

고내구성 콘크리트를 위한 시멘트 소재의 바람

Hope of the Cement for the High Durability Concrete

최현국 Hyun-Kook Choi
성신양회
기술연구소 소장

박대병 Dae-Byoung Park
쌍용양회
생산기획팀 차장

박기서 Ki-Seo Park
동양시멘트
고객지원팀 차장

이승현 Seung-Heun Lee
군산대학교
신소재공학과 교수

1. 머리말

‘미래의 시멘트는 어떤 모습이어야 하는가?’에 대해 생각해 보면, CO₂ 배출량이 매우 적고, 필요한 시간에 맞춰 높은 유동성을 발휘하며, 바로 경화하면서도 열을 발생하지 않는 시멘트이다. 또한 길이 변화가 없고, 가벼우면서 강도가 많이 나가며, 물질의 차폐성능이 우수하고 환경의 영향을 적게 받는 값이 싼 시멘트이다. 이러한 특성을 목적으로 시멘트는 기술 개발에 힘써 왔고, 앞으로도 이와 같은 이상적인 모습에 접근하기 위해 노력할 것이다. 현재 국내·외에서 생산되는 시멘트는 콘크리트 구조물이 요구하는 성능을 상당 부분 실현할 수 있어 제대로만 시공하면 양질의 콘크리트 구조물을 얻을 수 있다. 그러나 양질의 콘크리트 구조물이라고 말할 수 없는 경우가 많다. 그 중 하나는 미국과 일본에서 논의된 바 있듯이 강도가 너무 과도하게 발현되는 시멘트에 그 원인이 있는 것으로 보고 있다. 내구성 관점에서 보면 강도가 높은 시멘트는 콘크리트 배합의 물-시멘트비가 높게 됨으로 공극의 생성량이 많아지게 된다. 따라서 적절한 물-시멘트비를 가질 수 있도록 적절한 수준의 강도를 갖는 시멘트가 필요하다. 시멘트 제조에서 배출되는 CO₂의 대부분은 소성 공정에서 발생하기 때문에 시멘트 클링커의 생산량을 감소시킬 수 있는 혼화재료(고로 슬래그 미분말, 플라이 애시 등)의 이용은 시멘트의 CO₂ 배출량 저감에 유효하다. 따라서 최근 국내에서 혼화재료를 시멘트 클링커 대신 다량으로 치환하여 콘크리트 구조물에 적용하려는 연구·개발이 진행되고 있다. 앞으로도 콘크리트에 요구되는 성능의 다양화와 온실가스 저감에 부응하기 위해서라도 시멘트 대체재로써 혼화재료의 사용은 지금보다 많아질 것으로 예상된다. 그러나 CO₂ 저감이라는 관점을 너무 강조하다보면, 혼화재료의 다량 사용에 따른 유의점에 대해 소홀히 하는 경향이 있다. 혼화재료의 장점뿐만 아니라 단점도 면밀히 검토하여 혼화재료 사용에 따른 콘크리트의 특성을 명확하게 하는 것이 매우 중요하다. 그리고 시멘트만큼 오랜 시간동안 검증된 건설재료는 없기 때문에 혼화재료 치환에 따른 구조물의 내구성이라는 측면에서도 반드시 검증이 필요하다.

본 고에서는 콘크리트의 내구성 관점에서 강도가 높은 시멘트가 과연 좋은 시멘트인가라는 것에 대해 논의하고, 시멘트 대신에 혼화재료를 다량 대체한 콘크리트의 내구성에 대해서도 한번 짚어보고자 한다.

2. 내구성이 높은 콘크리트에 적합한 시멘트의 강도^{1~4)}

시멘트는 콘크리트 중에서 결합재의 역할을 하고, 콘크리트는 강도를 얻는다. 이 시멘트의 성능은 KS나 ASTM,

JIS 등에서 지정된 방법으로 측정하여 모르타르의 압축 강도로써 평가받게 된다. 이런 측정값은 '시멘트의 모르타르 압축강도'가 정확한 표현이나 일반적으로 '시멘트 강도'라고 약칭한다. 시멘트 강도는 일정한 것이 아니며 시대나 장소에 따라 다르다. 한국, 일본, 북미에서는 유럽규격의 52.5MPa급에 해당하는 높은 강도의 시멘트가 생산되나 유럽에서는 강도가 낮은 32.5MPa급의 시멘트가 가장 많이 사용되고 있다. 동남아시아의 최신공장에서는 우리나라와 같은 강도의 시멘트가 제조되고 있으나 현지 규격에 정해진 여러 가지 혼화재료를 첨가하는 것으로 중간정도 강도인 42.5MPa급의 시멘트를 제조하고 있다.

시멘트 강도는 어떤 일정한 비율의 물과 시멘트의 혼합물을 정해진 재령에서 평가하기 때문에 그 재령까지 얼마나 많이 시멘트 수화물을 생성시키느냐가 관건이 된다. 높은 강도의 시멘트가 사용자(콘크리트 제조자 및 시공자)에게 선호되는데 그것에는 다음과 같은 이유가 있다.

- (1) 높은 강도의 시멘트라면 콘크리트 중의 시멘트의 양을 줄일 수 있어 시멘트 대신에 값싼 물질을 넣을 수가 있으므로 경제적이다.
- (2) 초기강도가 빠르게 발현되면 시공에 필요한 시간이 짧아져 공기를 단축시킬 수 있다.

이러한 이유 때문에 시멘트 사용자는 높은 강도의 시멘트를 원하고, 시멘트 생산자는 이러한 요구에 응답하여 지속적으로 시멘트의 고강도화에 노력해왔다. 그러나 일본의 경우 1999년에 일어난 신칸센 터널 내부의 콘크리트 박리낙하를 계기로 강도 높은 시멘트가 콘크리트 구조물의 내구성을 낮출 수 있다는 지적이 공식의견으로 제시되었다. 이러한 비판으로 2004년경을 마지막으로 시멘트 강도의 증가 경향은 일단락되었다.

시멘트의 역할은 강도발현 뿐만 아니라 골재를 수송하기 위한 매체라는 면도 있다. 최근에는 거의 모든 콘크리트가 펌프 압송의 형태로 시공되고, 과밀 배근상태에서 충전 시공하는 경우가 많다. 이때, 균일하고 밀한 콘크리트를 만들기 위해서는 굳지 않은 콘크리트가 대상구조물의 조건에 맞는 적당한 반죽질기와 유동성을 가져야 하고, 운반에서 타설까지의 작업에서 재료의 분

리가 발생되지 않고 블리딩이 적은 콘크리트라야 한다. 이러한 관계로부터 경험적으로 콘크리트 강도와 최대 굵은 골재 수치에 의존하여 적절한 시멘트량이 존재하게 된다.

우리나라의 시멘트 품질 규격에서 최저 강도는 규정되어 있지만 상한치는 규정되어 있지 않다. 그러나 유럽에서는 시멘트 강도 등급이 있어 <표 1>과 같이 3개의 강도 등급이 있고 강도의 하한치와 상한치가 설정되어 있다. 각각은 강도발현이 비교적 늦은 것과 빠른 것으로 구별하며 N(일반형)과 R(조강형)의 기호로 구별된다. 유럽에서는 콘크리트의 내구성 등 품질을 확보하기 위해 적정 시멘트 양을 매우 중요시한다. 이러한 개념은 콘크리트 교과서에 기재되어 있으며, 매우 당연한 것으로 이해되고 있다. <표 2>는 프랑스에서 최대 굵은 골재 치수 20mm 경우의 콘크리트 강도와 시멘트 강도별 시멘트량과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 보통 콘크리트는 필요한 시멘트량을 확보하기 위해 낮은 강도의 시멘트를 사용해야 한다. 반대로 고강도 콘크리트에서는 높은 강도의 시멘트를 사용하지 않으면 시멘트량이 과다하게 된다. 예를 들면, 보증강도 25MPa 콘크리트를 제조할 경우 52.5MPa급의 고강도 시멘트를 280kg/m³ 사용하는 배합 대신 32.5MPa급의 저강도 시멘트를 360kg/m³ 사용하는 배합을 권고하고 있다. 이를테면 공극이 적고

표 1. EN197-1:2,000의 강도 등급에 기초한 시멘트 분류

강도 등급		압축강도(MPa)			
		초기강도		표준강도	
		2일	7일	28일	
32.5	N	-	≥16.0	≥32.5	≤52.5
	R	≥10.0	-	≥42.5	≤62.5
42.5	N	≥10.0	-	≥42.5	≤62.5
	R	≥20.0	-	≥52.5	-
52.5	N	≥20.0	-	≥52.5	-
	R	≥30.0	-	-	-

표 2. 콘크리트 강도와 시멘트 강도별 시멘트량과의 관계 예

시멘트 강도등급	시멘트의 28일 표준강도(MPa)	콘크리트의 목표강도(MPa)에 따른 시멘트량				
		20	25	30	35	40
32.5	45	320*	360*	400*	440*	490
42.5	55	280	310	350	380*	420*
52.5	65	250	280	310	340*	370*

*굵은 글자는 시멘트량의 적정범위를 나타낸다.

내구성이 요구되는 콘크리트 제조에는 분체량을 확보할 필요를 인식하여 단위 시멘트량이 많은 배합을 권장하고 있는 것이다. 따라서 보통 콘크리트에서 강도가 높은 시멘트를 사용한다면 적은 시멘트 양으로 소요의 콘크리트 강도를 얻을 수 있지만 굵은 골재와 잔골재 사이의 공간은 완전히 채우지 못한다. 이와 같이 콘크리트는 공기나 물에 대한 투과성을 가지며 콘크리트의 열화를 조장하기 쉬운 환경을 제공하여 콘크리트 내구성을 떨어뜨리게 된다. 이러한 관계는 굵은 골재의 형태에도 의존한다. 강자갈과 같은 둥근 굵은 골재는 필요한 시멘트 양은 많지 않고, 쇠석과 같이 각진 굵은 골재에서는 필요한 시멘트량이 많아지게 된다. 양호한 워커빌리티를 확보하기 위해서는 적정량의 시멘트량이 필요하기 때문에 보통 콘크리트에서는 높은 강도의 시멘트보다 적절한 강도를 가진 시멘트가 적합하다.

〈그림 1〉은 보통 콘크리트의 성능(강도적인 측면과 내구적인 측면)에서 바라본 시멘트 강도를 나타낸 것이다. 콘크리트의 성능을 강도라고 하면(좌), 콘크리트의 강도는 시멘트의 강도와 상관관계가 있다. 그러나 보통 콘크리트에서 강도와 내구성이라는 두 가지 특성을 고려하면(우), 시멘트에 필요한 강도 수준이 달라진다. 즉 시멘트의 강도가 증가하면 콘크리트의 강도는 증가하나 역으로 내구성은 감소하게 되어 두 가지 성능을 만족시키는 적정 시멘트의 강도가 존재한다. 콘크리트를 강도만의 관점에서 본다면 고강도 시멘트는 좋은 시멘트라 할 수는 있지만 강도와 내구성의 관점에서 본다면 고강도 시멘트가 반드시 좋은 시멘트는 아니다. 특히 보통 콘크리트에서 강도가 낮은 시멘트 사용이 내구성 관점에서는 유효하다.

3. 시멘트 대신 혼화재료 다량 치환에 따른 내구성 저하 우려^{1, 5, 6)}

일반적으로 혼화재료로 고로 슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 초기강도 발현은 늦지만 저발열이고 장기강도의 발현이 우수하며, 화학저항성, 내해수성이 향상되어 내구성이 양호한 콘크리트 구조물을 만들 수 있다는 특징이 있어 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와는 차별화하여 사용되고 있다. 고로 슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 초기강도가 떨어져 공사기간

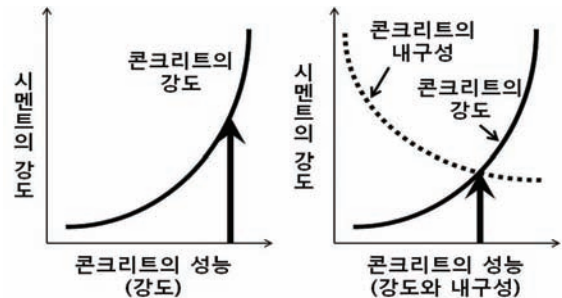


그림 1. 보통 콘크리트 성능과 시멘트 강도와의 관계 예⁴⁾

이 길어지는 특징이 있으나 현재 초기강도를 개선하기 위해 고로 슬래그 미분말의 분말도를 4,000 cm²/g 이상으로 높여 생산하고 있다. 이와 같이 고로 슬래그 미분말의 분말도를 높임으로써 초기강도가 상승되어 양생기간이나 거푸집의 탈형시기는 단축된다. 그러나 초기강도 개선으로 콘크리트의 단열온도 상승량이 보통 포틀랜드 시멘트보다 높게 되는 경우 내구성에 문제가 발생할 수 있으므로 매스콘크리트 사용 시 주의를 기울여야 한다. 또한 고로 슬래그 미분말 분말도의 향상은 자기수축과 건조수축을 증가시켜 구조물의 내구성을 저하시킬 수 있다. 콘크리트에서 건조수축은 구조물에 균열을 일으키는 가장 커다란 원인 중의 하나이다. 건조수축에 대한 고로 슬래그 미분말 분말도의 연구결과⁷⁾에서 분말도가 4,000 cm²/g에서 3,000 cm²/g, 2,500 cm²/g, 2,000 cm²/g로 감소하면 건조수축은 63%, 40%, 37%로 감소한다. 최근 고로 슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 균열을 조사한 결과⁶⁾ 자기수축이 무시할 수 없을 정도로 크다는 결과가 보고되고 있으며, 특히 분말도가 큰 고로 슬래그 미분말을 대량으로 배합한 경우 이러한 경향이 더 커진다. 또한 고로 슬래그 미분말 분말도 2,000 cm²/g, 2,500 cm²/g, 3,000 cm²/g에서의 재령 91일 자기 수축은 -19×10^{-6} , -18×10^{-6} , -11×10^{-6} mm의 작은 값을 나타내었다. 그러나 분말도 4,000 cm²/g의 고로 슬래그 미분말로 제조한 콘크리트는 초기 재령부터 수축을 보이기 시작한 이후 지속적으로 그 값이 증가하여 재령 91일에서 -216×10^{-6} mm를 나타냈다. 다시 말해, 고로 슬래그 미분말의 분말도 증가가 수축량, 특히 자기수축량이 증가하므로 이에 대한 주의가 필요하다.

플라이 애시를 콘크리트 혼화재료 사용하게 되면 유동성의 개선, 수화열의 저감, 장기강도의 증대, 알칼리

골재반응의 억제, 내해수성의 향상 등의 효과가 기대된다. 특히 이 중에서도 수화열 저감과 알칼리 골재반응의 억제는 플라이 애시의 효과 중에서도 매우 중요하다. 현재 플라이 애시는 특별한 경우를 제외하고 콘크리트 혼화재로서 사용량이 20% 미만이라 플라이 애시의 품질편차, 즉 유리질의 함유량, 미연탄소의 함유량, 화학조성의 불균일, 광물조성의 불균일 등에 의한 차이가 콘크리트의 특성에 큰 영향을 미치지 못한다. 그러나 플라이 애시의 사용량이 20%를 넘게 되면 플라이 애시의 품질 편차가 콘크리트 특성에 미치는 영향 커지므로 품질관리 기술개발이 필요하다. 시멘트 대체재로서 플라이 애시의 사용에 의하여 콘크리트의 특성이 저하하는 사례로는 소정의 공기량을 연행하기 위하여 필요한 AE제 양의 증가, 소정의 성능을 얻기 위하여 필요한 감수제 및 고성능감수제의 증가, 초기강도의 저하, 중성화 깊이의 증대, 동결융해작용에 의한 표면의 열화 등을 들 수 있다.

최근 플라이 애시 사용량이 증가됨에 따라 초기강도의 저하를 막기 위해 알칼리 자극제를 첨가하는 경우가 있다. 알칼리 자극제에 의해 초기강도 향상은 기대할 수 있지만 알칼리 골재반응, 표면의 취약화, 수축률 증대, 장기강도 저하 등 내구성을 요구하는 구조물에 적용하기 위해서는 고려해야 할 점이 있어 다량 사용에 주의를 기울이어야 한다.

콘크리트의 내구성 저하 인자는 염해, 중성화, 알칼리 실리카 반응을 비롯하여 여러 가지가 있다. 시멘트계 재료의 입장에서 보면 이러한 내구성 전체에 대해 저항성을 갖는 재료는 존재하지 않는다. 예로 보통 포

틀랜드 시멘트가 중성화에 대한 저항성은 우수하나 염해나 알칼리 실리카 반응에 대한 저항성은 혼화재료를 혼합한 시멘트에 비해 떨어진다. 역으로 혼합 시멘트는 중성화에 대한 저항성이 충분하지 않다. 즉, 고로 슬래그 미분말, 플라이 애시 등과 같은 혼화재료를 시멘트에 치환하는 경우 시멘트의 수화에 의해 생성되는 수산화칼슘과 혼화재료와의 포졸란 반응에 의해 pH가 저하되어 콘크리트는 중성화 속도가 빨라진다. 특히 물-시멘트비가 50% 정도인 보통 콘크리트 경화체의 중성화 문제는 철근 콘크리트에 치명적이므로 혼화재료 함유량이 증가할수록 철근 콘크리트 구조물에의 사용은 주의해야 한다. 일본에서는 고로 슬래그 미분말, 플라이 애시 등을 다량 사용한 콘크리트가 지하구조물 등 중성화의 영향을 받지 않는 환경 하에서 주로 사용된다. <표 3>과 같이 일본의 경우⁸⁾ 2008년 시멘트 사용량은 71백만 톤이며 이중 고로 슬래그 시멘트 사용량은 14백만 톤으로 19.7%를 나타내고 있다. 위에서 언급한 여러 가지 사항을 고려하여 건축구조물에서는 기초·지하 구조에 6백만 톤이 사용되고 상부구조에는 사용되지 않았다. 토목구조물에서는 교량, 하천공사, 항만공사, 해안공사 등 내해수성이 요구되고 초기강도가 필요하지 않은 구조물에 주로 사용되어졌다. 건축구조물보다는 토목구조물 사용량이 훨씬 많았다.


4. 맺음말

콘크리트를 강도만의 관점에서 본다면 고강도 시멘트는 좋은 시멘트라고 할 수는 있겠으나 내구성의 관점

표 3. 일본에서 고로 슬래그 시멘트의 사용 현황 추정(2008년)⁸⁾

용도 구분		전체 시멘트 사용량(백만 톤)	전체 시멘트 중 고로 슬래그 시멘트 사용량	
			비율(%)	사용량(추정, 백만 톤)
건축	기초·지하구조	6	20~30	1~2
	상부구조	22	0	0
토목	국토교통성 그린조달	3	94	2
	기타	17	50~60	9~10
프리캐스트 제품		7	2	0
고화재		6	20	1
수출		10	0	0
총 시멘트 사용량		71	-	14

에서 본다면 고강도 시멘트가 반드시 좋은 시멘트라고 할 수 없다. 또한, 단순히 건설 산업에서 환경부하 감소라는 시대적인 요구뿐만 아니라 기업의 니즈를 만족시키기 위한 고로 슬래그 미분말과 플라이 애시의 다량 사용은 향후 혼화재료의 단점으로 인해 구조물에 내구성의 저하를 초래하여 사용수명을 단축시킬 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 이러한 경우 본래의 목적과도 어긋나게 될 수 있으므로 시멘트 대신 혼화재료를 다량 치환하는 것은 구조물의 용도에 맞는 체계적인 연구와 검토가 필요하다.

최근 산업의 발달로 생산 과정에서 발생하는 각종 산업 부산물 및 폐기물이 지구의 환경을 훼손시킬 수 있는 문제를 안고 있다. 이에 대한 처리의 기술로써 시멘트와 콘크리트 산업에서 연구 개발이 이루어진다면 미래의 지구 환경을 보전하는 역할을 할 수 있는 친환경 산업으로 발전 가능성을 가지게 될 것이다. 

담당 편집위원 : 정해문(한국도로공사) haimoon@ex.co.kr

참고문헌

1. 사회환경머티리얼, 한국세라믹학회 시멘트부회, 한림원, 2009, pp. 65 ~ 75.
2. 이승헌, 시멘트 품질, 콘크리트 품질 그리고 규격, 시멘트 심포지움, Vol. 39, 2012, pp. 7 ~ 13.
3. S. Shirokuni, D. Sawaki and K. Yamada, An Investigation of the Most Suitable Cement for New Century, 太平洋セメント研究報告, No. 40, 2001, pp. 4 ~ 24.
4. C. Yamagishi, Is the High Strength Cement Rated among the Best Cement for Concrete, 技術革新と社會變革, Vol. 1, 2008, pp. 21 ~ 32.
5. 이승헌, 시멘트 · 콘크리트에 혼합 · 혼화재 사용에 따른 유의점 고찰, 시멘트, No. 191, 2011, pp. 38 ~ 46.
6. 鯉淵清, 高炉スラグを用いた環境にやさしいセメントコンクリートの開発, 帝京科学大学博士学位論文, 2010.
7. 이희건, SO₂에 따른 저분말도 고로 슬래그 미분말 시멘트의 수축 및 단열온도 특성, 군산대학교 석사학위논문, 2011.
8. K. Nobata, CO₂ Reduction Using Portland Blast Furnace Slag Cement, Concrete Journal, Vol. 48, No. 9, 2010, pp. 58 ~ 61.



최현국 박사는 일본대학 해양건축공학과에서 전로슬래그의 건설재료 이용에 관한 연구로 박사학위 취득 후, 성신양회 기술연구소에 입사하여 현재 연구소장으로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 특수 혼합시멘트 및 이를 적용한 저발열 콘크리트, 초고강도 콘크리트 등의 특수콘크리트 분야, 고로슬래그 및 기타 철강산업 부산물을 활용한 콘크리트 기술 등이다.
hkchoi@sscem.com



박대병 차장은 충남대학교 재료공학과에서 석사학위를 취득 후 쌍용양회에 입사하여 생산 공장 품질관리 업무, 고객 기술서비스 업무 등을 수행하였다. 현재는 생산기획팀에서 전사 시멘트 품질관련 업무를 담당하고 있다.
parkdb@ssyc.co.kr



박기서 차장은 강원대학교 토목공학과를 졸업하고 동양시멘트에 입사하여 레미콘, 파일 분야에서 전국의 40여개 공장의 품질관리 및 연구 업무를 수행 하였다. 삼척 시멘트공장에서 품질관리 업무를 거쳐 현재 고객지원팀에서 고객지원 업무를 수행하고 있다.
tycepark@lycos.co.kr



이승헌 교수는 현재 군산대학교 신소재공학과 교수로 재직하고 있으며, 연세대학교에서 시멘트 광물과 지연제와의 상호작용에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후, 일본의 동경공업대학에서 플라이 애시의 특성에 관한 연구로 박사학위를 취득하였다. 주 관심 분야는 시멘트 화학이며, 현재 한국시멘트협회 자문교수와 우리 학회 감사를 맡고 있다.
shlee@kunsan.ac.kr