

TBM의 굴진성능 예측을 위한 압입시험에 대한 연구

정호영¹⁾, 전석원^{2)*}, 조정우³⁾

A Study on Punch Penetration Test for Performance Estimation of Tunnel Boring Machine

Ho-Young Jeong, Seokwon Jeon, Jung-Woo Cho

Abstract This paper discusses the methods of estimating the punch penetration indices and data analysis punch penetration test to estimate the TBM normal force and penetration rate. In punch penetration test is known as a useful test to estimate penetration rates and normal force of TBMs directly with several slope indices indicated drill-ability and brittleness of rocks. However, the standard methods and indices for punch penetration test are not suggested yet. The main purpose of punch penetration test which is prediction of normal force of TBM disc cutter when cutters excavate rock mass. In this study, the punch penetration tests were performed for 6 representative Korean rock types and variety length and diameter of rock core specimens. Among slope indices were obtained from punch penetration test, PLI and MLI which is suggested in this study show high correlation with cutter force measured by full-scale cutting test. The results show that the predicted normal force of a single disc cutter and the experimental error was 10%. Based on these results, it is concluded that punch penetration test is reliable laboratory test for estimating thrust and penetration rates of TBM.

Key words punch penetration test, PLI (Peak Load Index), MLI (Mean Load Index), TBM, Thrust, Disc cutter

초 록 본 논문에서는 TBM의 굴진성능 평가를 위한 실내시험 중 하나인 압입시험의 시험과 결과 분석방법에 대하여 연구하였다. 압입시험은 암석의 굴진저항 및 취성도를 나타내는 여러 지수들을 산정하고 이를 통해 TBM의 굴진을 및 추력을 직접적으로 추정할 수 있는 유용한 실험으로 알려져 있으나 국내에서는 아직 관련된 연구가 수행된 바 없으며 규격화된 시험방법이나 결과해석방법 역시 제시되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 압입시험의 시험 장비를 재구성하여 제작하였고 다양한 조건에 대하여 시험을 수행하여 합리적인 시험방법과 시험의 크기에 대하여 고찰하였다. 또한 국내의 6개 암종에 대하여 압입시험을 수행하고 하중지수의 산정방법에 대하여 연구하였으며 하중지수로써 PLI와 MLI를 제안하였다. 본 연구에서 제안된 지수인 PLI와 MLI는 동일한 암종을 대상으로 수행된 선형절삭시험결과와 밀접한 상관관계를 보였으며 하중지수를 통해 개략적으로 예측된 단일 디스크커터의 수직하중은 실험값과 10% 오차를 보였다. 압입시험은 TBM의 성능예측을 위한 유용한 실험 방법임을 확인할 수 있었으며 본 연구는 이를 위한 기초연구로서 그 활용도가 높을 것으로 기대된다.

핵심어 압입시험, PLI (Peak Load Index), MLI (Mean Load Index), TBM, 추력, 디스크커터

1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정
2) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
3) 한국생산기술연구원 대경권지역본부 메카트로닉스연구 그룹 선임연구원

* Corresponding Author: sjeon@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-8807

Fax: +82-2-871-8938

Address: Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744 Korea

Received: April 20, 2012

Revised: April 26, 2012

Accepted: April 26, 2012

1. 서론

TBM(Tunnel Boring Machine) 커터헤드의 설계 시, 디스크커터에 작용하는 힘과 굴진율을 산정 하는 것은 매우 중요하다. 디스크커터의 작용력 및 절삭효율을 직접적으로 측정하기 위한 시험방법으로 LCM(Linear Cutting Machine) 시험이 있다. 하지만 LCM시험은 실험대형 시험수행에 상당한 비용이 들고 대형 암석시편을 확보하기가 어렵다. 따라서 많은 연구에서 간단한 실내시험과 현장굴진자료를 활용하여 절삭성능을 예측한 바 있다.

미국 CSM(Colorado Schools of Mines)과 노르웨이 NTNU(Norwegian University of Science and Technology)에서 개발한 TBM 성능예측 모델은 현장굴진 자료와 비교하여 그 신뢰성이 높은 것으로 보고되고 있으며(Bruland, 1998, Rostami and Ozdemir, 1993, Rostami *et al.*, 1996), 이 모델들은 몇 가지 실내시험(압입시험, 세르사 마모시험, NTNU시험 등)을 수행하여 얻어진 지수들을 사용하여 TBM의 굴진성능이나 커터의 마모도 등을 결정하게 된다.

그 중 압입시험(punch penetration test)은 암석시편에 압입자(indenter)를 압입시켜 수직하중을 측정할 수 있으며 암석의 치핑(chipping)과 파쇄를 일으킬 수 있는 시험법이다(Fig. 1). 코어시료를 사용하는 실내시험이기 때문에 LCM시험에 비해 시험수행이 간편하며 이에 소요되는 비용과 노력이 적은 장점을 가진다. 또한 이 시험의 결과는 TBM 디스크커터뿐만 아니라 드래그비트(drag bit)나 원뿔형 픽(conical pick)의 수직하중 혹은 절삭성능을 예측하는 용도로도 활용될 수 있다.

압입시험은 Handewith(1970)에 의해 처음 제안된 이후, 여러 연구자들(Cook *et al.*, 1984, Copur, 1999, Copur *et al.*, 2003, Dollinger *et al.*, 1998, Yagiz, 2002, Yagiz, 2009)에 의해 암석의 물성(예, 취성도, 파괴인성)을 평가하고 TBM의 성능예측을 위한 시험방법으로 꾸준히 활용되어 왔다. Cook 등(1984)은 압입시험 중 발생하는 미소 파괴음을 측정하여 암석의 파괴과정을 분석한 바 있으며, Dollinger 등(1998)은 다양한 암종에 대한 압입시험을 수행하여 암석의 파괴양상을 실험적으로 관찰하였으며 압입시험이 TBM의 굴진성능예측에 활용될 수 있음을 보고하였다. Copur 등(2003)은 로드헤더(roadheader)의 성능예측을 위한 시험으로 압입시험을 수행하였으며 암석의 취성도를 산정하는 방법을 제안한 바 있다. Yagiz(2002, 2009)는 압입시험을 통해 암석의 취성도

를 나타내는 BI_m 을 산정하는 식을 제안하였고(Eq. 1), 이후 TBM 현장에서 얻은 암석을 대상으로 시험을 수행하여 얻어진 취성지수를 활용하여 TBM의 굴진율을 예측하는 모델을 제시하였으며, 예측된 결과는 실제 굴진율과 양호한 상관관계를 나타내었다.

$$BI_m = \frac{F_{\max}}{p} \quad (\text{kN/mm}) \quad (\text{Eq. 1})$$

압입시험은 시험의 수행 및 결과 분석에 있어서 표준화된 방법이 제안된 바 없으며 제안된 데이터 처리방법들은 단순하여 다양한 절삭조건 하에서 절삭성능을 예측하기에 적합하지 않다. 또한 압입시험에서는 압입자의 형상에 따라 접촉면적이 달라지므로 암석의 파괴양상과 측정되는 수직하중의 크기가 달라지게 된다(Dollinger, 1998). 하지만 압입자를 다양한 굴착도구(예, 디스크커터, 드래그비트 등)와 동일한 형상으로 제작하여 시험하기는 어려우므로, 표준화된 압입시험을 수행하여 결과를 해석하고, 이를 선형절삭시험 및 현장에서 측정된 결과와 비교하여 각각의 굴착도구에 적합한 예측모델을 구성하는 것이 합리적이다. 또한 예측모델을 사용하면 시험을 통해 직접적인 측정이 어려운 다양한 관입깊이와 절삭조건에 대해서도 수직하중을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 선형절삭시험 결과를 비교자료로 사용할 경우에는 TBM 현장굴진자료에 비하여 데이터의 편차가 적으며 디스크커터의 작용하중에 영향을 줄 수 있는 변수(디스크커터의 형상, 지질조건, 인접한 커터의 상호작용 등)들을 고려하지 않아도 되기 때문에 결과 분석이 편리해진다.

하지만 국내에서는 아직 압입시험에 대한 연구가 수행된 바가 없기 때문에 본 연구에서는 합리적인 시험을 수행하기 위하여 우선 다양한 크기의 시편에 대하여 시험을 수행하고 압입시험에서 나타나는 암석 시편의 크

Table 1. Mechanical properties of rock used in this study

Rock type	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Brazilian Tensile Strength (MPa)	B ₃
Hwangdeung Granite	54.5	0.15	209	9.2	1923
Asan Gneiss (Case 1)	-	-	241	13.4	3217
Asan Gneiss (Case 2)	-	-	186	11.5	2146
Hudong Granite	47.3	0.26	91	10.1	919
Sungnam Gneiss	75.3	0.15	92	15.2	1389
Paldang Gneiss	44.4	0.21	124	11.2	1390
Macheon Granite	71.0	0.17	108	7.4	799

기효과를 살펴보았다. 이러한 시험장비와 시험법을 바탕으로 국내 6개 암석에 대하여 압입시험을 수행하였다. 압입에 의한 암석의 파괴과정을 실험적으로 관찰하였으며 시험결과를 분석하는 방법 및 지수산정법을 제시하고자 하였다. 또한 동일한 압중을 대상으로 수행된 선형절삭시험 결과(Yu, 2007; Jeong et al., 2011, Cho, 2010)와 비교하여 디스크커터의 수직하중을 예측하는 방법을 연구하고자 하였다.

2. 시험의 구성 및 방법

2.1 시험 장비

압입시험에 사용되는 시험도구는 일반적으로 암석을 구속하기 위한 구속프레임(confining frame), 암석을 압입하는 압입자, 이를 하중기와 연결하기 위한 고정플레이트(holding plate)로 구성된다(Fig. 1 참조). 먼저 고정플레이트는 하중기의 형상에 맞추어 제작하되 압입자를 장착하고 분리할 수 있도록 하였다. 구속프레임은 암석 시편에 충분한 반경방향 구속력을 제공하기 위해서 25 mm

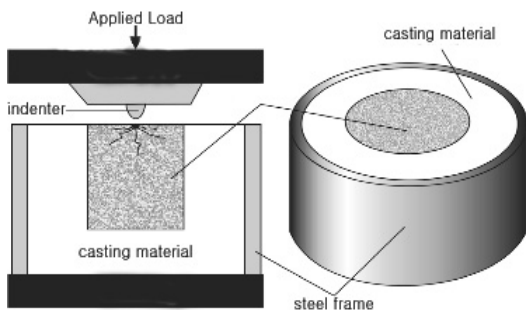


Fig. 1. Punch penetration test apparatus and sample preparation (modified from Yagiz, 2009).

의 두께를 가진 열처리된 철로 제작하였다. 시험체 제작 시에는 코어 주변을 압축강도 약 40 MPa, 인장강도가 약 4 Mpa인 다이아스톤으로 캐스팅 하였는데 앞서 설명된 이유와 같이 암석에 충분한 구속력을 제공하기 위해서이다. 시험 시에 캐스팅된 재료와 함께 암석시편이 팽창하게 되므로 시험체의 분리를 용이하게 하기 위하여 본 연구에서는 선형연구와는 달리 구속프레임을 이중으로 제작하였다(Fig. 2). 압입자는 선형연구를 참고하여 (Dollinger et al., 1998; Ozdemir and Nilsen, 1999; Yagiz, 2002; Yagiz, 2009) 120°의 각도를 가지는 콘모양(Conical shape)으로, 압입자의 팁은 응력의 집중으로 인해 발생하는 암석의 쪼개짐을 방지하기 위하여 곡률반경이 3.125 mm가 되도록 제작하였다.

2.2 시험편 제작

압입시험에는 NX코어(직경 54 mm) 크기의 시험편 또는 더 큰 직경의 코어 시험편이 사용 가능하며, 높이와 직경의 비는 최소 1이 되도록 제안된 바 있다(Dollinger et al., 1998). 본 연구에서도 높이와 직경의 비가 최소 1을 만족하는 암석코어를 사용하였으며 NX코어(직경 54 mm)를 사용하였다. 시험편을 제작하는 과정은 다음과 같다. 우선 한쪽 면 또는 양쪽 면이 연마된 코어 시편을 사용하고, 압입시험 시 압입 면으로 사용될 표면은 시험편을 다이아스톤으로 몰딩(molding)하는 과정에서 훼손될 우려가 있으므로 주의한다. 준비된 코어 시료는 압입 면이 바닥을 향하도록 하여 구속프레임의 정중앙에 위치시키고 다이아스톤으로 암석코어의 주변을 몰딩 한다(Fig. 3 참조). 본 연구에서는 비교적 최대 강도 발현 시간이 짧고 빠르게 양생되는 다이아스톤을 사용하였으며 몰과의 배합 시 무게 비는 4:1을 사용하였다. 본 연구에서는 최소 6시간동안 양생하였으나 캐스팅 재료의 강도가 약할 경우 압입하중의 편차가 크게

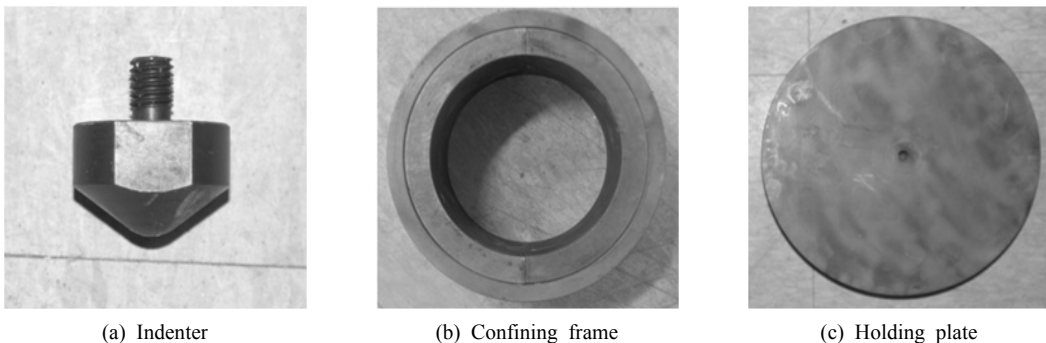


Fig. 2. Punch penetration test apparatus made in this study.

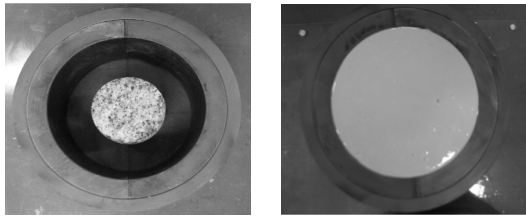


Fig. 3. Preparation of molded specimen for punch penetration test.

발생할 수 있으므로 캐스팅 재료는 그 강도가 충분히 발현 될 만큼 양생시키는 것이 좋다.

2.3 시험 방법

압입시험에서는 최대 변위를 설정할 수 있으며 그 변위를 일정한 속도로 제어할 수 있는 기능을 가진 하중기가 요구된다. 본 연구에서 사용한 하중기는 Shimadzu사에서 제작한 200톤 용량의 장비이다. 준비된 시편을 압입자가 표면의 정 가운데를 가압하도록 위치시킨 후 0.025 mm/초의 일정한 속도로 시험을 수행하였다. 압입시험 중 가해지는 하중은 로드셀(Load Cell)을 통해 측정하였으며, 압입 깊이는 데이터 수집 시스템에 연결된 LVDT로 측정할 수 있다. 하중과 압입 깊이는 0.2초마다 획득하도록 장비를 구성하였다. 압입시험에 사용되는 장비 및 압입시험이 준비된 모습은 Fig. 4와 같다.

압입깊이가 초기에 설정한 최대 변위에 다다른거나 파괴 하중에 이르러 시료가 심하게 파괴 되었을 경우에는 시험을 종료하였는데, 측정되는 하중이 선형 최대 하중의 50% 수준이하로 떨어진 경우 캐스팅 재료와 함께 암석이 심하게 파쇄 된 것을 의미하므로 시험을 종료한다. 본 연구에서는 최대 변위를 6 mm로 설정하였다.

3. 시험 결과

본 연구에서는 황등화강암, 아산편마암, 후동화강암 등 국내 6개 암석에 대한 압입시험을 수행하였으며 6개 암석의 역학적 성질을 정리하면 Table 1과 같다. 아산편마암의 경우 편리각을 두 가지 경우로 나누어 시험을 수행하였으며, Case 1은 압입면과 편리면이 평행한 경우이며 Case 2는 압입면과 편리면이 직교하는 경우이다 (Table 1). 또한 암석의 취성특성에 따라 압입시험에서 나타나는 암석의 파괴양상의 차이를 살펴보기 위하여 Altindag(2002)가 제시한 단축압축강도와 인장강도의 관계(Eq. 2)로부터 정의되는 취성도(B_3)를 산정하였다.

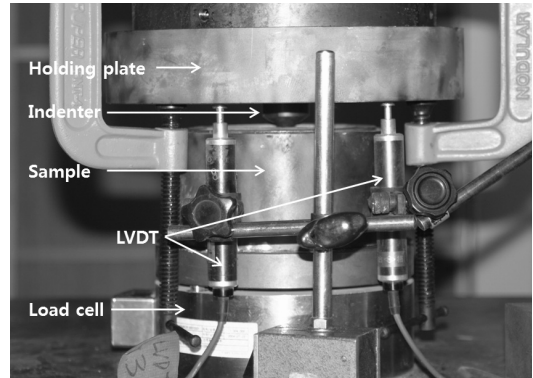


Fig. 4. Experimental set-up and apparatus for punch penetration test.

$$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

3.1 암석의 파괴 양상

커터가 암석을 압입하면서 암석을 절삭할 때 커터의 직하부에서 응력집중이 발생하는 것으로 알려져 있다 (Fig. 5(a)). 응력집중이 발생한 영역의 암석은 미세한 분진 형태로 파쇄되며 이 영역을 파쇄영역(Crushed zone) 또는 압력구(Pressure bulb)라 한다. 이 영역은 암석 내부와 커터주변의 암석으로 집중하중을 분산시키고 전달하는 시발점 역할을 하며 집중하중을 받는 부위로부터 응력이 전달되면서 분쇄되는 입자의 크기는 커터와의 접촉부로부터 멀어질수록 증가하는 것으로 알려져 있으나 파괴 형태나 응력분포에 대해서는 정확하게 알려진 바 없다(Rostami and Ozdemir, 1993).

압입시험에서도 인테터와의 접촉부에서는 응력의 집중으로 파쇄영역과 유사한 영역이 나타나는 것으로 관찰되었으며(Fig. 5(b)) 이로 미루어 볼 때 압입시험에서 인테터에 의한 암석의 파괴메커니즘 및 균열의 전파 특성은 디스크커터의 압입에 의한 것과 유사한 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 압입시험으로부터 얻게 되는 작용력과 압입 깊이를 도시한 전형적인 그래프이다. 시험 시작 후 하중은 선형적으로 증가하다가(Stage-1, Fig. 6 참조) 감소하게 되는데 이 부분은 Fig. 6의 A점에 해당하는 부분이다. 시편의 가장 연약한 방향 위주로 인장균열이 발생하게 되는데 이 때 발생한 균열은 시험이 계속되면서 성장하여 주 균열면을 이루는 것을 확인 할 수 있었다. 초기 인장 균열의 발생 시점인 A점과 최종 파괴 시점인 C점사이의 구간(Stage-2, B)에서는 압입깊이가 증가하

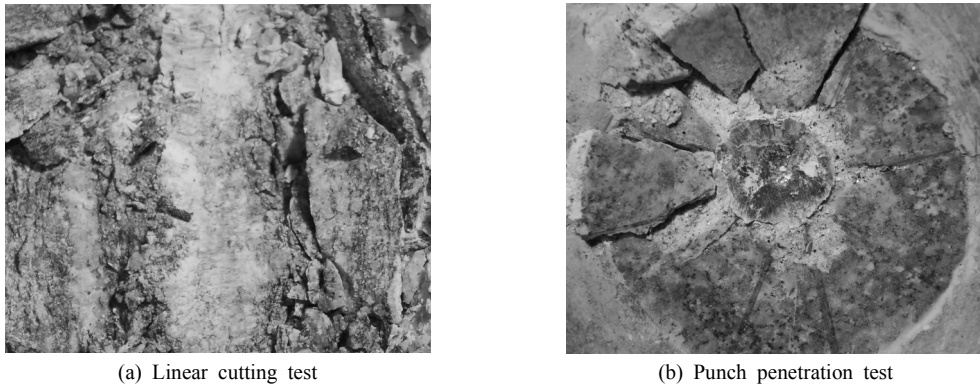


Fig. 5. Pressure bulb induced by penetration of disc cutter and indenter.

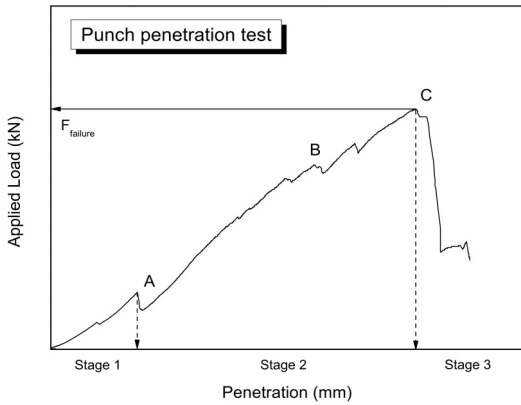


Fig. 6. Typical load vs. penetration depth curve obtained in punch penetration test (Hwangdeung Granite).

면서 추가의 균열이 발생하고 연결되면서 암석의 치핑이 이루어진다. 균열의 전파는 균열이 암석과 다이아스톤의 경계(자유면)에 이를 때까지 계속되며 균열이 이

경계를 넘어서 전파 되면 상대적으로 강도가 약한 다이아스톤은 먼저 파괴에 이르고 암석을 구속하는 힘이 급격히 저하된다. 구속력이 저하되고 이에 따라 암석의 압축변형으로 축적되었던 에너지가 자유면 방향(상부)으로 방출되면서 암석파편이 표면으로 떨어져 나오게 된다. 이점이 암석이 파괴에 이르는 C점에 해당된다. 각각의 단계에 해당되는 암석의 파괴양상을 나타내면 Fig. 7과 같다.

압입시험에 의해 나타나는 암석의 거동은 암석 특유의 성질이기 때문에 같은 암종의 경우 유사한 형태의 그래프가 나타나게 되며 암종에 따라 취성의 차이로 인하여 하중의 증가 형태가 달라짐을 확인 할 수 있었다. 취성도가 높은 암석 하중의 증감이 눈에 띄게 보이는 특징을 나타내었고, 취성도가 낮은 암석은 하중이 완만하게 증가하는 특징을 보였다. Table 2는 취성도가 높은 아산편마암(case 1)과 상대적으로 취성이 낮은 마천화강암의 압입시험 결과를 요약한 그래프이다.

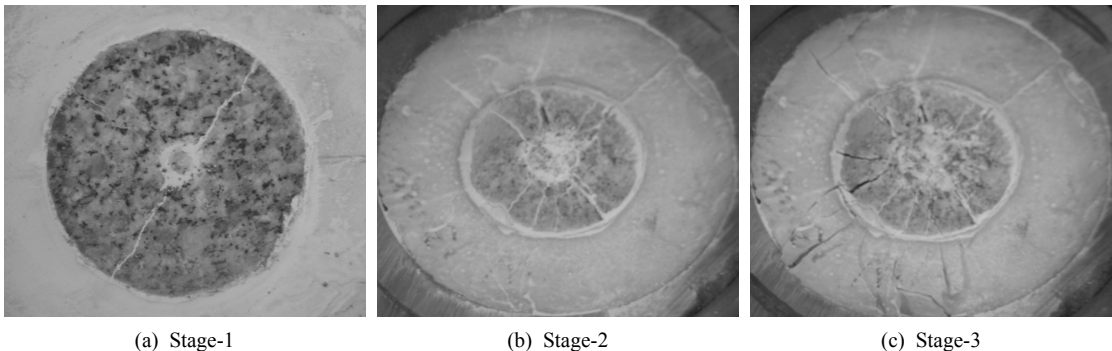
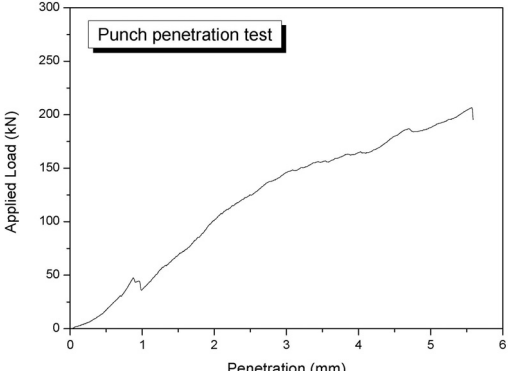
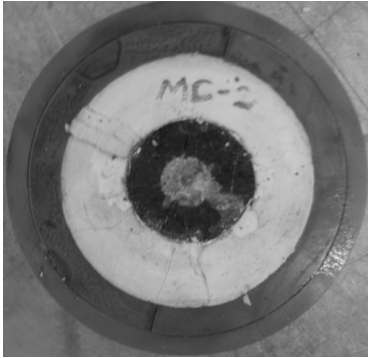
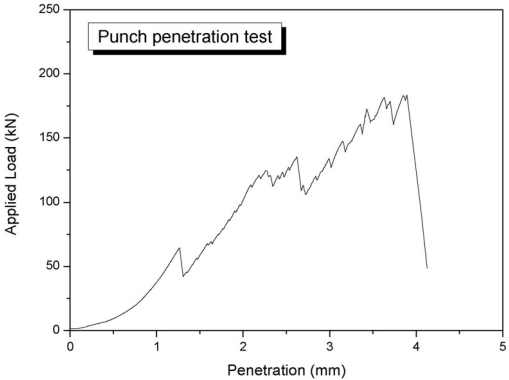
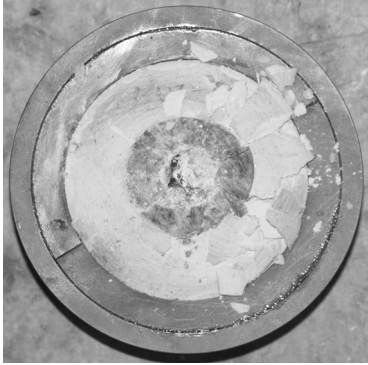


Fig. 7. Fragmentation process of rock in punch penetration test (Hwangdeung Granite)

Table 2. The difference of failure pattern for two different rocks having different brittleness

Rock type	Load vs. penetration diagram	Failure pattern
Macheon Granite ($B_3=799$)		
Asan Gneiss (Case 1) ($B_3=3217$)		

3.2 하중지수 산정법

압입시험에서는 압입깊이와 이에 대응되는 작용하중을 측정할 수 있다(Fig. 6). 본 연구에서 사용한 6개 암석에서 압입깊이가 6 mm를 초과하는 경우 암석 시험편이 파괴되는 현상이 관찰되었으므로, 최대 압입깊이를 6 mm로 설정하여 시험을 수행하였다. 압입시험의 그래프에서 최대 압입깊이 까지의 구간에서 얻게 되는 기울기로부터 하중지수(단위: kN/mm)를 산정하였다. 하중지수를 사용하면 이를 활용하여 회귀 모델식을 구성하고 6 mm 이상의 압입깊이(or 다양한 절삭조건)에 대해서도 작용하중을 예측할 수 있기 때문에 작용력을 예측하는데 합리적인 방법인 것으로 판단되었다. 각각의 지수들은 하나의 암종에 대하여 세 번의 시험을 수행하여 그 평균값을 취하였으며 하중지수의 산정방법은 다음과 같다.

et al., 2003, Dollinger *et al.*, 1998, Yagiz, 2002, Yagiz, 2009) 에서 나타난 바와 같이 압입시험의 결과(Fig. 6)에서는 극대점을 나타내는 점들이 여러 개 반복해서 나타나게 된다. 본 연구에서는 이러한 극대점들과 원점을 잇는 직선의 기울기의 평균값을 취한 값을 Peak Load Index(PLI)로 정의 하였다(Fig. 8). 하중의 감소가 뚜렷하게 보이는 점들을 최소 3개 선택하여 지수를 산정하였다. 선행 연구와 달리 여러 개의 극대점을 선택하여 지수를 산정한 이유는 시험 시에 압입깊이에 따라 기울기가 변화하기 때문이다(Fig. 9). 즉, 최종 압입깊이에서 측정된 하나의 기울기는 다양한 압입깊이에서 암석의 압입저항을 대표하기 어려우므로 본 연구에서는 여러 극대점에서 기울기를 측정하는 방식인 PLI를 산정하였다. Eq. 3에서 n 은 극대점의 개수, F_i 는 작용하중, p_i 는 압입깊이를 의미한다.

- (1) 최대 하중지수(Peak Load Index, PLI)
- 여러 선행 연구(Cook *et al.*, 1984, Copur, 1999, Copur

$$PLI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{p_i} \right) \quad (n \geq 3) \tag{Eq. 3}$$

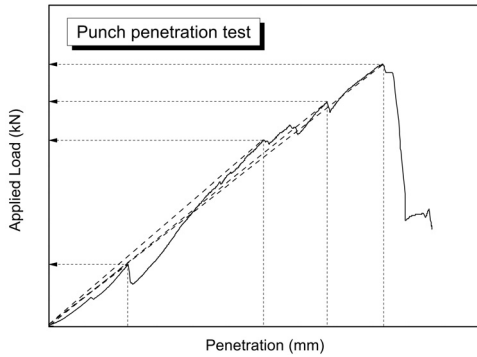


Fig. 8. Concept of Peak Load Index (PLI).

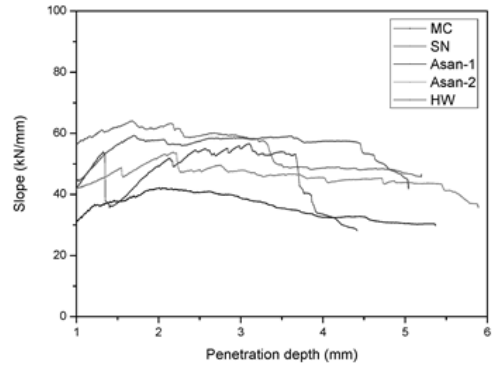


Fig. 9. Deviation of slope values with different penetration depth in punch penetration test.

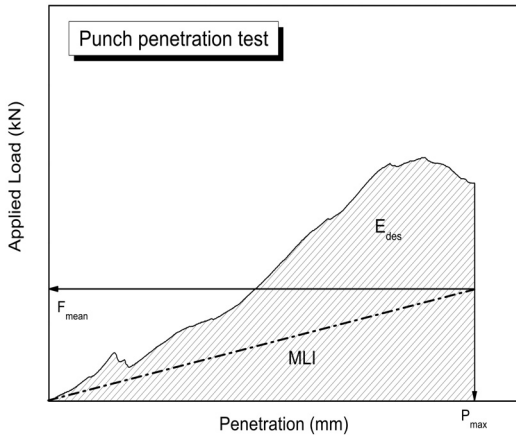


Fig. 10. Concept of Mean Load Index (MLI).

(2) 평균 하중지수(Mean Load Index, MLI)

시험으로부터 얻은 작용력-압입깊이 그래프에서 아래 면적을 적분하면 암석이 파괴되는데 소요되는 에너지 (E_{des})를 구할 수 있으며(Eq. 4) 이를 최종압입깊이(p_{max})로 나누어 주면 암석을 압입하는데 작용한 평균작용력 (F_{mean})을 산출 할 수 있다(Eq. 5). 그러나 암종별로 암석 시험편이 파괴되는 압입깊이가 다르므로 정량적인 비교가 힘들다. 그리하여 압입깊이에 따른 작용하중의 정량적인 예측을 위하여 단위 압입깊이당 평균작용력의 증가량을 나타내는(Eq. 6) 평균하중지수(MLI)를 새로운 지수로 제안하였다(Fig. 10).

$$E_{des} = \int_0^{p_{max}} Fdp \tag{Eq. 4}$$

$$\frac{E_{des}}{p_{max}} = F_{mean} \tag{Eq. 5}$$

$$MLI(kN/mm) = \frac{F_{mean}}{p_{max}} \tag{Eq. 6}$$

3.3 암석시험편의 길이 및 직경의 영향

3.3.1 길이의 영향

본 연구에서는 NX코어에 대하여 최대 6 mm의 압입 깊이에 도달할 때까지 압입시험을 수행하였다. 따라서 압입자가 암석코어에 6 mm 압입되었을 때, 반경방향으로 발생한 균열은 암석 시험편의 하부면까지 전달되지 않아야 한다. 본 연구에서는 황등화강암을 대상으로 암석시험편의 길이를 변화시켜가며(Table 3) 각각 3번씩 시험을 수행하여 균열의 전파 길이를 조사하였다. 시험을 수행한 결과 기본 조건으로 설정한 압입깊이 6 mm의 시험에서는 균열전파길이가 40 mm 정도로 나타났다. 따라서 길이가 27 mm와 41 mm인 시험편은 시험조건에 부합하지 않는다. 시험이 끝난 후 암석의 하부면을 관찰한 결과는 Fig. 11과 같으며 길이 27 mm 시료의 하부면은 균열들이 전파되어 파쇄가 심하게 발생하였으며 41 mm의 경우에도 마찬가지로 현상을 관찰할 수 있었다.

하지만 54 mm 길이의 코어부터는 수직균열의 전파가

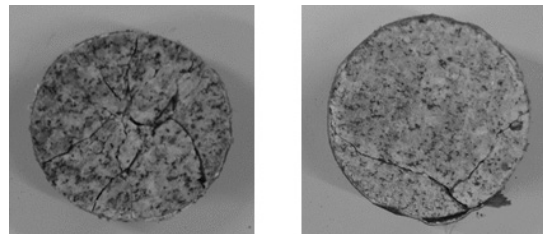


Fig. 11. Propagation of radial tensile cracks at different length of rock core (Left: L=27 mm, Right: L=41 mm).

Table 3. Different specimen geometries for different lengths

Core diameter, D (mm)	Core length, L (mm)	T (mm)	View
54	27	54	
	41	40	
	54	27	
	68	13	

* T: Thickness of casting material beneath rock core

** Rcoek type: Hwangdeung Granite

Table 4. The geometry of specimens for different diameters

Core diameter, D (mm)	Core length, L (mm)	Sample height, H (mm)	View
54	54	81	
60	60	87	
75	75	102	
100	100	127	
125	125	152	

하부면까지 이루어지지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 54 mm와 68 mm 길이의 코어에서는 압입면으로부터 약 40 mm 지점에서 시편이 반으로 쪼개지는 현상이 관찰되었다. 갈라진 면을 중심으로 상부에는 파쇄가 심하게 관찰되었으며 하부에는 구속이 풀리면서 발생한 쪼개짐이 관찰되었다. 따라서 황등화강암의 경우, 압입자가 6 mm 압입되었을 때 수직균열의 전파길이는 압입자의 직하부로부터 34 mm인 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때 6 mm의 압입시험에 필요한 암석코어의 길이는 압입깊이 6 mm와 균열의 전파길이 40 mm를 더하여 50 mm 가량인 것으로 약 판단할 수 있다. 또한 시료길이가 68 mm인 경우에는 하부면을

구속하는 다이아스톤이 파괴되었다. 따라서 하부면을 구속하는 구속재의 두께는 13~27 mm가 필요하다는 것을 뜻한다. 이에 따라 본 연구에서는 하부면을 구속하는 구속재의 두께를 27 mm로 설정하였다.

3.3.2 직경의 영향

본 연구에서는 다양한 직경의 코어를 대상으로 압입 시험을 수행하여 암석시편의 직경이 시험결과에 미치는 영향을 알아보았다. 시험조건은 Table 4와 같으며 그 결과는 Table 5에 요약하였다. 모든 시험에 대하여 직경 대 길이의 비율은 1:1을 사용하였으며 암석의 주변을 구속하는 다이아스톤의 두께는 27 mm로 고정하였다.

Table 5. Results of punch penetration test for different diameter of specimen

Core diameter (mm)	Maximum applied Load (kN)	Failure penetration depth (mm)	PLI (kN/mm)	MLI (kN/mm)
54	241	4.45	60.28	26.39
60	243	4.73	65.42	27.02
75	470	5.13	91.45	34.06
100	542	6.59	81.28	33.60
125	870	8.38	96.14	35.74

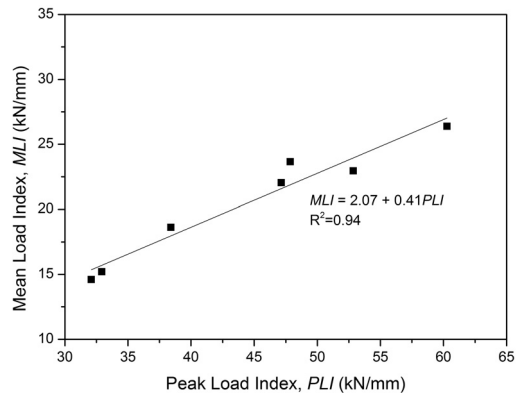
Table 6. Calculation of load indices in punch penetration test

Rock Type	PLI (kN/mm)	MLI (kN/mm)	BI _m (kN/mm)
Hwangdeung Granite	60.28	26.39	55.67
Asan Gneiss (Case 1)	52.85	22.95	52.37
Asan Gneiss (Case 2)	38.41	18.62	37.87
Hudong Granite	32.92	15.20	32.65
Sungnam Gneiss	47.85	23.65	31.75
Paldang Gneiss	47.15	22.04	39.31
Macheon Granite	32.09	14.60	29.31

직경이 증가함에 따라 파괴되는 최대 압입깊이와 작용하중이 함께 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 직경 54 mm와 직경 60 mm의 시험결과는 서로 유사하였으나, 직경 75 mm 이상의 시험결과는 그 이전과 다른 경향성을 보였다(Table 5). 하지만 본 연구에서 사용한 하중지수가 직경 60 mm ~ 75 mm 사이를 기점으로 크게 달라지는 것으로 미루어 볼 때(Table 5 참조) 기존의 연구자들과 본 연구에서 사용된 압입자에 적합한 암석코어의 직경은 54 mm ~ 60 mm가량인 것으로 판단되었다. 암석코어의 직경의 변화에 따른 시험결과의 차이는 압입자와 암석코어의 크기효과에서 기인한 것으로 보여진다. 암석코어에 비해 압입자의 크기가 작을 경우 파쇄영역으로부터 시작되는 반경방향으로의 응력 전달 및 균열 전파가 어렵게 된다. 또한 이러한 경우에는 암석의 치핑이 이루어지지 않는 상태로 과도한 압입이 발생하는 것이 관찰된다.

3.4 디스크커터의 수직하중 예측

3.2절에서 설명한 바와 같이 하중지수 PLI와 MLI는 단위 압입깊이 당 작용하는 하중을 나타내는 척도로써 단위는 kN/mm를 사용한다. 암석의 역학적 특성 중 강성과 같은 단위를 가지게 되는데 이 값은 암석의 고유한 값이다. 이상의 제시된 방법에 따라 시험을 수행하여 6개 암석의 하중지수를 측정된 결과는 Table 6과

**Fig. 12.** Relationship between PLI and MLI.

같다. 암석코어의 직경은 54 mm, 직경대 길이의 비는 1:1, 다이아스톤의 두께는 27 mm를 적용하였다. 선행연구(Yagiz, 2002, Yagiz, 2009)에 의해 제시된 지수와와의 비교를 위하여 BI_m의 산정결과 또한 함께 정리하였다. 하중지수의 크기가 클수록 동일한 압입깊이에서 암석을 파괴시키기 위해서는 더 큰 작용력이 요구됨을 뜻하며 PLI와 MLI는 밀접한 상관성($R^2=0.94$)을 가지고 있는 것으로 나타났다(Fig. 12).

압입지수들과 디스크커터의 작용력 간의 경향성을 파악해 보기 위하여 기존연구로부터 수행되었던 선형절

Table 7. Prediction of cutter normal forces using punch penetration test (p: 4mm, s: 40mm)

Rock type	Measured MNF (kN)	Predicted MNF (kN)	Relative error (%)
Hwangdeung Granite	122.0	105.6	13.44
Asan Gneiss (Case 1)	91.8	88.4	3.70
Asan Gneiss (Case 2)	61.5	74.5	21.14
Hudong Granite	70.4	60.8	13.64
Macheon Granite	90.8	94.6	4.19
Sungnam Gneiss	81.3	88.1	8.34
Paldang Gneiss	52.2	58.4	11.88

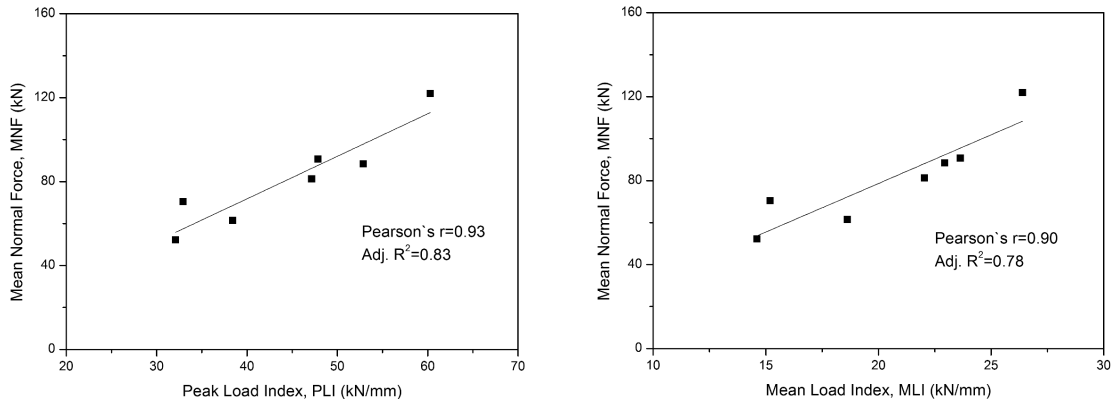


Fig. 13. Correlation between punch penetration indices and mean normal force obtained in the linear cutting tests (cutting condition: p=4 mm, s=40mm).

삭시험(유상화, 2007, 조정우, 2010, 정호영 등, 2011) 결과 중 공통된 절삭조건을 선택하여 그 관계를 파악해 보았다. 본 연구에서는 선형절삭시험에서 측정된 디스크커터의 모든 작용력(0이 아닌 값)을 평균한 값으로 산정되는 평균수직력(mean normal force, MNF)과 평균회전력(mean rolling force, MRF)를 비교대상으로 사용하였다(Cho, 2010). 그러나 암종별로 절삭조건이 달라 여러 절삭조건을 비교하는 것은 불가능하였으며 공통된 절삭조건인 압입깊이 4 mm, 커터간격 40 mm인 조건을 대상으로 하였다.

분석결과 동일한 절삭조건에서 커터의 평균수직력과 압입시험을 통해 산정한 PLI와 MLI 사이에는 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다(Fig. 13). 평균수직력과 PLI, MLI와의 Pearson 상관계수는 각각 0.93과 0.90이 도출되었다. Pearson 상관계수는 변수들 간의 선형관계를 나타내 주는 지표로서 값이 클수록 변수들 간에는 강한 선형의 상관관계를 가지는 것을 의미한다. 회귀곡선의 결정계수(R^2) 역시 0.83으로 강한 상관관계를 가지는 것으로 나타나 압입시험을 통해 산정한 하중지수

들은 디스크커터의 평균수직력을 산정하는데 있어 중요한 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

디스크커터의 수직력은 압입시험을 통해 산정된 지수들과 강한 상관관계를 보이는 반면에 회전력의 경우에는 Fig. 14와 같이 그 관계가 약한 것으로 분석되었다. 회전력이 일체 고려되지 않는 시험이기 때문인 것으로 보이며 선형적인 상관관계가 낮은 하나 PLI와 MLI가 증가함에 따라 커터의 회전력이 증가하는 경향은 확인할 수 있었다.

Eq. 6의 관계로부터 하중지수(MLI)에 적용하고자 하는 압입깊이를 곱할 경우 해당 압입깊이에 작용하는 하중을 예측할 수 있는데 이러한 방법은 커터의 수직력과 압입지수 간의 선형비례관계가 가정되어야 한다. 이것을 가정하였을 때 PLI는 최대 수직력, MLI는 평균 수직력을 예측하는데 사용될 수 있을 것으로 판단되나 본 연구에서는 평균 수직력에 대한 분석을 중점적으로 수행하였다. 결과분석에 사용된 선형절삭시험에서 최대 수직력을 산정하지 않았기 때문이다. 평균 수직력과 최대 수직력을 예측한 결과는 Table 7에 정리하였으며 측

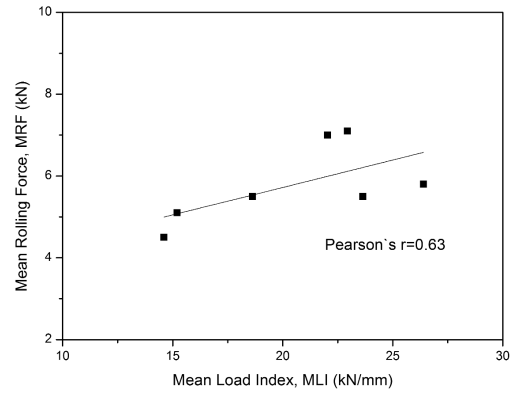
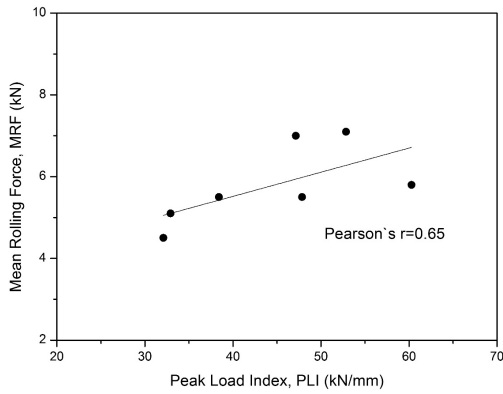


Fig. 14. Correlation between punch penetration indices and mean rolling force obtained in the linear cutting tests (cutting condition: p=4 mm, s=40mm).

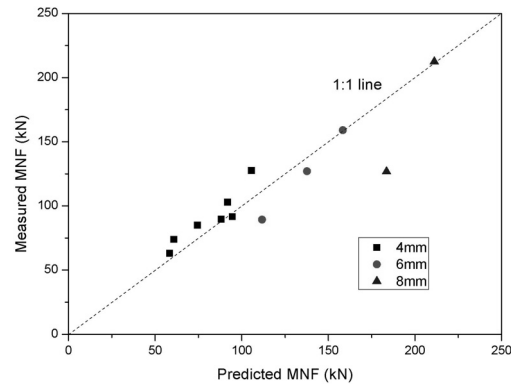
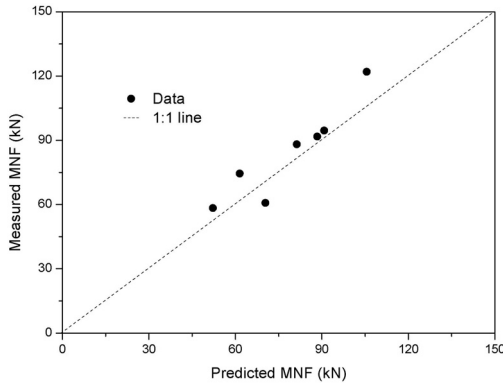


Fig. 15. Comparisons between mean normal forces obtained in LCM test and predicted normal forces in this study(p=4 mm and s=40 mm)

Fig. 16. Relationship between the measured forces in LCM test and predicted forces at different penetration depths.

정값과 예측값을 비교한 결과는 Fig. 15에 나타내었다.

같은 방법으로 압입깊이 4 mm, 6 mm, 8 mm를 대상으로 평균수직력을 예측하고 그 결과를 선형절삭시험결과(Yu, 2007, Cho, 2010, Jeong et al., 2011)와 비교해 보았다. 그 결과는 Fig. 16과 같으며, 압입깊이 별로 절삭조건이 일정하지 않아 비교적 공통된 시험조건인 커터간격이 48~60 mm 범위에 있는 결과를 사용하였다. 이상의 결과로부터 압입시험을 통해 디스크커터의 수직하중을 개략적으로 추정하는 것은 합리적인 결과를 도출하는 것으로 보인다. 그러나 본 연구에서 가정한 것과는 달리 선행연구에서는 디스크커터의 수직하중은 압입깊이와 선행적인 비례관계를 가지지 않으며 커터간격에도 영향을 받는 것으로 나타났으므로(Cho, 2010, Jeong et al., 2011), 디스크커터의 수직하중을 보다 합리적으로 산정하기 위해서는 절삭조건(압입깊이, 커터

간격)을 함께 고려해야 할 것으로 판단되었다.

4. 결론

압입시험은 암석을 압입자로 압입하여 암석의 물리적 특성에 따라 암석의 굴진 저항성을 측정하는 유용한 실내시험방법 중 하나이다. 하지만 적용성을 보다 높이기 위해서는 가장 최적화 된 시험법 및 시험 결과의 해석 방법이 제안되어야 할 것으로 판단되었다. 이에 본 연구에서는 규격화된 시험을 수행하기 위하여 암석시편의 크기와 길이를 변화시켜 가며 시험을 수행하여 사용한 압입자에 적합한 시험조건을 제안하였다.

본 연구의 시험결과로부터 압입시험은 코어시료를 사용하는 실험실 규모의 시험을 통하여 TBM의 추력을 개략적으로 추정할 수 있는 유용한 시험임을 확인할 수

있었다. 시험에서 얻은 작용하중과 압입깊이의 관계 그래프로부터 하중지수를 산정한 후 수직하중을 예측하는 것은 합리적인 것으로 나타났다. PLI와 MLI는 최종 파괴점에서의 기울기를 산정하는 BI_m 보다 다양한 압입 깊이에 의한 하중의 변화량을 반영할 수 있는 것으로 판단되었다.

하지만 TBM 디스크커터의 작용력을 보다 합리적으로 추정하기 위해서는 더 많은 변수들을 고려하여야 할 것이다. 커터간격은 선형절삭시험에 대한 선행연구에 나타나 있듯이 디스크커터의 작용력에 영향을 주는 중요한 변수 중에 하나이므로 추후 연구를 통하여 커터의 간격을 고려한 작용력을 고려해야 할 것이다. 비록 회전력이 고려되지는 않지만 TBM의 사양설계 시 결정되어야 할 핵심사양 중에 하나인 추력을 암석코어를 사용한 실내시험을 통해 추정할 수 있다는 것은 큰 의미를 지닌다고 하겠다. 한번 적용이 되면 설계 변경이 어려운 TBM 공법의 특성 상 설계 단계에서 해당 암반에 대한 굴진율을 예측하고 굴착성능을 평가하는 것이 공사기간과 비용을 산정하는데 있어 매우 중요하기 때문이다. 따라서 시험 수행 시 많은 비용과 노력이 소요되고 대형 암석 시험체를 채취해야 한다는 점에서 다양한 공사구간에 대한 성능예측이 현실적으로 어려운 선형절삭시험의 한계점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

압입시험 뿐만 아니라 TBM의 굴진성능예측을 위한 기타 실내시험(NTNU 등)의 활용도를 높이기 위해서는 지속적인 연구를 통하여 국내 암석에 대한 시험결과를 데이터베이스화하고 현장굴진자료와 상관관계를 규명하여 예측모델을 만들어 나가는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구의 주요 결과들은 국내의 TBM 성능예측모델 확립을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E09) - 1세부과제: TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

REFERENCES

- Altindag, R., 2002. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills. J. South African Inst. Min. Metall. 102.1, 61-66.
- Bruland, A., 1998, Hard rock tunnel boring, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Cook, N. G. W., Hood, M., Tsai, F., 1984, Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 21.2, 97-107.
- Copur, H., 1999, Theoretical and Experimental Studies of Rock cutting with Drag bits toward the development of a performance prediction model for roadheaders, PH. D. Thesis, Colorado School of Mines, T 5259, Colorado, USA
- Copur, H., Blogin, N., Tuncdemor, H., Balci, C., 2003, A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 103.9, 589-600.
- Dollinger, G. L., Handewith, H.J., C. D. Breeds, 1998, Use of the punch test for estimation TBM performance, Tunneling and Underground Space Technology. 13.4, 403-408.
- Handewith, H. J., 1970, Predicting the economic success of continuous tunneling and hard rock. 71st Annual General Meeting of the CIM, Vol 63, 595-599.
- Ho-Young Jeong, Seokwon Jeon, Jung-Woo Cho, Soo-Ho Chang and Gyu-Jin Bae, 2011, Assessment of Cutting Performance of a TBM Disc Cutter for Anisotropic Rock by Linear Cutting Test, Journal of Korean society for rock, 21.6, 508-517.
- Jung-Woo Cho, 2010, Linear cutting test and numerical study on the assessment of rock cuttability of a TBM disc cutter, Doctoral Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Ozdemir, L., Nilsen, B., 1999, Recommended laboratory testing for TBM projects, AUA News, Vol. 14, 21-35.
- Rostami, J. and Ozdemir, L., 1993, A new model for performance prediction of hard rock TBMs, Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference(RETC), 793-809.
- Rostami J., Ozdemir L., and Nilsen B., 1996, Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models, Proceedings, ISDT, 1-11.
- Sang-Hwa Yu, 2007, A Study on rock cutting behavior by TBM disc cutter, MD Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Yagiz, S., 2002, Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model based penetration for hard rock tunneling machines, PH.D. Thesis, Colorado School of Mines, T 5605, Colorado, USA.
- Yagiz, S., 2009, Assessment of brittleness using rock strength and density with punch test, Tunneling and Underground Space Technology. 24.1, 66-74.



정호영

2008년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 석사

Tel: 02-880-7230
E-mail: hyjung04@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 박사과정



조정우

2002년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사

Tel: 053-580-0138
E-mail: chojw1665@gmail.com
현재 한국생산기술연구원 대경권지역
본부 메카트로닉스연구그룹 선임연구원



전석원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1991년 (미)캘리포니아 주립대학 대학원
공학석사
1996년 (미)아리조나 주립대학 공학박사
Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 교수