

# 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 기계적 성질에 관한 연구

## Mechanical Behavior of Steel Fiber Reinforced Polymer-Impregnated Concrete

변근주\*, 송영철\*\*, 정해성\*\*\*, 정기영\*\*\*  
Byun, Keun-Joo, Song, Young-Chul, Jeong, Hae-Sung, Jeong, Ki-Young

### ABSTRACT

This paper is to develop steel fiber reinforced polymer-impregnated concrete(SFPIC) by impregnating polymer impregnant into hardened steel fiber reinforced concrete(SFRC). Steel fiber induces ductile behavior and polymer impregnant increases compressive strength.

Steel fiber reinforced polymer-impregnated concrete specimens are prepared with fiber contents of 0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5% and tested to obtain uni-axial and bi-axial compression strengths, tensile strength and flexural strength. The strength and mechanical properties of normal concrete, SFRC, SFPIC are compared .

### 1. 서 론

콘크리트의 인성을 증진시키기 위한 연구와 더불어 고강도의 콘크리트에 대한 요구가 증대되고 있다. 강도, 수밀성, 내구성, 내충격성을 증진시키기 위하여 본 연구에서는 강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SF-PIC)를 개발하고자 한다. 특히 강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SF-PIC)는 해양 및 항만구조물, 공항활주로, 도로포장판, 군사구조물, 원자력 관련 콘크리트 등에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 전망된다. 따라서 본 연구는 이와 같이 콘크리트의 물성 개선에 기여도가

큰 강섬유보강 콘크리트(SFRC)와 폴리머침투콘크리트(PIC)의 두가지 재료특성을 하나로 집약한 강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SF-PIC)의 기계적 특성을 구명하는데 그 목적을 두고 있다. 본 연구는 두분야로 구성되어 있다. 첫째는 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 제조기술을 개발하고, 두번째는 강도 및 기계적 특성을 구명하고자 한다. 실험은 총 93개의 시편을 제작해 실시하였으며, KS F 2401, KS F 2405, KS F 2408, KS F 2423, KS F 2438과 JCI-SF 1~5의 규정을 준수하여 실시하였다. 강섬유의 분산을 위해서는 Omni mixer의 사용이 유리할 것으로 사료되나 강섬유의 실용화와 실험여건을 위하여 일반믹서를 사용하였다.

\* 연세 대학교 토목공학과 교수

\*\* 한국전력공사 기술연구원 토건연구실과장

\*\*\*연세 대학교 토목공학과 석사과정

## 2. 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 내부결합구조

시멘트콘크리트 내부에 분산된 강섬유는 골재사이의 시멘트풀의 강도를 증진시키며, 특히 초기 및 후기 균열발생의 억제작용을 한다. 이와 같이 콘크리트에 있어서 강도증진에 기여하는 강섬유의 특성으로는 섬유형상(fiber geometry), 섬유형상비 (aspect ratio: length /diameter), 섬유혼입량 (fiber contents), 섬유배향 (fiber orientation), 배합설계 (mix design) 등이 있으며, 이 중에서도 특히 섬유형상비와 섬유혼입량은 큰 영향을 미친다.

한편 시멘트콘크리트의 내부공극에 존재하는 폴리머 입자는 수화결합구조가 아닌 화학결합구조를 갖고 있기 때문에 시멘트풀의 강성, 골재와 시멘트풀의 부착강도를 증대시키는 역할을 한다. 또한, 골재와 시멘트풀의 경계면에 존재하는 초기결합과 결합재와 골재의 강성차이를 최소화시키므로 각종 역학적 특성이 크게 개선되는 것으로 평가되고 있다. 폴리머침투제의 침투깊이는 점성유체의 침투이론인 Washburn의 동적모세관 흐름 법칙에 의하여 이론적으로 추정 가능하며, 대기침투의 경우 고분자재료의 점성과 침투시간이 주요 영향인자인 것으로 평가된다. 그림 1 은 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 내부조직구조를 도시한 것이다.

강섬유보강 폴리머침투콘크리트 시멘트콘크리트

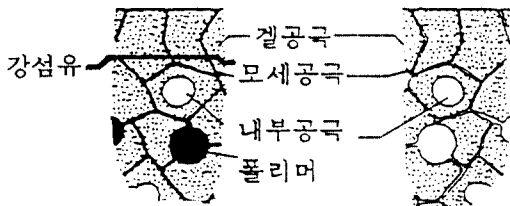


그림 1 시멘트콘크리트와 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 내부조직 비교

## 3. 실험개요

### 3.1 시편의 준비

강섬유 혼입율(0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5%)을 변화시키면서 3개씩의 압축강도측정용 원주형공시체( $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ ) 27개, 할렬인장강도 측정용 원주형공시체( $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ ) 27개, 휨인장강도 측정용 보시편(15x15x55cm) 27개, 이축압축강도측정용 평판시편(20x20x5cm) 12개 등 총 93개의 시편을 준비하였다.

실험에 사용한 콘크리트는 보통콘크리트의 경우 목표강도  $420 \text{kg/cm}^2$ 을 기준으로 하였으며, 배합표는 아래 표 1 과 같다.

표 1 콘크리트의 배합표

(단위 :  $\text{kg/m}^3$ )

시멘트	물	잔골재	굵은골재	고유동화제
469	165	795.9	803.9	5.53

### 3.2 강섬유의 특성과 혼입

본 연구에 사용한 강섬유는 벨기에 Dramix 사의 평형강섬유(길이 30mm, 형상비 60)를 사용하였으며, 강섬유의 혼입률을 0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5%로 각각 달리하여 시편을 제작하였고, 동일한 강섬유 혼입율별로 제작한 시편에 대해서도 폴리머를 침투시킨 것과 시키지 않은 것으로 구분하여 시편을 제작하였다. 강섬유의 특성은 아래 표 2 와 같다.

표 2 강섬유의 특성

(단위 :  $\text{kg/cm}^2$ )

강 섬유	응 력
항 복 응 력	124
극 한 응 력	170
탄 성 계 수	2.0E6

### 3.3 폴리머침투제의 특성

실험에 사용한 모노머는 점도0.55CP, 밀도 0.94g/cc인 Methyl Methacrylate (MMA)가 사용되었으며, 개시제로는 Azobisisobutyronitrile (AIBN)이 사용되었다. 발열촉매로는 Dimethyl Aniline (DMA)를 사용하였다. 폴리머침투콘크리트의 침투방법으로는 모세관 이론을 이용한 함침기법을 사용하였고, 중합방법으로는 열-촉매 중합법으로 열건조기를 사용하였다. 이 과정을 그림으로 나타내면 그림 2 와 같다.

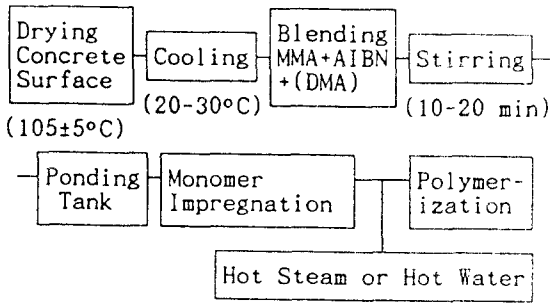


그림 2 표면건조-모노머함침기법의 체계도

그림 3 은 각 시편에 폴리머를 침투시키기 위하여 사용된 함침용 수조를 나타낸 것이다.

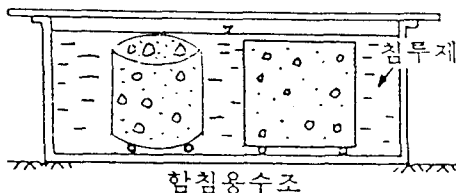


그림 3 함침용수조

## 4. 실험결과

### 4.1 SF-PIC의 제조특성

강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 강도는 두가지요소에 의해 지배를 받는다. 첫째는 콘크리트 내부에 강섬유가 고르게 분포되어 fiber ball의 형성을 억제하고 시멘트풀과 분리되지 않은 상태에서 완전한 부착을 이루도록 하는 문제이고, 둘째는 콘크리트의 공극을 메우고 있는 폴리머입자가 콘크리트 내부의 미세 공극을 채워 충전재와 경화시멘트풀이 완전한 결합을 이루도록 하는 문제이다.

첫째 요소인 강섬유의 분산은 강섬유의 혼입률과 밀접한 관계를 이루고 있으며, 요구하는 강도를 달성하면서 적절한 Workability를 유지하고, fiber ball의 발생을 억제하는 것이 주요 관건이 된다. 본 연구에서 얻은 결과로는 후술하는 바와 같이 강섬유혼입률 1.5~2.0%를 기점으로 해서 압축강도와 휨강도 모두 저하하는 양상을 보이고 있다. 이것은 1974년에 ACI에 수록된 Marsh, Clarke의 실험결과와도 일치하는 것이다.

둘째 요소인 폴리머의 침투 및 중합은 일정한 품질의 양호한 폴리머침투콘크리트를 얻기 위해서는 기본적인 배합설계를 통해 목표강도에 도달해야 하고, 폴리머침투 이전에 공극속의 자유수를 완전 배제하는 절차가 필요하다. 자유수의 배제를 위해서는 건조로를 이용하는 방법과 진공건조기를 이용하는 두가지 방법이 있다. 침투시에는 콘크리트 시편의 내부에 폴리머침투액의 완전한 침투가 이루어지도록 충분한 침투시간을 가지는 것이 중요하며, 자연중합이 이루어지지 않도록 개시제와 발열촉매의 정확한 배합과 적절한 대기온도의 유지가 필요하다. 중합절차에 있어서는 침투액의 증발을 막고, 가급적 빠른 중합을 유도하는 것이 중요하며, 본 연구에서는 이를 위해 열건조기를 이용했다.

## 4.2 압축강도 실험결과

압축강도는 보통콘크리트에 비해 SFRC의 경우 6~13%의 강도증진을 보인데 반해 SFPIC의 경우 경화된 SFRC의 내부공극을 폴리머 입자가 충전해줌으로써 2배이상의 강도 증진효과를 보이고 있다. 압축강도에 미치는 영향은 강섬유보다는 폴리머입자의 영향이 더욱 지배적인 것으로 판단되며, 강섬유혼입률에 있어서는 혼입률 1.5~2.0%일 때 최고 값을 나타내고 있다.

표 4. 압축강도 측정 결과

구 분		압축강도		
		강도	평균	
보통콘크리트		N-1	430	434
		N-2	413	
		N-3	460	
SFRC	SF 1.0%	1	467	462
		2	453	
		3	466	
	SF 1.5%	1	503	475
		2	503	
		3	480	
	SF 2.0%	1	492	489
		2	456	
		3	519	
	SF 2.5%	1	397	410
		2	403	
		3	425	
SF-PIC	SF-PIC 1.0%	1	1088	968
		2	880	
		3	936	
	SF-PIC 1.5%	1	1140	1085
		2	996	
		3	1120	
	SF-PIC 2.0%	1	996	1005
		2	988	
		3	1032	
	SF-PIC 2.5%	1	936	948
		2	960	
		3	904	

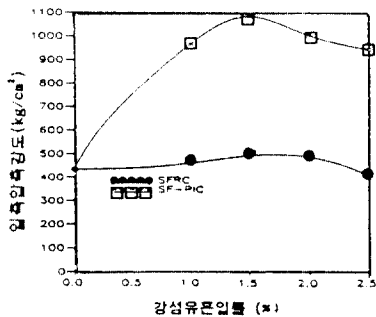


그림 4 압축강도 측정 결과

## 4.3 활렬인장강도 실험결과

활렬인장강도에 있어서는 보통콘크리트에 비해 강섬유보강 콘크리트의 경우 50~100%의 강도증진효과를 보이고 있으며, 강섬유보강 폴리머침투콘크리트에 있어서는 90~120%의 강도증진효과를 나타내고 있으므로 활렬인장강도의 경우 강섬유의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 이 경우 강섬유혼입률 2.0%를 기점으로 강도가 저하되는 양상을 띠고 있다. 실험결과는 표 5 및 그림 5 와 같다.

표 5. 활렬인장강도 측정 결과

구 분		활렬인장강도		
		강도	평균	
보통콘크리트		N-1	45	40
		N-2	36	
		N-3	38	
SFRC	SF 1.0%	1	79	72
		2	67	
		3	69	
	SF 1.5%	1	73	75
		2	75	
		3	78	
	SF 2.0%	1	68	74
		2	75	
		3	80	
	SF 2.5%	1	64	62
		2	60	
		3	61	
SF-PIC	SF-PIC 1.0%	1	75	76
		2	73	
		3	79	
	SF-PIC 1.5%	1	82	84
		2	88	
		3	82	
	SF-PIC 2.0%	1	86	85
		2	79	
		3	89	
	SF-PIC 2.5%	1	70	75
		2	75	
		3	81	

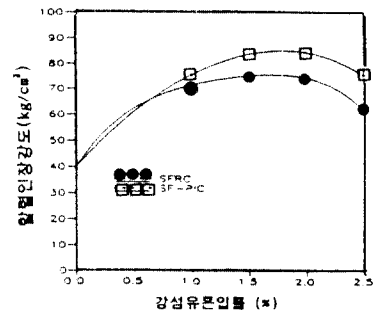


그림 5 활렬인장강도 측정 결과

#### 4.4 휨강도 실험결과

휨강도에 있어서는 표 6 에서 알 수 있는 바와 같이 강섬유보강 콘크리트가 보통콘크리트에 비해 30~60%정도의 강도증진을 보인데 반해 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 경우 2~3.3배의 강도증진효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 콘크리트내부에 분산된 강섬유와 폴리머입자가 휨강도증진에 크게 기여하고 있음을 보여주고 있다.

표 6 휨강도측정 결과

구 분		휨인장강도 (단위 : kg/cm <sup>2</sup> )		
		강도	평균	
보통콘크리트		N-1	55	55
		N-2	54	
		N-3	55	
SFRC	SF 1.0%	1	60	67
		2	68	
		3	74	
	SF 1.5%	1	75	78
		2	73	
		3	85	
	SF 2.0%	1	75	82
		2	81	
		3	91	
	SF 2.5%	1	85	87
		2	87	
		3	86	
SF-PIC	SF-PIC 1.0%	1	121	111
		2	119	
		3	94	
	SF-PIC 1.5%	1	181	181
		2	176	
		3	186	
	SF-PIC 2.0%	1	186	179
		2	187	
		3	165	
	SF-PIC 2.5%	1	150	158
		2	165	
		3	158	

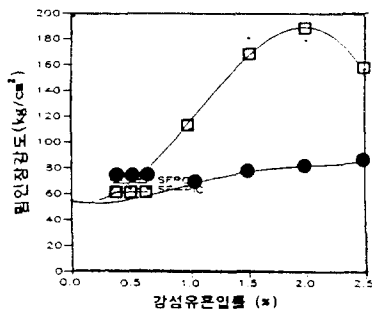


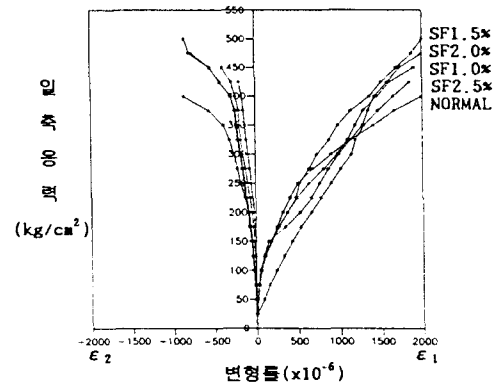
그림 6 휨인장강도측정 결과

#### 4.5 탄성계수와 포아슨비

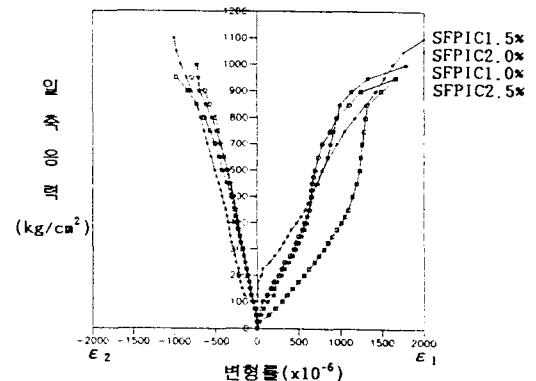
일축압축강도측정시 원주형시편의 종방향과 횡방향으로 부착된 Strain gage를 통해 일축응력하의 응력-변형률관계를 도출할 수 있으며, 이로부터 탄성계수와 포아슨비를 구할 수 있다. 강섬유혼입률 1.5%에 대한 탄성계수와 포아슨비는 표 7 과 같으며 응력-변형률관계는 그림 7 과 같다.

표 7. 탄성계수와 포아슨비

구 분	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	포아슨비	비 고
보통콘크리트	260931	0.130	강섬유혼 입률1.5%
SFRC	216422	0.133	
SF-PIC	435005	0.298	



(a) 보통콘크리트와 SFRC의 일축응력-변형률 선도



(b) SF-PIC의 일축응력-변형률 선도

그림 7 일축응력하의 응력-변형률 관계

#### 4.6 이축압축강도 실험결과

규격 20x20x5cm의 평판시편에 대해 이축압축실험을 한 결과는 표 8 과 같다. 이 결과에 대해 응력-변형률관계와 파괴포락선을 도출한 결과는 그림 8 및 그림 9 와 같다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 이축재하시의 강도효과는 일축재하시보다 10~30%가량 크게 나오며, 응력-변형률곡선과 파괴포락선을 통해서 볼 때 횡방향구속의 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

표 7 강섬유보강 폴리머침투콘크리트의 이축압축실험결과

구분	$\sigma_1/\sigma_2$	파괴강도 (kg)	$\sigma_{bi}/\sigma_{uni}$	$\sigma_{SF-PIC}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{SFRC}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
SF-PIC 1.5%	0.0	96800	1.00	968	-
	0.5	126000	1.30	1260	-
	1.0	106500	1.10	1065	-
	1.2	119060	1.23	1191	-
SFRC 1.5%	0.0	50533	1.00	-	505
	0.5	62661	1.24	-	626
	1.0	53060	1.05	-	531
	1.2	60134	1.19	-	601

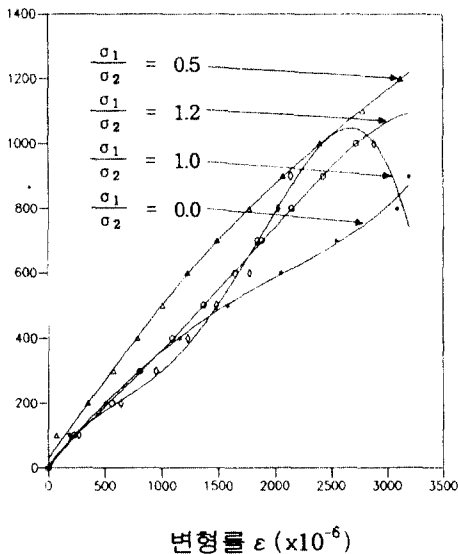


그림 7 이축압축응력을 받는 SF-PIC의 응력-변형률 곡선

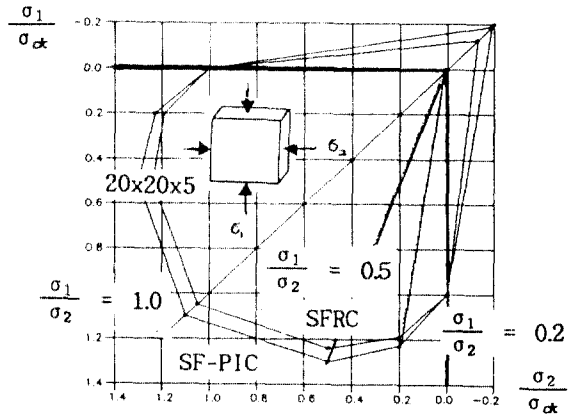


그림 7 이축압축응력을 받는 SF-PIC의 파괴포락선

#### 5. 결 론

본 연구결과로부터 강섬유보강 폴리머침투 콘크리트(SFPIC)의 제조과정에 있어서 강섬유의 분산과 목표강도 도달을 위해서는 강섬유 혼입률 1.5%에서 최적의 조건이 됨을 알 수 있었고, 물-시멘트비(W/C)를 줄이고 Workability를 유지하기 위해서는 고유동화제의 사용이 필수적임을 알 수 있었다. 고강도 혼화재(C.S.F)의 사용에 따른 강도 변화에 대한 실험은 현재 수행중이다.

아울러 실험을 통해 얻은 결과는 강섬유보강 폴리머침투콘크리트(SFPIC)의 경우 강섬유보강 콘크리트(SFRC)와 보통시멘트콘크리트에 비해 압축강도, 인장강도 및 휨강도가 증가함을 알 수 있었다.

#### 6. 참고문헌

1. Romualdi, J. P., and Baston, G. B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," ACI, J. Proceedings, Vol. 60, No.6, 1963.
2. Shah, S.P., and Rangan, B.V., "Effects of Reinforcements on Ductility of Concrete", ASCE, J. St. Div., 96(ST6), 1970, pp.1167-1184.
3. Steinberg, M., KuKacka, L., Colombo, P., Kelsch, J., Monowitz, B., Dikeo, J., and Rubenstein, S. "Concrete-Polymer Materials", First Topical Report, BNL 50134(T-509) and USBR Gen., Rep. 41, 1968.