

國內產 大理石의 地質工學的 特性

정 영 옥* · 전 효 택*

Engineering Geological Properties of Some Domestic Marbles

Young Wook Cheong* and Hyo Taek Chon*

Abstract : Mechanical, physical and petrographic properties of seventeen marble specimens collected from ten marble mines in Korea were investigated. Studied marbles were mainly composed of calcite, dolomite, and various amounts of serpentine, tremolite, olivine, quartz and opaque minerals. Complete and sutured textures were dominant. Compressive strength measured normal to the bedding plane is larger almost two times than that measured parallel to the bedding plane. From the results of Shore hardness test on marbles, water content was an important factor to decrease Shore hardness values. Engineering geological properties, especially, compressive strength, Young's modulus, wear resistance and water absorption could be controlled by the presence of quartz, and the type of marble texture. Water absorption-porosity, compressive strength-Young's modulus, and impact strength index-Los Angeles abrasion couples show good correlation. According to the comparative utility as commercial stone, it could be concluded that marbles from the Banglim mine, Songbo mine, Kwangdeok mine and Bongjeong mine were superior to that of other studied marbles.

서 론

석재는 구석기 시대로 부터 인간과 관계를 맺기 시작하면서 건축재, 예술작품, 종교구조물등에 다양하게 이용되어져 왔고, 최근 채석방법 및 처리기술의 발달로 인해서 석재의 활용이 광범위하게 이루어지고 있다. 특히 천연석재 중 대리석은 연마 및 가공기술에 힘입어 대리석의 미려한 광택, 색상 및 문양등의 특성에 의해서 건축재, 조각재, 공예재등으로 다양하게 이용되고 있다.

대리석이란, 암석학적으로 탄산염질암석이 열과 압력등에 의해 구성광물이 재결정화되고 또한 부수광물이 새로 생성된 암석으로 퇴적기원의 구조 및 유기물 흔적등이 소멸 혹은 변형된 결정질 변성암을 말한다. 한편, 상업적으로 대리석이란 용어는 좀더 광범위하게 사용되어 연마할수 있는 방해석, 백운석, 사문석등으로 구성된 결정질암석들을 통칭한다. 또한 이러한 대리석들은 채석장 위치, 색상, 혹은 석재의 조직이나 특징에 의해서 여러가지 상품명으로

불리워지기도 한다 (Power, 1983; Bowles, 1958).

이러한 천연석재들은 광범위한 광물조성, 조직 및 구조등을 갖고 있는 불균질 물질이므로 물리적·화학적 특성 즉, 내구성(durability) 등이 매우 다양하며, 또한 채석 및 가공단계에서 강력한 충격(진동) 등에 의해서 석재내부에 미소균열의 발생을 야기시켜서 염 또는 산성용액의 침투를 허용하여 변질작용을 가속화 시킬수도 있다 (Amoroso and Fassina, 1983). 따라서 이러한 천연석을 특정한 목적에 사용하고자 할때는 암석의 특성 및 물리적·역학적성질을 규명하여야 한다 (ASTM: in Winkler, 1975).

최근에 국내에 발표된 석재에 관한 연구로는 암석에 대한 물리적특성(이정인 등, 1982; 신병우, 현전기, 1985), 대리석 석탑에 대한 풍화연구(전효택, 전용원, 1975), 석재 자원 조사보고서(한국동력자원연구소, 1988, 1989, 1990), 석재자원 특성조사보고(광업진흥공사, 1989) 등이 있고, 최근 한국자원공학회에서 개최한 학술심포지움(1989)에서 "석재자원의 현황과 전망"이란 주제로 발표된바 있다. 한편 외국의 경우, 석재에 대한 전반적인 특성 및 실험방법 (Winkler, 1975; Bowles, 1939; Power, 1983), 석재의 풍화 (Winkler, 1966; Heidecker, 1968; Silverman and Munoz,

* 서울대학교 자원공학과(Dept. of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea.)

1970; Gauri et al., 1972; Schaffer and Sc, 1972), 용도별 분류 연구(Hornbostel, 1968; Koroneos et al., 1980) 및 석재에 대한 보존방법(Price and Ross, 1984; Amoroso and Fassina, 1983)등이 있는데 이는 국내에 비해 석재의 개발, 처리, 평가, 및 보존연구가 상당히 진척되어 있음을 나타내 준다.

본 연구는 국내산 대리석에 대해서 암석학적 및 물리적, 역학적 특성을 기재하고, Koroneos et al. (1980) 및 Italian institute for foreign trade(1982)에서 제안한 분류방법을 적용하여 각 광산별 대리석을 용도별로 평가하였다.

시료채취 및 실험방법

시료채취

국내의 대리석 산지는 주로 옥천대의 북동부인 함백산 향사대의 대석회암통, 그리고 옥천대 중부와 연천계내의 석회암층에 발달되어 있으며 지질시대는 대체로 선캄브리

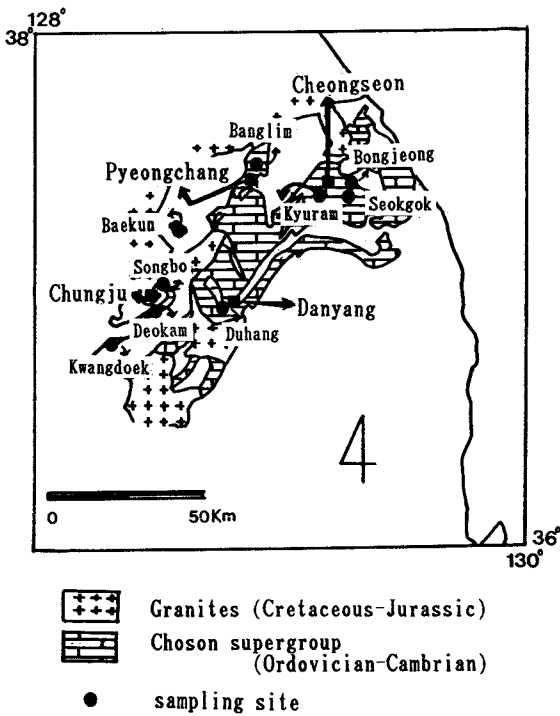


Fig. 1. Brief geologic map of sampling sites.

아(연천계의 경우)와 고생대 오오도비스기(옥천대 및 함백산 지구의 경우)에 해당된다(이대성, 1982).

국내의 주요 대리석분포지는 충북 충주, 증원, 제원, 괴산, 전북 익산, 무주, 진안, 전주, 및 강원 정선등이다(대한 광업진흥공사, 1989). 본 연구에서는 이들 지역중 충북 지역에서 성보광산, 광덕광산, 백운광산, 두함광산 및 덕암광산 그리고 강원지역에서 봉정광산, 방림광산, 굴암광산 및 석곡광산등 9개 광산을 대상으로 하여 암상을 달리 하는 대리석시료를 16개 채취하였고, 전주산 대리석도 구입하여 총 17개의 시료를 대상으로 암상기재 및 물리적 특성을 규명하였다(Fig. 1). 주구성광물, 조직의 특성, 광물의 평균입자크기등을 기재하기 위하여 박편을 이용한 현미경관찰 및 X-선회절 분석을 실시하였다.

물리적 및 역학적 실험방법

대리석 시료에 대한 물리적 및 역학적시험은 ISRM suggestion method (Bieniawski et al., 1981)을 주로하여 수행되었다.

1) 단축압축강도

단축압축실험에서는 용량 100톤의 유압식 압축시험기(Tokyo Koki, TK-8), 동적변형을 증폭기(Toyo Bold-Win MD-6E-F), 2대의 X-Y 기록계(Toa x XYR-2A) 및 Load cell 등이 이용되었다. 사용된 시험편은 직경(2.5cm)과 높이(5cm)의 비가 1:2인 코아를 이용하였다. 이방성이 현저한 시료에 대해서는 2개 이상의 시료를 제작하였다. 단축압축 과정에서 하중은 load cell에 의하였고 압축강도는 다음식에 의하였다.

$$Sc = \frac{P}{A}$$

P: 파괴시 하중(kg)

A: 공시체의 단면적(cm²)

2) 탄성계수(Young's modulus)

변형율은 암석강도 시험용 코아에 스트레인 게이지를 부착하여 감지를 하였고, 이를 동적 변형을 증폭기를 이용하여 X-Y 기록계에 연결하여 하중-중변형을 곡선을 자동기록 시켰다. 탄성계수는 기록된 하중-중변형을 곡선으로부터 scant Young's modulus를 택하였다.

3) 굴곡강도(Bending strength)

굴곡강도(S_b)는 압축강도시 사용했던 압축기에 특정한 실험장치를 삽입하여 3 point loading 방법을 이용하였다. 파괴 하중은 각주형태(20×3×3cm)의 시료로 측정하여 다음식에 의하여 구하였다.

$$S_b = \frac{3FL}{2WT^2}$$

F: 파괴시 하중(kg)

L: 각주의 길이(cm)

W: 각주의 폭(cm)

T: 각주의 두께(cm)

4) 겉보기 비중

암석의 겉보기 비중은 시험편의 무게와 외형체적으로 부터 계산하였으며 무게는 직시천평에 의해 0.001g 정도까지 측정하였다. 외형체적은 캘리퍼에 의해 0.05mm 정도까지 측정하였다.

5) 공극율

공극율(p)은 공시체를 24시간 물속에 침수시킨 후의 무게와 건조시켰을때의 무게를 측정하여 다음의 식에 의해서 구하였다.

$$P = \frac{(B-A)}{V} \times 100$$

B: 침수후의 시료무게(g)

A: 건조후의 시료무게(g)

V: 시료(코아)의 체적(cm^3)

6) 흡수율

흡수율은 (A_w)은 공시체를 24시간 동안 110℃에서 건조시킨 후 무게를 재고 48시간 침수시킨 후에 무게를 측정하여 다음식에 의하여 구하였다.

$$A_w = \frac{(B-A)}{A} \times 100$$

B: 침수후의 시료무게(g)

A: 건조후의 시료무게(g)

7) 쇼어 경도(Shore hardness)

쇼어경도는 Type D의 쇼어경도계(Imai Seiki)를 이용, 시료를 침수시켰을때 그리고 건조시켰을때 각각 20회 측정하여 평균값으로 쇼어경도를 측정하였다.

8) 마모도

마모도(h)는 Riken-Ogoshis Universal Wear Testing Machine를 이용하여 측정하였다. 직경이 3cm인 disk가 1×2×5cm의 시료에 6kg의 하중을 가하면서 시료위를 200m에 해당하는 거리를 회전하였을때 이때 파여진 홈깊이(h)를 마모도로 하였으며 다음식에 의하여 구하였다.

$$h = r \sqrt{r^2 - (b^2/4)}$$

b: 측정치(mm)

r: disk의 반경(1.5mm)

9) 로스엔제레스(Los Angeles) 마모도

로스엔제레스마모도(W_1)는 측정입도의 크기가 15mm내지 25mm 인 시료를 1,100±100g 취하여 철구와 함께 원통형 마모시험기에 넣고 500회 회전시킨후 2mm체(sieve)위의 파쇄시료의 무게를 측정하여 다음공식에 의해 구하였다.

$$W_1 = \frac{A}{B} \times 100$$

A: 2mm 체위의 파쇄시료 무게(g)

B: 15~25mm 입도의 시료무게(g)

10) Impact strength index

Impact strength index (S_i)는 지름이 76mm, 높이가 700mm 인 원통형 철재기구에 체적이 10-20 cm^3 정도 크기의 시료를 1개씩 기구바닥에 깔고 3.7kg의 추를 10회 낙하시켜 파쇄된 시료를 꺼내서 2.5mm 체(sieve)로 분급된 2.5mm 분체를 직경 2.3mm volumeter에 넣어서 그 눈금을 I_n 으로 하여 5회(I_1 - I_5) 실시하였다. 이들5회의 평균값을 I로 하여 다음식에 의해 Impact strength index를 구성하였다.

$$S_i = \frac{20N}{I}$$

N: 타격수, I: volumeter 눈금

Table 1. Petrographic description of the studied marble specimens.

mine	Specimen No.	color	mineralogical composition	texture	grain size (mm)
Songbo	SB 1	light greenish, gray	dolomite, calcite, olivine, serpentine, opaque mineral	complete	0.25
Kwangdeok	KD 2	white, light green	calcite, olivine, quartz, opaque mineral	sutured	0.03
	KD 3	greenish gray	calcite, tremolite, quartz, opaque mineral	sutured	0.30
	KD 4	blackish gray	calcite, tremolite, muscovite, quartz, opaque mineral	sutured	0.63
	KD 5	light gray	calcite, quartz, tremolite, opaque mineral	sutured	0.48
Baekun	BU 6	white	calcite, dolomite, tremolite	complete	0.39
	BU 7	black, light gray, pale green	olivine, calcite, dolomite, serpentine, quartz, opaque mineral	complete	0.45
Duhang	DH 8	white	calcite, brucite	sutured	0.49
	DH 9	light green	olivine, calcite, serpentine	long tangent (olivine) network	0.50
	DH 10	blackish gray	calcite, olivine, serpentine, opaque mineral	complete	0.34
Deokam	DG 11	light greenish, gray, white	calcite, tremolite, talc, quartz, calcite, chlorite	sutured	0.13
Bongjeong	BJ 12	light gray	calcite, quartz, tremolite	complete	0.41
	BJ 13	pink	calcite, muscovite, sericite, quartz	complete	0.46
Banglim	BL 14	pink, grayish green,	calcite, tremolite, quartz	sutured	0.32
Kyuram	KR 15	brownish white	calcite, quartz, opaque mineral	breccia	0.36
Seokgok	SK 16	black, white, dark reddish brown	calcite, muscovite, quartz	breccia	0.03
Cheonju	CJ 17	light gray	calcite, carbonaceous materials	complete	0.68

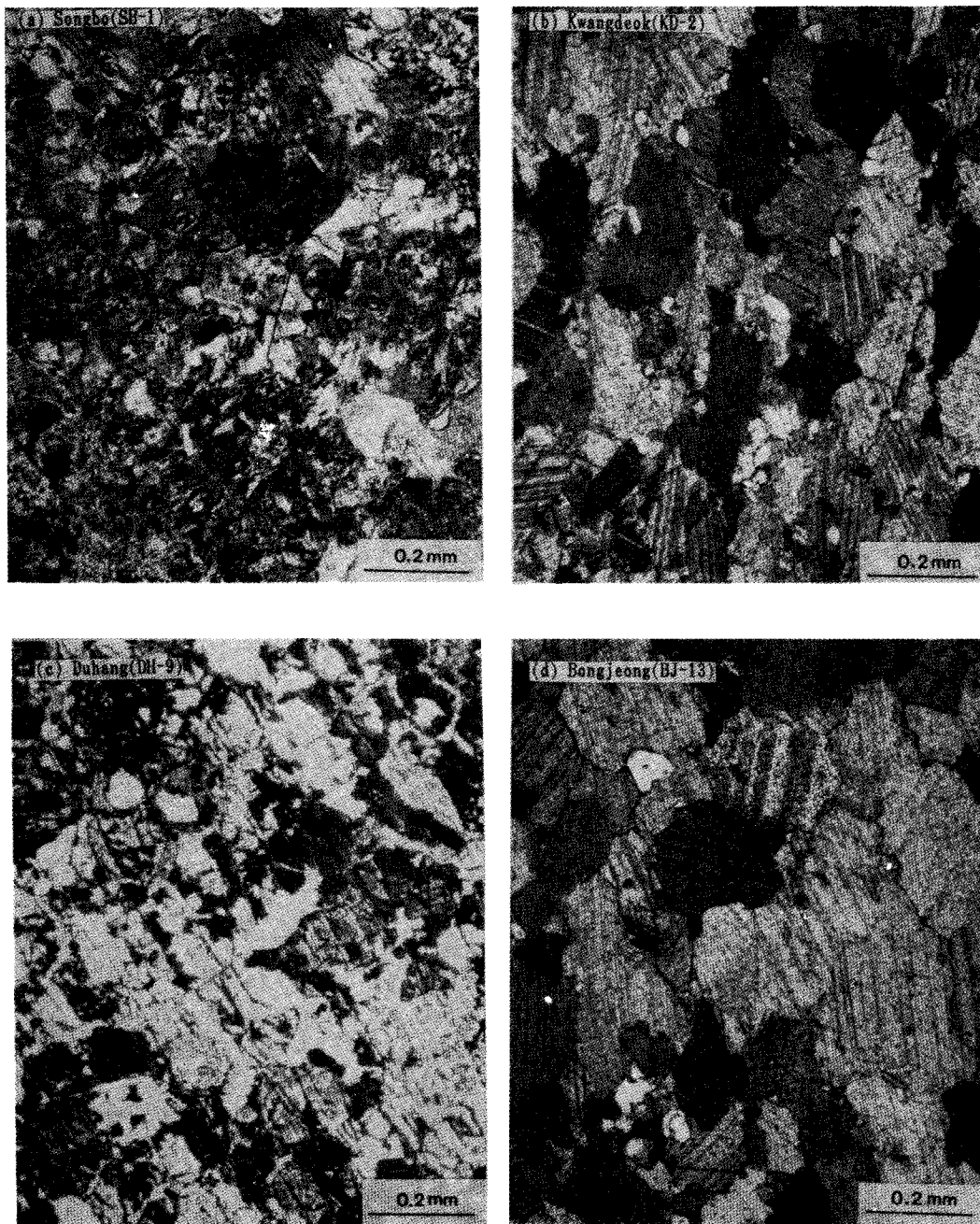


Fig. 2. Microphotographs of the representative marbles(crossd nicol) (a) serpentine in calcite and dolomite matrix (Sample SB 1). (b) sutured texture in calcite matrix(Sample KD 2). (c) olivine altered to serpentine, long tangent texture(Sample DH 9). (d) complete texture in calcite matrix(Sample BJ 13).

암석기재, 실험결과의 고찰 및 용도별 분류

암석기재

각광산의 시료들에 대한 육안관찰, 편광현미경감정 및 X-선 회절분석결과는 Table 1과 같다. 또한 조직은 Griffiths (Winkler, 1975)가 제안한 광물립의 충전정도(광물립의 접촉정도)에 따라서 floating, long tangent, complete 및 sutured (seriated)로 기재하였다(Table 1).

성보광산시료(SB-1)는 연녹회색을 띠며 백운석, 방해석, 감람석, 사문석 및 불투명 광물로 구성되어 있다(Fig. 2a). 광물립의 조직은 complete packing이다.

광덕광산시료(KD-2,3,4,5)는 연녹회색에서 암회색에 이르는 다양한 암상을 보이며 흑색의 가는선과 회색등의 암색을 이룬 호상조직이 발달되어 있기도 하다. 주구성광물은 방해석, 투각섬석, 감람석, 석영등이며 불투명광물이 수반된다. 이들 암석시료들의 조직은 sutured packing의 형태를 보인다(Fig. 2b).

백운광산시료(BU-6,7)는 유백색, 연녹색, 암회색등의 색상을 띠며 주로 방해석, 백운석, 투각섬석, 사문석, 감람석 및 석영등으로 구성되며 입자들의 조직은 complete packing의 특성을 보인다.

두항광산시료(DH-8,9,10)는 유백색 및 담갈색을 띠며 암청록색, 암회회색등의 망상 줄무늬를 보이기도 한다. 방해석, 백운석, 감람석, 사문석등이 주구성광물이며 불투명 광석광물이 포함되어 있다. 조직은 sutured, long tangent, complete이다(Fig. 2c).

덕암광산시료(DG-11)는 유백색 바탕에 연회색이 호상으로 암색을 형성한다. 주로 방해석, 투각섬석, 활석, 녹니석, 석영등으로 구성되며 sutured packing의 특성을 보인다.

봉정광산시료(BJ-12,13)는 연회색 및 핑크색을 띠며 주로 방해석, 투각섬석, 백운모, 견운모, 석영등으로 구성되어 있고 광물립의 조직은 complete packing이다(Fig. 2d).

방립광산시료(BL-14)는 핑크색바탕에 녹색띠가 부분적으로 발달되어 있으며 방해석, 투각섬석, 석영등으로 구성되어 있다. 광물립의 조직은 sutured packing을 보인다.

굴암(KR-15) 및 석곡광산시료(SK-16)는 각력질암으로서 기저부와 각력들의 크기는 매우 다양하다. 기저는 각각 암적색과 암회색을 띠며 각력들의 암색에 따라서 전체적인 색상의 명암을 좌우한다. 주로 방해석과 석영등으로 구성

되어 있다.

전주산시료(CJ-17)는 연회색으로 방해석 및 탄질물이 함유된 결정질암으로 조직은 complete packing 특성을 보인다.

이들시료들의 평균입자크기는 비각력암의 경우 입자들의 크기가 대체로 균일하며 0.03mm-0.5mm에 달한다. 각력암(KR-15 및 SK-16)의 각력들은 입자크기가 매우 다양하다. 또한 광물립의 형태는 complete packing의 경우 주로 등립질인 경우가 우세하고, sutured packing의 경우는 한쪽방향으로 신장된 형태를 보인다.

물리적 및 역학적 특성 고찰

17종 대리석 시료의 공극율은 0.2-1.0%의 범위를, 흡수율은 0.06%-0.37%의 범위(Table 2)를 보인다. 대리석 시료중 두항광산의 DH-8,9 시료에서 공극율이 1.0%와 0.4%였고 흡수율은 또한 DH-8,9 시료에서 약 0.3%로서 기타광산시료들에 비해 공극율 및 흡수율이 다소 높게 나타났다(Table 2). 한편 이공극율은 석재로 사용하기전과 후에 석재의 종류, 특성 및 풍화과정등에 의해서 공극의 형태 및 공극율이 변화될 수 있으므로 흡수율에 영향을 미칠 수도 있다. 온도의 변화에 따른 방해석의 열팽창계수의 변화로 인해 공극율의 40%-50%까지 증가하는 경우도 있다(Amoroso and Fassina 1983). 따라서 공극율 및 흡수율은 대리암을 석재로 이용하고자 할때 풍화요소(수분, 염 및 기타오염물질 등), 내구력, 및 석재의 보존방법에 대한 중요한 물성으로 간주된다.

겉보기 비중은 두항광산시료(DH-9)의 3.0을 제외하면 대부분의 광산시료가 2.6~2.8의 범위를 보인다(Table 2).

경도는 scratch, abrasion, rebound, impact 형태의 경도로 분류될 수 있으며 (Winkler, 1975) 본 시험에서는 rebound 형태인 쇼아경도(Shore hardness)를 이용하였고 수분으로 포화된 시료와 건조상태의 시료에서 각각 측정되었다(Table 2). 수분으로 포화된 시료의 경우 29~41, 건조시료의 경우 38~55로서 수분의 영향에 의해 쇼아 경도가 최고 19정도까지 감소가 일어났다(Fig.3의 SK 16시료). 한편, 광물 및 암석의 경도는 변형(deformation)에 대한 저항성을 의미하므로 채석장의 workability 및 석재 가공에 대한 난이성(저항상) 및 석재의 내구력에 대한 요소가 된다.

일축압축강도는 이방성이 현저한 경우 층리에 수직하중과 수평하중을 가하여 압축강도를 구하였다(Table 2). 층

Table 2. Engineering properties of studied marble specimens.

sample No.	porosity (%)	water absorption (%)	specific gravity	Shore hardness		compressive strength (kg/cm ²)		bending strength (kg/cm ²)	Young's modulus (x 10 ⁵ kg/cm ²)	wear resistance (mm)	impact strength index	Los Angeles abrasion (%)
				(1)	(2)	(3)	(4)					
S B-1	0.2	0.08	2.9	40	49	1265	1530	288	7.0	0.75	3.32	65
KD-2	0.2	0.08	2.8	36	42	613	1000	228	5.0	0.32	3.57	60
KD-3	0.4	0.12	2.8	37	44	387	967	198	2.7	0.85	3.57	68
KD-4	0.4	0.13	2.8	30	47	448	1020	298	3.0	0.40	3.17	63
KD-5	0.2	0.13	2.8	29	41	310	395	237	4.5	0.77	2.97	66
BU-6	0.3	0.09	2.9	35	45	1187		201	4.1	0.93	3.40	64
BU-7	0.4	0.10	2.8	41	42	563	1020	255	4.4	0.63	3.75	75
DH-8	1.0	0.30	2.6	25	39	1138		179	5.5	0.93	3.17	73
DH-9	0.4	0.37	3.0	40	50	657		125	4.4	1.18	3.40	67
DH-10	0.4	0.14	2.7	40	46	1742		155	7.0	1.18	3.66	77
DG-11	0.7	0.15	2.8	40	55	383		239	4.1	0.94	3.75	68
B J-12	0.2	0.21	2.8	40	55	755 1208		201	3.9	0.47	3.24	53
B J-13	0.2	0.06	2.7	35	41	693		145	3.0	0.41	3.24	54
B L-14	0.2	0.07	2.8	35	49	657	832	387	4.0	0.41	4.08	73
KR-15	0.2	0.08	2.8	37	54	318		212	1.4	0.25	3.86	67
S K-16	0.6	0.20	2.8	32	50	461		96	5.0	0.48	3.40	62
C J-17	0.3	0.10	2.7	36	38	771		184	5.5	0.91	2.69	29

(1) tested under the wet condition, (2) tested under the dry condition, (3) loading parallel to the bedding plane and (4) loading normal to the bedding plane.

리에 수직하중을 가하였을 경우 수평하중을 가했을 경우보다 일축압축강도가 대체적으로 크게 나타났으며(Fig. 4) Table 2의 KD-4의 경우 수직하중에 의한 강도가 1020kg/cm²인데 반해 수평하중의 경우 448kg/cm²로 약 2배이상의 강도저하가 일어났다. 이러한 이방성과 강도간의 관계는 Bell (1980, 1983) 및 Attewell and Farmer (1976)에 의해 편집된 자료들의 경향과 부합되며 이들 자료들에 의하면 특히 주응력과 벽개면의 수선방향과 약 50°를 이룰 경우 강도저하가 가장 크게 발생한다.

탄성계수(Young's modulus)는 $(1.4-7.0) \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위를 보이며 Winkler (1975)가 편집한 탄성계수와 비교해볼때 석회암 $(1-8) \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 및 백운암 $(4-8.4) \times 10^5 \text{ cm}^2$ 들과 유사하다. 이러한 탄성계수는 creep 현상과 상관성이 있는 물질으로 음의 상관성을 갖는다 (Winkler, 1975).

wear resistance는 0.25mm-1.18mm의 범위를, impact strength index는 2.69~4.08의 범위를, 로스엔제레스마모도는 29~77%의 범위를 보여준다 (Table 2).

이들 17종 대리석 시료의 물리적 및 역학적 특성들간의 상관관계는 다음과 같다 (Table 3). 공극율 및 흡수율들은 서로 상관성이 있는 물성으로 알려져 있는데 본시험에서도 이들 두물성간의 상관계수는 0.58로서 상관성이 비교적 양호하게 나타났다. 또한 압축강도와 탄성계수는 0.67, impact strength index와 Los Angeles 마모도는 0.68로서 상관성이 있는 물성들로 나타났다. 압축강도와 Shore 경도간의 상관계수는 -0.17 그리고 인장강도와 Shore 경도간의 상관계수는 0.10로 상관성이 극히 불량한데 이는 대리석암석들이 보통 여러종류의 광물로 구성된 집합체로서 다양한 조직 및 특성을 갖는 불균질 물질이기 때문에 경도변수와 강도간의 상관성은 잘 맞지 않는것으로 해석된다 (Winkler, 1975; Table 3).

입자조직 (texture)에 대한 물리적 특성의 분산분석결과 흡수율 및 압축강도가 조직의 형태에 따라서 차이가 있음이 나타났다 (Table 4). 흡수율은 complete (grp 1), sutured (grp 2) 및 breccia (grp 4) 시료에서 0.11~0.14%의 범위를 보이는 반면 long tangent (grp 3) 시료는 흡수율이 0.37%로서 크게 증

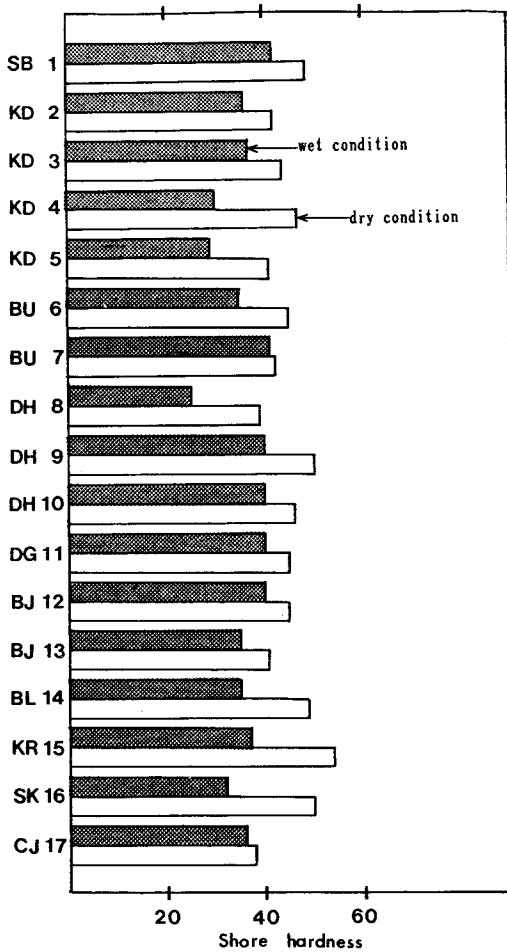


Fig. 3. Comparison of Shore hardness of each specimen (Refer to Table 1 for the abbreviation of specimen numbers).

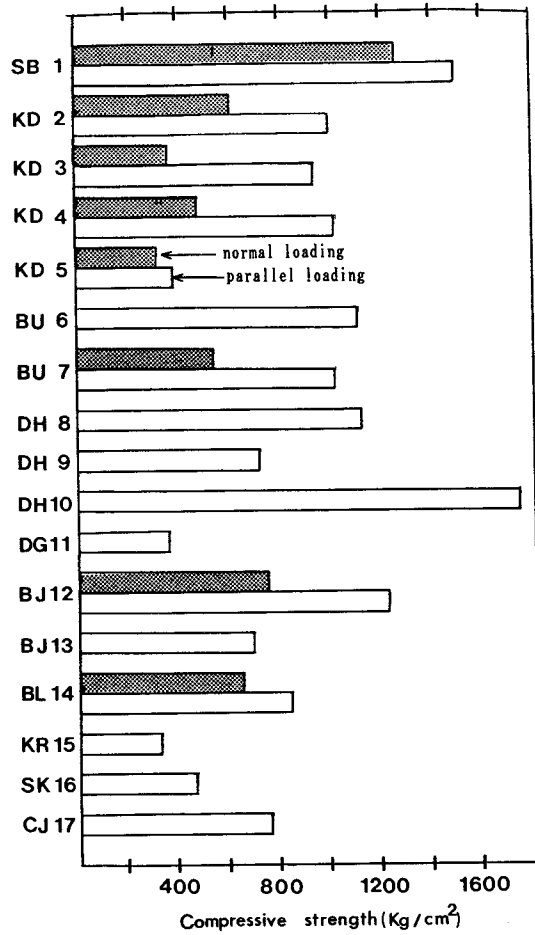


Fig. 4. Comparison of compressive strength of each specimen (Refer to Table 1 for the abbreviation of specimen numbers).

Table 3. Correlation coefficient of 10 physical properties of 17 samples.

Correlations :	por.	abs.	gra.	hrd.	st.	bend.	You.	wear.	imp.	Los.
porosity	1.00									
water absorption	0.58	1.00								
specific gravity	-0.38	0.12	1.00							
Shore hardness	-0.07	0.15	0.47	1.00						
compressive strength	0.03	0.00	-0.14	-0.17	1.00					
bending strength	-0.29	-0.48	0.10	0.10	-0.00	1.00				
Young's modulus	0.19	0.16	-0.10	-0.25	0.67	-0.09	1.00			
wear resistance	0.40	0.47	0.08	-0.16	0.41	-0.34	0.51	1.00		
impact strength index	-0.03	-0.20	0.20	0.48	-0.04	0.34	-0.24	-0.20	1.00	
Los Angeles abrasion	0.29	0.15	0.12	0.22	0.16	0.22	0.01	0.13	0.68	1.00

por. : porosity, bend. : bending strength, abs. : water absorption, You. : Young's modulus, gra. : specific gravity, wear. : wear resistance, hrd. : Shore hardness, imp. : impact strength index, st. : compressive strength, and Los. : Los Angeles abrasion.

Table 4. Analysis of variance for various physical properties according to texture.

physical variables	group	mean	F Ratio	F Prob.
porosity (%)	grp 1	0.28	0.5661	0.6470
	grp 2	0.44		
	grp 3	0.40		
	grp 4	0.40		
water absorption (%)	grp 1	0.11	4.4610	0.0231
	grp 2	0.14		
	grp 3	0.37		
	grp 4	0.14		
specific gravity	grp 1	2.78	2.4348	0.1114
	grp 2	2.77		
	grp 3	3.00		
	grp 4	2.80		
shore hardness (wet)	grp 1	38	2.1225	0.1467
	grp 2	33		
	grp 3	40		
	grp 4	34		
shore hardness (dry)	grp 1	45	1.0853	0.3898
	grp 2	45		
	grp 3	50		
	grp 4	52		
compressive strength (kg/cm ²)	grp 1	1080	3.2273	0.0577
	grp 2	690		
	grp 3	657		
	grp 4	389		
bending strength (kg/cm ²)	grp 1	204	2.1613	0.1417
	grp 2	252		
	grp 3	125		
	grp 4	154		
Young's modulus (x10 ³ kg/cm ²)	grp 1	4.98	0.9310	0.4535
	grp 2	4.11		
	grp 3	4.40		
	grp 4	3.20		
wear resistance (mm)	grp 1	0.75	2.2831	0.1272
	grp 2	0.66		
	grp 3	1.18		
	grp 4	0.36		
impact strength index	grp 1	3.32	0.4102	0.7484
	grp 2	3.46		
	grp 3	3.40		
	grp 4	3.63		
Los Angeles abrasion (%)	grp 1	59	0.5478	0.6584
	grp 2	67		
	grp 3	67		
	grp 4	64		

grp 1 ; complete(7), grp 2 ; sutured(7), grp 3 ; long tangent(1) and grp 4 ; breccia(2).

가된다. 압축강도는 complete조직 (grp 1)을 보이는 시료에서 1,080kg/cm²로 가장 크게 나타났으며 complete (grp 1), sutured (grp 2), long tangent (grp 3) 조직을 갖는 시료들은 압축강도가 657~1,080kg/cm²으로 ASTM의 외장용 대리암의 강도요구조건(527kg/cm²)을 충족하지만 breccia 조직을 보

Table 5. Analysis of variance for various physical properties according to quartz content.

physical variables	group	mean	F Ratio	F Prob.
porosity (%)	grp 0	0.43	0.7412	0.4028
	grp 1	0.33		
water absorption (%)	grp 0	0.18	1.9957	0.1782
	grp 1	0.12		
specific gravity	grp 0	2.80	0.0373	0.8495
	grp 1	2.79		
shore hardness (wet)	grp 0	36	0.0233	0.8807
	grp 1	35		
shore hardness (dry)	grp 0	44	1.0046	0.3321
	grp 1	47		
compressive strength (kg/cm ²)	grp 0	1148	12.2543	0.0032
	grp 1	630		
bending strength (kg/cm ²)	grp 0	188	1.1728	0.2959
	grp 1	226		
Young's modulus (x 10 ³ kg/cm ²)	grp 0	5.58	10.1888	0.0061
	grp 1	3.72		
wear resistance (mm)	grp 0	0.98	17.3027	0.0008
	grp 1	0.53		
impact strength index	grp 0	3.27	1.9386	0.1841
	grp 1	3.50		
Los Angeles abrasion (%)	grp 0	62	0.1136	0.7407
	grp 1	64		

grp 0 ; no quartz-bearing specimens(6),
grp 1 ; quartz-bearing specimens(11).

이는 시료 (grp 4)의 강도는 389kg/cm²으로 기준치 이하이다. 따라서 하중을 받는 석재로 대리암을 사용하고자 할때 상술된 바와 같이 층리방향과 입자의 조직(광물립의 충전 정도)등이 고려되어야 한다.

시료들 내의 석영유무에 따른 물리적특성의 분산분석결

과 탄성계수, wear resistance 및 압축강도등의 물성이 석영의 유무에 의해 차이가 있음이 나타났다 (Table 5). 석영이 함유된 시료 (grp 1)의 탄성계수는 $3.72 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 로 석영이 포함되어 있지 않은 시료들 (grp 0)의 값인 $5.58 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 보다 작게 나타났다. Winkler (1975)의 사암에 대한 탄성계수 자료는 $(0.3-8) \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 로 본연구의 탄산염암들보다 최저값이 더 작은 값을 갖는다. wear resistance의 경우 석영이 포함되어 있지 않은 시료들 (grp 0)은 마모에 대한 저항성이 0.98mm이고 석영이 포함되어 있는 시료들 (grp 1)은 마모에 대한 저항성이 0.53mm로서 석영이 포함된 시료들이 마모에 대한 저항성이 양호한 것으로 나타났다. 압축강도의 경우 석영이 포함된 시료 (grp 1)는 630kg/cm^2 의 강도를 가지나 석영이 포함되어 있지 않은 시료 (grp 0)는 1148kg/cm^2 의 강도를 나타낸다. 석영의 유무에 의해 강도저하는 석영이 대리석에 수반됨으로서 탄산염광물의 균질물질에 물리적 이방성을 부여하여 유발된 것으로 사료된다.

대리석의 용도별 분류

천연석을 석재로 이용하고자 할때 여러가지 물성이 고려되어야 하며 이들의 물성은 대체로 두가지로 구분할 수 있다 (Italian institute for foreign trade, 1982).

첫째, 암석의 특성을 나타내 주는 물성으로 비중, 흡수율 및 압축강도등인데 이들은 암석을 석재로 이용하고자 할때 거의 필수적으로 고려되어야 할 물성들이다. 비중은 석재의 사하중 계산과 치밀정도에 대한 정보를 제공해 준다. 흡수율은 석재의 저항성, 내구력, 및 치밀정도를 산정하는데 기초자료를 제공하여 주고 장기간에 걸쳐 토양수분의 영향이나 빗물등의 접촉이 예상되는 장소에서 이용되는 경우 중요한 고려요소가 된다. 압축강도는 석재에 전달되는 응력에 대한 저항능력을 추측하는데 필요로 하는 물성으로서, 최근들어 석재가 직접적으로 하중을 받지 않도록 설계되는 경향과 함께 장식용으로 사용되는 경우가 빈번해져 석재의 강도의 중요성은 적어지는 경향이 있다.

둘째, 석재가 어떤 특정목적에 이용되고자 할때 특히 고려되어야 할 물성들로서 열팽창계수, 영율, 경도, 충격강도, 마모도, 동결저항, 인장강도, 입자크기, 색상등이 있다. 열팽창계수 및 탄성계수등은 온도변화가 심한 외부 장소에서 석재를 이용하거나 보존하여야 할 경우 중요한 물성이다. 경도, 충격강도 및 마모도는 물리적 충격 및 마모가 예상되는 곳에 석재를 이용하고자 할때 고려되어야

하는 주요물성들이다. 인장강도는 overhanging stairs로 석재를 이용하고자 할때 고려되어야 할 물성이다.

또한 그의 암석학적으로 고려되어야 할 특성으로, 입자 크기등은 조각품 및 기념비 등에 이용하고자 할때 고려되어야 하며 특히 3방향으로 벽계가 발달된 방해석으로 구성되는 대리석의 경우, 입자크기가 클수록 정밀한 작업에 어려움이 따른다 (Winkler, 1975). 또한 석재내 황화광물 (특히 황철석)은 일련의 띠 혹은 독특한 문양에 의해 연마하여 내장용으로 이용이 가능하지만 (Bowles, 1939), 외장용으로 사용할 경우에는 공기중에서 산화되어 녹을 발생시키고 황산을 생성시켜 석재의 표면을 부식시켜 석재의 가치를 저하시키는 요인이 된다. 또한 구성광물 및 이들광물들의 산상에 따라서 이들광물간의 용해도 차이 및 풍화의 양상이 지배되므로 석재의 광물조성 및 조직에 대한 고려가 있어야 한다.

한편 석재의 공기오염원 (air pollutants)인 CO_2 , SO_2 , SO_3 및 Cl등은 석재의 풍화 및 보존에 중요한 요소가 되므로 이들의 석재에 미치는 영향은 예전에 비해 더욱 증대되고 있다 (Winkler, 1966, 1975; Winkler and Wilhelm, 1970; Schaffer and Sc, 1972).

이상의 석재에 관련된 물리적특성 및 암석학적 요소를 기초로 하여 특정목적에 따라서 이연구에 이용된 대리석 시료를 용도별로 분류하였다. 용도별 분류시 국내의 석재에 대한 물리적 및 암석학적 기준에 대한 설정이 극히 미진한 실정으므로 (KS F 2530) 대리석에 대해서 정량적인 석재의 판정은 어려운 실정이다. 따라서 Koroneos등 (1980)이 제안한 방법, 즉 물리적 특성을 10등분하여 암석의 등급을 정하는 정성적 품질평가 방법과 특정용도에 따른 물성의 중요도 (Italian institute for foreign trade, 1982)에 따라 가중치를 주어서 이들의 합으로 대리석의 품질을 순위별로 구분하였다.

Table 6은 입자크기, 비중, 공극율, 흡수율, 압축강도, 인장강도, 영율, 마모율, 충격계수 및 쇼아경도등에 대한 물성을 종합하여 본 연구에 이용된 대리석 석재의 등급을 나타낸 것이다. 방림광산시료(BL-14), 성보광산시료(SB-1) 및 광덕광산시료(KD-2)등이 순위가 1, 2, 3으로 가장 우수한 물성을 보이는 시료들로 나타났고 두항광산(DH-8,9) 및 전주산 대리석(CJ-17)등은 물성의 합이 가장 낮은 시료(순위가 15, 16, 17)로 나타났다.

외부 건축재 외벽용 용도에 대한 평가결과 전기한 종합

Table 6. Integrated behavior of the various specimens.

No.	grain size	specific gravity	porosity	water absorption	compressive strength	bending strength	Young's modulus	wear resistance	impact strength index	Shore hardness	sum.	grading
S B-1	7	3	10	10	9	4	10	5	5	7	70	2
KD-2	6	6	10	10	5	5	7	10	7	3	69	3
KD-3	6	6	8	9	5	4	3	4	7	4	56	9
KD-4	1	6	8	8	5	7	3	9	4	6	57	7
KD-5	4	6	10	10	1	5	6	5	3	2	52	14
BU-6	5	3	9	9	7	4	5	3	6	5	56	9
BU-7	4	6	8	3	5	6	6	6	8	3	55	12
DH-8	3	10	1	1	6	3	8	3	4	1	40	17
DH-9	3	1	8	8	3	1	6	1	6	8	45	16
DH-10	6	8	8	8	10	3	10	1	7	5	66	4
DG-11	9	6	4	5	1	5	5	3	8	10	56	9
B J-12	5	6	10	10	7	4	5	8	4	5	64	5
B J-13	4	8	10	10	3	2	3	9	4	2	55	12
B L-14	6	6	10	10	4	10	5	9	10	7	77	1
KR-15	5	6	9	9	1	4	1	10	9	10	64	5
S K-16	10	6	5	6	2	1	7	8	6	8	59	8
C J-17	1	8	9	9	4	3	8	3	1	1	47	15

Table 7. Exterior facing.

No.	water absorption	compressive strength	bending strength	Young's modulus	wear resistance	Shore hardness	sum.	grading
S B-1	20	18	12	20	5	7	82	2
K D-2	20	10	15	14	10	3	72	3
KD-3	18	10	12	6	4	4	54	11
KD-4	16	10	21	6	9	6	68	6
KD-5	20	2	15	12	5	2	56	8
BU-6	18	14	12	10	3	5	62	7
BU-7	6	10	18	12	6	3	55	9
DH-8	2	12	9	16	3	1	43	17
DH-9	16	6	3	12	1	8	46	16
DH-10	16	20	9	20	1	5	71	4
DG-11	10	2	15	10	3	10	50	13
B J-12	20	14	12	10	8	5	69	5
B J-13	20	6	6	6	9	2	49	14
B L-14	20	8	30	10	9	7	84	1
KR-15	18	2	12	2	10	10	54	11
S K-16	12	4	3	14	8	8	49	14
C J-17	18	8	9	16	3	1	55	9

적 평가와 유사하게 방림광산시료(BL-14), 성보광산시료(SB-1) 및 광덕광산시료(KD-2)등이 가장 우수한 순위를 보였다 (Table 7). 외장 바닥용의 경우에서 방림광산시료(BL-14), 굴암광산시료(KR-15), 광덕광산시료(KD-2) 및 성보광산시료(SB-1)등이 타광산시료들보다 더욱 큰 물성값을 보여준다 (Table 8). 내부 건축재 내벽용인 경우 (Table 9), 방림

광산시료(BL-14), 성보광산시료(SB-1), 봉정광산시료(BJ-12), 두항광산시료(DH-10) 및 백운광산시료(BU-6)등이 상대적으로 우수한 물성을, 내장 바닥용의 경우 (Table 10) 에는 방림광산시료(BL-14), 굴암광산시료(KR-15), 광덕광산시료(KD-2,4), 덕암광산시료(DG-11) 및 성보광산시료(SB-1)등이 타시료들보다 상대적으로 우수한 물성을 갖는 것으로 나타

Table 8. Floor covering(exterior).

No.	porosity	water absorption	compressive strength	bending strength	Young's modulus	impact strength index	wear resistance	Shore hardness	sum	grading
S B-1	20	20	18	12	10	15	15	21	131	4
K D-2	20	20	10	15	7	21	30	9	132	2
K D-3	16	18	10	12	3	21	12	12	104	10
K D-4	16	16	10	21	3	12	27	18	123	5
K D-5	20	20	2	15	6	9	15	6	93	14
B U-6	18	18	14	12	5	18	9	15	109	8
B U-7	16	6	10	18	6	24	18	9	107	9
DH-8	2	2	12	9	8	12	9	3	57	17
DH-9	16	16	6	3	6	18	3	24	92	15
DH-10	16	16	20	9	10	21	3	15	110	7
DG-11	8	10	2	15	5	24	9	30	103	11
B J-12	20	20	14	12	5	12	24	15	122	6
B J-13	20	20	6	6	3	12	27	6	100	13
B L-14	20	20	8	30	5	30	27	21	161	1
KR-15	18	18	2	12	1	27	30	30	138	2
S K-16	10	12	4	3	7	18	24	24	102	12
C J-17	18	18	8	9	8	3	9	3	76	16

Table 9. Interior facing.

No.	water absorption	compressive strength	bending strength	sum.	grading
S B-1	10	9	4	23	2
K D-2	10	5	5	20	5
K D-3	9	5	4	18	8
K D-4	8	5	7	20	5
K D-5	10	1	5	16	9
B U-6	9	7	4	20	5
B U-7	3	5	6	14	12
DH-8	1	6	3	10	16
DH-9	8	3	1	12	14
DH-10	8	10	3	21	3
DG-11	5	1	5	11	15
B J-12	10	7	4	21	3
B J-13	10	3	2	15	11
B L-14	10	4	10	24	1
KR-15	9	1	4	14	12
S K-16	6	2	1	9	17
C J-17	9	4	3	16	9

났다. 상술된 바와같이 대리석시료의 종합적 평가방법 및 용도별 평가결과 본 연구에서는 방림광산 시료(BL 14)가 가장 우수한 물성을 지니는 것으로 나타났으며 두항광산시료(DH)는 상대적으로 가장 저조한 물성을 지닌 것으로 나타났다.

결론

국내 10개 광산(충북의 성보광산, 광덕광산, 백운광산, 두항광산과 덕암광산, 강원도의 봉정광산, 방림광산, 굴암광산, 석곡광산과 전주광산)에서 생산되는 대리석 시료에 대한 암석학적 기재, 물리적 및 역학적 특성시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대리석의 주요 구성광물은 방해석 및 백운석등이며 시료에 따라서 감람석, 사문석, 투각섬석, 석영 및 불투명 광물등이 수반된다. 이들 시료들의 입자충진형태(조직)은 complete 및 sutured가 우세하다.
- 2) 시료의 층리에 대해 수평하중을 가했을 경우 수직하중을 가했을 때 보다 압축강도의 저하가 일어났고 특히 광덕광산의 시료(KD-4)의 경우 수직하중시 강도가 1020kg/cm², 수평하중시 448kg/cm²로 약 2배 정도의 강도저하가 나타났다. 쇼아경도는 수분으로 포화됐을 경우 건조상태의 경도치보다 최고 19정도의 쇼아경도의 저하가 발생하였다.
- 3) 물리적 특성간의 상관분석을 실시한 결과 흡수율과 공극율(0.58), 압축강도와 탄성계수(0.67), 충격강도지수와 로스엔체레스마모도(0.68)는 서로 상관성이 양호한 것으로 나타났다.

Table 10. Floor covering(interior).

No.	water absorption	compressive strength	bending strength	impact strength index	wear resistance	Shore hardness	sum.	grading
SB-1	10	9	8	15	15	21	78	6
KD-2	10	5	10	21	30	9	85	3
KD-3	9	5	8	21	12	12	67	10
KD-4	8	5	14	12	27	18	84	4
KD-5	10	1	10	9	15	6	51	15
BU-6	9	7	8	18	9	15	66	11
BU-7	3	5	12	24	18	9	71	9
DH-8	1	6	6	12	9	3	37	16
DH-9	8	3	2	18	3	24	58	14
DH-10	8	10	6	21	3	15	63	12
DG-11	5	1	10	24	9	30	77	5
B J-12	10	7	8	12	24	15	76	7
B J-13	10	3	4	12	27	6	62	13
B L-14	10	4	20	30	27	21	112	1
KR-15	9	1	8	27	30	30	105	2
SK-16	6	2	2	18	24	24	76	7
CJ-17	9	4	6	3	9	3	34	17

4) 분산분석에 의해 암석학적 자료와 물성간의 차이를 규명해 본 결과 석영이 함유된 시료의 경우 강도 및 탄성계수는 각각 $630\text{kg}/\text{cm}^2$ 과 $3.72 \times 10^6\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 석영이 없는 경우 $1148\text{kg}/\text{cm}^2$ 및 $5.58 \times 10^6\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 석영의 함유에 의해 이들 물성값은 증가했고 석영의 함유된 시료는 석영이 함유되지 않는 시료에 비해 마모도가 양호하였다. 조직의 종류에 따라서 강도 및 흡수율의 차이가 확인되었다.

5) 대리석을 전체적인 물성(입자크기, 비중, 공극율, 흡수율, 압축강도, 굴곡강도, 탄성계수, 마모도, 충격강도지수 및 쇼아경도등)에 의해 용도별로 분류한 결과 방림광산시료(BL-14), 성보광산시료(SB-1), 광덕광산시료(KD-2), 봉정광산시료(BJ-12)등이 우수한 물성을 보이는 시료로 나타났고, 두향광산시료(DH-8,9)는 상대적으로 물성이 저조한 것으로 나타났다. 이와같은 분류방법은 대리석에 대한 용도 기준의 설정이 확립되어 있지 않았을 경우 원광에 대한 기본적인 평가방법으로 제안될 수 있으며, 색상 및 문양에 대한 정량적 기재와 그들에 대한 수용자의 선호도 그리고 광산현장에서 균열대의 발달에 따른 가채가능 치수(부피) 문제등이 종합되어야 총체적인 석재의 평가가 가능할 것이다.

참고문헌

대한 광업진흥공사(1989) 석재자원 특성조사보고(제 1호), p. 1-254.

신병우, 현전기(1985) 국내석재자원에 관한 연구. 광산지질, 18권, p. 263-276.

이대성(1982) 석재: 한국의 지질과 광물자원(김옥준교수 정년퇴임기념). p. 425-427.

이정인, 이희근, 유창하, 양형식 (1982) 우리나라에 분포하는 주요암석류의 역학적 특성 연구(제 1보). 대한 광산학회, 19권, p. 260-267.

전효택, 전용원(1975) 함마그네슘대리석의 풍화작용에 관한 연구. 대한광산학회지, 12권, p. 128-134.

한국동력자원연구소(1988) 화강석류 석재자원 조사연구. p. 9-257.

한국동력자원연구소(1989) 석재자원 조사연구(3). p. 271-337.

한국동력자원연구소(1990) 석재자원 조사연구(4). p. 144-176.

한국자원공학회(1989) 석재산업의 현황과 전망. p. 1-112.

Amoroso, G. G. and Fassina, V.(1983) Stone decay and conservation atmospheric pollution, cleaning, con-

- solidation and protection. Elsevier, Amsterdam, p. 7-13.
- Attewell, P. B. and Farmer, I. W.(1976) Principles of engineering geology. Chapman and Hall Ltd., London, p. 285-304.
- Bell, F. G.(1983) Fundamentals of engineering geology. Butterworth and Co., London, p. 500-502.
- Bell, F. G. (1980) Engineering geology and geotechnics. Butterworth and Co., London, p. 220-221.
- Bieniawski, Z. T., Franklin, J. A. and Brown, E. T.(1981) Rock characterization testing and monitoring. Pergamon press, Oxford. p. 71-113.
- Bowles, O.(1958) Rock and stone in Engineering materials handbook. McGraw-Hill. p. 23-29.
- Bowles, O. (1939) The stone industries. McGraw-Hill Book Co., p. 23-228.
- Grauri, K. L., Hagerty, D. J. and Ullrich, C. R.(1972) Comparative physical properties of weathered impregnated and unimpregnated marble. Eng. Geol., v. 6, p. 235-250.
- Heidecker, E.(1968) Rock pressure induced by weathering and physicochemical processes. Inst. Min. Met., no. 226 part 1, p. 43-45.
- Hombostel, Q.(1968) Materials for architecture. Reinold, New York, N. Y., p. 492-498.
- Italian institute for foreign trade(1982) Italian marble technical guide. F. LLI VALLA RDI Editori, p. 18.
- Koroneos, E. G., Tassojanopoulos, A. and Diamantoulou, A.(1980) On the mechanical and physical properties of ten Hellenic marbles. Eng. Geol., v. 16, p. 263-290.
- Power, W. R.(1983) Construction materials in Industrial minerals and rocks(5nd ed.). S. J. Lefond, ed., American institute of mining, metallurgical and petroleum engineers, Inc., New York, p. 161-178.
- Price, C. A. and Ross, K. D.(1984) A technical appraisal of stone conservation tectnicques employed at Wells Cathedral. Monumentum, v. 27, p. 300-312.
- Schaffer, R. J. B. A. and B. Sc.(Oxon)(1972) The weathering of natural building stones. Department of scientific and industrial research, special report, no. 18, p. 26-105.
- Silverman, M. P. and Munoz, E. F.(1970) Fungal attack on rock, solubilization and altered infrared spectra. Nature, v. 169, p. 985-987.
- Winkler, E. M.(1975) Stone: properties, durability in man's environment(2nd ed.). Springer-Verlag, New York, p. 1-86.
- Winkler, E. M. (1966) Important agents of weathering for building and monumental stone. Eng. Geol., v. 1, p. 381-400.
- Winkler, E. M. and Wilhelm, E. J.(1970) Salt burst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere. Geological society of America bulletin. 81, p. 567-572.

1990년 10월 23일 원고접수

