

## 1축 로드셀 배열을 사용한 픽 커터의 3축 절삭력 측정방법

강 훈<sup>1</sup> · 장진석<sup>2</sup> · 박진영<sup>3</sup> · 조정우<sup>4</sup> · 정명식<sup>5</sup> · 이재욱<sup>†</sup>

(Received July 19, 2016 ; Revised November 25, 2016 ; Accepted November 28, 2016)

### Method for measuring 3-axis cutting force of a pick cutter using the single-axis load cell array

Hoon Kang<sup>1</sup> · Jin-Seok Jang<sup>2</sup> · Jin-Young Park<sup>3</sup> · Jung-Woo Cho<sup>4</sup> · Myeong-Sik Jung<sup>5</sup> · Jae-Wook Lee<sup>†</sup>

**요약:** 본 연구에서는 고가의 3-D 로드셀을 대체하기 위해 1축 압축 로드셀 배열을 사용한 새로운 픽 커터 3축 절삭력 측정방법을 제안하였다. 제안한 절삭력 측정방법은 4개의 1축 압축 로드셀과 숄더 볼트를 통해 기계적 구속을 만들어 3축 절삭력을 측정할 수 있다. 유한요소해석을 통해 제안한 새로운 절삭력 측정방법을 타당성을 확인하였으며, 최종적으로 실제 선형 암반절삭 시험을 통해 제안한 새로운 측정방법의 3축 힘 측정 정확도를 확인하였다. 시험 결과 새로운 절삭력 측정방법은 상대오차가 약 6% 이내이므로, 기존의 3-D 로드셀을 대체할 수 있음을 확인하였다. 더불어, 기존 고가의 3-D 로드셀 대비 약 20-30%의 비용만으로 구축 가능하므로 절삭력 측정에 사용되는 비용을 크게 줄일 수 있다.

**주제어:** 3-D 로드셀, 3축 절삭력, 로드셀 배열, 선형 암반절삭 시험, 1축 로드셀

**Abstract:** A new method for measuring the 3-axis cutting forces of a pick cutter by substituting costly 3-D load cells is proposed in this paper. The proposed cutting force measurement method is capable of estimating the 3-axis cutting forces through mechanical constraints using four single-axis compressive load cells and shoulder bolts. The feasibility of the proposed method was verified by finite element analysis, and the accuracy of the force measurement of the developed force measurement device was investigated by conducting linear rock cutting tests. The tests showed that the new cutting force measurement method is able to measure 3-axis cutting forces with a relative error of approximately 6%. These results imply that the new method could be a suitable alternative to conventional 3-D load cells. In addition, it will allow a significant reduction of approximately 20-30% in the costs required for measuring the cutting force when compared to conventional 3-D load cells.

**Keywords:** 3-D load cell, 3-axis cutting force, Load cell array, Linear rock cutting test, Single-axis load cell

## 1. 서론

로드헤더(Roadheader)는 터널공사, 석탄채굴 등에 주로 사용되는 대형 광산기계이며, Figure 1과 같이 회전하는 커팅헤드(cutting head)를 사용하여 연속적으로 암반을 제거할 수 있는 장치이다. 커팅헤드는 수십 개의 픽 커터(pick cutter)가 특정 패턴으로 배열되어 있으며, 텅스텐 카바이드(tungsten carbide)로 구성된 픽 커터는 끝단(tip)은 커팅헤드의 회전동력을 전달받아 암반을 제거한다. 암반을 제거할 때 픽 커터 끝단은 Figure 1과같이 암반으로부터 3축 방향으로 절삭력(cutting force)을 받는다. 여기서, 절삭력은 드래

그 힘(drag force,  $F_d$ ), 수직력(normal force,  $F_n$ ), 구동력(side force,  $F_s$ )로 분류할 수 있으며, 서로 직교하는 3축 방향 힘을 의미한다. 픽 커터 끝단에 작용하는 절삭력은 로드헤더의 용량 설계 및 운용조건 결정 및 커팅헤드의 픽 커터 배열설계에 사용되는 핵심 정보이기 때문에 로드헤더의 효과적인 설계 및 운용을 위해서는 대상 암반에 따른 픽 커터에 작용하는 절삭력을 반드시 파악해야 한다.

기존의 연구에서는 픽 커터에 작용하는 3축 절삭력을 측정하기 위하여 Figure 2와 같이 선형 절삭 시험기(LCM, Linear Cutting Machine)에 3-D 로드셀(load cell)을 장착하여

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9526-177X>): Ultimate Manufacturing R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, 320, Techno sunhwan-ro, Dalseong-gun, 42994, Korea, E-mail: jaewk@kitech.re.kr, Tel: 053-580-0186

1 Ultimate Manufacturing R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: hkang@kitech.re.kr, Tel: 053-580-0177

2 Construction Equipment R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: jsjang@kitech.re.kr, Tel: 053-607-1109

3 Technology Convergence R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: jinyupark@kitech.re.kr, Tel: 053-580-0190

4 Technology Convergence R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: chojw1665@kitech.re.kr, Tel: 053-580-0185

5 Region Advanced Manufacturing Technology Agency, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: msjeong@kitech.re.kr, Tel: 053-607-1109

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

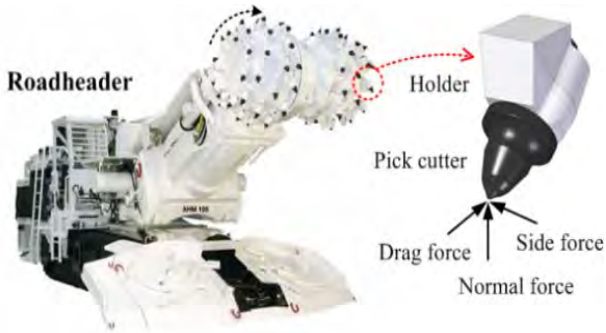


Figure 1: Roadheader(left) and the cutting forces acting on the pick cutter tip(right) (redrawn from [1])



Figure 2: Conventional method for cutting force measurement with a 3-D load cell (redrawn from [2])

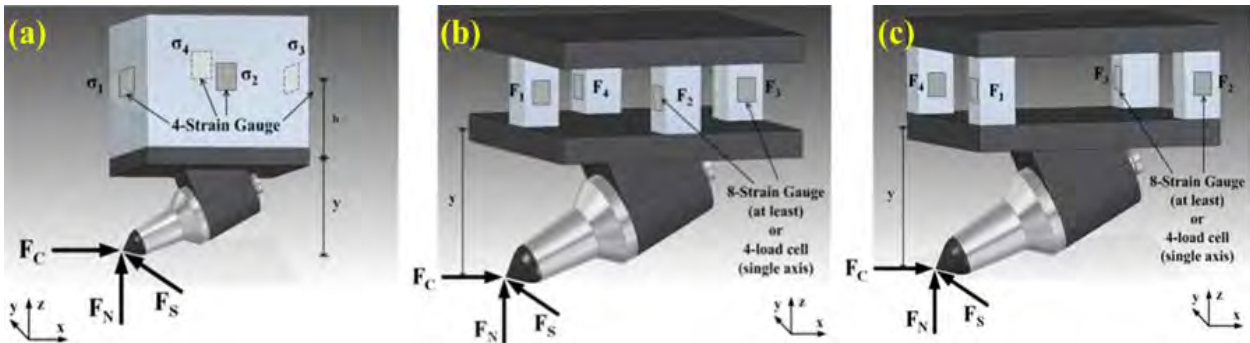
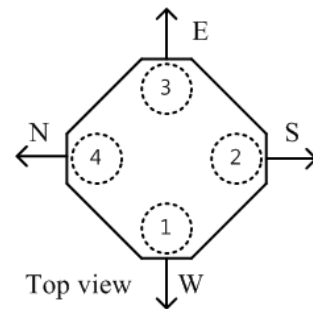


Figure 3: Force measurement methods with strain gauges in concept design



(a) 3-D load cell assembly



(b) Arrangement of 3-D load cells

Figure 4: Force measurement method with four 3-D load cells (captured and redrawn from [9])

사용하였다[2]-[8]. 하지만 픽 커터에 작용하는 절삭력은 수십 [kN] ~ 수백 [kN] 이므로 이를 측정하기 위해서는 상당히 고가의 3-D 로드셀이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다수의 1축 압축 로드셀 배열을 사용한 저가의 새로운 3축 절삭력 측정방법을 제안하였다. 제안한 절삭력 측정방법의 타당성을 확인하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 최종적으로 실제 선형 암반절삭 시험을 통해 제안한 새로운 측정방법의 3축 힘 측정 정확도를 확인하였다.

## 2. 새로운 3축 절삭력 측정방법

### 2.1 개념설계 과정

저가로 픽 커터에 작용하는 3축 절삭력을 측정하기 위한 방법으로 Figure 3과 같이 스트레인게이지(strain gauge)를 사용한 방법들이 개념설계 초기단계에서 고려되었다.

그 방법들을 살펴보면 Figure 3 (a)와 같이 대형 육면체 구조에 4개의 스트레인게이지를 설치하는 방법, Figure 3 (b)와 같이 마름모 형태로 배열된 사각기둥에 스트레인게이지를 적용하는 방법, Figure 3 (c)와 같이 사각형 모서리에 배열된 사각기둥에 스트레인게이지를 적용하는 방법 등이 있었다. 그러나 스트레인게이지 기반의 측정방법은 스트레인게이지 설치오차에 따라 힘 측정오차가 증가하고, 암반 절삭시험 과정에서 절삭된 암석파편에 의해 스트레인게이지가 파손될 우려가 있으므로 최종적으로는 선택되지 않았다.

개념설계를 진행하면서 문헌조사를 통해 Figure 4와 같이 4개의 3-D 로드셀 배열을 사용하여 디스크 커터(disc cutter)와 픽 커터의 3축 절삭력을 측정한 사례를 검토하였으며 [8][9], 본 연구에서는 이를 수정·보완하여 새로운 절삭력

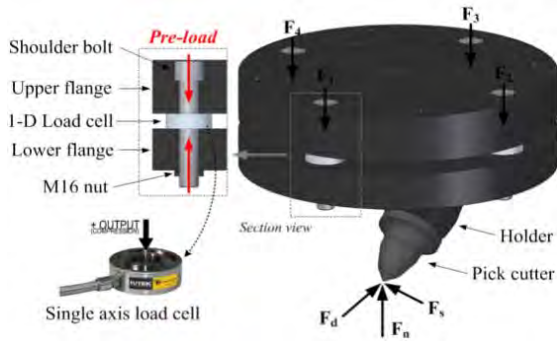


Figure 5: New force measurement device with four 1-D load cells and pre-loads on shoulder bolts

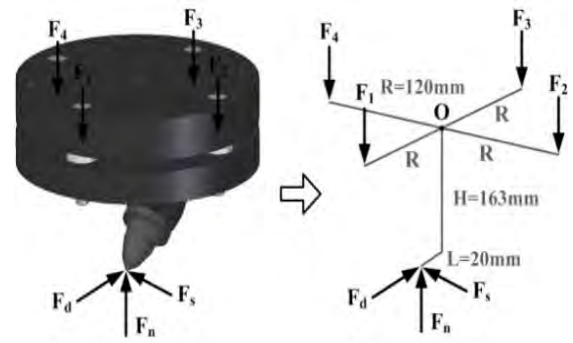


Figure 6: Free body diagram of the new force measurement device for cutting force calculation

측정방법을 제안하였다.

### 2.2 3축 절삭력 측정 장치 구조 및 절삭력 계산

개념설계를 통해 새롭게 제안한 절삭력 측정 장치는 Figure 5와 같이 4개의 1축 압축 로드셀과 4개의 숄더 볼트(shoulder bolt)를 통해 3축 절삭력을 측정하는 구조이다. 즉, 기존의 3-D 로드셀 배열을 사용하는 절삭력 측정 구조(Figure 4 (a))에서 3-D 로드셀 대신 도넛 형태(donut type)의 1축 압축 로드셀과 숄더 볼트를 적용한 구조이다. 여기서, 1축 압축 로드셀은 스트레인게이지 기반의 로드셀이며, 압축 하중만을 측정 가능하기 때문에 볼트 조임(bolt tightening)을 통해 사전에 압축하중을 작용시켜(pre-load) 인장하중 발생을 방지하였다. 또한, 숄더 볼트는  $F_d$ ,  $F_s$ 에 의한 전단력(shear force)을 견디기 위해 적용되었다.

제안한 절삭력 측정방법에서 픽 커터에 작용하는 3축 절삭력은 식 (1)-(3)을 사용하여 계산할 수 있다. 식 (1)-(3)은 Figure 6의 자유물체도(free body diagram)에서 힘과 모멘트 평형으로부터 유도된 식이다. 이론상으로 3축 방향 절삭력을 계산하기 위해서는 최소 3개의 하중 데이터가 필요하지만 본 연구에서는 4개의 하중 데이터를 사용하여 하중 측정에서 발생하는 오차를 보정할 수 있도록 하였다[10].

$$F_d = \frac{R}{H}(F_3 - F_1) + \frac{L}{H}(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (1)$$

$$F_n = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (2)$$

$$F_s = \frac{R}{H}(F_4 - F_2) \quad (3)$$

## 3. 3축 절삭력 측정방법 검증 및 고찰

### 3.1 유한요소 해석을 통한 검증

새롭게 제안한 절삭력 측정방법의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위한 해석모델은 Figure 7과 같으며, 상부의 6-자유도(DOF)가 고정된 상태에서 픽 커터 끝단에 설정한 절삭력이 작용하도록 설정하였다. 또한, 각 요소간의 상호작용은 접촉(contact) 조

건을 사용하였다. 1축 압축 로드셀에 발생하는 인장력 방지를 위한 압축하중(pre-load)은 숄더 볼트의 프리텐션(pretension)으로 구현되었고, 로드셀에 작용하는 압축하중은 미리 정의된 영역의 평균 하중(section force)으로부터 계산되었다. 유한요소해석은 Abaqus CAE를 사용하여 수행되었으며, 설계범위( $F_d = 15$  kN,  $F_n = 10$  kN,  $F_s = 5$  kN) 내에서 다양한 절삭력을 픽커터 끝단에 작용시켜 측정된 결과를 계산하였다.

유한요소해석을 통한 하중계산 결과는 Figure 8과 같다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 적용 하중( $F_d$ ,  $F_n$ ,  $F_s$ )과 유한요소해석을 통해 로드셀로부터 계산한 하중( $F_{da}$ ,  $F_{na}$ ,  $F_{sa}$ )이 거의 유사함을 알 수 있다. 정리해보면, 새롭게 제안한 절삭력 측정방법은  $F_d$ ,  $F_n$ 의 경우 약 1% 이내의 상대오차 범위 내에서 절삭력을 정확하게 계산하였고,  $F_s$ 의 경우 약 6% 이내의 상대오차 범위 내에서 절삭력을 측정할 수 있었다. 따라서 제안한 절삭력 측정방법이 타당하다는 것을 알 수 있다. 더불어, Figure 9는 절삭력 조건 2(Case 2 in Figure 8)에서 각각의 로드셀에 작용하는 수직응력( $\sigma_{33}$ )을 보여준다.

### 3.2 암반절삭 실험방법 및 과정

유한요소해석을 통해 새롭게 제안한 절삭력 측정방법의 타당성을 확인하였으므로, 실제로 절삭력 측정 장치를 제작하여 암반을 절삭할 때 픽 커터 끝단에 발생하는 3축 절삭력을 측정하였다. 3축 절삭력 측정실험을 위하여 Figure 10 (a)와 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치에서 절삭력 측정 장치는 선형 절삭 시험기 상단에 볼트로 고정되었으며, 유압으로 하단의 슬라이딩 테이블(sliding table)을 이동시켜 선형 절삭 시험을 수행하였다. 또한, 측정된 절삭력, 특히  $F_d$ 의 정확성을 확인하기 위하여 슬라이딩 테이블과 유압 액추에이터 사이에 별도의 독립적인 1축 로드셀이 설치되었다. 3축 절삭력 측정 정확도를 평가하기 위해서는 3축 방향 모두에 대한 정확도 검증이 필요하지만, 식 (1)-(3)에서 알 수 있듯이  $F_d$ 와  $F_s$ 의 측정원리가 동일하고  $F_n$  방향 측정방법은 특별히 규명할 필요가 없기 때문에 본 연구에서는  $F_d$  측정 정확도만을 평가하여 3축 방향 전체 절삭력 측정 정확도를 평가하였다.

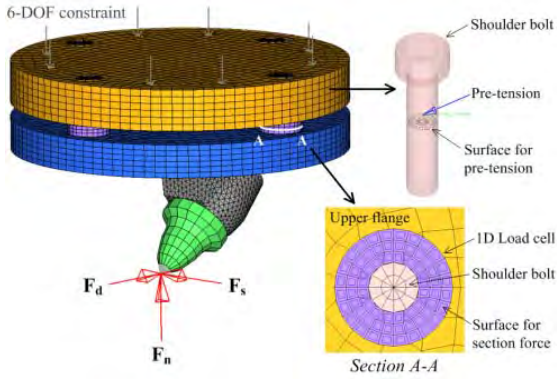


Figure 7: Finite element model of the new force measurement device

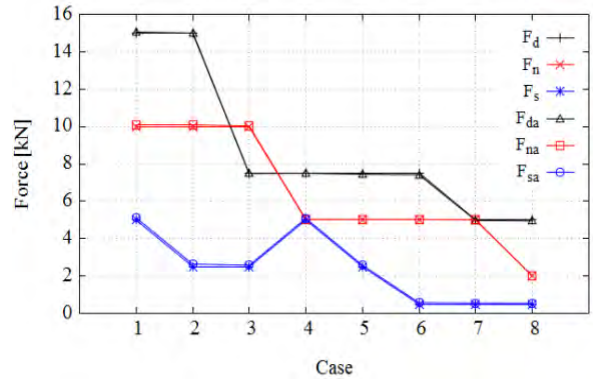
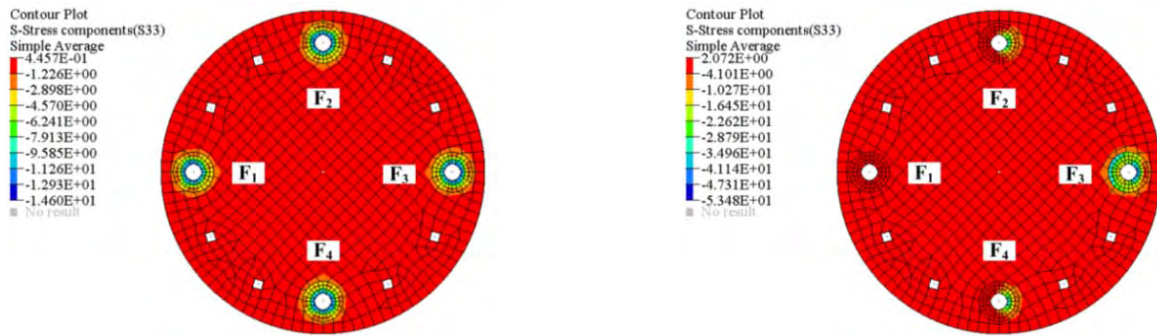


Figure 8: Results of the finite element analysis for the new force measurement device



(a)  $\sigma_{33}$  at pre-loading by pretension of shoulder bolts in finite element analysis

(b)  $\sigma_{33}$  at acting on the cutting force (Case 2:  $F_d=15$  kN,  $F_n=10$  kN,  $F_s=0.5$  kN)

Figure 9: Stress contour ( $\sigma_{33}$ ) observed at the four single-axis load cells

픽 커터의 3축 방향 절삭력을 측정하기 위해 절삭력 측정 장치의 성능특성을 알아보기 위하여 암석 시편 대신 철 구조물을 사용하여 힘 측정을 수행하였다. 그 결과는 Figure 10 (b)와 같으며, 측정결과 최대 히스테리시스 (hysteresis)는  $\pm 1.2\%$ , 비선형성(non-linearity)은  $\pm 2.5\%$ , 비반복성(non-repeatability)은  $\pm 0.7\%$  정도를 나타내는 것을 확인하였다. 비록 기존의 3-D 로드셀 (히스테리시스  $\pm 0.05\%$ ) 보다는 낮은 성능을 나타내지만, 비교적 정확하게 3축 방향 힘을 측정할 수 있음을 확인하였다.

픽 커터의 3축 방향 절삭력을 측정하기 위하여 Figure 10 (c)와 같이 약 2개월 동안 양생과정을 거쳐 강도가 각기 다른 3종류 (연암, 보통암, 및 중경암)의 시멘트 모르타르 시편 (cement mortar specimen)을 준비하였으며, 절삭 대상 표면을 평탄하고 균일하게 만들기 위해 수차례 사전 절삭(pre-conditioning)을 수행하였다. 실제 암반 표면을 절삭하면서 3축 방향 절삭력을 측정하는 모습은 Figure 10 (d)와 같다.

### 3.3 실험결과 및 고찰

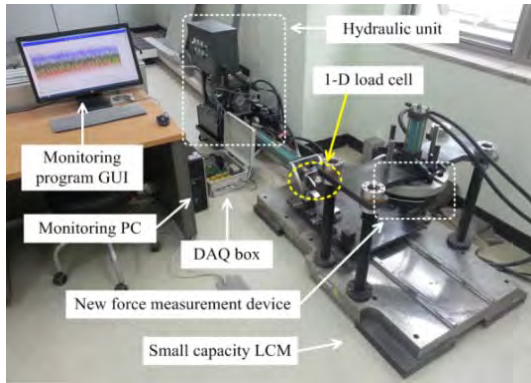
개발된 절삭력 측정 장치를 사용하여 연암 시편을 절삭하는 픽 커터의 3축 절삭력 측정 결과를 Figure 11에 나타내었으며, 절삭조건은 절삭 깊이(cutting depth)  $d = 4$  mm, 절삭 간격(cutting spacing)  $s = 8$  mm 이다. 측정결과를 보면 개발한 절삭력 측정 장치가 시간에 따른 하중 데이터를 잘

측정하는 것을 확인할 수 있다. 절삭력 측정 장치의 3축 절삭력 측정 정확도를 평가하기 위해서 시편강도와 절삭 조건에 따른 드래그 힘(drag force)을 측정하였으며, 그 결과는 Figure 12와 같다. 여기서,  $F_d$ 는 개발된 절삭력 측정 장치로부터 계산된 드래그 힘을 의미하며,  $F_{d0}$ 는 슬라이딩 테이블과 유압 액추에이터 사이에 설치된 1축 로드셀로 측정된 실제 드래그 힘을 의미한다.

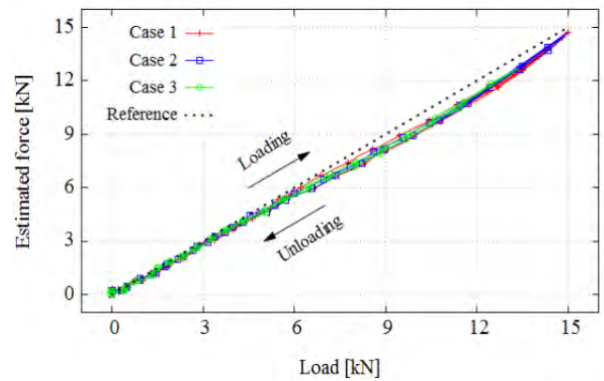
절삭력 측정결과로부터 알 수 있듯이, 개발된 절삭력 측정 장치로부터 측정된 드래그 힘( $F_d$ )과 실제 픽 커터 끝단에 작용하는 드래그 힘( $F_{d0}$ )과 매우 유사한 값을 나타내며, 평균 상대오차는 약 6% 이다. 특히, 측정 장치로부터 측정된 드래그 힘이 실제 값보다 항상 작게 나타나는데, 그 이유는 개발된 측정 장치가 기계적 구속과 변형에 의해 힘을 측정하기 때문에 절삭력이 측정 장치 자체를 변형시키는데 사용되기 때문이다. 더불어, 시편의 강도가 강해질수록 상대오차가 작은 것처럼 보이지만 이는 평균 절삭력의 크기가 크기 때문이며, 실제 절대오차는 약 50-250 N으로 시편 강도에 상관없이 비슷하게 관찰되었다.

## 4. 결론

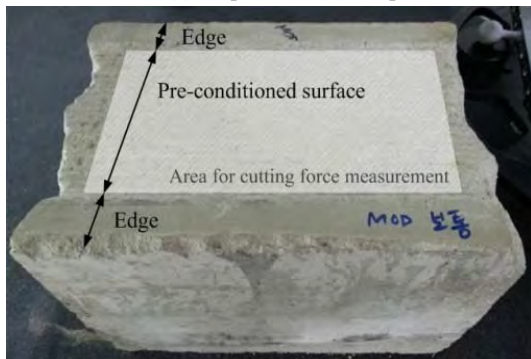
본 연구에서는 픽 커터에 작용하는 3축 방향 절삭력을 측정하기 위하여 사용되고 있는 고가의 3-D 로드셀을 대체



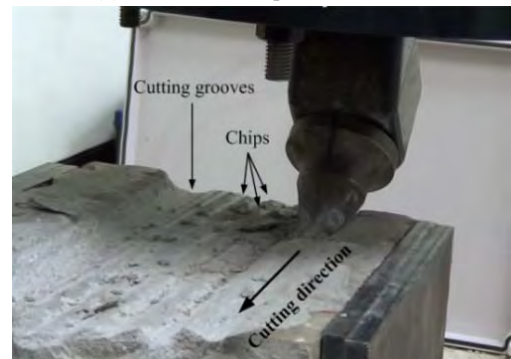
(a) Experimental set-up



(b) Measurement performance curve



(c) Pre-conditioned cement mortar specimen



(d) Rock cutting test

Figure 10: Experimental set-up and rock cutting test

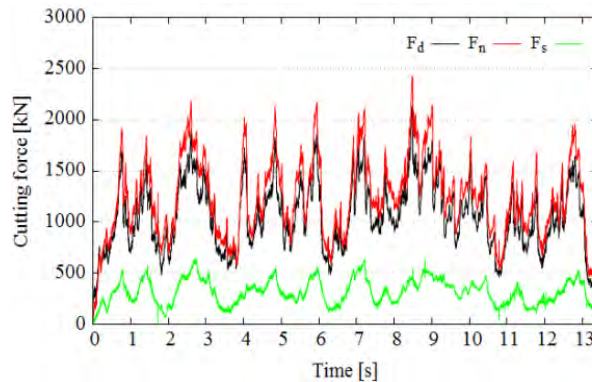


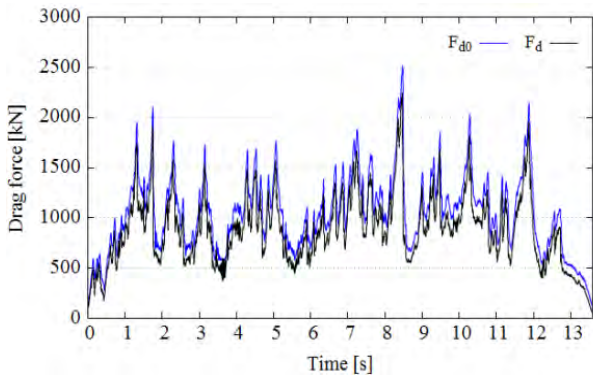
Figure 11: Example of estimated cutting forces at low strength specimen ( $d=4, s=8$ )

하기 위하여, 1축 로드셀 배열을 사용한 새로운 저가의 3축 절삭력 측정방법을 제안하였다. 유한요소해석을 통해 제한한 방법의 타당성을 확인한 후, 실제 선형 압반 절삭 시험을 수행하였다. 실험결과 개발한 절삭력 측정 장치는 약 6%의 상대오차를 가지고 3축 절삭력을 측정할 수 있음을 확인하였다. 토목 및 광산분야에 있어서 암반의 절삭력 측정은 매우 높은 정확도 보다는 암반절삭 시 발생하는 대략적인 힘의 크기와 평균 절삭력을 파악하는 것이 보다 중요하므로, 본 연구에서 개발한 1축 로드셀 배열을 사용한 3축 절삭력 측정방법이 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 더불어 소개된 절삭력 측정방법은 기존 고가의

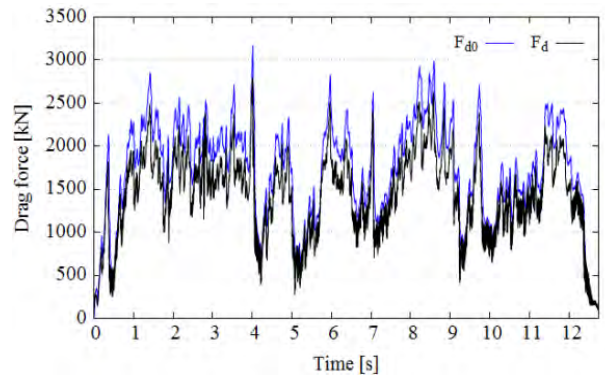
3-D 로드셀 대비 약 20-30%의 비용만으로 구축 가능하므로 절삭력 측정에 사용되는 비용을 크게 줄일 수 있다. 개발된 방법으로 측정된 절삭력은 향후 로드헤더의 용량 설계 및 운용조건 결정과 커팅헤드의 픽 커터 배열 설계에 활용될 예정이다.

## 후기

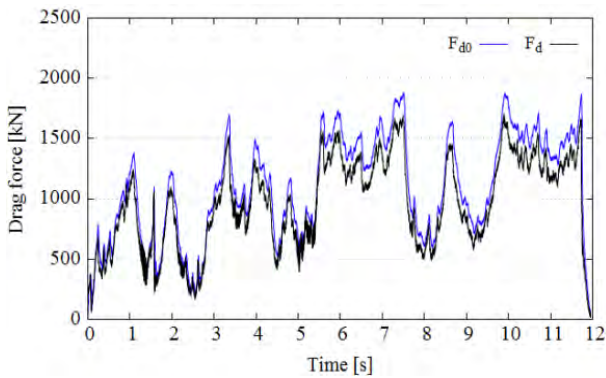
본 연구는 한국생산기술연구원 기관고유사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 본 연구는 2016년도 전기학술대회에 발표한 논문을 수정 및 확장한 논문입니다.



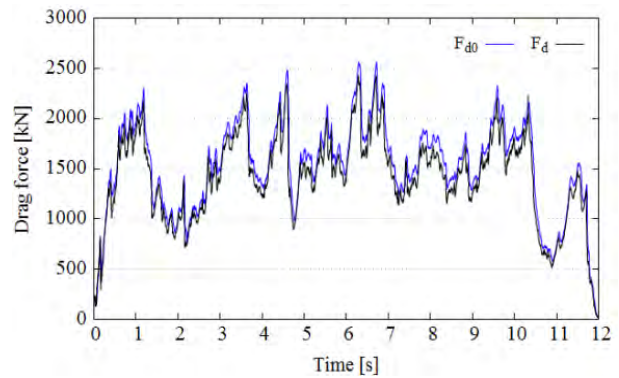
(a) Low strength,  $d = 4$ ,  $s = 8$



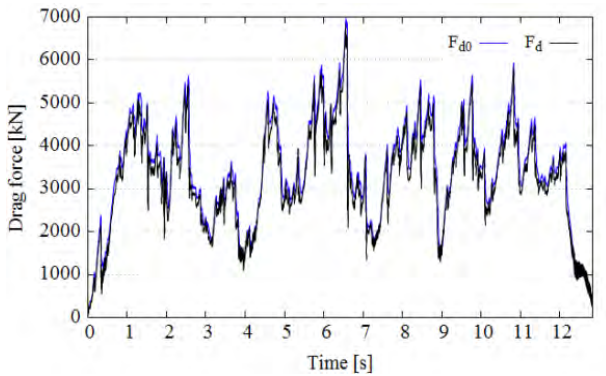
(b) Low strength,  $d = 4$ ,  $s = 12$



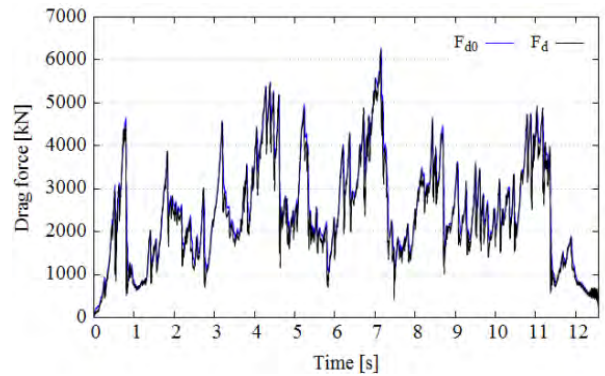
(c) Moderate strength,  $d = 4$ ,  $s = 8$



(d) Moderate strength,  $d = 6$ ,  $s = 12$



(e) Medium strength,  $d = 4$ ,  $s = 8$



(f) Medium strength,  $d = 6$ ,  $s = 12$

**Figure 12:** Comparison of the actual drag forces ( $F_{d0}$ ) with the estimated drag forces ( $F_d$ )

## References

- [1] Sandvik Mining Catalogues and Technical Brochures <http://pdf.directindustry.com/pdf/sandvik-mining-40142.html>, Accessed July 06, 2016.
- [2] J. W. Cho, S. Jeon, H. Y. Lee, and S. H. Jang, "Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 35, pp. 37-54, 2013.
- [3] N. Bilgin, M. A. Demircin, H. Copur, C. Balci, H. Tuncdemir, and N. Akcin, "Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, no. 1, pp. 139-156, 2006.
- [4] C. Balci and N. Bilgin, "Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machine," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 44, no. 3, pp. 468-476, 2007.
- [5] R. Gertsch, L. Gertsch, and J. Rostami, "Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 44, no. 2, pp.

238-246, 2007.

- [6] H. Tuncdemir, N. Bilgin, H. Copur, and C. Balci, "Control of rock cutting efficiency by muck size," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45, no. 2, pp. 278-288, 2008.
- [7] C. Balci, "Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 423-435, 2009.
- [8] M. Z. Abu Bakar and L. Gertsch, "Evaluation of saturation effects on drag pick cutting of a brittle sandstone from full scale linear cutting tests," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 34, pp. 124-134, 2013.
- [9] M. Z. Abu Bakar, *Saturation Effects on Mechanical Excavatability of Roubidoux Sandstone under Selected Rock Cutting Tools*, Ph.D. Dissertation, Geological Engineering, Missouri University of Science and Technology, USA, 2012.
- [10] M. Entacher, G. Winter, T. Bumberger, K. Decker, I. Godor, and R. Galler, "Cutter force measurement on tunnel boring machine-System design," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 31, pp. 97-106, 2012.