

# 제주산 현무암의 콘크리트용 골재 사용을 위한 품질 특성 평가

## Quality Evaluation of Basalt Aggregates from JEJU Island

장 명 훈

최 희 복\*

Jang, Myung-Houn

Choi, Hee-Bok\*

Department of Architectural Engineering, Jeju National University, Jeju-si, Jeju-do, Korea

### Abstract

This study was carried out to assess the suitability in terms of the standards of material quality of basalt aggregates from JEJU Island as a source for concrete aggregate. Quality assessments on the basalt aggregates were performed to assess the soundness of coarse aggregates using sodium sulfate solution, aggregate crushing test, and Los Angeles abrasion test. In addition, XRD, XRF, porosity, and compressive and tensile strength tests were performed to analyze the chemical components and the mechanical properties. In general, the mechanical properties of basalt aggregates from some areas did not meet the Korea Standards (KS), but the levels of compressive and tensile strength were higher than those of granite, andesite, and sandstone of other regions.

Keywords : basalt aggregates, soundness of aggregates, resistance to abrasion of coarse aggregates, aggregates crushing value, strength of rough stone

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적 및 배경

해외에서, 현무암 골재는 일반 콘크리트용 골재와 아스팔트용 골재, 댐 및 방파 건설을 위한 골재로서 널리 활용되고 있다. 골재의 품질은 주로 원석의 특성에 의해 결정되기 때문에 골재의 기계적인 성능저하에 영향을 미치는 골재의 표면 거칠기, 입자형태, 공극의 정도, 암석의 구성요소들에 대한 연구가 이루어졌다[1,2,3]. 또한, 콘크리트의 강도는 골재의 표면 거칠기 뿐만 아니라 골재의 품질 및 물리적 기계적 특성에 의해 영향을 받는다. 현무암 골재는 콘크리트의 강도와 품질을 향상시키는 장점도 있지만[4,5], 일반적으로 보통골재보다 단위 중량과 상대밀도가 크기 때문에 콘크리트 펌핑시 골재 분리를 유발시킬 수 있다[6,7].

우리나라의 골재는 알칼리-골재반응에 대해서 거의 안정하다고 보고되고 있지만, 제주산 현무암 골재의 안정성에 대해서는 의견이 대립되고 있다[8]. 현무암 골재는 알칼리-골재반응을 일으킬 수 있는데[6], 특히 규산질 석회암, 이암, 산성 또는 중성을 가진 화산암이 여기에 속하며, 알칼리-골재반응을 일으키는 주요 물질은 현무암에 포함되어 있는 알칼리와 화산유리이다[9,10].

제주도 지역은 화산활동에 의한 마그마에 의해 형성된 지형으로써 다량의 알칼리암류를 포함한 현무암으로 구성되어 있으며[11], 일부 현무암에서는 화산유리도 확인되고 있다[12]. 현무암 골재는 타 지역에서 사용되는 콘크리트용 골재에 비해 비교적 빨리 콘크리트의 열화현상[13]에 영향을 미친다. 따라서, 본 연구는 제주산 현무암 골재의 화학성분 및 기계적 특성을 평가하여 콘크리트의 열화현상을 평가할 수 있는 현무암 골재의 기초적인 자료를 제공한다.

Received : April 3, 2013

Revision received : May 21, 2013

Accepted : May 21, 2013

\* Corresponding author : Choi, Heebok

[Tel: 82-64-754-3731, E-mail: chb0319@jejunu.ac.kr]

©2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험 계획

제주지역의 콘크리트 골재용 석산은 동북부와 서남부 지역에 한정되어 있으며[13], 그 중에서 가장 많이 생산 및 사용되고 있는 안덕면과 표선면 2 지역의 골재를 사용하였다.

두 지역 현무암 골재의 물리적 특성을 고찰하기 위해 Table 1과 같이 콘크리트용 골재로서 요구되는 제반 품질에 대해 평가하였다. 또한 콘크리트가 열을 받을 경우 콘크리트 성능에 지대한 영향을 미치는 골재의 물리적 특성 변화에 대해 온도 변화에 따른 골재의 품질을 평가하였다.

Table 1. Design of experiment

Experiment factors	Condition
XRF, XRD, Porosity	Room temperature
Soundness of aggregates by sodium sulfate	
Resistance to abrasion of coarse aggregates by loss angeles machine	Room temperature, 200 °C, 400 °C, 800 °C,
Aggregates crushing value	
Compressive strength test and Flexural-tension test under high temperature	

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 XRF, XRD 및 Porosity

두 지역의 골재로부터 각각 3개씩의 샘플을 채취하고, 이를 분말화하여 XRF, X선 회절분석 및 수은압입공극률측정법에 의해 Porosity를 측정하였다. 각각의 결과값은 3번의 측정값의 평균값이다.

### 2.2.2 현무암 골재의 안정성 실험

골재 안정성 평가(KS F 2507)를 위한 시험용 용액은 25 °C의 깨끗한 물 1ℓ 에 황산나트륨( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )을 약 250 g의 비율로 가하여 잘 저어 섞으면서 녹이고 약 20 °C가 될 때까지 식힌 후 용액을 48시간 이상  $20 \pm 1$  °C의 온도로 유지한 후 시험에 사용한다. 시료를 5~10 mm, 10~15 mm, 15~20 mm 그리고 20~25 mm 4군으로 분류하여 각각 실험하였다. 시료를 철망바구니에 넣고 시험용 용액 안에 16~18시간 담가둔다. 시료를 건져  $105 \pm 5$  °C의 건조기에서 4~6시간 건조한 후 시료를 실온까지 식힌다. 용액 침전, 건조 및 식히는 과정을 5회 반복한 후, 골재를 깨끗이 씻어  $105 \pm 5$  °C의 건조기에서 일정 질량이 될 때까지 건조하고 체로 친 후 체에 남은 시료의 질량을 측정한다.

### 2.2.3 골재 마모 저항성 실험

시료는 안덕면과 표선면에서 생산되는 골재를 사용하였다. 골재를 입도별(5~10 mm, 10~15 mm, 15~20 mm 그리고 20~25 mm)로 분류하여 상온, 200 °C, 400 °C, 800 °C에서 4시간동안 가열한 후 시료를 상온에서 1일 동안 충분히 식히고 온도에 따른 굵은 골재의 LA 마모시험(KS F 2508)을 행하였다. LA 마모 저항성 시험은 분당 30~33회의 회전수로 500회 또는 1000회(입도구분에 따라 다름) 회전시키고, 시료를 시험기에서 꺼내 1.7 mm의 망체로 친 후, 체에 남은 시료를 물로 씻고  $105 \pm 5$  °C의 온도에서 일정 질량이 될 때까지 건조하여 질량을 재는 것으로 측정하였다.

### 2.2.4 골재 파쇄성 실험

시료는 안덕면과 표선면 2지역의 골재로서, KS F 2541에 따라 10 mm 망체를 통과하고, 6 mm 망체에 남은 골재를 사용하였다. 또한 골재 시료를 상온, 200 °C, 400 °C, 800 °C에서 4시간동안 가열한 후 시료를 상온에서 1일 동안 충분히 식힌 후 파쇄성 시험 전에 물에 침지시킨 후 골재 표면의 수분을 제거하여 시료를 표면건조포화상태로 만든 후 실험 하였다. 시료량은 KS F 2541에 따라 용기 상부에서 깊이 50 mm 되게 다질 수 있는 양으로서 1회당 380 g 씩 2회분 760 g을 준비하였다. 굵은 골재 파쇄성 시험은 직경 75 mm의 원통에 골재를 3층으로 나누어 채우고 25회 다집한 후, 골재를 용기에 넣고, 총하중은 10분 동안 100 kN으로 하였다. 파쇄 시험 후 시료를 원통에서 꺼내어 1.7 mm 망체로 친 후 체를 통과한 세립의 질량을 측정하고, 이 질량을 시료의 질량에 대한 백분율로 나타낸다.

### 2.2.5 고온하에서 현무암의 강도 실험

가열 온도(상온, 200 °C, 400 °C, 800 °C)에 따른 현무암 원석의 압축강도와 인장강도를 평가하기 위해 2 지역의 현무암에서 각각 12개씩 총 24개의 원석 코어를 채취하였다.

코어 시료는 층리 및 엽리면에 수직으로 채취하였으며, Figure 1과 같이 일축압축강도용 코어 시료는 직경 43.5 mm, 길이 87 mm으로 D/H의 비를 0.5에 가깝도록 가공하였으며, 압열인장강도용 코어 시료는 직경 43.5 mm, 길이 43.5 mm로서 D/H의 비를 1.0에 가깝도록 가공하였다.



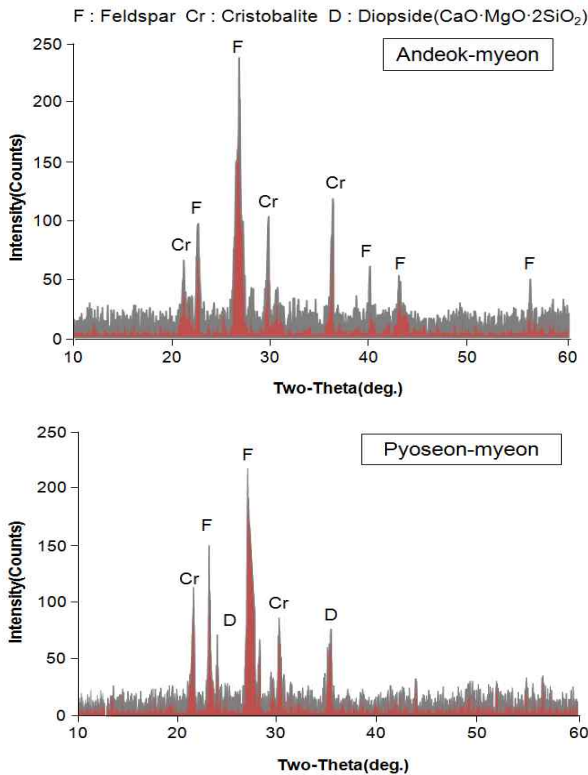


Figure 4. XRD results of the coarse aggregate from the basalt

2지역의 현무암 골재에서 시멘트내 알칼리 성분과 반응하여 시멘트알칼리골재반응을 일으키는 요인이 될 수 있는 알칼리금속산화물인  $\text{Na}_2\text{O}$  및  $\text{K}_2\text{O}$ 이 각각 2.29~3.70%와 1.49~1.77%을 함유하고 있다. 현무암 골재가 함유하고 있는  $\text{Na}_2\text{O}$  및  $\text{K}_2\text{O}$  성분이 100% 이온화되어 시멘트내 알칼리 성분인  $\text{Na}^+$ 이온 및  $\text{K}^+$ 이온의 양을 증가시킨다는 연구결과는 없지만, 현무암 또는 화산재의 경우 보통 0.2~0.3%를 함유하고 있고[18], 가능한  $\text{Na}_2\text{O}$  및  $\text{K}_2\text{O}$  성분의 함량이 적은 것이 시멘트알칼리골재반응에서 자유로울 수 있다고 보고 있으나, 안덕면과 표선면 지역의 현무암 골재는 상당량의 알칼리금속산화물을 함유하고 있다. 또한 MgO 성분이 과할 경우 콘크리트의 균열을 유발하기 때문에 KS F 5201에서는 5%이하로 규정하고 있는데, 2종류 샘플에서 최소 9.02% 및 5.37%로서 다소 많이 함유하고 있는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 2종류의 제주산 현무암 골재를 사용할 경우 구조체의 알칼리골재반응과 화학적 안정성에 미칠 영향에 대해 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

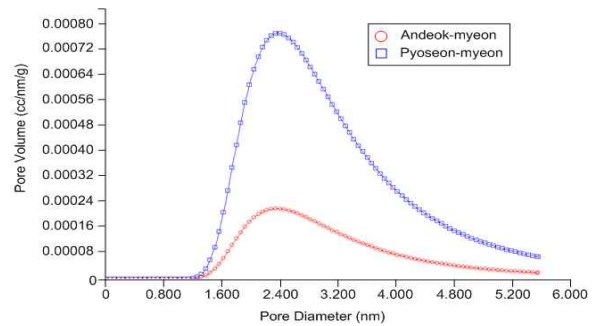


Figure 5. Porosity results of the coarse aggregate from the basalts

안덕면 및 표선면 현무암 골재의 평균 기공 직경은 각각 26.835 nm와 9.478 nm로서 안덕면 골재가 더 큰 기공을 가지고 있다. Figure 5에서 보듯이, 2종류의 골재 모두 가장 많은 부피를 차지하는 기공 사이즈는 대략 2.4 nm로 비슷하지만, 2.4 nm일 때 차지하는 기공 부피는 안덕면 골재의 경우 0.00027 cc/g이고 표선면 골재는 0.00065 cc/g이다. 또한 전체 기공 부피의 경우, 안덕면 골재는  $3.726 \times 10^{-3}$  cc/g이고 표선면 골재는  $9.424 \times 10^{-3}$  cc/g이다. 일반적으로 안덕면 골재가 표선면 골재에 비해 평균 기공 직경은 더 크지만, 전체 기공 부피는 더 작고, 크기가 유사한 기공으로 이루어져 있는 반면, 표선면 골재는 크기가 다양한 기공으로 이루어져 있는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2 현무암 골재의 안정성 평가

황산나트륨에 의한 골재 안정성 평가는 온도변화 또는 동결융해작용 등 물리적인 환경변화에 의해 골재의 공극내에서 반복되는 황산나트륨의 결정화 및 재수화에 의한 과도한 부피 변화에 따른 파괴영향에 저항하는 골재의 능력을 평가하는 방법 중 하나이다[3]. 특히, 동결융해는 현무암 골재를 사용하는 지역에서 고려해야 할 중요한 문제들 중 하나이다.

황산나트륨에 의한 안정성 시험의 결과값이 작을수록 내구적이라고 평가되며, KS F 2507에 의하면, 콘크리트 및 아스팔트용 골재의 품질기준으로 골재의 손실 질량 백분율을 12이하로 규정하고 있다. 골재 종류별 안정성 평가 결과가 Table 3에 있다. 제주산 현무암 골재는 KS 기준에 적합한 것으로 판별되었으나 지역별, 골재 입도별에 따른 품질은 다소 상이한 것으로 나타났다. 표선면 골재가 안덕면 골재보다 품질면에서 다소 저하되는 것으로 나타났다. 특히,

Table 4. Results of the Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> soundness on the coarse aggregates

	Grading (mm)	Specimen mass before test (g)	Mass of each group (g)	Mass percentage of each group (%)	Specimen mass retained in the sieve after test (g)	Mass percentage of specimen loss (%)	Average mass percentage of specimen loss (%)
Andeok-myeon	20~25	1,000	10,000	10.00	991	0.90	1.55
	15~20	750	50,000	1.50	740	1.33	
	10~15	500	2,500	20.00	479	4.20	
	5~10	300	1,000	30.00	294	2.00	
Pyoseon-myeon	20~25	1,000	10,000	10.00	935	6.50	2.63
	15~20	750	50,000	1.50	722	3.73	
	10~15	500	2,500	20.00	472	5.60	
	5~10	300	1,000	30.00	292	2.67	

안덕면 골재는 입도가 작을수록 골재 손실율이 높은 것으로 나타났으며, 표선면골재는 골재 입도별 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 표선면 현무암이 상대적으로 골재 손실량이 큰 것은 다공질이며[19], 다양한 크기의 기공에 의해 상대적으로 많은 기공 양을 가지고 있기 때문으로 판단되며, 이는 porosity 평가에서도 확인할 수 있었다.

### 3.3 골재 마모 저항성 평가

부식 또는 마모에 대한 저항성 또는 내구성은 골재에 요구되는 중요한 요소이며, KS F 2508에 의하면, 콘크리트 및 아스팔트용 골재의 품질기준으로 마모감량을 40이하로 규정하고 있다.

Figure 6에서 보듯이 LA 마모성 평가 결과 다공질이며 상대적으로 큰 기공을 가지고 있는 표선면의 골재가 안덕면 골재보다 마모율이 더 컸으며, 안덕면 골재는 KS 기준을 만족하는 반면 표선면 골재는 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 일반 콘크리트용 쇄석 골재의 마모율이 대략 10% 내외이며, 다른 지역의 현무암 골재의 경우 마모율은 대략 21.30% 이하이기 때문에[20], 두 종류의 골재 모두 일반 콘크리트용 쇄석 및 다른 현무암 골재보다 품질이 매우 낮다는 것을 고려해야 한다. 또한, 영국표준규격에서는 표면 마모가 있는 콘크리트 제품일 경우 골재 마모율이 30%를 넘지 않고, 그 외 콘크리트에서는 45%를 넘지 않는 범위 내에서 콘크리트용 골재로서 사용될 수 있기 때문에[21], 콘크리트용 골재로서 표선면 골재의 사용은 다소 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 두 종류의 골재에서 일반적으로 가열 온도가 높을수록 골재 마모율은 증가하였다. 그리고, 골재의 입도가 작을수록 골재 마모율은 온도 증가

에 더 큰 영향을 받았으나, 상온에서는 골재의 입도가 작을수록 LA 마모율은 낮은 것으로 나타났다.

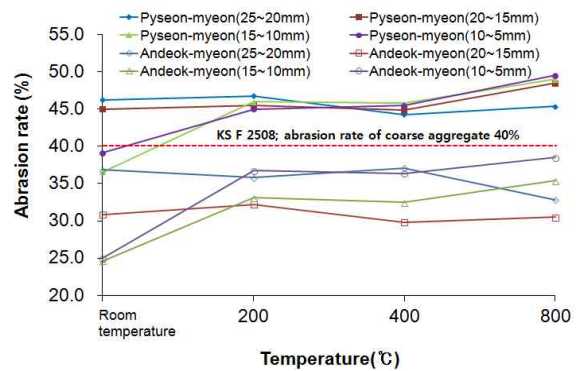


Figure 6. Los Angeles abrasion value

### 3.4 골재 파쇄성 평가

KS F 2541에 의하면, 콘크리트 및 아스팔트용 골재의 품질기준으로 골재의 파쇄값은 그 백분율이 7.5~12.5%의 범위에 있지만, 파쇄값이 30% 이상인 경우 골재의 파쇄값이 7.5~12.5% 범위에 들 때까지 적당히 하중을 조절하여 평가한다. 골재 파쇄성 평가 결과 두 골재 모두 골재 파쇄값이 30%를 상회하였다. 따라서 파쇄값 7.5~12.5% 사이에 만족하는 파쇄하중(N)으로 평가하였으며, 골재 종류 그리고 온도에 따른 골재의 파쇄성 결과는 Figure 7에 있다.

KS 기준에 따라 온도별 2회 실험하고, 그 결과를 평균하였다. 10% 파쇄값이 50 kN보다 작을 경우 일반적으로 단단하지 않은 골재이며 콘크리트용 골재로서 사용이 부적절한 것으로 판단하고 있다[22]. 표선면 골재의 경우 10% 파쇄하중이 상온에서 37.20 kN으로서 콘크리트용 골재로서의 사용은 부적합하다. 안덕면 골재는 상온과 200 °C의 열

을 받은 경우에는 콘크리트용 골재로서 성능 및 품질을 확보할 수 있으나, 화재에 의해 고온의 열을 받을 경우 건물의 재사용을 위한 안전성 측면에서 적절한 보수보강 방안의 고려가 필요 할 것으로 판단된다.

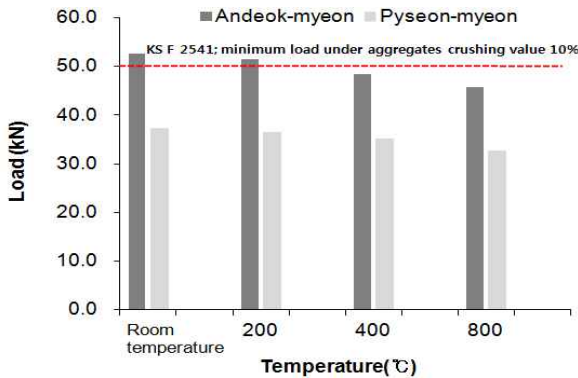


Figure 7. Aggregate crushing estimation under various temperatures

### 3.5 상온 및 고온하에서 현무암의 강도평가

안덕면과 표선면 각각의 현무암 원석에서 직경 2 inch 코어를 채취하여, 상온, 200 °C, 400 °C, 800 °C에서 4시간 동안 가열한 후 압축강도와 인장강도를 측정하였다. 각각의 압축강도와 인장강도는 각 시험체당 3개씩 실험한 후 평균값을 사용하였으며, 그 결과는 Figure 8에 있다.

일반적으로 콘크리트용 골재로는 안산암과 경질사암, 내열성을 필요로 하지 않는 콘크리트에는 화강암도 적절하다 [23]. 서울지역에 분포하고 있는 화강암의 일축압축강도는 83.6~207.1 MPa이며, 할렬인장강도는 5.5~10.8 MPa 범위에 있으며[24], 안산암, 사암의 압축강도가 각각 127.5~140.8 MPa, 107.1~255.1 MPa의 범위에 있다 [25]. 안덕면 골재의 경우 타 지역에서 사용되는 콘크리트용 골재의 품질보다 강도측면에서는 상당히 좋은 품질을 보유하고 있지만, 표선면 골재의 경우는 타 지역의 골재와 유사하거나 최대 압축강도 값보다는 다소 저하되는 경향을 보이기도 한다.

그러나, 암석의 강도는 그것의 고유한 특성이지만, 골재 입자의 유효강도는 골재 입형과 크기에 의해 결정된다. 비록, 골재와 암석의 거동 사이의 상관관계가 일관성이 없다 할지라도, 콘크리트의 강도는 골재의 강도에 영향을 받는다. 특히, 일반적으로 현무암은 파쇄시 각지고 판상형의 형태로 쪼개지기 때문에 오히려 이러한 골재의 형태는 골재와 시멘트

트페이스트의 부착력 향상에 영향을 미칠 수 있다.

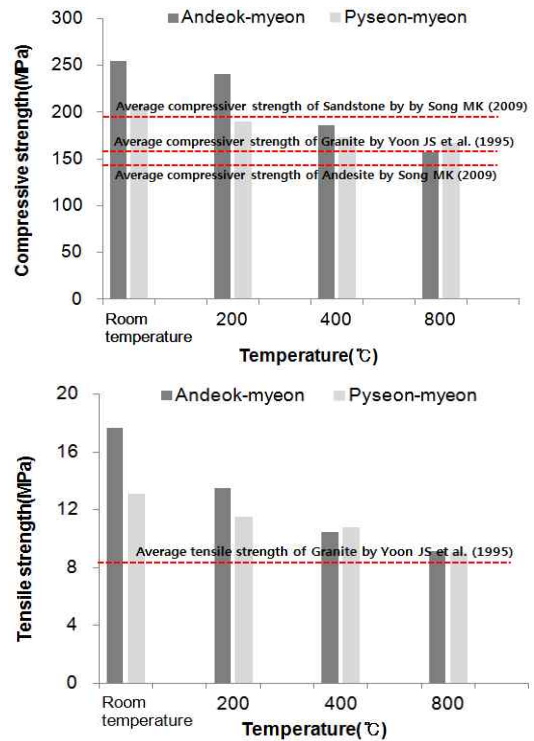


Figure 8. Strength comparison of basalt and other things for concrete

## 4. 결 론

본 연구는 제주 지역에서 사용되는 콘크리트용 골재로서 현무암의 쇄석 굵은골재에 대한 성능을 검토하고자 현무암 골재의 물리적 및 화학적 특성에 관해 실험하였으며, 고찰 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 현무암 골재의 화학성분은 대부분이 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 로 구성되어 있었으며, 무시하지 못할 만큼의 알칼리금속산화물인 Na<sub>2</sub>O 및 K<sub>2</sub>O (각 2.29~3.70% 와 1.49~1.77%), 그리고 콘크리트의 균열을 유발에 영향을 미치는 MgO 성분이 함유되어 있었다.
- 2) 황산나트륨에 의한 안정성 평가에서 2지역의 골재 샘플은 KS 기준을 만족하였지만, 상대적으로 표선면 지역의 골재의 안정성이 다소 저하되었다.
- 3) 현무암 골재의 마모저항성은 안덕면 지역의 골재는 KS 기준 40% 이하를 만족하였지만, 표선면 지역의 골재는 평균 45% 내외로서 콘크리트용 골재로서의 성능을 만족하지 못하였다.

- 4) 골재 파쇄성 평가에서 두 지역의 골재 모두 파쇄값 30%를 상회하였으며, 파쇄값 7.5~12.5% 사이에 만족하는 파쇄하중(N)으로 평가하였을 경우 안덕면 지역의 골재는 KS 기준을 만족하였지만, 표선면 지역의 골재는 37.20 kN으로서 KS에 따른 10% 파쇄값 50 kN에 상당히 못 미치는 골재 품질을 가지고 있었다.
- 5) 현무암의 압축 및 인장 강도 평가결과 2지역의 현무암은 타 지역의 콘크리트용 암석(수도권 지역의 화강암, 기타 지역의 안산암 및 사암)보다 강도가 높은 것으로 나타났다. 또한 최대 800 °C의 열을 가했을 경우에도 일반 상온에서 측정된 기타 지역의 암석강도보다 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 2지역의 암석 중에서 안덕면 지역의 암석 강도가 표선면 지역의 암석 강도보다 높은 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과를 바탕으로, 암석과 그 암석으로부터의 채석 골재의 강도는 차이를 보일 수 있지만, 현무암의 콘크리트 골재 사용을 위해서 골재 흡수율에 따른 굳지 않은 콘크리트의 작업성, 마모율, 파쇄성 그리고 그 영향이 미흡할 수 있으나 알칼리골재반응성에 따른 굳은 콘크리트의 물리적 특성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

## 요 약

본 연구는 제주도 현무암 골재에 대해 콘크리트용 굵은골재로서의 품질기준의 적합성을 평가하였다. 골재의 품질 평가는 KS 기준에서 요구하는 골재안정성, 골재마모저항성, 골재파쇄성 실험을 하였다. 더불어, 현무암 골재의 성분 분석을 위해 XRD, XRF, Porosity를 분석하였으며, 현무암의 강도는 콘크리트용 굵은 골재로서 다른 지역에서 주로 사용되는 화강암, 안산암 그리고 사암의 압축 및 인장강도 결과 값과 비교 평가하였다. 전반적으로, 골재의 기계적 특성 평가 결과, 일부 지역의 현무암 골재는 KS 기준을 만족하지 못하였다. 그러나 제주지역의 현무암의 압축강도와 인장강도는 타 지역의 암석보다 높았다.

**키워드 :** 현무암 골재, 안정성, 마모저항성, 파쇄성, 암석 강도

## References

1. Hartley A. A review of the geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1974 Feb;7:69-100.
2. Lees G, Kennedy CK. Quality, shape and degradation of aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1975 Aug;8:193-209.
3. Smith MR, Collis L. *Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*, 3rd ed. London: The Geological Society; c2001. 339 p.
4. Özturan T, Çeçen C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. *Cement and Concrete Research*. 1997 Feb;27(2):165-70.
5. Tasong WA, Lynsdale CJ, Cripps JC. Aggregate-cement paste interface. II: Influence of aggregate physical properties. *Cement and Concrete Research*. 1998 Oct;28(10):1453-65.
6. Fookes PG. 1980. An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 1980 Nov;13(4):207-29.
7. Neville AM. *Properties of concrete*, 4th ed. London. John Wiley & Sons; c1995. 844 p.
8. Choi KI, Kim JC, Sung YH, Kim SY. An experimental study on concrete with che-ju aggregates. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*. 1995 May; Korea Concrete Institute; 1995. p. 148-53.
9. Arnould M. Alkali-reaction with silica alkaline aggregates result of recent researches in france. *Proceedings International Three Gorges Project Technical Seminar*; 1997 November 26-28; Yichang, China: Chinese Committee on Large Dams; 1997. p. 184-95.
10. Wakizaka Y. Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. *Engineering Geology*. 2000 Apr;56(1-2):211-21.
11. Yu JE, Yang KH, Jeong HY, Kil YW. Petrology of pyroxenite xenoliths enclosed in basaltic rocks from shinsanri of jeju island. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2012 Aug;48(4):299-312.
12. Jeong GY, Sohn YK, Jeon YM. Zeolites in the volcanoclastics of jeju island. *Journal of Mineralogical Society of Korea*. 2010 Mar;23(1):39-50.
13. Yong TH, Choi JM, Lee YS, Yoon JH. An investigation report about phenomena of deterioration of concrete

- structures throughout cheju island. Proceeding of Architectural Institute of Korea; 1994 October: Architectural Institute of Korea; 1994, p. 509–12.
14. Moon JY. A study on the properties of crushed coarse aggregate for concrete [master's thesis]. [Kwangju (Korea)]: Chosun University; 2011. 59 p.
  15. Choi SJ, Jeong Y, Oh BJ, Kim MH. A study on the properties of crushed aggregate for concrete produced in korea. Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2003 Nov; Seoul, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2003, p. 112–5.
  16. Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre Le Bas MJ, Sabine PA, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Woolley AR, Zanettin B. A classification of igneous rocks and glossary of terms. 1st ed. Oxford (UK): Blackwell Scientific; c1989. 193 p.
  17. Choi HG, Jung EH, Kaeg EG, Kang C, Seo JP, Kim JM. A flexural strength properties of extruding concrete panel using stone powder sludge. Proceedings of The Korea Institute of Building Construction; 2006 May 20; Seoul, Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2006, p. 115–8.
  18. Hong SC. A study of natural pozzolan and foamy light weight concrete with volcanic (basaltic) ashes. Architectural Institute of Korea, 1970 Mar;14(35):13–23.
  19. Kim JH. A study on the mechanical characteristics and the strength in pyoseonri basalt [master's thesis]. [Jeju (Korea)]: Jeju National University; 2007. 93 p.
  20. Korkanç M, Tuğrul A. Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate. 2004 Nov;75(3–4):291–307.
  21. So YS. Development of manufacture technology of lightweight pavement block using incineration ash [Construction & Transportation R&D Repoet]. Seoul: Korea Institute of Science & Technology Evaluation and Planning; 2004. 324 p.
  22. Alexander M, Mindess S. Aggregate in concrete. 1st ed. New York (NY): Taylor & Francis; c2005. 435 p.
  23. Lee SB. Application and guality property of aggregate for concrete. Magazine of the Korea Concrete Institute, 2002 Mar;14(2):123–31.
  24. Yoon JS, Kim DY, Jung HM. A study on comparison and evaluation of various strength in seoul granite. Tunnel & Underground—Journal of Korea Society for Rock Mech, 1995 Jun;11(2):144–54.
  25. Song MK. Evaluation on physical properties on rock types of aggregates using artificial weathering. [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Seoul National University of Science and Technology; 2009. 110 p.