

# 알칼리 골재反應과 그 對策

崔 相 紘  
 〈漢陽大學校 教授·工博〉

## I. 머리 말

최근 각종 건설공사의 급증으로 콘크리트 구조물이 늘어나면서 양질의 하천골재가 부족되고 천연암석을 부순 골재나 인공골재 등의 수요가 늘어나고 있다. 이에 따라 골재의 품질저하, 골재중의 유해물질 등에 의한 콘크리트의 내구성에 미치는 영향 등이 거론되게 되었다.

골재의 화학적 요인이 원인이 되어 콘크리트가 손상되고 열화하는 현상의 하나로 알칼리골재반응이 있다. 알칼리골재반응이 처음으로 제기된 것은 미국에서 1930년대 후반에 발생한 콘크리트 균열에 의한 피해를 시멘트 중의 알칼리와 골재와의 반응이라고 보고한 Stanton<sup>1)</sup>에 의해서였다. 그후 계속하여 알칼리 골재반응의 사례가 발표되고 미국뿐 아니라 세계 여러 나라의 공동문제로서 인식되어 이에 관한 조사 연구가 행하여지고 있다. 1983년에는 알칼리 골재반응에 관한 제 6회 국제회의가 덴마크에서 개최되어 연구발표와 앞으로의 전망에 대한 의견교환이 있었으며 시험방법 등에 대한 논의가 있었다.

알칼리 골재반응에 의한 피해를 입은 콘크리트 구조물은 보수가 힘들고 반응을 정지시켜 피해를 막을 수 있는 방법도 아직은 거의 없다. 골재의 화학적 요인에 대한 콘크리트의 열화손상은 그 현상이 복잡할 뿐 아니라 완전한 해명

도 힘들어 앞으로 규명할 바 많겠으나, 여기서는 그 개설, 외국에서의 사례, 대책 등을 살펴보기로 한다.

## II. 알칼리 골재반응

### II-1. 분류

알칼리 골재반응은 시멘트중의 알칼리와 골재중의 어떤 성분이 반응하여 시멘트 경화체를 팽창시켜 콘크리트에 균열이나 pop out 를 일으키는 현상으로서, 주성분으로  $SiO_2$  를 갖고 있는 암석과 알칼리가 반응하는 경우와 주성분으로  $CO_2$  를 갖고 있는 암석과 알칼리가 반응하는 경우로 나눌 수 있다.<sup>2,3)</sup>

#### 1. 알칼리-실리카반응

골재 암석중의 실리카성분이 알칼리와 반응하는 경우로 반응생성물이 팽창하는 성질을 갖고 있어 콘크리트 내부에 국부적 팽창을 일으키고 이 팽창에 의하여 콘크리트에 균열이 발생하고 강도가 떨어지는 것으로 알칼리 골재반응중 가장 일반적인 것이다.

알칼리 골재반응이 처음 보고된 Stanton<sup>1)</sup>의 "시멘트와 골재의 반응"에서 map cracking과 pop out 현상이 보고되었는데 이는 알칼리-실리카 반응이다. 1936년~1937년에 시공한 미국 California 주 Bradley의 콘크리트 포장도로에서 1938년에 심한 map cracking 이 발견되

었다. 여기에는 두 종류의 세 골재가 사용되었는데 그중 Oro Fino의 세 골재가 사용된 곳에서만 피해가 나타나 그것이 원인의 하나라고 추정되었다. California의 연안지방에는 이런 피해를 입은 콘크리트가 여러곳 있었다.

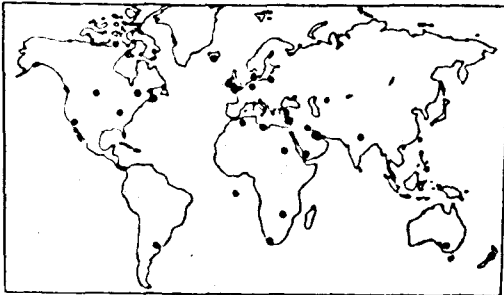
원인의 하나로 생각되는 골재에 대한 실험결과, 과도팽창을 일으키기 위해서는 골재중에 유해성분(예를 들면 chert)과 시멘트중에 알칼리가 일정량 이상 있어야 하고 유해성분 골재의 입경이 영향을 미침을 알았다.

또 팽창 외에 pop out에 대해서도 검토하였는데 원인물질로는 혈암이나 chert로서 이에 수반하여 sodium silicate를 함유하는 silica gel로 된 물질이 존재하고 있었다.

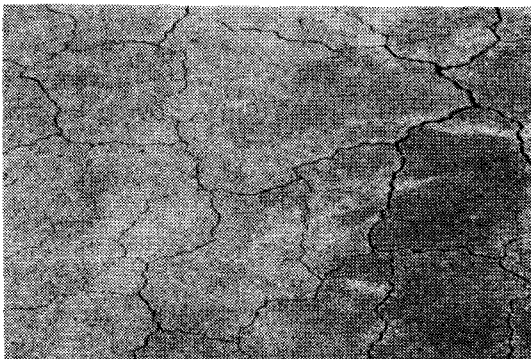
1941년에는 Parker dam, Washinton주의 도로, Buck 수력발전소의 피해가 보고되었다.

그후 이와 같은 현상에 대한 보고가 구미 제국에서 있었고 1940년부터 20년간의 연구 개요가 보고되었으며<sup>4)</sup> 최근에 와서도 중동<sup>5)</sup>, 영

국<sup>6)</sup>, 일본<sup>7)</sup> 등의 피해가 보고되고 있다. <그림-1>은 콘크리트 구조물의 알칼리 골재반응에 의한 손상사태가 보고된 곳을 나타낸 것이며, <그림-2~4>는 알칼리 골재반응에 의하여 손상된 예로서 map cracking, pop out 및 Val-dela-Mare 댐의 난간이 이동한 것을 보여주고 있다.



<그림-1> Reported cases of alkali silica reactivity 1982



<그림-2> Map Cracking



<그림-3> Pop out



<그림-4> Parapet of the Val-dela-Mare dam

알칼리-실리카반응의 여러 사례 및 재현 실험으로부터 알칼리-실리카반응의 현상을 종합하면 다음과 같다.<sup>8)</sup>

① 반응에 관여하는 것은 시멘트중의 알칼리( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )와 골재를 구성하는 특정광물 암석이다.

② 콘크리트의 피해는 map-cracking, disruptive-cracking, 또는 pop out 등이다.

③ 반응결과 알칼리 실리케이트의 gel 이 생성하며 그 거동이 균열의 원인이 되고 골재의 주변에는 반응 rim이 생긴다.

④ 시멘트중 알칼리량( $\text{Na}_2\text{O}$  당량)이 0.6 이하에서는 반응성 골재가 존재하여도 모르타르 바의 과도팽창은 일어나지 않으나 0.6 이상에서는 팽창량은 알칼리량에 비례한다.

⑤ 콘크리트가 물속에 있어 알칼리가 용출하는 경우 또는 건조하여 충분한 수분이 없을 경우에는 반응 또는 팽창이 일어나지 않는다.

⑥ 콘크리트에 침입하는 바닷물속의  $\text{NaCl}$ , 흠속의 알칼리는 팽창을 조장한다.

⑦ 모르타르의 팽창량은 반응성 물질의 입도에 관계하며 팽창이 최대가 되는 것은 유해물질이 골재중에 어느 정도의 량, 즉 pessimum 량이 존재할 때이다.

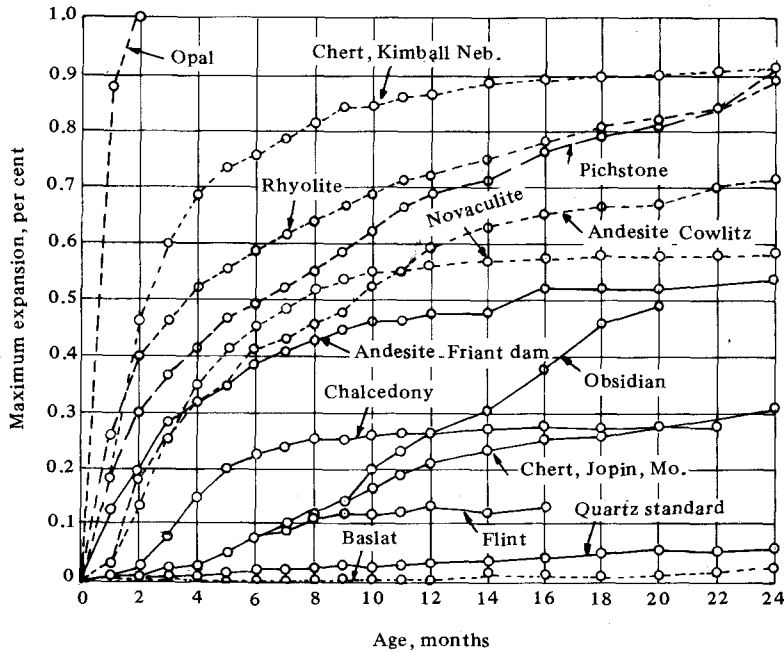
⑧ 반응은 전형적인 경우 2년 정도에서 피해가 나타나기도 하나 화학반응이므로 환경조건의 영향을 받아 반응이 늦은 것도 있다.

⑨ 포졸란이나 고로슬래그는 팽창을 억제하는 효과가 있다.

여러 가지 암석광물을 사용하였을 경우(알칼리 함량이 많은 시멘트 사용시)의 모르타르의 재령에 따른 팽창을 <그림-5>에 보인다.

## 2. 알칼리-탄산염반응

탄산염 암석과 알칼리가 반응하는 경우로, 미



<그림-5> Expansion of mortars containing various rocks with high-alkali cement

국 및 캐나다 동부의 일부 돌로마이트질 석회암이 시멘트중의 알칼리와 반응하여 팽창반응을 일으켜 콘크리트를 열화시키는 것이 밝혀졌다.

캐나다 온타리오 지방의 Kingston 석회석을 조골재로 사용한 콘크리트 구조물의 과도팽창과 균열에 의한 손상이 알칼리-실리카 반응과는 다른 알칼리 골재반응으로 보고됨으로써 알칼리-탄산염 반응으로 분류되었다. Swenson은 1957년 "ASTM 시험으로는 검출되지 않은 반응성 골재"란 보고<sup>9)</sup>에서 알칼리-탄산염반응을 처음으로 보고하였는데, 그중 한 예로서 보도가 공사후 6개월만에 과도팽창과 균열(6~8cm의 6각형에 가까운 모양)을 보였는데, 원인으로는 점토질 돌로마이트 석회암 조골재로서 ASTM 시험에서는 유해골재는 아니었다. 그후 알칼리-탄산염반응은 중동<sup>10)</sup>, 미국<sup>11)</sup>에서도 관찰되었다.

알칼리-탄산염반응의 특색은 다음과 같다.

① 균열은 map-cracking으로 골재의 표면에 반응층을 갖는 경우가 많다.

② 조골재로서 사용된 것이 열화가 심하며, 세골재의 경우 입경이 작은 것이 팽창이 적다. 불활성의 골재로 회석하면 회석량에 대략 비례하여 팽창이 적어진다.

③ 시멘트중의 알칼리량( $\text{Na}_2\text{O}$  당량)은 0.4 이하로 하여야 한다고는 하나 습윤상태에서는 불충분하다. 팽창은 알칼리량에 영향을 받으며 건조상태에서는 반응이 진행하지 않는다.

④ gel의 침출이 없고 pessimum 량도 없으며 포졸란의 억제효과도 없다.

⑤ 골재입자 내부에 rim을 성장시키며 주위의 페이스트가 탄산화된다.

### 3. 알칼리-실리케이트반응

알칼리-실리카반응 및 알칼리-탄산염반응과 그 반응성상이 약간 다르나 그 구별이 명확치 않아 천천히 진행되는 알칼리-실리카반응으로 분류하기도 하는 것이다.

알칼리-실리케이트반응은 Gillott<sup>12)</sup>에 의하여 보고된 것으로 캐나다의 Nova Scotia 산 골재를 대상으로 시험되었다. 많은 구조물의 과도팽창에 의한 피해가 보였는데 아직 검토의 대상

이 되고 있다.

이 반응의 특색은 다음과 같다.

① 늦은 반응으로 12~15년이 지나야 피해가 검출되고

② 물의 공급이 있는 경우 반응이 계속하여 일어나며

③ 알칼리가 많은 시멘트가 팽창이 크며

④ 팽창억제에 포졸란이 유효하다.

## II-2. 반응기구

알칼리 골재반응 및 반응에 의한 팽창기구는 아직 해결하여야 할 문제가 남아 있으며, 이의 연구는 알칼리 골재반응의 방지대책 및 반응성 골재의 판정 등 실제면에서도 중요하다.

알칼리와 반응성 골재와의 반응에 의한 콘크리트의 파괴는, 알칼리와 반응성 골재와의 화학적 반응과정과 팽창과정의 두단계로 나눌 수 있다.

### 1. 알칼리-실리카반응<sup>13, 14, 15)</sup>

콘크리트 경화체의 간극 액상에 존재하는 알칼리와 골재중의 반응성 실리카의 반응은 silanol기( $-\text{Si}-\text{OH}$ )와 수산화알칼리와의 반응에 의한 Siloxane기( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ )의 생성과 절단과정을 거치면서 진행한다는 설이 지배적이며, 공극 액상조성, 알칼리-실리카반응 생성물 조성 등도 검토되고 있으며, 계면의 SEM 관찰, EDX 조성분석 등으로 반응층이 분석되고 있다.

팽창기구에 관하여는 시멘트 페이스트를 반투막으로 생각하는 침투압이론이 유력하나 반드시 반투막이 존재하지 않는다는 설도 있다.

### 2. 알칼리-탄산염반응<sup>16, 17, 18)</sup>

알칼리와 돌로마이트 같은 탄산염 암석과의 화학반응은 brucite의 생성에 이어 일어나는 탄산 알칼리와 수산화칼슘과의 반응과정을 거쳐 진행한다.

팽창기구에 대해서는 돌로마이트의 분해에 의한 팽창설, 겔상 생성물이 물을 흡수하여 팽창을 한다는 설, 돌로마이트 석회암 중에 내포된 점토가 원인이라는 여러 설이 있다.

### Ⅲ. 알칼리 골재반응의 방지대책

알칼리 골재반응은 반응성골재, 알칼리 및 충분한 량의 물이 동시에 존재할 때 일어나므로 이 반응에 의한 피해를 막기 위하여는 이들 원인의 셋중 어느 하나를 없애는 것이며, 그 중에서도 과거의 실적을 참고할 때 비반응성 골재를 사용하는 것이 가장 안전한 방법이다.

알칼리 골재반응의 방지 대책은 아직 충분한 방법이 없고 해결할 문제가 많으나 지금까지 알려진 것을 반응의 종류에 따라 요약하면 다음과 같다.

#### 1. 알칼리-실리커반응

##### (1) 반응성 골재의 판단

반응성 골재의 판단은 그 골재를 사용한 과거의 실적을 조사하는 것이 가장 좋으나 이런 정보를 얻을 수 없는 경우에는 골재의 반응성 시험을 통하여 판정하여야 한다. 물론 골재의 반응성 시험방법에도 장단점이 있어 충분하다고 할 수 없으나 현재 평가되고 있는 방법들을 시험함으로써 종합평가하여 반응성 골재의 혼입을 어느 정도 배제할 수 있을 것이다.

##### (2) 알칼리 함량이 적은 시멘트의 사용

알칼리 함량이 적은 시멘트( $\text{Na}_2\text{O}$  당량 0.6 이하)를 사용하는 것도 예방책의 하나이다. 그러나 시멘트 이외의 다른 경로에서도 알칼리가 들어올 가능성이 있으므로 주의를 요한다.

##### (3) 포졸란 첨가

규조토, 프라이 앓쉬나 수석 슬래그 등을 첨가함으로써 알칼리-실리커반응을 방지하는 방법이 연구되고 있다.<sup>19)</sup> 이 반응기구에 대해서는 포졸란의 첨가에 의하여 경화체의 구조가 바뀌어 알칼리의 확산을 막는다는 설과 포졸란 반응에 의하여 생기는 C/S 비가 적은 C-S-H가 알칼리를 흡착 고정시킨다는 설이 있다.

##### (4) 콘크리트 배합에 따른 대책

반응성 골재와 비반응성 골재의 배합비, 유해성분의 입자크기, 물·시멘트비, 온도 등은 팽창에 영향을 미치며 pessimum 조건이 있으므로 이를 검토한 다음 배합설계를 한다. 또 일정량의 콘크리트 속에 있는 총 용해성 알칼리의 한계치를 설정하여 알칼리-실리커반응에 따른 팽창을 예방할 수도 있다.

또 습분의 이동으로 콘크리트의 특정부분에 알칼리 농도가 집중될 수도 있다. 치밀한 콘크리트 및 콘크리트 외부로부터 수분의 침입을 막는 것도 알칼리-실리커반응의 방지책으로 유효하다.

#### 2. 알칼리-탄산염반응

##### (1) 반응성 골재의 판정

반응성 돌로마이트질 석회석과 같은 유해골재를 각종 시험방법으로 시험하여 종합 판단한다.

##### (2) 알칼리 함량이 적은 시멘트의 사용

시멘트중의 알칼리는 적을수록 안전하며  $\text{Na}_2\text{O}$  당량으로 0.4% 이하가 좋다.

##### (3) 콘크리트 배합에 의한 대책

골재에 pessimum 조건이 없으므로 비반응성 골재에 의한 희석량에 대체적으로 비례하여 감소한다. 골재크기는 적을수록 팽창이 적다.

참고: 알칼리 골재반응에 관한 시험방법

1. ASTM C 227 Test for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)
2. ASTM C 289 Test for Potential Reactivity of Aggregate (Chemical Method)
3. ASTM C 295 Rec. Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete
4. ASTM C 586 Test for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates (Rock Cylinder Method)

5. 기 타

- (1) Vorbeugende Massnahmen gegen Schädigende Alkalireaktion im Beton, Beton, vol. 24 No. 5 p.179-185 (1974).
- (2) D. Hirche, IR-Spectroscopy, A modern method to test the alkali reactivity of silica aggregates, Symp. Alkali-Aggregate Reaction Preventive Measures, Reykjavik, August, (1975).
- (3) P. E. Grattan-Bellew, Evaluation of miniture rock prism test for determining the potential alkali-expansivity of aggregates, Cem. Concr. Res., vol. 11 No. 5/6, p. 699-711 (1981).
- (4) A. D. Jensen, S. Chatterji, P. Christensen, N. Thaulow, H. Gudmundsson, Studies of alkali-silica reaction Part 1: A comparison of two accelerated test methods, Cem. Concr. Res., vol. 12 No.5 p. 641-647 (1982).
- (5) Tang Ming-Shu, Han Su-Fen, Zhen Shi-Hua, A Rapid method for identification of alkali reactivity of aggregate, Cem. Concr. Res. vol. 13 No. 3 p. 417-422 (1983).

IV. 맺 음 말

알칼리 골재 반응에는 아직 검토할 점이 많이 있다. 또 반응의 원인인 반응성 골재는 천연암석이므로 산출되는 지역에 따라 그 성질이 다른 것도 당연하다. 우리나라에는 아직 알칼리 골재 반응에 의한 피해 보고는 없으나 다른 나라 들에서는 1970년대부터 알칼리 골재 반응은 미국, 캐나다 등지의 문제가 아니고 세계적으로 일어날 수 있는 가능성이 있고 또 구라파, 일본, 중동 등지의 사례도 있고 하여 그 연구와 조사가 활발히 진행되고 있다.

콘크리트의 주원료인 시멘트, 골재 및 물중에서 골재가 차지하는 양은 크다. 급격한 경제성장과 함께 콘크리트 구조물은 급증하고 있으며 양질의 하천골재의 부족은 다양한 천연골재, 인공골재의 수요를 증가시키고 있다. 또 해외공사도 많아지고 있는 오늘날, 알칼리골재 반응의 선

례를 강건너 불로만 볼 것이 아니라 좀더 관심을 갖고 골재의 화학적 안전성에 관하여 연구 검토하고 대비하여야 할 것이다.

<참 고 문 헌>

- 1. T. E. Stanton, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 66, 1781 (1940)
- 2. S. Diamond, Cement Concrete Reserch, 6, 549 (1976)
- 3. 有泉昌, 粘土科學, 19(2), 41 (1979).
- 4. P. Bredsdorff, G. M. Idorn, A. Kjaer, N. M. Plum, E. Poulsen, Proc. 4th Inter. Symp. Chem. Cement, 749 (1960).
- 5. I. Sims, A. B. Poole, Concrete, 14(5), 27 (1980).
- 6. D. Palmer, Concrete, 15(3), 24(1981).
- 7. 川村滿紀, 竹木邦夫, 柳場重正, 시멘트技術年報 (日本), 37, 136 (1983).
- 8. 日本시멘트協會, 알칼리골재 반응에 관한 문헌조사 (1984).
- 9. E. G. Swenson, ASTM Bull. 226, 48 (Dec. 1957).
- 10. W. J. French, A. B. Pool, Cement Concrete Reserch 4, 925(1974).
- 11. M. A. Pagano, P. D. Cady, Cement Concrete Reserch, 12(1), (1982).
- 12. J. E. Gillot, Symp. Alkali-Aggregate Reaction, Protective Mesure, 213, Reykjavic, Iceland (1975).
- 13. T. C. Powers, H. H. Steinour, ACI Journal Ptoc., 51, 497 (1955).
- 14. L. S. Dent Glasser, N. Kataoka, Proc. 5th Inter Conference Alkali-Aggregate Reaction in Concrete S252/23, Cape Town, (1981).
- 15. W.C. Hansen, ACI Journal Proc., 40 213 (1944).
- 16. W. C. Wherwood, H.H. Newlon Jr, Highway Res. Record, 45, 41 (1964).
- 17. D. W. Hadley, Highway Res. Record, 45, 1 (1964).
- 18. R. F. Feldman, P. J. Sereda, ACI Journal Proc. 55 203 (1961).
- 19. 川村滿紀, 제 4 회 日本시멘트協會研究所 討論會 (1984). ♣