

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.10.1069>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 터널굴착용 와이어쏘 암반절삭 모델 구축 및 절삭성능 향상 연구

이진호<sup>\*†</sup> · 안성권<sup>\*\*</sup> · 이경찬<sup>\*</sup> · 방춘석<sup>\*\*</sup> · 사공명<sup>\*\*\*</sup>

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부, \*\* 한국철도기술연구원 신교통연구본부,  
\*\*\* 한국철도기술연구원 기획전략본부

### Study on a Wire Saw Rock Cutting Model for Tunnel Excavation and Cutting Performance Improvement

Jin-Ho Lee<sup>\*†</sup>, Sung-Kwon Ahn<sup>\*\*</sup>, Kyoung-Chan Lee<sup>\*</sup>, Choon-Seok Bang<sup>\*\*</sup> and Myung-Sagong<sup>\*\*\*</sup>

\* High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute,  
\*\* New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute,  
\*\*\* Planning and Strategy Center, Korea Railroad Research Institute

(Received May 26, 2015 ; Revised July 6, 2015 ; Accepted July 23, 2015)

**Key Words:** Wire Saw(와이어쏘), Rock Cutting(암반절삭), Tunnel Excavation(터널굴착), Cutting Model(절삭 모델), Cutting Performance(절삭성능)

**초록:** 발파를 이용한 터널굴착시, 와이어쏘를 이용하여 심빼기 부분 외곽에 불연속면을 발생시켜 발파 진동을 차단함으로써 소음 및 진동을 저감시키고자 하는 방법은 타 방법에 비해 시공이 간편하고 경제 적일 것으로 예상된다. 본 논문에서는 터널굴착용 와이어쏘의 절삭 메커니즘을 규명하기 위하여 시간에 따른 절삭 깊이 변화와 절삭 중 암석 내부의 와이어쏘 곡선 형태를 파악할 수 있는 절삭 모델을 구축 하고 검증하였다. 구축된 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 터널굴착용 와이어쏘 절삭의 특징을 살펴 보 고, 와이어쏘 인장력, 와이어쏘 속도, 피드 속도, 천공 깊이 및 천공 직경과 같은 주요 조건들이 절삭 성능에 미치는 영향을 검토하였으며, 이러한 검토 결과를 바탕으로 절삭 성능을 높이기 위한 방안을 제 시하였다.

**Abstract:** In tunnel excavation using blast, the wire saw rock cutting method generates a discontinuity perimeter around the center cut, and thus prevents blast vibration propagation to reduce vibration and noise. Therefore, the method is expected to be easy to use and economical compared with other methods. In this paper, the cutting mechanism of wire saw in tunnel excavation is investigated. A model describing the changes in cutting depth and wire saw shape inside a rock during cutting is established and validated for this purpose. Through a simulation using the model, the important characteristics of wire saw cut are investigated, and the influences of cutting conditions, such as wire saw tension, wire saw speed, feed speed, depth, and diameter of boring, on cutting performance are also examined. A method to improve the cutting performance is proposed based on the results.

### 1. 서 론

최근 도심 밀집지역에서 발파공법을 이용한 터널 시공시 발생하는 소음 및 진동으로 인한 민원 때문에 공사 진행이 지체되는 사례가 늘어나고 있다. 이

와 같은 민원구간에서는 화약 삽입방법 및 발파시 간을 조정하여 화약폭발 세기를 줄이는 제어발파를 통하여 소음 및 진동을 감소시킬 수 있으나, 제어가 적절하지 못할 경우 시공성이 저하되거나, 절리나 파쇄대가 발달한 불균질암에서는 효과가 저하되는 단점이 있다. 터널 전단면을 자동화된 장비로 동시에 굴착하는 TBM(Tunnel Boring Machining) 공법을

† Corresponding Author, [jinholee@krii.re.kr](mailto:jinholee@krii.re.kr)

사용할 경우 역시 소음 및 진동 저감을 기대할 수 있으나, 전체 공사 구간 중 민원이 발생하는 일부 구간 때문에 값비싼 TBM 공법을 사용하는 것은 경제성 측면에서 합리적이지 않다. 유압으로 작동하는 썰기를 천공안에 삽입한 후 전진시켜 암반을 파쇄하는 super wedge 방법 또한 소음 및 진동 저감 효과가 있으나 다수의 천공을 뚫어야 하는 선행 작업이 필요하고 파쇄 유효 거리의 한계로 인해 시공시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 반면에 안성권<sup>(1)</sup>이 제안한 와이어쏘를 이용한 터널굴착 방법은 발파시 소음 및 진동이 집중되는 부분 외곽에 와이어쏘를 이용하여 불연속면을 발생시켜 발파진동을 차단함으로써 소음 및 진동을 저감시키고자 하는 방법으로 시공이 간편하고 절삭속도가 높아 매우 경제적인 것으로 예상된다.

와이어쏘는 채석장에서 암석을 채취할 때와 노후화된 건물이나 대형 장비를 해체할 때 주로 사용되는 방법이나, 앞서 설명한 것과 같은 용도로 터널 굴착에 적용되는 경우는 극히 드물고 그 방법이 일반적인 와이어쏘 절단 방법과는 다르기 때문에 관련되어 연구가 진행된 예가 적다. Gustafsson N.<sup>(2)</sup>은 도심지역 지하 터널 굴착을 위해 와이어쏘 방법을 적용하고 그 효과를 기존 발파 방법과의 소음 및 진동 측면에서 비교하였으나, 절삭 메커니즘 및 절삭성능 향상에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 반도체나 솔라셀 제조 공정 중 사파이어 잉곳 및 솔라셀 잉곳을 정밀 절단하기 위해 주로 와이어쏘가 사용되고 있으며 관련 절단 메커니즘 규명 및 절단성능 향상을 위한 연구가 진행되었으나,<sup>(3,4)</sup> 그 규모 및 절단방법이 상이하여 터널굴착용 와이어쏘에 적용하기는 어렵다.

이에 본 연구에서는 터널굴착에 사용되는 와이어쏘 절삭 방법에 대해 살펴보고 절삭 메커니즘을 규명하기 위한 모델을 구축하고자 한다. 그리고 구축된 모델을 통해 주요 절삭 인자가 절삭성능에 미치는 영향을 규명하여 절삭성능을 향상시키는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 와이어쏘를 이용한 터널굴착 방법

발파를 이용한 일반적인 터널 굴착시, Fig. 1과 같이 굴착면의 중심부분을 발파 시켜 그 부분(가로×세로×깊이:약 2m×2m×1.5m)만 빼내는 일명 ‘심빼기’ 작업을 제일 먼저 하게 된다. 심빼기 이

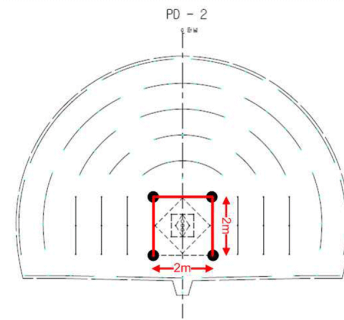


Fig. 1 Wire saw cutting around center cut in general tunnel face<sup>(1)</sup>

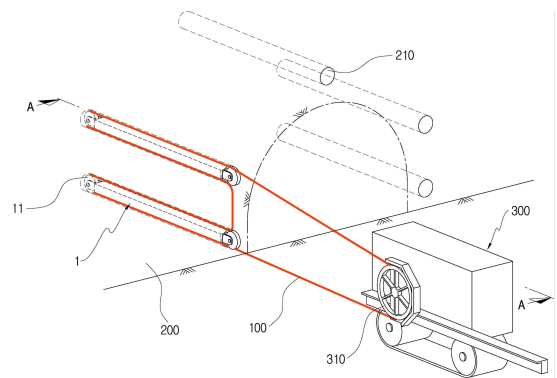


Fig. 2 Conceptual diagram of wire saw cutting in tunnel face<sup>(5)</sup>

후에 나머지 면을 발파시켜 굴착을 진행하는데 보통 심빼기 발파 때 발생하는 진동 및 소음이 가장 크기 때문에 이를 우선적으로 줄여야할 필요가 있다. 따라서 심빼기 발파를 하기 전에 와이어쏘를 이용하여 심빼기 부분 외곽면을 일정 깊이(1.5m 이상)만큼 절삭하여 암반에 불연속면을 생성시킴으로써 발파로 인해 진동이 전파되는 양을 줄이고자 하는 것이다.

와이어쏘를 이용하여 심빼기 부분의 외곽면 중 한 면을 절삭하는 방법을 Fig. 2에 나타내었다. 일정 깊이의 천공(210)을 뚫은 다음 그 속에 양 끝에 회전폴리(11)가 달린 지그(1)를 삽입하여 고정하고, 절삭용 다이아몬드 비드가 박힌 와이어쏘(100)를 회전기(310)에 일정한 인장력을 가한 상태로 연결한 후, 회전기를 고속으로 돌리면서 동시에 조금씩 뒤로 이동시킴으로써 절삭이 되게 하는 것이다. 이해를 돕기 위해 Fig. 2의 선 A-A에 대한 단면도를 이용하여 절삭 전후를 Fig. 3에 비교하였다.

석재 절단 및 건물 해체에 일반적으로 사용되

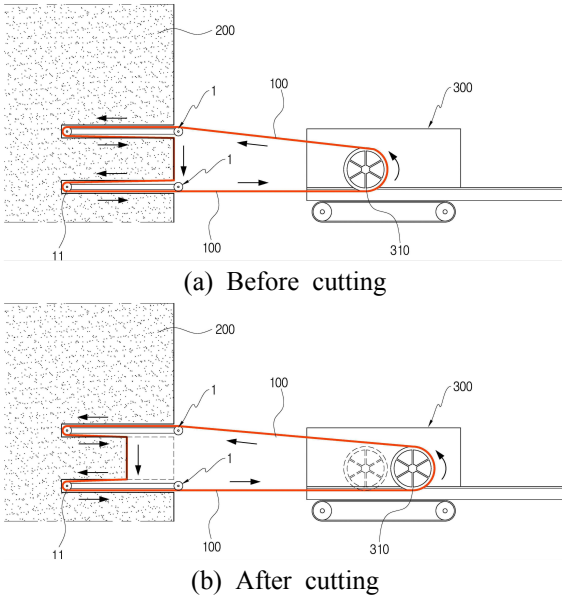


Fig. 3 Comparison between before and after cutting<sup>(5)</sup>

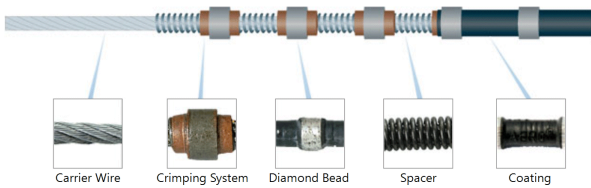


Fig. 4 Wire saw<sup>(6)</sup>

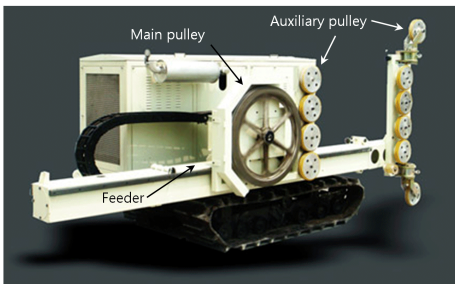


Fig. 5 Wire saw machine<sup>(7)</sup>

는 와이어쏘는 직경이 8~11mm이며, Fig. 4와 같이 캐리어 와이어, 클립핑 장치, 다이아몬드 비드, 중간재 및 코딩재 등으로 이루어져 있다.<sup>(6)</sup> Fig. 5와 같은 와이어쏘 머신에는 와이어쏘를 고속으로 회전시키기 위한 메인풀리와 와이어쏘의 방향을 조절하기 위한 보조풀리가 있으며 일정한 힘으로 와이어쏘를 조금씩 뒤로 이동시키기 위한 피드장치가 있다.

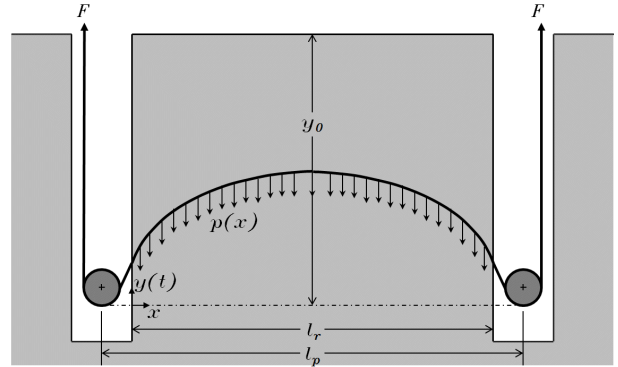


Fig. 6 Schematic diagram of wire saw cutting model

### 2.2 와이어쏘 절삭 모델

와이어쏘 절삭 모델에 대한 모식도가 Fig. 6에 나타나 있다.  $l_p$ 는 풀리사이의 거리,  $l_r$ 은 절삭되는 암반의 너비,  $y_0$ 는 암반 표면에서부터 풀리 끝단까지의 거리를 나타낸다. 사전에 와이어쏘에 가해진 인장력에 의해 힘  $F$ 가 발생하며 이에 따라 암반내 와이어쏘에 마찰압력  $p(x)$ 가 작용하여 절삭이 진행되게 된다. 여기서 시간에 따른 와이어쏘의 절삭깊이와 암석내부 와이어쏘의 곡선 형태를 파악하는 것이 절삭 모델 구축의 목표가 된다.

와이어쏘 머신의 피드장치에서 와이어쏘를 뒤로 이동시키는 속도를 피드속도  $v_f$ 라고 하고, 와이어쏘 다이아몬드 비드와 암반과의 마찰에 따라 암반이 절삭되는 속도를  $v_r$ 이라고 하면, 절삭깊이의 변화량  $\dot{y}$ 는 다음과 같이 피드속도와 절삭속도의 차로 표현할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \dot{y}(x,t) = v_f(t) - v_r(x,t) \quad (1)$$

절삭속도  $v_r$ 은 공구(다이아몬드 비드)와 피삭재(암반)와의 상대속도  $v_w$ (와이어쏘 회전속도)와 마찰압력  $p$ 에 비례하므로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_r(x,t) = k_p p(x) v_w(t) \quad (2)$$

여기서  $k_p$ 는 암반의 재질 및 가공 조건 등에 따라 결정되는 preston 계수이다.<sup>(8)</sup> 식 (1)과 식 (2)를 이용하면  $\dot{y}(x,t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

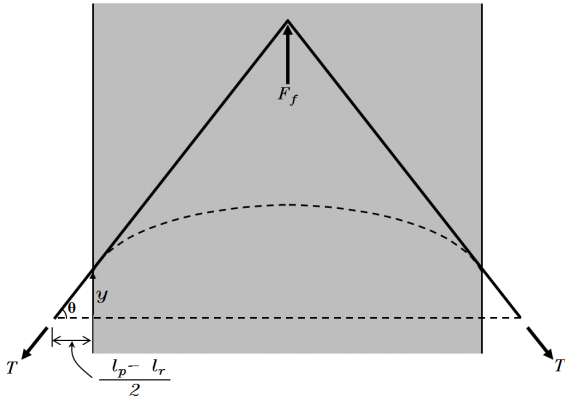


Fig. 7 Simplified model of wire saw cutting<sup>(3)</sup>

$$\dot{y}(x, t) = v_f(t) - k_p p(x) v_w(t) \quad (3)$$

위 식에서  $v_f$ 와  $v_w$ 는 와이어쏘 작업시 머신에서 제어하는 값으로서 파악이 가능하다. 마찰 압력의 합  $p_0$ 는 지름이  $d_w$ 인 와이어쏘를 머신이 끌어당기는 피드력을  $F_f$ , 피삭재와 와이어쏘가 접촉하는 길이를  $l_r$ 라고 근사하면 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$\int p(x) dA_c \approx p_0 l_r d_w = F_f \quad (4)$$

여기서  $F_f$ 를 파악하기 위하여 Fig. 7과 같이 단순화된 모델을 생각해 보도록 한다. 즉, 와이어쏘 양 끝에 걸리는 인장력이  $T$ 이고 와이어쏘를 머신에서 끌어당기는 힘인 피드력  $F_f$ 가 피삭재 중앙에 집중 하중으로 작용된다고 가정하는 것이다.<sup>(3)</sup> 이러한 조건에서 와이어쏘 내부에 작용하는 힘의 평형은 다음과 같이 이루어지고,

$$F_f = 2T \sin \theta \quad (5)$$

여기서  $\sin \theta$ 는 다음과 같다.

$$\sin \theta = \frac{y}{\sqrt{\left(\frac{l_p - l_r}{2}\right)^2 + y^2}} \quad (6)$$

위 식을 이용하여 마찰 압력  $p$ 를 구할 경우 식 (3)은  $y$ 에 대한 비선형 미분방정식이 되기 때문에  $y$ 의 일반해를 구하기 어렵게 된다. 따라서 다음과 같은  $F_f$ 의 근사값을 사용하였다. 즉,  $y = y_0$  일 때  $y_0 \gg (l_p - l_r)/2$  이기 때문에  $F_f \approx 2T$ 가 되고,  $y = 0$  일 때  $F_f = 0$  이 되므로  $F_f$ 는 다음과

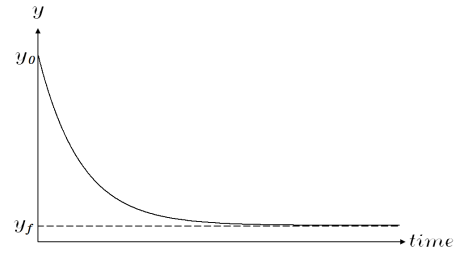


Fig. 8 Change of  $y$  with time

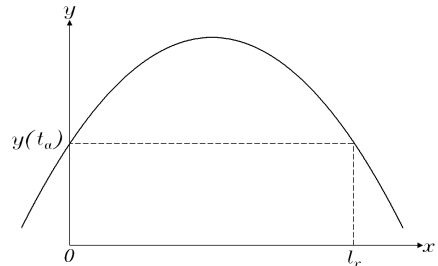


Fig. 9 Wire saw curve shape inside rock during cutting

같이 단순화할 수 있다.

$$F_f \approx \frac{2T}{y_0} y \quad (7)$$

와이어쏘의 회전속도와 피드속도가 일정하다고 가정하고 식 (7), (4), (3)을 이용하면 다음과 같은  $y$ 에 대한 선형미분방정식을 도출할 수 있다.

$$\dot{y} + Cy = v_f \quad \text{with} \quad C = \frac{2Tk_p v_w}{l_r d_w y_0} \quad (8)$$

이 식에 대한 일반해는 다음과 같다.

$$y(t) = e^{-\int_0^t C dt} \left[ \int_0^t (v_f e^{\int_0^t C dt}) dt + y_0 \right] \quad (9)$$

$$= \frac{v_f}{C} (1 - e^{-\alpha}) + y_0 e^{-\alpha}$$

식 (9)를 이용하여 시간에 따른  $y$ 의 변화량을 그래프로 살펴보면(Fig. 8),  $y_0$ 에서부터 시작된 절삭이 초기에는 급속하게 일어나다가 점차 절삭 속도가 감소되고, 결국  $y_f$ 로 수렴함을 알 수 있다. 여기서 다음과 같은 중요한 결론 두 가지를 유추할 수 있다. 즉, 절삭이 진행됨에 따라 절삭 효율이 급격하게 낮아진다는 것과 절삭 시간이 아무리 경과되어도 최종 절삭 깊이는 풀리 끝단 ( $y = 0$ )에 이르지 못한다는 것이다.

$t_a$  만큼 절삭이 진행 되었을 때 암석 내부의 와이어쏘 곡선 형태는 Fig. 9에서처럼 그 시점에서 절삭 변위  $y(t_a)$ 와 피삭재의 너비  $l_r$ 을 이용하여 이차항의 계수가  $A$ 인 이차함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x) = Ax(x - l_r) + y(t_a) \quad (10)$$

위 식에서 이차항의 계수  $A$ 는 와이어쏘의 암석 진입부에서의 경계조건을 이용하여 구할 수 있다. 즉, 와이어쏘 진입부에서의 와이어쏘 기울기  $y'(x_{in})$ 는  $y(t_a)/x_{in}$  이므로 이를 식 (10)을 한번 미분한 식에 대입하면 다음과 같이 이차항의 계수  $A$ 를 구할 수 있다.

$$A = -\frac{y(t_a)}{x_{in}l_r} \text{ with } x_{in} = \frac{l_p - l_r}{2} \quad (11)$$

### 2.3 와이어쏘 절삭 시험

앞 절에서 도출한 와이어쏘 절삭 모델을 이용한 절삭 결과와 실제 시험 결과를 비교해 보았다. Fig. 10은 와이어쏘를 이용한 절삭 시험 사진이고, 이 때의 시험 조건은 Table 1과 같다. 시험을 위해서 사전에 직경 380mm, 깊이 3m 천공 두 개를 2.3m 간격으로 뚫어 놓았으며, 이 천공안에 길이 1m의 지그를 설치하고 와이어쏘를 지그와 머신에 연결하였다. 절삭이 일정 시간동안 진행이 된 후, 절삭깊이의 증가가 현저하게 줄어드는 시점에서 작업을 종료하고 이 때의 절삭깊이를 3 지점(0, 1.15, 2.3m)에서 2회 이상 측정하였다. 와이어쏘 머신은 Table 2와 같은 사양을 보유한 FORTEC C&S CORP.의 FT-DX120를 사용하였고, 와이어쏘는 신한다이아몬드공업에서 제조된 Hybrid type 용착보강 비드가 삽입된 제품을 사용하였다.

앞 절에서 구축된 모델을 활용하여 절삭 과정을 예측한 결과와 실제 시험 결과를 Fig. 11에 나타내었다. (a)는 절삭깊이  $y$ 의 변화량에 관한 것으로 모델을 활용하여 예측한 결과를 실선으로,

시험결과를 점으로 표시하였다. 와이어쏘 절삭 도중에는 절삭 깊이의 측정이 불가능하기 때문에 절삭이 종료된 시점(1200초)에 측정된 결과만을 그래프에 나타내었다. (b)는 절삭이 종료된 시점에서의 암석내부 와이어쏘 곡선 형태에 대한 결과이다. 다음 절에서는 이와 같이 구축된 모델을 이용하여 와이어쏘를 이용한 암반절삭의 특징과 절삭 성능을 향상시킬 수 있는 방안에 대해 살펴보고자 한다.

### 2.4 와이어쏘 절삭 특징 및 성능 향상 방안

Table 1과 같은 절삭조건으로 절삭을 했을 경우 예상되는 시간에 따른 암석내부의 와이어쏘 곡선 형태를 Fig. 12에 나타내었고, 이를 이용하여 구간별(100초 간격) 절삭면적과 누적 절삭면적을 계산한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 최종 절삭 면적은 약 1.56m<sup>2</sup>로 당초 예상 절삭 면적인 2.3m<sup>2</sup>(=천공깊이(1m)×천공사이 거리(2.3m))의 68% 밖에 미치지 못함을 알 수 있다. 시간당 절삭면적을 나타내는 절삭속도(m<sup>2</sup>/h)는 400초까지 증가하다가 그 이후로는 급격히 감소해서 800초 이후에는 절삭이 거의 이루어지지 않게 된다. 이를

Table 2 Wire saw machine specifications

Max. RPM of main pulley	4000 RPM
Max. power of engine	100 HP
Max. pressure of feeding system	250 Bar
Diameter of main pulley	875 mm
Diameter of aux. pulley	260 mm

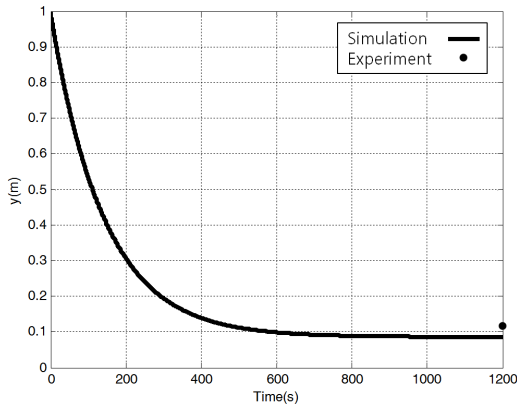


Fig. 10 Wire saw cutting test in field

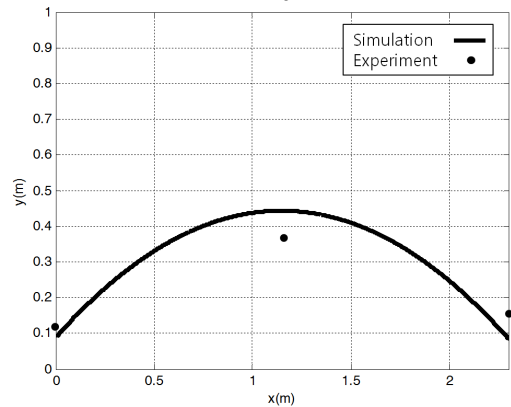
Table 1 Test parameters

$l_r$ (m)	$l_p$ (m)	$d_w$ (m)	$T$ (kN)	$v_f$ (m/s)	$v_w$ (m/s)	$y_0$ (m)	$k_p$ (m <sup>2</sup> /N)
2.3	2.58	0.011	7	$6.15 \times 10^{-4}$	22.9	1	$5.6 \times 10^{-10}$





(a) Change of  $y$  with time



(b) Wire saw curve shape at 1200 second

**Fig. 11** Cut depth change and wire saw curve shape comparing simulation and test result

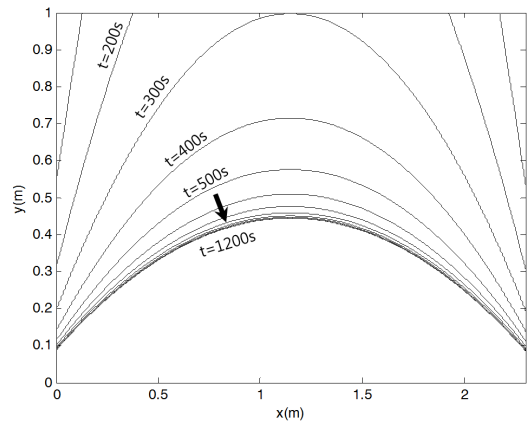
수치적으로 나타내기 위하여 절삭시간에 따른 절삭량 비율을 Table 3에 정리하였는데 800초 이전까지 이미 전체 절삭 면적의 약 97%가 절삭되었음을 알 수 있다. 따라서 절삭효율을 높이기 위해서는 절삭량을 미리 예측하여 적절한 시점에서 절삭을 중단하는 것이 중요하다.

다음은 제어 가능한 절삭 조건들에 대한 파라미터 스테디를 통해 절삭 조건이 절삭 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 와이어쏘의 인장력, 피드속도, 와이어쏘 속도 등은 와이어쏘 머신의 운전 조건이고, 천공 직경과 천공 깊이는 절삭 전에 결정되는 세팅 조건에 해당된다.

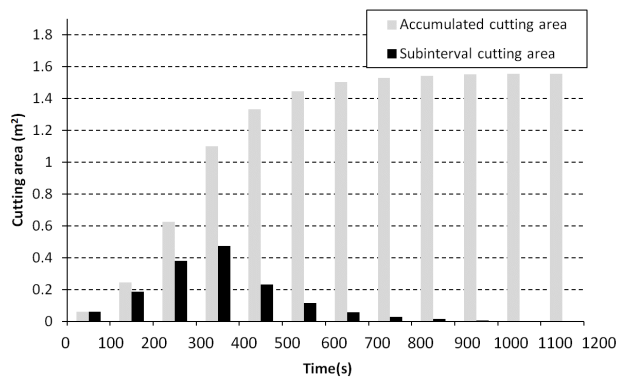
일반적으로 절삭 성능이 높아지면 와이어쏘 비드에 가해지는 압력 및 접촉횟수가 많아지므로 와이어쏘의 수명은 줄어들게 된다. 본 연구에서는 적용대상이 공기단축을 무엇보다도 우선시 하는 터널굴착현장이라는 점을 감안하였을 때 와이어쏘의 수명 보다는 절삭성능이 훨씬 중요한 인

**Table 3** Proportion of cutting amount with time

time (s)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
%	3.8	15.8	40.3	70.7	85.7	93.0	96.7	98.4	99.3	99.7	99.9



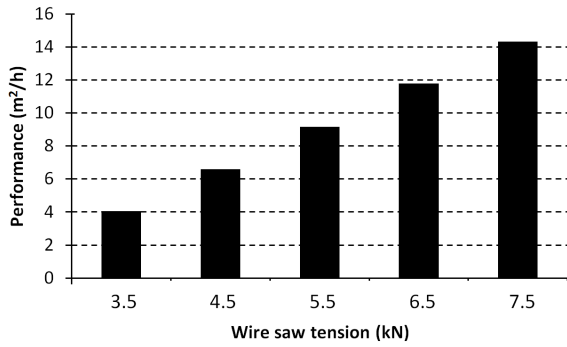
**Fig. 12** Wire saw curve shapes with time



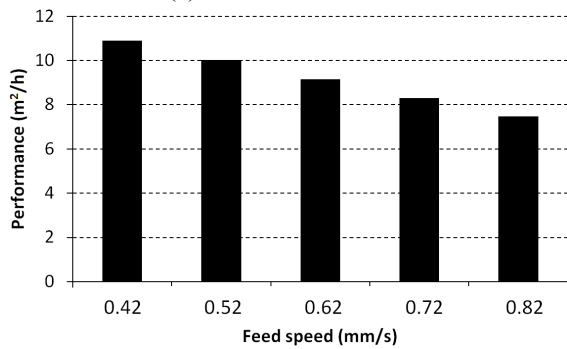
**Fig. 13** Subinterval and accumulated cutting area with time

자가 된다. 따라서 본 연구에서는 절삭 조건에 따른 와이어쏘 수명에 대한 영향은 고려하지 않았다.

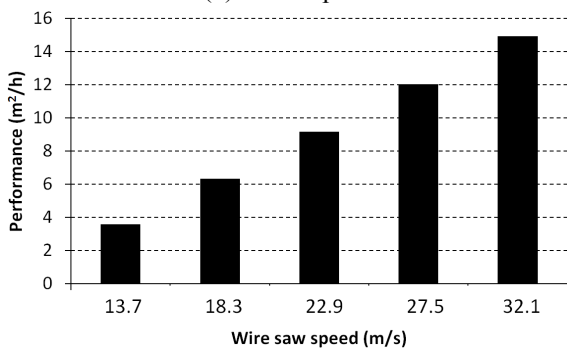
Fig. 14는 와이어쏘 인장력( $T$ ), 피드속도( $v_f$ ), 와이어쏘 속도( $v_w$ )에 따른 절삭성능 변화를 보여준다. 여기서 절삭성능을 나타내기 위한 지표로서 시간당 절삭면적( $m^2/h$ )을 사용하였고, 각 조건의 값은 실제 현장에서 적용 가능한 값을 사용하였다. 참고로 와이어쏘의 인장력의 경우 최대 허용인장력은 10kN 이내이다. 본 결과에서 볼 수 있듯이 와이어쏘 인장력과 와이어쏘 속도가 높을수록 절삭성능이 향상되고, 피드속도가 낮을수록



(a) Wire saw tension



(b) Feed speed

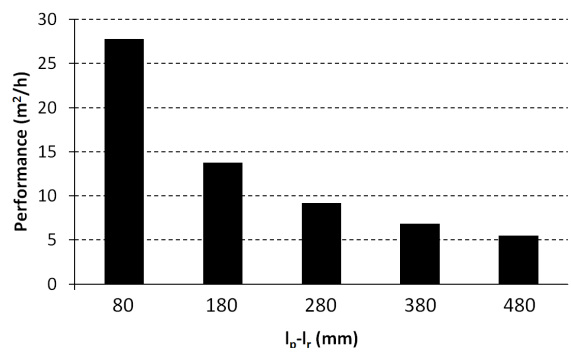


(c) Wire saw speed

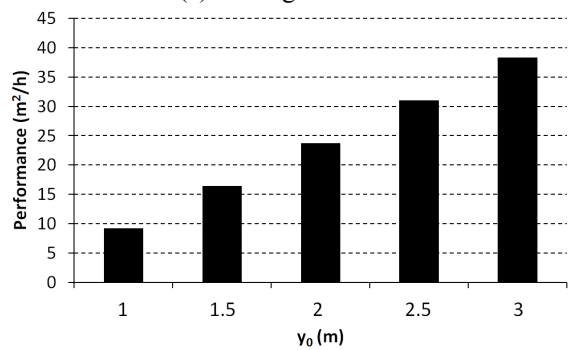
Fig. 14 Cutting performance according to cutting conditions

Table 4 Summary of sensitivity analysis regarding cutting conditions

Cutting conditions	Sensitivity
	$\left( = \frac{\text{Change rate of performance}}{\text{Change rate of condition}} \right)$
Wire saw tension	2.22
Feed speed	-0.33
Wire saw speed	2.38



(a) Boring diameter



(b) Boring depth

Fig. 16 Cutting performance according to setting conditions

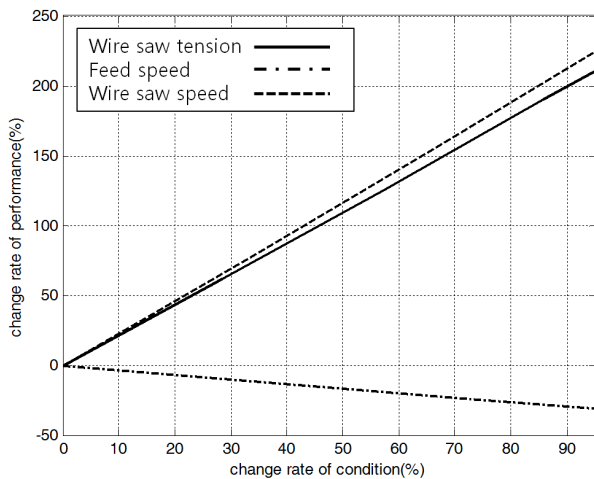


Fig. 15 Sensitivity regarding cutting conditions

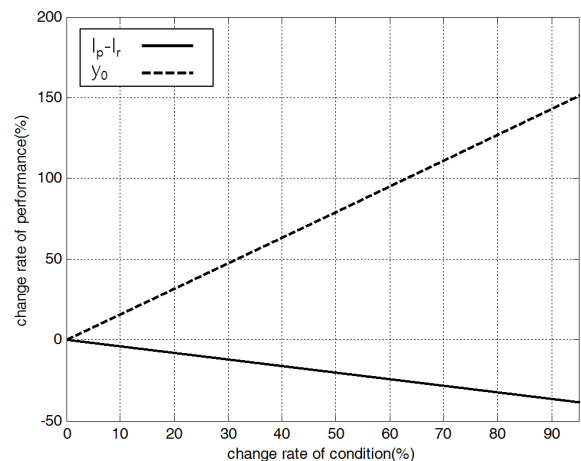


Fig. 17 Sensitivity regarding setting conditions

**Table 5** Summary of sensitivity analysis regarding setting conditions

Setting conditions	Sensitivity ( $= \frac{\text{Change rate of performance}}{\text{Change rate of condition}}$ )
$l_p - l_r$	-0.15
$y_0$	1.59

절삭성능은 향상됨을 알 수 있다. 조건별 절삭 성능에 대한 민감도 분석 결과를 Fig. 15와 Table 4에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 와이어쏘 인장력과 와이어쏘 속도에 대한 절삭성능의 민감도는 높고 피드속도에 대한 민감도는 상대적으로 낮음을 알 수 있다.

다음은 세팅 조건인 천공 직경 및 천공 깊이와 관계가 있는 ( $l_p - l_r$ )와  $y_0$ 가 절삭성능에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 천공 직경이 클수록 ( $l_p - l_r$ )을 크게 할 수 있고, 천공 깊이가 깊을수록  $y_0$ 를 크게 할 수 있다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 ( $l_p - l_r$ )를 작게 하고  $y_0$ 를 크게 할수록 절삭성능이 높아짐을 알 수 있다. Fig. 17과 Table 5는 각 조건에 대한 민감도 분석 결과를 보여준다.

### 3. 결론

본 논문에서는 터널굴착 시 발생하는 소음 및 진동을 저감시키기 위해 사용되는 와이어쏘 절삭에 있어서, 마찰압력에 의한 마모 원리와 와이어쏘가 암반에 작용하는 힘의 평형식을 이용하여 절삭 모델을 구축한 후 시험 결과와의 비교를 통해 이를 검증하였다. 구축된 모델을 이용하여 터널굴착용 와이어쏘의 절삭 특징을 살펴보고 주요 절삭 인자가 절삭 성능에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 절삭 시간이 아무리 경과해도 최종 절삭 면적은 당초 예상했던 절삭면적에 미치지 못한다. 본 연구에서 살펴본 예의 경우에는 최종 절삭 면적은 예상 절삭 면적의 68%에 불과했다.

둘째, 절삭 속도는 어느 시점까지는 증가하다가 그이후로는 급격히 감소한다. 본 연구의 경우, 1200초 동안 진행된 절삭 중 400초까지 절삭 속도가 증가하여 전체 절삭 면적의 약 71%가 이미 절삭되었다. 따라서 절삭 효율을 높이기 위해서는 예상 절삭량과 소요시간을 고려해서 작업 지속 시간을 결정하는 것이 필요하다.

셋째, 절삭 성능 향상과 비례 관계인 주요 절삭 인자는 와이어쏘 인장력, 와이어쏘 속도, 천공 깊이이고, 반비례 관계인 인자는 피드속도, 플리와 암반사이의 거리이다. 이들 인자가 절삭 성능에 미치는 영향정도는 와이어쏘 속도, 와이어쏘 인장력, 천공 깊이, 피드 속도, 플리와 암반사이 거리 순으로 크다. 이 중에서 와이어쏘 속도와 인장력은 절삭성능에 대한 영향정도가 가장 큰 인자로서 와이어쏘 머신의 성능과 관련이 있다. 즉, 와이어쏘 메인플리의 회전속도 및 토크를 동시에 높일 수 있도록 구동원의 출력이 높아야 한다. 현재 일반적으로 사용되는 와이어쏘 머신의 출력은 100HP 내외로써 고성능 터널굴착을 위해서는 이보다 더 큰 출력이 요구된다. 절삭 전 세팅 조건인 천공 깊이는 절삭성능에 대한 영향정도가 와이어쏘 속도와 인장력 다음으로 큰 인자로서 깊게 할수록 절삭성능을 높일 수 있다. 그러나 천공 깊이가 증가하면 천공 작업에 소요되는 시간 또한 증가하기 때문에 이를 고려해서 천공 깊이를 결정하여야 한다.

### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK1506C1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Ahn S. K., 2014, "Low Cost-High Performance Technology Development for Railroad Infrastructure," KRRRI Research Report 2014-106, Korea Railroad Research Institute, pp. 316-429.
- (2) Gustafsson N., 2011, "Wire cutting as a complement to drill and blast in vibration sensitive environments," Master's Thesis, Chalmers University of Technology.
- (3) Liedke T., Kuna M., 2011, "A macroscopic mechanical model of the wire sawing process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, pp. 711-720.
- (4) Palathra T., Adomaitis R., 2008, "Process Modeling of a Wire Saw Operation," ISR Technical Report 2008-9, Institute for Systems Research.
- (5) Lee J. H., Sakong M., Lee K. C., Ahn S. K., 2015, "Jig Apparatus for Tunnel Excavation using



Wire-Saw,” KR-10-1508205, 27<sup>th</sup> of May, pp. 11~13.

(6) <http://www.diaquidiamondtools.com>

(7) Foretec C&S Corporation, 2014, “Concrete

Demolishing System(Model No. FT-DX120),” User’s Manual.

(8) Preston F. W., 1927, *Journal of the Society of Glass Technology*, 11 247.