

# 알칼리-骨材反應의 매커니즘과 防止對策

林 采 中

〈東義工業專門大學助教授〉

## 1. 序 論

콘크리트 構造物은 耐久性이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 最近 各國의 研究報告에 따르면 建設後 豫想外로 早期에 劣化(deterioration)하는 경우가 적지 않은 것으로 나타나 注目을 끈다. 이 原因으로는 여러가지가 있으나 그중 鹽分으로 인한 鐵筋의 腐蝕 또 거의 고려하지 않고 있는 알칼리-骨材反應에 의해 콘크리트 構造物이 損傷을 받고 있다는 발표가 많이 나오고 있다. 1940년 美國에서 Stanton<sup>1)</sup>이 처음으로 발견한 이래 48년이 지났지만 아직도 不明確한 點이 많다.

알칼리 骨材反應은 보통 다음과 같은 3종류로 分類된다.

- ① 알칼리-실리카 반응(Alkali-silica reaction)
- ② 알칼리-炭酸鹽岩反應(Alkali-carbonate rock reaction)
- ③ 알칼리-실리케이트 반응(Alkali-silicate reaction)

②와 ③의 경우는 극히 드물고 ①의 경우가 대부분을 차지하므로 일반적으로 ①을 알칼리-골재반응이라고 하며 여기서도 이것을 중심으로 論하고자 한다.

알칼리 骨材反應은 骨材 중의 어떤 鑛物과 콘크리트 중 알칼리성의 間隙溶液과의 化學反應이

다. 이 反應에 의해 콘크리트 內部에 局部的인 體積膨脹이 생기고 그것이 콘크리트 중에 龜裂을 발생시킴으로써 콘크리트 강도를 저하시켜 극단적인 경우 崩壞에 到達하게 된다.

알칼리 骨材反應에 의해 損傷을 입은 構造物로서 最初의 注目을 받은 것은 美國 캘리포니아의 킹시티 橋梁의 橋脚<sup>1)</sup>이었다. 그후 世界各國에서 알칼리 골재반응에 의한 例가 急增하기 시작하였는데 이들의 背景에는 다음과 같은 問題點들<sup>2)</sup>이 있다.

- ① 에너지 및 環境保全을 목적으로 한 시멘트 製造法의 變化에 의해 시멘트 중의 알칼리량이 증가하는 경향이 있다.
- ② 새로운 콘크리트 技術의 開發에 의한 시멘트량의 증가 및 물시멘트비(W/C)의 저하에 따라 콘크리트 중 間隙溶液의 알칼리이온 濃度가 上昇했다.
- ③ 良質의 骨材가 모자람에 따라 海砂, 碎石 등의 사용이 늘어나고 있는데 이 代替骨材의 反應性을 排除할 만한 確실한 試驗法이 確立되지 않았다.
- ④ 各國에서 여러가지 反應性 骨材가 發見됨으로써 그 範圍가 擴大되었다.
- ⑤ 一部 混和材料는 알칼리-골재반응을 促進할 가능성이 있다.

최근 國內에서도 海砂, 碎石의 사용이 증가하고 있는데 이들의 反應性 與否를 미리 調査, 研究하여 豫상되는 被害에 대비하는 것이 바람직

하다고 생각된다.

## 2. 本 論

### 1. 反應性 骨材

#### 1) 反應性 骨材의 分類

콘크리트 容積의 7~8割을 차지하는 骨材는 그 品質에 따라 強度, 變形, 耐久性 등 콘크리트의 諸般 性能에 현저한 영향을 미친다. 骨材로 인해 콘크리트가 劣化하여 損傷된 例는 알칼리 반응 외에도 여러가지가 있는데 이는 日本의 水上<sup>4)</sup>이 整理하였다.

本 調査에서는 反應性 骨材를 岩石記載學(Petrography)과 成因的인 分類에 의해 구분하기 보다 反應性 岩種에 따라 설명하고자 한다.

트리디마이트(Tridymite), 크리스토파라이트(Cristobalite), 火山性 유리는 비교적 실리카 含有量이 높은 岩漿(Magma)이 急冷되어 만들어졌고 처음부터 安定된 石英(Quartz)으로 되어 있는 것이 高温形態에서 不安定한 형태로 남은 것이다. 또 이들의 鑛物을 포함할 可能性이 있는 岩石으로는 流紋岩(Rhyorite), 安山岩(Andesite) 또는 이들의 岩石에서 2次的으로 生成된 堆積岩, 變成岩이 있다. 蛋白石(Opal)과 玉髓(Chalcedony)는 無定形 또는 微晶質의 실리카이고 個個의 結晶이 적기 때문에 反應性이 좋은 것으로 생각되고 있다. 이들은 한번 물에 溶解된 실리카가 다시 침전되어 만들어졌고 많은

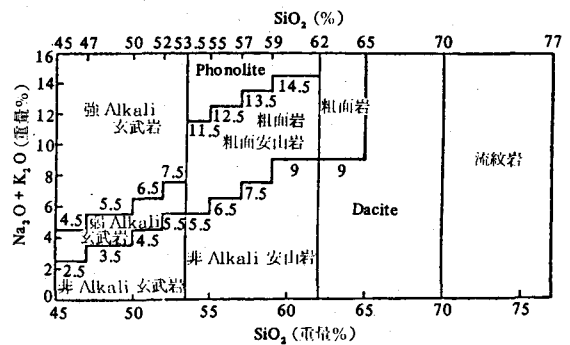
岩石中 微量 存在하지만 骨材로 사용할 경우 注意를 要한다.

Mantuani<sup>6)</sup>는 알칼리 反應性 실리카 鑛物과 岩石을 分類해 놓았지만 岩石의 종류에도 成分의 범위가 넓기 때문에 그에 따른 反應性을 예측하기가 곤란하다. 岩石을 成因에 따라 火成岩(Igneous Rocks), 堆積岩(Sedimentary Rocks) 및 變成岩(Metamorphic Rocks)으로 분류한 바 <表-1>은 火成岩의 상태를 나타낸 것이다.

<그림-1>은  $SiO_2$ 와  $Na_2O + K_2O$ 의 含有量에 의한 火山岩의 간단한 분류이다.<sup>6)</sup> 無色鑛物이  $SiO_2$ 의 含有量이 많은 傾向이 있다. 이와 같이 岩種만으로 반응성 골재를 判定하는 것은 不可能하므로 다음 節에서 종합·검토해 보겠다.

#### 2) 國內의 骨材岩種

우리나라의 地質圖는 <그림-2>와 같으며 이



<그림-1> Simply Classification of Contain amount  $SiO_2$  and  $Na_2O + K_2O$  in Igneous Rocks

### Classification of Igneous Rock<sup>5)</sup>

<表-1>

冷却速度	名 稱	多 ← 珪 酸 含 有 量 → 少			生成場所
		66% 以上	51~64%	52% 以下	
遲 延 ↑	深成岩	花崗岩 (Granite)	閃綠岩 (Diorite)	斑輝岩 (Gabbro)	地下深層 ↑ ↓ 地 表
	半深成岩	斑 岩 (Porphyry)	玢 岩 (Porphyrite)	輝綠岩 (Diabase)	
迅 速 ↓	鹽基成岩	流紋岩 (Rhyorite)	安山岩 (Andesite)	玄武岩 (Basalt)	

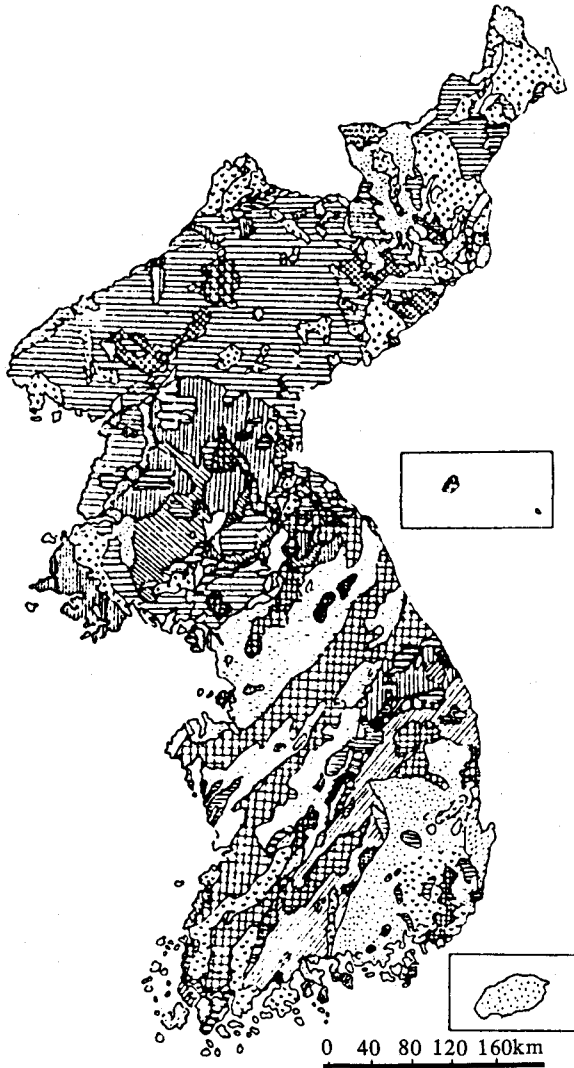
중 KSF<sup>8)</sup>上 碎石, 碎砂로 사용이 가능한 岩種  
은 <表-2>와 같다.

喜田 등<sup>9)</sup>의 岩種別 反應性 試驗에 의하면 石  
灰岩類, 變成岩類, 深成岩類 등의 非火山岩系의

Rock of Crushed Stone (By KSF)<sup>8)</sup>

<表-2>

區 分	岩 種	規 格	備 考
道路用 碎石	玄武岩, 安山岩, 硬質砂岩, 硬質石灰岩	KSF 2525	KS F 2548 과 비교
콘크리트用 碎石	이에 準하는 石質을 가진 岩石	KSF 2527	
콘크리트用 碎砂	玄武岩, 安山岩, 砂岩, 石灰岩 이에 準하는 石質을 가진 岩石	KSF 2558	



- 현무암
- 제3기층
- ▨ 유문암, 조면암
- ▨ 반불국사화강암
- ▨ 불분암상화산암류
- ▨ 경상계화강암
- ▨ 대보화강암
- ▨ 대동계
- ▨ 트라이아스기화강암
- ▨ 트라이아스기화강암(시대미상)
- ▨ 평안계
- ▨ 조선계
- ▨ 삼상원계
- ▨ 암기성암(시대미상)
- ▨ 옥천계(시대미상)
- ▨ 미분류 화강암철편마암
- ▨ 마천령계와 관련된 편암 화강편마암
- ▨ 영남계와 관련된 편암 화강편마암
- ▨ 연천계와 관련된 편암 화강편마암

<그림-2> Geological map of Korea

骨材는 碎屑堆積岩의 극히 一部를 제외하고는 無害하다. 流紋岩類, 玄武岩類, 輝石安山岩類 등 火山岩系의 骨材는 結晶度가 낮고 실리카量이 많아 有害 또는 潜在的 有害로 判明되었으며 鑛物學的 試驗에서도 火山岩系의 岩石은 알칼리-골재반응을 일으킬 可能性이 크다.

KS F 2548<sup>8)</sup>에서 Opal, Cristobalite, Tridymite, 珪酸成分含有火山岩, Chert, Cryptocrystalline, 酸性火成岩, 珪素質火山岩, 粘板岩, Pyrite, Phyllite, 變成硬砂岩, 硬砂岩, 片岩, 片麻岩, 片麻性火崗岩, 脈狀石英, 石英, 砂岩 등과 같은 深한 變成石英이 含有된 岩石은 알칼리-골재반응을 일으킨다고 밝혀져 있다.

한편 국내에서도 <그림-3>에 나타난 것과 같이 1980년을 起點으로 시멘트와 레미콘의 消費量이 급격히 늘어 강자갈, 강모래의 부족으로 쇄석과 쇄사의 사용이 많을 것으로 豫상되지만 精確한 統計가 없어 상당히 아쉬움이 크다.

日本은 1986년 쇄석:강자갈의 比가 54:46, 美國은 1970년경 1:1의 比를 나타내고 있다.

## 2. 알칼리 骨材反應의 메커니즘 <sup>2),10),13),19)</sup>

### 1) 콘크리트 중 알칼리

알칼리 骨材反應은 콘크리트의 間隙溶液(콘크리트 중 毛細管孔에 存在하는 溶液) 중 水酸化 알칼리와 反應性 骨材粒子 사이의 化學反應

이므로 알칼리 골재반응에 直接關係되는 콘크리트 중의 알칼리는 間隙溶液 중의 알칼리라고 생각해도 좋다. 이 간극용액 중의 알칼리는 시멘트, 骨材, 鑛物混和材 및 化學混和劑와 같은 콘크리트用 材料에서 供給된 것과 完成된 콘크리트 構造物이 海水, 解水劑 등과 接觸할 때 콘크리트의 外部에서 浸入해서 들어간 것도 있다.

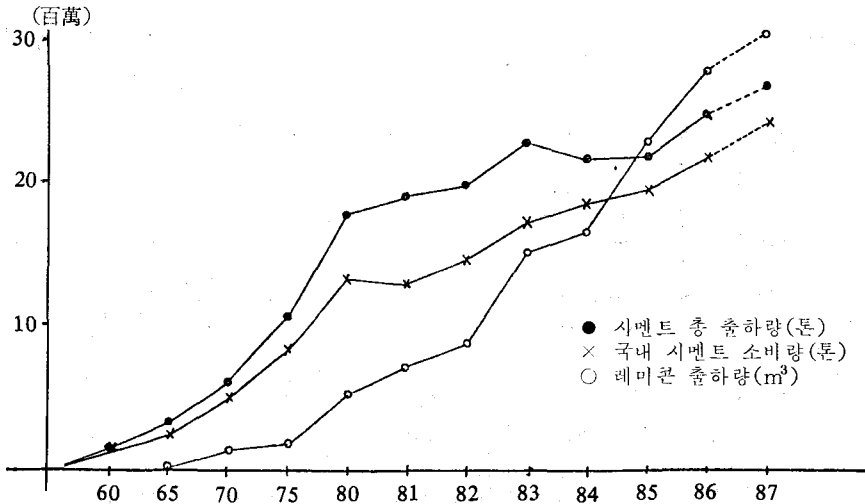
따라서 알칼리量은 콘크리트 材料나 콘크리트 構造物의 環境條件에 의해서 크게 다르며 反應性 骨材를 사용했을 경우 콘크리트 중 알칼리量의 推薦値는 뉴질랜드 3.5kg/m<sup>3</sup>, 日本 2.1kg/m<sup>3</sup>, 영국 3.0kg/m<sup>3</sup>, 남아공 2.1kg/m<sup>3</sup>, 美國 3.3kg/m<sup>3</sup> 이하로 나라에 따라 각기 다르지만 아직도 精確한 연구결과는 나와 있지 않다.

### (1) 시멘트 중의 알칼리

시멘트 중 어떤 알칼리가 有害 알칼리 骨材反應에 關係하는가에 있어서는 分明하지 않지만<sup>10)</sup> 시멘트의 종류에 따라 骨材와의 反應性은 다르게 나타난다.

Stanton에 의해 알칼리-골재반응성 골재가 발견되고 얼마되지 않아 美國에서는 反應性 骨材를 사용할 때 Na<sub>2</sub>O 換算百分率이 0.6% 이하의 시멘트를 使用하도록 되었으며 우리 나라도 그 기준이 미국과 같다.

그러나 시멘트 중 모든 알칼리가 알칼리 骨材反應에 영향을 미치는 것은 아니며 또 콘크리



<그림-3> Production Amounts of Cement and Remicon

트 間隙溶液 중 水酸化 알칼리량은 시멘트 알칼리량만이 아니고 콘크리트 중 單位시멘트량에 의해서도 크게 支配된다. 시멘트의 骨材反應性을 나타내는 指標로서 Oberholster 등<sup>11)</sup>은 소알칼리, 水溶性 알칼리 및 活性 알칼리를 이용, 모르타의 膨脹量을 측정 한 결과 그 量을 증가함에 따라 膨脹量도 증가함을 밝혀냈다.

(2) 콘크리트의 間隙溶液중 알칼리

콘크리트 중 反應性 骨材粒子에 직접 化學的 거동을 하는 것은 간극용액 중의 水酸化 알칼리이다. 따라서 간극용액 중 化學組成을 아는 것은 알칼리 骨材反應의 防止法을 모색하거나 그 메커니즘을 理解하는데 대단히 重要하다. 硬化 시멘트페이스트의 간극용액은 Lenzner 등<sup>16)</sup>이 만든 피스톤장치를 통해 供試體에 高壓力를 加함으로써 짜낼 수 있다.

이들 간극용액에 대한 각 이온 濃度는 川村<sup>2)</sup>, Lenzner 등<sup>16)</sup>에 의해 研究, 調査되어 있다.

2) 알칼리 - 실리카 反應의 메커니즘

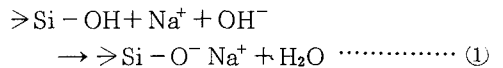
(1) 실리카와 水酸化 알칼리와의 化學反應<sup>12)</sup>

일반적으로 結晶性 실리카의 構造를 2次元의 으로 나타내면 <그림 - 4>와 같고 물이 存在하면 실리카 表面에 水和가 發生하여 OH群을 이룬 表面層이 形成된다. 실리카 表面에 대한 H<sup>+</sup>

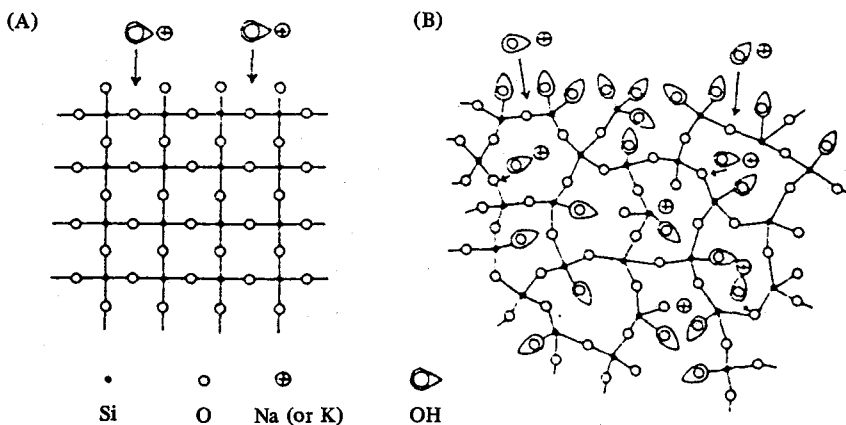
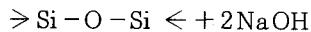
이온의 結合은 OH<sup>-</sup>이온 結合보다도 弱해 실리카 粒子表面은 弱酸性을 나타낸다. 따라서 실리카 粒子和 水酸化 알칼리와의 反應性은 表面積의 크기 또는 各種 이온의 浸入을 許容하는 結晶格子欠陥이 있는가 없는가에 따라 다르다. 比表面積이 대단히 작은 結晶 실리카는 弱酸性을 나타내는 表面에의 영향이 무시할 정도로 작다.

그러나 微結晶이나 隱微晶質 실리카는 그 比表面積이 크기 때문에 表面에 대한 水和의 영향은 점점 커진다. 따라서 일반적으로 콘크리트 중에는 化學的 安定性을 지닌 石英도 格子欠陥을 가질 때는 그 比表面積이 커지며 알칼리 - 실리카반응을 일으키기에 충분하다.

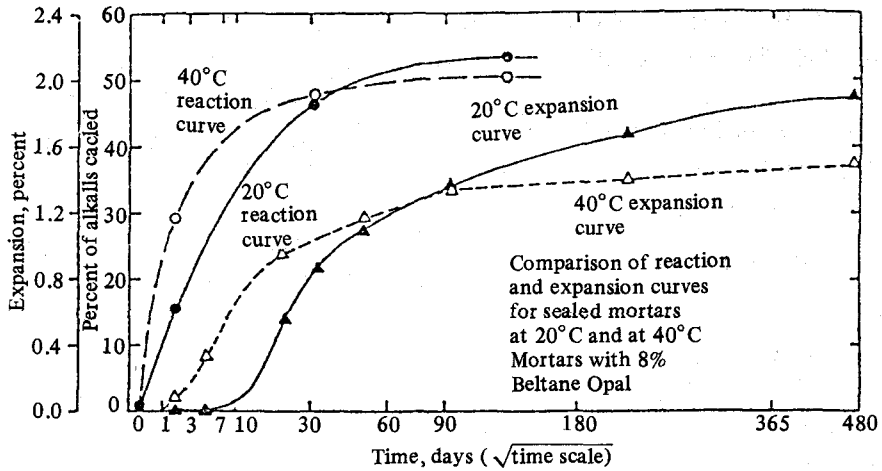
한편 無定形 실리카나 火山유리에서 각 실리카 4面體 ([SiO<sub>4</sub>]<sup>-4</sup>)는 임의의 3次元 網目構造를 形成하지만 그 構造에는 많은 氣孔을 內包하고 있다. 이와 같은 構造를 가진 실리카 粒子는 水산화나트륨(NaOH) 溶液과 反應시키면 식 ①, ②와 같이 두가지 반응이 생긴다.



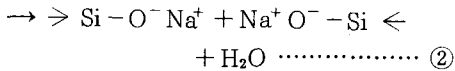
이와 같은 水酸化나트륨의 실리카 粒子에의 初期 化學的 舉動은 酸-鹽基反應이다. 만약 水산화나트륨의 濃度가 충분히 낮을 때는 이 反應만이 생긴다. 한편 水酸化나트륨의 濃度가 높을 때는 時間의 經過에 따라 다음 반응이 생긴다.



<그림 - 4> The attack of alkali on well-crystallised silica (A) and on poorly crystallised hydrous silica (B)



〈그림 - 5〉 Comparison of reaction parameter curves vs. expansion curves for sealed mortar specimens at 20°C and at 40°C



즉 수산화나트륨의 농도가 충분히 높을 때 수산화나트륨은 실리카粒子的 表面과 内部의 氣孔에 水素이온을 中和시키는데에만 머물지 않고 다시 Si-O-Si 結合을 斷切시킨다. 이 反應은 실리카 粒子的 構造를 弛緩시켜 粒子内部로 向해 위와 같은 반응이 進行돼 알칼리-실리카겔 (gel)이 形成된다.

(2) 化學反應 過程과 吸水膨脹過程

모르터나 콘크리트에서 알칼리-실리카반응에 의한 生成物의 化學組成과 物理的 性質과의 關係를 명확하게 파악하고 있으면 이 反應에 의한 被害를 받은 構造物의 補修對策을 세우는데 있어 有用한 判斷基準이 된다. 被害를 받은 콘크리트 構造物로부터 採取한 젤에 生成된 化學組成은 Idorn 등이 조사한 바 있으며 Opal 骨材를 包含한 모르터에 대한 間隙溶液의 組成變化와 모르터의 膨脹關係는 Diamond 등<sup>12)</sup>에 의해 〈그림 - 5〉와 같이 밝혀졌다.

그림에서 反應曲線은 모르터 중의 反應性 骨材粒子 内部에서 생긴 반응에 따라 消費된 알칼리량이 時間과 함께 증가함을 나타내고 있다.

이 結果에 따라 알칼리-실리카 反應에 의한 콘크리트의 弱화過程은 ① 化學反應에 의한 알

칼리-실리카 겔의 形成 ② 겔의 間隙溶液 吸水에 의한 膨脹順序로 進行된다고 Diamond 등<sup>12)</sup>이 提起了.

(3) 콘크리트 중 反應性 骨材粒子的 軟化過程과 알칼리, 칼슘의 浸入

〈그림-6〉<sup>2)</sup>은 콘크리트 중 Opal 粒子를 넣은 供試體에서 시멘트 반죽과 Opal 粒子間의 界面에서의 距離에 따른 微小硬度的 變化狀況을 나타낸다.<sup>2)</sup> 이 그림에서 재령과 함께 Opal 粒子内部의 軟化領域이 擴大되는 것을 알 수 있다. 또 콘크리트 중에 존재하는 均質한 反應性 骨材粒子的 反應은 먼저 粒子表面 부근에서 생기고 内部로 向해 進行됨을 나타낸다. 이외에도 川村 등<sup>2)</sup>은 微小硬度 測定에 提供된 Opal 粒子内部에 3日 後에는 多量の 알칼리가 浸入해 있고 7日 後에는 칼슘의 浸入이 현저함을 알아냈다. 칼슘과 알칼리가 初期부터 反應性 骨材 粒子的 内部에 浸入해 있다는 結果를 注目해야 한다.

(4) 알칼리-실리카 겔의 吸水에 의한 膨脹壓력과 龜裂의 發生

콘크리트에서 알칼리-실리카反應에 의한 龜裂은 알칼리-실리카 겔에 의한 間隙溶液의 吸水에 의해 膨脹壓力이 생겨 發生한다. 일반적으로 물은 그 화학 포텐셜을 저하시킴으로써 固

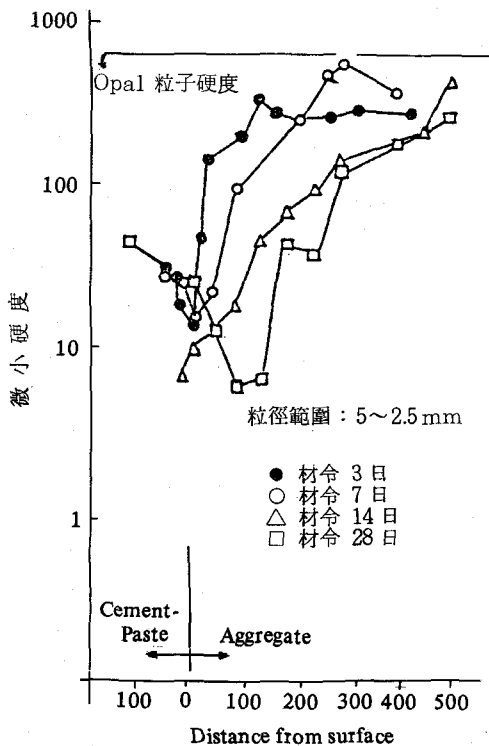
體內部로 移動한다. 이때 그 固體의 膨脹程度는 그 固體의 물에 대한 極性 및 剛性에 의해 支配된다.

즉 透水性和 물 分子의 吸引力을 갖고 比較的 非水溶性이며 部分的인 內部 結合의 破壞力을 지닐 때 固體가 膨脹한다.<sup>14)</sup>

### (5) 겔의 移動과 化學組成의 變化

콘크리트 內部에 있어 알칼리-실리카겔의 吸水에 의한 膨脹壓力으로 시멘트 모르타르에 發生하는 引張應力度는 骨材粒子의 形狀, 骨材量 등에 의해 다르다. 膨脹壓力에 의한 콘크리트의 龜裂은 龜甲狀, 地圖狀, pop out 등이다. 反應性 骨材粒子 位置에서 生成된 알칼리-실리카 겔은 겔의 膨脹에 의해 생긴 龜裂을 따라 移動해서 콘크리트 內部에 貯留하거나 콘크리트의 表面에 滲出하는 경우도 있다.

<그림-7><sup>2)</sup>은 反應性 骨材粒子에 의해 發生한 龜裂에 따라 얻어진 겔의 化學組成 變化를



<그림-6> Softening process of Reactive Aggregate particle in Concrete

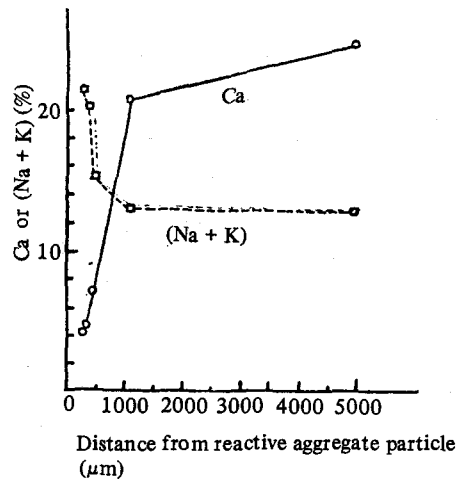
나타내었는데 졸(sol)이 龜裂을 통해서 移動하는 過程에서 졸中 칼슘의 含有量은 점차로 증가하고 알칼리량은 감소하는 것을 알 수 있다.

알칼리-실리카反應의 後期 段階에는 透明한 졸 또는 부드러운 겔이 콘크리트 內部에 나타나게 되고 또 콘크리트 表面에 滲出해 있는 것을 觀察할 수 있다. 따라서 透明 졸 또는 겔은 龜裂을 따라 移動하는 過程에서 시멘트반죽 중  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  나 C-S-H에 의해 칼슘을 받아들여 白色의 不透明한 非膨脹性 生成物로 變化하는 것으로 생각된다.

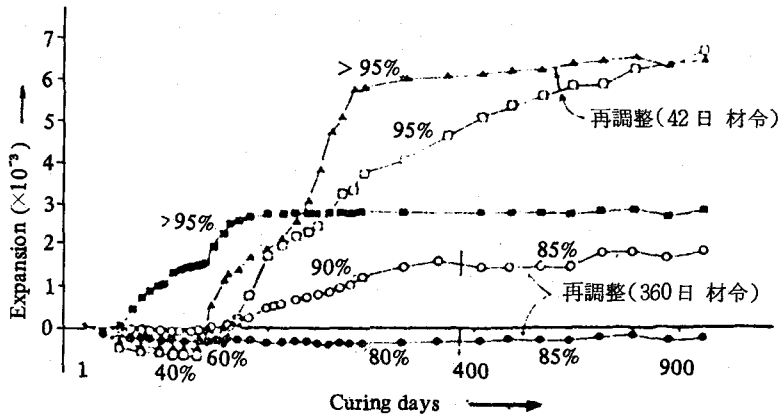
### (6) 濕度和 溫度의 영향

모르타르의 膨脹量은 모르타르內에 含有하고 있는 물의 量과 比例關係가 成立한다.<sup>10)</sup> 乾燥狀態에 있는 모르타르의 間隙溶液 中  $\text{OH}^-$  이온濃度는 濕潤狀態에 있는 것보다 높고 反應性 骨材는 乾燥狀態에서 보다 強한 化學反應을 일으키지만 그 膨脹量은 적다.

<그림-8>은 여러가지 環境條件下에서 Opal 質砂岩을 사용한 모르타르의 膨脹速度를 나타냈다.<sup>15)</sup> 42日 材令의 再調整曲線은 42日以後 60% R·H 및 40% R·H를 각각 95%以上과 95%의 濕度條件에 再調整했을 때의 膨脹曲線이다. 이 그림에서 나타난 것과 같이 42日까지 膨脹舉動은 初期段階에서 低濕度 狀態에 있는 모르



<그림-7> Variation of Gel component due to Distance from Reactive Aggregate particle



〈그림 - 8〉 Expansion behavior of Mortar influenced by Reactive Humidity

터에도 第1段階 化學反應이 進行되고 60% R·H나 40% R·H와 같은 低濕度 條件下에서는 第2段階의 吸水膨脹이 進行되지 않음을 알 수 있다. 그러나 그후 第1段階의 化學反應過程이 모두 進行된 모르터를 高濕度 條件下에 두면 第2段階 吸水 膨脹過程이 進行되고 그후 最終 膨脹량은 初期에 高濕度 條件下에 놓여진 모르터 보다는 훨씬 크다.

360日 材令의 再調整 曲線은 環境濕度 90%와 80%를 85%로 변화시켰을 경우이다. 이들 두 曲線은 相對濕度가 85% 이하이면 化學反應은 進行되어도 膨脹은 發生하지 않는다는 것을 나타내고 있다. 어느 狀況下에서든지 第1段階 化學反應 過程의 進行에 의해 알칼리-실리카 젤이 生成되므로 第2段階의 吸水膨脹過程이 進行되지 않도록 콘크리트 内部에 물의 浸透를 防止하는 것이 알칼리-실리카反應에 의한 콘크리트의 弱화를 防止하는 要諦이다.

溫度가 膨脹量에 미치는 영향을 살펴보면 〈그림 - 5〉에서와 같이 Opal을 사용한 모르터는, 40°C까지는 反應速度가 빠르지만 膨脹壓은 적으며 20°C에서는 反應速度가 느려 오히려 알칼리 消費量은 40°C의 경우보다 많다. 즉 溫度가 높을수록 初期의 膨脹速度는 빠르고 低溫인 경우 初期 膨脹速度는 느리나 長期間에 걸쳐 膨脹하여 最終膨脹量은 더 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 反應性 骨材에 따라서는 溫度의 영향에 敏感하지 않은 骨材도 있다.

### (7) 反應性 骨材量 및 粒度의 영향

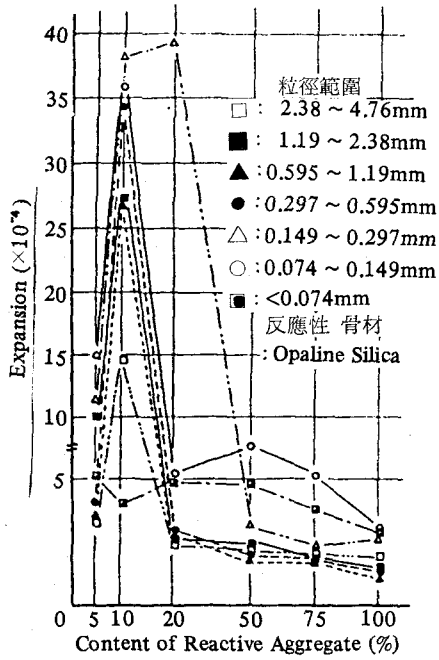
모르터의 膨脹量은 反應性 骨材量에 따라 증가하지만 膨脹量-反應性 骨材量의 關係는 岩石種類와 粒度에 따라 크게 다르다. 川村 등<sup>17)</sup>은 Opal에서 粒徑이 同一한 反應性 骨材는 사용한 모르터의 膨脹量-骨材量 曲線에서 粒度에 따라 큰 변화가 있음을 밝혀냈으며 Hobbs<sup>18)</sup>는 岩種에 따라 反應性 骨材量과 膨脹量이, Opal은 5~10%에서 銳敏한 膨脹量을 나타내고 安山岩은 비교적 平坦한 曲線으로 나타남을 알아냈다.

### 3) 反應 메커니즘과 最惡條件量 (Pessimism Percentage)

Stanton<sup>1)</sup>은 反應性 骨材를 含有한 모르터의 膨脹量은 骨材 중 反應成分比率이 어떤 값에 到達하게 되는데 이때의 最大가 되는 값을 'pessimism percentage'라 했다. 이 값은 反應性 骨材를 사용할 때 콘크리트의 配合設計, 포졸란 (pozzolan)에 의한 알칼리-실리카 膨脹의 抑制效果 檢討 및 化學法에 의한 骨材의 알칼리反應性에 의한 有害度의 判定 등 實際적인 問題에 중요한 의미를 가진다.

일반적으로 膨脹量과 反應性 骨材量과의 關係를 나타낸 퍼시먼曲線은 시멘트의 種類, 組成, 使用量 및 骨材의 性質 등에 의해 큰 영향을 받는다. Mielenz 등<sup>21,19)</sup>은 퍼시먼량이 생긴 것은 모르터 중 反應性 骨材量의 增加에 따라 모르터 膨脹量과 反應性 실리카 表面積의 增大로 모



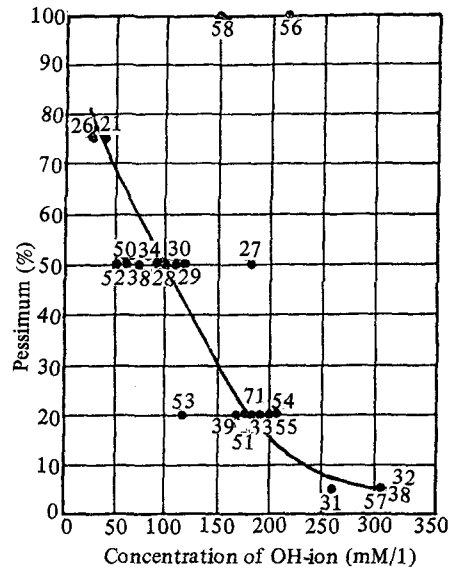


〈그림-9〉 Pessimism Curve of Opaline Silica by Mortar Bars

르터 중 알칼리가 급속히 감소하기 때문에 실리카 분해反應이 活發하게 이루어진다는 사실을 밝혀냈다. 이것은 Dent Glasser 등<sup>13)</sup>에 의한 실리카 겔과 水酸化나트륨 溶液과의 反應에 관한 實驗結果로부터 推測할 수 있다. 反應의 進行과 함께 실리카 겔은 溶解하고 溶解中の 水酸化 이온 濃度는 감소한다. Glasser 등<sup>13)</sup>의 研究에 의하면 실리카는 시간이 經過함에 따라 溶解하고 溶液 중 실리카 濃度는 증가한다.

실리카 겔이 증가함에 따라 最終溶解 실리카 量도 增加하지만 溶液 중 OH<sup>-</sup> 이온 濃度는 크게 低下하기 때문에 실리카 溶解는 途中에 停止한다. 즉 最終溶解 실리카 濃度가 最大가 되는 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O Mol 化가 存在하기 때문이다. 앞에서 살펴본 바와 같이 퍼시먼 量과 퍼시먼 曲線에 영향을 미치는 要因은 反應性 骨材 量, 粒度 外에도 여러가지가 있다.

〈그림-9〉<sup>20)</sup>는 物理的 性質과 反應性 Opal 을 사용한 모르터의 퍼시먼 曲線을 나타낸 것인데 同一한 反應性 骨材를 사용해서도 骨材의 粒度에 따라 그 曲線은 크게 다른 것을 알 수 있다. 〈그림-10〉<sup>19)</sup>에 나타낸 것과 같이 反應性



〈그림-10〉 Relationship between pessimum percentage and Concentration of OH<sup>-</sup> ion, by ASTM C-289

骨材의 퍼시먼 量은 OH<sup>-</sup> 이온 濃度의 低下度가 증가하면 감소하는 것이 확인되었다.<sup>19)</sup> 앞의 내용에는 生成된 겔의 粘性(또는 剛性)이 퍼시먼 曲線에 미치는 영향은 고려되지 않고 있다. 특히 포졸란 添加에 의해 퍼시먼 量이 변하는 현상은 겔의 剛性과의 관계가 깊다고 볼 수 있다.<sup>2)</sup>

이상과 같이 알칼리-실리카 反應의 메커니즘은 ① 充分한 물 ② 限界值 以上の 水酸化알칼리 濃度 ③ 骨材 중 反應性 실리카의 存在 등 3가지 條件을 갖출 때 알칼리-실리카 反應에 의한 콘크리트의 弱화가 생기므로 이를 防止하기 위해서는 위의 세 가지 條件 중 어느 한 가지를 阻止해야 한다.

### 3. 알칼리-骨材反應의 防止對策

알칼리-骨材反應에 의한 被害는 콘크리트 打設後 1~5년 뒤에 나타나는 것이 보통이므로 사용실적이 없거나 反應性 鑛物을 包含한 岩種으로 만들어진 骨材는 試驗을 거친 후 사용하는 것이 좋으며 퍼시먼 效果의 逆利用으로 骨材反應을 줄일 수 있다.

## 1) 反應性 骨材의 判定

反應性 骨材 判定을 위한 試驗法은 다음과 같다.<sup>8),20)</sup>

- ① 骨材의 構成 鑛物調査 (ASTM C 295)
- ② 骨材의 潛在反應性 試驗方法 (化學法) (KS F 2545, ASTM C 289)
- ③ 콘크리트用 骨材의 岩石學的 試驗方法 (K SF 2548, ASTM C 245)
- ④ 潛在 알칼리反應性 試驗方法 (모르터 방법) (KS F 2546, ASTM C 227)
- ⑤ 콘크리트用 炭酸鹽岩의 알칼리 潛在反應試驗方法 (圓錐型 岩石供試體에 의한 方法) (K SF 2547, ASTM C 586)
- ⑥ 알칼리-실리카 膨脹抑制 效果의 判定試驗方法 (ASTM C 441)
- ⑦ 기타 試驗法

이들 試驗 中 한가지 方法만으로 判定하기는 힘들며 여러가지 方法을 通해 綜合分析을 하는 것이 보다 효과적이다.

## 2) 콘크리트의 配合에 의한 對策

이상에서 살펴본 바와 같이 골재의 치수가 적을수록, 물-시멘트비가 적을수록 膨脹量이 적은 것을 알 수 있다.

單位시멘트량을 증가시키면 콘크리트 間隙水 中 알칼리 濃度가 높아져 化學反應을 촉진하므로 A·E劑 등을 사용하여 단위시멘트량을 줄이고 온도영향과 건조수축에 의한 균열의 發生을 방지해야 한다.

### < 參 考 文 獻 >

- 1) T. E. Stanton; Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate, proc. A. S. C. E, Vol 66 p1781-1811 (1940).
- 2) 川村滿紀: 알칼리骨材反應의機構, 金澤大學工學部 材料開發研究室 報告, 第一卷, p. 9~34, (85).
- 3) 福島正人, 二村誠二: 유크리트用 碎石의 알칼리骨材反應性, 세멘트·유크리트, No. 438, p. 8~15, (1983).
- 4) 水上國男: "알칼리骨材反應을防ぐには, 建築技術, No. 398, p. 77~85 (1984).
- 5) 都城秋穂, 久城育夫 著, 南基庠 譯: 岩石學(上)(下), 大學教材出版社(1983).

- 6) L. Dolar Mantuani; Handbook of Concrete Aggregate, Noyes Publication, p 84-86. (1983).
- 7) 韓國洋灰工業協會: 統計, 시멘트, 第 106 輯(1987).
- 8) 韓國工業標準協會: 韓國工業規格(KSF), (1982).
- 9) 喜田大三, 千野裕之: 알칼리骨材反應에關する 研究(その 1), 大林組技術研究所報, No. 32, p. 126~130 (1986).
- 10) 川村滿紀, 柳場重正: 알칼리·실리카反應とその防止對策, 日本土木學會論文集, No. 348, Vol 1, p. 13~26 (1984).
- 11) R. E. Oberholster 外; Durability of Cementitious Systems, Structure and Performance of Cements, Edited by P. Barnes, Applied Science Publishers, p. 365-413 (1983)
- 12) S. Diamond, R. S. Barneyback and L. T. Struble; On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reactions, Proc. 5th. int. conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, p S252/22 (1982).
- 13) L. S. Dent Glasser and N. Kataoka; The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, Cement and Concrete Research, Vol 11, p1-9 (1981).
- 14) L. S. Dent Glasser; Osmotic Pressure and the Swelling of Gels, Cement and Concrete Research, Vol 9, No4, p 515-517 (1979).
- 15) L. S. Struble & S. Diamond; Swelling Properties of Synthetic Alkali Silica Gels, J. of Amer. Ceram. Soc., Vol 64, No 11, p 652-655 (1981).
- 16) D. Lenzner and V. Ludwing; The Alkali Aggregate Reaction with Opaline Sand Stone from Schleswig, Holstein, Proc. 4th. Int. Conf. on Effects of Alkalies in Cement and Con. p 11-34 (1978).
- 17) 川村滿紀, 竹本邦夫, 柳場重正: 未發表 資料.
- 18) D. W. Hobbs; Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction; an Explanation, Magazine of Concrete Research, Vol 30, No 105, p 215-220 (1978).
- 19) R. C. Mielenz et al; Chemical Test for Reactivity of Aggregate with Cement Alkalies; Chemical Processes in cement Aggregate Reaction, Jou. of A. C. I. Vol 19, No3, p 193-221 (1947).
- 20) 柳場重正, 川村滿紀, 岡田光芳: 알칼리骨材反應에關する 基礎的 研究, 材料, Vol 26, No. 290, p. 1078~1084 (1977).
- 21) 1977 Annual ASTM Standards; Concrete and Mineral Aggregates, Manual of Concrete Testing Pt 14 (1977).
- 22) S. Diamond; A Review of Alkali-Silica Reaction and Expansion Mechanisms 1; Alkali in Cements and in Concrete Pore Solutions, Cement and Concrete Research, Vol 5, No 4, p329-346 (1975). ♣