



저발열 시멘트

송 종 택 <단국대학교 교수, 공학박사>

최근 구조물의 대형화나 시공방법의 다양화에 의해 종래보다도 수화열이 작으면서도 강도 발현성이 뛰어난 저발열 시멘트가 강하게 요망되어 연구가 활발하다.

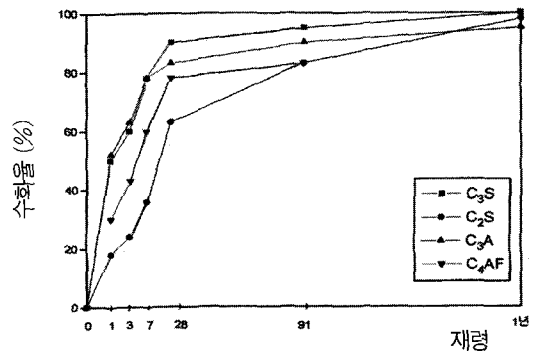
1. 머리말

시멘트는 물과 반응하여 경화하지만, 그때 발열하여 온도가 상승한다. 승온은 통상의 시공에서는 거의 문제가 되지 않지만, 타설량에 대해 방열면이 작은 매스 콘크리트나 경화가 빠른 시멘트를 사용한 경우에는 무시할 수 없게 되며, 균열 등의 시공 불량 원인으로 되는 일이 있다. 이 때문에 나쁜 영향이 예상되는 경우에는 여러가지의 대책이 취해지며, 그 중의 한가지 방법으로 수화 발열이 작은 시멘트를 선정하는 방법이 있다.

종래 수화열이 작은 시멘트로서 중용열 포틀랜드 시멘트나 플라이 애쉬 혹은 고로 슬래그 등의 혼합재를 혼합한 저열혼합시멘트가 있지만, 최근 구조물의 대형화나 시공방법의 다양화에 의해 종래보다도 수화열이 작으면서도 강도 발현성이 뛰어난 저발열 시멘트가 강하게 요망되어 연구가 활발하게 행해지고 있다. 1)~2)본고에서는 저발열 시멘트의 설계를 기술하고, 분류와 특성 및 초 저발열 시멘트에 대하여 소개하고자 한다. 3)~7)

2. 저발열 시멘트의 설계

각종 시멘트는 사용목적에 따른 수화·경화 특성이 얻어지도록 품질 설계가 되고 있다. 예를 들면 포틀랜드 시멘트의 경우에는 클링카의 광물조성이나 시멘트 분말도 및 석고의 첨가량등이 적절히 정해지며, 혼합 시멘트의 경우에는 사용하는 클링카 또는 시멘트의 종류 및 배합하는 고로 슬래그나 플라이 애쉬 등의 혼합재의 분량이 정해진다.



<그림-1> 시멘트 화합물의 수화속도



〈표-1〉 시멘트 화합물의 강도발현 및 수화열

화합물	압축강도(N/mm ²)					수화열(J/g)				
	3日	7日	28日	3月	1年	3日	7日	28日	90日	1年
C ₃ S	19.3	41.1	49.0	49.0	71.0	243	222	377	435	490
C ₂ S	0.4	1.0	6.3	35.6	70.7	50	42	105	176	226
C ₃ A	6.2	6.9	10.9	8.8	9.1	887	1,557	1,377	1,302	1,168
C ₄ AF	2.7	3.0	5.0	7.7	9.8	289	494	494	410	377

〈표-2〉 시멘트 화합물의 특성

화 합 물		강도발현		수화열
		단기	장기	
규산칼슘	Alite (C ₃ S)	大	大	中
	Belite (C ₂ S)	小	大	小
간극상	Aluminate상 (C ₃ A)	中	小	大
	Ferrite 상 (C ₄ AF)	小	小	中

〈그림-1〉은 각 시멘트 화합물의 수화속도를 나타내고 있다. 그림에서 보면 Aluminate상과 alite는 belite에 비교해서 수화속도가 큰 결과를 얻고 있다.

〈표-1〉에서는 시멘트 화합물의 강도발현과 수화열을 보여주고 있다. 수화열의 경시 변화는 각각의 화합물의 수화속도 차를 반영한 것으로 되어 있지만, 강도발현은 수화속도가 큰 aluminate상이 낮은 강도를 보이는 등 수화속도와와의 대응이 나쁘다. 이것은 수화에 의해 생성하는 수화물의 종류나 경화체 조직에 강도 발현이 크게 영향을 받기 때문이

다. 〈표-1〉의 내용을 정성적으로 정리한것이 〈표-2〉이다.

이상으로부터 포틀랜드 시멘트의 저발열화는 화합물의 구성에 있어서 수화열이 가장 작은 belite의 비율을 크게 하고, 그 밖의 화합물의 비율을 작게하는 방향으로 되지만, 이 점에 관하여 아래에 좀더 자세히 기술하고자 한다.

간극상인 aluminate상이나 ferrite상은 수화열이 대나 中임에도 불구하고 강도발현으로의 기여가 작기 때문에, 가능한한 저감시키는 방향으로 된다. 그러나 한 보기를 들면, 이들의 구성성분인 Al₂O₃나 Fe₂O₃는 클링카 소성에 있어서 저온에서의 액상의 생성을 가능하게 하여 이소성성(易燒成性)을 높이는 것에 의해 경제적인 클링카의 제조에 유용하다.

따라서, 공업적으로 이들을 극단적으로 감량하는 것은 어려우며, 실제적으로 Al₂O₃/Fe₂O₃비를 작게해서 수화열이 가장 큰 aluminate상을 소량으로하여 이소성성(易燒成性)의 확보에 필요한 ferrite상의 양을 존재시키는 품질설계가 이루어지고 있다.

(표-3) 고 Belite계 시멘트의 화합물 구성과 강도발현 및 수화열

화 합 물(%)				모르타르 압축강도 (N/mm ²)				수화열(J/g)		
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
43	45	2	10	10.8	15.9	36.1	55.7	243	318	364
30	58	2	10	9.7	13.1	38.6	62.9	209	272	327
21	67	2	10	6.7	9.5	31.4	62.0	188	251	322
10	80	2	8	0.8	1.1	12.4	52.2	105	222	297
0	90	2	8	0.5	0.8	19.6	53.3	80	176	272

규산 칼슘의 설계에 있어서, 저발열화를 도모하는 데에는 belite의 양을 증가시키고 alite를 감소시키면 좋다.

그러나 <표-3>의 고 belite계 시멘트의 실험예와 같이, 너무 많은 belite의 증량(표에서는 belite양이 80% 이상)은 초기강도의 현저한 저하로 이어지며, 장기 재령에서는 고강도가 얻어진다고 해도 실용면에 문제가 야기되며, 강도 발현과 수화열의 balance를 고려한 설계가 중요하게 된다.

예를들면 belite양을 65%정도, alite양을 20% 정도로 하면, 탈형에 필요한 초기강도(5N/mm² 정도)를 재령 3일에서 얻을 수 있으며, 재령 28일의 수화열은 중용열 포틀랜드 시멘트의 약 80%의 250J/g 정도로 저감시킨다.

다음은 혼합시멘트에 의한 저발열화에 관해서 기술한다. 일반적으로 고로슬래그나 플라이애쉬를 포틀랜드 시멘트에 혼합하면 첨가량에 따라서 수화열의 저감이 가능하게 된다.

혼합재의 열역학 데이터의 대응으로서, 산에 용해했을때의 반응열량(용해열)의 한 보기를 나타내면, 슬래그가 2,440J/g, 플라이 애쉬가 921J/g이며, 보통 포틀랜드 시멘트의 2,520J/g보다도 작은

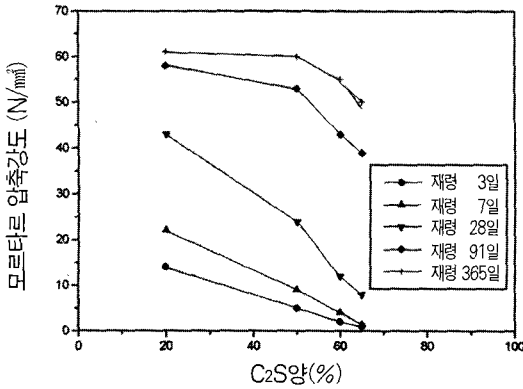
값이다. 시멘트의 수화열은 수화 전후의 용해열의 차로써 얻어지므로, 수화물의 용해열이 그다지 바뀌지 않는다고 하면, 포틀랜드 시멘트와 혼합재와의 용해열의 차를 각 혼합재의 수화열의 저감능력의 척도로 간주할 수 있다.

플라이애쉬는 보통 시멘트양의 반이하의 용해열이며, 수화열 저감효과가 크다. 그러나 수화 속도가 작기 때문에, 혼합량을 증가시키면 초기 및 중기의 강도 발현이 저하한다. 따라서 자연히 사용에 한도가 생기며, 20~30%의 혼합량이 실제적이다.

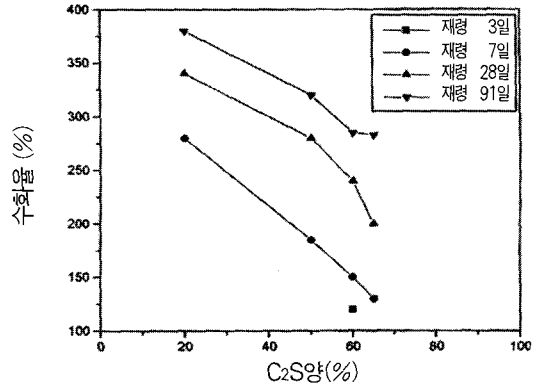
슬래그의 용해열은 혼합시멘트에 가깝지만, 그 차는 보통시멘트와 중용열 시멘트의 차보다도 크며, 플라이애쉬에는 미치지 못하는 수화열 저감효과가 있다.

또한 플라이 애쉬와 비교해서 강도 발현에 미치는 영향이 작기 때문에, 고로슬래그 시멘트계의 저발열 시멘트는 60%정도의 슬래그양으로 저발열화가 생각되어지고 있다. 더 나아가서 슬래그의 고미분말화에 의해 강도발현을 유지하면서 수화열을 저감하는 연구도 행해지고 있다.

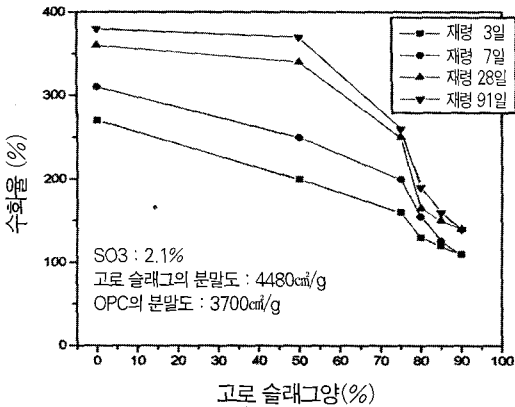
이상으로부터 추측할 수 있는 것과 같이, 혼합계 저발열 시멘트는 사용하는 포틀랜드 시멘트 및



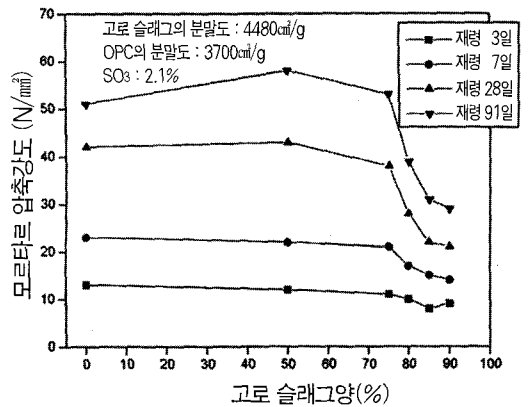
〈그림-2〉 C₂S양과 압축강도와와의 관계



〈그림-3〉 C₂S양과 수화열과의 관계



〈그림-4〉 고로 슬래그양과 수화열과의 관계



〈그림-5〉 고로 슬래그양과 모르타르 압축강도와와의 관계

혼합재의 종류와 양 혹은 분말도와의 조합으로 여러가지의 성능의 것들이 설계 가능하다.

3. 저발열 시멘트의 분류와 특성

저발열시멘트는 그 구성 성분에 의해서 Belite계와 혼합시멘트계로 분류된다.

1) Belite계 저발열 시멘트

포틀랜드 시멘트중의 각 광물 성분의 수화열은 alite, aluminate상이 높으며 (〈표-1〉). 수화 발열량의 저감을 위해서는 aluminate상의 양을 감소시키거나, alite에 대한 belite의 비를 증가시키는 대책이 취해지고 있다.

〈표-4〉 초저발열 시멘트와 Belite계 저발열 시멘트의 비교

		Belite	2 성분계	3 성분계
성분비율 (%)	포틀랜드 시멘트	100%	15~14%	15~35%
	고로 슬래그	—	60~85%	40~60%
	플라이 애쉬	—	—	15~30%
수 화 열 (28日)		170~310J/g	250~335J/g	190~250J/g
단 열 온 도 상 승 양		25~38℃	35~45℃	23~30℃
압축강도	28日	12~40N/mm ²	30~45N/mm ²	25~35N/mm ²
	91日	50~65N/mm ²	35~55N/mm ²	30~40N/mm ²
온도의존성 (고온양생)	수화열	大	大	小
	강도발현	양호	장기강도의 발현불량	양호
내 구 성	염해, 내알카리 골재 반응성	양호	양호	양호
	중성화저항성	양호	불량	양호

주 : 1) 2성분계는 포틀랜드 시멘트-고로 슬래그를, 3성분계는 포틀랜드 시멘트-고로 슬래그-플라이 애쉬계를 나타낸다.

2) 프틀랜드 시멘트로서는 조강, 보통, 중열 및 저열(Type IV 상당품)이 사용되고 있다.

〈그림-2〉, 〈그림-3〉은 C₂S함유량과 모르타르 압축강도 및 수화열과의 관계를 나타낸 것이다. Belite의 함유량은 60%정도가 상한선으로 생각된다. 이 때의 수화열은 재령28일, 91일에서 각각 약 250, 290J/g로 되어 있다. Belite계 저발열 시멘트는 초기강도발현이 늦다고 하는 결점은 있으나, 장기재령에 있어서 강도를 발현하는 것이나, 콘크리트가 중성화되기 어렵고, 또한 단열 조건하의 뛰어난 강도발현등의 장점을 가지고 있어, 금후 널리 이용될 것으로 생각된다. 이와같은 Belite계의 저발열시멘트는 ASTM에 있어서 Type IV로서 규격화되고 있지만, JIS에서는 규격화되어 있지 않으며 현재 규격화가 검토되고 있다.

2) 혼합 시멘트계 저발열 시멘트

혼합 시멘트계의 저발열 시멘트는 혼합재료(고로 슬래그, 플라이 애쉬 등)의 첨가에 의해서 수화

발열량을 저감하는 것과 함께 고로 슬래그의 포졸란 반응성에 의해서 강도 발현성의 저하를 억제하려고 하는 것이다.

〈그림-4〉, 〈그림-5〉는 보통 포틀랜드 시멘트로의 고로 슬래그 첨가량과 수화열 및 모르타르압축강도와의 관계를 나타낸 것이다.

수화열은 고로 슬래그 첨가량이 70%를 초과하면 급격히 저하한다. 모르타르 압축강도도 동일한 경향을 나타내지만, 급격한 저하를 나타내는 고로 슬래그 첨가량과는 약간의 차가 있는 것을 나타내고 있다. 바꿔 말하면, 강도저하를 억제하며 수화열만을 저감 가능한 고로 슬래그 첨가량이 존재하게 된다.

Belite 시멘트-고로 슬래그계에서도 마찬가지로 고로 슬래그양이 60%에서 급격한 수화열의 저하를 인정할 수 있다.

이것은 포틀랜드 시멘트중의 C₃S, C₂S의 수화에 동반하여 생성하는 Ca(OH)₂양의 저하에 의해



서, 고로 슬래그의 수화반응이 억제되기 때문으로 생각된다. 따라서, C₂S가 많은 시멘트일수록 고로 슬래그의 첨가허용량은 적어진다.

4. 초 저발열 시멘트

초 저발열 시멘트는 저발열시멘트와 정확한 구별은 없으나, 편의상 2성분(포틀랜드 시멘트-고로 슬래그)계와 3성분(포틀랜드 시멘트-고로 슬래그-플라이애쉬)계로 나눌 수 있다.

초 저발열 시멘트와 Belite계 저발열시멘트의 비교를 <표-4>에 나타내었다. 2성분계나 3성분계의 초 저발열 시멘트는 Belite계에서는 불가능한 곳까지 수화발열을 억제하고, 아울러 초기강도의 현저한 저하를 예방하는 시멘트로서 개발되었다. 저발열화의 지표로서 사용되는 수화열/모르타르 강도의 비교에서도 낮은 값을 나타내며, 우수한 성상을 나타내는 시멘트로서 대규모 매스 콘크리트 공사에 사용되고 있다.

한편, 혼합계의 대량사용에 의해 경화체중에 잔존하는 Ca(OH)₂양이 저하해서 중성화가 빠르게 된다는 데이터도 있으므로 양자의 득실을 고려하여 사용되고 있다.

5. 맺는 말

이상 저발열 시멘트의 설계, 분류와 특성 및 초 저발열 시멘트에 대해서 기술했다. 다른 관점으로 부터는 시멘트의 조립화, 유기 혼화제에 의한 수화 억제 등에 의해, 저수화열을 실현하는 시도도 있다.

현재 국내에서는 저발열 시멘트는 KS에 있어서 포틀랜드 시멘트 4종으로 규격화 되어 있지만, 거의 중용열 시멘트로 사용되어져 왔다.

그러나 최근 콘크리트 구조물의 대형화에 동반하여 시멘트에 대한 저발열화의 요망은 점점 더 커

지고 있다. 따라서 이에 대응해야 할 각종 저발열 시멘트가 국내에서도 시급히 개발되리라고 본다. 다행히도 금년 한국 콘크리트 학회 가을 학술 발표회에서 Belite rich계 및 혼합계 저발열 시멘트에 관한 논문^{8), 9)}이 보고 되었다.

끝으로, 저발열 시멘트의 실제 사용에 있어서는 이것을 이용한 콘크리트의 제 특성을 파악하고, 시공 목적에 적합한 것을 선정하는 것이 중요하다. 저발열 시멘트의 종류에 의한 콘크리트의 유동성, 단열 온도상승, 강도발현, 내구성등의 특징에 관해서는 이미 많은 연구가 선진 외국에서 행하여져 왔으므로, 이러한 자료들을 토대로 하루 빨리 개발 실용화가 이루어지기를 바란다. △

- 참고 문헌 -

- 1) 金澤克義 外3人, 콘크리트工學, 27(5), 31 (1989)
- 2) J. Bensted, World Cement, 24, 42 (1993)
- 3) 原田宏, セメント.콘크리트, No. 594, 40 (1996)
- 4) 吉田孝三郎, 五十嵐秀明, 無機マテリアル, 1, No. 252, 166 (1994)
- 5) 羽原後祐, 飛内圭之, セメント.콘크리트, No. 535, 12 (1991)
- 6) 五十畑達夫, セラミックス, 31(3), 206 (1996)
- 7) 中野錦一, セメント.콘크리트, No. 563, 2 (1994)
- 8) 현석훈 외 3인, 한국 콘크리트 학회 1996년도 가을 학술 발표회 논문집, 352 (1996)
- 9) 노재호 외 4인, 한국 콘크리트 학회 1996년도 가을 학술 발표회 논문집, 345 (1996)