

국내 알칼리반응성골재의 조기판정법에 관한 실험적 연구

윤 재 환

〈수원대학교 부교수 공박〉

이 양 수

〈동양시멘트(주) 중앙연구소, 주임연구원〉

1. 서론

콘크리트 구조물의 조기열화 요인중 하나인 알칼리-골재반응에 의한 피해는 1940년 미국의 T. E. Stanton에 의해 처음 보고된 이후, 1970년대에 유럽 각국에서, 그리고 1983년에는 일본에서 발견되었다.

국내에서는 아직 알칼리-골재반응에 의한 피해가 보고된 적은 없으나 천연골재의 고갈로 내구성 검증을 거치지 않은 쇄석골재의 사용이 증가하고 있으며, "국내에도 알칼리반응성골재가 존재한다는 것이 밝혀진" 현실과, 래디믹스트콘크리트 및 콘크리트용 골재의 생산공장에서 시험설비 일체를 도입하고 숙련된 기술자를 상주시켜 시험하는 것이 대단히 곤란한 현실에서 새로운 골재 사용시 신속하고 동시에 절차·조작이 간단한 시험방법이 요구되고 있으며 최근 국내에서도 이러한 취지에서 신속법(KS F2825)이 정식적으로 규격화 되었다.

본 연구는 국내 알칼리반응성골재를 조기에 판정하기 위한 방법의 하나로써 신속법을 적용할 수 있는지를 검토하기 위하여 행한 실험적 연구이다.

2. 실험개요

본 연구는 국내 알칼리반응성골재에 대한 신속법의 적용가능성을 조사하기 위하여 화학법과 모르타르바법의 결과와 비교하여 상호연관성을 조사하였으며, 반응성골재에 대해서는 골재를 구성하고 있는 화학성분 및 구성광물을 검출하여 반응성 광물의 함유여부를 알아보기 위해 화학분석, XRD 분석 및 편광현미경에 의한 관찰을 실시하였다.

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 골재는 제주도지역 골재 6종과 경남지역 골재 17종으로 하였으며(그림 1), 시멘트는 자체알칼리량 0.725%(A 시멘트) 및 0.692%(B 시멘트)를 함유한 T사의 보통포

〈표 1〉 시멘트의 화학분석 (unit: wt%)

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Jg. loss
A	21.19	3.03	5.18	61.94	3.03	2.28	0.06	1.01	0.91
B	21.61	3.25	5.28	62.55	3.16	2.42	0.06	0.96	1.11



〈그림 1. 골재의 채취위치〉

틀렌트시멘트로써 화학분석 결과를 표 1에 나타내었다.

2.2 시험방법

(1) 화학법 : 0.15~0.3mm의 쇄석골재를 1 N의 NaOH 용액과 반응시켜 HCℓ에 의한 적정으로 알칼리농도 감소량(Rc)을 측정하고, 중량법으로 용해실리카량(Sc)을 측정하여 $Sc \geq Rc$ 이면 유해로 판정.

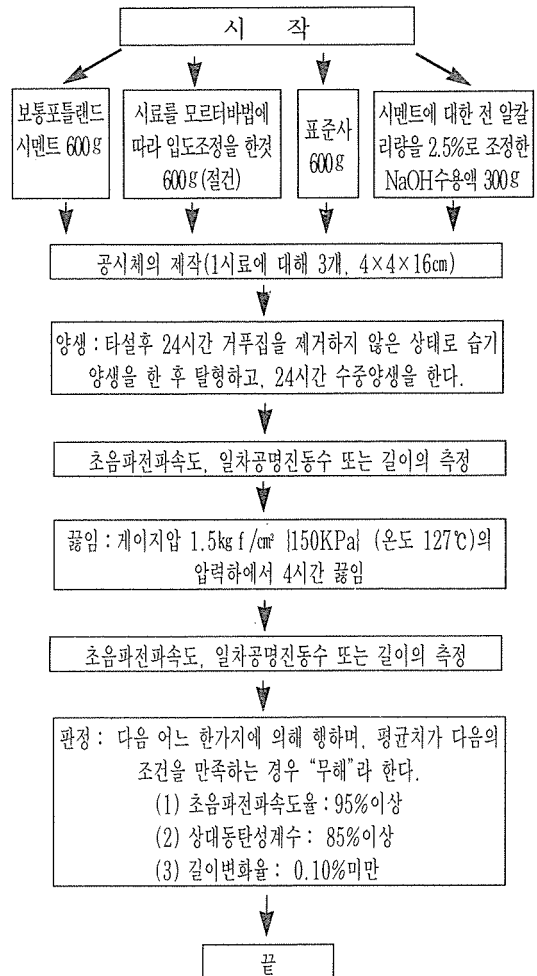
(2) 모르터바법 : 표 2의 배합으로 각각의 조건마다 3개씩 모르터바를 제작하여 40℃, RH>95%의 밀폐 저장용기에 보관하였으며, 모르터바의 길이 팽창율은 2주에 한번씩 길이를 측정하여 3개월에 0.05% 또는 6개월에 0.1%이상의 길이팽창을 유해로 판정.

〈표 2. 모르터바 배합조건〉

골재혼입율(%)	100
A/C (aggregate/cement)	2.25
W/C	0.5
Na ₂ O eq.(%)	1.2, 2.0

(3) 신속법 : 다음 그림 2와 같은 순서로 실험을 실시하였으며, 상대동탄성계수의 경우는 종진동 및 비틀림진동에 대하여 실시하였다.

(4) 광물학적 분석



〈그림 2. 신속법 순서도〉

① 화학분석 : 원자흡광분석기에 의해 정량된 알칼리(Na₂O 및 K₂O)를 제외한 나머지 성분에 대하여는 습식전분석을 실시하고 화학분석을 행하였다.

② XRD 분석 : 미분쇄한 골재시료를 2θ : 5~60°, Cu Ka (Ni filter), 40kV, 30mV, 주사속도 3°/min, full scale : 500~6000cps의 조건으로 X선 회절분석하여 정성분석 하였다.

③ 편광현미경에 의한 관찰 : XRD 분석으로는 비결정질 물질이 검출되지 않으므로 골재시료를 박편으로 제작하여 편광현미경에 의하여 구성광

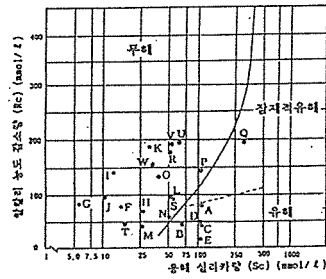
물과 암석의 판정을 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화학법

각 골재의 화학법 실험결과를 표 3과 그림 3에 나타내었다.

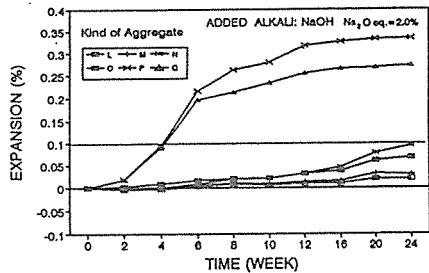
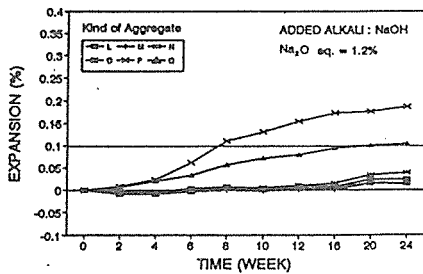
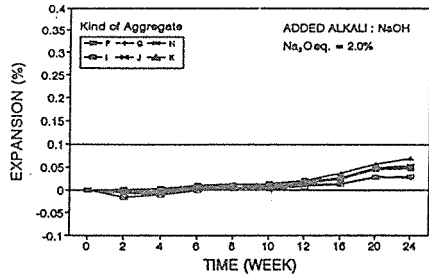
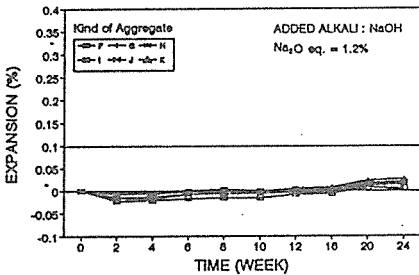
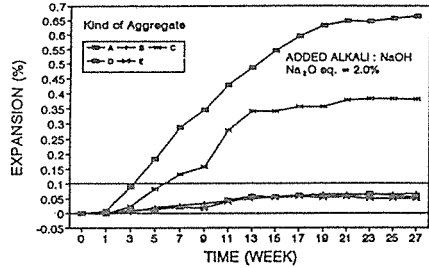
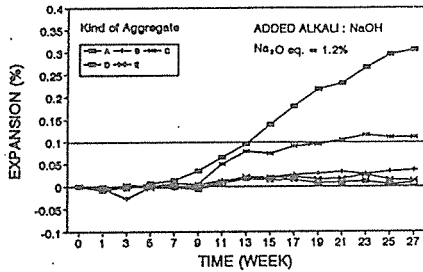
그림 3에서 보듯이 A, B, C, D, E, Q 6종은 유해로 판정되었고 나머지 골재 17종은 무해로 판정되었다.



〈그림 3. 화학법에 의한 유해판정 구분도〉

3.2 모르터바법

표 2의 배합조건으로 제작한 모르터바의 길이 변화 측정결과를 표 3과 그림 4에 나타내었다. A, C, P, Q 골재는 6개월 이내에 팽창을 0.1%를 넘어 유해로 판정할 수 있었다.



(a) Na_2O eq. = 1.2%

(b) Na_2O eq. = 2.0%

〈그림 4 각 재령에 따른 모르터바의 길이팽창률〉

3.3 신속법

신속법에 의한 판정결과를 표 3과 그림 5에 나타내었다.

3.3.1 초음파전파속도를

측정결과 유해로 나타난 것은 A, C, I, P, Q 골재인데 A, C, P, Q 골재는 모르타바법의 결과와 일치함을 알 수 있었다. 그러나 나머지 무해로 판정된 골재들의 측정값이 판정치 근처에 존재하기 때문에 측정에 세심한 주의를 요한다.

3.3.2 상대동탄성계수

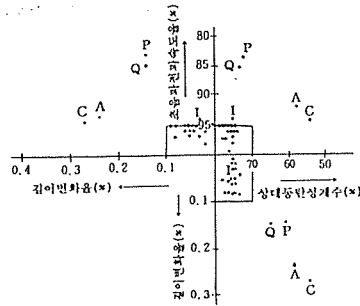
규정상 종진동에 의한 측정을 원칙으로 하여 상대동탄성계수 85% 이상을 무해라 판정하지만 실험 여건상 A~O 골재는 비틀림진동에 의한 측정을 실시하고 P~W 골재는 종진동 및 비틀림진동에 의해 실험을 실시하였다. 종진동에 의한 실험결과 P, Q 골재가 유해로 판정되어 모르타바법의 결과와 일치함을 알 수 있었고, 비틀림진동에 의한 실험결과 모르타바법에 의해 유해라고 판정된 A, C, P, Q 골재의 상대동탄성계수의 측정값이 나머지 무해라 판정된 골재들의 상대동탄성계수의 측정값과 그 차이가 큰 것을 고려해 볼 때 종진동에 의한 판정 뿐만 아니라 비틀림 진동에 의한 판정도 유효하다고 판단되며 여기에서는 타 실험결과와 비교하여 70%이하를 유해로 판정하였지만 그 판정기준 자체는 차후 더 많은 실험을 통해 정해야 한다고 사료된다.

3.3.3 길이변화율

A, C, P, Q 골재는 길이변화율 0.10% 이상을 나타내어 유해로 판정할 수 있었으며 모르타바법에 의한 판정과 일치하는 것을 알 수 있었다. JIS A 1804(신속법)에 의한 알칼리반응성골재의 판정은 초음파전파속도를, 상대동탄성계수, 길이변화율 중 어느 하나의 방법에 의하여 판정

하게 되어있는데, 이 중에서 길이변화율에 의한 판정이 가장 명확한 것을 알 수 있었다. 그러나 모든 시험에서 유해로 판정된 P 골재가 화학법에서 무해로 판정된 것은 모순되며 재검토를 요한다.

3.4 광물학적 분석



〈그림 5 신속법에 있어서 판정조건의 관계〉

3.4.1 화학분석

반응성골재에 대한 화학분석 결과를 다음 표 4에 나타내었다. 4가지 골재 모두가 SiO₂ 함유량 66~52%의 범위에 존재함으로써 화성암중에서 중성암에 속하고 있으며, 특히 A 골재의 경우 다른 골재보다 Fe₂O₃, CaO 및 MgO의 함량이 높게 나타났다. 이는 다음 편광현미경에 의한 관찰에서 감람석(4[Mg, Fe²⁺]₂·SiO₄)이 관찰되어 이로 인한 것으로 판단된다

〈표 4 반응성골재의 화학분석 결과〉 (unit : Wt.%)

골재 종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig. loss
A	53.62	11.58	15.87	8.09	6.55	0.13	0.57	2.30	-0.45
C	53.06	17.84	12.16	8.81	6.52	0.26	0.48	1.93	-0.39
P	60.22	14.48	14.66	2.68	0.67	0.00	2.34	3.58	1.21
Q	62.60	16.73	8.48	3.33	1.24	0.01	2.26	3.49	1.75

3.4.2 XRD 분석결과

시료 No.	신속법에 의한 판정결과						화학법 실험결과			모르타르바법 실험결과						
	초음파전파 속도율(%)		상대동탄성 계수(%)		길이변화율(%)		Sc (mmol /ℓ)	Rc (mmol /ℓ)	판정	팽창율(%)						판정
	측정값	판정	측정값	판정	측정값	판정				2주	4주	8주	3개월	4개월	6개월	
A	93	유해	58	유해	0.24	유해	121.91	87.50	유해	-0.005	0.007	0.034	0.095	0.179	0.295	유해
B	96	무해	82	무해	0.06	무해	72.15	42.50	유해	-0.026	-0.002	0.004	0.017	0.027	0.033	무해
C	94	유해	54	유해	0.27	유해	211.57	41.50	유해	0.004	0.004	0.006	0.074	0.095	0.111	유해
D	98	무해	82	무해	0.02	무해	102.79	50.00	유해	-0.001	-0.005	-0.007	0.018	0.015	0.005	무해
E	95	무해	79	무해	0.08	무해	114.44	20.50	유해	0.002	-0.004	-0.005	0.022	0.022	0.016	무해
F	97	무해	80	무해	0.03	무해	17.49	77.50	무해	-0.003	-0.005	-0.003	0.004	0.005	0.020	무해
G	96	무해	79	무해	0.05	무해	6.67	82.50	무해	-0.004	-0.007	0.004	0.002	0.003	0.014	무해
H	95	무해	81	무해	0.01	무해	26.81	67.50	무해	-0.014	-0.013	-0.006	-0.001	0.001	0.020	무해
I	94	유해	80	무해	0.03	무해	14.32	140.00	무해	-0.021	-0.021	-0.015	-0.008	-0.007	0.006	무해
J	95	무해	80	무해	0.03	무해	10.66	97.50	무해	-0.015	-0.017	-0.003	-0.003	-0.003	0.014	무해
K	96	무해	81	무해	0.06	무해	33.47	186.25	무해	-0.007	-0.006	0.001	0.006	0.009	0.027	무해
L	95	무해	84	무해	0.08	무해	61.61	88.75	무해	-0.004	-0.004	0.008	0.010	0.009	0.024	무해
M	96	무해	80	무해	0.02	무해	25.14	40.00	무해	-0.007	-0.009	0.000	0.001	0.001	0.014	무해
N	97	무해	88	무해	0.08	무해	50.17	55.00	무해	-0.002	-0.005	0.008	0.011	0.016	0.038	무해
O	97	무해	90	무해	0.05	무해	42.79	130.00	무해	-0.009	-0.009	0.006	0.004	0.005	0.015	무해
P	83	유해	61 (68)*	유해	0.14	유해	112.67	148.75	무해	0.009	0.024	0.110	0.154	0.172	0.186	유해
Q	85	유해	66 (70)	유해	0.14	유해	333.67	194.17	유해	0.007	0.021	0.057	0.079	0.093	0.103	유해
R	95	무해	88 (94)	무해	0.04	무해	53.45	175.00	무해	—	—	—	—	—	—	
S	95	무해	86 (86)	무해	0.09	무해	61.27	95.00	무해	—	—	—	—	—	—	
T	95	무해	90 (91)	무해	0.05	무해	19.15	48.75	무해	—	—	—	—	—	—	
U	95	무해	87 (93)	무해	0.06	무해	70.76	192.50	무해	—	—	—	—	—	—	
V	95	무해	88 (87)	무해	0.04	무해	61.52	190.00	무해	—	—	—	—	—	—	
W	95	무해	83 (91)	무해	0.06	무해	37.30	165.00	무해	—	—	—	—	—	—	

() * 는 종진동에 의한 측정결과임.

<표 3 실험 결과 일람>

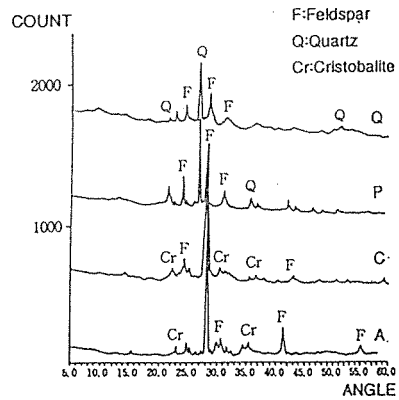
반응성골재의 XRD 분석결과를 그림 6과 표 5에 나타내었다.

〈표 5. 반응성골재의 XRD 분석 결과〉

광물 \ 골재	A	C	P	Q
Quartz	—	—	⊙	⊙
Tridymite	—	—	—	—
Christobalite	○	○	—	—
Feldspar	⊙	⊙	○	○

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

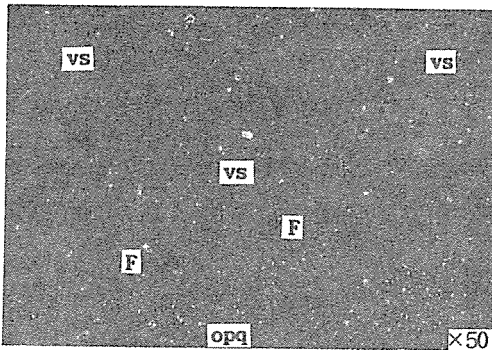
반응성 골재에 대한 XRD 분석 결과 A, C 골재는 장석과 알칼리-골재 반응성 광물인 크리스토파라이트(Cristobalite)로 구성되어 있었고 P, Q 골재는 석영과 장석으로 구성되어져 있는 것을 알 수 있었다.



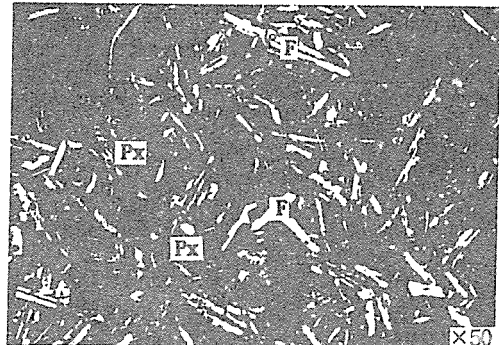
〈그림 6 반응성골재의 XRD 분석 결과〉

3.4.3 편광현미경에 의한 관찰

A, C, Q 골재의 편광현미경에 의한 관찰을 사진 1, 2, 3에 나타내었다.



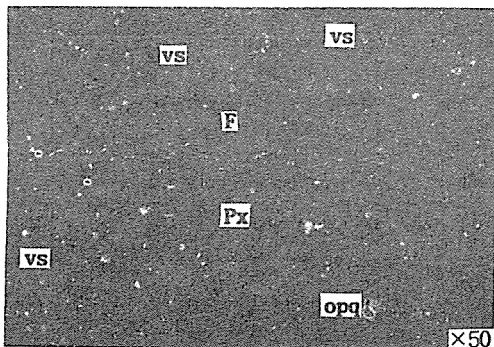
(a) OPEN NICOL



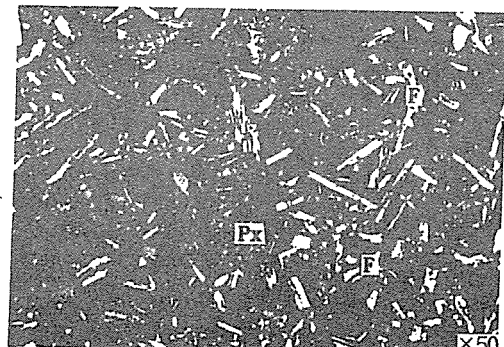
(b) CROSS NICOL

F: 장석 Px: 휘석 opq: 불투명광물 vs: 기공

사진 1. A 골재의 편광현미경에 의한 관찰



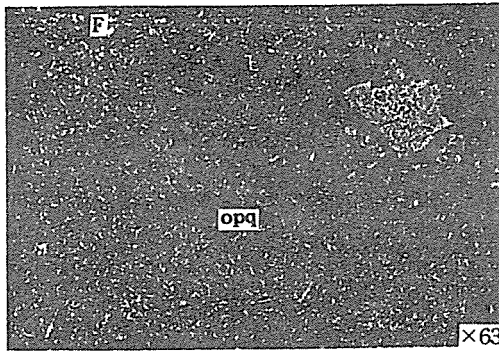
(a) OPEN NICOL



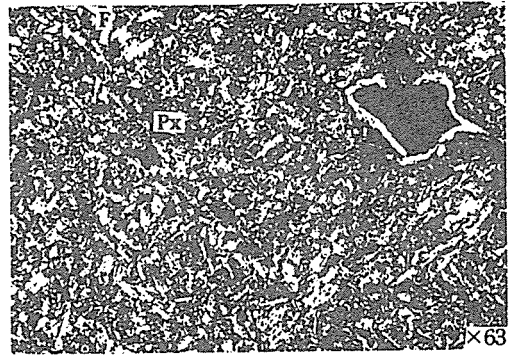
(b) CROSS NICOL

F: 장석 Px: 휘석 opq: 불투명광물 vs: 기공

사진 2. C 골재의 편광현미경에 의한 관찰



(a) OPEN NICOL



(b) CROSS NICOL

F: 장석 Px: 휘석 opq: 불투명광물 vs: 기공

사진 3. Q골재의 편광현미경에 의한 관찰

편광현미경에 의한 관찰결과

A, C 골재는 미립질의 사장석, 휘석, 녹염석 등으로 이루어진 현무암류로써 시편상에서 미세한 기공(vesicle)들이 관찰되고 있으며 이중 A 골재는 사장석 결정사이를 휘석과 불투명광물이 충전하고 있는 것이 관찰되었다. C 골재는 A 골재와 유사하나 국부적으로 휘석의 반정이 관찰되었다.

Q 골재는 반정에 있어서 사장석, 휘석을 함유하고, 석기에 있어서 반정의 세립광물들을 실리카광물이 매우고 있는 것을 볼 수 있어서 알칼리-골재반응을 일으킬 가능성이 있는 것으로 나타나 전술한 시험결과와 일치함을 알 수 있었다.

4. 결론

제주도지역 골재 6종과 경남지역 골재 17종에 대해 신속법을 실시하여 화학법과 모르타바법의 결과와 비교하고, 반응성골재에 대해서 광물학적 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 화학법을 실시한 결과 A, B, C, D, E, Q 골재가 유해로 판정되었으며 모르타바법을 실시한 결과 A, C, P, Q 골재가 유해로 판정되었고 나머지 골재는 무해로 판정되었다.

2) 신속법에 의한 실험결과 A, C, P, Q 골재가 유해로 판정되어 신속법에 의한 판정이 모르타바법에 의한 판정과 일치하는 것을 알 수 있었다.

3) A, C 골재는 장석과 알칼리-골재 반응성광물인 크리스토파라이트로 구성된 쇄석골재이며 P, Q 골재는 석영과 장석으로 주로 이루어진 강자갈, 강모래로써 국내의 하천골재에도 반응성 골재가 있다는 것이 처음 밝혀졌다.

참고 문헌

- 1) 최민수 외2, "골재의 需給現況과 展望", 콘크리트학회지, 제3권 2호, 1991, pp. 22-30.
- 2) 尹在換 외4, "國內一部 碎石骨材의 알칼리-실리카 反應性에 關한 實驗的 研究", 대한건축학회학술발표논문집, Vol. 13, No. 1, 1993, pp.413-416.
- 3) KS F 2825 콘크리트 생산공정관리용 시험방법 - 골재의 알칼리 실리카 반응성 시험방법 (신속법)
- 4) Koichi Kishitani, Masski Koba-yasi and Hiroshi Tamura, "DEVELOPMENT AND STANDARDIZATION OF RAPID TEST METHOD FOR IDENTIFICATION OF THE ALKALI REACTIVITY OF AGGREGATES", 한국콘크리트학회학술발표논문집, 제6권 1호, 1994, pp98-119.
- 5) 尹在換 외5, "국내산 알칼리반응성골재에의 신속법 적용가능성에 관한 실험적 연구" 대한건축학회학술발표논문집, Vol.14, No.2, 1994, pp.687-690