

# 일축 및 이축압축을 받는 폴리머침투콘크리트의 응력-변형률 특성

## Stress-Strain Response of Polymer-Impregnated Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression

변근주\*, 이상민\*\*, 노병철\*\*, 이용진\*\*\*  
Byun, Keun-Joo Lee, Sang-Min Lho, Byeong-Cheol Lee, Yong-Jin

### ABSTRACT

Polymer-Impregnated Concrete(PIC) can be considered composite material of concrete and polymer and has superior properties compared to conventional cement concrete, such as strength, stiffness, toughness, durability, water-proofing, chemical resistance. However, so far, the usage of PIC has been limited to repairing materials and non-structural applications, due to the lack of the design criteria and the analytical model to determine structural behavior.

The objective of this study is to define the stress-strain response and strength characteristics of PIC in uniaxial and various biaxial compressive loading. On the basis of experimental results, general stress-strain relation, biaxial failure envelope and strength evaluation formular of PIC made with normal aggregate and methyl methacrylate(MMA) are proposed.

#### 1. 서론

최근, 구조해석 및 시공기술의 발달에 힘입어 장대교량, 원자력 격납구조, 해양구조물, 지하구조물과 같은 거대·특수구조물의 건설이 성행됨에 따라 기존 시멘트콘크리트에 비하여 재료성능이 향상된 각종 신소재콘크리트의 개발에 관심이 집중되고 있다. 이들 신소재콘크리트 중 폴리머콘크리트는 무기계 콘크리트와 유기계 고분자재료를 결합시켜 강성, 연성, 인성, 동결융해저항, 내구성, 내화학적, 방수효과 및 부착특성 등을 대폭 향상시킨 폴리머-콘크리트의 신소재복합재료이다[1].

폴리머 콘크리트는 배합 및 제조특성에 따라서 폴리머시멘트콘크리트, 폴리머침투콘크리트(또는 폴리머함침콘크리트) 및 폴리머콘크리트(또는 수지콘크리트)등 크게 3분야로 분류된다. 이중 폴리머침투콘크리트(Polymer Impregnated Concrete)는 기존 구조물의 강도증진용, 보수재 및 방사성폐기물 저장용기, 흡관, 기계기초, 영구거푸집을 비롯한 각종 고부가가치 프리캐스트부재의 제조에 매우 효율적인 재료로 알려져 있으나, 국내의 경우 구조부재의 적용을 위한 해석이론 및 설계기준의 정립이 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 일축 및 이축하중하에서 폴리머침투콘크리트의 응력-변형률곡선, 탄성계수, 극한거동, 파괴강도 파괴형상 등을 평가하므로써 콘크리트 구조부재의 적용을 위한 역학적 특성을 실험적으로 구명하고자 한다.

\* 연세대학교 토목공학과 교수

\*\* 연세대학교대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 연세대학교대학원 토목공학과 석사과정

## 2. 폴리머침투콘크리트의 내부결합구조

시멘트콘크리트의 내부공극에 존재하는 폴리머 입자는 수화결합구조가 아닌 화학결합구조를 갖고 있기 때문에 시멘트풀의 강성과 골재와 시멘트풀의 부착강도를 증대시키는 역할을 한다. 또한, 골재와 시멘트풀의 경계면에 존재하는 초기결합과 결합재와 골재의 강성차이를 최소화시키므로 각종 역학적 특성이 개선되는 것으로 평가되고 있다. 폴리머침투콘크리트에 사용되는 고분자재료는 아크릴계수지인 methylmethacrylate (MMA), butylacrylate(BA), styrene(ST)등이 효율적인 것으로 알려져 있으나, MMA와 ST는 강성증진, BA는 연성증진에 기여함이 상이다. 폴리머침투제의 침투깊이는 점성유체의 침투이론인 Washburn의 동적모세관 흐름법칙에 의하여 이론적으로 추정 가능하며, 대기침투의 경우 고분자재료의 점성과 침투시간이 주요 영향인자인 것으로 평가된다. 그림 1은 폴리머침투콘크리트의 내부조직구조를 도시한 것이다.

폴리머침투콘크리트      시멘트콘크리트

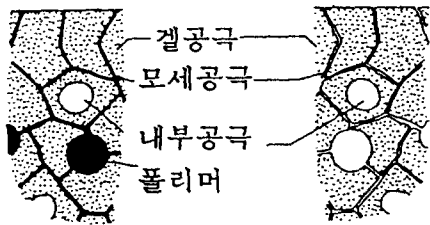


그림 1 폴리머침투콘크리트의 내부조직

## 3. 일축 및 이축압축 실험

### 3.1 시편제작

#### (1) 사용재료, 배합설계 및 시편의 형상

시편제작에 사용된 시멘트는 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트이며, 굵은골재는 최대치수 10mm인 골재번호 #8의 혼합골재이다. 폴리머침투제에 사용된 단량체는 결정성 아크릴수지인 공업용 MMA( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$ )

로 점도 0.55cp, 밀도 0.94g/cc인 고분자재료이다. 반응 개시제로는 질소화합물계의 azobisisobutyronitrile(AIBN)을 사용하였다. 시편의 제작과정은 KSF 2401 및 2405 규정을 따랐다. 폴리머의 조성 및 경화콘크리트의 물성이 일축압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 슬럼프를  $7.5 \pm 1\text{cm}$ 로 고정시키고 W/C를 40%, 50%, 60%로 변화시키면서  $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$  원주형시편을 제작하였으며, 이축압축시편은 W/C가 50%인 경우에 대하여  $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 5\text{cm}$ 의 평판시편으로 제작하였다. 실험시편의 배합설계 예는 표 1에 제시된 바와 같다.

표 1 실험시편의 배합설계 예

| W/C(%) | C(kg/m <sup>3</sup> ) | S(kg/m <sup>3</sup> ) | G(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 40     | 488                   | 896                   | 827                   |
| 50     | 400                   | 878                   | 809                   |
| 60     | 342                   | 808                   | 746                   |

( $G_{\text{max}}=10\text{mm}$ , 슬럼프 7.5cm, s/a=52%)

#### (2) 폴리머침투제의 침투 및 중합과정

침투기법으로는 함침기법(Surface-drying and Monomer-ponding Technique)을 적용하였다. 이 기법은 시편을 중량평형이 될 때까지 건조시킨 후, 함침용수조를 이용하여 콘크리트의 모세공극으로 침투제를 완전 침투시키는 방법이다. 폴리머침투깊이(cm)는 단량체의 종류 및 경화 콘크리트의 물성에 따라 상이하나, 일반적으로 MMA의 경우  $0.15\sqrt{\text{함침시간(분)}}$ 으로 추정된다. 중합과정은 열촉매중합법을 적용하였으며, 전기건조로 내에서  $80-100^\circ\text{C}$ 의 열을 가하여 중합개시제에 의한 단량체의 자유라디칼 연쇄중합반응을 유도하였다. 그림 2는 함침기법에 의한 폴리머침투콘크리트의 제조공정을 체계적으로 나타낸 것이며, 그림 3은 실험에 사용된 폴리머침투제의 함침수조를 도시한 것이다.

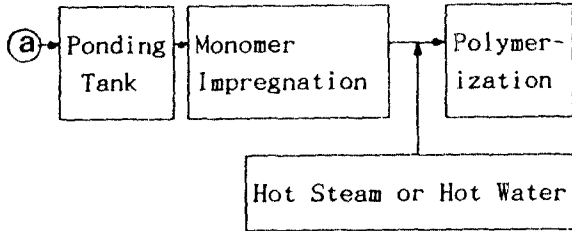
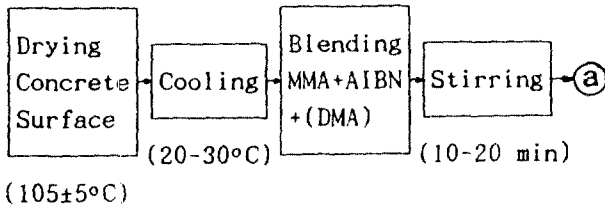


그림 2 함침기법에 의한 폴리머침투 콘크리트의 제조과정

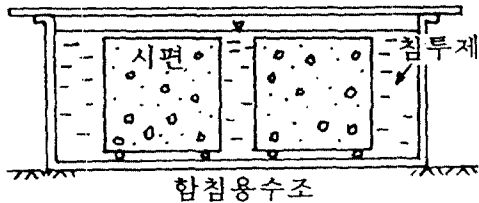


그림 3 함침수조

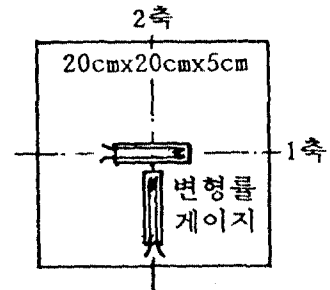


그림 4 변형률게이지의 부착위치

### 3.2 하중재하장치

폴리머침투콘크리트 원주형공시체의 일축압축강도 및 할렬인장강도시험은 200ton의 하중재하능력을 가진 만능시험기를 이용하였으며, 이축압축실험은 80ton 용량의 하중재하장치를 별도로 제작하여 기존 만능시험기와 함께 사용하였다. 이축시편에 부착한 변형률게이지의 부착위치는 그림 4와 같으며, 이축압축실험시 1축하중과 2축하중의 비( $\sigma_1/\sigma_2$ )를 0, 0.2, 0.5, 1.0의 4경우로 변화시키면서 폴리머침투콘크리트와 보통시멘트콘크리트에 대하여 각각 응력-변형률곡선, 비례한계, 파괴하중 및 극한거동을 평가하였다. 이축압축시험에 사용한 하중재하장치는 그림 5와 같다. 하중재하판은 평판 형태의 특수강으로 제작하였으며, 실험시 측면마찰이 최소화되도록 하였다.

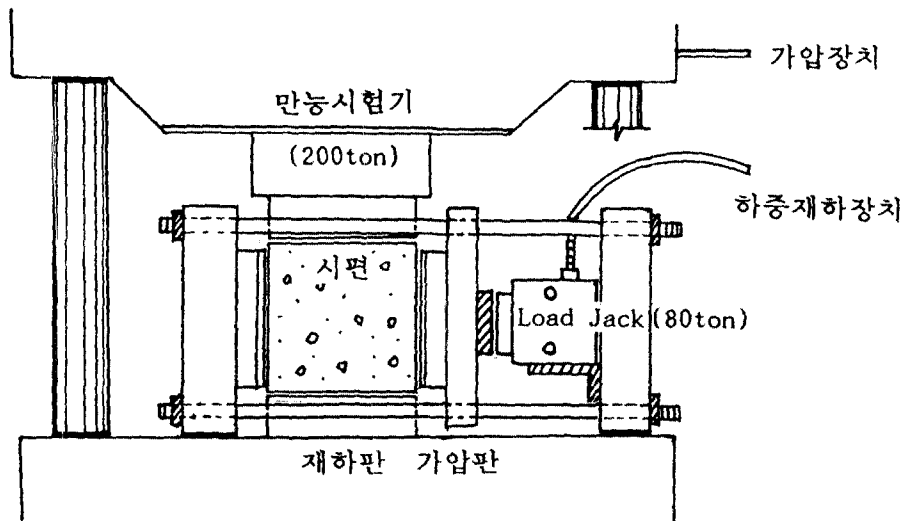


그림 5 이축압축 재하장치

#### 4. 실험결과와 분석

##### 4.1 일축압축 및 일축인장 거동특성

그림 6, 7, 8, 9, 10, 11 은 일축실험결과로부터 도출한 응력-변형률곡선, 압축강도, 탄성계수 및 할렬인장강도의 변화를 도시한 것이다. 분석결과에 의하면 폴리머 침투율이 증가함에 따라 압축강도, 탄성계수 및 할렬인장강도가 최대 1.8-3.5 배 증가하였다. 또한, 폴리머침투율이 3wt% 이하인 경우에는 탄성계수의 증가율이 현저하였고, 3wt% 이상에서는 압축강도의 증가율이 현저하였다. 이는 낮은 폴리머침투율에서도 내부미세균열과 초기결함이 크게 보강되어 탄성계수의 초기증가에 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 사료된다. 할렬인장강도의 경우, 시멘트콘크리트가  $1.6-1.9 \sqrt{\sigma_{ck}}$  범위인 반면, 폴리머침투콘크리트의 경우는  $25-48\%$  증가된  $2.37 \sqrt{\sigma_{cp}}$  인 것으로 평가된다. 특히, 공극의 전부를 폴리머로 치환할 경우, 응력-변형률곡선이 파괴강도의 75%까지 선형을 나타냈으며, 극한변형률도 0.0028-0.0029로 보통콘크리트에 비하여 31% 증가하였다. 이로부터 폴리머침투콘크리트는 기존 콘크리트에 비하여 강성과 연성이 크게 증가함을 알 수 있다. 본 연구의 실험결과를 회귀 분석하여 얻어진 폴리머침투콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수의 산정공식을 폴리머침투율의 함수로 유도하면 식 (1), (2), (3) 및 (4)와 같다.

$$\sigma_{cp} = (1.0 - 0.083 P + 0.077 P^2) \sigma_{ck} \quad (1)$$

$$\sigma_{tp} = (1 + 0.263 P) \sigma_{tc} \quad (2)$$

$$J_{tp} = 2.37 \sqrt{\sigma_{cp}} = 0.063 \sigma_{cp} \quad (3)$$

$$E_{cp} = 13,200 \sqrt{\sigma_{cp}} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{cp}$ 와  $\sigma_{tp}$ 는 폴리머침투콘크리트의 압축강도와 할렬인장강도,  $\sigma_{ck}$ 와  $\sigma_{tc}$ 는 기존 시멘트콘크리트의 압축강도와 할렬인장강도,  $E_{cp}$ 는 폴리머침투콘크리트의 탄성계수, P는 폴리머침투율(wt%)이며, 식에 사용된 단위는  $kg/cm^2$  이다.

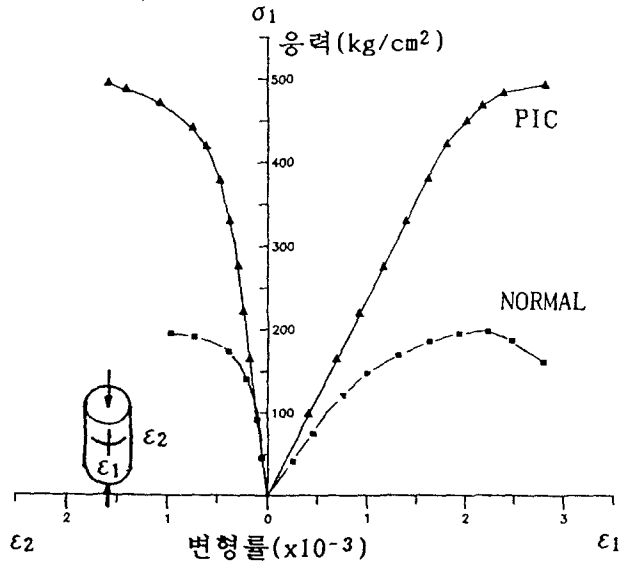


그림 6 응력-변형률곡선

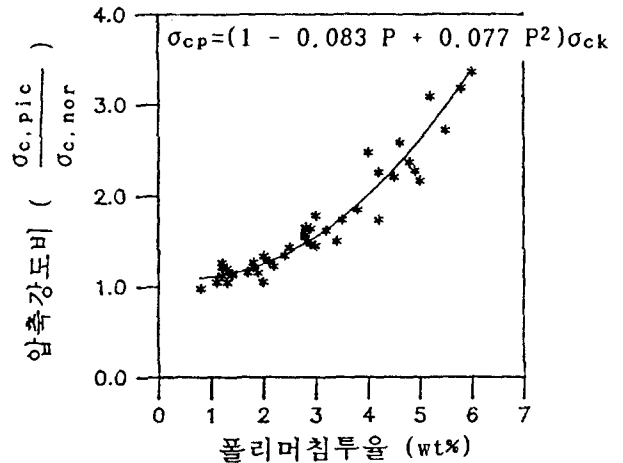


그림 7 압축강도특성

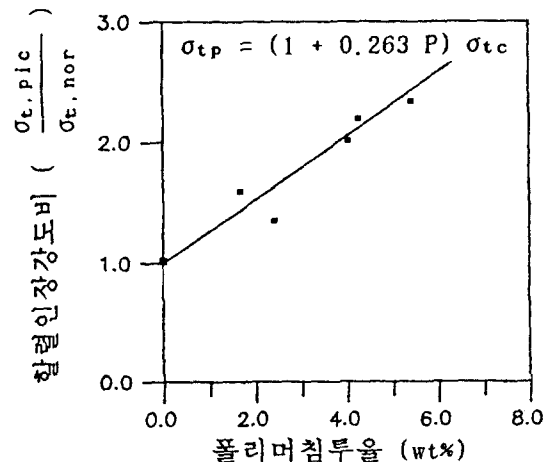


그림 8 할렬인장강도특성

## 4.2 이축압축 거동특성

표 2 와 3 은 이축압축실험으로부터 도출한 폴리머침투콘크리트 및 시멘트콘크리트의 이축 응력비에 따른 1축 압축강도의 변화를 분석한 것이다. 분석결과에 의하면  $\sigma_1/\sigma_2 = 0.5$  에서 폴리머침투콘크리트와 보통콘크리트의 1축 압축강도와 극한변형률의 증가가 가장 현저하였다. 특히 폴리머침투콘크리트의 경우  $\sigma_1/\sigma_2$  가 0.5 - 1.0 일때 최대 30 - 40% 의 강도증가를 나타내었는데 이는 결합재와 골재의 부착강도가 증가하였음에 기인되는 것으로 평가된다. 그림 12와 13은 응력비에 따른 폴리머침투콘크리트의 응력-변형률곡선 및 파괴포락선을 도시한 것이며, 보통시멘트콘크리트에 대한 이축압축 파괴포락선의 경우, Kupfer의 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

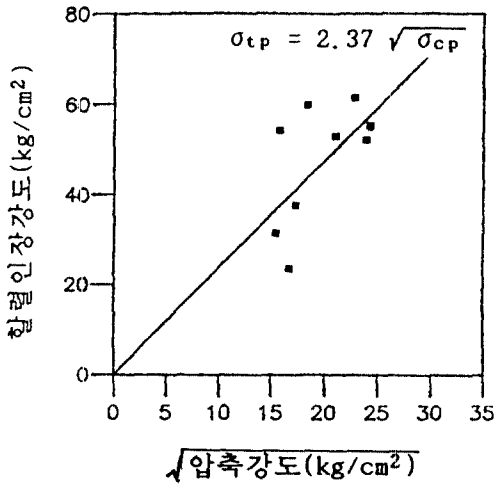


그림 9 할렬인장강도-압축강도의 관계

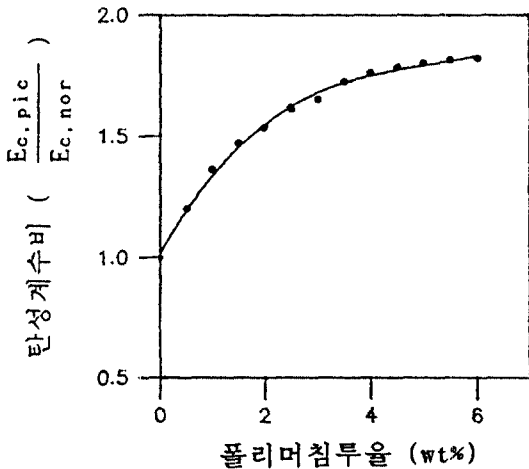


그림 10 탄성계수의 변화

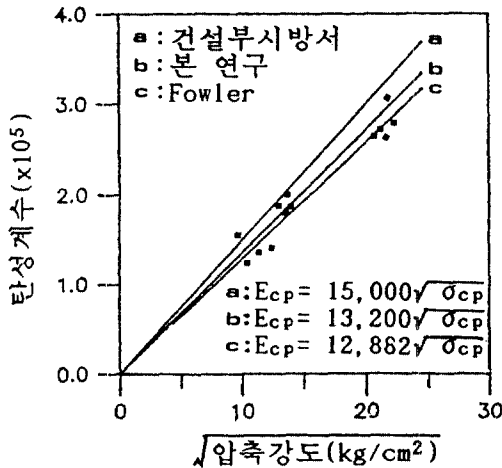


그림 11 탄성계수-압축강도의 관계

표 2 이축압축실험 결과분석

| 구분         | $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ | 파괴강도 (kg) | $\frac{\sigma_{bi}}{\sigma_{uni}}$ | $\epsilon_{ult}$ ( $\times 10^{-6}$ ) |
|------------|-----------------------------|-----------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 폴리머침투 콘크리트 | 0.0                         | 46,933    | 1.0                                | 2,880                                 |
|            | 0.2                         | 60,153    | 1.282                              | 2,800                                 |
|            | 0.5                         | 65,767    | 1.401                              | 3,160                                 |
|            | 1.0                         | 61,067    | 1.301                              | 2,590                                 |
| 보통시멘트 콘크리트 | 0.0                         | 20,900    | 1.0                                | 2,200                                 |
|            | 0.2                         | 24,833    | 1.188                              | 2,460                                 |
|            | 0.5                         | 25,833    | 1.236                              | 2,730                                 |
|            | 1.0                         | 24,600    | 1.177                              | 2,600                                 |

표 3 이축 응력비에 따른 강도증가율

| $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ | $\sigma_{pic}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{nor}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\frac{\sigma_{pic}}{\sigma_{nor}}$ |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 0.0                         | 469.3                                | 209.0                                | 2.246                               |
| 0.2                         | 601.5                                | 248.3                                | 2.422                               |
| 0.5                         | 657.7                                | 258.3                                | 2.546                               |
| 1.0                         | 610.7                                | 246.0                                | 2.482                               |

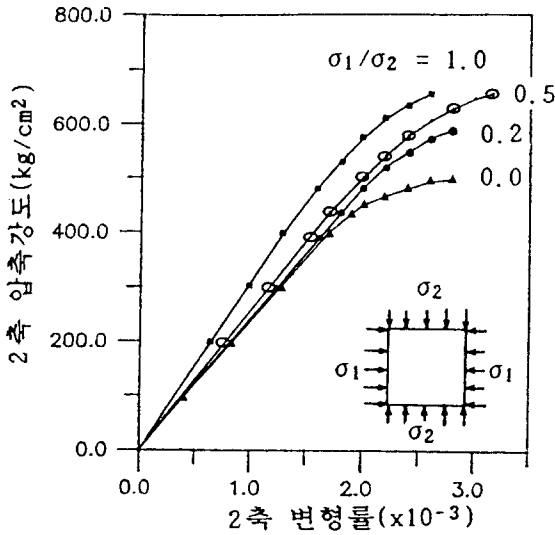


그림 13 이축압축 응력-변형률곡선

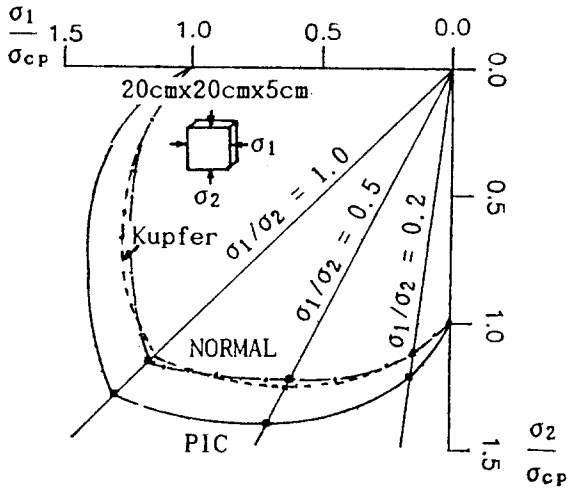


그림 10 이축압축상태의 파괴포락선

## 5. 결론

(1) 본 연구에서는 폴리머침투콘크리트의 일축거동 및 이축압축거동 실험을 토대로 폴리머침투율에 따른 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수, 응력-변형률관계 및 이축 파괴기준의 실험식을 제안하였다.

(2) 결정성 아크릴수지인 MMA를 시멘트콘크리트에 침투시킨 후, 열축매충합을 실시하면 폴리머 침투율이 증가할 수록 폴리머

침투콘크리트의 강도 및 탄성계수가 최대 1.8-3.5배 향상되며, 응력-변형률곡선의 탄성한계가 파괴강도의 75% 까지 증가한다.

(3) 폴리머침투콘크리트의 경우,  $\sigma_1/\sigma_2 = 0.5-1.0$ 에서 일축압축강도에 비하여 30-40% 정도 1축압축강도가 증가하였으며, 이때 극한변형률은 최대 0.00316을 나타내었으므로 MMA 침투콘크리트의 경우 강성과 연성이 크게 향상되는 것으로 평가된다.

## 참고문헌

- (1) Dikeou, J., Cowan, W., DePuy, G., et al., *Concrete-Polymer Materials*, Fourth Topical Report, BNL 50328, REC-ERC 72-1, 1972, pp.1-114.
- (2) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses", *ACI Journal*, Vol.66, No.8, 1969, pp. 656-666.
- (3) Liu, T.C.Y., Nilson, A.H., and Slate, F. O., "Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression", *ACI Journal*, Vol. 69, No.5, 1972, pp.291-295.
- (4) Park, S.E., "Stress-Strain Response of Polymer-Impregnated Concrete Under Biaxial Compressive Loading", *M.S.Thesis*, The University of Texas at Austin, 1982, pp.1-147.
- (5) Mehta, H.C., Chen, W.F., Manson, J.A., and Vanderhoff, J.W., "Stress-Strain Behavior of Polymer-Impregnated Concrete Beams, Columns, and Shells", *ACI Publication SP-58*, "Polymers in Concrete", ACI, 1978, pp.161-186.
- (6) Byun, K.J., Choi, H.S., and Lee, S.M., "Development of Surface Impregnants and Polymer-Impregnation Techniques for Highway Concrete", *Proceedings of 6th International Congress on Polymers in Concrete*, ICPC, China, 1990, pp.765-772.