

## 일본에서의 알카리·골재 反應에 관한 연구 동향

尹 在 煥

水原大學校 建築工學科

최근 알카리·골재반응이라는用語에 자주 접하게 되었으나 이것은 특히 日本에서 최근 몇년간 알카리·골재반응에 의한 콘크리트구조물의 被害가 언론매체에 보도되어 콘크리트구조물의 耐久性을 위협하는 것으로서 크게 사회문제화됨에 따라 이에 대한 연구와 관심이 집중된 때문에 영향을 받은 것이라고 생각된다. 그러나 우리나라는 이에 대하여 의연하게 대처할 필요가 있으며 反應性骨材의 존재여부에 대해서는 폭넓고 꾸준한 調査가 필요하다고 할 것이다.

알카리·골재 반응이란 주지하는 바와 같이 골재 속에 함유된 어떤 종류의 纖維物質과 시멘트에 함유되어 있는 알카리가 水分의 존재하에서 반응하여 규산소다 등의 반응생성물을 만들고 이 生成物이 吸水膨脹작용을 일으켜 파괴적인 壓力을 주위에 작용시킴으로써 콘크리트에 균열을 발생케 하는 現象을 말한다. 本稿는 작년 日本 京都에서 개최된 제 8 회 알카리·골재반응에 관한 국제회의에서 鳥取大學의 西林新藏교수가 알카리·골재반응에 관하여 일본에서 약 10년 동안에 이루어진 成果를 발표한 것을 정리한 것이다.<sup>1)</sup> 우리에게 시사하는 점이 크므로 전제키로 하였다. 알카리·골재반응에 관한 교과서적인 일반적인 사항에 대해서는 문헌 2), 3)을 참조해주시 바란다.

### 1. 序 論

최근 일본에서는 알카리·골재반응(AAR)에 기인하는 콘크리트구조물의 균열피해가 점차 증가하고 있다. 일본에서 알카리·골재반응에 관한 본격적인 조사와 연구가 시작된 것은 1980년대 초였다. 수많은 연구기관들이 지금까지 거의 10년 동안 어려운 AAR문제를 진지하게 다루어왔으며 그 결과 일본의 연구 수준이 최근에 세계 수준에 도달하게 되었다.

本 논문은 다음과 같은 AAR에 대한 여러 연구 측면을 나타낸다. 즉 AAR의 메카니즘과 같은 기초적인 연구과 더불어서 반응생성물의 微細組織과 岩石學的 연구, AAR에 대한 纖維物質 및 化學混和劑의 영향, 표준 및 촉진시험

법, AAR에 대한 防止對策, AAR에 의하여 손상을 입은 콘크리트구조물에 대한 調査와 補修등이다.

AAR에 관련된 최초의 연구는 1950년대로 돌아간다. 전국적으로 거의 100여종의 강자갈에 대하여 ASTM기준에 따라 화학법과 물탈바법에 의하여 조사가 이루어졌다. 그 당시에는 차트와 頁岩으로써 이루어진 단 2~3가지의 골재만이 잠재적으로 알카리반응성이 있다고 평가되었다.

1965년 鳥取縣 米子市內에 있는 건축물의 파라켓이 시공 후 36년에 박리 탈락한 사고를 조사한 결과 그 원인이 트리디마이트를 다량 함유한 安山岩과 시멘트와의 알카리반응으로 판명되었으며 전형적인 反應環도 확인되고 있

다.

그러나 그 후 大阪 阪神 고속도로의 철근콘크리트교각에서 AAR에 의한 손상이 1980년대에 발견되기까지는 이 반응에 기인된 균열 피해에 대하여는 아무런 報告도 이루어지지 않았다. 이 損傷事例가 보고된 뒤로 행해진 많은 조사결과 특히 西日本지역에 이러한 종류의 손상이 많다는 것을 알았다. 일본에서의 반응성 암석의 종류는 현재까지 안산암, 찻트, 점판암에 한정되어 있다.

일본에서 최근에 AAR이 발생되게 된 원인에 대해서는 세계의 다른 나라의 경우와 동일하다. 일본에서의 주된 원인을 들면 다음과 같다.

- (1) 良質의 天然骨材의 枯渴에 의하여 많은 종류의 쇄석들이 反應性에 대한 검토 없이 사용되어 왔다.
- (2) 시멘트의 알카리량은 증가되어 왔으며 단위 시멘트량도 특히 콘크리트의 펴퍼빌리티를 개선시키기 위하여 증가되는 경향이 있다.
- (3) 細骨材로써 보통 강모래 대신으로 海砂의 사용이 증가되어 왔으며 이것이 콘크리트내의 알카리량을 증가시켰다.

## 2. 일본에서의 AAR에 대한 研究

앞에서 밝힌 바와 같이 AAR에 관한 연구가 정상궤도에 오른 것은 최근의 일이다. AAR에 관한 50여편 정도의 실험결과가 매년 일본콘크리트공학회, 시멘트협회나 다른 학회, 협회의 정기학술강연회에서 보고되었다.

그러한 報告는 AAR에 관한 기초적인 연구로서 다음과 같이 크게 나눌 수 있다. 즉 메카니즘, 미세조직, 암석학적 및 광물학적 연구, 표준시험방법 및 신속축진시험방법을 포함한 시험방법, 건설예정 구조물에 대한 防止對策과 AAR에 피해를 입은 콘크리트구조물의 補修를 포함한 제어방법 등이다.

### 2.1 기초적 연구

#### (1) 메카니즘

AAR의 메카니즘에 관한 연구는 AAR에 의하여 피해를 입은 콘크리트구조물이 실제로 일본에서 발견된 때를 전후로 크게 구분할 수 있다.

AAR의 메카니즘에 관한 연구는 이미 AAR이 발견되기 이전에 金澤大學의 川村滿紀교수의 연구실에서 행하여졌다. 다음은 川村교수가 1979~1983년 사이에 발표한 一連의 논문의 결론이다.

(a) 시멘트페이스트 중에 파묻힌 오팔粒子와 페이스트와의 界面내에서 알카리농도가 급격하게 증가하며 이 영역내에서의 微少硬度는 시간과 함께 감소한다. 오팔내에서 발생하는 알카리·실리카반응(ASR)이 진행함에 따라 軟化領域의 두께가 증가한다. 水分이 反應領域안으로 서서히 침투해 오며 따라 硬度는 감소한다.

(b) 시멘트페이스트중에 파묻힌 굵은 오팔입자의 界面으로 부터 약  $50\mu$ 내의 軟化領域이 14일 후에 固化되는 현상은 비교적 많은 양의  $Ca^{++}$ 가 침투하는 것과 관련된 것 같다.

(c) 이 연구에서 사용한 플라이에쉬는 전혀 ASR을 억제하지 못하였다. 그러나  $Ca^{++}$ 이온이 골재입자로 이동하여 반응하는 것을 용이하게 한다. 이러한 결과가 플라이에쉬에 의한 ASR의 防止效果를 설명할 수 있는 메카니즘의 개념을 제안하게 하였다.

일본에서 AAR문제가 증가함에 따라 연구자들의 관심은 後述하는 바와 같이 플라이에쉬, 고로슬래그 및 실리카흙에 의한 AAR의 억제 메카니즘의 해명에 집중되고 있다.

#### (2) 반응생성물의 微細組織과 岩石學的 연구

안산암이 일본에서 AAR에 의한 劣化의 주된 원인이라고 생각되는 골재이다. 이 암석중의 반응성분으로서는 크리스탈라이트, 트리다마이트와 火山유리이다. 나중에 일본의 몇개

지역에서 차트질 암석이 손상을 입은 콘크리트구조물에서 발견되었다. 손상된 콘크리트중의 차트질암석을 암석학적으로 조사한 몇명의 연구자에 의하면 점재적인 알카리반응성 성분으로서는 潛晶質 석영, 옥수(chalcedony), 변형된 거친 석영으로 판명되었다. 그들은 또한 반응생성물의 微細組織을 전자현미경, 편광현미경, X선회절분석에 의하여 조사하였다.

손상구조물로 부터 절단한 콘크리트코아안에 있는 골재입자의 균열표면위의 반응생성물은 다음과 같이 3종류로 분류된다. 즉 (1)  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ , (2)  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$  및 (3)  $(\text{Na}_2\text{O})-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 이다. (1)과 (2)의 反應生成物의 형태는 젤리와 같으며 반면 反應生成物(3)의 外觀은 장미꽃모양과 같았다. 그러한 장미꽃모양의 반응물질은 다른 손상콘크리트에서도 발견되었다.

(3) 알카리·골재반응에 대한 礦物混和材의 영향

고로슬래그와 플라이애쉬와 같은 광물혼화재가 AAR을 억제하는 효과가 특히 조사되었다. 왜냐하면 이러한 재료들은 일본에서는 産業副産物으로써 多量 생산되기 때문이다. 슬래그와 플라이애쉬에 대한 특성데이터를 보면 슬래그의 전알카리량은 0.4%에서 0.7%까지이고 플라이애쉬의 全 알카리량은 0.8%에서 3.5%의 범위내에 있었다. 실리카흙은 거의 대부분 수입되며 일본에서는 거의 생산되지 않는다. 이러한 礦物混和材의 AAR에 대한 억제효과실험에 의하면 슬래그는 포틀랜드시멘트를 重量으로 40%이상 대체할 때에 유효하며 플라이애쉬는 20%이상 대체할 때에 억제효과가 있다는 것을 알았다. 1983년에서 1988년까지 일본에서 얻어진 주된 결과는 다음과 같다.

(a) 반응성골재를 오팔(opal)로 하여 제작한 몰탈바에 礦物抑制材로써 실리카흙을 사용했을 때 팽창이 증가되는 것은 몰탈내에 생성된 젤(gel)의 軟化가 지연되기 때문이다.

(b) 시멘트페이스트 간극 용액내의 알카리

도가 감소되는 것 이외의 因子가 포졸란과 슬래그를 혼합함으로써 ASR에 기인하는 팽창이 방지되는 것과 관련되어 있다.

(c) 오팔(opal)을 反應性骨材로 하여 만든 몰탈바의 알카리·실리카반응에 의한 팽창에 대한 실리카흙의 억제효과는 실리카흙의 종류에 따라 다르다.

(d) 매우 빠르게 반응하는 규산질골재로 만든 몰탈바의 팽창을 방지하는 플라이애쉬의 抑制効果는 플라이애쉬의 알카리량이나 포졸란 활성도에 따라 광범위하게 변화한다.

(4) 알카리·골재반응에 미치는 시멘트 및 化學混和劑의 영향

(a) 시멘트의 영향

보통포틀랜드 시멘트의 全 알카리량은  $\text{Na}_2\text{O}$  當量으로써 최대 1.07%이하이며 1983년에서 1988년사이에 점차적으로 감소하고 있다. 1987년에 일본에서 행해진 시멘트품질조사에 따르면 보통포틀랜드 시멘트의 全 알카리량은 평균 0.6%이고 최대값은 0.69%이었다. 보통포틀랜드 시멘트내의 알카리량이 알카리실리카반응에 의한 膨脹度에 미치는 영향이 많은 연구자에 의하여 조사되었다. 이 결과에 의하면 대표적인 안산암 반응성 골재와 차트질 반응성 골재를 사용하여 만든 몰탈바의 팽창은 시멘트의 전 알카리량이 0.6%이하일 때에는 팽창을 발생하지 않았다. 반면 同一骨材를 사용한 콘크리트의 팽창은 콘크리트내의 全 알카리량이  $\text{Na}_2\text{O}$ 當量으로써  $3\text{kg}/\text{m}^3$  이하일 때에는 발생하지 않으며 따라서  $3\text{kg}/\text{m}^3$ 이 알카리·실리카팽창에 대한 限界量으로 판단된다.

(b) 化學混和劑의 영향

AE공기연행제, 감수제, 고성능감수제 등의 영향은 화학혼화제의 종류에 따라 다르다. 알카리·실리카팽창에 영향을 미치는 화학혼화제의 因子는 혼화제의 알카리량과 시멘트입자에 대한 分散能力으로 생각된다. 이런 이유 때문에 高알카리량과 높은 분산능력을 가진 화학혼화제가 때때로 ASR을 조장시키는 큰 효과

가 있는 것 같다.

(5) 알카리·골재반응에 미치는 環境條件의 영향

AAR에 의한 팽창은 溫度, 濕度 및 외부로부터 공급되는 알카리에 의하여 영향을 받는다. 최근의 조사에서 얻어진 대표적인 결과는 다음과 같다.

(a) 溫度의 영향

알카리·실리카반응에 의한 팽창은 온도에 의존한다. 온도와 팽창과 관련하여 팽창이 최대가 되는 最適의 펠리움(pellimum)온도가 존재한다. 대표적인 안산암의 반응성 골재로 만든 몰탈바의 실험결과에 의하면 몰탈바가 최대팽창을 보이는 온도는 40°C이다. 60°C에서는 팽창이 작고 初期에 최대에 달한다. 그러나 20°C에서는 비록 팽창이 늦게 시작하지만 長期材畧에서는 40°C보다 큰 팽창을 나타낸다.

(b) 외부로부터 공급되는 알카리의 영향

일반적으로 알카리·실리카반응에 의한 팽창은 海水나 토양중의 알카리황산염에 의하여 조장된다고 말하여져 왔으나 그러나 팽창의 정도는 각각의 조건에 따라 크게 변화한다. 안산암의 반응성골재로 만든 콘크리트시험체에 대한 실험결과 시험체를 海水中에 반쯤 침적시켜 노출시켰을 때 팽창이 크게 촉진된다는 것을 알았다.

## 2.2 일본에서의 표준 및 촉진시험방법과 알카리·골재반응에 대한 防止對策

(1) 표준시험방법

일본콘크리트공학회(JCI)에 의하여 잠정적으로 확립된 표준시험방법은 화학법, 몰탈바법 및 콘크리트시험체법으로 구성되어 있다.

(a) 化學法

일본에서 화학법에 대해서는 溶解실리카량(Sc)의 定量에 있어서 용해실리카량에 대한 오차가 상당히 크기 때문에 蒸發乾固의 방법을 과염소산을 사용한 脫水法으로 바꾸므로써 보다 정확한 실험결과가 얻어지리라고 생각하

며 또한 重量法과 原子吸光光度法을 동시에 조합시킴으로써 정확한 결과가 얻어질 수 있다고 생각한다.

(b) 몰탈바법

몇개의 실험결과를 참고로 하고 넓게는 ASTM의 규정을 따르는 것으로 하여 몰탈바 시험법에 대하여 다음과 같은 試驗條件을 설정하고 있다.

1) 시험체치수=4×4×16 cm : 일본공업규격(JIS)에서 시멘트 몰탈시험에 대하여 규정된 것과 동일함.

2) 전 알카리량=1.2% Na<sub>2</sub>O 당량(NaOH로 조정)

3) 물시멘트비=0.50

그외의 시험조건으로써 ASTM 시험법의 시험조건과 판정기준을 채택하였다. 그러나 어떤 골재는 장기재령에서 큰 팽창을 보이는 경우가 있으므로 최소측정기간을 1년 이상으로 할 것이 권장되었다.

(c) 콘크리트시험체법

콘크리트시험체에 의한 시험은 실제 사용조건하에서 골재의 반응성 평가와 AAR에 의한 균열손상의 평가를 그 목적으로 하고 있다. 현재 시험체의 形狀과 크기, 저장조건, 단위시멘트량과 全 알카리량, 몰탈바에서 얻어진 시험결과와의 비교에 대한 연구가 주로 진행되고 있으며 길이 변화율과 全 알카리량(또는 시멘트량) 및 강도와와의 관계에 대해서도 조사하고 있다. 측정항목은 길이 변화율, 동탄성계수, 초음파 전파속도 및 균열의 성장형태등이다.

(2) 새로운 촉진시험법

현재 몰탈바법이 골재의 反應性을 평가하는데 있어서 가장 신뢰할 만한 방법으로 생각되고 있다. 그러나 이 방법은 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 골재의 반응성을 빨리 그리고 간편하게 결정할 수 있는 신뢰할 만한 시험법의 開發이 실제적으로 중요하다.

骨材의 알카리반응성을 빨리 판정하고 콘크리트의 팽창거동과 균열특성을 명확히 하기위

하여 몇가지의 촉진시험법이 일본에서 제안되었다.

(a) 竹中工務店(株)방법

이 방법은 몰탈바를 초기재령에 NaOH수용액중에 침적시켜 高温, 高濕으로 유지시키는 것으로 반응과 그에 다른 몰탈바의 팽창을 촉진시키는 데 효과적이다. 시험온도는 80°C이고 침적시간은 24시간이며 NaOH수용액의 농도는 1N이다. 이 촉진시험법의 결과는 골재의 반응성시험 및 몰탈바법의 시험결과와 잘 일치하여 7일 안에 평가할 수 있다.

(b) 일본건축종합시험소법(GBRC법)

몰탈시험체(치수=4×4×16cm, 모래:시멘트=1:1, W/C=0.50, 알카리량=2.5% Na<sub>2</sub>O 당량)을 3일간 양생시킨 후 압력용기(0.5kg/cm<sup>2</sup>, 110°C)에 넣어 2시간 동안 끓인다. 끓이기 전후에 있어서 시험체에 생긴 균열, 초음파 전파속도와 동탄성계수의 변화를 바로 검사한다. 초음파전파속도와 동탄성계수의 지하율이 각각 5%, 15%이하일 때에는 시험골재는 無害하다고 판단한다.

(c) 鳥取大學법

몰탈시험체(치수=4×4×16cm, 시멘트:모래=1:2.25, W/C=0.45, 전알카리량=2.0% Na<sub>2</sub>O 당량(NaOH에 의함))를 오토클레이브처리한다. 몇개의 시험결과에 근거한 시험조건은 다음과 같다. 즉 오토클레이브 킬른내의 壓力=0.1MPa, 오토클레이브처리시간=4시간, 시험체의 재령=타설후 24시간, 길이변화의 측정=오토클레이브처리후 24시간이다. 오토클레이브처리 동안 발생된 팽창은 보통 저장조건에서 발생된 팽창의 약 30%에 해당한다. 골재의 반응성을 평가하는 기준으로써 팽창한계 0.02%가 제안되었다.

콘크리트시험체(치수=10×10×40cm)는 시험육조(20°C)에 침적시킨 후 電氣爐(60°C)에서 건조되는 사이클을 반복하여 받는다. 길이변화율, 동탄성계수와 초음파전파속도의 低下率을 AAR에 의한 劣化도를 평가하기 위하여

50사이클후에 측정한다. 만약 팽창이 0.1%보다 크고 相對동탄성계수가 80%이하일 때에는 콘크리트내에 有害한 균열손상이 발생한 것으로 평가한다.

(d) 京都大學법

콘크리트시험체(치수=10×10×40cm)는 40°C, RH 100%에서 12시간동안 그후 20°C, RH60%에서 12시간 노출시키는 사이클을 반복하여 받는다. 이러한 濕潤과 乾燥의 노출법은 일본에서 예상되는 가장 극심한 노출조건을 모델화한 것이다. 이러한 시험조건하에서 여러가지 補修方法(防水型和 發散型)이 일본의 실제적인 노출조건에서의 특성에 대하여 검사된다.

### 2.3 새로운 건설에 있어서 알카리·골재반응의 防止法

建設省에서 제안한 잠정안에 따르면 새로 건설된 콘크리트구조물의 AAR을 방지하기 위하여 다음 조치중 한가지를 취해야 한다고 규정하고 있다.

- 1) 화학법 또는 몰탈바법중 어느 방법에 의하여 無害하다고 판정된 골재를 사용할 것.
- 2) Na<sub>2</sub>O 당량 0.6%이하의 低알카리형의 포틀랜드시멘트를 사용할 것.
- 3) 슬래그량이 30~60% 및 60~70%인 고슬래그시멘트B종 및 C종과 플라이애쉬량이 10~20% 및 20~30%인 플라이애쉬시멘트B종 및 C종과 같은 적절한 혼합시멘트를 사용하거나 고로슬래그나 플라이애쉬와 같은 혼화재를 사용할 것.
- 4) 콘크리트의 全 알카리량을 조절할 것, 포틀랜드시멘트를 사용할 경우 콘크리트배합내의 全 알카리량이 Na<sub>2</sub>O당량으로써 3kg/m<sup>3</sup>을 초과해서는 안된다.

### 2.4 알카리·실리카반응에 콘크리트구조물의 損傷과 補修

#### (1) 現場調査

被害를 입은 콘크리트구조물의 조사는 일반적으로 구조물로부터 절단채취한 코아에 대하여 행하여진다. 조사항목은 40°C, 100% RH에서 코아의 팽창을 측정하는 외에 광물학적 검사에 의한 암석의 판정, 알카리량의 측정, 균열폭과 깊이의 측정, 鐵筋의 부식검사, 코어 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수, 구조물의 조음과전파속도등이다. 피해를 입은 구조물로부터 채취한 반응성골재는 古銅輝石安山岩은 일본에서 가장 보편적인 반응성골재이다.

현장조사결과와 일부는 다음과 같다.

ASR에 의한 균열과 損傷度는 전 粗骨材量 중에 섞여있는 古銅輝石安山岩의 혼합비율과 알카리량에 크게 좌우된다. 큰 균열이 발생된 콘크리트구조물로부터 채취한 코아의 팽창량은  $500 \times 10^{-6}$  이상이었다. 폭이 넓은 균열일수록 깊이가 깊은 경향이 있으나 대부분의 조사된 절근콘크리트 구조물에 있어서 균열깊이는 콘크리트 피복두께 범위 내에 있었다. 콘크리트의 압축강도는 ASR에 기인하여 저하하나 모의 載荷試驗에서 측정된 變形으로 부터 추정된 탄성계수는 그렇게 작지않았다. 코아에서 측정된 탄성계수가 작은 이유는 구조물내에 존재하고 있던 拘束이 해제되는 것에 기인하는 것 같다.

## (2) 코팅에 의한 補修

AAR을 방지하는 효과적인 방법은 아직까지 확립되어 있지 않다. AAR이 발생하기 위해서는 水分이 필요하므로 AAR을 방지하기 위해서는 防水하는 것이 효과적이라는 것을 의미한다.

여러가지 종류의 코팅재료들이 일본에서 시험되었다. 코팅재료의 일부는 AAR에 의하여 손상된 교량구조물에도 적용되었다. 폴리우레탄수지와 에폭시수지가 防水코팅재로서 선택되었다. 폴리부탄수지, 시랑수지와 폴리머시멘트가 透濕코팅재로써 선정되었다. 폭이 0.3mm 이상의 균열은 코팅전에 통상적으로 주입되었다. 코팅으로 보수하기 전에 균열폭과 깊이,

鋼材의 腐蝕, 사용된 반응성골재, 구조물에서 채취한 코아의 팽창등이 조사되었다. 코팅 후에는 구조물표면에서 변형량 측정이 정기적으로 행하여졌다.

코팅후의 變形度로 부터 코팅재의 효과를 판단할 때에는 코팅할 당시의 코아의 殘留팽창뿐 아니라 숲 팽창에 대해서도 고려하여야 한다. 현장실험으로 부터 다음과 같은 결론이 가능하다.

(a) 방수코팅재는 별로 효과가 없다. 왜냐하면 橋脚이 코팅한 후에도 크게 팽창하여 다시 균열이 발생하였다.

(b) 폴리부탄의 효과는 현 단계에서 결정할 수 없다. 왜냐하면 橋臺가 코팅후 다시 균열이 생기지 않았으나 잔류팽창이 매우 작기 때문이다.

(c) 사랑수지가 橋脚에는 효과적인 것 같다. 그러나 코팅은 팽창의 終半期에 적용되었으며 따라서 사랑수지의 효과를 결정하는 데에는 더 많은 정보가 필요하다.

(d) 폴리머시멘트가 橋脚에 대해서는 잘 작용하는 것 같다. 코어의 잔류팽창이 매우 크기는 하지만 橋脚안에서 발생한 變形은 온도변화에 기인하는 것 외에는 나타나지 않았다. 그러나 이러한 결과는 코팅후 1년내의 결과에 한정된 것이다. 따라서 효과를 판단하기 위해서는 더 많은 관찰이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- 1) S.Nixhibayashi, "Alkali-Aggregate Reactivity in Japan-A Review", Proceedings of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reacation, Kyoto, Japan, 1989.
- 2) 尹在煥, "알카리·骨材反應에 의한 콘크리트의 異常膨脹" 레미콘, 6월, 1986.
- 3) 李利衡, 尹在煥, "알카리·骨材反應에 의한 콘크리트構造物의 劣化現象" 레미콘 12월, 1989.