

日本の 시멘트研究 概觀

李 承 燦(譯)

〈韓國洋灰工業協會 技術課 代理〉

1. 시멘트 技術開發의 中樞

시멘트의 대부분을 차지하고 있는 普通시멘트는 大量으로 生産, 流通되기 때문에 각각의 性能에 대해서는 다소 차이가 있을 수도 있으나 이 보다는 각종 混和劑 또는 混和材를 사용함으로써 特殊시멘트의 特性이 나타나게 된다.

日本에서 시멘트가 登場하기 시작할 무렵인 1891~1896년경 계속되던 工事不實로 인해 耐海水性에 대한 집중적인 研究 끝에 시멘트 중에 알칼리를 抑制하고 실리카를 增加시켜야 한다는 論議가 1904년 日本포틀랜드시멘트業 技術會 第4회 例會에서 提唱되었다.¹⁾ 그 結果 시멘트 原料로서 軟硅石을 混用하게 되었으며 현재까지의 日本 시멘트는 대체로 低알칼리·高실리카型으로 나타나고 있다. 이것은 乾燥收縮이나 長期強度에 있어서도 바람직한 것이다.

그 이후 2次大戰前까지의 위 技術會가 戰後에는 日本 시멘트 技術協會로 改編된 후 이를 다시 吸收한 시멘트協會가 새로 發足하여 一貫된 技術活動을 展開함으로써 日本은 시멘트技術의 向上과 더불어 新技術開發의 中樞的인 역할을 맡게 되었다. 이를테면 物理·化學의 각종 試驗方法에 있어서 JIS 項目에 대해서는 물론 그 時點에 필요한 其他項目에 대해서도 「시멘트協會 標準試驗方法」이 確立되어 있다는 점 등이다. 試驗方法의 確立이 研究開發에서 빼 놓을 수 없는

分野가 된다는 것은 두말할 나위도 없다.

또한 시멘트協會에서는 콘크리트에 관한 각종 테에 마에 대해서도 調査·研究하고 있다. 例로서 콘크리트의 龜裂, 耐久性, 鋪裝用 콘크리트, 高強度 콘크리트, 纖維補強 콘크리트 등의 시멘트 用途面에서 또는 粉碎나 燃料 등의 製造面에서 각각 專門委員會가 構成되어 있어 그 結果가 刊行되고 있다. 그리고 오래전부터 시멘트技術大會를 開催하여 대규모의 發表를 통해 研究開發을 支援함에 있어서 큰 役割을 맡고 있다.

2. 포틀랜드시멘트業 技術會 例會

시멘트技術大會는 1947년에 第1회가 開催되었으나 始初는 그 以前의 「日本 포틀랜드시멘트業 技術會」이다. 즉 每年 開催된 例會에서는 2~3篇의 研究發表에 불과하였으나 1925년 이후 政府機關, 시멘트設備 製造業者 또는 大學 教授도 來賓으로서 참가함에 따라 戰前 最後인 1941년에는 發表 26件, 參加者 290名에 달하였으며 오늘날의 시멘트技術大會의 原形을 이루게 된 것이다. 當時 發表된 主要 테에마는 다음과 같다.

- ① 시멘트의 2重 凝結에 대하여(1927)
- ② 小型 軟練 물탈에 의한 시멘트 試驗方法 (1930)
- ③ 시멘트 回轉爐의 熱經濟에 관한 研究(1934)
- ④ 水平荷重을 받는 有壁라멘의 研究(1934)

- ⑤ 시멘트粉末의 表面積에 대하여(1936)
- ⑥ 포틀랜드시멘트의 鑛物組成에 관한 研究 (1938)
- ⑦ 세리트(Celite)에 關한 研究(1939)
- ⑧ 鋼絃콘크리트(PRC)에 대하여(1939)
- ⑨ 最高強度 콘크리트의 製造에 대하여(1941)

3. 2次大戰 이후 現在까지

1) 시멘트 製造技術

日本の 시멘트 製造技術을 현저하게 發展시키게 한 것은 역시 NSP 키른의 開發이라고 할 수 있다. 이의 普及으로 인해 品質의 均一化, 原價 節減 또한 大氣汚染防止에 기여한 것은 잘 알려진 사실이다. 同時에 X線分析, 컴퓨터制御, 롤러밀, 新型 세퍼레이터 등 많은 開發도 함께 이루어졌으며 또한 크링카 및 그 化合物에 대해서 研究한 結果도 製造現場에 직접 適用되었다.

2) 매스콘(Mass concrete)用 시멘트

2次大戰 이후 大型 댐 건설붐이 일기 시작하여 1950년 이후 댐용 시멘트에 대한 활발한 研究가 있었다. 要求되는 低水和熱과 強度를 어떻게 調和시킬 것인가 또한 어떻게 하면 均質한 品質로 供給할 수 있겠는가 등 當時로서는 댐용 品質規格이 없었기 때문에 각 메이커들은 그 對應策에 腐心하였다. 그와 동시에 道路用 시멘트의 研究도 進行되었으며 이후 댐 이외에도 매스콘용 시멘트의 需要가 더욱 늘어남에 따라 1980년부터 「低發熱 高強度型의 시멘트」 研究가 활발히 展開되고 있다. 이는 中庸熱 포틀랜드시멘트 單味 외에 슬래그나 플라이애쉬를 混合 사용함으로써 要求에 對處할 수가 있는데 이 分野의 研究는 需要者의 期待에 應하기 위해 계속하고 있다.

3) 高性能 減水劑

1949년 日本에 AE(空氣連行) 콘크리트가 導入된 이래 減水劑가 널리 사용됨에 따라 1964년에는 이속고 高性能 減水劑가 開發된 바 그의 實用性은 우선 콘크리트파일의 高性能化를 이끌었고 高強度 콘크리트를 널리 普及할 수 있게

되었다. 단지 高性能 減水劑의 사용으로 인한 슬럼프 損失은 아직 충분히 해결되지 않은 상태에 있지만 超高層의 市街地 再開發을 위해서는 더욱 良好한 品質이 要求된다. 그러나 어쨌든 壓縮強度 $1t/cm^2$ 이상의 레미콘이 普及됨으로써 建設事情은 매우 큰 變化를 가져온 것으로 評價된다.

4) 시멘트의 多樣化

1965년 이후에는 超早強시멘트, 膨脹시멘트 超速硬시멘트, 1975년 이후에는 油井시멘트, 熱水井시멘트, 耐黃酸鹽시멘트 등의 새로운 시멘트가 出現하였다. 이같은 시멘트의 多樣化는 지금까지도 계속되어 각종 地盤改良用시멘트, 셸프 레벨링 床用시멘트, GRC用시멘트, 硫黃콘크리트 등 각각의 特殊目的을 위한 시멘트가 開發되고 있다.

例로서 日本 關西新空港 建設을 위해 海低地盤改良用 遲延性 시멘트의 開發이 進行되고 있으며 또한 新工法으로서 기대되는 롤러 轉壓(Roller compacted) 콘크리트 鋪裝道路 建設에 대해서도 最適의 시멘트開發이 進行되고 있다.

5) 高強度 콘크리트

高性能 減水劑는 콘크리트의 高強度化를 可能케 한다. 즉 오토클레이브 養生 및 調合으로서 콘크리트 製品으로서의 壓縮強度 $1,000 kgf/cm^2$ 까지 實用化되고 있는 것이다. 그러나 더 나아가 高性能 減水劑와 無機質 混和材를 併用함으로써 시멘트 페이스트의 組織을 더욱 緻密化하여 超高強度화 시킨 콘크리트가 開發되고 있다.

그 一例로서 石膏系의 混和材가 있는데 이를 시멘트에 대해 10% 정도, 高性能 減水劑 1% 정도를 混合한 후 常壓蒸氣養生한 결과 $1,000 kgf/cm^2$ 이상의 壓縮強度가 얻어진 바 있다.²⁾ 즉 오토클레이브를 利用한 高強度 콘크리트 製品이 널리 사용되고 있는 것이다.

플라이애쉬 또는 실리카퓌과 高性能 減水劑의 併用은 高強度 콘크리트를 跳躍의으로 發展시켰다. 그 最大의 것은 노르웨이 海上 油井 플랫폼 포움으로써 이미 13基는 建設되었으나 그 設

CONDEEP SP, GULLFAKS C

Platform 用 콘크리트 (1986)³⁾

<表-1>

시멘트(SP30-4 A modified)	430 kg
실리카폼	20 kg
모래(0~5 mm)	920 kg
粗骨材(5~20 mm)	860 kg
물(W/C)	165ℓ(0.38)
混和劑 Betokem PA(B) (멜라민系)	6 ℓ
슬럼프	240 mm
28日 強度平均 (標準偏差)	850 kgf/cm ² (40~50 kgf/cm ²)

高強度 콘크리트用 特殊시멘트(Norcem社)³⁾

<表-2>

項目	品名	SP30	SP30-4A	SP30-4A
		(普通)		modified
Blaine (cm ² /g)		3,000	3,100	4,000
凝結時間 (分)	初結	120	140	120
	終結	180	200	170
壓縮強度 (kgf/cm ²)	7日	377	357	449
	28日	469	551	663
化合物組成 (%)	C ₃ S	55	50	49
	C ₂ S	18	28	29
	C ₃ A	8	5.5	5.5
	C ₄ AF	9	9	9

置水深은 最大 216 m에 이르며 더욱이 檢討中에 있는 것은 375 m나 되는 巨大한 것이다. 그러한 콘크리트는 15년전만 해도 슬럼프 10 cm에 壓縮強度 460 kgf/cm²이던 것이 25 cm, 710 kgf/cm²로 向上되었으며 現在는 슬럼프 20~25 cm에서 1,170 kgf/cm²인 콘크리트를 試驗中에 있다고 한다. 이같은 進歩를 가져오게 한 主要因은 ①시멘트의 改良 ②보다 效果높은 混和材料 ③모래의 水簸 및 調整에 있었음을 밝히고 있다.

<表-1>에 콘크리트의 一例를 나타내었다. 混和材로는 실리카폼을 사용하고 있다.

시멘트 關係者가 보는 見地에서는 시멘트의 改

良이 우선일 것이다. 상세하게 判斷되지는 않으나 <表-2>의 例에서 보는 바와 같이 普通시멘트보다 C₃S 및 C₃A 含量을 낮추고 C₂S 含量은 높였으며 또한 粉末度를 上向시킨 것을 알 수 있다. 이러한 것은 실리카폼의 反應, 워커빌리티, 強度 등과의 關聯性을 추궁하던 끝에 나온 結果라 한다. Norcem社는 同改良研究를 계속하고 있다.

실리카폼은 아주 미세하고 또한 反應性이 매우 높은 실리카이기 때문에 混和材로서는 理想的이지만 워커빌리티가 낮기 때문에 高性能 減水劑와 併用하는 것이 效果的이다. 日本에서도 이미 實用化되고는 있으나⁴⁾ 混和材가 아닌 시멘트로서의 研究는 適合치 않은 것같다. 물론 사용조건이 일반시멘트와는 다른 것으로 생각되지만 아직도 시멘트메이커들의 課題로 남아있다.

노르웨이에서는 위의 플랫폼을 외에 壓縮強度 850~870 kgf/cm²의 가스用 水中 파이프라인(590 m), 720~820 kgf/cm²의 耐스파이크타이어 콘크리트 鋪裝, 830 kgf/cm²의 輕量콘크리트橋 등이 있으며 캐나다에서는 920 kgf/cm²의 現場打設 콘크리트를 사용한 68層의 빌딩을 建設中에 있다.

日本에서는 減水劑 등이 없던 2次大戰 前에도 當時 世界最高인 1,160 kgf/cm²의 試驗體를 만든 바 있으나⁵⁾ 현재는 高性能 減水劑로서 대개 450 kgf/cm² 정도의 콘크리트를 사용한 超高層 아파트가 활발히 建設되고 있는 한편 高強度化를 檢討하고 있다.

高強度 콘크리트는 壓縮強度가 높은 반면 伸張力이 약한 편이지만 鐵筋콘크리트로 하면 鐵筋의 補強效果가 현저하게 커져서 靱性이 큰 構造物이 된다.⁶⁾ NATM工法에 있어서도 실리카폼 콘크리트에 鋼纖維를 混入시킴으로써 靱性의 向上에 의한 高強度化가 實用化되고 있다.⁷⁾

6) 超高強度 硬化體

콘크리트의 強度는 어느 정도까지 얻을 수 있을까? 먼저 매트릭스인 시멘트 페이스트로서 岡島, 大門⁸⁾에 의하면 Powers는 2,400 kgf/cm², Roy는 強壓成型體로서 3,500 kgf/cm², Hot press로서 4,200 kgf/cm²를 얻어낸 바 있으니 시

멘트 페이스트의 強度 限界가 수천 kgf/cm² 에 이른다는 말은 틀림없는 것 같다. 더욱이 特殊한 條件이기는 하나 Roy와 Gouda⁷⁾는 W/C 는 0.1의 普通시멘트 페이스트를 250°C, 5,000 psi로 處理한 후 養生하여 최고 6,680 kgf/cm²의 壓縮強度를 얻어낸 바도 있다.

콘크리트에 있어서는 당연히 骨材가 시멘트 페이스트 보다 強靱하지 않으면 안된다. 실리카 폼 콘크리트의 경우 普通骨材를 사용하면 壓縮強度가 870~1,330 kgf/cm² 인데 비해 鐵鑛石骨材를 사용하면 1,750 kgf/cm² 으로 測定되고 있다.¹⁰⁾ 또한 폴리머 함침으로서 최고 2,870 kgf/cm² 까지 얻어냈다는 報告도 있다.¹¹⁾ 콘크리트의 引張強度는 壓縮強度에 대해 고작 6~7%밖에 되지 않으나 짧은 鋼纖維를 랜덤하게 分散시켜 사용하면 壓縮強度 1,000 kgf/cm² 일 때 引張強度는 160 kgf/cm² 까지 可能性이 나타나게 된다.¹²⁾

超高強度로서 MDF 시멘트와 DSP는 劃期的인 것으로서 發展이 기대된다. MDF (Macro Defect Free)는 1981년 Birchall 등¹³⁾에 의해 發表되어 日本에도 技術導入이 되어 있다. 이는 시멘트에 多量의 水溶性 폴리머를 가하여 아주 낮은 W/C 비(10~15% 정도)에서 강력하게 混合시킨 후 프레스 成形한 것으로서 最高 2,000 kgf/cm²에 가까운 曲強度를 얻은 바 있다. 이것은 破壞強度를 좌우하는 空隙을 없애므로써 效果가 나타난 것으로 생각된다. 그러나 多量의 水溶性 폴리머가 함침됨으로 인해 耐熱性, 耐水性은 약해지기 때문에 이같은 缺點이 問題가 되지 않는 用途나 使用方法을 익혀둠으로써 確實한 開發이 될 것이다.

DSP는 Densified System containing homogeneously arranged ultra-fine Particles의 略字로서 Bache^{14, 15)}에 의해 2,500 kgf/cm² 이상의 壓縮強度를 얻어낸 것이 發表되면서 시작되었다. 이것도 일본에 技術導入이 되어 있다. 材料의 構成을 확실히 알 수는 없으나 그 要點은 시멘트에 실리카 폼과 高性能 減水劑 등을 가하는 것이며 또한 粒度組成을 고려한 것 같다.¹⁶⁾ 流動性이 높기 때문에 鑄込成形이 가능하며 프레스成形, 射出成形 또는 工作機械類 등의 用途까지 檢討되고 있는 말하자면 엔지니어링 콘크

리트이다.

1988년 5월말 도쿄에서 開催된 MRS 尖端材料 國際會議의 Session에는 Advanced Cements and Chemically Bonded Ceramics라 하는 타이틀이 있었다. Chemically Bonded Ceramics(略해서 CBCs)¹⁷⁾는 이른바 세라믹스가 高溫에서 燒成되어 얻어진 結合體인데 비해 그와 같은 高溫이 아닌 化學的인 방법(例로서 水和에 의한 硬化 등)으로 얻은 結合體로서 세라믹스라는 의미로서는 완전히 새로운 概念이다. 言及한 MDF나 DSP는 이에 포함된다. CBCs는 化學成分이 시멘트와는 전혀 다른 것이며 範圍도 建材와는 달리 Biochemistry 등도 있다. 시멘트 技術者로서는 생소한 분야이지만 水和 또는 硬化 등 시멘트메이커의 技術範圍에 있으므로 새로운 分野로서 시멘트메이커의 進出이 要望되는 部門이다.

4. 콘크리트의 未來

이제는 콘크리트의 強度가 高度化 되어 있으며 또한 각종 纖維, 폴리머 등으로 補合된 우수한 素材를 갖추게 되었다. 現代는 이들의 應用으로서 過去에는 생각치도 못했던 建造物이 나타나는 新紀元을 이룩한 것이다.

노르웨이의 Fjord 懸垂橋로서 高強度 콘크리트를 사용한 全長 600 m의 水中浮遊 파이프의 設置提案¹⁸⁾이 있으며 화제에 오르고 있는¹⁹⁾ 美國大陸을 30分內에 橫斷할 수 있는 「플라네타륨 (Planetarium)」 構想은 직경 12m, 길이 4,600 km의 터널내에 리니어 모타카(Linier motorcar)를 走行시키는 것이며, 유럽大陸을 東西南北으로 달리는 「Euro 터널」의 構想도 있다. 日本에서는 도쿄~오사카 사이를 60分에 달리는 「中央道 익스프레스」의 構想이 있다. 참으로 콘크리트는 21世紀에서의 壯大한 꿈을 實現시키고 있다.

東北大學 名譽教授인 後藤幸正 博士²⁰⁾는 鐵筋콘크리트와 生物의 뼈가 構造上的 類似性이 있다 하여 뼈의 構造에 대한 優秀性을 紹介한 바 있다. 纖維콘크리트는 우수한 力學的 性能을 지니고 있으나 混練上 纖維量은 數% 이하

로 제한되어 있다. 이에 대한 완전한 解決策으로서 高強度의 DSP에 의한 流動性이 큰 몰탈 또는 페이스트를 FRP로서 행하여지는 것과 같이 纖維集合體 속에 注入시킬 수는 없는 것일까?

또한 Ferro 시멘트는 高強度로서 靱성이 매우 큰 반면 몰탈을 바르거나 注入할 때 問題가 많은데 이것도 鐵網 속에 DSP 몰탈을 注入시키는 방법으로 할 수는 없는 것일까? 이들의 複合體가 注入方法으로 만들어진다면 靱성이 크고 耐久性이 큰 材料로서 工業製品化 시킬 수는 없는 것일까? 시드니大學에서 펠로시멘트를 사용하여 두께 0.6mm의 종이와 같이 얇은 카누를 만든 것을 비롯하여²¹⁾ 日本大教授인 岸谷孝一에 의해 試案된 펠로시멘트로 만든 飛行船²²⁾도 꿈만은 아닐 것이다.

실리카폼은 매우 우수한 材料이지만 金屬硅素나 Ferro silicon 등의 製造時 副産物로서 얻어지기 때문에 量的으로 限界가 있으며 價格도 매우 비싸다. 실리카폼에 匹敵할만한 材料는 아직 없는 것 같다.

여기서 또한 흥미가 있는 왕겨재이다. 日本에서는 거의 檢討되지 않았으나 印度 등에서는 활발히 研究進行되고 있다.²³⁾ 왕겨를 600~700°C 이하에서 태운 재는 非晶質로서 실리카폼과 같이 反應성이 매우 크며 실리카분도 90% 이상으로서 매우 높다. 그러나 실리카폼의 경우와 같이 워커빌리티가 낮기 때문에 混水量이 많아지는 관계로 아직까지는 高強度의 데이터가 없는 것 같다. 그러나 여기에 高性能 減水劑의 併用을 현재 檢討中에 있다.

〈資料:セメント・コンクリート No. 500 特輯(1988. 10)〉

〈參 考 文 獻〉

- 1) 笠井眞三, 日本ポルトランドセメント業技術會報告, 第4號別冊, 明治38年9月.
- 2) 影山 博, 中川孝次, 永瀨 強, 材料 29, pp. 220~225 (1980).
- 3) M. Maage, Lewis Tuthill International Symposium on Concrete and Concrete Construction, Nov. 9-13, 1987, Seattle, pp. 161~183 (ACI SP-104, 1987); J. Moksens, A. K.

- Haug, M. Modeer and T. Berqvam, Proc. Symposium on Utilization of High Strength Concrete, June 5-18, 1987, Stavanger, Norway, published by TAPIR, Trondheim, NTH, pp. 405~416.
- 4) セメント協會, 海洋開發專門委員會, セメント・コンクリート No. 480, pp. 41~47 (1897)
- 5) 吉田徳次郎, 土木學會誌, 26, pp. 997~1006 (1940)
- 6) 六車 熙, セメント技術年報 41, pp. 18~23(1987)
- 7) T. C. Holland and M. D. Luther, Lewis Tuthill International Symposium on Concrete and Concrete Construction, Nov. 9-13, 1987, Seattle, pp. 107~121 (ACI SP-104, 1987).
- 8) 岡島達雄, 大門正機, コンクリート工學 14 (3), pp. 9~11 (1976).
- 9) D. M. Roy and G. R. Gouda, Cement and Concrete Research 5 pp. 153~162 (1975).
- 10) 長瀧重義, 坂井悦郎, コンクリート工學 25 (8), pp. 15~23 (1987)
- 11) 大浜嘉彦, コンクリート工學 14 (3) pp. 25~31 (1976)
- 12) 小林一輔, コンクリート工學 14 (3) pp. 31~33 (1976)
- 13) J. D. Birchall, A. J. Howard and K. Kendall, Nature 289 (5796) 388 (1981).
- 14) H. H. Bache, 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, June, pp. 10~12, 1981. Ottawa
- 15) 特許公報, 昭 60-59182
- 16) 蓑 巖, 芦田公伸, 坂井悦郎, セメント・コンクリート No. 495, pp. 20~24 (1988)
- 17) D. M. Roy, Science 235, pp. 651(1987).
- 18) T. Kjoberg et al., Proc. Symposium on Utilization of High Strength Concrete, June, pp. 15~18, 1987, Stavanger, Norway, published by TAPIR, Trondheim, NTH, p. 600.
- 19) 宇梶賢一, コンクリート工學 26 (1) pp. 40~60 (1988).
- 20) 後藤幸正, 月刊生コンクリート 7 (6) p. 15 (1988).
- 21) 山田順治, コンクリート工學 26 (1) pp. 23~27 (1988).
- 22) 岸谷孝一, 内田昭人, コンクリート工學 17 (1) pp. 7~9 (1979).
- 23) D. J. Cook, Cement Replacement Materials, Concrete Technology and Design Vol. 3, edited by R. N. Swamy, Surrey University Press, London, 1986, pp. 171~196. ♣