

갱내 대리석 채석을 위한 체인쏘머신 적용 사례연구

주재열, 이광표, 김재동*

Case Study on the Application of Chain Saw Machine for the Underground Marble Quarrying

Jaeyeol Ju, Kwangpyo Lee, Jaedong Kim*

Abstract The purpose of this research was to find an optimal quarrying for marble by analyzing the applicability and the work efficiency of a chain saw machine newly introduced in the underground Baekwoon mine. From the test results of the physical properties of Baekwoon marble, which affects the efficiency of rock cutting, it was found to have similar physical characteristics as the ones which are now being produced in the other areas in Korea. And especially it shows isotropic property, which can be thought to be advantageous as a dimensional stone. To check the long-term quality of the marble as a stone material, several tests such as corrosion resistance test and abrasion test were carried out. It was found to be vulnerable to acid rain with decrease of weight and seismic wave velocity after applying artificial rain at pH 5.6 for 50 times. The percentage of wear from abrasion test was 22.67%. The working time and cutting speed of the chain saw machine were recorded and analyzed during the test-run at the quarry. The overall work cycle was assorted into 9 unit operations and the operating time per each unit was drawn. The operating times for the two cutting patterns, which could be possibly applicable to the work site, were compared. The results indicated that the pattern B, that the cutting sequence was set to minimize the movement of the machine, showed 6% less working hours than the pattern A, which first cuts the outer boundary. With cutting pattern analysis, the ore body in the Baekwoon mine was 3 dimensionally modeled and a quarrying plan considering the existing conditions of the marble was suggested.

Key words Chain saw machine, Marble, Quarrying plan, 3D Modelling

초 록 본 연구는 백운광산지역에 부존하는 대리석을 효율적으로 채석하고자 새로이 도입한 체인쏘머신(chain saw machine)의 적용성과 작업 효율을 분석함으로써 최적의 채석 방안을 도출하고자 하였다. 절단 효율에 큰 영향을 미치는 채석대상암석의 물리적 특성을 파악한 결과, 국내 타 지역에서 산출되는 대리석의 물성과 유사한 수준을 보이고 있으며 등방적 성질을 지니고 있어 산업용 석재로서 유리한 것으로 나타났다. 부존 대리석이 석재로서 가지는 중장기 품질을 확인하기 위해 내부식성, 마모율 등의 시험을 수행한 결과, pH 5.6의 인공강우를 50회 적용한 이후부터 시험편의 무게와 탄성파속도가 감소하였으며 마모율은 22.67%로 나타났다. 채석장 현장에서 시험운행 중인 체인쏘머신의 작업별 소요시간과 절단속도를 분석하여 단위작업을 9가지로 분류하였고 각 단위작업별 소요시간을 도출하였다. 이를 토대로 현장에 실제 적용 가능한 2가지 작업패턴에 대한 작업소요 시간을 비교한 결과 장비 본체이동을 최소화하여 절단순서를 결정한 패턴 B가 원석의 외곽면을 우선 절단하도록 절단순서를 결정한 패턴 A보다 약 6%의 작업시간 단축을 나타내었다. 절단패턴 분석과 함께 백운광산의 광체를 3차원으로 모델링하고 대상암석의 부존조건을 고려한 채석 계획안을 제시하였다.

핵심어 체인쏘머신, 대리석, 채석계획, 3차원 모델링

Received: May. 14, 2013

Revised: Jun. 10, 2013

Accepted: Jun. 12, 2013

***Corresponding Author:** Jaedong Kim

Tel) +82332506256, Fax) +82332525550

E-Mail) jdkim@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resource Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondahak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

1. 서 론

국민소득수준이 높아지면서 현대 건축물들의 조형미와 내구성에 대한 요구 수준 또한 상향되고 있는 추세에 있다. 따라서 사용되는 건축 재료 또한 고급화 다양

화되어 가고 있으며, 그 중 석재자원으로서 대리석은 장중한 멋이 있어 호텔이나 백화점, 주거 공간뿐만 아니라 전자제품 및 가구에 이르기 까지 그 쓰임이 점차 확대되고 있다. 이에 산업자원으로서 대리석에 대한 연구와 개발은 최근 들어 세계적으로 여러 부문에서 점차 그 중요성이 더해가고 있다(Lee et al., 2006).

건자재로 사용되는 석재는 채석과정에서 원석이 파괴되거나 손상되는 부분을 최소한으로 해야 하기 때문에 발파 등을 이용하는 여타 광물자원과는 다른 개발방법을 적용할 필요가 있다. 특히 대리석은 미세한 내재 균열이 발파 과정에서 활성화될 경우 상품성에 큰 영향을 미치므로 보다 체계적이고 정교한 채석기술이 요구된다.

기존의 석재 채석방법들은 대부분 노천채석에 적합한 방법으로, 견고한 암석에는 연속 천공 절단법 및 제트버너 절단법 등을 적용하고, 연약한 암석은 워터제트 절단법 등을 채택하여 개발한다(Kim, 1996). 하지만 최근 석재를 포함한 광산 개발 중 비산, 진동, 소음 등의 유해 환경요소와 산림 경관 훼손 등과 같은 문제점이 지속적으로 제기되면서 갱내 개발로의 전환이 시도되고 있으나(Lee et al., 2012), 자유면의 한계와 작업공간의 협소함 등 갱내 채석에 많은 어려움이 존재하여 갱내채석장에 적합한 채석기술이 더욱 절실한 실정이다.

국외의 경우 갱내채석장에 체인쏘머신이 적용되면서 와이어쏘와 비교하여 원석의 손실률이 낮아지고 새로운 막장면 확보를 위한 준비시간이 감소하는 등 고품질 석재 생산을 위한 전체적인 능률향상을 가져온 것으로 알려져 있다(Copur et al., 2006). 체인쏘머신에 관한 국외 연구 사례로는 터키의 Copur(2010)가 톱날의 간격과 각도에 따른 절삭능력 변화와 절삭도구의 마모율에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Copur et al.(2011)은 장비의 중량과 톱날의 절단 깊이, 대상 암석의 일축압축강도를 이용하여 절삭속도를 예측하는 지수를 제안한 바 있다. 하지만 체인쏘머신을 실제 현장에 효율적으로 적용하기 위해 수행된 연구는 미미한 실정이다.

본 연구는 연구대상지역인 (주)GMC의 백운광산에서 고품위 석회석을 개발·생산하던 중 지표로부터 약 200 m 심부인 석회석 채석지역 하부에서 대리석이 발견되어 이를 효율적으로 채석하고자 최근 이탈리아에서 연구 개발된 체인쏘머신(chain saw machine)을 도입하여 장비의 적용성과 작업 효율을 분석함으로써 효율적이고도 경제적인 채석 방안을 도출하여 장비를 적극 활용하기 위한 목적으로 수행되었다.

체인쏘머신을 이용한 채석방법은 대상암반의 물리적 특성과 절리군의 개수·방향성 등의 지질학적 특성에 따라 절단 효율에서 현저한 차이가 발생(Copur et al.,

2011)하기 때문에 단순히 장비의 개략적인 절단 성능에 의거하여 현장에 적용하는 것은 문제가 발생할 위험이 따른다. 따라서 본 연구에서는 대리석의 기본적인 물리적 성질들과 함께 석재로서의 중장기 품질에 영향을 미치는 내열성, 내부식성, 마모율 등의 시험을 함께 수행하여 부존 대리석의 석재로서의 특성을 파악하고자 하였다. 이와 함께 대리석 채석 예정 지역에 대한 지질구조, 특히 부존하는 절리에 대한 절리구조 조사를 수행하였다.

체인쏘머신의 현장 적용성을 파악하기 위해서는 채석장 현장에서의 절단 작업 효율에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 시험 절단작업 현장에서 작업 단위 별로 소요되는 시간을 측정하여 최종적으로 원석의 절단 및 채석에 필요한 시간 분석을 수행하였다. 이를 기반으로 실제 적용 가능한 두 가지의 절단 패턴을 상정하여 최적의 절단 작업 패턴을 도출하고자 하였다.

현재 백운대리석의 부존량이나 광체의 경계 등에 대한 정밀한 탐사가 완료된 단계는 아니어서 대리석 광체에 대한 3차원 모델이나 개발계획을 구체적으로 제시하기는 어려웠으나 지금까지의 자료를 토대로 대리석 채석을 위한 개략적인 채석 계획을 제시하고자 하였다. 앞으로 시험채석 단계를 거쳐 생산이 진행됨에 따라 추가의 시추탐사와 절리구조 조사 등을 수행하여 그 결과를 채석계획의 수립에 활용한다면 효율적이고 경제적인 대리석 개발이 될 것으로 기대한다.

2. 연구대상지역

2.1 광산 위치 및 개요

연구대상지역은 행정구역상으로 강원도 삼척시 하장면 둔전리에 위치한 (주)GMC 백운광산으로, 북서쪽으로는 정선군이 위치해 있고 남쪽으로는 태백시가 위치해 있다. 본 광산은 CaO 54.8% 이상의 고품위, 백색도 92% 이상의 고품질 석회석을 연 150만 톤 이상 생산하고 있으며 백색도가 낮은 석회석은 CaO 함유량이 높아 탈황용, 제강용 등으로 제철소와 발전소 등에 공급하고 갱내 파쇄 시설과 최첨단 선별기를 이용한 친환경 선광 시설을 보유하고 있는 광산이다.

본 광산은 주방식채광법(room and pillar mining method)을 적용하고 있고 채굴적의 단면은 높이 7 m, 폭 13 m의 대단면 석회석 광산이다. 전체 갱도는 1단, 2단, 3단, 5단, 6단 등 총 5개의 단이 채굴된 상태이고, 하부 6단 갱도 북쪽에서 대리석이 발견되어 이를 채석할 목적으로 체인쏘머신을 도입하였다.

2.2 지질 및 채광현황

백운광산 지역의 지질은 Fig. 1과 같이 고생대 캄브로-오르도비스기 조선누층군의 풍촌층, 화절층, 동점층, 두무동층, 막동층 및 이들을 후기에 관입한 오르도비스기, 캄브리아기의 암맥류 등으로 구성된다. 우리나라에서 산출되는 고품위 석회석은 주로 고생대 초기의 조선누층군에서 산출되는데, 조선누층군은 한반도에 분포하는 하부 고생대 지층으로 캄브리아기-오르도비스기 동

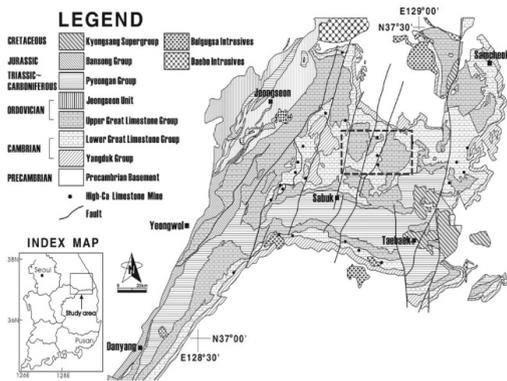


Fig. 1. Geological map around the Baekwoon mine area (Noh and Oh, 2005)

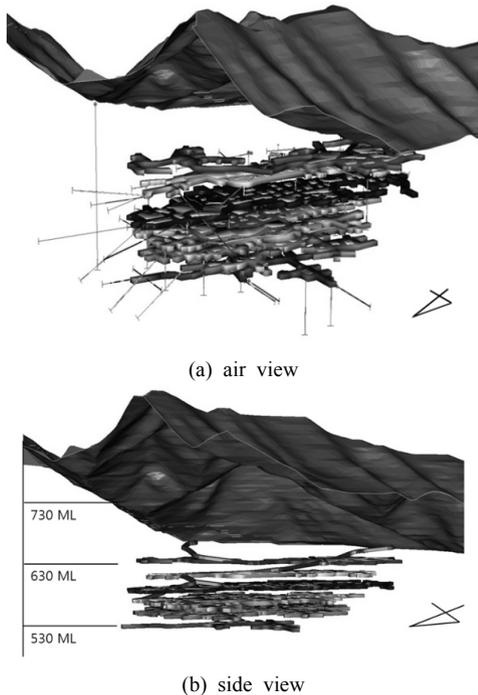


Fig. 2. 3D model of the study area

안에 퇴적된 지층을 통칭하는 석회암 위주의 지층이다.

국내에 산출되는 대리석류 자원은 지체구조별로 한반도 남부에서 북동향으로 발달하는 경기육괴, 옥천대와 영남육괴 내에 분포한다. 시대미상암류인 옥천층군은 국내 대리석 석재의 주요 분포지이며, 조선누층군은 캄브리아기의 풍촌석회암, 오르도비스기의 정선석회암 등이 해당되며 옥천층군의 대리석 산지와 함께 국내 대리석 석재의 주요 산출지이다(Yoon et al., 2003).

광산의 지표지형, 기존의 석회석 갱내 현황을 정확하게 파악하고자 연구대상지역의 지표지형과 굴착된 시추공 73공, 기존 석회석 채굴 갱도 등을 Fig. 2와 같이 모델링하였다(Son and Kim, 2012). 모델링에 사용된 software는 GEOVIA社의 GEMS이며 입력자료는 지표지형도면 1장, 시추공 자료 73공(수직: 37, 경사: 13, 수평: 23, 총 길이: 8,370.4 m), 기존 석회석 채굴 갱도 2차원 CAD도면 5장이다.

2.3 부존 대리석의 물리/화학적 특성

체인쏘머신의 절단속도는 대상 암석의 일축압축강도, 인장강도, 탄성계수 및 포아송비 등의 물리적 특성에 큰 영향을 받기 때문에 부존 암석은 매우 중요하다(Copur et al., 2006). 본 연구에서는 백운대리석의 물리적 특성을 파악하기 위해 흡수율, 비중, 탄성과 속도, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비, 이방성, 직접전단강도 시험을 실시하였다. 이와 함께 석재의 장기적인 품질에 영향을 미치는 내열성, 마모율, 내부식성 시험 등을 실시하여 부존 대리석 특성을 다방면에서 파악하고자 하였다.

2.3.1 시험 항목 및 방법

시험 항목 중 흡수율, 비중, 탄성과 속도, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비, 마모율(로스엔젤레스 시험기 이용), 직접전단강도 시험 등은 한국암반공학회에서 제정한 암석표준시험법(KSRM, 2005, 2006a, 2006b, 2008, 2009, 2010)에 의거하여 실시하였으며, 이방성의 경우 Kim(1995)과 Park et al.(2008)의 연구 결과를 참고하였다. 시험은 각 항목 당 5개의 시험편에 대해 수행하여 평균값을 취하였다.

내부식성 시험의 경우 산성비에 의한 석조문화재 손상에 관한 기존의 연구(Do and Cho, 2010)를 참고하여, pH 5.6의 인공강우를 직경 37 mm, 길이 50 mm 크기의 원주형 시험편 3개에 15 ml 적용하여 얻은 결과의 평균값을 취하였다. 인공강우 적용은 총 100회 반복하였으며 10회의 시험마다 시험편의 무게와 탄성과속도를 측정하여 산성비에 의한 중량손실 및 탄성과속도 변

화를 관찰하였다.

내열성 시험의 경우 예열온도에 따른 보령사암과 여산대리암의 물리적 특성 변화에 관한 기존 연구(Yoon, 2004)를 참고하여, 예열 온도에 따른(15, 200, 300, 400, 500, 600℃) 시험편의 비중과 흡수율 변화를 관찰하였다. 3개의 시험편에 대해 실시하여 평균값을 취하여 나타내었다.

2.3.2 시험결과 및 고찰

백운대리석은 Table 1에 나타난 바와 같이 국내 타 지역에서 산출되는 대리석의 물성과 유사한 수준을 보이고 있으며(Jang and Kim, 1995, Park and Jeon, 2001, Yoon, 2004), 특히 인장강도가 높게 나타났다. 내열성

시험결과 예열온도 300℃부터 암석의 물리적 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 내부식성 시험의 경우 pH 5.6의 인공강우를 50회 적용한 이후부터 시험편의 무게가 감소하고 탄성파속도가 변화하는 등 산성비에 다소 취약한 것으로 판단되었다. 마모율은 22.67%로 석재로서 적절한 수준이며, 대리석 내에 존재하는 절리에 대한 직접전단강도 시험결과 일반적으로 세립질 국내산 석재에서 나타나는 마찰각과 점착력의 수준을 보여주고 있다. 이방성시험결과, 등방적 성질을 지니고 있어 석재로서 활용되는데 매우 유리한 점을 보이는 것으로 나타났다.

Table 1. Physical characteristics of Baekwoon marble

Uni. Comp. Strength (MPa)	Apparent Density (kN/m ³)	Absorption (%)	P/S wave Velocity (m/sec)		Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile Strength (MPa)
			P wave	S wave			
85.1	26.736	0.109	4,610	2,660	43.2	0.232	7.9
Anisotropy test			Young's modulus (GPa)		Poisson's ratio		
			E1	E2	0.250		
			63.8	74.1			
Thermal resistance test			Temperature (℃)		Specific gravity	Absorption (%)	
			15		2.72	0.119	
			200		2.72	0.119	
			300		2.71	0.200	
			400		2.71	0.160	
			500		2.71	0.250	
			600		2.71	0.315	
Abrasion test	Mass of 25~20 mm (2500±10) (g)	Mass of 20~15 mm (2500±10) (g)	Mass of total (g)	Mass of after test in 1.7 mm (g)	Percentage of wear (%)		
	2489.9	2495.6	4985.5	3855.6	22.67		
Corrosion resistant test	Number	Mass (g)	Volume (cm ³)	P/S wave Velocity(m/s)			
				V _p	V _s		
	0	313.69	113.87	4352	2560		
	50	307.43	112.49	4330	2547		
100	300.57	110.80	4310	2535			
Joint shear test	Normal stress (MPa)	Peak shear stress (MPa)	Residual shear stress (MPa)	Friction angle (°)		cohesion (MPa)	
				for peak	for residual	for peak	for residual
	0.3	0.26	0.18	31	26	0.46	0
	0.6	0.45	0.34				
0.9	0.63	0.50					

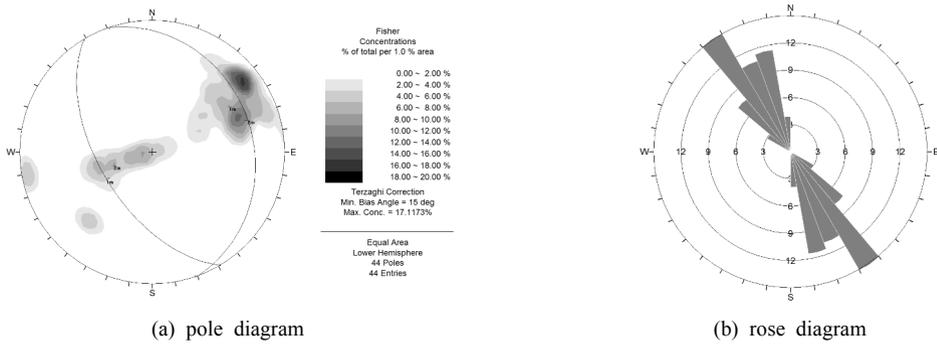


Fig. 3. The joint distribution in the test quarrying area of Baekwoon marble

Table 2. The orientations of joint sets in the test quarrying area of Baekwoon marble

Joint set	Dip direction (degrees)	Dip (degrees)	Spacing (mm)	Remarks
1	058	27	255.6	Major set
2	251	64	445.5	

2.4 절리구조

대상암석의 물리적 특성과 더불어 절단효율에 큰 영향을 미치는 요소는 절리군의 방향성과 개수 등의 채석장내 지질학적 특성이다(Copur et al., 2006). 본 절에서는 대리석 시험채석 현장에서 조사선 조사법을 이용하여 절리구조 조사를 실시하였으며 그 결과를 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다.

절리조사 결과 대리석 채석장 내의 주 절리군은 2개가 관찰되었으며 1번 절리군이 주 절리방향으로 나타났다. 굴착을 진행하면서 수시로 갱내탐사를 실시하여 그 결과를 채석계획에 지속적으로 반영해야 할 것으로 판단된다.

3. 체인쏘머신

3.1 장비 기능 및 특징

연구대상광산에 적용하여 채석에 이용 중인 체인쏘머신은 이탈리아 Fantini社의 장비로, 모델명은 GU.70/R-XC이다(Fig. 4). 이 장비는 지하채석장에서 석재를 절단 채석하기위해 설계 및 제작되었고, 기계의 작동은 작업자에 의해 무선리모컨으로 조종된다. 단단한 석재나 거친 석재의 절단이 가능하며 작업 범위는 전면 수직(측벽, 중간) 및 전면 수평(천반, 중간, 바닥)이 가능하다(Fantini, 2012).

체인쏘머신의 주요 구성은 무한궤도방식의 구동부와 오일탱크·윤활유 조종유닛 등이 포함된 베이스프레임, 수직레일과 수직 이동부, 암(arm), 톱날, 무선 리모컨,



Fig. 4. Chain saw machine (model: GU.70/R-XC)



Fig. 5. The bit of chain saw machine

버튼식 패널부 등 총 9개로 이루어져 있다.

본 장비의 절삭도구는 Fig. 5와 같으며 비트는 산업용 다이아몬드로 이루어져있다. 비트와 비트 사이의 간격

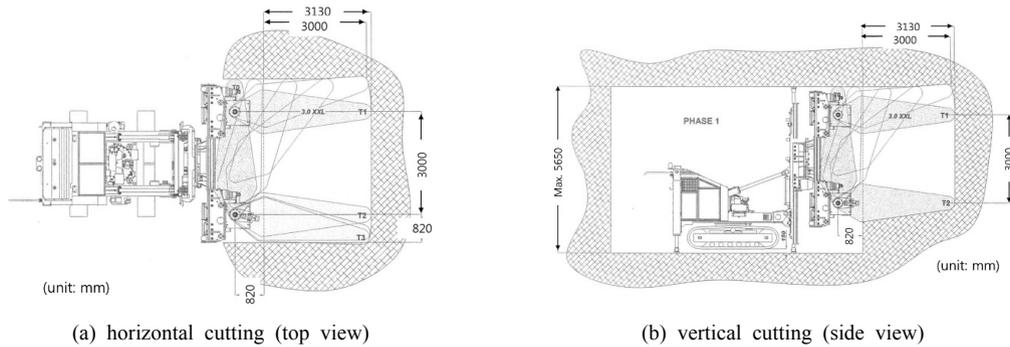


Fig. 6. Dimensions of the chain saw machine

Table 3. Technical data of the chain saw machine

Reference data	Power supply	440 Volts 60 Hz 3-phase
	Total power output	60 kW
	Max. current absorption	105 A
	Hydraulic oil tank capacity	450 liters
	Grease tank capacity	30 dm ³
	Arm rotation	360°
	Rail rotation	270°
	Track fifth wheel rotation	360°
	Strut orientation	24 ~ 93°
	Head carrier carriage stroke	3,000 mm
	Vertical carriage stroke	3,050 mm
	Head carrier slide stroke	190 mm
	Max. cutting depth	3.0 m (XXL type)
	Cut width	38 mm
	Vibration level	within regulation limits
	Noise level when fully operation	85 dB(A) with background noise equal to 70 dB
88 dB(A) [when not cutting]		
Weighted acoustic power level A	100 dB(A) [when cutting]	
Total weight of machine	29,000 kg	
Applications and limitations	Planned use	Cutting all types of stone (excluding granite)
	Environment	Underground quarries (tunnels)
	Storage temperature	≥ -25°C
	Ambient operational temperature	≥ -10°C
	Hydraulic oil temperature	-20°C ± 50°C
	Max. slope for use	25%
Performance	Chain advance speed	1.2 m/sec (adjustable)
	Cut speed	3 ~ 10 cm/min (it depends on the type of stone)
	Machine speed on tracks	1 km/hr
Tunnel dimensions	Height	5150 ~ 5650 mm
	Minimum width	7250 mm

은 0.1 m이다.

수평절단과 수직절단 시의 작업 범위는 Fig. 6에 나타난 바와 같으며, 장비 본체의 이동 없이 가능한 최대 수평절단 거리와 최대 수직절단 거리는 각각 4,640 mm와 5,650 mm이다.

Table 3은 본 장비의 제원과 적정 작업환경, 이론적 절단능력 등을 정리한 것이며, 특히 소음이 100 dB로

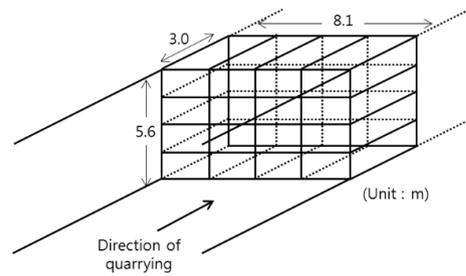
매우 높고 대상 암석의 특성에 따라 절단속도에 차이가 있음을 알 수 있다.

3.2 현장 적용

Fig. 7(a)는 체인쏘머신 작업 중인 백운광산 갱내채석장의 모습을 나타내며 Fig. 7(b)는 대리석 블록의 채석 규격을 도시한 것이다. 원석의 2차 분할 작업은 Fig.

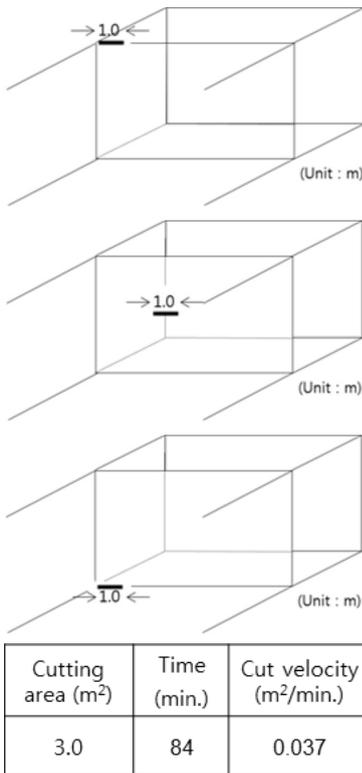


(a) Baekwoon quarry

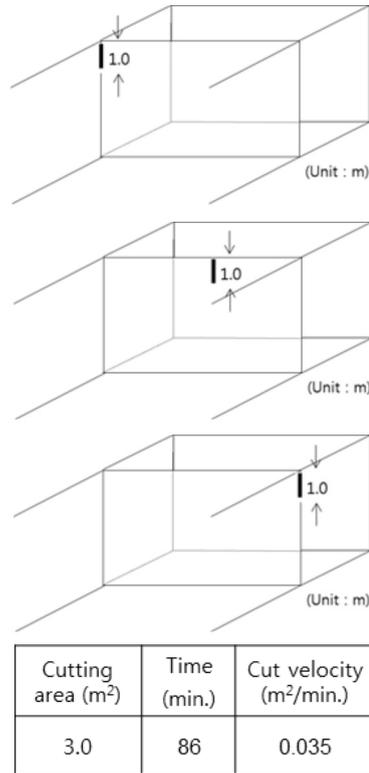


(b) Cutting pattern (test operation)

Fig. 7. Field operation of the chain saw machine



(a) Horizontal insert



(b) Vertical insert

Fig. 8. Performance of saw insert and its spending time

7(b)와 같이 16등분으로 정해져 있는 것은 아니며 연구 대상지역의 채석장 상황에 따라 달라질 수 있다.

현재 현장에서 적용 중인 채석 규격은 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 수평 8.1 m, 수직 5.6 m이므로 수평절단을 위해서는 장비 본체의 이동이 1회 필요하다.

4. 절삭장비 운영의 최적화

4.1 절단소요시간 분석

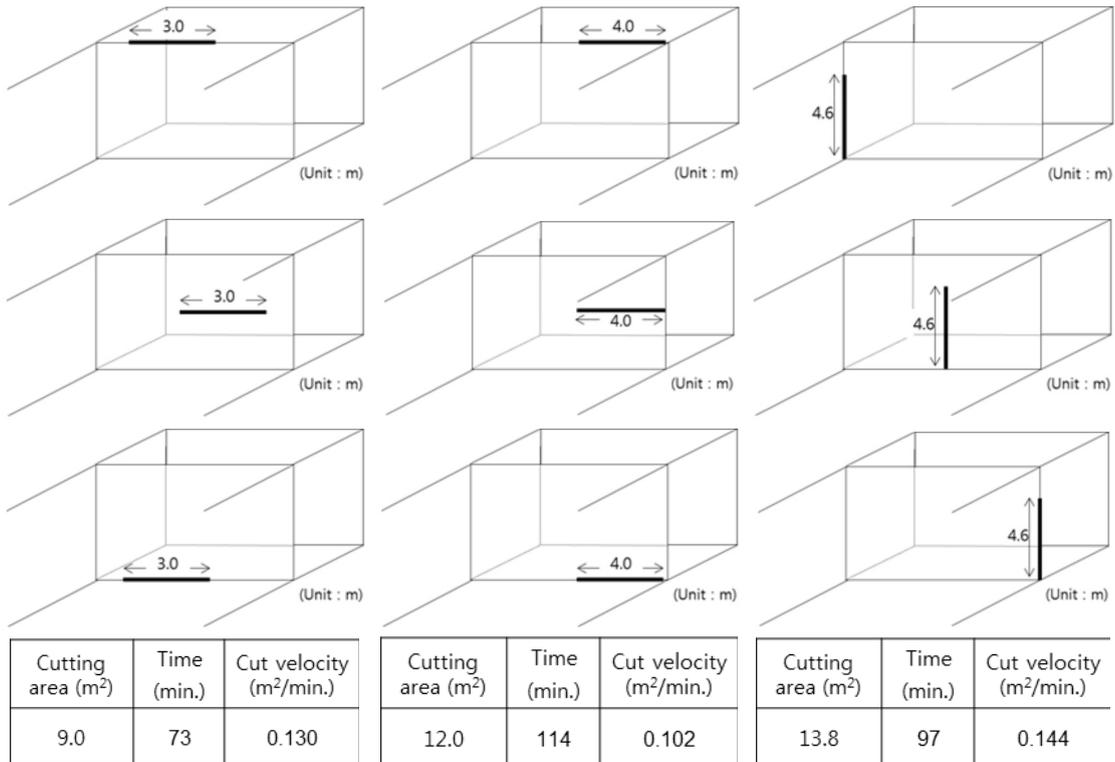
본 절에서는 대리석 채석 단위작업 시간을 도출하여 최적의 절단순서를 파악하기 위해 대리석 원석 절단에 소요되는 시간을 단위작업별로 세분하여 분석하였다. 장비가 원석을 절단하는 데에 소요되는 시간의 측정 뿐 아니라 이동, 수평조정, 톱날 회수 등 모든 작업시간을 구분하여 측정함으로써 각 단위작업에 소요되는 시간에 대한 효율성을 분석하고자 하였으며, 이를 작업량과 생산량을 계획하는 데에 활용하고자 하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 절단 면적이 같거나 절단 방향, 위

치 등 특성이 유사한 작업을 단위별로 분류한 것이며 각 작업별 절단 소요 시간과 속도를 각각 3회씩 측정한 후 평균값을 나타내었다.

Fig. 8은 톱날을 삽입 절단하는 경우로 절단면적은 3.0 m²이다. 톱날의 자중이 절단속도에 영향을 미치게 될 것을 예상하여 수평삽입(Fig. 8(a))과 수직삽입(Fig. 8(b)) 작업을 구분하였으나, 절단시간이 각각 84분과 86분으로 유사하게 나타났다. 이는 톱날삽입 작업의 경우 톱날 자중의 영향은 미미하고 삽입방향의 압력이 절단 속도에 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 톱날삽입의 경우 수평삽입과 수직삽입을 구분하지 않고 동일 작업으로 분류하고 절단 시간은 85분으로 하였다.

수평절단은 절단 거리가 7 m이고, 본체의 이동 없이 절단 가능한 거리는 4.64 m이므로 절단 도중 한 번의 본체 이동이 필요하다. 본체의 이동 속도시간을 제외한 수평절단속도 분석 결과, Fig. 9(a)에 나타난 수평 중간 절단속도는 Fig. 9(b)에 나타난 수평 끝단 절단속도와



(a) Horizontal intermediate cutting after insert

(b) Horizontal edge cutting

(c) Vertical cutting after insert

Fig. 9. Performance of cuttings and the spending time of each operation

큰 차이가 있었다. 수평 끝단 절단의 경우 절단이 끝나는 부분인 에지에서 마무리 절단에 정교함이 요구되기 때문에 절단속도가 다소 떨어지는 것으로 보인다. 따라서 수평절단의 경우 수평 중간 절단(Fig. 9(a))과 수평 끝단 절단(Fig. 9(b))으로 구분하였다.

Fig. 9(c)는 수직절단으로, 본체의 이동 없이 절단이 이루어지기 때문에 톱날의 위치를 다시 잡아야 하는 Fig. 9(b)에 비해 시간이 절약되지만 절단이 끝나는 부분도 포함되므로 에지에서 마무리 절단에 정교함이 요구되어 시간이 더 소요되는 등 복합적인 요인이 작용하였고 아래 방향으로 힘을 받기 때문에 톱날의 자중이 절단속도에 영향을 미쳐 결국 수평 절단속도보다 빠르게 나타난 것이라 사료된다. 따라서 수직절단작업은 수평절단과 구분하여 분류하였다.

4.2 단위작업시간 도출

앞 절에서 분석한 절단소요시간 분석결과를 바탕으로 독립적인 특성을 나타내는 작업 단위별로 소요시간을 도출하여 Table 4에 나타내었다. 단위작업 시간은 4.1 절에서 분석한 절단작업 시간뿐만 아니라 장비를 가동

하는 데에 필요한 모든 부대작업을 포함하여 도출하였다.

Table 4에 나타난 바와 같이 절단작업은 톱날삽입, 수평중간절단, 수평끝단절단, 수직절단의 4가지이며, 부대작업 5가지를 포함, 총 9가지의 단위작업으로 분류하였다. 단위작업 시간 분석을 통하여 최적의 절단순서를 파악할 수 있으며, 이는 절단규격 또는 2차 분할면수가 달라지더라도 탄력적으로 적용이 가능하다.

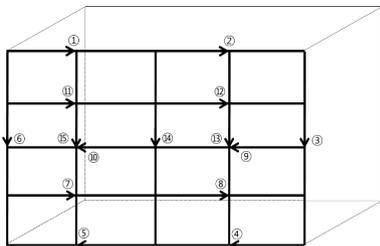
4.3 절단순서에 따른 효율 분석

본 절에서는 4.2절에서 얻은 분석결과를 기초로 하여 실제 대리석 원석 채취를 위한 절단 패턴을 가정하고 그에 따라 소요되는 전체 작업 시간을 분석하였다. 원석은 절단 단면 당 16개를 절단, 채석하고 각 원석의 크기는 폭 2 m, 높이 1.4 m, 길이 3 m이다.

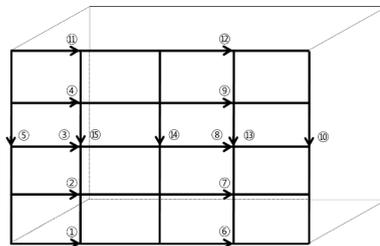
절단순서에 따른 작업 패턴을 결정하는 경우의 수는 무수히 많이 존재하지만 기본적으로 가장 소요시간이 긴 체인의 방향을 바꾸는 작업을 1회로 최소화하는 조건 하에서 현장에서 현실적으로 적용 가능한 두 가지 절단 패턴을 설정한 후 소요되는 시간을 비교하여 작업 효율의 차이를 분석하였다.

Table 4. The unit operating time for each step of the chain saw machine

Modules		Time (minutes)	Remarks
Chain saw insert		85	0.036 (m ² /minute)
Horizontal intermediate cut (3 m)		73	0.130 (m ² /minute)
Horizontal edge cut (4 m)		114	0.102 (m ² /minute)
Vertical cut (4.6 m)		97	0.144 (m ² /minute)
Pick out the saw		6	
Movement		16	
Setting the machine		23	
Rotation of head	90°	27	
	180°	31	
Rearranging the cutting direction of chain saw		68	for the reverse direction



(a) Cutting pattern A (2,970 min.)



(b) Cutting pattern B (2,805 min.)

Fig. 10. Comparison of total operating time for each cutting pattern

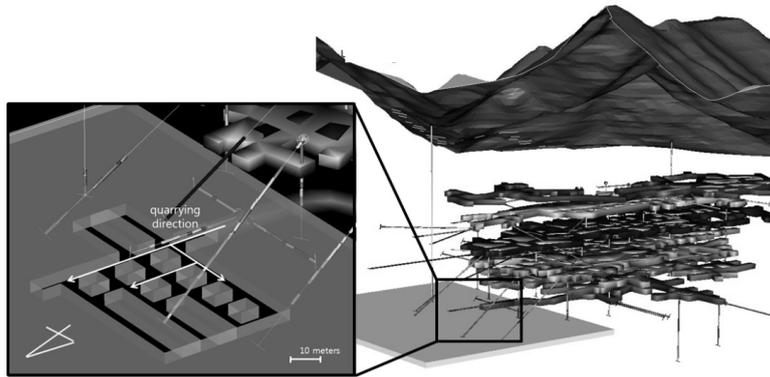


Fig. 11. Suggestion of quarrying plan of marble in the 3D Backwoon mine model

Fig. 10(a)의 경우 대리석 원석 블록의 외곽을 우선적으로 절단하는 절단패턴이며 Fig. 10(b)의 경우 체인쏘머신 본체의 이동을 최소화하여 같은 자리에서 최대한 많은 절단을 하는 절단패턴이다.

채석장에서 대리석을 16개의 블록으로 채석할 경우 절단패턴에 따른 작업시간 분석결과, 본체의 움직임을 최소한으로 하여 절단순서를 결정한 패턴 B의 경우가 패턴 A의 경우보다 165분(약 6%)의 절단시간 단축을 나타내었다. 장비 본체의 이동은 패턴 A의 경우 7회, 패턴 B의 경우 4회가 필요하며 장비 이동에 따른 순 소요시간 차이에 48분이다. 기타 부수적인 시간 차이는 있겠으나 장비 이동에 따른 소요시간이 전체 작업 소요시간의 차이에 가장 큰 영향을 미쳤다. 따라서 총 16개의 블록으로 채석하는 경우 패턴 B가 우수한 효율을 나타내었으며 암반 및 장비의 상태에 따라 상이하겠지만 기본적으로 본체의 이동과 체인 방향의 교체를 최소화하는 절단순서가 최대의 효율을 나타낼 것이라 판단된다.

4.4 채석 계획

채석장내에서의 품질이 최종제품의 품질이 되는 석재 자원의 특성상 채석장내 품질관리가 성공적인 석재생산에 있어 가장 중요한 요소인데, 이는 치밀하고 체계적인 채석계획 수립으로부터 비롯된다고 할 수 있다.

현재 대리석 부존지역의 탐사시추자료가 부족하여 정확한 광체의 경계와 형상을 파악하는 것이 어렵지만 개략적인 채석방향을 제시하기 위하여 2.2절에서 수행한 채광현황 3차원 모델에 더하여 Fig. 11과 같이 대리석 광체를 주방식채광법을 적용할 수 있는 수평의 판상으로 모델링하였다.

대리석의 채석은 체인쏘머신을 이용한 절단 굴착의

방식으로 진행하되 Fig. 11 내의 확대도와 같이 6단의 석회석 채굴갱도에서 연장하여 부존이 확인된 대리석 암체내로 전진하면서 좌우측을 채굴해 나가는 형태로 진행하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

각 채굴적과 잔주의 폭과 간격은 8 m로 설정하여 현재 채석 진행방향에서 대리석 암반의 백색도가 높고 질리 빈도가 낮은 좌측을 중점적으로 채석하는 것이 바람직할 것이다.

절리조사에서 나타난 주 절리군의 방향의 주향은 S28°E이며 Fig. 11에 나타난 채석진행방향의 주향은 S27°W로서 방위각으로 약 60도의 각을 이루고 있다. 본 지역 암석의 경우 이방성이 거의 나타나지 않고 절리의 간격이 보통정도로 조밀하지 않아 현재 채석장의 여건을 그대로 적용하여도 석재의 품질에 큰 영향은 없을 것으로 판단하였다.

현재 대리석 부존 예상지역의 암체 내로 실시된 시추 탐사는 석회석 품위 조사를 목적으로 대리석 구간을 단순히 통과한 시추공을 제외하면 3개 공 정도에 그치고 있으므로 상세한 대리석 암체의 규모나 경계 등이 확정되어 있지 않은 상태이다. 그러므로 현 단계에서 효율적으로 전체 암체에 대한 개발계획을 수립하는 데에는 어려움이 있으나, 앞으로 대리석에 대한 절단 채굴 작업을 진행하면서 채석기술을 정착시키고, 추가적인 시추 탐사와 갱내 탐사 등을 병행하면서 주방식채광법으로 채석작업을 진행시킨다면 효율적인 대리석 채석작업이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 갱내 채석장 환경에 최적화된 체인쏘머신 채석기술을 효율적이고 경제적으로 적용하기 위

하여 작업단위별, 패턴별 작업시간 분석을 수행하였으며 이를 토대로 최적의 절단순서를 파악하였다. 또한 성공적인 대리석 개발을 위해 채석대상지역을 3차원 모델링하여 부존 대리석의 개략적인 채석방향을 제시하였다.

이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 체인쏘머신의 단위작업 시간 분석 결과, 절단 작업은 톱날삽입, 수평중간절단, 수평끝단절단, 수직절단의 4가지로 구분할 수 있었다. 이 외에 장비 본체의 이동이나 체인방향 교체 등 부대작업은 5가지 단위 작업으로 분류되었다. 이렇게 분류한 총 9가지 단위 작업 시간 분석 결과를 바탕으로 암석 블록을 16등 분하여 채석할 경우를 가정하여 절단순서를 달리한 2가지 패턴을 비교한 결과, 장비 본체 이동을 최소화하여 절단순서를 결정한 패턴이 절단면의 외곽을 우선적으로 작업하는 절단 패턴보다 약 6%의 시간 단축을 나타내었다. 가장 긴 시간이 소요되는 부대작업은 체인의 방향을 교체하는 작업과 본체의 이동으로, 작업 효율을 높이기 위해서는 이들 작업을 최소화해야 할 것이라 판단된다. 또한 체인쏘머신에 대한 단위작업시간 분석에 기초하여 현장상황에 따라 채석 규격이나 2차 분할면수가 달라지더라도 그에 따른 절단 소요시간의 예측과 함께 최적의 절단순서 파악이 가능할 것이다.
2. 절리조사에서 나타난 주 절리군의 방향의 주향과 본 연구에서 제시한 채석진행방향의 주향은 방위각으로 약 60도의 각을 이루고 있다. 본 지역 암석의 경우 이방성이 거의 나타나지 않고 절리의 간격이 보통정도로 조밀하지 않아 현재 채석장의 여건을 그대로 적용하여도 석재의 품질에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

본 연구에 추가하여 앞으로 채석이 진행되는 과정에서 갱내탐사, 탐사시추 등의 조사결과를 채석계획에 지속적으로 반영한다면 고부가 대리석을 성공적으로 생산할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 (주)GMC의 연구과제 “암석절단굴착기를 이용한 고부가 대리석 채석기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1. Copur H, 2010, Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 47, 104-120.
2. Copur H, Balci C, Bilgin N, Tumac D, Feridunoglu C and Dincer T, 2006, Cutting performance of chain saw machines in quarries and laboratory. *Proceedings of the 15th international symposium on mine planning and equipment selection, Turin, 20-22 September 2006.* 1324-1329.
3. Copur H, Balci C, Tumac D and Bilgin N, 2011, Field and laboratory studies on natural stones leading to empirical performance prediction of chain saw machines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, 269-282.
4. Do, J. Y. and Cho, H. G., 2010, Modeling Study on Deterioration of Stone Monuments Constructed with Silicate Rock by Acid Rain, *Journal of The Mineralogical Society of Korea* 23(1), 63-71.
5. Fantini, 2012, User manual, 2-62.
6. Jang, B. A. and Kim, J. D., 1995, Microcrack Development in Gabbro, Sandstone and Marble due to Fatigue Stress, *Tunnel and Underground Space* 5, 240-250.
7. Kim, D. Y., 1996, Quarries, Joongmi, 123-182.
8. Kim, H. Y., 1995, Determination of Elastic Constants of Transversely Isotropic Rocks by Simple Uni-axial Test, *Tunnel and Underground Space* 5, 318-322.
9. KSRM, 2005b, Standard test method for uniaxial compressive strength of rock, *Tunnel and Underground Space* 15.2, 85-86.
10. KSRM, 2006a, Standard method for absorption and bulk specific gravity of rock, *Tunnel and Underground Space* 16.2, 95-98.
11. KSRM, 2006b, Standard test method for indirect tensile strength of rock by the Brazilian test, *Tunnel and Underground Space* 16.4, 279-280.
12. KSRM, 2008, Standard test method for determination of resistance to abrasion of rock by use of the Los Angeles machine, *Tunnel and Underground Space* 18.4, 239-241.
13. KSRM, 2009, Standard test methods for determining direct shear strength of rock in laboratory, *Tunnel and Underground Space* 19.4, 269-272.
14. KSRM, 2010, Standard test methods for rock, CIR, 11-25.
15. Lee, C. O., Hong, S. S., Lee, B. T., Kim, G. S. and Yun, H. S., 2006, Spatial Distribution of the Dimension Stone Quarries in Korea, *Journal of The Petrological Society of Korea* 15.3, 154-166.
16. Lee, S. M., Kim, S. M. and Lee, Y. H., 2012, Introduction of the $M_{(i,j,k)}$ BCP and Risk Assessment of Underground Limestone Mine, *Tunnel and Underground Space* 22.6, 383-392.

17. Noh, J. H. and Oh, S. J., 2005, Hydrothermal Alteration of the Pungchon Limestone and the Formation of High-Ca Limestone. Journal of The Geological Society of Korea 41.2, 175-197.
18. Park, C. H., Park, E. S. and Park, C., 2008, A Model Study on Deformability of A Transversely Isotropic Rock, Tunnel and Underground Space 18.4, 252-262.
19. Park, N. S. and Jeon, S. W., 2001, Crack Propagation and Coalescence in Yeosan Marble under Uniaxial Compression, Tunnel and Underground Space 11.3, 217-224.
20. Son, Y. J. and Kim, J. D., 2012, Mine Haulage System Design for Reopening of Yangyang Iron Mine using 3D Modelling, Tunnel and Underground Space 22.6, 412-428.
21. Yoon, H. S., Hong, S. S., Park, D. W., Lee, B. D. and Kim, K. S., 2003, Physical and Chemical Properties of Domestic Marble Resources Behalf of Geological Age, Proceedings of the Annual Joint conferences, Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea, 68-71.
22. Yoon, Y. K., 2004, Temperature Effects on the Physical Properties of Boryung Sandstone and Yeosan Marble, Explosives and Blasting 22.4, 17-22.

주 재 열

2012년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사



Tel: 033-256-6256
E-mail: jyju@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 대학원 에너지·자원공학과 석사과정

이 광 표

2013년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사



Tel: 033-256-6256
E-mail: freekpl1@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 대학원 에너지·자원공학과 석사과정

김 재 동

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사



Tel: 033-250-6256
E-mail: jdkim@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수
