

새로운 시멘트 材料

崔 相 紇
 〈漢陽大學校教授·工博〉

1. 머릿 말

시멘트가 인류사에 등장한지 반만년, 포틀랜드 시멘트가 발명된지도 160여년이 지난 오늘날, 시멘트·콘크리트는 건설재료로서 타의 추종을 불허하는 자리에 군림하고 있으면서 高強度化, 早強化, 高耐久化의 바람을 하나하나 실현하면서 한편 새로운 needs에 부응하는 새로운 성능을 갖는 새로운 시멘트를 계속 개발하고 있다.^{1)~3)}

超早強·超速硬 시멘트, 膨脹시멘트 등 시멘트가 개발되었고 지상공간의 이용은 물론 해양 개발과 지하공간 개발 나아가 우주공간 개발에 까지 인류의 영역을 넓히려 하고 있으며 이들 개발을 위한 耐海水性 시멘트, 海底개발용 시멘트, 地熱 시멘트 등의 연구가 행해지고 있다.

최근의 새로운 재료개발 추세는 시멘트·콘크리트의 영역에도 큰 비약을 가져와 高性能減水劑의 개발과 각종 複合材와의 복합으로 지금까지의 시멘트·콘크리트의 상식을 초월하는 新材料에 도전하기에 이르렀다. 시멘트 과학의 발전과 규산칼슘, 규산알루미늄 및 인산염 등과의 수화물에 대한 연구는 chemically bonded ceramics 라는 새 영역⁴⁾을 낳았다.

1988년 5월 30일에서 6월 3일까지 東京에서 열린 MRS(Material Reserch Society) 주최의 Advanced Material 국제회의에서는 새로

운 주제의 하나로 “Advanced Cement and Chemically Bonded Ceramics”의 심포지엄이 다른 20개 부문의 심포지엄과 함께 개최되었으며

- Composite with polymer
- Phosphate
- MDF cement
- Fine particle
- Composite with fiber
- Special cement

의 6개 부문에서 관심의 대상으로 등장한 새로운 시멘트 재료와 함께 “화학결합 세라믹스”란 새 개념에 대하여 발표 토론되었다.

이 화학결합 세라믹스는 고온 소성에 의한 지금까지의 세라믹스에 대하여 소성하지 않고 화학결합으로 이루어진 세라믹스로서 그 응용은 건설재료, 화학재료, 기계재료, 생체재료 등 넓은 범위에 걸쳐 활용되는 새로운 재료라 할 수 있다.

새로운 시멘트와 화학결합 세라믹스는 새로운石器시대를 맞이하는 또 하나의 새로운 재료로서 2000년대를 향한 재료라 할 수 있다.

2. 시멘트 경화체의 강도

시멘트 硬化體는 시멘트를 구성하는 광물과 그의 수화물 및 空隙으로 구성되어 있는 多孔體이다. 시멘트 경화체의 강도는 기본적으로는 수화물 응집체의 강도이나 다공체의 강도는 공

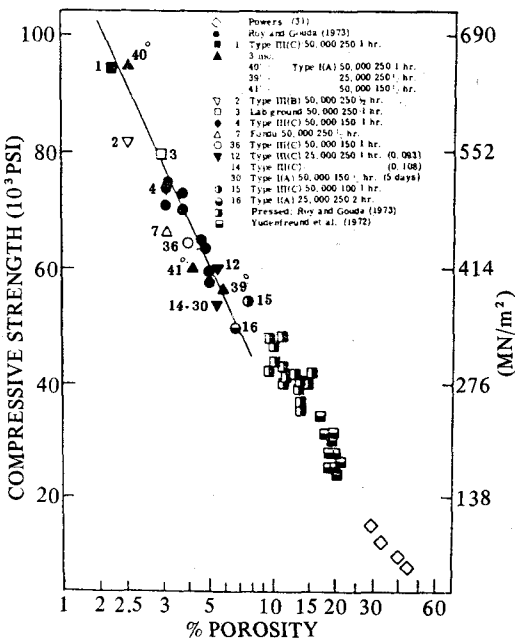
극률에도 의존한다. 즉 잘 양생되고(수화율이 클수록) 공극률이 적을수록 강도는 증대한다.

시멘트 경화체의 공극에는 모세관 공극과 gel 공극이 있는데 강도에 영향을 미치는 것은 주로 전자이다.⁵⁾ 따라서 시멘트 경화체의 강도를 높이기 위하여는 모세관 공극을 감소시켜야 한다.

Roy는 페이스트를 7,000 kg/cm²로 압축 성형하여 압축강도 3,250 kg/cm²의 경화체를 얻었으며 hot press 성형으로 4,200 kg/cm²의 경화체를 얻었는데 이때 경화체는 아주 치밀하고 공극은 거의 없었으며 Ca(OH)₂ 결정의 생성이 극히 억제되어 있었다.⁶⁾ 또 w/c ≒ 0.1로 보통 시멘트 페이스트를 250°C 5,000 psi로 처리하여 655 MPa(1 MPa ≒ 10.2 kgf/cm²)의 압축강도를 기록하였다.⁷⁾

고성능 감수제와 무기질 혼화제를 함께 사용하면 콘크리트의 고강도화를 도왔다. silica fume를 혼합 사용하여 만든 노르웨이 해상의 油井 플랫폼 흡은 28일 강도가 평균 83 MPa였으며 115 MPa의 것까지 얻어졌다(<表-1>).⁸⁾

시멘트·콘크리트 결합재의 일부를 polymer로 대체하는 polymer계 재료에 의한 콘크리트의 고강도화도 시도되고 있다.⁹⁾ polymer 흡浸



<그림-1> 시멘트 경화체의 공극률과 압축강도⁷⁾

의 경우 간극에 polymer의 충전에 의하여 결합체인 시멘트 수화물 자체의 강화와 함께 결합재와 골재와의 결합력도 증강된다. <表-2>는 polymer 함침에 따른 강도 증진의 예들이다 Rio는 高실리카 시멘트를 사용하여 MMA(methylmetacrylic acid)를 함침시켜 수열양생으로 2,870 kg/cm²의 고강도 콘크리트를 만들었다.

3. 초고강도 콘크리트

최근 超微粒子和 高性能 分散劑를 사용하여 지금까지의 고강도 콘크리트보다 더 큰 강도를 나타내는 超高強度 콘크리트가 개발되었다. 이런 초고강도 재료로서 MDF시멘트¹⁰⁾, DSP¹¹⁾

CONDEEP SP GULLFAKS C 플랫폼 흡용 콘크리트⁸⁾

<表-1>

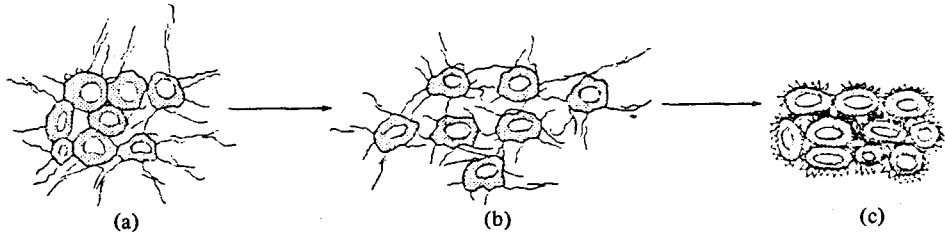
| | |
|---------------------------|--------|
| 시멘트 (SP-30-4 A modified*) | 430 kg |
| silica fume | 20 kg |
| 모래 (0~5 mm) | 920 kg |
| 조골재 (5~20 mm) | 860 kg |
| 물 | 165 ℓ |
| Betokem PA(B) | 6 ℓ |
| 슬럼프 | 240 mm |
| w/c | 0.38 |
| 강도 (28일, 평균) | 83 MPa |

* 시멘트 SP-30-4 A modified
C₃S 49%, C₂S 29%, C₃A 5.5%, C₄AF 9%
Blaine (cm²/g) 4,000
압축강도 7일 44 MPa, 28일 65 MPa

Polymetacrylic acid 함침 콘크리트의 강도⁹⁾

<表-2>

| 종 류 | 함 침 륜 (%) | 압 축 강 도 (kg/cm ²) | 취 임 강 도 (kg/cm ²) |
|-------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|
| 시멘트 페이스트 | 14.5~15.2 | 1,450~1,660 | 144~151 |
| 시멘트 모르터 (A) | 13.6~15.7 | 1,090~1,890 | 215~521 |
| 시멘트 모르터 (B) | 13.0~13.4 | 1,750~1,930 | 240~290 |
| 시멘트 콘크리트 | 3.91~7.30 | 910~1,290 | 106~180 |
| 경 콘크리트 | 24.8~25.2 | 1,020~1,050 | 146~174 |



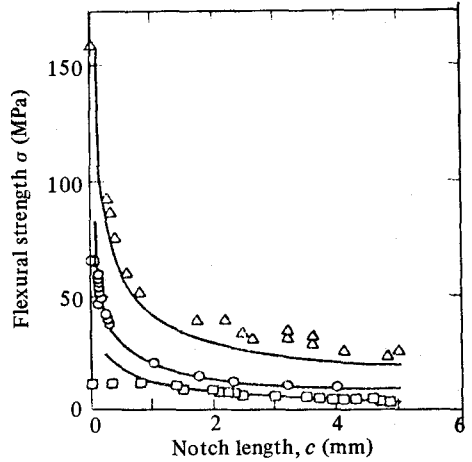
〈그림-2〉 MDF 시멘트의 결합¹²⁾

등 시멘트 재료들의 발전이 기대되고 있다.

MDF(Marco Defect Free) 시멘트는 수용성 polymer를 가지고 아주 적은 물/시멘트 비로 강력히 반죽한 다음 가압 성형하여 얻어진 200 Mpa에 가까운 꺾임강도를 갖는 시멘트로서 파괴강도에 영향을 많이 미치는 공극을 제거함으로써 높은 강도를 얻고자 한 것인데, 수용성 polymer의 성형을 돕는 작용과 결합제로서의 작용이 복합적으로 작용하였을 것이다. 〈그림-2〉¹³⁾는 MDF 시멘트의 결합양식을 보인 그림이고 〈그림-3〉⁴⁾은 MDF 시멘트의 notched beam test 결과이다.

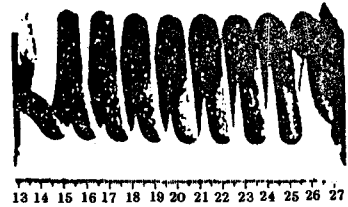
MDF 시멘트는 수용성 polymer를 갖고 있으므로 내열성, 내수성 등 앞으로 검토하여야 할 점도 있으나³⁾ 〈그림-4〉의 용수철 사진에서 볼 수 있는 것처럼 지금까지의 건설재료로서의 시멘트에서 새로운 재료로서의 시멘트의 가능성을 보인 한 본보기라 할 수 있다.

DSP (Densified system containing homogeneously arranged ultra-fine particles) 재료도 아주 적은 물/시멘트 비로서 유동성이 아주 좋은 고강도 콘크리트를 만든 것으로, 시멘트에 silica

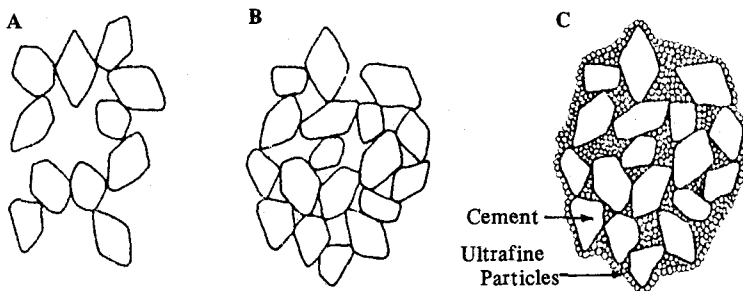


Bottom curve (squares) normal portland cement paste, Middle curve (hexagons), portland MDF; upper curve (triangles), calcium aluminate MDF.

〈그림-3〉 flexual strength의 notched beam test⁴⁾

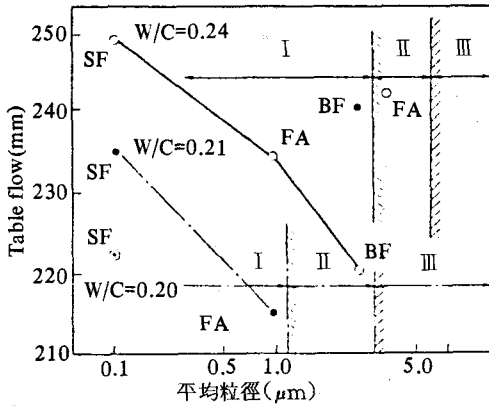


〈그림-4〉 시멘트로 만든 용수철

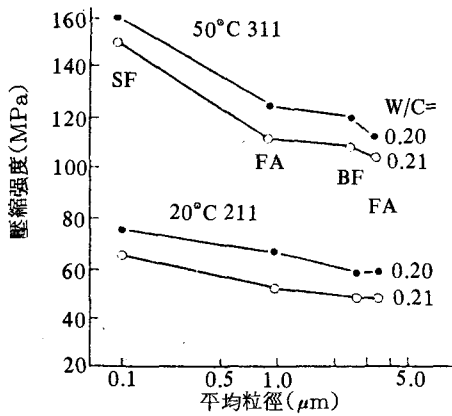


(A) Flocculated ordinary cement paste. (B) Better packing achieved with dispersant (superplasticizer). (C) Cement, silica fume, and superplasticizer.

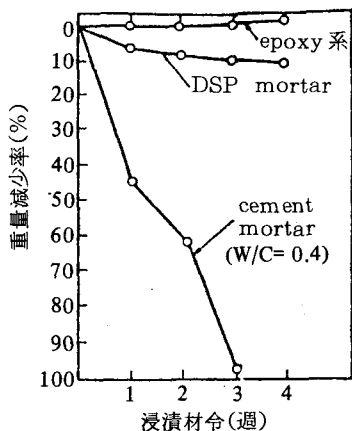
〈그림-5〉 DSP 페이스트



SF : silica fume, FA: flyash, BF: 高爐 slag
 <그림-6> DSP 모르터의 유동성에 미치는 미립자의 영향¹³⁾



SF: silica fume, FA: flyash, BF: 高爐 slag
 <그림-7> DSP 모르터의 압축강도¹³⁾



<그림-8> DSP 경화체의 내약품성 (30% 염산)¹³⁾

fume 과 같은 초미립자와 고성능 감수제를 가하고 입도구성을 조절하여 입자의 충전성을 향

상시켜 공극을 감소시켰다. <그림-5>는 DSP 페이스트의 그림이다.

<그림-6>은 입자 크기가 다른 미립자를 시멘트와 결합한 DSP 모르터의 유동성을 보인 것으로¹³⁾ 미립자의 평균 크기에 따라 유동성이 크게 바뀌고 있음을 보여주고 있다. <그림-7>은 각종 미립자를 조합한 DSP 모르터의 압축강도를 보이고 있다.¹³⁾

DSP 경화체는 큰 강도를 이용하는 건설재료로서의 용도뿐 아니라 내마모성, 내화학약품성, 세공량의 감소로 치밀성을 이용한 활용 등 다양한 면에서의 활용이 기대된다. CI 이온의 확산 계수는 보통 고강도 시멘트·콘크리트에 비하여 1~2자리 낮은 값을 보인다. 또 유동성이 좋으므로 주입성형, 가압성형, 사출성형도 가능하여 성형할 때의 정확한 치수나 높은 강도를 이용한 기계재료, 각종 몰드 등 금속을 대체하는 engineering concrete로의 이용도 검토되고 있다.¹³⁾

4. 두께 0.6 mm의 콘크리트

콘크리트로 얼마만큼 얇게 만들 수 있으며 그 두께로서 그 각각의 목적인 기능을 다할 수 있을까? 1983년 오스트레일리아에서 0.6mm 두께의 콘크리트가 출현하였다. Sydney 대학교의 The School of Civil and Mining Engineering 에서는 0.6 mm 두께의 콘크리트로 카누를 만들어 콘크리트 카누대회에 참가하였다.^{14),15)}

Sydney 대학에서 콘크리트로 카누를 만들기 시작한 것은 1980년으로 그때의 두께는 4mm 였다. <表-3>에서 보듯이 1982년에는 1mm 두께까지 만들 수 있었다. 이때는 보강재인 steel wire mesh의 굵기는 0.45 mm로 그것으로 짠 mesh의 두께는 0.9 mm로 콘크리트의 두께가 1mm 였다. 이 콘크리트의 배합과 품질은 <表-4>와 같다.

콘크리트 위에는 hessian이나 plastic membrane을 덮어서 5일간 습윤 양생하였다. 이 콘크리트는 직경 50 cm 정도로 말 수 있었다(<그림-9>).¹⁵⁾

1983년에는 직경 0.3 mm의 glass fiber로만

Sydney 대학의 콘크리트 카누¹⁴⁾

<表-3>

| Year | Name | Size | Hull thickness (mm) | Length (m) | Weight (kg) |
|------|-------------------------|-------|---------------------|------------|-------------|
| 1980 | <i>Orihune</i> | 2-man | 4 | 6 | 113 |
| 1981 | <i>Haribune</i> | 4-man | 2 | 7 | 56 |
| 1981 | <i>Dumbo</i> | 1-man | 2.2 | 6 | 22 |
| 1982 | <i>Aurora Australis</i> | 2-man | 1.0 | 6 | 25 |
| 1983 | <i>Tipsy</i> | 2-man | 0.6 | 6.5 | 11 |

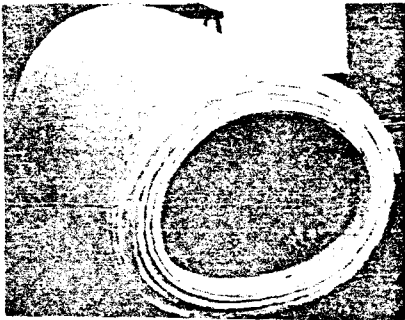
콘크리트 배합비 및 성능¹⁴⁾

<表-4>

| | |
|----------------|---------|
| 시멘트 | 300 g |
| pozzospheres*1 | 130 g |
| 고로슬래그*2 | 260 g |
| 물 | 250 g |
| 유동화제 | 1.25 ml |
| 물·시멘트 비 | 0.83 |
| 시멘트·골재 비 | 1.30 |
| 강도(11일) | 13 MPa |

*1 : pozzospheres 는 aluminosilicate microballoon 으로 150 μm 크기의 균일한 것.

*2 : 고로 슬래그는 300 μm 이하.



<그림-9> 두루마리로 만 콘크리트

든 그물(두께 0.6 mm)를 사용하여 0.6 mm 두께의 콘크리트를 만들었는데 이때의 배합비도 전과 같이 pozzospheres : 슬래그 : 시멘트 : 물의 비는 1 : 2 : 2.3 : 1.9로 역시 유동화제도 쓰고 있다. 이 콘크리트는 마치 종이와 같아서 반경 5 cm 정도도까지 말 수 있었다.

콘크리트 카누를 만든 것은 이 또한 새로운 재료로의 콘크리트의 면모를 보인 것이다.

5. 맺 음 말

고도기술 재료와는 무관한 것으로 알고 있었던 시멘트 재료도 신소재로서의 가능성을 보이고 있으며 인간 욕구의 한계에 도전하고 있다.

높은 강도와 큰 내구성을 가지면서 치밀하고, 작고 지금까지 생각지 못하던 기능까지 하나하나 이룩하고 있으며 하늘에 뜬 시멘트 경화체의 공간기지 또한 꿈만은 아닐 것이다.

<참 고 문 헌>

- 1) 최상훈, 토목학회지, 28(4), 28(1980).
- 2) 최상훈, 시멘트, No. 102, 33(1986).
- 3) 김정환, 한기성, 최상훈, 투고 예정.
- 4) D. M. Roy, Science, 235, 651(1987).
- 5) 近藤連一, 大門正機, 材料科學, 42, 376(1975).
- 6) D. M. Roy, G. R. Gouda, A. Bodsowsky, Cem. Concr. Res., 2, 349(1972).
- 7) D. M. Roy, G. R. Gouda, Cem. Concr. Res., 5, 153(1975).
- 8) 竹本國博, Cem. & Concr., No. 500, 230(1988).
- 9) 大浜嘉彦, Concrete 工學, 14(3), 25(1976).
- 10) J. D. Birchall, A. J. Howard, K. Kendal, Nature, 289, 388(1981).
- 11) H. H. Bache, 2nd Inter. Conf. on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, (1981).
- 12) K. Kendall, A. J. Howard, J. D. Birchall, Phil. Trans. R. Soc., Lond. A 310, 139(1983).
- 13) 長瀧重義, 坂井悦郎, Concrete 工學, 26(8), 15(1987).
- 14) C. M. Hewitt, R. D. Barnes, Concr. Inter., July 1985, 23(1985).
- 15) R. Q. Bridge, R. J. Wheen, Concr. Inter., Jan 1985, 31(1985). ♣