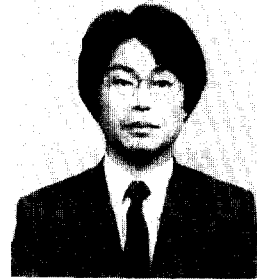


콘크리트의 알칼리·骨材反應과 對策

Alkali-Aggregate Reaction and Preventive Measures



著 者 韓 宰 煥*

1. 머리말

1940년 미국서부의 콘크리트댐의 성능저하現象이 T.E.Stanton에 의해 사용 骨材中の 실리카鐵物과 시멘트 중의 알칼리와의 反應에 의한 알칼리·骨材反應(Alkali-Aggregate Reaction, 이후 AAR로 表記)으로 報告¹⁾가 된 뒤로 약 20년간 일종의 流行처럼 많은 연구가 이루어 졌다. 그러나 미국이외의 나라에서는 AAR에 관한 연구는 비교적 低調했으나 덴마크, 독일, 영국 등에서 이 현상의 발생이 확인된 1970년대에서 부터 유럽諸國에서 연구가 활발하게 이루어졌다. 그후 최근 10년간 日本에서 이 문제가 크게 발생되어 관심이 고조됨과 동시에 다시 리바이벌된 感이 있다.

AAR에 관한 國際會議도 1974년 덴마크의 코펜하겐을 址로 시작되어 제8차 회의가 1989년 日本 京都에서 개최되었으며 제9차 회의가 1992년 영국 런던에서 개최될 예정이다.

특히 1983년에 행해진 덴마크大會의 參加國은 20개국에 달하여 이 會議에서 보고된 제2차 세계대전후의 콘크리트 構造物의 AAR에 의한 세계적인 피해사례를 그림

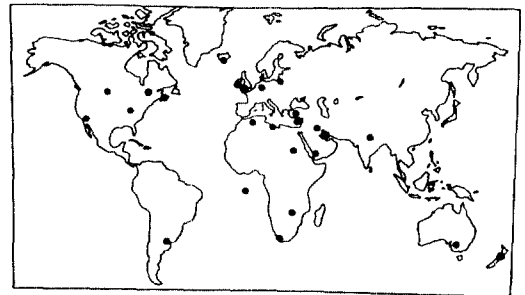


그림 1. 1982년까지 보고된 알칼리·골재 반응에 의한 손상사례

1에 나타낸다. 이와같이 1970년대에 들어와 AAR에 의한 피해가 세계적으로 急增하고 있으며 1980년대에는 日本에서 이 反應에 의한 被害가 다수발생하였다. 영국에 있어서는 1976년 사용실적이 있는 骨材를 사용하여 건설된 變電所의 콘크리트 기초부분에 AAR의 징후가 발견되기까지는 영국에서는 이와같은 反應에 의한 被害가 없는 것으로 믿었던 事實은 1951년 日本에서 처음 AAR에 의한 피해가 보고된 후 AAR은 일본에서는 존재하지 않는 것으로 인식되어 거의 無關心상태로 되어 오다가 1982년경 阪神高速道路의 橋脚에서 AAR에 의한 腐蝕이 발견되고나서 研究가 활발해진 것과 유사하다.

* 성회원, 수원대학교 건축공학과 부교수, 공박

이와같이 1970년대에 들어와서 세계적으로 AAR에 의한 콘크리트의 성능저하 문제가 다시 등장하게 된 것은 다음과 같은 배경이 있다고 생각한다.

첫째, 천연골재의 고갈 및 환경규제때문에 채석 등 사용실적이 적은 골재의 사용이 많아졌다.

둘째, 省에너지 및 환경보전을 목적으로 시멘트제조 방법이 변화되어 시멘트의 알칼리량이 증가하는 傾向이 있다.

셋째, 새로운 콘크리트기술의 개발에 따라 시멘트량의 증가, 물시멘트비의 감소 등에 따라 콘크리트 間隙溶液中的 알칼리이온濃도가 증가하였다.

넷째, 反應性골재를 判定하는 신속하고 간편한 試驗方法이 확립되어 있지 않다.

다섯째, 細骨材로써 海砂를 사용함에 따라 혼합되는 염화나트륨이 AAR를 促進하는 등의 이유라고 생각한다.

2. 알칼리·골재反應에 대하여

2.1 알칼리·실리카반응

AAR은 일반적으로 반응의 메카니즘에 따라 (1) 알칼리·실리카反應(Alkali-Silica Reaction: ASR) (2) 알칼리·炭酸鹽岩反應(Alkali-Carbonate Rock Reaction) (3) 알칼리·실리케이트反應(Alkali-Silicate Reaction)의 3종류로 분류된다. 그러나 대부분이 알칼리·실리카 反應이기때문에 AAR이라고 하면 알칼리·실리카反應을 가리킬 때가 많으며 本稿에서도 알칼리·실리카반응(이후 ASR로 표기)에 限定하여 논하기도 한다.

ASR은 골재중의 실리카(SiO_2)가 콘크리트細孔溶液중의 알칼리규속이온(Na^+ , K^+)과 반응하여 알칼리규산겔(Alkali Silicate Gel)을 만들고 이것이 물을 흡수하여 膨脹하는 반응이다. 그러나 이 반응에 있어서 수산화이온(OH^-)의 존재가 필수적이라는 것이 확실하다. ASR은 반응성골재, 알칼리, 물의 3조건이 모두 만족되었을 경우에 일어나며 어느 것 하나라도 없으면 反應은 일어나지 않는다.

실리카에 대한 알칼리의 反應메카니즘은 다음과 같

다. 結晶質실리카의 分子構造는 내부에 질서정연하게 실록산브릿지(Siloxane bridge, $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$)를 형성하여 化學적으로 안정된 구조를 형성하고 있다. 이에 비하여 非結晶質실리카의 分子구조는 化學적으로 느슨한 構造로 되어 있다. 이 경우에도 물이 존재하면 표면에 遊離하기 쉬운 H^+ 가 존재하여 약한 酸性을 나타낸다. 이들 실리카에 微量의 알칼리가 침투한 경우에는 표면의 실라놀($-\text{Si}-\text{O}-\text{H}-$)의 H^+ 가 알칼리와 치환되어 알칼리규산겔($-\text{Si}-\text{O}-\text{Na}-$ 나 $-\text{Si}-\text{O}-\text{K}-$)을 생성하는 反應이 된다. 多量의 알칼리가 작용하는 경우에는 内部的 실록산브릿지가 切断되어 더욱이 절단된 구조의 표면에서는 위에서 말한 反應이 일어나게 되어 微量의 알칼리인 경우에 비하여 분단된 알칼리규산겔이 많이 生成되게 된다.

ASR에 의한 膨脹의 메카니즘에 대해서 有力한 說로 시키는 Hansen이 제안한 침투압이론이 있다. 이 설에 의하면 알칼리규산염은 再重合하기 쉬우며, 시멘트경화체의 細孔중을 이동하기 곤란한 것에 비하여 수산알칼리는 이동이 용이하기 때문에 시멘트경화체가 일종의 半透膜이 되어 反應性골재의 주위에 膨脹壓을 미치게 된다고 한다.

2.2 반응성골재

ASR을 일으키는 알칼리반응성 礦物을 함유한 골재를 反應性골재(Reactive aggregate)라 한다. 알칼리반응성광물로서는 오판(opal), 트리디마이트(tridymite), 크리스트바라이트(cristobalite), 玉髓(chalcedony), 화산유리(volcanic glass) 또한 微晶質석영, 隱微晶質석영이나 변형된 석영 등을 들 수 있다. 위에서 열거한 알칼리반응성광물중에서 오판에서 화산유리까지의 反應性礦物이 關係하는 ASR을 「古典의알칼리·실리카반응(Classical Alkali-Silica Reaction)」이라고 부르는데 비해 石英중 결정구조가 化學적으로 불안정한 것이 關係하는 ASR을 「알칼리·석영질암석반응(Alkali-Siliceous Rock Reaction)」이라고 부르고 있다. 後者の 반응은 前者에 비해 반응속도가 대단히 완만한 것이 특징이다. 트리디마이트나 크리스트바라이트는 粉末×線回折試驗에 의하여, 기타의 반응성광물은 偏光

顯微鏡으로 확인할 수 있다. 일본에서 ASR에 의해 성능 저하가 발생한 구조물은 거의 전국적으로 분포하고 있으며, 이 反應에 관련된 岩石으로서는 사누카이트質안산암, 안산암, 유문암, 석영안산암, 차트(chert), 혈암 등을 들 수 있다. 표1에 세계적으로 주된 地域別로 反應性骨材의 岩石종류를 나타낸다.

표1. 세계의 주된 지역별 반응성골재의 암석종류

미 국	andesite, rhyllite, volcanic glass sand, chalcedony, novaculite, chert, opal, silicious limestone, chalcedonic chert, opaline chert
캐나다	argillite, granite, greywacke, chert, sandstone, phyllite, limestone, dolomitic limestone
독 일	opaline sandstone, flint
영 국	chert, flint
덴마크	flint, opal-sandstone
인 도	quartzite, quartz sandstone, basalt, phyllite, chlorite sandstone
일 본	andesite, chert
기 타	opal(오스트레일리아), chalcedony(中國), chert(키프로스, 이라크)

() andesite(안산암), argillite(질관암), basalt(현무암), chert(차트), chalcedony(玉髓), chlorite(綠泥石), dolomitic limestone(도로마이트질 석회암), flint(火打石), granitic 화강암), greywacke(硬砂岩), limestone(석회석), novaculite(은마질판 석영), opal(opal), phyllite(片板岩), quartzite(마석), rhyllite(유문암), sandstone(사암), volcanic glass(화산유리)

2.3 알칼리

AAR에 필요한 알칼리는 콘크리트의 細孔溶液중에 포함되어 있는 알칼리 금속이온(Na^+ , K^+)이다. 시멘트 페이스트중의 細孔溶液중에는 비침과 동시에 高濃度의 OH^- , Na^+ , K^+ 이온이 溶出한다. 시멘트의 水和反應에 의하여 생성하는 Ca^{++} 는 세공용액중에 비침초기에 조금 증가하나 Na^+ , K^+ 의 농도가 증가함에 따라 급속히 감소하는 것이 관찰되고 있다(그림 2).

이들 알칼리는 콘크리트의 使用材料에 포함되어 있는 외에 海水나 제설제 등에 함유되어 있는 알칼리와 같이 콘크리트가 경화한 후에 외부로부터 공급되는 것도 있다.

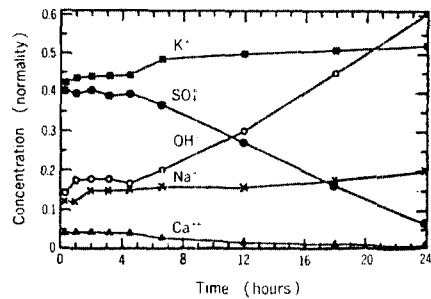


그림2. 재령1일까지 시멘트페이스트로부터 추출한 세공용액중의 성분변화

콘크리트용 사용재료로서는 시멘트, 骨材, 물, 혼화제나 혼화제 등이 있으나 특히 알칼리량에 주의하여야 할 것은 시멘트이다. 영국에서는 AAR에 의한 콘크리트 구조물의 피해가 확인된 것을 계기로 하여 시멘트의 알칼리량을 감소시키려는 努力이 계속되었다. 일본에서도 1986년에 알칼리량(Na_2O 환산) 0.6%이하를 보증하는 低알칼리형의 시멘트가 規格化되었다.

2.4 알칼리·실리카反應에 의한 損傷

ASR에 의하여 골재표면과 골재중의 空隙에 알칼리 규산염이 형성된다. 이 反應生成物의 組成은 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{++})의 확산속도가 다르기때문에 시간적으로 변화하여 초기단계에서는 高알칼리형(Na^+ , K^+ 을 많이 함유한 것), 후기에서는 高칼슘형(Ca^{++} 를 많이 함유한 것)이 된다.

반응을 일으킨 콘크리트구조물의 内部균열면이나 콘크리트표면 더욱이 골재내부의 空隙이나 균열부분에는 白色의 反應生成物(白色 gel)이 종종 보인다(사진1). 또한 골재주변에는 반응에 의하여 검게 변색한 부분(反應環: reaction rim)이 확인된다(사진2).

반응生成물은 골재주위나 골재내부에 膨脹壓을 미쳐 콘크리트를 팽창시키거나 콘크리트의 균열과 골재의 균열을 발생시킨다. 콘크리트의 팽창은 部材의 뒤틀림, 부재간의 段差나 국부파괴를 발생시킨다. AAR에 의한 균열과 팽창은 反應이 현저하게 진행되는 비에 젖는 부분이

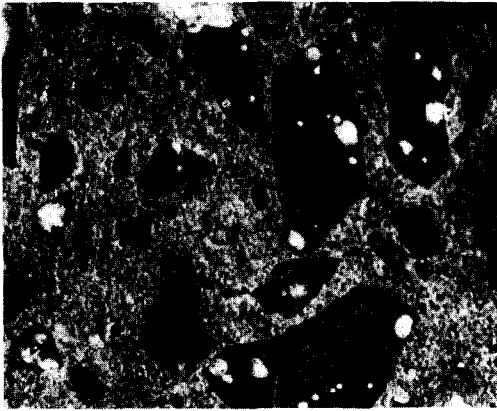


사진1. 침출한 겔

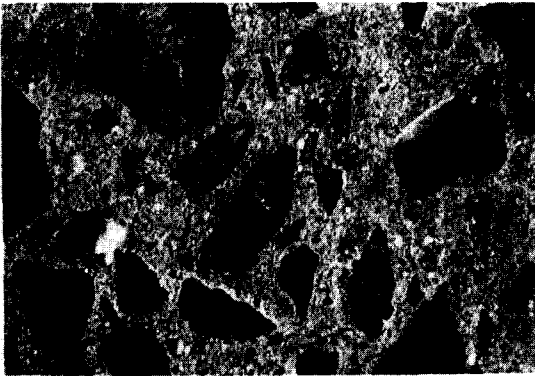


사진2. 반응환

나 콘크리트 내부의 수분이동에 의해 알칼리가 농축하는 콘크리트 표면에 현저하게 되는 傾向이 있다. 콘크리트 표면에 나타나는 균열의 形狀은 콘크리트 팽창의 拘束條件에 영향을 받는다. 콘크리트의 팽창이 구속되지 않은 無筋콘크리트의 경우에는 불규칙적인 거북이 등과 같은 균열(map cracking)이 생긴다(사진3).

기둥과 보와 같이 材軸方向의 변형이 구속된 경우에는 재축방향으로 균열이 발생하여 구속된 방향과 직교하는 방향으로 膨脹壓이 해방된다. 또한 기둥과 보에 생긴 균열의 깊이는 피복콘크리트 부분에서 멈추고 있는 것 같다 이것은 内部콘크리트의 변형이 스티럽이나 후프철근에 의하여 구속되어 있기 때문이다. 표면균열의 폭은 피복두께가 클수록 커지는 傾向이 있다.

주변으로의 面內변형이 구속된 벽과 슬래브의 경우에



사진3. 알칼리·실리카반응에 의한 균열

는 팽창압은 面外로 해방되어 콘크리트 表面層은 popout하여 비늘 모양으로 박리하는 균열과 단면을 형성하며 표면은 map cracking의 양상을 띤다.

2.4 알칼리·골재반응의 防止對策

AAR을 방지하는 기본방침은 AAR이 일어나기 위한 3가지 조건, 즉 반응성골재, 충분한 알칼리량, 충분한 수분의 어느 것 하나라도 만족시키지 않는 것이다. AAR에 의한 被害의 防止對策으로써 일반적으로 다음과 같은 사항을 들 수 있다.

(1) 반응성골재를 사용하지 않는다.

충분한 使用實績이 있는 골재를 사용하여야 하며 反應性이 의심스러운 경우에는 반응성을 판정하는 試驗을 실시하여 反應性骨材를 사용하지 않도록 하는 것이다. 그러나 지리적, 경제적인 여건 등으로 사용하지 않을 수 없을 때에는 다음 항에 기술하는 方法을 사용한다. 今後의 과제로서는 國內產骨材의 알칼리반응성有無에 대한

폭넓고 지속적인 調査, 국내실정에 맞는 觀望시험법 및 早期觀望법 的 확립, 規格 등에 있어서 檢査제도의 확립 등이다.

(2) 콘크리트중의 알칼리량을 감소시킨다.

시멘트중의 알칼리량이 0.6%이하인 경우에는 AAR은 발생하지 않는다고 한다. 따라서 骨材의 反應性이 의심스러운 경우에는 KS L5201 (포틀랜드시멘트)부속서에 규정하는 알칼리량이 0.6%이하의 低알칼리형시멘트를 사용하든지 또는 단위시멘트량의 감소 등으로 알칼리총량을 Na_2O 환산으로 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 이하로 하면 AAR을 억제시킬 수 있다(그림3).

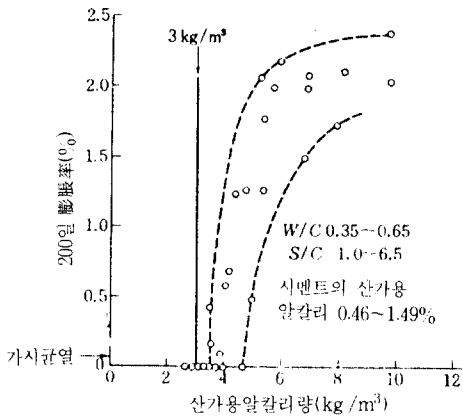


그림3. 모르타르중의 산가용알칼리량과 팽창률과의 관계

그러나 반응성골재를 깨모래로 하여 사용하는 경우에는 알칼리량이 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 이하인 경우에도 AAR에 의한 과대한 팽창이 있다는 被害도 있으며 이것은 앞에서 지적한 바와 같이 水分의 증발에 의한 콘크리트표면으로의 알칼리濃度の 集中과 관련되므로 注意를 요한다.

(3) AAR억제효과가 있는 포조란의 사용

고로시멘트, 플라이애쉬시멘트 등의 혼합시멘트나 고로슬래그분말, 플라이애쉬, 실리카흙 등의 혼화제로서의 사용은 AAR에 의한 팽창을 억제시킬 수 있다. 이와 같은 포조란物質은 콘크리트중의 알칼리총량을 감소시키고, 조직을 치밀하게 하여 알칼리금속이온과 水分의 이동을 억제하며, 반응촉진에 관여한다고 하는 Ca가 적어짐에 따라 比表面積이 큰 低칼슘형 규산칼슘수화물

(C-S-H)의 生成과 그에 따른 알칼리이온의 吸着 등으로 반응성골재를 사용한 경우라도 被害를 防止할 수 있다.

그러나 각종 포조란의 混合率과 AAR의 抑制效果에 대해서는 반응억제의 메카니즘에 대한 많은 研究¹⁰⁾에도 불구하고 명확히 밝혀진 것이 아니므로 試驗을 하여 억제효과를 확인하는 등 신중을 기할 필요가 있다.

슬래그분말을 혼합하는 경우에는 현재 미국, 영국 및 독일에서는 50% 이상의 混合率을 AAR억제책으로써 권장하고 있다(그림4 참조). 또한 플라이애쉬에 대해서는 영국에서는 25% 이상을 권장하고 있으며, 실리카흙은 10% 정도의 少量첨가라도 반응을 억제할 수 있다고 한다.

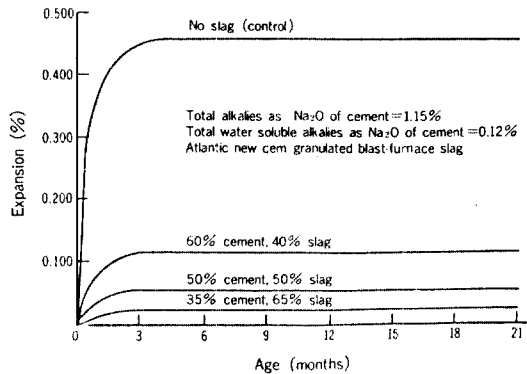


그림4. 슬래그의 혼합량과 팽창율의 관계

포조란물질의 少量添加는 팽창을 증가시키는 억제효과를 가져올 수도 있으므로 주의를 요한다. 또한 포조란반응성물질 기타의 無機質 混和材의 반응억제효과에 대해서는 ASTM C441에 그 억제효과를 확인하는 시험방법이 규정되어 있다. 이것은 반응성골재로서 Pyrex glass를 사용하고 高알칼리시멘트를 사용하여 AAR을 과대하게 발생시키는 조건을 만들어 무기혼화제를 첨가한 경우의 反應抑制效果를 팽창량의 비교로써 觀望하는 시험이다.

(4) 水分의 침투나 이동방지를 위해 콘크리트표면에 防水性이 있는 마감재로 피복

AAR에 의한 被害는 건조한 콘크리트에서는 발생하지 않는다. 따라서 건축물의 内部에서는 보통 피해가 생

가지 않는다고 하나 콘크리트가 빗물, 海水, 地下水 등에 젖거나 항상 높은 濕度에 노출되는 경우에는 上記의 (1), (2)의 조건이 갖추어지지 않도록 하여야 한다. 따라서 실외에 면하는 部材, 흙 또는 물과 접하는 部材와 海水 또는 바닷바람의 영향을 받는 部材에는 防水性의 마감재를 시공한다.

3. 맺는말

이상 본고에서는 AAR 특히 그중에서도 알칼리·실리카 反應과 그 對策에 대하여 살펴보았다. 우리나라에서 현재까지 알칼리反應性骨材 및 그에 의한 被害가 발견되지 않은 것은 무엇보다도 多幸한 일이다. 그러나 그동안 이루어진 調査結果³⁾에 의하면 ASTM C227의 모르타바법에 의해서는 有害한 팽창을 보이지 않으나 ASTM C289의 化學法에 의해서는 有害 또는 潛在的有害로 판정된 골재도 있다고 하는 것이 분명해져 장차 乾자갈의 사용이 증가할 경우 우리나라에서도 전혀 이 문제에 무관심해서는 안된다는 것을 시사하고 있으며, 無防備상태에서 많은 被害를 본 外國의 예를 답습해서는 안될 것이다.

그렇다고 해서 너무 민감하게 반응할 필요도 없으며 우리나라대로 꾸준하고 지속적인 조사와 研究가 必要하다고 하겠다. 우리나라에서의 이 分野에 대한 研究는 이제 시작했다고 해도 과언이 아닐 것이다. 洗淨하지 않은 바다모래가 콘크리트用 材料로 사용되어 철근콘크리트 구조물의 耐久性을 저해하는 것으로 크게 社會問題化되었던 지난해의 경험을 두번 다시 되풀이하지 않게하기 위해서는 이 分野에 대한 研究努力이 더욱 필요하다고 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) T.E. Stanton, "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate," Proc. ASCE, Vol.66, pp.1781~1811, 1940.
- 2) 小阪義夫, "最新 콘크리트 技術, 第5章 알칼리骨材反應", 森北出版, pp.57~75, 1990.
- 3) 日本 콘크리트 工學協會, "콘크리트 工學, 特集알칼리骨材反應", Vol.24, No.11, 1986.
- 4) 日本建築センター, "콘크리트의 鹽化物 總量規制 と 알칼리骨材反應對策", 1987年版.
- 5) 尹在煥, "콘크리트中 における 알칼리·실리카反應에 關する 基礎的 研究" 東京大學 博士學位論文, 1986.
- 6) 尹在煥, 岸谷孝一, "알칼리·실리카反應에 의한 膨脹의 모델화", 大韓建築學會學術發表會論文集, 제5권2호, pp.433~436, 1985.
- 7) 尹在煥, 岸谷孝一, "유리질 斜方輝石安山岩의 알칼리·실리카反應性", 大韓建築學會學術發表會論文集, 제5권2호, pp.437~440, 1985.
- 8) 尹在煥, "알칼리·실리카反應에 의한 팽창이 콘크리트의 강도에 미치는 영향", 大韓建築學會學術發表會論文集, 제6권, 제1호, pp.485~488, 1986.
- 9) 尹在煥, "알칼리·骨材反應에 의한 콘크리트의 異常膨脹", 레미콘, pp.9~22, 1986.6.
- 10) 尹在煥, "포조란添加에 의한 알칼리·실리카反應抑制과 그 메카니즘", 大韓建築學會論文集, 제2권, 제5호, pp.97~105, 1986.10.
- 11) 李利衡, 尹在煥, "알칼리骨材反應에 의한 콘크리트 構造物의 劣化現象", 레미콘, 제22호, pp.12~29, 1989.12.
- 12) 尹在煥, "일본에서의 알칼리·골재反應에 관한 연구동향", 콘크리트학회지, 제2권1호, pp.55~60, 1990.3.
- 13) 정재동, 이양수, 노재호, "국내쇄석골재의 알칼리-실리카 반응성판정에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회학술발표회논문집, Vol.3, No.1, pp.93~98, 1991.