

선형절삭시험에 의한 더블디스크커터와 싱글디스크커터의 커터 작용력과 축응력에 대한 실험적 평가

최순욱¹ · 장수호^{2*} · 박영택³ · 이규필³ · 배규진⁴

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구원

Comparative analysis of cutter acting forces and axial stresses of single and double disc cutters by linear cutting tests

Soon-Wook Choi¹, Soo-Ho Chang^{2*}, Young-Taek Park³, Gyu-Phil Lee³, Gyu-Jin Bae⁴

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Researcher

²Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

⁴Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Research Fellow

ABSTRACT: This study aims to evaluate cutter acting forces as well as axial stresses and torques in the shaft of two kinds of disc cutters including a single disc cutter and a double disc cutter with the same cutter ring geometry in a series of linear cutting tests. From the tests, the mean values of normal forces and rolling forces acting on the double disc cutter were approximately twice as high as those from the single disc cutter. Similarly, the mean values of axial stresses in the shaft of the double disc cutter were also twice as high as those from the single disc cutter even though the comparisons of torques from two kinds of disc cutters were insignificant since they showed very low values. However, it is necessary to take the durability of a tapered roller bearing used for the double disc cutter into high consideration since the average normal force from the double disc cutter exceeds the allowable force for a disc cutter with the diameter of 432 mm (17 inches). Finally, there is no practical problem in terms of axial stresses in the shaft of the double disc cutter since they are much lower than the yielding stress of the cutter shaft material, even though the axial stresses in the shaft of the double disc cutter are approximately twice as high as those from the single disc cutter.

Keywords: Linear cutting test, Double disc cutter, Cutter force, Axial stress, Torque

초 록: 본 연구는 선형절삭시험 중에 동일한 커터 링 형상을 가진 더블디스크커터와 싱글디스크커터에 발생하는 커터작용력과 각 디스크커터 축에 발생하는 축응력 및 토크를 평가하였다. 선형절삭시험 결과, 선형절삭시험 중에 발생한 더블디스크커터의 연직력과 회전력의 평균값은 싱글디스크커터의 약 두 배 내외인 것으로 측정되었다. 더블디스크커터의 축에 작용하는 축응력의 평균값 역시 연직력과 마찬가지로 싱글디스크커터의 두 배 정도로 나타났지만, 토크의 경우에는 전체적으로 낮은 측정값을 보여 비교의 의미가 없는 것으로 판단되었다. 하지만 더블디스크커터의 연직력의 평균값이 직경 432 mm(17인치) 디스크커터의 허용하중을 상회하기 때문에 테이퍼 롤러 베어링의 내구성능에 대한 검토가 필요한 것으로 판단되었다. 또한 더블디스크커터 축에 작용하는 축응력은 싱글디스크커터의 약 두 배 정도로 발생하였지만, 일반적으로 사용하는 디스크커터 축 재료의 항복강도를 고려할 때 적용 상에 문제가 없는 것으로 나타났다.

주요어: 선형절삭시험, 더블디스크커터, 커터작용력, 축응력, 토크

*Corresponding author: Soo-Ho Chang

E-mail: sooho@kict.re.kr

Received March 5, 2014; Revised March 14, 2014;

Accepted March 18, 2014

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

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.

1. 서론

LCM (Linear Cutting Machine)에 의한 선형절삭실험은 40년 이상 TBM (Tunnel Boring Machine)의 성능을 예측하기 위해 사용되었다(Ozdemir and Nilsen, 1993). 선형절삭실험은 TBM에 사용하는 실물 크기의 디스크커터를 이용하여 암석을 절삭하므로 실제와 유사한 커터작용력(cutter force)이 발생하게 되어 축적영향(scale effect)에 대한 고려가 필요 없다는 점에서 신뢰도가 높다. 이러한 이유로 선형절삭실험은 TBM의 면판설계를 수행하고 굴진성능을 예측하기 위해 많은 연구자들에 의해 수행되었다(Snowdon et al., 1982; Rostami and Ozdemir, 1993; Rostami, 1997; Bilgin et al., 1999; Chang et al., 2011; Choi et al., 2013).

선형절삭실험을 사용한 TBM의 굴진성능예측모델에는 CSM (Colorado School of Mines)모델과 KICT (Korea Institute of Construction Technology)모델이 있다. CSM에서는 V형상의 디스크커터를 대신해 일반화된 CCS (Constant Cross Section)타입의 디스크커터에 의한 암석파괴과정을 이론적으로 분석하여 CCS (Constant Cross Section) 디스크커터에 기반한 굴진성능예측모델을 발표하였다(Rostami and Ozdemir, 1993). KICT모델은 TBM현장 굴진자료와 선형절삭실험의 결과에 대해 다변량 회귀분석을 실시하여 TBM의 굴진성능을 예측한 모델이다. 이 모델은 암반대응형 설계모델로서 잘 알려져 있는 NTNU (Norwegian University of Science and Technology)모델에서 활용되는 DRI (Drilling Rate Index) 등과 같은 특성지표를 고려하였다는 점과 국내의 암반특성이 반영되었다는 특징을 가지고 있다(Chang et al., 2011)

디스크커터의 작용력은 연직력(normal force), 회전력(rolling force) 및 측력(side force)로 구분한다. 연직력은 디스크커터의 작용력 중에서 가장 크기 때문에 디스크커터의 허용하중을 검토하는데 사용하고, 또한 각 디스크커터 연직력의 합인 TBM의 소요 추력

을 산정하는데 사용한다. 회전력은 TBM 커터헤드의 소요 토크를 계산하는데 사용한다. 그러나 측력은 선형으로 절삭되는 선형절삭실험의 특성상 그 결과에 큰 의미를 두지 않는 것이 일반적이다. 디스크커터의 작용력은 대상지반의 강도뿐만 아니라 커터 링의 형상에 따라 달라지는 커터 링과 암석과의 접촉부 면적에 의해 영향을 받는다(Chang et al., 2013). 또한 디스크커터의 관입깊이(penetration depth), 즉 TBM 커터헤드의 1회전당 순관입깊이(net penetration depth)와 비례한다(Rostami, 2013; Balci and Tumac, 2012). 위와 같이 디스크커터의 작용력은 커터의 직경에 비례하는 디스크커터의 허용하중의 만족여부를 검토하고 TBM의 추력 및 토크와 같은 핵심 설계사양을 결정하는데 필수적인 평가항목이다(Entacher et al., 2012).

본 연구에서는 선형절삭실험 중 더블디스크커터(double disc cutter)의 커터작용력을 측정하여 싱글디스크커터(single disc cutter)의 커터작용력과 비교하고자 하였다. TBM 설계에서 각 디스크커터는 커터헤드 상에서 불규칙하게 배열된 것으로 보이지만, 커터헤드의 중심을 기준으로 각 디스크커터의 궤적을 그려보면 일정한 간격을 가지는 동심원이 된다. 이때 일반적으로 커터헤드 중심부에 위치하는 더블디스크커터의 두 개의 커터 링 역시 동심원을 그리게 된다. 그러나 더블디스크커터의 경우에는 두 개의 커터 링 사이를 다른 디스크커터의 동심원이 지나가게 하는 방법으로 커터간격을 유지한다. 즉, 더블디스크커터의 간격은 해당 커터헤드 상의 싱글디스크커터의 커터간격에 비해 두 배라는 뜻이다. 이와 같이 실제 설계적용과 차이가 있지만, 본 연구에서는 커터헤드 상에 설정된 커터간격에 따라 배열된 각각의 싱글디스크커터에 의해 수행되는 암석절삭작업이 순차적으로 이루어질 때의 커터작용력과 동일한 커터간격에서 더블디스크커터의 암석절삭작업이 이루어질 때의 커터작용력의 차이를 비교하기 위하여 아래와 같이 선형절삭실험을 수행하였다. 더불어 디스크커터의 성능

을 평가하기 위하여 Choi et al. (2013)이 수행한 비와 같이, 디스크커터의 축에 변형률게이지를 설치하여 선형절삭시험동안 디스크커터의 축(shaft)에 작용하는 축응력(axial stress)과 토크(torque)를 측정하여 디스크커터에 작용하는 하중조건을 파악하고자 하였다.

2. 실험장비 및 실험방법

2.1 디스크커터 및 LCM

본 연구에서는 선형절삭시험을 위하여 Fig. 1(a), (b)와 같이 더블디스크커터와 싱글디스크커터를 사용하였다. 디스크커터는 국내 A업체에서 제작한 상용제품으로서 커터 링 직경이 432 mm(17인치)인 CCS타입이다. 더블디스크커터와 싱글디스크커터에 의한 암석절삭 시 커터작용력의 차이를 파악하기 위하여 각 디스크커터의 커터 링 형상은 동일하게 제작하였으며, 이때 더블디스크커터의 커터 링 간격은 90 mm로 설정하여 별도로 제작하였다.

LCM에 더블디스크커터를 설치하여 선형절삭시험을 수행할 경우 LCM에 나타나는 커터작용력은 산술적으로 싱글디스크커터의 두 배로 나타나기 때문에 싱글디스크커터에 맞추어 제작되어있는 장비의 하부구조 및 하부 이송장치를 더블디스크커터에 맞추

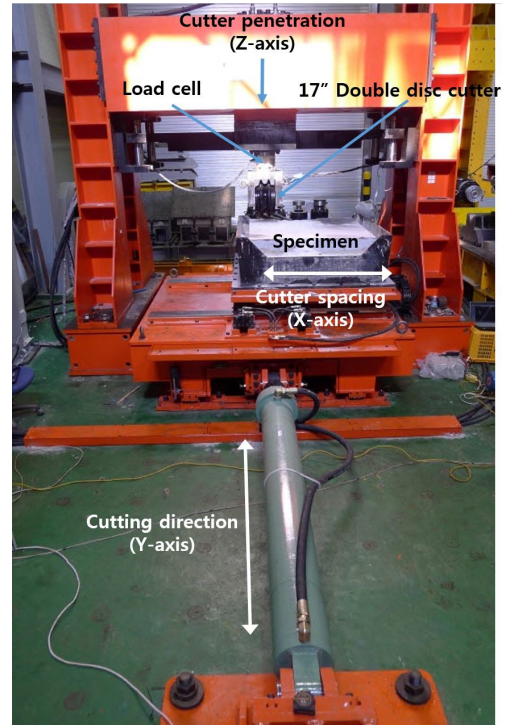


Fig. 2. Main components of the linear cutting machine

어 수정하였다. Fig. 2는 디스크커터의 절삭방향(Y축 방향)의 유압 액추에이터(hydraulic actuator) 용량을 확장한 LCM이다. 수정된 LCM은 기존과 마찬가지로 3개의 직교축에 대해 유압 액추에이터를 이용하여 디스크커터의 관입깊이 및 간격의 조절과 Y축 방향으



(a) Double disc cutter



(b) Single disc cutter

Fig. 1. Two-different types of disc cutters used for linear cutting tests

로의 절삭작업을 수행할 수 있으며, 디스크커터 상부에는 3분력 로드셀을 설치하여 선형절삭실험동안 디스크커터에 작용하는 3방향의 커터작용력인 연직력(normal force, Z축 방향), 회전력(rolling force, Y축 방향), 측력(side force, X축 방향)을 측정할 수 있다.

2.2 디스크커터 축에 작용하는 축응력과 토크의 계측방법

본 연구에서는 선형절삭실험 중에 디스크커터 축(shaft)에 발생하는 축응력(axial stress)과 토크(torque)를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 디스크커터 축(shaft)의 표면 일부를 가공하여 축응력과 토크를 측정할 수 있는 변형률게이지를 설치하였다. 변형률게이지는 커터 링이 설치되는 중앙부에 가깝게 두 개씩 설치하였으며, 연결선은 디스크커터의 축을 따라 연결하여 디스크커터의 몸체(hub)와 축사이를 고정시키는 옆판(seal carrier)과 덮개(cover)를 관통시켜 외부로 나오게 하였다. 변형률게이지는 계측값의 정확도를 높이기 위해 게이지별로 두 개씩 설치하였으며, 계측된 결과는 산술평균하여 사용하였다.

변형률게이지들과 디스크커터 상부의 3분력 로드셀은 데이터로거(DS-NET ver3.3.5)에 연결하여 변형

률과 3방향 커터 작용력을 수집 및 저장하였다. 본 연구에서는 선형절삭실험에 의한 데이터의 왜곡이 나타나지 않는 데이터의 수를 고려하여 자료획득속도(sampling rate)를 500 Hz로 정하고 데이터를 저장하였다.

축응력 산정을 위해 측정된 변형률은 다음의 식 (1)을 사용하여 디스크커터의 축에 작용하는 축방향(longitudinal)응력으로 환산하였고, 토크 산정을 위해 측정된 변형률은 다음의 식 (2)를 이용하여 디스크커터의 축에 작용하는 토크로 환산하였다.

$$\sigma_{as} = E_s \cdot \epsilon_{as} \quad (1)$$

여기서 σ_{as} 는 디스크커터 축의 축응력(axial stress), E_s 는 디스크커터 축의 탄성계수(elastic modulus, 210 GPa), ϵ_{as} 는 디스크커터 축에서 측정된 축방향변형률(strain for measuring axial stress)이다.

$$M_s = \frac{\epsilon_s \cdot E_s \cdot Z_p}{1 + \nu} \quad (2)$$

여기서 M_s 는 디스크커터 축의 토크(torque), ϵ_s 는 디스크커터 축에서 측정된 변형률(strain for measuring

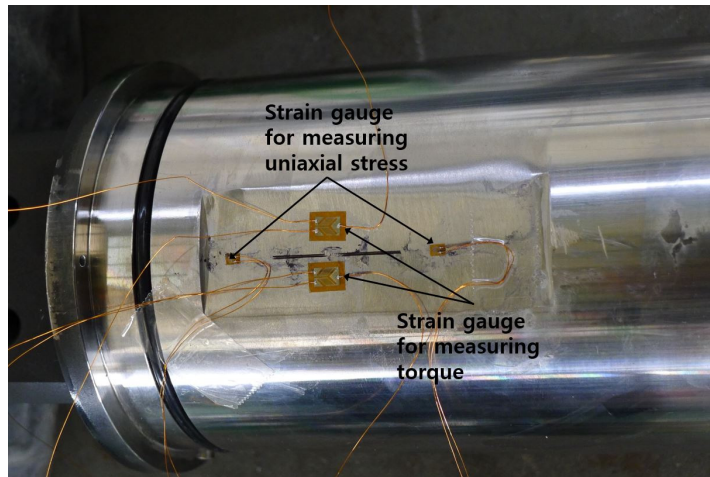


Fig. 3. Installation of strain gauges on the shaft of disc cutter

torque), E_s 는 디스크커터 축의 탄성계수(elastic modulus, 210 GPa), Z_p 는 디스크커터 축의 극단면계수(polar modulus of section), ν 는 디스크커터 축의 포아송비(Poisson's ratio)이다. 디스크커터 축의 극단면계수는 다음의 식 (3)으로부터 계산할 수 있다.

$$Z_p = \frac{\pi d^3}{16} \quad (3)$$

여기서 Z_p 는 디스크커터 축의 극단면계수(polar modulus of section), d 는 디스크커터 축의 직경(diameter)이다.

2.3 실험체 제작 및 선형절삭시험방법

선형절삭시험을 위한 암석실험체는 길이 1.3 m, 폭 1.15 m, 높이 0.4 m의 크기의 무결암으로 제작되었고 평균 압축강도가 178.44 MPa인 황등화강암을 사용하였다(Table 1). 암석실험체는 LCM의 대차에 설

치한 후 암석실험체에 충분한 구속이 가해질 수 있도록 대차와 암석실험체 사이에 모르타르를 채워 넣었다(Fig. 4).

선형절삭시험은 Fig. 2와 같이 암석실험편이 설치된 대차 상부에 디스크커터를 설치한 다음, X축 방향의 액추에이터를 이용하여 절삭간격을 조절하고 Z축 방향의 액추에이터를 사용하여 디스크커터의 관입깊이를 조절한다. 사전에 결정된 관입깊이와 절삭간격의 조절이 완료되면 Y축 방향으로 암석의 절삭이 이루어지며, 이때 디스크커터 상부에 설치되어 있는 3분력 로드셀로부터 3방향 커터작용력뿐만 아니라 디스크커터 내부의 축응력 및 토크 측정을 위한 변형률게이지의 변형률이 측정된다.

선형절삭시험에 사용하는 암석실험체는 무결암으로 제작되고 적절한 실험체 크기로 가공하였기 때문에 표면이 일정하다. 따라서 연속적인 굴착에 의해 이미 손상을 받은 실제 TBM터널의 굴진면과 유사한 조건을 모사하기 위하여 Rostami (1997)는 선형절삭

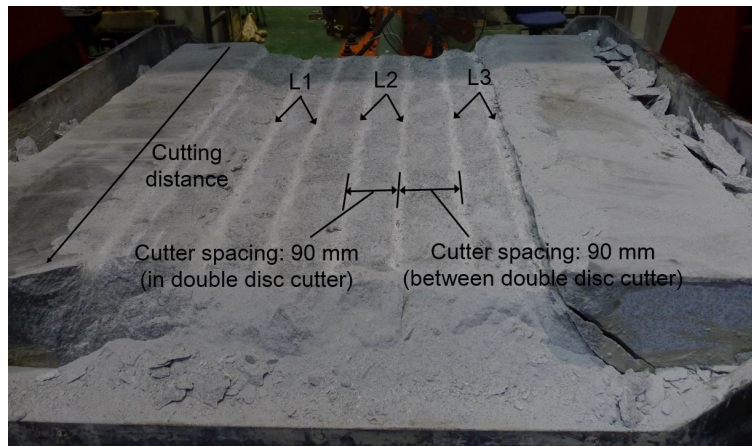


Fig. 4. Rock surface after a series of linear cutting tests by a double disc cutter

Table 1. Physico-mechanical properties of Hwangdeung granite

Uniaxial compressive strength (MPa)	Brazillian tensile strength (MPa)	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Shore hardness
178	8.20	2.67	0.44	72	0.23	68

실험의 본 절삭실험 전에 사전절삭(pre-conditioning)을 실시하였다. 본 연구에서도 마찬가지로 선형절삭 실험을 수행하기 전에 본 절삭 실험조건과 동일한 커터 간격과 커터 관입깊이로 사전절삭을 2회 실시하여 실제 TBM 굴진과 유사하게 굴진면을 모사한 다음 선형절삭실험을 수행하였다.

Fig. 4는 더블디스크커터를 사용한 선형절삭실험 후의 암석실험체 표면이다. 더블디스크커터는 Fig. 4의 L1, L2, L3와 같이 한 번의 절삭작업에서 두 개의 절삭선이 나타난다. 본 연구에서는 커터간격을 일정하게 유지하기 위하여 더블디스크커터 간의 절삭간격도 더블디스크커터의 커터 링 간의 간격과 동일하게 90 mm로 설정하여 실험을 수행하였다.

서론부에서 설명한 바와 같이 선형절삭실험에서 더블디스크커터와 싱글디스크커터에 의한 커터작용력의 차이를 파악하기 위하여 싱글디스크커터의 절삭작업은 더블디스크커터의 커터간격인 90 mm를 기준으로 80 mm, 100 mm의 커터간격에 대해 3 mm, 5 mm, 7 mm의 커터 관입깊이로 선형절삭실험을 수행하였다. 그리고 더블디스크커터는 커터간격이 90 mm이고 커터 관입깊이가 3 mm, 5 mm, 7 mm인 경우에 대해서만 실험을 수행하였다.

선형절삭실험에서 암석실험체의 좌우측 절삭선은

인접한 커터들의 절삭에 의한 상호작용의 영향이 작기 때문에 외측의 절삭선을 제외한 실험결과들만을 분석에 활용한다(Chang et al., 2012; Choi et al., 2013). 또한 절삭깊이가 깊어질수록 최외측 절삭선의 절삭시에 디스크커터의 몸체부분(Hub)이 암석표면에 닿을 수 있기 때문에 커터관입깊이가 깊어질수록 최외측의 결과의 활용은 제한된다. 따라서 본 연구에서도 더블디스크커터의 경우는 Fig. 4의 L2를 기준으로하고 싱글디스크커터의 경우는 중앙부인 3번과 4번의 절삭선을 기준으로 결과를 분석하였다.

3. 선형절삭실험결과

3.1 커터작용력 측정 결과

Fig. 5는 선형절삭실험 조건으로 커터간격이 90 mm이고 커터 관입깊이가 7 mm인 경우에서의 더블디스크커터와 싱글디스크커터에 의한 커터작용력을 측정한 결과이다. 예상된 바와 같이 더블디스크커터를 사용한 선형절삭실험에서의 커터작용력이 싱글디스크커터에서의 결과에 비해 확실히 크게 나타났다. 본 연구의 목적인 더블디스크커터에서 나타나는 커터작용력과 싱글디스크커터에서의 커터작용력을 비교하

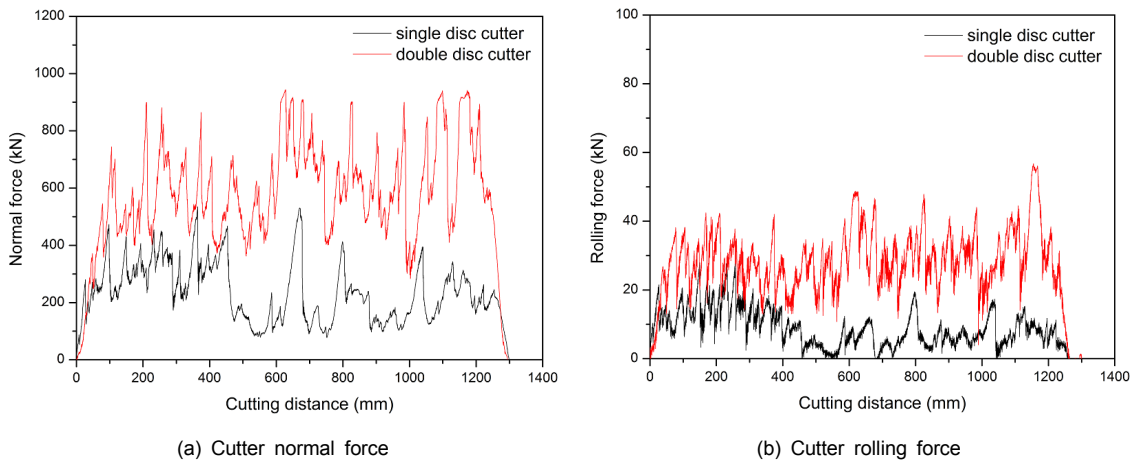


Fig. 5. A comparisons of cutter acting forces by single disc cutter and double disc cutter during linear cutting tests(when cutter spacing was 90 mm and penetration depth was 7 mm)

기 위하여 Table 2와 Table 3과 같이 커터 관입깊이와 커터 간격에 따라 연직력과 회전력의 최대값과 평균값을 정리한 다음, Table 4와 같이 싱글디스크커터에서의 커터작용력에 대한 더블디스크커터에서의 커터 작용력의 비율을 산정하였다.

더블디스크커터의 커터작용력을 살펴보면 연직력의 최대값은 991 kN이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 397~593 kN으로 나타났다. 또한 회전력의 경우 최대값이 55 kN이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 6.8~28.3 kN으로 측정되었다. 디스크커터의 커터작용력 중에서 일반적으로 연직력이 가장 크기 때문에 연직력의 평

균값은 디스크커터의 허용하중을 판단하는 지표로서 사용된다. 디스크커터의 허용하중의 결정에서 가장 중요한 부품은 커터 링과 테이퍼 롤러 베어링(tapered roller bearing)이며, 본 연구에서 사용한 17인치 디스크커터의 허용하중은 250 kN으로 알려져 있다(KTA, 2008; Entacher et al., 2012). 그러나 더블디스크커터의 커터작용력의 평균값은 현재 알려져 있는 디스크커터의 허용하중을 상회하는 것으로 측정되었다. 따라서 더블디스크커터의 내구성능에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

선형절삭시험뿐만 아니라 TBM에 의한 암석의 절삭과정에서 암석의 절삭면이 고르지 않기 때문에 디

Table 2. Maximum and mean values of cutter normal and rolling forces depending on penetration depths (double disc cutter, cutter spacing: 90 mm)

Penetration depth (mm)	Normal force (kN)		Rolling force (kN)	
	Maximum	Mean	Maximum	Mean
3 mm	868.3	397.2	22.0	6.8
5 mm	991.1	480.4	28.3	11.6
7 mm	909.3	593.3	55.2	28.3

Table 3. Maximum and mean values of cutter normal and rolling forces depending on penetration depths and cutter spacing (single disc cutter)

Penetration depth (mm)	Cutter spacing (mm)											
	80 mm				90 mm				100 mm			
	Normal force (kN)		Rolling force (kN)		Normal force (kN)		Rolling force (kN)		Normal force (kN)		Rolling force (kN)	
	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean
3 mm	748.7	240.1	22.7	6.4	705.4	174.0	19.6	3.4	558.1	173.8	20.0	3.6
5 mm	545.9	237.5	22.2	7.2	622.3	254.0	21.4	7.3	593.7	217.3	20.0	6.2
7 mm	521.0	200.3	29.6	7.9	534.7	232.9	28.0	8.5	855.3	282.7	41.7	13.7

Table 4. The ratio of cutter acting forces of double disc cutter to those of single disc cutter

Penetration depth (mm)	Double disc cutter / Single disc cutter											
	Double (S=90 mm) / Single (S=80 mm)				Double (S=90 mm) / Single (S=90 mm)				Double (S=90 mm) / Single (S=100 mm)			
	Normal force		Rolling force		Normal force		Rolling force		Normal force		Rolling force	
	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean
3 mm	1.16	1.65	0.97	1.06	1.23	2.28	1.12	1.99	1.56	2.29	1.1	1.89
5 mm	1.82	2.02	1.28	1.61	1.59	1.89	1.32	1.59	1.67	2.21	1.41	1.86
7 mm	1.75	2.96	1.86	3.58	1.7	2.55	1.97	3.32	1.06	2.1	1.32	2.06

스크커터가 암석표면의 도드라진 부분을 지나갈 경우에 순간적으로 커터작용력이 크게 나타난다(Rostami, 2013). 순간적으로 크게 작용하는 커터작용력을 기준으로 TBM을 설계하는 것은 비효율적이므로 TBM의 추력 및 토크 등의 설계에 사용되는 커터작용력은 평균값을 적용한다(Gertsch et al., 2007). 그러나 본 연구에서는 더블디스크커터와 싱글디스크커터를 비교하는 목적을 가지고 있으므로, 최대값과 평균값 모두를 비교하였다.

Table 4에서 더블디스크커터에서의 연직력의 최대값은 싱글디스크커터의 약 1.5배 정도로 나타났으며, 더블디스크커터에서의 연직력의 평균값은 싱글디스크커터의 약 2.2배 인 것으로 측정되었다. 그리고 더블디스크커터에서의 회전력의 최대값은 싱글디스크커터의 약 1.4배 정도로 나타났으며, 더블디스크커터에서의 회전력의 평균값은 싱글디스크커터의 약 2.1배 인 것으로 측정되었다. 연직력과 회전력 모두에서 싱글디스크커터에 대한 더블디스크커터의 커터작용력의 비가 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 디스크커터의 커터작용력은 암석절삭 시 마다 다르게 나타나지만, 본 연구에서는 더블디스크커터와 싱글디스크커터의 커터작용력을 비교하기 위해 1회 절삭에서의 싱글디스크커터의 커터작용력의 두 배를 2회 절삭

시 싱글디스크커터의 커터작용력의 합으로 가정하였다. 그 결과, 더블디스크커터에 의한 1회 암석절삭 시 커터작용력은 싱글디스크커터 2회 절삭에 의한 커터작용력보다 평균적으로 10~20% 더 크지만, 커터작용력의 최대값은 오히려 더블디스크커터에 의한 절삭 시 더 작게 나타났다.

3.2 축응력 및 토크 측정 결과

Fig. 6은 선형절삭실험 조건으로 커터간격이 90 mm이고 커터 관입깊이가 7 mm인 경우에 더블디스크커터와 싱글디스크커터의 축에 작용하는 축응력과 토크를 변형률게이지를 이용하여 측정한 결과이다. 디스크커터의 축에 발생하는 축응력은 Fig. 5(a)의 절삭거리에 따른 연직력의 측정결과와 절대치만 다를 뿐 동일한 변화를 나타내었다. 디스크커터의 축에 발생하는 토크는 싱글디스크커터의 경우 매우 낮게 나타났고 더블디스크커터도 역시 낮은 값을 보였다. 토크가 낮게 나타나는 결과는 커터 링에 작용하는 연직력의 대부분이 디스크커터의 축에 작용하는 것을 의미하며, 또한 테이퍼 롤러 베어링의 작동이 원활함을 보여주는 결과이다. 이 결과는 앞서 3.1절에서 언급한 디스크커터의 내구성능의 검토가 필요하다는 의견과

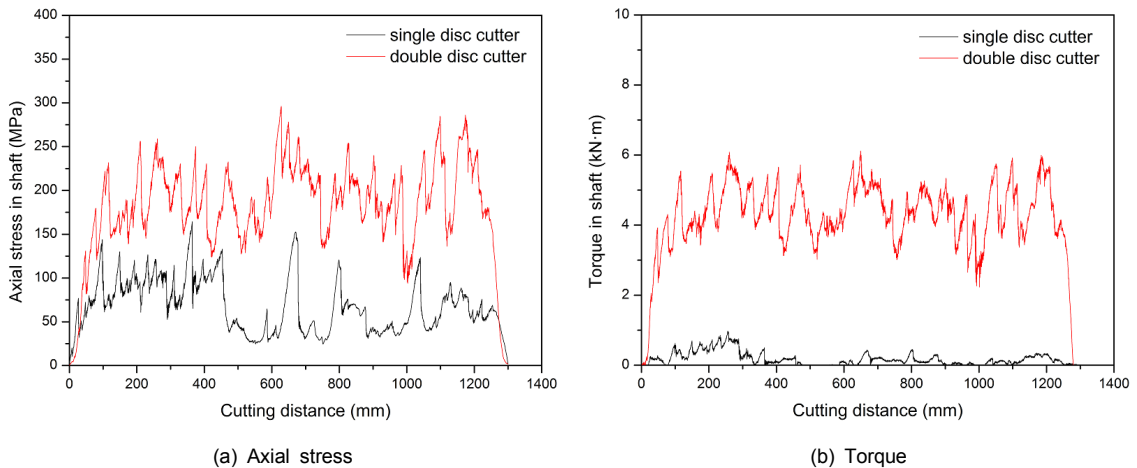


Fig. 6. A comparisons of axial stress and torque in the shaft of single disc cutter and double disc cutter during linear cutting tests(when cutter spacing was 90 mm and penetration depth was 7 mm).

상충되지만, 이 결과는 TBM현장과 달리 짧은 거리에 대하여 수행되는 선형절삭시험에 한정된다는 한계가 있다.

3.1절에서와 같이 본 연구의 목적인 더블디스크커터와 싱글디스크커터의 축에서 나타나는 축응력과 토크를 비교하기 위하여 Table 5와 Table 6과 같이 커터 관입깊이와 커터 간격에 따라 축응력과 토크의 최대값과 평균값을 정리한 다음, Table 7과 같이 싱글디스크커터에서의 커터작용력에 대한 더블디스크커터에서의 축응력과 토크의 비율을 산정하였다.

더블디스크커터의 축응력을 살펴보면 축응력의 최

대값은 316 MPa이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 117~187 MPa로 나타났다. 또한 토크의 경우 최대값이 7.8 kN·m이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 3.9~5.23 kN·m로 측정되었다. 디스크커터의 축을 제작하는 강종으로서 일반적으로 많이 사용하는 구조용 강인 SCM440 (KS, 2007)을 가정할 때, SCM440의 항복강도는 830 MPa이므로 더블디스크커터의 축에 발생하는 최대 축응력은 디스크커터 축 재료의 항복강도의 38%인 것으로 측정되었다.

Table 7에서 더블디스크커터 축의 축응력 최대값은

Table 5. Maximum and mean values of axial stress and torque in the shaft of a double disc cutter depending on penetration depths (cutter spacing: 90 mm)

Penetration depth (mm)	Axial stress in shaft (MPa)		Torque in shaft (kN·m)	
	Maximum	Mean	Maximum	Mean
3 mm	231.7	117.0	7.8	5.2
5 mm	297.9	144.1	7.6	4.5
7 mm	316.0	187.5	6.5	3.9

Table 6. Maximum and mean values of axial stress and torque in the shaft of a single disc cutter depending on penetration depths and cutter spacing

Penetration depth (mm)	Cutter spacing(mm)											
	80 mm				90 mm				100 mm			
	Axial stress in shaft (MPa)		Torque in shaft (kN·m)		Axial stress in shaft (MPa)		Torque in shaft (kN·m)		Axial stress in shaft (MPa)		Torque in shaft (kN·m)	
	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean
3 mm	219.7	77.6	1.1	0.3	218.2	51.7	0.6	0.1	184.8	50.7	0.5	0.02
5 mm	159.0	71.6	0.8	0.1	184.1	77.0	0.9	0.2	192.2	68.6	1.0	0.2
7 mm	167.5	63.7	1.0	0.2	164.4	67.5	1.0	0.2	273.2	90.5	1.1	0.2

Table 7. The ratio of axial stress and torque of double disc cutter to those of single disc cutter.

Penetration depth (mm)	Double disc cutter / Single disc cutter											
	Double (S=90 mm) / Single (S=80 mm)				Double (S=90 mm) / Single (S=90 mm)				Double (S=90 mm) / Single (S=100 mm)			
	Axial stress in shaft		Torque in shaft		Axial stress in shaft		Torque in shaft		Axial stress in shaft		Torque in shaft	
	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean
3 mm	1.05	1.51	6.96	19.14	1.06	2.26	13.77	62.41	1.25	2.31	15.09	251.08
5 mm	1.87	2.01	9.97	42.42	1.62	1.87	8.39	26.14	1.55	2.1	7.97	27.82
7 mm	1.89	2.94	6.27	19.21	1.92	2.78	6.62	22.73	1.16	2.07	6	16.74

싱글디스크커터의 약 1.5배 정도로 나타났으며, 더블디스크커터의 축응력 평균값은 싱글디스크커터의 약 2.2배 인 것으로 측정되어 연직력의 결과와 유사함을 알 수 있었다. 그리고 더블디스크커터에서의 토크의 최대값은 싱글디스크커터의 약 9배 정도로 측정되었으며, 더블디스크커터에서의 토크의 평균값은 싱글디스크커터보다 매우 큰 것으로 나타났다. 그러나 토크의 경우는 측정치가 절대적으로 작게 나타났기 때문에 단순히 더블디스크커터와 싱글디스크커터에서 나타나는 토크를 비교하는 것은 의미가 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 황등화강암을 대상으로 커터간격이 90 mm인 더블디스크커터와 커터간격이 80, 90, 100 mm이고 커터관입깊이가 3, 5, 7 mm인 조건의 싱글디스크커터에 의한 선형절삭실험에서 커터작용력과 디스크커터의 축에 발생하는 축응력과 토크의 측정결과를 비교하였다.

더블디스크커터의 연직력의 최대값은 991 kN이고, 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 397~593 kN으로 나타났다. 또한 회전력의 경우 최대값이 55 kN이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 6.8~28.3 kN으로 측정되었다. 선형절삭실험 중 발생한 더블디스크커터의 연직력과 회전력의 평균값은 싱글디스크커터의 두 배 남짓인 것으로 나타났다. 그러나 같은 직경을 가지는 더블디스크커터와 싱글디스크커터의 허브 직경은 동일하기 때문에 같은 지지하중을 가지는 테이퍼 롤러 베어링을 사용하게 된다. 따라서 더블디스크커터에 설치되는 테이퍼 롤러 베어링은 싱글디스크커터에 설치되는 테이퍼 롤러 베어링의 허용하중보다 더 큰 용량을 가져야 할 것으로 판단된다.

디스크커터에 순간적으로 크게 작용하는 연직력과 회전력의 최대값은 더블디스크커터가 싱글디스크

터의 1.5배 정도인 것으로 나타났다. 더블디스크커터의 연직력과 회전력의 평균값이 싱글디스크커터의 두 배 남짓인 점을 감안하면 두 개의 커터 링이 동시에 절삭하는 더블디스크커터에 의한 커터절삭작업은 순차적으로 절삭이 이루어지는 싱글디스크커터에 의한 절삭작업에 비해 평균적으로는 힘이 더 필요하지만 순간적으로 높게 나타나는 커터작용력을 줄여주는데 효과적임을 알 수 있다. 그 원인으로서 두 개의 커터 링이 동시에 절삭하는 작업이 순간적으로 높게 나타나는 커터작용력의 원인인 절삭면의 요철을 더 평활하게 하는 것을 생각할 수 있다.

더블디스크커터의 축응력의 최대값은 316 MPa이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 117~187 MPa로 나타났다. 또한 토크의 경우 최대값이 7.8 kN·m이고 평균값은 커터관입깊이가 3~7 mm인 조건에서 3.9~5.23 kN·m로 측정되었다. 축응력의 측정은 디스크커터의 축 제작 시 항복강도와 내구성에 기반한 재료의 선정에 도움을 줄 수 있을 것이다. 디스크커터 축에 사용되고 있는 구조용 강강의 항복강도를 기준으로 볼 때, 본 연구에서 측정된 결과는 문제가 없는 것으로 판단되었다. 또한, 비록 현장조건이 아닌 실험조건이지만 토크 결과 역시 낮게 측정되어 커터 링의 회전 역시 원활함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 디스크커터에 작용하는 외력이 테이퍼 롤러 베어링을 통해 축에 잘 전달되고 이때 외력이 작용하는 조건에서 베어링이 원활하게 회전함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 1세부과제: TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Balci, C., Tumac, D. (2012), "Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 30, pp. 183-193.
2. Bilgin, N., Balci, C., Tunçdemir, H., Eskikaya, Ş, Akgül, M., Algan, M. (1999), "The Performance Prediction of A TBM in Difficult Ground Condition", *AFTES-Journees d'Etudes Internationales de Paris*, pp. 115-121.
3. Chang, S.H., Choi, S.W., Lee, G.P., Bae, G.J. (2011), "Rock TBM design model derived from the multi-variate regression analysis of TBM driving data", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 6, pp. 531-555.
4. Chang, S.H., Choi, S.W., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2012), "Characterization of the deformation of a disc cutter in linear rock cutting test", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 3, pp. 197-213.
5. Chang, S.H., Choi, S.W., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2013), "Experimental evaluation of the effects of cutting ring shape on cutter acting forces in a hard rock", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 225-235.
6. Choi, S.W., Chang, S.H., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2013), "An Experimental study on the loads and temperature acting on the shaft of a disc cutter during linear rock cutting test", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 237-251.
7. Entacher, M., Winter, G., Bumberger, T., Decker, K., Godor, I., Galler, R. (2012), "Cutter force measurement on tunnel boring machines-System design", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 31, pp. 97-106.
8. Gertsch, R., Gertsch, L., Rostami, J. (2007), "Disc cutting tests in colorado red granite: Implications for TBM performance prediction", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 44, pp. 238-246.
9. KS (2007), Cr-Mo Steel (KS D 3711:2007), KS.
10. KTA (2008), Series of tunnel engineering 3-mechanized tunneling technology-design, Korean Tunneling Association, CIR, pp. 261.
11. Ozdemir, L., Nilsen, B. (1993), "Hard rock tunnel boring prediction and field performance", *Rapid Excavation Tunneling Conference (RETC) Proceedings*, Boston, USA.
12. Rostami, J., Ozdemir, L. (1993) "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", *Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Boston, 13-17 June, pp. 793-809.
13. Rostami, J. (1997), "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical and physical measurement of crushed zone pressure", *Ph.D Dissertation*, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, pp. 68-69.
14. Rostami, J. (2013), "Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 57, pp. 172-186.
15. Snowdon, R.A., Ryley, M.D., Temporal, J. (1982), "A study of disc cutting in selected british rocks", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, pp. 107-121.