

폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 강도, 인성 및 균열제어 특성 연구

A Study on the Strength, Toughness and Crack Control Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

오 병 환*, 한 승 환**, 차 수 원**, 백 상 현**
Oh, Byung Hwan, Han, Sueng Hwan, Cha, Soo Won, Baik, Sang Hyun

요 약

토목 및 건축재료로서 폴리프로필렌 섬유 모르타르 및 콘크리트의 사용은 미국, 영국 등지에서 개발되기 시작하여 많은 연구가 진행되어 왔는데, 가격이 저렴하고, 화학적인 안정성과 내구성이 우수하여 그 사용이 점차 증대되고 있는 실정이다. 이러한 폴리프로필렌 섬유의 사용은 모르타르 및 콘크리트가 건조나 냉각에 의해 수축될 때, 구속에 의해 발생하는 인장응력 및 균열을 제어하고, 인성의 증가와 충격, 마모, 피로에 대한 저항성, 내구성을 증대시키는 등의 장점을 가지는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 이러한 폴리프로필렌 섬유 모르타르 및 콘크리트의 역학적 거동특성인 압축강도, 인장강도, 인성, 유동성과 균열특성을 실험적으로 규명하고자 하였다.

실험결과 폴리프로필렌의 혼입량이 증가할수록 압축강도, 인장강도, 인성의 증가를 보였으나, 혼입량 0.2% 를 초과할 경우 유동성, 강도 모두 감소하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 단섬유형보다는 메쉬 형태의 폴리프로필렌 섬유가 역학적 특성면에서 우수한 것으로 관찰되었으며, Kraai 방법에 의한 소성수축균열제어 특성 실험에서 약 45%이상의 균열감소(0.1% 혼입) 효과를 볼 수 있었다.

1. 서론

토목 및 건축재료로 널리 사용되는 모르타르 및 콘크리트는 내구성 및 경제적 특성등의 여러가지 잇점에도 불구하고, 인장강도의 취약성과 취성거동으로 인해 국부적인 손상을 일으키기도 하는데, 콘크리트와 모르타르에 사용되는 각종 섬유는 이러한 역학적 단점인 취성을 보완하여 연성을 확보하고 에너지 흡수능력을 증대하기 위하여 개발되었다.

폴리프로필렌 섬유의 사용은 모르타르 및 콘크리트가 건조나 냉각에 의해 수축될때, 구속에 의해 발생하는 인장응력 및 균열을 제어하고, 인성의 증가와 충격(impact), 마모(abrasion), 피로(fatigue)에 대한 저항성을 증대시키고 내구성을 증대시키는 등의 여러가지 장점을 가진다.

본 연구에서는 이러한 폴리프로필렌 섬유 모르타르 및 콘크리트의 기존 논문 및 자료를 분석하였으며, 역학적 거동특성인 압축강도, 인장강도, 인성, 탄성계수, 유동성과 균열 제어특성을 실험적으로 규명하였다.

2. 폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 역학적 특성실험

2.1 개요

섬유보강콘크리트는 콘크리트의 취성거동을 일으키는 낮은 인장강도와 낮은 인장 변형도를 개선시키기 위한 목적과 구속된 콘크리트의

체적변화로 유발되는 국부적인 미세균열을 제어하기 위한 목적으로 사용된다.

폴리프로필렌 섬유를 혼입한 콘크리트의 보강은 콘크리트의 연성을 증대시켜 에너지 흡수능력을 크게하여 파괴의 위험을 감소시키며, 아울러 지진, 바람등의 동적하중과 충격하중에 대한 저항성을 확보한다. 콘크리트는 건조나 온도하강에 의해 체적의 감소가 일어나는데, 구조체가 구속되어 있는 경우, 이 체적의 감소경향은 인장응력을 유발하여 미세 균열을 일으켜, 구조체의 건전성 및 내구성에 영향을 미치게 되는데, 폴리프로필렌 섬유는 소성수축균열, 수차열에 의한 균열, 건조수축에 의한 균열 등에 매우 유용한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 섬유의 종류, 길이, 섬유의 혼입량을 달리한 콘크리트의 연성증대효과를 실험적으로 검증해보고 적용가능성을 검토하고자 한다.

2.2 실험계획 및 실험변수

폴리프로필렌 섬유를 혼입한 콘크리트의 인성과 강도특성을 규명하기 위한 실험을 수행하는데, 섬유의 혼입률과 섬유의 종류(단상 섬유, 메쉬형), 섬유의 길이 등에 의한 영향을 평가하고자 하였다.

강도시험은 7일과 28일 강도를 각 경우별로 측정하여 양생초기와 양생후의 영향을 비교하였다. 그리고 각 경우마다 3개의 시편갯수를 기본으로 제작하였다. (표1)

* 정회원 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원 서울대학교 토목공학과 대학원

표1. 콘크리트 실험 시편의 종류 및 실험변수

시편 번호	섬유 종류	섬유혼입량 (%)	양생 일수 (일)	섬유 길이 (mm)	섬유 굵기 (denier)	비 고	
CF 0-1	단섬유형	0	7	19	30		
CF 0-2			28	19	30		
CF 1-1		0.078	7	19	30		
CF 1-2			28	19	30		
CF 2-1		0.1	7	19	30		
CF 2-2			28	19	30		
CF 3-1		0.16	7	19	30		
CF 3-2			28	19	30		
CF 4-1		0.2	7	19	30		
CF 4-2			28	19	30		
CF 5-1		0.5	7	19	30		
CF 5-2			28	19	30		
CF 6-2			1.0	28	19	30	
CF 7-2			2.0	28	19	30	
CFL 6-2		1.0	28	30	30		
CFM 5-2	메쉬형	0.5	28	19	30		

2.3 실험시편의 제작 및 양생

각 변수에 따른 배합은 240 kg/cm²의 설계강도를 기준강도로 하여 약 300 kg/cm²의 배합강도가 나오도록 배합비가 결정되었는데, 물-시멘트비, 시멘트량, 잔골재, 굵은골재의 배합량은 다음의 표2와 같다.

혼화제로는 고유동화제(superplastizer)가 시멘트량의 0.2%가 첨가되었다.

표 2. 콘크리트 실험시편의 배합비

설계 강도	배합 기준	물시멘트 비	시멘트 량	배합 수량	잔골 재비	잔골 재	굵은 골재
240 (kg/cm ²)	중량	0.51	385	185	0.45	823	1005

비 중 : 잔골재 = 2.6, 굵은골재 = 2.59
 흡수율 : 잔골재 = 1.0%, 굵은골재 = 1.3%
 합수량 : 잔골재 = 0.8%, 굵은골재 = 0.7%

각 변수에 대하여 휨 측정을 위한 10cm x 10cm x 50cm 의 각주형 시편과 압축강도 시험을 위한 ϕ 10cm-20cm의 실린더 시편을 3개씩 제작하였다.

콘크리트의 배합은 시멘트와 골재의 전비법을 수행한 후 배합수를 첨가하여 1분 배합한 후 섬유를 고르게 뿌려 다시 2-3분 정도 믹서에 의한 배합을 수행하였다. 배합이 끝난 후, 타설하고 24시간 이후 탈형하여 25 ± 1 °C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

2.4 실험 및 분석 방법

앞에서와 같이 제작된 시편은 7일 또는 28일의 수중양생을 거치고 1일 건조시킨 이후 MTS 만능 압축, 인장시험기에 의해 압축 및 휨강도 실험을 수행하였다. 압축강도의 경우 최대하중(P)을 구한다음 단면적 (ϕ 10cm, A = 78.54 cm²) 으로 나누어 압축강도 (compressive strength, $\sigma=P/A$)를 구한다. 휨강도의 경우는 단면에서의 최대 휨모멘트 ($M=PL/3$)로부터 연단의 최대인장응력 (flexural tensile strength, $\sigma=My/I$)을 구한다.

2.5 실험결과 및 분석

2.5.1 유동 특성

다음의 표3은 섬유의 혼입량에 따른 slump의 변화로써, 표에서 알 수 있는 바와 같이 섬유의 혼입량에 따라 슬러프가 감소하나 0.2% 까지는 초기값을 조절하여 작업이 가능한 것으로 사료된다. 그러나 0.5%이상, 즉 4500 g/cm³이상의 섬유혼입은 유동성에 특별한 주의가 필요한 것으로 판단되고, 특히 폼핑을 하여 작업하는 경우는 2%이하라도 반드시 시험배합을 통하여 유동성의 확보 여부를 검토하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

표 3 섬유 혼입량에 따른 슬럼프

섬유 혼입량 (g/m ³)	0%	0.078 %	0.1%	0.12 %	0.2%	0.5%	1.0%	2.0%
슬럼프 (cm)	17	15	14	13	8	3	2	1

섬유의 길이에 대한 영향은 섬유의 길이에 따라 슬럼프의 감소량이 약간 큰것으로 나타났으며 mesh 형상의 섬유도 약간 감소하는 비슷한 경향을 보였다. (그림 1)

2.5.2 압축강도 특성

본 연구에서는 섬유혼입량에 따른 압축강도의 변화를 비교분석하였고, 섬유길이 변화 영향, 그리고 섬유의 종류에 따른 영향을 실험적으로 검증하였다.

7일 강도 특성은 일반콘크리트의 7일 강도 특성과 큰 차이점이 발견되지 않고, 28일강도의 약 70%정도가 발현되었다.

그림 2는 19mm폴리프로필렌 섬유의 혼입량에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 그림으로 0.2%(1800g/m³)정도의 혼입까지는 압축강도가 약 12%까지 점차적으로 증가하나 0.2%를 넘어서는 감소하여 1.0% 이상에서는

폴리프로필렌 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트의 압축강도 이하로 급격히 내려가는 것을 알 수 있었다.

섬유의 길이에 따라서는, 섬유의 길이가 길수록 강도의 감소가 발생함을 알 수 있었으나, 단섬유형과 메쉬형의 압축강도특성에 대한 차이점은 매우 작았고 메쉬형이 약간 큰 것으로 결과가 도출되었다.

각 시편의 하중-변위 곡선으로부터 섬유의 혼입량이 증가할수록 최대하중 이후가 완만한 경사로 하중감소가 일어남을 알 수 있다.

특히 섬유가 혼입되지 않은 경우 일정 변형 이후에 시편이 파괴되어 하중저항능력을 상실하나, 섬유가 혼입된 경우는 균열 후에도 상당한 정도 하중저항능력을 상실하지 않고 형상이 유지되는 것으로 볼 수 있었다.

2.5.3 뿔 인장강도 특성

각 변수별로 4점 뿔시험으로 뿔인장강도 실험을 수행하였는데, 각 섬유혼입량에 대한 뿔인장강도의 변화가 다음의 그림.27과 같다. 그림 3에서 보는 바와 같이 체적비로 0.2%까지는 뿔인장강도가 약 22%정도 증가하다가 감소하여 1.0%이상에서는 섬유가 혼입되지 않은 경우보다 더 작게 나오는 것으로 관찰되었다.

섬유의 길이에 따른 영향은 같은 1.0% 혼입량을 갖는 시편을 비교하였는데 19mm의 길이를 갖는 섬유와 30mm길이의 섬유는 30mm가 약간 작은 값을 보였다. 즉 19mm 섬유에서는 43.8975kg/cm²의 인장강도를 보여 2% 감소하였다.

섬유의 종류에 따른 영향은 단섬유보다 메쉬형의 섬유가 약간 작은 뿔인장강도 값을 보였다.

섬유의 혼입량이 0.5%인 경우에 단섬유형은 52.6140kg/cm²의 인장강도를 보였고 메쉬형은 45.8190kg/cm²의 인장강도를 보여 13% 정도 감소한 것으로 나타났다.

2.5.4 하중-변위 (응력-변형도) 관계

압축시험의 경우 섬유의 혼입량이 증가할수록 특히 0.1%이상의 혼입량에서 최대하중 도달 이후의 하중이 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 섬유가 혼입됨으로써 최대하중도달이후 시편의 일부가 분리되어 떨어지는 현상이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다.

19mm, 30mm의 두가지 섬유길이의 비교는 하중-변위 관계에서는 별다른 차이점을 발견할 수 없고, 섬유의 종류 두가지 단섬유형과 메쉬형도 큰 차이점은 보이지 않는다.

뿔시험에 의한 하중-변위 곡선에서는 앞서 언급한 특징들을 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있

다. 특히 섬유의 혼입량이 1.0%, 2.0%에서는 전혀 다른 모양의 하중-변위 관계 곡선이 얻어짐을 알 수 있었다. 최대하중의 50-70% 정도에서 다시 하중을 상당 변위동안 지속하게 된다.

섬유길이의 영향은 30mm길이의 섬유가 19mm길이의 섬유에 비해 약간 더 완만한 변위에 대한 하중저항을 보였고, 메쉬형의 경우 단섬유형에 비해 최대하중 도달이후 거동이 상당히 개선됨을 볼 수 있다.

2.5.5 탄성계수 특성

본 연구에서는 최대하중에 도달하는 선형 구간의 기울기 값을 상대적으로 비교하여 탄성계수 변화를 추정해 보고자 한다.

섬유의 혼입량이 7.2% 이하에서는 섬유가 혼입되지 않은 경우와 큰 차이가 없으나 섬유의 혼입량이 0.5% 이상되는 경우에는 상대적으로 작은 기울기 값을 보였다.

3. 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 뿔 인성 지수 분석

3.1 개요

뿔인성지수의 계산은, 초기균열까지의 면적으로 초기균열변형도의 3배, 5.5배, 10.5배의 변형도에 이르는 에너지를 나누어서 뿔인성지수를 구한다.

섬유의 혼입량에 따른 뿔인성지수의 변화와 섬유의 길이, 종류에 대한 뿔인성지수의 변화를 실험적으로 살펴보았다.

3.2 뿔인성 지수의 정의 및 계산

뿔인성 지수는 섬유콘크리트가 초기균열을 발생하는 동안 요구되는 에너지에 대하여 어느 일정 변형까지 요구되는 총 에너지의 비로 정의된다. 그림4에서처럼 초기균열을 일으키는 변형의 상수배에 해당하는 변형을 일으키는데 필요한 에너지, 즉 면적을 초기균열을 일으키는 하중-변위 면적으로 나누어 정량화한다.

섬유가 혼입된 경우, 섬유의 종류 및 특성에 의해 몇가지 형태의 파괴형태가 나오는데 요약하면 다음과 같다.

a) 콘크리트가 균열을 발생시킨 이후 동시에 섬유가 파괴되는 경우로 혼입량이 작은 합성섬유 계열의 섬유콘크리트에서 주로 발생한다.

b) 콘크리트의 최대강도보다 섬유의 강도가 더 크다 할지라도 최대하중 도달이후 하중이 감소하는데 혼입량이 작은 강섬유 콘크리트의 경우나 합성섬유의 혼입량이 큰 섬유콘크리트의 경우로 나타나는 형태이다.

c) 세번째의 경우는 콘크리트의 균열이 발

생한 이후에도 전체 매트릭스가 더 많은 하중을 지탱하여 인장응력이 증가하는 것으로 인장강도, 변형보다 전체 매트릭스의 최대하중과 최대변형이 더 크다. 섬유 혼입량이 매우 많은 경우에 발생하는 형태이다.

본 연구에서 도출된 폴리프로필렌 섬유가 혼입된 콘크리트의 응력-변형도 곡선은 (a), (b)와 같은 형태이다. 섬유의 혼입량이 적은 0.5% 이하의 경우에 (a)와 같은 형태이고, 0.5% 이상에서는 (b)와 같은 형태로 0.5%일때 중간 형태를 띈다.

이러한 휨인성의 확보는 에너지 흡수능력의 증대로써 피로 및 충격저항성이 증가하는 것을 의미하고 최대하중도달 이후 파쇄저항성 (shatter resistance)의 기능도 증대된다.

3.3 섬유의 혼입량과 길이 및 종류에 따른 휨인성지수의 계산

앞서 기술한 바에 의해 중요성을 갖는 휨인성 지수는 섬유의 혼입량별로 (그림5)와 같은 섬유의 혼입량별 휨인성지수 (I_5, I_{10})를 갖는다.

섬유가 혼입되지 않는 경우의 1.0의 지수값은 최대하중도달 이후 시편이 분리 즉 파쇄되어 버리는 것으로 섬유의 혼입과 동시에 파쇄가 방지되고 휨인성 지수가 증가한다.

그러나 강섬유에 비해 휨인성지수의 값이 섬유혼입량 0.5%이하에서는 크게 증가되지 않는 것으로 나타났는데 이는 섬유자체 강도보다는 섬유의 부착성능에 좌우되기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 섬유의 길이가 길수록 섬유의 종류가 메쉬형인 경우 거의 1.5-2배에 가까운 휨인성지수의 증대를 보였다. 즉 부착면적이 증가할수록 휨인성지수 측면에서 그 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다.

4. 폴리프로필렌 섬유보강 모르타르의 수축균열 저항 특성 실험

4.1 개요

본 장에서는 폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 균열제어 특성을 소성수축균열에 대한 저항성을 실험적으로 살펴봄으로써 고찰하였다. 소성수축균열을 인위적으로 극심하게 유발시켜 섬유의 혼입량과 섬유의 종류에 따른 개선영향을 평가하는데, K. Koverler & J.Sikuler나 A. Khjuria & P. Balaguru 등이 연구했던 결과를 충분히 참고하여 1980년대 중반 Kraai에 의해 수행된 실험방법에 준하여 수행하였다.

4.2 실험계획 및 실험변수

섬유의 혼입에 의한 소성수축균열제어 특성

을 실험적으로 규명하기 위해 섬유가 혼입되지 않은 모르타르와 섬유가 혼입된 모르타르를 섬유의 혼입량별로 비교, 실험하였다. 또한, 섬유의 길이에 대한 영향을 보기 위하여 19mm와 30mm의 두가지 길이의 섬유를 비교, 실험하였다.

본 연구에서 수행된 실험변수 및 시편은 다음의 표4와 같다.

표4 폴리프로필렌섬유 모르타르의 소성수축균열특성 실험 변수

시편번호	섬유종류	섬유혼입량 (%)	양생조건	비고
MF 0-0		0	함온함습자연건조	
MF 0-1		0	함온함습강제건조	
MF 1-1	단상 19mm	0.1	함온함습강제건조	
MF 1-2	단상 19mm	0.15	함온함습강제건조	
MF 1-3	단상 19mm	0.2	함온함습강제건조	
MF 2-1	단상 30mm	0.1	함온함습강제건조	

4.3 실험방법 및 수행

1980년대 중반에 Kraai는 강섬유 및 유리 섬유등 여러가지 섬유의 소성수축균열제어 특성을 연구하기 위하여 얇은 판 형태의 시편을 제작하고 건조시킴으로써 해서 발생하는 표면의 균열을 관찰하였다.

본 연구에서의 모울드는 90 x 60 x 2 cm의 얇은 판 모양으로 바닥은 모르타르의 수축이 원활하도록 비닐막을 설치하였고, 구속효과가 나타나 인장응력을 집중시키도록 90 x 60 cm의 둘레에 10cm간격으로 구속섬유를 설치하였다. 그리고 모울드의 측면은 부피변화가 측벽에 의해 구속되지 않도록 아르킬로 제작하였다.

시험체 모르타르의 배합비는 물 : 시멘트 : 모래가 1 : 2 : 3이고, 0.2% 중량비의 고유동 화제를 첨가하였다. 잔골재 모래의 비중 및 함수비는 앞의 4.3절에서와 같은 재료이다.

전비빔이후 배합수를 첨가하고 비빔을 2-3분 더 수행한 후 섬유가 혼입되는 경우에는 섬유를 고르게 분산, 살포하여 2-3분 더 비빔을 수행한 후 타설한다.

타설된 시편은 양생초기 1시간 경과후 부터 25°C의 50%상대습도에서 건조시키고 시편의 표면에 20-30 m/sec의 바람을 표면에 작용시킨다. 단, 자연건조조건인 경우는 이를 생략한다. 이후 6시간-24시간의 균열진전상황을 관찰한다.

4.4 실험결과 및 분석

항온항습조건에서 건조되는 시편은 3-6시간에서 소성수축균열을 발생시킨다. 균열의 진전상황을 관찰하고 최종적으로 12시간 이후 안정된 균열형태의 형상과 균열폭, 균열길이등을 측정한다.

균열의 면적을 산정하여 상대비교함으로써 균열저항성을 고찰하였는데 균열면적은 균열길이에 균열폭을 곱하여 구한다.

섬유의 혼입량에 따른 균열면적은 (그림6)과 같이 섬유가 혼입되지 않은 시편의 균열면적을 100%로 하여 상대비교하였는데 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 폴리프로필렌섬유가 0.1%가 함유된 경우 50%로 감소되는 것을 볼 수 있었고 0.2% 첨가시는 15%정도로 감소함을 볼 수 있었다.

섬유의 효과가 매우 크게 나타났는데 균열의 형상은 섬유의 혼입량이 증가할수록 균열의 폭과 균열갯수가 감소하였다.

30mm길이의 섬유가 19mm에 비해 효과가 큰것으로 나타났는데, 0.1%의 사용에도 19mm의 0.2%첨가보다 균열제어효과가 큰것으로 나타났다.

시험조건시 가해지는 바람의 영향을 고려하기 위해 항온항습조건만의 건조상태 시편으로 비교하였는데 약 5배의 균열면적 감소효과가 증대되는 것으로 나타났다. 따라서 이런 관계로 추론하면 섬유의 첨가시 실제 상태에서는 상당한 균열제어효과가 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 폴리프로필렌 섬유 콘크리트의 강도 및 인성, 균열제어 특성을 실험적으로 규명하고 분석하여 토목 구조물에의 활용방안을 연구하는데 목적을 두어 수행하였다. 따라서 섬유보강콘크리트의 역학적 거동 특성을 분석하고 섬유의 혼입량 및 섬유길이, 섬유종류에 따른 콘크리트의 압축, 휨강도, 휨인성, 소성수축균열 제어특성 실험을 수행하고 활용방안을 조사하였다.

본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 폴리프로필렌의 기본 물리, 화학적 특성과 폴리프로필렌 섬유 콘크리트의 역학적 특성 및 유용성을 조사 분석하였다.
- (2) 폴리프로필렌 섬유 콘크리트의 유동특성은 슬럼프를 측정하여 조사하였는데 4.5.1 절에 기술된 바와 같이 0.12%(1100 g/m^3) 혼입까지는 최대 4cm 가 감소하여, 이 이하의 혼입량에서는 별다른 주의 없이 실제 현장에서 사용할 수 있으나 그 이상의 혼입에서는 주의를 요하는 것으로 나타났다.

- (3) 폴리프로필렌 섬유 콘크리트의 혼입량별 강도 특성 실험을 수행하여 폴리프로필렌 섬유의 혼입량이 0.2%(1300 g/m^3) 혼입될때까지 압축강도는 최대 12%, 휨강도는 최대 22% 증가하는 것으로 나타났고, 그 이상의 혼입에서는 압축, 휨 강도 모두 감소하는 것으로 나타났다.

- (4) 폴리프로필렌 콘크리트의 휨인성지수 분석에서는 0.5% (4500 g/m^3) 이상의 사용에서 I_{10} 이 4이상, 2.0% 이상에서는 최대 8.4 정도까지 나타났고, 0.2% 이하의 사용에서는 1.2 - 2.0 의 값을 보였다.

- (5) 섬유의 길이가 30mm인 경우가 19mm보다, 단섬유형보다 메쉬형이 인성특성에서 상대적으로 우수하였으나 섬유의 길이가 긴 경우 유동특성이 저하하였다.

- (6) 폴리프로필렌 섬유 모르타르의 소성수축 균열제어 특성은 섬유의 혼입량이 0.1%(900 g/m^3)에서도 45% 이상의 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 박승범, 섬유보강 콘크리트의 특성과 최근의 기술 -폴리프로필렌 및 천연섬유 보강 콘크리트-, 한국 레미콘 공업협회지, 1992.
2. ACI, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, 1986.
3. Guirguis, B. E. and Potter, R. J., "Polypropylene Fibres in Concrete", Technical Report TR/F90, Cement and Concrete Association of Australia, 1985.
4. Litvin, A., "Report to Wire Reinforcement Institute on Properties of Concrete Containing Polypropylene Fibers," Construction Technology Laboratory, Portland Cement Association, 1985.
5. Zollo, R. F. et al, "Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibers," to be published in 1986.
6. "Static Load Test of Fibermesh vs. Welded Wire Fabric," F.E.D. Report No.5, Fibermesh Inc.(Tests performed by Wiss, Janney, Elstrier Associates Inc.), 1985.
7. Kraai, P. P., "A Proposed Test to Determine the Cracking Potential due to Drying Shrinkage of Concrete," Concrete Construction, pp.775-778, 1985.

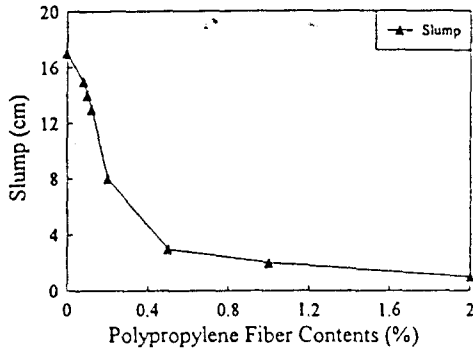
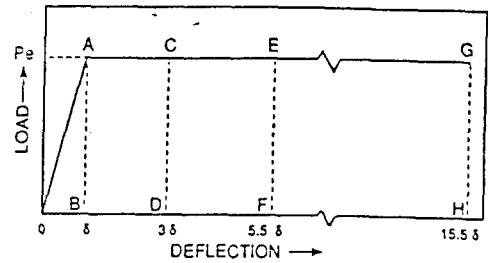


그림 1. 섬유의 혼입량에 따른 슬럼프 변화 (단섬유 19mm)



$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad I_{30} = \frac{OAGH}{OAB}$$

그림 4. 하중-변위 곡선으로부터의 휨인성지수의 계산

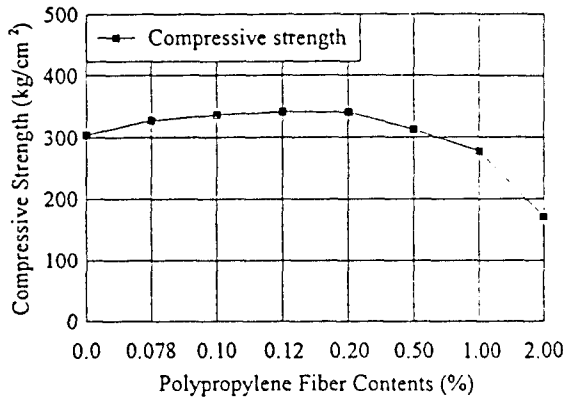


그림 2. 섬유의 혼입량에 따른 압축강도 변화 (단섬유 19mm)

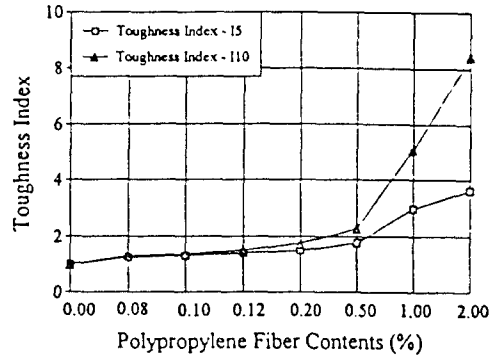


그림 5. 섬유의 혼입량에 따른 시편의 휨인성지수의 변화

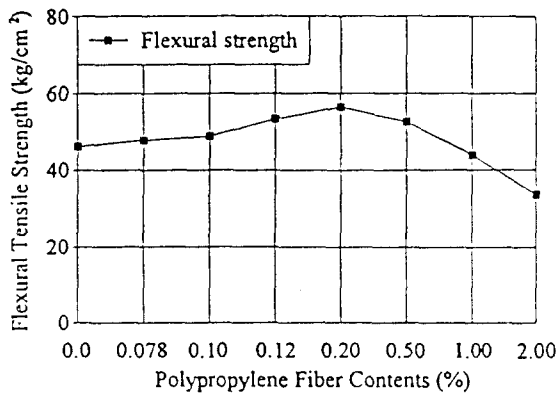


그림 3. 섬유의 혼입량에 따른 휨인장 강도의 변화 (단섬유 19mm)

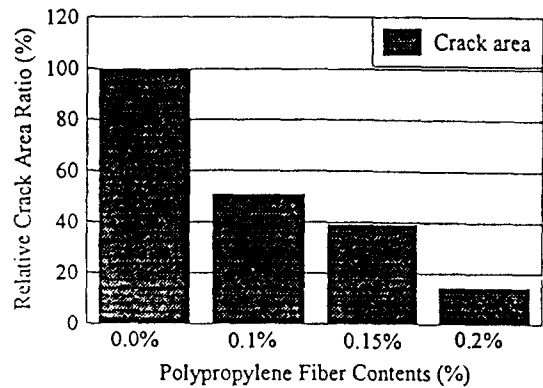


그림 6. 섬유의 혼입량에 따른 상대 소성수축균열면적의 비교