

## 양생온도에 따른 90 MPa 수준의 고강도 철근 콘크리트 보의 휨거동

황철성<sup>1\*</sup>

# Flexural Behavior of High-strength Concrete Beams of 90 MPa According to Curing Temperature

Chul-Sung Hwang<sup>1\*</sup>

**Abstract:** In this study, the flexural behavior of high strength concrete members with different curing condition of 90 MPa of compressive strength was investigated. Experimental parameters included normal and low temperature curing conditions, tensile steel amount and concrete compressive strength. 8 beam members were fabricated and flexural tests were carried out. Crack spacing, load-deflection relation, load-strain relation and ductility index were determined. Experimental results show that as the amount of rebar increases, the number of cracks increases and the crack spacing decreases. The higher the concrete strength, the smaller the number of cracks, but the effect is significantly smaller than the amount of rebar. As a result of comparison with the proposed average crack spacing in the design criteria, the experimental results are slightly larger than the results of the proposed formula, but the proposed formula does not reflect the concrete strength and curing conditions. The ductility index of normal temperature cured members was 3.36~6.74 and the ductility index of low temperature cured members was 1.51~2.82. The behavior of low temperature cured members was found to be lower than that of normal temperature cured members. As a result of comparing the ductility index with the existing studies similar to the experimental members, the ductility index of the high strength concrete member was larger than the ductility index of the ordinary strength concrete of the previous study. Further research is needed to understand more specific results.

**Keywords:** Low temperature curing, High-strength concrete, Flexural strength, Maturity, Ductility index

## 1. 서 론

고강도 콘크리트(High-Strength Concrete)를 교량 부재에 적용할 경우, 단면의 크기가 감소함에 따라 장경간의 교량 시공이 가능하다. 이러한 장점 때문에 최근 들어 전 세계적으로 콘크리트의 압축강도 70~120 MPa의 범위를 갖는 고강도 콘크리트의 사용이 빈번하게 시도되고 있다(Mansur et al., 1997; Pam et al., 2001; Sarkar et al., 1997). 교량에의 고강도 콘크리트의 적용은 1990년대 중반에 미국에서 시작되었다. 미국 텍사스에 위치한 North Concho River를 통과하는 교량에 압축강도 100 MPa 수준의 고강도 콘크리트를 적용하였다(Russell 1997a, 1997b).

미국 ACI(2002)와 국내 콘크리트구조기준(2012)에서 콘크리트 강도를 70 MPa로 제한하고 있는 이유와 시공성을 고려

하여 기존에는 콘크리트 압축강도 50 MPa 범위를 적용한 휨 실험 연구가 주를 이루었다.

Rhashid et al. (2005)는 콘크리트 압축강도를 40~120 MPa와 항복강도 400 MPa인 철근을 사용한 보를 제작하여 휨 거동을 실험적으로 분석하였다. 또한 Wu(2006)는 실험변수로 콘크리트 압축강도 70, 90 및 120 MPa, 철근비, 시편의 크기와 형상, 전단철근 및 피복두께를 선정하여 총 14개의 휨 부재를 제작하여 실험을 수행한 결과, 고강도 콘크리트 보의 거동은 일반강도 콘크리트 보와 유사하며, 철근비가 증가함에 따라 강성은 증가하고, 연성은 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보고하였다.

한편 고강도 콘크리트의 경우, 양생이 보통강도 콘크리트 보다 상대적으로 중요하다. 양생 기간 중 저온환경을 접하게 되면 강도발현에 심각한 문제가 발생되어 고강도를 달성할 수 없는 문제가 발생된다. 이러한 현상은 보통강도 콘크리트에 비하여 훨씬 큰 영향을 받을 것을 상식적으로도 알 수 있다.

1980년대 후반부터 국내에서도 고강도 콘크리트에 관한 연구를 시작하여 재료적인 측면에서 눈부신 연구 성과를 나타내고 있지만 여전히 고강도 콘크리트 구조의 거동에 관한

<sup>1</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 교수, 교신저자

\*Corresponding author: cshwang@gachon.ac.kr

Dept. of Civil and Environmental Eng. Gachon University, Seongnam-si, 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

연구는 부족한 실정이다. 구조거동에 관한 국내의 연구결과 부족으로 국내의 콘크리트 구조기준(2012)과 미국의 ASHTO LRFD Design Specification(2004)은 적용 가능한 콘크리트 강도를 70 MPa로 제한하고 있다.

따라서 본 연구에서는 양생조건에 따른 압축강도가 90 MPa 수준인 고강도 콘크리트의 휨 성능 실험연구를 수행하였다. 즉, 실험변수로 28일간의 25°C 습윤양생과 저온 대기양생(1일 2°C, 6일 -1°C, 6일 -5°C, 9일 -10°C 및 6일 -2°C) 두 가지로 구분하고, 보통 강도 및 90 MPa급 고강도 콘크리트, 그리고 두 가지의 철근비에 대하여 총 8개의 3 m 보를 제작한 후, 보의 극한휨강도, 하중-처짐 관계, 균열 형태, 파괴형상 및 연성 등을 파악하였다.

## 2. 고강도 콘크리트 배합 및 재료특성

### 2.1 콘크리트 배합

본 연구에서 사용한 굵은골재는 밀도 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 최대치수 19 mm인 쇄석 골재이고, 잔골재는 강모래를 사용하였다. 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(OPC)이다. 목표강도 90 MPa를 확보하기 위한 고강도 콘크리트의 배합표를 Table 1에 나타내었으며, 30 MPa급의 보통강도 콘크리트도 비교용으로 제작하였다.

### 2.2 양생

본 실험에서는 고강도 콘크리트 양생 온도 효과를 보기 위하여 28일간의 25°C 습윤양생과 저온 대기양생(1일 2°C, 6일 -1°C, 6일 -5°C, 9일 -10°C 및 6일 -2°C) 두 가지로 구분하여 양생을 실시하였다.

### 2.3 재료특성실험 결과

Table 1의 배합에 의한 측정된 콘크리트 슬럼프의 평균값은 184 mm이며, 공기량은 2.9%이다. 보 부재 제작 시 콘크리트 원주형공시체(100×200 mm)를 제작하여 KS F 2438에 따라 원주형 공시체의 탄성계수를 측정하였다. 공시체 중앙 100 mm구간에 등간격으로 3개의 LVDT를 설치하여, 하중재하

Table 1 Mix proportion

ID	Target strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				SP (%)
				W	OPC	S	G	
NSC	30	55.0	44.0	175	318	781	996	1.0
HSC	90	23.0	37.0	169	735	571	987	1.0

시 변위를 측정된 후, 측정된 변위를 게이지 길이 100 mm로 나누어 응력-변형률 곡선을 구하였다. 탄성계수의 경우 응력-변형률 곡선에서 변형률이 0.00005인 점과 최대 하중의 40%에 해당하는 점의 선분의 기울기를 이용하여 탄성계수를 산정하였다.

측정된 콘크리트의 평균 압축강도와 탄성계수의 평균 값 및 표준편차를 Table 2에 나타내었다. 저온 양생된 콘크리트의 평균 압축강도는 보통강도 콘크리트의 경우 20.21 MPa, 고강도 콘크리트의 경우 63.48 MPa로 측정되었다. 일반 온도에서 양생된 콘크리트의 평균 압축강도는 보통강도 콘크리트의 경우 32.80 MPa, 고강도 콘크리트의 경우 95.00 MPa로 측정되었다. 또한, 저온 양생된 콘크리트의 탄성계수 평균값은 보통강도 콘크리트의 경우 17.32 GPa, 고강도 콘크리트의 경우 32.26 GPa로 측정되었다. 일반 온도에서 양생된 탄성계수의 평균값은 보통강도 콘크리트의 경우 26.96 GPa, 고강도 콘크리트의 경우 42.25 GPa로 측정되었다. 이러한 결과로 볼 때, 보통강도 콘크리트의 압축강도는 저온 양생으로 인하여 38%, 고강도 콘크리트는 33% 정도 저하되는 것으로 나타났다. Fig. 1은 양생 조건에 따른 보통강도, 고강도 콘크리트 시험체에서 측정된 응력-변형률관계를 나타내고 있다.

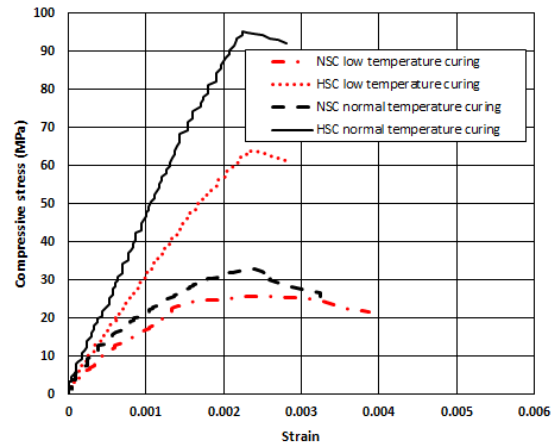


Fig. 1 Compressive stress-strain curve

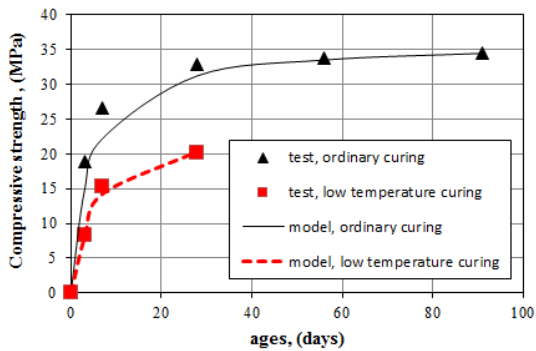
Table 2 Test results

ID	Compressive strength(MPa)		Elastic modulus(GPa)		Curing condition
	Mean	S.D	Mean	S.D	
NSC-L	20.21	2.41	17.32	3.11	low temperature
NSC-N	32.80	2.22	26.96	1.28	normal
HSC-L	63.48	4.81	32.26	4.54	low temperature
HSC-N	95.00	3.94	42.25	3.01	normal

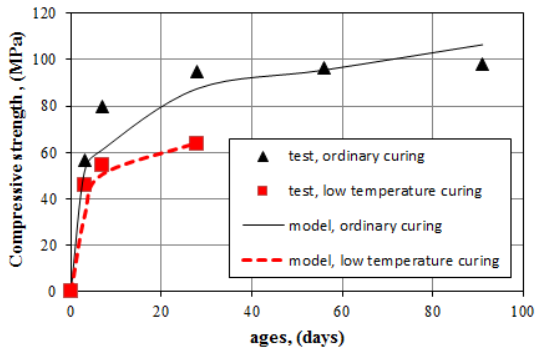
0 \* S.D : standard deviation

**Table 3** Details of test beams

Beam	Compressive strength of concrete(MPa)	Curing condition	Cross section size (mm)	Rebar type	Yield strength(MPa)	Elastic modulus of rebar(MPa)	Rebar details	
							Tension	Compression
NSC-1-L	20.21	2°C(1 day), -1°C(6 days), -5°C(6 days), -10°C(9 days), -2°C(6 days)	200×300	SD 400	475	198,140	2-D19	2-D16
NSC-2-L							2-D16	2-D13
HSC-1-L							2-D19	2-D16
HSC-2-L							2-D16	2-D13
NSC-1-N	32.80	25°C during 28 days					2-D19	2-D16
NSC-2-N							2-D16	2-D13
HSC-1-N							2-D19	2-D16
HSC-2-N							2-D16	2-D13



(a) NSC



(b) HSC

**Fig. 2** Comparison between tests and maturity model

**2.4 성숙도 모델을 이용한 압축강도 예측**

실험에서 구해진 재령별 압축강도 결과와 식 (1)에 나타난 Mun et al. (2014)과 Yang et al. (2016) 이 제안한 성숙도를 이용한 압축강도 예측 모델을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 기존의 연구에 의한 예측모델은 저강도 콘크리트일수록 실험결과와 더 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 고강도 콘크리트도 유사한 정확도를 나타냈다.

$$\frac{f_{ck}}{f_{cu}} = \frac{(\beta_1 + 1)X_1}{X_1^{\beta_1 + 1} + \beta_1}, X_1 = (M_{28}/M_s)^{0.75}(1 + \alpha),$$

$$\alpha = 0, \beta_1 = 1.5 \text{ for } (M_{28}/M_s)^{0.75} \leq 1.0, \quad (1)$$

$$\alpha = R_G^{0.3}, \beta_1 = 1.5 \text{ for } (M_{28}/M_s)^{0.75} \geq 1.0$$

여기서,  $f_{ck}$ : 양생온도별 28일 압축강도,  $f_{cu}$ : 표준양생 시 재령 28일에서 압축강도,  $M_{28}$ : 양생온도별 28일 성숙도,  $M_s$ : 표준양생 시 재령 28일에서 성숙도이다.

**3. 힘부재 실험**

**3.1 힘부재 설계**

철근콘크리트 힘부재는 폭 200 mm, 높이 300 mm 크기의 직사각형 단면으로 지간 길이 3,000 mm로 제작하였다. 실험 변수는 힘철근 량, 콘크리트 압축강도 및 양생조건으로 하여 총 8개의 힘 부재를 제작하였다. 사용된 철근은 SD400으로 직접 인장실험 결과 항복강도는 475 MPa, 탄성계수는 198,140 MPa로 나타났다. Fig. 3에 실험부재들의 철근배근도를 나타내었다.

**3.2 힘 실험방법**

연직 액츄에이터를 통해 3점 하중재하방식으로 하중을 단계별로 재하하였다. 시편의 양쪽 단부로부터 150 mm 씩 떨어진 단순지지점으로 하였으며, 지점 사이의 거리는 3,000 mm로 구성하였다. 하중 가력점은 부재의 중앙에 위치하였으며, 하중재하속도는 변위제어로서 1.5 mm/min의 속도로 재하하였다. Fig. 4에 하중가력 형상 및 센서 부착 상세를 나타내었다. 하중이 재하되는 동안 처짐을 측정하기 위하여 부재 중앙에 LVDT를 설치하였으며, 지간 중앙점에서의 철근변형률을 측

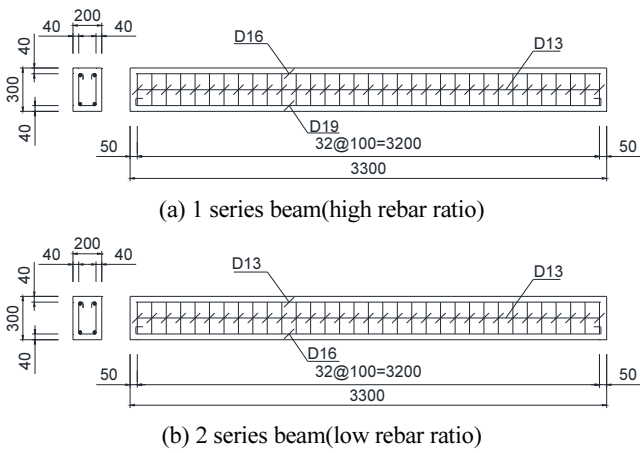


Fig. 3 Dimension of test beam

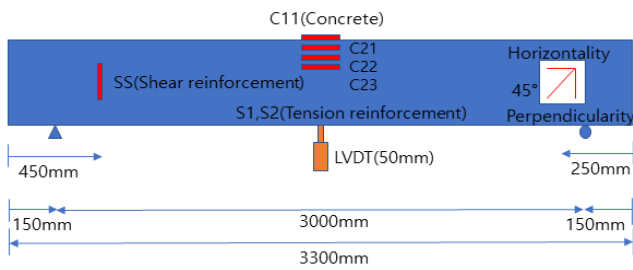


Fig. 4 Instrumentation used for the beam flexural test(unit: mm)

정하였다. 또한, 하중이 가력됨에 따라 발생하는 단면의 종방향 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 변형률 게이지를 4개 부착하였다.

## 4. 힘부재 실험결과 및 분석

### 4.1 균열거동 특성

부재의 균열 및 파괴양상을 파악하기 위하여 최종 파괴 시 까지 하중을 재하하였다. 과소철근으로 배근된 부재들인 이 유로 모든 부재들의 초기 힘 균열은 극한하중의 대략 10% 내 외에서 발생하였다. 실험 부재들의 균열발생 형상을 Fig. 5에 나타내었으며, 균열개수는 철근량이 많은 1-시리즈가 철근량이 적은 2-시리즈보다 많이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 강도가 높을수록 균열개수가 줄어들며, 양생조건도 유사하게 나타났지만 그 효과는 철근량보다는 상당히 작은 것을 알 수 있었다.

### 4.2 균열간격 특성

CEB-FIP Model Code(1978)에서는 OPC콘크리트에 대해

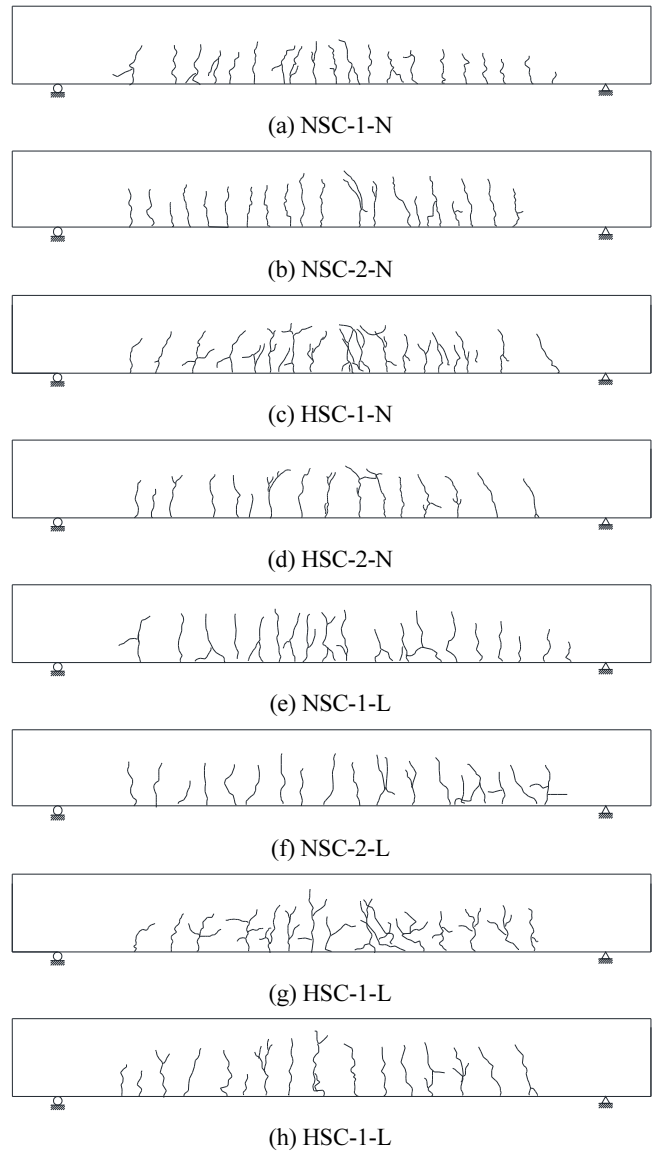


Fig. 5 Crack patterns

서 다음 식 (2)와 같은 평균 균열 간격을 제안하고 있다.

$$S_m = 2\left(c + \frac{s}{10}\right) + k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_{eff}} \quad (2)$$

여기서,  $c$ : 콘크리트 순दै개,  $s$ : 종방향 철근의 간격,  $k_1$ : 철근과 콘크리트간의 부착계수(= 0.4),  $k_2$ : 단면 내에서 응력분포계수(= 0.125),  $\phi$ : 종방향 철근 직경(mm),  $\rho_{eff}$ : 유효철근비이다.

실험과 식 (2)에서 구해진 균열 개수, 간격을 Table 4에 나타내었다. 모든 부재에 발생한 균열간격은 식 (2)에서 구해진 값보다는 실험에서 얻어진 결과가 더 크게 나타났으나, 식 (2)는

**Table 4** Crack number and spacings

ID	Test		Equation (2)		Test / Eq. (2)	
	Number (EA)	Space (mm)	Number (EA)	Space (mm)	Number (EA)	Space (mm)
NSC-1-N	20	107	-	162	-	0.66
NSC-2-N	19	101	-	190	-	0.53
HSC-1-N	18	123	-	162	-	0.76
HSC-2-N	16	123	-	190	-	0.65
NSC-1-L	19	106	-	162	-	0.65
NSC-2-L	19	105	-	190	-	0.55
HSC-1-L	15	124	-	162	-	0.77
HSC-2-L	16	119	-	190	-	0.63

콘크리트 강도 및 양생조건 등을 반영하지 못하는 문제점이 있다.

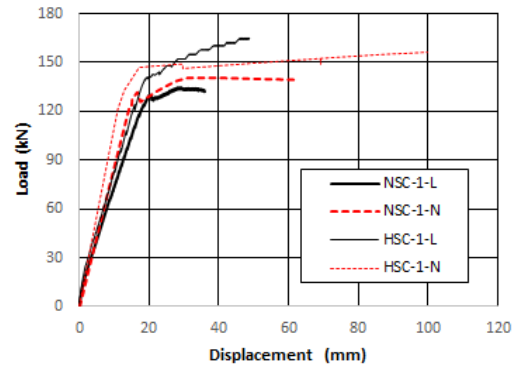
### 4.3 하중-처짐 곡선

하중 단계별로 부재의 중앙 단면위치에 설치된 변위계를 이용하여 처짐 값을 측정하였다. Fig. 6은 실험에서 구해진 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 균열하중은 하중-처짐 곡선에서 초기 선형구간 종점에서 하중 값으로, 항복하중은 철근이 항복할 때의 하중으로, 극한하중은 하중-처짐곡선의 최대 하중으로 산정하였다. Table 5에 균열하중, 항복하중 및 극한 하중 상태의 하중, 처짐 및 연성지수 값을 나타내었다. 일반적으로 콘크리트 구조물의 연성은 연성지수(ductility index)로 정량화할 수 있으며, 변형 특성 중에서 구조물의 처짐 등을 바탕으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다(FHA, 2006; Jang 2008).

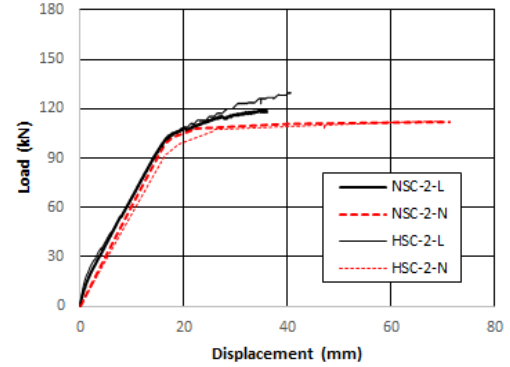
$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (3)$$

**Table 5** Test result of cracking, yielding and ultimate load

ID	Crack	Yield state		Ultimate state		Ductility index
	$P_{cr}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\Delta_u / \Delta_y$
NSC-1-N	12.28	123.17	18.63	128.23	62.54	3.36
NSC-2-N	12.41	99.56	16.42	112.24	71.29	4.34
HSC-1-N	27.12	109.38	14.81	120.21	99.76	6.74
HSC-2-N	27.64	92.45	16.82	111.96	69.84	4.15
NSC-1-L	11.33	123.76	18.62	134.57	28.17	1.51
NSC-2-L	11.37	100.67	16.29	118.88	36.33	2.23
HSC-1-L	26.00	128.67	16.97	165.04	47.89	2.82
HSC-2-L	27.11	101.32	16.37	129.79	40.15	2.45



(a) 1 series beams (large amount of rebar)



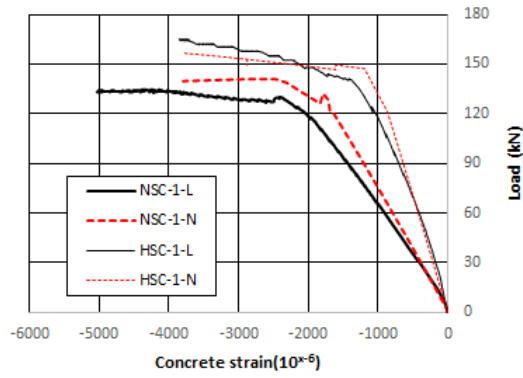
(b) 2 series beams (small amount of rebar)

**Fig. 6** Load-deflection relationship

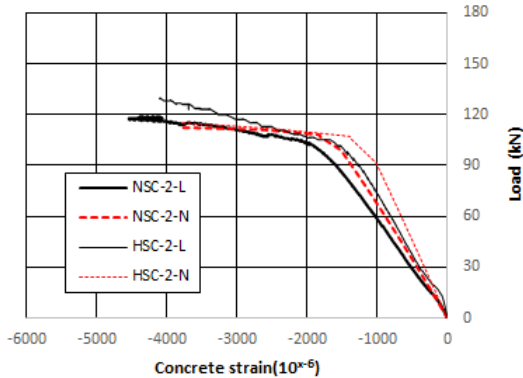
여기서  $\mu$  : 부재의 연성지수,  $\Delta_{u(y)}$  : 부재의 극한(항복)하중에서의 처짐이다.

Fig. 6에서 처럼 철근량이 많은 1시리즈 부재들의 극한강도가 철근량이 적은 2시리즈보다 명확하게 크게 나타났다. 또한 정상 온도에서 양생된 콘크리트 휨부재들이 저온 양생된 콘크리트 부재들보다 변위량이 크며, 연성거동을 하고 있음을 알 수 있다. 다만, 콘크리트 압축강도의 영향은 이론적인 예상보다 크지 않음을 알 수 있었으며, 고강도일수록 저온 양생으로 인한 구조 성능 감소가 더 큼을 알 수 있었다.

식 (3)에 의해 계산된 연성지수를 Table 5에 나타내었다. 정상 양생된 부재들의 연성지수는 3.36~6.74이며, 저온 양생된 부재들의 연성지수는 1.51~2.82이다. 앞의 하중-처짐관계에서 언급한 바와 같이 저온양생된 부재들의 거동은 정상 양생된 부재들에 비해서 연성도지수가 저감됨을 재확인할 수 있다. 한편, 이 부재들과 유사한 철근비를 갖는 기존연구(Hong, 2011)에서 항복강도가 400 MPa인 철근과 압축강도가 24, 30 및 50 MPa의 콘크리트를 적용한 부재의 연성지수는 1.09, 1.85 및 1.46으로 나타난다. 따라서 본 연구에서 고강도 콘크리트 부재의 연성지수는 선형연구(Hong, 2011)의 보통강도 콘크리트의 연성지수 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 다만, 더 구체적인 결과를 파악하기 위해서는 추가적인 상세 실험

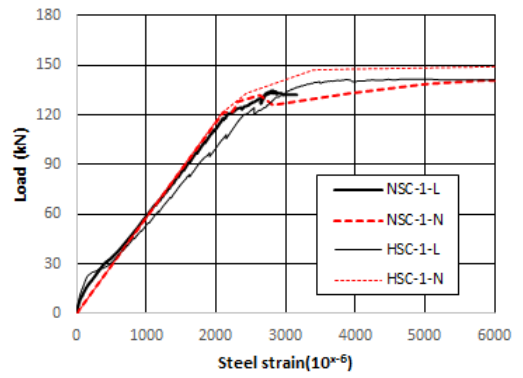


(a) 1 series beams (large amount of rebar)

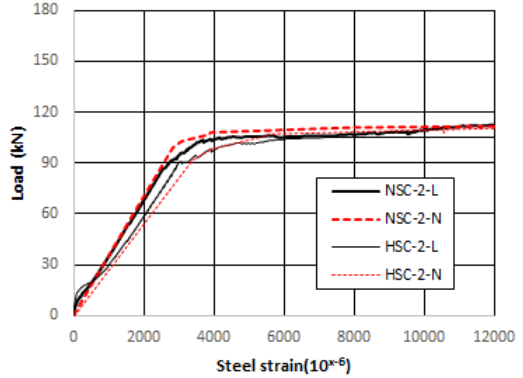


(b) 2 series beams (small amount of rebar)

Fig. 7 Load-concrete strain relationship



(a) 1 series beams (large amount of rebar)



(b) 2 series beams (small amount of rebar)

Fig. 8 Load-rebar strain relationship

연구가 필요하다고 판단된다.

#### 4.4 하중-변형률 관계

실험부재에 부착된 변형률게이지를 이용하여 하중-변형률 관계를 파악하여 Figs. 7, 8에 하중-변형률관계 곡선을 나타내었다. 콘크리트 압축연단의 극한 변형률은 0.0037~0.0050 정도 발생되었으며, 콘크리트의 압축강도가 낮을수록 극한 변형률 값이 크게 나타났으며, 고강도일수록 초기 기울기가 커서 탄성계수 역시 큼을 알 수 있다. 철근이 항복할 때의 변형률은 약 0.0025 근처로 나타나, 철근의 직접인장실험 결과인 항복강도 475 MPa보다는 약간 크게 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 양생조건에 따른 압축강도가 90 MPa 수준인 고강도 콘크리트의 양생조건에 따른 구조 거동을 규명하기 위하여 휨 성능 실험연구를 수행하였으며, 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 연구자들이 제안한 성숙도 이론을 이용한 압축강도 예측 모델을 비교한 결과, 예측모델은 저강도일수록 실험결과와 더 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 고강도 콘크리트도 상당한 예측 정확도가 있는 것으로 나타났다.
- 2) 철근량이 증가함에 따라 균열 개수는 증가하고 균열간격은 감소하는 경향을 나타내며, 콘크리트 강도가 높을수록 균열개수가 줄어들기는 하지만 그 효과는 크지 않았다.
- 3) 설계기준에서 제안된 평균 균열 간격 식과 실험결과를 비교한 결과, 실험결과가 제안식의 결과보다 약간 크게 나타났으나, 제안식은 콘크리트 강도 및 양생조건을 반영하지 못하는 문제점이 있다.
- 4) 정상 양생된 부재들의 연성지수는 3.36~6.74이며, 저온 양생된 부재들의 연성지수는 1.51~2.82으로 나타나, 저온양생된 부재들의 거동은 정상 양생된 부재들에 비해서 연성도지수가 저감됨을 확인하였다.
- 5) 기존연구 결과와 연성지수를 비교한 결과, 고강도 콘크리트 부재의 연성지수는 선행연구의 연성지수 보다 크게 나타났으나, 더 구체적인 결과를 파악하기 위해서는 추가연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지기술개발사업의 연구비 지원(No. 20161120200190)에 의해 수행되었습니다.

## References

AASHTO LRFD Bridge Design Specification (2004), 3rd edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

ACI Committee 318 (2002), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 318.

Comité Euro-Internationale du Béton (1978), CEB-FIP Model Code-Design Code; Comité Euro-International du Béton, CEB Bulletin d'Information, Thomas Telford, London, UK, 124-125.

Federal highway administration (FHWA) (2006), Material property characterization of ultra-high performance concrete 1st ed., Washington D.C.; pp.23-49.

Hong, G. H. (2011), Flexural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Concrete and Reinforcing Bars, *Journal of Architectural Institute of Korea, Architectural Institute of Korea*, 27(6), 49-56.

Jang, I. Y., Park, H. G., Kim, S. S., Kim, J. H., and Kim, Y. G. (2008), On the Ductility of High-Strength Concrete Beams, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2(2), 115-122.

Korea Concrete Institute (2012), Design Code for Concrete Structure. Gimundang, Seoul.

Mansur, A. A., Chin, M. S., and Wee, T. H. (1997), Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 94(6), 663-674.

Mun, J. S., Yang, K. H., Jeon, Y. S., (2014), Maturity-Based Model for Concrete Compressive Strength with Different Supplementary Cementitious Materials, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(6), 082-089.

Pam, H. J., Kwan, A. K. H., and Islam, M. S. (2001), Flexural Strength and Ductility of Reinforced Normal-and High-Strength Concrete Beams, *Proceeding of the ICE-Structures and Buildings*, 146(4), 381-389 (30-100).

Rashid, M. A., and Mansur, M. A. (2005), Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure, *ACI Structural Journal*, 102(3), 462-471.

Russell, H. G. (1997b), High-Performance Concrete-From Buildings to Bridges, *Concrete International*, 19(8), 62-63.

Russell, H. G., Voltz, J. S., and Bruce, R. N. (1997a), Optimized Sections for High-Strength Concrete Bridge Girders, Report No. FHWA-RD-95-180, FHWA, U.S. Department of Transportation, 156 pp.

Sarkar, S., Adwan, O., and Munday, J. G. L. (1997), High Strength Concrete: an Investigation of the Flexural Behavior of High Strength RC Beams, *Structural Engineer*, 75(7), 115-121.

Wu, Z. (2006), Behavior of High-Strength Concrete Members Under Pure Flexure and Axial-Flexural Loadings, PhD Thesis, *Dissertation of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina*.

Yang, K. H., Mun, J. S., Kim, D. G., Cho, M. S. (2016), Comparison of Strength-Maturity Models Accounting for Hydration Heat in Massive Walls, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(1), 47-60.

Received : 07/19/2017

Revised : 08/07/2017

Accepted : 08/09/2017

**요 지** : 본 연구에서는 양생조건이 다른 압축강도 90 MPa 수준의 고강도 콘크리트 부재의 휨거동 실험을 수행하였다. 실험변수는 정상 및 저온 양생 조건, 인장 철근량 및 콘크리트 압축강도 수준 등을 고려하였다. 8개의 보 부재를 제작하여 휨 실험을 수행하였으며 균열 간격, 하중-처짐 관계, 하중-변형률 관계 및 연성지수를 파악하였다. 실험결과는 철근량이 증가함에 따라 균열 개수는 증가하고 균열간격은 감소하는 경향을 나타내며, 콘크리트 강도가 높을수록 균열개수가 줄어들기는 하지만 그 효과는 철근량보다는 상당히 작은 것을 알 수 있었다. 설계기준에서 제안된 평균 균열 간격 식과 비교한 결과, 실험결과가 제안식의 결과보다 약간 크게 나타났으나, 제안식은 콘크리트 강도 및 양생조건을 반영하지 못하는 문제점이 있다. 정상 양생된 부재들의 연성지수는 3.36~6.74이며, 저온 양생된 부재들의 연성지수는 1.51~2.82으로 나타나, 저온 양생된 부재들의 거동은 정상 양생된 부재들에 비해서 연성도지수가 저감됨을 확인하였으며, 본 연구와 기존 연구의 연성지수를 비교한 결과, 고강도 콘크리트 부재의 연성지수는 선행연구의 보통강도 콘크리트의 연성지수 보다 크게 나타났으나, 더 구체적인 결과를 파악하기 위해서는 추가연구가 필요하다고 판단된다.

**핵심용어** : 저온 양생, 고강도 콘크리트, 휨강도, 성숙도, 연성지수