

콘크리트의 化學的인 考察

韓 基 成

〈仁荷大 工大 無機材料工學科 教授〉

1. 緒 論

얼마전에 서울江南地區의 新築아파트 建設現場을 돌아 본 일이 있다. 레미콘으로 施工중인 슬라브에 龜裂이 많이 간다는 것이다. 施工者側에서는 레미콘 즉 시멘트가 나쁘다는 것이고 레미콘 供給者側에서는 施工作業이 不實하다는 것이다. 슬라브에 龜裂이 가는 原因을 명쾌하게 진단하여 구명해달라는 것이다. 콘크리트의 龜裂現象은 그 原因이 하나 하나 예를 들 수 없을만큼 많아서 쉽게 判定될 수 있는 問題가 아니다. 콘크리트의 主材料가 되는 시멘트, 骨材, 混和劑, 물에 대한 異常有無가 檢討되어야 할것이고 施工에 있어서의 打設時間, 速度, 安定된 作業性 與否, 養生 등의 問題와 環境條件의 變化 등도 함께 檢討되어야 하기 때문이다.

現在 우리나라의 시멘트生産能力은 3千万吨을 초과 하였고 1985年度 시멘트生産量은 2千 58万 8千吨에 달하고 있다. 生産된 시멘트중 약 3百万吨을 輸出한 나머지는 전부 國內에서 콘크리트로 消費하고 있는 것이다.

콘크리트는 土木, 建築 기타 여러가지 構築物에 利用되어 國土建設의 基盤을 이루는 대단히 重要的 材料이다. 콘크리트의 壽命은 一律

的으로 말하기 어렵고 數十年 아니 數百年을 지탱할 수 있는 長久한 것이어서 그 壽命을 最大限度로 발휘할 수 있도록 施工者나 需要者가 다 같이 留意해야 할 것이다.

여기서는 콘크리트가 가지는 屬性을 化學的인 面에서 考察해 봄으로써 좀더 좋은 콘크리트를 製造하고 施工하여 우리의 後世들에게 좋은 構築物을 遺産으로 남겨주고 싶기 때문인것이다.

2. 시멘트의水和反應과 水和生成物

시멘트의 水硬性은 시멘트가 가지는 가장 基本的인 特性으로서 단지 물과 섞어 混練하는것만으로 놀랄만한 強度와 耐久性을 나타내게 된다. 시멘트페이스트(Cement paste)의 初期水和反應期에는 어느 정도의 流動性을 가지고 있어 운반이나 施工에 필요한 時間的 여유가 있으나 水和가 진행됨에 따라 水分이 차츰 吸收되고 粘性이 커지며 凝結過程을 거쳐 차츰 硬化段階에 들어가고 數年에 걸쳐 強度를 增進하게 된다.

시멘트를 構成하는 클린커 鑛物은 alite (C_3S), belite ($\beta-C_2S$), Ca-aluminate (C_3A), Ca-ferrite

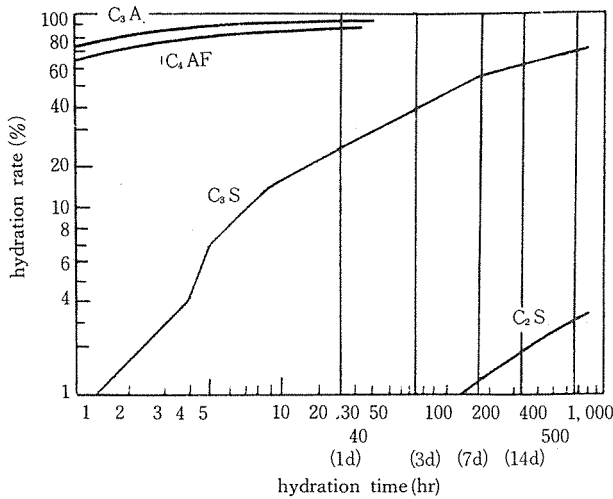
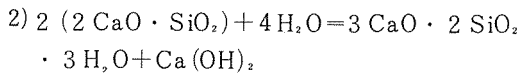
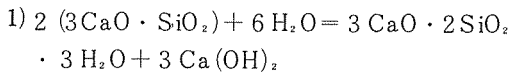


그림 1. 시멘트 클린커 礬物의 水和速度

(C₄AF) 등의 主 礬物과 遊離石灰 (free CaO), MgO, alkali成分 (Na₂O, K₂O) 및 石膏 (CaSO₄ · 2H₂O) 등이 少量 含有되어 있다.

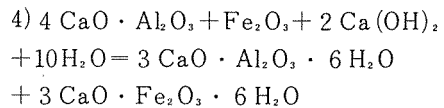
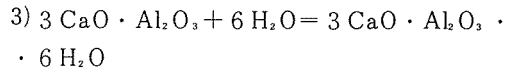
이들 클린커 礬物은 서로 다른 水和速度를 가지며 또한 水和生成物도 結晶狀態 및 工學的인 物性에 차이를 나타낸다. 그들의 水和時間에 따른 水和率을 그림-1에 표시 하였다. 이 그림에서 보면 水和가 가장 빠른것은 C₃A와 C₄AF 이고 이들은 물을 가한 후 1時間에서 이미 70%의 水和가 끝난 것을 알 수 있으며 이들을 그대로 제멋대로 水和를 시키면 施工上 問題가 있으므로 적당량의 石膏를 가하여 水和를 지연시키고 있다.

각 클린커 礬物의 水和反應關係를 化學式으로 表示하면 다음과 같다.

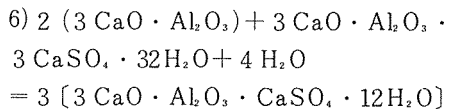
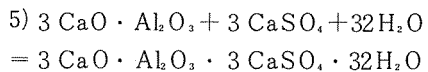


1), 2)에서 보는바와 같이 C₃S와 C₂S는 포틀랜드시멘트중 80% 이상을 포함하는 것으로 이들의 水和反應과 水和生成物은 시멘트硬化體의 性狀을 결정하는 중요한 것이다. 水和生成物인 Calcium silicate hydrates (C-S-H)는 gel 狀態의 微細한 層狀을 이루는 結晶物質로서 시멘

트의 強度를 나타내게 하는 主役割을 한다. 水和物에 生成되는 Ca(OH)₂는 필연적으로 生成되어 시멘트의 水密性을 阻害시키기도 한다.



3), 4)의 Ca-aluminate와 Ca-ferrite 礬物의 水和는 不安定하고 複雜한 中間反應過程을 거쳐 最終적으로 安定한 水和生成物이 되며 앞에서 본바와 같이 水和速度가 상당히 빠르다. 水和遲延劑로서 소량의 石膏를 加할 때에는



와 같은 水和反應을 하여 5)式에서는 ettringite가 生成되고 6)式에서는 이것이 다시 다른 C₃A와 反應하여 monosulphate로 된다. 즉 ettringite의 生成反應은 빠르고 많은 發熱을 하며 약간의 膨脹性을 갖는다. 그것은 곧 周圍의 다른 C₃A와 反應하여 安定形의 monosulphate로 된다.

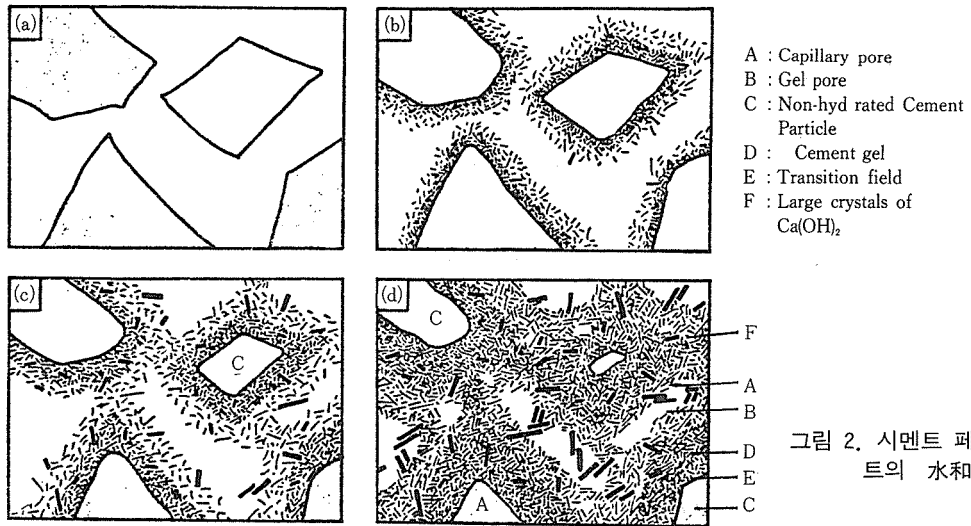


그림 2. 시멘트 페이스트의 수화과정

위의 반응식에서와 같이 시멘트 鑛物의 각 鑛物成分은 각각 다른 反應過程과 反應生成物을 가지나 시멘트의 수화시에 이들은 함께 混在된 狀態에서 자기나름대로의 時間帶를 가지고 수화反應을 하게 된다.

이들의 反應關係를 시멘트페이스트의 모델로서 그림-2로 표시 설명해 보기로 한다.

(a)는 混水直後의 狀況으로 시멘트 粒子는 완전히 水中에 懸濁되어 있고 서로 떨어져 있으므로 重力에 의하여 沈降하고 어느 時間後에는 물의 一部를 遊離하여 bleeding 現象을 나타내며 下部에 定着層이 생겨 密度가 커진다.

(b) 수화가 진행됨에 따라서 시멘트 粒子와 gel 狀態의 수화物 粒子(시멘트 gel)가 어느 정도 近接 엉기게 되지만 아직도 서로 떨어져 있는 狀態이다.

(c) 수화가 進行됨에 따라서 시멘트 gel이 空隙를 메우고 차츰 密實化하여 서로 접촉하게 되며 引力이 커져 粘性이 증가하고 凝結이 시작되는 狀態로 된다.

(d) paste가 硬化期에 들어갔을 때의 모양으로 시멘트 gel, 작아진 未수화 시멘트 粒子, 毛細管 空隙, gel 空隙 등으로 되어 있다.

이와같이 시멘트의 수화反應은 시멘트가 물

과 접촉함과 동시에 여러가지 反應이 복합적으로 일어나 長期間에 걸쳐 계속된다.

3. 시멘트의 수화速度에 미치는 影響

a) 粉末度

포틀랜드시멘트의 粉末度는 硬化速度에 현저한 影響을 미치게 된다. 比表面積이 클수록 물과의 接觸面積이 커지므로 수화速度가 빨라져 특히 短期強度가 증가한다. 콘크리트나 몰탈에서 미세한 시멘트는 骨材와 均일하게 混雜되고 骨材間의 結合을 強固하게 하기 때문에 強度는 增大한다. 그러나 시멘트를 너무 微細하게 粉碎하면 물과 接觸하자마자 aluminat가 빠른 反應을 하여 石膏가 短時間內에 消耗되고 mono-sulphate로의 反應도 빠르며 monosulphate로와 C-A-H gel이 alite 粒子를 둘러싸게 되고 수화를 妨害한다. 이런때는 石膏의 量을 늘려주어야 한다. 또한 시멘트의 粉末度가 微細할수록 單位水量을 많게해야 되고 따라서 硬化體의 收縮도 커지는 등의 副作用이 따르므로 바람직하지 못하다.

b) 溫 度

콘크리트의 硬化速度와 溫度와의 關係는 실지 建設에 있어서 가장 중요한 意義를 갖는다. 溫度가 높으면 硬化는 촉진되고 낮으면 遲延된다. 〈그림-3〉은 傳導熱量計로서 포틀랜드 시멘트페이스트의 初期段階에서 水和發熱 速度의 溫度에 따른 影響을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 發熱피크는 C₃S의 水和發熱에 의한 것이며 溫度가 높아질 수록 C₃S의 水和는 促進되고 있음을 알 수 있다. 즉 溫度가 너무 높으면 誘導期가 짧아지고 溫度가 너무 낮으면 凝結, 硬化가 늦어져 어느 경우나 工事に 支障을 초래하게 된다.

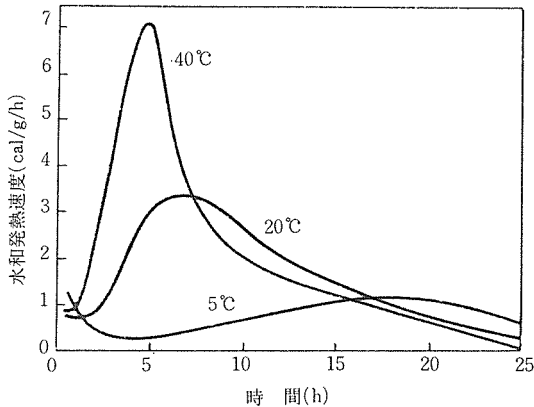


그림 3. 포틀랜드시멘트의 水和發熱曲線 (溫度에 따른)

콘크리트가 30°C 이상의 溫度로 되면 施工上 필요한 時間 보다도 빨리 凝結을 시작한다. 따라서 겨울철에 骨材와 물을 加熱하여 높은 溫度의 콘크리트를 얻고자 할 때에는 콘크리트의 最高溫度가 30°C가 넘지 않도록 하여야 한다. 또 물만을 高溫으로 하는 특별한 경우에는 우선 물과 骨材와를 混合하여 찬 骨材와 더운 물이 溫度가 均一하도록 한 뒤에 시멘트를 加함으로써 시멘트의 急硬性을 피하도록 해야한다.

다음 〈그림-4〉는 여러가지 種類의 포틀랜드시멘트가 養生溫度에 따라서 그 水和가 어떻

게 달라지는가를 보여주고 있다. 高溫에서의 水和生成物은 일반적으로 結晶이 크게 됨으로 이온의 移動이 容易하고 점점 더 反應이 빨라진다. 따라서 初期強度가 나타나지만 生成物의 硬함이 弱하여 最終強度는 적어진다. 한편 低溫에서 養生할 경우 生成物은 일반적으로 작고 천천히 成長하여 치밀한 形態로 되어 反應이 촉진되기 어렵고 反應速度가 적으므로 初期強度는 약해진다. 그러나 천천히 成長한 結晶은 纖維狀 生成物로 되고 서로 엉기게 됨으로써 最終強度가 크게 된다.

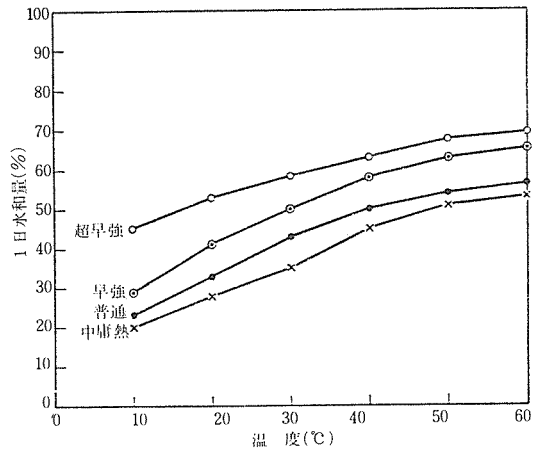


그림 4. 여러가지 시멘트의 養生溫度와 水和와의 關係

溫度에 의한 反應關係를 보면 시멘트의 主成分인 Ca와 Si의 溶解度가 溫度에 따라 다르기 때문이다. Ca의 溶解度는 高溫이 될 수록 低下하며 그 정도는 느리고 급격하지 않다. 한편 Si의 溶解度는 常溫에서는 아주 적고 그때문에 시멘트의 水和物이 작은 結晶으로 되어 시멘트로서의 特性을 나타내지만 溫度의 상승과 더불어 溶解度가 급격히 增大하고 그에 따라 生成物의 決晶도 크게되어 反應이 加速的으로 커지는 것이다.

c) 濕 度

모르탈이나 콘크리트를 打設한 직후의 養生條件이 重要な 것은 말할 필요도 없다. 시멘트

트가 骨材와 結合하여 차츰 硬化되어 갈 때 根本적으로 濕潤養生이 重要하다는 사실이 輕視되고 있는 현실이 참으로 유감스러운 일이다. 일반적으로 콘크리트가 凝結하여 硬化하는 것을 乾燥된다고 하지만 사실은 乾燥란 硬化의 끝남을 뜻하는 것이다. 물로 채워진 毛細管 안에서만 시멘트gel이 生成된다. 毛細管水 대신에 空氣가 들어가면 gel의 生成은 停止하고, 蒸發된 물이 다시 補充될 때 gel의 生成이 시작되어 水和反應이 進行된다.

新鮮한 콘크리트가 보호되지 않고 乾燥되는 危險性에 대해서 일반적으로 심각하게 생각하지 않고 있는 것 같다. 打設 직후의 新鮮한 콘크리트는 硬化한 것보다 쉽게 水分을 放出하게 된다. 따라서 新鮮한 콘크리트의 濕潤養生은 각별히 重要하다. 初期의 乾燥는 化學的인 水和反應을 위한 水分을 감소시킨다는 것보다도 水分이 乾燥됨으로써 毛細管을 縮小시키는 쪽의 관계가 더욱 크다. 新鮮한 콘크리트의 凝結 및 硬化의 速度는 그 水分의 乾燥速度에 민감하게 영향을 받는다. 또한 空氣중의 濕度和 風速이

乾燥速度에 중대한 영향을 미치는 것은 두말할 여지도 없다.

硬化体の 乾燥는 필연적으로 收縮現象^{h)}을 초래하고 이것이 콘크리트 硬化체에 균열을 남게 하는 가장 큰 원인이 되고 있다.

이러한 乾燥收縮에 의한 龜裂現象을 방지하기 위해서는 현장의 조건에 적합한 養生方法을 사용함으로써 水分의 蒸發을 가능한 한 저하는 것이 필요하다. 蒸發을 방지하는 방법으로서는 콘크리트를 젖은 材料나 通氣性이 없는 시이트(폴리에틸렌 시이트등)로 덮든가 膜을 형성하는 液体를 撒布하는 것이 좋다.

d) 물-시멘트비(W/C)

硬化한 시멘트케이스트의 氣孔性(porosity)은 濕練水量에 따라 결정되며 이것을 일반적으로 물-시멘트비(W/C)라 하고 이것이 증가하면 強度는 떨어진다. 이 원칙은 콘크리트 工學에서 基礎的인 사실이다.

〈그림-5〉는 물-시멘트비를 여러가지로 달리 하였을 때의 콘크리트 硬化체의 強度를 표시한 것이다.

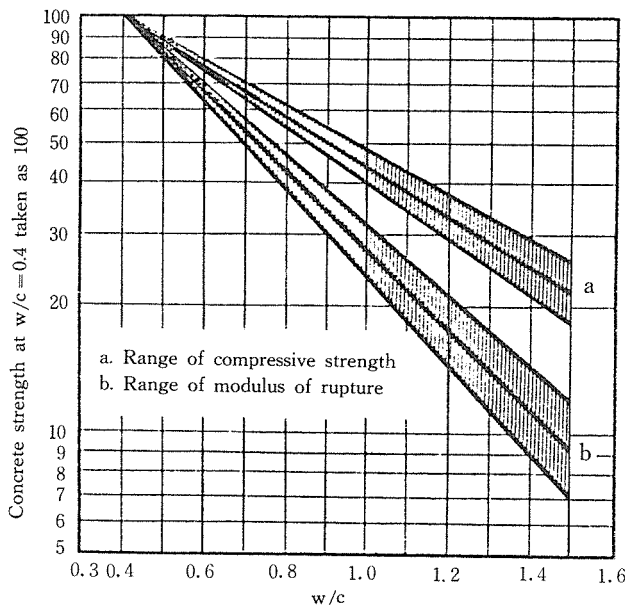


그림 5. 물-시멘트비(W/C)와 強度와의 관계

이 關係는 對數的인 函數를 이루고 있다. 強度와 물-시멘트比를 세미log의 座標軸系에 作圖하면 그 關係는 直線이 된다. 實驗值으로 부터 작성한 이 直線에 의해서 임의의 콘크리트 配合物의 強度를 예측하든가 또는 어느 정해진 強度 범위에 대한 콘크리트 配合를 계산해낼 수도 있다.

이와같이 물-시멘트比는 콘크리트의 強度 또는 시멘트페이스트의 氣孔性에 큰 영향을 미치게 되며 시멘트 硬化體에 관한 概念을 개략적으로 기술해 보면 다음과 같다.

① 시멘트가 물과 접촉한 직후것은 시멘트 粒子的 堆積狀態를 형성하고 그 空隙는 서로 연락되어 물로 채워져 있다. 이와 같은 分布狀態에 있는 물을 毛細管水라고 한다.

② 포틀랜드시멘트는 완전히 水和할 때까지 그 重量의 1/4의 물과 化學적으로 결합한다.

③ 化學的結合에 따라 물은 그 容積의 약 1/4을 잃게 된다.

④ 포틀랜드시멘트는 化學的인 結合水외에 그 重量의 15%를 gel水로서 아주 느슨한 狀態로 결합한다. 이 gel水는 많이 乾燥한 空氣중 또는 105°C의 乾燥器중에서는 전부 蒸發해 버린다. 이 느슨한 結合을 하고 있는 gel水는 아직 水和하지 않은 시멘트와는 반응하지 않는다.

⑤ 시멘트와 물과의 반응으로 생긴 生成物은 주로 같은 성질을 가지고 견고하게 附着된 물질인 시멘트gel로서 되어있다. gel水가 乾燥蒸發한 후의 시멘트gel은 그 容積의 1/4에 달하는 微細하게 분포된 空隙, "gel空隙"을 함유하게 된다.

f) 시멘트硬化體의 全氣孔率(毛細管空隙와 gel空隙)은 시멘트硬化體의 強度를 결정한다.

bleeding은 물-시멘트 比가 비교적 큰 편이거나 시멘트粒子가 아주 미세하지 않을 때 또는 貧配合일 경우에 일어나기 쉽다. bleeding이란 시멘트가 凝結하기 전에 무거운 시멘트 粒子가 沈降하고 물만이 分離되어 뜨는 현상으로 바람직하지 못한 것이다. 콘크리트 内部의 不均一

性을 초래하든가 鐵筋의 下部가 bleeding 으로 沈下되어 시멘트와의 附着을 방해하는 일들이 있어 주의를 요한다.

4. 시멘트와 骨材와의 反應

콘크리트材料로서 骨材가 차지하는 量은 약 70%~80%에 달하며 그만큼 骨材의 중요성은 절대적인 것이다.

콘크리트가 耐火性을 잃는 원인중의 하나로 시멘트와 骨材의 反應을 들 수 있다. 骨材構成物의 종류에 따라서 시멘트成分과 化學反應하여 異常膨脹을 일으켜 콘크리트를 破壞시키는 경우도 있다.

시멘트의 水和初期에는 가해진 물이 알칼리, 黃酸칼슘($CaSO_4$) 또는 水酸化칼슘($Ca(OH)_2$)의 溶液으로 되어 있고 그 OH이온의 濃度は $Ca(OH)_2$ 의 飽和溶液濃度보다 크다. 이 OH이온의 濃度は 시멘트의 알칼리(Na_2O+K_2O)量이 많을 수록 높다. OH이온이 骨材의 特定成分과 反應하여 膨脹反應을 일으킨다.

그중에서 알칼리骨材反應은 우리가 특히 관심을 가져야 할 問題이며 骨材岩石중의 실리카成分이 시멘트중의 알칼리成分과 반응하여 膨脹性的 生成物을 생기게 함으로써 콘크리트 内部에 국부적으로 膨脹을 일으키고 이 膨脹에 의하여 콘크리트에 龜裂이 발생하고 強度가 떨어지는 것을 말한다.

우리나라에서는 骨材反應性에 관한 研究가 별로 없고 알칼리骨材反應에 입각한 폭넓은 骨材 調査가 이루어지고 있지 않은것은 유감이다. 물론 알칼리骨材反應性事故가 발생하고 있지 않기 때문이라고는 하지만 언제까지나 마음놓고 태연하게 지내서는 안될 것으로 생각한다.

콘크리트중에서의 骨材의 역할은 값이싸고 安定性있는 增量材로서이며 그 品質이 대단히 중요하다. 骨材의 성질로서는 먼지, 점도분, 有機物 등을 포함하지 않고, 비중이 크고, 耐磨耗性이며 吸水性이 적고, 가능한 한 球狀이고, 粒

度分布가 좋고, 監分이 적은 것이 바람직 하다.

5. 結 論

이상에서 콘크리트에 관계되는 시멘트의 水和反應, 水和反應速度에 미치는 여러가지 因子들 및 骨材와의 반응에 대하여 化學的인 面에서 알기쉽게 考察하여 시멘트化學을 전공으로 하지 않는 一線 土木·建築에서 콘크리트를 담당하는 이들에게 조금이라도 참고가 되었으면 하는 것들을 다루어 보았다.

여기서 우리가 根本的으로 생각해야 될 것은 좋은 콘크리트란 결코 시멘트나 骨材, 混和材등과 같은 材料만이 좋아야 되는 것도 아니고 配合設計나 레미콘配合이 잘 배야 되는 것만도 아니다. 제일 중요한 것은 콘크리트를 施工하는 사람들, 施工을 감독하는 사람들의 精神姿勢가

아닐까.

콘크리트란 살아있는 物體와 같이 時間과 더불어 반응이 연속적으로 진행되고 적당한 條件下에서만 제 機能을 발휘하게 된다. 업계의 過當競爭으로부터 工事費의 덤핑 受注, 이에 따른 工事費의 절감, 工期의 단축, 短時日內的 超過達成을 위한 工事의 拙速과 不實 등이 뒤따르지 않을런지 우려가 되지 않을 수 없다. 近視眼的인 이런 모든 과오가 後世들에게 물려 줄 귀중한 遺産을 不實하게 한다는 것은 심히 가슴 아픈 일이 아닐 수 없다.

지난번 江南地區에서 돌아 보았던 龜裂이 간슬라브, 그대로 몰탈 마무리가 되어 눈가림이 되겠지만 이대로 좋은 것인지 콘크리트에 관계하는 우리들 다같이 戬우치고 깨닫고 하루속히 是正해 나가야 하리라 본다. *

'86 品質管理賞 申請案内

政府에서는 「'86 全國工場새마을 品質管理·標準化大會」에서 褒賞할 品質管理 優秀業체를 選拔코자 하고 있으니 다음 要領에 의거 申請바랍니다.

— 다 음 —

1. 申請期限: '86. 9. 10 까지
2. 申請方法
各市·道 品質管理 推進本部를 經由하여 工業振興廳(品質管理課)에 申請
3. 提出書類
 - 申請公文
 - 品質管理 現況說明書 25部(4×6倍版)
 - 品質管理 現況說明書 要約 2部(16절지 10枚 이내)
4. 審査計劃
 - 時 期: '86. 9~10月
 - 審査區分: 大企業과 中小企業을 區分하여 審査基準을 달리 適用
 - 審査方法: 書類審査, 理地審査, 品質管理賞 褒賞審査委員會의 審議
5. 褒賞內容(褒賞數는 制限없음)
 - 品質管理賞 大賞 • 品質管理賞 優秀賞 • 品質管理賞 獎勵賞