

모르타르봉 시험(ASTM C 227-90)에 의한 현무암 골재 등의 팽창률 분석 연구

정지곤^{*1)} · 김경수²⁾

^{*1)}충남대학교 지구환경과학과, ²⁾한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부

An Analytical Study on the Expansion Rates of Mortar-bars (ASTM C 227-90) for Basalt and Various Aggregates

Ji Gon Jeong^{*1)} · Kyung Su Kim²⁾

^{*1)}Dept. of Geology and Earth and Environmental Sciences,

²⁾Radwaste Disposal Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

ASTM C 227-90에 의한 모르타르봉 팽창의 원인에 대해서 현재까지는 막연히 알칼리-골재 반응에 의한 것으로 알려져 왔으나 본 연구에서는 팽창의 원인을 알칼리-골재 반응에 의한 팽창 외에 젤 공극의 팽창과 골재 자체에 형성된 엽리나 쪼개짐에 물이 침투되어 물리적으로 팽창되는 간극수에 의한 팽창으로 세분하였다. 또한 총 팽창량을 이들 세분된 팽창요인별로 정량적인 계산을 실시한 바 골재에 따라서는 팽창결과가 주로 간극수에 의한 것도 있고, 알칼리-골재 반응에 의한 것도 있으며 이들이 복합적으로 작용한 것도 있음을 알게 되었다. 이러한 방법으로 현무암, 사암 등 몇몇 골재의 문제점을 분석하였다. 콘크리트는 현재 건설구조물의 대부분을 차지하고 있으며, 골재는 콘크리트의 75% 내외를 점유하고 있는 만큼 골재의 올바른 선정은 중요한 의미를 갖는다. 또한 이미 완성된 콘크리트 구조물에 골재와 관련된 문제점이 발생하였을 때 이를 치유하는데 정확한 원인을 알아내는 것이 중요하다고 보며 본 연구는 그러한 면에서 활용면을 찾을 수 있다.

주요어: ASTM C 227-90, 모르타르봉, 골재, 알칼리-골재 반응, 젤 공극, 간극수

ABSTRACT: Since the concrete covers most structures in modern architecture and it is composed of aggregates of about 75%, the appropriate selection of aggregates is valuable for the durability of concrete. A major cause of the expansion of mortar-bar measured by ASTM C 227-90 has been accounted by the alkali-aggregate reaction. This study carried out designed experiments on some aggregates including basalt and sandstone, to classify the expansion factors into the alkali-aggregate reaction, the increase of the gel pore volume, and the interstitial water that

* Corresponding author: jgjeong@cnu.ac.kr

could expand physically the cracks or foliation developed in aggregates itself. The quantitative analyses of expansion by each factor indicated that the interstitial water and/or the alkali-aggregate reaction had major roles in the concrete expansion. Thus, if the supplied aggregates have deteriorated the structural framework, it is important to investigate the exact causes through this suggested method.

Key Words: ASTM C 227-90, mortar-bar, aggregate, alkali-aggregate reaction, gel pore, interstitial water

서 론

1995년 7월 건설교통부에 의하여 콘크리트 시방서와 설계기준의 관리주체로 지정된 한국콘크리트 표준시방서 해설(한국콘크리트 학회, 1999)에 콘크리트에 사용하는 골재의 선정지침이 소개되어 있다. 이 중 내구성에 대한 규정 (6)항에 의하면 “화학적 혹은 물리적으로 불안정한 골재를 사용해서는 안된다. 다만, 그 사용실적, 사용조건, 화학적 혹은 물리적 안정성에 관한 시험결과 등에서 유해한 영향을 주지 않는다고 인정되는 경우에 이것을 사용해도 좋다”라고 규정하고 있다. (6)항에 대한 학회의 해설내용에는 화학적 안정성에 관해서만 언급이 있으며, 이에 대한 사항으로 알칼리-골재 반응이 소개되어 있다.

골재의 화학적 안정성을 위한 시험으로 현재 대표적으로 사용되고 있는 방법은 3가지가 있는데, 이에선 ASTM C 295(KS F 2548 ; 골재의 암석 분류 시험), ASTM C 289(KS F 2545 ; 골재의 화학적 반응 시험), 그리고 ASTM C 227(KS F 2546 ; 골재의 모르타르봉 시험)이 있다.

본 논문에서는 위의 3가지 중 모르타르봉 시험법에 대하여 논의하고자 한다. 즉, ASTM C 227이나 한국콘크리트학회의 콘크리트 표준시방서에서 설명한 바와 같이 모르타르봉의 팽창이 전적으로 화학적인 반응(알칼리-골재 반응)에만 의한 것인지 아니면 그 외 팽창을 야기시킨 다른 요인이 있는 것인지, 그리고 몇 가지 복합적인 요인으로 모르타르봉이 팽창된다면 그 각각의 요인에 의한 팽창량은 각각 어느 정도인가를 밝히고자 한다. 골재에 의한 팽창원인의 정확한 판단은 그

에 의하여 콘크리트 구조물에 형성된 균열의 치유방안에 정확한 해법이 될 수 있다.

모르타르봉의 팽창이 알칼리-골재반응에 의한 것만은 아닐 것이라는 생각은 그간의 모르타르봉 시험 결과에서 연유된 것이다. 즉 동일한 화학성분을 갖는 반려암과 현무암 골재의 시험에서 다공질인 후자의 팽창률이 훨씬 더 높다는 점, 화학적으로는 안정되어 있으나 열리가 매우 발달되어 물리적으로 취약한 천매암 골재의 팽창률이 불량성 골재에 가깝다는 점이다(유신애, 1997).

모르타르봉 팽창요인

ASTM C 227-90의 영문제목은 “Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)”이며, 이와 동일한 목적의 한국산업규격(KS F 2546-1993)의 제목은 “시멘트와 골재의 배합에 따른 알칼리 잠재 반응 시험 방법(모르타르봉 시험 방법)”이다. 두 제목 모두 모르타르봉 팽창요인을 알칼리-골재 반응에 두고 있으며 본문의 내용 역시 그 외의 팽창요인은 언급되어 있지 않다. 모르타르봉에 의거 시험한 많은 문헌들 역시 팽창의 결과를 모두 알칼리-골재 반응으로 간주하고 있다(Swamy, 1992; Michihiko et al., 1989; 윤재환, 岸谷孝一, 1985).

이에 대하여 정지곤과 유신애(1997)는 모르타르봉의 팽창요인을 간극수(interstitial water)에 의한 골재 자체의 물리적 특성에 의한 팽창, 젤수(gel water)에 의한 시멘트 페이스트의 팽창 그리고 알

칼리-골재반응에 의한 팽창으로 세분한 바 있다. 즉, 간극수에 의한 팽창은 천매암, 점판암, 셰일과 같이 불연속면이 매우 발달되어 있거나, 현무암과 같이 매우 다공질이거나, 운모류와 같이 완벽한 쪼개짐을 보이는 암석 및 광물이 골재로 사용된 경우로서 물의 침투로 골재 자체가 부풀어지는데 원인이 있다. 실험에 의하면 운모류는 0.61%, 천매암은 0.22%까지 팽창함을 확인하였다(Fig. 1). 겔수에 의한 겔 공극의 팽창은 동일한 부피의 시멘트 페이스트에서 w/c(물-시멘트)의 비가 낮을수록 사용된 시멘트의 양이 많아지며 동시에 수화물의 양과 겔 공극도 커진다. 따라서, 수화물의 양이 많을수록 더 큰 팽창을 보이는데, 실험에 의하면 동일한 골재에서 플로우치(flow value)가 111.6%인 경우 팽창량은 0.332mm, 115.6%인 경우 0.302mm를 보인다. 알칼리-골재반응에 의한 팽창은 계면에서의 화학적인 반응에 의한 것으로서 잘 알려진 사실이다.

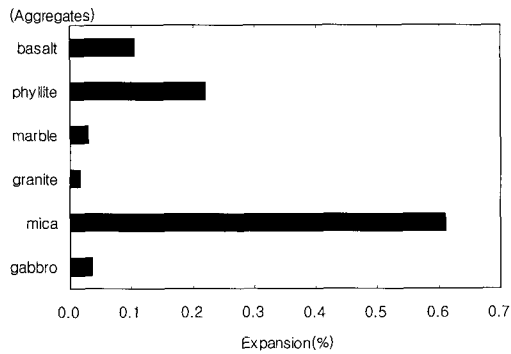


Fig. 1. Physical expansion rates of rock and mineral aggregates cured in fresh water under 50°C, 17days.

모르타르봉 팽창량의 분석

모르타르봉의 팽창요인이 알칼리-골재반응에만 의한 것이 아님이 명백하므로 앞에 소개한 3가지 팽창요인에 의한 각각의 팽창을 정량적으로 분석하기 위하여 골재와 시멘트로 이루어진 골재 모

르타르봉과 골재 없이 시멘트만으로 이루어진 비골재 모르타르봉의 팽창과 수축 요인을 각각 분석한 후 양자를 통합하는 방식을 취하였다.

골재 모르타르봉

모르타르봉의 팽창 시험단계(A→B)에서는 ASTM C 227-90의 규정대로 시험하였으며, 알칼리도는 1.2%이다. 건조·수축 시험단계(A→C, B→D)에서는 100°C미만으로 8일간 서서히 건조시켜 화학적 결합수를 제외한 간극수, 겔수 및 모세관수만 증발하도록 하였다. 24시간 및 6개월간 골재 모르타르봉을 습윤·팽창시킨 값과 이들을 각각 건조·수축시킨 값으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다(Fig. 2). Fig. 2에 소개한 약자는 본문에서 설명하였으며 단위는 mm이다. 본 논문에서 사용된 모세관 공극과 겔 공극은 Powers의 모델(Powers, 1960)을 기초로 한다.

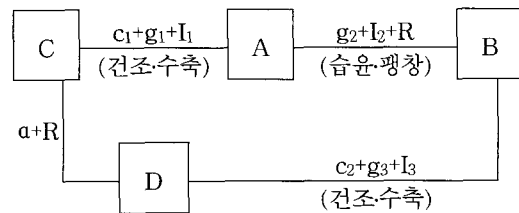


Fig. 2. The idealized illustration of 4 types of mortar-bar with aggregates and their relationship. The abbreviation is explained in this text (unit: mm).

- A : 24시간 습윤저장한 후 탈형한 모르타르봉의 길이비교 측정치
- B : A를 6개월 동안 습윤시켜 팽창된 모르타르봉의 길이비교 측정치
- C : 모르타르봉 A를 건조시킨 것의 길이비교 측정치
- D : 모르타르봉 B를 건조시킨 것의 길이비교 측정치
- c : 모세관수에 의하여 수축된 길이 변화 값
- g : 겔수에 의한 수축 및 팽창된 길이 변화 값
- I : 간극수에 의한 수축 및 팽창된 길이 변화 값
- R : 알칼리-골재 반응에 의하여 팽창된 길이 변화 값

a : C와 D에 형성된 모세관 공극에 의한 수축의 차이 값

Fig. 2에 표시한 대문자 A, B, C, D는 길이비교 측정치이며, 그 사이의 값 c, g, I, R 및 a는 해당 대문자 사이의 차이 값이다.

· A→B : 팽창에 관여한 요인은 g₂, I₂ 및 R이다. 숙성이 진행됨에 따라 수화물 양의 증가에 의해 모세관 공극은 감소한다.

$$B - A = g_2 + I_2 + R \quad (1)$$

· A→C : 수축에 관여한 요인은 c₁, g₁ 및 I₁이다. 이 때의 수축은 모르타르봉 A의 건조에 의한 수축으로서 모세관수, 겔수 및 간극수는 증발되어 수축에 관여한다. A에는 24시간 동안 형성된 수화물과 수화물 사이의 겔수, 수화물의 양이 적기 때문에 상대적으로 많은 모세관수, 그리고 골재의 엽리나 쪼개짐에 침투한 간극수가 예상되며 이들은 건조시 모르타르봉의 수축을 야기시킨다. 모르타르봉 A와 B를 비교할 때 g₁<g₂, I₁<I₂의 관계가 있다. 겔 내의 모세관수는 수축에는 관여하나 팽창에는 관여하지 않으므로 A→C 단계에는 c값이 포함되고 A→B 단계에는 없다. 이 점에 관하여는 고찰에서 자세히 설명한다.

$$A - C = c_1 + g_1 + I_1 \quad (2)$$

· B→D : 수축에 관여한 요인은 c₂, g₃, I₃이다. A→C 단계와 수축 요인은 동일하나 수축량에는 차이가 있다. 즉, B는 A를 포화상태에서 6개월 동안 숙성시킨 것이기 때문에 A와 B에 각각 형성된 수축요인은 B→D단계에서 합해진 상태로 작용된다. 따라서 g₃>g₂>g₁, I₃>I₂>I₁이다. 수화가 진행됨에 따라 모세관과 겔의 부피는 서로 역비례의 관계이기 때문에 c₁>c₂의 관계를 갖는다. B에는 알칼리-골재반응(R)에 의한 팽창량이 함유되어 있으나 R은 화학적 결합수에 의한 것이므로 B→D단계에서 수축량으로 나타나지 않는다.

$$B - D = c_2 + g_3 + I_3 \quad (3)$$

· D→C : A는 24시간 숙성시킨 것으로서 알칼리-골재반응이 없는 것으로 간주되어 C에 반영된 R값은 없다. 그러나 B는 R에 의한 팽창이 있으며

이 값은 B의 건조시 수축요인이 되지 않아 D의 길이에 포함되어 있다. c₁>c₂이기 때문에 (c₁-c₂)의 값(a) 역시 D에 반영되어 있다. 24시간 및 6개월 동안 A와 B에 작용한 팽창요인 g₁, g₂와 I₁, I₂는 B의 건조시 g₃와 I₃의 값으로 각각 수축에 반영된다. 따라서 D>C의 관계를 갖는다.

$$D - C = a + R \quad (4)$$

이상의 사실을 종합하면 다음의 식이 된다.

$$(A-C)+(B-A)=(B-D)+(D-C) \quad (5)$$

$$(c_1+g_1+I_1)+(g_2+I_2+R)=(c_2+g_3+I_3)+(a+R) \quad (5')$$

비골재 모르타르봉

비골재 모르타르봉의 팽창 및 수축요인을 분석하기 위하여 골재 모르타르봉에 사용된 시멘트의 양을 정확히 계량하여 시멘트만을 사용한 축소 모르타르봉을 제작하였다. 비골재 모르타르봉의 단면적과 플로우치는 골재 모르타르봉의 그것과 동일하다. 이 후의 실험은 골재 모르타르봉에 대한 것과 같다. 이 실험으로부터 아래와 같은 결론을 얻었다(Fig. 3). 여기에 소개한 약자의 단위는 mm이다.

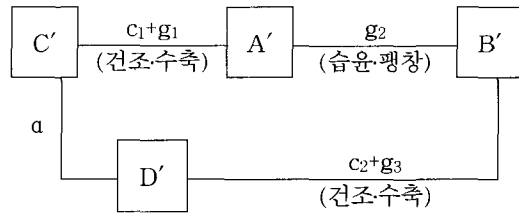


Fig. 3. The idealized illustration of 4 types of mortar-bar without aggregates and their relationship. The abbreviation is explained in this text (unit: mm).

- A' : 24시간 습윤저장한 후 탈형한 모르타르봉의 길이비교 측정치
- B' : A'를 6개월 동안 습윤시켜 팽창된 모르타르 봉의 길이비교 측정치
- C' : 모르타르봉 A'를 건조시킨 것의 길이비교 측정치

모르타르봉 시험(ASTM C 227-90)에 의한 현무암 골재 등의 팽창률 분석 연구

D' : 모르타르봉 B' 를 건조시킨 것의 길이비교 측정치

c, g, a : Fig. 2의 설명과 동일하다.

Fig. 3은 비골재 모르타르봉에 관한 것이기 때문에 골재에 의하여 팽창이나 수축에 영향을 주는 I와 R 값은 Fig. 3에서 제외된다.

· A' → B' : 팽창에 관여한 요인은 g₂ 뿐이다.

$$B' - A' = g_2 \quad (6)$$

· A' → C' : 수축에 관여한 요인은 c₁과 g₁이다. 이들은 24시간 동안 형성된 값이다.

$$A' - C' = c_1 + g_1 \quad (7)$$

· B' → D' : 수축에 관여한 요인은 c₂와 g₃이다. 이들은 6개월 동안 형성된 값이다.

$$B' - D' = c_2 + g_3 \quad (8)$$

· D' → C' : 앞에서 소개한 D-C 관계에서 R을 제외한 것이다.

$$D' - C' = a \quad (9)$$

이상의 사실을 종합하면 다음의 식이 된다.

$$(A' - C') + (B' - A') = (B' - D') + (D' - C') \quad (10)$$

$$(c_1 + g_1) + g_2 = (c_2 + g_3) + a \quad (10')$$

구하려는 값은 g₂, I₂ 및 R이며 알고 있는 값은 A, B, C, D와 A', B', C', D'이다. 두 실험치를 써서 미지수를 구한다.

$$g_2 = B' - A' \quad (6)$$

$$R = (D - C) - a = (D - C) - (D' - C') \quad (11)$$

$$I_2 = (B - A) - g_2 - R \quad (12)$$

Fig. 2와 3으로부터 유도된 식 (6), (11) 및 (12)가 성립하기 위해서는 B > A > D > C 및 B' > A' > D' > C' 여야하며 이 관계는 골재와 비골재 모르타르봉으로부터 얻은 값(Table 1)으로 확인된다.

팽창률의 분석

골재 및 비골재 모르타르봉에 의한 실험치 A, B, C, D와 A', B', C', D'는 Table 1에, 이로부터 g₂, R, I₂를 구하기 위한 계산과정은 Table 2에 각각 정리하였다.

Table 2 자료의 평균값으로 Fig. 4를 작성하였다. Fig. 4A는 유효표점길이 250mm를 100%로 할 때의 겔수(g₂), 골재의 간극수(I₂), 알칼리-골재반응(R)에 의한 팽창률을 각각 %로 나타낸 것이다.

Table 1. The comparator readings of mortar-bar with and without the aggregates (unit: mm).

Aggregates	Flow value (%)	B	A	D	C	B'	A'	D'	C'
basalt	106.2	4.608	4.320	4.193	4.001	1.932	1.804	1.673	1.596
	111.6	5.910	5.627	5.482	5.286	2.241	2.124	1.925	1.849
	115.6	6.011	5.731	5.574	5.375	2.189	2.081	1.834	1.757
phyllite	110.0	5.069	4.832	4.611	4.517	1.859	1.735	1.562	1.493
	115.6	6.202	5.978	5.712	5.611	1.985	1.890	1.631	1.563
sandstone	111.6	6.108	5.752	5.562	5.385	2.134	2.011	1.823	1.751
	112.6	6.098	5.837	5.637	5.455	2.247	2.139	1.933	1.861
marble	111.6	5.875	5.654	5.492	5.372	2.152	2.036	1.849	1.782
	112.6	5.983	5.763	5.583	5.454	2.250	2.147	1.934	1.867
granite	111.6	5.361	5.176	5.077	4.973	2.063	1.946	1.772	1.703
	112.6	5.577	5.393	5.273	5.161	2.157	2.053	1.852	1.783
mica	106.2	5.935	5.584	5.241	5.167	1.939	1.844	1.701	1.652
	110.0	5.898	5.553	5.044	4.968	1.838	1.760	1.566	1.518
gabbro	111.0	5.147	4.982	4.885	4.770	2.016	1.911	1.690	1.618

Table 2. The calculation process to obtain α , R and l_2 (unit: mm).

Aggregates	Flow value (%)	α		R	l_2	Length of (B-A) : 100%			Nominal gage length (250mm) : 100%			
		$B'-A'$	$D'-C'$			$(D-C)-\alpha$	$(B-A)-g_2-R$	g_2	R	l_2	B-A	g_2
basalt	106.2	0.128	0.077	0.115	0.045	44.4	39.9	15.7	0.115	0.051	0.046	0.018
	111.6	0.117	0.076	0.120	0.046	41.3	42.4	16.3	0.113	0.047	0.048	0.018
	115.6	0.108	0.077	0.122	0.050	38.6	43.6	17.8	0.112	0.043	0.049	0.020
phyllite	110.0	0.124	0.069	0.025	0.088	52.3	10.6	37.1	0.094	0.049	0.010	0.035
	115.6	0.095	0.068	0.033	0.096	42.4	14.7	42.9	0.089	0.038	0.013	0.038
sandstone	111.6	0.123	0.072	0.105	0.038	46.2	39.5	14.3	0.106	0.049	0.042	0.015
	112.6	0.108	0.072	0.110	0.043	41.4	42.1	16.5	0.104	0.043	0.044	0.017
marble	111.6	0.116	0.067	0.053	0.052	52.5	24.0	23.5	0.088	0.046	0.021	0.021
	112.6	0.103	0.067	0.062	0.055	46.8	28.2	25.0	0.088	0.041	0.025	0.022
granite	111.6	0.117	0.069	0.035	0.033	63.2	18.9	17.9	0.074	0.047	0.014	0.013
	112.6	0.104	0.069	0.043	0.037	56.5	23.4	20.1	0.074	0.042	0.017	0.015
mica	106.2	0.095	0.049	0.025	0.231	27.1	7.1	65.8	0.140	0.038	0.010	0.092
	110.0	0.078	0.048	0.028	0.239	22.6	8.1	69.3	0.138	0.031	0.011	0.096
gabbro	110.0	0.105	0.072	0.043	0.017	63.6	26.1	10.3	0.066	0.042	0.017	0.007

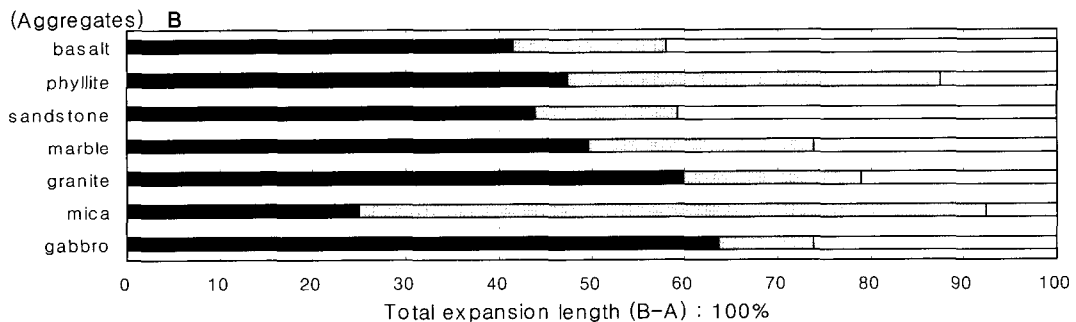
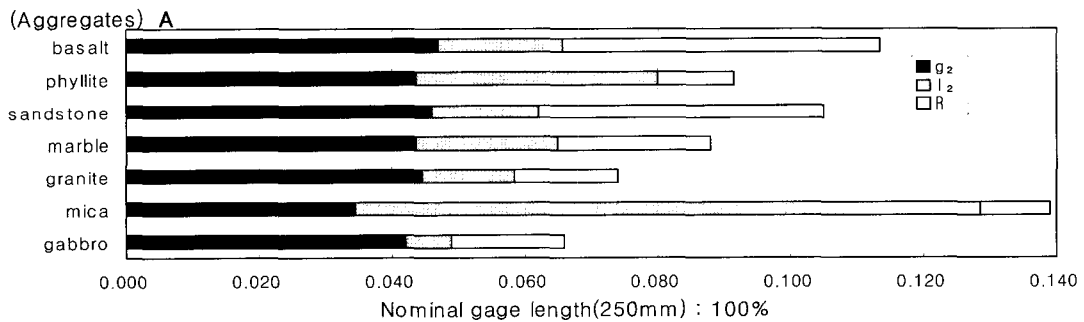


Fig. 4. The analysis of total expansion of mortar-bars by the factors of gel water(g_2), interstitial water(l_2) and alkali-aggregate reaction(R). The hatches of A and B are identical.
 A : Calculated when nominal gage length(250 mm) is 100%.
 B : Calculated when total expansion length(B-A) is 100%.

골재의 종류와는 무관하게 g_2 의 팽창량은 유사하나 골재 자체의 구조에 의한 I_2 와 성분에 의한 R의 팽창량은 골재에 따라 큰 차이를 보인다. 팽창률이 0.1%를 초과하여 불량성 골재로 판명된 것은 청양산 사암(팽창률 : 0.105%), 제주도산 현무암(팽창률 : 0.113%), 그리고 운모류(팽창률 : 0.139%)이다. 사암과 현무암은 특히 R 값이, 운모류는 I_2 값이 커서 팽창률이 높게 나왔음을 알 수 있다. 흑운모와 백운모로 구성된 운모류는 골재로는 쓸 수 없는 광물이나 I_2 에 의한 팽창효과를 알아보기 위하여 사용되었다. 반려암과 현무암은 거의 동일한 화학성분을 갖는 암석이나 팽창률은 큰 차이를 보인다. 동일한 화학성분이라도 광물의 종류와 암석 조직의 차이에 의해서 팽창률에 차이가 있음을 알 수 있다. 이에 대해서는 뒤에 자세히 설명한다.

Fig. 4B는 모르타르봉의 총 팽창량(B-A)을 100%로 하여 요인별 백분율을 나타낸 것으로서 암석별 팽창요인을 분석하기 위함이다.

현무암 : 다공질 염기성암으로서 유리질 석기에 사장석, 휘석, 감람석이 반정을 이룬 반상조직이다. 팽창률이 0.1%를 초과한 이 암석의 골재로서의 취약점은 구조면에서 미세한 기공을 포함한 다공질 구조와 유리질 석기인 점이고 구성광물 면에서는 다량의 세립질 유화광물(ASTM C 227-90)과 단백석(ASTM C 295-90)을 함유한 점이다. 미세한 기공은 6개월의 숙성기간 중에 물을 흡수하여 상대적으로 플로우치를 낮추게 되어 겔의 팽창을 증대하였으며 유리질 석기 및 위의 두 광물은 알칼리-골재반응을 촉진시켰다. 플로우치와 시멘트의 함량 및 팽창과의 관계는 고찰에서 자세히 설명한다. 노재호 외(1996)는 이 암석이 알칼리도 1.2%에서 0.3%이상의 팽창률을 보인다고 보고하였다. 용태형 외(1994)도 유사한 실험치를 보고하였다.

반려암 : 등립·중립질 입상조직을 보이는 염기성암이다. 주로 사장석과 각섬석으로 이루어졌으며 소량의 흑운모, 휘석, 불투명 광물이 관찰된다. 이 암석은 골재로서 크게 취약한 점이 없다. 그 결과 전 팽창량의 63.6%에 달하는 겔의 팽창이 상대적으로 가장 크다.

사암 : 약 65%의 입자와 나머지의 기질로 이루어

어져있다. 입자는 주로 쇠질성 퇴적물로 석영, 장석, 쳐어트 등이다. 팽창률이 0.1%를 초과한 이 암석의 취약점은 쳐어트의 함량이 높은데 있다(입자의 약 30%). 쳐어트는 은미정질에 가까운 극세립의 석영으로 이루어진 암편으로 알칼리-골재반응에 매우 민감하다(ASTM C 295-90). 35%의 기질은 점토광물로 이루어져 있어 현무암의 미세공극과 유사한 효과인 것으로 보인다.

천매암 : 이질 천매암으로 엽리가 대단히 발달되어 있다. 주 구성광물은 약 70%의 백운모와 흑운모이며 그 외 정장석, 녹니석, 변성광물로 되어 있다. 팽창률은 0.1%를 넘지 않으나 특히 발달된 엽리와 많은 양의 운모류의 간극에 물이 침투되어 물리적인 팽창을 야기한다.

화강암 : 중립 내지 조립질 입상조직을 갖는 산성암이다. 주 구성광물인 석영, 정장석, 사장석, 피다이트가 전체의 60%이며 기타 흑운모, 각섬석, 스피넬, 인회석, 녹니석 등으로 구성되어 있다. 물리·화학적으로 안정된 골재이기 때문에 겔의 팽창이 상대적으로 큰 비중을 차지한다.

대리암 : 조립질 방해석이 95%인 탄산염암이다. 방해석은 쪼개짐이 매우 발달되어 있어 숙성기간 중에 페이스트에 함유된 물이 쪼개짐 사이로 침투해 들어갈 수 있다. 결과적으로 최초의 플로우치 보다 낮은 물의 양이 겔에 함유되어 시멘트의 농도를 높여서 겔의 팽창이 커진다. 또한 알칼리-탄산염 반응이 기대되나 조립질 입자이어서 효과는 크지 않은 것으로 보인다. 팽창률은 0.1%미만이다.

운모류 : 거의 백운모와 흑운모로 구성되어 있다. 두 광물 모두 <001>저면에 따라 쪼개짐이 대단히 발달된 광물이다. 이 광물로 모르타르봉을 제작할 때 플로우치 106.2와 110.0을 만들기 위해서 w/c가 1.06에 이를 만큼 많은 양의 물이 첨가되었다. 이는 쪼개짐 사이로 물이 침투됨을 의미한다. 6개월 숙성기간 중에도 물을 계속 보충한 바 있는데 역시 위와 같은 이유 때문이다. 그 결과 운모는 다른 골재보다 간극수에 의한 물리적인 팽창을 많이 야기하였음을 짐작할 수 있다. 전 팽창량 중 68%가 이로 인한 팽창으로서 이러한 사실은 I_2 의 존재를 충분히 입증한다. 즉, 실험에 사용한 골재들보다 팽창률이 커서 0.139%에 이른다.

고찰

모르타르봉의 팽창과 수축요인에 대한 고찰

· $I_3 = I_1 + I_2$ 의 의미

$$I_1 = (A-C) - (A' - C')$$

$$I_2 = (B-A) - (B' - A') - R$$

$$I_1 + I_2 = (B-C) - (B' - C') - R = I_3$$

모르타르봉 B에는 간극수에 의한 팽창량 I_1 과 I_2 가 내포되어 있으며 이 값은 B를 건조수축시킨 I_3 에 모두 반영됨을 의미한다. 다시 말하면 팽창한 만큼 수축된다.

· $a = c_1 - c_2 > 0$ 의 의미

Powers 모델의 모세관과 겔 공극에서 수화의 진행에 따라 두 공극의 생성비가 반비례함은 잘 알려진 사실이다. 모르타르봉을 6개월 숙성시키는 동안 모세관 공극은 감소하나 겔 공극은 증가하며 $c_1 > c_2$ 인 관계가 성립된다. 이론적으로 수화가 완료되었을 때에 수화에 필요한 화학적 결합수와 겔수의 합은 시멘트 중량의 약 40%이다(강창구, 1994). 따라서 w/c 가 0.4 이상이면 수화가 완료되더라도 물이 채워진 모세관 공극은 남아 있는 셈이다(본 연구에서의 w/c 는 0.60 이상임). 그러므로 $c_1 - c_2 > 0$ 이 성립되며 이 차이 값을 본 연구에서는 a 로 정의하였다.

· $g_3 = g_1 + g_2$ 의 의미

공식 (10')에 $a = c_1 - c_2$ 를 대입하면 위의 공식이 된다. 6개월 숙성시킨 모르타르봉에는 겔 공극에 의한 팽창량 g_1 과 g_2 가 함유되어 있으며 이 값은 건조수축시에 g_3 로 나타난다. 앞에서 설명한 간극수와 동일하다.

· 수축에만 영향을 주는 모세관 공극

Haller(1940)는 시멘트 페이스트의 건조수축 실험을 통하여 모세관 공극(c)와 겔 공극(g)에 의한 수축효과를 확인하였다. 유신애(1997) 역시 동일한 실험을 통하여 동일한 변화를 측정하였다. Fig. 5의 $B' - A'$ (g_2)값은 팽창실험의 결과로서 플로우치의 증가에 따라 감소하며, Fig. 6의 $B' - D'$ ($c_2 + g_3$)값은 플로우치의 증가에 따라 증가한다. 두 사실을 종합하면 모세관 공극의 효과는 플로우치의 증가에 따라 팽창실험에는 나타나지 않았고,

수축실험에는 나타남을 의미한다. 플로우치의 증가에 따라 g_3 는 수축량이 적어지는데 Fig. 6의 결과는 $c_2 + g_3$ 의 효과에서 오히려 증가하고 있다. 이는 플로우치의 증가에 따라 g_3 에 의한 수축량의 감소효과보다는 c_2 에 의한 증가효과가 컸음을 의미한다.

· $B > A > D > C$ 와 $B' > A' > D' > C'$ 의 의미

앞에 소개한 모든 이론은 위의 관계가 성립될 가능하며 골재·비골재 모르타르봉의 실험치는 위의 관계를 모두 만족한다(Table 1 참조). 수학적으로는 $B > A$, $A > C$, $B > D$, $D > C$ 와 $B' > A'$, $A' > C'$, $B' > D'$, $D' > C'$ 일 때 $B > A > D > C$ 와 $B > D > A > C$, $B' > A' > D' > C'$ 와 $B' > D' > A' > C'$ 가 모두 가능하다. 비골재 모르타르봉의 경우 $A' = B' - g_2$, $D' = B' - g_3 - c_2$ 이며 $g_2 < g_3$, $c_2 > 0$ 이기 때문에 $D' < A'$ 가 된다. 그러나 골재 모르타르봉에서는 c_2 의 크기가 불확실하여 수학적으로 판단할 수 없다.

총 팽창량의 분석치에 대한 고찰

Fig. 5는 골재 모르타르봉의 팽창량 g_2 , R , I_2 의 변화량을 플로우치에 따라 도시한 것이다. 플로우치가 증가함에 따라 g_2 의 값은 감소하나 R 과 I_2 는 증가한다. g_2 의 감소는 플로우치의 증가에 따라 생성된 수화물의 양이 감소하기 때문에 겔의 공극도 작아진데 원인이 있으며, R 과 I_2 는 골재와 관련된 팽창량으로서 플로우치의 증가에 따라 알칼리-골재 반응이 더 활발해질 것이며 골재 내 염리나 쪼개짐에 물의 침투도 활발해질 것이 예상된다. 단, R 이 크면 I_2 가 작고(현무암, 사암), R 이 작으면 I_2 가 크다(천매암, 운모류). 이는 암석의 구조와 밀접한 관련이 있다. 즉, 후자는 염리와 쪼개짐이 대단히 발달되었고 전자는 이와 반대이다. 특기할 사항은 R 과 I_2 의 변화폭보다 g_2 의 변화폭이 큰 점이다. 결과적으로 총 팽창량은 동일한 골재에서 플로우치의 증가에 따라 감소한다(Table 2 참조).

일정한 값을 갖는 a 에 대한 고찰

Fig. 6은 Table 1의 비골재 모르타르봉의 자료 (A' , B' , C' , D')를 써서 $B' - C'$ 와 $B' - D'$

모르타르봉 시험(ASTM C 227-90)에 의한 현무암 골재 등의 팽창률 분석 연구

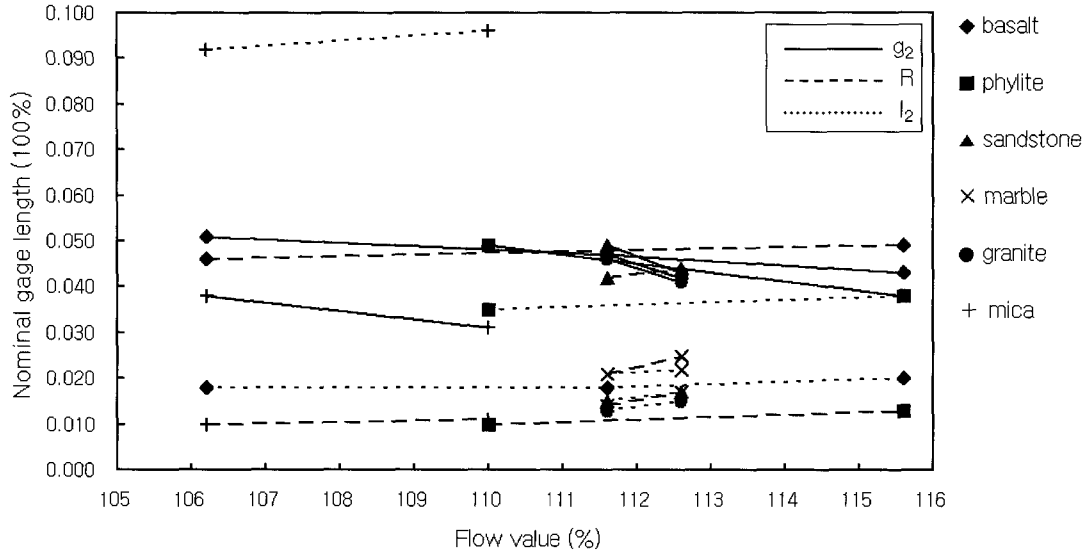


Fig. 5. The increasing and decreasing trends of g_2 , R and I_2 values according to the increasing flow values.

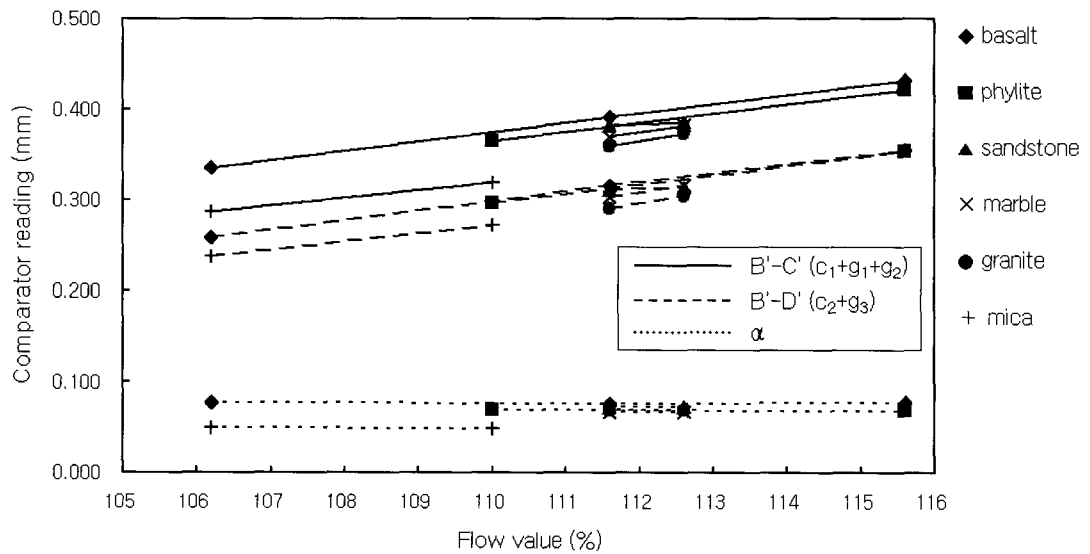


Fig. 6. The constant trends of α values relative to the increasing trends of $(B' - C')$ and $(B' - D')$.

의 차이 값을 도시하였다. 공식 (10)을 변형하면 $\alpha = (B' - C') - (B' - D')$ 이며 α 는 두 값의 차이 값으로서 그림의 하단에 도시되었다. Fig. 6에서 두 값은 플로우치의 증가에 따라 전반적으로 증

가함에 비해 α 는 플로우치에 관계없이 일정한 값을 보이며 $(B' - C') > (B' - D')$ 의 관계를 보인다. $\alpha = c_1 - c_2$ 임을 고려할 때 다음과 같은 설명이 가능하다. 즉, 24시간 직후 탈형한 비골재 모르타르

봉 A'와 이를 6개월 동안 포화 숙성시킨 B'를 비교할 때 시간이 지남에 따라 A'의 모세관 공극(c)은 감소하고 겔 공극(g)은 증가하여 B'가 된다. 플로우치를 점차 늘려 시험할 때 a의 값이 일정한 것은 c의 감소량이나 g의 증가분이 동일함을 의미한다. 다시 말해서 낮은 플로우치(낮은 w/c)에서 적은 c공극은 적은 감소를, g공극은 큰 증가를 보이고, 높은 플로우치(높은 w/c)에서 큰 c공극은 큰 감소, g공극은 낮은 감소를 보임을 의미한다.

a의 값이 이론적으로 암석별로 동일하여야 한다고 할 때 실험치의 a값(Table 2)은 현무암, 천매암, 운모류에서 ±0.001mm의 오차를 보인다. 이 값은 R과 I₂ 값에 직접 영향을 주며 결과적으로 총 팽창량의 오차에 해당된다.

현무암과 사암 골재의 문제점

현무암은 주로 제주도와 경기도의 전곡, 연천 지방에 분포되어 있으며 그 외 소규모로 전국에 산재되어 있다. 이 암석은 염기성 화산암으로서 은미정질 내지 유리질 석기에 사장석, 휘석, 감람석 등 유색광물을 반정으로 갖는 반상조직을 보이는 점에서 공통적이긴 하나 모든 현무암이 구조나 구성광물에 있어서 동일하지는 않다. 즉, 기공이 많은 다공상구조, 기공이 광물질로 채워져 있는 행인상구조, 기공이 전혀 없는 피상구조 등을 보이며, 구성광물도 알칼리-골재반응에 취약한 단백석, 트리디마이트, 크리스토팔라이트, 유화광물 등이 언제나 함유되는 것은 아니다. 따라서 본 연구에 사용된 시료의 팽창률이 0.1%를 초과하였다고 모든 현무암을 불량성 골재로 간주할 수는 없다.

마찬가지로 사암 역시 입자의 크기, 함량, 성분 등이 지극히 다양하기 때문에 사암에 따라서는 알칼리-골재반응에 문제가 되는 쳐어트나 유화광물 등을 함유하지 않는 것도 얼마든지 있다. 본 연구에 사용된 시료는 청양지역에 분포한 아미산층에서 채취한 것이며, 이러한 종류의 사암은 우리나라의 고생대 이후 모든 지층에 함유되어 있다.

따라서 현무암과 사암 골재는 일괄적으로 불량성 골재로 간주할 수는 없는 것으로 보며 이 골재

를 사용하기 전에 암석분류 시험(ASTM C 295)을 거칠 필요가 있다.

결 언

ASTM C 227-90에 의한 모르타르봉을 제작, 시험하고 그 팽창량을 3가지 요인으로 분류한 후 이들 각각의 요인별 팽창량을 정량적으로 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 모르타르봉의 팽창은 알칼리-골재반응과 같은 화학적인 팽창 외에 겔 공극 및 골재의 간극(엠틀리 또는 쪼개짐)의 팽창과 같은 물리적인 팽창에 의한 복합적인 현상으로서 골재 및 비골재 모르타르봉을 이용하여 각각의 정량적인 팽창량을 구할 수 있다.

2. 모세관 공극은 모르타르봉의 수축에는 관여되나 팽창과는 무관하고, 수화가 진행되기 전과 후의 모세관 공극의 부피 차이는 동일한 골재라면 플로우치가 변해도 일정한 값을 갖는다.

3. 팽창률 0.1%가 넘는 현무암과 사암 골재의 팽창은 주로 알칼리-골재반응과 겔 공극에 의한 것이며 운모류의 팽창은 간극수가 주도적으로 작용한 것이다. 그러나 우리나라에 분포되어 있는 모든 현무암과 사암 골재가 불량성 골재인지는 확인된 바 없다.

사 사

이 논문은 2002년도 충남대학교 자체연구비의 지원에 의하여 연구되었다. 논문의 내용을 검토해 주신 충남대학교 공과대학 김무한 교수에게 감사드린다.

참 고 문 헌

강창구, 1994, 콘크리트 기술, 圓技術, p. 24-25.
노재호, 이영수, 조일호, 이양수, 정재동, 윤재환,

모르타르봉 시험(ASTM C 227-90)에 의한 현무암 골재 등의 팽창률 분석 연구

1996, 국내 일부 세석골재의 알칼리-실리카 반응성에 관한 연구, 시멘트 심포지엄, p. 102-107.

용태형, 최진만, 이양수, 윤재환, 1994, 제주도 콘크리트 구조물의 열화현상에 관한 조사보고서, 대한건축학회, 학술발표논문, p. 14-1, 509-512.

유신애, 1997, 조암광물 골재를 사용한 모르타르봉의 팽창률 해석, 1997 충남대학교 대학원 석사학위 논문.

윤재환, 岸谷孝一, 1985, 유기질 단사휘석 안산암의 알칼리-실리카 반응성, 대한건축학회 학술발표논문집 5, p. 437-440.

정지곤, 유신애, 1997, 모르타르봉의 팽창률 해석에 대한 실험적 연구, 박희인 교수 정년퇴임 기념집, p. 189-197.

한국산업규격(KS) F 2545, 1997, 한국공업규격집, 한국공업표준협회.

한국산업규격(KS) F 2546, 1982, 한국공업규격집, 한국공업표준협회.

한국산업규격(KS) F 2548, 1997, 한국공업규격집, 한국공업표준협회.

한국콘크리트학회, 1999, 콘크리트 표준 시방서 해설, p. 32-45.

ASTM C 227-90, 1995, Annual book of ASTM Standard. section 4, v. 04 02.

ASTM C 289-94, 1995, Annual book of ASTM Standard. section 4, v. 04 02.

ASTM C 295-90, 1995, Annual book of ASTM Standard. section 4, v. 04 02.

Haller, P., 1940, Shrinkage and creep of mortar bar and concrete, Diskussion bericht n. 124, EPMA, Zurich.

Michihiko, A., Fuminori, T., Takatsugu, M., Kiyohiko, T., 1989, Study on the simple rapid test method used to judge the alkali-reactivity of aggregate, p. 369-374.

Powers, T. C., 1960, Physical properties of cement paste, Proc. Symp. Chem. Cement, Washington, 2, p. 577-613.

Swamy, R. N., 1992, The alkali-silica reaction in concrete, Blackie, p. 5-10.

투 고 일	2003년 7월 6일
심 사 일	2003년 7월 7일
심사완료일	2003년 7월 30일

정지곤
 충남대학교 자연과학대학 지질학과
 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
 Tel: 042-821-6424
 E-mail: jgjeong@cnu.ac.kr

김경수
 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야
 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150
 Tel: 042-868-2365
 E-mail: kskim@kaeri.re.kr