TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol.31, No.6, 2021, pp.440-459
https://doi.org/10.7474/TUS.2021.31.6.440 ISSN: 1225-1275(Print) ISSN: 2287-1748(Online)

TECHNICAL NOTES

일축압축강도에 미치는 암석시편의 형상효과 고찰 및 로드헤더 굴진율 예측모델 수정

김문규[1], 이상민[2], 조정우[3*], 최성현[4], 엄준원[5]

[1,2]한국생산기술연구원 연구원, [3]한국생산기술연구원 수석연구원, [4](주)샌드빅서전 팀장, [5]SK에코플랜트 프로

Investigation on Shape Effect of Rock Specimens to Uniaxial Compressive Strength and Modification of Performance Prediction Model of a Roadheader

Mun-Gyu Kim[1], Sang-Min Lee[2], Jung-Woo Cho[3*], Sung-Hyun Choi[4], and Jun-Won Eom[5]

[1]Researcher, Korea Institute of Industrial Technology
[2]Researcher, Korea Institute of Industrial Technology
[3]Principal researcher, Korea Institute of Industrial Technology
[4]Director, Sandvik Suhjun
[5]Professional, SK ecoplant

***Corresponding author:** chojw1665@kitech.re.kr

Received: December 10, 2021
Revised: December 16, 2021
Accepted: December 17, 2021

ABSTRACT

Roadheaders have begun to be adopted in Korean tunneling sites. The performance prediction models proposed by the manufacturer are used by Korean construction companies. The models use UCS (uniaxial compressive strength) value to predict the net cutting rate, but the rock specimens conducted for the uniaxial compression test have 1.0 of the diameter to length ratio. It has been reported that the specimen shape generally influences the rock strength. The previous references studying the shape effect were cited, and the UCS data of Korean rocks are also updated to analyze the shape effect on UCS. The cause of effect was discussed by previous theory. The change amount of UCS values of Korean rocks was estimated by the data, and the modified prediction model for NCR was finally suggested.

Keywords: Roadheader, Net cutting rate, Uniaxial compressive strength, Performance prediction, Shape effect, Modified prediction model

초록

최근 대형 로드헤더가 국내 터널현장에 도입되면서 해외 제조사의 굴진율 예측모델에 대한 관심이 증가하고 있다. 현재 주로 사용되는 해외모델은 압축강도로부터 굴진율을 예측하고 있는데, 암석 시험편의 직경 대 길이의 비율이 1.0인 시편을 일축압축시험으로 사용하고 있다. 일반적으로 시편의 형상과 치수는 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 기술보고에서는 직경 대 길이 비율에 따른 암석강도의 변화에 대한 기존 연구사례를 조사하였다. 그 형상효과에 대한 원인을 이론적으로 고찰하였다. 이를 토대로 국내 예정된 암종에 대해서 길이 비율에 따른 강도의 변화 양상을 예측하고 굴진율 수정모델을 제시하였다.

핵심어: 형상효과, 일축압축강도, 로드헤더, 순굴진율, 수정 예측모델

© The Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering 2021. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

터널공사현장에서 자주 발생하는 거주민의 민원 문제의 해결책으로 기계화 시공법의 적용을 검토하는 사례가 증가하고 있다. 기계식 굴착공법은 암반을 연속 절삭하여 굴착하므로 발파공법에 비해 상대적으로 굴착 시 발생하는 진동 수준이 매우 낮다. 이 때문에 도심지 터널굴착공법으로 민원유발 원인을 사전에 차단할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Chang, 2015, KSRM, 2021). 기존 공법의 문제점을 해결하는 대안으로서 해외 터널 프로젝트(이탈리아, 호주, 스페인, 호주 등)에 대형 로드헤더 시공이 점차 확대되고 있다(Kim et al., 2021). 국내에서도 도심 교통 인프라 개발사업이 확장되는 추세로서 수도권 광역철도사업 및 도시철도사업에 로드헤더가 곧 도입될 예정이다(Hyundai E&C, 2019, 1. SK ecoplant, 2019).

대형 로드헤더를 적용한 해외 사례에서는 주로 중경암 이하의 암반등급에서 시공에 성공한 사례가 있으나 국내는 아직 로드헤더를 이용한 시공사례가 보고된 바 없다. 그래서 국내 시공사는 제조사가 제공하는 보고서와 데이터에 근거해서 로드헤더의 성능과 굴진율을 예측하여 공사입찰에 활용하고 있다. 현재 주로 사용되는 해외모델은 일축압축강도로부터 굴진율을 예측하고 있는데, 암석 시험편의 길이(L, length) 대 직경(D, diameter)의 비율(L/D)이 1.0인 암석시편을 사용하여 강도를 측정한다(Peinsitt, 2017). 이에 반해 국제표준시험과 국내표준시험법은 직경 대 길이 비율이 1.5~2.5이상인 시편을 일축압축강도 표준시험법으로 정하고 있다(Bieniawski and Bernede, 1979, ASTM, 1995, KSRM, 2005). 암석시편의 형상비율에 따라 일축압축강도가 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Du et al., 2019). 제조사에서 제공한 굴진예측모델을 국내 현장에 적용하여 공기를 정확히 예측하려면, 시편 형상에 따른 암석강도 변화량에 대한 정량적인 분석이 필요하다.

본 보고는 암석시편의 형상효과를 분석하기 위하여 직경 대 길이 비율이 따른 일축압축강도 해외 연구사례를 조사하였다. 그리고 국내 로드헤더 투입예정 현장의 암석에 대해 수행한 시험결과를 추가하여 국내외 형상효과 데이터를 확보하였다. 확보된 데이터를 통계분석하여 제조사의 시험방식과 표준시험법 사이의 강도 저하 비율을 추산하였다. 추산된 강도 저하 비율을 적용하여 로드헤더 순굴진율 모델의 수정안을 제안하고자 하였다.

2. 로드헤더 굴진예측 모델 및 제작사 시험방법

2.1 강도기반 굴진예측 모델

로드헤더의 굴진예측 방법 중 가장 간편하게 활용되는 것은 Thuro-Plininger(T-P) 모델(Thuro and Plinninger, 1999)과 Restner-Plinninger(R-P) 모델(Restner and Plinninger, 2015)이다. 이 모델들은 일축압축강도(UCS: uniaxial compressive strength) 증가에 따라 순굴진율(net cutting rate)이 감소하는 음지수함수의 형태를 가지고 있다(Fig. 1). 불연속면의 발달정도에 따라 3가지 곡선 중 1개를 선택하도록 구성되어 있고, 커팅헤드 동력기준으로 2개의 기종(132, 300 kW)에 대해서 제안하고 있다. 여기서 NCR(Net cutting rate)은 ICR(Instantaneous cutting rate)과 함께 로드헤더의 순굴진율을 의미하는 동일한 인자로서 m^3/hr의 단위를 갖는다(Park et al., 2013).

일축압축강도의 1개 변수만으로 순굴진율을 예측하는 방법은 정확도가 떨어진다. 그래서 이외에도 커팅헤드 동력, 비에너지, RQD(Rock quality designation) 등의 인자를 활용하는 여러 예측모델이 제안된 바 있다(Copur et al., 1998, Ocak and Bilgin, 2010, Rostami, 2011). 하지만 본 보고에서는 T-P 모델이 현재 터널 입찰보고서 작성 시 우선적으로 활용되고 있기 때문에 해당 모

델을 정확히 분석하는 데에 초점을 맞추고자 한다.

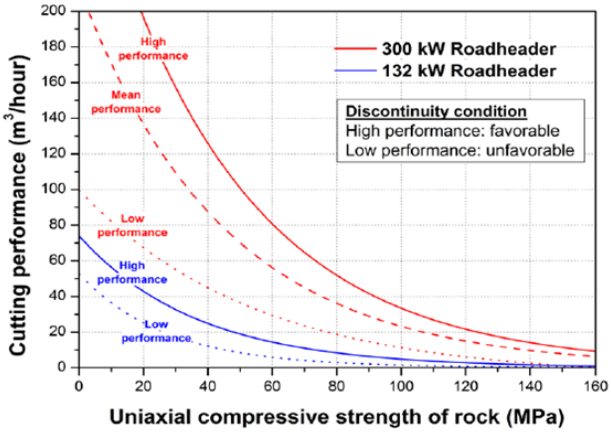

Fig. 1. T-P prediction model for roadheaders cutting performance (after Thuro and Plinninger, 1998)

2.2 제작사 시험방법

현재 터널현장에 도입 예정인 로드헤더는 S사의 MT-720모델로서 커팅모터는 300 kW급이다. 제조사는 현장에서 수거되는 암석시편에 대한 자체적인 강도시험방법을 가지고 있다. 그 방법은 Fig. 2와 같이 직경 대 길이 비율이 1.0인 암석시편을 시험하여 일축압축강도를 측정한다(Peinsitt, 2017).

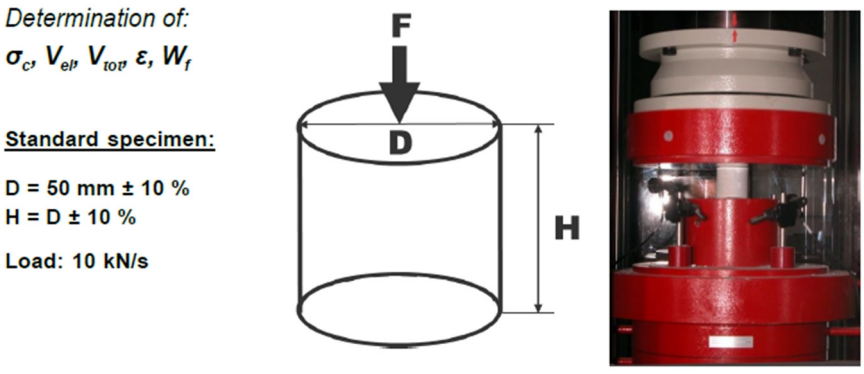

Fig. 2. Testing method for UCS of the manufacturing company (Peinsitt, 2017)

반면 국제암반공학회(ISRM: International Society for Rock Mechanics), ASTM(American Society for Testing and Materials)는 길이/직경(L/D) 비율이 2.0인 암석시편을 사용하라고 명기하고 있고(Bieniawski, and Bernede, 1979, ASTM, 1995), 한국암반공학회는 1.5~2.5인 암석시편으로 일축압축강도를 측정하는 것을 제안하고 있다(KSRM, 2005). 암석시편의 길이는 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러므로 제조사의 강도시험 결과값에 대한 보정이 필요한 실정이다. 그 방법의 일환으로 제작사는 보정식(식 (1))을 제안하고 있다(Peinsitt, 2017). 식 (1)에 따르면 L/D 값이 2.0인 시편은 1.0에 비해 약 12.5% 정도의 강도 감소분을 가진다. 한편 ASTM(1986)은 암석시편의 형상 보정식을 Eq. 2와 같이 제안한 바 있다. 이에 따르면 L/D 값이

2.0인 시편은 1.0에 비해 10.7% 강도가 감소한다. 결과적으로 해외 문헌은 강도 감소율을 10~12%정도의 범위로 추정하고 있다.

$$\sigma_{c1} = \frac{\sigma_{ci}}{0.778 + 0.222/i} \tag{1}$$

여기서 σ_{c1}은 L/D=1 일 때의 UCS, σ_{ci}는 L/D=i일 때의 UCS이다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_a}{0.88 + 0.24 * D/L} \tag{2}$$

여기서 σ_c은 L/D=1 일 때의 UCS, σ_a는 특정 D/L일 때의 UCS이다.

2.3 보고의 목적

2.3.1 굴진율 모델 규명

우선 T-P 모델은 발표된 논문자료(Fig. 3)과 제작사의 제공자료(Fig. 1)가 서로 x, y축이 달라서 실무 적용 시 혼란이 발생한다. 그리고 제작사의 굴진율 모델(Fig. 1)은 로그함수로 알려져 있으나 모든 함수의 계수는 공개되지 않았다. 따라서 순굴진율 모델의 x-y축을 통일한 후 굴진율 모델의 함수를 정확히 규명하는 작업이 필요하다.

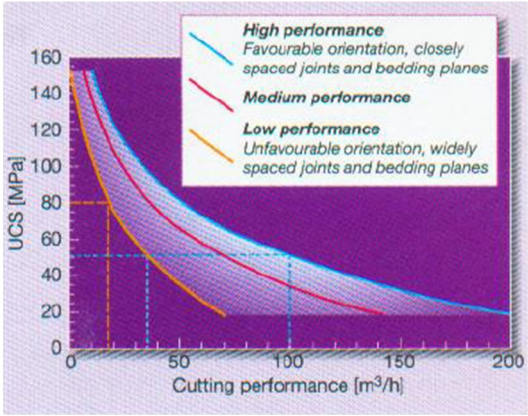

Fig. 3. T-P prediction model of the 300 kW roadheader (Thuro and Plinninger, 1999)

2.3.2 형상 효과의 정량화

해외 자료(Peinsitt, 2017)는 약 12% 정도의 강도 증가를 반영하고 있는데, 국내의 기본설계보고서(SK ecoplant, 2019)에 따르면 국내암석의 경우 L/D=1.0인 시편의 상대적인 강도증가 효과는 150~200% 정도로 보고된 바 있다. 이 차이가 매우 커서 이 순굴진율 모델의 수정안을 제안하기가 쉽지 않은 상황이다. 본 기술보고에서는 해외데이터와 국내데이터를 취합하여 형상효과를 정량적으로 규명하고자 하였다. 이를 통해 기존 굴진율 모델을 데이터에 근거하여 합리적인 수준으로 수정, 제안하고자 하였다.

3. 형상효과 관련 시험사례

3.1 해외문헌 데이터

과거의 암석시편의 크기효과 및 형상효과에 대한 대부분의 실험자료가 요약, 정리되어 있는 문헌(Du et al., 2019)을 조사하였고, 형상효과에 관련된 그래프들을 디지타이징하여 데이터를 추출하였다(Tables 1~3). 각각 변성암(Table 1), 화성암(Table 2), 퇴적암(Table 3)에 관한 데이터이고 L/D=2.0인 시편의 정규화된 강도값을 1.0으로 하여 시편 길이비율(L/D)에 따른 상대 강도값을 기록하였다. 형상 효과가 암석의 강도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 데이터를 지수함수로 회귀하였다(Figs. 1~3).

L/D가 증가함에 따라 암석의 강도가 감소하는 경향이 명확히 확인되었다. 암종별로 강도의 감소량에도 차이가 있었다. L/D가 1.0일 때의 강도에 비한 2.0일 때의 강도 비율을 형상계수로 정의하였다(식 (8)). 회귀 곡선에 근거하여 분석해보면, 형상계수 기준으로 변성암 0.88, 화성암 0.89. 퇴적암 0.91로 계산되었다. 변성암, 화성암, 퇴적암 순으로 차이가 크게 나타났다.

Table 1. Normalized UCS for international metamorphic rocks (after Du et al., 2019)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	Relative UCS
Mable	19	9.50	0.50	1.40
Mable	50.8	25.40	0.50	1.32
Mable	50.8	50.80	1.00	1.18
Mable	50.8	152.40	3.00	0.98
Mable	101.6	50.80	0.50	1.25
Mable	101.6	101.60	1.00	1.05
Mable	101.6	304.80	3.00	0.80
Mable	47	47.00	1.00	1.03
Mable	47	70.50	1.50	1.01
Mable	49.5	49.50	1.00	1.26
Mable	49.5	45.42	0.92	1.10
Mable	49.5	68.43	1.38	1.13
Mable	49.5	74.25	1.50	1.10
Mable	49.5	99.00	2.00	1.07
Mable	49.5	104.24	2.11	0.98
Mable	49.5	101.62	2.05	0.93
Mable	49.5	148.50	3.00	1.02
Mable	49.5	148.50	3.00	0.90

Table 2. Normalized UCS for international igneous rocks (after Du et al., 2019)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	Relative UCS
Granite	9.53	28.59	3.00	0.98
Kersansite	20	20.00	1.00	1.02
Kersansite	20	25.06	1.25	1.06
Kersansite	20	30.00	1.50	1.01
Kersansite	20	35.00	1.75	1.01
Kersansite	20	35.00	1.75	1.01
Kersansite	20	40.00	2.00	1.00
Kersansite	20	45.53	2.28	1.00
Kersansite	20	50.00	2.50	1.02
Kersansite	20	55.65	2.78	0.95
Kersansite	20	60.00	3.00	0.98

Table 2. Normalized UCS for international igneous rocks (after Du et al., 2019) (continued)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	Relative UCS
Basalt	47	70.50	1.50	1.09
Basalt	47	117.50	2.50	0.93
Grey amdesite	47	47.00	1.00	1.27
Grey amdesite	47	117.50	2.50	0.86
Pink andesite	47	47.00	1.00	1.07
Pink andesite	47	70.50	1.50	1.05
Pink andesite	47	117.50	2.50	0.99
Granite	47	47.00	1.00	1.15
Granite	47	70.50	1.50	1.00
Granite	47	117.50	2.50	0.97
Granite	47	141.00	3.00	0.84

Table 3. Normalized UCS for international sedimentary rocks (after Du et al., 2019)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	Relative UCS
Limestone	9.53	31.67	3.32	0.97
Limestone	9.53	12.50	1.31	1.18
Tuff	9.53	12.39	1.30	1.19
Tuff	9.53	25.28	2.65	0.98
Sandstone	43	21.50	0.50	1.14
Sandstone	43	21.50	0.50	1.14
Sandstone	43	64.50	1.50	1.10
Sandstone	43	64.50	1.50	0.78
Sandstone	43	77.40	1.80	1.05
Sandstone	43	107.50	2.50	0.79
Sandstone	43	129.00	3.00	0.85
Sandstone	43	150.50	3.50	0.87
Sandstone	54	91.80	1.70	0.88
Sandstone	54	102.60	1.90	0.92
Limestone	12.7	6.35	0.50	1.19
Limestone	12.7	12.70	1.00	1.10
Limestone	12.7	12.70	1.00	1.04
Limestone	12.7	12.70	1.00	0.97
Limestone	12.7	12.70	1.00	0.95
Limestone	12.7	19.05	1.50	0.98
Limestone	12.7	19.05	1.50	0.98
Limestone	12.7	19.05	1.50	0.95
Limestone	12.7	19.05	1.50	0.93
Limestone	12.7	19.05	1.50	0.92
Limestone	12.7	25.40	2.00	1.00
Pink sandstone	50	50.00	1.00	0.95
Pink sandstone	50	75.00	1.50	0.80
Pink sandstone	50	100.00	2.00	0.90
Limestone	47	47.00	1.00	1.02
Limestone	47	70.50	1.50	1.02
Limestone	47	117.50	2.50	0.92
Siltstone	47	47.00	1.00	1.10
Siltstone	47	70.50	1.50	1.10
Siltstone	47	117.50	2.50	0.99
Tuff	47	47.00	1.00	1.12
Tuff	47	117.50	2.50	1.05

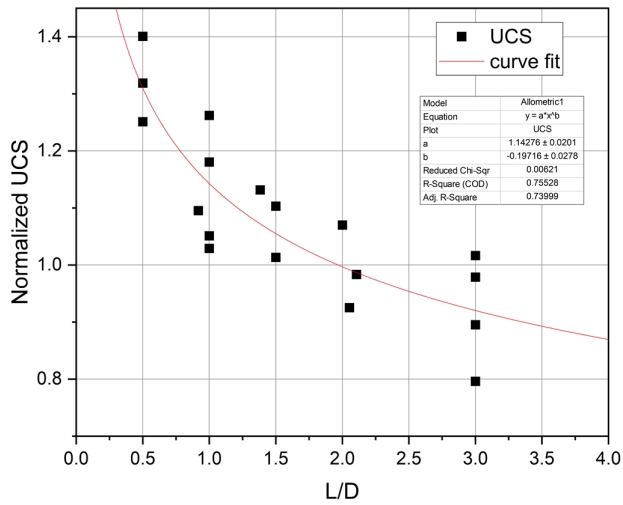

Fig. 4. UCS change with L/D of international metamorphic rocks

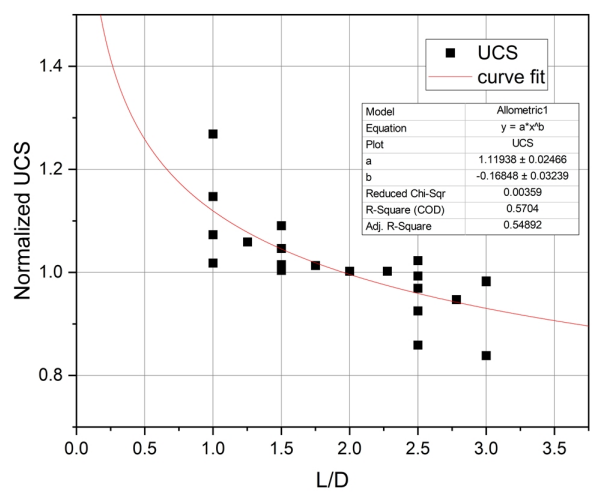

Fig. 5. UCS change with L/D of international igneous rocks

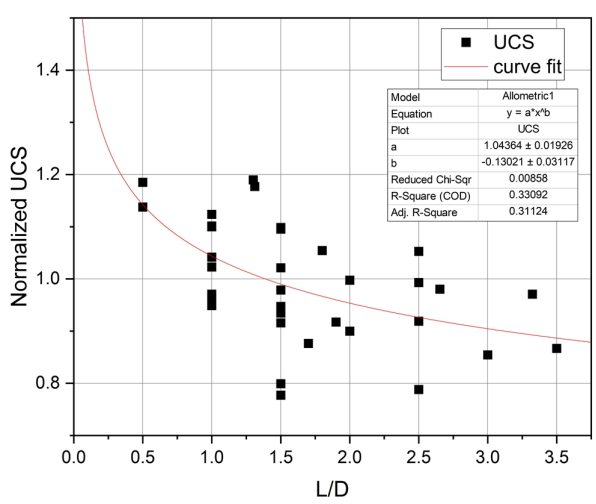

Fig. 6. UCS change with L/D of international sedimentary rocks

3.2 국내 암석 시험결과

한국 암석의 형상효과를 규명하기 위해 국내 암석시험에 대한 기존 보고서의 데이터와 본 보고에서 수행한 시험 결과를 합산하여 데이터를 정리하였다(Tables. 4~5). 국내 시험은 길이와 직경 비율(L/D)이 1.0과 2.0의 2가지 형상에 대해서만 일축압축시험이 수행되었다. 현장의 암석 종류는 변성암, 화성암 2종이었이며 해외 시험결과와 동일하게 지수함수로 회귀하였다(Figs.7~8). L/D값이 1.0에 대한 2.0의 강도 비율(형상계수)를 암석의 종류에 따라 구분하여 보면, 변성암 0.40, 화성암 0.83으로 분석되었다.

화성암에 비해 변성암의 형상계수가 2배 이상 크게 나타났다. 해외의 암석강도 변화에 비해 국내 변성암은 L/D 비율이 증가함에 따라 강도가 감소하는 폭이 더 큰 것으로 분석되었다. 이는 현장에서 수집된 암석의 파괴 이방성의 편차가 해외 암석에 비해 상대적으로 더 크기 때문으로 추정된다. 결과적으로 해외의 강도 증감율을 일괄적으로 적용하여 국내 암석강도를 추산하는 것은 부정확하며, 현장 암석의 특성에 맞는 형상효과를 반영해야 굴진율을 보다 정확히 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 4. UCS of Korean metamorphic rocks (after SK ecoplant, 2019)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	UCS[Mpa]
Gneiss	50.1	102.1	2	74.6
Gneiss	50.4	96	2	21.8
Gneiss	50.2	102.8	2	60.1
Gneiss	50.2	97	2	40.2
Gneiss	50.1	94	2	35.3
Gneiss	50.3	98.2	2	30.1
Gneiss	50	98.4	2	67.6
Gneiss	50.6	99.4	2	23.3
Gneiss	50.3	101.2	2	59.2
Gneiss	50.6	91.2	2	29.2
Gneiss	50	97.1	2	69.9
Gneiss	50.5	97.7	2	10.5
Gneiss	50.3	101.2	2	45.9
Gneiss	50.3	91.5	2	77.4
Gneiss	50.2	97.3	2	52.1
Gneiss	50.2	100.6	2	48
Gneiss	50	103.9	2	81.4
Gneiss	50.2	104.1	2	43.1
Gneiss	50.2	94.8	2	62.3
Gneiss	50.2	105.4	2	78.4
Gneiss	50.2	95.5	2	26.9
Gneiss	50.3	93.6	2	44.7
Gneiss	50	96.8	2	20.2
Gneiss	50.2	101.7	2	43.9
Gneiss	50.2	98	2	43
Gneiss	49.9	98.2	2	20.4
Gneiss	50.1	101.3	2	30.3
Gneiss	49.9	99.6	2	60.7
Gneiss	50.1	102.9	2	71.3
Gneiss	50.2	102.9	2	59.5
Gneiss	50.2	98.2	2	8.5
Amphibolite	50.39	50	1	224.06
Amphibolite	50.41	49.98	1	235.82

Table 4. UCS of Korean metamorphic rocks (after SK ecoplant, 2019) (continued)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	UCS[Mpa]
Amphibolite	50.35	50.01	1	242.67
Amphibolite	50.4	50.04	1	103.51
Amphibolite	50.44	49.97	1	210.39
Gneiss	50.35	49.94	1	49.92
Gneiss	50.34	52.87	1	72.76
Gneiss	50.4	52.53	1	19.52
Gneiss	50.28	49.97	1	148.35
Gneiss	50.33	50.03	1	86.99
Gneiss	50.34	49.96	1	105.83
Gneiss	50.26	49.99	1	149.57
Gneiss	50.34	50.05	1	115.81
Gneiss	50.23	50.07	1	175.98
Gneiss	50.3	49.82	1	115.19
Gneiss	50.31	49.91	1	79.45
Gneiss	50.32	50.03	1	110.08
Gneiss	50.3	50.02	1	75.75
Amphibolite	50.28	50.01	1	37.81
Amphibolite	50.40	50.00	1	117.78
Amphibolite	50.42	49.92	1	98.74
Amphibolite	50.41	49.98	1	119.31
Amphibolite	50.43	49.93	1	103.78

Table 5. UCS of Korean igneous rocks (after SK ecoplant, 2019)

Rock type	Diameter (mm)	Height [mm]	L/D	UCS[Mpa]
Granite	50.10	50.45	1	237.0
Granite	50.01	50.20	1	279.25
Granite	50.48	51.15	1	160.1
Granite	49.89	50.20	1	133.7
Granite	23.30	47.25	2	217.1
Granite	50.21	50.29	1	94.6
Granite	49.93	50.31	1	193.61
Granite	23.30	47	2	85.80

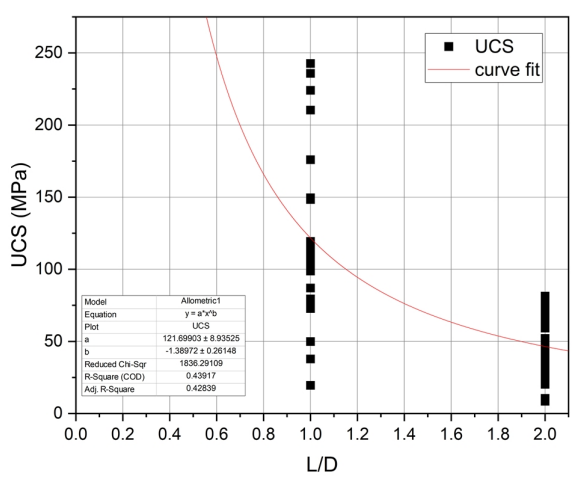

Fig. 7. UCS change with L/D of Korean metamorphic rocks

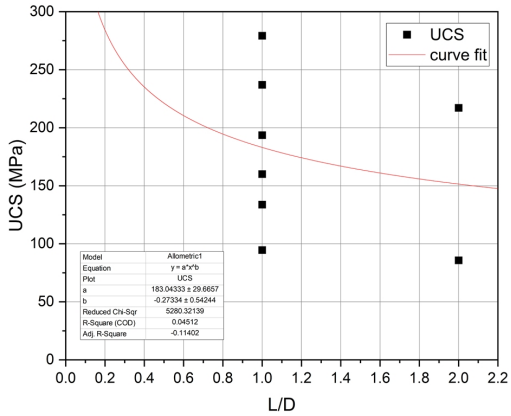

Fig. 8. UCS change with L/D of Korean igneous rocks

4. 굴진율 함수 분석 및 형상효과 고찰

4.1 굴진율 모델 분석

4.1.1 Thuro-Plinninger(T-P) 모델

Fig. 3의 T-P 모델을 디지타이징하여 로그함수로 회귀한 결과 Figs. 9~11과 같이 데이터와 로그함수가 거의 일치하였다(식 (3)). 그리고 Fig. 1을 같은 방법으로 로그함수의 역함수인 지수함수로 회귀한 결과 Figs. 12~14와 같이 일치하였다(식 (4)). 따라서 논문에 제안된 초기 T-P모델(Thuro and Plinninger, 1999)은 로그함수를 따르고, 제조사에서 사용하는 T-P 신규모델(Fig. 1)은 지수함수임을 규명하였다. 각 모델을 회귀한 결과와 각 함수의 계수값을 Table 6에 정리하였다. 초기모델과 신규모델은 서로 같은 함수로서 역함수 관계임을 알 수 있었다.

$$UCS = a - b \ln NCR \tag{3}$$

$$NCR = c \cdot e^{d * UCS} \tag{4}$$

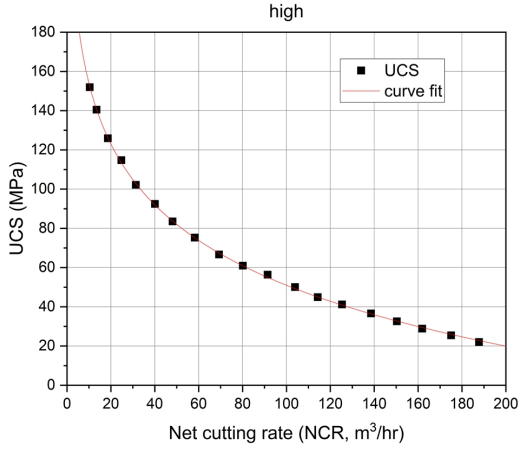

Fig. 9. Original T-P model graph for 300 kw cutting head (high performance)

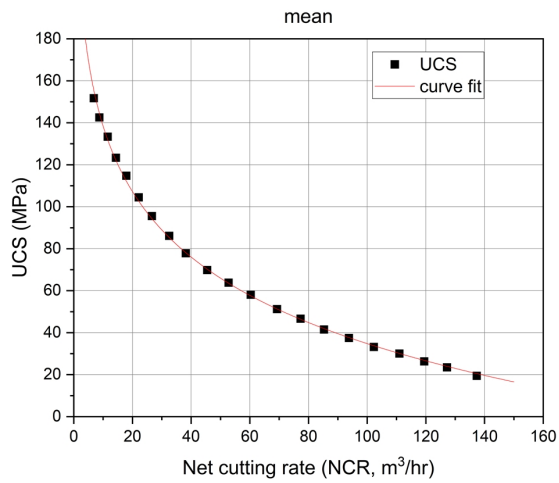

Fig. 10. Original T-P model graphs for 300 kw cutting head (mean performance)

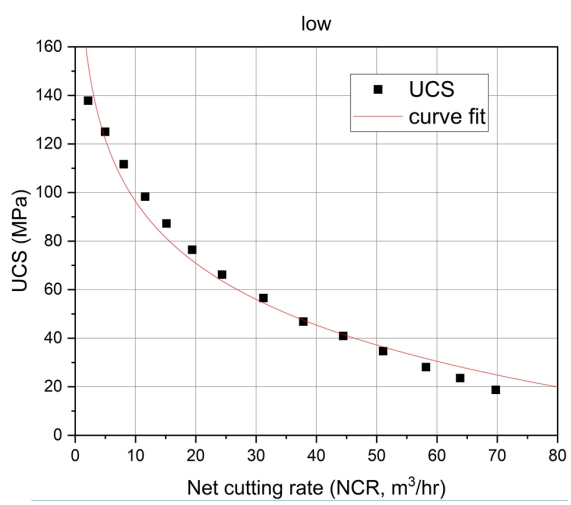

Fig. 11. Original T-P model graphs for 300 kw cutting head (low performance)

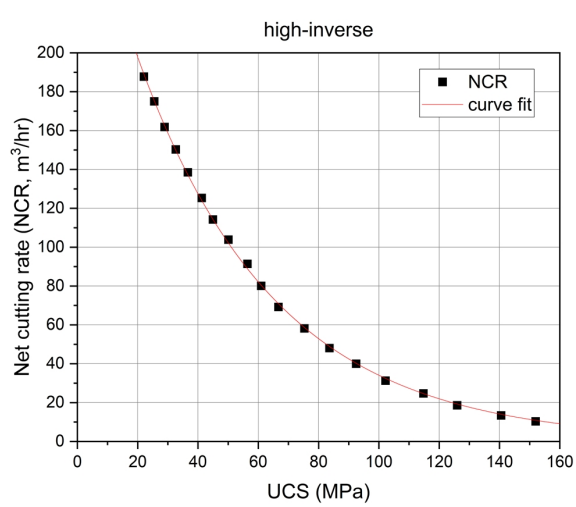

Fig. 12. New T-P model graphs for 300 kw cutting head (high performance inverse)

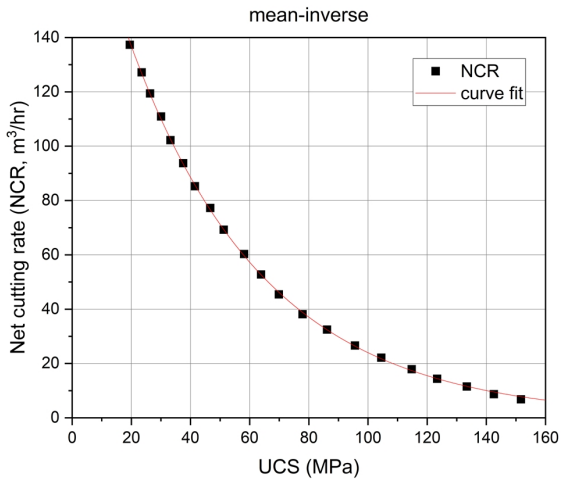

Fig. 13. New T-P model graphs for 300 kw cutting head (mean performance inverse)

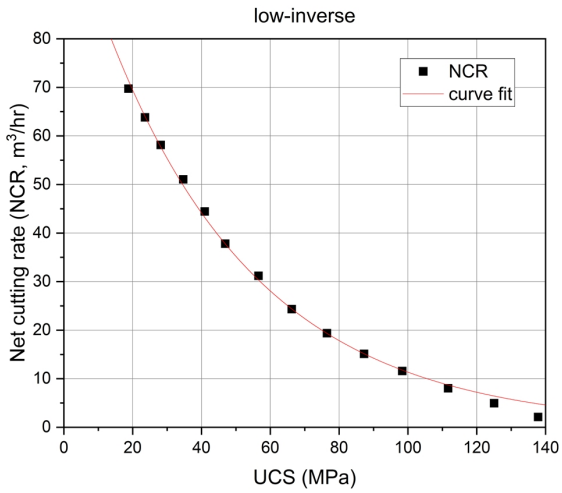

Fig. 14. New T-P model graphs for 300 kw cutting head (low performance inverse)

Table 6. Regression results of T-P model (Thuro and Plinninger, 1999)

Model version	Variable	Discontinuity condition		
		High	Mean	Low
T-P	a	275.1	242.1	181.0
	b	44.75	45.01	36.76
T-P-exp	c	307.1	211.5	109.2
	d	-0.0222	-0.0218	-0.0226

4.1.2 Restner-Plinninger(R-P) 모델

강도기반 예측모델 중 제조사에서 최근 제안한 모델은 Restner-Plinninger(R-P) 모델이다(Restner and Plinninger, 2015). 무결암의 일축압축강도만을 입력변수로 사용한 예측모델은 식 (5)와 같다. 여기서, P는 커터헤드의 동력수준(kW)이다. 또한 식 (6)은 현장 암반의 파괴인성(Rock toughness rating), 불연속면 상태(Discontinuity rating using RMCR), 응력상태(Stress condition

rating)에 따른 보정이 이루어진 암반 굴진에 대한 예측모델이다. 파괴인성(k_1), 불연속면상태,(k_2), 응력상태(k_3) 등에 따른 보정계수를 입력하여 수식을 확장할 수 있도록 제안되었다(식 (6)).

Fig. 15는 300 kW급 커팅헤드의 성능예측 모델을 추정한 결과 그래프이다. 디지타이징하여 분석해본 결과, 파괴인성에 대한 보정계수(k_1)만 반영되었음을 알 수 있었다. 이를 요약하여 정리하면 Table 7과 같다. R-P모델(식 (7))의 보정계수의 범위는 해당 논문(Restner and Plinninger, 2015)에 제시되어 있다.

$$NCR_{basic} = \frac{7\,P}{UCS} \tag{5}$$

$$NCR_{eff} = k_1\,k_2\,k_3\,NCR_{basic} \tag{6}$$

$$NCR_{eff} = k_1\,\frac{7\,P}{UCS} \tag{7}$$

Table 7. R-P model regression results (Restner and Plinninger, 2015)

Model	Variable	Discontinuity condition		
		Very tough	Normal	Very brittle
R-P	P (kW)	300	300	300
	k1	0.75	1.0	1.2

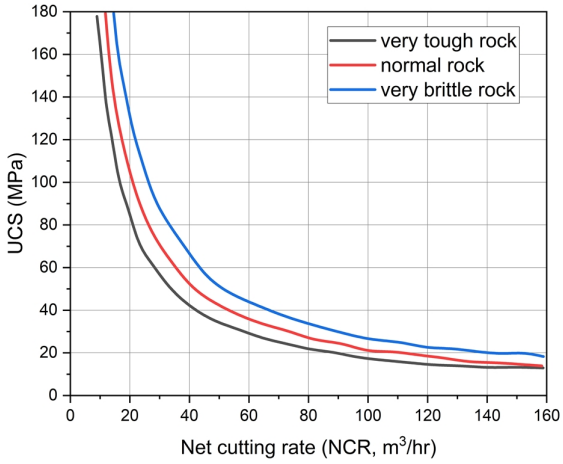

Fig. 15. R-P prediction model for roadheader MT-720

4.2 형상효과 통합 분석

4.2.1 가중치 분석

본 보고에서는 L/D값이 2.0인 시편의 강도를 L/D가 1.0인 강도로 나눈 비(H)를 형상계수로 정의하였다(식 (8)).

$$H = \frac{UCS_{2.0(L/D)}}{UCS_{1.0(L/D)}} \tag{8}$$

국내 자료는 L/D값이 각각 1.0과 2.0일 때 형상에 따른 형상계수가 0.38(Fig. 16), 해외자료는 0.88(Fig. 17)로 두 자료 간에 큰 차이가 있었다. 이 때문에 통합데이터에 기반하여 형상효과를 합리적으로 추산하기 위해 가중치를 고려한 형상계수 합산식(식 (9))을 고안하였다. 국내 자료 개수 62개, 해외 자료 개수 76개이며, 계산한 결과 통합형상계수는 0.66으로 도출되었다. 따라서 가중치를 고려한 형상효과에 따른 강도 감소의 평균치는 34%였다.

$$H_w = \frac{n_k * H_k + n_w * H_w}{n_k + n_w} = 0.66 \tag{9}$$

여기서 H_t는 형상효과 통합보정계수, n_k는 국내 암석 데이터 개수, n_w는 해외 암석 데이터 개수, H_k는 국내 암석 형상계수, H_w는 해외 암석 형상계수이다.

4.2.2 통합 분석

형상효과가 UCS에 미치는 영향을 알아보기 위해 국내 데이터들을 통합하여 회귀하였다(Fig. 16). 이 그래프에서 L/D가 1.0인 지점에 해당하는 평균값이 135.4 MPa, 2.0인 지점의 평균값이 52.1 MPa이 도출되었다. 형상계수 값은 0.38로 형상효과의 차이가 거의 3배에 이르는 점을 알 수 있다. 마찬가지로 해외데이터도 통합하여 회귀하였다(Fig. 17). 그 결과에서 L/D가 1.0인 지점에 해당하는 값이 1.08, 2.0인 지점에 해당하는 값이 0.99로 형상계수는 0.92였다. 마지막으로 해외데이터와 국내 데이터를 한 그래프에 옮겨서 형상효과를 통합 분석했다(Fig. 18). 해외자료는 UCS가 70 MPa인 부분이 1로 정규화 되어 있어 국내 데이터도 동등한 조건으로 정규화시켜 두 자료를 통합하였다. 국내외 통합데이터를 지수함수로 회귀하면 L/D가 1.0일 때 1.35, 2.0일 때 0.99가 나타났다. 형상계수는 0.73으로 형상효과에 대한 UCS의 감소 비율은 27%로 확인되었다.

가중치에 대한 계산방법과 전체 통합자료의 회귀함수로 분석한 결과 L/D 1.0과 2.0인 시편의 강도차이는 평균 27~34% 인 것으

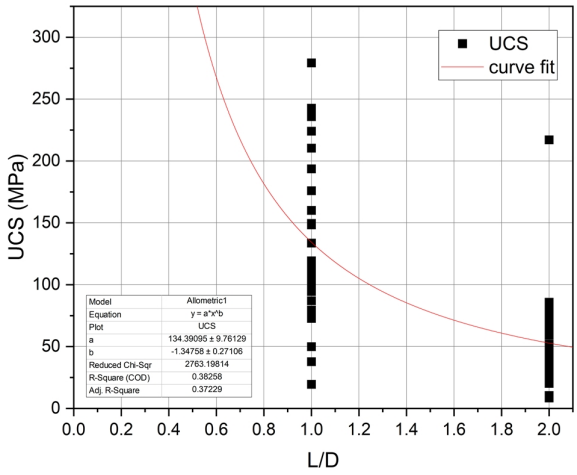

Fig. 16. UCS change with L/D of Korean rocks

로 분석되었다. 하지만, 결과적으로 암석의 균열유무와 이방성 정도에 따라 형상효과의 편차가 매우 크게 차이가 났으며, 결정계수(R^2) 값은 0.15로 매우 낮았다(Fig. 18). 따라서 일괄적으로 형상계수를 결정하는 것은 충분한 정확도를 확보가 어려운 것으로 판단된다. 따라서 본 기술보고에서 제안한 형상계수는 암석 길이비에 따른 강도 시험데이터가 충분치 않을 때 간접적인 추정방법으로 활용해야 한다. 해외데이터는 Du et al.(2019)의 문헌에 제시된 데이터를 기준으로 분석하였고, 국내 데이터는 기본설계보고서의 내용을 기반으로 일부 현장의 암석만 활용되었으므로, 데이터의 한계점이 존재한다. 따라서 향후 추가 자료 업데이트를 통해 형상효과 분석에 대한 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다.

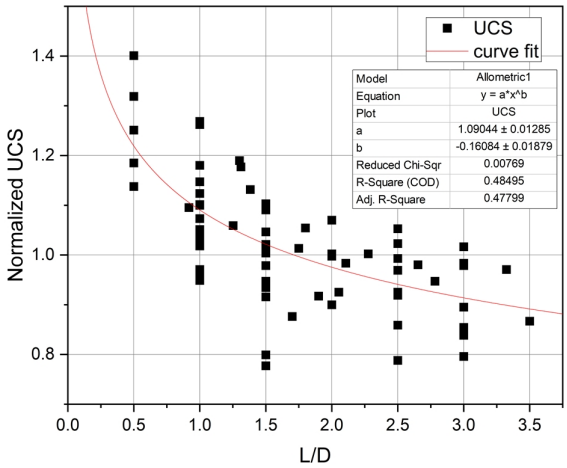

Fig. 17. UCS change with L/D of international rocks

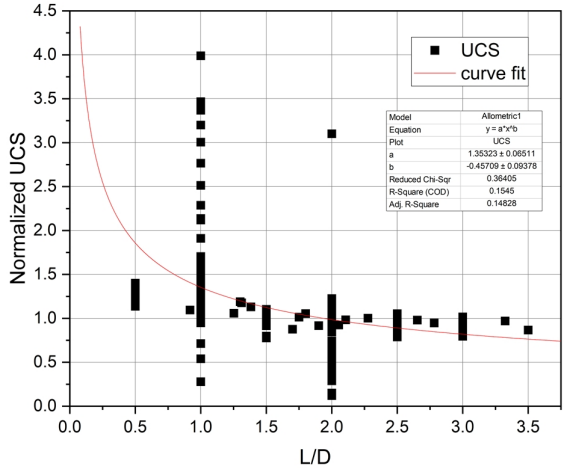

Fig. 18. Combined UCS change data with L/D of international and Korean rocks

4.3 굴진율 모델 수정모델

4.3.1 Thuro-Plinninger(T-P) 모델

보통 굴착효율을 산정할 때 국내에서는 L/D값이 2.0인 UCS값을 기준으로 사용한다. 그래서 L/D값이 1.0이 기준으로 된 해외 모델을 수정하여 사용할 필요가 있다. 상기 3장에서 도출된 통합형상계수 0.73를 반영하면, x축인 UCS를 27% 정도 축소해야 한

다. 형상계수를 감안한 식 (4)(Table 6)의 각 계수는 Table 8의 식 (10)과 같이 변환된다. 해당 T-P모델 평균(mean)함수을 기준으로 수정 모델을 Fig. 19에 제시하였다. 암석의 표준 강도를 반영하면 같은 강도에서 순굴진율이 확연히 낮은 값이 예측됨을 알 수 있다.

$$NCR = c \cdot e^{(d/H_t)*UCS} \tag{10}$$

Table 8. Modified T-P model with consideration of shape effect (Thuro and Plinninger, 1999)

Model	Variable	Discontinuity condition		
		High	Mean	Low
Modified T-P	c	307.1	211.5	109.2
	d/H_t	-0.0304	-0.0299	-0.0310

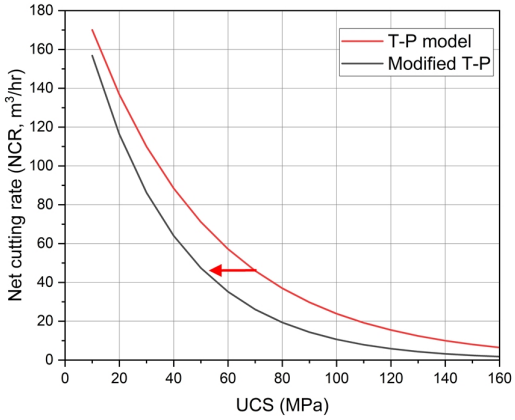

Fig. 19. Comparison of original and modified T-P model

4.3.2 Restner-Plinninger(R-P) 모델

R-P 모델에 형상효과를 고려하면 식 (11)을 얻는다. 기존의 계수에 비해 변경된 계수를 Table 6에 정리하였다. T-P모델은 지수함수인데 반해 R-P모델은 1차 역수함수(reciprocal function)이므로, 상대적으로 형상계수에 의한 NCR 감소비율이 비교적 일정하게 반영되는 것을 알 수 있다.

$$NCR_{eff} = k_1 H_t \frac{7P}{UCS} \tag{11}$$

Table 9. R-P model regression results (Restner and Plinninger, 2015)

Model	Variable	Discontinuity condition		
		Very tough	Normal	Very brittle
Modified R-P	P (kW)	300	300	300
	$k_1 H_t$	1.03	1.81	2.16

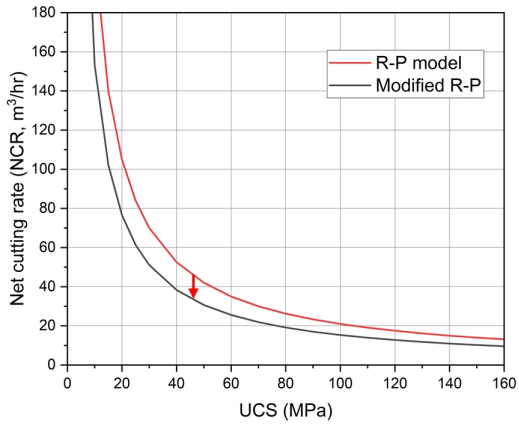

Fig. 20. Comparison of original and modified R-P model

4.4 기존 형상효과 이론 고찰

본 절에서는 여러 효과 중 직경 대 길이비가 암석강도에 미치는 영향에 대해 기존의 문헌과 이론을 바탕으로 고찰하고자 한다.

4.4.1 가압면 구속효과

로드헤더 예측모델 고안자들도 국제표준과 다른 제작사의 시험방법의 영향을 분석한 바 있다. Thuro and Plinninger(2001)는 UCS와 영률에 대해서 추정식(식 (12)~(13))을 제안한 바 있다.

$$UCS^{*} = UCS(0.925 + 0.036\,L/D) \tag{12}$$

$$E^{*} = E(1.24 - 0.33\ln(L/D)) \tag{13}$$

여기서 UCS^{*}과 E^{*}은 L/D=1.0을 기준으로 형상효과가 보정된 강도와 영률이다.

식 (12)에 따르면 L/D가 1.0과 2.0일 때의 강도차이는 3.9%에 불과한 반면, 탄성계수의 감소폭은 25% 정도로 추정하고 있다. 이 현상을 Fig. 21과 같이 가압면과 인접한 영역의 응력집중에 따른 탄소성변형으로 설명하고 있다. 암석시편의 높이가 커질수록 상대적으로 탄소성 영역에 비해 탄성영역이 증가하고 그에 따라 변형이 적게 발생한다고 설명한다.

4.4.2 파괴면 형성효과

Fig. 21은 가압면 직하부의 수직응력과 그에 대한 수직변형을 주로 설명하고 있다. 수직방향의 응력증가에 따라 가압면의 마찰력에 의한 횡방향 응력도 시편의 표면에 작용하게 된다(Fig. 22). 이는 가압면 인접 부위에 봉압효과(confining effect)를 유발하는데, 암석시편의 L/D가 작을수록 상대적으로 더 큰 봉압효과를 가지게 된다. 이런 이유로 L/D가 작을수록 강도가 증가하는 형상효과가 크게 발현된다.

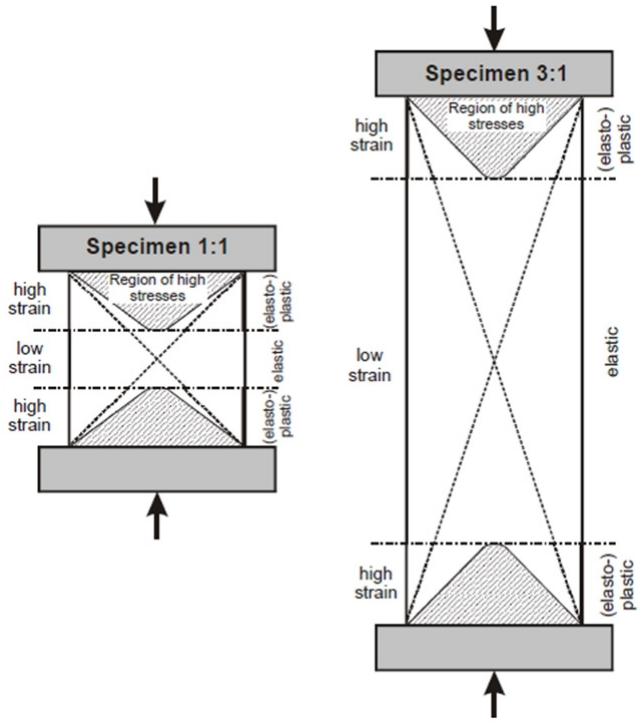

Fig. 21. Conceptual diagram of high stressed region near loading plate (after Thuro and Plinninger, 2001)

일축압축상태에서 암석시편의 전단파괴를 Mohr-Couloumb 이론에 따라 가정하면, 파괴면의 각도는 45+ φ/2도로 형성된다. 이때 시편의 L/D가 1.0이면 파괴면의 상하부면이 가압 플레이트에 걸쳐지게 되어 전단파괴를 방지해주는 역할을 하게 된다. 한편 L/D가 2.0인 시편을 사용하게 되면 마찰각(φ)이 36도 이내일 때는 파괴면이 플레이트 영역을 벗어나게 된다. 따라서 시편의 길이비(L/D)는 전단파괴면의 활성화에도 영향을 주게 되므로 L/D가 작을수록 강도가 증가하는 효과는 이론적으로 설명된다.

경암의 내부마찰각이 50도는 넘는 경우도 있기 때문에 파괴면 각도에 영향을 받지 않게 하려면 측정된 내부마찰각에 따라 L/D도 증가시켜야 하지만, 국제표준시험법과 국내표준시험법은 L/D를 1.5-2.0의 수준을 권고하고 있다. 암석시편의 파괴 시 전단파괴 뿐만 아니라 인장파괴 모드도 고려해야 하고, 또한 좌굴파괴를 방지해야 하기 때문으로 사료된다.

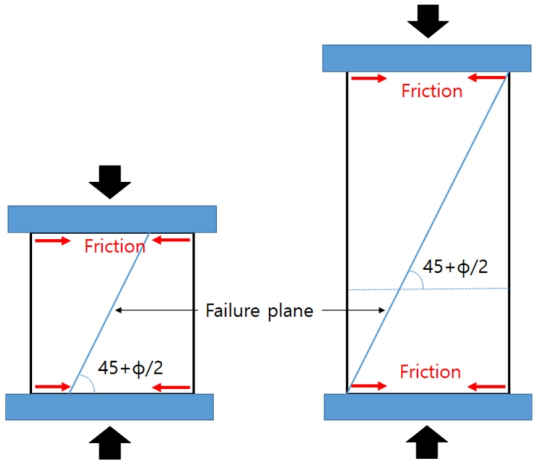

Fig. 22. Friction effect of loading plate to failure plane

로드헤더 제조사는 직경 대 길이 비(L/D)가 1.0인 암석시편의 일축압축강도를 기준으로 굴진예측 모델을 제시하고 있다. 본 보고는 국내외 암석시편의 형상효과를 규명하여 로드헤더 굴진예측 모델의 정확도를 향상시키기 위한 목적으로 수행되었다. 수행과정에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 해외자료를 수집하여 암석시편의 크기효과 및 형상효과 데이터를 조사하였다. L/D 1.0에 대한 2.0인 암석시편의 상대적 강도로 형상계수를 정의하였고, 해외문헌의 형상계수는 0.88~0.92의 범위로 조사되었다.
2) 국내 현장의 암석시험데이터를 수집하여 형상계수의 범위를 조사한 결과, 국내 암석의 형상계수의 범위는 0.40~0.83으로 해외 데이터에 비해 최대 2배 이상 높은 값을 기록하였다. 국내외 형상계수 데이터를 통합하여 통합형상계수를 계산하였다.
3) 대표적인 강도기반 굴진예측 모델(T-P, R-P 모델)의 함수를 각각 분석하고, 통합형상계수를 적용하여 강도기반 굴진예측 모델(T-P, R-P 모델)의 수정안을 제안하였다.
4) 암석시편의 형상효과에 대한 선행문헌의 설명을 소개하고, 길이비에 따른 강도 감소의 이유를 이론적으로도 고찰하였다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 국토교통기술촉진연구사업의 '파일럿시험 및 현장데이터 기반 로드헤더 굴진율 수정 예측모델 개발(21CTAP-C164190-01)' 과제를 통해 수행되었습니다.

REFERENCES

ASTM, 1986, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, D 2928: 390-391.

ASTM, 1995, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, D2938-95

Bieniawski Z. and Bernede M., 1979, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16(2), pp. 138-140.

Chang, S., 2015, A Consideration for Mechanical Rock Excavation Focusing on TBM and Roadheader, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng. Vol.52(5), pp.531-548.

Copur, H., L. Ozdemir, and J. Rostami, 1998, Roadheader applications in mining and tunneling, Mining Engineering, Vol. 50, 38-42.

Du, K., Su, R., Tao, M., Yang, C., Momeni, A., and Wang, S., 2019, Specimen shape and cross-section effects on the mechanical properties of rocks under uniaxial compressive stress. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 78.

Hyundai E&C, 2019, 인천도시철도1호선 검단연장선 1공구 기본설계보고서.

Kim, Y., Jeong, H., Cho, J., Park, S., and Lee, Y., 2021, Roadheader excavation in urban tunnelling, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 23(1), pp. 61-80.

KSRM, 2005, Standard test method for uniaxial compressive strength of rock

KSRM, 2021, Roadheader excavation guide, CIR Co.

Ocak, I. and Bilgin, N., 2010, Comparative studies on the performance of a roadheader, impact hammer and drilling and blasting

method in the excavation of metro station tunnels in Istanbul, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, 181-187.

Park, Y., Choi, S., Park, J., Lee, C., and Chang, S., 2013. Excavation Mechanism of Roadheader and Statistical Analysis of its Key Design Parameters Based on Database, Tunnel and underground space, Vol.23, No.5, pp.428-441.

Peinsitt, T., 2017, Rock testing standards for the evaluation of mechanical cuttability, Sandvik Mining and Construction G.m.b.H., Zeltweg, Austria

Restner, U. and Plinninger, R., 2015, Rock Mechanical Aspects of Roadheader Excavation. EUROCK 2015 & 64th Geomechanics ColloquiumAt: Salzburg, Austria, October 2015.

Rostami, J., 2011, Section 7.1 Rock Breakage, Mechanical, Mining Engineering Handbook, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration Engineering Inc(SME).

SK ecoplant, 2019, 동탄-인덕원 복선전철 1공구 및 월곶-판교 복선전철 8공구 건설공사 기본설계보고서.

Thuro, K. and Plinninger, R., 1998, Geological limits in roadheader excavation-Four case studies Proceedings of the 8th International IAEG Congress, pp.3545-3552

Thuro, K. and Plinninger, R., 1999, Roadheader excavation performance-geological and geotechnical influences, Proceedings of the 9th ISRM Congress, Paris, pp.1241-1244.

Thuro, K. and Plinninger, R., 2001, Scale effect in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test, Proceedings of EUROCK 2001 ISRM regional symposium, Espoo, Finland, June 3-7, 2001, pp169-174.