

# 고강도 폴리머 콘크리트보의 등가직사각형 응력분포

## Distribution of the Equivalent Rectangular Stress Block for High-Strength Polymer Concrete Beams

김 관 호\*      연 규 석\*\*      김 남 길\*\*      조규우\*\*\*\*  
Kim, Kwan Ho      Yeon, Kyu Seok      Jin, Nan Ji      Jo, Kyu Woo

### ABSTRACT

This study was conducted to analysis the distribution of the rectangular stress block for high-strength polymer concrete beam. C-shaped specimens were produced and tested to compute parameters of the rectangular stress block. They were  $k_1 = 0.73$ ,  $k_3 = 0.94$  and  $\gamma = 0.845$ , respectively. Experimental value of flexural strength of beam was same to be compared with theoretical value. But there is desirable to need many experimental data in order to exact design of polymer concrete structure.

### 1. 서 론

폴리머 콘크리트의 재료 및 역학적 성질에 대한 연구는 국내외적으로 많이 이루어 졌으며, 실용화에 대한 연구도 일본, 미국, 독일, 영국 등을 중심으로 활발하게 진행되어 오고 있다. 또한 ACI Committee 548에서는 각종 기초자료를 수집중에 있는 것으로 알려져 있으나, 현재까지 폴리머 콘크리트 구조물설계에 적용할 수 있는 기준은 제정되어 있지 않고 있다. 특히, 특히 압축강도<sup>3)</sup> 80~100MPa 전후를 갖는 폴리머 콘크리트의 재료적 성질이나 보의 구조적 특성에 대한 연구는 다소 이루어 졌으나, 압축강도 140MPa 전후의 고강도 폴리머 콘크리트를 사용한 휨 부재의 구조적 특성은 거의 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다<sup>1)</sup>.

따라서 본 연구에서는 고강도 폴리머 콘크리트보의 역학적 성질 가운데 구조설계시 필요한 주요변수를 실험적으로 구명하고, 고강도 폴리머 콘크리트보의 직사각 응력분포 특성을 분석함으로써 구조해석의 기초자료로 제공코저 한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 결합재

결합재로서는 스틸렌 모노머가 38% 포함된 불포화 폴리에스터 수지(UP), 촉진제는 옥탄산 코발트 8% mineral turpentine 용액(CoOc), 촉매제로서는 메틸에틸케톤 프록사이드(MEKPO)가 사용되었으며, 무기질의 골재와 유기질의 결합재 사이의 부착력 증진을 위하여 시란(Silan)을 첨가하였다. 사용된 불포화 폴리에스터 수지의 성질은 다음의 Table 1과 같다.

- \* 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원
- \*\* 정회원, 강원대학교 농업공학부 교수
- \*\*\* 정회원, 강원대학교 농공학과 대학원

Table 1 Properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity	Viscosity (25°C, poise)	Acid value	Styrene content (%)
1.12±0.02	30	24	38

### 2.2 충전재 및 골재

충진재로서는 중질 탄산칼슘(heavy calcium carbonate)을 사용했으며, 잔골재로는 5mm이하의 규사를, 굵은 골재로는 최대치수가 13mm인 편마암 쇄석을 사용하였다. 충전재 및 골재는 120±2°C에서 24시간 건조시킨 후 냉각시켜 사용하였다.

## 3. 시험체 제작

### 3.1 배합비 결정

폴리머 콘크리트의 배합비는 사용목적, 결합재의 종류, 골재 형상 및 입도 등 여러가지 요인에 의해 달라질 뿐 아니라 시멘트 콘크리트와 같이 배합의 결정방법이 정립되어 있지 않아 반복실험에 의해 구하는 것이 바람직하다. 워커빌리티, 압축강도를 고려하여 결정된 폴리머 콘크리트의 배합비는 Table 2와 같다<sup>2)</sup>.

Table 2 Mix proportion of polymer concrete

(Unit : wt. %)

Binder			Filler	Aggregate	
UP	SR	Silane (phr*)		Fine	Coarse
8.3	2.7	2.0	12	49.8	27.2

phr : parts per hundred parts of resin

SR : Shrinkage reducing agent

### 3.2 원주형 시험체 제작

원주형 시험체는 KS F 2419에 규정된 방법에 의하여 제작하였다.

### 3.3 C형 시험체 제작

등가 직사각형의 응력분포를 파악하기 위해 Hognestade등이 제안한 C형 시험체를 제작하였다. 시험시 주요 저동 부위인 중앙부는 무근이고, 양쪽 단부는 자체 파괴없이 중앙부에 편심하중을 전달하기 위해 철근으로 보강하였다.

### 3.4 폴리머 콘크리트 보 제작

본 시험에서는 철근 보강 폴리머 콘크리트 보의 휨거동을 구명하기 위해 Table 3과 같이 인장철근을 달리하는 5종류의 철근보강 폴리머 콘크리트 보가 제작되었다.

Table 3 Details of test beams

Beam No.	b(cm)	d(cm)	Tensile reinforcement	$\rho$ (As/bd)
FB-1	16	21	2-D29	0.038
FB-2	16	21	2D-32	0.047
FB-3	16	21	4-D29	0.076
FB-4	16	21	2-D29 2-D32	0.085
FB-5	16	21	4-D32	0.094

#### 4. 실험방법

##### 4.1 원주형 시험체의 압축시험

압축강도 시험은 KS F 2481(폴리에스터 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 규정된 방법에 따라 실시하였고 탄성계수는 KS F 2438(콘크리트 원주형 시험체의 정탄성계수 및 프아송비 시험방법)에 규정된 2가지 측정방법중 와이어 스트레인 게이지법을 이용하였다.

##### 4.2 C형 시험체의 휨 압축 실험

C형 시험체 중앙부의 깊이별 변형률을 측정하기 위해 중앙부의 압축, 인장 및 측면에 깊이별로 12개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 시험체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 처짐을 측정하기 위해 공시체 중앙부의 압축측에 2개의 변위측정기(LVDT)를 설치하였으며, 여기서 얻은 데이터의 평균치는 휨모멘트의 하중팔 길이 보정시에 사용되었다.

재하과정은 먼저 시험체 중앙부 인장측 연단에 부착된 스트레인 게이지의 초기값이 특정값( $100 \times 10^{-6}$ )에 도달할 때까지 주하중( $P_1$ )을 가한 후, 이 상태에서 인장측 연단의 변형률이 0에 도달할 때까지 편심하중( $P_2$ )을 서서히 증가시킨다. 이렇게 인장측 변형률이 0이 되게 주하중( $P_1$ )과 편심하중( $P_2$ )을 비례적으로 증가시키면서 시험체가 파괴할때까지 반복한다. 이때 단계별 하중과 위치별 변형률 및 LVDT 값은 데이터로그에 의해 연속적으로 기록되었다.

축력을 유발시키는 주하중( $P_1$ )은 2500kN용량의 Instron 만능시험기로 변위 제어방식에 의해 가력하였으며, 휨모멘트를 유발시키는 편심하중( $P_2$ )은 200kN용량의 수동식 유압잭과 200kN용량의 Load cell을 사용하였다. Fig.2는 C형 시험체의 압축시험 과정을 나타낸 것이다<sup>3)</sup>.

##### 4.3 폴리머 콘크리트 보

폴리머 콘크리트 보의 휨 시험은 3등분점 재하방식으로 하였으며, 보의 휨 파괴를 유발하기 위해 전단스팬비(a/d)는 4.0으로 하였고 재하에는 용량 2500kN인 만능시험기(UTM)를 사용하였다. 보의 재하점에는 지름이 4cm인 강봉을 설치하고, 강봉과 시험체 사이에는 응력집중을 완화시키기 위해 8mm 두께의 고무판을 삽입하였다. 또한 강봉위에는 I형빔을 올려놓은 다음 Load Cell을 장착하였다. 하중은 극한강도를 결정시킬 수 있도록 파괴시까지 재하하였으며, 변형률, 처짐 및 하중은 데이터로그에 의해 연속적으로 측정되었다.

#### 5. 결과 및 고찰

##### 5.1 강도 및 탄성계수

시험결과 압축강도는 136.7MPa로 나타났으며 탄성계수는 응력-변형률 곡선으로부터 파괴강도의 40%수준에서 할선 탄성계수로 구하였던 바 그 값은 평균 29.2GPa로 나타났다. 이 결과를 압축강도가 98MPa인 폴리머 콘크리트의 탄성계수가<sup>3)</sup> 24.5GPa인 것과 비교하면 상대적으로 높은 값이지만 압축강도 98~127MPa인 초고강도 시멘트 콘크리트의 탄성계수<sup>4)</sup> 40.2~43.9GPa인 것과 비교하면 상당히 작은 값이다.

또한 극한 변형률은 약 0.008로서 일반 시멘트 콘크리트의 극한 변형률이 0.003인 것에 비해 상당히 크게 나타남을 알 수 있다.

##### 5.2 등가직사각형 응력분포

휨압축을 받는 부재에서의 응력-변형률 관계는 식(2)와 같은 다항식으로 표시할 수 있다.

$$f_{ck} = a_1 \epsilon + a_2 \epsilon^2 + a_3 \epsilon^3 + \dots + a_n \epsilon^n \quad (2)$$

여기서,  $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$  은 Fig. 5와 같이 C형 시험체 중앙부에서 폴리머 콘크리트에 의한

단면 저항모멘트와 외력  $P_1$ ,  $P_2$ 에 생기는 모멘트의 차이를 최소화(최소자승법) 시키는 데서 얻어지는 미정계수이다.

이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \min = \sum \left\{ b \cdot \int f(\epsilon_i) y dy - [P_{1i} a_1 + P_{2i} (\delta_i + a_2 - a_1)] \right\}^2 \quad (3)$$

여기서,  $\delta_i$ : C형 시험체 중앙부 수평변위 식(2)를 4차다항식으로 표시하고 식(3)과 같이 회귀분석하여 구하면 식(4)와 같은 응력-변형을 상관관계식을 얻을 수 있다.

$$f_{ck} = 0.025\epsilon + 7.819 \times 10^{-7} \epsilon^2 - 3.139 \times 10^{-10} \epsilon^3 + 9.908 \times 10^{-15} \epsilon^4 \quad (4)$$

식 (4)에 의한 곡선과 원주형 시험체의 압축 응력 - 변형을 곡선과 비교하여 나타낸 것이 Fig. 6과 같다.

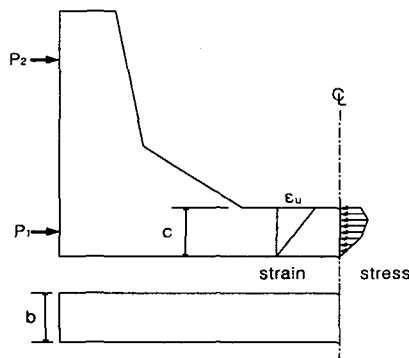


Fig. 5 Stress block of C-shaped specimen at ultimate load

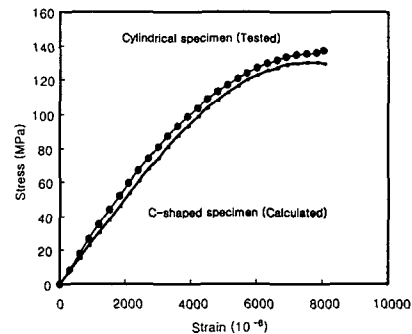


Fig. 6 Stress-strain curves for C-shaped and cylinder specimen

Fig. 7과 같이 휨 압축 부재에서 응력분포를 직사각형으로 등가 변환하는데는 아래와 같은 두가지 조건을 만족해야 한다<sup>4)</sup>.

1. 압축력의 크기가 같아야 한다.

$$k_3 \cdot f_{ck} \cdot S_0 = r \cdot f_{ck} \cdot k_1 \cdot C \quad (5)$$

여기서,

$k_1$  : 등가 직사각형의 높이가 중립축으로 부터 압축연단 까지의 거리에 대한 비

$k_3$  : 원주형 시험체의 최대압축응력 대한 C형 시험체의 최대압축력의 비

$S_0$  : C형 시험체 응력 - 깊이 곡선의 면적

2. 중립축으로 부터 압축력 중심까지의 거리가 같아야 한다.

$$C = \frac{\int f(\epsilon) y dy}{\int f(\epsilon) dy} \quad (6)$$

식 (1), (4), (5) 및 (6)을 연립하여 풀면 등가 직사각형 응력분포에 대한 각 매개변수의 값을 산출할 수 있으며, 이 값은 Table 4와 같다.

Table 4 Stress block parameters of the ultimate strength

$f_{ck}^*$ (MPa)	$f_{ck}^{**}$ (MPa)	$\epsilon_{max}$	$k_1$	$k_3$	$\gamma$
136.7	130.5	8,034	0.73	0.94	0.845

\* Comp. strength of cylinder specimen  
 \*\* Comp. strength of C-shaped specimen

### 5.3 폴리머 콘크리트보의 휨 특성

휨 하중을 받는 폴리머 콘크리트의 응력분포에 대한 등가직사각형 응력블럭의 매개변수가 결정되고, 휨압축에 대한 폴리머 콘크리트의 극한 변형률이 정해지면 보에 대한 이론적 분석이 가능하다. 즉 강도설계법 이론에 근거한 균형철근비 및 극한 휨모멘트 등의 산출이 가능하다.

본 실험에서는 C형 시험체에 의해 구해지는 매개변수에 근거하여 강도설계법 이론을 적용한 설계식의 정확도를 검토하기 위해 철근비를 달리한 5종의 휨 시험체를 제작하여 이에 대한 휨시험을 실시하여 극한모멘트를 구하였다.

균형철근비를 산출하는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

1. 먼저 압축연단으로부터 중립축까지의 거리  $c_b$  를 산출한다.

$$\frac{(d - c_b)}{c_b} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_u} \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{431}{2.0 \times 10^5} = 0.0022$ ,  $\epsilon_u = 0.008$

2. 콘크리에 의한 압축력과 철근에 의한 인장력이 같다는 힘의 평형조건을 식(8)로 나타낸다.

$$\gamma \cdot f_{ck} \cdot k_1 \cdot c_b \cdot b = A_s \cdot f_y \quad (8)$$

식 (8)과 식(9)로 부터 평형철근비를 산출하는 일반 관계식을 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_b = \frac{A_s}{bd} = \frac{0.845 \times f_{ck} \times 0.73}{f_y} \cdot \frac{0.008}{0.008 + \frac{f_y}{E_y}} \quad (9)$$

그러므로,  $f_{ck} = 136.7 \text{MPa}$ ,  $f_y = 431 \text{MPa}$  인 경우 균형철근비  $\rho_b = 0.153$ 으로서 일반 시멘트 콘크리트에 비해 매우 높음을 알 수 있다. 이 원인은 폴리머 콘크리트의 비교적 큰 극한 인장변형률에 기인된 중립축의 증가로 인한 1차적인 증대효과와 비교적 큰 극한 압축응력에 기인되는 2차적인 증대효과인 것으로 분석된다.

또한 단철근 직사각형 보에서 균형철근비 보다 적게 배근된 인장철근에 의해 파괴되는 보의 공칭 휨강도는 식(10)에 의해 구해진다. Fig. 8은 식(10)의 변수를 그림으로 나타낸 것이다.

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (10)$$

여기서,  $a = \frac{\rho f_y d}{0.845 f_{ck}}$

Table 5에 시험결과에서 얻어진 휨강도와 식(9)로부터 구해진 값을 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과로 부터 폴리머 콘크리트의 휨 압축응력의 분포형상을 직사각형으로 등가 변환한 후 강도설계법 이론에 근거하여 산정한 휨 모멘트 이론값과 실제값의 절대적인 크기는 비교적 근접 함을 알 수 있다.

이는 C형 시험체에 의해 구해지는 매개변수를 강도설계법에 적용 할 경우 폴리머 콘크리트 휨 부재의 휨 압축강도에 대한 산정이 어느정도 가능함을 보여주는 근거이기도 하다.

Table 5 CoMParison of observed and predicted ultimate moments of polymer concrete beams

Beam No	$\rho$	$\rho/\rho_b$	Mu1 (kN · m)	Mu2 (kN · m)	K (Mu2/ Mu1)
FB-1	0.038	0.25	116.7	107.9	0.92
FB-2	0.047	0.31	142.2	133.4	0.92
FB-3	0.076	0.50	172.6	206.9	1.15
FB-4	0.085	0.56	187.3	217.7	1.16
FB-5	0.094	0.61	197.1	236.3	1.20

Mu1 : Measured values  
Mu2 : Calculated values

그러나 철근비가 비교적 작은(0.25, 0.31  $\rho_b$ ) 시험체의 이론값은 실제값 보다 작은 값을 나타냈고, 철근비가 상대적으로 큰 (0.50, 0.56, 0.61  $\rho_b$ ) 시험체의 이론값은 실제값보다 15~20%정도 상회하여 이론값, 실제값 사이의 상관관계가 떨어졌다.

따라서 압축강도와 크기효과를 변수로 하는 보다 많은 C형 시험체에 대한 실험적 데이터의 축적 및 휨 부재의 구조적 특성에 대한 심도있는 연구가 더 이루어 져야 할 것이다.

## 6. 결 론

1. 본 시험에 사용된 폴리머 콘크리트의 압축강도는 136.7MPa 이었고 탄성계수는  $2.92 \times 10^4$ MPa 이었다.
2. 폴리머 콘크리트 C형 시험체에 대한 압축시험을 통하여 등가직사각형 응력블럭에 대한 매개 변수를 산출하여 보았던 바, 각각  $k_1=0.73$ ,  $k_3=0.94$ ,  $\gamma=0.845$  였다.
3. 휨을 받는 폴리머 콘크리트보의 응력상태를 등가직사각형 응력분포로 가정하고 강도설계법을 적용하여 산출한 이론 공칭 모멘트 강도값과 실험값을 비교하여 보았던 바, 매우 근접함을 알 수 있었다.
4. 폴리머 콘크리트보에 대한 보다 정확한 설계를 위해서는 압축강도와 공시체 크기를 변수로 하는 C형 시험체 및 폴리머 콘크리트보의 휨거동에 대한 보다 많은 실험적 데이터가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Ahmad, S. H., and Lue, D. M., "Flexure -Shear Interaction of Reinforced High- Strength Concrete Beams", ACI Structural Journal, Vol.84, No.4, 1987, pp.330~341.
2. Kim, K. H., "Mechanical Properties of High - Strength Polymer Concrete" M.S. Thesis, Kangwon National University, 1992.
3. Okada, K., Kobayashi, K. and Tokunaga, M., "Fundamental Studies on Structural Use of R
4. Rebeiz, K. S., Serhal, S. P., and Fowler, D. W., "Recommened Design Procedure in Shear for Steel-Reinforced Polymer Concrete", ACI Structural Journal, Vol.90, No.5, 1993, pp.562~567.