

고인성 섬유보강 콘크리트의 균열제어 성능시험평가

Evaluation of Crack Control
Performance of High Ductile Fiber
Reinforced Concrete

2017.02

연구개발서비스업/기술전문기업
주식회사 한양이엔씨

근대건축 연구회 발간 제10호 2017 02

 사문건설(주)
(주) 위너스BDG

 (주)한양이엔씨

제 출 문

서문건설주식회사 대표이사 귀하

본 보고서를 “고인성 섬유보강 콘크리트의 균열제어 성능시험평가” 계약의 최종
보고서로 제출합니다.

2017년 02월 28일

수행기관명 : 주식회사 한양이앤씨 대표이사 류 화 성



■ 참여연구진 (주관연구기관: 한양이엔씨)

류 화 성	총 관	공학박사
김 득 모	실험수행	공학박사
신 상 현	실험수행	공학박사
심 소 진	실험수행	이공학사

■ 참여연구진 (서문건설)

유 일 환	서문건설	대표이사
조 지 민	서문건설	기술이사
송 인 철	Apaplan Korea	기술이사

■ 참여연구진 (위너스BDG)

이 석	대표이사	건축구조기술사
이 영 직	전무이사	공학박사

■ 자문 위원

박 원 준	강원대학교 교수	공학박사
임 명 관	송원대학교 교수	공학박사
배 기 선	한양대학교 연구교수	공학박사
최 진 영	한양대학교 연구원	공학박사
양 현 민	한양대학교 연구원	박사수료

목 차

제1장 성능시험평가의 개요	3
제1절 과업배경	3
제2절 과업 목적 및 내용	5
제2장 이론적 고찰	9
제1절 콘크리트 수축 및 균열	9
제2절 콘크리트 균열 방지용 섬유	22
제3장 성능시험계획 및 방법	47
제1절 보강섬유 인장강도/탄성계수	47
제2절 배합설계	50
제3절 슬럼프/공기량	54
제4절 압축강도	55
제5절 쪼갬인장강도	55
제6절 휨강도/등가휨강도/휨인성계수	56
제7절 경사전단접착강도	57
제8절 길이변화율	57
제9절 건조수축	58
제4장 균열제어 성능시험평가 및 결과 분석	63
제1절 보강섬유 인장강도/탄성계수	63
제2절 슬럼프/공기량	64
제3절 압축강도/탄성계수	65
제4절 쪼갬인장강도	69
제5절 휨강도/등가휨강도/휨인성계수	73
제7절 경사전단접착강도	79
제8절 길이변화율	80
제9절 건조수축	81

제5장 결론	85
제1절 결론	85
참고문헌	88
부록[공인시험성적서]	90

표 목 차

표 1-1 고인성 보강섬유 콘크리트의 목표 성능 및 시험항목	5
표 1-2 시험항목	6
표 1-3 시험항목	6
표 2-1 등급에 따른 EFNARC 패널의 에너지 흡수능력 기증	37
표 2-2 잔류강도 등급 규정	41
표 2-3 하중재하속도와 경계조건의 비교	44
표 2-4 시편 규격 비교	44
표 3-1 최적배합 실험계획	50
표 3-2 1종 보통포틀랜드 시멘트의 물리적 성질	51
표 3-3 골재의 물리적 성질	51
표 3-4 혼화재료의 물리적 성질	51
표 3-5 콘크리트 배합표	51
표 3-6 섬유성질	52
표 4-1 포타섬유의 인장강도 및 탄성계수	63
표 4-2 슬럼프 및 공기량 실험결과	64
표 4-3 40MPa급 콘크리트의 압축강도 실험결과	66
표 4-4 30MPa급 콘크리트의 압축강도 실험결과	66
표 4-5 콘크리트의 탄성계수	66
표 4-6 40MPa급 콘크리트의 쪼갬인장강도 실험결과	69
표 4-7 30MPa급 콘크리트의 쪼갬인장강도 실험결과	70
표 4-8 40MPa급 콘크리트의 휨강도 실험결과	73
표 4-9 30MPa급 콘크리트의 휨강도 실험결과	74
표 4-10 콘크리트의 등가휨강도와 휨인성 실험결과	76
표 4-11 30MPa급 콘크리트의 경사전단접착강도 실험결과	79
표 4-12 30MPa급 콘크리트의 길이변화율 실험결과	80
표 4-13 30MPa급 콘크리트의 최종 수축량	81

그림 목 차

그림 1-1 보강섬유 혼입에 의한 균열저감 특성	4
그림 1-2 우리나라 섬유보강콘크리트 산업 성장단계	4
그림 1-3 연구 흐름도	7
그림 2-1 링실험의 응력분포 개념도	11
그림 2-2 건조수축 균열발생의 메커니즘	13
그림 2-3 소성수축균열의 발생 기구 및 소성수축균열 양상	16
그림 2-4 공기온도, 상대습도, 콘크리트 온도, 풍속과 수분증발속도의 관계	17
그림 2-5 수화수축과 자기수축의 관계	19
그림 2-6 침하균열 및 발생 모식도 (거푸집)	20
그림 2-7 침하균열발생 모식도 (철근, 굵은골재)	20
그림 2-8 CL섬유의 화학 구조식	23
그림 2-9 매트릭스 내의 Cell섬유	24
그림 2-10 Cell섬유	24
그림 2-11 Cell섬유의 SEM 사진	24
그림 2-12 PP섬유의 화학식	26
그림 2-13 PP섬유	26
그림 2-14 PP섬유의 분산	26
그림 2-15 PP섬유의 SEM 사진	27
그림 2-16 PVA섬유의 화학 구조식	28
그림 2-17 PVA섬유	28
그림 2-18 콘크리트 내부의 PVA섬유	29
그림 2-19 NY섬유의 화학 구조식	30
그림 2-20 NY섬유	31
그림 2-21 NY섬유의 SEM 사진	31
그림 2-22 NY섬유의 End-Anchor 구조	31
그림 2-23 PET 분자 구조	33
그림 2-24 현미경으로 관찰한 PET 원사의 단면모양	34
그림 2-25 EFNARC 패널 실험방법	36
그림 2-26 원형패널을 이용한 인성 평가실험	38
그림 2-27 Johnston(II)의 휨인성지수 결정방법	39

그림 2-28 휨인성지수 산출 개념도(ASTM, ACI)	40
그림 2-29 완전탄소성 거동 재료의 하중-변위곡선	41
그림 2-30 EFNARC에서 규정하는 잔류강도 등급	42
그림 2-31 JSCE에서 규정하는 등가휨강도의 개념도	43
그림 3-1. 시험편의 형상	48
그림 3-2 하중-변형도 곡선	48
그림 3-3 Forta Fiber	49
그림 3-4 인장강도 시험	49
그림 3-5 Steel Fiber의 형상	52
그림 3-6 Forta Fiber의 형상	52
그림 3-7 콘크리트의 혼합과정	53
그림 3-8 콘크리트 혼합 믹서(a)	53
그림 3-9 콘크리트 혼합 믹서(b)	53
그림 3-10 115mm 슬럼프 측정광경	54
그림 3-11 120mm 슬럼프 측정광경	54
그림 3-12 500mm 도달시간 측정	54
그림 3-13 슬럼프 플로우 측정	54
그림 3-14 압축강도 시험	55
그림 3-15 압축강도 시험	55
그림 3-16 휨강도 시험	56
그림 3-17 휨인성계수 측정	56
그림 3-18 경사전단접착강도 시험	57
그림 3-19 길이변화율	58
그림 3-20 콘크리트 혼합	59
그림 3-21 슬럼프 측정(a)	59
그림 3-32 공기량 측정	59
그림 3-33 건조수축시험 몰드	59
그림 3-34 매립게이지 거치	59
그림 3-35 건조수축 시험 전경	59
그림 4-1 포타 섬유의 Stress-Strain 곡선	64
그림 4-2 슬럼프, 공기량 측정 시험결과 그래프	65
그림 4-3 압축강도 실험결과	67
그림 4-4 하중-변위 실험결과	67
그림 4-5 압축강도 시험체 전경	68

그림 4-6 콘크리트의 쪼갬인장강도	70
그림 4-7 콘크리트의 쪼갬 인장 강도 측정 전후 전경	71,72
그림 4-8 콘크리트의 휨강도	74
그림 4-9 40MPa급 콘크리트의 휨 하중-변위 곡선	75
그림 4-10 30MPa급 콘크리트의 휨 하중-변위 곡선	75
그림 4-11 등가휨강도	76
그림 4-12 휨인성계수	76
그림 4-13 콘크리트의 휨강도 측정 전후 전경	77,78
그림 4-14 30MPa급 콘크리트의 경사전단접착강도	79
그림 4-15 30MPa급 콘크리트의 길이변화율 시험 결과 그래프	80
그림 4-16 30MPa급 콘크리트의 건조 수축	81
그림 4-17 콘크리트의 건조수축 측정 전경	82

제1장

성능시험평가의 개요

제1절 과업배경

제2절 과업 목적 및 범위

제1장 성능시험평가의 개요

제1절 과업 배경

1. 과업 배경

건설재료로써 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트는 경제성, 시공성, 안정성 등이 상대적으로 매우 우수한 건축/건설 구조물의 주재료로서 100여년 이상 전 세계적으로 사용되어오고 있으며, 시멘트, 잔골재 및 굵은 골재를 물과 혼합하여 수화반응을 거쳐 경화하게 되는 복합재료로써, 콘크리트는 외부의 진동 및 하중에 의한 균열 뿐 만 아니라, 자기수축, 건조수축 및 소성수축으로 인한 균열과 수화열에 의한 온도균열이 발생할 수 있다. 이와 같이 콘크리트에 발생하는 미세한 균열은 콘크리트의 수밀성을 감소시키고, 유해물질의 침투에 의한 내구성능 저하는 물론, 구조적 성능저하를 가속화시키게 된다.

한편, 이러한 콘크리트가 가지고 있는 가장 큰 결점으로는 여러 항목 중 균열발생이 용이한 것을 들 수 있는데, 콘크리트에서 균열의 발생은 여러 종류 및 원인으로 분석되고 있지만, 실무시공 측면에서는 소성수축 균열이 가장 많이 문제시 되는 것이라고 할 수 있다. 소성수축 균열은 콘크리트를 타설한 후 건조한 외기에 노출될 경우 급작스런 표면의 수분증발로 말미암아 콘크리트 외부에 수축현상이 일어나는 것을 말하는데, 이러한 수축 현상은 건조되지 않은 내부 콘크리트의 구속으로 표면에 인장응력이 발생하게 되고, 콘크리트의 초기 인장강도를 초과하게 될 경우 균열발생과 함께, 콘크리트의 내구성을 저하시키는 등 하자의 요인으로 작용하게 된다. 소성수축에 의한 균열을 저감시키는 방법으로는 수분증발을 억제시키는 방법, 수축력을 완화시키는 방법 이외에도, 섬유를 첨가시켜 응력 분산 및 대응하는 방법이 있다. 이중 특히, 섬유를 첨가시키는 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete : 이하 FRC)는 최근 많이 이용되고 있는 추세이다. 그러나 이러한 섬유보강콘크리트는 섬유 뭉침 현상으로 인해 분산력의 감소와 작업성의 저하로 인한 슬럼프 감소, 마감시 헤어의 노출 등 여러 가지 해결 해야 할 문제점이 남아 있어 지속적인 연구와 개발이 절실히 필요한 실정으로 이에 대한 대비책과 유지보수비용의 절감방안이 요구되고 있다.

이러한 균열 방지 대책으로는 초기 재령에서 수분 손실을 최대한 억제 할 수 있는 방법, 수축력 완화를 위한 와이어 메쉬(Wire mesh)를 사용하는 방법, 보강섬유의 혼입에 의하여 응력을 분산시키는 방법이 있다. 이러한 방법 중 수분 손실을 억제 시키는 방법과

와이어 메쉬를 사용하는 방법은 현장조건에 따라 시공성, 작업성, 경제성의 문제로 적용이 난해하고 효과적이지 못하다. 따라서 콘크리트 내 섬유를 혼입함으로써 응력을 분산시키는 방법인 섬유보강 콘크리트의 사용이 주목받고 있다.

섬유보강 콘크리트에 사용되는 대표적인 섬유 보강재의 종류로는 폴리프로필렌, 폴리에틸렌, 강, 나일론 등이 있고, 현재 수많은 연구가 진행이 되었다. 그러나 이들에 대한 성능 비교 검토 자료가 부족하여 현장 적용에 다소 어려움이 있고, 분산력의 문제점과 시멘트 페이스트와의 접착력이 부족하여 강도의 감소를 초래하며, 마감시 헤어(Hair)의 노출 등으로 인한 표면마감 곤란, 슬럼프 감소로 인한 워커빌리티 저하 등의 해결해야 할 문제점이 남아있는 실정이다.

따라서 본 성능평가에서는 콘크리트의 소성수축으로 인해 발생하는 균열을 저감할 목적으로 비교적 탄성계수가 크고, 시멘트 페이스트와의 높은 부착력을 가지며, 균열 저감에 아주 효과적인 고인성 보강섬유인 Forta Fiber를 대상으로 콘크리트에 섬유를 혼입하여 균열 저감에 미치는 영향과 초평탄 바닥 콘크리트현장에서 사용하는 기존 강섬유를 포타섬유로 대체하여 자체 비중을 줄여 리바운드 감소에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 PC(Precast Concrete)구조물의 와이어메쉬를 포타섬유로 대체할 경우 균열을 억제하고 충분한 구조성능발휘를 위한 영향을 검토하였다.

이를 위하여 균열저감 성능을 동시에 확보하기 위하여 혼합섬유 종류와 혼입량 변화 및 혼입률 변화에 따른 제반 공학적 특성을 파악한 후 콘크리트의 효율적 균열제어 방안을 제시하고 고인성 보강섬유 콘크리트의 성능평가를 실시하여 산업에 활용하는데 그 과업 배경이 있다.

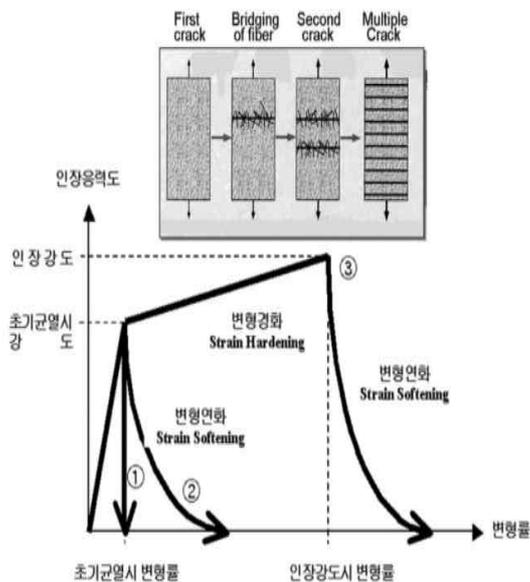


그림 1-1 보강섬유 혼입에 의한 균열저감특성

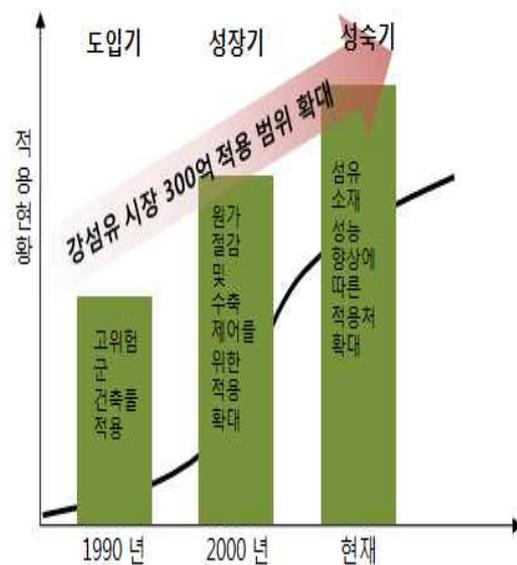


그림 1-2 우리나라 섬유보강콘크리트 산업 성장단계

제2절 과업목적 및 내용

1. 품질성능 시험평가의 최종목표

가. 최종목표

본 시험의 최종목표는 고인성 보강섬유 콘크리트 바닥의 수축과 컬링을 저감시킬 수 있는 합성섬유인 포타섬유 혼입량 변화에 따른 초평탄 바닥 노출콘크리트와 PC구조물의 제반 공학적 성능을 평가하는 것이다.

나. 세부내용

설계강도 30MPa급 콘크리트에 고인성 보강섬유인 Forta Fiber와 기존 강섬유를 대상으로 PLAIN 배합과 PLAIN 배합과 동일한 성능의 섬유 혼입 조건에 따른 콘크리트 기초적 특성에 대해 섬유 혼입량을 변화시켜 콘크리트 실험체를 제작하고 각 실험체의 슬럼프 값, 공기량, 압축강도, 정탄성계수, 경사전단강도, 쪼갬인장강도, 휨강도, 등가휨강도, 휨인성계수, 길이변화율, 건조수축 굴절 등의 다양한 변수에 따른 실험을 수행하였다. 또한, Forta Fiber의 인장강도 및 인장탄성계수 측정을 실시하였고, 콘크리트 설계강도 40MPa에 대하여 PLAIN 배합과 Forta Fiber 혼입 Type에 따른 분석을 포함하여 평가를 수행하였다. 과업의 세부목표를 정리하면 다음과 같다.

- Forta Fiber의 역학평가
 - 가) Forta Fiber의 인장강도 시험
 - 나) Forta Fiber의 탄성계수 시험
- 고인성 보강섬유 혼입 Type에 따른 콘크리트 배합의 종류
 - 가) 설계강도 30MPa급 PLAIN 콘크리트
 - 나) Forta Fiber의 혼입(2.5kg/m³, 3.5kg/m³, 4.5kg/m³)
 - 다) Steel fiber의 혼입(25kg/m³)

표 1-1 에서는 목표 성능을 만족하는 슬럼프와 공기량 성능을 나타내고 있다.

표 1-1 고인성 보강섬유 콘크리트의 목표 성능 및 시험항목

설계강도(MPa)	고인성 보강섬유 콘크리트	
	슬럼프(mm)	공기량(%)
30	100~120이상	2% 이하

○ 설계강도 30 MPa급 콘크리트 배합

① 시험평가 항목

표 1-2 시험항목

시험 항목	배합 종류* (섬유혼입 종류)	설계강도 (MPa)	재령(일)
슬럼프, 공기량	-Plain 배합, -Forta Fiber의 혼입 (2.5kg/m ³ , 3.5kg/m ³ , 4.5kg/m ³)	30	-
압축강도			3일, 7일, 28일
탄성계수			28일
휨강도			3일, 7일, 28일
등가휨강도, 휨인성계수			3일, 7일, 28일
쪼갠인장강도			3일, 7일, 28일
경사전단접착강도			28일
길이변화율			28일
장기균열저항성평가 (건조수축)			50일

* Plain 배합, Forta Fiber의 혼입(2.5kg/m³, 3.5kg/m³, 4.5kg/m³)

○ 설계강도 40MPa급 콘크리트 배합

① 시험평가 항목

표 1-3 시험항목

시험 항목	배합 종류* (섬유혼입 종류)	설계강도 (MPa)	재령(일)
슬럼프, 공기량	-Plain 배합, -Steel fiber 의 혼입 (25kg/m ³)	40	-
압축강도			3일, 7일, 28일
탄성계수			28일
휨강도			3일, 7일, 28일
등가휨강도, 휨인성계수			3일, 7일, 28일
쪼갠인장강도			3일, 7일, 28일

* Steel fiber 의 혼입(25kg/m³)

2. 성능평가범위 및 방법

본 연구는 그림 1-3과 같은 순서로 진행하였고, 각 단계별 세부내용은 다음과 같다.

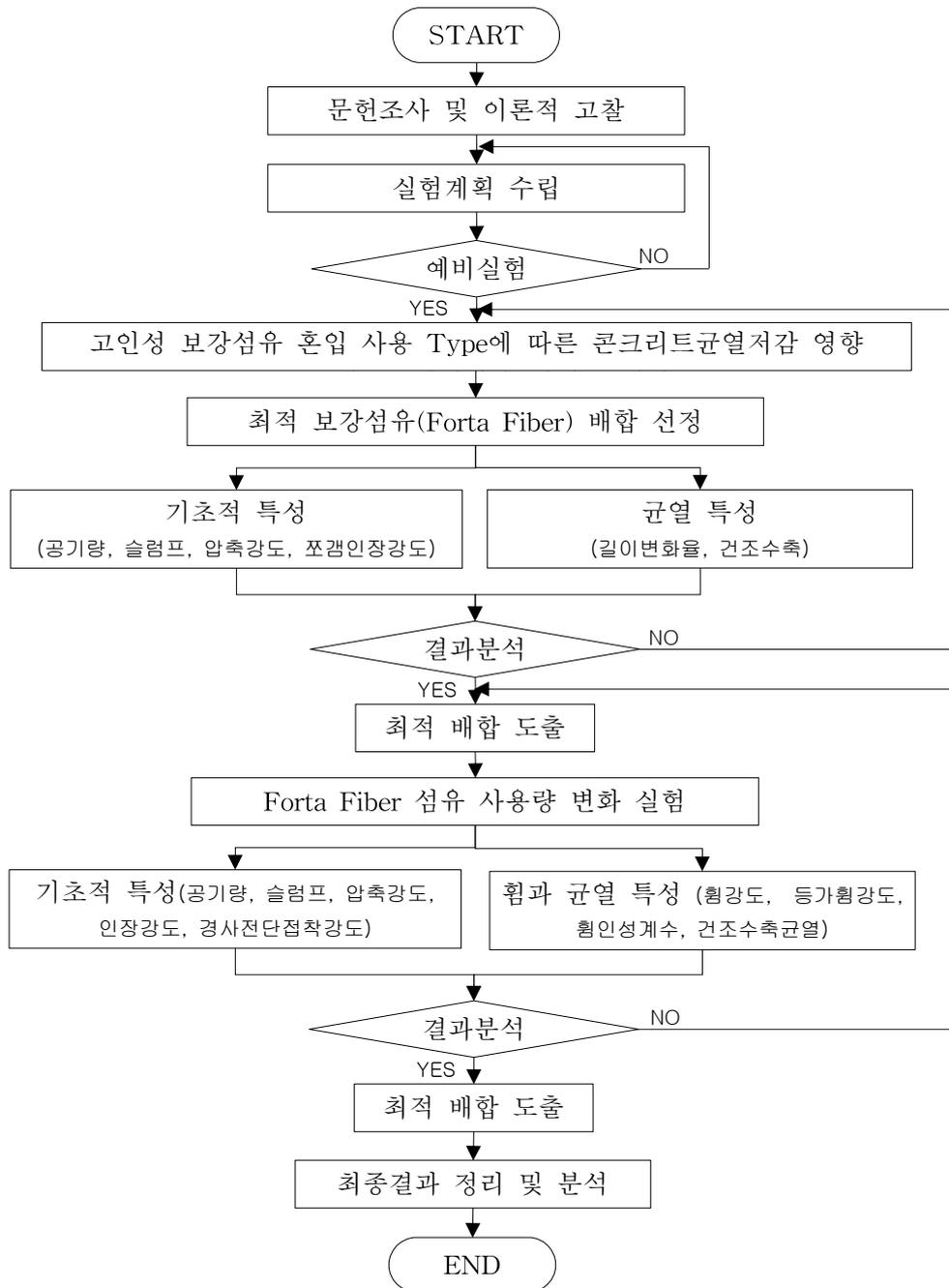


그림 1-3 연구 흐름도

제2장

이론적 고찰

제1절 콘크리트 수축 및 균열

제2절 콘크리트 균열 방지용 섬유

제2장 이론적 고찰

제1절 콘크리트 수축 및 균열

1. 건조수축균열

(1) 건조수축 연구동향

국내에서는 콘크리트의 건조수축균열을 평가하기 위한 실험 방법으로 일본의 “JIS A 1151”에서 정의하고 있는 아령형 구속건조수축몰드 실험을 KS 기준으로 규격화 하여 사용하고 있다. “KS F 2595 콘크리트의 건조 수축 균열 시험 방법”에서 규격화 하고 있는 아령형 시험 몰드에 의한 구속건조수축 균열 실험은 양 단부에 매립된 강관봉에 의해 콘크리트에 구속력이 작용하여 얇아지는 단면에서 관통 균열이 발생하는 것으로 균열의 발생 시점을 기록하는 실험이다.

재령 28일 압축강도 45 MPa이하의 콘크리트를 대상으로 하고 있으며 변형률 게이지를 몰드에 부착하여 얻어지는 변형율의 감소를 통해 균열발생 시점을 알 수 있다. 하지만 시험체 전체에 일정한 구속을 주지 못하며 적절한 구속의 조절 또한 불가능하다. 또한, 시험체에서 하나의 관통균열만 발생하기 때문에 균열의 정량적, 상대적 평가에 어려움이 있다.

국내에서는 구속된 상태에서 콘크리트의 건조수축균열을 측정하기 위해서 개량된 링형 건조수축 시험기를 사용한 연구가 수행되었다. 2008년 김규용 등은 ASTM과 AASHTO에서 규정하고 있는 링형 실험기준을 개량하여 매우 얇고 낮은 단위의 콘크리트 링을 지름으로부터 구역을 나누고 그 면적에서 균열을 정량적으로 평가하는 기술을 소개하고 있다.

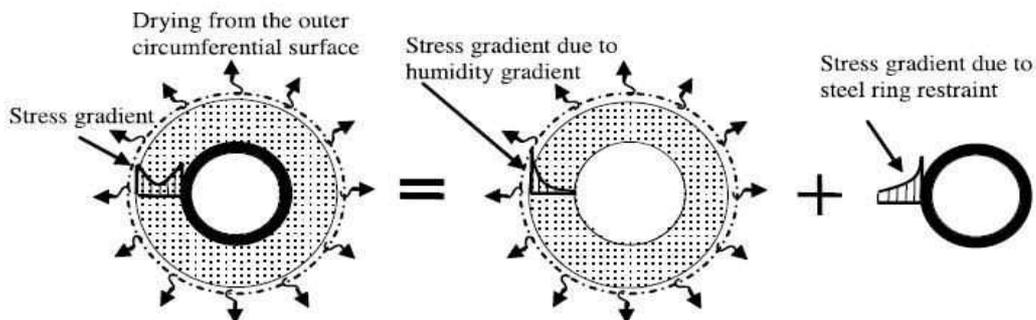


그림 2-1 링시험의 응력분포 개념도

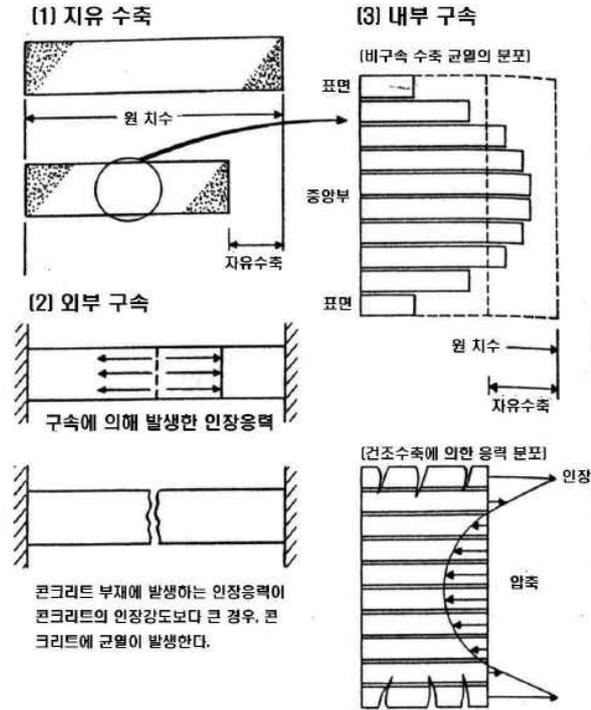


그림 2-2 건조수축 균열발생의 메커니즘

이 변형의 분포를 그림에서 보여주고 있지만, 부재는 실제 일체로 수축하기 때문에, 표면 부분의 요소는 인장력을, 또한 내부는 압축력을 받는 상태가 된다. 특히 콘크리트가 초기 재령에서 중요하다. 그 이유는 부재 내에서 건조정도의 차이가 일어나는 것은 수화진행에도 차이가 있게 됨으로서, 재령은 동일하여도 부재 내에서 차이가 나는 성질을 가지고 있는 콘크리트가 되기 때문이다.

건조수축균열의 형상은 바닥의 경우 건물의 긴 방향 인장력이 강하여 그림 2-2(a)와 같은 형상이 되고, 건물이 길면 구속력이 강해져서 균열은 현저하게 나타난다. 벽체의 경우는 아래층이 위층의 수축을 구속하므로 변위차이가 생겨 상단부를 중앙으로 끌어들이는 듯한 힘이 작용하므로 그림 2.3(b)와 같은 균열형상이 된다. 건조수축에 영향을 미치는 주요인자를 나타내면 다음과 같다.

- (가) 콘크리트 건조수축은 시멘트의 종류, 골재, 배합, 혼화재료, 양생조건 등에 따라 달라지는데, 이 중 시멘트의 영향으로서는 분말도의 증가가 수축의 증가와 비례하는 것은 아니지만 분말도가 높은 시멘트의 경우 수축이 증대하는 경향이 있다.
- (나) 골재는 탄성계수가 크고 흡수율이 적을수록 수축은 작아지고, 골재의 크기가 클수록 단위수량이 줄어들어 시멘트 페이스트의 수축량을 줄일 수 있다. 불량한 입도의 골재, 진흙이나 실트 등의 유해물이 혼입되면 건조수축을 증가시키는 요인이 된다.

(2) 건조수축균열의 발생기구

건조수축은 콘크리트의 배합, 양생조건, 환경, 부재의 크기 등에 의해 영향을 받는다. 콘크리트 수축은 배합시 통상 55~60 % 정도의 물-시멘트비에서 수화에 필요하지 않은 30~40 %의 물이 증발하여 콘크리트가 수축하며, 경화한 콘크리트가 건조하면 체적이 0.05 %까지 수축한다고 알려져 있다. 이와 같이 콘크리트가 건조 수축할 경우 방해하는 구속력이 작용할 때 균열이 발생하게 되며, 다른 하나는 콘크리트 표면과 내부의 수축량 차이 때문에 발생할 수도 있다.

타설초기에 발생하는 균열은 수화 전 시멘트에 흡착되었던 수분이 급속히 증발할 때 건조수축으로 인하여 균열이 생기고 경화한 콘크리트는 1~3개월 정도에서부터 발생하며, 조건에 따라서는 장기간에 걸쳐 진행되고, 발생시기는 계절에 따라 서로 다르다. 콘크리트 부재에서 생기는 건조수축 균열의 발생 메커니즘을 모식적으로 보여주는 것이 그림 2-2이다. 발생 메커니즘을 간단하게 다음과 같이 설명을 하였다. 그림 2-2(1)는 자유수축의 경우로서, 건조조건에서 수축되는 양상을 보여주고 있다. 그림 2-2(2)는 외부에서 구속을 받는 경우로서 실제 구조물에 있어서 벽과 슬래브를 고려하는 경우는 기둥, 천장에 의한 구속, 또한 부재 내에 파묻힌 철근에 의한 것 등이 있다. 이와 같은 외부구속을 받을 때, 콘크리트 부재는 자유롭게 수축될 수는 없다. 그림에 표시한 예는 완전구속의 경우이지만, 콘크리트 부재는 자유 수축량으로 당기는 경우에는 부재 내에는 균일한 인장응력 분포가 일어나, 이 응력이 부재가 갖고 있는 인장강도를 넘게 되면, 균열이 발생하게 된다. 한편 그림 2-2(3)에 표시한 구속은 콘크리트 부재 자체의 내부에서 일어나는 구속을 보여주는 것으로서, 내부구속이라고 부르고 있다. 이것은 콘크리트 부재내의 건조 정도의 차이에 의해서 일어나는 것이다. 그림과 같이 건조가 급하게, 또는 외부에서는 건조가 발생되지 않아, 각각의 건조정도에 상당하는 수축량이 차이가 나게 된다. 이와 같은 변형은 부재내의 각 점에서 고유의 변형이라는 의미로서 선비구속수축 변형이라고 부르고 있다.

한편 그림 2-2(3)에 표시한 구속은 콘크리트 부재 자체의 내부에서 일어나는 구속을 보여주는 것으로서, 내부구속이라고 부르고 있다. 이것은 콘크리트 부재내의 건조 정도의 차이에 의해서 일어나는 것이다. 그림과 같이 건조가 급하게, 또는 외부에서는 건조가 발생되지 않아, 각각의 건조정도에 상당하는 수축량이 차이가 나게 된다. 이와 같은 변형은 부재내의 각 점에서 고유의 변형이라는 의미로서 선비구속수축 변형이라고 부르고 있다.

(다) 혼화제(admixture)는 건조수축균열을 유발하는 좋지 않은 영향을 끼치는 경우가 있다. 감수제 및 고성능감수제의 사용은 단위수량을 감소시켜 건조수축을 일부 감소시켜 주지만 경화촉진제 등의 사용은 초기 건조상태에서 건조수축을 증가시키는 결과를 가져올 수 있다.

(라) 콘크리트 배합수는 건조수축에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 배합수의 양이 증가하면 할수록 건조수축량이 증가한다. 또한 건조수축은 콘크리트 내 물의 조건과 성질에 따라 변화하고, 물의 표면장력이 작을수록 건조수축도 작아진다. 건조수축시험은 시간의 경과에 따른 건조수축량을 측정하는 ASTM 157의 시험방법을 주로 사용하고 있다.

(3) 건조수축균열의 특징

건조수축에 의한 균열은 슬래브나 벽체와 같이 두께가 얇고 면적이 넓은 부재에서는 부재중양과 표면이 거의 같은 비율로 건조되어 좁은 폭의 미세균열 등이 발생하고, 보나 기둥 등 두께가 두꺼운 부재에서는 부재내부와 표면간의 상이한 수축률 때문에 인장응력이 발생하여 균열이 생긴다. 벽체의 경우는 상하 압축력이 작용하거나 이어붙기 때문에 바닥의 경우는 건물이 길수록 인장력이 강하여 구속력이 강해져서 균열이 생기며, 외벽의 경우에는 건조수축량이 벽두께나 마감의 유무에 따라 다르긴 하나 일반적으로 아래층이 위층의 수축을 구속하므로 변위차이가 생겨 발생한다. 이와 같이 건조수축에 의한 균열은 실제구조물에서 발생확률이 가장 많은 균열로서 타설 후 1개월 이내에 전체 수축량의 35~50%, 1년에 60~80% 정도 진행되고, 부재가 작은 경우는 5년 정도, 큰 부재는 10년 이상 계속 진행되는 것으로 알려져 있다. 건조수축에 의해 발생한 균열은 일정한 방향 및 일정한 간격으로 발생하고, 균열의 폭은 0.05~0.5 mm 정도가 대부분이지만 1~3 mm에 달하는 것도 있으며, 표면의 수축률이 커지면 균열은 점차 부재 내부로 깊숙이 침투하여 관통하는 경우도 있다.

(4) 저감대책

건조수축균열을 저감하기 위한 대책으로는 다음과 같은 방법들이 있다.

(가) 시멘트의 품질 및 종류가 콘크리트 건조수축도와와의 관계에 대해서 아직까지 명확하게 밝혀진 바는 없으나 보통포틀랜드시멘트, 알루미나시멘트, 조강포틀랜드시멘트 및 초조강포틀랜드시멘트는 비교적 유사한 건조수축을 나타내며, 실리카시멘트가 건조수축이 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 플라이애시시멘트는 건조수축을 줄일 수 있고, 알루미나 3칼슘의 양이 적은 중용열시멘트와 내황산염포틀랜드시멘트는

비교적 건조수축량이 작은 반면 고로슬래그시멘트는 건조수축이 크지만 습윤양생 기간을 길게하면 건조수축이 작아진다.

- (나) 골재는 흡수율이 작고 탄성계수가 크며, 좋은 입형과 크기가 큰 것을 사용하며, 콘크리트가 필요로 하는 비중과 강도 및 내구성, 내화성이 있어야 하며, 유해물질을 함유해서는 안된다. 특히 잔골재가 소량의 유기물을 함유하면 콘크리트 압축강도가 작아지고 콘크리트가 굳지 않는 경우도 있다. 진술한 바와 같이 건조수축에 효과적인 골재로는 석영, 장식, 석회석, 화강암 등이 있으며, 건조수축률이 높은 사암, 점판암, 이판암, 현무암, 경량골재와 다공질의 골재, 입자상태가 나쁜 골재, 미분량이 많은 골재는 좋지 않다.
- (다) 단위수량 감소는 건조수축을 적게하고 콘크리트 슬럼프가 작을수록 균열저감에 효과가 있으므로 배합 시 AE감수제나 고성능AE감수제를 사용하여 건조수축위험성을 줄인다. 또 물-시멘트비가 클수록 건조수축이 증대하여 자기수축이 감소하므로 굵은골재를 최대로 하여 배합수를 줄이는 방법이 있다.
- (라) 혼화재료로 플라이애시는 건조수축 변형을 감소시키는 효과가 있으며, 팽창시멘트는 건조수축균열을 최소화하고 저감하는데 효과적이다. 그러나 혼화재 중에서도 백토나 규조토 등이 함유되어 있을 경우에는 단위수량을 증가시키기 때문에 건조수축이 커지는 등 콘크리트 특성에 적지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 사용실적 등을 충분히 검토한 후에 사용하는 것이 바람직하다.
- (마) 콘크리트 혼합수로 공장의 슬러지수는 고형분이 많을수록 건조수축이 증가하는 경향이 있으므로 피하는 것이 좋으며, 수돗물과 비교할 때 건조수축률이 20~30 % 큰 하수처리수, 하천수, 해수등도 좋지 않다.
- (바) 콘크리트 진동다짐은 W/C을 적게할 수 있으므로 건조수축률을 감소시킬 수 있다. 또한 콘크리트 치기 후 습윤양생은 건조수축에 큰 영향을 미친다. 특히 장기간 습윤양생은 건조수축량이 크게 감소한 것으로 나타났다.
- (사) 콘크리트 속에 적정량의 철근을 배근하면 건조수축을 억제하고 균열을 감소시킨다. 철근 보강은 수축변형이 철근을 따라 부착응력으로 전달되기 때문에 미세균열로 유도하는데 효과적이며, 철근비는 0.6 % 이상이 필요하다. 특히 용접철망은 건조수축량 저감과 균열제어에 효과가 있다.

2.1.2 소성수축균열

2.1.2 소성수축균열

(1) 소성수축균열의 정의

콘크리트의 균열은 다양한 원인에 의해 발생을 하게 됩니다. 그 중 우리나라의 사계절 특성상 건조, 고온, 저온 등의 환경적 변화로 인해 발생하는 대표적으로 주의해야만 하는 균열이 있습니다. 따라서 환경적 요인에 의한 균열을 방지하기 위하여 계절별 영향 요인들을 고려하여 콘크리트의 제조방법, 재료관리, 양생방법 등을 고려해야 합니다.

따라서 이번호에서는 봄철에 나타날 수 있는 균열 중 대표적인 소성수축 균열에 대해서 알아보고, 그에 맞는 제조업체 및 시공업체별 필요 사항에 대해서 조사해보고자 합니다.

(2) 소성수축균열의 정의 및 발생기구

소성수축균열은 일반적으로 봄철에 발생하는 경우가 많으며, 이러한 보철과 같은 급격히 건조한 조건인 경우(빠른 바람, 낮은 상대습도, 강한 햇볕의 일사에 의한 고온 등)에는 블리딩수와 증발수가 균형을 이루지 못하고, 특히 증발수량이 크므로 외부가 급속히 마르기 시작하여 표면으로부터 수축작용이 발생하기 시작합니다. 그런데, 이와 같은 시점은 콘크리트를 부어넣고 1시간~6시간 사이로서 시멘트는 이제 유동상태로부터 소성 및 응결이 진행되는 상태이기 때문에(아직 경화가 진행되지 않음) 거의 강도가 발휘되지 않았음으로써 수축작용에 견디지 못하고 그림과 같이 표면에서부터 균열이 발생하는데 이와 같은 균열을 소성수축 균열이라 합니다.

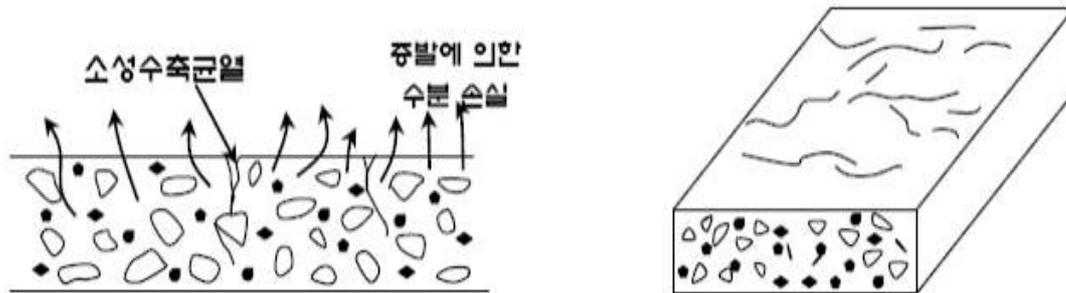


그림 2-3 소성수축균열의 발생 기구 및 소성수축균열 양상

(4) 소성수축균열의 원인

급격히 건조한 조건(빠른 바람, 낮은 상대습도, 강한 햇볕에 의한 고온 등)

- 과도한 마무리(판재로 일정한 방향으로 지나치게 다지고 밀어서 마무리하게 되면 미립자가 한쪽으로 모이게 되어 그 모인 부분에 집중적으로 균열이 발생)
- 미립자, 점토 덩어리가 많은 골재 사용
- 잔골재율이 크거나, 고품분율이 높은 회수수 사용
- 불안정한 시멘트 사용(이상응결 등)

(5) 소성수축균열의 양상

- 서로 평행인 0.3~1.0 m 간격으로 풍향에 대하여 대략 직각 방향으로 발생
- 가장자리 쪽에서 많이 발생(바람에 의한 건조영향)

(6) 균열의 폭

초기에는 0.1~0.3 mm 정도의 작은 균열로 깊이 2.5 cm미만의 표면에만 존재(외관상 좋지 않지만 콘크리트의 강도나 내구성을 해치는 경우는 드뭄)

초기에 소성수축 균열이 발생한 후에도 양생하지 않고 방치하게 되 균열 폭은 점점 커지고, 깊이도 깊어져 부재를 관통하며 인근 균열과도 연결되어 심각한 상태로까지 진전할 수도 있음.

(7) 소성수축 균열 발생 위험성 판정

현장의 기상 데이터로 그날의 기온 최고값, 상대 습도 최저값, 최대 풍속, 콘크리트 부어넣기 온도 등을 사용하여 그림과 같이 수분 증발량을 구하여 발생 위험성을 판정 할 수 있으며, 증발 비율이 1.0~1.5 l/m²/h를 초과 할 때는 소성수축 균열 가능성이 크다고 할 수 있습니다.

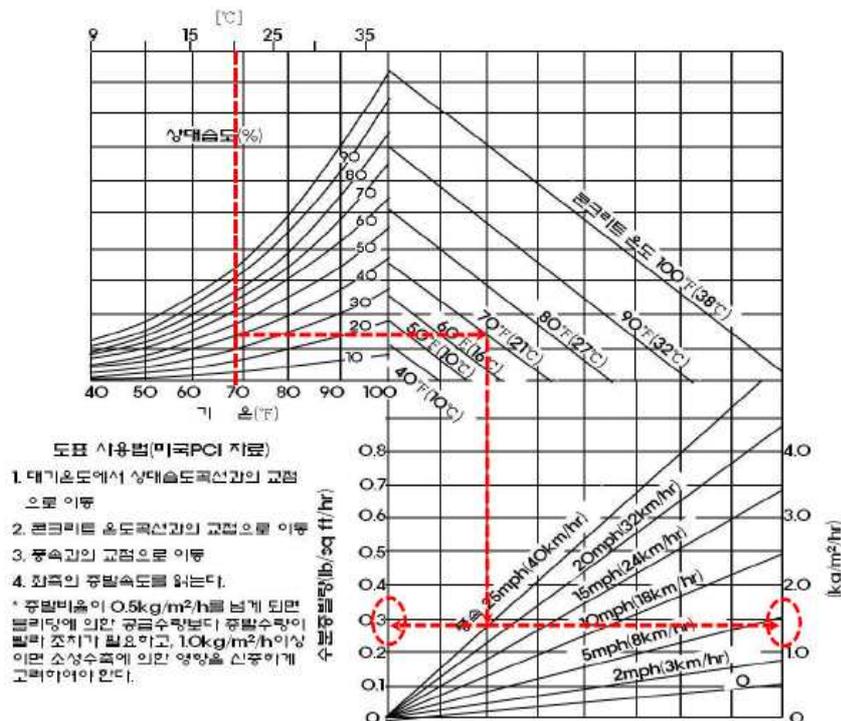


그림 2-4 공기온도, 상대습도, 콘크리트 온도, 풍속과 수분증발속도의 관계

예시: 외기온도(20 ℃), 상대습도(40 %), 콘크리트 온도(21 ℃), 풍속(25 mph) 일 경우 도표 사용법 1, 2, 3, 4에 의해 실시한 결과, 증발비율이 1.0~1.5 kg/m²/h사이로 소성수축 균열의 가능성이 높으므로 예방 대책이 필요하게 됩니다.

(8) 소성수축 균열 저감 방법

소성수축 균열은 콘크리트가 아직 다소 건조한 상태에서 콘크리트 표면에서 수분의 급격한 증발 속도가 블리딩 물의 상승 속도를 상회하는 경우 표면 부근에 생기는 콘크리트의 균어짐에 기인하여 발생하는 균열로 초기 양생 방법에 의해 발생 여부가 좌우될 수 있으므로 그 저감 방법에 대해서 제시해 보도록 하겠습니다.

(9) 시공상 방법

- 건조하기 쉬운 날씨에는 바람막이나 그물막을 이용하여 수분 증발을 방지한다.
- 표면 마무리 작업의 대기 시간에 표면 덮개를 이용하여 증발을 방지한다.
- 타설과 마무리 작업 후 가능한 빨리 양생을 실시한다.
(피막 양생제 or 버블시트, 젖은 부직포 등으로 덮는다.)
- 타설시기의 조절을 실시한다. (가능하면 오후 늦게 하는 것이 좋음)
- 추운 날씨에 콘크리트 온도를 너무 높게 하지 않는다.
- 지나친 표면 마무리는 회피
- 지속적으로 콘크리트 표면을 잘 관찰하고 균열 발생시 바로 탬핑 등의 조치를 취한다.
- 가끔 소성수축을 방지하기 위해 콘크리트에 가수를 하는 경우 콘크리트의 성능저하가 더 크기 때문에 잘못된 방법의 양생은 피하는 것이 좋다.

(10) 재료/배합적 방법

- (가) 콘크리트 타설 시 섬유 혼입을 고려해 본다.
- (나) 안전성이 큰 시멘트 사용, 단위수량 저감
- (다) 양질의 골재 사용
- (라) 회수수의 슬러리 농도나 사용량 저감

2.1.3 자기수축균열

시멘트 수화에 기인한 콘크리트의 수축은 이미 오래전부터 알려져 있는데, Davis에 의해서 최초로 Autogenous shrinkage로 정의되고 있다.

즉, 자기수축이란 시멘트계 재료에 있어, 시멘트의 수화에 의해 응결시점(초결) 이후에 거시적으로 생기는 체적감소를 말한다. 자기수축에는 물질의 침입과 발산, 그리고 온도변

화, 외력 및 외부구속에 기인된 체적변화 등을 포함하지 않는 것으로서, 검토대상으로 주로 고려하는 범위는 고유동 콘크리트, 고강도 콘크리트, 매스콘크리트 및 고성능 콘크리트 등이다. 이 경우에, 기준 길이의 측정은 응결에서 초결시점에 행하는 것으로, 자기수축은 원래, 삼차원적으로 생기는 현상이지만 자기수축변형은 그림 2-5와 같이 일차원의 변형으로 나타낸다.

콘크리트, 고강도 콘크리트, 매스콘크리트 및 고성능 콘크리트 등이다. 이 경우에, 기준 길이의 측정은 응결에서 초결시점에 행하는 것으로, 자기수축은 원래, 삼차원적으로 생기는 현상이지만 자기수축변형은 그림 2-5와 같이 일차원의 변형으로 나타낸다.

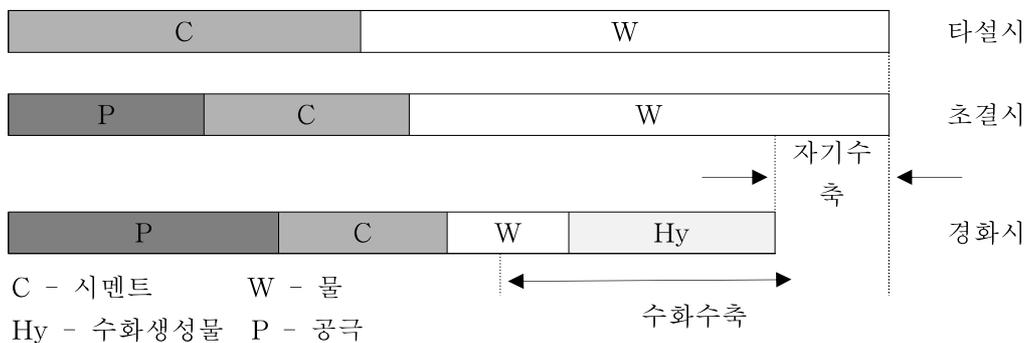


그림 2-5 수화수축과 자기수축의 관계

자기수축은 시멘트의 수화반응에 의해 내부에 새롭게 생성되는 공극에 외부 및 주변부에서 물의 보급이 없는 경우에 발생하는데, 물의 보급이 있는 경우라도 물의 침투속도가 공극형성에 따라가지 못하는 경우에, 물이 부족하고 공극내를 물로 충전할 수 없게 되어 공극내 습도의 저하가 발생한다. 이렇게, 이른바 자기건조의 발생에 따라 자기수축이 일어나게 되는데, 수중양생으로 질량이 증가하여도 자기수축은 발생한다. 이와 같이, 시멘트 경화체중에 새롭게 생성된 공극 내 상대습도의 저하에 의해 부압이 발생하고 수축이 일어나게 되는데, 이것을 자기수축이라 한다.

또한, 자기수축의 측정 시점을 초결이라고 정하는 것은 자기수축을 콘크리트의 균열요인으로써 검토하기 위해서는 유동을 동반하는 굳지 않은 콘크리트의 체적변화는 제외하는 것이 적절하다고 판단되기 때문이다.

자기수축에 영향을 미치는 요인으로 시멘트의 종류며 각종 혼화재료가 시멘트 경화체의 초기체적변화에 미치는 영향에 관하여 실험적 검토를 한 연구는 많다.

2.1.4 침하수축균열

콘크리트를 부어넣은 후 시멘트 및 골재의 침하와 동시에 블리딩이 발생하고, 침하는 콘크리트의 각 구성재료가 상호접촉하고 시멘트 페이스트가 어느 정도 응결되어 고착될

때까지 계속하여 발생한다. 또한, 콘크리트의 침하가 그림 2-7과 같이 철근 및 기타 매설물에 따라서 국부적으로 방해를 받으면 그 상부 면에 인장력 또는 전단력이 발생하고, 이러한 응력에 저항 가능한 강성(콘크리트의 인장강도)이 없으면 콘크리트의 상면에 균열이 발생하는데 이러한 균열을 침하균열이라고 한다.

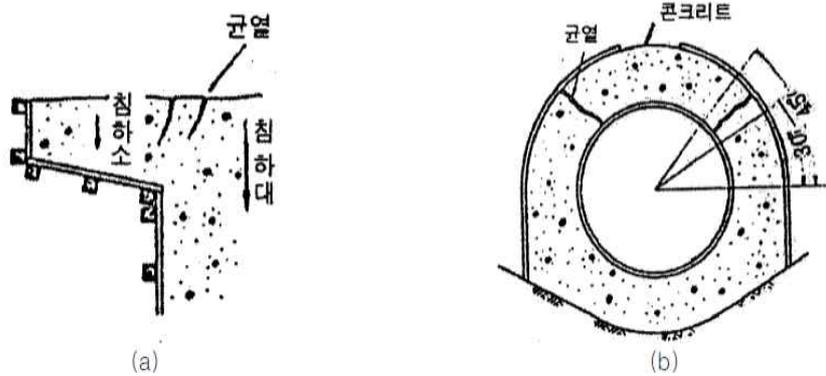


그림 2-6 침하균열 및 발생 모식도 (거푸집)

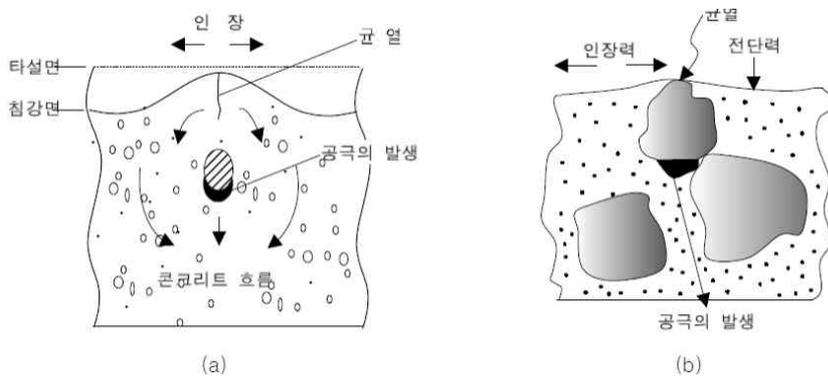


그림 2-7 침하균열발생 모식도 (철근, 굵은골재)

- (1) 침하균열의 발생시키는 주요원인을 정리하면 다음과 같다.
 - (가) 잔골재율(S/a)이 낮을수록 골재의 입자구성이 커지므로 침하속도가 빨라진다.
 - (나) 단위수량이 많을수록 슬럼프 치가 커지게 되고 묽은 콘크리트가 되므로 침하는 증가한다.
 - (다) 시멘트의 분말도가 낮고, 응결시간이 늦어질수록 침하는 커진다.
 - (라) 사용된 철근의 직경이 클수록 콘크리트의 침하에 방해되는 면적이 증가하여 침하균열의 가능성이 높아진다.
 - (마) 콘크리트의 1회 타설량이 많을수록 침하량이 증가한다.
 - (바) 설치된 거푸집의 마찰저항이 작거나, 흡수율이 높은 재질인 경우, 거푸집조립 불량으로 인한 틈새발생 시 콘크리트자체의 수량감소로 인하여 침하가 촉진된다.
 - (사) 콘크리트 타설 시 다짐이 충분하지 못하면 침하량은 증가한다.

침하균열은 보의 상단 철근의 상면이나 바닥판 상단 철근 상면의 종방향을 따라 발생하고, 균열의 폭은 1 mm 이상일수도 있으나 깊이는 대체적으로 작으며, 철근배근 근의 하단 및 골재의 하부에는 그림 1과 같이 공극이 발생하기도 한다. 일반적으로 콘크리트 구조물에서 침하에 장애가 되는 요소는 철근이고, 철근은 규칙적으로 배근되어지기 때문에 침하균열도 대개 규칙적으로 발생한다. 또한, 침하균열은 콘크리트를 대략 타설한 후 1~3시간이 경과 하였을 때 발생하고, 부재의 두께가 다르거나 콘크리트의 타설 높이가 큰 만큼 침하량이 크게 되며, 그 차이에 따라서 경계면상에 침하균열이 발생한다.

(2) 블리딩과 침하

블리딩은 고체입자의 침하에 의해 발생하고, 콘크리트 표면에서 물의 증발이 없는 경우에는 블리딩 수의 양은 침하수축량에 비례한다. 또한, 블리딩은 콘크리트를 부어넣은 후 시멘트, 골재의 침하와 함께 발생하고, 침하는 콘크리트의 각 구성재료가 상호 접촉하여 시멘트 페이스트가 어느 정도 응결됨으로써 침하가 방지되기까지 계속하여 일어난다. 따라서 블리딩이 많을수록 침하가 크게 발생한다.

(3) 침하균열의 방지대책

침하균열을 방지하기 위해서는 침하가 완료되는 시점까지 타설 간격을 조정하거나 재다짐을 하는 방안이 필요하고, 수직부재일 경우에는 가능한 1회 콘크리트 타설 높이를 낮추고 충분한 다짐을 실시해야한다.

(4) 침하균열을 방지하기 위한 대책은 다음과 같다.

(가) 작업성이 허용되는 범위 내에서 단위수량 및 슬럼프치를 작게 배합설계한다.

(나) 블리딩의 양이 적은 배합으로 설계한다.

(다) 가능한 한 경화속도가 빠르거나, 접착력 혹은 점도가 우수한 시멘트 및 혼화제를 선정한다.

(라) 타설 속도를 늦추고 1회 타설 높이를 낮게 시공한다.

(마) 철근의 피복두께는 충분히 하고 배근된 철근이 헝클어 지지 않도록 철근 배근시에는 충분히 결속시킨다.

(바) 표면부는 잘 다짐하고 보의 밑부분은 충분히 콘크리트가 침하될 수 있도록 시간적 여유를 주고 슬래브와 일체로 상부를 타설하는 등 시공방법에 주의해야 한다.

(사) 침하균열이 발생 하였는지는 수시로 검사하여 보기에 발견하도록 하고, 침하균열이 발생하였을 때에는 가재 등으로 두드리거나 흙손으로 눌러 균열을 제거한다. 재 두드림 마무리를 하는 시기는 대기온도 및 조건에 따라 다르나 일반적으로 여름철인 경우는 타설 후 60~90분 이내, 기타 계절인 경우는 90~180분 이내에 행하는 것이 좋다.

제2절 콘크리트 균열 방지용 섬유

1. 섬유의 종류

콘크리트는 건설재료 중 가장 많이 사용되고 있지만 압축에 유리하고 인장에 취약한 성질로 인하여 철근, 강재, 철골 등과 함께 주로 사용되고 있다.

콘크리트는 수화반응을 거쳐 경화하는 과정에서 발생하는 소성수축균열, 불충분한 다짐과 튼튼하지 못한 거푸집의 사용으로 인한 침하균열, 콘크리트 수축작용에 대한 외부구속으로 생기는 건조수축균열, 골재의 알칼리-실리카 반응으로 인한 반응균열, 동결융해에 취약한 골재 사용 시 골재의 결빙파괴로 인한 D-균열 그리고 외적 하중에 의한 균열 등이 발생한다.

외적 하중에 의해 발생하는 균열을 제외한 균열을 미세균열로 분류할 수 있으며, 미세균열은 콘크리트의 수밀성을 감소시키고 표면조직을 다공성화 시킴으로 재료표면이 탈락되고, 제빙 염 등의 침투가 용이하며, 우수 및 공기의 침투로 인한 결빙으로 추가적인 균열이 발생되어 결국에는 콘크리트와 철근의 부식을 가져옴으로서 콘크리트의 성능저하가 가속화 되는 원인이 된다.

합성섬유는 1970년대 초부터 콘크리트의 균열제어용으로 검토 되기 시작하여 1980년대 초부터 상품화되기 시작하였으며, 국내에는 1980년대 중반부터 소개 되어 콘크리트 마감표면의 균열제어를 목적으로 아파트의 미장용 모르타르에 섞어 사용하기 시작하였다. 합성섬유는 인장에 취약한 콘크리트에 혼합하여 사용함으로써 미세균열 감소 효과가 있는 것으로 보고되고 있으며, 강섬유를 사용하는 경우에는 충격저항성이 월등히 향상된다.¹⁹⁾

(1) Cellulose섬유

(가) Cellulose(이하, Cell)섬유의 특성

목재에서 특수 가공된 Cell섬유의 표면은 수산기(OH)로서 콘크리트 내에서 분산과 부착을 촉진시키며, 작은 유효직경을 가지고 있어, 시멘트복합체를 더욱 밀실하게 만들어 준다. 이러한 Cell섬유는 콘크리트·모르타르에 혼입시 원통형 펠렛으로 정밀제조 된다.

굳지 않은 콘크리트에서 섬유 혼입율이 0.06 %이상이 되면, 보통 및 고강도 콘크리트 모두 슬럼프 감소가 일어나며, 공기량은 증가하는 것으로 나타난다. 경화 콘크리트에서 압축강도의 경우 0.1 %까지는 보통 및 고강도 콘크리트 모두 압축강도에는 영향을 주지 않으나, 혼입율이 0.15 %이상 일 때는 압축강도에 영향을 미치는 결과이었다. 또한 휨강도의 경우에는 혼입율이 0.08 %까지는 휨강도가 증가하나 0.1 %이상이 되면 증가는 없는 것으로

로 보고되고 있다.

(나) Cell섬유의 장점

1) 균열저감

Cell섬유는 표면이 수산기로서(OH) 시멘트 매트릭스와의 뛰어난 부착능력을 가지고 있으며, 단위체적당 차지하는 섬유수가 많고, 시멘트 입자 크기(0.003~0.3 mm)와 비교하여 유효직경(0.015 mm)을 가지고 있어, 섬유의 가교(Bridging)작용을 통하여 시멘트 복합체의 역학적 성질을 개선시키는데 매우 효과적이며 미세 균열을 효과적으로 저감한다.

2) 내탄산화

일반 콘크리트에 비해 20 %정도의 탄산가스 침투속도를 감소시킨다.

3) 염소이온 침투저항성

셀룰로오스 섬유, 시멘트, 물과 반응하여 수화물을 생성할 때 구경재료를 결합시킬 뿐 아니라 미세균열의 발생을 억제하여 약 30 %의 염소이온 확산계수를 감소시킨다.

4) 화학저항성

Cell섬유를 혼입한 콘크리트는 상대동탄성계수의 감소가 비교적 적으며 약품에 대한 저항성도 우수하다.

5) 동결융해 저항성

축진동결융해 300사이클에서 축진시험전의 압축강도와 비교하여 약 46 %정도 감소되었으나, Cell섬유를 혼입한 경우는 12 %정도 감소한다.

6) 충격저항성

규정량의 Cell섬유를 혼입시 충격 파손에 대한 저항력은 50 %이상 증대된다.

(다) Cell섬유의 구조 및 형태

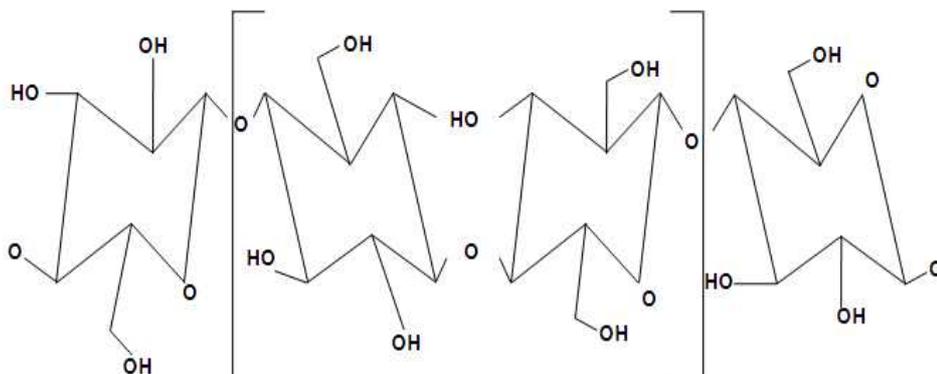
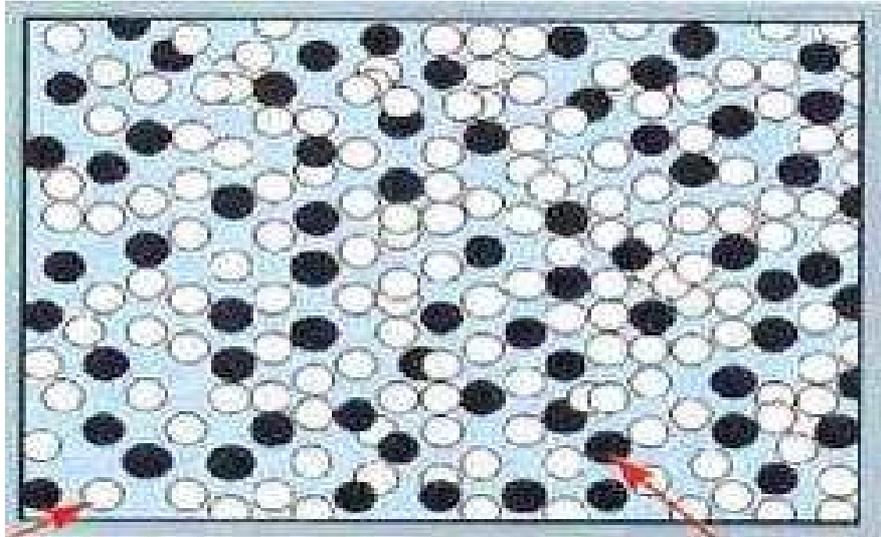


그림 2-8 CL섬유의 화학 구조식



시멘트 페이스트

셀룰로오스 섬유

그림 2-9 매트릭스 내의 Cell 섬유



그림 2-10 Cell 섬유

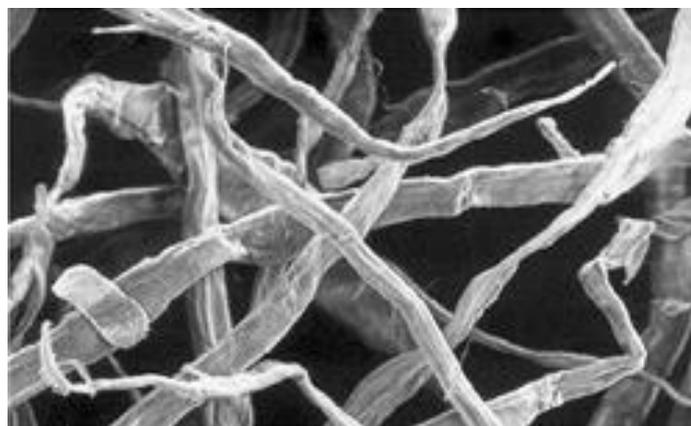


그림 2-11 Cell 섬유의 SEM 사진

(2) Poly propylene섬유

(가) Poly propylene(이하, PP)섬유의 특성

PP섬유는 직사각형 거푸집에서 추출하여 생산된다. 생산된 폴리프로필렌의 필름 낱장은 같은 넓이의 테입으로 동일 길이로 자른다. 격자형 패턴을 얻기 위하여 테입에 기계적인 압력을 가하거나 네트상으로 만든다. 어떤 경우 네트상 테입을 자르기 전에 꼬는 경우가 있는데 이것은 묶음의 직경을 더 크게 하기 위한 것이다. 이렇게 생산된 섬유는 필름상의 속상 PP섬유라고 부르며 적당한 길이로 자른다.

콘크리트 매트릭스에서 PP섬유는 극소수성이며, 화학적 부착은 기대할 수 없고, 주로 기계적 상호작용에 의한 부착으로 볼 수 있다.

PP섬유는 호모 폴리머 폴리프로필렌 레진(Resin)으로부터 생산되며 다른 섬유에 비해 상대적으로 용융점과 탄성계수가 낮아서 증기양생을 하는데는 한계가 있다.

최근에는 용융점을 활용하여 콘크리트의 폭렬을 방지하는데 쓰이기도 한다.

(나) PP섬유의 장점

1) 균열특성

PP섬유는 콘크리트에서 건조나 온도하강에 의해 체적의 감소가 일어나는데, 구조체가 구속되어 있는 경우 이 체적의 감소경향은 인장응력을 유발하여 균열을 일으키는데, PP섬유는 이와 같은 균열에 유용한 것으로 알려져 있다.

2) 흡수성

물을 흡수하지도 않고, 반응하지도 않는다. 흡수성이 없음은 콘크리트나 모르타의 W/C비를 변화시키지 않고 심각한 작업성의 저하가 섬유혼입량의 조절로 방지될 수 있음을 의미하고, 물과의 화학적 반응이 없음은 콘크리트, 모르타, 매트릭스 내에서 안정적으로 거동함을 의미한다.

3) 밀도

다른 섬유종류에 비해 낮은 밀도를 가지고 있어 많은 양의 섬유가 콘크리트나 모르타에 혼입되어 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다.

4) 내화학성

산과 알칼리에 대한 저항성은 Polyester나 강섬유에 비해 우수한 점으로 구조물의 사용기간 동안 건전성이 유지될 수 있으므로 콘크리트의 내구성 측면에서 유리하다.

5) 인장강도

결정성과 탄소 고리의 입체적인 규칙적 배열성을 갖고 있으므로 인장강도나 다른 합성섬유에 비해 크다.

6) 충격저항성

규정량의 PP섬유를 혼입

(다) PP섬유의 구조 및 형태

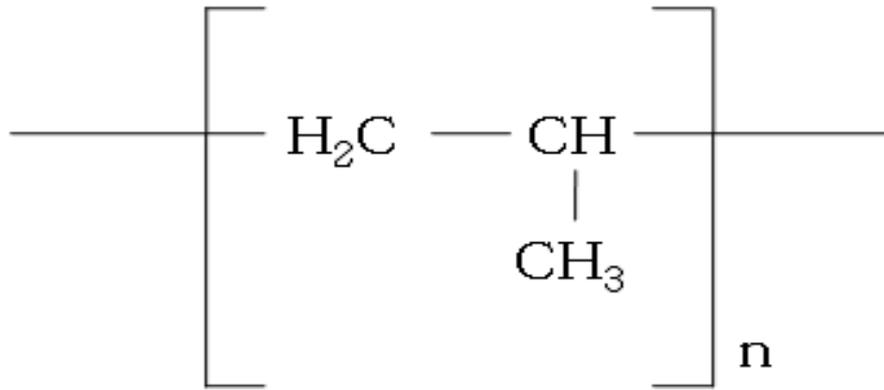


그림 2-12 PP섬유의 화학식



그림 2-13 PP섬유

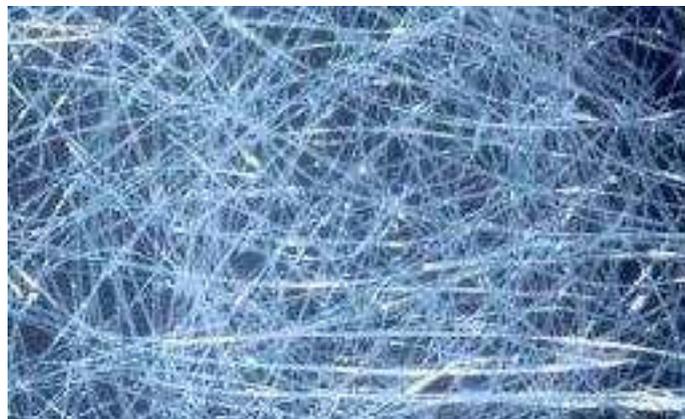


그림 2-14 PP섬유의 분산



그림 2-15 PP섬유의 SEM 사진

(3) Polyvinyl alcohol섬유

(가) Polyvinyl alcohol(이하, PVA)섬유의 특성

점화도는 폴리비닐알콜의 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 점화도가 높은 경우 분자간의 수소결합이 강하여 용점이 높고 물에 용해되기 어렵다.

일반적으로 고당도용 PVA섬유 제조에 사용되는 검화도는 99.0mol %이상이고 이러한 고당도 PVA를 사용하면 수용가능 온도가 5~95℃인 수용성 PVA가 만들어진다. 또한 초산비닐은 여러 종류의 모노머와 공중합이 가능하며 이것을 검화 할 경우에 보다 여러 종류의 PVA계 화합물을 얻을 수 있다. 그러나 PVA 분자구조 내에 여러 종류 결합이 존재하면 분자간 수소결합이 약해지므로 산업용 고당도 PVA섬유를 목표로 할 경우 공중합 PVA는 일반적으로 사용되지 않는 것이 효과적이다.

상업적으로 유용한 PVA중합도(Degree of polymerization, DP)는 1500~2000정도이다. PVA은 라디칼 중합시 초산비닐이 성장 말단이 매우 활성이 강하기 때문에 고중합도 PVA를 얻을 수 있는 에멀전 중합법이 개발되었다. 일본에서는 이와 같은 제조방법에 의해서 일반적인 중합물보다 10배 정도 높은 DP 18000의 PVA를 얻는데 성공하였다. 이와 같은 초중합도 PVA를 사용할 경우 아라미드 섬유의 일종인 Kevlar의 강도와 같은 2.9 GPa(24gram/denier)의 고당도 PVA를 제조할 수 있게 된다.

(나) PVA섬유의 장점

1) 균열특성

PVA섬유는 비교적 작은 직경과 높은 형상비를 갖추고 있어 시멘트 복합체 내에서 미소균열을 억제하고 안정화하며 섬유의 가교작용(Bridging)을 통하여 시멘트 복합체의 역학적 성질을 증대시키는데 매우 효과적인 작용을 한다.

2) 인장강도

기존 연구결과에 의하면 길이가 짧고 직경이 작을수록 섬유간 거리가 가까워져 최대 응력이 커진다고 알려져 있다. 이는 PVA섬유가 PP섬유보다 2배 이상의 축인장 응력을 가지며 연성적인 거동을 하는 것으로 알려져 있다.

3) 탄성계수

섬유 자체내에 가지고 있는 물리적 성질 중 탄성계수가 크기 때문에 콘크리트 또는 시멘트 모르타 매트릭스 내에서 우수한 가교작용(Bridging)을 한다.

4) 내열성

PVA섬유의 용점과 연화점은 각각 240~250℃와 220~230℃이다.

5) 접착성

PVA는 OH group을 가지고 있으며 표면은 요철구조로 구성되어 있다. 수경성물질로서 화학적, 물리적으로 우수한 접착성을 가지므로 콘크리트 및 시멘트 보강소재로서 적당하다.

6) 내약품성

내황산염에 우수하며, 시멘트 매트릭스 내에서 강하게 결합하여 내약품성이 증대된다.

(다) PVA섬유의 구조 및 형태

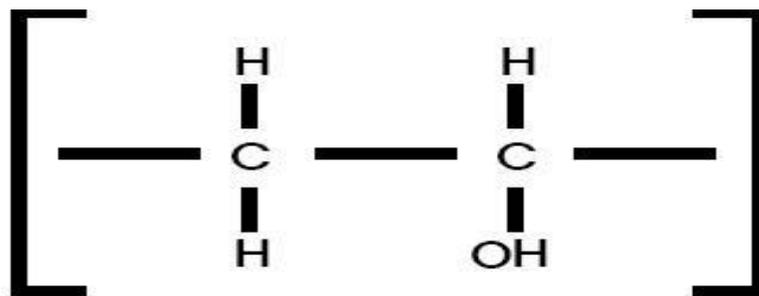


그림 2-16 PVA섬유의 화학 구조식



그림 2-17 PVA섬유



그림 2-18 콘크리트 내부의 PVA섬유

(4) Nylon섬유

(가) Nylon(이하, NY)섬유의 특성

NY섬유의 특성은 표면 처리와 가열, Air-texturing의 특별한 처리를 함으로써 더욱 개선된다. 콘크리트에 적용할 때는 높은 인장강도와 열과 빛에 대한 안정성을 위해 실로 잘라지기도 하고, 연속적인 짧은 길이로 자르기도 한다.

과거 NY섬유는 시간 경과에 따른 물성저하, 가볍기 때문에 생기는 시멘트 및 콘크리트 매트릭스 상에서의 분산력 문제(뭉침 현상), UV에 노출시 생기는 강도의 저하 등의 많은 문제점을 가지고 있었다. 그러나 현재의 NY섬유는 과거 나일론이 가지는 단점들을 개선하여 가벼우므로 타이어 같은 것에 이미 사용되고 있다.

또한, 시멘트 및 콘크리트 매트릭스 상에서 분산력이 좋아 섬유 뭉침 현상이 발생되지 않으며, 인성, 탄성 회복 능력이 좋고, 열에 매우 안정적이며 콘크리트의 품질을 저하시키는 균열과 휨, 인장강도를 개선시키고 콘크리트 구조물의 내구성 및 품질을 개선시키는 우수한 재료로 발전되었다. 또한 경제성에 있어서도 PP 등의 기타 합성섬유보다 저렴하여 그 사용이 증가되고 있는 실정이다. 또한 이러한 특성으로 인하여 NY섬유에 관한 많은 연구가 진행되어지고 있는데 Dr. Shah는 NY섬유의 친수성과 다른 합성 섬유들의 소수성 특성을 비교하는 기초 실험을 진행 하였다. 4~5 %의 수분을 함유하고 있고 소수성을 가지는 NY섬유는 시멘트 수화시 수분을 제공하는 역할을 하여 다른 합성섬유와는 달리 시멘트와의 결합력을 높여주며, 낮은 수분함유율은 체적비 0.1~0.2 %정도의 양으로 섬유 함유율이 낮은 콘크리트의 수화와 워커빌리티에 영향을 주지 않으며, 비교적 불활성 물질이고, 강염기를 포함한 다양한 유기, 무기물질에도 저항력이 크다.

(나) NY섬유의 장점

1) 균열저감

NY섬유는 친수성 및 시멘트 매트릭스와의 우수한 부착성능으로 인해 콘크리트 균열저감 성능을 지니고 있다.



그림 2-20 NY섬유

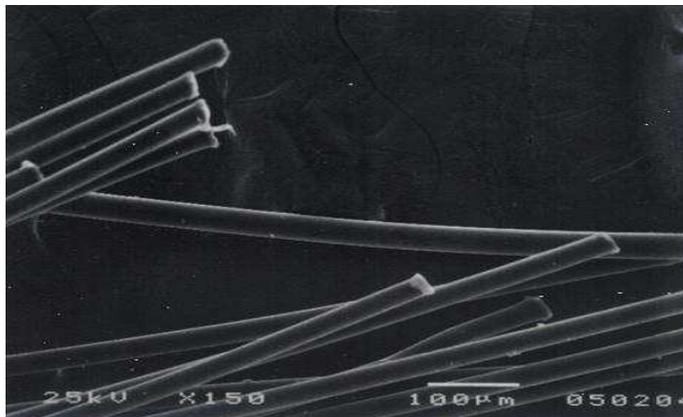


그림 2-21 NY섬유의 SEM 사진

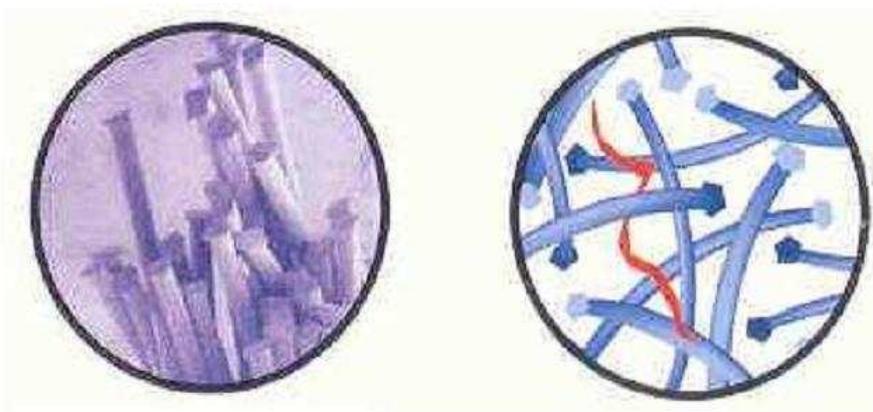


그림 2-22 NY섬유의 End-Anchor 구조

(라) NY섬유의 물리적 성질 및 특성

NY섬유는 고성능 콘크리트에 적용할 수 있는 우수한 특성을 지니고 있다. 보통 콘크리트는 인장성능이 떨어지고, 마모되며, 충격에 쉽게 부서지지만 NY섬유를 사용하게 되면 콘크리트가 지니고 있는 단점들을 보강할 수 있다. 콘크리트 매트릭스 상에서의 NY섬유는 함유되어져 있는 수분을 통한 시멘트와의 부착력이 증가되어져 균열저감 효과가

뛰어나며, 표면에 헤어가 노출되지 않는다. 또한 섬유가 가지는 연성으로 인해 작업성이 좋으며, 색상에 영향을 주지 않는다. 전에 NY섬유가 가지고 있는 부식이나 자외선 노출로 인한 강도의 저하, 뭉침 현상 등의 단점으로 인하여 그 사용이 많지 않았으나, 최근에는 이러한 단점을 보완한 NY섬유로 인하여 그 사용량이 증가하는 추세이다.

(마) NY섬유의 적용 예

콘크리트 매트릭스 상에서 NY섬유는 흡수성을 지니고 있으므로, 부착력이 좋아 균열 저감 효과가 크고 헤어가 노출되지 않아 표면 마감력이 우수한 특성을 지니고 있다. 또한 연성을 지니고 있어 콘크리트의 취성 파괴를 억제하며, 작업성이 좋고 색상에 영향을 주지 않는다. 이 외에도 강도의 증진효과 및 콘크리트 매트릭스의 부스러짐과 마모에 대한 저항력을 지니는 점 등의 우수한 특성을 가지고 있다. 이와 같은 특성을 지닌 NY 섬유가 콘크리트 보강재로서 적용 가능한 곳에는 공업용과 상업용 슬래브, 보도·도로 등과 숏크리트용, 터널과 지반 고정, 건물 보강등과 해양구조물이나 방벽, 오염물 탱크 등에 적용할 수 있다. 또한 프리캐스트용으로 파이프나, 수도관, 건축용 생산 제품 등에도 적용이 가능하다.

(5) Polyester섬유

(가) 개요

나일론 섬유, 아크릴 섬유와 함께 3대 합성섬유의 한 가지로 불리는 합성섬유이다.

1941년 영국의 칼리코 프린터스사(Calico Printers Assoc.)의 윈필드(Whinfield)와 디슨(Dickson)에 의해 처음 발명되었는데 이 발명 내용을 중심으로 미국의 듀폰사가 1948년 미국 특허를 획득했고 영국의 I.C.I. 사는 미국을 제외한 전 세계의 특허권을 획득했다. Polyester섬유는 2가 알코올(HOROH)과 테레프탈산(p-HOCC6H4COOH)의 Ester를 적어도 85 %이상 함유하는 합성고분자로부터 제조된 섬유로 정의된다.

1953년 미국에서 첫 상품화가 이루어진 이래 1960년대 1970년대에 걸쳐 전 세계적으로 생산량이 증가하여 현재까지도 가장 널리 사용되는 섬유의 한 가지이며 원료가 싸고 섬유 특성이 범용성을 가지며 의류, 비의류 분야로서의 광범위한 소재 전개가 가능한 섬유이다.

최근 섬유제조기술이 첨단화학에 따라 촉감, 염색성, 기능성 등에서 천연섬유를 능가하는 신합섬 소재의 개발과 함께 기술적 측면 및 경제적 측면에서도 중요한 위치를 점하고 있다.

(나) 제조 방법 및 분자구조

일반적으로 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol, 이하 EG)과 테레프탈산(Terephthalic Acid, 이하 TPA)의 반응에 의한 용융, 축합중합에 의해 제조된다.

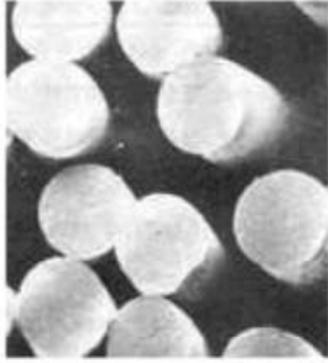
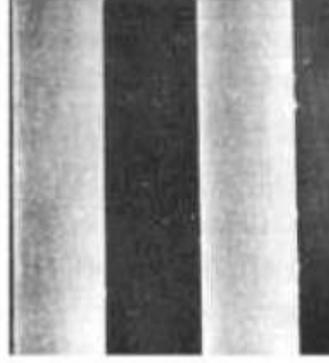


그림 단면 - 둥근 원형



측면 - 매끄러운 줄 모양

그림 2-24 현미경으로 관찰한 PET 원사의 단면모양

(라) 용도

1) 의류용 PET 섬유제품

PET는 초기 탄성회복율이 커서 구김 발생이 적고 열가소성에 의한 열고정성이 우수하여 신축, 구김, 형태의 변형이 잘 일어나지 않기 때문에 의류 소재로 적합하다. 그러나 PET는 소수성이므로 흡습성이 좋지 않고 마찰대전성이 커서 100 % PET사로 된 의류는 인체에 그다지 적합하지 못하다.

따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 천연섬유와 혼방(T/C제품)되어 의류가 제조되기도 한다.

PET면 혼방사는 제직 및 편성의 공정을 거쳐 셔츠, 과마자, 바지, 유니폼, 정장, 스포츠복, 라이닝, 넥타이, 비옷 등에 많이 사용되며 편직물은 주로 캐주얼복에 이용된다.

이 때 PET/면 혼용율은 50/50과 65/35가 가장 보편적이다.

2) 인테리어용 PET 섬유제품

PET는 근본적으로 나일론에 비하여 탄성회복성이 나쁘기 때문에 카페트의 용도로는 적합하지 않다. 그렇지만 형태안정성이 우수하여 카페트용 파일보다는 기포로 많이 쓰인다. 스펀본드(spun bonded) PET부직포로 니들룸 펠트(needle-loom felt)나 수지가 코팅되는 마루용 덮개(floor covering)의 기포로 쓰인다.

또한 PET는 강도, 내광성, 일광견뢰도, 투명성, 백도 등이 우수하기 때문에 가정이나 사무실의 커튼, 벽지, 가구류에 매우 적합한 소재이며 면섬유와의 혼방제품(T/C)은 수지가공과 방오가공을 하여 침대용 시트와 베갯잇으로 많이 사용되며 PET솜은 베개와 이불용으로 널리 쓰인다.

3) 산업용 PET 섬유제품

초기 탄성율과 강도가 크고 신장도가 낮기 때문에 여러 용도의 산업용사로 사용된다. 가장 대표적인 경우가 타이어 보강재로서의 PET 타이어 코드(Tire-Cord)이다.

PET 타이어 코드는 타이어 제조에 적합한 인장강도, 유연성, 탄성률을 가진다.

그 밖에 PET는 내가수분해성이 우수하여 제지공정에서 사용되는 와이어, 부직벨트, 건조기직포, 로프, 토목공사용 부직포, 텐트, 자동차 안전벨트, 전선피복재료 등에 이용된다.

2.3.5 섬유혼입의 인성특성

숏크리트에 강섬유를 혼입하는 것은 콘크리트의 취성을 개선하기 위한 것이므로 숏크리트의 균열 발생 후 인성특성을 정량적으로 표현함으로써 강섬유 보강 숏크리트의 성능을 평가할 수 있다. 인성특성을 나타내는 방법으로는 에너지 흡수능력을 절대값으로 나타내는 방법, 에너지 흡수능력과 관련하여 무차원의 지수(Toughness Index)로 나타내는 방법, 균열 발생 후 임의 처짐까지의 등가휨강도(Equivalent flexural strength)로 나타내는 방법 등이 있다.

유럽통합규정인 EFNARC(European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), 호주의 RTA(Roads and Traffic Authority), 일본의 JCI (Japan Concrete Institute), 미국의 ASTM(American Society for Testing and Materials), ACI(American Concrete Institute)에서는 에너지 흡수능력으로써 숏크리트 성능을 평가하는 방법을 제시하고 있으며, 일본의 JSCE(Japan Society of Civil Engineers)에서는 등가휨강도를 이용한 성능평가 방법을 제시하고 있다. 우리나라 고속도로 건설공사에서는 최대휨강도에 대한 등가휨강도의 비가 68% 이상이 되어야 한다는 것을 기준으로 등가휨강도 3.0MPa를 사용하고 있다. (한국도로공사, 2001)

(가) 패널시편을 이용한 휨인성 평가방법

유럽통합규정인 EFNARC와 호주의 RTA에서는 일정한 형태의 패널(panel) 시편 중앙부 최대 처짐과 하중을 이용하여 휨인성을 평가하고 있다. 즉, 일정 크기의 패널시편에 대한 재하시험을 통하여 특정 처짐까지 하중-처짐 곡선의 면적으로 표시되는 에너지 흡수능력(energy absorption capacity)을 측정하여 이를 숏크리트의 휨인성 평가지표로 사용하고 있다.

(1) EFNARC 에서 규정하는 시험법

EFNARC에서는 일정 처짐까지 P-o곡선의 면적을 절대적으로 평가한 방법을 사용하고

있다. 시험에 이용하는 패널은 가로 x 세로가 600 × 600mm 인 사각형상에 높이가 100mm 인데 시편의 4변을 지지하여 시험하기 때문에 터널에서 슛크리트 라이닝이 실제로 거동하는 형태와 유사하다는 장점이 있지만, 균열의 패턴이 일정하지 않은 단점이 있다. 사각패널을 이용한 휨인성 평가 방법이 가지고 있는 장·단점을 열거하면 다음과 같다.

- ① 슛크리트 터널 라이닝은 사각패널에 대한 시험방법과 흡사한 거동을 보인다.
- ② 슛팅에 의한 제작이 용이하다.
- ③ 하중재하 실험시 경계조건이 바뀔 수 있다.(모서리 부분에서 슛음이 발생)
- ④ 중앙에서의 균열폭이 큰 경우 중앙부 최대처짐을 측정하는 것이 불가능하다.

EFNARC에서 제시하고 있는 European Specification for Sprayed Concrete에는 시험 방법과 에너지흡수능력 등급이 표시되어 있다. 사각패널에 대한 재하실험은 그림 2-25에 제시되어 있는 바와 같이 네 변을 지지한 상태에서 시편의 중앙에 100 × 100mm 의 재하판을 두고 일정한 속도로 하중을 재하하게 된다. 이때 중앙점의 최대처짐을 측정하여 최대처짐이 25mm가 될 때까지 시험을 하며 하중재하 방향은 터널에서 실제로 작용하는 하중을 모사할 수 있도록 슛팅을 실시한 반대방향으로 한다.

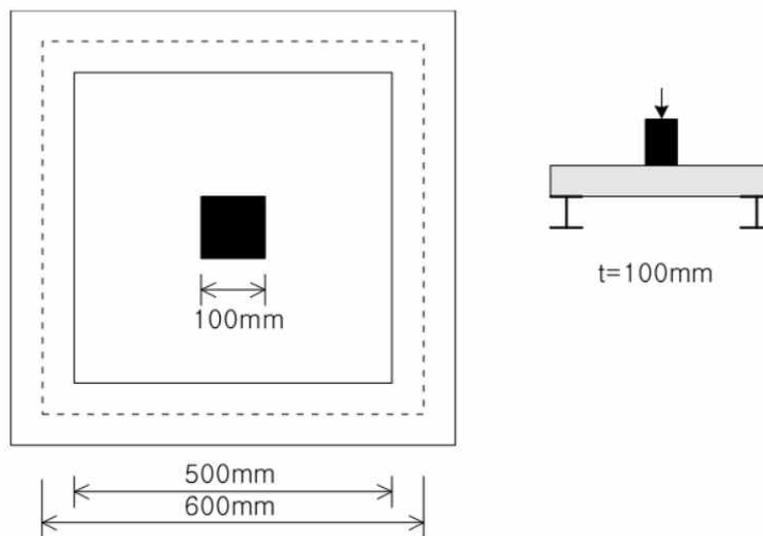


그림 2-25 EFNARC 패널 실험방법

이 실험방법에서는 실험시 중앙에 발생하는 균열폭이 큰 경우, 더 이상의 처짐을 측정할 수 없을 수도 있으며 재하중에 네 변의 지지조건이 각 변의 중앙점으로 바뀌면서 균열 형태가 불규칙하게 형성된다. EFNARC에서 규정하는 강섬유보강 슛크리트의 성능기준은 표 2-1과 같다.

표 2-1 등급에 따른 EFNARC 패널의 에너지 흡수능력 기준

Toughness classification	Energy absorption in Joule for deflection up to 25mm
a	500
b	700
c	1000

(2) RTA에서 규정하고 있는 시험법

EFNARC에서 규정하는 사각형 패널에 대한 시험에서는 불규칙한 균열형태가 나타남으로써 시험결과와 분산성이 높은 단점이 있다. 이러한 점을 보완한 것이 호주의 RTA(Roads and Traffic Authority)에서 규정하고 있는 원형패널이다. 원형패널은 사각패널의 4변지지 형식이 아닌 3점지지 형식이기 때문에 균열이 인접한 지지점 사이에서 형성되어 일정한 방향과 패턴을 가지고 있으며, 하중-처짐 곡선도 일정한 형태를 갖는다. 하중-처짐 곡선의 최대하중은 터널의 콘크리트 강도에 의하여 결정되며 최대하중 이후의 하중-처짐 곡선은 강섬유에 의한 인장특성을 반영한다. RTA에서는 원형패널에 대한 실험방법을 Test Method T373(Determination of the Toughness of a Fibre Reinforced Shotcrete Mix - Round Determinate Panel Test)에 규정하고 있다.

원형패널의 규격은 지름 800mm 두께 75mm 이며 시편은 슛크리트 타설작업으로 제작하여야 한다. 슛크리트 타설작업으로 시편을 제작할 때에는 두께를 일정하게 유지하는 것이 중요한데 그 이유는 해당 시료의 에너지 흡수능력을 잘 나타낼 수 있는 두께가 75mm 이기 때문이다, 실험방법은 다음과 같다. 그림 2.13에서 보듯이 3점에서 지지되고 있는 시편의 중앙에 지름이 100mm 이고 재하점의 곡률반경이 100mm 인 재하판을 이용하여 재하를 한다.

사각패널과 마찬가지로 중앙부의 최대처짐을 1초 단위로 측정하여 하중-처짐곡선을 얻는다. 이때의 하중-처짐곡선으로 흡수에너지를 구하여 강섬유 보강 슛크리트의 성능을 평가한다. 사각패널과 마찬가지로 실험 시 중앙부 균열폭이 크게 되면 최대처짐을 얻지 못하는 경우가 발생할 수 있으므로 실험시 주의를 하여야 한다. 최대처짐은 40mm까지 얻어야 하며, 재하속도는 10mm/min 이다. 재하속도는 사각패널보다 약 7배 정도 빠르는데, 최대처짐이 크고 균열 발생형태가 일정한 양상을 보이기 때문에 양호한 결과를 얻을 수 있다. 그림 2-26은 원형패널의 지지대를 나타낸 것이다.

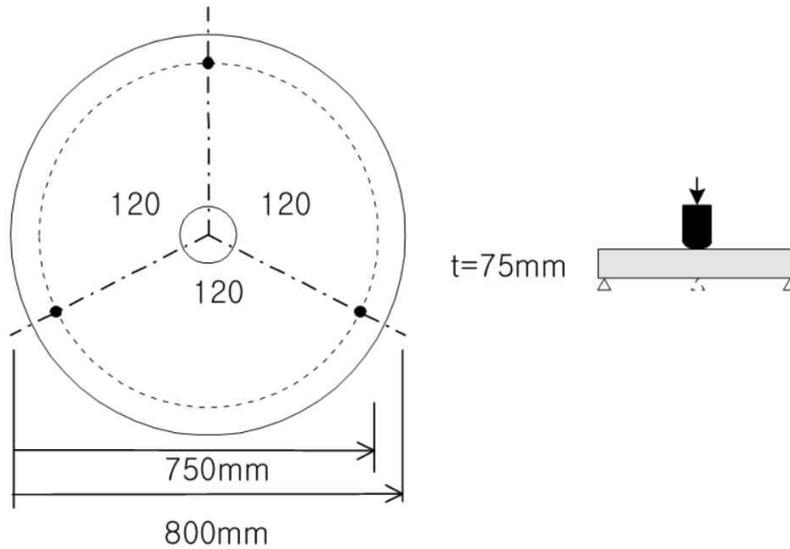


그림 2-26 원형패널을 이용한 인성 평가실험

(나) 보 형태의 시편을 이용한 휨인성 평가방법

(1) ACI에서 규정하는 휨인성 평가방법

ACI 544 위원회에서는 1978년에 Henager의 연구에 기초를 둔 무차원 인성지수 (Toughness Index, I)를 제안하여 하중-처짐곡선 아래의 면적비를 인성평가에 도입함으로써 Johnston의 인성평가 방법의 비합리성을 해결하려고 하였다. 이 방법에 의한 인성지수 (T.I.)는 10×10×35cm의 보 공시체에 3등분점 재하를 실시하여 지간 중앙부 처짐이 1.9mm 가 되는 점까지의 하중-처짐곡선하의 면적(S_0+S_1)을 초기 균열점까지의 면적(S_0)으로 나눈 값으로 정의하였는데, 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T.I. = \frac{S_0 + S_1}{S_0} \quad (\text{식 2.4})$$

이때 중앙부의 처짐 기준을 고정 변위 1.9mm로 정한 근거를 ACI에서는 언급하고 있지 않지만, Henager는 평균적인 초기 균열 시 처짐인 0.125mm의 15배에 해당하는 값으로 설명하고 있다. 이 ACI 544 위원회에서 정의한 평가방법은 정해진 시험체에 대한 특정 처짐(1.9mm)까지의 시험값을 지정함으로써 동일한 시험체 및 시험방법으로 시험을 수행할 때만 적용이 가능한 단점이 있다. ACI 544 위원회에서 정의한 인성평가 방법의 장점은 표준 시험체로부터 인성을 쉽게 구할 수 있고, 저인성 섬유보강 콘크리트를 쉽게 구분할 수 있다는 것이다. 그러나 비례한도점 (LOP, Limit of Proportional Point)을 정확하게 판정하는 데에 문제가 있으며, 시험결과값이 시험체의 크기 및 형상에 크게 좌우

되는 단점을 가지고 있다. 한편 초기 균열점(δ LOP)은 일정한 재하속도에 비하여 변형이 갑자기 증가하는 점을 말한다. 이는 하중-처짐곡선이 비선형이 되기 시작하는 점, 즉 복합체 매트릭스의 역할이 끝나는 점으로 토상 비례한도점이라고 부르는 지점이다.

(2) Johnston(II)이 제시한 휨인성 평가방법

1980년에 Henager와 Zollo, 1982년 Johnston에 의해 ACI 인성지수 결정방법의 결점에 대한 논의가 있었으며, Johnston이 시험체의 정해진 고정변위(δ LOP=1.9mm)를 사용하여 인성을 평가하는 방법 대신에 다소 개선된 방법을 제시하였다. 즉 그림 2.13과 같이 δ LOP 처짐의 3 배, 5.5 배, 15.5배에 해당되는 점까지의 면적을 δ LOP까지의 면적(S_0)으로 나누어 사용하는 인성지수를 제안하였다. 이를 근거로 1988년에는 ACI 544 위원회에서 ASTM의 인성지수(I_t)를 포함한 개정된 기준을 마련하였다.

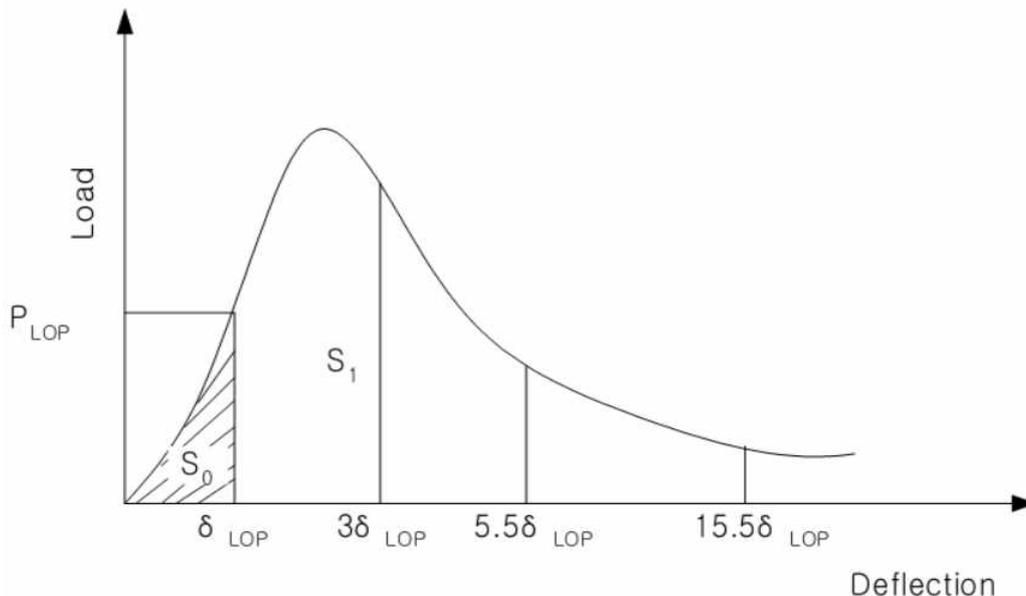


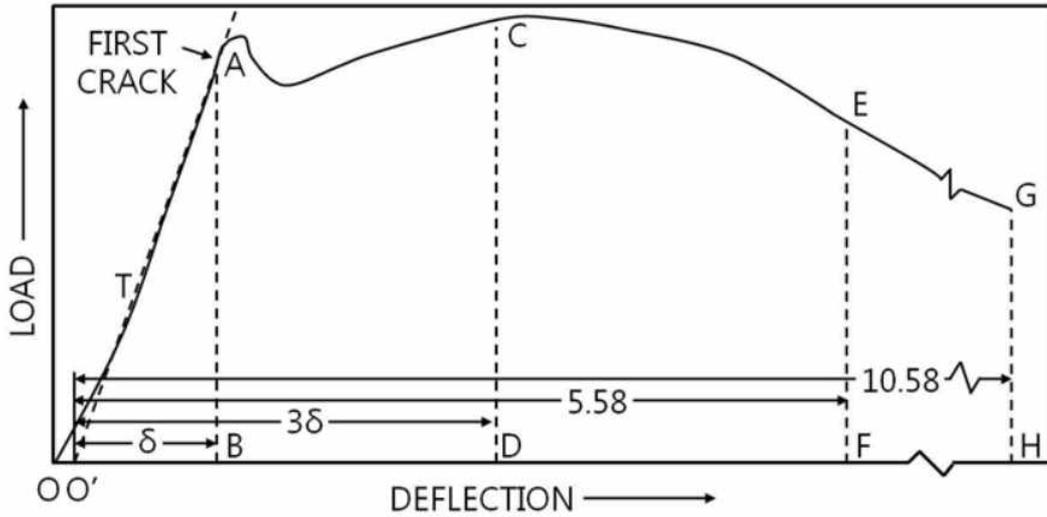
그림 2-27 Johnston(II)의 휨인성지수 결정방법

(3) ASTM의 규정

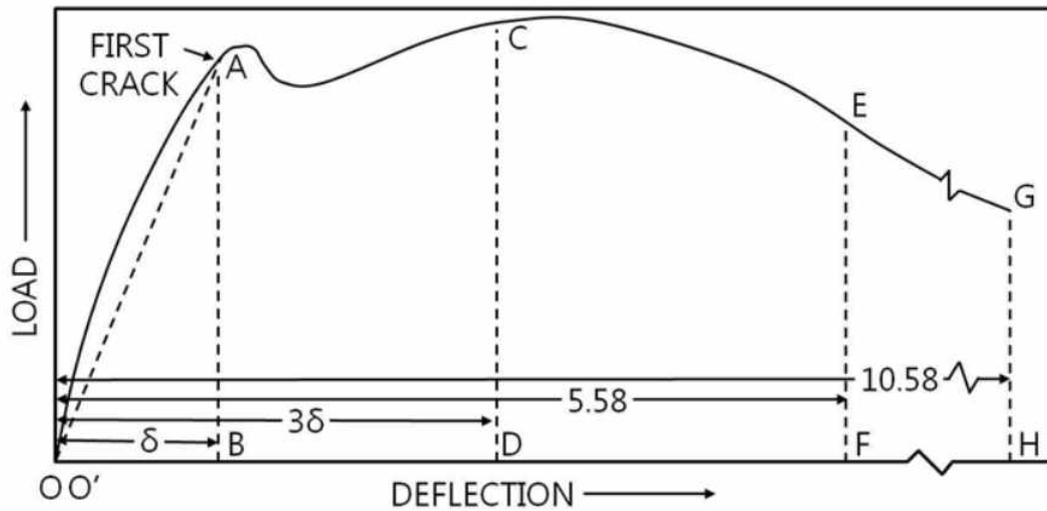
ASTM에서는 1986년에 그림 2-28과 같이 ACI 544 위원회의 방법과 Johnston (II)의 방법을 조합하여 채택하였는데, 초기 하중-처짐 곡선을 직선화한 뒤 초기 균열하중(A점)의 접선이 X축과 만나는 O' 점을 처짐 원점으로 잡아 O'AB 에 의한 삼각형 면적을 초기 균열처짐 δ LOP의 면적으로 간주하였다. 이때 O'B를 δ 로 하여 3 δ , 5.5 δ , 10.5 δ 인 D, F, H점을 잡아 각각의 인성지수를 구하여 인성평가의 기준으로 사용하고 있다.

한편 그림 2-29는 시편이 LOP까지는 완전탄성체이고, LOP 이후는 완전소성체라고 가정했을 때의 하중-변위곡선이며, 인성지수 I5, I10, I20에서의 첨자는 이론적인 인성지수

가 각각 5, 10, 20임을 의미한다. 따라서 시험편이 완전 탄소성체일 때 Johnson(II)의 인성평가 지수인 I3.0, I5.5, I15.5 등은 ASTM C 1018에서는 I5, I10, I30으로 표시하고 있다. 이러한 휨인성지수(Toughness Index)의 계산방법은 아래의 식에 제시되어 있다.(그림 2-28, 2-29 참조)

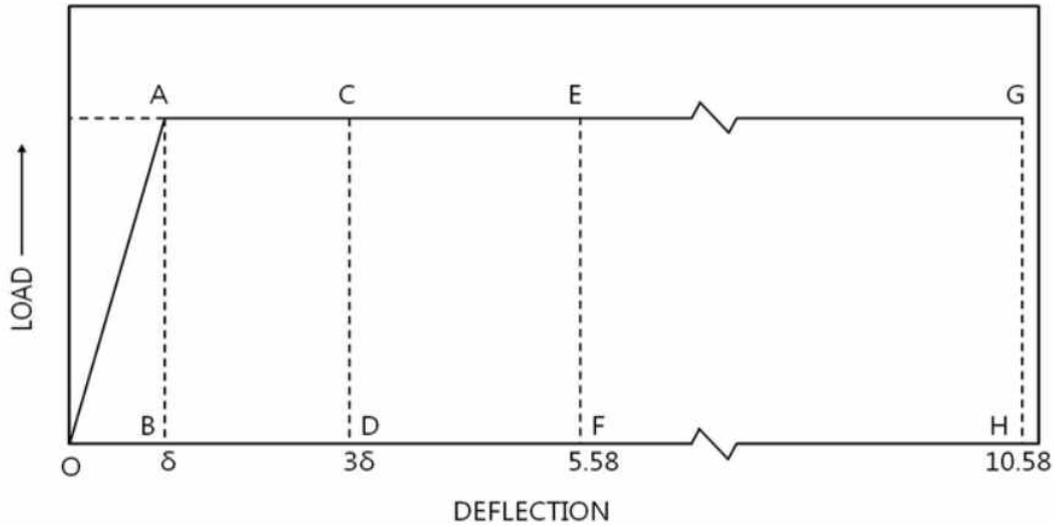


(a) Concave upward to first crack



(b) Convex upward to first crack

그림 2-28 휨인성지수 산출 개념도(ASTM, ACI)



$$I_5 = \frac{OACD \text{의 면적}}{OAB \text{의 면적}}, \quad I_{10} = \frac{OAEF \text{의 면적}}{OAB \text{의 면적}}, \quad I_{20} = \frac{OAGH \text{의 면적}}{OAB \text{의 면적}}$$

그림 2-29 완전탄소성 거동 재료의 하중-변위곡선

(4) EFNARC의 잔류강도 기준

EFNRAC에서는 사각형 패널에 대한 시험규정 뿐만 아니라 보 공시체에 대한 휨시험도 규정하고 있는데, 보 시편의 크기를 75×125×600mm로 정하고 일정 처짐(0.5, 1, 2, 4mm)까지의 에너지 흡수능력을 4등급으로 구분하여 인성을 평가한다. 하중-처짐곡선은 4점 재하시험을 통하여 얻으며, 이 곡선과 표 2-2 및 그림 2-30에 있는 잔류강도 등급을 비교하여 강섬유 보강 슛크리트의 성능을 판단한다.

표 2-2 잔류강도 등급 규정

Deformation class	Beam deflection (mm)	Residual stress (MPa) for strength class			
		1	2	3	4
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Low	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Normal	2	1.0	2.0	3.0	4.0
High	4	0.5	1.5	2.5	3.5

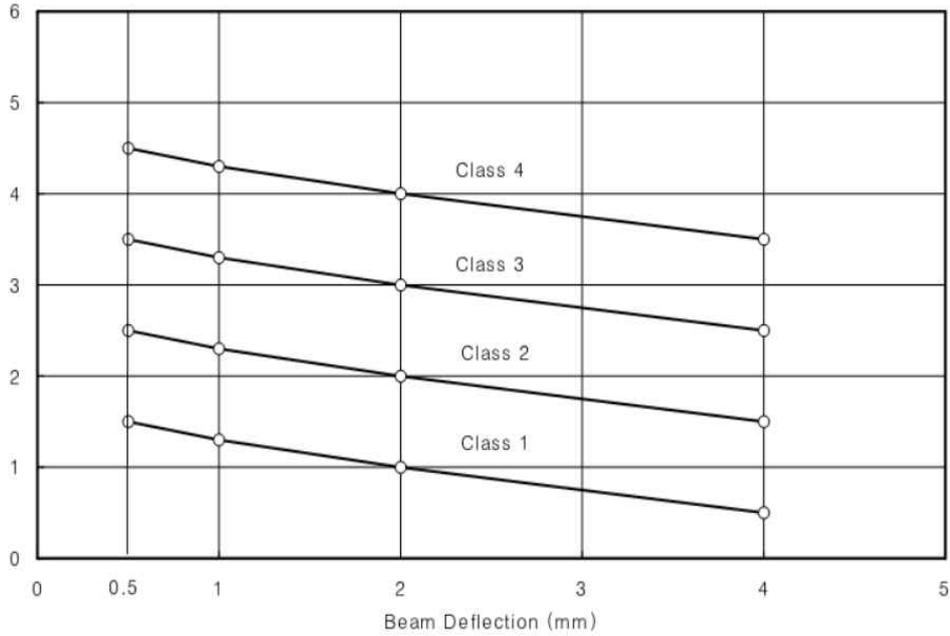


그림 2-30 EFNARC에서 규정하는 잔류강도 등급

(5) JSCE에서 규정하는 휨인성 평가방법

일본 JSC(Japan Society of Civil Engineers)에서는 등가휨강도 (equivalent flexural strength, f_e)를 통하여 휨인성을 평가하고 있다, 등가휨강도는 그림 2-31에 제시되어 있는 것처럼 하중-변위곡선에서 일정한 처짐 (1/150, 1은 지간길이)까지의 에너지 흡수능력 T_b 를 계산하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다. 등가휨강도는 최대하중에 도달한 후 일정한 변위까지의 휨인성계수(flexural toughness factor)로서 평균강도의 개념을 가진다.

$$f_c = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2}$$

여기서, T_b = 기준처짐까지의 휨인성(flexural toughness)

δ_{tb} = 기준처짐(1/50)으로 처짐이 30cm인 경우 2mm, 45cm인 경우 3mm

l, b, h = 시편의 지간길이, 폭, 높이

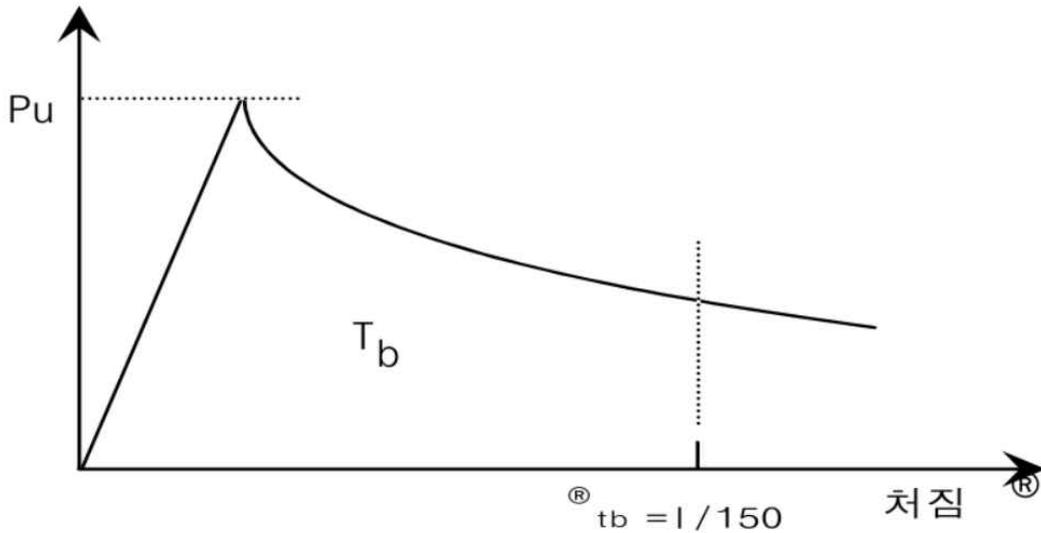


그림 2-31 JSCE에서 규정하는 등가휨강도의 개념도

이것은 콘크리트에서 휨인장균열이 발생한 이후의 강섬유에 의한 휨인성을 차원을 갖는 수치로 나타낸다는 장점이 있다. 현재 우리나라에서도 일본 JSCE의 휨인성 평가 개념을 그대로 이용하고 있는데, 이 등가휨강도는 차원을 갖는 값이므로 시편의 크기 및 형상에 따라 그 값이 달라질 수 있다.

실험방법은 외부 처짐을 배제한 순수처짐을 구하기 위하여 Yoke 방식을 이용하며, 하중의 재하속도는 1/1,500 ~ 1/3,000로 일정한 속도를 유지하여야 한다. 이 방법은 하중-처짐 곡선이 일정하지 않기 때문에 배합과 강섬유 혼입량, 강섬유 종류에 따른 변화를 정확하게 파악하기가 쉽지 않다. 즉 곡선의 형상으로 강섬유의 특성을 파악하기에는 문제가 있다고 할 수 있다.

(다) 패널과 보 공시체에 대한 휨인성시험의 차이점

패널과 보 공시체에 대한 휨인성시험은 하중 재하 속도와 경계조건 그리고 시편의 크기에서 차이가 있으며 시험에서 얻는 하중-처짐곡선의 최대 처짐량에도 차이가 있다. 이것은 각 규정마다 휨인성 평가를 위한 에너지 흡수능력을 측정하기 위해 하중-처짐곡선을 구하는 방식은 같으나, 실제 하중조건을 모사하는 재하방법과 콘크리트 재료가 받아야 할 변형량을 산정하는 데 차이가 있기 때문이다. 표 2-3에는 각 시험방법에 있어서 하중 재하 속도와 경계조건에 대한 차이를 제시하였으며, 표 2-4에는 시편의 규격을 제시하였다.

표 2-3 하중재하속도와 경계조건의 비교

공시체 종류	하중재하속도	경계 조건
Round Panel	10.0mm/min	3점 지지
EFNARC Panel	1,5mm/min	4점 지지
Beam	0.3mm/min	양단 단순지지

표 2-4 시편 규격 비교

공시체 종류	시편 규격
Round Panel	직경 800mm, 높이 75mm
EFNARC Panel	가로×세로 600×600mm, 높이 100mm
Beam	150×150×550mm 또는 100×100×350mm

제3장

성능시험계획 및 방법

- 제1절 보강섬유 인장강도/탄성계수
- 제2절 배합 설계
- 제3절 슬럼프/공기량
- 제4절 압축강도/탄성계수
- 제5절 쪼갬인장강도
- 제6절 휨강도/등가휨강도/휨인성계수
- 제7절 경사전단접착강도
- 제8절 길이변화율
- 제9절 건조수축

제3장 성능시험계획 및 방법

제1절 보강섬유 인장강도/탄성계수

1. Forta Fiber 인장강도/탄성계수

1) 시험 목적

콘크리트 구조물의 혼입하는 고인성 보강섬유의 품질성능을 확인하기 위하여 Forta Fiber 의 인장강도, 탄성계수를 측정한다.

2) 시험체 제작방법

- ① 평탄한 판에 박리가 가능한 필름 또는 종이를 붙여 고정시키고, 소정량의 함침 접착용 에폭시 수지를 균일하게 도포한다.
- ② Forta Fiber 를 붙이고 탈포 롤러로 충분히 공기를 빼낸다. 이때, Forta Fiber 위로 에폭시수지가 함침되는 것을 반드시 확인한다.
- ③ 함침용 에폭시 수지를 Forta Fiber 위에 도포하고, 그 위에 박리용 필름을 붙인 후, 탈포 롤러로 공기를 충분히 빼낸다. 이때, Forta Fiber 가 흐트러지지 않도록 충분히 주의한다.
- ④ 제작한 Forta Fiber 시험체는 소정기간 양생을 실시한다.
- ⑤ 시험편의 형상은 폭 15mm, 시험부의 길이 200mm 이상으로 하며, 전장은 200mm 이상으로 한다.
- ⑥ 시험편은 경화가 반정도 일어났을 때 컷터 날로 자르던가 완전히 경화된 상태에서 다이아몬드 컷터로 Forta Fiber 가 흐트러지지 않게 정밀하게 절단한다.
- ⑦ 절단 시험체에 알루미늄 또는 GFRP제의 탭을 양면에 접착제를 이용하여 붙인다.
- ⑧ 스트레인 게이지를 시험편의 중앙부에 붙인다.

3) 시험방법

- ① Forta Fiber 에 함침용 수지를 함침시켜 경화 후, 제작한 시험편을 사용하여 인장시

험을 실시하고 인장강도, 탄성계수를 구한다.

- ② 시험기는 최대용량 50N 이상의 인장 시험기를 사용한다. 시험편을 시험기의 척에 확실히 물릴 수 있도록 고정한다.
- ③ 탄성계수는 스트레인 게이지를 사용하여 측정한다.
- ④ 로드셀의 하중 정도는 ±1% 이내로 한다.
- ⑤ 시험편의 폭, 두께를 1mm의 정도로 측정한다.
- ⑥ 시험편의 장축과 인장 하중 축이 일직선상에 오도록 시험편을 고정한다.
- ⑦ 인장속도를 2mm/분으로 시험을 개시한다.
- ⑧ 아래 식에 따라 인장강도, 탄성계수를 산정 한다. 탄성계수 산정은 그림 3-2에 나타난 것처럼 하중의 20% 와 60% 사이의 직선부분의 변화율로부터 산정 한다.
- ⑨ 신율은 최대인장 하중시 변형도를 신율(μ)로 표시한다.

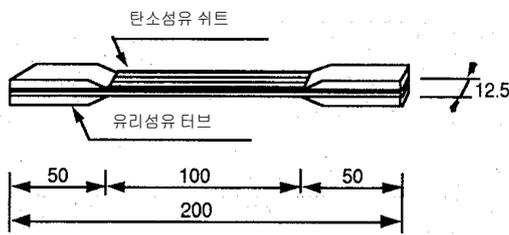


그림 3-1. 시험편의 형상

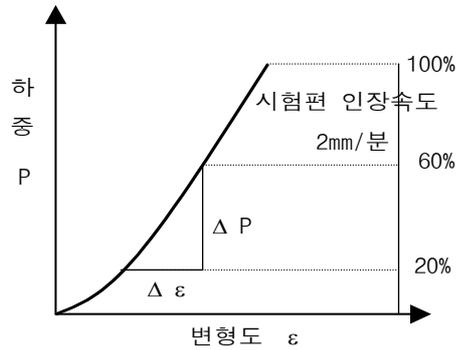


그림 3-2 하중-변형도 곡선

$$\text{인장강도}(\sigma) = \frac{P_{\max}}{(t \times w)} \quad \text{식(3-1)}$$

여기서, σ =인장강도(MPa), P_{\max} =최대하중(N), t =설계두께(mm), w =폭(mm)

$$\text{탄성계수} E = \frac{\frac{\Delta P}{(t \times w)}}{\Delta \epsilon} \quad \text{식(3-2)}$$

여기서, E =탄성계수(MPa), ΔP =최대하중의 20%와 60%의 하중 차 (N)

$\Delta \epsilon$ = 최대하중의 20%와 60%의 변형도 차 (μ)

4) 관련규격

- ASTM D 3039



그림 3-3 Forta Fiber



그림 3-4 인장강도 시험

제2절 배합 설계

1. 배합 실험계획

설계강도 30MPa급 및 40MPa급에 대하여 고인성 보강섬유 혼입에 따른 배합은 두 분류로 계획하였는데, 과업 목적 및 범위에서 제시한 PLAIN 배합, Forta Fiber 2.5kg/m³, 3.5kg/m³, 4.5kg/m³ 배합, Steel fiber 혼입(25kg/m³) 배합으로 설계하였다.

최적배합의 실험계획은 표 3-1과 같다.

표 3-1 최적배합 실험계획

실험요인		실험수준		
배합변수	설계강도(MPa)	2	30, 40	
	PLAIN 배합	2	30 MPa, 40 MPa	
	목표슬럼프(mm)	1	100±20	
	목표공기량(%)	1	2.0±0.5	
실험변수	섬유종류	2	Forta Fiber, Steel fiber	
	섬유혼입량	Forta Fiber	3	2.5kg/m ³ , 3.5kg/m ³ , 4.5kg/m ³
		Steel fiber	1	25kg/m ³
측정사항	환경조건	1	항온항습 양생	
	섬유혼입량	굳지 않는 콘크리트	2	슬럼프, 공기량
		경화콘크리트	9	압축강도, 탄성계수, 쪼갬인장강도, 휨강도, 등가휨강도, 휨인성계수, 경사전단접착강도, 길이변화율, 건조수축

가. 최적 배합 결정(배합변수)

- 설계강도 30 MPa-PLAIN 배합
- 설계강도 30 MPa-PLAIN 배합에 Forta Fiber를 각각 2.5kg/m³, 3.5kg/m³, 4.5kg/m³ 배합
- 설계강도 30 MPa-PLAIN 배합에 Steel fiber 25kg/m³ 배합
- 설계강도 40 MPa-PLAIN 배합
- 설계강도 40 MPa-PLAIN 배합에 Forta Fiber를 각각 1.0 kg/m³ 배합

설계강도 30MPa와 40MPa 2수준에 대하여 목표 슬럼프 100mm~120mm로 목표를 설정하였다. 최적배합을 도출 한 후 굳지 않은 콘크리트는 슬럼프와 공기량을 측정하고, 경화 콘크리트는 재령에 따라 압축강도를 측정하였다. 또한 섬유보강 콘크리트의 성능평가를 위하여 쪼갬인장강도, 휨강도, 등가휨강도, 휨인성계수, 경사전단접착강도, 길이변화율, 장기수축거등을 위한 건조수축을 진행하였다. 본 실험에서 사용한 시멘트는 국내산 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 물리적 성질은 표 3-2와 같다. 골재 및 화학 혼화제의 특성은 표 3-3 및 3-4에 각각 나타내었다. 본 연구의 목적을 달성하기 위한 콘크리트의 최적 배합 도출을 위한 배합은 표 3-5에 나타내었다.

표 3-2 1종 보통포틀랜드 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3390	0.05	230	345	24.8	39.9	56.9

표 3-3 골재의 물리적 성질

구분	밀도(g/cm ³)	조립률(%)	흡수율(%)	0.08 mm체 통과량(%)
부순모래	2.63	2.62	1.42	3.00
굵은 골재	2.62	6.48	0.58	-

표 3-4 혼화재료의 물리적 성질

구분	형태	주성분	색상	pH	밀도(g/cm ³)
고성능감수제	액상	음이온계	암갈색	6.5	1.04

표 3-5 콘크리트 배합표

설계 강도 (MPa)	배합 구분	W/B (%)	S/a (%)	단위중량배합(kg/m ³)						Ad. (B%)
				W	C	Slag	Sand	Gravel	Fiber	
30	PLAIN	40	47	165	371	42	804	948	0.0	0.40
	Forta Fiber	40	47	165	371	42	804	948	2.5	0.40
		40	47	165	371	42	804	948	3.5	0.40
		40	47	165	371	42	804	948	4.5	0.40
	Steel Fiber	40	47	165	371	42	804	948	25	0.40
40	PLAIN	30	46	170	503	56	736	878	0.0	0.40
	Forta Fiber	30	46	170	503	56	736	878	0.0	0.40

나. 고인성 보강섬유

섬유의 각각의 물리·화학적 성질은 표 3-6과 같다.

표 3-6 섬유유의 성질

물성항목	Steel Fiber	Forta Fiber
형상비	60	-
유효직경	0.5	-
섬유 길이(mm)	30.02	54, 38
밀도(g/cm ³)	7.85	0.91
인장강도(Mpa)	1,140	570~660
인장신도(%)	3.5	-
탄성계수(Gpa)	200	4.67
산/알칼리저항성	부식성 있음	이상없음



그림 3-5 Steel Fiber의 형상



그림 3-6 Forta Fiber의 형상

나. 콘크리트의 혼합

콘크리트의 혼합은 트위 타입 믹서를 사용하였으며, 그림 3-7의 순서에 따라 실시한다. 즉, 강제식 팬타입 믹서에 시멘트, 골재를 투입한 다음 건비빔을 30초간 저속(20 rpm)으로 실시하고, 건비빔 후 물을 넣고 60초간 중속(30 rpm)으로 비빔 후, 혼화제 및 보강섬유를 첨가하여 고속(40 rpm)으로 90초간 다시 비빔하여 혼합을 완료하였다. 그림 3-8 에서는 콘크리트 믹싱과정 및 출하과정을 그림 3-9에 나타내었다.

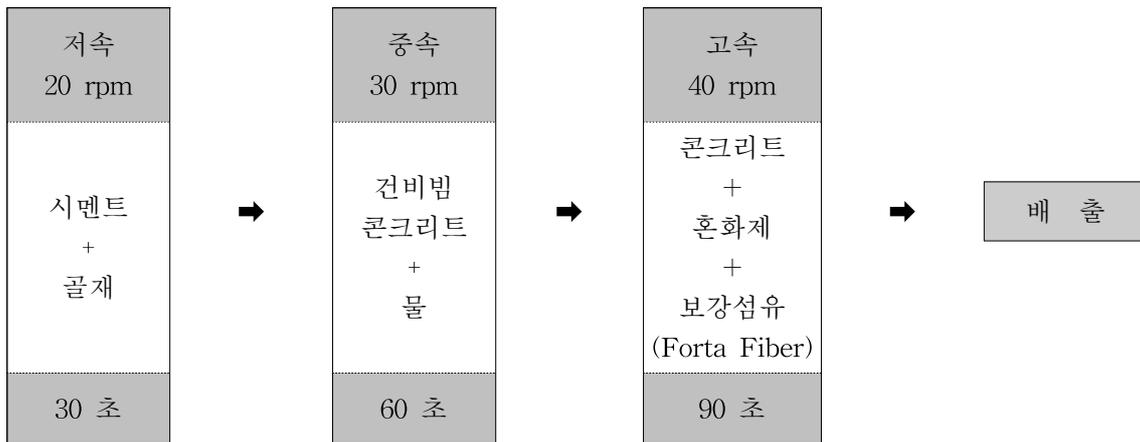


그림 3-7 콘크리트의 혼합과정



그림 3-8 콘크리트 혼합 믹서(a)



그림 3-9 콘크리트 혼합 믹서(b)

제3절 슬럼프/공기량

굳지 않은 콘크리트의 유동성 평가로서 슬럼프 시험을 KS F 2594 및 ASTM C 143 규정에 의거하여 수행하였다. 그림 3-10 ~ 그림 3-11은 슬럼프 측정하는 모습을 나타내고 있다.



그림 3-10 115mm 슬럼프 측정광경



그림 3-11 120mm 슬럼프 측정광경

굳지 않은 콘크리트의 공기량 평가를 위하여 KS F 2421 및 ASTM C 231 규정에 의거하여 수행하였다. 그림 3-12 ~그림 3-13은 슬럼프 플로우 측정하는 모습을 나타내고 있다.



그림 3-12 500mm 도달시간 측정



그림 3-13 슬럼프 플로우 측정

제4절 압축강도/탄성계수

압축강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2405 및 ASTM C 873의 규정에 의거 측정하며, 그림 3-14와 같은 200 TON UTM을 사용하여 ASTM D3039를 사용하여 탄성계수를 측정하였다.



그림 3-14 압축강도 시험

$$\text{압축강도 공식} = \frac{\text{파괴시 하중}(P)}{(\text{단면적})A} = \frac{P}{\pi r^2} \quad \text{식(3-3)}$$

P : 최대 하중
r : 반지름

제5절 쪼갬인장강도

쪼갬 인장 강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2423 및 ASTM C496의 규정에 의거 측정하며, 그림 3-15와 같은 200 TON UTM을 사용하여 측정하였다.



그림 3-15 쪼갬인장강도 시험

$$\text{인장강도 공식} = \frac{2P}{\pi dl} \quad \text{식(3-4)}$$

P : 최대하중
d : 시험체의 지름
ℓ : 시험편의 길이

제6절 휨강도/등가휨강도/휨인성계수

휨강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2408 및 ASTM C 293의 규정에 의거 0.01mm/min 속도의 변위조절 방식으로 측정하였으며, 그림 3-16과 같은 200 TON UTM 을 사용하여 측정하였다. 이 때 휨 시험체의 처짐량을 측정하여 KS F 2566 및 ASTM C 1609에 따라 등가휨강도와 휨인성계수를 도출하였다.



그림 3-16 휨강도 시험



그림 3-17 휨인성계수 측정

$$\text{휨강도} = \frac{Pl}{bh^2} \quad \text{식(3-5)}$$

P : 최대하중
ℓ : 시험편의 지간길이
b, h : 시험편의 폭, 높이

$$\text{등가휨강도} = \frac{Tb}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \quad \text{식(3-6)}$$

Tb : 기준 처짐까지의 휨강도
: 기준 처짐(ℓ/150)
δ (지간이 30cm인 경우 2mm, 45mm인 경우 3mm)
ℓ : 시험편의 지간길이
b, h : 시험편의 폭, 길이

$$\text{휨인성계수} = \frac{f_e}{f_r} \times 100 \quad \text{식(3-7)}$$

f_e : 등가휨강도
f_r : 휨강도

제7절 경사전단접착강도

압축강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2760 및 ASTM C 882의 규정에 의거 측정하며, 그림 3-18과 같은 200 TON UTM을 사용하여 측정하였다.



그림 3-18 경사전단접착강도 시험

$$\text{경사전단접착강도 공식} = \frac{\text{파괴시 하중}(P)}{(\text{단면적})A} \quad \text{식(3-8)}$$

P : 최대 하중
A : 단면적

제8절 길이변화율

길이변화율은 KS F 2424과 ASTM C 157 규정에 따라 각선기를 사용하여 측정하였다.

$$\text{길이변화율}(\%) = \frac{(x_{01} - x_{02}) - (x_{i1} - x_{i2})}{L_0} \times 100 \quad \text{식(3-9)}$$

L_0 : 기준길이
 x_{01}, x_{02} : 각 기준으로 한 시점에서의 측정치
 x_{i1}, x_{i2} : 각각 시점 I에서의 측정치



그림 3-19 길이변화율

제9절 건조수축

본 시험체는 KS F 2403에 준하여 제작하며 공시체의 제작 및 양생 중의 온도는 표준으로서 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 한다. 콘크리트의 길이변화(건조수축) 실험에서는 KS F 2424와 ASTM C 157의 규정에 준하여 실시하였으며, 온도 및 습도를 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 및 $60\pm 5\%$ 로 유지할 수 있는 항온항습 설비 내에서 보관하였다. 균열이 발생하는 시점, 혹은 목표시점까지 관찰하는 방식으로 $100\times 100\times 400\text{mm}$ 각주형 공시체에 매립게이지를 공시체 중심부에 위치시킨 후 각 배합당 3EA씩 제작 하였으며, 각 변수별 제작된 시험체는 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 및 $60\pm 5\%$ 로 유지되는 항온항습실에서 그림 3-25과 같이 제령별 건조수축 변형률을 측정하였다. 이때 변형률은 매립용 Strain Gage를 사용하여 측정한 값을 가지고 사용하여 분석하였다. 그림 3-20에서 그림 3-25까지는 건조수축 변형 측정을 위한 콘크리트 제조과정 및 수축시험 모습을 나타내었다.



그림 3-20 콘크리트 혼합



그림 3-21 슬럼프 측정(a)



그림 3-22 공기량 측정



그림 3-23 건조수축시험 몰드



그림 3-24 매립게이지 거치



그림 3-25 건조수축 시험 전경

제4장

품질성능 시험평가 및 결과 분석

- 제1절 보강섬유 인장강도/탄성계수
- 제2절 슬럼프/공기량
- 제3절 압축강도/탄성계수
- 제4절 쪼갬인장강도
- 제5절 휨강도/등가휨강도/휨인성계수
- 제6절 경사전단접착강도
- 제7절 길이변화율
- 제8절 건조수축

제4장 실험 및 결과 분석

제1절 보강섬유 인장강도/탄성계수

표 4-1은 고인성 포타 섬유의 인장강도와 탄성계수를 측정한 결과를 나타내고 있으며, 그림 4-1은 응력-변형도 곡선으로 나타낸 것이다. 포타 섬유의 인장강도는 평균 684 MPa로 나타났으며, 탄성계수는 약 4.87 GPa로 나타났다. 기존 합성섬유와 비교한 결과치에서도 포타 섬유의 인장강도와 탄성계수는 동등 이상의 유사한 수준을 나타내고 있으며, 콘크리트 혼입에 많이 사용되고 있는 PP섬유의 인장강도 약 500MPa이며 탄성계수 5GPa와 비교할 때에도 유사하게 나타났다.

그림 4-2에서 알수 있듯이, 고인성 포타 섬유의 응력도-변형도 곡선은 항복점이 잘 나타나고 있으며, 초기 직선형태를 나타내고 있으며, 1차 항복점까지의 Stress값이 급격하게 상승하여 최대 인장강도 시점에서 초기 파단이 이루어지고, 이후 극한 응력까지 완만한 상승 곡선을 그리며 연성 파괴가 나타남을 확인하였다.

표 4-1 포타섬유의 인장강도 및 탄성계수

시험체명	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
1	668	4.85
2	683	4.92
3	667	4.83
4	688	-
5	712	-
평균	683.60	4.87



(a) 섬유 인장 시험(전)



(b) 섬유 인장 시험(전)

그림 4-1 포타 섬유 인장 시험

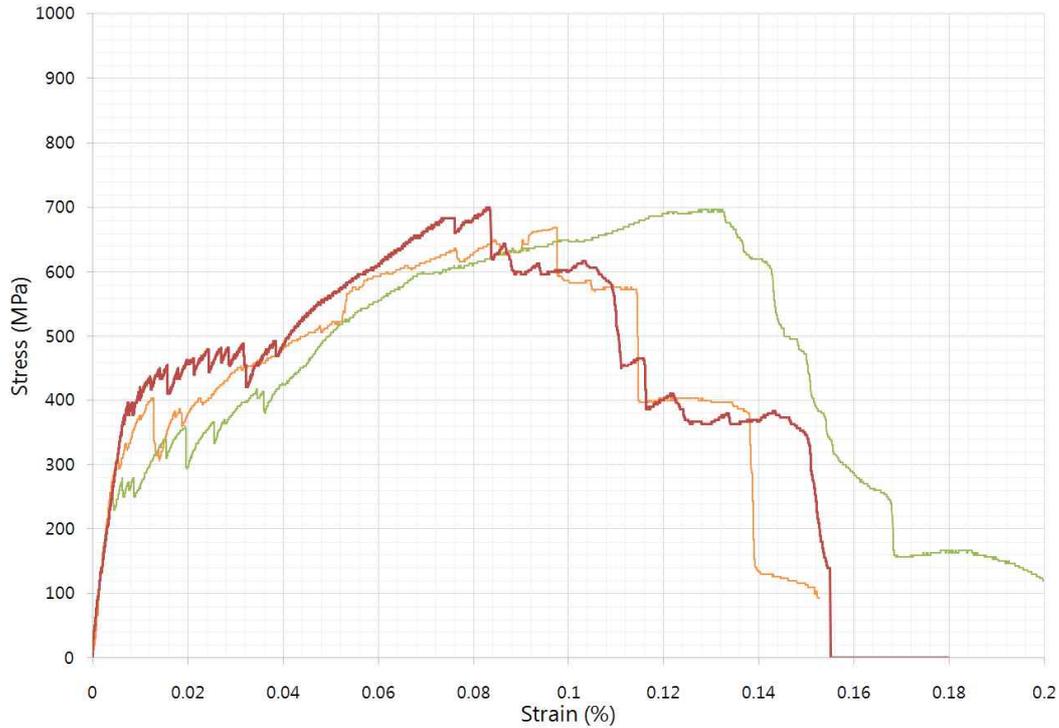


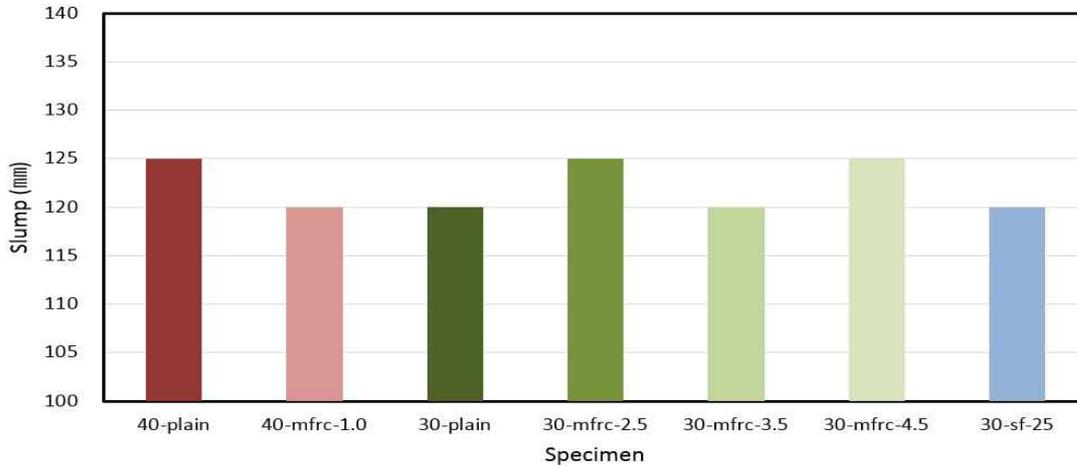
그림 4-2 포타 섬유유 의 응력-변형도 곡선

제2절 슬럼프 및 공기량

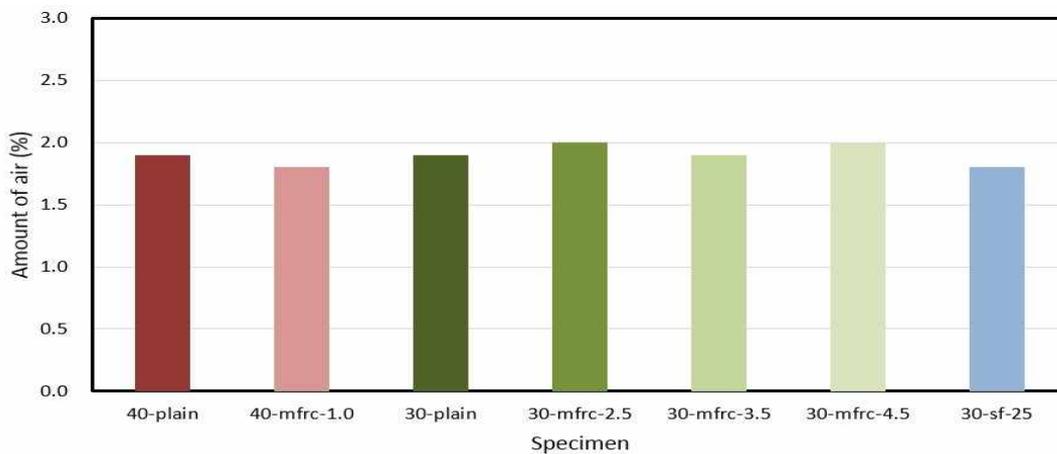
표 4-2는 배합변수에 따른 섬유 혼입에 따른 시험체의 슬럼프와 공기량을 나타낸 표이다. 모든 배합은 목표 슬럼프인 $100\pm 20\text{mm}$ 와 공기량 $2.0\pm 0.5\%$ 를 만족하는 것으로 나타났다.

표 4-2 슬럼프 및 공기량 실험결과

시험체명	슬럼프 (mm)	공기량 (%)
40-plain	125	1.9
40-mfrc-1.0	120	1.8
30-plain	120	1.9
30-mfrc-2.5	125	2.0
30-mfrc-3.5	120	1.9
30-mfrc-4.5	125	2.0
30-sf-25	120	1.8



(a) 슬럼프 측정결과



(b) 공기량 측정결과

그림 4-3 슬럼프, 공기량 측정 시험결과 그래프

제3절 압축강도/탄성계수

압축강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2405 및 ASTM C 873 의 기준에 의거 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였으며, 표 4-3과 표 4-4와 그림 4-4은 각각 40 MPa급 콘크리트와 30MPa급 콘크리트의 압축강도를 나타낸 실험 결과이며, 표 4.5는 콘크리트의 탄성계수를 나타낸 표이다. 40MPa급 콘크리트의 40-Plain 배합의 압축강도 경우 전반적으로 강도발현이 이루어져 재령 28일에서 목표 강도인 40 MPa이상 나타났다. 포타섭유를 1.0% 혼입한 경우인 40-MFRC-1.0의 압축강도에서는 47.08MPa로 나타나 40-Plain을 상회하는 값을 나타내었으며, 탄성계수는 무혼입과 유사하였다.

30MPa급 콘크리트인 30-Plain의 압축강도는 28일재령에서 30MPa이상으로 나타나 목표강도에 도달하는 것으로 나타났다. 포타섭유를 혼입한 경우 섭유혼입율 2.5%인 30-MFRC-2.5에서 압축강도 37MPa로 나타나 30-Plain을 상회하는 것으로 나타났다. 포타섭유 혼입율이 3.5%로 증가하면서 30-MFRC-3.5의 압축강도는 30.94MPa로 30-Plain

과 유사한 것으로 나타났다. 강섬유를 2.5% 혼입한 30-SF-2.5의 경우에는 압축강도의 증진은 나타나지 않았으며, 30-Plain과 유사한 것으로 나타났다. 탄성계수는 무혼입, 강섬유, 포타섬유 혼입의 순으로 증가하는 것으로 나타나, 압축 파괴시 섬유 내부 구속으로 변형이 억제되어 탄성계수가 증가된 것으로 판단된다.

표 4-3 40MPa급 콘크리트의 압축강도 실험결과

시료명 days	압축강도 (MPa)			
	40-Plain		40-MFRC-1.0	
	평균	측정값	평균	측정값
3일	31.55	32.01	38.70	38.52
		31.39		38.69
		31.24		38.88
7일	37.08	37.95	45.27	46.45
		37.23		45.10
		36.07		44.27
28일	41.38	44.07	47.08	44.95
		41.64		47.29
		38.44		49.00

표 4-4 30MPa급 콘크리트의 압축강도 실험결과

시료명 days	압축강도 (MPa)									
	30-Plain		30-MFRC-2.5		30-MFRC-3.5		30-MFRC-4.5		30-SF-25	
	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값
3일	20.97	21.76	24.27	24.62	23.41	23.37	20.76	21.46	20.91	20.64
		20.89		24.21		23.42		20.70		20.92
		20.27		24.00		23.45		20.12		21.17
7일	27.06	26.73	32.97	32.79	27.71	25.70	28.44	28.34	28.93	28.17
		26.85		32.91		27.42		28.42		29.11
		27.60		33.21		30.02		28.57		29.50
28일	31.98	31.82	37.09	37.77	31.84	32.42	30.94	30.43	30.10	27.53
		31.98		37.11		32.34		31.22		30.03
		32.14		36.39		30.76		31.18		32.75

표 4-5 콘크리트의 탄성계수

시험체명	탄성계수 (MPa)
40-plain	34,976
40-mfrc-1.0	35,420
30-plain	27,694
30-mfrc-2.5	30,647
30-mfrc-3.5	30,955
30-mfrc-4.5	29,182
30-sf-25	28,146

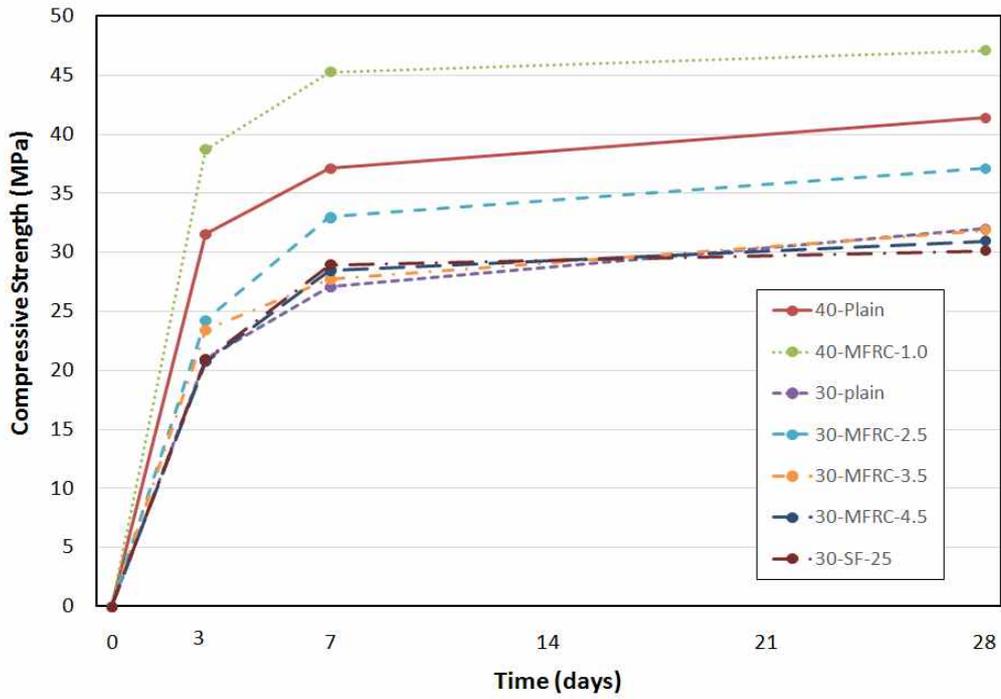


그림 4-4 압축강도 실험결과

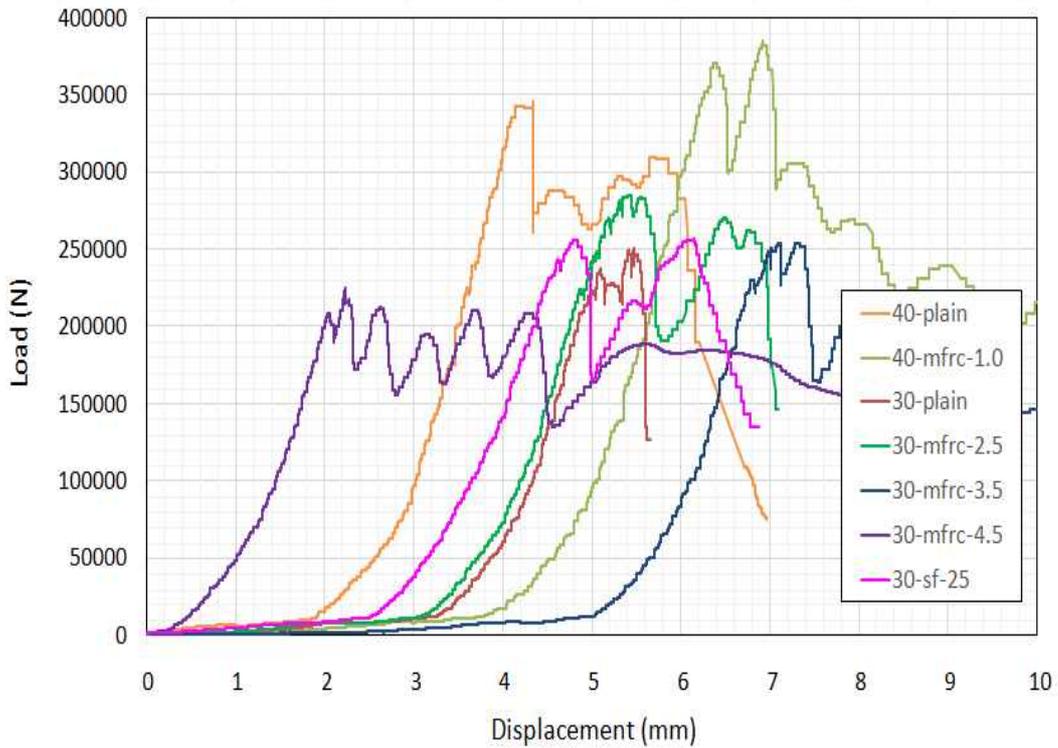


그림 4-5 하중-변위 실험결과



(a) 40-Plain



(b) 40-MFRC-1.0



(c) 30-Plain



(d) 30-MFRC-2.5



(e) 30-MFRC-3.5



(f) 30-MFRC-4.5



(e) 30-SF-25



(f) 압축강도 시험후 시험체 전경

그림 4-6 압축강도 시험체 전경

제4절 쪼갬인장강도

쪼갬인장강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2423 및 ASTM C 496의 기준에 의거 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였으며, 표 4-6와 표 4-7와 그림 4-7은 각각 40MPa급 콘크리트와 30MPa급 콘크리트의 쪼갬 인장 강도를 나타낸 실험 결과이며, 배합 변수별 재령 경과에 따른 쪼갬 인장 강도 실험결과를 나타낸다. 40MPa급 콘크리트의 40-Plain 배합의 쪼갬 인장 경우 전반적으로 강도발현이 이루어져 재령 28일에서 3.2MPa로 나타났다. 포타섬유를 1.0% 혼입한 경우인 40-MFRC-1.0의 쪼갬 인장 강도에서는 3.51MPa로 나타나 40-Plain을 상회하는 값을 나타내었다.

30MPa급 콘크리트인 30-Plain의 쪼갬 인장 강도는 28일 재령에서 2.8MPa이상으로 나타났다. 포타 섬유를 혼입한 경우 섬유혼입율 2.5%인 30-MFRC-2.5에서 30-Plain보다 높은 3.1 MPa의 강도를 보였으며 섬유혼입율이 3.5%인 30-MFRC-3.5에서 쪼갬 인장 강도가 3.2 MPa로 나타나 30-Plain의 강도를 상회하는 것으로 나타났다. 30-MFRC-4.5는 포타 섬유 혼입율이 4.5%로 증가하면서 쪼갬 인장 강도는 3.2 MPa로 30-MFRC-3.5와 유사한 것으로 나타났다. 강섬유를 2.5%혼입한 30-SF-25의 경우에는 쪼갬 인장 강도의 증진은 나타나지 않았으며, 30-Plain과 유사한 것으로 나타났다.

아래 그림 4-8은 콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험 전후의 시험체 상태를 나타낸 것이다. 쪼갬 인장 강도 전 후 시험체의 섬유 무혼입 공시체는 파괴된 후 시험체가 분리된 상태가 되었으며, 섬유가 혼입된 경우에는 분리되지 않은 상태로 유지되는 것으로 나타났다.

표 4-6 40MPa급 콘크리트의 쪼갬인장강도 실험결과

시료명 days	쪼갬인장강도 (MPa)			
	40-Plain		40-MFRC-1.0	
	평균	측정값	평균	측정값
3일	2.7	2.71	2.5	2.56
		2.61		2.51
		2.63		2.57
7일	3.0	2.89	2.8	2.94
		2.94		2.81
		3.13		2.75
28일	3.2	3.26	3.5	3.69
		3.11		3.23
		3.13		3.51

표 4-7 30MPa급 콘크리트의 쪼갬인장강도 실험결과

시료명 days	쪼갬인장강도 (MPa)									
	30-Plain		30-MFRC-2.5		30-MFRC-3.5		30-MFRC-4.5		30-SF-25	
	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값
3일	2.3	2.25	2.2	2.21	2.0	2.05	1.5	1.51	2.1	2.19
		2.28		2.21		2.03		1.46		2.15
		2.31		2.10		1.92		1.52		2.09
7일	2.7	2.61	2.6	2.58	2.7	2.99	2.4	2.46	2.6	2.59
		2.65		2.60		2.59		2.46		2.65
		2.75		2.58		2.62		2.39		2.60
28일	2.8	2.98	3.1	3.53	3.2	3.14	3.2	3.10	3.0	3.37
		2.62		2.74		3.25		3.46		2.86
		2.88		3.11		3.26		2.97		2.87

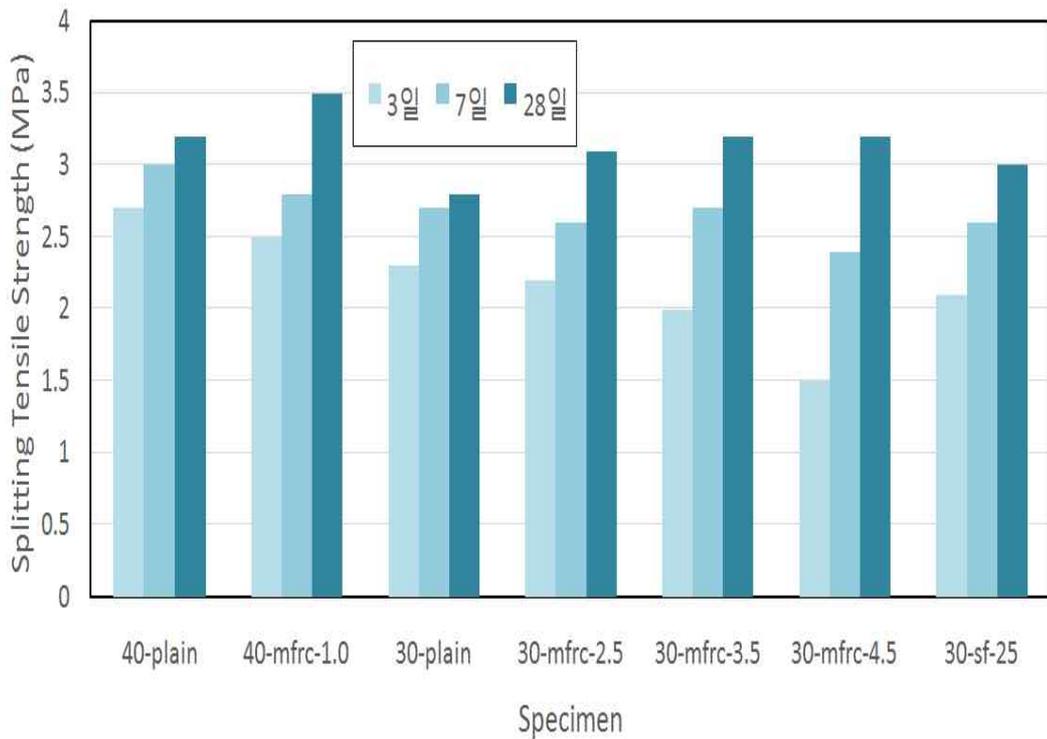


그림 4-7 콘크리트의 쪼갬인장강도



(a) 40-Plain 측정 전 후



(b) 40-MFRC-1.0 측정 전 후



(c) 30-Plain 측정 전 후



(d) 30-MFRC-2.5 측정 전 후

그림 4-8 콘크리트의 포깸 인장 강도 측정 전후 전경(a)



(e) 30-MFRC-3.5



(f) 30-MFRC-4.5



(e) 30-SF-25



(f) 30-Plane와 30-MFRC-4.5의 파괴 성상

그림 4-8 콘크리트의 조깅 인장 강도 측정 전후 전경(b)

제5절 휨강도/등가휨강도/휨인성계수

휨강도 시험은 소정기간 양생이 끝난 후 KS F 2408 및 ASTM C 293의 규준에 의거 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였으며, 표 4-8, 표 4-9와 그림 4-9는 각각 40 MPa급 콘크리트와 30MPa급 콘크리트의 휨 강도를 나타낸 실험 결과이며, 배합변수별 재령 경과에 따른 휨 강도 실험결과를 나타낸다. 40MPa급 콘크리트의 40-Plain 배합의 휨 경우 전반적으로 강도발현이 이루어져 재령 28일에서 5.3 MPa로 나타났다. 포타섬유를 1.0% 혼입한 경우인 40-MFRC-1.0의 휨 강도에서는 6.6 MPa로 나타나 40-Plain을 상회하는 값을 나타내었다.

30MPa급 콘크리트인 30-Plain의 휨 강도는 28일 재령에서 4.3 MPa이상으로 나타났다. 포타 섬유를 혼입한 경우 섬유혼입율 2.5%인 30-MFRC-2.5에서 30-Plain보다 높은 4.8 MPa의 강도를 보였으며 섬유혼입율이 3.5%인 30-MFRC-3.5에서 휨 강도가 5.6 MPa로 나타나 30-Plain의 강도를 상회하는 것으로 나타났다. 30-MFRC-4.5는 포타 섬유 혼입율이 4.5%로 증가하면서 휨 강도는 5.9 MPa로 섬유 혼입율의 증가에 따라 휨강도가 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유를 2.5%혼입한 30-SF-25의 경우에는 휨 강도는 포타섬유 3.5%를 혼입한 경우와 유사한 것으로 나타났다.

표 4-8 40MPa급 콘크리트의 휨강도 실험결과

시료명 days	휨강도 (MPa)			
	40-Plain		40-MFRC-1.0	
	평균	측정값	평균	측정값
3일	5.2	5.52	3.5	3.61
		5.26		3.29
		4.87		3.47
7일	4.5	4.64	5.3	5.51
		4.40		5.26
		4.46		5.17
28일	5.3	5.11	6.6	6.45
		5.57		6.79
		5.25		6.55

표 4-9 30MPa급 콘크리트의 휨강도 실험결과

시료명 days	휨강도 (MPa)									
	30-Plain		30-MFRC-2.5		30-MFRC-3.5		30-MFRC-4.5		30-SF-25	
	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값	평균	측정값
3일	2.5	2.56	2.5	2.50	2.6	2.83	3.4	3.75	2.8	2.77
		2.26		2.18		2.35		3.08		2.84
		2.60		2.69		2.57		3.45		2.73
7일	4.1	4.00	4.0	4.18	4.4	4.45	4.7	4.61	3.8	3.71
		4.27		3.97		4.35		4.61		3.97
		4.13		4.00		4.34		4.74		3.77
28일	4.3	4.17	4.8	4.65	5.6	5.27	5.9	5.84	5.6	5.59
		4.26		4.93		5.58		5.86		5.46
		4.40		4.79		5.90		5.93		5.61

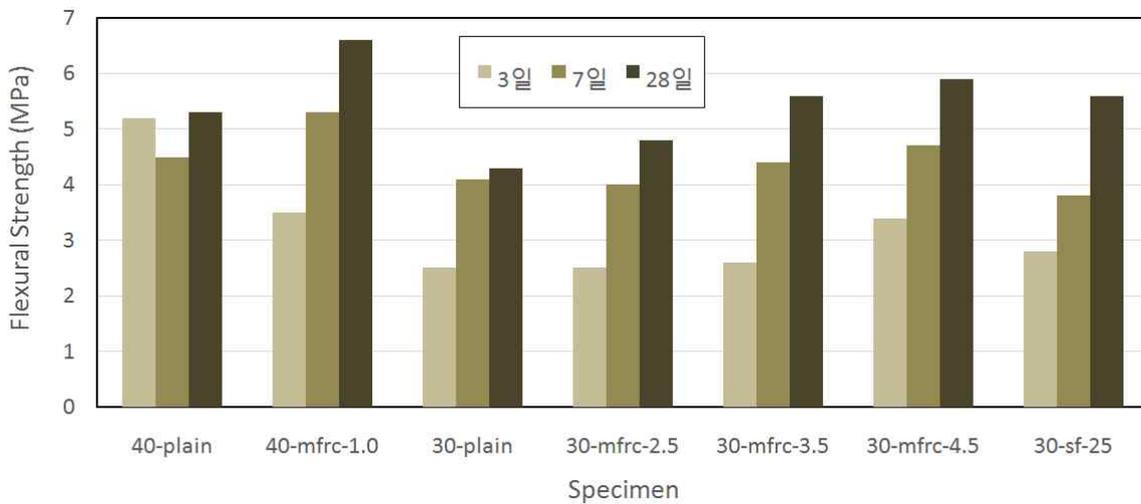


그림 4-9 콘크리트의 휨강도

휨 시험체의 처짐량을 측정하기 위하여, 그림 4-10와 그림 4-11은 각각 40MPa급 콘크리트의 휨 하중-변위 곡선과 30MPa급 콘크리트의 휨하중-변위 곡선을 나타내었다. 이를 기준으로 하여 KS F 2566 및 ASTM C 1609에 따라 등가휨강도와 휨인성계수를 도출하였고, 표 4-10와 그림 4-11와 그림 4-12에서 등가휨강도와 휨인성 실험결과를 정리하였다. 40-Plain의 등가휨강도는 2.6MPa로 나타났으며, 휨인성계수는 49.7%로 나타났다. 40-MFRC-1.0의 등가휨강도는 2.7MPa로 변형저항성이 높은 것으로 나타났으며, 휨인성계수는 40.2%로 나타났다. 이는 40MPa의 고강도 콘크리트가 잔류강도보다 최대 파괴하중까지의 변위량의 증가로 인해 기준 처짐량인 1/150인 2mm 변위까지의 휨인성계수는 40-Plain이 높은 것으로 나타났다.

30MPa급 콘크리트에서의 등가 휨강도는 섬유 혼입율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 포타 섬유 혼입율 4.5%일 때 등가휨강도는 2.8MPa로 최대인 것으로 나타났다.

섬유혼입량에 따른 휨인성계수는 포타 섬유 3.5%까지 증가한 것으로 나타나 인성이 향상되는 것으로 나타났다.

아래 그림 4-14는 콘크리트의 휨 강도 시험 전후의 시험체 상태를 나타낸 것이다. 휨 강도 전 후 시험체의 섬유 무혼입 공시체는 파괴된 후 시험체가 분리된 상태가 되었으며, 섬유가 혼입된 경우에는 분리되지 않은 상태로 유지하고 있는 것으로 나타났다.

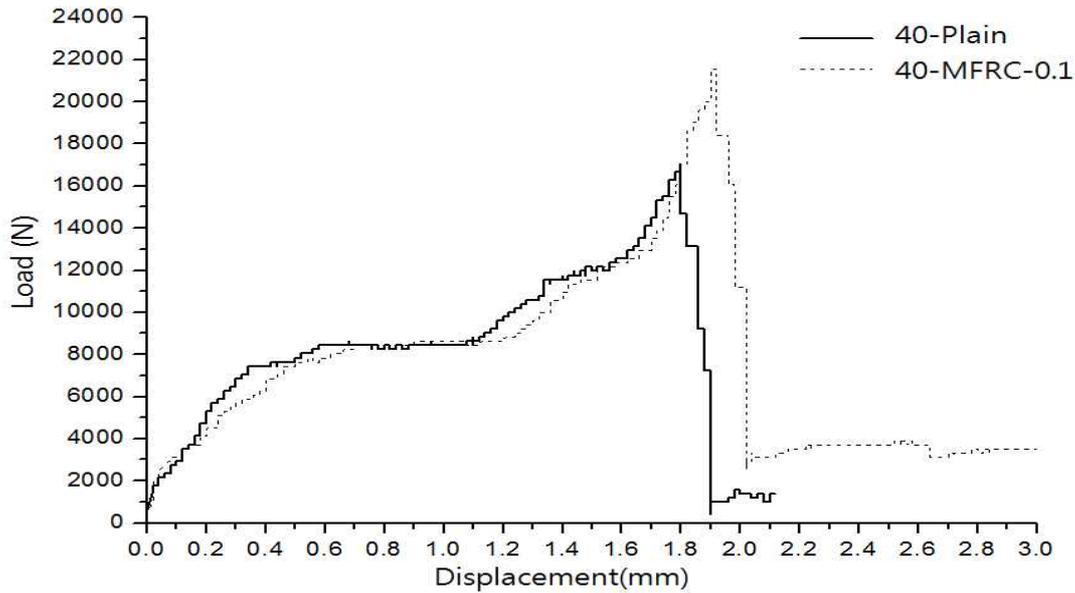


그림 4-10 40MPa급 콘크리트의 휨 하중-변위 곡선

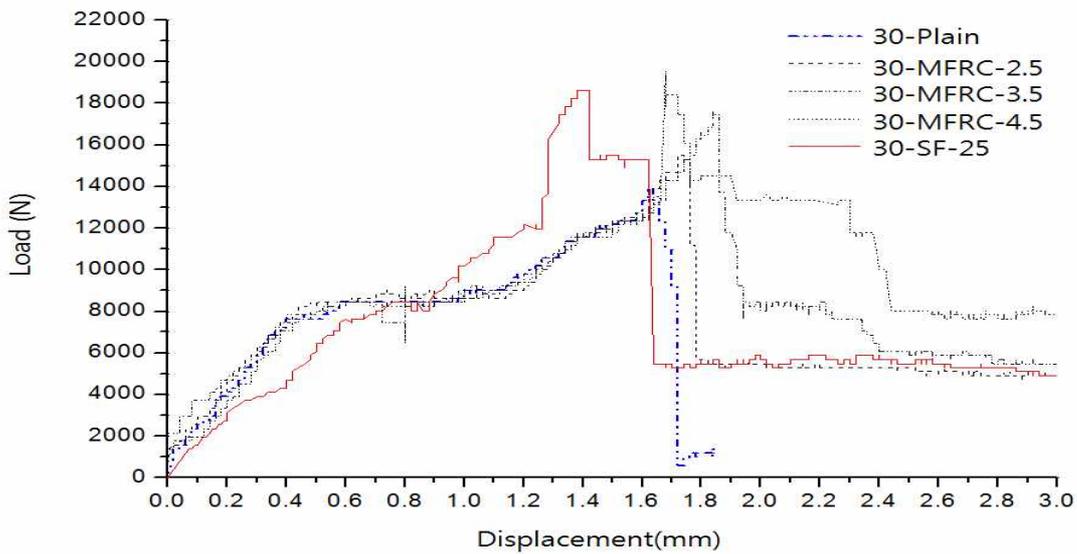


그림 4-11 30MPa급 콘크리트의 휨 하중-변위 곡선

표 4-10 콘크리트의 등가휨강도와 휨인성 실험결과

시험체명	등가휨강도 (MPa)	휨인성계수 (%)
40-plain	2.6	49.7
40-mfrc-1.0	2.7	40.2
30-plain	2.0	46.1
30-mfrc-2.5	2.4	49.9
30-mfrc-3.5	2.7	49.0
30-mfrc-4.5	2.8	47.0
30-sf-25	2.1	37.2

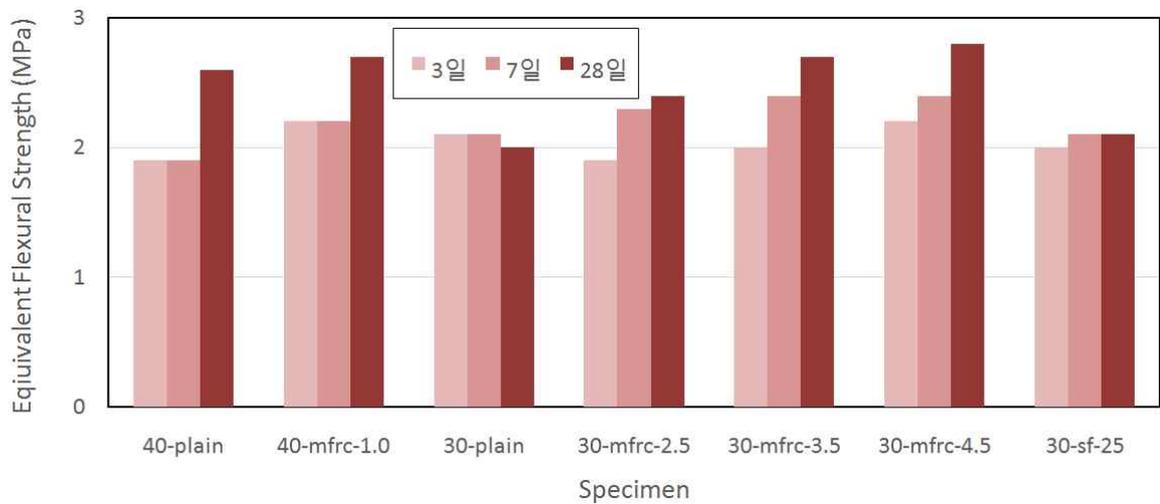


그림 4-12 등가휨강도

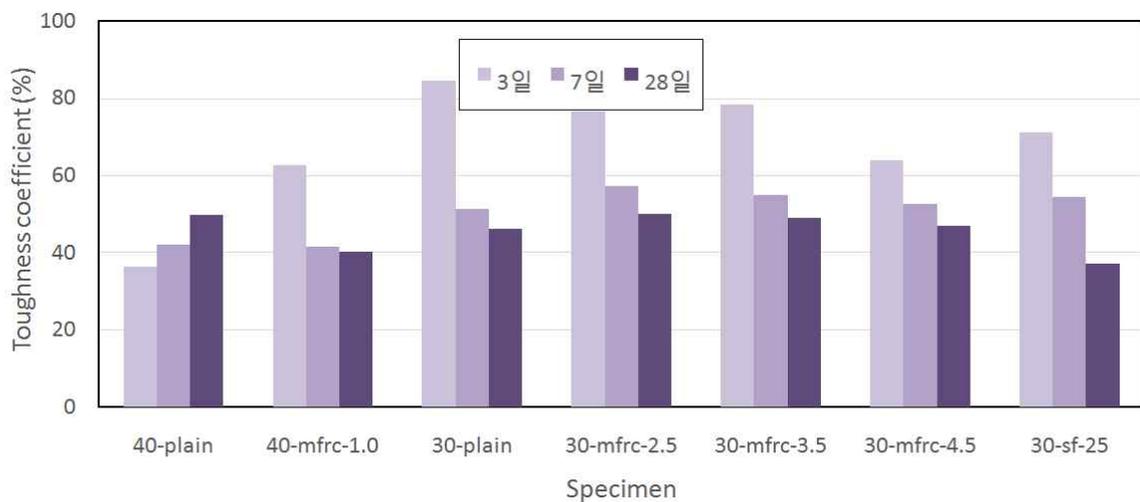


그림 4-13 휨 인성 계수



(a) 40-Plain 측정 전 후



(b) 40-MFRC-1.0 측정 전 후



(c) 30-Plain 측정 전 후



(d) 30-MFRC-2.5 측정 전 후

그림 4-14 콘크리트의 휨강도 측정 전후 전경(a)



(e) 30-MFRC-3.5



(f) 30-MFRC-4.5



(e) 30-SF-25



(f) 30-Plain과 30-MFRC-4.5의 파괴 성상

그림 4-14 콘크리트의 휨강도 측정 전후 전경(b)

제8절 경사전단접착강도

배합변수에 아래 표 4-11과 그림 4-15는 30MPa급 콘크리트의 경사전단접착강도의 실험결과를 나타낸 표와 그래프이다. 경사전단접착강도의 측정 목적은 이어치기 면의 접합력에 대한 안정성과 배합된 콘크리트의 접합력을 측정 평가하기 위한 것이다. 섬유가 혼입된 콘크리트의 경우 매트릭스 내에서 섬유가 외측부로 돌출될 경우에 접합면적의 감소와 표면의 슬립 등으로 인해 접합력 저하의 우려가 있다.

본 실험 결과 30MP급 콘크리트의 경사전단접착강도는 약 6MPa로 나타났으며, 섬유 혼입에 따른 경사전단접착강도의 저하 문제는 발생하지 않는 것으로 나타나 신규 콘크리트의 타설 시 포타 섬유 혼입에 따른 접합력 저하와 구조물의 하자 원인은 없을 것으로 기대되었다. 이는 나선형의 다발 형태의 포타 섬유가 콘크리트 내에 고르게 분산되면서 접착계면의 돌출을 최소화함으로써 인해 경사전단접착강도가 유지된 것으로 판단된다.

표 4-11 30MPa급 콘크리트의 경사전단접착강도 실험결과

시험체명	경사전단접착강도 (MPa)
30-plain	6.3
30-mfrc-2.5	6.4
30-mfrc-3.5	6.1
30-mfrc-4.5	6.4
30-sf-25	6.1

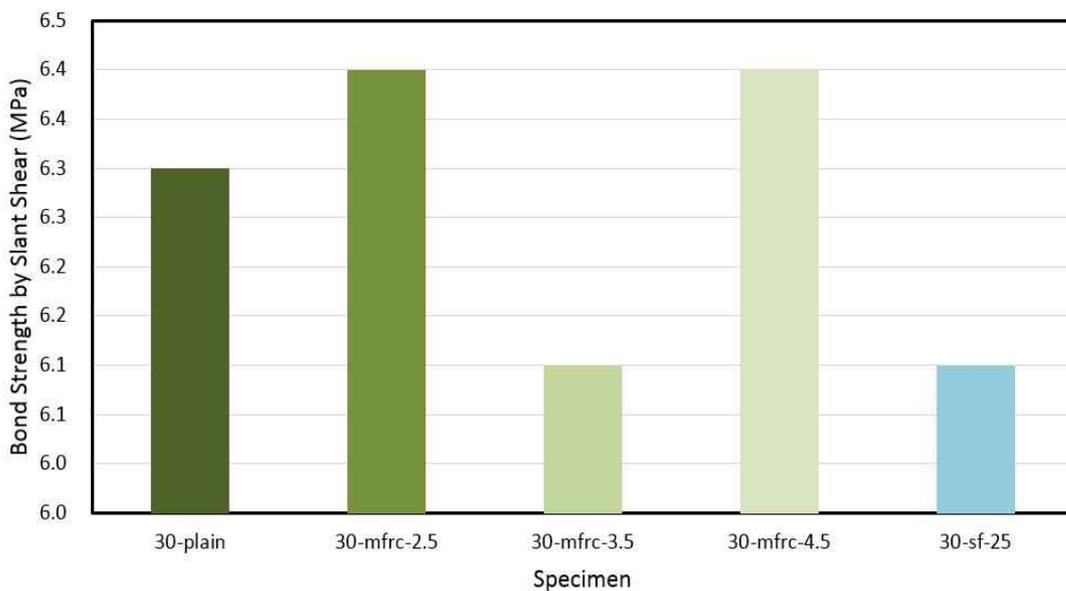


그림 4-15 30MPa급 콘크리트의 경사전단접착강도

제9절 길이변화율

아래 표 4-12과 그림 4-16는 30MPa급 콘크리트의 28일 양생 후의 길이변화율을 측정한 실험 결과를 나타낸 것이다. 30-Plain의 길이변화율은 0.0422%로 나타났으며, 포타 섬유 혼입율이 2.5%혼입된 경우에는 0.0188%로 나타나 포타 섬유 혼입시 길이변화율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 30-MFRC-2.5는 동일한 섬유혼입율을 갖는 강섬유 혼입배합인 30-SF-25보다 낮은 길이변화율을 보이고 있어 고른 분산에 의한 수축억제 효과가 우수한 것으로 나타났다.

표 4-12 30MPa급 콘크리트의 길이변화율 실험결과

시험체명	길이변화율 (%)
30-plain	-0.0422
30-mfrc-2.5	-0.0188
30-mfrc-3.5	-0.0173
30-mfrc-4.5	-0.0170
30-sf-25	-0.0203

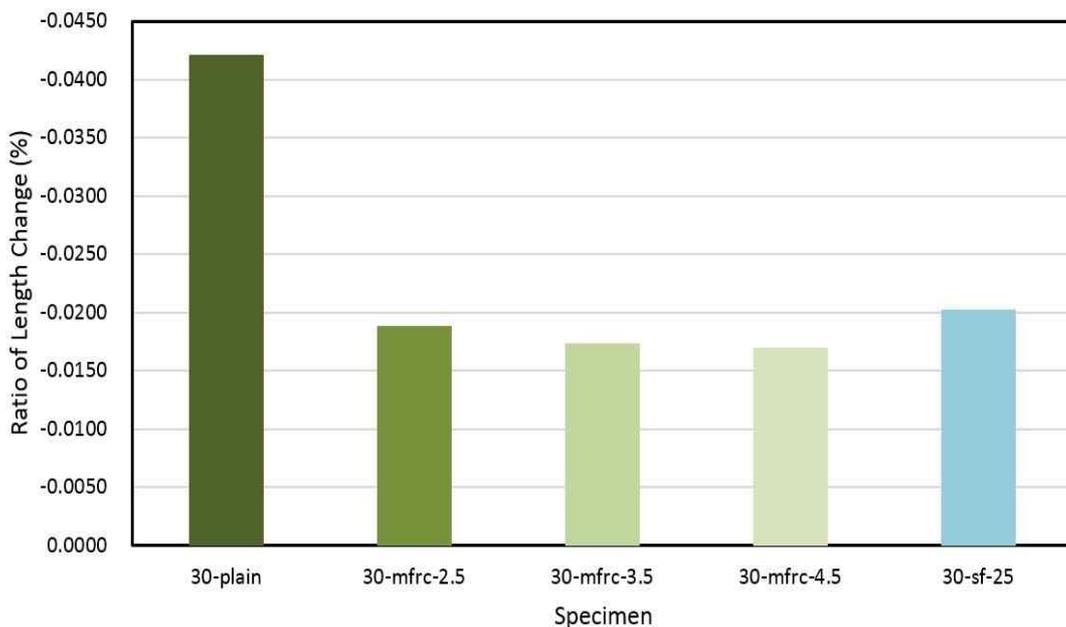


그림 4-16 30MPa급 콘크리트의 길이변화율 시험 결과 그래프

제10절 건조수축

표 4-13은 30MPa급 콘크리트의 최종수축량을 나타내고 있으며, 그림 4-16은 30MPa급 콘크리트의 건조수축량을 나타낸 그래프이다. 30-Plain의 최종수축량은 $-417\mu\text{m}$ 였으며, 포타섬유를 혼입한 경우 최종수축량은 각 배합에 따라 30-MFRC-2.5는 $-399\mu\text{m}$, 30-MFRC-3.5는 $-316\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 30-MFRC-4.5에서는 $-115\mu\text{m}$ 의 값을 나타내어 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 건조수축 경향은 섬유 무혼입 콘크리트가 초기에 급격한 건조수축을 보인 것에 반해 섬유 혼입 콘크리트의 경우 건조수축 거동은 섬유의 혼입량이 증가할수록 건조수축량의 약간 감소하는 경향을 보였다. 동일한 배합 조건에서 섬유 종류 및 혼입에 따른 건조수축량을 비교한 결과, 강섬유를 혼입한 배합 30-SF-25의 경우에는 최종수축량이 $-384\mu\text{m}$ 로 나타나 포타 섬유혼입 배합의 30-MFRC-2.5와 비교시 최종수축량이 더 크게 나타나 포타 보강섬유가 콘크리트의 총 수축 및 균열에 있어서 억제효과가 있음을 확인하였다.

표 4-13 30MPa급 콘크리트의 최종 수축량

시험체명	최종 수축량 (μm)	균열 발생 여부
30-plain	-417	미세균열발생
30-mfrc-2.5	-339	균열없음
30-mfrc-3.5	-316	균열없음
30-mfrc-4.5	-115	균열없음
30-sf-25	-384	균열없음

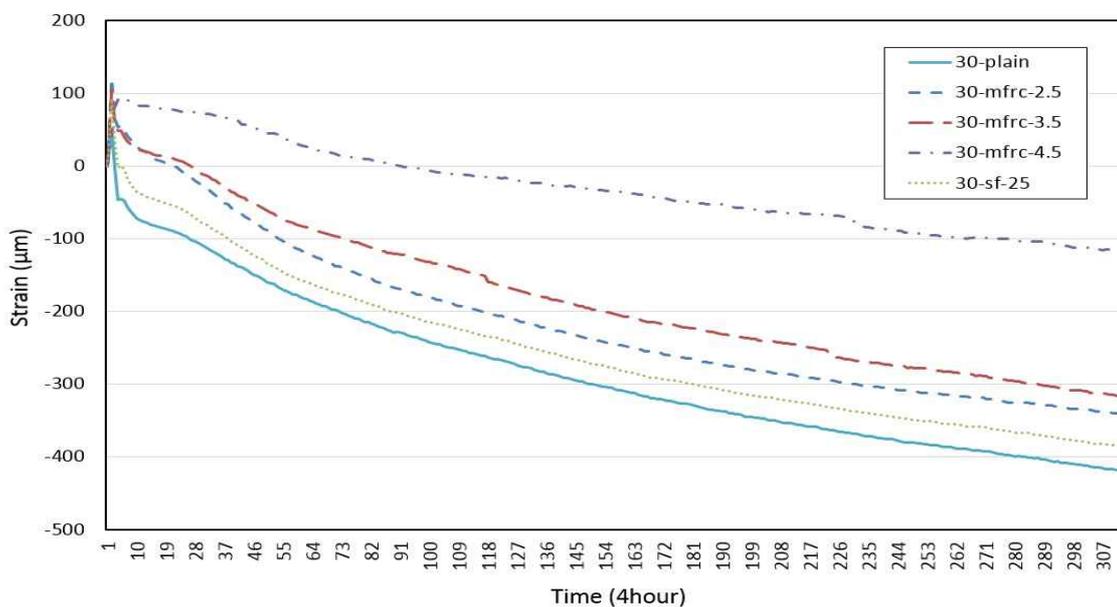


그림 4-17 30MPa급 콘크리트의 건조 수축



(a) 매립형 게이지 설치



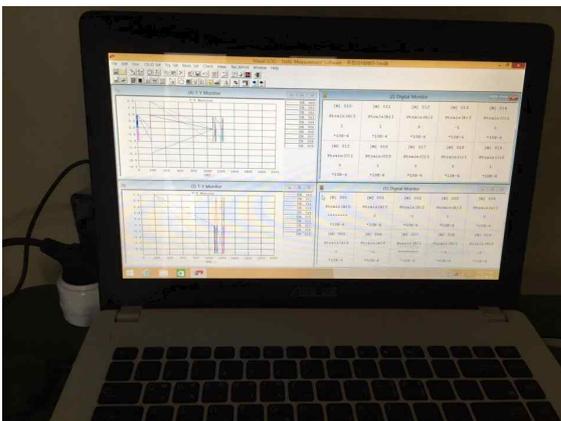
(b) 건조 수축 몰드 준비



(c) 콘크리트 내 매립형 게이지 매립



(d) 건조 수축 몰드 제작 완료



(e) 건조 수축 측정



(f) 건조 수축 측정

그림 4-18 콘크리트의 건조 수축 측정 전경

제5장

결론

제1절 결론

제 5 장 결론

제1절 결론

고인성 섬유보강 콘크리트의 균열제어 성능시험 평가를 위하여 강섬유와 포타섬유를 사용하여 다양한 배합변수로 갖는 시험체를 제작한 뒤 실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 고인성 포타 섬유 인장강도/탄성계수

본 연구에 사용한 포타 섬유의 인장강도와 탄성계수 측정결과 포타 섬유의 인장강도는 684MPa, 탄성계수는 4.87Gpa로 나타났다. 기존 합성섬유의 물성치와 비교한 결과 동등한 것으로 확인되었고, 고인성 포타 섬유의 응력도-변형도 곡선은 항복점이 잘 나타나고 있으며, 초기 직선형태에서, 1차 항복점까지의 Stress값이 급격하게 상승하여 최대 인장강도 시점에서 초기 파단이 이루어지고, 이후 극한 응력까지 완만한 상승 곡선을 그리며 연성 파괴가 나타남을 확인하였다. 이러한 결과로 보아 본 연구에서 사용되는 고인성 포타섬유의 경우 콘크리트 혼입시 인성 강화에 매우 효과적일 것으로 판단된다.

2. 슬럼프/공기량

포타 섬유 혼입에 따른 콘크리트의 슬럼프와 공기량의 변화는 크지 않은 것으로 나타났으며, 목표 슬럼프인 100±20mm와 공기량 2.0±0.5%를 만족하는 것으로 나타났다.

3. 압축강도/탄성계수

압축강도 시험 결과 40 MPa급 콘크리트에서 무혼입의 경우 41.38 MPa로 나타났으며, 포타 섬유 혼입시 47.08 MPa로 압축강도 증진에 효과적인 것으로 나타났다. 30MPa급 콘크리트에서 무혼입의 경우 31.98MPa로 나타났으며, 포타 섬유 혼입시 동등 이상의 압축강도를 발현하였으며, 특히 3.5%의 포타섬유 혼입시 압축강도가 37.09MPa로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유 혼입시에는 압축강도가 OPC와 유사한 것으로 나타나 포타 섬유의 혼입은 강섬유와 비교하였을 때 압축강도 증진에 좀 더 효과적인 것으로 판단되었다. 섬유의 혼입에 의한 압축탄성계수는 증가하는 경향을 나타내었는데 압축 파괴 시 섬유에 의한 내부 구속 효과로 인해 탄성계수가 증가한 것으로 판단된다.

4. 쪼갬인장강도

쪼갬인장시험결과 40MPa급 콘크리트에서는 무혼입의 경우 3.2MPa를 나타내었으며, 포타 섬유 1.0% 혼입시 3.51MPa로 쪼갬인장강도가 증가하였다. 30MPa급 콘크리트에서는 무혼입의 경우 2.8MPa로 나타났으며, 포타 섬유 혼입 증가에 따라 쪼갬 인장강도가 증가하여 최대 3.2MPa로 나타났다. 포타 섬유와 강섬유를 혼입한 경우의 쪼갬 인장 강도를 비교하였을 때 동일 혼입율에서 3.1 MPa과 3.0 MPa으로 나타나 쪼갬인장강도 성능은 유사한 것으로 나타났다.

5. 휨강도/등가휨강도/휨인성계수

휨강도 시험 결과 40MPa급 콘크리트에서 포타섬유 무혼입과 혼입에서 휨강도는 각각 5.3MPa와 6.6MPa로 나타나 휨강도 개선에 효과적인 것으로 나타났다. 30 MPa급 콘크리트에서도 포타 섬유의 휨강도 개선은 무혼입의 경우에서 4.3 MPa의 강도를 발현한데 반해 약 5.9 MPa까지 휨강도 증진 효과에 우수한 것으로 나타났다.

40-Plain의 등가휨강도는 2.6MPa로 나타났으며, 휨인성계수는 49.7%로 나타났다. 40-MFRC-1.0의 등가휨강도는 2.7MPa로 변형저항성이 높은 것으로 나타났으며, 휨인성계수는 40.2%로 나타났다. 이는 40MPa의 고강도 콘크리트가 잔류강도보다 최대 파괴하중까지의 변위량의 증가로 인해 기준 처짐량인 1/150인 2mm 변위까지의 휨인성계수는 40-Plain이 높은 것으로 나타났다.

30MPa급 콘크리트에서의 등가 휨강도는 섬유 혼입율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 포타 섬유 혼입율 4.5%일 때 등가휨강도는 2.8MPa로 최대인 것으로 나타났다.

섬유혼입량에 따른 휨인성계수는 포타 섬유 3.5%까지 증가한 것으로 나타나 인성이 향상되는 것으로 나타났다.

등가휨강도와 휨인성계수에서도 포타 섬유를 혼입할 경우에 인성 증진에 있어 효과적인 것으로 나타났으며, 강섬유에 비해 휨강도 및 등가휨강도 등의 값이 높아 섬유보강에 의한 물성 개선 측면에서 강섬유보다 포타 섬유가 유리한 것으로 판단된다.

6. 경사전단접착강도

콘크리트는 이어치기 및 증축 등과 같은 신규 콘크리트의 접합이 이루어지는데, 이때 콘크리트의 접착력 저하는 신규 콘크리트의 접합부위의 방수성 부족 및 전단력 저하와 같은 하자 요인이 된다. 30 MPa급의 콘크리트에서 포타 섬유의 무혼입과 혼입시의 경사전단접착강도는 약

6 MPa정도로 접합부위의 성능저하 현상은 관찰되지 않았다. 섬유 혼입 시 표면부의 섬유 도출은 접합력이 저하될 수 있는 결함 인자가 될 수 있으나 포타섬유는 과량 혼입 시에도 섬유의 콘크리트 내의 고른 분산 등으로 접합부의 경계면까지 페이스트의 충전성이 확보됨에 따라 접합력 유지에 유리할 것으로 판단된다.

7. 길이변화율

30MPa급 콘크리트에서 섬유 무혼입과 혼입시 길이변화율을 살펴보면 포타 섬유 무혼입시에 비하여 최소 55 ~ 59.7%의 길이변화율 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 동일 혼입율에서 포타 섬유와 강섬유의 길이변화율은 포타 섬유가 동등이상인 것으로 나타났다.

8. 건조수축

건조수축 경향은 섬유 무혼입 콘크리트가 초기에 급격한 건조수축을 보인 것에 반해 섬유 혼입 콘크리트의 경우 건조수축 거동은 섬유의 혼입량이 증가할수록 건조수축량의약간 감소하는 경향을 보였다. 동일한 배합 조건에서 섬유 종류 및 혼입에 따른 건조수축량을 비교한 결과, 강 섬유를 혼입한 배합 30-SF-25의 경우에는 최종수축량이 $-384\mu\text{m}$ 로나타나 포타 섬유혼입 배합의 30-MFRC-2.5와 비교시 최종수축량이 더 크게 나타나 포타 보강섬유가 콘크리트의 총 수축 및 균열에 있어서 억제효과가 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1]. 정인수, “폴리프로필렌섬유보강 시멘트 복합체의 수축균열 및 내구특성에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 석사학위논문, 1999
- [2]. 전우철, “양마섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 적용성에 관한 실험적 연구” 동명대학교 대학원 석사학위논문, 2013
- [3]. 신현섭, “나일론 纖維를 利用한 콘크리트의 基礎的 特性에 관한 研究”, 청주대학교 대학원 석사학위논문, 2007
- [4]. 이방연, “폴리프로필렌 섬유 보강 콘크리트의 인장 성능” 대한건축학회, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 구조계 31(1), 2011.4
- [5]. 오병환, “섬유보강 콘크리트의 전망 및 필요성” 한국콘크리트학회, 콘크리트학회지 8(4), 1996.8, 5-13 (9 pages)
- [6]. 함홍식·윤태호, “폴리프로필렌 및 유리섬유 보강 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구” 대한건축학회, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 34(2), 2014.10
- [7]. 원종필·장필성·김명균·공태웅, “섬유보강 폴리머 시멘트 모르타르의 초기수축균열 및 내구특성” 콘크리트학회, 2004. 04
- [8]. 권민호·박수철·김진섭·서현수, “섬유보강 폴리머 시멘트 모르타르의 특성에 관한 연구” 콘크리트학회, 2012. 05
- [9]. 원종필·김명균·박찬기·김완영·박경훈·장창일, “서로 다른 길이의 PVA 섬유 혼합에 따른 시멘트 복합체의 균열제어 특성” 콘크리트학회, 2006. 05
- [10]. 박용규·주현·전인기·김현우·윤기원, “셀룰로오스 섬유 종류에 따른 콘크리트의 기초 물성 평가에 관한 연구” 한국건축시공학회, 2011. 10
- [11]. 한국도로공사, (2003), “터널 숏크리트 품질기준 개선”. 도로연구소 연구보고서
- [12]. Fernando Pelissera·Almir Barros da S. Santos Netob·Henriette Lebre La Roverec·Roberto Caldas de Andrade Pintoc, “Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking” Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 11, November 2010
- [13]. M. Grzybowski·S.P. Shah, “Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete” ACI Mater J, 87 (2) (1990)
- [14]. N. Banthia·C. Yan “Shrinkage cracking in polyolefin fiber reinforced concrete” American Concrete Institute, Materials Journal, 97(4), 2000
- [15]. Nemkumar Banthia·Rishi Gupta, “Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete” Cement and Concrete Research, 2006. 7
- [16]. 한천구, “섬유보강 콘크리트” 삼표기술강좌, 2012. 12

- [17]. 대림산업 기술연구소 건축연구지원팀, "무근콘크리트 섬유보강재 현장 적용성 검토" 대림산업, pp 2, 2008. 07
- [18]. 한천구·양성환·한민철·송용원, "PP와 NY섬유의 형상비 및 혼입률 변화에 따른 고강도 콘크리트의 폭렬방지 특성" 청주대학교 석사학위 논문, 2008. 07
- [19]. 풍림산업, "섬유를 혼입한 누름콘크리트의 성능 향상에 관한 연구" 청주대학교 건축재료 시공 연구실, pp 2~5, 2011. 05
- [20]. 이상수·김홍섭·남정수·구경원·김규용·함은영, "수분증발조건 및 폴리믹스섬유 혼입에 따른 고강도콘크리트의 수축특성" 춘계학술발표대회 논문집, 12권, 1호, 2012. 02
- [21]. 한천구·한민철·박종섭·정우태·백대현·전규남, "섬유종류 변화에 따른 도로포장용 섬유보강 콘크리트의 기초적 특성에 관한 연구" 한국콘크리트학회논문집, 2009. 12
- [22]. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조물의 균열" 제5회 기술강좌, IV13-IV25, 2000
- [23]. 주부기, "폴리머 시멘트 콘크리트의 물리적 성질에 관한 연구" 조선대학교 석사학위논문, 2002
- [24]. 한천구, (2011), "콘크리트의 특성과 배합설계", 기문당
- [25]. Yoshihiko Ohama Principle of Latex Modification and Some Typical Properties of Latex-Modified and Concrete, ACI materials journal Vol.84, No 4, 1988
- [26]. 박봉수, "비정질 강섬유 보강 콘크리트 슬래브의 건조수축균열", 숭실대학교 석사학위논문 2012
- [27]. 문승호, "콘크리트 구조균열" 기문당, 2014. 03
- [28]. 소양섭·박홍신·조영국, "폴리머 시멘트 모르타르의 개발에 관한 기초적 연구" 대한건축학회 논문집 V.7 No.4 1991
- [29]. Cement & Concrete エソサイクロペディア : 社団法人セメント協會, 1996
- [30]. 武田昭彦, 暑中の生コソクリート, コソクリートジャーナル, Vol4, No.6 1996
- [31]. 김규용·김영덕·조봉석·윤현도·김무한 "국내에서의 섬유보강 시멘트 복합재료의 적용 현황과 수요 전망" 한국콘크리트학회, 콘크리트학회지 18(1), 2006.1
- [32]. 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, (2004), "터널 지보특성 개선을 위한 보강합성섬유 습식 슛크리트 공법 개발", pp. 20 ~ 83
- [33]. 국토해양부, (2009), "시멘트 콘크리트포장 배합설계 잠정지침"
- [24]. 한국도로공사, (2009), "도로설계요령 제4권", pp 127 ~ 135
- [35]. (주)매우건설, 대우엔지니어링, (1984), "스�크리트 배합시험 연구보고서", pp.22 ~ 28.
- [36]. 양재경, (2005) "강섬유보강 슛크리트의 성능 향상을 위한 실험적 연구" 고려대학교 석사학위논문
- [37]. 오요환, 김용철, 김은경, 김군수, (2007), "콘크리트포장의 압축강도와 휨강도의 상관관계 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표 논문집 , pp. 1025 ~ 1028.

공인시험기관 시험성적서

1. Forta Fiber 섬유인장강도 및 탄성계수[국문/영문]
2. 30MPa급 섬유보강 콘크리트 PLAIN 배합[국문/영문]
3. Forta Fiber 혼입(2.5kg/m³) 배합[국문/영문]
4. Forta Fiber 혼입(3.5kg/m³) 배합[국문/영문]
5. Forta Fiber 혼입(4.5kg/m³) 배합[국문/영문]
6. Steel Fiber 혼입(25kg/m³) 배합[국문/영문]
7. 40MPa급 섬유보강 콘크리트 PLAIN 배합[국문/영문]
8. Forta Fiber 혼입(1.0 kg/m³) 배합[국문/영문]

1. Forta Fiber 섬유인장강도 및 탄성계수[국문/영문]



성적서번호 : KCTL-B-17-01006
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크빌 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

시험성적서

1. 접수 번호 : KCTL-16-01605
2. 기관 명 : 서문건설(주)
3. 주 소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시 료 명 : Forta 섬유
5. 성과이용목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단 위	시험결과 값	시험방법	비 고
인장강도	MPa	684	ASTM D 3039 : 2008	n≥5 n=시료수
인장탄성계수	GPa	4.87		

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.



작성자 : 이 재 호

승인자 : 이 용 수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원 

KCTL-TP-22-08(00)



Korea Concrete Testing Laboratory

*진위여부 확인은 상단 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01605
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : FORTA-FERRO
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty
Tensile strength	MPa	684	ASTM D 3039 : 2008	Number of Specimens, n≥5
Tensile Young' s modulus	GPa	4.87		

END.



Measurements performed by Name : Lee, Jae Ho		Approved by Name : Lee, Yong Soo	
---	---	-------------------------------------	---

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

2. 30MPa급 섬유보강 콘크리트 PLAIN 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01007
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접수 번호 : KCTL-16-01606
2. 기관 명 : 서문건설(주)
3. 주 소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시 료 명 : 30MPa-Plain콘크리트
5. 성과 이용 목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단위	시험결과 값		시험방법	비고
슬럼프	mm	120		ASTM C143 : 2009	n≥3 n=시료수
공기량	%	1.9		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	21.0	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	27.1		
		재령 28일	32.0		
압축탄성계수	MPa	27 694		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	2.5	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	4.1		
		재령 28일	4.3		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.0	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	46.1	ASTM C1609 : 2007	
쪼갠인장강도	MPa	재령 3일	2.3	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	2.7		
		재령 28일	2.8		
경사전단접착강도	MPa	재령 28일	6.3	ASTM C882 : 2005	
길이변화율	%	-0.0422		ASTM C157 : 2008	
건조수축	-	미세균열발생		JIS A 1151 : 2002	

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호

승인자 : 이 용 수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원



KCTL-TP-22-08(00)

Korea Concrete Testing Laboratory

* 진위여부 확인은 상단 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01606
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 30MPa-Plain Concrete
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty	
Slump	mm	120	ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n≥3	
Air content	%	1,9	ASTM C231 : 2009		
Compressive strength	MPa	curing 3days	21,0		ASTM C873 : 2004
		curing 7days	27,1		
		curing 28days	32,0		
Compressive Young' s modulus	MPa	27 694	ASTM C873 : 2004		
Flexural strength	MPa	curing 3days	2,5		ASTM C293 : 2008
		curing 7days	4,1		
		curing 28days	4,3		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2,0		ASTM C1609 : 2007
Flexural toughness index	%	curing 28days	46,1		ASTM C1609 : 2007
Split tensile strength	MPa	curing 3days	2,3		ASTM C496 : 2004
		curing 7days	2,7		
		curing 28days	2,8		
Bond strength by slant shear	MPa	curing 28days	6,3	ASTM C882 : 2005	
Ratio of length change	%	-0,0422	ASTM C157 : 2008		
Shrinkage	-	fine crack	JIS A 1151 : 2002		

END.

Measurements performed by
 Name : Lee, Jae Ho



Approved by
 Name : Lee, Yong Soo



※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

3. Forta Fiber 혼입(2.5kg/m³) 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01008
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접 수 번 호 : KCTL-16-01607
2. 기 관 명 : 서문건설(주)
3. 주 소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시 료 명 : 30MPa-Forta 섬유 혼입 콘크리트(2.5kg/m³)
5. 성과 이용 목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단위	시험결과 값		시험방법	비고
슬럼프	mm	125		ASTM C143 : 2009	n≥3 n=시료수
공기량	%	2.0		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	24.3	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	33.0		
		재령 28일	37.1		
압축탄성계수	MPa	30 647		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	2.5	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	4.0		
		재령 28일	4.8		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.4	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	49.9	ASTM C1609 : 2007	
포괘인장강도	MPa	재령 3일	2.2	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	2.6		
		재령 28일	3.1		
경사전단점착강도	MPa	재령 28일	6.4	ASTM C882 : 2005	
길이변화율	%	-0.0188		ASTM C157 : 2008	
건조수축	-	균열없음		JIS A 1151 : 2002	

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호  승인자 : 이 용 수 

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원 

KCTL-TP-22-08(00)

 Korea Concrete Testing Laboratory

* 진위여부 확인은 상단 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01607
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 30MPa-Fora Fiber Concrete(2,5kg/m³)
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty	
Slump	mm	125	ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n≥3	
Air content	%	2.0	ASTM C231 : 2009		
Compressive strength	MPa	curing 3days	24.3		ASTM C873 : 2004
		curing 7days	33.0		
		curing 28days	37.1		
Compressive Young' s modulus	MPa	30 647	ASTM C873 : 2004		
Flexural strength	MPa	curing 3days	2.5		ASTM C293 : 2008
		curing 7days	4.0		
		curing 28days	4.8		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2.4		ASTM C1609 : 2007
Flexural toughness index	%	curing 28days	49.9		ASTM C1609 : 2007
Split tensile strength	MPa	curing 3days	2.2		ASTM C496 : 2004
		curing 7days	2.6		
		curing 28days	3.1		
Bond strength by slant shear	MPa	curing 28days	6.4		ASTM C882 : 2005
Ratio of length change	%	-0.0188	ASTM C157 : 2008		
Shrinkage	-	no cracks in Concrete	JIS A 1151 : 2002		

END.

Measurements performed by
Name : Lee, Jae Ho

Lee Jae Ho
(signature)

Approved by
Name : Lee, Yong Soo

Lee Yong Soo
(signature)

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

4. Forta Fiber 혼입(3.5kg/m³) 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01009
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접수 번호 : KCTL-16-01608
2. 기관 명 : 서문건설(주)
3. 주 소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시 료 명 : 30MPa-Forta 섬유 혼입 콘크리트(3.5kg/m³)
5. 성과 이용 목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단위	시험결과 값		시험방법	비고
슬럼프	mm	120		ASTM C143 : 2009	n ≥ 3 n=시료수
공기량	%	1.9		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	23.4	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	27.7		
		재령 28일	31.8		
압축탄성계수	MPa	30 955		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	2.6	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	4.4		
		재령 28일	5.6		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.7	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	49.0	ASTM C1609 : 2007	
쪼갠인장강도	MPa	재령 3일	2.0	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	2.7		
		재령 28일	3.2		
경사전단접착강도	MPa	재령 28일	6.1	ASTM C882 : 2005	
길이변화율	%	-0.0173		ASTM C157 : 2008	
건조수축	-	균열없음		JIS A 1151 : 2002	

- 위 시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호

승인자 : 이 용 수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원장



Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01608
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 30MPa-Forta Fiber Concrete(3.5kg/m³)
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results		Test method used	Uncertainty
Slump	mm	120		ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n≥3
Air content	%	1,9		ASTM C231 : 2009	
Compressive strength	MPa	curing 3days	23,4	ASTM C873 : 2004	
		curing 7days	27,7		
		curing 28days	31,8		
Compressive Young' s modulus	MPa	30 955		ASTM C873 : 2004	
Flexural strength	MPa	curing 3days	2,6	ASTM C293 : 2008	
		curing 7days	4,4		
		curing 28days	5,6		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2,7	ASTM C1609 : 2007	
Flexural toughness index	%	curing 28days	49,0	ASTM C1609 : 2007	
Split tensile strength	MPa	curing 3days	2,0	ASTM C496 : 2004	
		curing 7days	2,7		
		curing 28days	3,2		
Bond strength by slant shear	MPa	curing 28days	6,1	ASTM C882 : 2005	
Ratio of length change	%	-0,0173		ASTM C157 : 2008	
Shrinkage	-	no cracks in Concrete		JIS A 1151 : 2002	

END.

Measurements performed by
 Name : Lee, Jae Ho

Lee Jae Ho
 (signature)

Approved by
 Name : Lee, Yong Soo

Lee Yong Soo
 (signature)

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

5. Forta Fiber 혼입(4.5kg/m³) 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01010
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접 수 번 호 : KCTL-16-01609
2. 기 관 명 : 서문건설(주)
3. 주 소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시 료 명 : 30MPa-Forta 섬유 혼입 콘크리트(4.5kg/m³)
5. 성과 이용 목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단위	시험결과 값		시험방법	비고
슬럼프	mm	125		ASTM C143 : 2009	n ≥ 3 n=시료수
공기량	%	2.0		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	20.8	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	28.4		
		재령 28일	30.9		
압축탄성계수	MPa	29 182		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	3.4	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	4.7		
		재령 28일	5.9		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.8	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	47.0	ASTM C1609 : 2007	
쪼갠인장강도	MPa	재령 3일	1.5	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	2.4		
		재령 28일	3.2		
경사전단접착강도	MPa	재령 28일	6.4	ASTM C882 : 2005	
길이변화율	%	-0.0170		ASTM C157 : 2008	
건조수축	-	균열없음		JIS A 1151 : 2002	

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호

승인자 : 이 용 수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국 콘크리트 시험원장



KCTL-TP-22-08(00)



Korea Concrete Testing Laboratory

*진위여부 확인은 상단 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01609
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 30MPa-Fora Fiber Concrete(4,5kg/m³)
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty	
Slump	mm	125	ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n≥3	
Air content	%	2,0	ASTM C231 : 2009		
Compressive strength	MPa	curing 3days	20,8		ASTM C873 : 2004
		curing 7days	28,4		
		curing 28days	30,9		
Compressive Young' s modulus	MPa	29 182	ASTM C873 : 2004		
Flexural strength	MPa	curing 3days	3,4		ASTM C293 : 2008
		curing 7days	4,7		
		curing 28days	5,9		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2,8		ASTM C1609 : 2007
Flexural toughness index	%	curing 28days	47,0		ASTM C1609 : 2007
Split tensile strength	MPa	curing 3days	1,5		ASTM C496 : 2004
		curing 7days	2,4		
		curing 28days	3,2		
Bond strength by slant shear	MPa	curing 28days	6,4	ASTM C882 : 2005	
Ratio of length change	%	-0,0170	ASTM C157 : 2008		
Shrinkage	-	no cracks in Concrete	JIS A 1151 : 2002		

END.

Measurements performed by
 Name : Lee, Jae Ho

Lee Jaeho
 Signature

Approved by
 Name : Lee, Yong Soo

(Signature)
 Signature

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

6. Steel Fiber 혼입(25kg/m³) 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01011
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접수 번호 : KCTL-16-01739
2. 기관명 : 서문건설(주)
3. 주소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시료명 : 30MPa-강섬유 혼입 콘크리트(25kg/m³)
5. 성과이용목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단위	시험결과 값		시험방법	비고
슬럼프	mm	120		ASTM C143 : 2009	n ≥ 3 n=시료수
공기량	%	1.8		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	20.9	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	28.9		
		재령 28일	30.1		
압축탄성계수	MPa	28 146		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	2.8	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	3.8		
		재령 28일	5.6		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.1	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	37.2	ASTM C1609 : 2007	
쪼갠인장강도	MPa	재령 3일	2.1	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	2.6		
		재령 28일	3.0		
경사전단점착강도	MPa	재령 28일	6.1	ASTM C882 : 2005	
길이변화율	%	-0.0203		ASTM C157 : 2008	
건조수축	-	균열없음		JIS A 1151 : 2002	

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호

승인자 : 이 용 수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원장



KCTL-TP-22-08(00)

Korea Concrete Testing Laboratory

* 진위여부 확인은 상담 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01739
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 30MPa-Steel Fiber Concrete(25kg/m³)
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty	
Slump	mm	120	ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n≥3	
Air content	%	1.8	ASTM C231 : 2009		
Compressive strength	MPa	curing 3days	20.9		ASTM C873 : 2004
		curing 7days	28.9		
		curing 28days	30.1		
Compressive Young' s modulus	MPa	28 146	ASTM C873 : 2004		
Flexural strength	MPa	curing 3days	2.8		ASTM C293 : 2008
		curing 7days	3.8		
		curing 28days	5.6		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2.1		ASTM C1609 : 2007
Flexural toughness index	%	curing 28days	37.2		ASTM C1609 : 2007
Split tensile strength	MPa	curing 3days	2.1		ASTM C496 : 2004
		curing 7days	2.6		
		curing 28days	3.0		
Bond strength by slant shear	MPa	curing 28days	6.1	ASTM C882 : 2005	
Ratio of length change	%	-0.0203	ASTM C157 : 2008		
Shrinkage	-	no cracks in Concrete	JIS A 1151 : 2002		

END.

Measurements performed by
 Name : Lee, Jae Ho

Lee Jae Ho
 (signature)

Approved by
 Name : Lee, Yong Soo

Lee Yong Soo
 (signature)

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

7. 40MPa급 섬유보강 콘크리트 PLAIN 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01012
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접수번호 : KCTL-16-01740
2. 기관명 : 서문건설(주)
3. 주소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시료명 : 40MPa-Plain 콘크리트
5. 성과이용목적 : 품질관리용

6. 시험결과 :

시험항목	단위	시험결과 값		시험방법	비고
슬럼프	mm	125		ASTM C143 : 2009	n ≥ 3 n=시료수
공기량	%	1.9		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	31.5	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	37.1		
		재령 28일	41.4		
압축탄성계수	MPa	34 976		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	5.2	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	4.5		
		재령 28일	5.3		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.6	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	49.7	ASTM C1609 : 2007	
쪼갠인장강도	MPa	재령 3일	2.7	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	3.0		
		재령 28일	3.2		

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호

이재호

승인자 : 이 용 수

이용수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원장



KCTL-TP-22-08(00)



Korea Concrete Testing Laboratory

*진위여부 확인은 상단 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01740
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 40MPa-Plain Concrete
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty	
Slump	mm	125	ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n≥3	
Air content	%	1,9	ASTM C231 : 2009		
Compressive strength	MPa	curing 3days	31,5		ASTM C873 : 2004
		curing 7days	37,1		
		curing 28days	41,4		
Compressive Young' s modulus	MPa	34 976	ASTM C873 : 2004		
Flexural strength	MPa	curing 3days	5,2		ASTM C293 : 2008
		curing 7days	4,5		
		curing 28days	5,3		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2,6		ASTM C1609 : 2007
Flexural toughness index	%	curing 28days	49,7		ASTM C1609 : 2007
Split tensile strength	MPa	curing 3days	2,7		ASTM C496 : 2004
		curing 7days	3,0		
		curing 28days	3,2		

END.

Measurements performed by
Name : Lee, Jae Ho

Lee Jae Ho
(signature)

Approved by
Name : Lee, Yong Soo

Lee Yong Soo
(signature)

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory

8. Forta Fiber 혼입(1.0 kg/m³) 배합[국문/영문]



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-17-01013
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접 수 번 호 : KCTL-16-01741
2. 기 관 명 : 서문건설(주)
3. 주 소 : 경기도 안산시 단원구 다리간로 8(고잔동, 3층)
4. 시 료 명 : 40MPa-Forta 섬유 혼입 콘크리트(1.0kg/m³)
5. 성과 이용 목적 : 품질관리용

6. 시험 결과 :

시험항목	단 위	시험결과 값		시험방법	비 고
슬럼프	mm	120		ASTM C143 : 2009	n≥3 n=시료수
공기량	%	1.8		ASTM C231 : 2009	
압축강도	MPa	재령 3일	38.7	ASTM C873 : 2004	
		재령 7일	45.3		
		재령 28일	47.1		
압축탄성계수	MPa	35 420		ASTM C873 : 2004	
휨강도	MPa	재령 3일	3.5	ASTM C293 : 2008	
		재령 7일	5.3		
		재령 28일	6.6		
등가휨강도	MPa	재령 28일	2.7	ASTM C1609 : 2007	
휨인성계수	%	재령 28일	40.2	ASTM C1609 : 2007	
쪼갠인장강도	MPa	재령 3일	2.5	ASTM C496 : 2004	
		재령 7일	2.8		
		재령 28일	3.5		

- 위시험은 현장시험결과임.

끝.

작성자 : 이 재 호

승인자 : 이 용 수

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2017 . 02 . 21 .

한국콘크리트시험원장



KCTL-TP-22-08(00)

Korea Concrete Testing Laboratory

* 진위여부 확인은 상단 연락처로 문의요망

Certificate of Test

1. Number of Receipt : KCTL-16-01741
2. Name : Seomun Construction Corporation
3. Address : 8, Darigan-ro, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea
4. Test Sample : 40MPa-Fora Fiber Concrete(1.0kg/m³)
5. Use of Report : Quality Control

6. Test Results :

Test Item	Unit	Test Results	Test method used	Uncertainty	
Slump	mm	120	ASTM C143 : 2009	Number of Specimens, n ≥ 3	
Air content	%	1.8	ASTM C231 : 2009		
Compressive strength	MPa	curing 3days	38.7		ASTM C873 : 2004
		curing 7days	45.3		
		curing 28days	47.1		
Compressive Young' s modulus	MPa	35 420	ASTM C873 : 2004		
Flexural strength	MPa	curing 3days	3.5		ASTM C293 : 2008
		curing 7days	5.3		
		curing 28days	6.6		
Equivalent flexural strength	MPa	curing 28days	2.7		ASTM C1609 : 2007
Flexural toughness index	%	curing 28days	40.2		ASTM C1609 : 2007
Split tensile strength	MPa	curing 3days	2.5	ASTM C496 : 2004	
		curing 7days	2.8		
		curing 28days	3.5		

END.

Measurements performed by Name : Lee, Jae Ho		Approved by Name : Lee, Yong Soo	
---	---	-------------------------------------	---

※ The above test report is the result of the sample which a client submitted.

2017 . 02 . 21 .

Director, Korea Concrete Testing Laboratory