

# 폐PET를 재활용한 폴리머 콘크리트 특성에 관한 실험적 연구

## A Experimental Study on Characteristic of Polymer Concrete Using Recycled PET Waste

조 병 완\*      구 자 갑\*\*      박 승 국\*\*      나 선 권\*\*\*  
Jo, Byung Wan      Koo, Jakap      Park, Seung Kook      Na, Sun Kwon

### ABSTRACT

Polymer concrete (PC) using unsaturated polyester resins based on recycled polyethylene terephthalate (PET) plastic waste were used in our study for grasping its mechanical properties such as compressive strength, tensile strength and flexural strength, etc. by changing its quantity of resin, filler and dilution(SM) respectively. As a result of it, compressive, tensile and flexural strength of PC indicated 752kgf/cm<sup>2</sup>, 80kgf/cm<sup>2</sup> and 243kgf/cm<sup>2</sup> kind of satisfaction successively. Judging from the above results, polymer concrete (PC) using unsaturated polyester resins as a coupling are suitable for construction material both in the aspect of ECO-building materials and in the aspect of superior strength of PC so that it is good possibility of success as a product.

### 1. 서론

폴리머는 용도가 다양하여 가변성 있게 사용할 수 있는 신건설 재료로서 많은 연구자들에 의해 그 특성이 연구되어 오고 있다. 또한 고성능 재료로 평가됨에 따라 건설산업 분야에서 많은 관심을 불러 일으키고 있으며 각종 제품이나 구조물에 대한 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 폴리머와 골재를 조합시켜 제조되는 폴리머 콘크리트는 종래의 시멘트 콘크리트에 비해 용도에 따라 경화시간 및 가사시간을 제어할 수 있고, 조기에 고강도의 발현이 가능하다. 뿐만 아니라, 수밀성, 접착성, 내식성, 내마모성, 내약품성 및 동결융해성 등의 우수한 장점을 가지고 있으며, 압축, 인장 및 휨강도 역시 현저히 높아 단면을 최소화할 수도 있다. 현재 환경문제를 일으키고 있는 폐 PET 경우 환경문제를 자원 재활용의 관점에서 많은 연구자들에게 주목되고 있다. 폐 PET를 재활용하는 방법은 여러 종류가 있지만, 특히 화학적 방법을 통해 불포화 폴리에스터 수지로 합성할 수 있어 폴리머 콘크리트를 제조하는 결합재로 사용할 수 있다. 폐 PET를 합성한 불포화 폴리에스터 수지를 폴리머 콘크리트의 결합

\* 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 한양대학교 토목공학과 석사과정

재료 사용할 경우 수지 가격의 절감으로 인한 제조 단가의 절감, 폴리머가 가지고 있는 우수한 화학적 특성의 유지, 경화시 우수한 기계적 강도 발현 등의 이점이 있으며 또한 폐기되는 PET를 정제할 필요가 없고 색에 의해 재료를 분리할 필요 없이 재활용할 수 있으므로 오랜 기간 동안 폐 PET를 안정적으로 처리하여 자원 재활용 측면에서도 매우 경제적이며 환경 보호의 이점도 있다. 따라서 본 연구는 폴리머 콘크리트의 실용화 및 자원의 재활용을 목적으로 폐 PET를 이용해 불포화 폴리에스터 수지를 합성한 후 합성된 수지를 결합재로 사용한 폴리머 콘크리트의 특성을 파악하기 위해 실시되었다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용한 불포화 폴리에스터 수지는 코발트계 경화촉진제가 첨가되어 있는 제품으로서 성분은 [표 1]과 같다. 촉진제로서는 옥탄산 코발트(CoOc)가 주로 이용되며, 개시제로서는 메틸에틸케톤 퍼옥사이드(MEKPO)를 사용하였다. 충전재로는 가격이 저렴하고 구입이 용이할 뿐만 아니라 큰 비표면적을 가지고 있어 폴리머 콘크리트 배합시 증량에 유리한 점을 지니고 있는 탄산칼슘계 충전재를 사용하였다. 사용된 굵은골재는 쇄석을, 잔골재는 규사를 사용하였다. 실험에 앞서 골재의 수분은 함수량이 0.1% 이하가 되도록 건조로에서 24시간 건조시킨 후 냉각시켜 사용하였다. 사용된 굵은골재 및 잔골재의 물리적 성질은 [표 2]와 같다.

표 1 Properties of unsaturated Polyester resin

Specific gravity (25℃)	Viscosity (mPas)	ACID Value (mg KOH/g)	Styrene content (%)	Non Volatile Materials (%)
1.13	1300	5	37~43	63

표 2 Physical properties of Aggregate

Type	Size (mm)	Specific gravity	Fineness modulus	Absorption (%)
coarse aggregate	8mm이하	2.63	6.42	0.08
fine aggregate	5mm이하	2.60	2.48	0.05

### 2.2 실험방법

KS F 2419 (폴리에스터 레진 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법)에 준하여 압축 및 쪼갬인장

표 3 Mixture proportions of Polymer concrete (wt.%)

Materials		Proportions													
		I		II		III		IV		V		VI		VII	
Binder	UP+SM	11	100	13	100	13	100	13	100	13	100	13	100	15	100
	SM		40		37		40		40		40		43		40
Filler		11		13		11		13		15		13		15	
Coarse agg.		31.2		31.2		31.2		31.2		31.2		31.2		31.2	
Fine agg.		46.8		46.8		46.8		46.8		46.8		46.8		46.8	
*개시제(MEKPO) : 수지중량의 0.5% 첨가															

강도 시험은  $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$  크기의 공시체를 제작하였고, 휨강도 시험은  $6 \times 6 \times 24\text{cm}$  크기의 공시체를 제작하였으며 그 배합비는 [표 3]과 같다. 재령에 따른 강도발현을 추론하고자 1일, 3일, 7일에 대해 공시체를 제작하였다. 압축강도는 KS F 2481(폴리에스터 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법), 휨강도는 KS F 2482(폴리에스터 레진 콘크리트의 휨강도 시험방법), 쪼갬인장강도는 KS F 2480(폴리에스터 레진 콘크리트의 인장강도 시험방법)의 규정에 의하였으며, 정탄성계수는 KS F 2438(콘크리트 원주실험체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법)에 의하여 콤프레소 미터를 사용하는 방법으로 구하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 강도특성

##### 3.1.1 UP에 의한 강도발현

[그림 1]에서 Type I, IV의 경우에는 재령 1일이 7일과 비교하여 압축강도 발현도가 77~81%수준이고, Type VII인 경우에만 약 70%수준으로 다소 낮으나 대체적으로 초기의 강도 발현이 크다는 것을 알 수 있다.

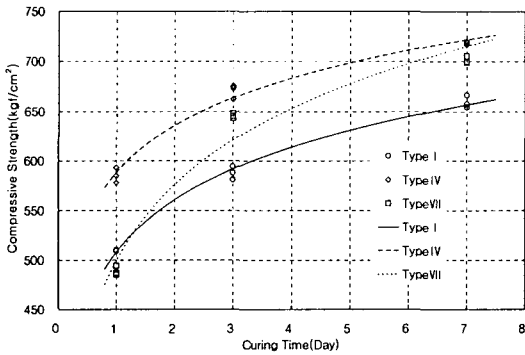


그림 1 UP에 대한 재령별 압축강도

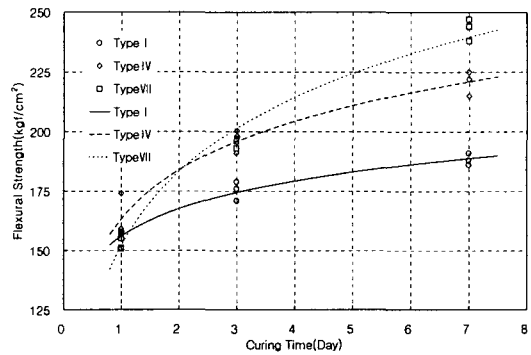


그림 2 UP에 대한 재령별 휨강도

[그림 1]에 나타난 것처럼 수지의 사용량과 압축강도의 관계에서 폴리머 콘크리트의 압축강도는 수지 사용량의 증가에 따라 증가하고 있으며, 특히 수지 사용량이 공시체 중량의 13%인 Type IV에서 가장 높게 나타났다. 이것은 7일 강도 기준으로 Type I보다 8.2% 증가한 것이며 그 이상의 수지량을 사용한 Type VII에서는 오히려 강도가 2.4% 감소하였는데, 이는 매트릭스의 형성 지연 및 콘크리트 내부에 골재 부분과 레진 층의 분리로 수축응력이 잔존하게 되거나 수축균열이 발생하여 강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 수지량에 따른 휨강도의 변화는 Type VII가 재령 7일에서 242.87 kgf/cm<sup>2</sup> 강도로 가장 높은 값을 나타냈으며 조깅인장강도는 수지량이 15%인 Type VII에서 가장 큰 강도를 발현하고 있다. [그림 3]에 나타난 바와 같이 Type VII에서 재령 7일의 조깅인장강도는 평균 79.43kgf/cm<sup>2</sup>로 초고강도 시멘트 콘크리트의 조깅인장강도가 75~85kgf/cm<sup>2</sup> 인 것과 비교해 볼 때, 거의 유사한 효과를 기대할 수 있다. 이것은 Type I 보다는 11.4%, Type IV 보다는 2.5% 증가한 값이다.

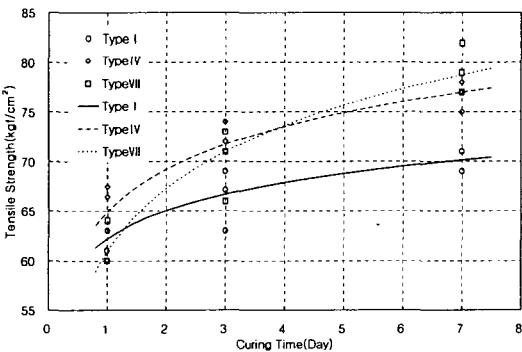


그림 3 UP에 대한 재령별 조깅인장강도

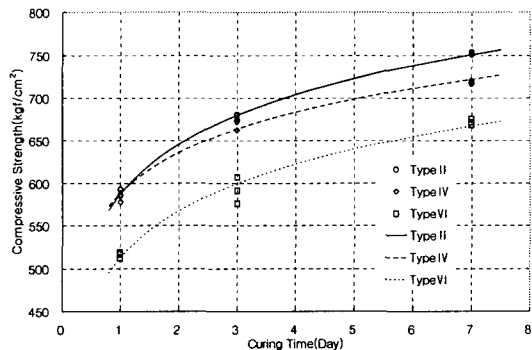


그림 4 SM에 대한 재령별 압축강도

### 3.1.2 SM에 의한 강도발현

폴리머 콘크리트의 배합설계에서 스틸렌 모노머의 첨가량은 우수한 시공성을 얻을 수 있으며 경화후의 물성변화에 미치는 영향이 최소로 되는 수준에서 결정되어야 한다. 본 실험에서는 SM비가 37%인 Type II에서 7일 압축강도가 752kgf/cm<sup>2</sup>으로 가장 우수했으나 작업성 및 성형성이 다소 떨어지는 경향을 보였으며 이것은 Type IV보다 4.5%, Type VI보다는 10.8% 우수한 값이다. 휨강도 역시 Type II에서 228kgf/cm<sup>2</sup>로 가장 큰 강도를 발현하는데 이는 SM비가 40%인 Type IV보다는 3.1%높은 값이며 SM비가 43%인 TypeVI에서는 강도가 7.9% 감소하였다. 쪼갠인장강도는 재령 7일의 TypeII에서 80.45kgf/cm<sup>2</sup>로 가장 큰 강도를 나타내었고 Type VI에서 72.04kgf/cm<sup>2</sup>로 Type II에 비해 10% 감소한 강도를 발현하였다.

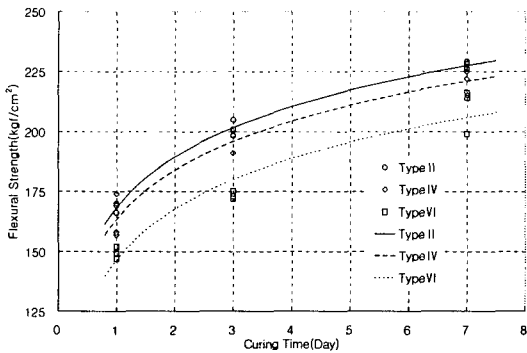


그림 5 SM에 대한 재령별 휨강도

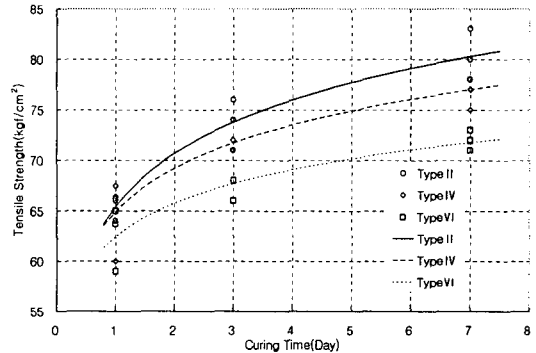


그림 6 SM에 대한 재령별 쪼갠인장강도

### 3.1.3 CaCO<sub>3</sub>에 의한 강도발현

충전재의 증가에 의해 배합의 점도는 급격히 증가하는데, 강도면에서는 재령 7일의 Type IV에서 약 718kgf/cm<sup>2</sup>으로 가장 큰 강도를 나타내었다. 120%를 배합한 Type V에서는 오히려 강도가 Type IV에 비해 4.2% 감소되었는데 충전재 증가에 의한 성형성 저하 및 강도를 지배하는 수지량이 상대적으로 부족해 결합재로서의 충분한 역할을 담당하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

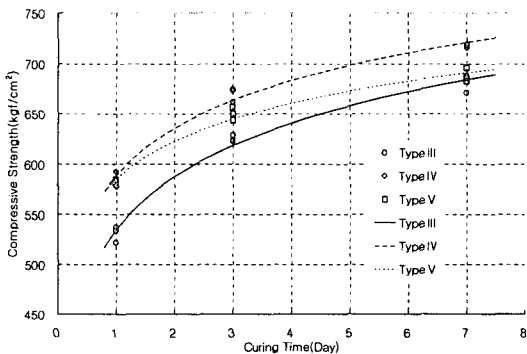


그림 7 CaCO<sub>3</sub>에 대한 재령별 압축강도

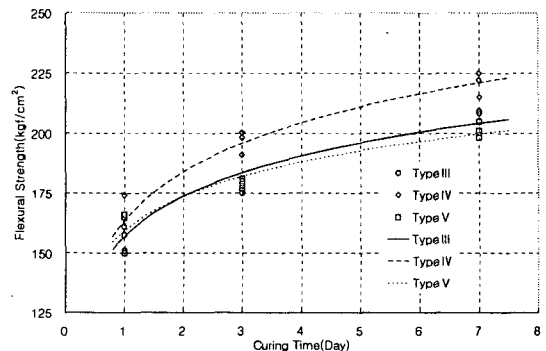
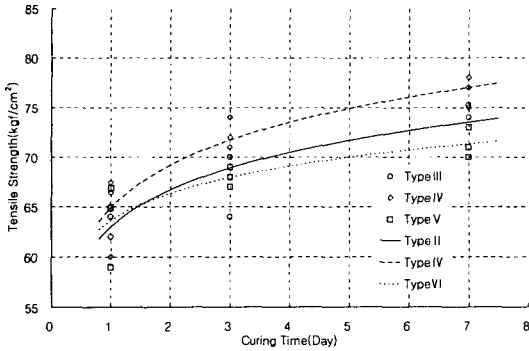


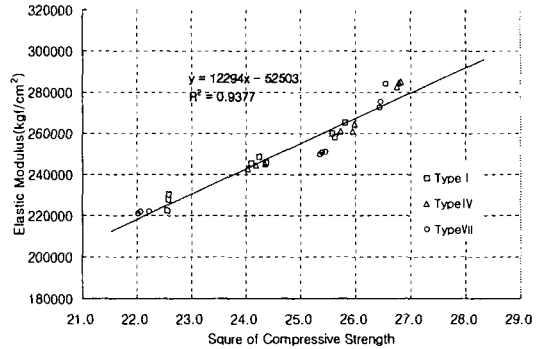
그림 8 CaCO<sub>3</sub>에 대한 재령별 휨강도

휨강도의 변화를 살펴보면 충전재가 결합재와 같은 양으로 배합된 Type IV에서 220.67kgf/cm<sup>2</sup>으로 가장 큰 강도를 발현하였으며 Type V에서는 Type IV의 휨강도에 비해 9% 감소하였다. 충전재에 따

큰 조깅인장강도의 변화 역시 수지량과 동일한 량을 배합한 Type IV에서 재령 7일 강도가 약 76.6kgf/cm<sup>2</sup>로 최대 강도를 나타내고 있으며 이것은 Type III, Type V보다 각각 3.9%, 7.8%만큼 더 높은 강도이다. 앞에서 언급한 바와 같이 충전재량은 강도를 발현하는데 수지량과 긴밀한 관련이 있으며 어느 정도는 충전재량의 증가에 따라 강도도 증가하지만 과도한 충전재의 사용은 점도를 증가시키고, 강도발현에 필요한 상대적 수지량을 부족하게 만들어 결국 강도를 감소시키는 원인이 되기도 한다.



[그림 9] CaCO<sub>3</sub>에 대한 재령별 조깅인장강도



[그림 10] 압축강도에 따른 할선탄성계수 산정식

### 3.1.4 탄성계수

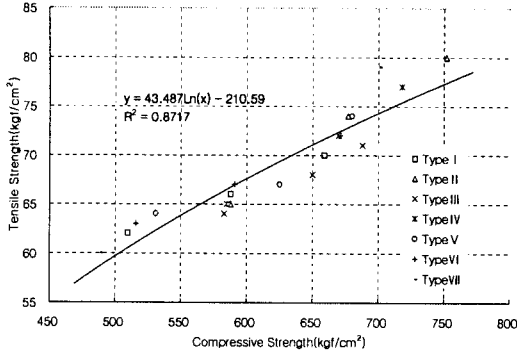
탄성계수는 포아송비와 함께 구조설계나 해석시 중요한 요소로서 주로 부재의 변형성을 예측하는데 있어서 필수적인 요소이다. 본 실험에서는 수지량의 변화에 따른 재령별 탄성계수를 측정하였으며 측정방법은 응력-변형을 곡선으로부터 파괴강도의 40%에서의 할선탄성계수로 구하였다. 재령 7일에서 Type IV가 약  $2.84 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 로 가장 큰 탄성계수값을 나타냈는데 이것은 압축강도가  $1000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 폴리머 콘크리트의 탄성계수가  $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 인 것과 비교하면 높은 값이지만, 압축강도  $1000 \sim 1300 \text{ kgf/cm}^2$ 인 초고강도 시멘트 콘크리트의 탄성계수와 비교하면 약 70%~80% 수준이다. Type IV에서 최대 탄성계수를 가지는 것은 압축강도시험에서 나타난 바와 같이 수지량이 과다하거나 부족하면 강도의 감소를 초래하게 되는 것처럼 탄성계수에서도 결합재인 불포화폴리에스터 수지의 결합력이 어느 수준에서 최대로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험에서 나타난 탄성계수의 범위는 재령 7일에서  $2.61 \sim 2.84 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  정도이며 또한 탄성계수는 압축강도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 역학적 특성간의 관계 분석

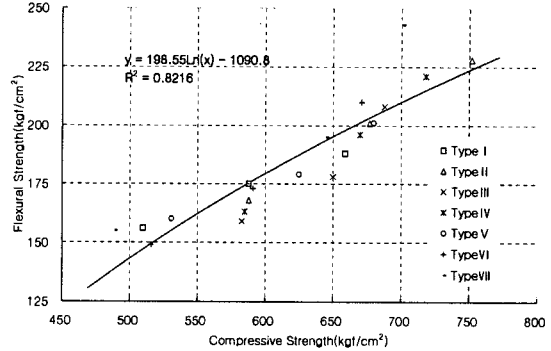
일반적으로 시멘트 콘크리트에서는 압축강도로부터 조깅인장강도 및 휨강도를 추정할 수 있다. 그 대략적인 값을 비교해 보면 압축강도  $600 \text{ kgf/cm}^2$ 의 고강도 시멘트 콘크리트의 경우 휨강도와 조깅인장강도는 각각 11.3%, 7%라는 연구결과에 비해 본 연구에서 실시한 페 PET 합성 불포화 폴리에스터 폴리머 콘크리트는 재령 7일 압축강도가  $659 \sim 752 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때 휨강도가  $188 \sim 243 \text{ kgf/cm}^2$ , 인장강도가  $70 \sim 80 \text{ kgf/cm}^2$ 로서 각각 29~32%, 9%~11%의 비율을 나타낸다. 이로써 시멘트 콘크리트보다 폴리머 콘크리트의 휨강도비와 인장강도비가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 본 연구 역시 페PET 합성 폴리머 콘크리트 경화체의 탄성계수가 압축강도의 제곱근에 비례한다고 가정하고 회귀분석을 실시하였다. 또한, 압축강도와 조깅인장강도와의 관계를 회귀분석으로 나타낸 결과는 [그림 11],

휨강도와와의 관계는 [그림 12]로 나타났다. 각각의 상관계수는 93.8%, 87.2%, 82.2%로 나타났으며 그 산정식은 다음과 같다.

$$E_c = 12294\sqrt{f_c} - 52503, \quad f_{sp} = 43.487 \ln(f_c) - 210.59, \quad f_t = 198.55 \ln(f_c) - 1090.8$$



[그림 11] 압축강도에 대한 쪼갬인장강도 산정식



[그림 12] 압축강도에 대한 휨강도 산정식

#### 4. 결론

- 1) 페 PET 합성 불포화 폴리에스터 폴리머 콘크리트의 휨과 쪼갬인장강도는 각각 압축강도의 29~32%, 9%~11%의 비율로 나타나 강도비가 우수하였다.
- 2) 탄성계수는  $2.61 \sim 2.84 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  정도로서 압축강도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.
- 3) UP비가 13%일 때 압축강도가 가장 높게 나타났고 일정수준 이상의 수지량은 매트릭스의 형성지연 및 콘크리트 내에서 골재 부분과 레진 층이 분리되어 수축균열이나 내부에 수축응력이 잔존하게 하여 강도를 감소시키는 것으로 나타났다.
- 4) 희석제는 강도와 작업성 및 성형성을 고려했을 때 37%~40%에서 배합비를 결정하는 것이 바람직하다고 판단되었으며 희석제량이 과다하게 증가되면 골재와 결합재가 분리되는 레이턴스 현상을 일으키는 것으로 나타났다.
- 5) 폴리머 콘크리트의 강도는 충전재와 수지량의 영향을 받으며, 충전재 증가에 의한 성형성 저하 및 강도를 지배하는 수지량의 부족 등을 고려하여 동일한 양으로 배합하는 것이 유리하다고 판단되었다.
- 6) 압축강도와 압축탄성계수, 쪼갬인장강도, 휨강도는 일정부분 상관관계를 나타내었다.

$$E_c = 12294\sqrt{f_c} - 52503, \quad f_{sp} = 43.487 \ln(f_c) - 210.59, \quad f_t = 198.55 \ln(f_c) - 1090.8$$

#### 참고문헌

1. J.T. Sanjose, J.I. Urreta, A. Prado, I. Rz-Maribona, A. Muguerza., "Mechanical Behaviour of Polymer Concrete Structural Application", Proceedings of thw VIIIth ICPIC Congress on Polymers in Concrete, pp375-380.
2. ACI Committe 548, "Guide for the Use of Polymers in Concrete(ACI 548.1R-97)", American Concrete Institue, Detroit, 1997.
3. 김진근, "고강도 콘크리트의 재료 역학적 특성 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권, 제2호, pp.111-118, 1992.
4. 장일영, 이효범, 변근주, "초고강도 콘크리트의 재료특성 및 휨거동에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회, 제4권, 제2호, pp.107-112, 1993