백열광을 이용한 무진동, 무소음 암반파쇄공법의 이론적 고찰

Theoretical study on rock excavation method by whitelight thermal stress

최용기*1, 한현희*2, 김성환*3, 김학준*4, 노르만 엘 아리슨*5, 공훈주*6
Choi, Yong-Ki · Han, Hyun-Hee · Kim, Sung-Hwan · Kim, Hak-Joon · Norman L., Arrison · Kong, Hoon-Joo

Abstract

Nowadays, the blast method is mainly operated in the fields of the rock excavation accompanied by construction site in Korea. Blast method has many merits such as improvement of workability, reducement of operation period, and etc. However, blast operation also create much loss and troubles with the neighbours for the environmental pollutions such as the noise, blast vibration, fly rocks and dusts. Thus, the non-vibration and shallow vibration methods have been used but they have also another problems in the view of the economy and the efficiency in operation. In this study, we had made laboratory tests for the breaking of the various Rock types by White Light Thermal Stress. The tests shows that one unit consuming 500kilowatts of electricity, would go 90 feet a day in tunneling if the tunnel was 16 feet by 16 feet. Also, if a faster rate of tunneling could be handled, other white light units could be added.

Keywords: Blast method, white light, thermal stress, rock breakage

요 지

현재 우리 나라의 각종 건설공사에 수반되는 암반 굴착작업은 아직까지 화약류에 의한 발파공법이 주를 이루고 있는 실정이다. 이는 발파공법이 다른 굴착방법에 비하여 경제성 및 작업 효율성 등에서 효과적이기 때문이다. 그러나, 도심지에서 발파작업은 작업에 수반되는 환경 공해적 요소인 소음, 진동, 암석의 비산 및 분진 등의 끊임없는 민원발생과 많은 피해가 발생되어 미진동 및 무진동 굴착방법이 대체공법으로 사용되고 있기는 하나 이들은 경제성 및 효율성이 낮아 궁극적인 해결책이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 백열광에 의해 유도된 열 응력 (인장 및 전단 응력)을 이용한 무진동, 무소음 암반 파쇄공법의 특성, 암석파쇄효과 및 경제성에 대하여 검토하였다. 본 연구에서 백열광에 의한 암반굴착방법은 500Kw의 전력소비로 16ft×16ft정도의 터널단면을 하루에 약 90ft 굴진이 가능한 것으로 분석되었다. 또한 본 굴착방법은 전기를 동력원으로 이용하기 때문에 화약발파에 의한 작업 중단이 필요 없으며 화이트라이트 유니트를 추가로 설치하면 굴착속도를 더욱 단축할 수 있게 된다.

주요어: 발파공법·백열광, 열 응력, 무진동, 무소음 암반굴착

*1 정회원 대원토질 (주) 대표이사
*2 정회원 (주) 뉴테크 이엔씨 대표이사
*3 정회원 한국도로공사 도로연구소 연구위원
*4 정회원, 대전대학교 교수
*5 White Light International LLC, 대표이사
*6 White Light Thermal Technology Ltd. 이사

1. 서론

암반의 굴착기술은 도심지의 지하공간 개발, 광산, 토목 및 건설 등 다방면에서 기본이 되고 있는 요소이다. 현재까지 대부분의 암반 굴착은 화약에 의한 발파작업이 주를 이루고 있다. 이는 발파작업이 다른작업에 비하여 경제적이고 시공기간을 단축할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그러나, 주택 및 건물이 밀집된 도심지에서 화약 발파에 의한 굴착작업시 소음, 진동, 분진 및 암석의 비산 등과 같은 환경공해에 의한 끊임없는 민원발생으로 공기지연 및 비용 발생의 또 다른 문제점이 대두되고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 대체방법으로 약액 주입이나 유압식 할암기를 이용한 미진동 및 무진동 굴착공법이 사용되고 있으나 이들 방법은 생산성 및 효율성이 낮아 적용에 어려움이 많은 것이 사실이다. 따라서 환경공해가 전혀 없으면서도 경제성을 동시에 충족할 수 있는 암반굴착공법이 요구되고 있는 실정이다. 현재 화약을 사용하지 않고 암석을 분쇄할 수 있는 여러 가지 개발중인 공법 가운데 무진동, 무소음, 무발파 공법으로서 화이트라이트에 의해 유도되는 열 응력을 이용한 암석파쇄에 대하여 소개하고자 한다.

2. 열 응력에 의한 암석의 파쇄 이론

2.1 백열광에 의한 열 가열 이론

일반적으로 아세틸렌과 산소를 연소하여 얻을 수 있는 최대온도는 3,110℃정도이다. 반면에 백열광 (White Light)은 최대 12,000℃ 정도의 열원을 갖고 있다. 이것은 아래에 제시된 스테판의 방사법칙 식 (1)에 의해 알 수 있듯이 화이트라이트는 거의 모든 열이 방사에 의해 높은 온도로 전달되기 때문에 뜨거운 화염에 의해 암석을 가열하는 것보다 약 200~250배 더 빠르게 가열할 수 있다는 것이다.

$$\frac{\triangle Q}{\triangle t} = A\varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \qquad (1)$$

여기서,

$\triangle Q$ = 방사에 의해 전달된 에너지

$\triangle t$ = 에너지 전환이 발생한 시간

A = 전환 에너지가 전달된 면적

ε = 방사율

σ = 스테판-볼츠만의 상수

T_1 = 방사하는 물체의 온도

T_2 = 방사에너지를 받는 물체의 온도

2.2 열 응력에 의한 암석의 파쇄 및 특성

2.2.1 열 응력에 의한 암석의 파쇄 원리

백열광 (White Light)은 매우 빨리 암석을 가열시키기 때문에 암석내부에 열 응력을 발생시킨다. 암석 그 자체는 딱딱한 취성재료이기 때문에 열 응력은 암석을 짧은 시간에 저렴한 가격으로 암석을 파쇄할 수 있다. 암석의 파쇄는 압축 응력에 의해서가 아니라 오히려 전단 및 인장응력에 의해 이루어지기 때문에 작은 에너지로 암석을 분쇄할 수 있게 된다.

2.2.2 열 응력에 의한 암석파쇄 이론

열 대류현상 (매우 작은 량)이 무시되고, 가열이 일정할 경우 암석 표면에서의 온도는 단지 방사에너지와 열용량에 의해 지배됨으로 온도 T는 다음 식 (2)으로 표현된다.

$$\varepsilon_{abs} I = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx + k\frac{dT}{dx} + \varepsilon_{emis}\sigma T^4 \qquad (2)$$

여기서, 첫 번째 항은 εabs의 유효 흡수율로 방사상의 가열을 의미하며, 다음 항은 밀도 ρ와 열량 Cp인 두께 dx층의 열 용량이다. 또 다른 항은 열 전도율이 k인 암석의 표면에 수직하게 통과하는 열의 확산이다. 마지막 항은 열의 발산이며, 여기서 ε_{emis}는 반구상의 총유효 발산율이며 ρ는 스테판-볼츠만의 상수이다. 상기 방정식에서 주목해야 할 것은 발산율에 관련된 빛의 파장을 사용하는 것이 아니라 유효 발산율을 사용한다는 점이다. 흡수 및 발산 스펙트럼을 적분하면 서로 다른 두 개의 유효 발산율이 구해질 수 있다. 계산을 단순화하기

위해 두 가지를 상수 0.7로 가정하고, 열의 발산 및 흡수항은 암석의 표면에서만 사용된다. 식 (2)를 사용할 경우, 정상상태에서의 암석온도는 다음 식 (3)에 의해 주어진다.

$$T^4 = \frac{\varepsilon_{abs}}{2\varepsilon_{emis}} I \tag{3}$$

여기서, 발산은 양쪽 측면으로부터 발생하며 열의 확산은 복사량에 비교해서 작다 (이것은 높은 온도에서 사실임)고 가정한다. 이 방정식을 역으로 유도 및 대체하면 빛의 발산이나 강도에 대한 온도변화가 다음 식 (4)로 된다.

$$\frac{\partial T}{T} = \frac{\partial I}{4I} \text{ or } \frac{\partial T}{T} = \frac{\partial \varepsilon}{4\varepsilon} \tag{4}$$

따라서, 100℃ 혹은 373K온도에서 가열의 1% 변화는 강도 혹은 발산에서 0.9℃의 변화가 생긴다. 확산과 같은 프로세스에서 이러한 온도변화의 효과가 결정되어야 하며, 이 프로세스들은 어떤 가중치가 부여된 프로세스와 관련된 시간-온도관계이기 때문에 매개변수가 사용될 것이다. 이것이 바로 식 (5)에 의해 주어진 등가시간 (Equivalent time)이다.

$$t_{eff} = \int \exp\left[E_a(1/T - 1/T_{ref})/k_b\right] dt \tag{5}$$

여기서, Ea는 방정식 (5)에서 프로세스의 활성에너지이며, T_{ref}는 그 프로세스에 대한 설정 온도, k_b는 볼츠만의 상수 8.617×10^{-5}eV/K이다. 등가 시간이 설정된 온도에서 그 프로세스에 대한 시간의 길이라는 것은 명백하다. 그래서, 1 sec에 대한 100℃ 프로세스에 대한 등가 시간은 예측된 것처럼 1초이다.

2.2.3 컴퓨터 계산 모델

등가 시간을 찾기 위한 적분도 어렵고 가열 프로세스라는 것은 이번 예제에 사용된 직사각형 단면보다 훨씬 더 복잡하기 때문에 등가 시간 및 온도에 대한 가열 결과의 변화를 평가하기 위하여 컴퓨터 계산 모델이 도입되었으며, 위의 방정식 (2)에서부터 다음과 같이 공식이 만들어진다.

암석의 가열 표면의 경우:

$$\triangle T_0^{S+1} = \frac{\triangle t}{\triangle x \rho Cp}\left[\varepsilon_{abs} I - \varepsilon_{emis}\rho(T_n^s)^4 - k(T_0^S - T_{n-1}^S)/\triangle x\right] \tag{6}$$

비가열 표면 (후면)의 경우:

$$\triangle T_n^{S+1} = \frac{\triangle t}{\triangle x \rho Cp}\left[-\varepsilon_{emis}\rho(T_n^s)^4 - k(T_n^S - T_{n-1}^S)/\triangle x\right] \tag{7}$$

표면에서 체적분리의 경우:

$$\triangle T_n^{S+1} = \frac{\triangle t}{\triangle x \rho Cp}\left[-k(T_n^S - T_{n-1}^S)/\triangle x\right] \tag{8}$$

여기서, n은 암석 속으로의 공간적 절점 (간격 △x)을 의미하며, S는 시간 간격 △t이다. 위의 방정식은 암석을 파쇄하기 위한 설정온도에 도달하도록 시간이 조정된다. 컴퓨터 계산 실행시 1.0cm 두께의 암석 표면을 균등하게 10등분한 얇은 조각을 사용하게 되며, 발산율은 흡수 및 방출 모두에 0.7로 설정된다.

암석이 분쇄하기 시작하는 설정 온도에 이르기 위해서는 균일한 전력이 공급되며, 암석이 가열되는 속도는 다음 식 (9)으로 주어진다.

$$\frac{\triangle T_0^{S+1}}{\triangle t} = \frac{1}{\triangle x \rho Cp}\left[\varepsilon_{abs} I - k\frac{\triangle t}{\triangle x} - \varepsilon_{emis}\sigma T^4\right] \tag{9}$$

암석의 표면에서 온도의 변화 속도는 개략적으로 다음 식 (10)과 같다.

$$\frac{\triangle T_0^{S+1}}{\triangle t} = \varepsilon_{abs}\frac{I}{\triangle x \rho Cp} \tag{10}$$

2.2.4 열 응력에 의한 암석 파쇄

Fig. 1은 암석 표면의 온도에 따라 암석 내부의 전단응력이 어떻게 변하는가를 보여준다. 초기에는 암석의 온도가 상승함에 따라 응력도 증가하는데 이는 표면에 있는 취성 재질의 암석이 팽창하기 때문이다. 그러나 암석이 일단 표면에서 충분히 뜨겁게 되면 암석은 연성화되어 암석 내부적으로 응력을 지원할 능력을 상실하게 된다. 따라서 암석 표면의 온도는 암석 표면 자체가 열에

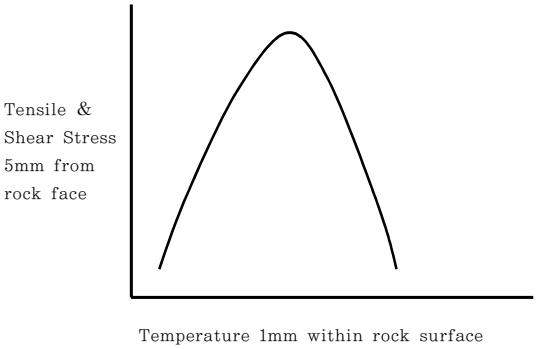

Fig. 1. Relation of tensile and shear stress-temperature

의하여 연성화되어 암석의 내부구조에 더 이상의 응력을 지원할 수 없을 정도의 온도가 아닌 높은 온도까지 가열되어야만 한다는 것이다. 암석에 있어서 관찰되어야 할 또 다른 변수는 다양한 응력 형태에 대한 암석분쇄에 요구되는 온도변화 △T이다. 표면의 암석은 열에 의해 팽창하고 내부 암석은 차가운 상태로 유지되어 팽창하지 않는다고 가정하면 인장 응력이 발생되고, 이 경우에 내부의 암석은 인장 응력에 의해 분리된다. 그림 1은 암석의 표면이 너무 많이 가열되면 응력이 제거된다는 것을 보여주며, 암석이 인장 응력 때문에 분쇄된다고 가정할 경우, 암석의 종류에 따라 분쇄에 요구되는 온도변화 △T는 Table 1의 역학적 자료를 이용하여 후크의 법칙을 이용하면 Table 2와 같다.

또한 가열된 암석은 팽창하게 되기 때문에, 가열된 암석은 팽창하지 않는 암석으로부터 전단되어 분리됨으로 전단 응력 또한 암석을 파쇄할 수 있는 모델 중의 하나이며, 이때 요구되는 온도차 △T는 Table 2와 같다. 또한 인장 및 전단 응력의 결합에 의해 암석이 분쇄될 수 있다.

Table 1. Temperature difference required to break rock via tensile stress

Rock Type	Specific Gravity	Compressive Strength (psi)	Modulus of elasticity (psi)	Coefficient of Expansion Per Degree (F)	Modulus of Rupture (psi)	Shear	Shear	Tensile
						Compressive Strength		
						10%	20%	4%
Granite	2.67	19,400	7,300,000	0.000004	1,850	1,940	3,880	776
Limestone	2.53	9,500	8,460,000	0.0000045	1,400	950	1,900	380
Marble	2.72	12,700	8,000,000	0.0000045	1,400	1,270	2,540	508
Sandstone	2.22	9,300	3,000,000	0.0000055	1,400	930	1,860	372
Slate	2.77	1,400	14,000,000	0.0000058	7,700	140	280	86

Note: Shearing strength of stone is from 10 to 20% of the compressive strength
Tensile strength of stone is 4% of the compressive strength
Modulus of rupture of stone is 15% of the compressive strength
Poisson's ratio is 1/4 for stone

Table 2. Temperature difference required to break rock for stress types

Rock Type	Tensile stress △T(。F)	Shear stress	
		10% (△T。F)	20% (△T。F)
Granite	26.57534	66.43835	132.8767
Limestone	9.981612	24.95403	49.90806
Marble	14.11111	35.27777	70.55555
Sandstone	22.54545	56.36363	112.7272
Slate	0.689655	1.724137	3.448275

3. 결론

백열광 (White Light)을 이용한 무진동, 무소음 암반파쇄공법의 이론은 백열광에 의한 열 가열 이론과 열 응력에 의한 이론을 이용하여 암석파쇄이론을 정립하였다.

1. 암석의 표면은 열에 의해 팽창하고 암석의 내부는 차가운 상태로 유지되어 팽창하지 않는다면, 온도 변화(차) △T에 의해서 인장 및 전단 응력이 발생되어 암석이 파쇄된다.
2. 암석의 표면에 열을 가하면 취성 재질의 암석이 팽창하기 때문에 온도증가에 따라 응력도 증가한다. 그러나 암석의 표면을 너무 많이 가열하면 암석이 연성화되어 응력이 제거되며, 암석이 분쇄되기 위해 요구되는 온도변화 △T는 응력의 형태 및 암종에 따라 후크의 법칙에 의해 결정된다.
3. 백열광 (White Light)을 이용한 암반파쇄공법은 전기를 동력원으로 이용하는 무소음, 무진동, 무발파 굴착공법으로서 발파 공법에 의해 발생되는 민원발생의 문제점을 근본적으로 해결할 수 있다.
4. 본 화이트라이트에 의한 암반파쇄공법을 이용하여 현장 적용시, 기존의 무진동 암반파쇄공법에 의한 작업효율 및 경제성이 아주 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Dr. Norman L. Arrison (2002), Thermal Heating Theory, Whitelight Internation LLC.
2. Marks, Standard Handbook for Mechanical Engineers, 7th Edition, pp.5-6.

최용기
대원토질 (주) 대표이사
04choi@korea.com

한현희
(주) 뉴테크 이엔씨 대표이사
hhhan@daewontns.co.kr

김성환
한국도로공사 도로연구소 연구위원
shkim@freeway.co.kr

김학준
대전대학교 교수
hakkim@dju.ac.kr

노르만 엘 아리슨
White Light International LLC, 대표이사
hellocharlie@usa.net

공훈주
White Light Thermal Technology Ltd. 이사
hihenry@hanmail.net