

# 골재용 암석의 광물학적 및 역학적 특성과 콘크리트용으로서의 적합성 연구

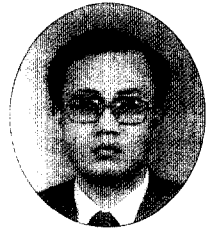
Mineralogical and Mechanical Properties of Some Rocks as Aggregates  
and Their Suitability for Concrete



진 호 일\*  
Chin, Ho-Il



민 경 원\*\*  
Min, Kyoung-Won



연 규 석\*\*\*  
Yeon, Kyu-Seok

## ABSTRACT

This study was designed, firstly, to determine the mineralogical and chemical characteristics of some rock aggregates, secondly, to offer interrelationships between those and mechanical properties, and thirdly, to evaluate their suitability for concrete aggregates. Mineralogical, chemical, physical and mechanical characteristics of the studied rock aggregates indicate that granite from BJ quarry and banded gneisses from KB, HI and SK quarry, and quartzite from the Hongcheon riverside are not proper to cement concrete aggregates because of quartz's potential possibility of alkali-silica reaction, and limestone in SY quarry is proper to asphalt concrete aggregates owing to dolomite causing alkali-carbonate reaction. Augen gneiss and diorite from KB and SA quarry, respectively, are to be not suitable for concrete aggregates because of biotite contents, but augen gneiss in HI quarry and gneisses in Hongcheon riverside are proper to concrete aggregates because of mineralogical and mechanical characteristics.

Keywords: concrete aggregates, mineralogical and mechanical characteristics, suitability

\* 정회원, 강원대 자원공학과 연구원

\*\* 정회원, 강원대 자원공학과 교수

\*\*\* 정회원, 강원대 농공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보  
내주시면 1999년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

우리 나라는 1960년대이래 국가의 경제개발 정책에 따라 건축 및 토목분야에서 꾸준한 발전을 이룩해 왔으며, 특히 1980년대 중반 이후에는 건설 경기의 급속한 성장으로 건축 및 토목재료의 소비량이 매년 크게 증가하고 있는 실정이다. 건설재료중 상당 부분을 차지하고 있는 콘크리트는 구성재료의 대부분이 골재로 이루어져 있기 때문에 골재의 특성이 대단히 중요하다고 할 수 있다. 일반적으로 골재의 성질은 골재의 입형과 입도 등과 같은 이차적인 요소를 제외하면, 천연골재와 쇄석골재를 막론하고 대부분이 원암석의 성질에 좌우된다. 원암석의 성질은 성인과 생성 메커니즘에 의해 다양하게 나타날 수 있는데, 이는 암석의 물성이나 역학적 특성 등과 같은 제반 특성에 많은 영향을 미친다. 또한 동일기원의 암석이라 할지라도 산출되는 지역에 따라 광물학적 및 역학적 특성에 다소 차이가 있을 수 있으며, 풍화 및 변질 정도에 의해서도 서로 다른 특성을 보일 수도 있다. 그러나 지금까지 보편적으로 행해져 왔던 콘크리트용 골재시험은 비중, 흡수율, 마모율, 안정성 등, 주로 물리적 특성 조사에만 국한되어져 왔으며, 이러한 품질 기준에만 적합하면 암석 고유의 광물학적 및 화학적 특성은 거의 무시한 채, 어떤 용도의 골재로 사용되더라도 크게 문제시하지 않았다<sup>(1)</sup>. 하지만 암석 고유의 특성을 감안하여 적합한 용도의 골재로 이용하기 위해서는 암석의 물리적·역학적 특성을 구명하기 전에 먼저 원암석의 광물학적 및 화학적 특성을 이해하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 이와 관련하여 지금까지 발표된 연구로는 알칼리-골재 반응에 관한 연구<sup>(2,3,4,5)</sup>와 석회석 골재를 대상으로 한 제반특성 연구<sup>(6,7)</sup>가 일부 수행된 바 있다.

따라서 이 연구의 목적은 몇 가지 종류의 골재용 암석들에 대한 광물학적 및 화학적 특성을 구명하고, 이들과 물리적·역학적 특성간의 상호관계를 알아보며, 콘크리트용 골재로서의 적합성을

검토하는데 있다.

## 2. 대상재료 및 시험방법

이 연구를 수행하기 위하여 현재 국내에서 골재의 용도로 비교적 많이 사용되고 있으며, 암석의 성인을 잘 반영하는 암석들 중 화강암, 편마암, 석회암, 섬록암, 규암 등 5종의 시료를 채취하였다. 화강암은 BJ 채석장과 홍천강변에서 각각 쇄석골재와 하천골재로 이용되고 있는 시료를 채취하였으며, 편마암은 KB 채석장과 HI 채석장, SK 채석장 및 홍천강변에서, 석회암은 SY 채석장, 섬록암은 SA 채석장, 규암은 홍천강변에서 각각 괴상의 암괴 및 골재시료를 채취하였다.

채취한 괴상의 암괴시료는 각각 세척-건조 후 적당한 크기로 자른 다음, 일부 암편으로는 박편을 제작하였고, 일부 암괴로는 core drilling machine을 사용해 원주형의 시험편을 만든 후, 각 시험편의 지름이 4.1cm, 길이는 일축압축시험편의 경우 대략 8.5cm, 간접인장강도 시험편의 경우에는 4.4cm가 되도록 성형하고, 시험편의 상하 편평도가 0.05mm이내가 되도록 연마하여 물성 및 역학적 시험을 수행하였다. 또한 원소의 화학분석을 위해서는 핸드햄머와 스테인레스 절구(stainless mortar)를 이용하여 파·분쇄한 후, 시료의 대표성을 갖도록 잘 혼합한 다음 사분법에 의해 시료의 양을 약 300g씩 선택한 후, Mixer/ Mill(Spex 8000)을 이용하여 전량-200mesh로 미분쇄하였다.

이 연구를 위하여  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  등 10개의 주성분 원소를 캐나다의 ACTLABS (Activation Laboratories Ltd.)에서 fusion-ICP로 분석하였으며, 강열감량(Ig. loss)도 함께 측정하였다. 또한 겉보기 비중, 흡수율, 공극률, 탄성과 속도 등의 기본물성과 일축압축강도 및 Brazilian test를 통한 간접 인장강도를 측정하였고, 압축시험의 결과로부터 Young's modulus와 Poisson's ratio를 구하였는데, 이러한 시험은 국제 암반역학

Table 1 Modal abundances of some rock aggregates (Unit : vol.%)

Rock types & Sample No. Minerals	Crushed Aggregates								Natural Aggregates			
	Granite	Diorite	Limestone	Gneiss					Granite	Quartzite	Gneiss	
				Banded			Augen				Augen	Banded
				KB-21	HI-21	SK-21	KB-22	HI-22				
BJ-11	SA-11	SY-11	KB-21	HI-21	SK-21	KB-22	HI-22	ST-gr	ST-qz	ST-ag	ST-bg	
Quartz	15.1	0.63		26.6	27.9	14.1	14.2	29.9	21.5	92.9	20.4	23.6
			22.9(6.22)*			22.1(7.85)*						
K-feldspar	63.0	34.3		48.5	50.5	26.4	26.5	58.2	50.6	3.1	70.7	51.5
			41.8(10.9)*			42.4(15.9)*						
Plagioclase	15.6	8.77		8.75	11.8	38.0	13.0	1.88	10.6		2.1	0.62
			19.5(13.1)*			7.44(5.56)*						
Biotite	5.51	26.3		15.3	9.17	20.9	37.5	9.42	6.29		6.67	13.2
			15.1(4.79)*			23.5(14.0)*						
Muscovite	0.38				0.13				2.1	2.11		
Pyroxene		26.1								0.12	0.12	
Hornblende		1.75					2.1					
Opauques	0.25	1.88	1.38	0.5			2.6		0.12	0.25		0.12
Chlorite	0.13				0.5							
Garnet						0.13	4.08					0.12
Sericite							0.12	0.63	8.88	0.87		10.7
							0.38(0.26)*					
Epidote				0.38								0.12
Calcite			82.8			0.25						
Dolomite			14.6									
Olivine			1.25									
Diopside						0.25						
Apatite		0.25										
Hematite										0.62		

\* Mean (standard deviation)

회에서 제시한 표준시험방법<sup>(8)</sup>에 따라 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 암석의 광물학적 특성

이 연구를 위해 사용한 화강암과 편마암, 석회암, 섬록암, 규암 등에 대한 광물학적 및 암석학적 특징에 대해 살펴보면 다음과 같다.

BJ 채석장에서 채취한 화강암(BJ-11)은 비교적 담회색을 띠는 중립질의 등립화강암으로서 주요 조암광물로는 석영과 K-장석, 사장석, 흑운모 등이며, 부성분 광물로는 백운모와 불투명광물, 녹니석 등이 산출된다(Table 1). 이중 석영은 비교적 심한 파동소광을 보이고 있으며, 사장석과 K

-장석은 부분적으로 견운모화 되어 있고, 녹니석화된 흑운모도 관찰된다. 한편 홍천강 하류의 하천골재 채취지에서 채취한 화강암(ST-gr)은 모두 타원형의 둥근 외형을 보이는데, 이는 상류에 있는 암석의 근원지로부터 하류로 운반되는 과정에서 침식되고 연마되어 생긴 것으로, 대체로 중립질의 등립화강암이다. 이 화강암의 주요 조암광물로는 석영과 K-장석, 사장석, 흑운모, 견운모, 백운모, 불투명광물 등이다(Table 1).

SA 채석장에서 채취한 섬록암은 전체적으로 암녹색의 입상조직을 보이고 있으며, lath상의 휘석류와 흑운모가 자형 내지 반자형의 형태를 나타내고 있다. 현미경 관찰 결과, 주요 조암광물로는 K-장석과 흑운모, 휘석, 사장석, 각섬석, 불투명광물 등이며, 소량의 석영이 함유되어 있다(Table 1). 이중 사장석은 상당히 견운모화 되어

있고, 벽계가 휘어져 있는 흑운모가 특징적으로 관찰된다.

SY 채석장의 석회암은 비교적 담회색에서 담갈색을 띠고 있으며, 세립의 방해석 입자가 육안으로 잘 관찰되고 있다. 현미경 관찰 결과 약 0.03~0.3mm에 달하는 타형 내지 반자형의 방해석 입자가 취편쌍정(polysynthetic twin)을 잘 나타내고 있으며, 불투명광물과 감람석, 백운모 등이 소량 수반되어 있다. 또한 육안 및 현미경하에서 방해석과 구분이 곤란하였던 백운석(dolomite)의 함량을 알아보기 위해 넓고 편평하게 자른 압편을 대상으로 HCl과 alizarin red S, potassium ferricyanide 등의 시약을 사용한 착색방법<sup>(9)</sup>을 이용하여 백운석의 함량을 구해본 결과, 전체 조암광물중 약 14.6%가 백운석인 것으로 나타났다.

이 연구를 위한 편마암 시료는 KB, HI, SK 채석장 및 홍천강변에서 채취하였으며, 암상의 조직에 따라 크게 호상 편마암(banded gneiss)과 안구상 편마암(augen gneiss)으로 구분하였다. 이중 호상 편마암(KB-21, HI-21, SK-21, ST-bg)은 전반적으로 흑운모 등의 유색광물과 석영, 장석류 등 무색광물의 호층이 잘 나타나고 있는데, 부분적으로 무색광물의 폭이 커지거나 또는 부풀어올라 안구상의 조직을 나타내는 시료(SK-21)도 관찰된다. 호상 편마암의 주요 조암광물로는 석영과 K-장석, 사장석, 흑운모 등이며, 시료에 따라 백운모와 녹니석, 녹렴석, 방해석, 투회석, 석류석, 불투명 광물 등이 수반되고 있는데(Table 1), 특히 석영은 심한 파동소광을 나타내고 있다. 또한 하천골재 채취지에서 채취한 호상 편마암 시료(ST-bg)는 다른 시료들에 비해 사장석의 함량이 낮고 견운모의 함량이 높아 풍화 또는 변질되었음을 나타내 주고 있다(Table 1). 이에 반하여 안구상 편마암은 대체로 장경이 약 2~7cm(평균 3cm)인 분홍색의 안구상 장석 주위를 흑운모와 같은 유색광물이 감싸고 있는데, 부분적으로 미세균열이 다수 발견되기도 하며, 안구상 장석의 색깔이 담회색인 경우(HI-22)도 관찰

된다. 안구상 편마암의 주요 조암광물은 석영과 K-장석, 사장석, 흑운모 등이며, 시료에 따라 석류석, 불투명광물, 각섬석, 휘석, 견운모 등이 산출된다(Table 1). 특히 HI 채석장에서 채취한 시료(HI-22)와 하천골재 채취지에서 채취한 시료(ST-ag)에서는 대부분의 장석류가 K-장석으로 나타나고 있으며, KB-22 시료에서는 석류석이 많이 산출되고 있어 고온의 변성작용에 의해 암석이 생성되었음을 암시하고 있다. 또한 안구상 편마암에 함유되어 있는 석영은 호상 편마암에 함유된 석영에서보다 파동소광이 훨씬 적게 관찰된다.

이 연구를 위한 규암은 홍천강변의 하천골재 채취지에서 채취한 것으로 대부분 석영으로 구성되어 있고, 소량의 K-장석과 백운모, 견운모, 불투명광물 등이 함유되어 있다. 특히 석영은 파동소광을 보이는 입자와 보이지 않는 입자가 동시에 관찰되고 있는데, 현미경하에서의 면적비를 계산해 본 결과 전체 석영중 약 75%가 파동소광을 나타내었다.

### 3.2 암석의 화학적 특성

분석한 원소중 SiO<sub>2</sub>의 경우 석회암을 제외한 대부분의 암석에서 50wt.% 이상의 높은 함량을 보였는데, 특히 석영의 함량이 많은 규암(ST-qz)에서 96.3wt.%로 가장 높았으며, 석영과 K-장석의 함량이 높은 일부 안구상 편마암(HI-22)에서도 78.8wt.%로 높은 SiO<sub>2</sub> 함량을 나타내었다(Table 2). TiO<sub>2</sub> 함량은 섬록암과 호상 편마암에서 높은 값을 보여 주었으며, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량은 화강암과 대부분의 편마암에서 10wt.% 이상의 높은 함량을 나타내었다(Table 2). 또한 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(T)과 MnO는 섬록암과 일부 호상 편마암에서 그 함량이 높았고, MgO의 함량은 휘석이 가장 많이 함유되어 있는 섬록암에서 10wt.% 이상의 높은 값을 보여 주었다(Table 2). 한편 CaO의 함량은 석회암과 섬록암에서 각각 50.7wt.%와 10.3wt.%로 다른 암석에 비해 높은 함량을 나

Table 2 Abundance of major elements and loss on ignition in some rock aggregates

(Unit :wt.%)

Rocktypes & Sample No.	Crushed Aggregates								Natural Aggregates		
	Granite	Diorite	Limestone	Gneiss					Granite	Quartzite	Gneiss Augen
				Banded			Augen				
	BJ-11	SA-11	SY-11	KB-21	HI-21	SK-21	KB-22	HI-22	ST-gr	ST-qz	ST-ag
SiO <sub>2</sub>	72.4	50.5	2.03	55.2	67.9	67.1	65.3	78.8	71.9	96.3	70.2
			63.4(5.81)*			72.1(6.75)*					
TiO <sub>2</sub>	0.24	1.36	0.02	1.71	0.54	0.73	0.35	0.13	0.20	0.05	0.27
			0.99(0.51)*			0.24(0.11)*					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.8	9.54	0.56	15.5	15.1	15.3	15.2	9.81	14.8	1.45	13.7
			15.3(0.16)*			12.5(2.70)*					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	1.70	10.4	0.42	14.6	5.38	5.90	3.05	1.82	2.04	0.40	2.99
			8.63(4.23)*			2.44(0.62)*					
MnO	0.04	0.14	0.12	0.16	0.04	0.05	0.03	0.02	0.05	n.d.	0.02
			0.08(0.05)*			0.03(0.01)*					
MgO	0.32	10.4	4.09	1.73	1.85	0.98	0.25	0.24	0.38	0.03	0.24
			1.52(0.38)*			0.25(0.01)*					
CaO	1.41	10.3	50.7	7.17	2.13	2.41	1.39	0.24	1.08	n.d.	0.12
			3.90(2.31)*			0.82(0.58)*					
Na <sub>2</sub> O	3.67	1.46	0.01	3.31	2.95	2.76	2.73	1.52	3.42	0.03	2.40
			3.01(0.23)*			2.13(0.61)*					
K <sub>2</sub> O	4.65	3.92	0.13	0.89	2.92	3.96	7.73	5.69	5.07	0.45	7.05
			2.59(1.27)*			6.71(1.02)*					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	1.22	0.13	0.40	0.08	0.25	0.13	0.04	0.08	0.02	0.10
			0.24(0.13)*			0.09(0.05)*					
Ig. loss	0.58	1.34	41.9	0.16	1.77	1.42	1.51	0.65	0.81	0.22	0.76
			1.12(0.69)*			1.08(0.43)*					
Sum	98.9	100.6	100.1	100.8	100.7	100.9	97.7	99.0	99.8	99.0	97.9

\* Mean (standard deviation)

타내었는데, 이는 석회암과 섬록암에 많이 함유되어 있는 방해석과 휘석류에 기인한 것으로 판단된다. 또한 Na<sub>2</sub>O는 화강암에서, K<sub>2</sub>O의 함량은 안구상 편마암에서 가장 높은 값을 보여, 화강암과 안구상 편마암 중에서의 사장석과 K-장석에 대한 함유 정도를 어느 정도 잘 반영해 주고 있다(Table 1; Table 2). 한편 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 함량은 연구대상 암석중 섬록암에서 가장 높은 값을 나타내고 있는데, 이는 섬록암내에서 관찰되고 있는 인회석에 의한 결과로 생각된다(Table 1). 강열감량의 경우에 있어서는 다른 암석에 비해 석회암에서 매우 높은 값을 보이는데, 이는 석회암에 함유되어 있는 방해석의 일부가 약 900℃의 온도에서 분해되어 산화칼슘(CaO)으로 해리 되었기 때문으로 판단된다.

### 3.3 암석의 물성 및 역학적 특성

이 연구에서 겉보기 비중은 흑운모와 휘석 등 유색광물이 많이 들어 있는 섬록암에서 가장 높은 값(2.97)을 보였으며, 하천에서 채취한 화강암에서 가장 낮은 값(2.54)을 나타내었다(Table 3). 또한 흡수율과 공극률은 하천에서 채취한 안구상 편마암이 가장 높은 값을 보이고, 석회암에서 가장 낮은 값을 나타내었으며, P파 속도는 섬록암에서 가장 높았고, 채석장에서 채취한 안구상 편마암에서 가장 낮은 값을 보여 주었다(Table 3). 일반적으로 일축압축강도는 암석의 공학적 특성을 나타내는 가장 중요한 지표로 사용되고 있는데, 이러한 압축강도는 시험조건과 시험편의 상태와 같은 외부적인 요인 이외에 암석의 구성 광물과 입자들의 크기, 공극률, 풍화정도, 절리

Table 3 Mechanical properties of some rock aggregates

Rock types & Sample No. Mechanical Properties	Crushed Aggregates								Natural Aggregates			
	Granite	Diorite	Limestone	Gneiss					Granite	Quartzite	Gneiss	
				Banded			Augen				Augen	Banded
	BJ-11	SA-11	SY-11	KB-21	HI-21	SK-21	KB-22	HI-22	ST-gr	ST-qz	ST-ag	ST-bg
Apparent Specific Gravity	2.62	2.97	2.75	2.95	2.71	2.71	2.62	2.59	2.54	2.63	2.61	2.72
				2.79*			2.61*					
Absorption(%)	0.29	0.17	0.11	0.14	0.13	0.15	0.29	0.43	1.06	0.15	1.19	0.92
				0.14*			0.36*					
Porosity(%)	0.75	0.49	0.31	0.40	0.36	0.39	0.76	1.11	2.69	0.38	3.08	2.48
				0.38*			0.94*					
Seismic Wave Velocity(m/sec) P/S-wave	3,783/ 2,183	4,589/ 2,666	4,288/ 2,491	4,203/ 2,426	3,189/ 1,841	3,093/ 1,786	3,379/ 1,963	2,162/ 1,263	n.d.**	3,181/ 1,836	n.d.**	n.d.**
				3,495*/2,018*			2,771*/1613*					
Uniaxial Compressive Strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	829	727	621	869	590	947	503	978	792	1,478	1,061	1,667
				802*			741*					
Young's Modulus (×105kgf/cm <sup>2</sup> )	2.50	2.86	2.41	4.23	2.40	4.28	4.09	3.53	n.d.**	5.87	n.d.**	n.d.**
				3.64*			3.81*					
Poisson's Ratio	0.29	0.32	0.32	0.18	0.30	0.13	0.24	0.18	n.d.**	0.20	n.d.**	n.d.**
				0.20*			0.21*					
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	60	70	61	84	58	84	48	91	n.d.**	107	n.d.**	n.d.**
				75.3*			69.5*					
Modulus Ratio	301.6	393.4	388.1	486.8	406.8	452.0	813.1	360.9	n.d.**	397.2	n.d.**	n.d.**
				448.5*			587*					
Brittleness	14	10	10	10	10	11	10	11	n.d.**	14	n.d.**	n.d.**
				10.3*			10.5*					
Point Load at Rupture(kg)***	n.d.**	n.d.**	n.d.**	n.d.**	n.d.**	n.d.**	n.d.**	n.d.**	690	n.d.**	803	1,305
				n.d.**			n.d.**					

\* Mean

\*\* n.d. : not determined.

\*\*\* Number of samples for point load test : Granite(12).Augen gneiss(15). Banded gneiss(13)

및 균열의 빈도 등과 같은 내부적인 요인에 의해 많은 영향을 받으며, 보통 석영을 교결물질로 갖거나 또는 입자의 크기가 아주 작은 암석인 경우에는 압축강도가 강하고, 점토를 교결물질로 갖는 암석이나 공극률이 큰 암석의 경우에는 압축강도가 약한 것으로 알려져 있다<sup>(10)</sup>. 이 연구에서 일축압축강도는 쇄석골재용으로 사용되는 암석의 경우, 일부 안구상 편마암(HI-22)과 호상 편마암(SK-21)에서 900kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 값을 나타내었고, 석회암에서 가장 낮은 값을 보여 주었다. 또한 규암을 제외한 하천골재 시료들은 점하중 시험을 통해 일축압축강도를 환산<sup>(11)</sup>하여 구하였는데, 대체로 연구대상 암석중 호상 편마암이 비교적 강하고 화강암이 약한 것으로 나타났다(Table 3). 이러한 결과는 원암석의 성인뿐만

아니라 풍화정도에 기인한 것으로 생각되며, 화강암을 제외하고는 대부분의 암석시료에서 하천골재 시료가 쇄석골재용 시료들에 비해 전반적으로 높은 값을 나타내고 있다(Table 3).

#### 4. 종합 논의

동일 암종을 대상으로 하천골재와 쇄석골재에 대한 제반특성을 알아보기 위하여 연구대상 암석중 KB 채석장에서 채취한 안구상 편마암(KB-22)과 이보다 하류 지역의 홍천강변에서 채취한 동일기원으로 판단되는 안구상 편마암(ST-ag)을 비교해 보았다. 그 결과 하천에서 채취한 천연 골재시료(ST-ag)는 석산에서 채취한 쇄석골재용 시료(KB-22)보다 석영, K-장석

ASG	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	⊙	†
ABSORP	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
POROSI	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
PWAVE	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	⊙	†
SWAVE	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	⊙	†
UNISTRENG	●	†	†	†	⊙	†	†	⊙	†	†	†	†	†
YOUNG	†	⊙	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
POISS	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	⊙	†
TENSIL	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	⊙	†
	Qtz	K-feld	Pla	Bio	Mus	Pyx	Hb	Opa	Chl	Gar	Ser	Cal	

Fig. 1 Correlation matrix of rock forming mineral abundances and mechanical properties for the rock aggregates. (ASG : Apparent specific gravity, ABSORP : Absorption, POROSI : Porosity, PWAVE : P-wave, SWAVE : S-wave, UNISTRENG : Uniaxial compressive strength, YOUNG : Young's modulus, POISS : Poisson's ratio, TENSIL : Tensile strength, Qtz : Quartz, K-feld : K-feldspar, Pla : Plagioclase, Bio : Biotite, Mus : Muscovite, Pyx : Pyroxene, Hb : Hornblende, Opa : Opaques, Chl : Chlorite, Gar : Garnet, Ser : Sericite, Cal : Calcite)

등 상대적으로 풍화에 강한 광물들은 더 많이 함유되어 있는 반면에, 사장석과 흑운모와 같이 풍화에 민감한 광물들은 상대적으로 적은 함량을 나타내었다(Table 4). 따라서 몇몇 원소들에 대

Table 4 Mineral and chemical composition and mechanical properties of the augen gneiss aggregates

Aggregate types		Crushed Aggregates	Natural Aggregates
Sample No.		KB-22	ST-ag
Mineralogical Composition (vol.%)	Quartz	14.2	20.4
	K-feldspar	26.5	70.7
	Plagioclase	13.0	2.10
	Biotite	37.5	6.67
Chemical Composition & Ignition Loss (wt.%)	SiO <sub>2</sub>	65.3	70.2
	TiO <sub>2</sub>	0.35	0.27
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.2	13.7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.05	2.99
	CaO	1.39	0.12
	Na <sub>2</sub> O	2.73	2.40
	K <sub>2</sub> O	7.73	7.05
Ig. loss	1.51	0.76	
Mechanical Properties	Apparent Specific Gravity	2.62	2.61
	Absorption (%)	0.29	1.19
	Porosity(%)	0.76	3.08
	Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	503	1.061

한 화학조성에 있어서도 이들간에 뚜렷한 함량차이를 보여 주었는데, 특히 CaO 함량과 강열감량의 경우에는 암석이 수계를 따라 운반되는 과정 중에 사장석이 풍화되고, 유기물을 흡착하고 있는 미세한 점토광물들이 유출된 결과로 인해 하천에서 채취한 천연골재(ST-ag)가 석산에서 채취한 쇄석골재용 시료(KB-22)보다 각각 1/10 및 1/2 이하의 낮은 함량을 나타내었다(Table 4). 또한 암석의 물성중 겉보기 비중은 두 시료간에 거의 비슷한 값을 갖고 있으나, 흡수율과 공극률은 하천골재에서 더 높은 값을 보이고 있으며, 일축압축강도의 경우도 하천골재가 석산에서 채취한 쇄석골재용 시료보다 약 2배정도 강한데(Table 4). 이는 채석장에서 발파와 파쇄에 의해 쇄석골재를 제조할 당시 암석내에 생긴 내부 균열면을 충전하고 있던 미세한 광물 입자들이 수계를 통해 운반되는 과정 중에 제거되었을 뿐만 아니라, 상대적으로 풍화에 강한 광물들이 하천골재에 비교적 많이 남아 있기 때문인 것으로 판단된다(Table 1).

암석의 조암광물과 물리적·역학적 특성간의 상호관계를 살펴보면, 암석중 석영 함량과 일축압축강도 사이에는 높은 양의 상관관계(상관계수 r=0.796)를 나타내고 있으며, 백운모의 함량과

일축압축강도간에도 좋은 양의 상관관계( $r=0.507$ )를 보여(Fig. 1), 비교적 풍화에 강한 광물의 함량이 많을수록 일축압축강도가 높은 것을 알 수 있다. 또한 암석중 견운모의 함량과 겉보기 비중, P파 및 S파 속도, 포아송비와 인장강도 사이에는 비교적 양호한 음의 상관계수( $r = -0.7 \sim -0.5$  정도)를 보이는데, 이는 암석이 변질되거나 풍화될 경우 이러한 물성 및 역학적 특성이 감소된다는 것을 잘 반영해 주고 있다.

편마구조의 방향성에 따른 물성 및 역학적 특성 변화를 알아보기 위하여 SK 채석장에서 채취한 괴상의 호상 편마암 시료를 대상으로 편마구조에 수직인 방향과 수평인 방향으로 각각 원주형의 시험편을 제작하여 서로간의 물리적·역학적 특성을 비교해 본 결과, 편마구조에 수직으로 제작된 시료가 수평으로 제작된 시료에서보다 일축압축강도와 인장강도는 약간 높게 나타났으나 탄성파속도와 포아송비, 탄성계수비 등은 약간 낮은 값을 보여 주었다(Table 5). 이러한 결과는 편마구조가 형성될 당시 받은 응력의 차이로 광물들이 재배열되어 조직에 있어서 이방성(anisotropic)을 갖기 때문인 것으로 해석된다.

일반적으로 골재는 그 용도에 따라 크게 시멘트 콘크리트용, 아스팔트 콘크리트용, 도로 포장용 및 철도 선로용 등으로 분류되며, 이중 시멘트와 아스팔트 콘크리트용으로 소비되는 골재가 대부분을 차지하는데, 시멘트 콘크리트용 골재로는 가능한 암석 중에 알칼리-실리카 반응을 일으킬 수 있는 광물(예를 들면, 파동소광을 보이는 석영, 산성 내지 중성 화산유리, 크리스토티라이트, 트리다이마이트, 오파, 옥수 등)과 백운석 등 알칼리-탄산염 반응을 일으키는 광물이 없어야 좋은 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 또한 운모를 다량 함유하고 있는 암석 골재는 콘크리트의 강도를 저하시키고 마모 저항성을 낮게 하기 때문에 가능한 시멘트 콘크리트용으로 사용하지 않는 것이 좋으며, 특히 건축 구조물로 사용되는 시멘트 콘크리트의 경우에는 화재시의 내화성을 고려해야 하는데, 일반적으로 안산암이나 사암 등은 열에

Table 5 Mechanical properties of the banded gneiss according to direction of gneissosity

Rock Types & Sample No.	Banded Gneiss	
	SK-21 (vertical)	SK-22 (horizontal)
Mechanical Properties		
Apparent Specific Gravity	2.71	2.68
Absorption(%)	0.15	0.18
Porosity(%)	0.39	0.49
Seismic Wave Velocity(m/sec) P/S-wave	3,093/ 1,786	3,831/ 2,225
Uniaxial Compressive Strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	947	810
Young's Modulus ( $\times 105\text{kgf/cm}^2$ )	4.28	4.21
Poisson's Ratio	0.13	0.22
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	84	73
Modulus Ratio	452.0	519.8
Brittleness	11	11

강하지만, 화강암은 석영, 장석, 운모 등 열팽창 계수가 서로 다른 광물을 함유하고 있어서 콘크리트의 균열발생 원인이 될 수 있고, 석회암의 경우에도 약 600℃에서 탄산화되기 때문에 내화 구조물용 골재로는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다<sup>(12)</sup>. 한편 아스팔트 콘크리트용 골재로서 좋은 암석은 석회석이나 백운석과 같이 역청 재료와의 부착성이 좋거나 골재의 입형이 입방체가 가깝고 모난 각이 많게 제조할 수 있는 것, 견고하여 가열 등에 의해 변질되지 않고 내마모성이 좋은 것, 비중이 크고 흡수율이 작은 것(공극이 큰 골재일수록 더 많은 양의 아스팔트를 흡수하기 때문에 아스팔트의 소모량이 더 커짐), 동결-융해 작용에 대한 저항성이 양호한 것, 유해물질(부식토, 실트, 점토 등의 연약물질과 황동석, 황철석, 방연석 등의 황화광물, 석고, 중정석, 맥반석 등의 황산염광물, 흑운모, 백운모 등의 운모류와 석영과 같은 규산염 광물 등)을 규정값 이상 함유하지 않은 것 등으로 알려져 있다<sup>(13)</sup>. 그러나 대부분의 경우 여러 가지 경제적인 측면을 고려할 때 골재의 소비가 있는 지역의 주변에서 골재를 채취하는 것이 유리하기 때문에 각 수요지 주변 지역의 지질과 암석의 제반 특성을 잘 파악한



후 가능한 부작용이 없는 알맞은 용도의 골재를 개발하여 이용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 따라서 연구대상 암석들의 광물학적 및 화학적, 물리적, 역학적 특성을 기준으로 이들 암석들에 대한 콘크리트용 골재로서의 적합성을 검토해보면, BJ 채석장에서 채취한 화강암과 KB, HI, SK 채석장에서 채취한 호상 편마암, 홍천강변에서 채취한 규암 등은 주요 조암광물인 석영이 심한 파동소광을 보이고 있어 알칼리-실리카 반응을 일으킬 수 있고, SY 채석장에서 채취한 석회암의 경우에는 백운석이 약 14.6% 함유되어 있어 시멘트 콘크리트용 골재로 사용할 경우 알칼리-탄산염 반응을 일으킬 수 있기 때문에 가능한 한 시멘트 콘크리트용으로보다는 아스팔트 콘크리트용 골재로 이용하는 것이 좋을 것으로 판단되며, 부득이 시멘트 콘크리트용 골재로 이용하여야 할 경우에는 반드시 화학법이나 모르타르봉법 등 관련시험을 거쳐 사용 여부를 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 KB 채석장에서 채취한 안구상 편마암과 SA 채석장에서 채취한 섬록암은 흑운모가 다량 함유되어 있기 때문에 콘크리트용 골재로 사용할 경우 콘크리트의 강도를 저하시킬 수 있어 가능한 한 이러한 용도로 사용하지 않는 것이 바람직하며, HI 채석장에서 채취한 안구상 편마암과 홍천강변에서 채취한 편마암 등은 운모류의 함량도 많지 않고, 석영도 파동소광을 적게 나타내고 있을 뿐만 아니라 일축압축강도도 높아서 어떠한 용도의 콘크리트용 골재로 사용하더라도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

이와 같이 콘크리트용 골재의 선택시 가능한 한 각각의 용도와 목적에 따라서 유해성 있는 골재는 사용을 하지 않는 것이 바람직한데, 만일 골재의 물리적 특성은 양호하나 광물 및 암석학적인 측면에 있어서 콘크리트용 골재로 부적합할 경우에는 이러한 용도 이외에 도로포장용이나 철도용 등으로 활용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

이상에서 몇 가지 종류의 골재 제조용 원암석들에 대한 광물학적 및 화학적 특성을 알아보고, 이들과 물리적·역학적 특성간의 상호관계와 콘크리트용 골재로서의 적합성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일기원으로 판단되는 안구상 편마암의 경우, 하천에서 채취한 골재용 암석이 채석장에서 채취한 쇄석골재용 암석보다 풍화에 강한 석영과 K-장석을 더 많이 함유하고 있었으며, 풍화에 민감한 사장석과 흑운모는 상대적으로 적게 함유되어 있었다. 또한 CaO 함량과 강열감량은 암석이 수계를 따라 운반되는 과정 중에 사장석이 풍화되고, 유기물을 흡착하고 있는 미세한 점토광물들이 유출된 결과로 인해 하천에서 채취한 천연골재가 석산에서 채취한 쇄석골재용 시료보다 각각 1/10 및 1/2 이하의 낮은 값을 나타내었다.

2. 암석의 물성중 겉보기 비중은 두 시료에서 거의 비슷하나 흡수율, 공극률 및 일축압축강도는 하천골재가 더 높게 나타났는데, 이는 원암석내의 내부 균열면을 충전하고 있던 미세한 광물 입자들이 수계를 통해 운반되는 과정 중에 제거되었을 뿐만 아니라, 상대적으로 풍화에 강한 광물들이 하천골재에 비교적 많이 남아 있었기 때문인 것으로 판단된다.

3. 암석의 조암광물 함량과 물리적·역학적 특성간의 상호관계에서 보면, 암석중 석영 및 백운모의 함량과 일축압축강도 사이에는, 각각 0.7이상( $r=0.796$ ), 0.5 이상( $r=0.507$ )의 상관계수를 갖는 양의 상관관계를 보여, 비교적 풍화에 강한 광물의 함량이 많을수록 일축압축강도가 높은 경향을 나타내었다. 또한 암석중 견운모의 함량과 겉보기 비중, P파 및 S파 속도, 포아송비, 인장강도 사이에는  $-0.7 \sim -0.5$  정도의 비교적 양호한 음의 상관계수를 보여, 암석이 변질되거나 풍화될 경우 이러한 물성 및 역학적 특성이 감소됨을 잘 나타내었다.

4. 호상 편마암에서 편마구조의 방향성에 따른

물성 및 역학적 특성의 경우, 일축압축강도와 인장강도는 편마구조의 수직방향에서, 탄성과속도와 포아송비, 탄성계수비 등은 수평방향에서 각각 다소 높은 값을 나타내어 편마구조가 형성될 당시 광물들이 재배열된 이방성을 잘 반영해 주었다.

5. 연구대상 암석들의 광물학적 및 화학적, 물리적, 역학적 특성 등의 기준으로 이들 암석들에 대한 콘크리트용 골재로서의 적합성을 살펴보면, BJ 채석장에서 채취한 화강암과 KB, HI, SK 채석장에서 채취한 호상 편마암, 홍천강변에서 채취한 규암 등은 시멘트 콘크리트용 골재로 사용할 경우 알칼리-실리카 반응을 일으킬 수 있고, SY 채석장에서 채취한 석회암은 알칼리-탄산염 반응을 일으킬 수 있기 때문에 가능한 한 이러한 용도보다는 아스팔트용 골재로 이용하는 것이 좋으며, 부득이 시멘트 콘크리트용 골재로 이용하여야 할 경우에는 반드시 화학법이나 모르타르봉법 등 관련시험을 거쳐 사용 여부를 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 KB 채석장에서 채취한 안구상 편마암과 SA 채석장에서 채취한 섬록암은 흑운모가 다량 함유되어 있기 때문에, 이에 유의하여 콘크리트용 골재로서의 적합성 여부를 결정하는 것이 좋으며, HI 채석장에서 채취한 안구상 편마암과 홍천강변에서 채취한 편마암 등은 어떠한 용도의 콘크리트용 골재로 사용하더라도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 '96 국내 박사후 연수과정의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 한국학술진흥재단과 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. 김동기, "쇄석골재 자원의 활용방안", 한국자원공학회, 1994년도 추계총회 골재자원 Forum 및 학술발표회 논문집, 1994, pp. 79-89.
2. 하성호, 김경수, 김무한, 정지곤, "콘크리트 골재용 각종 암석의 알칼리-골재반응에 대한 연구", 한국광물학회지, Vol. 3, No. 1, 1990, pp. 18-33.
3. 양동윤, 이동영, "콘크리트 장기 안정성을 위한 골재의 선택", 자원환경지질, Vol. 28, 1995, pp. 519-525.
4. 윤재환, 이양수, "국내 알칼리반응성 골재의 조기판정법에 관한 실험적 연구", 레미콘지, Vol. 45, 1995, pp. 37-43.
5. 양동윤, 이창범, "촉진시험법을 이용한 하천골재의 알칼리 반응성 판정", 자원환경지질, Vol. 30, No. 2, 1997, pp. 175-183.
6. 권순옥, "석회석골재를 사용한 콘크리트의 제반 특성 검토", 레미콘지, Vol. 46, 1996, pp. 60-68.
7. 진호일, 민경원, 백환조, 연규석, "쇄석골재용 석회암의 암석학적 및 역학적 특성", 한국콘크리트학회지, Vol. 9, No. 3, 1997, pp. 119-126.
8. ISRM Commission on Testing Methods, "Rock Characterization Testing and Monitoring", E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, 1981, 211p.
9. Dickson, J. A. D., "A modified staining technique for carbonates in thin section", Nature, Vol. 205, No. 497, 1965, p. 587.
10. Vutukuri, V. S. and Katsuyama, K., "Introduction to rock mechanics", Industrial Publishing & Consulting, Inc., 1994, 275p.
11. Broch, E. and Franklin, J. A., "The point load strength test", Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., Vol. 9, No. 6, 1972, pp. 669-697.
12. 쌍용자원개발주식회사, "산림골재를 이용한 부순모래 제조법", 광업기술자료 14, 1996, 39p.
13. 한국수자원공사, 한국골재협회, "골재의 채취와 생산", 1989, 561p.

### 요 약

이 연구는 몇 가지 종류의 골재용 암석들에 대한 광물학적 및 화학적 특성을 구명하고, 이들과 물리적·역학적 특성간의 상호관계 및 콘크리트용 골재로서의 적합성을 알아보기 위한 것이다. 연구대상 암석

석들의 광물학적·화학적 및 물리적·역학적 특성 등을 고려할 때, BJ 채석장에서 채취한 화강암과 KB, HI, SK 채석장에서 채취한 호상 편마암, 홍천강변에서 채취한 규암 등은 파동소광을 보이는 석영이 다량 함유되어 광물학적으로 알칼리-실리카 반응을 일으킬 수 있는 가능성이 있기 때문에 시멘트 콘크리트용 골재로 사용하는 것보다는 다른 용도의 골재로 이용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. SY 채석장에서 채취한 석회암의 경우에는 알칼리-탄산염 반응을 일으킬 수 있는 백운석이 많이 함유되어 있어 아스팔트 콘크리트용 골재로 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. KB 채석장에서 채취한 안구상 편마암과 SA 채석장에서 채취한 섬록암은 흑운모가 다량 함유되어 있어 콘크리트의 강도를 저하시킬 수 있기 때문에 콘크리트 용도로 사용하지 않는 것이 좋으나, HI 채석장에서 채취한 안구상 편마암과 홍천강변에서 채취한 편마암 등은 광물학적 및 역학적 특성 등을 고려할 때 어떠한 용도의 콘크리트용 골재로 사용하더라도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

(접수일자: 1998.5.7)