

# Belite 시멘트를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Flexural Behavior of Reinforced  
High-Strength Concrete Beams Using Belite Cement



한상훈\*

Han Sang-Hoon



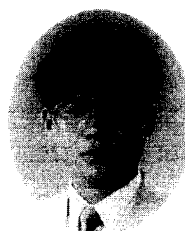
구봉근\*

Koo Bong-Kuen



김기수\*\*

Kim Gee-Soo



조홍동\*\*\*

Cho Hong-Dong



전체만\*\*\*\*

Juen Chea-Man

## ABSTRACT

A study was conducted to investigate the flexural behavior of reinforced high-strength concrete beams using Belite cement. In this study, fourteen reinforced Belite and control beams were tested. The major experimental variables are compressive strength( $350\text{kgf/cm}^2$  and  $600\text{kgf/cm}^2$ ) of concrete and reinforcement ratios( $0.0086\sim 0.0345$ ). They were tested by three point loading method.

Comparing with flexural behavior of normal reinforced concrete beams, the investigation were to : (1) determine experimentally the load-displacement relationships and the strain distribution on the section of test beams ; (2) determine experimentally the moment-curvature and the load-neutral axis relationship of Belite ; (3) investigate the flexural ductility of Belite ; (4) estimate the ratio of the capacities of nominal moment strength as a function of ACI to as a experiment.

From the test results, the flexural behavior of reinforced high-strength concrete beams using Belite cement are similar to flexural behavior of normal reinforced concrete beams.

Keyword : Belite, High-strength concrete, Flexural Behavior, Load-Displacement relationships  
Strain distribution, Moment-Curvature relationships, Flexural Ductility

\* 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 쌍용양회(주) 중앙연구소 콘크리트연구실장

\*\*\* 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료

\*\*\*\* 충북대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내  
주시면 1999년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근들어 건설 구조물이 초고층화, 대형화 그리고 특수화됨에 따라 고강도, 고유동 그리고 저발열의 특성을 발휘하는 고성능 콘크리트에 대한 필요성이 크게 증가하고 있는 실정이다. 특히, 새로 개발된 고강도 콘크리트는 압축부재로 사용될 때 콘크리트의 장점을 더욱 극대화하여 안전하고 경제적인 재료로 사용될 수 있으나, 콘크리트 강도가 높을수록 더욱 취성적인 재료가 되어 이에 대한 보완 조치가 없으면 부재의 연성이 확보되지 않아 휨부재로 사용할 때 안전성이 저하되므로 고강도 콘크리트를 사용하기 전에 구조 역학적 거동에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 기존 시멘트의 구성광물 중에서 규산2석회(C2S)와 알루미늄산3석회(C3A)의 함량을 조절함으로써 초기 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승을 저감시키며, 화학의 분산효과가 좋아 유동성을 증진시킬 뿐만 아니라 장기재령에서의 강도증진이 크게 발현되는 정점이 있는 Belite 시멘트를 고강도 철근콘크리트 보에 적용하여 전반적인 휨 거동 양상을 관찰하고, ACI 및 콘크리트표준시방서에 의거해 성능평가를 실시함으로써 Belite 시멘트를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 실용화에 대한 기본적인 자료를 제공하는 데 본 연구의 목적을 두었다. 비교를 위하여 1종 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC로 표기)로 기준 시험체를 제작하여 선행 실험을 실시하였다.

## 2. 재료 및 실험

### 2.1 사용재료 및 배합설계

본 연구에 사용한 시멘트는 Belite 시멘트와 1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. 1종 보통포틀랜드 시멘트는 일반 상용제품을 사용한 것이며, Belite 시멘트는 쌍용양회(주)가 개발한 고강도·고유동·저발열 시멘트이다. 시멘트의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 골재는 금강하천사와 25mm쇄석을 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 2와 같다. 콘크리트의 물리적 성질은 Table 3과 같으며, 배합조건은 Table 4와 같다.

Table 1 Physical characteristics of cement

구분	비중	44 $\mu$ m 산사 (%)	응결시간 (h:m)		W/C (%)	flow (%)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
			초결	종결			28일
OPC	3.15	12.5	3:40	6:20	48.5	101.8	413
Belite	3.20	5.5	6:45	10:00	48.5	110.5	429

Table 2 Physical characteristics of aggregate

구분	비중	흡수율 (%)	단위중량 (kgf/m <sup>3</sup> )	실적율 (%)	조립률
굵은골재	2.59	1.2	1529	59	7.64
잔 골재	2.57	1.5	1627	-	2.49

Table 3 Physical characteristics of concrete

구분	목표 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	슬럼프 (cm)	양생 구분	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )			탄성계수* (kgf/cm <sup>2</sup> )	포아송비
				7일	28일	56일		
OPC	350	11.5	현장	257	401	-	2.21	0.13
			표준	261	393	-	-	-
Belite	350	24.0	현장	181	326	347	2.27	0.18
			표준	182	330	354	2.53	0.17
	600	19.2	현장	345	556	603	2.99	0.15
			표준	357	568	630	3.12	0.14

\* 28일의 탄성계수 ( $\times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>)

Table 4 Mixing proportion of concrete

구분	설계 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/a (%)	단위 중량 (kgf/m <sup>3</sup> )				
				C	W	F	G	Adm.
OPC	350	39.8	41.0	495	197	646	973	0.15*
Belite	350	32.4	48.0	525	170	809	995	1.00**
	600	41.8	45.0	400	167	808	883	1.20**

\* Neo-mix (AE 감수제), \*\* SP-8N (고성능 AE 감수제)

### 2.2 시험체의 상세

본 연구를 수행하기 위하여 콘크리트의 강도(350, 600kgf/cm<sup>2</sup>)와 주철근비(2-D13, 2-D16, 2-D19, 2-D22, 2-D25)를 실험변수로 하여, 단면이 14 $\times$ 26cm이며 시험체 길이가 200cm인 기준 시험체 4개와 Belite 시험체 10개를 제작하였다. 시험체 제작시 전단 철근은 휨파괴를 유도할 수 있도록 콘크리트표준시방서와 기존의 연구자료를 근거로 하여 설계하였으며, 시험체의 상세한 형상 치수 및 철근배근은 Fig. 1과 같다. 시험체의 상세는 Table 5에 나타내었으며 시험체명의 기준은 아래와 같다.

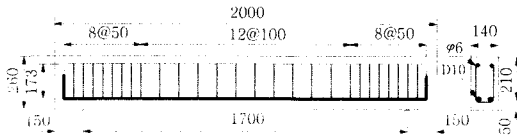


Fig. 1 Details of section (unit:mm)

예) CM-N2

C : 콘크리트 종류 (C:OPC, B:Belite)

M : 휨시험체

N : 콘크리트의 목표강도(N:350kgf/cm<sup>2</sup>)

H : 600kgf/cm<sup>2</sup>)

2 : 인장철근 종류 (1:2-D13, 2:2-D16, 3:2-D19, 4:2-D22, 5:2-D25)

Table 5 Classification of flexural beams

시험체명	시멘트	목표 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장 철근	$p$	$p_b$	$p/p_b$
CM-N1	OPC	350	2-D13	0.0086	0.036	0.24
CM-N2			2-D16	0.0135		0.38
CM-N3			2-D19	0.0195		0.54
CM-N4			2-D22	0.0260		0.72
BM-N1	Belite	350	2-D13	0.0086	0.036	0.24
BM-N2			2-D16	0.0135		0.38
BM-N3			2-D19	0.0195		0.54
BM-N4			2-D22	0.0260		0.72
BM-N5			2-D25	0.0345		0.96
BM-H1	600	600	2-D13	0.0086	0.048	0.18
BM-H2			2-D16	0.0135		0.28
BM-H3			2-D19	0.0195		0.40
BM-H4			2-D22	0.0260		0.54
BM-H5			2-D25	0.0345		0.72

## 2.3 실험방법

실험 중 시험체의 변형을 측정하기 위하여 콘크리트게이지를 최대휨모멘트가 발생하는 시험체의 지간 중앙부의 콘크리트 표면 양면에 총 12개를 부착하였으며, 철근게이지를 양쪽 인장철근의 중앙부 2개소와 중앙 점을 기준으로 150mm떨어진 2개소에 부착하여 인장철근의 변형률을 측정하였다. 시험체의 처짐은 보의 지간 중앙과 시험체의 4등분점 2개소에서 측정하였다. 재하는 100tf 용량의 U.T.M.을 사용하여 단순지지 조건하에서 보의 중앙에 1점 재하하였다. 재하 방식은 예상파괴 하중의 50%까지는 하중 조절 방식으로 그 이후는 변위 조절 방식으로 하였다. 재하하는 시험체가 파괴될

때까지 계속하였으며 시험체의 설치 상황은 Fig. 2와 같다.

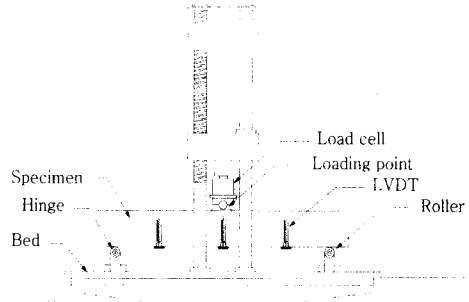


Fig. 2 The setting of loading test

## 3. 실험 결과 및 분석

본 실험결과를 초기균열, 철근항복, 최대내력 발생시로 구분하고 각 발생시의 하중, 변위 그리고 압축연 변형률을 시험체별로 나누어 Table 6에 나타내었다. 압축연 변형률은 파괴 형태에 따라 압축연에서 변형률 게이지의 손상으로 측정이 불가능한 경우가 있었으므로 가능한 한도 내에서 결과치를 기술하였다.

### 3.1 하중-처짐 관계

Fig. 3에서 Fig. 5까지는 각 시험체의 하중-처짐 관계를 CM-N, BM-N 그리고 BM-H 계열로 구분하여 나타낸 것이다.

그래프를 통하여 알 수 있듯이, Belite 시험체의 하중-처짐 관계는 보통 강도 콘크리트 시험체의 하중-처짐 관계 특성과 비슷한 경향을 보였다. 즉, 인장 철근비가 큰 시험체일수록 휨 내력은 증가하였지만, 최대내력 도달 이후 처짐구간이 짧고 과보강된 경우 급격한 압축 파괴가 발생하여 종국상태시의 처짐이 작게 나타났다.

BM-N과 CM-N 계열을 비교해 보면, 철근보강이 0.24  $p_b$ (BM-N1, CM-N1), 0.38  $p_b$ (BM-N2, CM-N1), 0.54  $p_b$ (BM-N3, CM-N3)인 시험체는 공통적으로 철근항복 이후 시험체가 파괴에 도달할 때까지 완만한 경사의 처짐구간을 확보하였으나, 철근보강이 0.73  $p_b$ (BM-N4, CM-N4), 0.94  $p_b$ (BM-N5)인 시험체는 최대내력 도달 직후 급격한 하강곡선을 보

Table 6 Results of beam tests (unit of compressive end strain :  $\mu$ )

구분	초기균열시			철근항복시			최대하중시			균열간격		파괴형태
	하중 (tf)	변위 (mm)	압축연 변형률	하중 (tf)	변위 (mm)	압축연 변형률	하중 (tf)	변위 (mm)	압축연 변형률	최대 (cm)	평균 (cm)	
CM-N1	1.75	2.36	316	5.02	4.44	1182	7.27	38.18	-	22.0	12.3	휨 파괴
CM-N2	2.25	1.04	361	8.24	5.23	1495	9.75	17.04	2394	13.0	9.5	휨 파괴
CM-N3	2.20	0.74	301	11.08	6.82	1599	12.19	12.44	2687	15.4	11.4	휨 파괴
CM-N4	2.05	0.99	326	16.57	8.51	1640	16.57	8.51	-	14.3	8.1	휨압 파괴
BM-N1	1.68	1.11	275	4.06	4.21	974	6.94	26.14	-	16.5	9.4	휨 파괴
BM-N2	1.66	1.09	290	7.09	5.08	1375	8.52	16.77	-	15.5	7.4	휨 파괴
BM-N3	1.75	0.76	286	10.64	5.97	1544	12.47	18.12	-	16.2	8.6	압축파괴
BM-N4	1.77	1.03	292	14.84	8.88	2820	15.79	12.17	-	16.9	7.8	휨압 파괴
BM-N5	1.74	0.79	273	-	-	-	17.09	9.05	-	20.0	10.9	폭발압괴
BM-H1	1.56	1.14	172	4.61	3.51	715	7.48	29.61	-	17.5	10.4	휨 파괴
BM-H2	1.54	0.48	170	7.78	4.64	942	10.09	25.65	-	13.5	9.0	압축파괴
BM-H3	1.50	0.61	155	11.62	6.31	1225	12.71	15.17	-	18.5	10.0	압축파괴
BM-H4	1.61	0.44	168	14.13	6.73	-	15.99	12.18	-	12.3	10.9	폭발압괴
BM-H5	1.47	0.60	140	-	-	-	18.28	12.16	-	23.0	13.3	폭발압괴

였다. 철근 항복 이후 연성구간의 길이는 평형철근비에 대한 철근비가 동일한 경우 BM-N 계열이 CM-N 계열에 비해 상대적으로 길게 나타났다.

BM-N과 BM-H 계열을 비교해 보면, 평형철근비에 대한 철근비가 동일한 경우 콘크리트 강도가 높은 BM-H 계열의 시험체가 철근 항복 이후 처짐 구간이 상대적으로 짧게 나타났으며, 철근항복 이전의 하중-처짐 곡선의 점선 기울기가 크게 나타나 콘크리트가 고강도화 할수록 강성이 커지는 반면 취성적인 성질을 갖는다는 것을 알 수 있다.

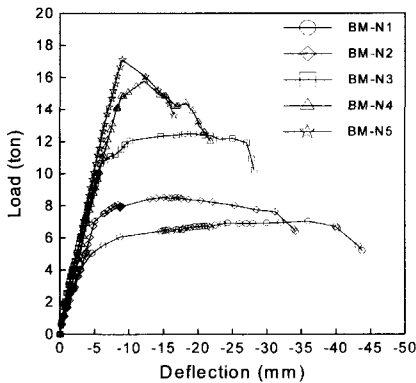


Fig. 3 Load-deflection for CM-N series

### 3.2 시험체 응력분포 및 중립축의 이동

Fig. 5는 시험체 중앙 단면의 변형률 분포를

대표적으로 나타낸 것이다. 그림의 각 점들은 하중 단계별로 측정된 게이지의 변형률이다. 변형률은 시험체 표면에 부착한 콘크리트게이지의 실측치만을 고려하였으며 최하단의 점은 인장철근의

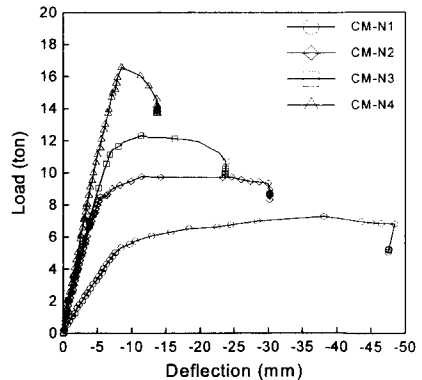


Fig. 4 Load-deflection for BM-N series

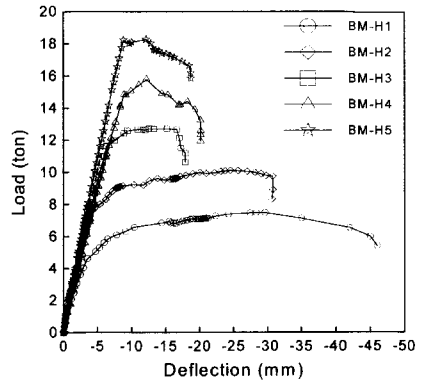


Fig. 5 Load-deflection for BM-H series

변형률을 사용하였다.

각 시험체의 변형률 분포를 살펴보면 대략적인 직선분포를 나타내고 있으며 하중 증가에 따른 중립축의 상승 과정을 잘 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 본 실험의 경우 철근보강이  $0.24 p_b$  이하(CM-N1, BM-N1, BM-H1, BM-H2),  $0.40 p_b$  이하(CM-N2, BM-N2, BM-H3),  $0.54 p_b$  (CM-N3, BM-N3, BM-H4) 그리고  $0.72 p_b$  (BM-N4)인 시험체는 공통적으로 압축부 콘크리트의 변형률이 극한변형률(본 연구에서는 약 0.003으로 가정)에 도달하기 이전에 인장철근이 먼저 항복하였으며 인장철근 분포의 항복이 즉각적인 보의 파괴를 일으키지 않는다는 것을 보여 주고 있다. 또한 인장철근 항복이후 발생하는 추가모멘트에 저항하기 위하여 중립축이 콘크리트의 압축부로 이동하고 이로 인하여 중립축과 인장철근의 거리를 증가시켜 철근의 변형률을 급속도로 증가시키는 것을 알 수 있다. 철근비가  $0.96 p_b$  (BM-N5)인 시험체의 경우 시험체가 파괴시점에 이를 때까지 중립축의 변화가 거의 없으며 압축부 콘크리트의 변형률이 인장철근의 변형률보다 증가율이 훨씬 크게 나타났다. 따라서, 압축연단에서 변형률이 극한변형률에 도달할 때 인장철근은 항복점에 못 미치는 변형률을 보였다.

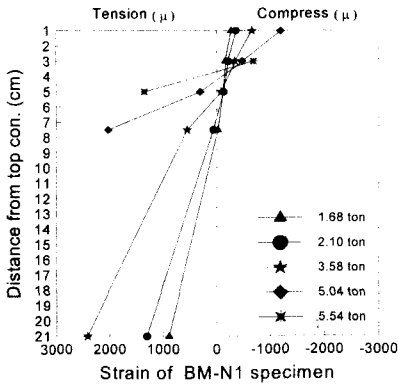


Fig. 6 Strain distribution of BM-N1

전반적으로 변형률 분포에 따른 응력분포 형상은 파괴 직전에 대체로 삼각형 분포를 이루고 있어 기존의 실험 결과 및 이론<sup>1,2)</sup>과 같은 경향을 나타내고 있으나, 종국상태에 대한 응력분포는 더 많은 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

BM-N 계열과 BM-H 계열을 비교해 보면, 평형철근비에 대한 철근비가 동일한 경우 최종 파괴 상태 직전의 변형률 분포는 BM-H 계열 시험체가 더욱 급한 기울기를 보였다. 이는 '고강도일수록 응력-변형률 곡선은 보통강도 콘크리트에 비해 매우 가파른 상향곡선을 나타낸다.'<sup>3)</sup>는 일반적인 고강도 콘크리트 압축강도 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

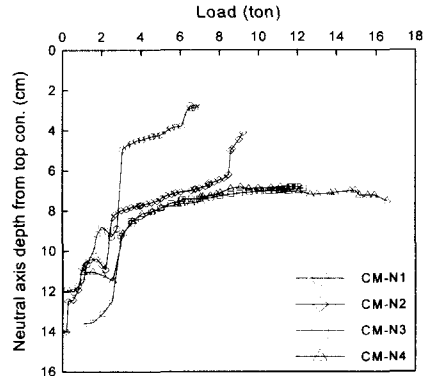


Fig. 7 Load-neutral axis for CM-N series

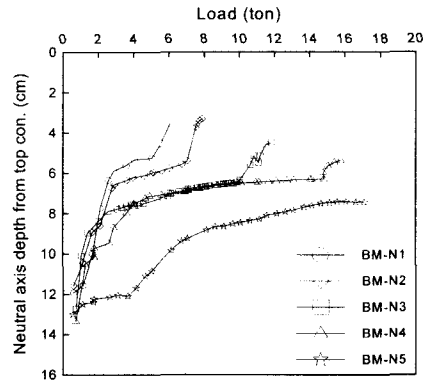


Fig. 8 Load-neutral axis for BM-N series

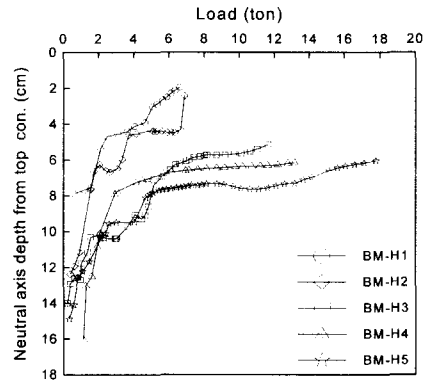


Fig. 9 Load-neutral axis for BM-H series

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 하중 단계에 따른 각 시험체의 중립축 이동 상황을 계열별로 나누어 나타낸 것이다. 중립축은 하중 단계별로 각 시험체의 중앙 단면에 대한 변형을 분포를 통하여 얻은 것이며, 실험 도중 콘크리트의 박리와 최종 파괴시 콘크리트 압괴로 인하여 상부 콘크리트 게이지가 망실되어 취득이 곤란한 데이터가 있으므로 측정이 가능하였던 구간까지만 고려하여 나타내었다.

중립축 이동상황의 경우 각 계열별로 평형철근비에 대한 철근비가 작은 시험체일수록 중립축 상승속도가 빠르고 상승 높이가 크게 나타나는 공통된 경향을 보였다. BM-H와 BM-N 계열 시험체를 비교해 보면, 평형철근비에 대한 철근비가 동일한 경우 콘크리트의 압축강도가 높은 BM-H 계열 시험체의 중립축이 더 상승하는 경향을 알 수 있었다.

이는 콘크리트가 고강도화 함에 따라 콘크리트가 저항할 수 있는 단위 압축응력이 증가하기 때문에 중립축이 상승하여도 시험체의 압축부는 작은 단면으로 큰 하중에 견딜 수 있기 때문으로 사료된다.

### 3.3 휨모멘트-곡률 관계

철근콘크리트 구조물은 철근과 콘크리트의 복합체로서 탄성영역에 있는 경우 전체 변형거동은 종래의 탄성이론에 의해서 간단하게 구해지지만 콘크리트의 균열, 철근의 항복 및 부차파괴 등에 의해 비탄성영역에 들어가면 전체 변형거동을 정확하게 평가하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 시험체의 내부 변형 상황을 파악하기 위해 시험체의 곡률과 이와 관계되는 변형을 고려하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 다음의 식 (3-1)<sup>4)</sup>에 의하여 각 하중단계별로 시험체의 곡률을 구하였다.

$$\phi = -\frac{\epsilon_c}{y} \quad (3-1)$$

여기서,  $\phi$  : 곡률

$\epsilon_c$  : 콘크리트 압축부의 변형률

위의 식에서 중립축으로부터 거리  $y$ 는 각 시험

체 중앙 단면의 변형을 분포를 이용하여 구하였다.

Fig. 10에서 Fig. 12까지는 휨모멘트-곡률 관계를 나타낸 것이다. 각 계열별 휨모멘트-곡률 관계는 대체적으로 앞의 하중-처짐 관계와 아주 유사한 형태를 보였다. 즉, 철근 항복 이전에는 공통적으로 평형철근비에 대한 철근비가 작은 시험체일수록 경사가 완만한 선형적인 모멘트-곡률 관계를 나타내고 있으며, 철근 항복 후에는 휨모멘트의 증가에 비하여 곡률의 변화폭이 크게 나타나고 있다. 따라서 '인장철근이 증가함에 따라 곡률은 감소한다'는 기존의 연구결과<sup>5)</sup>와 일치함을 알 수 있다.

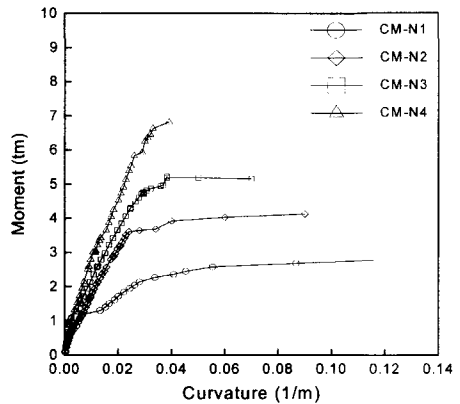


Fig. 10 Moment-curvature for CM-N series

BM-H 계열의 BM-H5는 인장철근 항복 이전에 곡률의 변화가 거의 없는 상태에서 휨모멘트가 급상승하였으며 전형적인 취성거동을 나타내고 있다. 또한, BM-H4는 인장철근이 항복하기 하였지만 항복과 동시에 곡률의 변화가 거의 없는 상태에서 취성거동을 보이며 종국상태에 도달하였다.

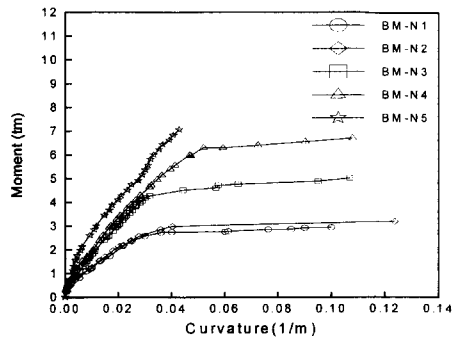


Fig. 11 Moment-curvature for BM-N series

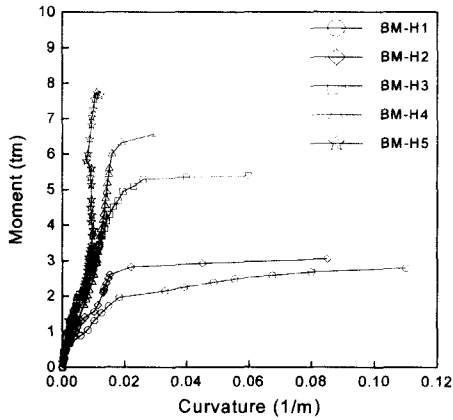


Fig. 12 Moment-curvature for BM-H series

따라서, 이 두 시험체의 철근비가  $0.54 p_b$ ,  $0.72 p_b$ 이므로 기존의 강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계규준(6.7)에서 최대인장철근량을 균형철근비의 75%이하로 배근하도록 규정하는 것이 BM-H 계열에 대해서는 적절하지 못함을 휩모멘트-곡률 관계에서 알 수 있다.

### 3.4 연성 거동

일반적으로 부재의 연성은 보통 처짐에 의해 가장 잘 표현되므로, 본 연구에서는 연성을 평가하기 위하여 ACI-363의 처짐연성에 관한 식 (3-2)<sup>8)</sup>와 최대하중의 80%에 해당하는 부재의 처짐을 고려한 식 (3-3)<sup>9)</sup>을 사용하였다. 평가결과를 Table 7과 같다.

$$\mu_{cu} = \frac{\Delta_{cu}}{\Delta_y} \quad (3-2)$$

$$\mu_f = \frac{\Delta_f}{\Delta_y} \quad (3-3)$$

- 여기서,  $\mu_{cu}$  :  $\Delta_{cu}$ 에 의한 연성지수
- $\mu_f$  :  $\Delta_f$ 에 의한 연성지수
- $\Delta_y$  : 보 중앙부인장철근 항복시의 처짐
- $\Delta_{cu}$  : 파괴시의 처짐
- $\Delta_f$  : 최대하중이후 최대하중의 80%에서의 처짐

본 연구에서는 파괴의 개념을 구조물이 견딜 수 있는 최대하중을 더 이상 지지할 수 없는 상태로 보고 최대하중시의 처짐을 파괴시의 처짐으로 고려하였으며, 연성에 영향을 미치는 요인으로

Table 7 Deflection ductility index for specimens

구분	$\sigma_{ck,s}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$p/p_b$	$\Delta_y$	$\Delta_{cu}$	$\Delta_f$	$\mu_{cu}$	$\mu_f$
CM-N1	350	0.24	7.61	38.10	48.46	5.00	6.37
CM-N2		0.38	5.23	17.04	31.00	3.26	5.90
CM-N3		0.54	6.82	12.44	23.71	1.82	3.50
CM-N4		0.72	8.51	8.51	13.85	1.00	2.60
BM-N1	350	0.24	4.21	26.14	43.24	6.21	10.27
BM-N2		0.38	5.08	16.77	34.01	3.30	6.69
BM-N3		0.54	5.97	18.12	28.18	3.04	4.27
BM-N4		0.72	8.88	12.17	20.14	1.37	2.27
BM-N5		0.96	9.05	9.05	16.58	1.00	1.83
BM-H1	600	0.18	3.51	29.61	32.80	8.44	9.34
BM-H2		0.28	4.64	25.65	31.25	5.53	6.73
BM-H3		0.40	6.31	15.17	17.87	2.40	2.83
BM-H4		0.54	6.73	12.18	20.24	1.81	3.01
BM-H5		0.72	12.16	12.16	19.62	1.00	1.61

알려진 콘크리트의 강도, 주철근비, 전단스팬비, 그리고 스티럽 보강비 중 주요 요인인 콘크리트의 강도와 주철근비만을 고려하여 연성을 평가하였다. 철근항복 이전에 파괴된 시험체의 경우  $\Delta_y$  값은  $\Delta_{cu}$  값으로 대체하였다.

철근콘크리트 보의 연성에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 평형철근비에 대한 철근비와 연성지수의 관계는 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. CM-N, BM-N 그리고 BM-H 계열 시험체는 그룹에 나타난 바와 같이  $\mu_{cu}$ 와  $\mu_f$  모두, 각 계열별로 평형철근비에 대한 철근비가 증가함에 따라 연성지수가 감소하는 공통된 경향을 보여주고 있다.

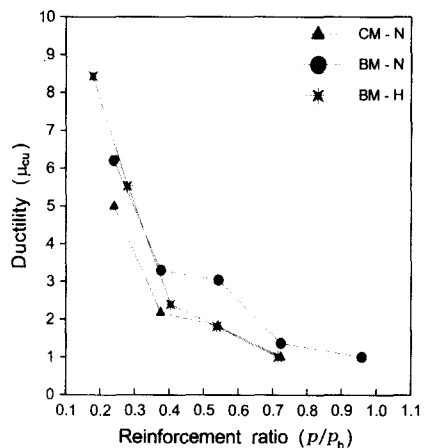


Fig. 13 Ductility index with different reinforcement ratio ( $\mu_{cu}$ )

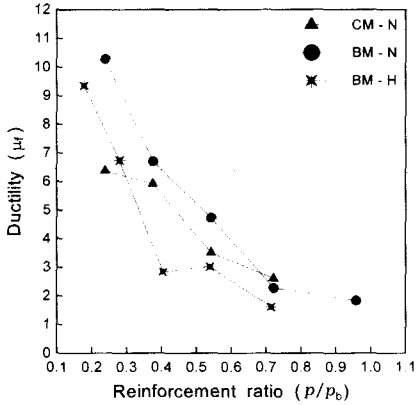


Fig. 14 Ductility index with different reinforcement ratio ( $\mu_r$ )

철근비가 평형철근비의 75%이상인 BM-N 계열의 시험체는 연성지수의 변화가 거의 없어 과보강 이후 인장철근비의 증가는 부재의 연성에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이는 기존의 일반 고강도 콘크리트의 실험에서 나타난 경향과 일치하는 것이다<sup>10)</sup>. BM-N과 CM-N 계열 시험체를 비교해보면 BM-N 계열의 연성지수는 CM-N 계열에 비해  $\mu_{cu}$ 의 경우 약 32%,  $\mu_f$ 의 경우 약 37%의 증가를 보여 연성능력이 있어 BM-N 계열이 우수한 것으로 나타났다.

콘크리트 압축강도에 따른 각 부재의 연성을 비교하면 BM-N과 BM-H 계열 시험체의 경우, 평형철근비에 대한 철근비가 동일한 경우 콘크리트 강도가 높은 BM-H 계열의 연성이 작게 나타났으며 이는 콘크리트 압축강도가 클수록 평형철근비( $p_b$ )가 커지기 때문으로 사료되며 일반적인 고강도 콘크리트 실험과 같은 경향을 나타내고 있다.<sup>11)</sup>

본 실험연구의 연성결과를 토대로 철근콘크리트 휨부재의 최대철근비를 검토한 결과 휨부재의 안전을 위해 최소한 3이상의 연성을 확보하도록 설계하기 위해서는 CM-N 계열의 경우 최대철근비를 평형철근비의 58%이하로 하고, BM-N 계열의 경우는 평형철근비의 65%이하로 하며, BM-H 계열의 경우는 평형철근비의 53%이하로 상한선을 두어 설계하는 것이 적절하다고 판단된다.

### 3.5 휨강도 및 최대하중 비교분석

본 실험을 통하여 ACI 규준식을 이용한 값과 실험값을 비교분석 하였으며 그 결과는 Table 8과 같다. 시험체 모두 실험값이 ACI 규준식 값보다 안전측으로 나타났다. CM-N, BM-N 그리고 BM-H 계열의 실험값에 대한 ACI 규준식의 비가 각각, 1.344, 1.274 그리고 1.276의 평균값을 나타냈으며, 각 계열별로 평형철근비에 대한 철근비가 증가함에 따라 실험값에 대한 ACI 규준식의 비가 감소하는 공통된 경향을 보였다. 위의 결과를 도시적으로 비교하기 위하여 Fig. 15에 나타냈으며, 그림에서 알 수 있듯이 ACI 규준식에 의한 공칭휨강도 값은 Belite 콘크리트를 사용한 휨부재의 설계시 그대로 적용하여도 무리가 없음을 알 수 있다.

Table 8 Comparison of test results and code equ.  $M_n$

구분	$\sigma_{ck}$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	$p/p_b$	$M_n$ (t·m)		EXP./ACI.	AVE.	$P_{max}$ (ton)
			ACI.	EXP.			
CM-N1	350	0.24	2.02	3.09	1.53	1.34	7.28
CM-N2		0.38	3.07	4.14	1.35		9.76
CM-N3		0.54	4.26	5.18	1.21		12.19
CM-N4		0.72	5.49	7.04	1.28		16.57
BM-N1	350	0.24	1.99	2.99	1.47	1.27	6.94
BM-N2		0.38	3.01	3.6	1.20		8.52
BM-N3		0.54	4.13	5.29	1.28		12.47
BM-N4		0.72	5.26	6.71	1.27		15.79
BM-N5		0.96	6.39	7.26	1.13		17.09
BM-H1	600	0.18	2.05	3.17	1.54	1.27	7.48
BM-H2		0.28	3.14	4.28	1.36		10.09
BM-H3		0.40	4.41	5.40	1.22		12.71
BM-H4		0.54	5.77	6.79	1.17		15.99
BM-H5		0.72	7.27	7.67	1.06		18.28

EXP. : 실험값, ACI. : ACI 규준식 값, AVE. : 평균값

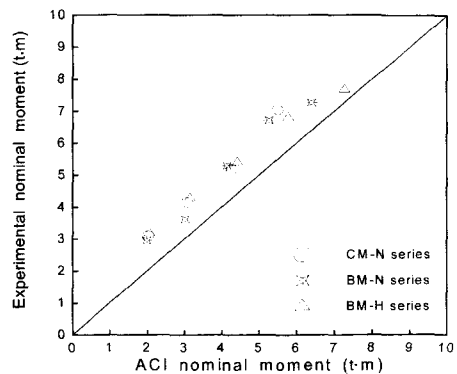


Fig. 15 Comparison of test results and code equation



철근보강에 따른 최대하중의 차이는 BM-N1과 BM-N4 시험체의 경우 8.77tf의 차이를 보였으며, CM-N1과 CM-N4 시험체의 경우는 9.3tf의 차이를 보였다. BM-N 계열과 BM-H 계열 시험체의 경우 평형철근비에 대한 철근비가 동일할 때, 콘크리트 강도가 높은 BM-H 계열 시험체가 평균적으로 최대하중이 4tf증가하였으며, BM-H1과 BM-H5 시험체의 최대하중은 10.8tf의 차이를 보였다.

### 3.6 파괴 양상 및 분석

시험체 모두 계획 및 설계단계에서 전단파괴의 영향을 배제하고 휨파괴를 유도하기 위하여 콘크리트표준시방서와 기존의 연구자료를 근거로 전단철근을 충분히 배근하였기 때문에 전단파괴나 splitting의 영향은 나타나지 않았다. Pic. 1~Pic. 3은 파괴형태를 대표적으로 나타낸 사진이다.

인장철근이 과보강(0.95  $p_b$ )된 BM-N5 시험체의 경우 철근 항복 이전에 폭발음을 동반한 급격한 취성적인 압축 파괴를 일으켰으며, 인장 철근비가 비교적 큰 BM-N4, BM-H4 시험체는 철근 항복 후 내력은 증가하였지만 연성구간이 매우 짧고 종국 상태에서는 폭발음을 동반한 취성적인 압축파괴 현상을 보였다. 전형적인 휨파괴를 일으킨 시험체는 CM-N1, CM-N2, CM-N3, BM-N1, BM-N2, 그리고 BM-H1 시험체이다. 이들은 대부분 부재 중앙에서부터 미세균열이 발생하였고 초기 하중 단계에서 1차 균열 안정상태가 되었다가 하중이 점점 증가하면서 2차 균열이 발생하였고 부재 항복 후 내력의 증가로 인해 균열의 상부 연단부분이 갈라지는 현상이 발생하였으며 하단에서는 2차 균열이 1차 균열에 결합되는 현상을 보였다. BM-N3, BM-H2 그리고 BM-H3 시험체는 전형적인 휨파괴를 일으킨 시험체들과 비슷한 파괴 흐름을 나타냈으나 최대 내력 도달 시에 압축파괴 되는 양상을 보였다. BM-N 계열 시험체들은 대체로 CM-N 계열 시험체의 휨거동과 비슷한 경향을 보였으며, BM-H 계열 시험체는 보통 고강도 시험체의 휨거동과 비슷한 경향을 나타냈다.



Photo 1 Cracks after failure (BM-N1)



Photo 2 Cracks after failure (BM-H2)



Photo 3 Cracks after failure (BM-H4)

## 4. 결론

- 1) 고강도, 고유동, 저발열 Belite 시멘트를 사용한 본 실험의 경우, 전반적으로 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 휨 거동 특성과 비슷한 경향을 보였다.
- 2) 본 실험의 경우 Belite 시멘트를 사용한 BM-N계열의 시험체들은 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 CM-N계열의 시험체들에 비해 연성지수가 약 35% 크게 나타나 연성능력이 우수함을 보였다.
- 3) 본 실험의 경우 철근 콘크리트 휨부재의 안전을 위해 3이상의 연성지수를 확보하기 위해서는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 CM-N 계열의 경우 최대 철근비를 평형 철근비의 58%이하로 하고, Belite 시멘트를 사용한 BM-N계열의 경우는 65%이하로 하며, BM-H 계열의 경우는 53%이하로 규정하는 것이 타당하다고 판단되었다.
- 4) 시험체 모두 실험에 의한 공칭 휨강도 값이 ACI 표준식에 의한 값보다 크게 나타났으며 CM-N 계열, BM-N 계열 그리고 BM-H 계열의 실험값에 대한 ACI 표준식의 비가 각각, 1.344, 1.274 그리고 1.276의 평균값을 나타냈다. 따라서, Belite 콘크리트 부재의 설계시 ACI 표준식을 그대로 적용하여도 무리가 없음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 신성우, "고강도 콘크리트 부재의 응력블록에 관한 검토", 한국콘크리트학회지, 제2권 2호, 1990.6, pp. 93~99.
2. Swartz, S.E. and Nikaeen, A. et al., "Structural Bending Properties of High Strength Concrete", Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger Norway, June 1987, pp. 147~178.
3. 대한건축학회, "고강도-고성능 콘크리트 제조·시공 및 설계", 1996, pp. 191~192.
4. Phinyawat, P., "Flexural Behavior of Reinforced Polymer Impregnated Concrete Beams", The University of Texas at Austin, December, Ph. D, 1977, pp. 60~61.
5. Mattock, A. H., "The Rotation Capacity of Hinging Region in Reinforced Concrete Beam", ASCE, 1965, pp. 135~180.
6. "극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조 설계 기준 및 해설", 대한건축학회, 1994.
7. "콘크리트표준시방서", 대한토목학회, 1996, pp. 44~82.
8. ACI Committee 363, "State-of-The-Art Report on High Strength Concrete", Proc., ACI Journal Vol.81, No.4, July-August, 1984, pp. 364~411.
9. Shin, S. W., Ghosh, S. K. and Moreno, J., "Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members", ACI Journal, July -August, 1989, pp. 394~400.
10. 신성우, 유석형, 안종문, 이광수, "고강도 철근콘크리트 보의 휨 설계 및 연성능력", 한국콘크리트학회논문집, 제8권, 6호, 12, 1996, pp. 141~149.
11. 박태규, 박기철, 정헌수, "高强度 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 휨舉動에 관한 實驗的研究", 大韓建築學會學術發表論文集, 제10권, 제2호, 1990년 10월 20일, pp. 501~504.

### 요 약

본 연구는 Belite를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구이다. 이를 위하여 Belite 시험체의 (1) 하중-처짐 관계와 시험체 중앙단면의 변형을 분포, (2) 하중-중립축관계와 모멘트-곡률 관계, (3) 연성평가, (4) 기준규준식과 실험값에 의한 휨강도 비교 등을 통하여 1종 보통 포트랜드 시멘트를 사용한 기준시험체(OPC)의 실험결과와 비교분석 하였다. 주요 실험변수는 콘크리트의 강도(35, 600kgf/cm<sup>2</sup>)와 철근비(2D-13, 2D-16, 2D-19, 2D-22 and 2D-25)로 하였으며, 3점 재하를 실시 하였다.

실험결과, 고강도·고유동 Belite 콘크리트를 사용한 본 실험의 경우, 전반적으로 1종 콘크리트의 휨 거동 특성과 비슷한 경향을 보였다.

(접수일자 : 1998. 10. 28)