

ORIGINAL ARTICLE

로드헤더용 픽커터의 형상변수와 암반조건에 대한 통계적 분석

장수호¹, 강태호², 이철호², 최순욱^{2*}

¹한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원, ²한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

Statistical Analysis of Geometric Parameters and Rock Conditions of Pick Cutters for Roadheaders

Soo-Ho Chang¹, Tae-Ho Kang², Chulho Lee², and Soon-Wook Choi^{2*}

¹Senior Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding author: soonugi@kict.re.kr

Received: September 20, 2023

Revised: October 3, 2023

Accepted: October 4, 2023

ABSTRACT

In this study, a total of 326 data on a variety of geometric parameters of pick cutters and the corresponding cuttable rock conditions were collected and built as a database. Statistical analysis of the database showed that there is a significant positive correlation between the parameters that define the geometry of a pick cutter, especially between the parameters related to the length of a pick cutter and the geometry of a tungsten carbide insert. The diameter of a pick cutter shaft was also strongly correlated with the geometry of the inserts. On the other hand, it was difficult to find a clear correlation between the parameters for the rock conditions defined by the four conditions and the geometric parameters of pick cutters, which may be due to the uncertainty of the rock mass and the fact that the application of a pick cutter is presented as a range rather than a numerical single value. However, the mean values of geometric parameters of pick cutters tend to increase as a rock mass becomes harder. However, the pick length parameters are found to decrease as a rock mass becomes harder, which may be a way to reduce the moments that can occur when using long pick cutters in a hard rock condition.

Keywords: Pick cutter, Roadheader, Statistical analysis, Database, Tungsten Carbide

초록

본 연구에서는 픽커터의 다양한 형상변수들과 그에 따른 절삭 가능 암반 조건들에 대한 총 326개의 정보를 수집하고 데이터베이스를 구축하였다. 이와 같이 구축한 데이터베이스를 대상으로 통계분석을 실시한 결과, 픽커터의 형상을 정의하는 변수들 사이에는 유의미한 양(+)의 상관관계가 존재하는 것으로 나타났다. 특히, 픽커터의 길이 관련 변수들과 텅스텐 카바이드 삽입재의 형상 변수들 사이의 상관관계가 높게 나타났다. 픽커터 샤프트의 직경도 삽입재의 형상변수들과 밀접한 상관관계를 나타내었다. 반면, 네 가지 조건으로 정의한 암반 조건에 대한 변수와 픽커터의 형상 변수들 사이에는 뚜렷한 상관관계를 확인하기 어려웠다. 이는 암반의 불확실성으로 인해 픽커터의 적용 대상을 수치가 아닌 적용 가능 범위로 제시했기 때문인 것으로 사료된다. 단, 암반이 강해질수록 픽커터 형상변수들의 평균값이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 픽커터의 길이 관련 변수들은 암반이 강해질수록 오히려 작아지는 것으로 나



타났는데, 이는 경암반에서 길이가 긴 픽커터를 사용할 때 발생할 수 있는 모멘트의 발생을 줄이기 위한 방안으로 사료된다.

핵심어: 픽커터, 로드헤더, 통계 분석, 데이터베이스, 텅스텐 카바이드

1. 서론

로드헤더(roadheader)는 TBM (Tunnel Boring Machine)과 함께 대표적인 기계화시공(mechanized tunnelling) 장비이다. 로드헤더는 1930년대 초에 구 소련에서 개발된 이후로 선진국을 중심으로 전 세계적으로 터널과 광산에 널리 활용되고 있다 (Deshmukh et al., 2020, Park et al., 2013). 특히, 로드헤더는 TBM과 비교할 때, 터널 단면의 형상 변화에 대한 대응력과 이동성이 좋을 뿐만 아니라 장비 제작기간이 짧고 초기 투자비용이 적다는 것이 큰 장점이다(Chang, 2015).

반면, 로드헤더는 굴착에 필요한 반력(reaction force)을 로드헤더 장비 자체의 자중(self-weight)으로부터 얻기 때문에, TBM과 달리 한 번에 넓은 단면을 굴착할 수 없고 그에 따라 굴착이 가능한 암반 강도도 제한적이다(Park et al., 2013). 이로 인해 TBM은 전단면(full-face) 굴착장비, 그리고 로드헤더는 부분단면(partial-face) 굴착장비로 분류된다.

로드헤더와 관련된 연구는 크게 세 가지 세부 분야로 구분될 수 있다. 첫 번째로 로드헤더 전면에 장착되어 암반을 굴착하는 부분인 커팅헤드(cutting head)의 최적 설계(Cho et al., 2023, Eyyuboglu et al., 2005, Hekimoglu et al., 1991)와 관련된 연구, 두 번째로 커팅헤드 설계와 로드헤더의 굴착성능 예측에 사용되는 픽커터(pick cutter)의 절삭력(cutting forces)을 산출하기 위한 실험적·수치해석적 연구(Bilgin et al., 2006, Choi et al., 2016, Choi et al., 2014a, 2014b, Hekimoglu and Ozdemir, 2004, Kim et al., 2022, Shahabedin et al., 2018), 그리고 암반조건에 따른 로드헤더의 굴착성능 예측 모델 개발(Bilgin et al., 2004, Comakli et al., 2014, Ebrahimabadi et al., 2015, Kahraman and Kahraman, 2016) 등으로 구분된다.

이와 같이 로드헤더의 효율적인 적용과 활용을 위해서 커팅헤드의 최적 설계와 그에 따른 굴착성능의 예측이 매우 중요한 설계과정을 알 수 있다. 특히, 커팅헤드에는 암반에 접촉되어 굴착하는 소모성 절삭도구(cutting tool)인 픽커터가 수십 개 이상 장착된다(Fig. 1 및 Fig. 2). 즉, 픽커터는 로드헤더의 굴착성능뿐만 아니라 공사기간과 공사비용을 좌우할 수 있는 핵심 부품이다.

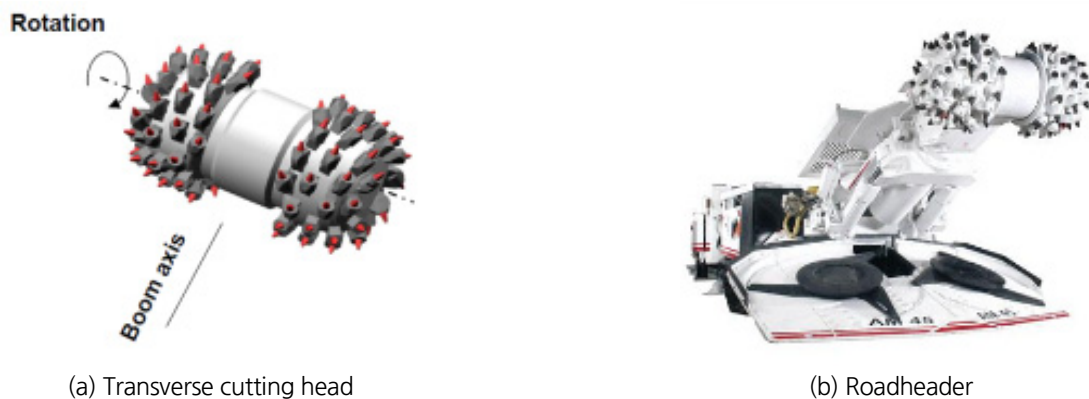


Fig. 1. Roadheader with a transverse cutting head (modified from Pichler, 2011)

현재까지 로드헤더로 굴착이 가능한 최대 암반 강도는 약 160 MPa 수준이나(Deshmukh et al., 2020), 픽커터의 절삭 성능과 내

마모 성능의 한계로 인하여 압축강도가 100 MPa 이하인 비교적 연암 조건에서 효과적인 것으로 보고되고 있다(Tunnel Business Magazine, 2011). 하지만 픽커터의 절삭성능을 좌우하는 텅스텐 카바이드 삽입재(tungsten carbide insert)의 탈락과 손상을 방지하기 위하여 삽입재 하부에 하드페이싱(hardfacing) 보강을 실시한 연구(Chang et al., 2017) 등의 극히 일부 사례를 제외하고, 픽커터의 최적 선정과 성능 향상에 대한 연구는 좀처럼 이루어지지 않고 있다. 또한 픽커터와 텅스텐 카바이드 삽입재의 형상과 재질은 암반 특성에 따라 달리 적용되어야 하지만 이에 대한 기술적인 자료가 좀처럼 제시되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 픽커터의 다양한 형상변수들과 그에 따른 절삭 대상 암반 조건들에 대한 데이터베이스(database)를 구축하였다. 이와 같이 구축한 데이터베이스를 바탕으로 각각의 픽커터 형상변수들과 암반 조건들의 상관관계를 통계적으로 분석하여, 시공조건에 적합한 픽커터를 선정하기 위한 자료를 제시하고자 하였다.

2. 픽커터 데이터베이스의 구축

본 연구에서는 전 세계적으로 픽커터를 생산하고 있는 제작사들의 자료들을 수집하고 각각의 정보들을 수치화하여 데이터베이스로 구축하였다. 본 연구에서 구축한 데이터베이스에는 총 326개의 픽커터 정보가 포함되어 있다. 이때, 컨티뉴어스마이너(continuous miner), 도로포장 절삭장비, 지하연속벽(diaphragm wall) 시공장비 등은 제외하고 터널이나 광산에 사용되는 로드헤더에 장착되는 픽커터들의 정보만을 포함하였다.

픽커터는 Fig. 2와 같이 구성되며, 여기서 가장 중요한 부분은 암반과 접촉하여 높은 응력을 받는 텅스텐 카바이드 삽입재이다. 텅스텐 카바이드 삽입재는 매우 높은 수준의 내마모성과 내충격성을 가져야 한다. 픽커터의 헤드(head)와 샤프트(shaft)는 열처리된 강재로 만들어지며 텅스텐 카바이드 삽입재를 지지하고 커터 박스(box)를 보호하는 역할도 한다. 또한 커터 박스는 설계된 픽커터의 절삭 각도에 부합되도록 커팅헤드에 용접·부착된다(Park et al., 2013). 픽커터와 텅스텐 카바이드의 형상과 크기는 암반조건에 따라 달리 적용되는데, 암반이 약할 경우에는 헤드가 좁은 형태의 픽커터를 사용하여 관입 성능을 높이는 반면, 경암에서는 큰 충격에 대한 저항성과 내구성을 확보할 수 있도록 헤드와 삽입재의 폭이 넓은 픽커터를 사용하는 것이 일반적이다(Fig. 3).

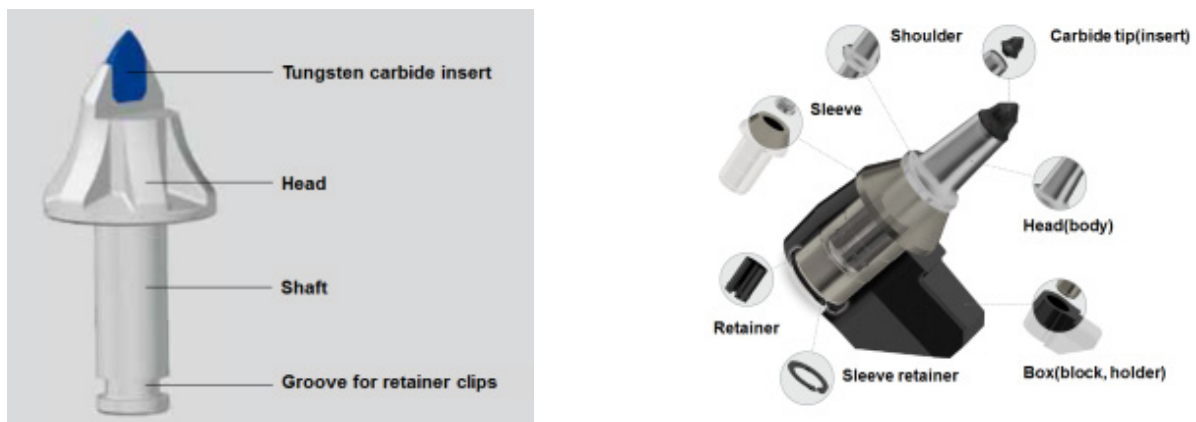


Fig. 2. Main components of a pick cutter (modified from Sandvik, 2010)

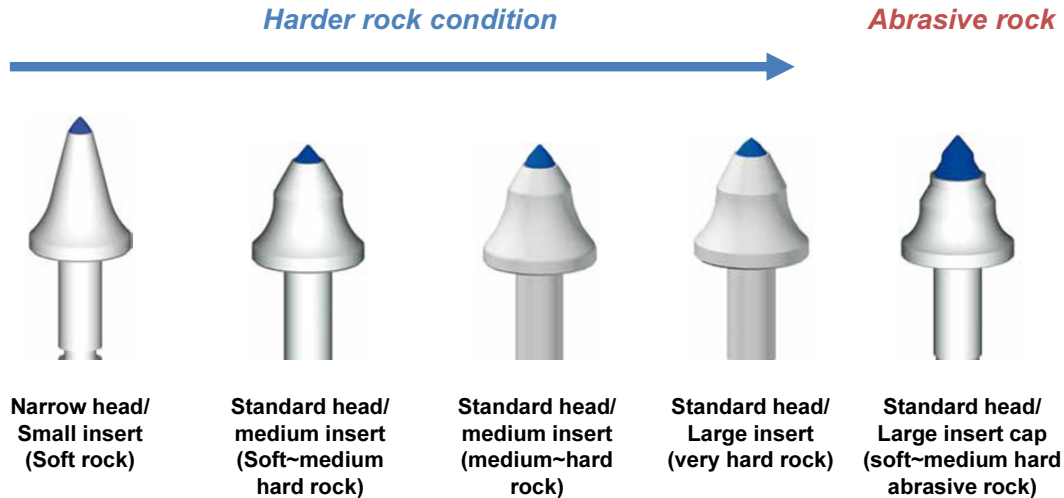


Fig. 3. Pick cutter shapes depending on rock conditions (Park et al., 2013)

본 연구에서는 데이터베이스에 포함된 픽커터들의 3차원 도면을 제작하였고, 이로부터 총 7개의 형상변수들에 대한 수치들을 정보로 저장하였다. 본 연구에서는 픽커터의 7개는 형상변수들을 픽커터 두부의 폭(A), 픽커터 두부의 길이(B), 픽커터 샤프트의 총 길이(C), 커넥터 부분을 제외한 픽커터 샤프트의 길이(D), 텅스텐 카바이드 삽입재의 폭(E)과 길이(F), 그리고 픽커터 샤프트의 직경(LD)으로 정의하여 구분하였다(Fig. 4). 이때 각각의 단위를 mm로 설정하였다.

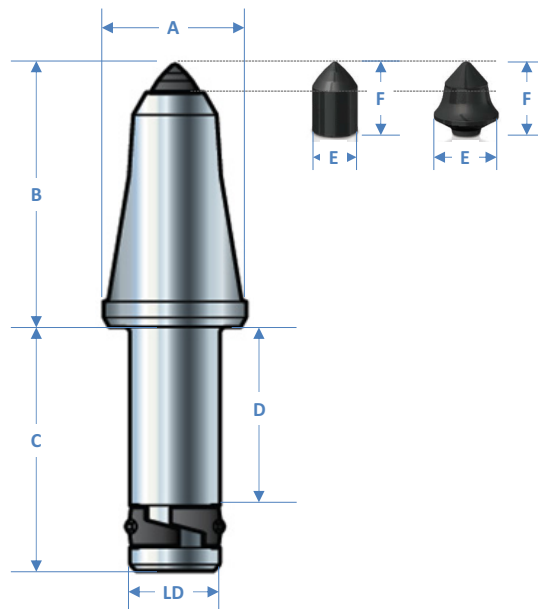


Fig. 4. Definition and notation of geometric parameters of a pick cutter

제작사들은 공통적으로 픽커터에 의해 절삭이 가능한 암반 조건을 크게 네 가지 조건으로 분류하고 있으며, 일부 용어의 차이는 있으나 연암(soft rock), 보통암(medium rock), 경암(hard rock) 및 극경암(very hard rock 또는 extreme rock)으로 분류된다. 본 연구에서는 통계적 분석을 위해 연암을 1, 보통암을 2, 경암을 3, 그리고 극경암을 4로 하여 데이터베이스에 분류하여 저장하였다.

3. 픽커터 형상변수와 절삭조건에 대한 통계분석

3.1 데이터 분포

본 연구에서 구축한 데이터베이스에 포함된 픽커터의 적용 대상 암반조건 정보는 연암 15%(49개), 보통암 27%(88개), 경암 31%(101개), 극경암 27%(88개)로서 연암의 정보가 상대적으로 작게 포함되어 있다.

픽커터 형상변수들의 분포를 히스토그램으로 나타내어 분석한 결과, 픽커터 샤프트의 직경(LD)을 제외하고는 정규분포에 가까운 분포를 나타내었다(Fig. 5). 단, 데이터의 분산이 크게 나타났는데 이는 다양한 암반 조건에 적용되는 픽커터들의 정보가 모두 포함되었기 때문인 것으로 사료된다.

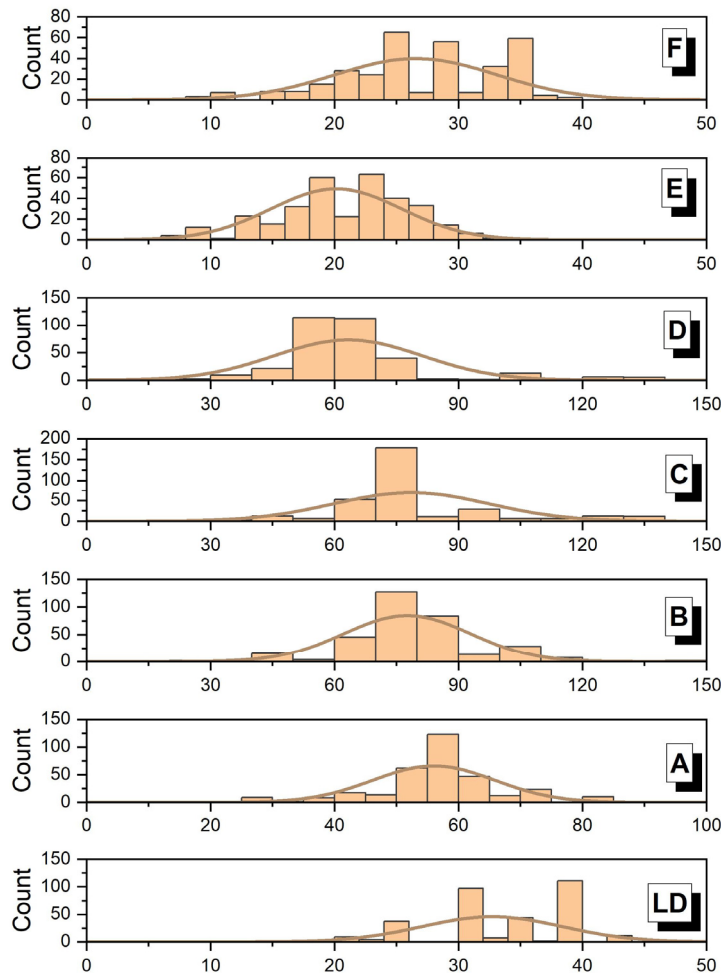


Fig. 5. Statistical distribution of geometric parameters of pick cutters (unit: mm)

3.2 상관관계 분석

본 연구에서 구축한 데이터베이스를 활용하여 각각의 변수들 사이의 상관관계를 분석한 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 여기서 상관관계에 대한 척도로서 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 사용하였다.

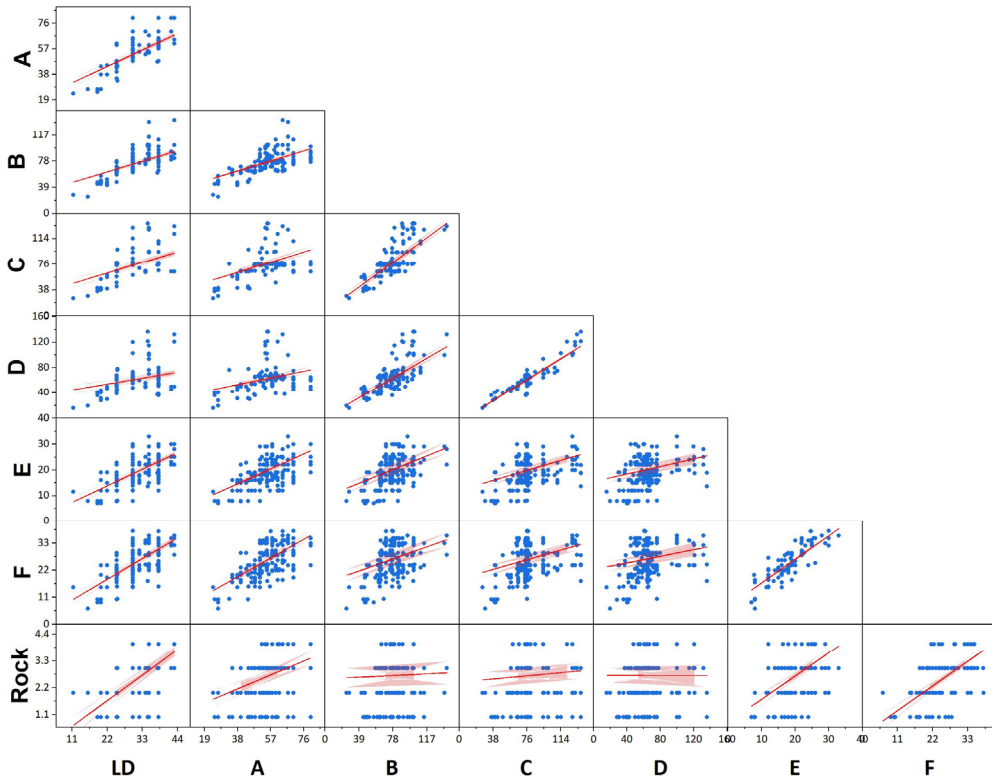


Fig. 6. Scatter plot showing correlations between geometric parameters and rock cutting conditions

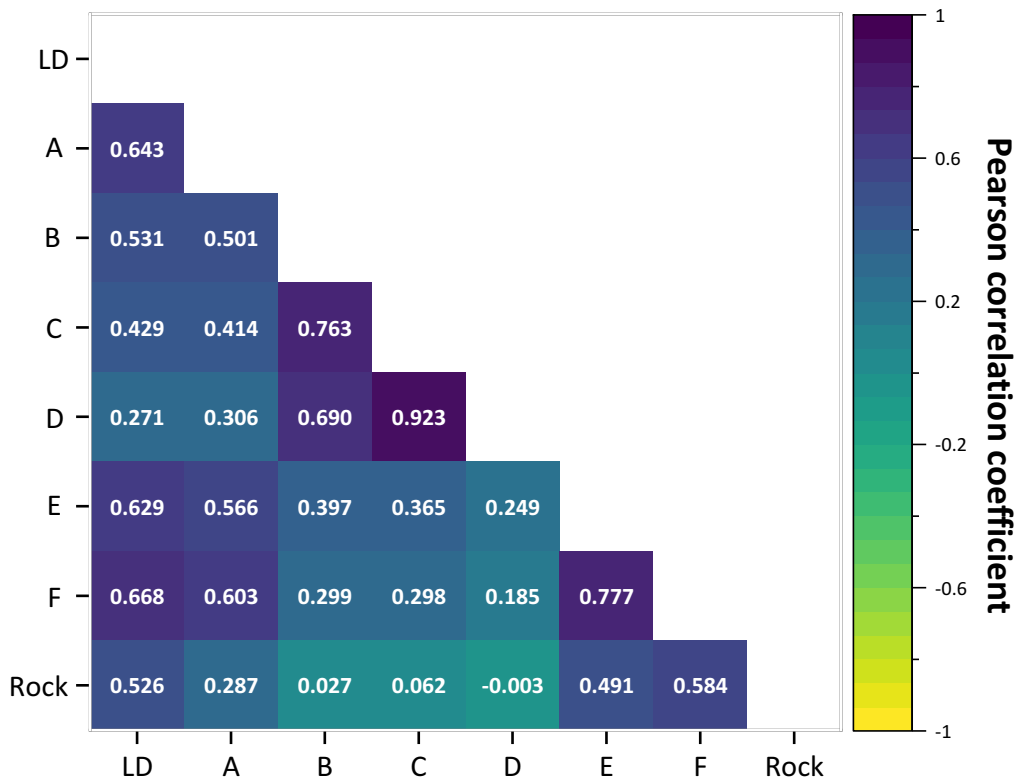


Fig. 7. Heat map showing correlations between geometric parameters and rock cutting conditions

각각의 변수들 사이의 산점도(scatter plot)를 살펴보면, 전반적으로 변수들 사이에는 양(+)의 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 즉, 픽커터의 형상을 정의하는 어느 하나의 변수에 대한 크기가 커지게 된다면, 다른 형상변수들의 길이도 증가해야 한다는 것을 알 수 있다.

반면, 네 가지 암반 조건에 대한 변수와 픽커터 형상변수들 사이의 뚜렷한 상관관계를 확인하기는 어려웠다. 이는 근본적으로 암반 조건이 연속적인 수치가 아닌 네 가지 조건에 대한 각각의 단일 수치이기 때문이며, 이는 Fig. 6의 상관관계 그래프에서도 확인할 수 있다. 특히, 일부 제작사 정보의 경우에는 하나의 픽커터를 다양한 암반 조건(예: 보통암~극경암)에 적용할 수 있는 것으로 제시하고 있어, 통계분석을 위한 데이터의 신뢰도가 떨어진 것으로 판단된다. 하지만 픽커터의 적용 조건을 범위가 아닌 암석의 압축 강도와 같은 수치로 표현하게 되면, 실제 픽커터 적용 시에 암반의 불확실성으로 인해 발생할 수 있는 리스크를 회피하기가 어렵기 때문에 현실적으로 모든 제작사들이 압축강도의 범위로 고려할 수 있는 네 가지 조건으로 적용 조건을 제시한 것으로 사료된다. 결론적으로 통계적인 분석을 통해서 암반 조건에 따른 픽커터의 최적 형상을 추정하는데 한계가 있을 것으로 판단된다.

픽커터들의 형상변수들 사이에는 유의미한 상관관계가 관찰되었는데(Fig. 7), 특히 픽커터의 길이와 관련된 변수인 B, C 및 D 사이의 상관관계가 상대적으로 가장 높게 나타났다. 또한 텅스텐 카바이드 삽입재의 형상을 정의하는 두 가지 변수인 E(폭)와 F(길이) 사이에도 상관계수가 약 0.78로서 양호한 상관관계를 나타내었다. 픽커터 샤프트의 직경(LD)은 텅스텐 카바이드 삽입재의 형상 변수들(E, F)과 커터의 헤드 폭(A)과 상대적으로 밀접한 상관관계를 나타내었다. 일부 제작사에서 픽커터를 선정하는 첫 번째 단계로서 샤프트의 직경을 가장 먼저 결정해야 하는 것으로 제시하고 있는 바, 샤프트의 직경이 중요한 고려 항목임을 알 수 있다. 피어슨 상관계수가 0.6 이상인 8개의 상관관계들을 정리하면 Table 1과 같다. 여기서 추가적으로 샤프트의 길이 변수인 C와 D의 선형회귀함수의 기울기가 0.97로서 1에 가까운 점을 고려하면, 절편값인 17.08은 앞선 Fig. 2에 나타난 리테이너 클립(retainer clip)의 평균 길이에 가까울 것으로 사료된다.

Table 1. Top correlations between geometric parameters of pick cutters (Pearson correlation coefficient > 0.6)

Rank	Linear regression function (unit: mm)	Pearson correlation coefficient
1	$C = 0.97 D + 17.08$	0.923
2	$E = 0.63 D + 3.45$	0.777
3	$C = 0.93 B + 6.10$	0.763
4	$B = 0.59 D + 40.05$	0.690
5	$F = 0.77 LD + 1.45$	0.668
6	$A = 1.11 LD + 19.57$	0.643
7	$E = 0.58 LD + 1.01$	0.629
8	$F = 0.40 A + 4.14$	0.603

3.3 암반 조건에 따른 픽커터 형상변수들의 변화

앞서 살펴본 바와 같이 암반 조건과 픽커터 형상변수들 사이의 밀접한 상관관계를 관찰하기는 어려웠으나, 암반 조건에 따른 픽커터 형상변수들의 변화 양상을 살펴보고자 하였다. 그 결과, 암반이 강해질수록 텅스텐 카바이드 삽입재의 폭(E)과 길이(F)의 평균이 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 8). 마찬가지로 강한 암반일수록 샤프트의 직경(LD)과 헤드의 폭(A)의 평균도 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 9).

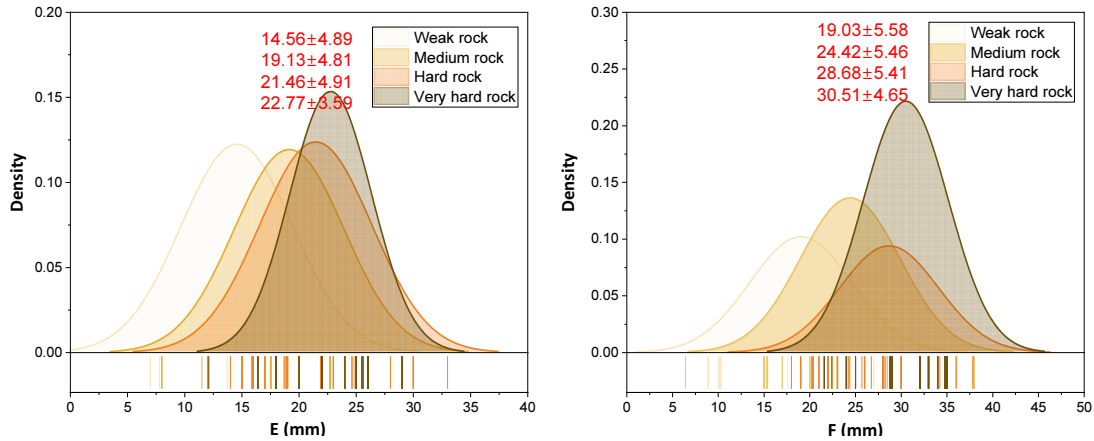


Fig. 8. Size variation of tungsten carbide inserts dependent upon rock conditions

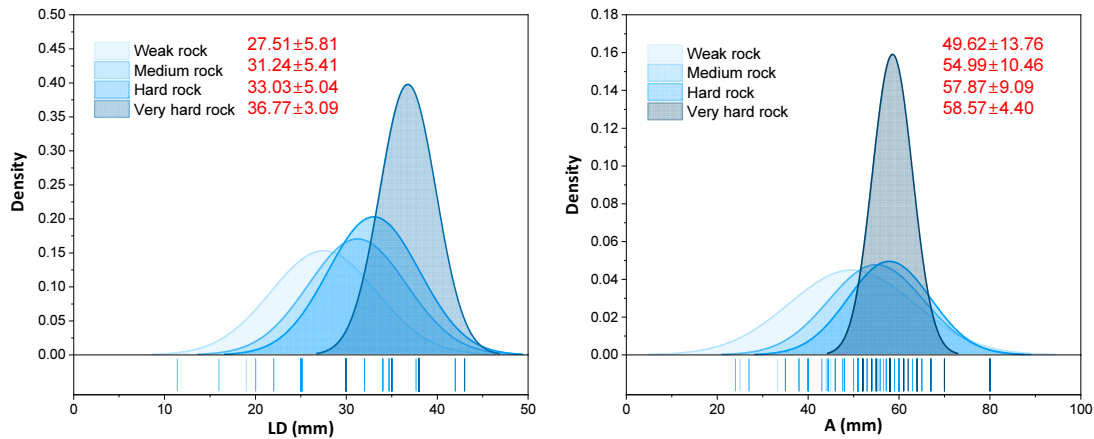


Fig. 9. Variation of shaft diameters and head widths dependent upon rock conditions

반면, 픽커터의 길이와 관련된 세 가지 변수인 B, C 및 D는 연암에서보다 경암이나 극경암일 경우 평균적으로 오히려 작아지는 경향을 나타내었다(Fig. 10). 이는 강한 암반에서 픽커터의 길이가 길어지게 되면 상대적으로 픽커터에 큰 모멘트가 발생할 수 있는 문제를 줄이기 위한 방안으로 추정된다.

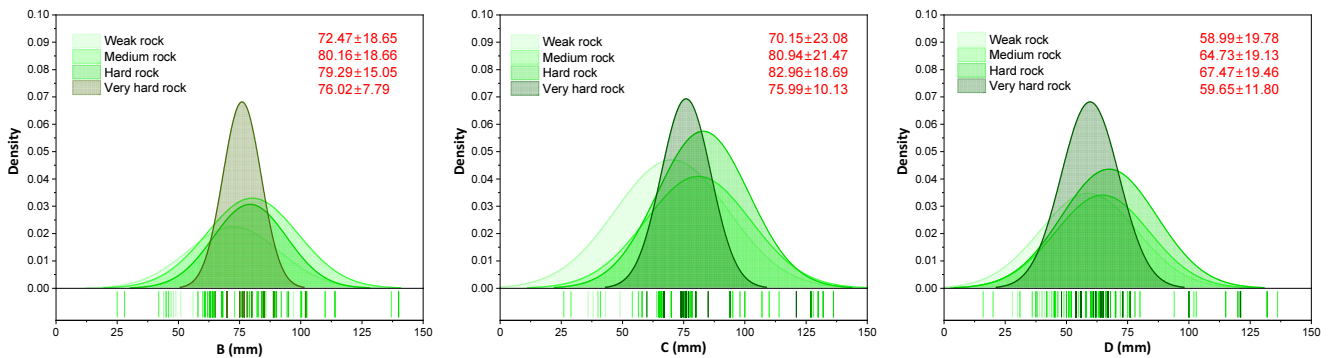


Fig. 10. Variation of pick cutter length parameters dependent upon rock conditions

이상과 같이 분석한 암반 조건에 따른 픽커터의 주요 형상변수들에 대한 평균값의 변화 경향을 나타내면 Fig. 11과 같다.

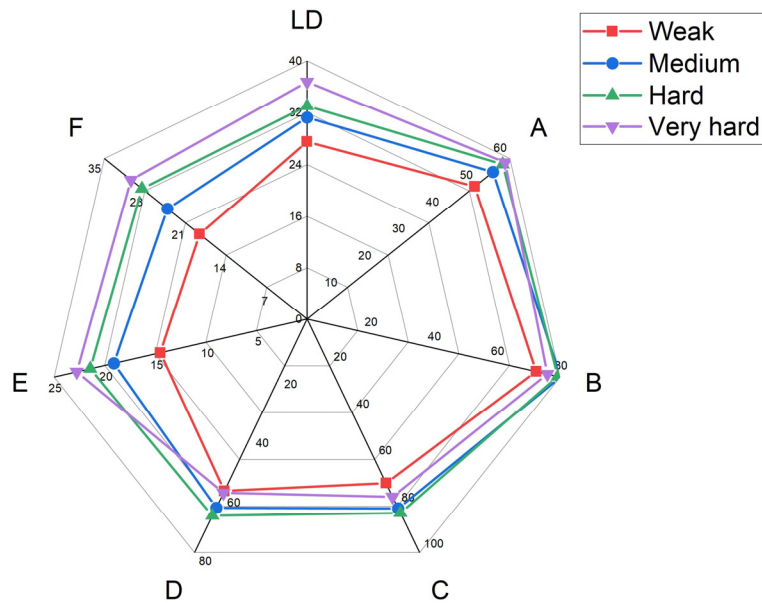


Fig. 11. Mean values of geometric parameters defining pick cutters' shape at different rock conditions (unit: mm)

4. 결론

본 연구에서는 로드헤더에 사용되는 핵심 부품이자 소모성 절삭도구인 픽커터의 다양한 형상변수들과 절삭 대상 암반조건에 대한 통계 분석을 실시하였다. 이를 위해 전 세계적으로 픽커터를 생산하고 있는 제작사들의 자료들을 수집하여 총 326개의 픽커터 정보가 포함된 데이터베이스를 구축하였다.

이와 같이 구축된 데이터베이스를 대상으로 통계 분석을 실시한 결과, 연암, 보통암, 경암 및 극경암의 네 가지 조건으로 정의되는 암반 조건에 대한 변수와 픽커터 형상 변수들 사이에는 뚜렷한 상관관계를 확인하기 어려웠다. 이는 암반의 불확실성으로 인해 픽커터의 적용 대상을 압축강도와 같은 수치로 제시하지 못하고 적용이 가능한 범위로 제시했기 때문인 것으로 판단된다.

반면, 픽커터의 형상을 정의하는 변수들 사이에는 유의미한 양(+)의 상관관계가 존재하는 것으로 나타났다. 특히, 픽커터의 길이와 관련된 세 가지 변수들 사이의 상관관계가 가장 높게 나타났다. 또한 텅스텐 카바이드 삽입재의 형상을 정의하는 두 가지 변수들 사이에도 상관계수가 약 0.78로서 양호한 상관관계를 나타내었다. 일부 제작사에서 픽커터의 선정을 위한 첫 번째 고려 항목으로 제시하고 있는 픽커터 샤프트의 직경도 삽입재의 형상변수들과 커터의 헤드 폭과 밀접한 상관관계를 나타내었다.

암반 조건에 따른 픽커터 형상변수들의 변화 양상을 살펴본 결과, 픽커터의 길이 관련 변수들 제외하고는 강한 암반일수록 형상 변수들의 평균값이 증가하는 경향을 나타내었다. 반면, 픽커터의 길이 관련 변수들은 연암일 경우보다 경암이나 극경암일 경우에 평균적으로 오히려 작아지는 경향을 나타내었는데, 이는 강한 암반에서 길이가 긴 픽커터를 사용함으로써 인해 발생할 수 있는 모멘트의 발생을 줄이기 위한 방안으로 추정된다.

특히, 텅스텐 카바이드는 픽커터의 성능과 가격을 좌우하는 중요한 부분으로서, 본 연구에서 도출한 상관관계를 활용하여 픽커

터의 형상에 적합한 텅스텐 카바이드 삽입재의 형상과 크기를 추정할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 픽커터의 국산화를 위한 자료로도 활용을 기대할 수 있다. 단, 본 연구결과는 픽커터의 재료 특성과 종류를 고려하지 못한 한계가 있으므로, 향후 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “최대 압축강도 100 MPa의 암반 굴착이 가능한 로드헤더용 픽커터 국산화 기술 개발(과제번호: 20230310-001)”의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bilgin, N., Demircin, M.A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H., and Akcin, N., 2006, 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*, 43(1), 139-156.
- Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H., and Erdogan, M., 2004, Some geological and geotechnical factors affecting the performance of a roadheader in an inclined tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(6), 629-636.
- Chang, S.-H., 2015, A Consideration for Mechanical Rock Excavation Focusing on TBM and Roadheader, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 52(5), 531-548.
- Chang, S.-H., Lee, C., Kang, T.-H., Ha, T., and Choi, S.-W., 2017, Effect of hardfacing on wear reduction of pick cutters under mixed rock conditions, *Geomechanics and Engineering*, 13(1), 141-159.
- Cho, M.-G., Cho, J.-W., Kim, M.-G., Jeong, J.-H., and Choi, S.-H., 2023, Operating Process of Transverse Type Roadheader for Tunnel Excavation in Korea, *Tunnel and Underground Space*, 33(1), 1-9.
- Choi, S.-W., Chang, S.-H., Lee, G.-P., and Park, Y.-T., 2014a, Performance estimation of conical picks with slim design by the linear cutting test (II): depending on skew angle variation, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 16(6), 585-597.
- Choi, S.-W., Chang, S.-H., Park, Y.-T., and Lee, G.-P., 2014b, Performance estimation of conical picks with slim design by the linear cutting test (I): depending on attack angle variation, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 16(6), 573-584.
- Choi, S.-W., Kang, T.-H., Chang, S.-H., Lee, C., Lee, G.-P., and Kim, C.-Y., 2016, Performance estimation depending on the insert size of conical picks by linear cutting test, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 18(2), 221-233.
- Comakli, R., Kahraman, S., and Balci, C., 2014, Performance prediction of roadheaders in metallic ore excavation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 38-45.
- Deshmukh, S., Rainaa, A.K., Murthyb, V.M.S.R., Trivedia, R., and Vajrea, R., 2020, Roadheader – A comprehensive review, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95, 103148.
- Ebrahimabadi, A., Azimipour, M., and Bahreini, A., 2015, Prediction of roadheaders' performance using artificial neural network

- approaches (MLP and KOSFM)", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(5), 573-583.
- Eyyuboglu, E.M. and Bolukbasi, N., 2005, Effects of circumferential pick spacing on boom type roadheader cutting head performance, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(5), 418-425.
- Hekimoglu, O.Z. and Fowell, R.J., 1991, Theoretical and practical aspects of circumferential pick spacing on boom tunnelling machine cutting head. *Mining Science and Technology*, 13(3), 257-270.
- Hekimoglu, O.Z. and Ozdemir, L., 2004, Effect of angle of wrap on cutting performance of drum shearers and continuous miners. *Mining Technology*, 113(2), 118-122.
- Kahraman, E. and Kahraman, S., 2016, The performance prediction of roadheaders from easy testing methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1585-1596.
- Kim, M.-G., Song, C.-H., Oh, J.-Y., and Cho, J.-W., 2022, Contribution Assessment of Roadheader Performance Indexes by Analysis of Variance, *Tunnel and Underground Space*, 32(6), 386-396.
- Park, Y.-T., Choi, S.-W., Park, J.-H., Lee, C.-H., and Chang, S.-H., 2013, Excavation Mechanism of Roadheader and Statistical Analysis of its Key Parameters Based on Database, *Tunnel and Underground Space*, 23(5), 428-441.
- Pichler, J., 2011, Mechanical excavation of tunnels with Roadheaders, Lecture note, Post graduate master course - Tunnelling and Tunnel Boring Machine, Politecnico Di Torino, 1-78.
- Sandvik, 2010, Mineral Ground Tools - Mining, Product Catalog, <http://www.miningandconstruction.sandvik.com>.
- Shahabedin, H., Jeong, H., and Jeon, S., 2018, Prediction Model for Specific Cutting Energy of Pick Cutters Based on Gene Expression Programming and Particle Swarm Optimization, *Tunnel and Underground Space*, 28(6), 651-669.
- Tunnel Business Magazine, 2011, Roadheaders in Hard Rock-East Side Access Among North American Projects Employing Roadheader Technology, February 2011, 20-21.