

한반도 산림골재의 물성특성

양동윤* · 임순복* · 민충기* · 이창범* · 박덕원* · 김주용* · 이동영*

Physical Characteristics of Crushed Aggregates in Korea

Dong-Yoon Yang*, Soon-Bok Lim*, Choong-Ki Min*, Chang-Bum Lee*,
Deog-Won Park*, Ju-Yong Kim* and Dong-Young Lee*

ABSTRACT : In the last decade, the supply of natural aggregates has been continuously increased due to increase of construction activity in Korea. Specially mining of crushed aggregates were more rapidly extended comparing to the other types of aggregates. In general, aggregates constitute 70-80% of the total volume of concrete, so the quality of aggregates is main factor controlling physical characteristics of concrete. For this reason, physical properties of aggregate according to different rock types were studied. The majority of crushed aggregates is taken out of granite, gneiss, sandstone, andesite, basalt and so forth. The physical properties of these rock types were tested and most of them fell within the acceptable limit on the base of Korean Standard Regulation. The major lithology of the crushed aggregates is granite and gneiss, both of which are marked for more than 50% of total lithology types in Korea. As to the physical properties of granite, the high specific gravity coincides with low porosity, low absorption ratio, while the abrasion and soundness index show, in general, no specific trend. It has been assumed that slight differences of the physical properties of granite aggregates are related with those of the mineral composition, grain size, and so on. In comparison to granite, the physical properties of gneiss have little correlation one after another. This trend is related to different mineral composition, grain size and typical sheet fractures typically prevailing in the texture of gneiss. Spatial pattern of physical properties shows that high specific gravity of granite coincides only with low porosity and absorption ratio in all provinces except Cheolla province, and high specific gravity of gneiss coincides with low porosity and absorption ratio only in Cheolla and Gangwon provinces.

서 론

1980년대 말부터 본격화한 대단위의 주택 건설과 도로, 항만, 지하철, 공항 등의 사회간접자본의 확충은 대량의 골재 수요를 발생시켰고 이는 한때 골재 파동으로 이어졌다. 이에 따라 정부는 1992년 골재채취법을 제정하여 골재의 안정적 공급을 확보하기 위한 방안을 모색하기 시작하였다. 그 일환으로 통상산업부(산업자원부 전신)에서는 국내 골재산업 육성을 위하여 전국의 골재자원 기초 조사를 위한 1차 5개년 계획을 수립하였으며, 조사 수행 기관으로 지정된 한국자원연구소는 1993년부터 1997년 까지 5년간 전국의 하천골재, 산림골재 및 바다골재에 대하여 골재자원부존량 개략조사를 실시하였다(이동영 외,

1994; 이동영 외, 1995; 이동영 외, 1996; 이동영 외, 1997; 이동영 외, 1998).

건설교통부 자료(비출판, 1997)에 의한 골재의 전국 품종별 허가 공급 비율을 보면, 1986년의 경우 하천골재가 73%이고 산림골재가 17.5%에 불과하였으나, 1996년도 전국 골재채취 허가량은 총 338,178,000 m³ 중에서 산림골재가 229,262,000 m³로 67.8%를 차지하였다. 이와 같이 하천골재의 점진적 고갈과 더불어 산림골재의 사용 점유율이 높아지고 그 중요성이 부각되고 있으나, 산림골재는 지질특성, 개발여건 및 환경을 감안하면 유한한 자원으로, 개발할 수 있는 대상지와 양은 상당히 제한을 받게 된다. 산림골재의 개발에 앞서 정밀한 지질특성을 조사하여야 하며, 경제성과 환경영향에 대한 평가를 병행하고 개발을 대단위화 하여야만 무분별한 개발을 막을 수 있으며, 환경의 훼손을 최소화하면서 골재를 효율적으로 생산할 수 있다고 본다.

* 한국자원연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Korea), E-mail: ydy@kigam.re.kr

Table 1. Standard of physical characteristics for quality of aggregates.

Countries (Standard)	Korea (KSF-2527)		USA (ASTM C 33-90)		Japan (JIS A 5005)	
Aggregates	Pebble	Sand	Pebble	Sand	Pebble	Sand
Specific gravity	>2.5	>2.5	>2.6		>2.5	>2.5
Absorption (%)	<3.0	<3.0			<3.0	
Soundness (%)	<12	<10	<18	<10	<12	<10
Abrasion (%)	<40		<50		<35-40	
Weight per unit	>1,250					
Volume (kg/m ³)						
Clay lumps (%)	<3.5	<1.0	<3-10	<1.0	<0.25	<0.25
Materials finer than						
No. 200 sieve (75 μm) (%)	<5.7	<3.0	<1.0	<3.0	<1.0	<7.0
Friable particles (%)	<5.0		<2-10	<0.5	<5.0	<0.5

골재는 콘크리트 체적의 70~80%를 차지하므로 그 종류 및 품질이 콘크리트의 품질에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 골재의 물성을 보다 정확히 파악하여 적재적소에 사용하므로써 목표로 하는 콘크리트의 적정 품질을 확보할 수 있다.

이 논문에서는, 산림골재 개발계획의 입안, 용도 및 품질 파악에 대한 기초자료를 제공하기 위하여 한국자원연구소에서 지난 5년간에 걸쳐 조사한 산림골재의 물성에 관한 자료를 검토, 분석하였으며 그 결과들을 종합하였다.

골재의 물성 및 품질 기준

골재의 정의는 골재채취법 (1991) 제2조제1호에 명시되어 있다. 골재의 분류에 관한 사항은 골재채취법시행령 (1992) 제2조제1항에서 규정하고 있는데, 산림골재는 산림법의 규정에 따르는 것으로 되어 있다. 이 논문에서 다루고자 하는 산림골재 (쇄석골재)는 산림법 제2조제1항 제1호에서 규정하는 산림 안에서 채취하는 골재에 한한다.

조골재의 물성은 골재 입자 날개의 성질이 아니라 크고 작은 입자로 구성된 전체로서의 성질을 말하는데, 콘크리트용 골재는 일반적으로 다음과 같은 물성을 가져야 한다. 즉, 콘크리트 강도 확보가 가능한 세기를 가질 것, 콘크리트의 비중을 만족하는 비중을 가질 것, 기상 조건 및 다른 사용 요건에 맞는 내구성이 있을 것, 유동성이 좋고 밀실한 콘크리트를 만들 수 있는 입형과 밀도일 것, 콘크리트의 성질에 악영향을 끼치는 유해물질을 포함하지 않을 것, 내화성이 있을 것 등이다. 이러한 골재의 일반적 성질을 평가하는 시험 항목에는, 비중과 흡수율과 같이 그 골재 고유 특성에 관한 것, 크기 및 입도분포와 같이 생산 특성에 좌우되는 것, 염분과 유기물과 같이 혼입율에 관한 것 등이 있다 (森野奎二, 1992).

Table 1에 우리 나라, 미국 및 일본에서 골재에 적용되는 일반적인 시험 항목과 그 규정치를 제시하였다. 지난 5개년 동안 한국자원연구소에서 조사 분석한 물성은 비중, 흡수율, 공극률, 마모감량, 안정성 등의 물리적 특성이 있고, 골재의 일반적 시험 항목에는 해당되지 않지만 참고로 점재하강도 및 일축압축강도 등의 역학적 특성에 관한 것도 제시하였다.

각 시험 항목들에 대한 의의와 목적은 다음과 같다.

비중과 흡수율

골재 관련 분야에서 흔히 사용하는 티중은 실제 비중이 아니라 겉보기비중을 말하므로 골재의 합수 상태에 따라 비중의 값이 변한다. 골재의 건조 상태는 수분을 전혀 포함하지 않는 절대건조 (절건)상태에서부터 공기중 건조 (기건)상태, 표면건조 포화 (표건)상태, 습윤상태로 분류된다. 골재의 표건상태란 골재의 내부와 표면의 패인 곳에는 물이 채워져 있으나, 표면에는 수분이 없는 상태를 말하는데, 콘크리트 배합 설계에서 기준으로 적용된다. 절건상태 및 표건상태의 중량을 그 측적으로 나눈 값을 각각 절건비중, 표건비중이라 한다. 표건상태일 때 포함하고 있는 수량을 절건중량으로 나눈 값의 백분율이 흡수율이다.

마모감량

도로용 콘크리트 및 댐용 콘크리트 등과 같이 마모저항이 필요한 경우, 골재의 마모감량 값을 구한다. 로스앤젤레스 시험기 (Los Angeles Abrasion Testing Machine)를 이용하여 조골재의 마모저항을 시험하는데 골재의 마모감량 값이 낮을수록 콘크리트의 마모저항이 커진다.

안정성

기상 작용에 대해 내구적인 콘크리트를 만들기 위해서는 내구성이 높은 골재를 사용할 필요가 있는데, 골재가 기상 작용에 대해 안정한 지의 여부를 황산나트륨 (Na_2SO_4)을 이용하여 시험한다.

단위용적중량

이 시험은 콘크리트의 제조 및 배합 설계 등을 결정하기 위하여 행하는데 골재의 단위용적중량이란 기전상태의 1 m^3 당 중량을 뜻한다. 이 값은 골재의 비중, 입도, 공극률 및 함수 정도에 따라 변화한다.

점재하강도

점재하강도는 원추형의 가압축(加壓軸) 사이에 암석시료를 끼우고 하중을 재하시켜 시료가 파괴되었을 때의 최대 하중을 구하여 산출한다. 이 시험은 실내에서는 물론 현장에서도 시행할 수 있는 비교적 간단한 시험으로, 원주나 각주형의 암석 시험편으로 성형할 필요가 없어 편리하다. 이 시험은 암석의 강도에 따른 분류, 즉 지수(index)를 구하는데 이용되고 있는데 인장강도 및 압축강도와도 상관관계가 있어서 암석의 강도를 추정하는데 이용되기도 한다.

일축압축강도

암석의 일축압축강도는 원주나 각주형으로 성형한 암석 시험편에 일축 방향으로 압축력을 가하여 파괴되었을 때의 응력에 의한 저항 정도를 나타내는 것이다.

콘크리트에 유해한 물질의 혼입량

골재에 포함되어 콘크리트에 유해하게 작용하는 물질의 혼입량을 시험하는 방법들이 있는데, 점토나 미세한 물질, 석탄 및 부식토 등의 유기불순물, 염분, 비중 1.95의 액체에 뜨는 물질 및 연석 등은 Table 1에 규정된 양 이상 함유되면 콘크리트의 강도나 내구성이 심각한 영향을 미치므로 규정치 이하로 제거되어야 한다. Table 1에 나타낸 것 외에 콘크리트내의 시멘트와 골재의 일부가 반응해서 콘크리트의 내구성을 저하시키는 물질이 골재내에 포함될 수 있는데, 골재 사용 전에 이를 확인하는 알칼리 반응시험 (ASTM C 227-90, 1991; ASTM C 289-87,

1991; 양동윤, 이동영, 1995; 양동윤, 이창범, 1997)도 반드시 거쳐야 한다.

물성시험 내용 및 결과

산림골재는 일부 업체에서 쇄사로도 제조하고 있으나 아직은 경제성이 낮고 생산량 면에서 매우 미미한 편으로 현재로서는 주로 조립재로 생산하고 있다. 따라서 골재물성에 관한 시험 항목 중에서 비중, 흡수율, 마모감량, 안정성 등 골재 고유의 물리적 특성과 점재하강도 및 일축압축강도 등의 역학적 특성을 파악하였다. 단, 골재자원부존조사 사업 초기에는 부존량조사가 우선시 되었으나, 점차 물성 조사의 중요성이 인식되면서 물성에 관한 시험 항목을 매년 단계적으로 늘려 갔다. 즉, 충청권 골재의 물성에 대해서는 비중, 흡수율, 공극률, 점재하강도시험이 이뤄졌고, 경상권, 경기권, 전라권의 골재에 대해서는 마모강도 시험과 안정성시험이 추가되었으며, 강원권과 제주권의 골재에 대해서는 위에서 열거한 시험 외에 일축압축강도 시험이 추가되었다.

골재의 물성은 당시 가행중이던 골재석산에서 채취된 시료를 대상으로 조사되었다. 비중, 흡수율 및 공극률은 골재석산에서 생산되는 상품을 시료로 채취하였다. 콘크리트 골재의 강도시험은 콘크리트 공시체를 제작하여 행하는 것이 원칙이나, 참고 자료로 하기 위해 암석시료를 점재하강도 및 일축압축시험을 위해 직경과 높이의 비가 2:1이 되도록 각각 직육면체와 원주형으로 시편을 제작하여 시험을 실시하였고, 그 결과를 Table 2, 3, 4에 나타내었다. 시료 중에는 퇴적암의 일부와 호상편마암 등의 조직의 이방성이 현저한 것이 있으나 골재는 수 mm~수십 mm의 작은 암석 파편으로 생산되기 때문에 골재로 이용되는 암석의 이방성이 석재나 구조물의 기반암에서와 같은 큰 의미를 갖지는 않을 것으로 본다. Table 2는 전국에서 골재로 사용되는 각 암종에 대한 물성의 평균값과 각 암종에 대한 시료수 및 전체 시료수에 대한 각 암종의 백분율을 나타낸 것이다. 비중은 절대건조상태의 비중 (1^*), 표면건조상태의 비중 (2^*), 겉보기비중 (3^*)으로 나누어서 표시하였다. 공극률은 골재에서 흔히 적용하는 골재의 단위부피가 차지하는 빈틈과 절대부피와의 비인 빈틈율이 아니라 암석 자체의 공극률을 나타낸 것이다. 이상 각 항목의 시험은 골재업계에서 흔히 적용하고 있는 KS에 규정된 방법에 따라 수행되었다.

Table 2에 화성암, 변성암, 퇴적암을 구분하여 각 암종의 물성 평균값을 비중이 낮은 것부터 높은 것의 순서로 배열하였다. 겉보기비중은 화성암 중 심성암과 화산암의

일부, 그리고 변성암의 것이 2.68~2.91로 높은 값을 나타내고 있다. 흡수율과 공극률은 현무암과 응회암의 값이 높고 반화강암, 각섬암, 석회규산염암, 섬창암 등의 값이 낮게 나왔다. 마모감량 값은 화강암과 석회암의 것이 높고, 각섬암과 실트암의 것이 낮게 나타났다. 한편 안정성은 안산암과 사암이 높은 값을 보이고 현무암, 각섬암, 석회암 등의 것이 낮게 나타났다.

골재석산에서 채석 대상으로 하는 암종은 화강암류와 편마암류가 주종을 이루고 있으므로 Table 3과 Fig. 1에 화강암류와 편마암류에 대해서만 따로 암상별 물성을 정리하였다. 이들의 결보기비중은 2.61~2.75로 변화 폭이 크며, 그에 따른 다른 물성의 변화 양상도 다양하다. 화강암은 비중의 증가와 함께 다소 기복은 있지만 전반적으로 공극률과 흡수율이 감소하는 경향을 보인다. 화강암류 중에서 알칼리장석화강암과 조립질운모화강암은 결보기비중이 낮고 흡수율 및 공극률이 크다. 반면에 각섬석화강암은 비중이 높고 흡수율 및 공극률이 낮다. 운모화강암과 엽리상화강암의 경우 조립의 것보다는 세립의 것이 비중이 높고 흡수율과 공극률은 낮게 나왔다. 그렇지만 흑운모화강암의 경우는 이와 반대의 양상을 보이는데 이는 구성광물의 입도뿐만 아니라 조직, 풍화도 등 여러 요인들이 물성에 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다. 마모감량과 안정성은 엽리상화강암에서 낮은 값을, 장석화강암에서 높은 값을 나타내었다. 편마암의 경우, 비중의 증가에 따른 다른 물성의 상관성은 거의 보이지 않았다. 공극률은 호상편마암에서 높은 값을 보였고, 세립질의 것보다는 중립질의 것에서 더 값이 높았다. 마모감량 값은 중립질 호상편마암에서 낮고 흑운모편마암에서 높게 나왔다. 안정성의 값은 안구상편마암, 미그마타이트편마암, 화강암질편마암 등에서 낮은 값을 나타내었고, 보통의 편마암에서 높은 값을 보였다.

각 조사권역별 화강암 및 편마암의 물성과 제주도의 현무암에 대한 물성 값은 Table 4와 Fig. 2에서와 같다. 단, 시료수가 “1”인 경우 Table 3과 4에 동시에 기재되어 있다. 화강암의 권역별 평균 비중은 보통 2.61~2.76으로 변화 폭이 작은 반면에, 편마암의 경우 2.67~2.74로 화강암보다는 변화의 폭이 크고 높은 비중 값을 보인다. 그리고 흡수율 및 공극률도 전반적으로 편마암이 화강암보다 낮게 나온다. 제주권의 경우, 채석대상 암석이 현무암인데 이의 평균 비중이 2.82로 약간 높은 편이고 화강암이나 편마암에 비해 흡수율과 공극률이 상당히 높은 특징이 있다. 화강암의 경우, 전라권의 것을 제외한 나머지 권역의 것에서 비중의 증가와 함께 흡수율과 공극률은 감소하는 경향을 보였다. 그러나 나머지 물성은 서로 뚜렷한 상관관계를

보이지 않았다. 편마암의 경우, 경기권과 전라권의 것은 비중의 증가와 함께 흡수율과 공극률의 감소 경향이 보였으나 나머지 권역의 것에서는 거의 보이지 않았다. 각 권역별로 이러한 경향들을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

충청권의 화강암은 각섬석화강암을 제외하면 전반적으로 비중의 증가와 함께 공극률과 흡수율이 감소하는데, 특히 비중이 낮은 장석화강암은 매우 높은 공극률을 보였다. 편마암은 비중의 증가에 따른 흡수율 및 공극률이 일정한 경향을 보이지 않았으며, 암상에 따른 변화가 크게 나타나는데 특히 호상편마암에서 높게 나왔다.

경상권의 화강암은 공극률과 흡수율은 비중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고, 흑운모화강암의 경우 조립질 흑운모화강암이 비중과 마모율이 높게 나왔다. 편마암은 각섬석편마암과 세립질 호상편마암에서 흡수율 및 공극률이 높게 나왔다.

경기권의 화강암은 전반적으로 비중이 증가하면서 공극률과 흡수율이 감소하는 경향을 보이며, 마모율과 안정성은 비중이 높은 것에서 낮게 나왔다. 편마암의 경우, 비중이 증가하여도 흡수율 및 공극률은 큰 변화를 보이지 않았다.

전라권의 화강암은 비중과 다른 물성과의 사이에 상관관계는 뚜렷하지 않았으며, 비중의 증가에 따라 흡수율 및 공극률은 증가하다 다시 감소하고, 안정성과 마모감량 값은 서로 상반되는 양상을 보여준다. 편마암의 경우 비중이 증가하면서 흡수율 및 공극률은 감소하다가 약간 증가하는 경향을 보였다.

강원권의 화강암은 비중이 증가하면서 전반적으로 공극률과 흡수율도 감소하는 경향을 보였다. 편마암 중에서 흑운모편마암의 경우 조립질의 것보다 세립질의 것이 비중이 높고 흡수율 및 공극률은 낮게 나왔다.

제주권의 경우 약간의 퇴적암을 제외하면 대부분이 제4기의 현무암으로 구성되어 있어, 육지에서 반입하지 않는 한 현무암을 골재로 사용하게 된다. 현무암 대부분이 공극률이 높다. 현무암은 비중이 증가하면서 공극률과 흡수율이 현저히 감소하는 경향을 보였다.

토 론

산림골재의 경우 대부분이 단일 또는 2~3종의 암석으로만 구성되어 있어서 채취 대상인 기반암의 물성 자체가 골재의 물성을 좌우하게 되므로, 골재 채취 장소의 지질 특성에 따른 물성의 변화가 클 것으로 조정된다.

Table 2에서 나타내듯이 국내에서 산림골재로 많이 이용되는 암종은 화강암, 편마암, 사암, 안산암, 현무암 등이

Table 2. Physical characteristics of crushed aggregates in Korea.

Rock type		Specific Gravity			Abs %	Φ %	PLS kg/cm ²	UCS kg/cm ²	Abr %	Sound %	No	Per %	
		1*	2*	3*									
Igneous rock	Rhyolite	aver.	2.58	2.61	2.67	1.41	3.60	134.8		18.4	1.84	7	1.19
		min.	2.52	2.56	2.63	0.20	0.53	93.5		14.3	1.10		
		max.	2.70	2.70	2.71	2.48	4.77	186.6		25.7	1.84		
	Felsite	aver.	2.60	2.63	2.67	0.91	2.37			25.2		3	0.51
		min.	2.56	2.60	2.64	0.88	2.27	118.0		24.5			
		max.	2.62	2.65	2.69	0.93	2.44			25.8			
	Porphyritic rock*	aver.	2.60	2.63	2.67	0.95	2.53	122.0	2,450			19	3.34
		min.	2.49	2.57	2.59	0.44	2.44	46.1					
		max.	2.79	2.81	2.84	1.88	4.71	203.3					
	Basalt	aver.	2.63	2.69	2.77	1.97	5.06	46.3	1,210	29.8	0.61	30	5.11
		min.	2.32	2.40	2.51	0.65	1.84	31.9	674	14.0	0.10		
		max.	2.85	2.87	2.90	3.22	7.50	76.5	1,480	36.7	1.05		
	Diorite	aver.	2.63	2.66	2.7	0.96	2.49	64.5	1,705	20.5		12	2.04
		min.	2.50	2.55	2.64	0.25	0.54	11.5		17.2			
		max.	2.80	2.84	2.91	2.14	5.36	196.8		23.8			
	Granite	aver.	2.64	2.65	2.68	0.73	1.59	76.9	1,525	31.1	2.13	152	25.89
		min.	2.50	2.53	2.56	0.15	0.41	13.6	724	18.0	0.81		
		max.	2.90	2.92	2.95	2.59	5.19	212.2	1,967	38.5	4.25		
	Andesite	aver.	2.65	2.69	2.74	1.18	3.12	158.5		20.5	4.15	42	7.16
		min.	2.52	2.57	2.66	0.36	0.72	44.3		12.0	0.78		
		max.	2.78	2.80	2.84	2.80	7.20	269.1		22.2	4.31		
	Aplitic		2.69	2.69	2.7	0.24	0.64	72.3				1	0.17
	Basic dyke	aver.	2.76	2.78	2.83	0.64	1.74	107.2		18.5		3	0.51
		min.	2.57	2.60	2.64	0.43	1.20	96.3					
		max.	2.87	2.88	2.96	1.05	2.70	115.1					
	Syenite		2.87	2.88	2.91	0.49	1.40	46.5				1	0.17
Metamorphic rock	Quartzite	aver.	2.65	2.67	2.69	0.56	1.48	93.5	1,637	26.8	1.10	15	2.56
		min.	2.50	2.61	2.66	0.37	0.77	51.1	1,320	20.6	0.47		
		max.	2.74	2.75	2.77	1.20	3.09	155.3	2,250	36.3	1.84		
	Gneiss	aver.	2.67	2.69	2.71	0.57	1.50	78.6	1,643	23.5	1.94	126	24.70
		min.	2.51	2.54	2.59	0.17	0.47	10.9	1,204	15.8	0.60		
		max.	2.81	2.99	3.01	2.56	6.58	296.7	2,115	38.5	3.50		
	Schist	aver.	2.69	2.71	2.74	0.68	1.79	55.0		21.8		16	2.73
		min.	2.54	2.58	2.62	0.27	0.71	16.7					
		max.	2.81	2.83	2.89	1.86	4.72	100.3					
	Phyllite	aver.	2.72	2.73	2.77	0.64	1.76	88.1				9	1.53
		min.	2.63	2.66	2.73	0.31	0.83	25.6					
		max.	2.81	2.84	2.89	1.38	3.61	133.6					
	Slate	aver.	2.74	2.75	2.78	0.51	1.41	79.5	2,370	20.6	1.00	5	0.85
		min.	2.69	2.70	2.72	0.36	0.96	20.3					
		max.	2.77	2.78	2.80	0.99	2.74	174.4					
	Limesilicate	aver.	2.85	2.86	2.88	0.37	1.05	98.2	1,409			2	0.34
		min.	2.82	2.82	2.84	0.27	0.77	65.3					
		max.	2.88	2.89	2.91	0.46	1.33	131.0					
	Amphibolite	aver.	2.86	2.87	2.89	0.38	1.10	93.6	1,325	15.3	0.78	4	0.68
		min.	2.77	2.78	2.79	0.25	0.19	78.9	980				
		max.	2.99	3.00	3.02	0.51	1.53	124.6	1,670				
Sedimentary rock	Tuff	aver.	2.55	2.60	2.67	1.71	4.26	108.7		19.9		17	2.90
		min.	2.40	2.52	2.57	0.40	1.92	2.3		15.7			
		max.	2.69	2.73	2.81	4.92	11.82	187.9		23.6			

Table 2. Continued.

	Rock type	Specific Gravity			Abs %	Φ %	PLS kg/cm ²	UCS kg/cm ²	Abr %	Sound %	No	Per %	
		1*	2*	3*									
Sedimentary rock	Conglomerate	aver.	2.63	2.68	2.71	1.12	2.86	119.0		21.9		11	1.87
		min.	2.49	2.57	2.69	0.10	0.40	6.9		21.0			
		max.	2.75	2.78	2.84	2.90	7.23	123.9		22.8			
	Limestone	aver.	2.67	2.69	2.72	0.63	1.67	136.4	1,230	30.0	0.78	8	1.36
		min.	2.56	2.60	2.65	0.41	1.14	45.5	1,050	26.0	0.25		
		max.	2.75	2.76	2.78	1.37	3.45	296.7	1,410	38.0	1.30		
	Siltstone	aver.	2.67	2.70	2.74	1.03	2.92	65.7		14.1		12	2.04
		min.	2.59	2.60	2.61	0.74	0.83	41.8					
		max.	2.79	2.81	2.85	1.82	4.76	160.9					
	Sandstone	aver.	2.67	2.69	2.72	0.77	1.92	117.8	1,120	22.8	5.59	54	9.20
		min.	2.52	2.57	2.57	0.12	0.33	19.6		15.1	1.00		
		max.	2.88	2.92	2.92	2.71	4.71	251.7		33.5	12.49		
	Shale	aver.	2.70	2.73	2.76	0.91	2.19	118.8		21.5		20	3.41
		min.	2.52	2.64	2.71	0.12	0.32	45.3		20.3			
		max.	2.79	2.80	2.82	2.29	4.65	276.0		22.7			

Abbreviations: 1*; Bulk Specific Gravity, 2*; Bulk Specific Gravity with dried surface, 3*; Apparent Specific Gravity, Abs; Absorption, Φ; Porosity, PLS; Point Load Strength (Is (50)), Abr; Abrasion, UCS; Uniaxial Compressive Strength, Sound; Soundness, No; Numbers of tested samples, Per; Percentage rate of tested samples, *Porphyritic rock: quartz or feldspar porphyry.

Table 3. Physical characteristics of granite and gneiss used for crushed aggregates in Korea.

Rock type	Facies	Specific gravity			Abs %	Φ %	PLS kg/cm ²	UCS kg/cm ²	Abr %	Sound %	
		1*	2*	3*							
Granite	Akgr	2.56	2.59	2.64	1.30	3.33	62.8				
	mcgr (c)	2.57	2.57	2.61	1.02	2.59	67.8	1,462			
	mcgr	2.59	2.61	2.65	0.84	2.16	90.2				
	gr (fo)	2.60	2.62	2.64	0.69	1.79		1,510	20.0	0.85	
	fgr	2.61	2.63	2.66	0.76	1.96	78.8	1,667	32.4	4.25	
	gr	2.63	2.64	2.69	1.02	1.55	8.4	1,155	.25.9	2.10	
	bgr (c, fo)	2.63	2.64	2.67	0.59	1.55	113.9		29.1	2.06	
	bgr	2.64	2.66	2.69	0.63	1.66	62.7	1,839	30.5	1.86	
	bgr (f, fo)	2.64	2.65	2.67	0.38	1.01	97.6		28.4	1.98	
	gngr	2.65	2.66	2.69	0.59	1.57	62.1				
	ppgr	2.65	2.66	2.68	0.52	1.22	71.5	1,624	22.6	2.49	
	bgr (c)	2.67	2.69	2.70	0.49	1.31	57.7	1,550	29.8	2.11	
	amgr	2.72	2.73	2.75	0.40	1.08	98.0				
Gneiss	grgn (c)	2.58	2.59	2.61	0.33	0.85	44.9				
	qfgn	2.61	2.62	2.63	0.51	1.32	61.8		21.7		
	bdgn (f)	2.61	2.63	2.68	0.23	2.44	4.5				
	chgn	2.62	2.63	2.65	0.47	1.22	76.7				
	pbgn	2.62	2.64	2.66	0.58	1.52	144.0				
	agen	2.62	2.63	2.65	0.40	1.04	87.3	1,240	27.6	1.36	
	bgn	2.66	2.68	2.71	0.59	1.58	77.2	2,052	26.6	2.21	
	amgn	2.67	2.69	2.73	0.82	2.18	137.5	1,217	17.2	2.37	
	grgn	2.68	2.70	2.72	0.61	1.63	83.5	1,376	29.4	2.05	
	bdgn	2.68	2.70	2.73	0.65	1.69	61.0	1,639	24.7	0.65	
	mggn	2.69	2.72	2.73	0.50	1.32	102.0		21.5	3.37	
	gn	2.70	2.71	2.74	0.48	1.22	86.7		20.6	1.15	

*Abbreviations: (in Granite) gr; granite, mc; mica, f; feldspar, ak; alkali feldspar, b; biotite, gn; gneissose, pp; porphyritic, am; amphibole, (c); coarse grained, (f); fine grained, (fo); foliated, (in Gneiss) gn; gneiss, gr; granitic, bd; banded, q; quartz, ch; chlorite, ag; augen, pb; porphyroblastic granitic, mg; migmatitic, see Table 2 for the other abbreviations.

Table 4. Physical characteristics of granite and gneiss of each regions and basalt of Cheju island used for crushed aggregates in Korea.

Region	Rock type	Facies	Specific gravity			Abs %	Φ %	PLS kg/cm ²	UCS kg/cm ²	Abr %	Sound %
			1*	2*	3*						
Chungcheong	Granite	fgr	2.55	2.59	2.66	1.22	3.07	68.7			
		amgr	2.65	2.66	2.67	0.40	1.06	82.0			
		bgr	2.65	2.67	2.70	0.67	1.78	70.6			
		gngr	2.65	2.66	2.69	0.59	1.57	62.1			
		ppgr	2.67	2.69	2.71	0.57	1.25	64.3			
		bdgr	2.69	2.69	2.71	0.27	0.71	96.4			
		chgn	2.62	2.63	2.65	0.47	1.22	76.7			
	Gneiss	pbgn	2.62	2.64	2.66	0.58	1.52	144.0			
		bdgn	2.66	2.69	2.73	1.04	2.72	39.3			
		bgn	2.67	2.69	2.72	0.61	1.62	75.0			
		grgn	2.69	2.71	2.74	0.66	1.75	65.0			
		aggn	2.7	2.71	2.73	0.37	0.99	88.4			
Kyeongsang	Granite	akgr	2.56	2.59	2.64	1.30	3.33	62.8			
		mcgr	2.59	2.61	2.65	0.84	2.16	90.2			
		bgr	2.66	2.67	2.70	0.57	1.53	80.0		20.28	2.29
		bgr (c)	2.68	2.69	2.72	0.61	1.64	44.4		27.9	
	Gneiss	amgr	2.76	2.77	2.79	0.46	1.26	118.7			
		grgn (c)	2.58	2.59	2.61	0.33	0.85	44.9			
		qfgn	2.58	2.6	2.62	0.55	1.42	47.4			
		amgn	2.59	2.62	2.67	1.09	2.82	162.2			
		apgn	2.59	2.6	2.62	0.29	0.76	96.8			
		bdgn (f)	2.61	2.63	2.68	0.93	2.44	45.9			
		grgn	2.61	2.62	2.65	0.50	1.30	111.6		29.1	3.5
		bgn	2.68	2.69	2.71	0.43	1.15	74.7			
		bdgn	2.72	2.73	2.76	0.55	1.48	47.5			
		gr (c)	2.59	2.61	2.64	0.65	1.69	97.5		18.5	
Kyeonggi	Granite	qfgr	2.60	2.61	2.63	0.46	1.20	66.3			
		bgr	2.62	2.63	2.66	0.53	1.40	63.6		29.4	2.22
		gr	2.64	2.65	2.67	0.48	1.27	78.4		25.5	1.12
		amgr	2.75	2.75	2.76	0.20	0.56	68.1			
	Gneiss	qfgn	2.66	2.67	2.68	0.42	1.11	90.2		21.7	
		bdgn	2.70	2.70	2.72	0.34	0.92	71.3		24.5	
		grgn	2.71	2.73	2.75	0.42	1.13	82.6			
		bgn	2.73	2.74	2.76	0.35	0.95	90.5		23.1	1.15
		bdbgn	2.80	2.81	2.83	0.32	0.89	50.2			
		gr (c)	2.59	2.61	2.64	0.65	1.69	97.5			
Cheolla	Granite	bgr	2.62	2.64	2.65	0.48	1.25	73.8		32.4	1.84
		ppgr	2.62	2.64	2.66	0.53	1.39	83.1		23.6	2.64
		bgr (c, fo)	2.63	2.64	2.67	0.59	1.55	113.9		29.1	2.06
		bgr (f, fo)	2.64	2.65	2.67	0.38	1.01	97.6		28.4	1.98
		ppgr (c)	2.65	2.66	2.67	0.24	0.65	79.8		21.5	2.33
		bgr (cc)	2.66	2.67	2.68	0.27	0.71	71.1		30.6	1.77
	Gneiss	bgn	2.66	2.68	2.74	1.11	2.96			26.5	2.21
		grgn	2.66	2.67	2.69	0.48	1.27	83.4			
		bdgn	2.67	2.68	2.69	0.33	0.88	67.6			
		mggn	2.69	2.72	2.73	0.50	1.32	102.0		21.5	3.37
		amgn	2.75	2.76	2.79	0.55	1.53	112.8		17.2	2.37
		gr (c)	2.59	2.57	2.61	1.02	2.59	67.8	1,462		
Kangwon	Granite	bgr	2.59	2.61	2.63	0.51	1.33	88.8	1,839	30.0	1.15
		gr (fo)	2.6	2.62	2.64	0.69	1.79		1,510	20.0	0.85
		ppgr	2.61	2.62	2.64	0.52	1.35	75.3	1,624		
		bgr (c)	2.68	2.69	2.70	0.47	1.27		1,550	30.9	2.44
		fgr	2.74	2.75	2.76	0.37	1.02	91.2	1,667		

Table 4. Continued.

Region	Rock type	Facies	Specific gravity			Abs %	Φ %	PLS kg/cm ²	UCS kg/cm ²	Abr %	Sound %
			1*	2*	3*						
Gneiss		aggn	2.61	2.63	2.65	0.44	1.17	82.2	1,240	27.6	1.36
		bgn (c)	2.66	2.67	2.69	0.45	1.21	92.2	1,989		
		bdgn	2.69	2.70	2.73	0.55	1.30	76.3	1,639	24.8	0.65
		bgn (f)	2.69	2.69	2.70	0.24	0.65	98.0	2,115		
		grgn	2.77	2.77	2.8	0.59	1.61	72.0	1,376		
Cheju	Basalt	pbs	2.53	2.6	2.73	2.99	7.40	38.7	837		
		bs	2.63	2.69	2.73	2.05	5.36	55.2	1,047	33.5	
		fbs	2.69	2.74	2.82	1.73	4.60	37.6	1,527		
		fps	2.73	2.77	2.85	1.58	4.34		1,480	24.6	0.3
		abs	2.74	2.79	2.86	1.48	4.04	61.8	1,150		

*Abbreviations: ap; aplitic, p; pyroxene, bs; basalt, f; feldspar, a; aphanitic, see Table 3 for the other abbreviations.

다. 괄재로 사용되고 있는 각 암종의 물성치는 대부분 한국산업규격 (KS)의 규정치 이내의 값을 가지고 있어 물리적 특성에는 별 문제가 없다. 괄재로 사용되는 여러 암종 중 화강암류와 편마암류가 차지하는 비율이 각각 25.89%와 24.7%로 이를 두 암종이 절반 이상을 차지하고 있어, 우리 나라의 산립꼴재 석산에서 채석 대상으로 가장 많이 선택되는 암종임을 알 수 있다. 이들이 괄재로 많이 이용되는 것은 적절한 물성을 가지고 있다는 이유도 있겠지만, 한편으로는 이들의 지질학적 분포가 넓기 때문이기

도 하다. 현실적으로 괄재산업에서 수송 거리 및 운송비가 매우 큰 요소로 작용하기 때문에, 그요처 근처에서 개발여건이 갖추어지고 물성에 결함만 없다면 암종에 크게 구애받지 않고 개발되고 있다.

비중은 응회암, 산성화산암 등에서 2.55~2.60으로 비교적 낮은 값을 나타내고, 심성암 및 변성암에서 2.68~2.91로 높은 값을 나타내었다. 공극률과 흡수율은 비록 규정치를 넘는 것은 없지만 현무암과 응회암에서 공극률; 4.26~5.06%, 흡수율; 1.71~1.97%로 높게 나오고 각섬암, 섬록암, 반화강암 등에서 공극률; 0.64~2.49%, 흡수율; 0.24~0.96%로 낮은 값을 보였다. 김선억 외 (1989)의 석재 연구에 의하면, 평균 비중과 흡수율이 각각 화강암; 2.65, 0.24%, 편마암; 2.69, 0.14%, 섬록암; 2.82, 0.14%, 안산암질 맥암류; 2.88, 0.06%로 되어 있다. Table 2에서 해당되는 각 암종의 평균값과 이들의 값을 비교하면 비중은 석재의 값이 약간 높고 흡수율은 괄재의 값이 현저하게 높다는 것을 알 수 있다. 이의 주된 요인은, 석재의 시료는 제작된 시편을 사용하지만, 괄재의 경우 생산된 상품을 시료로 사용한다는 점과 석재의 경우 가능한 신선한 시료가 선택되어지지만 괄재 상품이 어느 정도 풍화된 것도 섞여 있을 수 있다는 점을 들 수 있다. 또한 괄재 생산시 파쇄과정에서 각각의 괄재입자 내에 많은 균열이 발생한다는 것도 간접적으로 추정할 수 있다. 마모율은 석회암, 현무암, 화강암에서 29~32%로 높은 값을 보였고, 안정성은 안산암과 사암이 4.15~5.59%로 한계치에는 못 미치지만 비교적 높은 값을 나타내었다. 영국의 경우 (Smith and Collis, 1993), 마모율은 화강암이 6~13%, 석회암이 18~27%로 우리나라와는 큰 차이를 보여 같은 암종이라도 지질 환경에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

꼴재로 사용되고 있는 여러 암석들 중에서도 분포가 넓

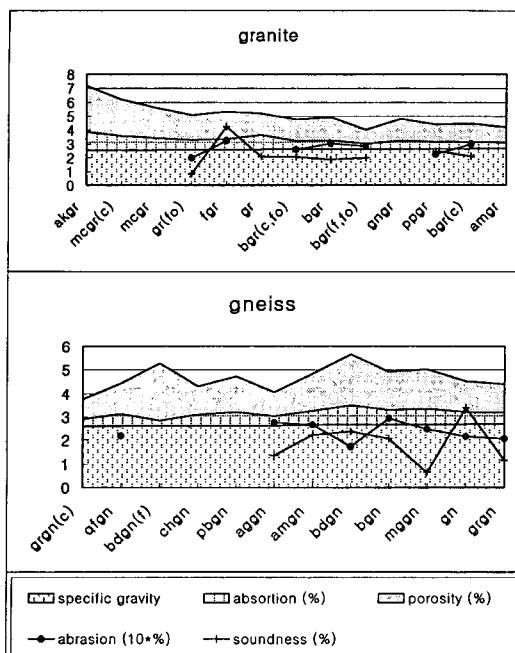


Fig. 1. Variation of the physical characteristics of granite and gneiss used for crushed aggregates in Korea, see abbreviations of Table 2 and 3.

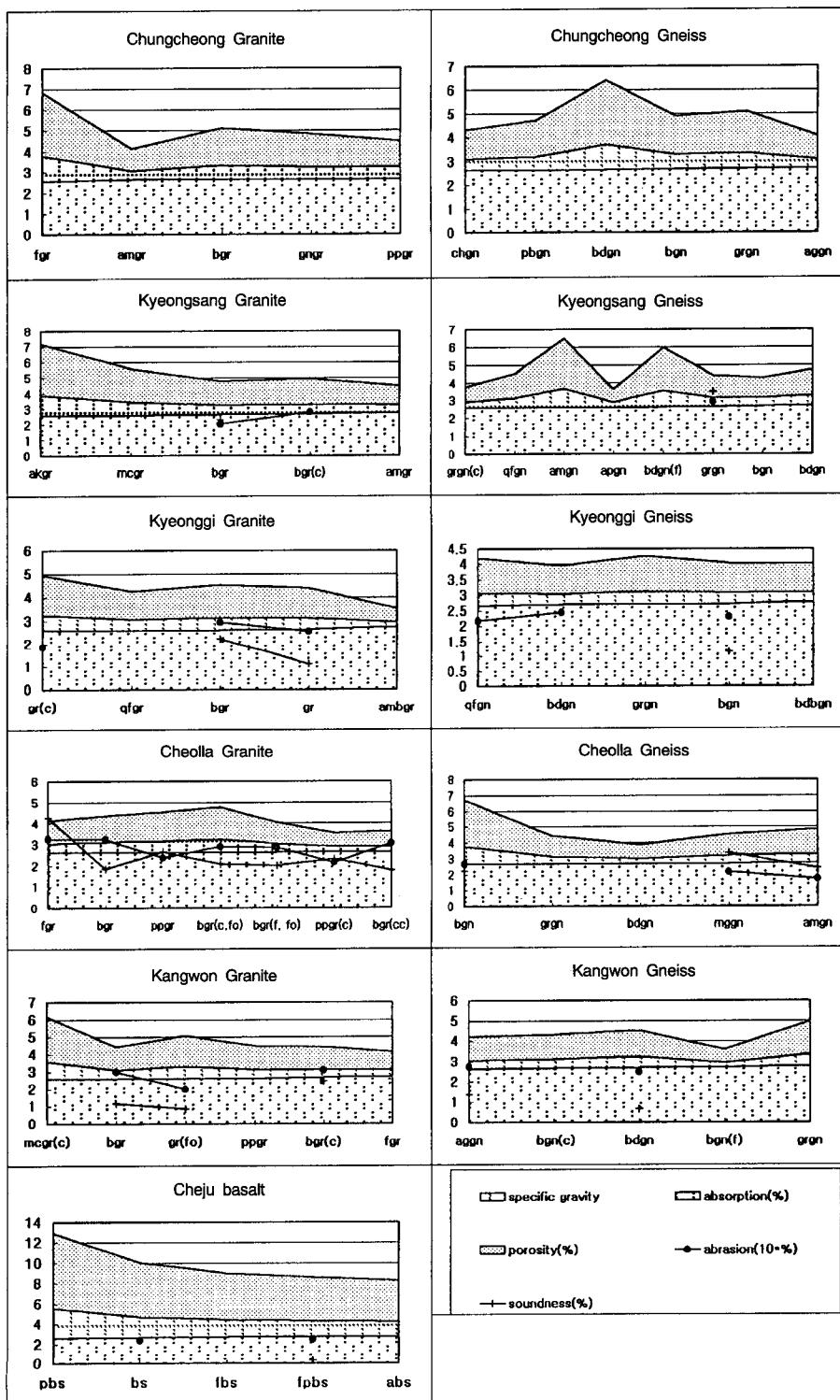


Fig. 2. Variation of the physical characteristics of granite and gneiss of each areas and basalt of Cheju island used for crushed aggregates in Korea, see abbreviations of Table 4.

고 암상과 조직 특성이 다양한 화강암과 편마암을 예로 물성의 상관성을 살펴보면 Table 3 및 Fig. 1과 같다. 화강암의 경우, 비중이 증가하면서 공극률과 흡수율은 감소하는 경향을 보이지만, 마모율과 안정성 등은 거의 상관관계를 보이지 않았다. 또한 이들 물성치는 구성 광물의 종류 및 조성, 입도 등에 따라서도 약간 차이를 보였다. 편마암의 경우, 물성치 사이에 상관관계가 뚜렷하지 않고 암상에 따른 변화가 크게 나타났다. 일반적으로 암석의 물리적 특성 중 비중은 골재를 구성하고 있는 암석의 광물조성과 공극률 및 흡수율의 영향을 받는다. 그리고 Smith and Collis (1993)에 의하면 흡수율은 기계적 강도, 수축, 안정성 등과 관련이 있어서 흡수율이 낮으면 기계적인 힘과 풍화에 대해 저항력이 커지는 경향은 있으나 확실하지 않다고 하였다. 흡수율이 어느 정도 이상으로 커지면 골재 내부에 흡수된 수분의 결빙과 해빙의 영향으로 부분적 파괴가 일어나 내구성이 저하된다. 동일의 경우 (Smith and Collis, 1993), 골재의 흡수율이 1% 이상이면 결빙에 의해 영향을 받을 수 있는 것으로 간주하고 있다. 그러나 시험 결과에서 보면 흡수율과 안정성의 상관관계는 뚜렷하지 않다. 안정성은 흡수율 뿐만 아니라 골재를 구성하고 있는 암석내의 광물끼리의 결합 상태와 세기 등에도 영향을 받으므로 앞으로 더 많은 연구가 필요하다고 생각된다. 마모율 또한 다른 물성과는 거의 상관관계를 보이지 않았는데 강원권 흑운모화강암의 경우 세립질의 것보다 조립질의 것에서 이들 값이 높게 나왔다. 이는 구성광물의 입도가 클수록 쉽게 풍화를 받는다는 이론 (Carroll, 1970)과 일치하나, 전라권의 반정질화강암의 경우 반대의 결과가 나왔다. 아직 이에 대한 자료가 부족하므로 같은 암상에서의 입도에 따른 안정성과 마모율 변화에 대한 연구와 더불어 다른 요인에 대한 연구도 더 필요할 것으로 생각된다.

한편 편마암의 경우, 화강암에 비해 물성치 사이에 상관성이 뚜렷하지 않게 나왔다. 일부의 연구 결과 중, 진호일 외 (1998)는 호상편마암의 경우는 편마구조에 대해 수직과 수평으로 제작한 코아에 대해 시험한 결과 수평의 것이 비중이 높고 흡수율 및 공극률이 낮으며 일축압축강도 값도 약 15% 정도 낮게 나와 좋은 상관성을 보이나, 같은 암상이라도 풍화에 강한 광물의 함량이 많은 경우, 일축압축강도 값이 높게 나온다고 보고하였다. 이처럼 골재로 사용되고 있는 암석의 물성은 암종과 암상에 따른 차이는 물론이고, 같은 암종의 것에서도 광물조성과 조직특성, 입도에 따라 차이가 있으며, 암석 형성 당시의 지질환경이 다르기 때문에 지역에 따른 물성의 차이도 있는 것으로 해석된다.

이상 우리나라에서 산림골재로 이용되는 암석에 대한 물성치를 제시하였으나, 당시 가행중이던 골재석산에서 채석 대상으로 하는 암종과 암상에 대해서만 시료 채취가 이뤄졌으므로, 시료채취가 체계적이고 균형 있게 이뤄지지 못하고 시료수에 있어서 어느 암종과 암상에 대해서 편중된 점이 있다. 또한 동일 암종 및 동일 암상이라도 풍화의 정도가 약간 차이가 있었을 것이다. 따라서 앞으로의 정밀조사 단계에서는 더 많은 연구가 이뤄져야 할 것으로 생각된다.

결 론

국내에서 산림골재로 많이 이용되는 암종은 화강암, 편마암, 사암, 안산암, 현무암 등이다.

골재로 사용되고 있는 각 암종의 물성치는 대부분 한국 산업규격의 규정치 이내의 값을 가지고 있어 물리적 특성에는 별 문제가 없다.

골재로 사용되는 여러 암종 중 주개발 대상이 되는 것은 화강암류와 편마암류로, 각각 25.9%와 24.7%의 비율을 차지하고 있다. 이들이 골재로 많이 이용되는 것은 적절한 물성을 가지고 있다는 점도 있겠지만, 한편으로는 이들의 지질학적 분포가 넓기 때문이기도 하다.

화강암과 편마암에 대해 물성 차이를 비교할 때, 화강암의 경우, 비중이 증가하면서 공극률과 흡수율은 감소하는 경향을 나타내었다. 마모율과 안정성 등은 다른 물성과는 거의 상관관계를 보이지 않았는데, 강원권 흑운모화강암의 경우 세립질의 것보다 조립질의 것에서 이들 값이 높게 나왔다. 편마암의 경우, 물성치 사이에 상관관계가 뚜렷하지 않고, 암상에 따른 변화만 크게 나타났다.

화강암과 편마암에 대해 산지별로 비교할 때, 화강암의 경우, 전라권의 것을 제외한 나머지 권역의 것에서 비중의 증가와 함께 흡수율과 공극률은 감소하는 경향을 보였으나, 나머지 물성은 서로 뚜렷한 상관관계가 보이지 않았다. 편마암의 경우, 경기권과 전라권의 것은 비중의 증가와 함께 흡수율과 공극률이 감소하는 경향을 보였으나 나머지 권역의 것에서는 거의 나타나지 않았다.

골재로 사용되고 있는 암석의 물성은 암종과 암상에 따른 차이는 물론이고, 동일 암종의 것에서도 광물조성과 조직특성, 입도에 따라 차이가 있고, 암석 형성 당시의 지질환경이 다르기 때문에 지역에 따른 물성의 차이도 있었다.

사 사

이 연구는 산업자원부에서 지원하는 “골재자원부존조

사 사업”의 일부이다.

참고문헌

- 김선억, 윤현수, 김윤규, 장세원, 박덕원, 박용순, 이춘오, 이병대, 이병태, 혼전기, 김철주 (1989) 석재자원조사연구 (4), 한국동력자원연구소, KR-89-2C.
- 골재채취법 (1991) 제2조 제1호, 골재의 정의.
- 골재채취법시행령 (1992) 제2조제1항, 골재의 분류.
- 산림법 (1994년 개정) 제2조제1항제1호, 산림골재 (석산산골재)에 관한 규정.
- 양동윤, 이동영 (1995) 콘크리트의 장기 안정성을 위한 골재의 선택. 자원환경지질, 제28권, p.519-525.
- 양동윤, 이창범 (1997) 촉진시험법을 이용한 하천골재의 알칼리반응성 판정. 자원환경지질, 제30권, p.175-183.
- 이동영, 김주용, 조진동, 최종호, 이희일, 임무택, 정현기, 이봉주, 조민조, 최순학, 유일현, 한대석, 김정택, 민충기, 김윤종, 김원영, 윤상규, 김규봉, 최위찬, 홍승호, 박기화, 황상기, 이병주, 송교영, 황재하, 윤욱, 서해길, 권석기, 신홍자, 이윤오, 박영수, 진재화, 방효기, 이호영, 김원식, 김정기, 김상우, 김승우, 조규장, 이치원, 민건홍, 신원철 (1994) 골재자원부존조사 (충청권). 한국자원연구소-상공자원부.
- 이동영, 김정택, 이윤오, 김주용, 조진동, 이동남, 김윤종, 이봉주, 김석중, 권영인, 최종호, 성기성, 민충기, 김동숙, 임순복, 이창범, 박덕원, 이병태, 김경수, 이춘오, 박영수, 김승우, 이치원, 방효기, 민건홍, 김원식, 신원철, 이호영, 김정기, 김상우 (1995) 골재자원부존조사 (경상권), 한국자원연구소-통상산업부. 연구보고서 KR-95 (C)-38.
- 이동영, 김주용, 김정택, 이윤오, 양동윤, 이동남, 김윤종, 이봉주, 최종호, 조진동, 민충기, 김동숙, 임순복, 이창범, 최영섭, 박덕원, 박영수, 김승우, 이치원, 방효기, 민건홍, 김원식, 신원철, 이호영, 김상우, 김정기 (1996) 골재자원부

- 존조사 (경기권), 한국자원연구소 연구보고서 KR-95 (C)-38.
- 이동영, 김주용, 김정택, 이윤오, 양동윤, 이동남, 이상규, 황세호, 민충기, 김동숙, 임순복, 이창범, 최영섭, 박덕원, 민건홍, 박영수, 김원식, 이호영, 김정기 (1997) 골재자원부존조사 (전라권), 한국자원연구소. 연구보고서 KR-96 (C)-18.
- 이동영, 김주용, 김정택, 이윤오, 양동윤, 이상규, 황세호, 황학수, 박인화 이동남, 임순복, 이창범, 김동숙, 민충기, 박영수, 민건홍, 김원식, 이호영, 김정기, 박덕원 (1998) 골재자원부존조사 (강원권), 한국자원연구소 연구보고서 KR-97 (C)-48.
- 진호일, 민경원, 연규석 (1998) 골재용 암석의 광물학적 및 역학적 특성과 콘크리트용으로서의 적합성 연구, 콘크리트학회지, 제10권, p. 183-193.
- ASTM C 33-90 (1991) Standard specification for concrete aggregates.
- ASTM C 125-88 (1991) Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates.
- ASTM C 227-90 (1991) Test method for potential reactivity of aggregates (chemical method).
- ASTM C 289-87 (1991) Test method for potential alkali reactivity of cement aggregates (mortar-bar method).
- Carroll, D. (1970) Rock weathering, Plenum Press, 248p.
- JIS A 5005 (1993) 콘크리트용 쇄석 및 쇄사.
- KS F 2522 (1966, 1991확인) 골재의 정의.
- KS F 2527 (1993) 콘크리트용 부순 돌.
- Smith, M.R. and Collis, L. (ed.) (1993) Aggregates-Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes (2nd ed.). Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 9. Geol. Soc. London, Pub. 339p.
- 森野奎二 (1992) 日本骨材資源, No. 93, p. 24-34.

1998년 7월 24일 원고접수, 1998년 12월 16일 게재승인.