

마천석재의 물리적 특성에 관한 연구

양해승, 김종인, 최한규¹⁾

A study of Physical Characteristic on Machun Building Stone

Hae-Seung Yang, Jong-in Kim and Han-gyu Choi

ABSTRACT. Samples examined in this study were acquired from Machun building stone, Dukwoo building stone in Kyungnam province. The aim of this study is to examine physical features of Machun rock from specific gravity, porosity, absorption, point load test, triaxial compressive test, Brazilian test, petrology test, and chemical analysis test.

Key words : building stone, specific gravity, porosity, absorption, point load test, triaxial compressive test

초 록. 본 연구논문에서는 우리나라 주요 석재인 마천석 원석을 경남 함양군 마천면 기흥리에 위치한 마천석재, 덕우석재를 방문하여 원석과 판석을 색상, 조직, 구성광물, 입도의 차이에 따라 마천석 원석 17개를 채취하였다. 본 현장에서 채취한 시료에 대한 비중, 공극율, 흡수율, Point Load Test, 삼축압축시험, Brazilian Test, 암석학적 시험 및 분석, 화학적 시험 및 분석을 통해 마천석 원석의 물리적 특성을 규명하여 석재의 용도에 따른 타당성을 파악하는데 목적이 있다.

핵심어 : 석재, 비중, 공극율, 흡수율, point load test, 삼축압축시험, 압열인장시험

1. 서 론

석재란 건물 장식재, 석공예재 등의 용도에 따라서 경도, 강도, 사용 가능성, 광택성, 장식적 특성 등의 일정한 성질을 갖는 암석으로서 건축재료는 주거용 건물, 비주거용 건물, 종교용 건축물의 외면, 내면, 외부바닥, 내부바닥 등에 blocks, slabs, panels, tiles, chips, powder 등의 형태로 사용되고 있다. 석공예재료로서는 기념물, 가구, 조각상, 주문 공예품, 창턱, 안장, 계단석, 기둥석 등으로 사용된다.

우리나라 석재 산업의 초기수출 형태는 주로 원석상태로 소량수출 되었다. 1980년대에 들어서면서 그 동안에 축적된 가공기술로 일본의 전통문화와 생활양식에 부합되는 묘석, 석등, 석탑 등 고가의 석가공품이 수출의 주종을 이루면서 급성장되어 왔다. 또한, 수출시장과 함께 국내시장도 국민소득 수준이 높아지면서 건축물의 대형화 및 고급화 추세에 따라 석재의 수요가 급격히 증가하였다. 이에 따라 원석 수요의 부족 현상을 초래하였고, 동 기

간중 석재개발 허가가 급증하여 자연환경을 훼손하는 부작용이 발생되기도 하였으나 이로 인해 석재산업이 유망업종으로 부각되기 시작하였다. 그러나, 이러한 우리나라의 석재산업이 괄목할만한 발전을 하고 있는 것과는 달리 아직도 몇 개의 대기업을 제외하고는 대부분의 석재 업체들이 영세한 실정에 있어 앞으로 낙후된 기술을 발전시키고 최근에 둔화되고 있는 수출경쟁력을 강화하기 위해서는 업체자체의 노력과 함께 정부의 육성대책을 필요로 하고 있다. 이에 본 연구에서는 마천석 원석의 물리적 특성을 규명하여 석재 용도에 따른 타당성을 규명하는데 그 목적이 있다.

2. 연구지역의 지질개요

본 연구지역인 경상남도 함양군은 경상분지 남부에 위치하여 약 80%가 중생대 후기에 육성층으로 퇴적된 경상계의 지층으로 덮여 있다. 경상계는 하부의 낙동통과 상부의 신라통으로 구분된다. 낙동통은 세일, 사암, 역암 등으로 이루어졌으며 진주에서 산청을 거쳐 함천까지 북북동 방향으로 길게 뻗어 있다. 신라통은 이암, 사암, 역암, 분암, 응

1) 조선대학교 자원공학과
접수일 : 2004년 5월 12일

회암, 반력암 등으로 이루어져 있으며 낙동통 동쪽의 대부분을 덮고 있다. 서쪽의 지리산 일대에는 지리산 편마암복합체의 변성암류와 함께 화강암이 분포하며, 이 밖에 중생대 말에 관입한 불국사 화강암이 곳곳에 소규모로 드러나 있어 건축재, 비석재 등으로 쓰인다. 남부 해안지방은 주로 응회암, 화강암, 석영반암 등으로 되어 있다.

Fig. 1은 본 연구지역인 함양에 대한 지질도이다.



Fig. 1. Geological map of the study area (Machun)

3. 석재의 특성

3.1 마천석

본 연구를 위해 경남 함양군 마천면 기흥리에 위치한 마천석재와 덕우석재를 방문하여 원석과 판석을 색상, 구성광물 입도의 차이에 따라 9개의 시료를 채취하였다.

마천석 원석의 주 구성광물은 중립 내지 조립질의 사장석, 흑운모, 휘석으로서 암회 흑색 바탕에 흑운모가 부분적으로 줄기 형태 또는 반상질 조직을 보여주는 반력암으로 균일한 조직과 색상, 검은색의 무게감 그리고 가공이 용이하여 경제적이며, 또한 광택이 우수하고 색상변질이 다른 암석에 비해 나타나지 않아 고급 내·외장 재료로 널리 쓰

기에 좋다.

4. 실험기기 및 방법

4.1 비중, 흡수율, 공극율 시험

본 실험에서 비중을 측정하는데 사용된 기기는 METTLER TOLEDO 사의 AG Balance를 사용하였다(Fig. 2). 자세한 사양은 다음과 같다(Table 1).

Table 1. Specification of the balance

Measurement accur. (g/cm^3)	0.001
Measurement range (g/cm^3)	0.1~30
Sample mass(g)	1~50
Sample volume (ml)	30~60
Temperature range($^{\circ}\text{C}$)	10~30
Typical measurement time(s)	<60



Fig. 2. Photography of AG balance

4.2 점하중 시험(Point load test)

점하중시험에 사용된 기기는 미국 ENERPAC사의 Model No : P-80, 최대하중 10,000psi인 핸드펌프(hand pump)와 Model No : RC-254, 용량 25ton의 실린더 및 20ton의 하중을 견딜수 있는 frame으로 제작된 시험기를 사용하였다(Fig. 3).

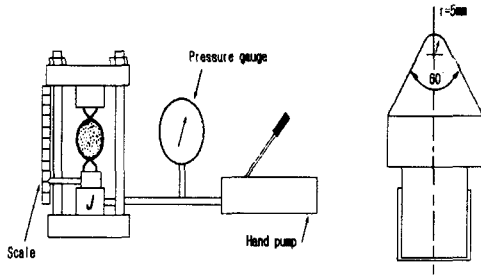


Fig. 3. Apparatus for point load test

4.3 삼축압축시험

삼축압축시험은 암석의 역학적 특성을 명백히 하기 위한 기본적인 시험이며 삼축압축응력의 응력-변형률관계나 강도 정수로서 겉보기 점착력(c) 및 내부마찰각(ϕ)을 구하기 위해 실시된다. 압축시험기는 영점조정과 하중속도의 조절이 가능한 Server controller system이 부착된 국내산 Model No : HST-100T, 용량 100ton의 시험기를 이용하였고(Fig. 5), 하중속도는 5kgf/cm²/sec로 가압하였다. 구속압은 유압 pump를 사용하여 재하하였으며, 구속압 50, 100, 150(kgf/cm²)일 때, 각각의 삼축압축강도를 측정하였다. Fig. 4는 삼축압축셀의 모식도를 나타낸다.

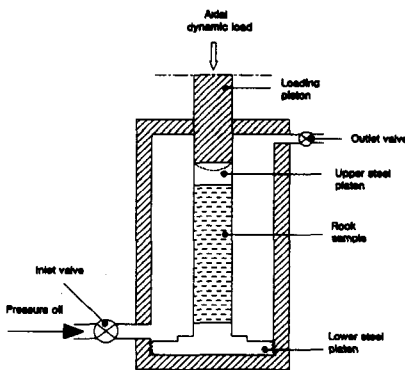


Fig. 4. Schematic diagram of triaxial confining pressure cell system

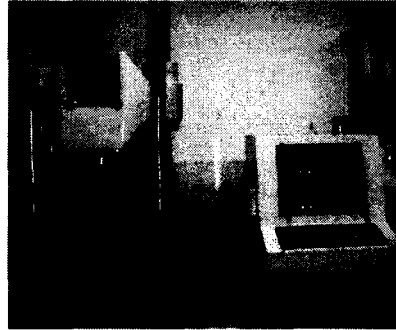


Fig. 5. Photograph of system for compressive test

4.4 압열인장시험(Brazilian test)

직접 인장시험은 시료의 제작이 까다롭기 때문에 암석의 인장강도를 구하는데 있어서 시료의 제작 및 하중의 재하 방법이 직접 인장시험에 비해서 용이한 압열인장시험을 실시하였다.

본 시험에 사용된 장치는 Fig. 6과 같다.

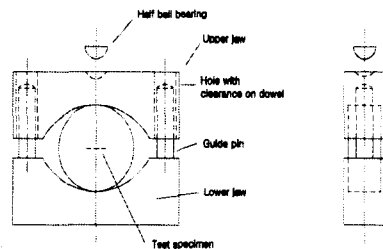


Fig. 6. Apparatus for Brazilian test

4.5 암석학적 시험

마천석 원석 시료 17개 시료에 대해 제작된 박편(0.03mm두께)에 대하여Polarizing Microscope(Fig. 7)을 사용하여 50배에서 125배의 배율로 각각 Open nicol과 Cross nicol 하에서 구성 광물의 종류 및 조직을 조사하였으며, 모드 분석(Modal Analysis)을 실시하였다. 또한 색상, 구조 등을 육안 관찰하였으며, 모드분석 결과를 이용하여 석재 시료의 정확한 암석명을 규명하였다.

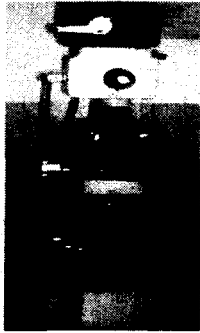


Fig. 7. Polarizing microscope

4.6 화학적 시험

제작된 표준시료 glass bead를 이용하여 standard값을 측정하고, 측정된 값을 이용하여 Calibration을 Matrix correction을 통해 실시하였으며, 이를 이용해 검정곡선을 그린 후 check sample을 이용하여 Alpha 보정값을 측정한 후 분석 시료에 대한 분석을 실시 하였다.

5. 석재에 대한 실험 및 결과

5.1 비중

시험횟수는 각 Grade당 5회를 실시하여 평균 처리하였으며, 실험절차는 국제암반역학회 표준시험 규정(Suggested Methods of ISRM, International Society for Rock Mechanics), 미국표준시험법 (ASTM, American Standards for Testing and Material)에 준하였다. 시료의 비중 측정은 METTLER TOLEDO 사의 MANUAL을 참고하였다. 본 시험을 위해 마천석 17개의 시료에 대한 시험을 통해 비중을 측정하였다.

시험결과 마천석 원석의 비중은 2.777~2.870(평균 : 2.827)로 나타났다. 시험결과를 Table 2에 정리하였다.

5.2 흡수율

본 시험을 위해 마천석 17개의 시료에 대한 시험을 통해 흡수율을 측정하였다.

마천석 원석의 흡수율은 0.183%~0.300%(평균 : 0.203%)이며, 흡수율 측정실험결과를 Table 3에 정리하였다.

5.3 공극율

본 시험을 위해 마천석 17개의 시료에 대한 시험을 통해 공극율을 측정하였다.

마천석 원석의 마천석 원석의 공극율은 0.300%~0.700%(평균 : 0.534%)이며, 공극율 측정실험결과를 Table 4에 정리하였다.

5.4 Point Load Test

본 시험을 위해 마천석 17개의 시료에 대한 시험을 통해 일축압축강도를 측정하였다.

시험결과 마천석 원석의 일축압축강도는 $1,200\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 1,740\text{kg}/\text{cm}^2$ (평균 : $1,444\text{kg}/\text{cm}^2$)으로 측정되었으며, 마천석은 경암에 속한다는 것을 알 수 있다.

Table 5에 마천석 원석의 일축압축시험결과를 나타냈다.

5.5 삼축압축강도

삼축압축시험 Chamber 내의 봉압력은 50, 150, 200 kgf/cm^2 를 사용하였으며, 기타조건은 ISRM 기준에 준하였다. 마천석 원석의 삼축압축시험을 하였으며, 점착력은 234.56, 271.85, 234.11, 284.90, Internal fric. angle은 50.36, 50.13, 50.23, 51.00 으로 나타났다.

Hoek & Brown Failure envelope에 의한 상수 m 과 s 의 변화를 살펴보면, m 값은 10.08, 9.44, 10.38, 10.08 s 값은 1 으로 나타났다.

삼축압축시험의 시험결과를 Table 6, Table 7에 각각 나타냈다. Fig. 8 ~ Fig. 11은 Hoek-Brown, Mohr-Coulomb 파괴조건을 도시한 Diagram이다.

Table 2. Specific gravity of Machun rock

Specimen ID.	Specific gravity	Remark
1-1	2.855	Machun
1-2	2.820	
1-3	2.836	
2-1	2.787	
2-2	2.803	
2-3	2.792	
3-1	2.856	
3-2	2.813	
3-3	2.837	
4-1	2.777	
4-2	2.810	
5-1	2.795	
5-2	2.824	
6-1	2.836	
6-2	2.849	
7-1	2.854	
7-2	2.841	
8-1	2.777	
8-2	2.860	
9-1	2.808	
9-2	2.826	
10-1	2.834	
10-2	2.810	
11-1	2.797	
11-2	2.805	
12-1	2.845	
12-2	2.853	
13-1	2.835	
13-2	2.870	
14-1	2.813	
14-2	2.835	
15-1	2.829	
15-2	2.853	
16-1	2.846	
16-2	2.817	
17-1	2.868	
17-2	2.841	
Average	2.827	

Table 3. Absorption rate of Machun rock

Specimen ID.	Absorption(%)	Remark
1-1	0.189	Machun
1-2	0.243	
1-3	0.261	
2-1	0.216	
2-2	0.198	
2-3	0.243	
3-1	0.185	
3-2	0.210	
3-3	0.234	
4-1	0.200	
4-2	0.215	
5-1	0.191	
5-2	0.217	
6-1	0.276	
6-2	0.264	
7-1	0.300	
7-2	0.234	
8-1	0.264	
8-2	0.263	
9-1	0.204	
9-2	0.225	
10-1	0.275	
10-2	0.234	
11-1	0.287	
11-2	0.263	
12-1	0.252	
12-2	0.245	
13-1	0.265	
13-2	0.278	
14-1	0.286	
14-2	0.275	
15-1	0.229	
15-2	0.217	
16-1	0.226	
16-2	0.195	
17-1	0.183	
17-2	0.240	
Average	0.203	

Table 4. Porosity of Machun rock

Specimen ID.	Porosity(%)	Remark
1-1	0.686	Machun
1-2	0.514	
1-3	0.418	
2-1	0.564	
2-2	0.613	
2-3	0.581	
3-1	0.615	
3-2	0.496	
3-3	0.553	
4-1	0.570	
4-2	0.536	
5-1	0.353	
5-2	0.410	
6-1	0.506	
6-2	0.390	
7-1	0.462	
7-2	0.574	
8-1	0.612	
8-2	0.464	
9-1	0.488	
9-2	0.453	
10-1	0.512	
10-2	0.585	
11-1	0.356	
11-2	0.597	
12-1	0.673	
12-2	0.615	
13-1	0.300	
13-2	0.453	
14-1	0.318	
14-2	0.378	
15-1	0.649	
15-2	0.610	
16-1	0.700	
16-2	0.671	
17-1	0.524	
17-2	0.573	
Average	0.517	

Table 5. Uniaxial compressive strength

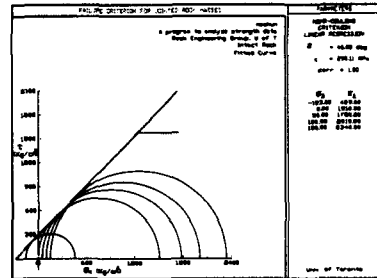
Specimen ID.	Compressive strength (kg/cm ²)	Remark
1-1	1.430	Machun
1-2	1.310	
1-3	1.270	
2-1	1.510	
2-2	1.410	
2-3	1.460	
3-1	1.740	
3-2	1.450	
3-3	1.570	
4-1	1.340	
4-2	1.380	
5-1	1.740	
5-2	1.690	
6-1	1.670	
6-2	1.370	
7-1	1.400	
7-2	1.350	
8-1	1.310	
8-2	1.280	
9-1	1.510	
9-2	1.570	
10-1	1.440	
10-2	1.410	
11-1	1.250	
11-2	1.200	
12-1	1.310	
12-2	1.420	
13-1	1.240	
13-2	1.420	
14-1	1.470	
14-2	1.520	
15-1	1.310	
15-2	1.450	
16-1	1.430	
16-2	1.390	
17-1	1.520	
17-2	1.450	
Average	1.484	

Table 6. Triaxial compressive strength

Specimen ID.	Triaxial compressive test	
	Con. Press. (kgf/cm ²)	Max. Stress (kgf/cm ²)
2-1-1	50	1,780
2-1-2	100	2,010
2-1-3	150	2,340
3-1-1	50	1,950
3-1-2	100	2,210
3-1-3	150	2,500
4-1-1	50	1,670
4-1-2	100	2,050
4-1-3	150	2,430
5-1-1	50	2,060
5-1-2	100	2,390
5-1-3	150	2,710

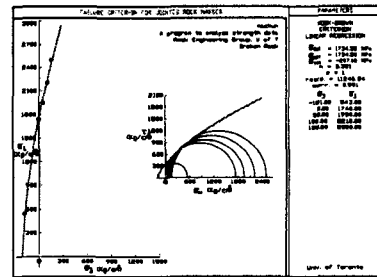
Table 7. Analysis of result obtained from uniaxial and triaxial compressive tests and Brazilian test

Heok-Brown failure criterion				Mohr-Coulomb failure criterion		
m	s	σ_c (kgf/cm ²)	γ^2	c (kgf/cm ²)	Ψ ($^\circ$)	γ^2
10.08	1	1516.23	0.993	234.56	50.36	0.974
9.44	1	1715.63	0.996	271.85	50.13	0.974
10.38	1	1507.8	0.943	234.11	50.23	0.999
10.08	1	1839.44	0.983	284.90	51.00	0.992

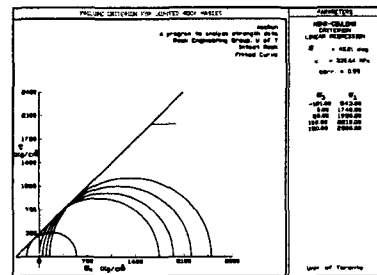


(b) Mohr-Coulomb failure envelope

Fig. 8. Estimation of cohesion(c) and friction angle(Ψ) from failure envelope for sample 2-1

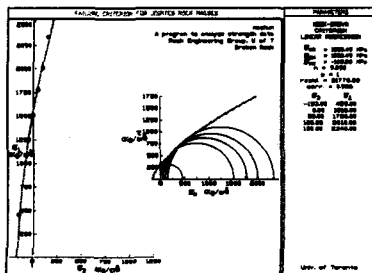


(a) Heok-Brown failure envelope

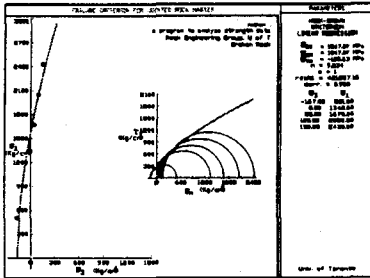


(b) Mohr-Coulomb failure envelope

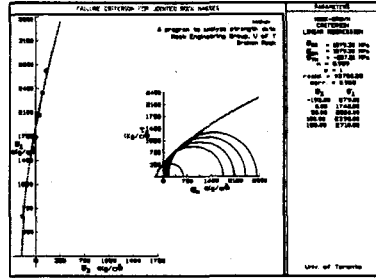
Fig. 9. Estimation of cohesion(c) and friction angle(Ψ) from failure envelope for sample 3-1



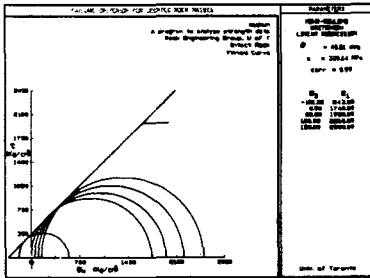
(a) Heok-Brown failure envelope



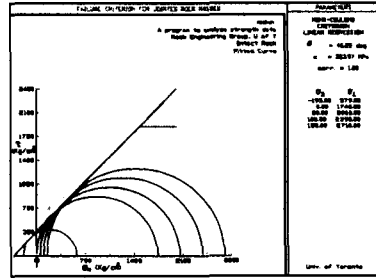
(a) Heok-Brown failure envelope



(a) Heok-Brown failure envelope



(b) Mohr-Coulomb failure envelope



(b) Mohr-Coulomb failure envelope

Fig. 10. Estimation of cohesion(c) and friction angle(Ψ) from failure envelope for sample 4-1

Fig. 11. Estimation of cohesion(c) and friction angle(Ψ) from failure envelope for sample 5-1

5.6 압열인장강도

압열인장시험은 간접인장시험 또는 브라질리안 (Brazilian) 시험이라고 한다. 얇은 원판시험편에 직경 방향으로 점 접촉 집중하중을 가하였을 때 하중과 응력조건을 고려하여 인장강도를 구한다 (Overt and Duvall, 1967).

마천석 17개에 대한 압열인장시험을 실시하였으며, 그 결과 143~193kgf/cm² (평균: 158kgf/cm²)으로 측정되었다. 인장강도 시험편의 제작은 두께와 직경의 비가 1:2로 동일하게 하였으며, 측정결과는 Table 8 에 정리하였다.

Table 8. Results of Brazilian tensile strength in Machun rock samples

Specimen ID.	Strength (kgf/cm ²)	Specimen ID.	Strength (kgf/cm ²)
1-1	162	10-1	151
2-1	153	11-1	146
3-1	181	12-1	150
4-1	167	13-1	143
5-1	193	14-1	152
6-1	158	15-1	147
7-1	160	16-1	145
8-1	155	17-1	167
9-1	163	Average	158

5.7 암석학적 시험 및 분석

마천석원석 석재의 주 구성광물에 대한 모드 (Modal) 분석 결과 함량비를 보면 마천석 원석의 사장석, 휘석 흑운모의 평균 광물 조성은 각각 67.4%, 14.6%, 7.3%로 분석되었다.

다음 Fig. 12에 마천석 원석17개 시료에 대한 모드 분석 결과를 나타냈다.

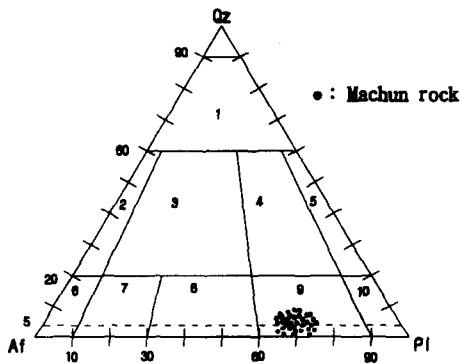


Fig. 12 Ternary plot of modal composition in the Machun rock samples

주) Qz:Quartz Af : Alkali felspar Pl:Plagioclass

- 1 : quartz rich granitoids
- 2 : alkali feldspar granite
- 3 : granite 4 : granodiorite 5 : tonalite
- 6 : alkali geldspar quartz syenite
- 7,8 : quartz syenite, monzonite
- 9 : quartz monzodiorite (gabbro)
- 10 : quartz diorite (gabbro)

5.8 화학적 시험 및 분석

분석조건은 Spectrum : Ka, Diaphragm : 30mm, PHA : 100-300, Attenuator : 1/1, Spin : On, kV-mA : 50-50, Slit : Coarse, Atomsphere : Vac, Crystal : LIF1, TAP, GE, PET 이다. 화학분석은 X-선 형광분석기(X-RAY fluorescence spectrometer : XRF)로 분석하였으며, 일본 Rigaku社의 RIX-2000 이 사용되었다.

마천석 원석에 대한 $Fe_2O_3 + FeO$ 의 평균값은 3.05 wt(%)로 분석 되었으며, 이는 마천석

원석의 불투명 광물중 자철광, 티탄철광 등의 Fe 함량이 높음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구는 경상남도 함양군의 주요 석재인 마천석을 대상으로 Point Load Test, 삼축압축시험, 비중, 흡수율, 공극률, Brazilian Test, 암석학적 시험, 화학분석시험을 실시하여 이들 석재에 대한 암석역학적 특성을 규명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 암석학적시험 결과, 현장에서 채취한 마천석은 전형적인 반려암으로 나타났으며, modal 분석 결과 주 구성광물은 사장석, 흑운모, 휘석 등이며, 부성분 광물은 각섬석, 불투명 광물, 인회석 등이고 소량-미량의 석영, K-장석, 스펀, 견운모, 녹리석, 점토 광물류 등이 수반된다.
2. 비중시험 결과, 마천석 원석에 대한 평균 비중은 2.83이다. 암석의 비중은 온도, 압력에 의해 또는 풍화 변질정도에 영향을 받는다고 할 수 있는데 반려암의 비중은 다른 암석의 비중보다 높게 나타남을 알 수 있다.
3. 흡수율시험 결과, 마천석 원석에 대한 평균 흡수율은 0.203%, 공극률 시험 결과, 마천석 원석에 대한 평균 공극률은 0.534%로 측정되었으며, 이는 마천석 원석의 입자간의 조직이 치밀하여 미세한 기공들이 원석 시료에 존재하지 않은 것으로 사료된다.
4. 압축강도시험 결과, 마천석 원석의 평균 압축강도는 $1,444 \text{ Kg/cm}^2$ 으로 측정되었으며, 이는 흡수율과 공극률이 낮은 값을 보인 마천석 원석의 입자간의 치밀한 조직이 압축강도에 영향을 미친다는 것을 본 연구를 통해 얻을 수 있었다.

5. 화학적분석시험 결과, 마천석 원석에 대한 $Fe_2O_3 + FeO$ 의 평균 값은 3.05 wt(%)으로 분석 되었으며, 이는 마천석 원석 불투명 광물중 자철광, 티탄철광 등의 Fe 함량이 높음을 알 수 있었으며, 지각의 평균 Fe 함량 4.6 wt(%)와 비교할 때 1.55 wt(%) 정도 낮게 나타나 비교적 우수한 석재품으로 평가될 수 있을 것으로 판단된다.
6. 본 연구에 사용된 마천석의 채취된 시료를 통한 암석역학적 연구 결과, 사장석, 휘석, 흑운모가 주성분을 이루는 전형적인 반려암으로 판단되며, 암석조직이 치밀하고 미세한 기공들이 육안으로 식별이 불가능하여 흡수율, 공극률, 압축강도 등의 실험의 좋은 결과를 나타냈다.
7. 본 석재 원석의 암석역학적 실험 및 화학적 실험 결과, 강도특성이 우수하며, 연마면이 아름다운 계단 등 내부바닥재나 내부건축구조재로 사용시 매우 우수한 품질을 지닌 석재로 보인다. 반면 불투명 광물의 함량이 비교적 많아 골재나, 공예, 조각품의 용도에는 적합지 않을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ISRM(International Society for Rock Mechanics), Rock characterization testing and monitoring : ISRM Suggested method(ed. rown E. T.), Pergamon Press, 1981
2. 이수곤, 이송, 점하중강도(Point Load Test)를 이용한 일축압축강도 추정방법, 대한토목학회, Vol. 15, NO. 4, pp. 1015-1027, 1995.
3. Kahraman S., Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci., pp. 981-994, 2001.
4. Einstein H. H., and Dershowitz W. S., Tensile and shear fracturing in predominantly compressive stress fields-A review, Eng. Geol., 29, pp. 149-172, 1990.
5. Broch E. and Franklin J. A., The point-load strength test, Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomechanics Abstracts, Vol. 9, pp 669-697, 1972.
6. Hudson J. A., Harrison J. P., Engineering Rock Mechanics, An Introduction to the Principles, Pergamon, pp. 110-111, 1997.