

Belite시멘트를 사용한 고강도 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Shear Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Beams with Belite Cement

한 상 훈* 구 봉 근* 김 동 석** 강 지 훈*** 이 상 근**** 홍 기 남*****

Han, Sang-Hoon Koo, Bong-Kuen Kim, Dong-Seok Kang, Ji-Hun Lee Sang-Kuen Hong Kee-Nam

ABSTRACT

This paper presents the shear behavior in reinforced normal and high-strength concrete beams with Belite cement due to the increase of concrete compressive strength. The shear tests were conducted on thirty two beam specimens having concrete compressive strengths of 350 and 600kg/cm². The major experimental variables are compressive strength of concrete, shear span to depth ratio, and shear reinforcement ratio. The shear responses as to each variable are discussed in terms of shear capacity. The comparison of prediction equations with test results is also presented.

1. 서론

최근 들어, 건설 구조물의 초고층화, 대형화, 그리고 특수화에 따른 건설재료의 고성능화 추세로 인하여 고강도 콘크리트 사용에 대한 요구가 크게 증가되고 있는 실정이다. 따라서, 고강도 콘크리트를 주요 구조부재인 보에 사용하기 위해선 콘크리트 압축강도에 따른 보부재의 전단성능 및 파괴양상에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다. 특히, 고강도 콘크리트 부재는 재료적인 측면에서 일반적으로 취성 파괴를 유발할 가능성이 크므로 보유 전단내력을 충분히 활용하면서 연성적 휨파괴를 유도하기 위한 많은 실험적 연구가 필요하다 하겠다. 그러나, 철근콘크리트 보의 전단거동에 대한 연구는 수십년간 많은 연구자들의 노력에도 불구하고 아직까지 명확하게 규명되지 못한 어려운 문제중에 하나이다. 또한, 전단거동은 휨거동에 비해서 여러 가지 변수들로 인해 복잡하며, 이론적으로 규명하기 곤란한 인자를 많이 포함하고 있는 것이 특징이다. 본 연구는 Belite시멘트를 사용하여 제작된 보통강도(350kg/cm²)와 고강도(600kg/cm²) 철근콘크리트 보 시험체의 전단 거동특성을 실험적으로 규명하였으며, 기존의 전단내력에 대한 제안식들과의 비교를 통해 설계시 필요로 하는 사근열 전단력과 극한전단력의 신뢰성 있는 예측이 가능하도록 하였다. 그리고, 전단스팬비와 전단보강비의 실험변수에 따른 Belite 콘크리트 보의 전단내력과 역학적 거동양상을 비교 분석하기 위해 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 보통강도(350kg/cm²)의 기존 시험체에 대해서도 동일 전단시험을 실시하였으며, 그 비교 결과로부터 고강도 Belite시멘트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단설계를 위한 기초자료를 제공하였다.

- * 김희원, 충북대학교 토목공학과 교수
- ** 쌍용양회(주) 중앙연구소 주임연구원
- *** 쌍용건설(주) 기술연구소 연구원
- **** 충북대학교 토목공학과 박사과정 수료
- ***** 충북대학교 토목공학과 석사과정

2. 실험

2.1 실험 재료

본 연구에 사용한 시멘트는 기준 시험체의 경우 1종 보통 포틀랜드시멘트를, 고강도 철근콘크리트 시험체는 국내 S사가 개발한 저발열, 고유동성 및 고강도를 발현하는 Belite시멘트를 사용하였다. 잔골재는 비중 2.57, 흡수율 1.5%, 조립률 2.49인 모래를, 굵은골재는 비중 2.59, 흡수율 1.2, 조립률 7.69인 25mm 쇄석을 사용하였다. Belite 콘크리트에 사용된 혼화제는 KMB사의 고성능 AE감수제인 SP-8N 이고, 1종 보통 포틀랜드 콘크리트에는 Neomix를 사용하였다. Belite 콘크리트 및 일반 콘크리트 시험체의 목표강도는 600kg/cm^2 , 350kg/cm^2 로 배합설계되었으며, 표준공시체에 의한 28일 압축강도 시험결과 압축강도가 Belite 콘크리트는 556kg/cm^2 , 326kg/cm^2 , 그리고 일반콘크리트는 400kg/cm^2 로 나타났다. 콘크리트의 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 콘크리트의 물리적 성질

시멘트	목표강도 (kg/cm^2)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(kg/cm^2)		탄성계수 (kg/cm^2) (28일)	포아송비 (28일)
				7일	28일		
1종 시멘트	350	11.5	4.5	257	401	2.21×10^9	0.13
Belite 시멘트	350	24.0	5.4	181	326	2.27×10^9	0.18
	600	19.2	6.0	345	556	2.99×10^9	0.15

2.2 시험체 제작

본 연구에서는 Belite 콘크리트(600kg/cm^2 , 350kg/cm^2)와 일반 콘크리트(350kg/cm^2)를 사용하여 총 32개의 보 시험체를 제작하였다. 주요 설계변수로는 전단스팬비를 1:5, 2.0, 2.5, 3.0으로 하고, 각각의 전단스팬비에 따라 전단보강비를 0%, 25%, 50%로 하였다. 시험체의 단면은 일정하게 $14 \times 26\text{cm}$ 로 하였으며, 전단보강철근은 ACI 규준에 따라 산정하여 배근하였다. 주철근비($\rho_w = 0.0195$)를 일정하게 고려하고, 주철근 양지점 부근의 부착 및 정착파괴를 방지하기 위하여 15cm씩 여유길이를 두고 90° 후크를 주어 충분한 정착길이를 확보하였다. 각 시험체별 상세는 그림 1과 표 2에 나타내었다.

2.3 시험체 설치 및 실험

재하실험은 충북대학교 구조실험실에 설치되어 있는 100t 용량의 UTM을 사용하여 전단스팬비에 따른 4점재하방식에 의해 수행되었다. 시험체를 설치한 후 예상종국파괴 하중의 1/2까지는 하중조절방식, 그리고 이후부터는 중앙부에 설치된 LVDT의 변위를 관찰하면서 변위조절방식으로 재하 시켰으며, 재하과정에서 하중 단계별 균열진전 양상을 시험체에 직접 도시하였다.

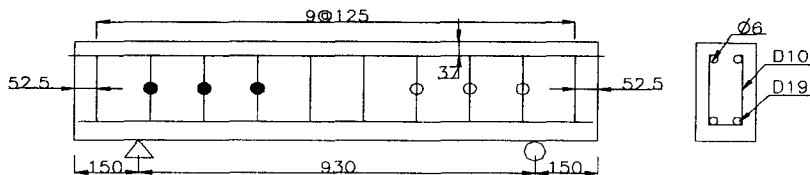


그림 1. 시험체 상세($a/d=1.5$, $V_f=25\%$, unit : mm)
 (● ○ : 매립 steel gage 부착 위치)

표 2. 시험체 설계상세

시험체명	목표압축강도 (kg/cm ²)	사용인장철근	전단스팬비 (a/d)	지간길이 / 부재길이 (cm)	전단보강비 (%)		
CS-N1.5①	350	2D19	1.5	93/123	0		
CS-N1.5③					50(s=10.0cm)		
CS-N2.0①			2.0	114/144	0		
CS-N2.0③					50(s=10.0cm)		
CS-N2.5①			2.5	135/165	0		
CS-N2.5③					50(s=20.0cm)		
CS-N3.0①			3.0	156/186	0		
CS-N3.0③					50(s=20.0cm)		
BS-N1.5①	350	2D19	1.5	93/123	0		
BS-N1.5②					25(s=12.5cm)		
BS-N1.5③					50(s=10.0cm)		
BS-N2.0①			2.0	114/144	0		
BS-N2.0②					25(s=12.5cm)		
BS-N2.0③					50(s=10.0cm)		
BS-N2.5①			2.5	135/165	0		
BS-N2.5②					25(s=25.0cm)		
BS-N2.5③					50(s=20.0cm)		
BS-N3.0①			3.0	156/186	0		
BS-N3.0②					25(s=25.0cm)		
BS-N3.0③					50(s=20.0cm)		
BS-H1.5①			600	2D19	1.5	93/123	0
BS-H1.5②							25(s=12.5cm)
BS-H1.5③							50(s=10.0cm)
BS-H2.0①	2.0	114/144			0		
BS-H2.0②					25(s=12.5cm)		
BS-H2.0③					50(s=10.0cm)		
BS-H2.5①	2.5	135/165			0		
BS-H2.5②					25(s=25.0cm)		
BS-H2.5③					50(s=20.0cm)		
BS-H3.0①	3.0	156/186			0		
BS-H3.0②					25(s=25.0cm)		
BS-H3.0③					50(s=20.0cm)		

C : Control , B : Belite

S : 전단 시험체

N : 보통강도(350kg/cm²) , H : 고강도 (600kg/cm²)

1.5 , 2.0 , 2.5 , 3.0 : 스펠비(a/d)

① : V_R=0% , ② : V_R=25% , ③ : V_R=50%

3. 실험결과

3.1 하중-처짐관계

전단보강이 없는 시험체는 사인장 균열 이후 어느 정도의 보유내력을 보이다가 최대하중 이후 급격하게 전단내력이 감소하였다. 전단보강이 있는 경우 전단보강비가 증가함에 따라 최대내력과 최대처짐이 동시에 증가하면서 연성적 거동을 보였다. 또한 그림 2로부터 동일 전단보강비에서는 전단스팬비가 증가할수록 최대내력이 급격히 감소함을 알 수 있다.

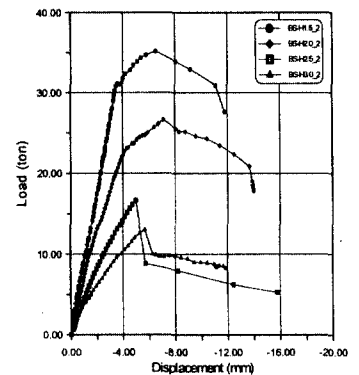


그림 2. 하중-처짐 곡선

표 3. 실험결과

시험체명	사균열 전단력 V_c (ton)	극한전단력 V_u (ton)	증앙 변위(mm)	시험체명	사균열 전단력 V_c (ton)	극한전단력 V_u (ton)	증앙 변위(mm)
CS-N1.5①	7.82	11.70	3.99	BS-N2.5③	4.18	8.51	5.79
CS-N1.5③	8.10	14.80	4.53	BS-N3.0①	3.82	4.06	3.83
CS-N2.0①	6.63	9.60	4.99	BS-N3.0②	3.85	5.28	5.22
CS-N2.0③	6.60	12.60	6.83	BS-N3.0③	4.00	7.55	7.71
CS-N2.5①	4.79	6.60	5.27	BS-H1.5①	9.14	12.20	2.45
CS-N2.5③	4.46	9.50	7.55	BS-H1.5②	9.12	17.59	6.42
CS-N3.0①	4.00	4.50	4.93	BS-H1.5③	9.95	18.32	6.52
CS-N3.0③	4.30	7.60	8.13	BS-H2.0①	6.65	8.32	4.24
BS-N1.5①	7.65	11.10	3.09	BS-H2.0②	6.58	13.33	7.10
BS-N1.5②	7.84	16.25	6.35	BS-H2.0③	6.60	13.77	7.60
BS-N1.5③	7.86	16.83	6.17	BS-H2.5①	4.29	5.47	4.29
BS-N2.0①	6.08	7.14	3.21	BS-H2.5②	5.13	8.32	4.97
BS-N2.0②	6.32	12.34	6.96	BS-H2.5③	5.07	10.80	9.78
BS-N2.0③	6.04	12.89	9.21	BS-H3.0①	4.24	4.56	3.70
BS-N2.5①	4.09	5.13	4.37	BS-H3.0②	4.80	6.52	5.68
BS-N2.5②	4.05	6.52	4.53	BS-H3.0③	5.00	8.82	11.00

3.2 최대 전단내력과 사균열 전단력

표 3의 실험결과에서 알 수 있듯이 각 시험체별 최대 전단내력은 전단스팬비가 작을수록, 전단보강비가 클수록 큰 값을 나타냈다. 본 실험에서는 전단보강비의 효과가 보유전단내력에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 나타났다. 또한 전단스팬비 2.0이하의 깊은보에서는 전단보강비 25%의 설계가 전단스팬비 2.5이상의 부재에서는 전단보강비 50%의 설계가 우수한 것으로 나타났다. 사균열 전단력은 전단스팬비가 3.0을 기점으로 그 이하에서는 전단스팬비에 따른 영향을 크게 받는 것이 일반적이다. 따라서, 본 연구에서는 전단스팬비가 3.0이하인 경우만 고려하였으며, 실제로 그림 3과 같이 사균열 전단력에 대한 영향이 매우 크게 나타났다. 특히, 전단스팬비 2.5를 기점으로 그 이하에서는 사균열 전단력이 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나, 사균열 전단력에 대한 전단보강비의 영향은 크지 않았고, 전단보강비가 증가하여도 사균열 전단력은 거의 동일한 값을 나타내었다.

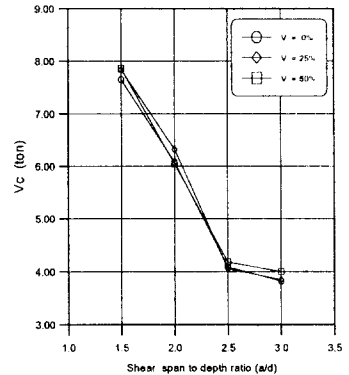
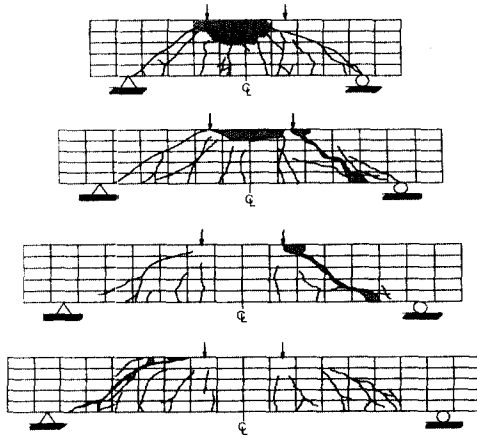


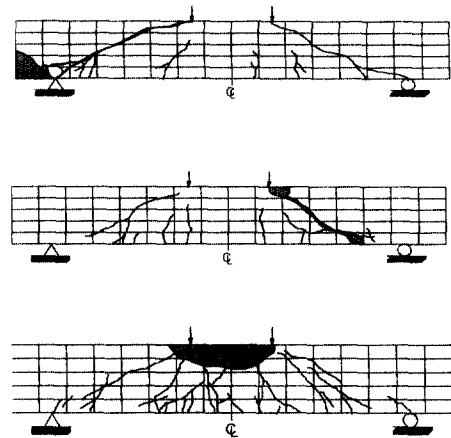
그림 3. V_c 와 a/d 의 관계

3.3 파괴양상

전단스팬비가 커질수록 하중 증가에 따른 사균열의 진행속도가 빠르게 나타났다. 전단스팬비가 1.5인 깊은보에서는 사균열의 진행속도가 매우 느려서 압축부의 콘크리트가 압축파쇄에 의해 파괴되었다. 그러나, 전단스팬비 2.5이상에서는 사균열이 발생하자마자 빠른 속도로 진전하여 사인장파괴로 이어졌다. 콘크리트 강도가 큰 시험체일수록 사균열의 발생시점이 느린 반면 발생후의 진행속도가 빨라서 콘크리트 강도가 증가할수록 보유전단강도가 감소하고 취성이 증가함을 알 수 있었다. 전단스팬비 2.5를 기준으로 2.5미만에서는 사인장 압축파괴가 2.5이상에서는 사인장파괴가 지배적이었다. 그림 4에 대표적인 전단스팬비별, 전단보강비별 파괴양상을 나타내었다.



(a) a/d 에 따른 시험체의 파괴양상
(BH계열, $V_R=25\%$, $a/d=1.5, 2.0, 2.5, 3.0$)



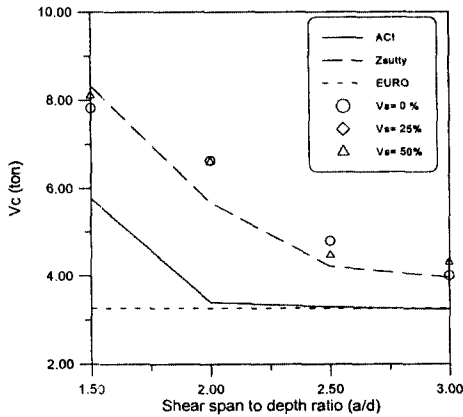
(b) V_R 에 따른 시험체의 파괴양상
(BH계열, $a/d=2.5$, $V_R=0\%, 25\%, 50\%$)

그림 4. 파괴양상

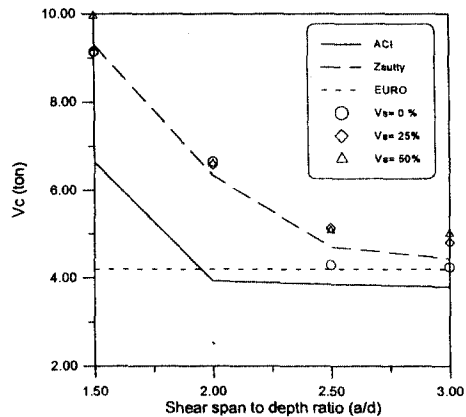
4. 규준식과의 비교

4.1 사균열 전단력

ACI와 EURO 규준식은 사균열 전단력을 낮게 평가하는 것으로 나타났다. Zsutty식은 압축강도 420kg/cm^2 이하의 콘크리트를 시험하여 얻은 식이기는 하지만, 본 실험의 CS-N계열과 BS-N 계열은 물론 BS-H 계열 시험체의 사균열 전단강도를 가장 근사적으로 예측하였다. 이는 본 실험의 결과와 ACI 규준식, EURO 규준식, 그리고 Zsutty식에 의한 사균열 전단력 비교를 전단스팬비별로 나타낸 그림 5로부터 명확히 알 수 있다.



(a) BS-N계열



(b) BS-H계열

그림 5. 사균열 전단력 비교

4.2 극한전단력

그림 6은 실험치에 대한 ACI 표준식과 Zsutty식의 계산치와의 비교를 나타낸 그림이다. 여기서 알 수 있듯이 ACI 표준식은 전단스팬비에 대한 영향과, 전단보강비의 영향을 비교적 낮게 평가하고 있어 극한전단력이 실험치와 다소 차이를 보였다. 그리고, 전단스팬비에 따른 전단보강비의 영향 측면에서 살펴 본 결과에 의하면 Zsutty식은 전단스팬비 2.0이하의 깊은보에서는 적절하게 전단보강비의 효과를 예측하는 것으로 나타났으나, 전단스팬비가 증가함에 따라 전단보강비의 효과를 과소평가함을 보였다. 그러나, Zsutty식은 매우 근사하게 극한전단력을 예측함을 알 수 있다.

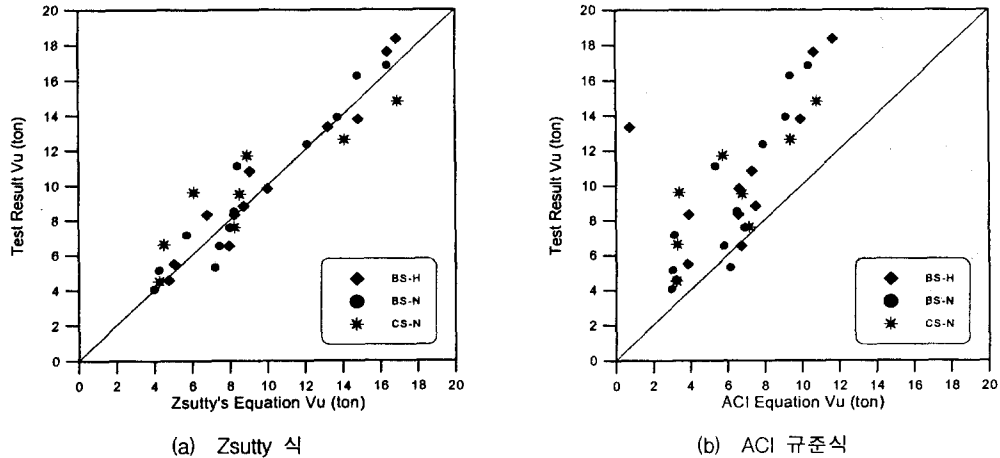


그림 6. 극한전단력 비교

5. 결론

- (1) 고강도, 고유동 Belite시멘트를 사용한 철근 콘크리트 보는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 철근콘크리트 보와 유사한 역학적 거동을 나타내었다.
- (2) 전단 시험체의 하중-처짐 곡선은 전단보강비 보다는 전단스팬비에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.
- (3) 최종파괴에 영향을 미치는 주인자는 전단보강비 보다는 전단스팬비로 나타났으며, 전단스팬비 2.5를 기준으로 2.5미만에서는 사인장 압축파괴가 2.5이상에서는 사인장 파괴가 지배적이었다.
- (4) Zsutty의 제안식이 고강도, 고유동 Belite시멘트를 사용한 콘크리트보의 사균열 전단력 및 극한전단력을 예측하는데 적합한 것으로 판명되었다.
- (5) ACI 표준식은 본 연구에 있어 전단스팬비 감소에 따른 전단내력 증가 효과를 과소평가 하고 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Thorenfeldt, E., and Drangsholt, G., "Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams", ACI, SP 121-8, pp.126~153, 1978.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89)", American Concrete Institute, Detroit, 353, 1989.
3. Zsutty, T., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests", Journal of the ACI, Feb, 1971.