

# 碎石 骨材의 알칼리-실리카 反應에 關한 實驗的 研究

(第1報 : 反應性骨材의 判定과 骨材混入率이 알칼리-실리카 反應에 미치는 影響)

## A Experimental Study on the Alkali-Silica Reaction of Crushed Stones

(Part 1 : The Identification of Reactive Aggregate and the Influence of Aggregate Content to the Alkali-Silica Reaction)

○ 윤재환\*            이영수\*\*            정재동\*\*\*            노재호\*\*\*\*            이양수\*\*\*\*            조일호\*\*\*\*\*  
Yoon, Jai Hwan    Lee, Young Su    Jaung, Jae Dong    Noh, Jae Ho    Lee, Yang Soo    Cho, Il Ho

### ABSTRACT

The Alkali Aggregate Reaction(AAR), reported first by T. E. Stanton in 1940, is a reaction between certain siliceous aggregates and hydroxyl ions present in the pore fluid of a concrete. The damages of concrete structures, deteriorated by AAR, have been reported since using the crushed stones caused by the exhaustion of natural aggregates.

This study was performed to investigate the AAR of crushed stones using chemical analysis, polarization microscope, XRD, chemical method(KS F 2545, ASTM C 289), mortar bar method(KS F 2546, ASTM C 227) and Scanning Electron Microscope(SEM) and Energy Dispersive X-ray Analysis (EDXA) of reaction products by AAR in mortar bar.

### 1. 서 론

1940년 미국의 T. E. Stanton<sup>1)</sup>에 의해 처음 보고 된 알칼리-골재반응이라 하는 것은 콘크리트의 세공용액에 존재하는 수산화이온(OH<sup>-</sup>)과 골재의 어느 특정 성분과의 반응으로 인해 콘크리트를 조기에 성능저하 시키는 요인중 하나로서, 현재 세계 각국에서는 이로 인한 피해를 줄이고자 알칼리-골재 반응에 관한 연구가 활발히 진행중이다.

알칼리-골재반응에는 몇몇 종류가 있으나 일반적으로 알칼리-골재반응이라 함은 알칼리-실리카 반응을 가리킨다. 주로 천연골재의 고칼로 쇄석을 사용하게 된 이후 발생된 알칼리-실리카반응은 비 결정질의 실리카를 함유한 특정골재와 시멘트의 알칼리 금속이온(Na<sup>+</sup> 또는 K<sup>+</sup>)이 수분의 존재하에서

반응하여 알칼리-실리카이트 겔이 생성되고<sup>2)</sup> 이 겔이 팽창하여 콘크리트의 균열 및 pop out이 발생하거나 심한 경우에는 구조물의 붕괴를 일으키는 것으로서 쇄석의 사용이 증가하고 있는 국내<sup>3)</sup>에서도 이에 대한 연구가 시급히 진행되어야 할 것이다.

본 연구는 쇄석골재의 알칼리-반응성 유무 판정을 위해 광물학적, 화학적 및 물리적 시험방법으로 실험적 연구를 실시하였다.

### 2. 실험개요

본 연구는 쇄석골재의 알칼리-실리카 반응성 판정을 위해 세계적으로 널리 사용되고 국내에서도 이미 규격화 된 화학법 및 모르타바법을 중심으로 실험을 행하였으며, 모르타바의 표면 및 내부의 반응생성물을 SEM(Scanning Electron Microscope)에 의한 관찰과 EDXA(Energy Dispersive X-ray Analysis)에 의한 성분분석을 하였다.

#### 2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 쇄석골재는 국내산 골재 3종과 국외산 골재 2종으로 하였으며, 시멘트는 자체

\* 정희원, 수원대학교 부교수, 工博  
\*\* 정희원, 수원대학교 대학원, 석사과정  
\*\*\* 정희원, 동양중앙연구소, 연구실장, 工博  
\*\*\*\* 단체회원, 同, 주임연구원  
\*\*\*\*\* 단체회원, 同, 연구원  
◆ 본 연구는 수원대학교와 동양중앙연구소가 공동 연구한 결과의 일부임.

알칼리량 0.724%를 함유한 T사 제품으로서 화학분석결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 시멘트의 화학성분 (unit : wt.%)

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	In Sol.	Ig. Loss
21.43	3.04	6.07	63.67	2.47	2.3	0.076	0.985	0.13	0.75

## 2.2 실험방법

각 골재에 대해 다음과 같은 시험방법을 적용하여 실험을 실시하였다.

- ① 광물학적 분석 : 화학분석, XRD분석, 편광현미경에 의한 관찰
- ② 화학적 시험방법 : 골재의 알칼리 잠재 반응 시험방법(화학법)(KS F 2545, ASTM C 289)
- ③ 물리적 시험방법 : 시멘트와 골재의 배합에 따른 알칼리 잠재반응 시험방법(모르타바법) (KS F 2546, ASTM C 227).

표 2의 배합조건으로 11×11×11¼in.의 모르타바를 제작하여 40℃, RH>95%의 밀폐저장용기에 저장하였으며, 모르타바의 길이팽창율은 2주마다 길이를 측정하여 계산하였다.

- ④ 알칼리-실리카반응의 암석학적 시험방법 : 반응 생성물의 SEM 촬영 및 EDXA 분석

표 2. 모르타바 배합조건

골재	A, B, C	D, E
W/C	0.4	0.6
A/C	0.75	2.0
골재혼입율(%)	30, 50, 100	100
Na <sub>2</sub> O eq. (%)	2.0	1.0
첨가알칼리	NaOH	

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 광물학적 분석결과

#### 3.1.1 화학분석

각 골재의 화학분석결과를 표 3에 나타내었다.

표 3. 각 골재의 화학성분 (unit : wt.%)

구분	골재	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ig. loss
국내	A	50.92	19.76	13.74	7.33	4.18	-	1.43	0.13	-0.51
	B	53.62	11.58	15.87	8.09	6.55	0.13	0.57	2.30	-0.45
	C	50.94	19.42	13.43	6.82	3.82	0.11	1.75	3.04	0.85
국외	D	64.86	17.90	5.80	5.05	1.64	0.31	0.06	0.13	0.83
	E	68.60	16.50	2.65	2.03	1.09	0.39	0.10	0.13	1.50

국외산 골재가 SiO<sub>2</sub>를 60%이상 함유하고 있어 화성암중에서 中性岩에 속하고 있으며, 국내산 골재는 SiO<sub>2</sub>가 52%이하에 속하는 鹼性岩임을 나타내고 있다. 특히 B골재의 경우 다른 골재 보다 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO 및 MgO의 함량이 높게 나타났다. 이는 다음 편광현미경에 의한 골재의 분석에서 감람석( 4[(Mg, Fe<sup>2+</sup>)<sub>2</sub> · SiO<sub>4</sub>] )이 관찰되어 이로 인한 것으로 판단된다.

#### 3.1.2 XRD분석결과

각 골재의 XRD분석결과를 그림 1과 표 4에 나타내었다.

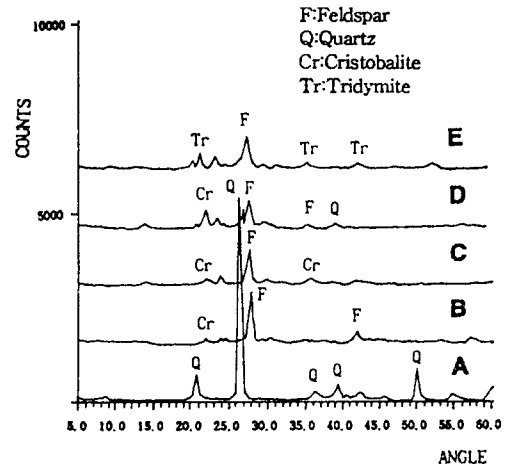


그림 1. XRD분석 결과

표 4. 각 골재의 XRD분석결과

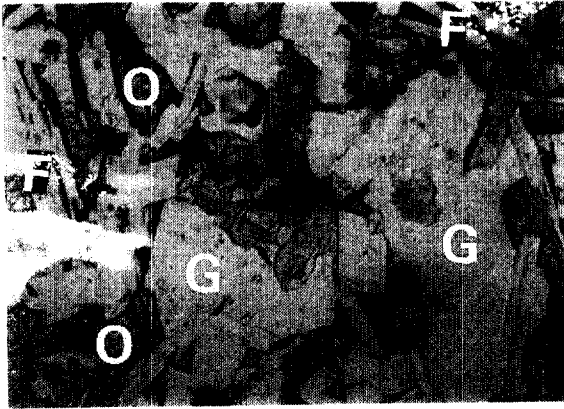
골재	A	B	C	D	E
Quartz	●	—	—	◎	—
Tridymite	—	—	—	—	○
Christobalite	—	○	○	◎	—
Feldspar	—	●	◎	◎	◎

註 : ● 1000 cps 이상 ○ 500~100 cps  
◎ 1000~500 cps — 검출되지 않음

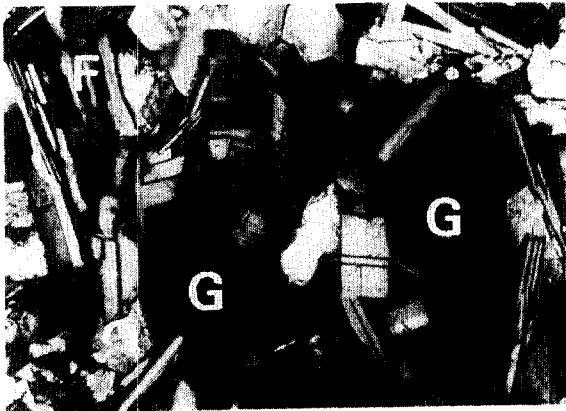
A골재는 석영이 주성분을 이루고 있으며, B, C 및 D골재에서는 알칼리-실리카 반응성광물인 Christobalite가 검출되었다. 그리고 E골재에서는 다른 골재에서는 검출되지 않은 Tridymite라고 하는 반응성광물이 검출되어 A골재를 제외한 B~E골재가 알칼리-실리카반응을 발생시킬 가능성이 높게 나타났다.

### 3.1.3 편광현미경에 의한 골재의 관찰

B골재의 편광현미경에 의한 분석을 사진 1에 나타내었다.



(a) OPEN NICOL



(b) CROSSED NICOL

F : Feldspar O : Olivine G : Glass

사진 1. B골재의 편광현미경 관찰

斑晶으로서 장석 및 감람석 등이 보이며, 石基에는 장석과 감람석 등의 사이를 非晶質의 glass가 매우고 있는 반상조직임을 알 수 있다.

### 3.2 화학법

각 골재의 화학법 시험결과를 표 5와 그림 2에 나타내었다.

XRD의 결과와 마찬가지로 A골재를 제외한 나머지 골재들이 유해 또는 잠재적유해로 판정되어 알칼리-실리카 반응성이 높은 것으로 나타났다.

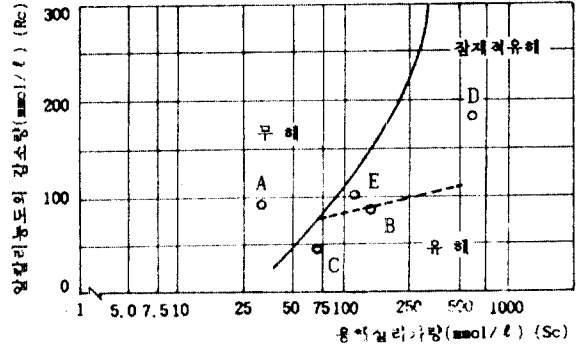


그림 2. 화학법에 의한 유해학적 구분도

표 5. 화학법 시험결과

골재 종류	용해실리카량 (Sc) (mmol/l)	알칼리농도 감소량(Rc) (mmol/l)	Sc/Rc	판 정
A	33.11	95.83	0.346	무 해
B	121.99	87.50	1.394	유 해
C	72.15	42.50	1.698	유 해
D	615.10	185.10	3.323	잠재적유해
E	119.80	100.20	1.196	잠재적유해

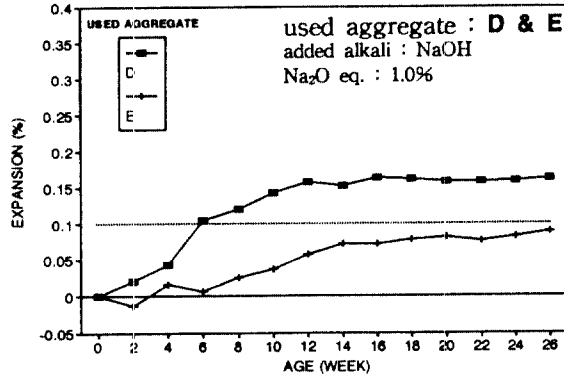
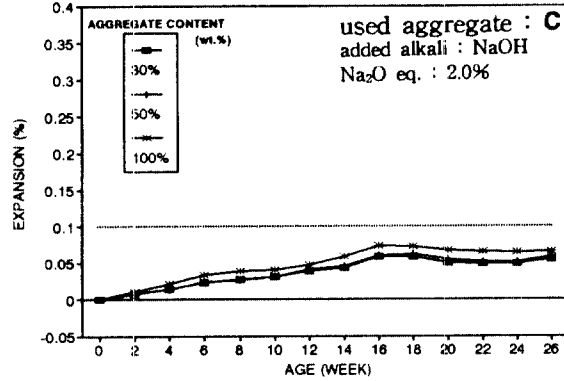
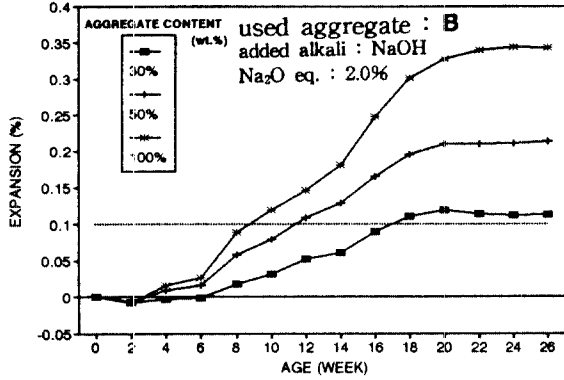
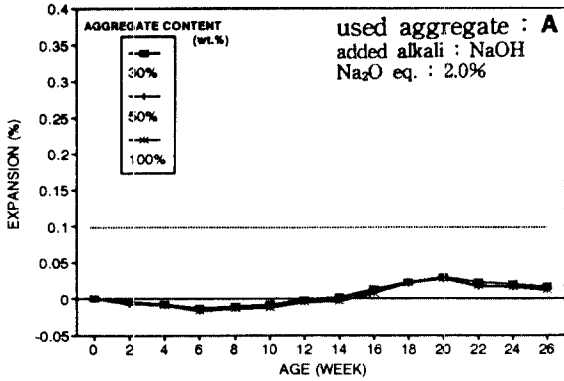
### 3.3 모르타바법

5종류의 골재를 사용하여 골재의 혼입율을 바꾸어 제작한 모르타바의 재령 6개월까지의 팽창을 그림 3에 나타내었다.

A골재의 경우 화학법과 마찬가지로 무해로 판정되었다. B골재의 경우 골재혼입율 30%, 50% 및 100% 모두 6개월 이내에 길이팽창율 0.1%를 넘어 알칼리-실리카반응이 있는 것으로 판단된다. 모르타바의 팽창을 결과를 보면 골재의 혼입율이 증가할수록 팽창이 증가함을 볼 수 있다. 그러나 C골재 중 골재혼입율 100%의 경우는 모르타바법 유해 판정 기준인 3개월에 팽창율 0.05%를 넘었으나, 6개월에 0.1% 미만의 팽창을 보임으로 화학법 결과와는 달리 무해로 판정된다. D골재와 E골재의 결과를 보면 D골재의 경우 유해로 판정되나 E골재는 장기결과를 보고 판단할 필요가 있다.

### 3.4 모르타바의 SEM관찰 및 EDXA

B골재 및 D골재로 제작된 모르타바중 가장 높은 팽창을 보인 모르타바를 절단하여 건조시킨 후 모르타바의 표면으로 침출되거나 내부의 세공으로 스며든 반응생성물의 성분을 SEM관찰 하였다. SEM



에 의해 관찰한 결과, 사진 2와 사진 3에 보이는 반응생성물이 관찰되었으며, 그 성분을 분석한 결과, 사진 2에서는 Na<sup>+</sup>이온은 검출되지 않았고 Si<sup>4+</sup>, K<sup>+</sup> 및 Ca<sup>2+</sup>이온이 검출되었으며, 사진 3에서는 Na<sup>+</sup>, Si<sup>4+</sup>, K<sup>+</sup> 및 Ca<sup>2+</sup>이온이 검출되어 알칼리-실리카반응에 의한 반응생성물임이 확인되었다.

사진 2(c)와 사진 3(a), (b), (c)에 보이는 반응생성물(massive gel)은 시멘트의 알칼리와 골재 중의 非結晶質 실리카가 반응을 하여 생성된 1차 반응생성물이고 사진 2(a), (b)에 보인 반응생성물(spongy gel)은 1차 반응생성물이 변형된 2차 반응생성물이다.<sup>8)</sup>

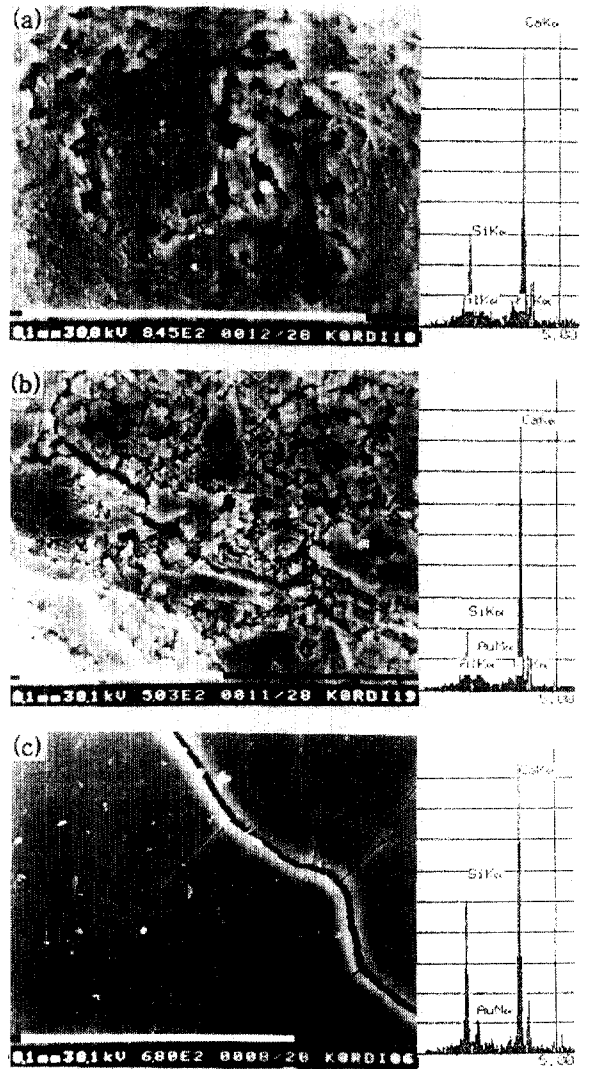


사진 2. B골재로 제작된 모르터바 내부의 반응생성물

그림 3. 각 재령에 따른 모르터바의 길이팽창률

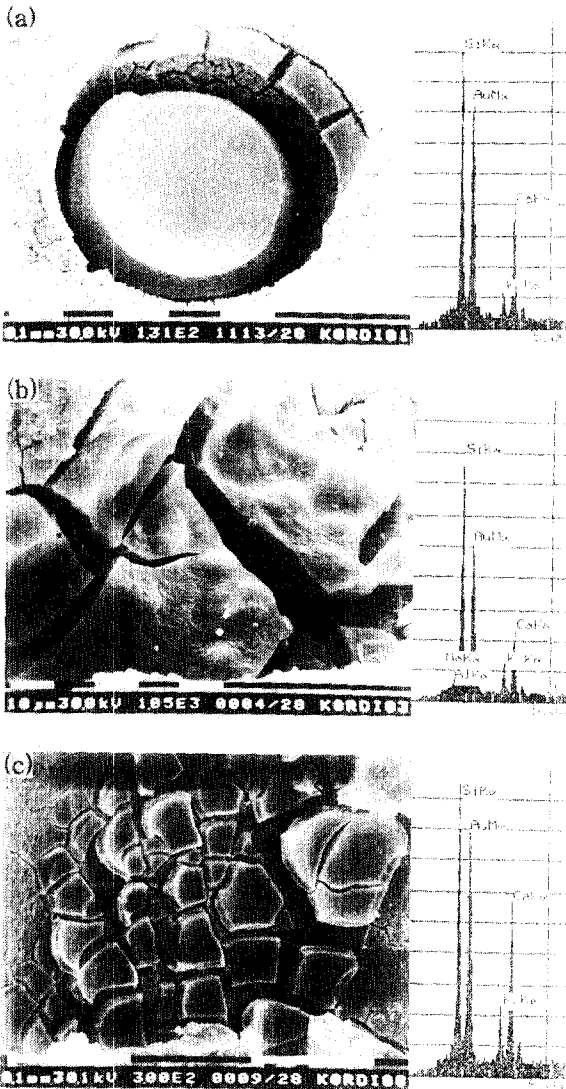


사진 3. D골재로 제작된 모르타바 내부의 반응생성물

#### 4. 결 론

국내산 골재 3종과 국외산 골재 2종에 대하여 알칼리-골재 반응성 시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광물학적 분석결과 A골재를 제외한 B, C, D 및 E골재가 알칼리-골재 반응성 광물인 Tridymite 또는 Christobalite를 함유하고 있었다.
- 2) 화학법 시험결과 A골재를 제외한 B, C, D 및 E골재가 유해 또는 잠재적 유해로 판정되었다.

3) 모르타바법 시험결과 국내산 B골재와 국외산 D골재가 유해로 판정되었으며, 골재의 혼입율이 증가할 수록 팽창량도 증가하였다.

4) B골재와 D골재로 제작된 모르타바의 표면 및 내부의 세공으로 스며든 반응생성물을 SEM관찰한 결과 1차 및 2차 반응생성물이 관찰되어 그 반응생성물을 EDXA에 의해 성분분석한 결과,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{K}^+$  및  $\text{Ca}^{2+}$  이온 검출되어 알칼리-실리카 반응에 의한 반응생성물, 즉 알칼리-실리케이트 겔입이 입증되었다.

5) 국내에서도 알칼리-골재반응성을 나타내는 반응성골재가 존재하므로 알칼리-골재반응에 관한 연구가 활발히 진행되어 이에 대한 대책을 강구해야 되겠다.

#### 참 고 문 헌

- 1) T. E. Stanton, "Influence of Cement and Aggregate on Concrete Expansion", Engineering News Record, 1940
- 2) T. C. Powers, H. H. Steinour, "An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction, Part 1-The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion", Journal of The ACI, Feb. 1955
- 3) 尹在煥, "전국의 콘크리트용 골재에 관한 실태조사결과", 레미콘誌, 통권제12호, 1987
- 4) 최민수 外1, "시멘트, 골재의 공급현황 및 유통구조", 콘크리트학회지, 제5권 3호, 1993
- 5) D. W. Hobbs, "Expansion of concrete due to alkali-silica reaction : an explanation", Magazine of Concrete Research, Vol.30, No. 105, Dec. 1978
- 6) 森野奎二, "알칼리 반응성 골재의岩石學的考察" 第6回 콘크리트 공학년차講演會論文集, pp241-244.
- 7) 森野奎二, "알칼리 골재 반응과 반응生成物の顯微鏡觀察", せ技年報, No.38, 1984, pp114~117.
- 8) A. Shayan and G.Quik. "Microstructure and Composition of AAR products in Conventional standard and new accelerated testing," Proceedings of 8th international conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989. 7. pp 475-482.
- 9) 川村滿紀 外3, "콘크리트 구조물의 내구성 시리즈, 알칼리 골재 반응", 技報堂出版, 1986
- 10) 中部セメントコン크리트研究會 編, 콘크리트 구조물의 알칼리 골재 반응, 理工學社, 1990