

## 지하굴착암 쇄석의 성분 및 역학적 특성 분석(I)

### Analysis on Component and Mechanical Characteristics for Crushed Stone of Excavated Rocks(I)

이 상 호\* · 차 완 용\*\* · 김 영 수\*\*\*

Lee, Sang Ho · Cha, Wan Yong · Kim, Young Soo

#### Abstract

In this paper, an experimental program was undertaken to test the analysis on Component and mechanical characteristics for crushed stone of excavated Rocks from Sandstone, Shale, Mudstone, for use as a new source of aggregate. Physical and mechanical properties, required for aggregate materials, of major constituents of rock wastes including Sandstone, Shale, Mudstone, Felsite, Basalt, Marl were measured in the laboratory.

Test results showed that the Shale, Felsite, Basalt tested in this study might possibly be used for construction aggregates. In case of Sandstone and Mudstone, some physical properties such as rock strength were generally adoptable but the aggregate characteristics were lower than required.

*Keywords : Time effect, Sedimentary rock, Slaking test, Poisson's ratio, Soundness*

#### I. 서 론

지하철 건설현장에서 발생하는 쇄석골재를 콘크리트용이나 아스팔트용 골재로 유용하게 사용하기 위해서는 우선적으로 그 골재의 품질시험을 실시하고 그 결과를 통하여 골재의 사용이 적절한가를 판단한다. 이와 같이 콘크리트와 아스팔트용 골재로

사용하기 위해서는 무엇보다도 콘크리트와 아스팔트용 골재규정에 적합한 품질의 골재를 생산·공급하는 체계가 우선되어야 하나 현재 국내에서 생산되고 있는 쇄석골재는 생산업체에서 시간에 따른 골재특성의 변화를 무시하고 파쇄 직후의 품질규정에 적합하면 그대로 골재로 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 대구 주변(지하철 포함)에서 분포·생산되고 있는 암석을 대상으로 각종 물리적, 역학적 특성시험을 실시하여 골재로서 재 활용 여부를 검토하고, KS에서 규정하고 있는 콘크리트용이나 아스팔트용 규정으로 시료의 각종 시험을 시간경과에 따라 실시하였다.

\* 경북대학교 농업생명과학대학

\*\* 경북대학교 대학원

\*\*\* 경북대학교 토목공학과

\* Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5735

fax: +82-53-950-6752

E-mail address: sahlee@knu.ac.kr

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용 재료

영남지방과 호남내륙지방 일부에서 중생대 백악기 경산누층군 낙동층군에 해당되는 퇴적암이 상당히 넓게 분포되어 있다. 특히 대구지역은 지질학적으로 중생대 백악기 하양군층군으로 구성되어 있다.

하양군층은 후기 화산활동에 의한 퇴적분지로 대부분이 역암, 사암, 이암, 혈암 등과 같은 쇄설성 퇴적암이 서로 교호하며 존재한다. 본 연구에서 사용한 퇴적암 R1, R2는 대구 북구 산격동, R3은 침산동, R4는 지하철 2-7공구, C는 산격동, D, E, B1, B2, B3은 지하철2-15공구에서 각각 8ton 트럭 2대씩 채취하였다. 암석의 공학적 특성에 관한 시험에 사용한 시료는 블록상태의 원석을 NX 사이즈의 원형코아를 성형하여 사용하였다. 골재시험에 사용한 시료는 파쇄기(Jaw crusher)를 사용하여 원석을 골재최대치수 50 mm가 되도록 파쇄하였다. 대부분 습식으로 생산되는 국내의 골재는 표면수가 많아서 재료분리가 적으므로, 골재무덤에서의 위치에 따른 품질편차가 크지 않다. 따라서, 본 연구에서는 30 cm 정도의 표층부를 제외한 상, 중, 하부 세 곳에서 일정한 간격을 두고 시료를 채취하여 골재의 각종 물성시험 시료로 사용하였다.

### 2. 시험 방법

대구지역 지하철현장에서 산출되는 폐기 암석을 건설골재용으로 사용하기 위하여 화학성분 분석 및 광물구성비는 XRD 회절시험과 편광현미경시험, XRF 측정시험을 각각 실시하였고, 암석의 기본 물성시험은 일축압축시험, 포아송비, 탄성파속도시험, 탄성계수, Slaking 시험 등을 실시하였다. 한편 Slaking 시험은 우선 10개의 암석 시편(건조무게 : 약 40 ~ 60 g)을 이용하여 약 10분간 20 rpm의 속도로 회전시킨 후에 시료가 들어있는 Test drum을 꺼

내어 건조로에 넣고 건조시킨 다음, 시험 후에 잔류한 시료 중량을 측정하여 내구성 지수( $I_d$ )를 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$N \text{회 } I_d = \frac{N \text{회 회전후의 잔류시료 건조중량}}{\text{초기의 건조중량}} \times 100(\%)$$

암석의 파쇄는 기존 Impact crusher를 이용하여 골재시험에 적합한 크기의 25 mm, 19 mm, 13 mm, 10 mm 등으로 하였으며, 골재로서 적합한지를 확인하기 위해 KS에서 규정하고 있는 골재시험인 LA 마모시험(KS F 2508), 안정성시험(KS F 2507), 비중(KS F 2503) 및 흡수율시험(KS F 2504), 0.075 mm 통과율 시험(KS F 2511)을 실시하여 각 시험결과와 상관성을 회귀 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 암석의 광물특성

기계적 풍화작용에 의해 형성된 세립질 퇴적물은 주로 석영, 장석, 백운모, 흑운모와 같은 주요 조암 광물과 점토 광물로 구성되어 있다. 채취한 암석의 XRD 회절시험 결과 Fig. 1~2와 같은 양상을 보였으며, Photo. 1(a)~(f)는 각 암석에 대한 편광 현미경사진으로서 대구지역의 암석성분은 석영

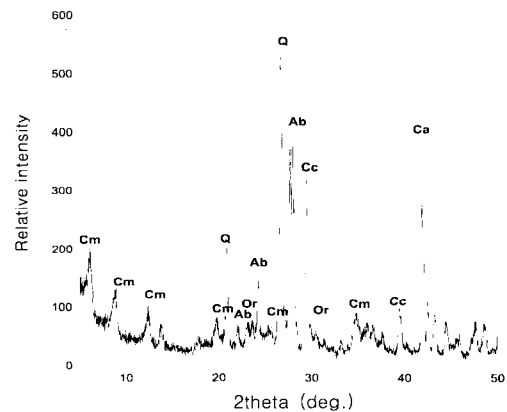


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of R2 sample

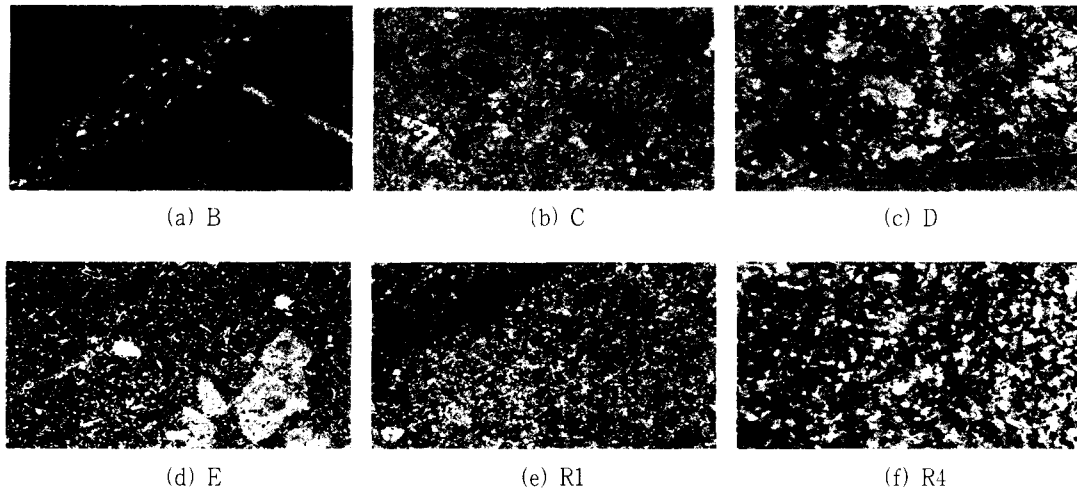


Photo. 1 Polarization microscope picture for rock

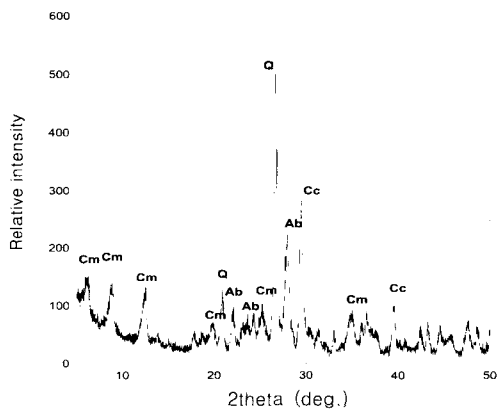


Fig. 2 X-ray diffraction patterns of B3 sample

(Quartz, Qz), 장석(Albite, Ab), 방해석(Calcite, Cc) 및 다량의 점토 광물(Clay mineral)로 이루어져 있음을 알 수 있다. 그중 특히 R3 시료는 Hp와 En 등이 다른 시료와 달리 많이 함유하고 있으며 B3 시료도 8% 정도 포함하고 있다. 점토광물은 R3, D 및 E 등을 제외한 시료들에서 30~20% 정도 함유하고 있다.

## 2. 암석의 공학적 특성

암석에 관련된 일축압축강도, 탄성파, Slaking시

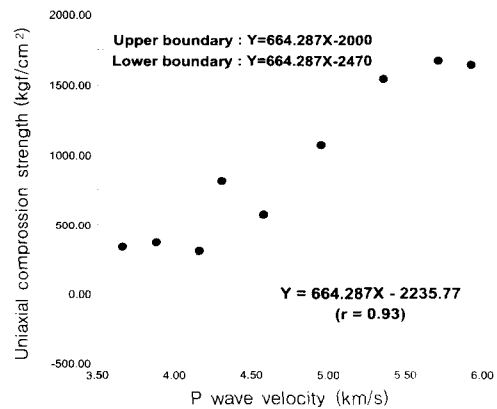


Fig. 3 Relationship of unconfined compressive strength and P-wave

험을 실시하여 Table 1과 같은 결과를 얻었다. 각 시료별 P파 속도와 일축압축강도를 Fig. 3와 같이 R3을 제외한 나머지 시료를 회귀분석으로 직선식을 구하여 상관식을 유도한 다음 상한경계선과 하한경계선을 그렸다. 상관계수 0.93으로 깊은 상관성이 있었다. R3 시료는 절리와 층리와 같은 불연속면이 많이 존재하였기에 P파 속도는 크게 나왔지만 일축압축강도는 다른 시료에 비해 적게 측정되었다. P파 속도와 일축압축강도를 기준으로 하여 건설 품셈표로 판정하면 R1, R4 시료는 보통암,

Table 1 Test result for rock

Sample	P-wave velocity (km/s)	Unconfined compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Elastic modulus	Slaking test (%)				Criterion of rock
					Times				
					1	2	3	4	
R1	4.878	577.73	0.168	2.387	98.896	98.587	98.256	98.035	mudstone
R2	3.664	333.60	0.126	2.47	99.586	99.154	98.937	98.553	sandstone
C	3.883	369.64	0.097	2.23	99.735	99.498	98.899	98.206	argillaceous sandstone
R3	5.495	224.53	0.114	1.06	99.332	99.203	98.858	98.729	basic tuffaceous sandstone
R4	4.950	1072.23	0.222	2.275	99.786	99.701	99.573	98.574	sandstone
D	4.306	815.53	0.240	2.994	99.568	99.474	99.343	99.211	felsite
E	5.357	1540.50	0.287	6.395	99.603	99.548	99.476	99.440	olivine-basalt
B1	5.711	1672.59	0.269	6.997	99.834	99.818	99.751	99.685	black shale
B2	4.162	308.46	0.091	1.603	99.141	98.969	98.754	98.682	marl
B3	5.926	1643.89	0.338	6.5	99.814	99.711	99.443	99.360	marl

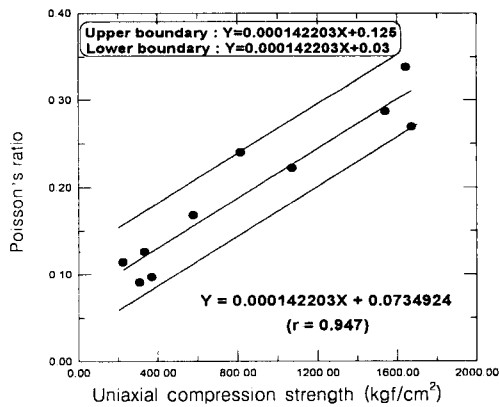


Fig. 4 Relationship of Unconfined compressive strength and poisson's ratio

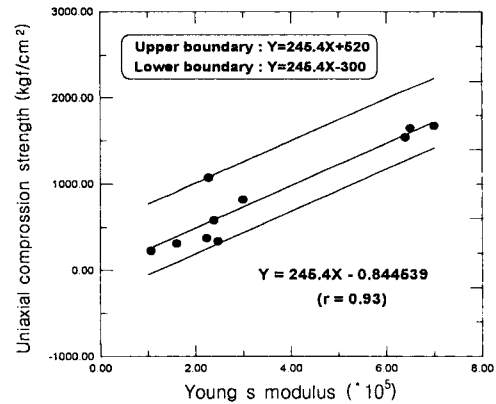


Fig. 5 Relationship of elastic modulus and unconfined compressive strength

R2, C, D, B2 시료는 연암, R3 시료는 풍화암, E, B1, B3 시료는 경암으로 판정되었다. 일축압축강도와 포아송 비는 Fig. 4에 보는 바와 같이 상관관계가 있음을 실험으로 확인하였으며, 화강암계열인 D, E 시료는 다른 시료들 보다 포아송비가 더 크게 측정되었다. Fig. 5은 일축압축강도와 탄성계수에 대한 상관관계 그래프이다. 각 시료별 건조 습윤의 반복에 의하여 그 고결성과 내구성을 알아보기 위한 Slaking 시험결과는 B 군은 거의 손실이 없었으나, 기타군(C, D, E)은 C 시료가 Slaking 시험

회수의 증가에 따라 현저하게 손실률이 증가하였다.

R군은 R4가 현저하게 손실률이 증가하였다. 이 암이나 사암의 경우 시료의 점토성분 함유율이 높은 경우 Slaking 손실률이 증가하는데 R1, R2, R3, C 시료가 여기에 속한다. Fig. 6은 Slaking과 파쇄적후의 암석의 흡수율의 관계를 나타낸 것인데 Slaking 지수가 높으면 함유비가 낮다는 것을 알 수 있다. 즉, 건조의 반복에 의하여 진행성으로 연장된 내부의 불연속면을 통하여 물이 들어가면서, 함유비가 증가하게 되고 그 물이 공기를 밀어내면

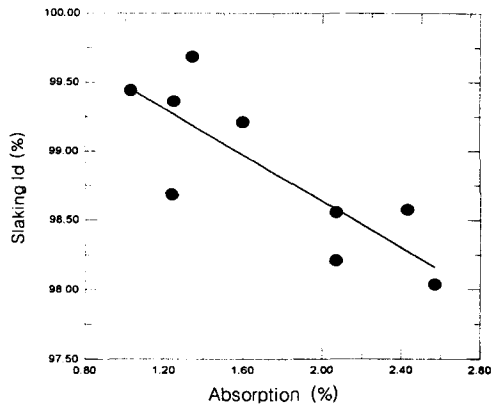


Fig. 6 Relationship of absorption ratio and Slaking

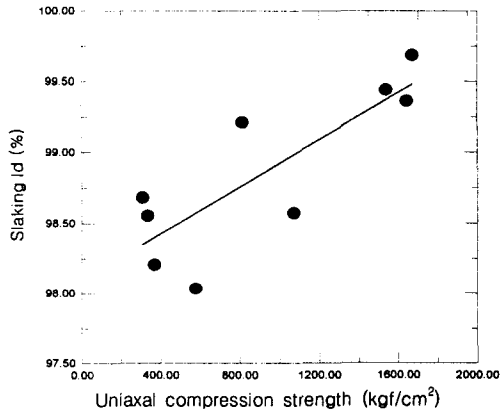


Fig. 7 Relationship of unconfined compressive strength and Slaking

서 팽창에 의한 암석의 내구성을 떨어지게 하는 결과를 초래하였다. 상관계수는 0.89이었다. Fig. 8은 일축압축강도와 Slaking 지수간의 관계를 나타낸 것인데 연한 암석에서는 이들 환경변화에 의거한 건조 습윤 반복에 의하여 급격히 고결력을 잃어 조직이 파쇄되는 현상을 보이므로 강도가 낮은 암석은 Slaking 지수도 낮게 나온다. 시험지역에서 채취한 암석들은 건·습 반복2회 때의 지수를 이용한 Gambel의 6가지 암석특성 중 98% 이상의 지극히 내구성이 있다는 판정을 받았다.

세립질 퇴적물로 구성된 대구지역의 암석들의 상관관계를 구하기 위해 P파-포아송비, 일축압축강도-포아송비, P파-일축압축강도, 탄성계수-일축압축강도, 탄성계수-포아송비의 상관관계를 선형회귀분석으로 구하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 상관계수가 1과 -1에 가까울수록 관련성이 높다고 본다. 암석의 물성치 시험 결과를 바탕으로 서로의 상관관계를 선형회귀 분석한 Table 2를 통해 일축압축강도-포아송비, 탄성계수-일축압축강도, 탄성계수-포아송비, P파-일축압축강도의 관계가 0.8이상의 비교적 높은 상관계수를 보였으며, 이를 바탕으로 암석의 탄성계수와 포아송비를 통해 일축압축강도를 대략 추정할 수 있었다.

Table 2 Correlation of respective rock integer

Correlation	Correlation equation	Upper limit boundary	Lower limit boundary	Correlation coefficient(r)
P-wave(X)-Poisson's ratio(Y)	$Y=0.08X-0.18$	$Y=0.08X-0.09$	$Y=0.08X-0.23$	0.70
Elastic modulus(X)-Unconfined compressive strength(Y)	$Y=245.4X-0.84$	$Y=245.4X+520$	$Y=245.4X-300$	0.93
Elastic modulus(X)-Poisson's ratio(Y)	$Y=0.034X+0.08$	$Y=0.034X+0.15$	$Y=0.034X+0.02$	0.86
P-wave(X)-Unconfined compressive strength(Y)	$Y=664.3X-2235.8$	$Y=664.3X-2000$	$Y=664.3X-2670$	0.93
Unconfined compressive strength(X)-Poisson's ratio(Y)	$Y=0.14 \times 10^{-3}X+0.07$	$Y=0.14 \times 10^{-3}X+0.13$	$Y=0.14 \times 10^{-3}X+0.03$	0.95

Table 3 Respective sample aggregate test result

Sample	0.075mm passing percentage	True specific gravity	Apparent specific gravity	Absorption ratio(%)	Dissipation rate of abrasion test(%)	Dissipation rate soundness test(%)
KS	< 1.00	2.5-2.7	> 2.5	< 3.00	< 40.00	< 12.00
R1	0.87	2.52	2.75	2.57	31.54	47.5
R2	0.98	2.58	2.72	2.07	26.00	100.0
R4	0.94	2.52	2.69	2.43	24.70	28.00
C	0.91	2.54	2.69	2.07	27.20	92.50
D	0.50	2.57	2.68	1.60	15.60	5.60
E	0.47	2.71	2.78	1.03	14.50	2.90
B1	0.74	2.68	2.78	1.34	14.40	2.80
B2	0.95	2.64	2.73	1.24	26.70	40.9
B3	0.97	2.66	2.76	1.25	24.10	61.99

### 3. 골재시험

#### 가. 파쇄직후 골재의 공학적 특성

대구지역 지하철과 그 주변의 암석을 이용한 골재로서의 적합성 시험 기준은 골재의 도로 보조기층 재료에 대한 KS 규격을 적용하였으며 시험결과는 Table 3와 같다. 각 시료별로 흡수율시험을 실시한 결과 모든 시료가 KS 규정(3.0% 이하)에 적합한 결과를 보였으며, 각각의 시료에 대한 겉비중 값은 2.69~2.78로 나타났다. 진비중시험은 KS 규정치인 2.5~2.7 이내에 접근하는 값 2.52~2.71로 측정되었으며, 각 시료별로 LA 마모시험을 실시한 결과 모든 시료가 KS 규정 손실률(40% 이하)에 적합한 결과를 보였다. 주로 손실률은 14.4~26.7%로 측정되었다. 각 시료에 대한 기상작용에 대한 골재의 내구성을 조사하기 위해 안정성시험을 실시한 결과 KS 규정(12% 이하)에 적합한 시료는 D 시료(5.6%)와 E 시료(2.9%), B1 시료(2.8%) 등이며 다른 시료(R4, B3)들은 탄성과속도시험과 일축압축시험결과에서는 강도가 우수한 경암으로 판정되었지만 골재의 품질시험인 안정성 시험에서 매우 취약한 것으로 측정되었다. 그 이유는 B3 시료의 경우 일축압축강도시험 당시에는 미세한 균열이 강도에 영향을 주지 않았으나 안정성

시험에서 균열사이로 시약(황산나트륨)이 들어와 전부분에 걸쳐 파괴되는 현상을 보였으며, R4 시료가 안정성 시험에 취약한 이유는 풍화도가 많이 진행된 상태가 원인으로 파악된다. 그리고 이들 시료들은 불연속면(주로 층리)이 매우 발달된 상태로 안정성시험결과에 많은 영향을 준 것으로 사료된다. 그러므로 암석판정에 의한 양질의 암석이 골재로서의 적합하다고 볼 수는 없으며 골재로 사용하기 위해서는 추가로 골재시험실시가 필수적이라 판단된다.

#### 나. 시간경과에 따른 골재시험

Fig. 8은 각 시료의 시간경과에 따른 골재의 0.075 mm 통과율을 나타낸 것으로 KS 규정에 0.075 mm 통과율을 1% 이하로 규정한 것은 부순 자갈의 미분량이 많아지면 세립질성분이 증가되어 골재의 입형에 커다란 영향을 줄 수 있기 때문이다. 1년 후 세립성분을 함유한 이암과 사암계통인 R1, R2, R4 그리고, 이회암 계통인 B2 시료가 규정치를 초과하는 결과가 발생하였다.

Fig. 9은 각 시료의 시간경과에 따른 흡수율을 나타낸 것이다. 골재의 흡수율은 골재의 공극에 침투되는 수량을 나타낸 것으로 골재 중의 전체 공극이 아닌, 모세관 작용에 의해 골재 중에 침수되는

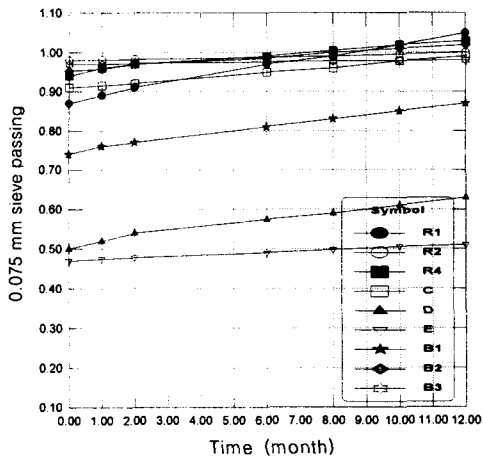


Fig. 8 0.075 mm passing percentage of aging effect aggregate

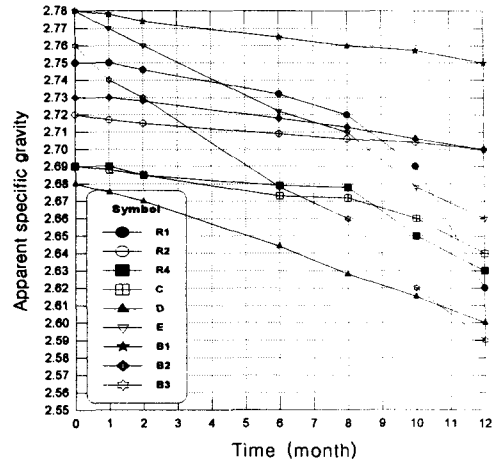


Fig. 10 Apparent specific gravity of aging effect aggregate

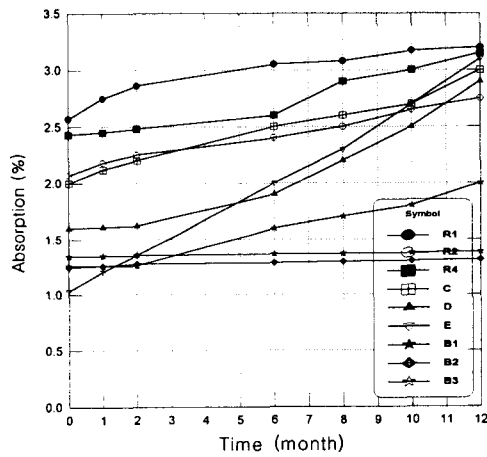


Fig. 9 Absorption ratio and aging effect of aggregate

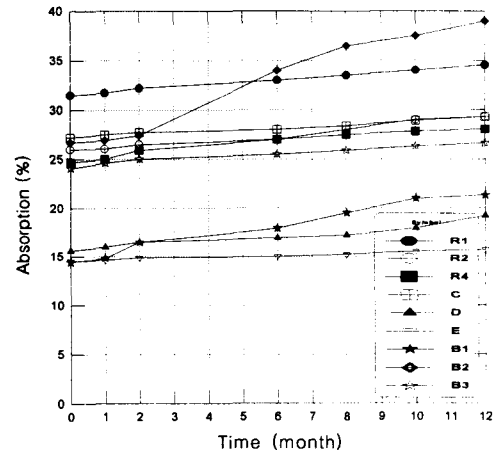


Fig. 11 Abrasion rate and aging effect of aggregate

수량을 나타내는 것이다. 또한 비중은 감소하고 흡수율은 증가됨을 알 수 있다. Fig. 10은 시간경과에 따른 골재의 겉보기비중이다. D 시료는 6개월부터 골재의 내부적인 공극이 증가되어 흡수율의 증가와 비중이 급격히 감소하는 경향을 보였으며 B3 시료는 점토광물이 다량으로 들어 있어 파쇄후 최초의 암석성질을 상실하여 시간이 경과할수록 비중의 감소를 가져와 저품질의 골재성분으로 변질되었다. Fig. 9, 10을 통해 시간이 경과함에 따라 비중은 감소하고 흡수율은 증가됨을 알 수 있다. 또,

비중이 작다는 것은 입자가 거칠고, 다공질이기 때문이고, 흡수율이 크다는 것을 알 수 있으며, 비중이 크다는 것은 일반적으로 양질의 것을 나타낸다. 이와 같은 결과를 통해 흡수율은 골재품질을 나타내는 척도로서 골재의 내구성에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 11의 시간경과에 따른 골재의 마모율은 전 시료가 1년이 지난 후에도 규정치 내에 들었다. 특히 안정성시험에 불합격(12% 이상)한 골재도 1년 동안 한계치인 40%보다 낮게 나왔는데 이는 골재의 비중이 양호(비중 2.5 이상)

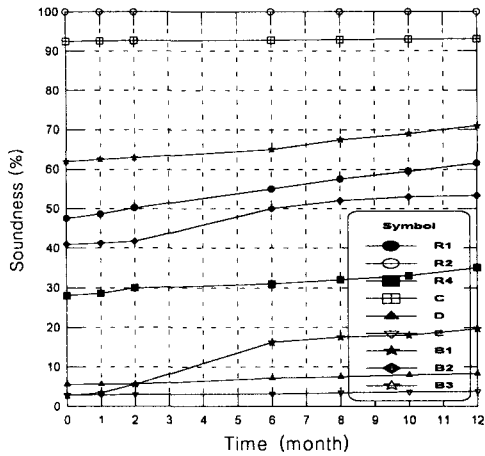


Fig. 12 Aging effect and soundness of aggregate

하면, 마모율도 낮게 나타남을 보여준다. Fig. 13는 시간경과에 따른 골재의 안정성 변화 그래프이다. 풍화도의 진행이 늦고, 점토광물을 함유하지 않은 D, E 시료는 안정성시험에 1년 동안 큰 변화 없이 규정치안에 들었다. B1 시료는 파쇄직 후에는 안정성손실률이 적었으나, 6개월부터는 손실률이 높아졌다. 다른 시험에서 합격한 골재가 안정성에서 불합격한 이유는 쇄석 골재는 천연골재와는 달리 그 구성 광물상들이 지표환경에 노출된지 얼마 되지 않아 물리·화학적 풍화작용에 약한 불안정한 상태로 존재하는 경우가 많고, 대구지역에서 생성되는 규장암과 감람석 현무암은 풍화가 상대적으로 적고, 나머지 세일 계통은 암석의 풍화진행이 크게 나타났다.

다. 각 골재정수들의 상관관계

Table 4는 각 골재정수들의 상관계수를 나타낸 것이다. 골재시험 중 흡수율과 마모성의 상관계수가 전 시료에서 0.92 이상 나타나 골재내부의 공극이 증가할수록 마모손실률이 증가함을 알 수 있다. Fig. 13, 14는 1년 동안 골재시험 중 합격을 한 D, E 시료에 대한 상관관계 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 13은 E 시료의 흡수율과 마모율에 대한 상관관계로서 6개월 후부터 마모율의 증가에 따라 흡수율이 급속히 증가한다. Fig. 14는 D 시료의 마모율과 흡수율의 상관관계로서 처음 2개월까지는 흡수율의 변화 없이 마모율이 증가하지만 6개월부터는 거의 직선적으로 변화하는 것이 보여진다.

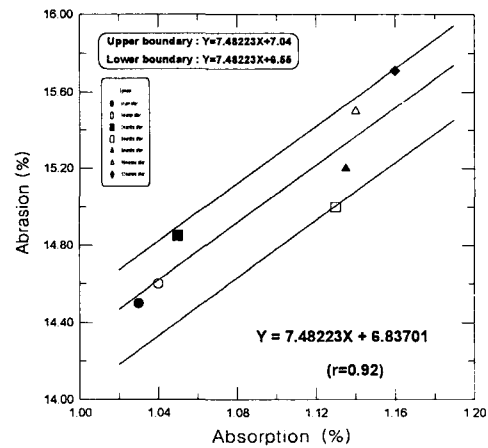


Fig. 13 Correlation (E) for absorption ratio and abrasability

Table 4 Correlation coefficient of respective aggregate integer

Sample	R1	R2	R4	C	D	E	B1	B2	B3
0.075 mm passing percentage-Absorption ratio	0.97	0.98	0.95	0.99	0.94	0.96	0.99	0.98	0.96
Absorption rate-Apparent specific gravity	0.75	0.99	0.91	0.97	0.98	0.95	1.00	0.94	0.99
Apparent specific gravity-Abradability	0.88	0.96	0.80	0.97	0.97	0.99	0.99	0.98	0.99
Absorption ratio-Abradability	0.96	0.98	0.92	0.98	0.97	0.92	0.98	0.94	0.96
0.075 mm passing percentage-Apparent specific gravity	0.87	0.97	0.87	0.96	0.99	0.99	1.00	0.99	0.97
Absorption ratio-Soundness	0.96	-	0.96	0.99	0.94	0.91	0.89	0.92	0.98
Soundness-Absorption rate	1.00	-	0.96	0.99	0.93	0.99	0.91	0.99	0.97



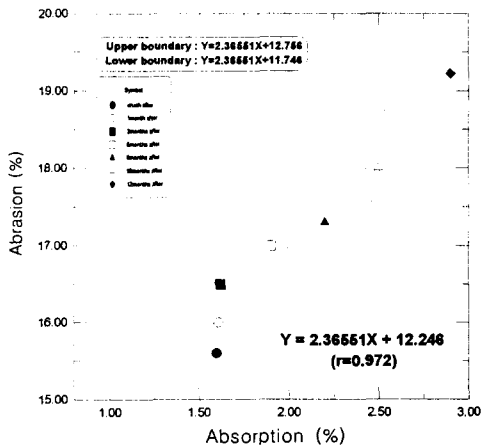


Fig. 14 Correlation (D) for abrasion rate and absorption ratio

#### IV. 결 론

본 연구는 대구지하철 건설현장에서 발생하는 지하굴착암 쇄석을 골재로서의 재활용 여부를 검토하기 위하여 수행한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시간경과에 따른 골재의 0.075 mm 체 통과율은 세립성분을 함유한 이암과 사암계통인 R1, R2, R4 그리고, 이회암 계통인 연암은 1년 후 골재의 KS 규정치에 부적합한 것으로 측정되었다.

2. 쇄설성 퇴적층의 암석에 대한 파쇄한 후의 골재는 0.075 mm 체 통과율과 비중, 흡수율의 상관계수가 높게 나오는 것으로 미루어 흡수율을 통해 골재의 내구성을 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 골재시험 중 흡수율과 마모성의 상관계수가 전 시료에서 0.92 이상 나타나 골재내부의 공극이 증가할수록 마모손실률이 증가함을 알 수 있었다.

3. 시간경과에 따른 흡수율은 극경암, 연암, 경암의 증가폭이 적게 나타났으나, 경암은 골재 파쇄 1년경과 후 흡수율이 증가되었다. 보통암은 한달 경과 후 빠른 흡수율 증가로 인해 비중이 감소되었으

며 흡수율은 높게 나타났다. 안정성시험에서 경암은 1년 동안 큰 변화 없이 규정치안에 들었다. 극경암은 파쇄 직후에는 안정성손실률이 적었으나, 6개월부터는 손실률이 높아졌다.

4. 쇄석골재는 천연골재와는 달리 파쇄면이 지표에 노출 된지 얼마 되지 않아 물리·화학적 풍화작용으로 불안정한 상태로 존재하는 경우가 많았다. 즉, 풍화된 암석의 내부에는 풍화에 약한 광물이 함유하게 되어 비중이 감소되며, 이로 인하여 흡수율이 증가되고 마모감량과 안정성에 의한 손실량 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구는 대학부설연구과제 학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

1. Bulk, A. D. 1977. Recycled Concrete as a Source of Aggregate, *ACI Journal*, Title No. 74-22, pp.212-219.
2. Cho, Pyoung Sun. 1988. An experimental study on the effect of aggregate shape influencing to the concrete properties, Degree of Master. Chongju University. (in Korean)
3. Clive Whiston, 1987, X-ray Methods, Analytical Chemistry by Open Learning, : Wolverhampton Polytechnic, UK, 29-33 pp.296-305, 309-312.
4. Kim, Dong chun. 1988. The influence of the height/width ratio of rock specimen on its uniaxial compressive strength. Degree of Master. Inha University. (in Korean)
5. Song, Sun Ho. 1994. A study on absorption properties in rock specimen, Degree of Master : Chungbuk National University. (in Korean)