

콘크리트의 微構造와 強度

吳 基 東

〈釜山大學校 無機材料工學科 教授〉

本稿는 9월 6일 當協會 釜山·慶南지부가 주최한 技術세미나에서 主題 발표한 「시멘트의 水和와 콘크리트의 諸性質」을 發表者인 釜山大 吳基東교수가 「콘크리트의 微構造와 強度」로 改題하여 整理한 것이다.〈編輯者 註〉

〈目 次〉

1. 序 論
2. 콘크리트의 強度를 나타내는 提案式
3. 시멘트 paste 相의 物質
4. 養生中 온도에 의한 水和變化와 強度
5. 콘크리트의 건조수축
6. 레미콘을 引渡할 때의 問題點
7. 結 論

1. 序 論

콘크리트는 鐵鋼材와 더불어 토목, 건축용 材料로서 중요한 위치를 차지하고 있다.

최근 건설기술의 현저한 進歩에 수반하여 콘크리트 구조물의 규모가 大型化되고 있을뿐 아니라 공사의 質의인 내용도 점차 高度化, 복잡화 함에 따라 수요처에서 콘크리트의 耐久性의 향상을 한층 더 요망하고 있다. 한편 省에너지에 관한 요청도 技術的인 課題의 하나라고 할 수 있다.

상술한 요망에 부응하려면 콘크리트의 結構체인 시멘트의 성능을 개량하는 것도 생각되지만 현장에서의 여러가지 대응책 즉 사용원료 배합 및 품질검사 등 技術的인 문제를 검토하는 것이 매우 중요하다.

콘크리트의 微構造와 強度의 변화는 시멘트의 水和過程에 의해 지배된다고 할 수 있다. 즉 수화과정에서 일어나는 수축, 空隙의 비율, 수화열 生成水和相의 轉移나 조직의 변화가 복잡하게 交錯하여 接착제나 강도체로서의 기능을 발휘한다.

콘크리트에 요구되는 성질중에서 가장 중요한 것은 콘크리트가 가압 파괴될 때는 조직이 가장 약한 部位부터 파괴 되지만 이러한 部位는 거의 모든 수화 조직과 골재와의 接合部이다. 여기서는 콘크리트의 미구조에 대해서 어떻게 해석되고 있는가를 국내외의 연구중에서 소개하고 그것이 硬化組織의 물성 특히 강도와 어떤 관계에 있는지 考察하려고 한다.

2. 콘크리트의 강도를 나타내는 提 案 式

콘크리트의 강도를 나타내는 제안식에 시멘트의 수지가 어떻게 취급되고 있는지 살펴보면

- 1) 材 畧에 의한 강도변화를 취급한 것.
 - 2) 양생온도를 변수로 생각한 것.
 - 3) 시멘트의 수화율을 변수로 도입한 것.
- 등이 있다.

1) Abrams의 식

$$F = A \log t + B \dots \dots \dots (1)$$

여기서 F: 강도, t: 材 畧, A, B: 상수

2) 笠井의 식

$$f_c = a(T^\circ T)^n \dots \dots \dots (2)$$

여기서 T°: 가상양생온도(°C), T: 加水 후의 경과시간(h), a, n: 상수, f_c: 20°C, 材 畧 3 일간 양생한 강도를 기준으로한 초기강도 백분율

3) 關 등의 식

$$\sigma_c = -281.2 + 413.97 (CH/W) (kg/cm^2) \dots \dots \dots (3)$$

여기서 σ_c: 압축강도, CH/W: 有効시멘트-물의 비인데

$$CH/W = \frac{\text{콘크리트 1 m}^3 \text{ 중의 시멘트량} \times \text{水和量}}{\text{콘크리트 1 m}^3 \text{ 중의 水量}}$$

시멘트의 초기의 수화가 복잡한 변화를 수반하고 그것이 콘크리트의 短期, 長期의 물성에 영향을 미친다 해도 수화의 진행이 材 畧과 더불어 어느 정도 정상화되면 진술한 해석은 가능할 것이다.

강도란 보통 통계적인 측정량으로서 평가되는 것이기 때문에 초기의 어떤 반응과정에 의해 영향을 받는가에 대해서는 알지 못하고 넘어가는 경우가 많다.

3. 시멘트 Paste 相의 物 性

콘크리트의 強度發現은 주로 시멘트의 수화반응에 의한 것이므로 시멘트 paste의 검토는

매우 有用하다. 그래서 시멘트 paste의 물성에 대하여 간단히 기술하려 한다.

시멘트 paste 중의 自由水和 空隙의 변화는 물의 투과성에 영향을 미치고, 또 이것은 paste의 구조와 액체의 점성에 支配된다. 수화가 진행하여 毛細管이 水和生成物로 채워짐에 따라 투과성은 減少한다.

충분히 水和한 paste에서는 全空隙과 투과율과의 관계를 다음 식으로 나타낸다.

$$K_1 = \frac{1.36 \times 10^{-10}}{\eta(T)} \cdot \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \epsilon \times p \left[- \left(\frac{1242}{T} + 0.7 \right) \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right] \dots \dots \dots (4)$$

여기서 K₁: 투과율, η(T): 온도 T°K에서의 물의 粘性(poises), ε: 全空隙

이 (4)식은 Gel水是 水和paste를 固相의 一部로 보고, 全空隙ε를 毛細管空隙ε_c로 치환한 경우로 그림 1에서 보는바와 같이 新鮮 paste, 충분히 水和한 paste等 材 畧에 의한 모든 paste에 적용된다고 한다. 그림 1로부터 이해될 수 있는 바와같이 투과성은 시멘트의 수화를 支配하는 하나의 중요한 점이다.

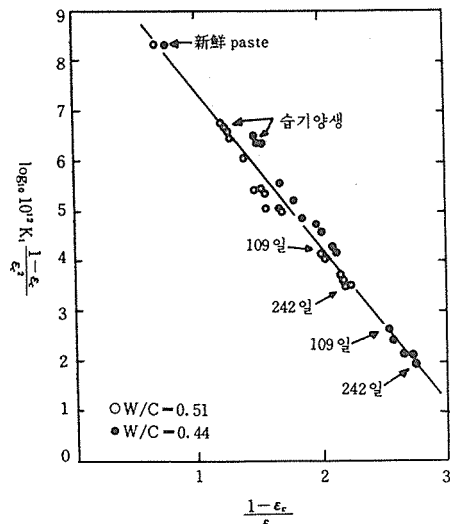


그림 1. Paste의 空隙率 - 침투성 변화

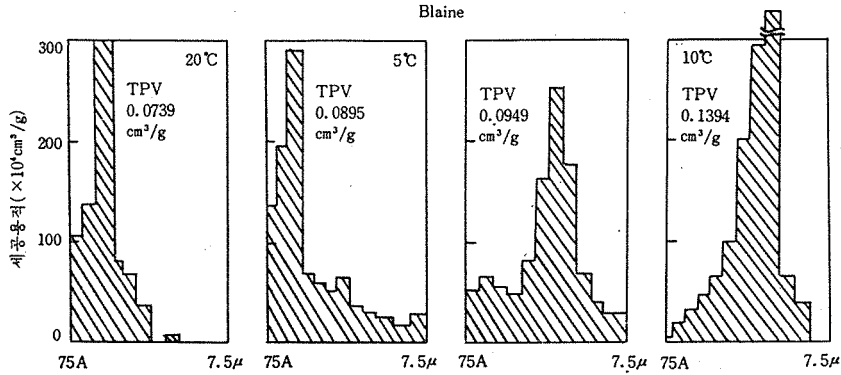


그림 2. 材令 7 일에 있어서의 Cement 경화체의 세공경 분포

그림 2에 시멘트 硬化体の 細孔徑分佈를 나타내었다. Blaine 硬化体の 細孔徑分佈를 양생 온도의 차이로 비교하면 低温이 될수록 細孔徑分佈는 커지고 있다.

시멘트 paste의 強度增進은 주로 그 組成과 粉末度, 水和時의 온도 때로는 混和劑에 의한 영향이 크다. 그러나 最終的인 강도는 완전히 水和되었느냐, 아니냐를 나타내는 수화율과 그 기공율에 의해 결정된다.

천천히 水和하면 水和性成物이 서서히 성장하여 長섬유狀의 C-S-H를 만들어 같은 水和率, 같은 정도의 치밀한 水和物을 갖는 短섬유狀보다 더 강도가 크다는 것이 나타났다. 이들의 空隙이 콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 것을 이용하여 강도를 추정하는 실험식이 제안되었다. 硬化콘크리트에 대하여 물과 시멘트에 대한 容積比를 사용한 Abrams의 식은

$$\log f_c : a - bx \dots\dots\dots (5)$$

여기서 f_c : 콘크리트의 압축강도, x : 콘크리트내의 물과 시멘트의 容積比, a, b : 상수 또한 Gel과 空隙率을 고려한 Power의 식은

$$f_c = f_c' : X^n \dots\dots\dots (6)$$

여기서 f_c' : 시멘트성질에 관한 상수 X : Gel이 차지하는 容積比, n : 상수 완전히 水和된

paste의 X 는 $X = 1 - P_c$ (P_c : 毛細管空隙)로 3이다.

一례로 위식에 대응하는 그림3 처럼 空隙率의 대수치와 강도사이에는 직선관계가 주어진다.

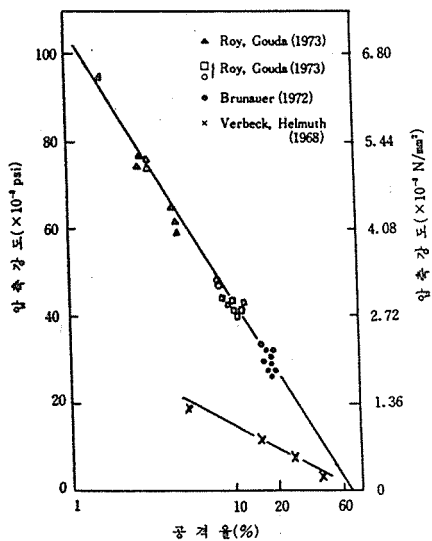


그림 3. Paste의 空隙率 - 압축강도 변화

硬化paste는 건조상태에서는 1次彈性材料로서 작용하지만, 높은 相對濕度下에서는 1차점탄성재료로서 작용한다. 즉 습도는 이 2개의

탄성체간의 不特定位置에 재료를 놓는다. 균열의 생성은 2차적으로 탄성체의 성질을 변하게 한다. 예컨데 압축에 강한 콘크리트라도 曲强度에 대해서는 표면층의 균열때문에 극도로 약해진다는 현상이다. 따라서 paste나 콘크리트의 Young계수는 습도와는 직선관계를 갖지 않고 그림 4와 같이 불규칙하게 변한다.

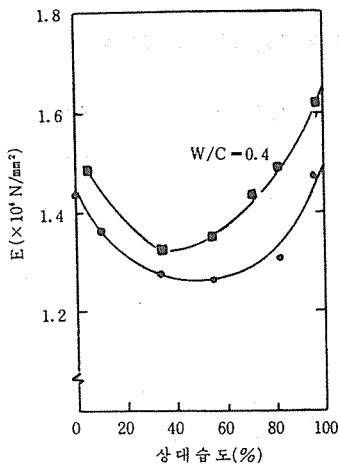


그림 4. 상대습도 증가에 의한 Young 율의 변화

4. 養生中 온도에 의한 水和變化와 强度

콘크리트의 양생온도변화(40~120° F)에 수반하는 初期(1일), 長期(28일)강도의 차를 그림 5에 나타낸다.

그림에서 강도의 차를 나타나게 한 要因은 초기수화율의 差와 長期强度의 差이다. Verbeck은 Calorimeter에 의한 水和率測定에서 常温水和後 2~3시간내에 약 20%가 수화한 시멘트는 105° F(40°C)에서는 2시간후에 약 40~50%가 水和한 것을 확인했다고 한다. 한편 증기양생으로는 거의 50%가 水和되었다고 한다. 이처럼 빠른 水和에 의해 생성한 조직은 수화물의 低溶解性과 低分散性때문에 시멘트입자 표면으로

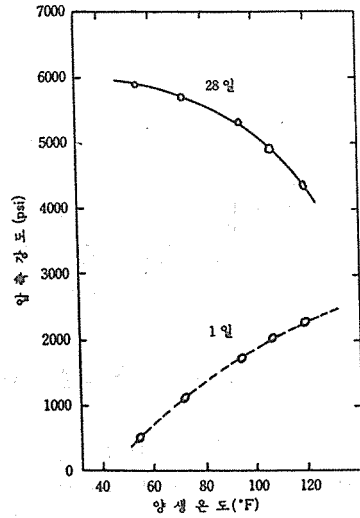


그림 5. 양생온도 상승에 의한 1일, 28일 후의 압축강도 변화

부터 바로 분리 되지 않고 이들이 高濃度의 수화물로 입자를 빨리 포위하여 이후의 수화를 지연시킨다. 이것이 장기강도를 저하시키는 원인으로 된다. 수화율은 이 변화에 대응하여 그림 6처럼 장기수화율은 온도가 상승할 수록 저하한다.

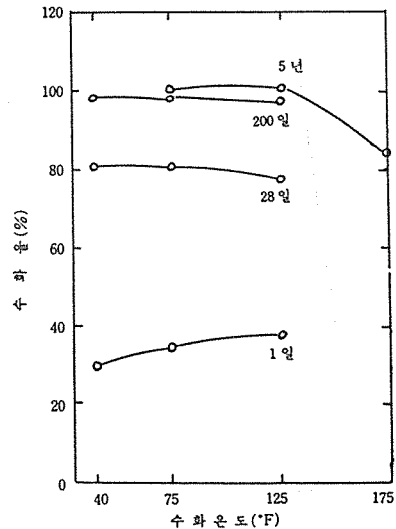


그림 6. 수화 C₃S의 각 材壽에서 온도상승에 의한 수화율 변화

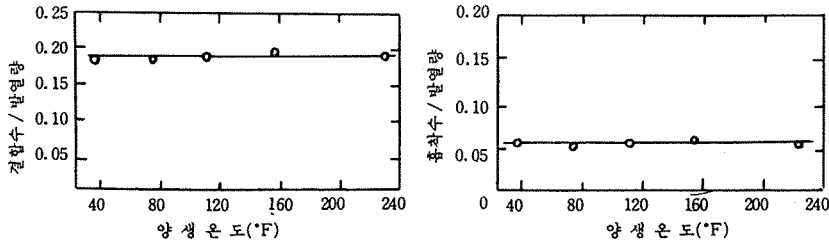


그림 7. 수화생성물의 화학적, 물리적성질의 양생온도에 대한 비의존성

한편 생성한 수화물의 화학적성질이나 물리적성질이 수화온도에 의해 어떻게 변화하는가를 그림 7에 나타낸바와 같이 거의 변화가 없음을 보여주고 있다. 이것은 화학적으로 결합한 수량과 수화과정에서 발열한 발열량의 비를 취하고 양생온도 40~240° F (4~115°C) 사이의 변화를 plot한 것이다. 마찬가지로 물리적성질의 량으로 수화생성물의 표면층에 흡착한 물과 수화과정에서의 발열량의 비를 취하고 이 온도 변화에 의한 차를 plot인 것으로 그림에서 보여주는바와 같이 거의 변화가 없다. 즉 수화온도

가 변화해도 수화생성물 그 자체의 성질의 변화는 없고 오히려 수화과정의 차에 의한 것이라고 볼 수 있다.

Vennat도 高温에서의 수화생성물은 상온생성물과 같다는 것을 보고하고 있다. 그러나 각 생성물의 변화에 대해서 C-S-H Gel의 c/s 비가 커진다는 것, C-S-H는 감소하고 SO₃는 Ettringite에서 Mono-Sulfate로의 전이가 빠르다는 것을 확인 하였다.

Mironov는 장기강도저하를 paste와 콘크리트의 열팽창의 차에 의한 것이라고 그림 8 처럼 나타내었다.

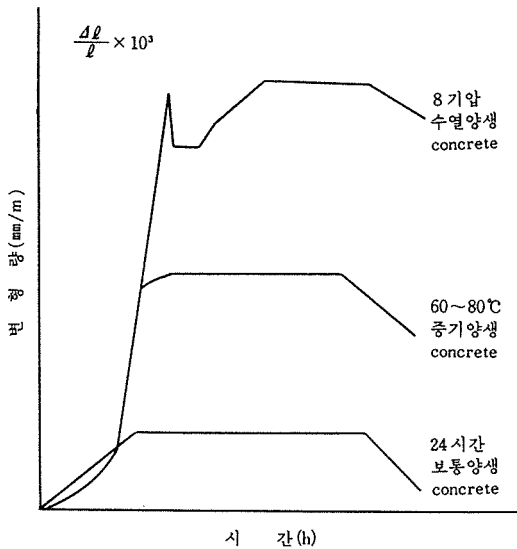


그림 8. 양생방법의 차이에 의한 Concrete의 변형률

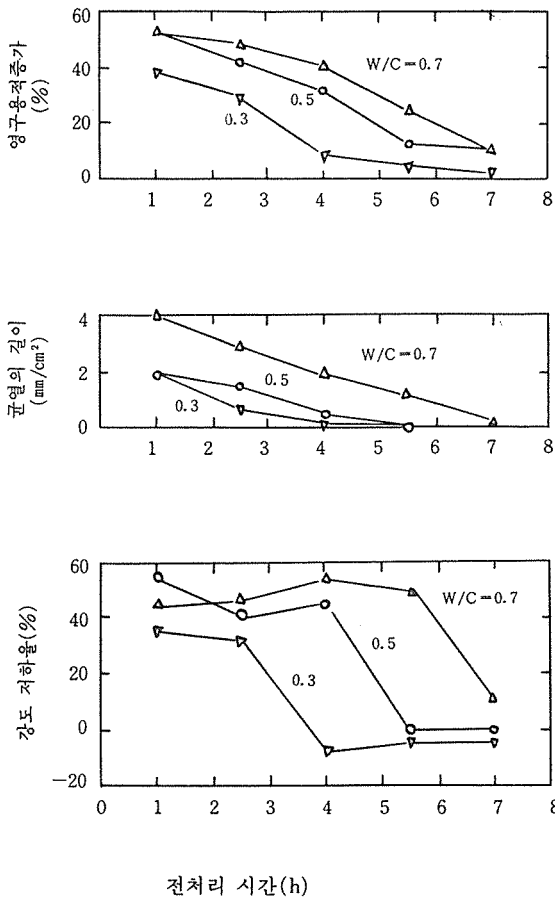
또한 양생온도를 60~80°C 까지徐徐히 올렸을때와 급격하게 올렸을때의 팽창의 차를 조사한 결과 천천히 상승 했을때는 1~1.2mm/mm의 저팽창으로 留保시킬 수 있었다고 한다. Alexander도 이 기계적 강도저하의 이유를 공기와 물의 가열에 의한 팽창에 의한 것이라고 하였고 이것 때문에 空隙을 증가하여 이것이 微細한 균열의 형성이 되고 있다고 한다.

80°C까지의 처리에 의한 실험에서 지연시간 즉 증기양생전의 처리시간을 1~7시간 사이에서 변화시킨 결과를 그림 9에 나타내었다. 이 그림은 지연시간이 긴 편이 콘크리트 容積增加, 균열증가, 강도저하 등이 적고 또한 물-시멘트비가 적은 편이 보다 더 양호하다는 것을 나

타내고 있다.

이러한 결과로부터 콘크리트 증기양생전의 처리 방법을 다음과 같이 제안하고 있다.

- 1) 성형하기 전에 콘크리트를 가열할 것.
- 2) 증기양생전에 시간의 여유를 충분히 가질 것.
- 3) 콘크리트에서 가능한 한 공기를 제거할 것.
- 4) 공기가 들어가지 않는 상태에서 혼련할 것.
- 5) 응결전에 진동에 의해 콘크리트에 발생한 균열을 제거할 것.



전처리 시간(h)
 그림 9. 증기양생을 행하기 전의 전처리시간의 차이에 의한 Concrete의 영구용적증가, 생성균열의 길이 및 강도저하율의 변화

5. 콘크리트의 건조수축

콘크리트는 그 성질상 수경성 재료이므로 건조수축은 당연히 일어난다. 건조수축은 콘크리트가 놓인 환경조건, 즉 온도, 습도, 바람의 세기, 風向, 재료의 배합, 材令, 局部斷面의 형상 및 剛性等에 의한 차가 크다.

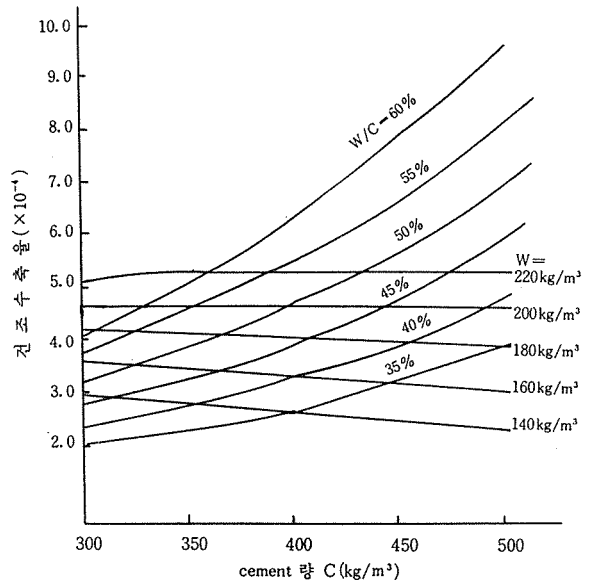


그림 10. 水 Cement비, 단위 Cement 량, 단위수량과 건조 수축율과의 관계 (상대습도 75%, 기온 20°C)

材令 28일을 기준으로 건조수축율과 단위시멘트량 및 단위수량의 관계를 그림10에 나타내었다.

大島에 의하면 균열한계에에서의 건조수축율은 材令 28일을 기준했을때 $4 \times 10^{-4} \sim 4.25 \times 10^{-4}$ 정도라고 한다.

위 그림의 균열한계에 대한 건조수축율과 물-시멘트比, 단위시멘트량 및 단위수량의 관계를 나타낸것이 표1이다.

표 1. 건조수축율 4.00×10^{-4} 과 4.25×10^{-4} 에 해당하는 水 cement비, 단위 cement량 및 단위수량의 한계

W/C (%)	건조수축율 (4.00×10^{-4} , kg/m ³)		건조수축율 (4.25×10^{-4} , kg/m ³)	
	C의 한계	W의 한계	C의 한계	W의 한계
45	≦ 387	≦ 175	≦ 400	≦ 183
50	≦ 350	≦ 175	≦ 365	≦ 183
55	≦ 325	≦ 175	≦ 343	≦ 184
60	≦ 300	≦ 176	≦ 313	≦ 185

표준조합표의 Slump18cm 및 21cm의 練軟 콘크리트에서 물-시멘트比, 단위시멘트량 및 단위수량을 표 2에 나타내었다.

6. 레미콘을 引度할때의 問題点

레미콘은 콘크리트 공사에서 신속성과 편의성으로 인하여 필수적으로 인정되어 레미콘을 생산하는 기업체가 증가하는 추세에 있다. 그런데 생산자와 수요자간에는 기술적 문제점이 제기되고 있는데 일본의 事例를 분석해 보면 畵域에서 집계한 문제점이 704件인데 畵쳐을 크게 분류하면 그림11과 같다.

1) 사용재료에 관한 것, 70件(9.9%)

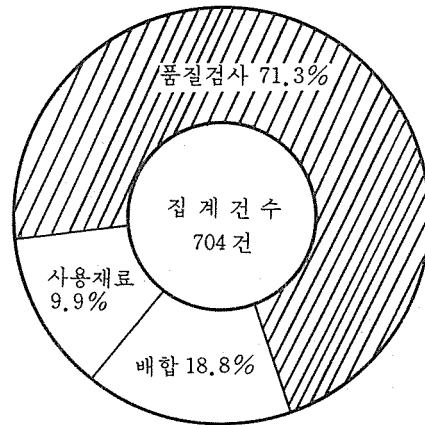


그림 11. 집계건수의 대분류비율

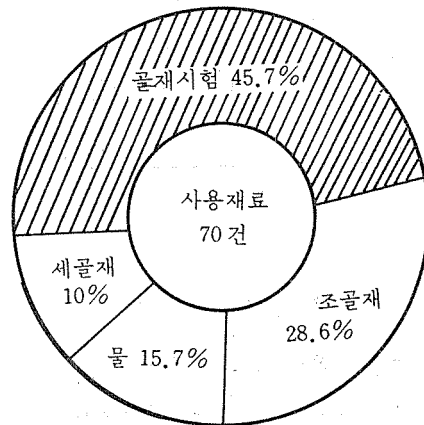


그림 12. 사용재료에 대한 건수 비율

표 2. Slump 18cm와 21cm의 水 cement비, 단위 cement량 및 단위 수량의 관계

W/C (%)	조골재의 최대치수 (mm)	Slump 18cm				Slump 21cm			
		C (kg/m ³)	C의 適·不適	W (kg/m ³)	W의 適·不適	C (kg/m ³)	C의 適·不適	W (kg/m ³)	W의 適·不適
45	20	451	×	203	×	487	×	219	×
	25	442	×	199	×	478	×	215	×
50	20	394	×	197	×	426	×	213	×
	25	388	×	194	×	418	×	209	×
55	20	355	×	195	×	382	×	210	×
	25	347	×	191	×	375	×	206	×
60	20	322	×	193	×	348	×	209	×
	25	315	×	189	×	340	×	204	×

2) 材料의 配合에 관한 것, 132件(18.8%)

3) 품질검사에 관한 것, 502件(71.3%)

또한 사용재료에 의한 문제점은 그림12와 같다.

이들 문제점의 발생이유를 살펴 보면

- 1) 생산자와 수요자 사이의 문제점에 대한 대화가 부족
- 2) 受注時의 기술문제에 대한 협의가 불충분
- 3) 콘크리트 공사의 사양서가 구태의연하여 기술적인 모순이 殘留
- 4) 상품으로서의 레미콘과 시공 품질면에서의 콘크리트의 품질과 混同

7. 結 論

콘크리트의 微構造와 強度에 대해서 고찰하였지만 복잡한 시멘트 paste의 수화과정의 상호작용을 콘크리트의 강도변화에 직접 연결시킨다는 매우 어려운 일이라 思料된다. 콘크리트의 경우 물-시멘트의 比, 시멘트-骨材의 比, 시멘트의 水和, 양생온도, 압력 및 混和劑等에 의해 크게 변화하기 때문에 解明上 곤란한 點

이 수반된다. 따라서 高強度의 콘크리트를 위해서 今後 微構造의 檢討가 絶실히 要望된다.

이상은 筆者가 平素에 생각하고 있는 一部를 기술하였으나 淺薄한 知識이므로 충분히 見解를 피력하지 못한 點에 대하여 反省하는바 이다. *

참고문헌

- 1) S, Seki, 5th. Intern. Symp. Chem. Cement. 3, 175 (1968)
- 2) K. Suzuki, Cem. Concr. Res. 11, 759 (1981)
- 3) J.F. Young, 7th. Intern. Symp. Chem. Cement, 1, 1~3 (1980)
- 4) H. S. Tong, J. Am. Ceram. Sac, 62, 161 (1979)
- 5) J.F. Young, Cem, Concr. Res. 7, 627 (1977)
- 6) K. Kodama, ibid, [453], 10, (1985)
- 7) Committee on Ready-Mixed Concrete, ibid, [431]13, (1983)
- 8) H. Ooshima, ibid, [452] 36 (1984)