

초유동 고강도 저발열성 벨라이트 시멘트의 특성 및 용도

박 춘 근(쌍용중앙연구소 책임연구원)

1. 서 론

최근 SOC(사회간접자본) 사업이 본격화되고 고품질 구조물의 건설이 사회적으로 요구되면서 시멘트 재료에 대한 특성 발현요구가 다양화 되고 있다. 특히 콘크리트 구조물의 고층화, 대형화 추세가 이어지고 있고 이들 구조물들이 지하 및 해양 환경하에서 건설되고 있어서 콘크리트도 고강도, 고유동, 저발열, 고내구성 등의 고성능화가 요구되고 있다.

일반적으로 대형 및 고층 구조물과 특수 환경하에서 건설되는 고품질 구조물은 철근의 두께가 굵고 과밀배근 상태가 되기 때문에 종래의 콘크리트로는 형틀내 충전이 어렵다. 따라서 이러한 용도에는 유동성이 양호하고 재료분리 저항성이 높은 고성능 콘크리트가 필요하다. 일본, 미국 등 건축 토목 선진국에서는 이러한 성능을 발휘하는 콘크리트를 개발하고자 1970년대부터 학계, 시멘트 제조업체 및 연구소에서 연구개발 활동을 활발히 수행하여 왔다. 그 결과 보통 포틀랜드(Portland)시멘트(이하 포틀랜드시멘트)에 원하는 특성 발현을 위하여 실리카 흙(Silica fume)이나 고분말도의 미분말 슬래그(Slag) 등을 혼합하고 고성능 감수제를 첨가하여 콘크리트를 제조하는 방법이 개발되었다.

그러나 이러한 방법으로는 콘크리트의 품질관리가

어렵고 요구되는 특성중 하나는 첨가제의 종류를 선택하여 첨가함으로써 특성 발현을 할 수 있으나(예를 들면, 고강도의 경우 실리카 흙이나 고분말도의 슬래그 미분말, 저발열의 경우 슬래그 미분말 또는 플라이애쉬, 고유동의 경우 고성능 감수제 및 응집제 등을 첨가하여 요구 특성을 발현) 구조물에서 요구되는 특성 모두를 동시에 만족시킬 수 없기 때문에 한계를 느껴오다가 1980년대 말부터 포틀랜드시멘트를 변형시킨 새로운 타입(ASTM, JIS, BS 및 KS에서의 Type IV-저열시멘트로 분류됨)의 시멘트 개발이 시작되었다. 이 시멘트는 일본 등 선진국에서는 시멘트 중에 존재하는 광물인 벨라이트 함량을 많이 함유하고 있기 때문에 벨라이트(Belite) 또는 벨라이트 리치시멘트(Belite Rich Cement)라 불리우고 있다.

벨라이트시멘트는 지금은 小野田, 日本 시멘트 회사와 함께 太平洋 시멘트로 통합한 일본의 秩父 시멘트 회사에서 90년대에 들어서면서 연구를 시작하여 '94년에 상품화시켰다. 지금은 이 시멘트가 특수기능 발현이 요구되는 여러 분야 및 용도에 적용되어 그 우수성이 입증된 후 '95년을 기점으로 일본의 전 시멘트 회사에서 연구·개발 활동이 본격적으로 이루어져 생산, 판매되고 있다. 용도 또한 광범위하게 확장되어 고층 건축구조물, 대형 토목구조



물, 지하 연속벽, LPG 및 LNG지하 저장 탱크, 상하수도 구조물 등 건축 토목 분야에 적용되고 있다. 국내에서는 이러한 고성능 콘크리트에 대한 연구 및 개발이 1990년대에 들어와 본격적으로 수행되었으나 고성능 콘크리트의 제조는 모두 혼합에 의한 것으로 국내 주요 건설업체가 학계와 연계하여 몇몇 건축물에 시공한 경험을 바탕으로 활발히 연구개발 활동을 하고 있으나 아직 만족할만한 수준은 아니다. 이들 건설업체의 시공 결과, 혼합에 의한 콘크리트 제조는 품질관리, 원료조달, 설비투자, 경제성 등에서 한계점이 발견되었고 이들 문제점들에 대한 개선연구가 진행되고 있다.

그러나 국내 건설시장 상황은 1997년 건설시장의 개방과 함께 미국, 유럽, 일본 등의 선진기술이 대거 진입하여 초고층 RC 구조물 및 국가적인 대형 프로젝트의 추진에 의하여 고성능 콘크리트의 적용이 국내 건축 토목분야에 시급히 요구되고 있다. 이들 구조물들이 요구하고 있는 콘크리트의 특성은 포틀랜드시멘트의 기능만으로는 충족하기 어려워 국내에서는 최초로 쌍용양회공업(주) 중앙연구소에서 벨라이트시멘트를 1994년부터 연구를 시작하여 1997년에 개발을 완료하였다.

개발된 벨라이트시멘트는 1998년부터 본격적으로 공장에서 생산되어 현대건설이 시공한 한국 가스공사의 11, 12호기 인천 LNG 지하 저장고 건설에 적용된 후 지속적으로 적용되고 있으며, 시공 결과 벨라이트시멘트의 고유동, 저발열, 고강도 등의 특성과 품질관리 및 시공 등에서 용이성이 입증되어 지하철 공사, 고층 건축구조물, 원자로 건설 등 여러 분야에서 적용이 검토 중이다.

본고에서는 이러한 고기능성 콘크리트의 기초 재료로 사용되고 있는 벨라이트시멘트의 고품질의 건축 및 토목 구조물 재료로서의 특징을 중심으로 소개하고 용도를 논하고자 한다.

2. 벨라이트시멘트의 특징

벨라이트시멘트는 시대적 요청에 따라 다양하게 요구되는 특성을 만족시킬 수 있는 차세대 시멘트라 할 수 있다. 즉, 위에서 언급한 고성능 콘크리트의 특성발휘를 위한 시멘트 재료의 특징을 제외하더라도 환경적인 측면에서 보면 시멘트 제조시 석회석 사용량의 감소로 자연자원을 절약할 수 있고, 이 결과 CO₂ 배출가스를 포틀랜드시멘트와 비교하여 적게 배출하고 있고, 저온에서 소성되는 특성을 가지고 있기 때문에 에너지 소비 또한 적어 날로 심각해지고 있는 환경규제 및 문제에 능동적으로 대응할 수 있는 특징이 있다.

벨라이트시멘트는 포틀랜드시멘트의 구성광물을 적절하게 조절, 시멘트 재료를 설계, 변경하여 제조된 시멘트이다. 따라서 벨라이트시멘트는 구성광물이 포틀랜드시멘트와 동일하며 단지 광물함량만 다르다. (포틀랜드시멘트는 알라이트, 벨라이트, 칼슘알루미네이트, 칼슘 황로알루미네이트, 석고 5종류로 구성되어 있음) 이러한 이유로 벨라이트시멘트는 새로운 시멘트로 개발되었지만 구조물 제조, 특성분석 및 검증을 거쳐 실제 구조물에 적용되는 절차를 간소화하여 곧바로 적용할 수 있는 장점이 있다.

일본의 경우 90년대 초에 개발되어 기본특성 및 시공특성만을 검토한 후에 곧바로 고층 건물이나 대형 구조물에 적용되어 상품화 기간이 매우 짧았다. 실제로 ASTM, KS, BS 등에 벨라이트시멘트에 대한 규격을 수십년 전에 규정하여 저열시멘트라는 이름으로 불리어지고 있다. 일본만이 벨라이트 관련규격을 1997년 4월에 JIS화 하였다.

벨라이트시멘트로 제조한 콘크리트는 고강도, 고유동, 저발열의 특성을 동시에 보유하고 있어 초고층, 초대형 구조물에 이상적으로 적용이 가능하다. 또한 진동·다짐없이 형틀내로 균질하게 충전되는

자기충진 특성이 있고 또한 시멘트와 골재가 분리되는 재료 분리 저항성을 가지고 있어 초유동 특성을 갖는 고성능 콘크리트 제조가 용이하다. 포틀랜드시멘트를 사용하여 고성능 콘크리트를 제조하는 경우 고유동성을 얻기 위하여 고성능 AE감수제를 첨가하여 사용하여 왔고, 재료의 분리 저항성을 향상시키기 위하여 고로슬래그 분말, 플라이 애쉬, 실리카 흙 등의 미분말 물질을 첨가하였다. 이러한 혼화재료 및 혼합재의 사용은 혼화·혼합재의 품질 변동, 응결의 지연, 중성화에 따른 내구성 저하, 설비의 개조, 경제성 등의 문제점이 제기되고 있어 시공 현장에서 직접 적용하기에는 많은 어려움이 있었다. 이러한 문제점들을 해결하고 시공성이 우수한 시멘트로 개발된 것이 전술한 바와 같이 벨라이트시멘트이며, 벨라이트시멘트는 그 자체로 고성능 특성을 보유하고 있어 첨가물질 없이 고성능 콘크리트의 제조가 가능하다는데 큰 잇점이 있다.

벨라이트시멘트는 지속적인 고강도 발현, 다짐이 필요없는 고유동성, 장시간의 작업시간 유지, 대폭적인 수화열 저감, 치밀한 미세구조 생성에 의한 내구성 향상, 미려한 표면 등으로 구조물의 안정성 및 시공시 인력절감을 도모할 수 있고, 미려한 표면특성을 살려 경관(또는 노출) 콘크리트로 아름다운 건축물을 건설할 수 있다. 경관 콘크리트로 시공한 건축물은 대리석과 같은 질감을 나타내어 외부도색이

필요없다. 국내에서는 인천 국제공항 관제탑과 전자통신 연구소의 건축물에 적용한 바 있고 향후 많은 건축 구조물에 적용이 예상된다. 벨라이트시멘트는 구성광물의 조성에 따라 두 종류로 분류되는데 일반적으로 시멘트의 특성에 의해 고유동·고강도, 저발열·고강도 시멘트로 분류된다.

〈표-1〉에 벨라이트시멘트의 특성을 포틀랜드시멘트와 비교하여 나타내었다. 벨라이트시멘트는 포틀랜드시멘트에 비하여 장기 강도발현이 높으며 낮은 수화발열 특성이 있다. 벨라이트시멘트는 구조물이 요구하는 특성에 따라 용도에 맞게 선택하여 사용 가능하며 고유동·고강도 시멘트의 경우 벨라이트시멘트의 단점인 낮은 초기 강도발현 특성을 보상하여 설계하였다. 일반적으로 고유동·고강도 시멘트는 공사기간이 짧은 건축구조물 건설에, 저발열·고강도 시멘트는 큰 구조물(mass concrete structure) 위주의 토목구조물 건설에 주로 사용된다.

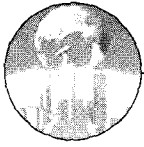
〈표-2~5〉에 벨라이트시멘트를 사용하여 제조한 콘크리트의 배합특성 및 콘크리트의 발현특성을 나타내었다. 〈표-2〉에서의 배합은 일반적으로 초고층 RC 구조물에 적용되는 것으로 물/시멘트 비율이 30%, 슬럼프 23cm, 과밀배근으로 최대골재 크기 20mm를 사용한 것이다. 고성능 콘크리트를 얻기 위한 혼화제의 사용량은 포틀랜드시멘트의 경우 1.8%인데 비하여 벨라이트시멘트의 경우 1.5%로 혼화제

〈표-1〉 시멘트 종류별 물리특성

구분 ¹⁾	분말도 (cm/g)	플로우	응 결 (시간:분)		압 축 강 도 (kg/cm ²)				수 화 열 (cal/g)	
			초 결	중 결	3 일	7 일	28 일	91 일	7 일	28 일
고 유 동	4.000	118	285	7:50	189	288	480	803	61.3	73.1
저 발 열	3.450	114	285	8:15	174	250	458	588	58.0	70.2
1 종 ²⁾	3.210	98	280	7:30	192	270	381	427	81.0	96.8

※ 주 1) 고유동: 고유동·고강도 벨라이트시멘트, 저발열: 저발열·고강도 벨라이트시멘트.

2) 1종: 포틀랜드시멘트.



〈표-2〉 초고층 RC 구조물에 사용되는 콘크리트 배합

배합 No.	시멘트 종류 ¹⁾	W/C (%)	S/a (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위중량 (kg/m ³)				혼화제량 (×C/M%)	혼화제 종류 ²⁾	최대골재 (mm)
						W	C	S	G			
1	1종	30	40	2.0	23	180	533	849	1,041	1.8	M-2000	20
2	고유동	30	40	2.0	23	180	533	849	1,041	1.5	M-2000	20
3	저발열	30	40	2.0	23	180	550	881	1,081	1.5	M-2000	20

※ 주 1) 1종: 포틀랜드 시멘트, 고유동: 고유동·고강도 시멘트, 저발열: 저발열·고강도 벨라이트시멘트.
2) Mighty 2000.

〈표-3〉 〈표-2〉의 배합에 의한 Slump, Slump Flow 및 압축강도 발현특성

배합 No.	시멘트 종류	Slump (cm)	Slump Flow (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kg/cm ²)			
					3일	7일	28일	91일
1	1종	23.1	48	2.0	458	550	785	824
2	고유동	28.1	80	2.3	438	544	848	908
3	저발열	24.8	53	1.8	349	527	778	836

〈표-4〉 〈표-2〉의 배합에 의한 콘크리트 유동성 경시변화 특성

배합 No.	시멘트 종류	Slump (cm)	경시변화 특성				
			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	65.0	64.0	62.0	59.0	59.0
		Air Content	2.1	2.4	2.8	2.7	3.1

〈표-5〉 〈표-2〉의 배합시 콘크리트의 Slump Flow 50cm 도달시간

배합 No.	시멘트 종류	W/C (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)				혼화제량 (×C/M%)	Slump Flow 50cm 도달시간 (sec)
				W	C	S	G		
1	1종	30	40	180	533	849	1,041	1.8	58
2	고유동	30	40	180	533	849	1,041	1.5	20

사용량 감소 효과가 크며 이는 벨라이트시멘트의 기본특성 중의 하나이다. 콘크리트의 유동성은 벨라이트시멘트가 포틀랜드시멘트에 비해 우수하며, 초고층 RC 구조물 배합에서 초기강도(7일) 특성은 포틀랜드시멘트가 약간 높게 발현되나 7일 이후부터 벨라이트시멘트의 강도신장이 월등하여 28일에서 모두

포틀랜드시멘트의 강도수준을 상회하고 특히 재령 91일에서는 훨씬 높은 압축강도 발현특성을 나타낸다. 벨라이트시멘트의 슬럼프 경시변화 특성은 포틀랜드시멘트에 비해 우수하며 레미콘 수송에 의한 타설시 현장에서 우수한 작업성을 확보할 수 있고, 〈표-5〉에서 보는 바와 같이 소정의 슬럼프 플로우

(50cm) 도달시간이 매우 짧아 과밀배근 구조물 제조시 콘크리트의 충전성이 매우 우수하다. 과밀배근 구조물에 타설되는 고성능 콘크리트에 요구되는 가장 중요한 인자는 재료분리 저항성과 충전성이다. 이 두가지는 타설된 콘크리트의 품질을 결정하는 중요한 요소이다.

그러나 이 특성은 상호보완이 아닌 이율배반적인 특성관계에 있으므로 기존의 포틀랜드시멘트에서 이러한 특성을 확보하기란 대단히 어려운 일이다. 벨라이트시멘트로 제조한 콘크리트는 타설이 되면 자중에 의한 충전성으로 형틀 구석까지 충전이 된다. 이러한 퍼짐성은 공학적인 평가로는 전단변형(콘크리트의 퍼짐)에 필요한 힘(항복치)이 얼마나 되느냐로 정의될 수 있다. 일반적으로 고성능 콘크리트는 상대적으로 항복치가 커져서 충전성이 불량해질 우려가 있으므로 재료 선정이 중요하다.

〈표-7〉에서 알 수 있듯이 벨라이트시멘트로 제조된 콘크리트가 포틀랜드시멘트와 달리 재료분리가 발생하지 않으면서 일정 슬럼프 플로우에 도달하는 시간이 짧다는 것은 콘크리트 충전시 발생하는 전단변형에 대한 항복치가 작다는 것을 의미한다. 이것은 점도는 크면서 항복치는 작은 특성을 요구하는 고성능 콘크리트의 조건에 잘 부합된다. 따라서 벨라이트시멘트는 앞에서 언급한 바와 같이 과밀배근 구조물용 콘크리트에 적합하다. 즉, 과밀배근하에서도 재료 분리없이 유체와 같은 충전성 확보가 가능한 벨라이트시멘트는 향후 용도가 기대되는 철골조 대체구조물, 강관충진 구조물, 매스콘크리트 구조물 등에 적용되는 이상적인 시멘트라 할 수 있다.

3. 벨라이트시멘트의 용도

벨라이트시멘트는 앞에서 언급한 바와 같이 적용 분야에 따라 크게 두가지 용도로 나눌 수 있으며 그

구분은 초유동·고강도 구조물과 저발열·고강도 구조물이다. 〈표-6〉에 벨라이트시멘트의 적용분야를 나타내었다. 가까운 일본의 경우 벨라이트시멘트의 적용상황은 초고층 RC 구조물, 대형교량, 지하 연속벽, 에너지 저장시설 등의 건설에 상당히 활발하고 용도 또한 다양하며 특히, 1995년 초에 발생한 한신지방의 대규모 지진으로 인하여 파괴된 대형구조물의 복구에도 벨라이트시멘트가 사용되고 있다.

〈표-7〉에 일본에서 최근 적용된 벨라이트시멘트 시공사례를 간추려 소개하였다. 최근 일본에서는 표에서 보는 바와 같이 고기능 콘크리트 수요가 큰 붐을 타고 일고 있다.

따라서 모든 시멘트 제조업체에서 초유동·고강도 벨라이트시멘트와 저발열·고강도 벨라이트시멘트 두 종류를 생산 판매하고 있다. 또한 학계, 업계, 연구소를 중심으로 위에서 언급한 용도 이외에 벨라이트시멘트를 활용하여 자기 충전성(self levelling) 콘크리트, 무수축 특성을 이용한 그라우트 재료, 건축 토목 구조물의 외관을 미려하게 하는 경관 콘크리트, 초치밀 미세구조 및 내화학 특성을 이용한 원자력 발전소 건설, 우수한 내해수성을 이용한 해양 구조물 등에서의 용도개발 및 확대가 활발히 진행되어 조만간 수요가 급증될 것으로 예상된다.

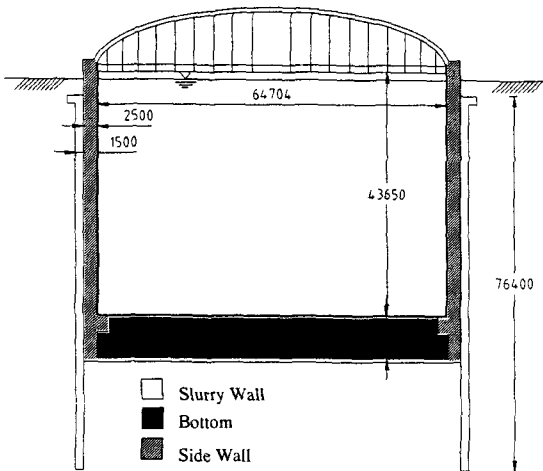
〈표-6〉 벨라이트시멘트의 적용처

구분		적용처
구조물	초유동	- 초고층 RC 구조물
	고강도	- 콘크리트 2차제품
	요구	- 지하연속벽
	구조물	- 지하철 및 상하수도 구조물
		- 경관(노출) 콘크리트
	저발열	- 에너지 저장시설
구조물	고강도	- 대형교량
	요구	- 매스콘크리트 구조물
	구조물	- 원자력 및 화력발전소 구조물



〈표-7〉 벨라이트시멘트를 이용한 일본에서의 최근 시공사례('94~'95년)

제 조 업 체	공 사 명	시 공 자	비 고
秩父小野田	栢馬공동화력발전(주) 新地下發電所 灰처리시설	態谷, 株木, 橋本占	저발열·고강도 벨라이트시멘트
	三軒茶屋 시가지 재개발사업	東急, 大成, 協榮建設	
	仙台 LNG기지 지하식 貯水槽 공사	大 林 組	
	동경가스 LPG 지하식 貯槽	大成建設	
	국립암센터 중앙병원 新棟공사	佐藤工業	
	秩父公園橋(PC 사장교) 主塔 높이 130m 펌프압송	鹿島建設	고유동·고강도 벨라이트시멘트
	土浦市 초고층 집합주택 지상 31층 규모 Fc=600	態 谷 組	
	積水 House 城北 지상 61층 규모의 초고층 RC 구조물(나코야시)	鹿島建設	
住友大版	大版 시립체육관 廳體공사	-	저발열·고강도 벨라이트시멘트
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 시설물 공사	-	
三 菱	青森工場 시멘트 Silo 공사	-	고유동·고강도 벨라이트시멘트
	南陽工場 크링카 예비분쇄 시스템 기초공사	-	



〈그림-1〉 국내에서 개발된 벨라이트시멘트를 사용하여 건설되고 있는 인천 LNG 지하탱크 구조물

우리도 국내 토건분야의 선진화와 고급화를 위해

여 고기능성 콘크리트 개발에 박차를 가해야 할 것으로 생각되며 특히, 벨라이트시멘트를 이용한 고기능성 콘크리트의 개발 및 상품화의 연구개발에 더욱 심혈을 기울여야 하겠다.

〈그림-1〉에 현재 국내에서 벨라이트시멘트를 이용한 고성능 콘크리트의 적용분야인 인천 LNG 인수기지에 대한 설계도면을 나타내었다. 현재 건설되고 있는 국가적인 대형 프로젝트 및 SOC 사업에 고기능성 콘크리트의 요구가 증대되고 있으며, 향후 고내구성의 고품질 건축·토목 구조물의 건설에 고성능 콘크리트의 사용은 확대될 것으로 예상된다.

시멘트 재료적인 측면에서 고기능화가 용이한 콘크리트의 제조 및 현장에서 경제적으로 사용될 수 있도록 고기능성 시멘트의 개발 및 시공성 연구를 시급히 수행하여야 하겠다. ▲