

콘크리트용 골재의 알카리-실리카 반응의 함량 최악조건

An Introduction of Pessimism Program for the Identification of Alkali-Aggregate Reaction

이 상 완*
Yi, Sang Wan

김 수 만**
Kim, Su Man

이 평 석***
Lee, Pyung Suk

ABSTRACT

This paper is an introduction of pessimism program for the identification of alkali-silica reaction of alkali-aggregate reaction which is known as one of a major factor of concrete deterioration. A series of gel-pat testing program was undertaken to observe the reactivity of potentially alkali-silica reactive concrete aggregates which were found to be reactive by previous petrographic examination (ASTM C 295). And then a pessimism program was performed in accordance with mortar-bar test method (ASTM C 227) with different percentage of those reactive components included in the fine aggregate source to determine the pessimism quantity.

Chert and quartzite were found to be major components of reactive mineral/rock, and the pessimism condition for chert was about 3%, even though the test was performed with up to 25% of the component. In the case of quartzite, however, the mortar-bar expansion appeared to be directly proportional to the amount of quartzite sample with increasing tested quantity up to 35%. Both of the expansion results were well within 3 and 6 month specified maximum limitation of 0.05% and of 0.1%, respectively.

1. 서론

콘크리트용 골재의 알카리-실리카 반응은 1940년 미국의 T. E. Stanton에 의해 최초로 보고된 이래 국내에서도 수년 전부터 건설경기의 활성화에 따른 천연 골재의 부족으로 쇠석골재의 사용이 급증함에 따라 알카리-골재반응에 대해 관심을 가지게 되어 체계적인 연구가 수행되고 있다. 알카리-골재반응에는 알카리-실리카반응, 알카리-실리케이트반응 및 알카리-탄산염암반응 등이 있으며, 이들은 제각기 다른 반응기구를 가지고 있지만 공통적으로 반응성 골재와 시멘트의 알칼리 성분이 물의 존재 하에 팽창성 물질을 생성하여 콘크리트의 주변에 팽창압을 형성하고, 이로 인하여 콘크리트에 거북등 모양의 균열을 유발하며 궁극적으로 내구성을 저하시키는 요인으로 알려져 있다.

* 정회원, (주)코센 건설재료기술실, 부장

** 정회원, 수원대학교 토목공학과, 부교수

*** 정회원, (주)코센, 부사장

중동지역의 건설현장에서도 지역에 따라서는 유해한 성분을 다량 함유하고 있기 때문에 엄격한 품질의 요건을 필요로 하는 현장에서는 시방규정에 부합하는 골재류를 찾는 데 많은 노력을 투자하며, 그 중 알카리-골재반응에 대해서도 많은 관심을 기울인다.

원자력발전소 건설에 적용되는 ASME Code에서는 콘크리트용 골재에 대해서 ASTM C 295에 의한 암석기재학적검사를 수행하고, 이의 결과에 따라 ASTM C 227, C 289 또는 C 586 등의 관련 시험을 수행하도록 요건화되어 있으며, 기타 중요 구조물에서도 이런 규정을 따르도록 하고 있다.

본 연구는 외국의 건설현장에서 콘크리트용 골재원 조사 및 품질관리 업무 수행 중 알카리-실리카 반응성 골재의 종류 및 함량에 따른 팽창반응의 정도를 조사하기 위한 최악조건시험(Pessimum Program)을 수행한 경험을 기초로, 이에 대한 실험방법과 결과를 요약한 것이다.

2. 알카리-실리카 반응의 Pessimum 이론

알카리-실리카반응에 의해 팽창량에 영향을 미치는 요인은 복잡다양하며 최대의 팽창 반응을 발생 시키는 최악조건(Pessimum Condition)이 존재한다. 이런 팽창량에 영향을 주는 주요 요인으로는 시멘트의 알카리량, 콘크리트의 물/시멘트 비, 온도 및 습도, 반응성 골재의 종류, 반응성 골재의 입자크기 및 혼입률, 그리고 콘크리트의 공극율 등이 있으며, 이들의 조건에 따라 콘크리트에 미치는 영향은 다르다. 본 실험에서는 반응성 골재의 종류와 함량에 따른 팽창정도를 파악하는데 초점을 맞추었다.

3. 알카리-골재반응의 조사를 위한 시험

세계 각국에서 사용되고 있는 알카리-골재반응에 관한 시험방법들을 요약하면 표 1과 같다.

표 1 알카리-골재반응에 관한 시험방법

번호	시험명	시험 및 판정방법
1	ASTM C 295 (암석/광물학적방법)	편광현미경, 분말 X선 회절시험, 적외선 분석, E.P.M.A 시험 등을 통해서 유해한 광물/암석의 유무 및 함량 파악
2	ASTM C 227 (모르터-바법)	공시체를 온도 37.5℃, 상대습도 100%에서 3개월, 6개월 경과 후 팽창량으로 판정
3	ASTM C 289 (화학법)	골재시료와 NaOH를 반응시켜서 알카리 감소량(Rc)과 용해실리카의 양(Sc)을 구하여 판정
4	콘크리트 프리즘법 (CSA CNA 3A 23.1-M77)	온도 23±3℃, 상대습도 100%에서 습윤 3개월 팽창 : 0.02%, 건조 3개월 : 0.04%, 재령 무관 : 0.03% 이상일 때 유해 판정
5	독일법	4mm 이하 : 4% NaOH 용액 시험, 4mm 이상 : 암석학적 방법, Opal 사암 : 4% NaOH 용액 시험을 실시하고 참고표로 판정
6	Gel-Pat 법	W/C = 0.4%인 시멘트 풀 중에 골재를 넣고 Ca(OH) ₂ + 0.5N NaOH + 0.5N KOH의 용액에서 생성되는 Gel을 보고 판단
7	Gratten-Bellew 법	38℃의 수중에 길이가 일정할 때까지 담근 후 38℃ 2N NaOH용액 중에 침적, 팽창량 측정
8	중국 Autoclave 법	100℃ 4시간 장기 양생 후 6시간 10% KOH의 용액속에 150℃ Autoclave 양생 후 팽창량 측정
9	덴마크법	28일까지 수중양생 후 50℃ NaCl의 포화용액에 침적, 20℃에서 팽창 측정
10	ASTM C 586 (Rock Cylinder 법)	돌로마이트질 석회암의 알카리-탄산염암의 반응성을 소형의 원주형 코어 공시체를 제작하여 1N NaOH의 용액에 침적, 팽창량으로 판정

이들 중 일반적으로 사용되는 방법으로는 알카리-골재반응에 잠재적으로 유해한 광물 또는 암석의 유무 및 함량을 파악할 수 있으며, 골재로서의 전반적인 암석학적 특징을 파악하기 위하여 ASTM C 295 방법을 사용하며, 알카리-실리카(Alkali-Silica) 반응성의 확인을 위해서는 모르타-바의 길이 팽창을 측정하는 ASTM C 227 방법과 화학적 방법인 ASTM C 289 방법을, 그리고 알카리-탄산염암(Alkali-Carbonate Rock)의 반응성 확인을 위해서는 Rock-Cylinder의 팽창을 측정하는 방법인 ASTM C 586 등을 사용한다.

4. 시험골재의 암석기재학적검사 및 Gel-Pat 시험에 의한 반응성 물질과 반응생성물의 확인

4-1. 암석기재학적검사

알카리-실리카 잠재 반응성 물질의 종류별 반응생성물의 확인을 위한 시험을 수행하기 전에 먼저 잔골재를 구성하는 각 물질의 종류별로 시편(Thin Section)을 제작하여 암석기재학적검사 (ASTM C 295)를 실시하였다. 각 시편제작에 사용된 골재의 종류별 육안 관찰 및 편광현미경하 검사 결과, 이들 시편의 공통적인 특징은 모두가 비정질(Amorphous), 은미정질(Cryptocrystalline), 미정질(Microcrystalline) 또는 변형된(Strained) 규산염(SiO_2) 광물로 구성되며, 대부분 U.E. (Undulatory Extinction) Angle이 25° 이상, 최고 65° 까지의 강한 파동소광을 나타내었다.

사진 1은 검사용 시편의 제작광경을, 그리고 사진 2는 ASTM C 295의 편광현미경하의 시편 관찰모습을 촬영한 것이다.



사진 1 Thin-section(박편) 제작



사진 2 편광현미경 관찰

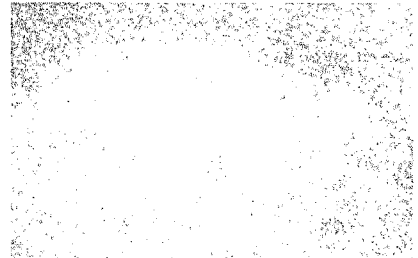


사진 3 백색 솜털모양의 Gel을 생성한 시편

4-2. Gel-Pat 시험

암석기재학적검사 방법으로 확인된 잠재 유해성 광물/암석에 대하여, 이들의 반응생성물을 직접 확인하기 위하여 제안된 절차¹⁾에 의하여 Gel-Pat 시험을 수행하였는바, 처트(Chert), 규화목(Fossil Wood) 및 여러 변종의 규암(Quartzite) 등 8종의 규산질 광물과 암석을 대상으로 실시하였다. 시편 제작 후 재령 3, 7, 8일 및 3개월에 Gel의 형성 여부를 관찰하였으며, 그 결과를 표 2에 요약하였고, 알카리-실리카 반응생성물의 대표적인 것으로 사진 3에 나타내었다.

표 2 Gel의 생성관찰

시편 번호	Silica Type	시험 회차	재령별 Gel의 관찰				
			3일	7일	14일	28일	3개월
1	Quartzite	1차	No Gel (Gel의 형성이 없음) 모든 플라스틱 시험용기에 흰색의 침전물 형성.	변화 없음	약 2mm의 Gel 1개 생성	4mm*1mm의 크기로 성장	변화 없음
		2차			No Gel	No Gel	2개의 Gel 생성(1mm*1mm, 1mm*1mm)
2	Grey Polycrystalline Quartz	1차			No Gel	No Gel	No Gel
	2차	No Gel			No Gel	2개의 Gel 생성 (2mm*2mm, 1mm*1mm)	
3	Colourless Polycrystalline Quartz	1차			No Gel	No Gel	2개의 Gel 생성 (2mm ²)
	2차	No Gel			No Gel	No Gel	
4	Orange Polycrystalline Quartz	1차			No Gel	No Gel	No Gel
	2차	No Gel			No Gel	1mm*1mm 2개 생성	
5	Chert	1차			No Gel	2개 Gel 생성(2mm*1mm)	변화 없음
		2차			총 7개의 Gel 생성, 가장 큰 것은 4mm*1mm, 기타는 1mm ²	최대 20mm*7mm(인접확산), 기타 약 4mm ² 크기 다수, 총 56개 입자 중 절반에서 형성	최대 직경 20mm로 성장, 이런 성장이 시편 표면적의 20%~25%를 점유함
6	Red/Rose Polycrystalline Quartz	1차			No Gel	No Gel	No Gel
	2차	No Gel			No Gel	No Gel	
7	Milky Quartz	1차			No Gel	No Gel	No Gel
		2차			No Gel	No Gel	2mm*2mm Gel 2개 생성
8	Fossil Wood	-			-	-	-
		2차			No Gel	Gel생성의 조짐	8개 입자 중 4곳에 7개 Gel생성(약 2mm ²)

5. 처트와 규암에 대한 Pessimum 시험

Pessimum Program은 ASTM C 227의 시험방법을 따르며, 다만 알카리반응성 물질의 함량을 다양하게 변화시켜 최대의 팽창률을 나타내는 상태를 파악하기 위한 시험으로서, 암석기재학적검사에 의해 반응성으로 확인되고 Gel Pat시험의 결과로부터 반응생성물이 분명한 처트와 규암을 대상으로 수행하였으며. 그 밖의 반응성 물질은 실제 극미량으로 잔골재에 존재하므로 본 시험 대상에서 제외하였다.

5.1 시료의 채집 및 준비

잔골재원으로부터 시험에 사용할 처트와 규암의 입자들을 채집하였으며, 이들을 시험에 사용하기 위하여 분쇄 후 체가름하여 ASTM C 227의 절차에 부합하도록 표 3과 같이 입도를 맞추었다.

처트와 규암 각 재료에 대하여 4개씩의 시편으로 구성되는 8개조, 즉 처트는 1%, 3%, 5%, 8%, 10%, 15%, 20% 및 25%의 함량으로, 그리고 규암은 1%, 3%, 5%, 8%, 10%, 15%, 25% 및 35%의 함

량으로 시편을 제작하였다. 표 4에 2개조의 시편제작에 필요한 함량별 각 재료의 양을 수록하였다.

표 3 모르터-바 시험 골재 입도

통과	잔류	중량(%)
4.75mm (No. 4)	2.36mm (No. 8)	10
2.36mm (No. 8)	1.18mm (No. 16)	25
1.18mm (No. 16)	600 μ m (No. 30)	25
600 μ m (No. 30)	300 μ m (No. 50)	25
300 μ m (No. 50)	150 μ m (No.100)	15

표 4 2개조의 시편 제작에 소요되는 골재의 양

재료	처트 또는 규암의 함량에 따른 각 골재의 소요 중량(g)									
	0%	1%	3%	5%	8%	10%	15%	20%	25%	35%
처트 또는 규암	0.0	6.8	20.3	33.8	54.0	67.5	101.3	135.0	168.8	236.3
석회암	675.0	668.2	654.7	641.2	621.0	607.5	573.7	540.0	506.2	438.7
총량	675.0	675.0	675.0	675.0	675.0	675.0	675.0	675.0	675.0	675.0

5.2 모르터-바의 제작

시험을 위한 모르터-바의 제작을 위하여 다음과 같은 재료를 사용하였으며, 이들 재료의 배합은 시멘트 1에 대해 골재 2.25 (중량비)로 하고 배합수를 첨가하여 흐름값이 105~120의 범위가 되게 한다.
 (1) 골재류 : 사용된 골재류는 분쇄하여 굵은골재로 사용되며 또한 잔골재의 입도 조정용으로 사용되는 석회암의 Cap Rock을 분쇄하여 표 3과 같이 입도를 맞추어 사용하였으며, 여기에 반응성 물질을 시험에 요구되는 양만큼 치환하여 표 4와 같이 시편 제작의 잔골재 시료로 사용하였다.

(2) 사용 시멘트 : 공사에 사용되는 것과 동일한 고알카리 시멘트 ($\text{Na}_2\text{O} : 0.32\%$, $\text{K}_2\text{O} : 0.73\%$, 총 알카리($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$) : 0.80%)

(3) 배합수 : 공사에 사용되는 것과 동일한 것으로 화학분석 결과, 염화물 297ppm(ASTM D 512), 황화물(SO_3) 342ppm(ASTM D 516), 총 고형분 930ppm(AASHTO T 26) 및 pH 7.1

5.3 시편의 보관 및 길이변화의 측정

모든 시편은 ASTM C 227에 준하여 보관하였으며, 재령 24시간, 14일, 28일, 2개월, 3개월, 4개월, 5개월, 6개월, 8개월, 10개월 및 12개월에 길이변화를 측정하였다. 이들 측정 결과 중 재령 28일, 3개월, 6개월 및 12개월에서의 결과를 표 5와 표 6 및 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

표 5 처트의 함량에 따른 길이변화

재령	처트의 함량에 대한 모르터-바의 팽창률(%)								
	0%	1%	3%	5%	8%	10%	15%	20%	25%
28일	0.008	0.012	0.026	0.006	0.003	0.000	0.008	0.013	0.007
3개월	0.012	0.022	0.030	0.017	0.009	0.007	0.013	0.007	0.007
6개월	0.015	0.023	0.034	0.023	0.012	0.008	0.012	0.011	0.010
12개월	0.018	0.022	0.034	0.021	0.011	0.008	0.010	0.010	0.010

표 6 규암의 함량에 따른 길이변화

재령	규암의 함량에 대한 모르터-바의 팽창률(%)									
	0%	1%	3%	5%	8%	10%	15%	25%	35%	
28일	0.008	0.008	0.007	0.007	0.009	0.015	0.010	0.014	0.018	
3개월	0.012	0.013	0.012	0.012	0.013	0.017	0.016	0.020	0.023	
6개월	0.015	0.017	0.018	0.017	0.016	0.021	0.025	0.025	0.029	
12개월	0.018	0.017	0.019	0.018	0.018	0.022	0.024	0.026	0.029	

5.4 시험결과 고찰

모르터-바의 팽창률은 처트 및 규암 공통으로 6개월까지는 재령에 따라 증가하고, 재령 28일에서 12개월까지 팽창률의 50% 정도를 보이며, 재령 6개월에서 12개월의 기간에서는 팽창이 거의 없다.

처트는 재령 5개월에서 3% 전후의 낮은 함량에서 0.034%의 최고의 팽창률을 보이고, 함량 8% 이상에서는 현저히 감소하며 함량에 관계없이 팽창률이 평탄하는 경향을 보인다.

규암은 처트의 경우와는 전혀 다른 양상을 보인다. 즉 모르터-바의 팽창은, 함량 8%까지는 다소 경

량이 미약하나, 그 이상에서는 규암 물질의 함량에 직접적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 최고의 팽창은 최고의 시험 함량 35%에서 재령 8개월과 10개월에서 0.03%였다.

따라서 처트와 규암 모두 재령 3개월에서의 한계치 0.05% 및 재령 6개월에서의 한계치 0.1%에 못 미친다. 그러나 규암은 35% 이상의 함량에서는 더 큰 팽창이 일어날 수 있으므로 주의를 요한다.

즉, 시험결과 처트의 Pessimum Condition은 약 3%의 함량에서, 그리고 규암은 함량 35% 또는 그 이상에서 나타나며, 지난 87회의 주간 ASTM C 295에 의한 결과 처트는 평균 1%미만(최대 약 2%)의 함량을 보였으며, 규암은 4~21% (평균 12%)의 함량을 나타내었다. 따라서 본 재료원은 통상의 상황에서는 심각한 알카리-실리카 반응의 잠재성은 매우 적다.

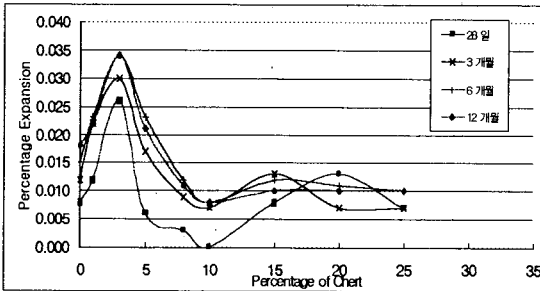


그림 1 처트의 함량에 따른 길이변화

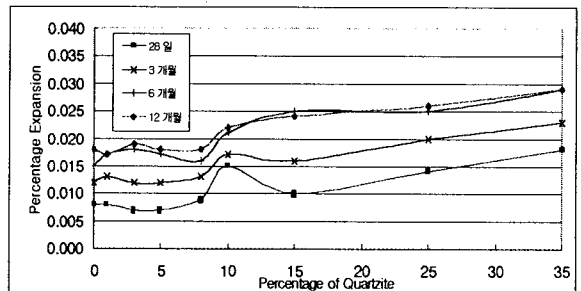


그림 2 규암의 함량에 따른 길이변화

6. 결론

알카리-실리카 반응에 유해한 물질 중 골재원에서 함유량이 상대적으로 많은 처트와 규암에 대하여 고알카리 시멘트를 사용하여 Pessimum Program을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ASTM C 295방법 상 유해성골재의 Gel-Pat시험결과 팽창성 유해물질인 Gel의 형성을 관찰하였다.
- 2) 처트는 골재 함량의 약 3%에서 최대의 팽창률을 보였으며, 규암은 함량 8%까지는 팽창증가가 미약하나 그 이상에서는 최고 시험함량 35%까지 팽창량이 비례하여 계속 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 그러나 처트와 규암에 대한 시험결과 모두 팽창률이 시방의 허용범위인 재령 3개월에서의 0.05%와 재령 6개월에서의 0.1% 이내에 있어 유해한 팽창은 발생하지 않았다.
- 4) 알카리-실리카 반응은 유해한 물질에 따라 최악의 함량상태가 존재하며, 이런 반응성 골재를 사용하여 하는 현장에서는 관련 시험을 사전에 수행하여 결과에 따라 적절히 대처하여야 할 것이다.

< 참고 문헌 >

- 1) 한국건설기술연구원, 국내 쇄석골재의 화학반응성 연구, 1993
- 2) ASTM Standards : C 33, C 227, C 289, C 295, C 586, etc.
- 3) ASME Code, Section-III, Division-2 (Code for Concrete Reactor Vessels and Containments)
- 4) Neville, A. M., Properties of Concrete, 3rd Edition, Pitman, London, 1981, pp. 158-163.
- 5) D. W. Hobbs, Expansion of Concrete due to ASR, Mag. of Con'c Res., Vol. 30, No. 105, 1978.
- 6) Sims, I., The Application & Reliability of Standard Testing Procedures for AAR, 1981.
- 7) Dong Ah Consortium, Brega New Sand Source-The Final Reports, 1986, 1987 & 1989.