

고유동 벨라이트시멘트를 사용한 콘크리트의 조건별 강도특성에 대한 연구

이종열 · 하재담 · 김동석 · 하상욱* 문한영

〈쌍용중앙연구소〉

〈한양대 토목공학과〉

1. 서 론

근년에 국가적 차원의 거대 SOC사업들이 추진됨에 따라 국내 건설기술도 이러한 시대적 요구에 부응하기 위하여 고도화에 진일보 하고 있다.

이로 말미암아 토목, 건축 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화 및 복합화 추세가 점차 가속되고 있으며 아울러 3D 기피현상으로 건설현장의 인력 부족, 인건비 상승 등의 사회구조적 문제로 인하여 성력화 및 효율적인 공법을 도입하여 경제적 생산활동을 성취해야 하는 실정이다. 이러한 당면과제들을 고려할 때 콘크리트의 고품질, 고강도 및 고성능화가 필수불가결하다고 할 수 있다.

현재 고강도, 고성능 콘크리트의 실용화를 위하여 사용재료, 배합 및 시공방법 등 여러 차원에서 새로운 공법 및 연구가 진행되고 있으며, 주지하는 바와 같이 콘크리트가 고강도화하게 되면 단위시멘트량이 커지고, 물-시멘트비가 대폭 낮아지므로 시멘트의 높은 점성으로 인하여 펌프 압송이 곤란하며 낮은 충전성 및 간극투과성이 작으므로 과밀 배근된 구조물 타설시 콘크리트의 강도 및 내구성을 저하시키며 아울러 시멘트의 수화열로 인하여 콘크리트의 온도가 크게 상승하여 온도응력에 의한 균열을 유발시킨다.

그래서 국내에서도 이러한 문제점을 해결하기 위해서 산업부산물인 고로슬래그 및 플라이애시 등을 광물질 혼화재로 이용하여 콘크리트 중의 분체량을 늘리거나, 고성능 감수제 및 증점제 등의 화학 혼화제를 활용하는 방안에 대하여 연구가 진행되고 있다.

한편 같은 맥락에서 시멘트의 광물조성을 조정 한 벨라이트(Belite) 시멘트를 이용한 연구가 활발

하게 진행되고 있는데 벨라이트시멘트는 보통포틀랜드시멘트에 비하여 벨라이트(C_2S) 성분이 많은 시멘트로서 화학 혼화제에 의한 분산효과가 좋아 유동성을 증진시키며, 초기 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승을 저감시킬 뿐만 아니라, 장기 재령에서의 강도증진이 크게 발현되는 여러 장점들이 보고되고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 생산되는 고유동형 벨라이트시멘트를 사용하여 조건에 따른 강도특성을 검토하였는데 다양한 배합조건에서의 압축강도는 물론 고유동 배합에서의 무다짐 콘크리트의 압축강도, 단열온도 상승에 따른 강도발현 특성 및 양생조건을 달리한 경우의 압축강도를 측정하여 고유동 벨라이트시멘트를 사용한 콘크리트의 각 조건별 특성을 보통콘크리트와 비교, 검토하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

비중과 비표면적이 각각 3.15, 3,112 cm^2/g 인 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)와 3.20, 4,270 cm^2/g 인 벨라이트시멘트(이하 BRC로 약함)를 사용하였고, 각각의 화학성분 및 조성광물은 <표1>과 같으며 사용 골재로서 잔골재는 비중 2.61, 흡수율 1.10인 한강산 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 20 mm , 비중 2.63인 부순돌을 사용하였다.

그리고 고유동성 확보를 위하여 화학혼화제는 주성분이 폴리카복실산 고축합물인 고성능 AE감수제를 사용하였다.

〈표 1〉 사용시멘트의 화학성분 및 광물조성

Items Type	화 학 성 분 (%)							광 물 조 성 (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	21.9	6.5	2.8	60.1	3.3	2.1	2.5	50	21	10	10
BRC	24.5	3.7	3.6	62.0	1.3	2.5	1.8	37	45	3	9

2.2 실험 방법

- (1) 표준강도 시험 : 콘크리트 믹싱 후 5~10초 정도 진동다짐하여 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 원주형 공시체를 제조하고 24시간 경과 후, 탈형하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에서 양생하여 재령 3, 7, 28, 56 및 91일의 압축강도를 KS F 2405에 의하여 측정하였다.
- (2) 자기충전성에 따른 강도시험 : 콘크리트의 고유동에 따른 강도를 알아보기 위하여 콘크리트를 믹싱한 후 다짐을 하지 않고 콘크리트의 자중에 의해서 채워진 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 원주형 공시체를 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에서 양생하여 재령 3, 7, 28, 56 및 91일의 압축강도를 KS F 2405에 의하여 측정하였다.
- (3) 수화발열에 따른 강도시험 : 콘크리트의 온도 이력이 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 간이단열장치에서 경화한 $30 \times 30 \times 30 \text{cm}$ 입방체 콘크리트의 코어를 채취하여 재령 28일에서의 압축강도를 측정하였다.
- (4) 양생온도에 따른 강도시험 : $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 원주형 공시체를 제조한 후, 20, 40 및 80°C 의 수중에서 양생하여 재령 28일까지의 압축강도를 KS F 2405에 의해 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

콘크리트의 표준강도 시험배합은 단위시멘트량 4단계, 각각의 단위시멘트량에 물-시멘트비를 변화시킨 보통시멘트 콘크리트 4배합과 벨라이트시멘트 콘크리트 13배합을 정하였다.

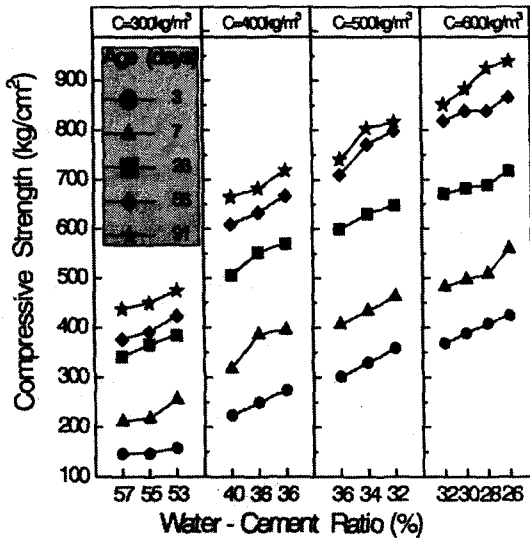
또한 이 배합에 있어서 각 단위시멘트별 한 수준씩 선정하여 콘크리트 수화열 이력에 따른 압축강도를 측정하였으며 콘크리트의 자기충전성 및 양생온도 시험배합은 단위시멘트량을 3단계로 변화시켜 각각에 있어서 다짐유무에 따라 2배합씩

총 12배합을 그리고 단위시멘트별로 양생온도를 3단계씩 변화시켜 총 18배합을 선정하였고 각각의 단위시멘트량에 있어서 W/C에 따른 압축강도 측정결과를 정리한 것이 〈표 2〉이다.

벨라이트시멘트는 보통포틀랜드시멘트보다 C₂S (belite) 성분이 많기 때문에 수화열이 적고 초기 재령에서의 강도는 낮으나, 장기재령에서 강도가 크게 증진되는 장점이 있다. 벨라이트시멘트를 사용한 경우의 각 단위시멘트별 W/C를 3~4단계 변화시켜 재령 91일까지의 압축강도를 측정한 결과를 〈그림 1〉에 나타내었고 각 단위시멘트별로 한수준씩 정리하여 보통콘크리트와 비교하여 나타낸 것이 〈그림 2〉이다.

〈표 2〉 시멘트량 및 W/C에 따른 압축강도

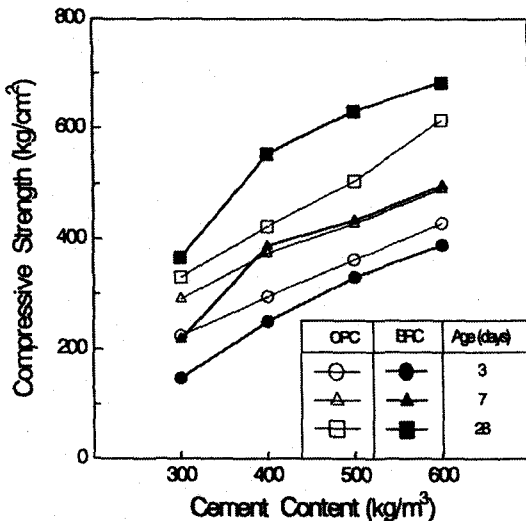
Type	Cement Content (kg/m ³)	W/C (%)	S/a (%)	압축강도(kgf/cm ²)				
				재 령 (일)				
				3	7	28	56	91
BRC	300	53	40	158	256	385	424	475
		55		148	218	366	392	450
		57		147	212	342	377	438
OPC		55		224	291	330	365	393
BRC	400	36	40	275	396	571	668	719
		38		250	387	553	634	683
		40		224	318	506	610	665
OPC		38		295	374	423	485	534
BRC	500	32	42	359	463	648	799	817
		34		330	434	631	772	804
		36		302	407	600	710	741
OPC		34		362	428	505	562	648
BRC	600	26	42	425	560	718	866	939
		28		409	509	690	840	926
		30		389	497	683	839	883
		32		369	483	672	819	852
OPC		30		429	491	615	666	688



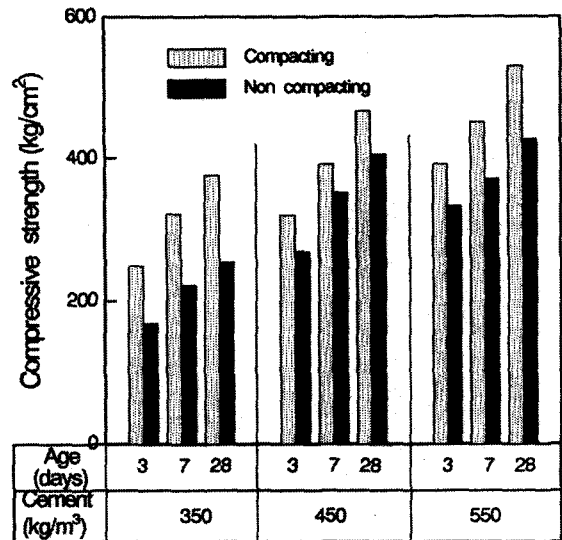
<그림 1> W/C에 따른 압축강도(BRC)

이 그림에서 단위시멘트량이 증가함에 따라 강도는 거의 직선적으로 증가하였으며, 벨라이트시멘트를 사용한 경우 재령 3일에서의 압축강도는 보통콘크리트에 비해 낮았지만 재령 28일에서는 오히려 강도가 반전되어 벨라이트시멘트 콘크리트의 압축강도가 보통콘크리트보다 100kg/cm 이상을 나타내었으며 단위시멘트량 600kg/m³에서는 683kg/cm의 큰 압축강도를 나타내었다.

다음은 단위시멘트량 350, 450, 550kg/m³에서의 보통시멘트 및 벨라이트시멘트의 고유동 배합에 있어서 다짐유무에 따른 재령별 압축강도 변화를



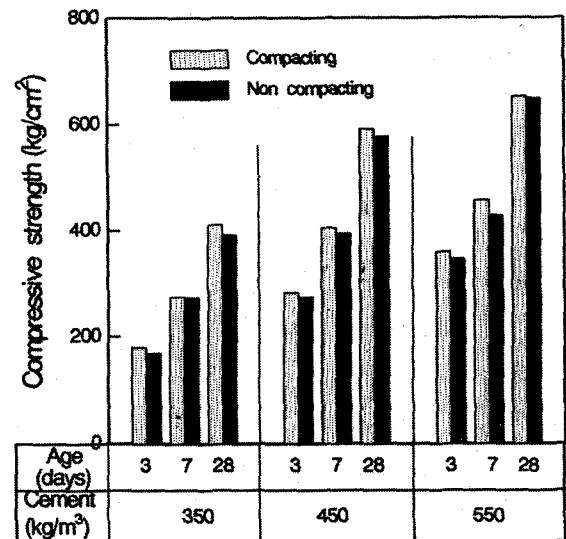
<그림 2> 시멘트 종류에 따른 압축강도



<그림 3> 다짐유무별 압축강도(OPC)

시멘트 종류별로 정리한 것이 <그림 3>과 <그림 4>이다.

이 그림에서 벨라이트시멘트의 경우 다짐의 유무에 상관없이 유사한 값을 나타내고 있는 반면에 보통시멘트의 경우는 단위시멘트량이 작을수록 큰 압축강도의 차이를 나타내었는데 이것은 충분한 점성을 갖지 못한 시멘트페이스트가 골재와의 재료분리 현상에서 기인한 것으로 사료되며 충분히 충전되지 못한 것도 그 이유라 할 수 있겠다. 즉 단위시멘트량이 작을 경우 보통시멘트는 시멘트페이스트의 낮은 점성으로 인하여 충분히 충전

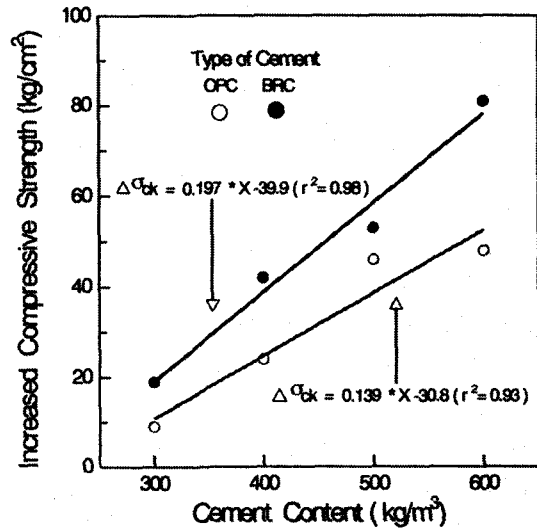


<그림 4> 다짐유무별 압축강도(BRC)

이 되지 않지만 벨라이트시멘트는 항복치가 낮고 분말도 조정으로 점성을 높였으며 아울러 고성능 AE감수제에 의한 분산효과가 증대되어 콘크리트가 잘 충전되었기 때문이며 압축강도의 편차가 큰 고강도의 경우에는 충전성의 불량으로 인한 콘크리트의 내부공극의 증대로 강도간의 격차가 크게 나타난 것으로 사료된다. 그러므로 위와 같은 결과를 통해 볼 때 벨라이트시멘트의 경우 고유동성만 확보한다면 다짐을 하지 않아도 큰 강도저하는 없을 것으로 예상된다.

한편 시멘트가 수화하면서 발생하는 수화열에 의하여 단면이 큰 매스구조물의 경우 구조물 내부 콘크리트의 온도상승이 급격하게 발생되며 아울러 외부로의 열손실이 표면보다 느리기 때문에 이러한 콘크리트의 온도이력에 따라서 초기재령에서의 콘크리트구조물의 강도발현이 영향을 받을 수가 있는데 <그림 5>는 이러한 온도이력에 따른 압축강도 발현특성을 나타낸 것이며 각 단위시멘트별 압축강도 증가량을 상관관계로 나타낸 것이 <그림 6>이다.

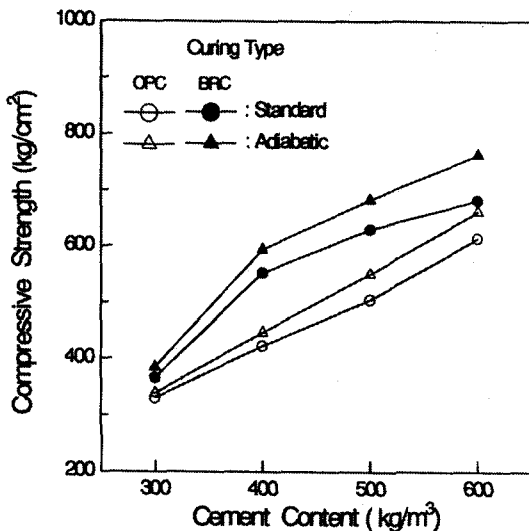
단위시멘트량 300 kg/m³에서의 압축강도 증가는 크게 나타나지는 않지만 단위시멘트량이 증가할수록 온도이력에 의한 압축강도가 비례적으로 증가하고 있음을 알 수 있었고, 단위시멘트량 600 kg/m³에서는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트의 경우는 약 50 kg/cm²의 강도증가를 보이는 반면 벨라이트시멘트 콘크리트의 경우 단열양생에 따른 강도가



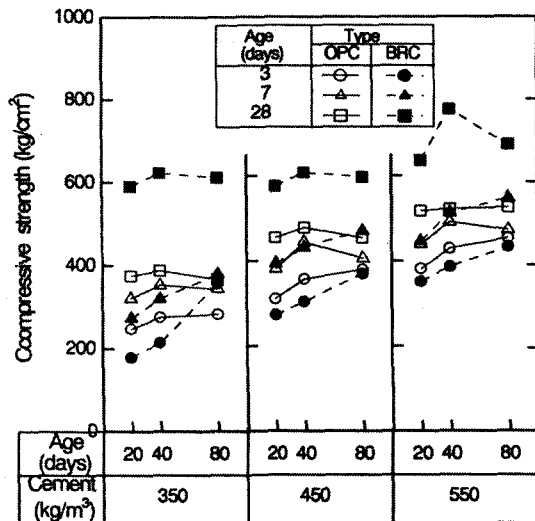
<그림 6> 온도이력에 따른 강도 증가량

764 kg/cm²로서 표준양생의 683 kg/cm²보다 약 80 kg/cm² 이상의 큰 강도증진을 보였다. 이와 같은 이유로서는 벨라이트시멘트의 특징으로서 매스콘크리트와 고강도 콘크리트와 같은 고온양생하에서 양호한 강도발현을 나타내는 것을 들 수 있는데 이것은 C₂S의 반응은 양생온도가 높을 경우 빠르고, 그 유도기는 단축되는 경향이 있기 때문이다.

이러한 실험결과를 토대로 하여 고온양생하에서의 벨라이트시멘트 콘크리트의 강도발현 특성을 알아보기 위해서 단위시멘트량을 3단계로 변화시킨 두 종류의 콘크리트에 대하여 40 및 80°C로



<그림 5> 온도이력에 따른 압축강도



<그림 7> 양생온도에 따른 압축강도

고온양생을 하여 20°C 표준양생시킨 콘크리트의 압축강도와 비교한 것이 <그림 7>이다.

40°C 양생하에서는 단위시멘트량에 관계없이 표준양생의 경우보다 30~40 kg/cm²의 강도증진을 보이고 있지만 80°C 양생하에서는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트의 경우 오히려 강도가 떨어짐을 알 수 있었다.

한편 K. L. Scrivener에 의하면 보통포틀랜드시멘트는 약 60°C에서부터 80°C사이에서 초기에 형성된 에트링가이트(AFt)가 분해되고 모노설페이트가 생성되며 그 외에 100°C 가까이에서는 모노설페이트(AFm)도 불안정하게 되어 C₃AH₆가 생성된다고 한다. 이러하듯이 수화물의 결정형태 변화는 당연히 시멘트 경화체의 미세한 구조에 영향을 받게 되고 강도발현에도 반영되는 것으로 예상된다.

아울러 시멘트 페이스트의 열발생 차이를 분석한 결과를 보면 보통포틀랜드시멘트를 사용한 페이스트에서는 최고온도 70°C 이상에서 AFm 및 C₃AH₆의 생성이 확인되었지만 벨라이트시멘트의 경우는 최고온도 80°C에서도 AFm의 생성이 확인되지 않고 AFm으로 전화가 생기지는 않았다는 연구 보고가 있으며 이러한 내용이 벨라이트시멘트가 고온에서 양호한 강도발현을 보이는 한가지 이유라고 생각된다.

4. 결 론

벨라이트시멘트를 사용한 콘크리트의 재령별 압축강도 및 조건에 따른 강도발현 특성을 검토

한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 벨라이트시멘트 콘크리트의 압축강도는 단위시멘트량이 클수록 크게 증가하며, 단위시멘트량 600 kg/m³, 재령 28일 압축강도는 683 kg/cm²으로서 보통콘크리트보다 약 11% 정도 증가되는 효과가 있었다.
- 2) 벨라이트시멘트 콘크리트의 유동배합에 대해서 다짐의 유무에 따른 압축강도를 고찰한 결과, 단위시멘트량과 재령에 관계없이 유사한 압축강도를 나타내는 좋은 효과가 있었다.
- 3) 벨라이트시멘트 콘크리트의 수화온도 이력에 따른 압축강도를 고찰한 결과, 벨라이트시멘트를 사용한 경우에 있어서 수화온도에 따른 압축강도 증진율이 보통시멘트의 경우보다 높게 나타났다.
- 4) 벨라이트시멘트 콘크리트의 양생온도(20, 40, 80°C)에 따른 압축강도를 고찰한 결과, 단위시멘트량에 관계없이 양생온도에 따라 비례적인 압축강도 증진이 나타났으며, 초기재령에서의 강도발현이 커지는 효과가 있었다.

<참 고 문 헌>

1. 名和豊春, “高ビーライト系セメントの現状”, 콘크리트工学, Vol. 34, No. 12, 1996, pp. 16~25.
2. 長岡誠一 外 2名, “高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの基礎的性状”, セメントコンクリート論文集, No. 47, 1993, pp. 148~153.