

초유동 고강도 저발열(벨라이트) 시멘트

박춘근 / 쌍용중앙연구소 책임연구원

최 근 콘크리트 구조물의 고층화와 대형화 추세가 이어지고 있으며 이에 따라 콘크리트도 고강도, 고유동, 저발열, 고내구성 등의 고성능화가 요구되고 있다. 일반적으로 고강도 콘크리트를 사용하여 제조하는 구조물은 철근의 두께가 굵고 과밀배근 상태가 되기 때문에 종래의 콘크리트로는 형틀내 충전이 어려워, 유동성이 양호하고 재료분리 저항성이 높은 고성능콘크리트가 필요하다. 일본, 미국 등 건축·토목 선진국에서는 이러한 성능을 발휘하는 콘크리트를 개발하고자 70년대부터 학계, 시멘트 제조업계 및 연구소에서 연구 개발 활동을 활발히 수행하여왔다.

그 결과 포틀랜드 시멘트에 원하는 특성 발휘를 위하여 실리카 흙이나 고분말도를 가진 슬래그 등을 혼합하고 고성능 감수제를 첨가하여 콘크리트를 제조하는 방법이 개발되었다. 그러나 이러한 방법으로는 콘크리트의 품질관리가 어렵고 요구되는 특성 모두를 동시에 만족시킬 수 없기 때문에 한계를 느껴오다가 80년대 말부터 포틀랜드 시멘트를 변형시킨 새로운 타입 (ASTM, JIS, BS 및 KS에서의 Type IV - 저열 시멘트와 유사한 Type) 의 시멘트 (일본 등 선진국에서는 시멘트중에 존재하는 주 시멘트 광물명을 본떠 벨라이트 시멘트라 불리고 있음) 개발이 시작되어 90년대 초에 상품화되기 시작되었다. 지금은 이 시멘트가 여러분야에 적용, 그 우수성이 인정되어 모든 시멘트 업체에서 생산 판매되고 있다.

국내에서는 이러한 고성능 콘크리트 분야는 아직 태동기라 볼 수 있다. 사용되고 있는 고성능 콘크리트도 모두 혼합에 의해 제조되고 있는 실정이고 국내 주요 건설업체가 학계와 연계하여 몇몇 건축물에 시공한 경험을 바탕으로 활발히 연구 개발중에 있으나 아직 만족할만한 수준은

아니다. 이들 건설업체의 시공 결과 혼합에 의한 콘크리트의 제조에는 품질관리, 원료조달, 경제성 등에서 한계점이 발견되었고 이들 문제점들에 대한 개선연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 콘크리트의 시장 상황은 지금까지와는 달리 초고층 RC 구조물, 국가적인 대형 프로젝트의 추진 등에 의하여 고성능 콘크리트의 적용이 국내 건축·토목 분야에 시급히 요구되고 있고, 향후 보통 포틀랜드 시멘트의 기능만으로 시공이 어려운 건축·토목 구조물에서의 꾸준한 수요증가가 예상된다. 특히, 최근 일련의 구조물 붕괴사고, 건설시장 개방, 숙련공 부족현상에 따른 문제는 건설시장의 환경을 급격히 변화시킬 수 있는 잠재요인으로 작용하여 건축·토목 구조물의 주재료인 콘크리트에 대해서도 보다 다양화, 고급화, 고품질화가 가속되고 있다.

본 연구소에서도 이와 같은 관점의 일환으로 고성능 콘크리트 제조에 사용되는 시멘트 개발을 통하여 국내 건축·토목 분야의 발전에 이바지하고자 90년 초부터 연구 개발을 수행하여 왔으며 현재는 상품화 단계로 조만간 벨라이트 시멘트가 시중에 유통될 전망이다.

본 고에서는 이러한 고기능성 시멘트중의 하나인 벨라이트 시멘트의 건축 및 토목 재료로서의 특징을 중심으로 소개하고자 한다.

벨라이트 시멘트의 특징

벨라이트 시멘트는 시대적 요청에 따라 다양하게 요구되는 특성을 만족시킬 수 있는 차세대 시멘트로서 일반적으로 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트의 구성 광물비를 적절히 조절, 설계변경하여 제조된 시멘트이다. 따라서 벨라이트 시멘트는 구성광물이 포틀랜드 시멘트와 동일하며

<표 1> 시멘트 종류별 물리특성

구분*	분말도 (cm ² /g)	플로우	응 결 (시간 : 분)		압 축 강 도 (kg/cm ²)				수화열 (cal/g)	
			초결	종결	3일	7일	28일	91일	7일	28일
고유동	4000	118	285	7:50	189	288	480	803	81.3	73.1
저 열	3450	114	285	8:15	174	250	458	588	58.0	70.2
1 종	3210	98.5	280	7:30	192	270	381	427	81.0	96.8

* 고유동 : 고유동 · 고강도 벨라이트 시멘트, 저열 : 저열 · 고강도 벨라이트 시멘트,
1종 : 보통 포틀란트 시멘트

단지 광물함량만이 다르다. (포틀란트 시멘트는 알라이트, 벨라이트, 칼슘 알루미늄네이트, 칼슘 페로알루미늄네이트 4 종류로 구성되어 있음) 이러한 이유로 벨라이트 시멘트는 새로운 시멘트로 개발되었지만 구조물 제조, 특성 분석 및 검증을 거쳐 실제 구조물에 적용되는 절차를 간소화 하여 곧바로 적용할 수 있는 장점이 있다. 일본의 경우 90년대 초에 개발되어 기본 특성만을 검토한 후에 곧바로 고층 건물이나 대형 구조물 제조에 적용되어 상품화 기간이 매우 짧았다.

<표 2> 초고층 RC 구조물에 사용되는 콘크리트 배합

배합 No	시멘트 종류*	W/C (%)	S/a (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위중량(kg/m ³)				혼화제량 (x C/M%)	혼화제 종류**	최대 골재 (mm)
						W	C	S	G			
1	1 종	30	40	2.0	23	180	533	849	1041	1.8	M-2000	
2	고유동	30	40	2.0	23	180	533	849	1041	1.5	M-2000	20
3	저 열	30	40	2.0	23	180	550	881	1081	1.5	M-2000	20

* 1종 : 보통 포틀란트 시멘트, 고유동 : 고유동 고강도 벨라이트 시멘트,
저열 : 저열 고강도 벨라이트 시멘트

** Mighty 2000

벨라이트 시멘트로 제조한 콘크리트는 고강도, 고유동, 저발열의 특성을 동시에 보유하고 있어 초고층, 초대형구조물에 이상적으로 적용이

<표 3> 표 2의 배합에 의한 Slump, Slump Flow 및 압축강도 발현특성

배합 No	시멘트 종류	Slump (cm)	Slump Flow (cm)	공기량 (%)	압 축 강 도(kg/cm ²)			
					3일	7일	28일	91일
1	1 종	23.1	48	2.0	458	550	848	888
2	고유동	28.1	80	2.3	438	544	785	871
3	저 열	24.8	53	1.8	349	527	778	801

가능하다. 또한, 진동다짐없이 형틀내로 균질하게 충전되는 고성능 콘크리트 제조에 필요한 고유동성과 재료분리 저항성이 매우 우수하다.

보통 포틀란트 시멘트를 사용하여 고성능 콘크리트를 제조하는 경우, 고유동성의 발휘는 고성능 AE 감수제를 첨가하여왔고 분리 저항성을 향상시키기 위해서는 일반적으로 고로슬래그 분말, 플라이 애쉬, 실리카 흙 등의 초미분말을 첨가한 혼합시멘트를 사용한다.

이러한 시멘트는 혼화제의 품질변동, 응결의 지연, 중성화에 따른 내구성저하, 장치의 개조, 경제성 등의 문제점이 제기되고 있어 시공 현장에서 직접 적용하기에는 많

은 문제점들을 안고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 시공성이 우수한 시멘트로 개발된 것이 벨라이트 시멘트이며, 벨라이트 시멘트는 시멘트 그 자체로 고성능 특성을 확보하고 있어 첨가물질 없이 고성능 콘크리트 제조가 가능하다는데 그 의의가 있다.

벨라이트 시멘트는 지속적인 고강도발현, 다짐이 필요 없는 고유동성, 장시간의 작업시간 유지, 대폭적인 수화열 저감, 치밀한 구조 형성에 따른 내구성향상 등의 특성으로 구조물의 안정성 및 인력절감을 도모할 수 있을 뿐만 아니라 시멘트 제조시 석회석 사용량 감소와 소성온도 저하에 따른 CO₂ 배출 감소 등의 효과가 있어 향후 날로 다양화,

〈표 4〉 표 2의 배합에 의한 콘크리트 유동성 경시변화 특성

배합 No	시멘트 종류	Slump (cm)	경 시 변 화 특 성				
			0분	30분	60분	90분	120분
1	1종	Slump Flow*	49.0	42.0	35.0	23.0	21.0
		Air Content**	2.1	2.3	2.9	3.2	3.5
2	고유동	Slump Flow	85.0	84.0	52.0	49.0	39.0
		Air Content	2.1	2.4	2.8	2.7	3.1

* Slump Flow : cm, ** Air Content : %

〈표 5〉 표 2의 배합시 콘크리트의 Slump Flow 50cm 도달 시간

배합 No	시멘트 종류	W/C (%)	S/a (%)	단위중량(kg/m ³)				혼화제량 (x C/M%)	Slump Flow 50cm 도달시간 (sec)
				W	C	S	G		
1	1종	30	40	180	533	849	1041	1.8	58
2	고유동	30	40	180	533	849	1041	1.5	20

〈표 6〉 벨라이트 시멘트의 적용처

구	분	적 용 처
구 조 물	고유동 고강도 요구 구조물	- 초고층 RC 구조물 - 콘크리트 2차 제품 - 지하연속벽
	저발열 고강도 요구 구조물	- 에너지 저장 시설 - 대형 교량 - 매스 콘크리트 구조물

가능화되는 건축·토목 분야의 추세와 부수적으로 CO₂ 발생규제에 따른 환경문제에 능동적으로 대응할 수 있는 특징을 가지고 있다.

벨라이트 시멘트는 구성광물 조성에 따라 두 종류로 분류되는데 일반적으로 시멘트 특성에 의해 고유동 고강도, 저열 고강도 시멘트로 불리워지고 있다.

〈표 1〉에 벨라이트 시멘트의 특성을 나타내었다. 벨라이트 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 장기 강도 발현이 높으며 낮은 수화 발열 특성이 있다. 벨라이트 시멘트는 용도에 따라 선택하여 사용 가능하며 고유동 고강도 시멘트의 경우 초기강도를 보강하여 설계하였다. 일반적으로 고유동 고강도 시멘트는 건축 구조물 제조에, 저열 고강도 시멘트는 토목 구조물 제조에 주로 사용된다.

〈표 2, 3, 4, 5〉에 벨라이트 시멘트를 사용하여 제조한 콘크리트의 특성을 나타내었다. 〈표 2〉에서의 배합은 일반적으로 초고층 RC 구조물 제조에 적용되는 것으로 물 시멘트 비율이 30%, 슬럼프 23 cm, 과밀 배근으로 최대 골재 크기 20 cm를 사용하였다.

고성능 콘크리트 특성을 얻기 위한 혼화제의 사용량은 보통 포틀랜드 시멘트인 경우 1.8% 인데 비하여 벨라이트 시멘트의 경우 1.5%로 혼화제 사용량 감소효과가 크다. 이는 벨라이트 시멘트 기본 특성중 하나이다.

콘크리트의 유동성은 보통 시멘트에 비해 우수하며 초고층 RC 구조물 배합에서 초기강도(7일) 특성은 보통 포틀랜드 시멘트가 약간 높게 발현되나 7일 이후부터 벨라이트 시멘트의 강도신장이 월등하여 28일에서 모두 보통 포틀랜드 시멘트의 강도수준을 상회하고 특히, 재령이 경과할수록 강도발현이 두드러져 재령 91일에서는 훨씬 높은 압축 강도 발현 특성을 나타낸다.

벨라이트 시멘트의 슬럼프 경시변화 특성은 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 매우 우수하여 레미콘수송에 의한 타설시 현장에서 우수한 작업성을 확보할 수 있고, 〈표 5〉에서 보는 바와 같이 소정의 슬럼프 플로우 (50 cm) 도달 시간이 매우 빨라 과밀 배근 구조물 제조시 콘크리트의 충전성이 매우 우수하다.

과밀 배근 구조물에 타설되는 고성능 콘크리트에 요구되는 가장 중요한 인자는 재료분리저항성과 충전성이다. 이 두가지는 타설된 콘크리트의 품질을 좌우하는 중요한 요소이다. 그러나 이 특성은 상호보완이 아닌 이율배반 특성관계에 있으므로 기존 1종시멘트에서 이러한 특성을 확보하기란 대단히 어려운 일이다.

벨라이트 시멘트로 제조한 콘크리트는 타설이 되면 자중에 의한 충전성으로 형틀구석까지 충전이 된다. 이러한 퍼짐성은 공학적인 평가로는 전단변형(콘크리트의 퍼짐)

에 필요한 힘(항복치)이 얼마나 되는
 나로 정의할 수 있다. 일반적으로 고
 성능 콘크리트는 상대적으로 항복치
 가 커져서 충전성이 불량해질 우려가
 있으므로 재료선정이 중요하다.

위의 표에서 알 수 있듯이 벨라이트
 시멘트로 제조된 콘크리트가 보통 포
 틀란드 시멘트와는 달리 재료분리가
 발생하지 않으면서 일정 슬럼프 플로
 우에 도달하는 시간이 짧다는 것은 콘
 크리트 충전시에 발생하는 전단변형
 에 대한 항복치가 작다는 의미이다.

이것은 점도는 크면서 항복치는 작
 은 특성을 요구하는 고성능콘크리트
 의 조건에 잘 부합된다.

따라서 벨라이트 시멘트는 앞에서
 언급한 바와 같이 과밀배근구조물용
 콘크리트에 적합하다. 따라서 과밀배
 근하에서도 재료분리 없이 유체와도
 같은 충전성 확보가 가능한 벨라이트
 시멘트는 향후 용도가 기대되는 철골
 조 대체구조물, 광관충진구조물, 매스콘크리트구조물 등
 에 적용되는 이상적인 시멘트라 할 수 있다.

벨라이트 시멘트의 용도

벨라이트 시멘트는 앞에서 언급한 바와 같이 적용 분야
 에 따라 크게 두가지 용도로 나눌 수 있으며 그 구분은 고
 유동, 고강도 구조물과 저발열 구조물이다. <표 6>에 벨라
 이트 시멘트의 적용분야를 나타내었다. 가까운 일본의 경
 우 벨라이트 시멘트의 적용상황은 초고층 RC 구조물, 대
 형교량, 지하연속벽, 에너지 저장시설 등 상당히 활발하
 고 다양하며 특히, 95년 초에 발생한 한신 지방의 대규모
 지진으로 인하여 파괴된 대형 구조물의 복구에도 벨라이
 트 시멘트가 사용되고 있다.

<표 7>에 일본에서 최근 적용된 벨라이트 시멘트 시공
 사례를 간추려 소개하였다. 최근 일본에서는 표에서 보는

<표 7> 벨라이트 시멘트를 이용한 일본에서의 최근 시공사례 (94년 ~ 95년)

제 조 업 체	공 사 명	시 공 자	비 고	
秩父小野田	相馬공동화력발전(주) 新地發電所 灰처리시설	態谷, ハザマ, 株木, 橋本占	저발열 고강도 벨라이트 시멘트	
	三軒茶屋시가지 재개발사업	東急, 大成, 協榮建設		
	仙台 LNG 기지 지하식貯水槽공사	大林組		
	동경가스 LPG 지하식貯槽	大成建設	고유동 고강도 벨라이트 시멘트	
	국립암센터 중앙병원 新棟공사	佐藤工業		
	秩父公園橋(PC사장교) 主塔 → 높이 130m 펌프압송	鹿島建設		
	土浦市 초고층집합주택 지상 31층 규모 → Fc = 600	態谷組		
	積水 House ザ・シーン城北 → 지상 46층규모의 초고층 RC 구조물(나고야시)	鹿島建設		
	住友・大阪	大阪시립체육관 聖體體育場	-	저발열 고강도 벨라이트 시멘트
	日本시멘트	국립암센터 중앙병원 新棟 기초부공사	佐藤工業	
宇部興産	千葉縣 船橋市 清掃工場 시설물공사	-	고유동 고강도 벨라이트 시멘트	
三菱 マテリアル	青森工場 시멘트 Silo 공사	-		
トクヤマ	トクヤマ 南陽工場 클링커 예비분쇄시스템 기초공사	-		

바와 같이 고기능 콘크리트 수요가 큰 붐을 타고 일고 있
 다. 따라서 모든 시멘트 제조업체에서 고유동 고강도 벨
 라이트 시멘트와 저열 고강도 벨라이트 시멘트 두 종류를
 생산 판매하고 있다. 또한 학계, 업계, 연구소를 중심으로
 위에서 언급한 용도 이외에 벨라이트 시멘트를 활용하여
 셀프 레벨링 콘크리트, 무수축 특성을 이용한 그라우트
 재료, 건축·토목 구조물의 외관을 미려하게 하는 경관
 콘크리트, 초치밀 미세 구조 및 내화학특성을 이용한 원
 자력 발전소 건설, 우수한 내해수성을 이용한 해양 구조
 물등에의 용도 개발 및 확대가 활발히 진행되어 조만간
 수요가 급증될 것으로 예상된다.

우리도 국내 토목 건축 분야의 선진화와 고급화를 위하
 여 고기능성 콘크리트 개발에 박차를 기해야할 것으로 생
 각되며 특히, 벨라이트 시멘트를 이용한 고기능성 콘크리
 트의 역할이 기대된다. **SS**