

시멘트의 특성과 콘크리트 품질

이 재 항

〈한일시멘트공업(주) 대전 연구소 2차 제품 연구실 연구원〉

目

1. 머리말
2. 시멘트 관련현황
 2. 1 국내 시멘트 생산 및 소비실적
 2. 2 국내 시멘트 수급전망
 2. 3 국내 레미콘 생산실적

次

3. 시멘트의 특성과 콘크리트 품질
 3. 1 시멘트의 주요광물
 3. 2 주요 화학성분
 3. 3 주요 물리성능
4. 맺음말

1. 머리말

콘크리트란, 구성물질인 골재입자(Particle)를 접착제인 시멘트풀(Cement Paste)로 접착시킨 2상 물질(Two Phase Material)로서 그 강도는 강도기준에 따라 골재의 강도, 시멘트의 강도, 그리고 골재와 시멘트풀의 부착강도에 의존하는 것으로 알려져 있다. 그러므로, 골재와 시멘트가 지닌 물리·화학적 특성은 콘크리트 배합설계를 위시하여 구조물의 종류, 특징에 따라 다양한 방향의 이해를 필요로 하고 있으나, 시멘트에 관해서는 현실적으로 설계 및 레미콘 제조현장에서 이를 활용하기에 미흡한 실정이다.

따라서 본란에서는 시멘트회사에서 발행하

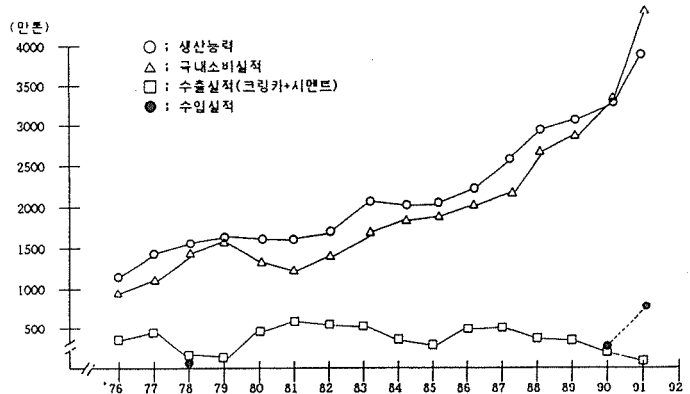
는 시멘트제품 시험성적서에 표시하는 항목을 기준으로, 콘크리트와 관련된 일반적인 내용을 정리하여 현장업무에 참고가 되게 하고자 한다.

2. 시멘트 관련 현황

2. 1 국내 시멘트 생산 및 소비실적

1976년부터 국내 시멘트업계에서 생산한 시멘트의 생산 및 소비 실적은 <그림 1>과 같다.

생산실적이 '76년도에 비하여 '91년도에는 3.3배 가까이 증가되었으나 국내 소비는 무려 4.1배 증가하였다. 반면 수출실적(cement + clinker)은 '81년도 최고 수출실적에 비하여 '91년도에는 3.5배 가량 감소되었을 뿐 아니



<그림 1> 연도별 국내 시멘트 생산 및 소비실적 (한국양회공업협회 자료)

라 수입이 약 700만톤에 이르고 있다.

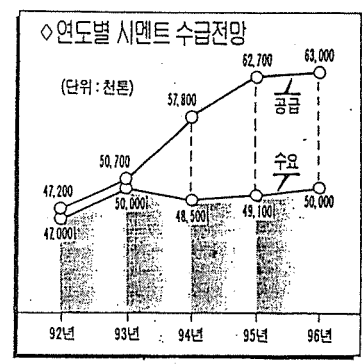
2. 2 국내 시멘트 수급전망

최근 분석된, 앞으로 국내 시멘트 수급전망은 <그림 2>와 같다.

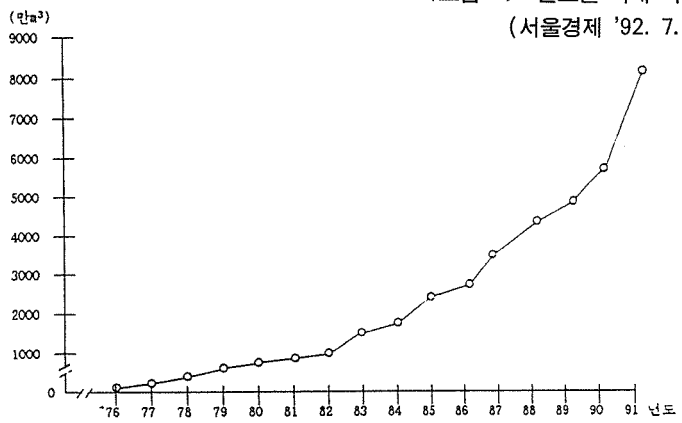
<그림 2>에 의하면 국내 각 시멘트 업계의 증설계획에 의거 '96년도에는 '91년말 현재 국내 생산능력, 약 4200만톤의 무려 50%가 증가된 6300만톤의 생산능력을 갖게 되는 반면 수요증가율은 점차 둔화되어 연간 1000만톤 이상의 시멘트 재고에 따른 해외시장 개척으로 다시 눈을 돌려야 하는 실정이다.

2. 3 국내 레미콘 생산실적

'76년부터 국내의 레미콘 생산실적은 <그림 3>과 같다.



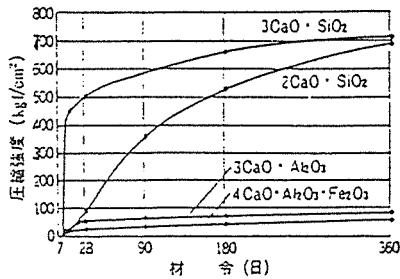
<그림 2> 연도별 국내 시멘트 수급전망 (서울경제 '92. 7. 22)



<그림 3> 국내의 레미콘 생산 실적 (한국레미콘공업협회 자료)

<표 1> 시멘트 광물의 일반적인 특성

화합물	알리트	베리트	알루미네이트	페타이트
개략적인 화학조성	규산 3칼슘 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_3\text{S})$	규산 2칼슘 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{S})$	알루미늄산 3칼슘 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$	테트라칼슘알루미노 페라이트 $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_4\text{AF})$
수화반응속도	빠르다(수시간)	늦다(수일)	순간적	대단히 빠르다(수분)
강도발현	빠르다(수일)	늦다(수주간)	대단히 빠르다(1일)	대단히 빠르다(1일)
중국강도	높다 : 수백 kgf/cm ²	꽤 높다 : 수백 kgf/cm ²	낮다 : 수십 kgf/cm ²	낮다 : 수십 kgf/cm ²
수화열	중정도 120Cal/g	낮다 : 60cal/g	대단히 높다 : 200cal/g	중정도 : 100cal/g
비고	포틀랜드 시멘트의 특징을 갖는 성분		水中에서는 불안정, 황산염에 의한 침해를 받기 쉽다.	시멘트의 특징인 회색을 부여한다.



<그림 3>에 의하면 레미콘 산업은 <그림 1>의 국내 시멘트 생산실적과 더불어 매우 급속한 양적 팽창을 가져왔음을 알 수 있다. 그러나, 정부의 7차 경제개발 계획기간('92-96년)중의 경제 성장율을 연평균 7.5%로 잡고 있는데 이 기간중 고정투자 증가율은 6차 계획기간의 16.5%보다 무려 10% 낮은 6.5%로 잡고 있을 뿐 아니라 그 중 건설투자 증가율은 6차 계획기간 17.2%보다 훨씬 밑도는 3.8%로 잡고 있어 레미콘의 내수 증가 속도도 점차 둔화될 것으로 여겨진다.

3. 시멘트의 특성과 콘크리트 품질

3.1 시멘트의 주요광물

시멘트는 다음의 4가지 주요광물로 되어 있으며 각 광물의 일반적인 특성은 <표 1>과

같다.

$\text{C}_3\text{S} (3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ - Alite (tricalcium silicate)

$\text{C}_2\text{S} (2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ - Belite (dicalcium silicate)

$\text{C}_3\text{A} (3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ - Aluminate (tricalcium aluminate)

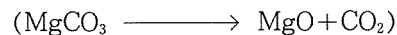
$\text{C}_4\text{AF} (4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$ - Ferrite (tetracalcium aluminoferrite)

3.2 주요화학 성분

3.2.1 산화마그네슘(MgO)

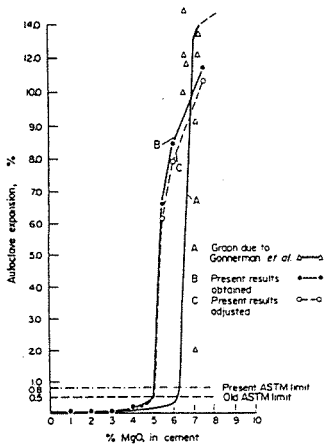
시멘트의 원료중에 포함되어 있는 MgCO_3 는 소성하면 산화마그네슘(MgO)과 이산화탄소로 분해된다.

가 열



MgO는 주요한 산화물과는 결합하지 않고 그 일부는 크링카 광물중에서 고용체의 형태를 취하며 나머지는 MgO(periclase)로서 결정화한다. 시멘트의 소성온도로 소성된 MgO는 硬燒 마그네시아이며 상온에서는 수년간에 걸쳐 물과 서서히 반응한다. 따라서 MgO는 단기간의 시험으로는 CaO와 같이 급격한 체적증가를 동반한다고는 말할 수 없

으나 autoclave 시험(KSL 5107)에서는 MgO가 수화반응을 일으키는 조건이 갖추어져 있으므로 불안정성을 나타나게 할 수도 있다. 그러나 고용체, 결정화 등의 상태에 따라 그 차이가 크며 <그림 4>는 포틀랜드 시멘트 포함된 MgO량과 autoclave 팽창과의 관계를 나타낸 그림이다.



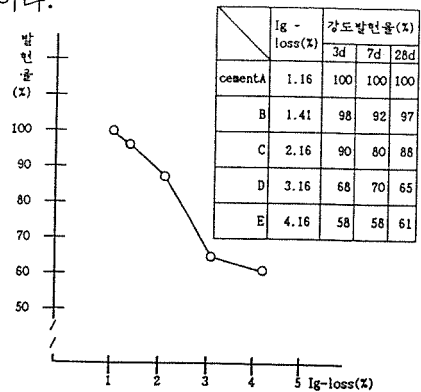
<그림 4> 시멘트중의 MgO 함량과 autoclave exp.관계

3. 2. 2 강열감량(신선도)

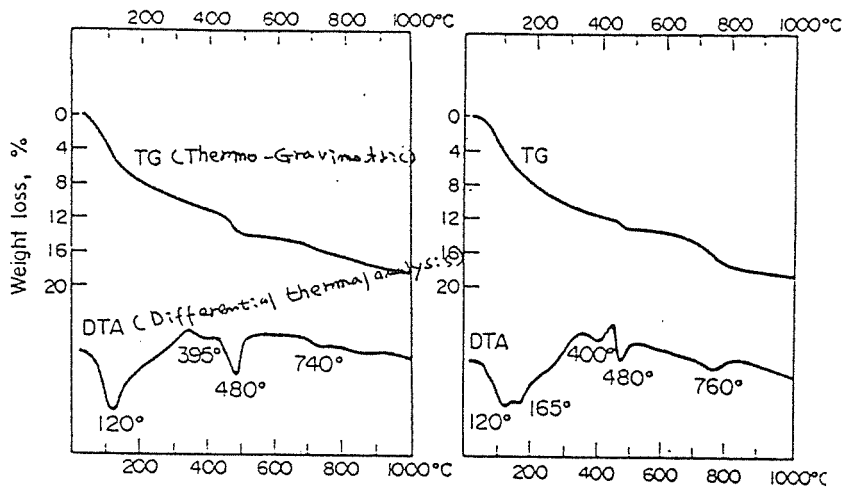
강열감량이란 시멘트를 900-1000°C로

강열한 후의 중량 감소율을 나타내며 일반적으로 Clinker 분쇄시 첨가되는 석고등의 첨가제 및 불순물 등에서 비롯되는 경우와 시멘트의 제조공정이나 저장, 수송중에 시멘트 입자의 부분수화에 의해 생성된 시멘트 수화물의 탈수등에서 비롯되는 경우이며 KS에서는 3% 이하로 규정하고 있다.

<그림 5>는 특성이 다소 다른 수화한 시멘트 경화체를 열분석한 결과로서, 특성온도에서 나타난 중량변화가 강열감량으로 나타내지며 <그림 6>은 시멘트 강열감량과 콘크리트 강도 발현율과의 관계를 나타낸 것이다.



<그림 6> 시멘트의 강열감량과 콘크리트 강도발현율



<그림 5> 시멘트 경화체의 열분석 결과

3. 2. 3 삼산화황(SO₃)

석고(CaSO₄·2H₂O)는 시멘트의 응결시간을 조절하여 주는 역할을 하며 시멘트에서는 석고의 함량을 삼산화황(SO₃)기준으로 관리하고 있다. 석고는 시멘트중의 알카리 금속화합물이나 C₃A의 함유량 및 시멘트의 분말도에 따라서, 최대 강도와 최소 수축량을 나타내는 최적량이 있다. KLS 5201에서는 C₃A가 8% 이하일때 3.0%이하, C₃A가 8% 이상일때 3.5% 이하로 규정하고 있다.

3. 3 주요 물리성능

3. 3. 1 분말도(Blaine(cm²/g)비표면적)

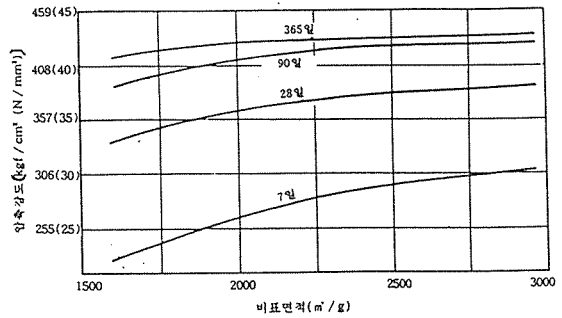
분말도가 높을수록 시멘트 입자가 물과 접촉할 수 있는 표면적이 커지고, 그 결과 반응성(수화반응)이 좋아 초기강도에서는 그 영향이 대단히 크나, 수화가 진행됨에 따라 점진적으로 감소한다. 즉 장기 재령에서는 시멘트 수화물인 CHS gel에 의해 물의 확산이 방해받아 진행이 완만히 되며 이 경우 수화 속도는 주로 물의 확산속도에 의해 결정되며 이때의 시멘트 분말도는 2차적인 것이 된다.

Blaine에 의하여 고안된 이 방법은 일정량의 공기가 시멘트 베드를 통과 하는데 소요되는 시간을 이용한 장치이다. <그림 7>은 시멘트 분말도가 콘크리트 강도 발현에 미치는 영향이고 <그림 8>은 시멘트 분말도가 시멘트 페이스트의 수축에 미치는 영향을 나타내고 있다.

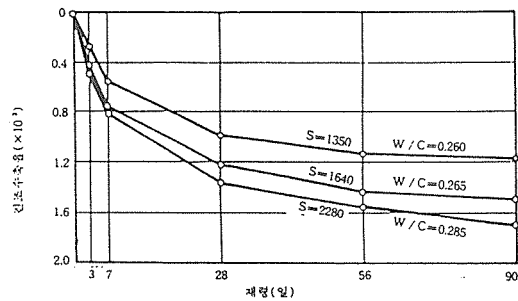
한편 시멘트 페이스트의 워커빌리티는 분말도가 높아짐에 따라 응집력이 증가하며 블리딩이 감소하기 때문에 개선되고 주어진 콘시스턴시를 얻는데 필요한 수량은 분말도가 높을수록 입자의 표면을 덮는데 필요한 수량이 많이 소요되므로 증가된다.

또한 비표면적이 클수록 표면적에 의하여 지지(支持)되는 수량이 많아져 블리딩이 감소한다. <그림 9>는 시멘트 분말도와 콘크리트

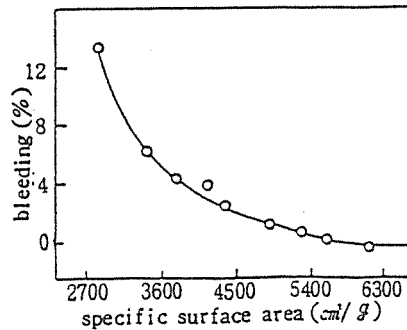
리트 블리딩율의 관계를 나타낸 그림이다.



<그림 7> 시멘트 비표면적이 콘크리트 강도 발현에 미치는 영향(Price)



<그림 8> 시멘트 분말도가 시멘트 페이스트의 수축에 미치는 영향(Haller) (Wagner법에 의한)

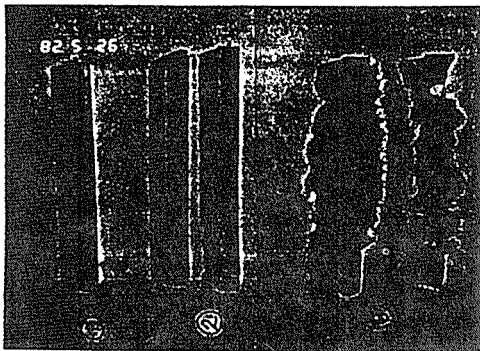


<그림 9> 콘크리트 블리딩율과 시멘트 분말도와의 관계

3. 3. 2 안정도

시멘트의 품질을 결정할 때 CaO와 같은 유리석회(free lime)는 중요한 인자가 된다. CaO는 원료를 소성할 때 CaCO₃가 분해해서 생긴다. 시멘트의 소성은 CaCO₃의 분해 온도인 약 900°C보다 훨씬 높은 약 1400°C에서 이루어지므로 CaO는 수화가 대단히 늦은 경소석회(硬燒石灰, hard burnt)가 되어 다른 광물과 결정화 됨으로서 물과 곧 반응하지 않기 때문에 CaO가 관여하는 수화반응은 시멘트가 응결하고 나서가 된다. CaO가 물과 반응하여 생성되는 Ca(OH)₂는 CaO보다 체적이 크므로 그 수화에 의해 경화 시멘트의 팽창이 발생하여 균열이나 열화(劣化)를 일으키는 원인이 된다.

이와같은 팽창을 나타내는 시멘트를 불안정(unsound)하다고 말하며 그 현상을 석회에 의한 불안정화(unsoundness due to lime)라고 한다. 따라서 KS에서는 각주(角柱)의 공시체를 21kgf/cm²의 증기압으로 양성하여 그 체적 변화의 정도로서 안정도를 판정하며 0.8이하로 규정하고 있다. <그림 10>은 autoclave 양성하였을 때 불안정 상태로 인하여 공시체가 변형되거나 파괴된 상태를 보여주고 있다.



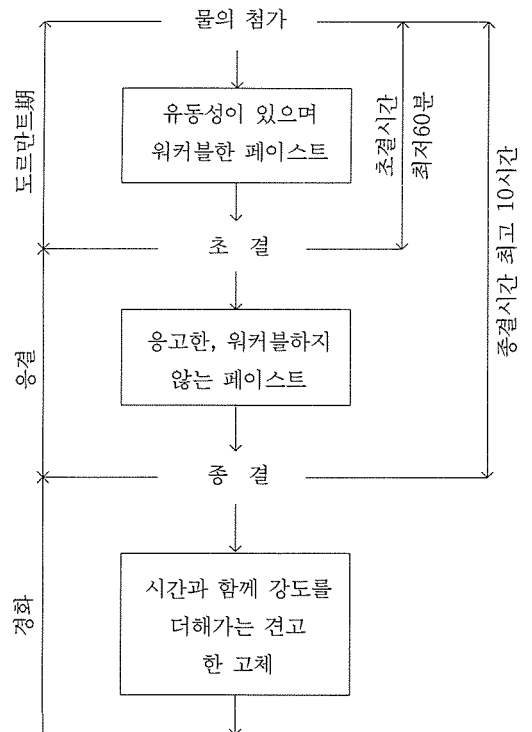
1) 안정 2) 균열 및 변형 3) 파괴

<그림 10> 불안정 시멘트 공시체의 안정도 시험결과

3. 3. 3 응결시간

시멘트를 물과 혼합하면 시멘트 광물(C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF)의 표면은 곧 수화반응이 시작된다. 그 중 3CaO·Al₂O₃는 가장 수화가 빠르나, 석고(CaSO₄·2H₂O)에 의하여 표면에 미세한 ettringite(3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·31H₂O)결정이 치밀하게 피막을 형성하여 3CaO·Al₂O₃의 수화를 억제하며 시멘트 페이스트(paste)는 유동성이 있다.

이와같은 형태는 어느 기간동안 변하지 않고 그 성상을 유지하며 그 기간을 도르만트기(dormant period, 休止期)라 하고, 시간이 경과됨에 따라 경화하기 시작하고 부드러운 상태이나 유동성이 없는 상태를 초결시간(initial setting time)이라 하며 시멘트 페이스트가 응고를 계속하여 고체와 같은 상태를 나타낼 때를 종결시간(final setting time)이라 한다. <그림 11>은 시멘트 페이스트의 응결 및 경화의 과정을 나타낸 그림이다.



<그림 11> 시멘트 페이스트의 응결 및 경화 개략도

3. 3. 4 압축강도

시멘트의 압축강도는 cement gel이라하는 미세결정 에너지가 상호간에 응집, 교착하므로써 치밀한 망상 구조가 됨에 따라 더욱 상호간에 결합이 강화되어 경화가 촉진, 강도 발현되며 복합적인 인자에 의하여 결정된다.

그 중요한 인자는

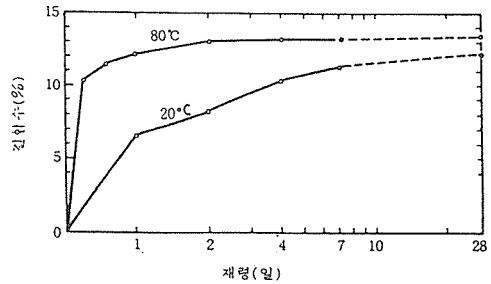
- 1) 포르시티(porosity)
- 2) 물시멘트비
- 3) 수화도
- 4) 온도(또는 압력을 동반한 온도)
- 5) 함수량 등으로써 포르시티는 시멘트의 압축강도를 결정하는 주요인자이다.

포르시티는 물시멘트비 및 수화도에 의해 결정되기 때문에 수화도에 영향을 미치는 모든 인자는 시멘트 강도에도 영향을 미치게 된다. 모든 조건이 동일하고 또 수화를 지속시키는데 충분한 수분이 있다고 하면 수화도는 시멘트의 종류, 재령등에 의하여 결정된다. 고온양생은 초기 재령강도를 향상 시키지만 장기재령 강도에 대해서는 유해한 영향을 미치는데 이는 페이스트를 구성하는 요소간에 서로다른 열팽창에 주로 기인하며 이로인해 포르시티가 증가되고 내부 균열이 발생한다.

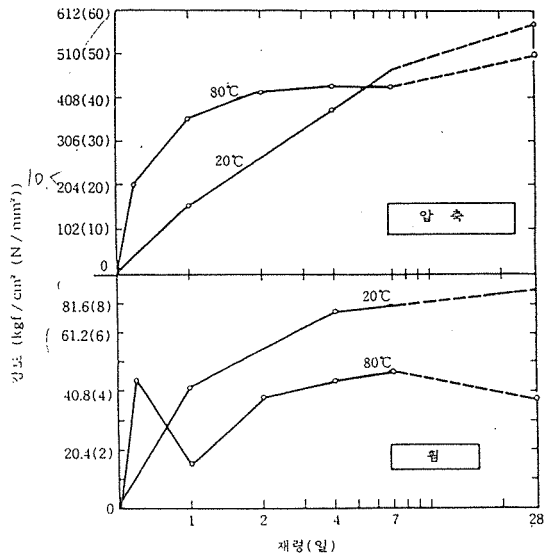
압력을 동반한 100°C 이상의 온도는 100°C이하의 고온양생보다 심하게 강도의 악영향을 미치나 이것은 수화생성물의 광물학적 및 물리적인 변화에 의하여 기인되는 것이다. 그 중 실무적으로 가장 가까이 있는 인자중에 하나인 온도와의 관계에 대하여 간략하게 살펴보면 <그림 12>는 수화도와 온도와의 관계를 나타내었고 <그림 13>은 시멘트 압축강도에 미치는 양생온도의 영향을 나타내고 있다.

또한 시멘트의 압축강도는 시멘트 2차 제품의 품질특성에 매우 중요한 영향을 미치고 있다. <그림 14>는 시멘트의 압축강도 변화에 따라 콘크리트 설계배합시 소요

강도를 얻기위한 각원재료의 단위재료 변화율을 나타내고 있다.

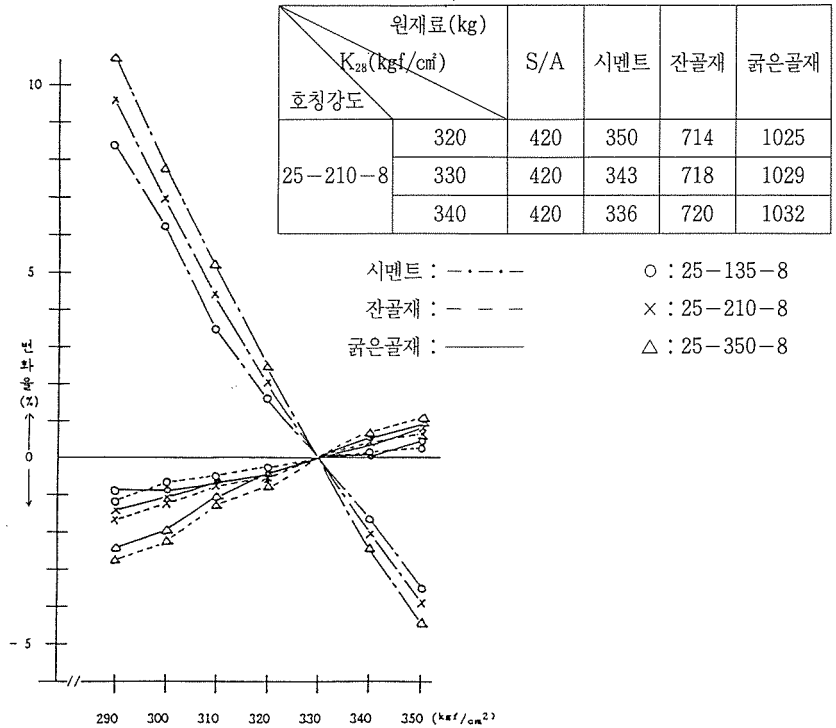


<그림 12> 수화도에 미치는 온도의 영향 (Odler와 Gebauer에 의함)



<그림 13> 시멘트 페이스트 강도에 미치는 양생온도의 영향 (Odler와 Gebauer에 의함)

또한 시멘트의 압축강도는 시멘트 2차 제품의 품질특성에 매우 중요한 영향을 미치고 있다. <그림 14>는 시멘트의 압축강도 변화에 따라 콘크리트 설계배합시 소요강도를 얻기위한 각원재료 변화율을 나타내고 있다.



<그림 14> 시멘트의 압축강도(K_{28})변화에 따른 콘크리트 1M³당 원재료 총량변화율
($K_{28} = 330\text{kgf/cm}^2$ 기준)

할 것이다.

4. 맺음말

이상으로 시멘트 시험성적서에 표시되는 항목과 관련되는 일반적인 사항을 정리하여 보았다.

그동안 국내 수요증가에 따른 시멘트 및 시멘트 관련 제품 업계의 양적 팽창은 국내 건설시장의 여건 변화 움직임에 따라 앞으로 많은 난관을 극복하여야 될지도 모른다. 따라서 공급에 치중한 이면에 잠재되어 있을지도 모를, 변화를 필요로 하는 요소를 재정비하여 소비자들에 대한 신뢰유지는 물론 새로운 건축소재의 끊임없는 출현에 대응하여 시멘트 및 시멘트 관련 제품이 지닌 고유특성이 소비자 들로부터 외면당하지 않도록 노력하여야

<참 고 문 헌>

1. セメントの常識, 日本セメント協會
 2. F.M.Lea, "The chemistry cement and concrete"
CHEMJICAL PUBLISHING COMPANY, INC, New York.
 3. 尹在煥, "포틀랜드 시멘트 및 콘크리트"
도서출판 세진사.
 4. S,N. GHOSH "GHOSH "Advances in Cement Technology"PERGAMON PRESS.
- ※ 상기 내용은 1992. 10. 27 한국레미콘공업협회 대구 경북지부 주최의 '92 콘크리트제품품질개선 및 관리세미나에서 발표한 내용을 수정, 보완하였음.