

# 고성능 Belite 시멘트 콘크리트의 철근 부착성능

Bond Strength of Reinforcing Steel to High-Performance Concrete Using Belite Cement



김상준\*

Kim, Sang Jun



조필규\*

Cho, Pil Kyu



허준\*

Hur Jun



최완철\*\*

Choi, Oan Chul

## ABSTRACT

Bond strength of reinforcing bar to high-performance concrete using belite cement is explored using beam end test specimens. The key parameters for the bond test are slump of concrete, top bar effect, and strength of concrete in addition to concrete cover.

The test results show that the specimens with belite cement concrete show approximately 10% higher bond strength than those with portland cement concrete. The results also show that the bond strength from the high strength concrete is function of the square root of concrete compressive strength. Bond strength of the top bar is less than bond strength of bottom bar, but the ratios of the bond strength of bottom-cast bars to those for top-cast bars are much less than the modification factor for top reinforcement found in the ACI 318-95 code. Comparisons with other reported tests identified that belite cement increased bond strength while silica fume or flyash used in high strength concrete decreased bond strength. The high-strength and high-slump concrete with belite cement performs well in terms of bond strength to reinforcing steel.

Keywords : belite cement, bond strength, high-strength, high-performance, top bar effect

\* 숭실대 건축공학과 대학원 석사과정  
\*\* 정회원, 숭실대 건축공학과 부교수

·본 논문에 대한 토의를 1999년 4월 30일까지 학회로  
보내 주시면 1999년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

최근 건설시장의 개방과 더불어 건축, 토목 분야의 기술이 꾸준히 발전되고 있다. 합리적이며 경제적인 구조시스템의 개발과 함께 이에 상응하여 콘크리트 구조재료의 성능에 대한 요구도 다양화, 고급화되고 있다. 고유동, 고강도의 콘크리트 특성을 얻기 위하여 시멘트에 플라이애쉬, 슬래그, 실리카흙 등 혼합재 첨가를 시도하고 있지만 시멘트 이외에 다른 재료를 혼합 사용하는 데 따른 설비, 품질관리 및 시공상의 부담이 가중되고 있는 실정이다.

belite 시멘트는  $C_3S$ 에 비해  $C_2S$ 의 함량을 많게 함으로서 고유동, 저발열, 고강도 특성이 발현될 수 있어 최근 S사가 belite 콘크리트로서 개발하여 제품화하고 있다. belite 콘크리트는 실리카흙, 플라이애쉬, 슬래그등 혼합재의 사용이 필요 없어 품질관리가 용이하여 고성능 콘크리트로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 구조재로서 belite 콘크리트 개발에 따라 belite 시멘트를 사용한 철근 콘크리트 구조의 기본 특성 중의 하나인 철근과 콘크리트 사이의 부착특성을 평가하고자 한다. 부착강도에 대한 주요 영향 요인인 콘크리트의 강도(압축, 인장), 유동성(슬럼프), 배근위치(상/하부 철근) 등 재료관련 성능의 변수로 부착강도를 측정한다. belite 콘크리트의 고성능에 따른 부착강도의 영향을 1종 포틀랜드 시멘트의 실험결과와 비교 평가한다.

## 2. 부착실험

본 연구는 크게 3가지 그룹으로 나누어 각각 그룹에 대해서 보단부 시험체와 이음길이 보시험체의 2종류의 부착시험체를 만들어 실험하고자 한다.

- 1그룹 : 1종 포틀랜드 시멘트를 이용한 보통 강도의 시험체
- 2그룹 : 1종 포틀랜드 시멘트와 같은 강도조건의 belite 시멘트를 이용한 시험체
- 3그룹 : belite 시멘트를 이용한 고강도 시험체

## 2.1 실험계획 및 재료

본 연구에서는 철근 콘크리트 보의 응력분포와 동일하며 그 크기를 줄이고 보다 많은 데이터를 얻을 수 있는 보단부 부착시험체를 위주로 사용하였다.<sup>(1)</sup> 보단부 시험체는 보의 단부 절단을 가정하여 철근에 인장이 작용하여 부착파괴가 발생하는 현상을 재현하게 된다. 재하되는 철근은 D16, D19의 2가지 종류를 사용하였고, 철근의 위치에 따른 부착강도의 변화를 관찰하기 위하여 상/하부 철근을 배치하였다. 또한 콘크리트의 활열강도에 직접적인 관계가 있는 콘크리트의 피복두께는 0.5, 1, 2, 3db로 계획하였다. 정착길이는 기존의 연구에 의하여 D16 및 D19 철근에서 각각 8cm 및 10cm로 계획하였다. 보단부 부착시험체의 결과를 확인하기 위하여 최소 개수의 이음길이 부착시험체를 제작하였다. 철근은 D16 한 종류를 사용하였고 피복두께는 보단부 시험체와 같이 0.5, 1, 2, 3db로 계획하였다. 인장철근의 이음길이는 ACI 318-95 기준<sup>(2)</sup>에 의한 값의 약 1/2인 16cm가 되도록 계획하였다.

본 실험에서 사용한 1종 포틀랜드 시멘트계 콘크리트 설계강도는 350kg/cm<sup>2</sup>, belite 시멘트 콘크리트의 설계강도는 350kg/cm<sup>2</sup>과 600kg/cm<sup>2</sup>로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 시멘트의 물성, 콘크리트의 배합비와 재령별 강도측정 결과는 Table 1, 2, 3과 같다.<sup>(3)</sup>

Table 1 Physical and chemical properties of cement

Cement Type	Specific Gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Setting Time		W/C (%)	Flow (%)	Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )		
			Initial (min)	Final (h:m)			3 days	7 days	28 days
Belite	3.20	4.250	6:45	10:00	48.5	100.5	203	263	429
Type 1 Portland	3.15	3.240	3:40	6:20	48.5	101.8	261	323	413

Table 2 Mix proportion

Cement Type	Design Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )				
					Water	Cement	Sand	Aggr.	Admixture (%)
Type 1 Portland	350	4.5	39.8	41	197	495	646	973	0.15*
Belite	350	5.4	41.8	45	167	400	808	995	1.0**
	600	6.0	32.4	48	170	525	809	883	1.2**

\* Admixture : Neomix (AE Water reducer)

\*\* SP-8N(High-Performance AE Water reducer)

Table 3 Concrete test results (kg/cm<sup>2</sup>)

Cement Type	Curing Type	Slump(cm)	Test Type	4 days	7 days	11 days	14 days	17 days	28 days	56 days
Type 1 Portland Cement (350kg/cm <sup>3</sup> )	Field Curing	11.5	Comp. Str.	210	257	283	346	362	401	-
			Elastic Mod.	-	$2.06 \times 10^5$	-	-	-	$2.21 \times 10^5$	-
			Tens. Str.	-	23	-	-	30	34	-
		19	Comp. Str.	193	266	280	312	314	398	-
			Elastic Mod.	-	$2.03 \times 10^5$	-	-	-	$2.15 \times 10^5$	-
			Tens. Str.	-	24	-	-	29	35	-
	Moist Curing	11.5	Comp. Str.	-	261	-	-	-	393	-
			Tens. Str.	-	-	-	-	-	34	-
			Comp. Str.	-	253	-	-	-	384	-
		19	Tens. Str.	-	-	-	-	-	33	-
			Comp. Str.	119	181	-	209	-	326	347
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	$2.27 \times 10^5$	-
Belite Cement (350kg/cm <sup>3</sup> )	Field Curing	24	Tens. Str.	-	-	-	-	23.9	-	
			Comp. Str.	-	182	-	-	-	330	354
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	$2.53 \times 10^5$	-
	Moist Curing	24	Tens. Str.	-	-	-	-	27.1	-	
			Comp. Str.	256	345	-	421	-	556	603
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	$2.99 \times 10^5$	-
Belite Cement (600kg/cm <sup>3</sup> )	Field Curing	19.2	Tens. Str.	-	-	-	-	33.4	-	
			Comp. Str.	-	357	-	-	-	568	630
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	$3.12 \times 10^5$	-
	Moist Curing	19.2	Tens. Str.	-	-	-	-	38.2	-	
			Comp. Str.	-	-	-	-	-	-	-
			Elastic Mod.	-	-	-	-	-	-	-

## 2.2 시험체 제작

본 연구에서 보단부 시험체의 크기는 단면의 폭이 22cm, 높이가 39cm, 길이는 49cm이다. 보단부 시험체는 길이 110cm의 D16 및 D19의 이형철근을 시험체의 상/하부 각각에 설치하고 D10의 수평보강근을 상/하부 양쪽 모서리에 설치하였다. 각각의 철근에는 정착길이를 정확하게 유지하고 단부의 인발파괴를 방지하기 위하여 철근 양단부에 PVC 파이프를 삽입하였다.(Fig. 1)

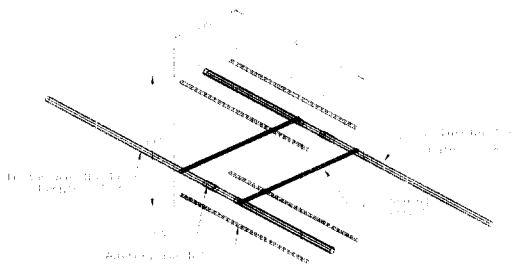


Fig. 1 Beam end specimen (unit: mm)

이음길이 보시형체는 단면치수 18×25cm, 인장철근 2-D16, 압축철근 2-D10, 길이 2.4m의 장방형 복근보로 제작되었다. 전단보강근은 보 중앙에서 양쪽으로 50cm 되는 구간을 제외하고 나머지 구간에서 D10@100간격으로 배근 하였다. (Fig. 2)

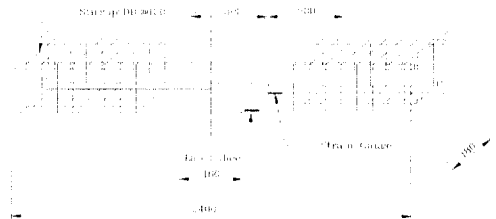


Fig. 2 Splice specimen (unit: mm)

## 2.3 재하 및 측정방법

보단부 시험체에서는 20ton 용량의 증공 유압식 오일잭 2개를 사용하여 약 3초 간격으로 하중을 가력하였으며, 이 하중은 다시 직경 2.54cm의 냉간 가공된 강봉 (steel rod)에 의하여 전달되고, 이때 강봉은 load cell역할을 하게 된다. 강봉을 통한 하

중은 재하단을 통하여 철근에 인장력을 작용시킨다.

실험시 철근의 미끄러짐량은 시험철근의 재하단 양쪽에 변위계를 1개씩 설치하였고, 재하되지 않는 자유단 부분(재하단 반대쪽)에서는 1개의 변위계를 설치하여 하중-변위관계를 측정 하였다. (Fig. 3)

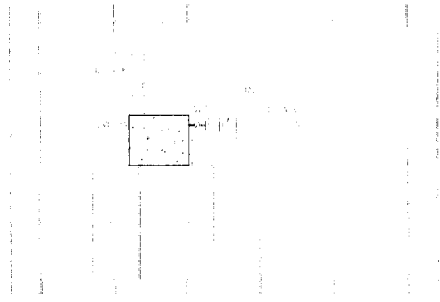


Fig. 3 Test setup for beam end specimen

이음길이 보 시험체에서는 반력 프레임을 설치한 유압잭으로 보 중앙에서 각 50cm 떨어진 곳에 하중을 가하였고 재하 하중량을 검출하기 위해 유압재 하부에 로드셀을 설치하였다. 보저침 변형을 측정하기 위하여 보시험체 중앙하부에 변위계를 설치하였으며, 하부 인장철근에서는 이음이 끝나는 부분에 변형계이지(strain gauge)를 각각 1개씩 설치하여 철근의 하중-변형 관계를 측정하였다. (Fig. 4)

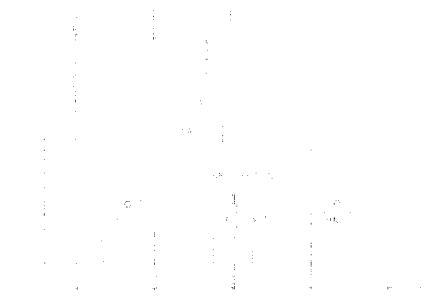
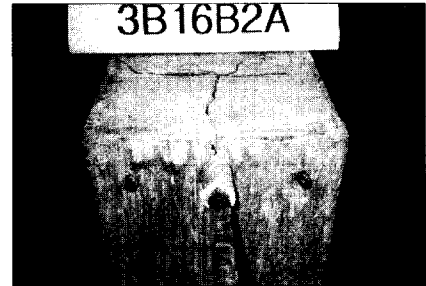


Fig. 4 Test setup for splice specimen

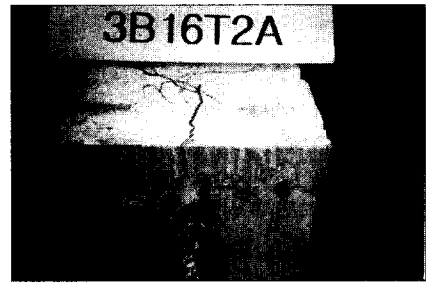
## 2.4 균열 발생 및 파괴형태

보단부 시험체에서의 균열발생 및 파괴형태는 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 belite 시멘트 콘크리트가 서로 유사한 결과를 보였으며 콘크리트 할렬파괴시 발생하는 형상과 같은 쪼개짐 파괴형상을 나타내

었다. 대부분 시험체는 철근에서 수직하게 윗부분으로 전형적인 파괴역학적(fracture) 균열이 발생하였고, 이 균열은 시험체 윗면에서 철근이 정착된 부분까지 이어지고, 철근정착이 끝나 PVC로 연결되는 부분에서 수평으로 균열이 발생되었으며 하중작용점에서는 직선형 또는 방사형 균열을 보여주고 있다. (Fig. 5)



(a) Single crack



(b) Multiple crack

Fig. 5 Typical splitting bond failure

이음길이 보 시험체에서의 균열발생 및 파괴형태는 하중증가에 따라 보 시험체의 인장측 하부에서부터 재하점으로 휨균열이 진행되는 전형적인 휨파괴 형상을 나타내었고, 파괴 시에는 강한 파열음과 함께 갑자기 철근 이음부위인 보 중앙하부의 균열과 함께 쪼개짐 현상이 발생하였다.

1종 포틀랜드 시멘트와 고성능 belite 시멘트 콘크리트를 사용한 보단부 시험체에서 부착파괴의 형태로 급격히 파괴되었으며 그 하중-변위곡선은 각각 대체로 비슷한 형태인 최대하중에서 급격히 떨어지는 양상을 보이고 있다.

## 2.5 실험 결과

보단부 시험체 및 이음길이 보시험체에서의 각각 시험체별 부착강도 실험결과는 Table 4, Table 5 와 같다. 보단부 부착시험체의 부착강도는 두개 시험체 실험결과의 평균값이다.

Table 4 Test results for beam end specimens

Specimen	Cement Type	Conc. Str. (kg/cm <sup>3</sup> )	Bar Size	Cover (d <sub>b</sub> )	Slump (cm)	Bar Position	Ult. Bond Force (ton)	
3N16T112	Type 1 Portland Cement	355	D16	1d <sub>b</sub>	11.5	Top	3.85	
3N16B112						Bot.	4.41	
3N16T118					Top	3.99		
3N16B118		Bot.		4.17				
3N16T212		355		D16	2d <sub>b</sub>	11.5	Top	4.64
3N16B212							Bot.	5.09
3N16T218		313	D16	2d <sub>b</sub>	19	Top	4.62	
3N16B218						Bot.	4.99	
3N16T312		355	D16	3d <sub>b</sub>	11.5	Top	5.21	
3N16B312						Bot.	5.96	
3N16T318		313	D16	3d <sub>b</sub>	19	Top	4.89	
3N16B318						Bot.	5.88	
3B16T0.5	Belite Cement	375	D16	0.5d <sub>b</sub>	24	Top	3.49	
3B16B0.5						Bot.	4.41	
3B16T1				1d <sub>b</sub>	Top	4.66		
3B16B1					Bot.	4.71		
3B16T2				2d <sub>b</sub>	Top	5.66		
3B16B2					Bot.	5.99		
3B16T3		3d <sub>b</sub>	Top	6.25				
3B16B3			Bot.	6.72				
3B19T2		650	D19	2d <sub>b</sub>	19.2	Top	7.17	
3B19B2						Bot.	8.74	
6B16T0.5				0.5d <sub>b</sub>	D16	19.2	Top	3.95
6B16B0.5							Bot.	5.19
6B16T1				1d <sub>b</sub>	D16	19.2	Top	5.26
6B16B1							Bot.	5.81
6B16T2		2d <sub>b</sub>	D16	19.2	Top	5.79		
6B16B2					Bot.	6.10		
6B16T3		3d <sub>b</sub>	D16	19.2	Top	7.02		
6B16B3					Bot.	7.27		
6B19T2	D19	2d <sub>b</sub>	19.2	Top	8.34			
6B19B2				Bot.	8.81			

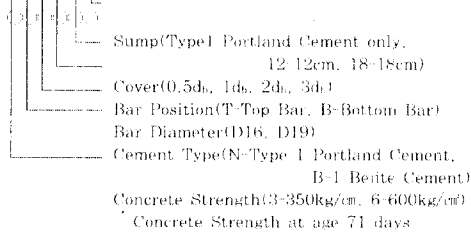
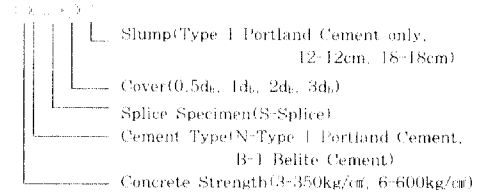


Table 5 Test results for splice specimens

Specimen	Cement Type	Conc. Str. (kg/cm <sup>3</sup> )	Bar Size	Cover (d <sub>b</sub> )	Slump (cm)	Deflection (mm)	Ult. Load (ton)		
3NS212	Type 1 Portland Cement	355	D16	2d <sub>b</sub>	11.5	5.1	4.56		
3NS218		313			19	5.3	4.44		
3BS0.5	Belite Cement	360	D16	0.5d <sub>b</sub>	24	4.9	4.26		
3BS1						4.6	4.55		
3BS2				2d <sub>b</sub>	6.0	4.79			
3BS3					7.3	4.58			
6BS0.5				603	D16	0.5d <sub>b</sub>	19.2	5.1	5.24
6BS1								1d <sub>b</sub>	5.9
6BS2	603	D16	2d <sub>b</sub>	19.2	6.3	6.10			
6BS3					3d <sub>b</sub>	7.9	5.05		



### 3. 부착강도 평가

#### 3.1 belite 시멘트와 포틀랜드 시멘트 콘크리트 부착강도 비교

개발된 belite시멘트를 사용한 콘크리트 부착강도를 평가하기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 부착강도를 비교한다. belite시멘트, 포틀랜드 시멘트를 사용한 각각의 콘크리트 압축강도 350kg/cm<sup>2</sup>의 실험결과를 비교한다.

부착실험시의 재령 71일을 고려하여 압축강도를 375kg/cm<sup>2</sup>를 추정하고 압축강도 증가량을 재령 56일에 표준화하여 수정하여 비교하면 Fig. 6과 같이 나타난다. 부착강도 표준화는 부착강도가  $\sqrt{f'_c}$ 에 비례한다고 가정하고 부착강도에  $\sqrt{350}/\sqrt{375}$ 를 곱하여 얻는다. Fig. 6에서 보듯이 belite 시멘트 콘크리트의 부착강도는 동일한 설계강도의 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 부착강도에 비해 대체로 높게 나타나고 있다. belite 시멘트 콘크리트의 부착강도는 높은 슬럼프값(24cm)에도 불구하고 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 대해 피복두께 1d<sub>b</sub>, 2d<sub>b</sub>, 3d<sub>b</sub> 시험체에서 각각 6%, 15%, 10%씩, 평균 약 10%

높게 나타나고 있다. 부착강도는 철근과 콘크리트 계면의 시멘트 매트릭스 치밀성에 크게 영향을 받으며 belite 시멘트가 장기 재령에 따라  $C_2S$ 의 조성으로부터 더욱 치밀한 콘크리트를 생성시킴으로 보여지고 있다.

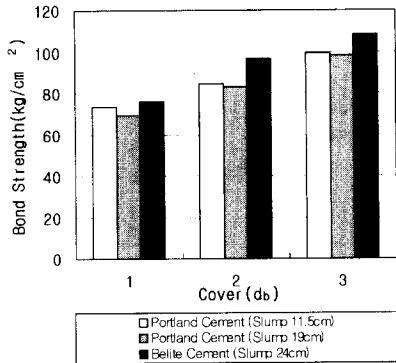


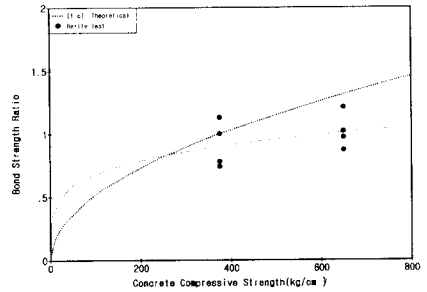
Fig. 6 Comparison of bond strength from belite cement to type 1 portland cement

### 3.2 콘크리트 압축강도와 인장강도

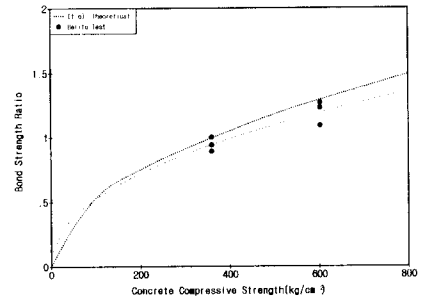
부착파괴는 주로 콘크리트의 할렬인장파괴로서 부착강도는 콘크리트의 할렬인장강도에 비례하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 기존의 연구결과에 따르면 부착파괴는 콘크리트의 할렬인장파괴에 기인하게 되며, 따라서 부착력은 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다<sup>(5)</sup>.

Fig. 7은 보단부 시험체와 이음길이 보시험체 시험결과로부터 부착강도와 콘크리트 압축강도의 관계를 나타내었다. 피복두께  $2d_b$ (압축강도  $360\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $375\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 기준으로 하였을 때)에 대한 피복두께 별 부착강도의 비를 콘크리트 압축강도에 대해 나타내었으며 이론적인  $\sqrt{f'_c}$ 에 대한 부착강도의 비를 비교하였다. 그림에서 보듯이 보단부 시험체와 이음길이 보시험체의 실험결과는 다소 차이를 보이나 belite 시멘트 콘크리트에서 대체로 부착강도가  $\sqrt{f'_c}$ 에 비례하고 있음을 보여주고 있다. 압축강도  $600\text{kg}/\text{cm}^2$  정도의 고강도 belite 콘크리트 구조물 부착 및 정착길이 설계시에 기존 설계규준에서 제시되고 있듯이 부착강도가  $\sqrt{f'_c}$ 에 비례함을 적용할 수 있겠다.

Fig. 8은 콘크리트 인장강도와 부착강도에 대한 그래프이며 그림에서 보듯이 부착강도는 콘크리트 인장강도와 관계가 크며 직선 비례관계라기 보다는 비선형 관계일 수 있겠다. 또한 그림에서 선형관계라고 가정한다면 인장강도가 낮은 수준에서라도 부착강도가 일정값을 가질 수 있으며 이는 계면의 부착력 즉, 접촉력의 영향 요인으로 보여지고 있다. 부착강도와 인장강도의 비례관계는 좀더 많은 실험 자료에 의해 확인되어야 할 것이다.



(a) Beam end specimen



(b) Splice specimen

Fig. 7 Bond strength ratio versus concrete compressive strength

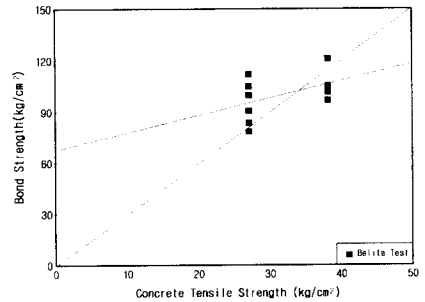


Fig. 8 Bond strength versus concrete tensile strength

Table 6 Strength ratio normalized to 2d<sub>s</sub> cover

Test	Concrete Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Cover (d <sub>s</sub> )	Ult. Load (ton)	Strength Ratio
Beam End Specimen	375	0.5	4.41	0.74
		1	4.71	0.78
		2	5.99	1.00
	650	0.5	5.19	0.87
		1	5.81	0.97
		2	6.10	1.02
Splice Specimen	360	0.5	4.26	0.89
		1	4.55	0.94
		2	4.79	1.00
	603	0.5	5.24	1.09
		1	5.93	1.23
		2	6.10	1.27

### 3.3 슬럼프 및 상부근계수

콘크리트는 그 시공성의 확보를 위하여 일정 슬럼프치를 유지하여야 한다. 높은 슬럼프치는 시공성의 확보라는 측면에서 유리하나 깊은 단면을 갖는 일반적인 구조체의 경우에는 골재분리현상과 블리딩에 의해 상부 콘크리트의 강도 약화로 인한 상/하부 콘크리트의 강도 차이를 유발하게 되어 구조적으로 불리한 측면을 가지게 된다. 그래서 ACI 318-95 규준에서는 정착길이 설계시 상부근계수 1.3의 보정계수를 제시하고 있다.

본 연구에서는 이러한 상/하부 콘크리트의 강도차에 의한 부착강도의 영향을 고려하기 위하여 상/하부근에 대한 부착강도의 차이를 시험하였으며 그 결과는 Table 7과 같다.

Table 7 Bond strength ratios of bottom-cast to top-cast bars

Cement Type	Cover (cm)	Concrete Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Slump (cm)	Ult. Bond Force (ton)		Bot./Top	Average Bot./Top		
				Top	Bot.				
Type I Portland Cement	16	355	11.5	3.85	4.41	1.14	1.13		
	32			4.64	5.09	1.1			
	48			5.21	5.96	1.14			
	16	313		19	3.99	4.17		1.05	1.11
	32	4.62		4.99	1.08				
48	4.89	5.88	1.20						
Belite Cement	8	375	24	3.49	4.41	1.26	1.10		
	16			4.66	4.71	1.01			
	32			5.66	5.99	1.06			
	48			6.25	6.72	1.08			
	8	650		19.2	3.95	5.19	1.31	1.13	
	16				5.26	5.81	1.10		
	32				5.79	6.10	1.05		
	48				7.02	7.27	1.04		

Fig. 9는 슬럼프에 따른 하/상부근 부착강도비를 나타낸 그래프이다. 이 표와 그래프에서 보듯이 belite 콘크리트에서 슬럼프가 24cm와 19.2cm인 경우 상부근 부착강도비는 각각 평균 1.10, 1.13으로 나타나고 있다. belite 시멘트를 이용한 각각의 높은 슬럼프를 가지는 시험체에 대해서 상부근 계수는 ACI 규준인 상부근 보정계수 1.3 이내의 값을 모두 만족하고 있다는 것을 알 수 있다.

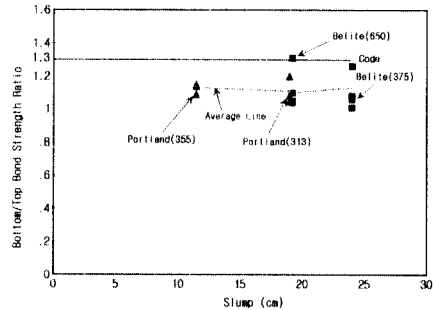


Fig. 9 Ratio of bottom to top bar strength versus slump

Fig. 10은 압축강도에 대한 하/상부 철근의 부착강도의 비를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 belite 시멘트를 사용한 650kg/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트에서도 1.13으로 안정된 값을 취하고 있음을 알 수 있다. 하/상부근 부착강도 계수의 낮음은 belite 콘크리트가 높은 슬럼프로 유동성이 크에도 불구하고 블리딩이나 골재분리현상이 적은 것으로 추정된다. 이 같은 현상은 유동화제에 의하여 콘크리트의 점성이 높아졌으며 belite 시멘트의 경우 슬럼프가 높더라도 시멘트 매트릭스가 치밀해져서 부착손상을 억제하는 것으로 판단된다.

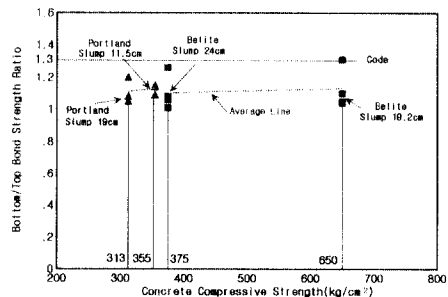


Fig. 10 Ratio of bottom to top bar strength versus concrete compressive strength

## 4. 기존 연구와 비교

### 4.1 고강도 콘크리트

고성능, 고강도 콘크리트 개발로부터 부착강도에 관한 성능연구에 대해서는 최근 많은 발표가 있어 왔다. 기존의 설계식과 부착강도 추정식은 대부분 압축강도 420kg/cm<sup>2</sup>범위의 실험자료에 근거하고 있으며 이를 초과하는 고강도 콘크리트에서 콘크리트 강도의 제한치를 두고 있어 ACI 318-95<sup>(2)</sup>에서는 압축강도가 700kg/cm<sup>2</sup> 초과할 때 그 이상 강도를 무시하고 있다. 이에 대한 많은 연구가 발표되고 있으나 그 한계를 대체로 인정하는 방향으로 발표되고 있다.

본 연구와 비교를 위하여 실리카흙과 플라이애쉬를 사용한 고강도 콘크리트의 부착강도 실험자료를 인용한다. 여러 연구자에 의한 실험결과를 비교하기 위하여 각 변수에 따른 실험결과로부터 통계처리되어 제시된 부착강도에 관한 추정식을 사용한다.

Orangun Jirsa and Breen<sup>(6)</sup>에 의해 제시된 횡보강이 없는 보의 시험결과로부터의 이형철근의 접침이음강도 추정식은

$$U_{OJB} = 0.083 \left( 1.2 + \frac{3C}{d_b} + \frac{50d_b}{l_b} \right) \times \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

이며, 여기서  $U_{OJB}$ 는 추정되는 부착강도, C는 최소피복두께로서 콘크리트 피복두께와 순간격의 1/2 중 적은값,  $f'_c$ 는 콘크리트 압축강도로 MPa 단위이다.

실험에 의한 부착강도는 부착응력이 이음길이에 균등하게 분포되었다고 가정할 때 다음식으로 얻어질 수 있다.

$$U_{test} = \frac{f_s d_b}{4l_d} \quad (2)$$

여기서  $f_s$ 는 재하로부터 부착과괴시 철근에 작용되는 인장응력이다.

고강도 콘크리트에 관한 기존연구결과와 본 연구에서의 결과를 비교하기 위하여 부착강도 효율이라 지칭하는  $U_{test} / U_{OJB}$ 를 Table 8에 비교하여 나타내었다. 각 연구 그룹별 콘크리트 배합표는 Table

9과 같다. DeVries et al.<sup>(7)</sup>에 의한 초기연구에 의하면 실리카흙은 포졸란 반응으로 철근과 콘크리트 사이의 접착력을 손상시킴으로 부착력을 다소 저하시킨다고 알려져 있다. 표에서 보듯이 Rangan<sup>(8)</sup>, Hwang<sup>(9)</sup>의 연구결과 부착강도 효율  $U_{test} / U_{OJB}$ 는 각각 0.78, 0.90으로 실리카흙을 사용함으로써 고강도 콘크리트의 부착강도가 감소함을 보여주고 있다. 또한 플라이애쉬를 사용한 Treece<sup>(10)</sup> 연구결과에서도 부착효율은 0.92로 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 비해 부착강도가 다소 저하되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 belite 콘크리트를 사용한 본 연구 실험결과 부착효율은 1.40을 넘어 상당히 높음을 보여주고 있다. belite 시멘트로 600kg/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트를 제조할 때에 다른 재료에 비해 부착강도가 양호함을 보여주고 있으며 계속 연구가 필요하다.

Table 8 Comparison with other reported tests

Researchers	Series	Specimen Label	$f'_c$ (MPa)	$d_b$ (mm)	$l_d$ (mm)	C (mm)	$U_{test}$ (MPa)	Bond Efficiency
								$U_{test}/U_{OJB}$
Treece and Jirsa	1	0-11-8	57.1	36.0	460	54.0	5.45	0.90
		0-11-12	72.5				6.34	0.95
		0-11-12b	66.2				5.79	0.91
Rangan and Esfahani	2	2	98.0	23.3	200	24	5.79	0.70
		4			298		5.02	0.74
		6			282		4.47	0.65
		7			230		5.88	0.76
		9			230		8.07	1.05
Hwang	3	S28-N-M	84.0	28.7	300	28.7	7.30	1.07
		P28-N-M	70.6				7.12	1.13
		S33-N-U	71.1				6.63	1.05
		P33-N-M	63.7				7.34	1.23
Authors	4	6BS0.5	59.1	16.0	160	8	7.41	1.51
		6BS1				16	8.85	1.51
		6BS2				23	9.85	1.47

Table 9 Concrete mixes of other researchers

Reaserchers	Series	Concrete Mix(kg/m <sup>3</sup> )					
		Cement	Silica fume	Flyash	Sand	Gravel	Water
Treece	1	415	-	178	629	1086	148
Rangan	2	520	40	-	*	*	146
Hwang	3	486	54	-	700	1050	135
		540	-	-	700	1050	135
		486	54	-	700	1050	162
		540	-	-	700	1050	162
Authors	4	525	-	-	809	883	170



## 4.2 고성능(고유동성) 콘크리트

기존 연구에 따르면 보통 강도의 콘크리트의 경우에는 철근의 위치에 따른 부착강도의 변화가 콘크리트의 슬럼프와 밀접한 관계를 갖게되어 슬럼프 증가에 따라 부착강도가 감소하는 것으로 알려져 있다. Fig. 11에 belite 시멘트 콘크리트의 본 연구결과와 기존연구의 자료<sup>(11)</sup>를 포함한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 기존 연구에서 하부철근의 부착강도에 대한 상부철근의 부착강도비, 즉 상부근 계수는 슬럼프와 관계되며 슬럼프가 커질수록 상부근 계수가 증가한다. 그러나 본 연구에서 수행한 고성능 콘크리트의 결과를 포함할 때 이러한 경향은 상당히 감쇄되고 있으며 이는 슬럼프가 높은 고성능 콘크리트에서는 슬럼프 영향이 다소 적음을 보여주고 있다.

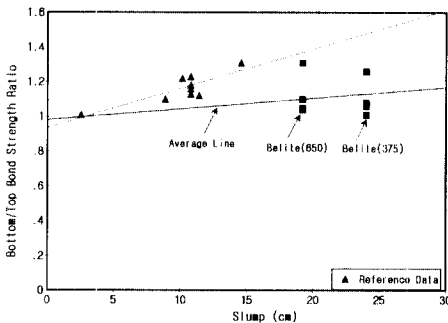


Fig. 11 Ratio of bottom to top bar strength versus slump including reference data

최근 상부철근의 수정계수, 1.3이 고강도, 고성능 콘크리트에 다소 과대하게 평가되고 있음이 보여지고 있다. 고강도 콘크리트에서는 단위 수량이 적음으로 슬럼프가 크더라도 부착계면의 손상이 다소 적을 수 있겠다. 고강도, 고성능, 즉 단위수량이 적고 유동성이 높은 콘크리트에 대한 상부철근의 부착강도에 대한 연구가 계속 수행되어 보통 콘크리트와 고성능 콘크리트에서의 상부근 계수가 구분 적용되어야 할 것이다.

## 5. 결론

개발된 belite 시멘트를 사용한 콘크리트와 철근의 부착성능을 연구한 결과, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 콘크리트 압축강도 350kg/cm<sup>2</sup>의 실험결과 belite 콘크리트의 부착강도가 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트 부착강도에 비하여 약 10% 높게 나타났다.
2. 압축강도 600kg/cm<sup>2</sup>의 고강도 belite 콘크리트에서 부착강도가 대체로  $\sqrt{f_c}$  에 비례하였다.
3. belite 시멘트 콘크리트를 사용한 상부근 부착 시험체는 부착강도의 손상이 적었다. 압축강도 375kg/cm<sup>2</sup> 슬럼프 24cm와 압축강도 650kg/cm<sup>2</sup> 슬럼프 19.2cm 시험체에서 상부근 계수는 각각 1.10, 1.13으로 나타났으며 규준에서 제시하고 있는 상부근 계수 1.3 이하의 범위에 있었다. 높은 슬럼프에 비해 상부근 계수가 낮은 것으로 나타나 블리딩이나 골재분리가 적은 것으로 보여진다.
4. 고강도 belite 시멘트 콘크리트를 사용한 이음 길이 보시험체에서 부착강도는 기존 예측식의 값보다 다소 높게 나타났으며, 실리커흙, 플라이애쉬를 사용한 고강도 콘크리트 부착강도의 기존 연구결과와 차이를 보였다.
5. 고유동, 고강도 belite 시멘트 콘크리트는 철근과의 부착성능이 다른 재료에 비해 양호한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 논문은 1997년 쌍용건설(주), 쌍용양회(주)로부터 연구비 및 연구 인력 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 최완철 외 "고강도, 고유동 belite콘크리트 부착성능 평가시험", 숭실대학교 생산기술연구소, 1998. 2. 14. page 62
2. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-95) and Commentary(ACI 318R-95), American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, 1995, 369 pp.
3. 문한영, 문대중, 하상욱, 김기수, "벨라이트시멘트를 사용한 콘크리트의 강도특성에 대한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표, 1997, pp. 61-64
4. 조필규, 김상준, 강지훈, 김영식, 최완철, "belite 시멘트를 이용한 고성능 콘크리트의 철근부착성능 실험연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표, 1997, pp. 408-415
5. 홍건호, "고강도 콘크리트의 부착강도 특성을 고려한 이형철근의 정착에 관한 연구," 서울대학교 건축학과 박사학위논문, 1996
6. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," ACI Journal, Vol.74, No.3, Mar., 1977, pp. 114-122
7. DeVries, R. A.; Moehl, J. P.; and Hester, W., "Lap Splice Strength of Plain and Epoxy-Coated Reinforcements," Report No. UCB/SEMM-91102, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, Jan, 1991, 88 pp.
8. Rangan and Esfahani, "Bond Between High-Performance Concrete(HPC) and Reinforcing Bars in Splices of Beams," Proceeding, ACI International Conference on High-Performance Concrete, Malaysia, 1997, pp. 971-992
9. Hwang, S. J., "Effect of Silica Fume on the Splice Strength of Deformed Bars of High-Strength Concrete," ACI Structural Journal V.90, No. 5, Sep.-Oct. 1993, pp. 554-561
10. Treece, R. A., and Jirsa, J. O., "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcing Bars," ACI Materials Journal, V.86, No. 2, Mar.-Apr., 1989, pp. 167-174
11. Choi et al., "Bond Strength of Epoxy Coated Reinforcing Steel: Cover, Casting Position, Slump and Consolidation", ACI Structural Journal, Jan.-Feb., 1994, pp. 59-68

### 요 약

고성능 belite 시멘트 콘크리트에 대한 부착특성에 대하여 콘크리트의 강도, 슬럼프, 배근위치, 피복 두께 등의 영향요인을 보단부시험체와 이음길이 보시시험체를 통해 연구하였다. 동일한 압축강도의 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 비해 부착강도는 약 10% 증가하였고 압축강도 600kg/cm<sup>2</sup>의 고강도 belite 콘크리트에서 부착강도가 대체로  $\sqrt{f_c}$ 에 비례하였다. 유동성에 있어서 높은 슬럼프에 비해 ACI 318-95 기준에서 제시하는 상부근 계수 1.3 이하의 범위에 있었으며 이것은 고유동 belite 콘크리트가 블리이딩이나 골재분리가 적은 것으로 보여졌다. 또한 고강도 belite 시멘트 콘크리트를 사용한 이음길이 보시시험체에서 부착강도는 기존 예측식의 값보다 다소 높게 나타났으며, 실리커피, 플라이애쉬를 사용한 고강도 콘크리트 부착강도의 기존 연구결과인 낮은 값과 차이를 보였다. 이상의 결과로 고유동, 고강도 belite 시멘트 콘크리트는 철근과의 부착성능이 다른 재료에 비해 양호한 것으로 나타났다.

접수일자 (1998. 4. 9)