

촉진시험법을 이용한 하천골재의 알칼리 반응성 판정

양동윤* · 이창범*

Identification of Alkali Reactivity of Natural Aggregates by Application of a Rapid Method

Dong-Yoon Yang* and Chang-Bum Lee*

ABSTRACT : The concrete structure can be easily damaged due to alkali-aggregates reaction. There are several methods to identify alkali reactivity of aggregates. The most reliable method is mortar-bar test, but it takes 3 to 12 months for whole test. The authors applied "rapid method" which takes only 7 days for this test. The result of this rapid method follows; expansion ratio of mortar bar for natural aggregates taken at the Youngsan River ranges from 0.197 to 0.489%, but that from Changseong Lake has low expansion ratio of 0.147%, which is below the limit of allowance, 0.168%. Those from the Seomjin River range from 0.173 to 0.22%, and those from the Keum River range from 0.078% to 0.111%. In the case of higher expansion ratio than 0.168%, aggregates must be used with cement containing low alkali content or adding material consuming the alkali content of cement, for example, fly ash and silica fume, etc.. Most of natural aggregates in Cheolla area have no problem in physical properties, particularly the abrasion ratio is below 40%, the limit of allowance. The natural aggregate from Cheolla area consists mostly of gneiss, granite and volcanic rocks. The major alkali reactive materials are quartz mineral with undulatory extinction in gneiss and granite, and amorphous silica in volcanic rocks. Even if a certain aggregate consists of the same kind of rocks and has similar rock composition each other, content of alkali reactivity material can be various, because rock formation is locally different according to temperature and pressure. Therefore every rock type must be physically and chemically identified before using for aggregates.

서 언

우리 나라에서 최근 문제화되고 있는 콘크리트 구조물의 대형사고는 단순히 콘크리트의 물리적 열화에서만 기인되지 않고, 구조물의 재령이 오래된 것일수록 화학적 열화가 치명적 영향을 미친다는 사실에 관심이 쏠리고 있다. 이러한 화학적 열화의 주된 원인은 시멘트 중의 알칼리와 골재가 반응하는 현상이다 (알칼리-골재 반응). 골재를 구성하는 암석 중에 열역학적으로 불안정한 실리카 성분이 포함되어 있으면, 이것이 알칼리와 쉽게 반응하는데, 이를 알칼리-실리카 반응이라 한다. 우리 나라의 알칼리-골재 반응에 의한 피해는 대부분 이러한 알칼리-실리카 반응에 의한 것이다. 반응 결과, 알칼리-실리카젤이 생성되고 이러한 젤이 흡수·팽창하므로써 콘크리트에 균열을 발생시킨다. 양

동윤, 이동영 (1995)은 알칼리-골재반응의 메커니즘을 소개하고, 암석학적 및 화학적 시험방법을 경상지역산 골재에 적용시킨 결과에 대해 보고한 바 있다.

알칼리-골재 반응에 의한 피해를 사전에 방지하기 위해서는 골재의 알칼리 반응성을 사전에 판정하고 그에 따른 예방책을 강구할 필요가 있다. 골재의 알칼리-실리카 반응성을 판정하는 방법은 우리 나라 독자적으로 개발되지는 않았고 검토중인 단계인데, 미국에서는 암석학적 판정법 (ASTM C 295-79), 화학법 (ASTM C 289-71) 및 몰탈바법 (Mortar bar method: ASTM C 227-81) 등이 일반적인 방법으로 사용되고 있다. 이 중에서 암석학적 방법 및 화학법은 비교적 단시간에 판정 가능한 방법이지만 유해광물이 포함되는 경우, 그것이 유해한 피해로 연결될 것인가 여부에 대한 최종적인 판정은 몰탈바법에 의존하는 경우가 많다. 한편 몰탈바법은 반응성 골재를 이용한 몰탈 공시체의 팽창량을 측정하는 시험법으로 비교적 신뢰성이 높지만 판정 결과를 얻는데, 3개월에서 6개월, 길게는 1년이라는 장

* 한국지질연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Korea)

시간을 요한다. 그래서 실용적인 관점에서는 간편하고 신뢰성이 높으며 신속하게 판정할 수 있는 방법이 요구되어진다. 신속한 판정시험법으로는 오토클레이브법 (Autoclave method), 덴마크법 (Denmark method), 일본의 GBRC법 등의 각종 시험법이 제안되어 있지만, 몰탈바법과의 대응관계가 충분하지 않는 등 검토할 여지가 남아 있다. 이 논문에서는 국내에서 거의 소개된 바가 없지만 몰탈바법과 상관관계가 좋은 大野 등 (1986)이 제안한 촉진판정법을 토대로 하여 시험을 실시하였다.

촉진시험법 소개

비교적 잘 알려져 있는 알칼리-골재 반응성 촉진시험법에는 오토클레이브법, 독일법 (DIN 4226), 덴마크법, 일본의 GBRC법 등이 있다.

오토클레이브법은 중국의 Tang *et al.* (1983)이 제안한 방법으로, 몰탈공시체를 제작하여 24시간 후, 100°C에서 4시간 동안 증기 양생한 다음 10% KOH용액에서 150°C로 6시간 오토클레이브 양생한 후, 팽창률을 측정한다. 이 방법은 화학법에 의한 결과와 대응관계가 비교적 좋은 편이어서 널리 사용되고 있지만, 양생온도를 150°C까지 올리기 때문에 실제 상황에서는 생성되지 않는 광물이 생성될 가능성이 있어서 더 많은 검증이 필요하다.

독일법은, 독일에서 반응성 골재로서 문제가 되고 있는 것이 오팔 (opal)질 암석이기 때문에, 이들의 함유량을 밝히기 위하여 고안된 방법이다. 1~4 mm의 골재를 4% NaOH용액에 90°C로 1시간 浸液한 다음, 중량의 감소분을 측정하여 오팔질 암석 비율을 구한다. 덴마크법은 포화 염화나트륨용액 침액법으로도 알려져 있는데, Chatterji (1979)가 제안한 방법으로 외부의 해수로 인한 알칼리-골재 반응성을 조사하기 위해 고안되었다. 몰탈공시체를 수중에서 27일간 양생한 후, 50°C의 포화 NaCl 용액 중에 浸液하여 공시체의 길이 변화를 측정한다.

일본 GBRC 촉진법은 일본건축종합연구소의 田村 등 (1984)이 제안한 방법으로, 고알칼리농도의 몰탈공시체를 제작, 48시간 양생한 후, 1.5 kg/cm²로 가압한 100°C의 수중에서 2시간 양생하고 몰탈의 균열을 육안, 초음파속도 저하 또는 탄성파계수의 저하 등으로 확인하여, 골재의 알칼리 반응성 유무를 단시간에 판정하는 방법이다. 몰탈 중 알칼리량은, 2.5% (Na₂O 환산)로 알칼리 농도가 높은 것을 사용하는데, 이는 반응을 촉진시키기 위한 것이다. 실제로 보통 콘크리트에서도 내부에서의 수분의 이동으로 인해 알칼리가 농축되기 때문에 고알칼리농도가 된다는 것이 확인된 바 있다.

국내에는 잘 알려져 있지 않지만, 타케나카 (竹中) 기술연구소의 촉진시험법은 大野 등 (1986)이 제안한 방법으로, 몰탈 바의 팽창을 촉진시키기 위하여, NaOH 용액에 일정 시간 침액하여, 고온·고습하에서 양생시키는 방법이다. 이 방법으로 시험시간 7일 정도의 단기간에 양생시킨 시료가, 몰탈바법으로 6개월간 양생한 시료와 유사한 팽창량을 나타내며, 대응관계가 좋기 때문에 신뢰성이 클 것으로 생각된다. 이 논문에서는 몰탈바법과 상관관계가 좋은 大野 등 (1986)이 제안한 촉진시험법을 토대로 하여 전라권 하천골재를 대상으로 실시한 시험결과에 대해 보고한다.

촉진조건인 인자 영향

大野 등 (1986)은 알칼리-골재의 반응촉진 조건을 최적으로 하기 위하여, 반응요인을 NaOH 용액에의 침액시간, 침액하는 NaOH 용액농도, 양생온도로 정하여, 이들에 대한 최적조건을 실험을 통하여 구하였다 (Fig. 1).

양생온도 효과

Fig. 1a는 침액하는 NaOH용액 농도를 1N, 침액시간을 24시간으로 하여 양생 온도만을 40°C, 60°C, 80°C로 변화시킨 경우의 몰탈바 팽창량을 나타낸다. Fig. 1a에서 명확히 나타나듯이 양생온도가 팽창률에 미치는 영향은 매우 크고 온도가 높을수록 팽창률이 커진다. 촉진 요인으로서 온도의 영향이 크다는 것은, 오토클레이브법에서도 지적되고 있다. 알칼리-골재반응에서는 영향 인자가 많기 때문에 현 단계에서는 그 요인을 완벽하게 추정해내기는 어렵지만, Fig. 1a에서 나타나듯이 80°C의 온도조건이 공시체의 팽창을 촉진하는 최적 조건으로 나타났고 이 때의 팽창률이 0.4%를 기록하였다. 이러한 값은 같은 재료 조건에서 몰탈바법에 의한 재령 6개월의 팽창률을 웃도는 값이다.

浸液하는 NaOH용액농도 효과

공시체를 침액하는 NaOH용액의 농도를 0에서 2N까지 변화시킬 때 농도와 공시체의 팽창량 관계를 Fig. 1b에 나타냈다. NaOH용액의 농도는 0.5에서 1N일 때 팽창량이 크게 나타나고 2N 또는 0N의 경우 팽창량은 작게 나타나므로 침액시간을 24시간으로 할 경우에는 0.5에서 1N농도가 적당하다고 생각된다. 몰탈바 공시체의 알칼리용액에의 침액은 과다하게 알칼리를 공급하여 현실과는 동떨

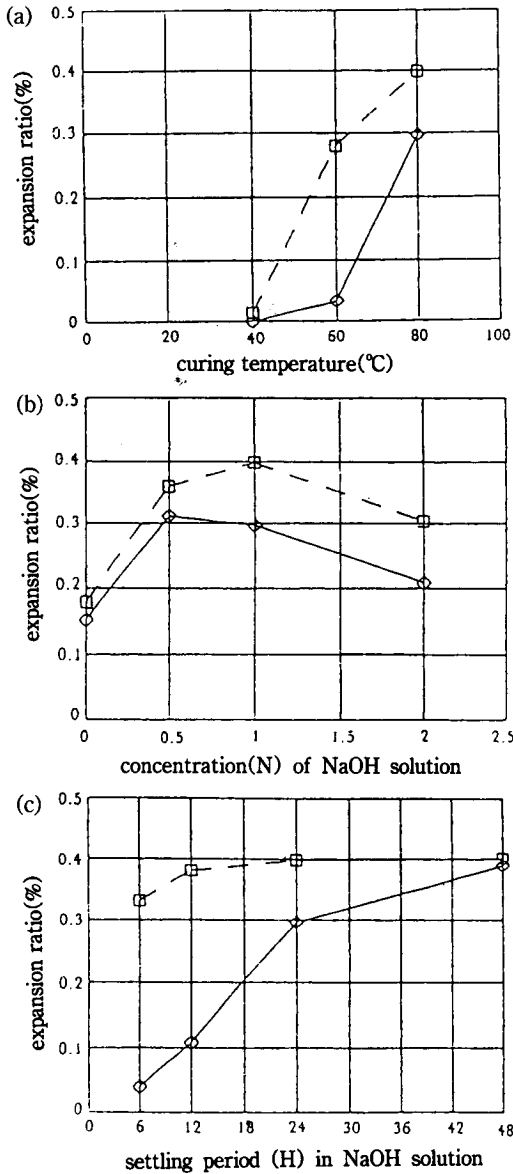


Fig. 1. The factors affected alkali reactivity of aggregates, a; effect of curing temperature (°C), b; effect of concentration (N) of NaOH solution, c; effect of settling period (hour) in NaOH solution (modified from Ono, *et al.*, 1986), ◇; 1st measurement, □; 2nd measurement.

어진 촉진 조건처럼 생각되기 쉽지만, 실제로 콘크리트 중 공극수의 알칼리 농도를 조사한 보고 (Diamond, 1981)에 따르면 공극수의 알칼리농도는 0.7에서 0.8N 정도의 비교적 고농도라는 사실이 알려져 있다. 그래서 촉진법에서는 현실적으로 생길 수 있는 공극수의 알칼리농도를 선택하는 것이 바람직하다고 생각된다. 단, 농도가

높은 알칼리용액에 너무 장시간 공시체를 침액하면 생성된 젤이 침액용액 중에 용출되어 팽창 효과가 낮아 질수도 있다. 이번 연구에서는 NaOH용액의 농도를 1N로 하였다.

NaOH용액에의 浸液시간 효과

Fig. 1c는 1N의 NaOH용액에 침액하는 시간을 6, 12, 24, 48시간으로 변화시켰을 때의 결과를 나타낸다. Fig. 1c의 결과는 침액중의 온도 조건이 80°C이기 때문에, 침액중의 온도변화 경과와 침액시간 양자의 영향을 포함하고 있다. 그 결과, 1차 측정 (NaOH용액에 80°C로 일정시간 침액한 후 측정)의 팽창량은 침액시간이 길수록 커진다. 한편, 2차 측정 (NaOH용액에 침액한 후 80°C로 일정시간 양생한 다음 측정)의 결과는 어떤 침액시간에서도 같은 정도의 팽창량을 나타내고 있다. 이들 결과로 판단하면, 공시체를 NaOH용액에 80°C로 24시간 이상 침액하면, 1차 측정으로 상당량의 팽창량이 확인되므로, 보다 단기간에 판정 결과를 구하는 경우에 유리하다.

실 험

시료는 골재의 마모율 측정에 이용되는 입도 규정에 의해 채취된 것을 이용하였다. Table 1은 시료의 채취 위치와 채취 지점의 주변 지질을 나타낸다. 시료를 우선 Jaw-crusher를 이용하여 4번체 (4.76 mm)를 통과하는 비가 50% 정도로 되게 파쇄하였고, 다음에 Cone-crusher를 이용하여 Table 2와 같은 粒度비율이 되도록 시료를 제조하였다. Table 3은 각 시료의 암석구성비를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 골재의 암석구성비는 주변 지질에 밀접한 영향을 받는다.

일반적으로 행하여지고 있는 촉진시험은, Diamond (1983)가 제안한 알칼리-골재반응의 과정에 관한 이론을 배경으로 하고 있다. 즉 Diamond는 알칼리-골재반응의 반응과정에 대해, 골재 중의 준안정한 실리카성분과 시멘트 중의 알칼리금속이 반응해서 젤이 생성하는 제1단계와 그 후 생성된 젤이 수분을 흡수하여 팽창하는 제2단계로 된다고 설명하고 있다. 이번 실험에서의 제1단계의 반응 과정에 해당되는 촉진조건은 NaOH 용액에 침액시키는 것이고, 제2단계 과정에 해당되는 촉진조건으로는 고온·고습으로 양생하는 것이다. 시멘트는 보통의 포틀랜드 시멘트를 이용하였고, 시멘트의 화학분석 결과 Na₂O 등 가 알칼리량이 1.14%로 고알칼리성을 나타내어, 골재의 알칼리 반응성을 조사하는데 적절한 시멘트임을 확인하

Table 1. Sampling sites and their geology in the environs of natural coarse aggregates.

rivers	sample No.	sampling site	geology in the environs
Youngsan River	SG1	Kwangju-shi Kwangsang-ku Seungchon-dong	biotite granite, rhyolite, tuff, granitic gneiss
Youngsan River	SG5	Cheollanam-do Naju-shi Songchon-dong	andesitic tuff, biotite granite, andesite, sandstone
Chiseog Stream	SG6	Cheollanam-do Naju-shi Shinga-ri	biotite granite, tuff, rhyolite, andesite
Hwangryong River	SG8	Kwangju-shi Kwangsang-ku Osan-dong	biotite granite, granitic gneiss, porphyritic granite gneiss, acidic dyke
Changseong Lake	SG9	Cheollanam-do Changseong-gun Pukha-myeon Yaksu-ri	andesitic lava, tuffaceous breccia, tuff, shale, sandstone
Seomjin River	SG11	Kyeongsangnam-do Hadong-gun Hwagae-Myeon Puchun-ri	granitic gneiss, porphyroblastic gneiss
Semjin River	SG14	Cheollanam-do Kogseong-gun Yp-myeon Jewol-ri	schistose granite, mica schist, muscovite schist, amphibole schist
Yo Stream	SG16	Cheollanam-do Namwon-shi Sejeon-ri	biotite granite, foliated granite, porphyritic granite, quartzite, limestone
Keum River	SG18	Cheollapug-do Muju-gun Punam-myeon Taeso-ri	schist, limestone, granitic gneiss, felsite, alkali granite, schistose granite, quartz porphyry, andesite
Keum River	SG22	Cheollapug-do Chinan-gun Sangjeon-myeon Yongpyeong-ri	granitic gneiss, porphyroblastic, granitic gneiss, sandstone, shale, conglomerate

Table 2. Weight % of samples at each size.

	screen size		weight%
	passing	remaining	
No. 4	4.76 mm	No. 8 2.38 mm	10%
No. 8	2.38 mm	No. 16 1.19 mm	25%
No. 16	1.19 mm	No. 30 0.59 mm	25%
No. 30	0.59 mm	No. 50 0.30 mm	25%
No. 50	0.30 mm	No. 100 0.15 mm	15%

였다. Table 4는 시멘트의 화학분석치를 나타낸다.

시험에 사용한 시료는 10종류의 하천골재이다. Table 3에서 나타내듯이 조골재를 구성하는 암석 비율은 주변의 지질환경에 따라 좌우된다. 양동윤, 이동영 (1995)은 우리나라에서 골재로 사용되고 있는 암석들 중에서 반응성 골재로서 문제가 되고 있는 암석들을 소개하였는 바, 이들은 주로 심한 변성작용으로 인해 파동소광을 나타내는 석영을 포함한 화강암 및 변성암류 등과 유리질 실리카성분을 포함하는 화산암류, 화산쇄설암류, 그리고 실리카성

분을 많이 포함한 석회암류 등이다. 이번 연구대상인 전라권 하천골재에는 유해할 것으로 판단되는 화강암, 편마암, 화산암류와 화산쇄설암류가 많이 포함되어 있다.

몰탈바 공시체의 치수는 $4 \times 4 \times 16$ cm이다. 축진시험 방법의 순서를 Fig. 2에 표시하였다. 몰탈공시체를 제작한 후, 20°C, 95%RH 로 24시간 동안 양생한 다음, 길이를 측정한 후 바로 1N NaOH 용액에 침액하였는데 용기는 NaOH 용액에 대해 비부식성인 스테인레스제로 밀봉이 가능한 것을 이용하였다. 침액한 공시체는 24시간 동안 80°C, 100%RH 조건에서 양생시켰다. NaOH 용액에서 꺼내어 20°C, 95%RH에서 24시간 동안 냉각시킨 후에 길이를 측정하였다 (1차 측정). 다음 과정으로 공시체를 80°C, 95%RH 의 조건하에서 72시간 동안 양생시켰고, 다시 20°C, 95% RH에서 24시간 냉각시킨 다음 길이를 측정하였다 (2차 측정).

大野 등 (1986)의 실험 결과에 의하면, 축진법과 몰탈바법의 결과는 좋은 상관관계를 나타내고, 상관계수는 0.95로, 회귀곡선식은 다음과 같다.

Table 3. The relationships of rock composition and abrasion ratio of each natural coarse aggregates sample.

sample No.	rock composition (weight %)	abrasion ratio (%)
SG1	biotite granite; 33.3, rhyolite; 16.4, tuff; 33.4, granitic gneiss; 12.4, quartzite; 1.5, etc.; 3	33.83
SG5	andesite and andesitic tuff; 28.7, biotite granite; 54.8, sandstone; 11.5, etc.; 5	28.90
SG6	biotite granite; 56.9, tuff; 17.6, rhyolite; 10.3, andesitic rock; 13.8, quartzite; 1.4	25.38
SG8	biotite granite; 17.7, gneiss; 52.1, acidic rock; 27.3, etc.; 2.9	33.20
SG9	andesitic lava; 22.3, tuff; 33.6, shale; 12.9, sandstone; 20.5, etc.; 10.7	27.72
SG11	gneiss; 59.8, schist; 15.9, sandstone; 15.8, etc.; 8.5	31.36
SG14	foliated granite; 85, mica schist; 4.2, amphibole schist; 8, etc.; 2.8	28.26
SG16	biotite granite; 32.5, foliated granite; 13.9, porphyritic granite; 26.7, quartzite; 13.9, limestone; 13	39.54
SG18	schist; 31.5, limestone; 3.2, granitic gneiss; 41.2, granite; 17.2, quartz porphyry; 6.9	29.80
SG22	granitic gneiss; 37, porphyroblastic granitic gneiss; 39, sedimentary rocks; 24	31.64

Table 4. Chemical analysis result of the portland cement used in alkali-aggregates reaction test (weight %).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
cement A	20.7	0.26	5.45	3.19	59.50	2.40	1.24	1.24	0.30	0.21
cement B	20.4	0.25	5.49	3.21	59.61	2.44	1.30	1.30	0.30	0.20

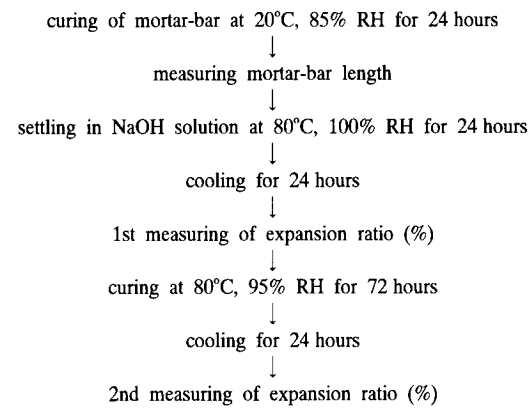


Fig. 2. Flow sheet of a rapid method for identification of alkali reactivity of aggregates.

$$y = 1.158x + 0.0518$$

여기서 x: 몰탈바름에서의 팽창률, y: 촉진법에서의 팽창률, 단위: %

이 식에 의하면 촉진법의 결과는 몰탈바름의 그것보다 약간 높게 나타난다. 몰탈바름에 의한 6개월간의 팽창률은 0.1%인데, 촉진법에서 이에 대응하는 값은 0.168%이다.

실험결과

위와 같은 시험과정을 거쳐 Fig. 3과 같은 결과가 나왔

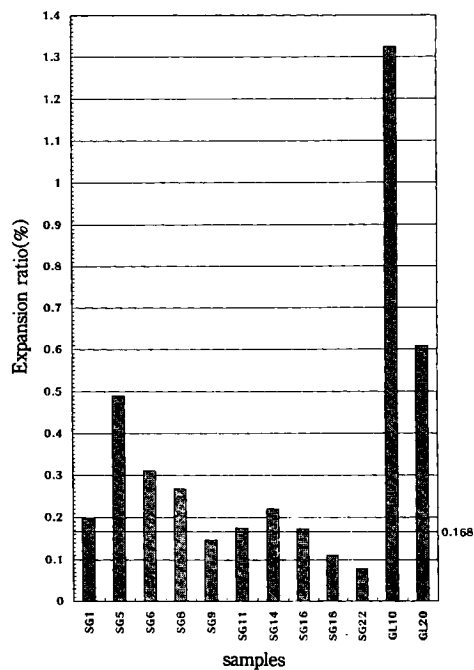


Fig. 3. The result of identification of alkali reactivity for aggregate of SG 1 to SG 22. GL 10 and GL20 are samples non-reactive to alkali, replaced by pyrex glass 10% and 20% at each.

다. GL 10과 GL 20 시료는 알칼리에 대해 비반응성인 골재에 파이렉스글라스 (pyrex glass)를 각각 10%, 20% 첨

가한 시료로, 촉진시험법에서의 팽창 효과를 확인하기 위한 추가 시험이다. 파이렉스글라스를 10% 첨가한 것에서는 팽창률이 1.325%로 팽창한계 값의 거의 8배에 달하고 있다. 그렇지만, 파이렉스글라스를 20% 첨가한 시료에서는 약 4배 정도의 팽창량을 보였다. 더 많은 검증이 필요하겠지만 이는 팽창량이 반응 물질의 양에 비례관계를 보이다가 어느 한계 값을 지나면 반비례 관계를 보인다는 것을 알 수 있다. SG 1~SG 8의 영산강 및 그 지류에서 채취된 시료들에서는 모두 팽창량의 한계치인 0.168%를 넘는 0.197~0.489%를 나타내었고, 장성호에서 채취된 SG 9 시료만 0.147%로 낮은 값을 나타내었다. 그리고 섬진강과 그 지류에서 채취된 SG 11~SG 16까지의 시료들은 0.168%를 약간 넘는 0.173~0.22%로 나타났다. 한편, 금강 상류에서 채취된 SG 18과 SG 22 시료는 0.078~0.111%로 매우 낮은 값을 나타내어 화학적으로 안정되어 있는 것을 알 수 있다.

고 찰

영산강, 황룡강, 장성호에서 생산되는 골재는, 광주광역시와 인접하여 있어서 운송비가 저렴하고 수요가 많으므로 경제성이 높다. 섬진강 중-상류, 요천 등의 골재는 인접 지역인 남원, 곡성 뿐만 아니라 전주, 광주, 순천지역까지 공급되고 있다.

전라권에 분포된 암석은 심한 변성작용을 받은 화강암류와 변성암류, 그리고 화산암류 등이 주류를 이루고 있다 (Table 1, 3). 변성작용을 많이 받은 암석 중의 석영은 대부분 파동소광을 나타내는데, 이는 변성작용시 석영 결정이 변형을 받아 격자구조가 변형 또는 파괴되어 있음을 의미한다. 이는 열역학적으로 불안정한 상태이므로 콘크리트 세공용액 중의 Na^+ , K^+ 등의 이온과 쉽게 반응하여 콘크리트에 해를 끼치게 된다. 또한 화산암류에는 일반적으로 비정질실리카 또는 은미정질 석영이 함유되는데, 가장 문제시되는 것이 비정질인 유리질 실리카이다. 결정질 실리카에서는 격자와 격자 사이가 규칙적이고 질서정연하게 채워져 있어 결정표면에서만 알칼리와 반응하는 반면에, 비정질 실리카에서는 격자와 격자 사이가 엉성하고 불규칙하여 알칼리 이온이 표면 뿐만 아니라 내부에까지 침투해서 반응하기 때문에 알칼리 이온과 실리온 이온이 접할 수 있는 확률이 매우 커져서 반응속도가 빨라지게 된다. 따라서 비정질 실리카가 다량 함유된 골재를 콘크리트용으로 사용하게 될 경우에 골재의 화학적인 안정성에 문제가 야기될 수 있다.

전라권의 대표적인 하천에서 채취된 시료에 대해 암석

구성비, 시험 결과 및 마모율시험 결과를 비교 검토 고찰하였다.

영산강 조골재 (SG 1, SG 5)

SG 1시료는 영산강 중류에서 채취된 조골재로, 암석 구성은 흑운모화강암과 응회암이 주를 이루고, 유문암, 화강암질편마암이 상당량 포함되어 있다 (Table 3). 조골재 구성비가 33%를 차지하는 흑운모화강암 중의 석영은 약한 파동소광을 나타내고, 구성비가 약 12%인 화강암질편마암의 석영도 재결정화 되었거나 심한 파동소광을 나타낸다. 응회암은 약 33%를 차지하는데, 유문암편이 많이 들어 있다. 유문암은 홍색의 것과 백색의 것이 보이는데, 홍색을 띠는 것에는 은미정질 내지 유리질의 실리카가 약간 포함되어 있다. 이러한 암석들의 구성광물 중 시멘트의 알칼리 성분과 반응해서 콘크리트를 팽창시키는 물질은 화강암질편마암 중 심한 파동소광을 보이는 석영 입자와 화산암류 중의 은미정질 석영 및 유리질 실리카로 추정된다. 촉진시험법을 이용한 알칼리-골재 반응성 시험 결과 팽창률이 0.197%로 나타났다.

SG 5시료의 암석 구성은 흑운모화강암이 절반을 넘고, 안산암 및 안산암질 응회암이 약 30%를 차지하며 사질암도 약간 포함된다 (Table 3). 흑운모화강암의 석영 입자는 심한 파동소광을 나타낸다. 안산암 및 안산암질 응회암은 은미정질 석영, 변질산물인 견운모, 방해석, 녹니석 등을 포함한다. 이러한 조골재의 구성 암석 중에서 촉진법 팽창률 시험에서 팽창에 기여하는 물질은 주로 흑운모화강암 중의 파동소광을 나타내는 석영 입자들과 화산암류 중의 은미정질 실리카로 생각된다. 시험 결과 0.489%로 급변 시험 대상의 시료 중에서 가장 높은 팽창률을 보였다.

SG 1 시료 채취지점의 조골재는 마모율이 33.83% (Table 3.3-14)로 보통이고 화학적으로도 크게 문제될 정도는 아니므로 저알칼리성 시멘트를 사용하던가 첨가제 등을 사용하여 시멘트 중의 알칼리량을 저하시키는 방법을 이용하면 콘크리트용 골재로 사용 가능할 것으로 보인다. 그러나 SG 5 시료 채취지점의 조골재는 마모율이 28.9%로 낮아 물리적 측면에서는 안정되어 있으나, 화학적 측면에서는 불안정하므로 다른 용도의 골재로 사용하는 것이 좋다고 본다.

지석천 조골재 (SG 6)

채취된 조골재의 암석 구성은 흑운모화강암이 절반 이상이고, 응회암, 안산암, 유문암 등도 포함된다 (Table 3). 암

석 구성비가 57%를 차지하는 흑운모화강암은 암석학적 특성이 SG 5 시료의 것과 거의 유사하며 석영은 강한 파동소광을 나타낸다. 응회암은 백악기의 것으로 조골재 중 암석 구성비가 약 18%를 차지하며 유문암편을 많이 포함하고 있다. 그리고 구성비가 약 10%를 차지하는 유문암에는 은미정질에서 유리질의 실리카가 약간 포함되어 있다. 안산암의 경우, 약 14%를 차지하는데 거의 유리질에 가까운 석기를 함유하고 있다. 이러한 암석들의 구성광물 중 시멘트의 알칼리 성분과 반응해서 콘크리트를 팽창시키는 물질로 예상되는 것은 화강암질편마암 중 파동소광을 보이는 석영 입자와 화산암류 중의 은미정질 석영 및 유리질 실리카로 생각된다. 축진법을 이용한 알칼리-골재 반응성 조사 결과 팽창률은 0.311%로 시험 대상의 시료 중에서 두 번째로 높은 값을 나타내었다. SG 6 시료의 마모율은 25.8%로 낮아서 SG 5 시료와 마찬가지로 물리적 측면에서는 안정되어 있지만 화학적 측면에서는 불안정하므로 다른 용도의 골재로 사용하는 것이 좋을 것이다.

황룡강 조골재 (SG 8)

SG 8 시료는 황룡강 중류의 하안 조골재로, 이를 구성하고 있는 암석은 화강암질편마암과 반상변정질편마암이 절반을 넘고, 흑운모화강암이 약 18%를 차지한다 (Table 3). 화강암질편마암의 경우, 석영 입자들은 변형작용 결과로 인한 봉합상 조직을 보이거나 파동소광은 별로 나타나지 않는다. 반상변정질편마암 중의 석영은 압쇄작용 결과 석영 입자들이 긴 리본 모양을 하고 있고, 흑운모화강암 중의 석영 입자도 압쇄작용 결과 봉합상 조직을 보이며 파동소광을 나타낸다. 이러한 조골재의 구성 암석 중에서 축진법 팽창률 시험에서 팽창에 기여하는 물질은 주로 흑운모화강암과 반상변정질편마암 중의 파동소광을 나타내는 석영 입자들로 생각된다. 시험결과 팽창률은 0.268%로 약간 높은 값을 보였다. 마모율은 33.2% (Table 3)로 보통이지만 화학적으로 불안정하므로 다른 용도의 골재로 사용하던가, 저 알칼리성 시멘트 또는 첨가제 등을 사용하는 조건으로 고내구성을 요하지 않는 콘크리트구조물에는 사용할 수 있다고 본다.

장성호 조골재 (SG 9)

SG 9 시료의 암석은 주로 화산암류와 퇴적암류로 구성된다 (Table 3). 구성비가 약 22%를 차지하는 현무암은 암회색에서 암록색으로 방해석, 녹니석, 옥수 등이 포함되어 있다. 응회암은 구성비가 약 33%인데, 사실로 구성되

어 반응성물질은 별로 포함되지 않는다. 그 밖의 퇴적암류로 사암 및 셰일 등이 약 33%를 차지하는데 화학적으로 불안정한 물질은 거의 없다. 이러한 암석들의 구성광물 중 시멘트의 알칼리 성분과 반응해서 콘크리트를 팽창시키는 데 기여하는 물질은 현무암 중의 옥수로 생각되나, 축진법을 이용한 알칼리-골재 반응성 조사 결과 0.147%로 낮은 값을 보여 영산강 본류와 지류의 조골재 중에서 유일하게 화학적 안정성을 나타냈다. 마모율도 27.72%로 낮은 값을 가지며 부존량이 풍부하여 매우 유망한 조골재로 생각된다.

섬진강 조골재 (SG 11, SG 14)

SG 11 시료의 암석 구성은 반상변정질편마암, 화강암질편마암, 화강편마암이 약 60%를 차지하고, 나머지는 편암류와 사암이다 (Table 3). 반상변정화강암질편마암은 미사장석의 반상변정이 우세하게 발달하고, 석영 입자는 중립질의 것과 재결정된 세립질의 것으로 이뤄지며 파동소광이 약간 나타난다. 화강암질편마암의 석영 입자들은 파쇄되어 있거나 변형되어 파동소광을 보인다. 화강편마암의 암석 특성도 화강암질편마암과 거의 유사하다. 편암류와 사암에서는 반응성 광물이 거의 보이지 않는다. 이러한 암석들의 구성광물 중 시멘트의 알칼리 성분과 반응해서 콘크리트의 팽창에 기여하는 물질은 편마암류 중 격자구조가 변형되어 파동소광을 나타내는 석영 입자들로 판단된다. 시험 결과 팽창률은 0.175%로 나타났다.

SG 14 시료를 채취한 지점은 섬진강 중상류로, 이 곳의 조골재를 구성하고 있는 암석은 염리상화강암이 85%를 차지하며 운모편암과 각섬석편암이 소량 포함된다 (Table 3). 화강암 중의 석영은 봉합상 조직을 가지며, 파동소광을 나타낸다. 편암류는 세립의 석영을 포함하고 있는데 입자의 변형 정도가 낮다. 이러한 조골재의 구성 암석 중에서 팽창에 기여하는 물질은 주로 염리상화강암 중의 파동소광을 나타내는 석영 입자들로 생각된다. 시험 결과 팽창률은 0.22%로 약간 높게 나타났다. 이 시료의 마모율은 31.36% (Table 3)로 보통이나, 화학적으로 약간 불안정하므로 다른 용도의 골재로 사용하던가, 저알칼리성 시멘트 또는 첨가제 등을 사용하는 조건으로 고내구성을 요하지 않는 구조물에는 사용할 수 있다고 본다.

요천 조골재 (SG 16)

요천의 조골재를 구성하는 암석은 주로 흑운모화강암, 염리상화강암과 반상화강암이다. 암석 구성비가 32.5%를

차지하는 주라기의 흑운모화강암은 중립~조립의 등립상 조직을 보이고 석영은 파동소광을 거의 나타내지 않는다. 엽리상화강암은 약 14%를 차지하며 석영은 재결정화되어 봉합상조직을 나타낸다. 반상화강암은 약 27%를 차지하는데, 이에 포함되는 석영 입자는 반자형~타형으로 파동소광을 나타낸다. 이러한 암석들의 구성광물 중 시멘트의 알칼리 성분과 반응해서 콘크리트를 팽창시키는 물질은 반상화강암 중 파동소광을 보이는 석영으로 생각된다. 이 시료의 팽창률은 한계치인 0.168%와 거의 같은 0.173%로 비교적 낮은 값을 나타내었다. SG 16 시료 채취지점의 조골재의 마모율은 39.54%로 40%의 한계값보다는 낮지만 금번 조사 대상의 조골재 중 가장 높은 값을 보인다. 그러나 화학적으로는 거의 안정된 것으로 생각되므로 내마모성과 고내구성을 요하지 않는 콘크리트구조물에는 사용 가능할 것으로 보인다.

금강 상류 조골재 (SG 18, SG 22)

SG 18 시료는 금강 상류에서 채취된 조골재로 구성암석은 주로 화강암질편마암과 편암류이다 (Table 3). 이들 중에 포함된 석영 입자는 세립으로 파동소광을 보이지 않는다. SG 22 시료도 금강 상류의 것으로 구성암석은 주로 화강암질편마암, 반상변정화강암질편마암으로 이들이 76%를 차지하며, 그 밖에 퇴적암류가 포함된다 (Table 3). 이들 암석에 포함된 석영 입자들 역시 거의 파동소광을 보이지 않아서 화학적으로 안정되어 있는 것으로 판단된다. 시험 결과 SG 18과 SG 22 시료의 팽창률은 유해한 정도의 한계치인 0.168%보다 아주 낮은 0.111%와 0.078%로 나타났다. 한편, 마모율도 각각 29.8%와 31.64%로 비교적 낮은 값을 나타내므로, 고내구성, 내마모성 콘크리트구조물에 매우 적합한 골재로 판단된다.

이상과 같이 조사지역에서의 골재의 알칼리와의 반응 팽창성의 차이는 골재 중 주로 화강암과 편마암에 포함되는 파동소광을 갖는 석영과 화산암류 중에 포함되는 유리질 실리카의 함유량에 의해 좌우되며, 이러한 반응성 물질의 함유량은 골재를 구성하는 암종이 같다고 하더라도 암석의 형성환경에 지배된다. 따라서 각 지역의 골재는 사용 전에 반드시 품질 판정시험을 거쳐야 하는 바, 여러 판정법 중에서 신속하며 신뢰성이 높은 축진시험법이 매우 유용함을 알 수 있다.

결 론

축진시험법을 이용하여 전라권 하천 조골재를 대상으

로 알칼리-골재 반응성을 조사하였다. 축진시험법으로 7일간 양생시킨 몰탈바의 팽창량은 몰탈바 시험법에서 6개월에 해당하는 결과치와 유사하고, 몰탈바법에서의 팽창한계값 0.1%에 대해 축진법의 팽창한계값은 0.168%이다. 강 유역별로 채취한 조골재로 제작한 몰탈바의 축진법을 이용한 팽창량시험 결과는 다음과 같다.

1. 영산강과 그 지류의 조골재의 콘크리트에서의 팽창량은, 영산강 중류의 조골재; 0.197~0.489%, 지석천 하류의 조골재; 0.311%, 황룡강 하류의 조골재; 0.268%, 황룡강 상류에 해당하는 장성호의 조골재; 0.147%로 다양한 팽창 특성을 보이는데, 그 중에서 유일하게 장성호의 조골재만이 유해한 정도의 팽창량 한계값 0.168%보다 낮은 값을 나타내었다. 섬진강과 요천 조골재의 콘크리트에서의 팽창량은, 섬진강 중류; 0.175%, 섬진강 중상류의 조골재; 0.22%, 요천의 조골재; 0.173%로, 영산강의 것과 비교할 때 변화의 폭도 좁고 비교적 낮은 값을 나타내지만 팽창한계값보다는 높았다. 금강 상류의 조골재는 팽창률이 0.078~0.111%로 매우 낮은 값을 보였다. 이 중에서 팽창률이 0.168%를 넘는 골재는 콘크리트용 골재보다는 다른 용도의 골재로 사용하는 것이 좋고, 콘크리트용으로 사용하게 될 경우 저알칼리성 시멘트와 함께 사용하든지 또는 첨가제를 사용하는 것이 바람직하다.

2. 조사지역에서의 이러한 팽창률의 차이는 골재 중의 화강암과 편마암에 포함되는 파동소광을 갖는 석영과 화산암류 중에 포함되는 유리질 실리카의 함유량에 의해 좌우된다. 이러한 반응성 물질의 함유량은 골재를 구성하는 암종이 같다고 하더라도 해당지역 암석의 형성환경에 지배되므로, 골재는 사용 전에 반드시 품질 판정시험을 거쳐야 하며, 여러 판정법 중에서 본 연구에서 적용한 축진시험법이 매우 유용함을 알 수 있다.

3. 축진시험법의 유용성 여부를 확인하기 위한 시험에서, 알칼리에 대해 비반응성 골재에 반응물질인 파이렉스 글래스를 각각 10%, 20% 첨가한 시료의 팽창률은, 10% 첨가한 것이 1.325%로 팽창률 한계값의 8배, 20% 첨가한 것이 0.608%로 약 4배의 팽창률을 보였다. 더 많은 검증이 필요하겠지만 반응성 물질의 함유량과 팽창률 관계에서 서로 비례관계를 보이다가 반비례관계로 반전되는 임계값이 함유량 20% 내에 존재할 것으로 생각된다.

사 사

본 논문 작성시 많은 도움을 주신 한국자원연구소 지질연구부 이동영 박사님과 김주용 박사님께 깊은 감사를 드리고, 논문의 초고를 자상하게 검토해 주신 임순복 심사

위원께도 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 양동윤, 이동영 (1995) 콘크리트 장기 안정성을 위한 골재의 선택. 자원환경지질, v. 28, p. 519-525.
- Chatterji, S. (1979) An Accelerated Method for the Detection of Alkali-aggregates Reactivities of Aggregates. Cement and Concrete Research, v. 8, p.647-649.
- Diamond, S., (1981) Effects of Two Danish Flyashes on Alkali Contents of Pore Solutions of Cement-Flyash Pastes. Cement and Concrete Research, v. 11 p. 383-394.
- Diamond, S., (1983) Alkali Reactions in Concrete-pore Solution Effects. proc. 6th Int. Conf. Alkalies in Concrete, Copenhagen, p. 155-166.
- Tang, M., Han, S. and Zhen, S. (1983) A Rapid Rethod for Identification of Alkali Reactivity of Aggregates. Cement and Concrete Research v. 13, p. 417-422.
- 大野定俊, 嵩英雄, 吉岡保彦, 篠崎征夫 (1986) モルタルバ-促進法による骨材のアルカリ反応性の判定. 骨材資源, No. 68, p. 215-221.
- 田村博, 星野善孝, 齊藤廣志, 高橋利一 (1984) アルカリ-骨材反応性の早期判定に関する実験. 日本建築學會大會學術講演梗概要 (10月號), p. 27-28.

1997년 3월 6일 원고접수