



## UP-MMA 폴리머 콘크리트의 경화수축, 열팽창계수 및 탄성계수

연구석<sup>1)</sup> · 연정흠<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>강원대학교 지역건설공학과 <sup>2)</sup>미국 텍사스대 교통연구센터

### Setting Shrinkage, Coefficient of Thermal Expansion, and Elastic Modulus of UP-MMA Based Polymer Concrete

Kyu-Seok Yeon<sup>1)</sup> and Jung-Heum Yeon<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>2)</sup>Center for Transportation Research at the University of Texas at Austin, Austin, TX 78731, USA

**ABSTRACT** This study examines setting shrinkage, coefficient of thermal expansion, and elastic modulus of unsaturated polyester(UP)-methyl methacrylate(MMA) polymer concrete, which is generally used for repair of portland cement concrete pavement and manufacturing of precast products. In this study, a series of laboratory test were conducted with variables such as UP-MMA ratio, shrinkage reducing agent (SRA) content, and test temperature. The results showed that the setting shrinkage ranged from 29.2 to 82.6×10<sup>-4</sup>, which was significantly affected by test temperature. Moreover, the findings revealed that the coefficient of thermal expansion, elastic modulus and ultimate strain of UP-MMA based polymer concrete ranged from 21.6 to 31.2×10<sup>-6</sup>/°C, 2.8 to 3.3×10<sup>4</sup> MPa, and 0.00381 to 0.00418, respectively. The results of this study will be used as important data for design and application of UP-MMA based polymer concrete.

**Keywords** : polymer concrete, setting shrinkage, thermal expansion, ultimate strain, elastic modulus

#### 1. 서 론

폴리머 콘크리트는 유기질인 폴리머 결합재, 무기질인 골재와 제조 시 발생하는 공극으로 구성되며, 강도가 높고, 내충격성, 내식성, 방수성, 동결융해 저항성, 부착성 등이 우수하다. 주된 용도는 시멘트 콘크리트 포장의 보수, 주차장 바닥의 코팅 등과 같은 현장시공용과 경량 슬래브, 미장 패널, 수리시설물, 지하구조물 등과 같은 제품제조용이다.<sup>1,2)</sup>

과다한 하중과 가혹한 환경에 놓여있기 때문에 효율적이고 경제적이며 정기적인 유지관리가 필요한 교통시설물 용으로 널리 사용되는 재료 또한 폴리머 복합소재이다.<sup>3)</sup> 특히 교량 신설이나 기존교량의 수명을 연장시키기 위한 상판 표면부용으로도 많이 이용된다.<sup>4)</sup>

폴리머 콘크리트의 제조에 사용되는 결합재로는 불포화 폴리에스터 수지, 에폭시 수지, 아크릴 수지 등이 주로 이용되고 있으며,<sup>4,6)</sup> 결합재의 양과 화학적 조성에 따라 물리, 역학적 성질에 차이를 나타낸다. 골재나 충전재, 유

리섬유와 같은 보강재, 착색제와 같은 첨가제의 사용에 따라 다양한 용도의 폴리머 콘크리트를 제조할 수 있다.

결합재 중에서 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 사용한 폴리머 콘크리트가 가장 널리 사용된다. 그 이유는 저렴한 가격, 높은 강도, 용이한 경화시간 조절 등의 장점이 있기 때문이다. 그러나 300 mPa·s 정도의 높은 점도를 갖고 있어 작업성이 떨어지며, 경화수축이 커서 균열이 발생되고, 자외선에 의해 내후성이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 또한 이 연구에서 개질제로 사용한 MMA 모노머는 작은 경화수축과 우수한 내후성을 가지나 점도가 0.56 mPa·s로서 매우 낮고 휘발성이 높아 점도를 증가시키기 위한 첨가제를 사용하지 않고 단독으로 사용하는 데는 한계가 있다.

특히 점도가 높은 불포화 폴리에스터 수지만을 사용하면 소정의 워커빌리티를 얻는데 더 많은 수지를 필요로 하게 된다. 이 같은 점도 문제를 해결하기 위해서는 스티렌 모노머를 첨가할 수 있으나 과다하게 첨가하면 경화수축이 커지고 강도의 저하를 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이 연구에서는 MMA 모노머를 첨가한 새로운 결합재를 사용하여 폴리머 콘크리트를 제조하였다.

그러나 이러한 콘크리트를 응용하기 위해서는 강도발

\*Corresponding author E-mail : jyeon@utexas.edu

Received May 7, 2012, Revised June 20, 2012,

Accepted July 4, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

현 등과 같은 역학적 성질을 구명하는 것도 중요하나 경화수축, 열팽창계수, 탄성계수 등 폴리머 콘크리트의 변형 특성에 대한 기초연구를 수행하는 것도 매우 중요하다.

그 이유는 기존 콘크리트는 물론 철근과 같은 보강재와 일체화된 거동을 확보하기 위해서 반드시 구명해야 할 사항이기 때문이다. 이렇게 일체화된 거동은 손상된 일반 콘크리트에 대한 보수뿐만 아니라 프리캐스트 제품 제조 시에도 중요하다. 더욱이 폴리머 콘크리트는 일반 콘크리트가 갖지 못하는 장점들을 갖고 있지만 큰 변형성을 가지고 있다는 것이 가장 큰 단점으로 알려져 있는 만큼 이를 줄일 수 있는 기술을 확보하여야 한다.

따라서 이 연구에서는 재령과 UP-MMA비, 수축저감제(SRA) 첨가량, 시험온도 등이 경화수축에 미치는 영향과 열팽창 특성, 압축응력-변형률 관계 등을 실험적으로 구명함으로써 UP-MMA 폴리머 콘크리트 현장시공이나 프리캐스트 제품의 제조를 위한 설계 및 시공기준 설정에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 결합재

##### (1) UP 수지

불포화 폴리에스터(unsaturated polyester: UP) 수지는 그 구성분자의 포화된 모노머(monomer)가 에스테르 결합으로 중합된 고분자 화합물이다.

이 연구에서 주결합재로 사용한 UP 수지는 한국의 A사에서 제조된 것으로서 올소 타입이며, 그 성질은 Table 1과 같다.

##### (2) MMA 모노머

메틸 메타아크릴레이트(methyl methacrylate : MMA)모노머는 무색투명한 액체로서 저온에서 라디칼 중합하면 고분자 사슬 구조가 연속된 규칙성을 나타내는 신디오택틱(syndiotactic) 구조의 비율이 증가하는 특성을 나타낸다.

이 연구에서는 주결합재인 UP 수지에 일정한 비율로 혼합하여 사용하였으며, 그 성질은 Table 2와 같다.

##### (3) 개시제

UP 수지의 경화를 위해 개시제와 촉진제가 첨가되며, 촉진제가 첨가된 UP 수지는 개시제만 첨가되면 경화반

**Table 1** Properties of UP resin

| Density (25°C, cc/g) | Viscosity (25°C, mPa·s) | Acid value | Styrene content (%) |
|----------------------|-------------------------|------------|---------------------|
| 1.13                 | 300                     | 20.0       | 40                  |

**Table 2** Properties of MMA monomer

| Density (25°C, cc/g) | Viscosity (20°C, mPa·s) | Molecular weight (g/mol) | Appearance  |
|----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|
| 0.942                | 0.56                    | 100                      | Transparent |

**Table 3** Properties of initiator

| Component            | Density (25°C, cc/g) | Active oxygen |
|----------------------|----------------------|---------------|
| MEKPO 55%<br>DMP 45% | 1.12                 | 10.0          |

**Table 4** Properties of DMA

| Density (25°C, cc/g) | Boiling point (°C) | Melting point (°C) | Molecular weight (g/mol) | Appearance  |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------|
| 0.942                | 193~194            | 1.5~2.5            | 121.18                   | Oily liquid |

**Table 5** Properties of SRA

| Components                              | Density (25°C, cc/g) | Viscosity (mPa·s) | Appearance  |
|---|----------------------|-------------------|-------------|
| Poly styrene 35%<br>Styrene monomer 65% | 1.1~1.3              | 8,000~10,000      | Transparent |

응이 일어난다. 개시제로서는 메틸에틸케톤 프록사이드(MEKPO) 55%인 DMP 용액이 이용된다.

이 연구에 사용된 개시제의 성질은 Table 3과 같다.

##### (4) 촉진제

UP 수지와 MMA 모노머는 공중합(copolymerization) 상태에서 개시제만 첨가하였을 경우 분자간의 경화 반응속도가 매우 느려지기 때문에 폴리머 콘크리트의 제조가 불가능하게 된다. 따라서 반응 촉진제의 첨가가 반드시 필요하다. 이 연구에서는 DMA(N,N-Dimethylaniline)를 사용하였으며, 그 성질은 Table 4와 같다.

##### (5) 수축 저감제

UP 수지 자체는 경화 시 보통 6~10%의 큰 수축이 발생하고 이 수축은 제품의 균열이나 치수 안정성을 저해할 수 있기 때문에 수축 저감제(shrinkage reducing agent: SRA)를 사용한다.

이 연구에서 사용된 SRA는 폴리스틸렌을 스티렌 모노머에 용해시킨 것으로서 그 성질은 Table 5와 같다.

#### 2.1.2 골재 및 충전재

폴리머 콘크리트용 골재로는 규사가 주로 이용되며, 규사를 사용하는 것이 유리한 이유는 입도조절이 용이하고, 골재를 별도로 건조시킬 필요가 없기 때문이다. 이 연구에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 6과 같다.

한편, 폴리머 콘크리트 결합재는 액상이기 때문에 페이스트 형태로 만들어 골재사이의 공극을 채워주기 위해서는 충전재가 필요하며, 이것은 결합재의 증량 및 강도 향상에 기여하게 된다. 이 연구에 사용된 충전재는 중질

**Table 6** Physical properties of aggregate

| Size (mm) | Apparent specific gravity | Bulk density (kg/m <sup>3</sup> ) | Fineness modulus | Water content (%) | Organic impurities |
|-----------|---------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| 0.08~5    | 2.64                      | 1,648                             | 3.09             | < 0.1             | Nil                |

**Table 7** Physical properties of heavy calcium carbonate

| Specific gravity | Absorption (cc/g) | Water content (%) | pH  | Mean grain size (μm) | Retained percentage of 325 mesh sieve |
|------------------|-------------------|-------------------|-----|----------------------|---------------------------------------|
| 0.75             | 0.20              | ≤ 0.3             | 8.8 | 13                   | 0.03                                  |

탄산칼슘이며, 물리적 성질은 Table 7과 같다.

## 2.2 시험 방법

### 2.2.1 결합재 및 폴리머 콘크리트의 배합비

주결합재인 UP 수지는 높은 점도로 인해 작업성이 저하되며, 양호한 작업성을 얻기 위해서는 상대적으로 많은 양의 결합재를 필요로 한다. 이러한 점의 해결을 위해 스틸렌 모노머를 첨가할 수 있으나 과다하면 강도가 저하하고 경화수축이 커지는 문제가 있기 때문에 MMA 모노머를 사용하였다.

Table 8은 시험에 사용한 결합재의 조성과 폴리머 콘크리트의 배합비를 나타낸 것이다.

### 2.2.2 경화수축 시험

경화수축시험은 Ohama-Demura 시험방법에 따라 몰드의 양단에 LVDT를 장착하는 방법을 이용하였다. 시험체의 크기는 70×70×320 (mm)이며, 시험은 온도 10°C, 20°C, 30°C, 상대습도는 60±3%인 항온실에서 실시하였다. 측정은 초기 3시간은 10분 간격으로, 나머지는 30분 간격으로 데이터 로거(Tokyo Sokki, TDS-602)에 의해 측정하였다.

### 2.2.3 열팽창계수 시험

열팽창계수는 RILEM TC 113-CPT(PC-12 method of test for coefficient of thermal expansion of polymer concrete and mortar)를 준용하여 실시하였다. 시험체의 크기는 100×100×400 (mm)이고, 각 배치(batch)별로 공시체를 동일 조건하에서 3개씩 제작하였다. 초기 3시간은 시험체의 온도를 20±1°C에서 유지시켰으며, 80°C에까지 2시간 간격으로 20°C씩 높여가면서 측정하였다.

TC 133-CPT에서 제안하는 열팽창률 산출식은 다음과 같다.

**Table 8** Binder formulation and mix proportion of polymer concrete

| Binder content (wt.%) | Binder formulation |                           |                             |                           | Filler (wt.%) | Fine aggregate (wt.%) |
|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------|-----------------------|
|                       | UP:MMA             | SRA (phr <sup>(1)</sup> ) | MEKPO (phr <sup>(1)</sup> ) | DMA (phr <sup>(1)</sup> ) |               |                       |
| 11                    | 70 : 30            | 0                         | 1                           | 1.5                       | 22            | 67.0                  |
| 11.5                  | 80 : 20            | 2                         |                             | 1                         | 23            | 65.5                  |
|                       |                    | 4                         |                             | 0.5                       | 24            | 64.0                  |
| 12                    | 90 : 10            | 6                         |                             |                           |               |                       |

<sup>(1)</sup>parts per hundred parts of resin

$$L = (l - l_0) / l_0 \quad (1)$$

여기서, L = 열팽창률

$l_0$  = 시험 전의 길이

$l$  = 각 온도에서 측정된 길이

그리고, TC 133-CPT에서 제안하는 열팽창계수 산출식은 아래와 같다.

$$\alpha = \Delta\varepsilon / \Delta t \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$  = 열팽창계수

$\Delta t$  = 온도 차이

$\Delta\varepsilon$  = 온도 차이에 따른 열팽창률

### 2.2.4 탄성계수 시험

탄성계수는 Ø50×100 (mm) 크기의 시험체를 이용하여 KS F 2438(콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법)에 규정된 방법에 따라 시험하였다.

재하에는 20톤 용량의 UTM(Instron 8502)을 사용하였으며, 탄성계수는 다음 식에 의해 구하였다.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (3)$$

여기서, E = 탄성계수(MPa)

$S_1$  = 세로 변형 0.00005에 대한 응력(MPa)

$S_2$  = 극한응력의 40%에 대한 응력(MPa)

$\varepsilon_2$  = 응력  $S_2$ 에 의해 생긴 세로 변형

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 경화수축

폴리머 콘크리트의 경화수축(setting shrinkage)이란 용어는 시멘트 콘크리트 콘크리트에서의 건조수축(drying shrinkage)과 같은 의미를 갖는다. 폴리머 콘크리트는 제조시 물을 사용하지 않기 때문에 시멘트 콘크리트에서와 같이 수화반응에 의해 경화되는 것이 아니기 때문이다.

시멘트 콘크리트에서 건조수축에 영향을 미치는 요소는 양생온도, 상대습도, 물-시멘트비, 시멘트의 종류, 골재의 종류와 품질, 재령 및 배합방법 등이다.<sup>7-9)</sup> 이에 비해 폴리머 콘크리트는 결합재의 종류, 양생온도, 재령, 첨가제의 종류와 성분 등이 경화수축에 미치는 요소라고 할 수 있으며, 폴리머 콘크리트에서는 강섬유를 사용하는 것도 경화수축의 감소에 효과가 있다.<sup>10)</sup>

이 연구에서는 UP-MMA를 결합재로 하는 폴리머 콘크리트의 경우 재령, UP-MMA비, 수축저감제(SRA)의 첨가량 및 시험온도가 경화수축에 미치는 영향을 구명하고자 한다. 이들 4가지 요소에 대한 각각의 범위는 실제 폴리머 콘크리트 제조 시 적용가능한 한도 내에서 정해진 값이다.

### 3.1.1 재령의 영향

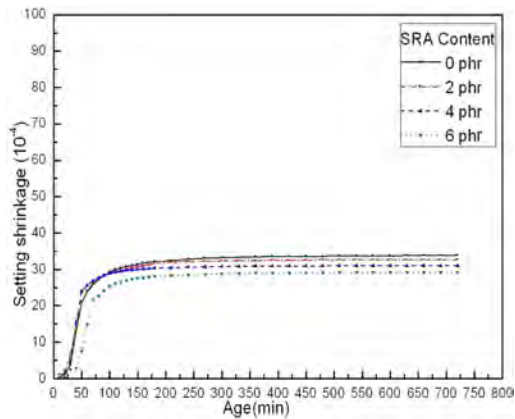
Figs. 1, 2 및 3은 시험온도가 10°C, 20°C, 30°C일 때 재령에 따른 경화수축의 변화경향을 나타낸 것이다. 재령 720분(12시간)까지만 시험한 것은 예비시험을 통해 24시간까지 경화수축을 측정해 본 결과 720분 이후에는 수축 발생이 미소하였기 때문이다.

이 결과에서 보면 재령 720분을 기준으로 할 때, 120분에서의 경화수축이 평균 94.5%(32개 데이터 평균)에 달함으로써, 재령 초기에 수축이 거의 다 발생함을 알 수 있다. 즉 120분까지는 경화수축발생이  $0.392 \times 10^{-4}/\text{min}$ 이었으나 그 이후부터 720분까지는  $0.0044 \times 10^{-4}/\text{min}$ 로서 매우 느리게 나타났다. 이러한 결과는 재활용 PET 폴리머

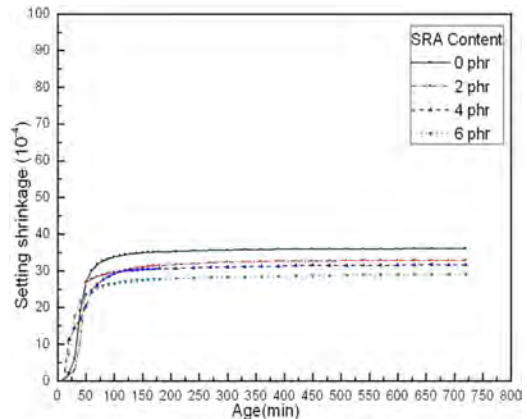
콘크리트의 경화수축 발생<sup>7)</sup>과 비슷한 경향을 보여주는 것이다.

그리고 재령 720분에서의 경화수축은 최대값  $82.6 \times 10^{-4}$ , 최소값  $29.2 \times 10^{-4}$ 으로  $53.4 \times 10^{-4}$ 의 차이가 있었으며, 이는 UP와 MMA의 비, SRA의 첨가량, 시험온도 등의 영향을 받는 것으로 나타났다.

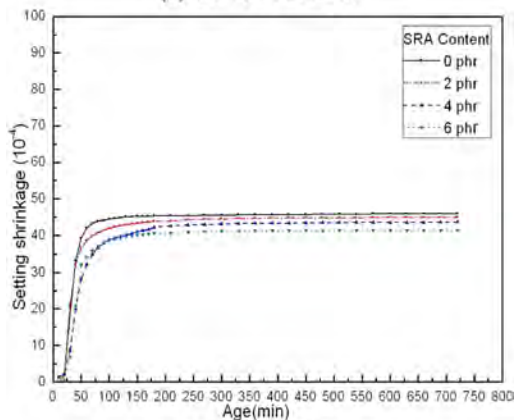
이러한 시험 결과를 기존의 연구들과 비교해 보면 보통 시멘트나 고강도 시멘트 콘크리트의 경우 건조수축이  $500\sim 800 \times 10^{-6}$ 이며,<sup>8,9,11)</sup> 포장 콘크리트의 현장 측정 건조수축이 21일 재령에서  $154\sim 249 \times 10^{-6}$ 이라는 연구 결과<sup>12)</sup>와 비교해 볼 때 매우 큰 값을 알 수 있다. 그러나 PMMA 콘크리트의 경우 경화수축이  $60 \times 10^{-4}$  정도라는



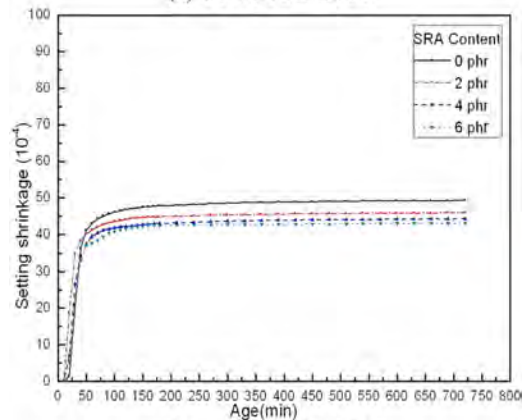
(a) UP 70 : MMA 30



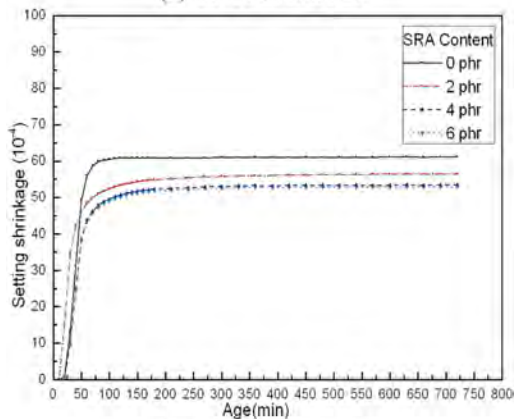
(a) UP 70 : MMA 30



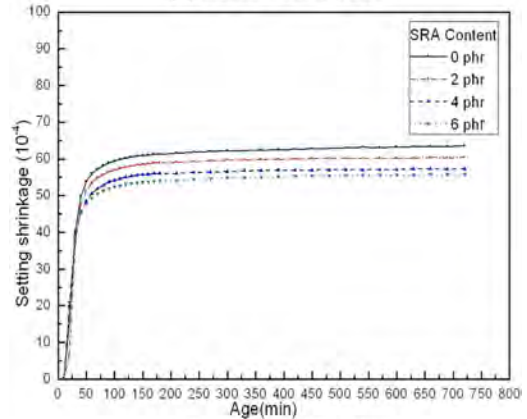
(b) UP 80 : MMA 20



(b) UP 80 : MMA 20



(c) UP 90 : MMA 10



(c) UP 90 : MMA 10

**Fig. 1** Development of setting shrinkage depending on age at test temperature of 10°C

**Fig. 2** Development of setting shrinkage depending on age at test temperature of 20°C

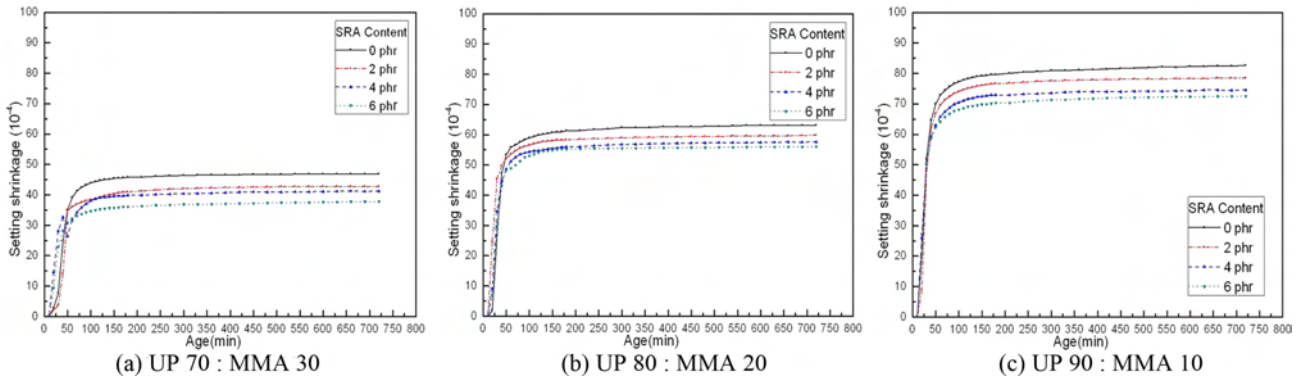


Fig. 3 Development of setting shrinkage depending on age at test temperature of 30°C

연구 결과<sup>13)</sup>와 비교해 보면 비슷한 값을 알 수 있다.

보아 UP 비율이 확실하게 경화수축의 변화에 작용함을 알 수 있다.

### 3.1.2 UP : MMA비의 영향

Fig. 4는 UP-MMA비가 경화수축에 미치는 영향을 파악하기 위한 그림이다. 이 그림에서 보면 UP의 함량이 많아질수록 경화수축이 현저히 커짐을 알 수 있다. 그 원인은 UP 수지 자체의 경화수축이 6~10% 정도로 크게 일어나는데 기인한다고 볼 수 있다.

### 3.1.3 SRA 첨가량의 영향

Fig. 5는 SRA의 첨가량이 경화수축에 미치는 영향을 파악하기 위한 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 SRA 첨가량에 따른 경화수축의 차이는 작게 나타났다. 즉 SRA 0 phr(SRA 미첨가)일 때와 6 phr일 때 경화수축의 차이는 시험온도 10°C일 때 평균  $8.2 \times 10^{-4}$ , 20°C일 때  $7.7 \times 10^{-4}$ , 30°C일 때  $10.1 \times 10^{-4}$ 로서 전체적으로는 평균  $8.6 \times 10^{-4}$ 을 보여 앞에서 언급한 UP-MMA비에 따른 경화수축의 차이보다 훨씬 작게 나타났다.

UP-MMA비의 영향을 파악하기 위해 그 비가 90:10 일 때와 70:30일 때의 차이를 살펴보면 시험온도 10°C에서  $24.0 \sim 28.2 \times 10^{-4}$ , 20°C에서  $26.7 \sim 27.4 \times 10^{-4}$ , 30°C에서  $34.7 \sim 35.6 \times 10^{-4}$ 이었으며, 평균 경화수축은  $29.4 \times 10^{-4}$ 으로 나타났다. 또한 UP-MMA비가 90:10, 80:20, 70:30일 때의 경화수축 변화경향을 보면 등간격을 유지하는 것으로

또한 UP-MMA비 별로 SRA 첨가량에 따른 경화수축의 차이는 거의 일정하여 UP-MMA비와 SRA 첨가량은

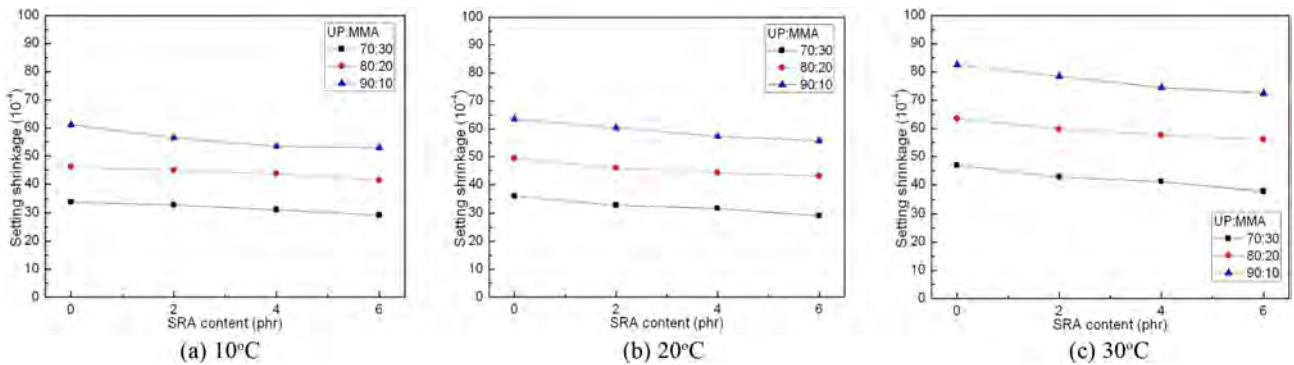


Fig. 4 Influence of UP-MMA ratio on setting shrinkage development depending on SRA content

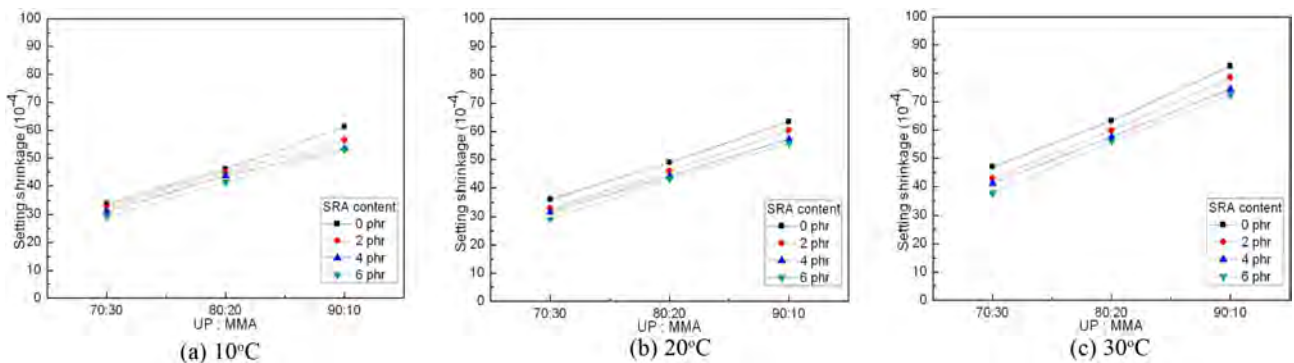


Fig. 5 Influence of SRA content on setting shrinkage development depending on UP-MMA ratio

상호간의 작용에 간섭이 일어나지 않음을 알 수 있다.

### 3.1.4 시험온도의 영향

Fig. 6은 경화수축에 미치는 시험온도의 영향을 알아보기 위한 그림이다. 이 그림에서 시험온도 10°C와 30°C에서의 경화수축 차이는 SRA 첨가량이 0 phr일 때 13.2~21.4

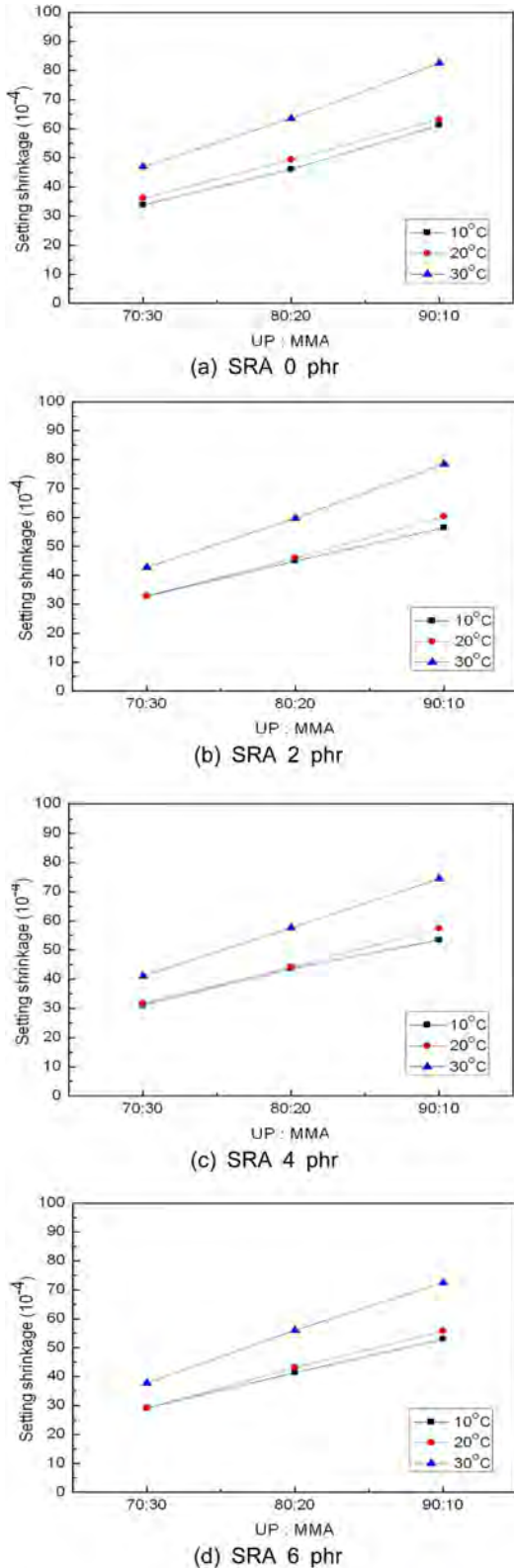


Fig. 6 Influence of test temperature on setting shrinkage development depending on UP-MMA ratio

$\times 10^{-4}$ , 2 phr일 때  $10.0\sim 22.0 \times 10^{-4}$ , 4 phr일 때  $10.1\sim 21.0 \times 10^{-4}$ , 6 phr일 때  $8.6\sim 19.5 \times 10^{-4}$ 으로 나타났다. 이러한 차이는 UP-MMA비가 증가함에 따라 커지는 경향을 보였으나, 차이의 대부분이 시험온도 20°C와 30°C에서 발생한 경화수축의 차이임을 알 수 있다.

즉 시험온도 10°C와 20°C에서의 차이가 매우 작게 나타났는데, 특이한 경향은 SRA 0 phr일 때는 UP-MMA비에 따라 일정한 폭을 유지하면서 증가하는 경향을 보였으나 SRA 2, 4, 6 phr일 경우 UP-MMA비가 70:30과 80:20일 때는 차이가 없고, 90:10에서만 차이를 보였다는 점이다.

이러한 경향은 UP-MMA비와 시험온도가 상호간에 간섭을 하며, UP가 MMA보다 경화수축에 미치는 영향이 크기 때문에 나타난 결과라고 판단된다.

### 3.2 열팽창계수

UP-MMA비가 열팽창계수에 미치는 영향을 구명하기 위해 시험체는 온도 25°C에서 재령 168시간 동안 양생하였으며, SRA 첨가량은 예비시험 결과 열팽창계수에 미치는 영향이 매우 작게 나타나 4 phr로 고정하였다.

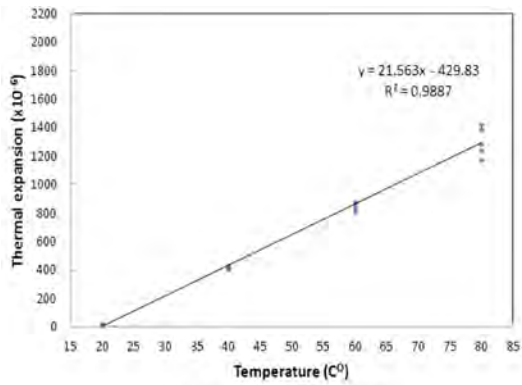
Fig. 7은 UP-MMA비가 70:30, 80:20, 90:10일 때 열팽창률을 시험한 결과를 나타낸 그림이고, 이것으로부터 열팽창계수를 산출한 결과는 Table 9와 같다.

이 그림에서 보면 열팽창률은 온도가 상승에 따라 급격히 증가하여 80°C에서의 열팽창률은 UP-MMA비가 70:30일 때  $1,424 \times 10^{-6}$ , 80:20일 때  $1,809 \times 10^{-6}$ , 90:10일 때  $2,047 \times 10^{-6}$ 에 달하였다. 그리고 온도가 증가함에 따라 6개 시험치에 대한 분산이 커져 80°C에서는 비교적 큰 분산을 보였다. 시험온도와 열팽창률의 관계식은 직선회귀식으로 표현할 수 있으며,  $R^2$  값도 0.97 이상으로서 상관성이 높게 나타났다.

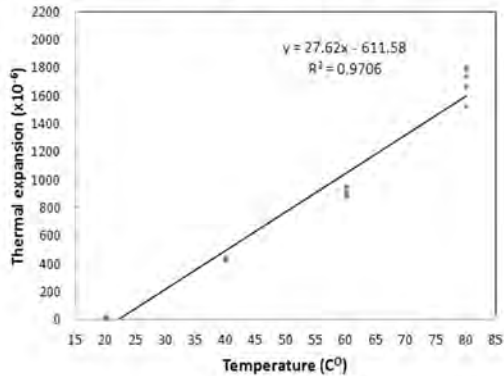
Table 9에서 열팽창계수를 살펴보면 UP-MMA비가 70:30일 때는  $21.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 80:20일 때는  $28.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 90:10일 때는  $31.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 로서 UP 비율이 많아질수록 현저하게 증가하는 경향을 보였다. 이 결과를 시멘트 콘크리트에 대한 열팽창계수가  $11\sim 13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 의 범위에 있다는 보고<sup>8,9)</sup>와 비교해 보면 2~3배에 달하는 값으로서, 프리캐스트 제품 제조 시에는 큰 문제가 없으나 기존 콘크리트 포장의 보수 등에 적용할 때에는 분리가 일어날

Table 9 Test results for coefficient of thermal expansion

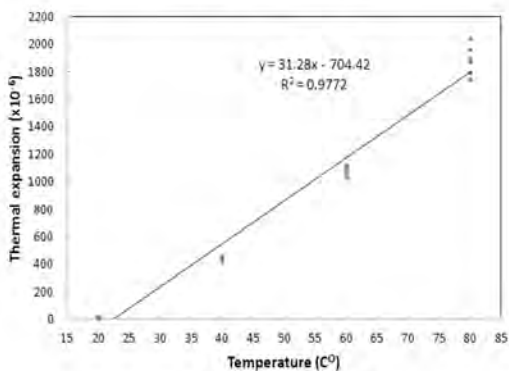
| UP:MMA | Test values ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) |      |      | Mean value ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) | Standard deviation |
|--------|---|------|------|--|--------------------|
| 70:30  | 19.2  | 22.8 | 20.5 | 21.6   | $\pm 1.5$          |
|        | 21.1  | 22.7 | 23.5 |  |                    |
| 80:20  | 28.7  | 25.2 | 29.7 | 28.0   | $\pm 1.6$          |
|        | 29.6  | 27.3 | 27.5 |  |                    |
| 90:10  | 31.4  | 28.8 | 33.9 | 31.2   | $\pm 1.7$          |
|        | 29.7  | 31.1 | 32.4 |  |                    |



(a) UP 70 : MMA 30



(b) UP 80 : MMA 20



(c) UP 90 : MMA 10

Fig. 7 Relation between thermal expansion and test temperature

수 있으므로 택 코트(tack coat) 등을 통하여 부착력을 강화시키기 위한 방안을 마련해야 할 것이다.

이 연구 결과에서 분명한 것은 UP 비율의 증가는 경화수축에서와 같이 열팽창계수도 증가시키는 중요한 요인임을 알 수 있으며, 반대로 MMA 비율의 증가시키면 경화수축과 열팽창계수의 감소 측면에서 유리하다는 점이다.

### 3.3 탄성계수

응력-변형률 시험에서도 열팽창률 시험에서와 마찬가지로 UP-MMA비를 변수로 하여 시험을 하였다.

Fig. 8은 UP-MMA비에 따른 압축응력-변형률 곡선이며, 이것은 시멘트 콘크리트의 경우와 상당히 다른 양상을

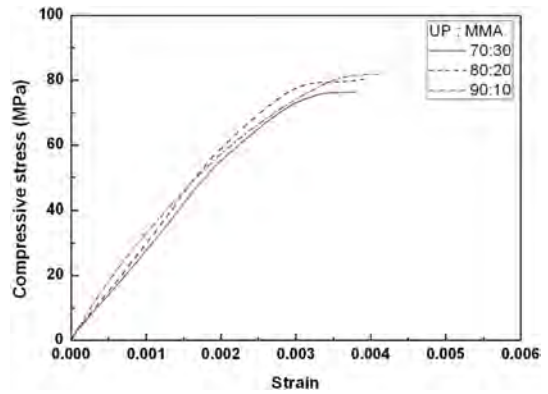


Fig. 8 Compressive stress-strain curves depending on UP to MMA ratio

Table 10 Test results of ultimate stress and strain

| UP : MMA (wt.%)       | 70 : 30 | 80 : 20 | 90 : 10 |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Ultimate stress (MPa) | 76.4    | 80.5    | 82.1    |
| Ultimate strain       | 0.00381 | 0.00395 | 0.00418 |

Table 11 Test results of elastic modulus

| UP:MMA (wt.%)         | 70:30             | 80:20             | 90:10             |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Elastic modulus (MPa) | $2.8 \times 10^4$ | $3.1 \times 10^4$ | $3.3 \times 10^4$ |

보이고 있다. 즉 극한응력의 약 70%까지 거의 직선형태의 변화를 보인다는 점이다.

또한, 이 그림으로부터 얻어진 데이터를 정리해놓은 것이 Table 10이다. 여기서 UP-MMA비가 70:30, 80:20, 90:10일 때 극한응력은 각각 76.4, 80.5, 82.1 MPa이며, 극한 변형률은 각각 0.00381, 0.00395, 0.00418로서 UP 비율이 많아질수록 응력과 변형률 값이 커짐을 알 수 있다.

이러한 결과를 시멘트 콘크리트의 경우와 비교해 보면 최대응력이 100 MPa일 때 변형률이 0.003~0.004이라는 보고<sup>8)</sup>와 비슷한 값을 보였으며, 압축강도가 120~140 MPa인 UP 폴리머 콘크리트의 경우 변형률이 0.0050~0.0065라는 결과<sup>14)</sup>에 비해서는 상당히 작은 값을 보였는데, 이것은 UP와 MMA의 물성 차이 때문이라고 판단된다.

그리고 Fig. 8의 압축응력-변형률 곡선으로부터 얻어진 탄성계수 산출 결과는 Table 11과 같다. 여기에서 볼 수 있듯이 탄성계수는  $2.8 \sim 3.3 \times 10^4$  MPa로서 UP의 비율이 많아질수록 커졌다. 이 결과를 ACI 363R-92에 제시된<sup>8)</sup> 압축강도 83 MPa까지 적용 가능한 식  $E_c = 3.32(fc')^{0.5} + 6.9$ 에  $fc' = 80$  MPa를 대입하여 산출된 탄성계수 값  $3.65 \times 10^4$  MPa에 비해 약간 작았으며, 압축강도 120~140 MPa인 UP 폴리머 콘크리트의 탄성계수 값  $2.8 \sim 3.8 \times 10^4$  MPa<sup>14)</sup>의 범위에는 포함되는 값이다.

## 4. 결 론

이 연구는 콘크리트 포장의 보수나 프리캐스트 제품용으로 사용가능한 UP-MMA 폴리머 콘크리트의 경화수축, 열팽창계수 및 탄성계수에 대한 실험적 연구로서 얻어진

결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 경화수축은 재령 120분내에서 94.5% 이상 발현되었으며, 재령 720분(12시간) 이후에는 경화수축의 증가가 미소하였다. 경화수축은 최소  $29.2 \times 10^{-4}$ , 최대  $82.6 \times 10^{-4}$ 으로서 UP-MMA비, SRA 첨가량, 시험온도 등의 영향을 받으며, 특히 UP-MMA비에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 열팽창률은  $1,424\text{--}2,047 \times 10^{-6}$ 이었으며, 열팽창계수는  $21.6\text{--}31.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로서 UP 비율이 커질수록 현저하게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 열팽창계수의 값은 시멘트 콘크리트에 비해 큰 것이므로 이용시 감안해야 된다.
- 3) 압축응력-변형률 곡선의 특징은 시멘트 콘크리트의 경우보다 직선변형구간이 길게 나타났다는 점이며, 압축강도는  $76.4\text{--}82.1 \times 10^4 \text{MPa}$ , 극한변형률은 0.00381~0.00418, 탄성계수는  $2.8\text{--}3.3 \times 10^4 \text{MPa}$ 이었다. 보통 시멘트 콘크리트에 비해 극한변형률은 비슷하였고, 탄성계수는 작게 나타났다.
- 4) 이 연구를 통하여 얻어진 경화수축, 열팽창계수, 극한변형률, 탄성계수 등은 UP-MMA 폴리머 콘크리트를 실제 응용하기 위한 설계를 함에 있어서 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 농림수산식품부의 농림기술개발사업에 의해 이루어진 것으로서, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Fowler D. W., "Future Trends in Polymer Concrete," *Polymers in Concrete : Advances and Applications*, ACI SP-116, 1989. pp. 129~143.
2. Ahn, N., Park, D. K., Lee, J., and Lee M. K., "Structural Test of Precast Polymer Concrete," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 114, Issue 3, 2009, pp. 1370~1376.

3. Liu, Q., Shaw, M. T., and Parnas, R. S., "Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation," *Polymer Composites*, Vol. 27, Issue 1, 2006, pp. 41~48.
4. Shokrieh, M. M., Heidari-Rarani, M., Shakoyri, M., and Kashizadeh, E., "Effects of Thermal Cycles on Mechanical Properties of an Optimized Polymer Concrete," *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 8, 2011, 25, pp. 3540~3549.
5. Ignacio, C., Ferraz, V., and Orefice, R. L., "Study of the Behavior of Polyester Concrete Containing Ionomers as Curing Agent," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108, No. 4, 2008, pp. 2682~2690.
6. Kobayashi, T. and Ohama Y., "Low-Temperature Curing of Polymethyl Methacrylate Polymer Concrete," *Transportation Research Record 1003*, Transportation Reserch Board (ISSN: 0361-1981) 1984, pp. 15~18.
7. 조병완, 태기호, 이두화, "몬모릴로라이트를 이용한 재활용 PET 폴리머 콘크리트의 경화수축, 온도팽창계수, 압축강도," 콘크리트학회 논문집, 18권, 2호, 2004, pp. 205~212.
8. Neville, A. M., *Properties of Concrete (Fourth Edition)*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 378~449.
9. Mehta, K. P. and Monteiro, P. J. M., *Concrete (Third Edition)*, McGraw-Hill, pp. 99~119.
10. Altoubat, S. A. and Lange, D. A., "Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age," *ACI Materials Journal*, Jul.-Aug. 2001, pp. 323~331.
11. Wiegink, K., Marikunte, S., and Shah, S. P., "Shrinkage Cracking of High Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 409~415.
12. 윤영미, 서영찬, 김형배, "포장 콘크리트의 초기 열팽창계수 및 건조수축 측정 연구," 한국도로학회논문집, 10권, 1호, 2008, pp. 117~122.
13. Saliba, J., Roziere, E., Grondin, F., and Loukill, A., "Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, Issue 2, 2011, pp. 209~217.
14. 연규석, 김관호, 이필호, 김동수, 박윤제, "불포화 폴리에스터 수지를 이용한 고강도 폴리머 콘크리트의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 6권, 3호, 1994, pp. 131~141.

**요약** 이 연구는 시멘트 콘크리트 포장의 보수나 프리캐스트 제품용으로 사용되는 UP-MMA 폴리머 콘크리트의 경화수축, 열팽창계수 및 탄성계수에 대한 연구이다. 이를 위해 UP-MMA비, SRA 첨가량, 시험온도 등을 변수로 하여 경화수축 시험과 UP-MMA비에 따른 열팽창과 압축응력-변형률에 대하여 시험을 실시하였다. 그 결과 경화수축은  $29.2\text{--}82.6 \times 10^{-4}$ 으로 UP 비율과 시험온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 열팽창계수는  $21.6\text{--}31.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 탄성계수는  $2.8\text{--}3.3 \times 10^4 \text{MPa}$ , 극한변형률은 0.00381~0.00418이었으며, 이는 UP-MMA비에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 UP-MMA 폴리머 콘크리트의 적용을 위한 설계에 중요한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 폴리머 콘크리트, 경화수축, 열팽창계수, 극한변형률, 탄성계수