

선형절삭시험에 의한 TBM 디스크 커터의 최적 절삭조건 예측

Prediction of the optimum cutting condition of TBM disc cutter in
Korean granite by the linear cutting test

박관인(석탄산업합리화사업단)

장수호, 최순욱(한국건설기술연구원), 전석원(서울대학교)

초 록

본 연구에서는 TBM의 면판 설계와 굴진성능 평가를 위한 기초 연구로 우리나라의 대표 암종인 황등 화강암에 대하여 LCM 시험기를 사용한 일련의 시험을 실시하였다. LCM 시험을 통하여 최적의 절삭 조건을 구하고 절삭 깊이와 커터 간격 등의 TBM 면판 설계인자가 굴진성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 정확한 TBM 성능을 예측하기 위하여 기존 연구들에서 적용된 방법에서 탈피하여 3차원적인 절삭 부피를 정량적으로 측정하고자 하였다. 이를 위해 실시간 처리가 가능하고 정밀도와 정확도가 확보된 디지털 사진계측기법을 LCM 시험에 적용하였다. 또한 TBM 디스크 커터에 의한 암석의 절삭과정을 모사하기 위한 수치해석 기법의 적용성을 검토하기 위해 AUTODYN 2D를 적용하였다.

핵심어

TBM, LCM, 사진계측, 절삭성능, 절삭 부피

Abstract

In this study, the LCM was applied as the preliminary study for the cutterhead design of TBM and the drilling performance evaluation. The optimum cutting condition is obtained from the LCM tests and the effects of the design factors of TBM cutterhead, such as penetration depth and cutter spacing, on drilling performance are estimated. In this study, hence, to predict the accurate performance of TBM, instead of one-dimensional penetration depth applied in existing studies, three-dimensional cutting volume was quantified and measured. For this, the digital photogrammetry technique was applied to the LCM tests. Also, AUTODYN 2D was applied to investigate the

applicability of the numerical analysis technique to simulate the cutting process of rock by the TBM disc cutter.

keywords

TBM, LCM, photogrammetry, cutting performance, cutting volume

1. 서 론

국내에서는 1985년 도수터널 공사에 Open TBM이 처음 도입된 이래로 많은 터널 공사에 기계화 시공법이 적용되어 왔다. 그러나 국내 터널 기계화 시공기술은 도입 시기, 활용 기간 및 공사 적용 횟수 등에 비해 아직까지 기술의 정착이 이루어지지 않고 있어 국내 지반 조건에 적합한 TBM의 설계와 터널 기계화 시공법의 자립에 큰 어려움을 겪고 있다.

이러한 우리의 실정과는 달리 미국의 CSM(Colorado School of Mines), 일본의 Civic Consultant, 영국의 Transport and Road Research Lab., 터키의 Technical University of Istanbul 등에서는 TBM 설계인자의 도출과 굴진성능 예측을 위하여 LCM(Linear Cutting Machine)과 같은 실물 절삭시험 장비를 개발하여 적극 활용하고 있다. 그러나 이에 대한 상세한 기술이나 시험법 등은 공개되지 않고 있다.

LCM을 이용한 TBM의 성능 예측시, 절삭 부피는 절삭의 효율성을 판단하는 비에너지(Specific Energy)를 산출할 때 필요하기 때문에 매우 중요한 인자이다. 이러한 절삭 부피를 구할 때 미국 CSM에서는 시험 전에 기계적으로 설정한 절삭 깊이를 분석에 사용하고 있으나(Rostami 등, 1993), 1차원적인 절삭 깊이로 3차원적인 절삭 과정을 고려하는 것은 한계가 있다. 일본 Civic Consultant에서는 변위계로 절삭 깊이를 측정하고 있으나 가로, 세로 크기가 1 m 이상인 대형 시험편의 절삭 깊이를 변위계를 사용하여 측정하는 과정은 비효율적이고 상당한 시간이 소요된다(이승복 등, 2004). 그리고 영국 Transport and Road Research Lab.에서는 절삭시험 후에 절삭파편들을 회수하여 그 무게를 계량하여 절삭 부피를 추정하고 있으나 이 역시 측정과정이 신뢰적이지 못하고 비효율적이다(Snowdon 등, 1982).

따라서 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 암종인 황등 화강암에 대해 TBM에 실제로 사용되는 디스크 커터를 사용한 실물 절삭시험을 수행하였다. 이때 시험대상인 화강암에 대한 최적의 절삭조건을 도출하고 절삭 깊이와 커터 간격 등의 면판 설계인자가 TBM의 굴진성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 또한 사진계측기법을 통해 실험 전후의 시험편의 표면을 3차원 영상화하여 절삭 부피를 정량화하였다. 사진계측을 통한 절삭 부피와 기존의 LCM 시험에서 활용되어 왔던 산술적으로 계산된 절삭 부피를 비교 분석하여 LCM 시험에 있어서 사진계측 기법의 적용 필요성을 확인하고자 하였다.

또한 TBM 디스크 커터에 의한 암석의 절삭과정을 모사하기 위해 수치해석을 실시하였다. 절삭 과정의 모사에 있어서 수치해석 기법의 적용성을 검토하기 위해 비선형 동해석 프로그램인 AUTODYN 2D를 이용하였다.

2. 본 론

2.1 디스크 커터에 의한 암석 절삭 메커니즘

디스크 커터에 작용하는 힘의 성분과 절삭부의 기하학적 모양은 그림 1과 같다.

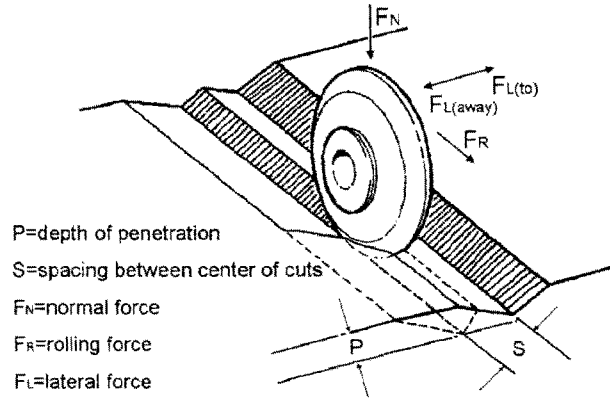


그림 1. 절삭부의 기하학적 모양과 디스크 커터 위에 작용하는 힘들

수직력(normal force)은 암반 표면에 연직한 방향으로 작용하는 힘으로 TBM에 적용되어야 할 추력(thrust)를 정하는데 사용된다. 수직력은 TBM이 효율적으로 굴착하고자 하는 암반에 관입되도록 하기 위한 힘을 구하는데 사용된다.

회전력(rolling force)은 디스크 커터를 회전시키는데 필요한 힘으로 암반 표면과 평행하고 커터의 운동방향과 같은 선상에서 작용한다. 회전력은 TBM의 토크(torque)와 직접적으로 관련이 있고 비에너지를 구하는데 사용된다.

측면력(lateral force)은 커터의 측면에서 작용하여 횡방향으로 움직이게 하는 힘으로 수직력 및 회전력과 함께 면판 설계에 사용된다.

비에너지(specific energy)는 단위체적-을 절삭하는데 필요한 일로 정의되고 낮은 비에너지를 유지하는 것이 가장 효율적인 굴착이 된다. 비에너지를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Specific Energy} &= \frac{\text{Rolling force} \times \text{Cutting distance}}{\text{Cutting volume}} \\
 &= \frac{\text{Rolling force} \times \text{Cutting distance}}{\text{Penetration depth} \times \text{Cutting distance} \times \text{Cutter spacing}} \quad (1) \\
 &= \frac{\text{Rolling force}}{\text{Penetration depth} \times \text{Cutter spacing}}
 \end{aligned}$$

디스크 커터가 암반으로 관입함에 따라 커터 하부에는 암반으로 응력을 전달하는 매체가 되는 파쇄 영역(crushed zone)이나 pressure bulb라고 불리는 영역이 발생하게 된다(그림 2). 파쇄 영역의 정확한 형상은 알려지지 않았지만 모델링의 단순화를 위해 원형으로 가정된다(Rostami & Ozdemir, 1993). 이 영역은 커터 직하부의 높은 응력 집중으로 인해 발생하는 잘게 파쇄된 암석으

로 구성된다. 파쇄된 입자의 크기는 암석과 맞닿은 커터 팁(tip)의 중심으로부터 파쇄 영역 주변의 암반으로 갈수록 커진다.

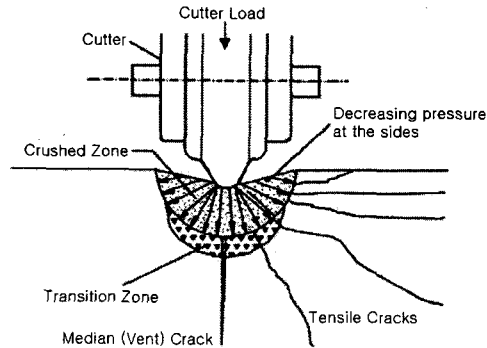


그림 2. 디스크 커터 하부의 파쇄 영역 (Rostami & Ozdemir, 1993)

절삭 방향과 수직한 단면에서, 파쇄 영역의 압력 분포는 정확하게 알려져 있지 않다. 계산상의 편의를 위해 정수압이 파쇄 영역 내에 존재한다고 가정된다(그림 3). 파쇄 영역에서 발생하는 응력에 의해 반경방향의 인장 균열이 발생된다. 이러한 균열들은 파쇄 영역 주변에 만들어지는 주요 불연속면이 된다. 따라서 인장 균열의 발생과 전파는 암편(chip) 형성의 주요한 파괴 모드로 간주된다. 또한 파쇄 영역 주변에 발생하는 균열들 특히, 자유면에 연결되는 균열들은 상당한 전단응력을 받게 된다. 따라서 암편 형성에 대한 파괴 모드는 인장 파괴와 전단 파괴 등이 혼합된 것이 더 현실에 가깝다고 볼 수 있다.

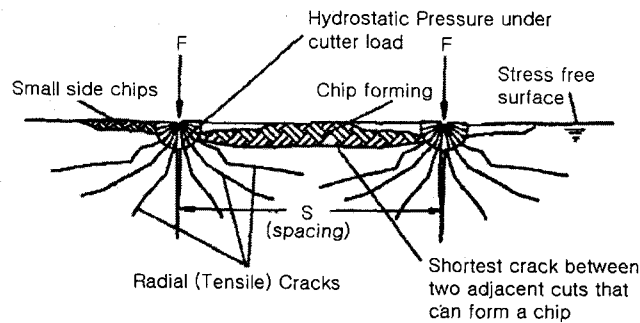


그림 3. 파쇄영역과 암편의 형성 (Rostami & Ozdemir, 1993)

2.2 선형절삭시험 시스템의 구성 및 시험방법

2.2.1 선형절삭시험기 및 자료획득 시스템

LCM은 TBM 먼판(cutterhead)의 설계와 제작에 있어서 핵심적인 실험장비로 미국 CSM에서 개발되어 지난 20~30년 동안 TBM의 설계인자를 도출하고 성능을 예측하는데 널리 적용되어 왔다. LCM시험은 실제 TBM의 커터를 사용하여 TBM 굴착시 발생할 수 있는 커터 하중과 관입정도를 모사할 수 있기 때문에 TBM의 성능예측에 직접 적용할 수 있고 시험결과에 대한 크기효과

를 배제할 수 있다(Ozdemir & Nilsen, 1999).

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 구축한 국산 LCM 시스템을 사용하였고(장수호 등, 2004) LCM의 기본적인 사양은 다음과 같다.

- 프레임 크기: 3.5m(높이)×4.1m(폭)×4.7m(길이), 최대 50톤까지의 피로하중에 견딜 수 있으며 최대 2배의 안전율을 갖도록 설계
- 시험편 블록의 크기: 1.5m(길이)×1.4m(폭)×0.43m(두께)
- 가압장치: 500mm(stroke), 50톤(유압)
- 커터 작용하중 측정: 3방향 로드셀(용량: 100톤)
- X, Y, Z 방향의 이동거리 확인 가능
- 커터의 연직방향(servo-control가능), 이송방향 및 횡방향 이동가능
- TBM에 실제로 사용되는 다양한 커터 장착 가능

본 연구에서 사용한 LCM의 전체적인 모습과 주요 구성은 그림 4와 같다.

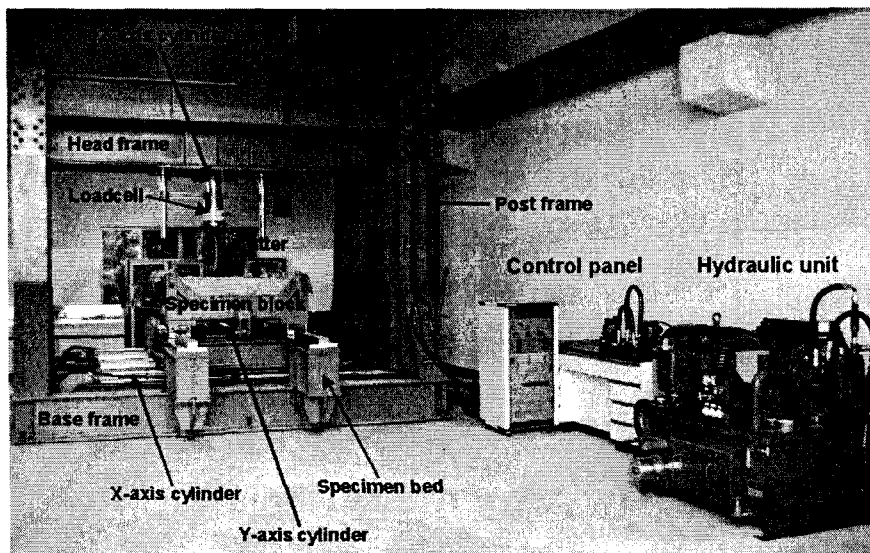


그림 4. LCM 시스템의 주요 구성

LCM 시험시 1회의 절삭은 대략 6~7초의 짧은 시간 동안에 이루어지므로 LCM 시험 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 고속 자료획득시스템의 사용이 필수적이다.

디스크 커터에 작용하는 3방향 하중을 측정하기 위한 자료획득시스템(data logging system)은 미국 National Instrument사의 NI PXI-1062 Combination Chassis, NI PXI-8186 P4 2.2 GHz, NI SCXI-1620 Universal strain/bridge module 등으로 구성하였다. 이 시스템은 16 bit resolution의 자료를 최대 200 kS/s의 sampling rate로 고속 획득할 수 있는 특성을 가지고 있다.

또한 LCM 시험동안 TBM 디스크 커터의 절삭 메커니즘을 관찰하기 위해 고성능 디지털 캠코더인 SONY사의 DCR-VX2100을 사용하여 매 시험시 연속고속촬영을 실시하였다.

2.2.2 디지털 사진계측 시스템

디지털 사진 계측기법을 위한 시스템은 고성능 디지털 카메라, 타겟(target) 및 laser points

projector 등이 필요하다.

LCM의 위에서 사진 촬영이 이루어지기 때문에 촬영 각도의 변경이 용이한 4백만 화소 카메라인 Nikon CoolPix 4500을 사용하였다.

코드 타겟을 사용하여 사진 계측시 기준점의 역할을 하도록 하였다(그림 5). 코드 타겟은 크기가 50 mm × 50 mm인 크기로 카메라의 플래쉬에 반사되어 타겟이 사진 상에 선명하게 나타나도록 하는 광반사 물질이 붙어 있다. 본 연구에서는 절삭시험 전에 총 6~8개를 시험편 위에 움직이지 않도록 고정 설치하였다.

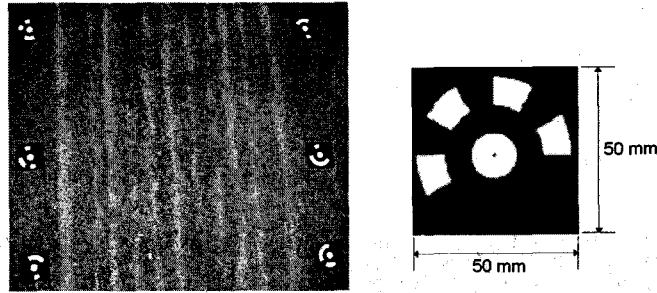


그림 5. 시험편 위에 설치된 코드 타겟들

본 연구에서는 가로, 세로의 크기가 1 m 이상인 비교적 대형 시험편의 표면 형상을 정량화하는데 목적이 있으므로 레이저 타겟 투사방식(laser target projection)을 적용하였다. 레이저 타겟을 투사시키기 위하여 미국의 Geodetic Services사에서 제작한 Pro-Spot을 사용하였고 그 형상은 그림 6과 같다. Pro-Spot은 촬영 카메라와 유/무선으로 동기화되어 카메라 플래쉬의 작동과 동시에 빛 감지 센서가 작동하여 Pro-Spot 내의 레이저로 천공된 포인트 슬라이드(point slide)를 통해 원형 타겟들을 시험편에 투사하는 장비이다. 본 연구에서는 23,000개의 원형 타겟을 시험편 표면에 생성시켜 사진계측에 이용하였다.

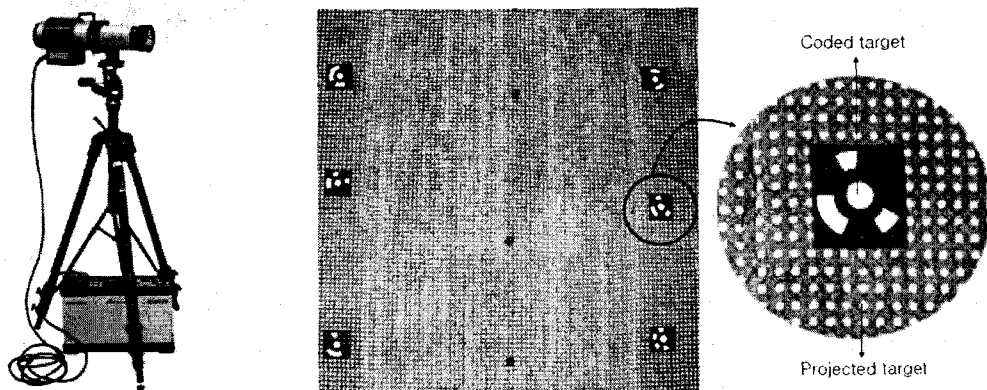


그림 6. Pro-Spot과 시험편 위에 원형 타겟을 투사시킨 예

2.2.3 선형절삭시험 조건

황등 화강암에 대한 최적 절삭간격과 절삭 깊이의 비율(S/P)을 유도하고 절삭간격 (S)과 절삭 깊이(P)가 절삭성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해 절삭 깊이(P)를 2 mm, 4 mm 및 6 mm로 하

였고 각각의 경우에 대해 S/P를 5, 7, 10, 15, 20으로 설정하였다(표 1). 시험조건별로 동일한 절삭조건에서 4~7회의 절삭을 하여 시험결과의 신뢰도를 높이고자 하였다.

표 1. 황등 화강암에 대한 선형절삭시험 조건

Case number	P (mm)	S (mm)	S/P
Case 1	4	80	20
Case 2	4	60	15
Case 3	4	40	10
Case 4	4	28	7
Case 5	6	90	15
Case 6	6	60	10
Case 7	6	42	7
Case 8	6	30	5
Case 9	2	40	20
Case 10	2	30	15
Case 11	2	20	10
Case 12	2	14	7

본 연구에서 선정한 시험대상은 국내의 대표적인 암종인 황등 화강암으로 일축압축강도는 180 MPa이었다. 시험편은 절삭방향의 길이가 110 cm이고 절삭간격 방향의 길이는 80 cm이며 높이는 30 cm의 블록형으로 성형되었다. 시험편을 LCM에 거치하고 시험편의 수평을 맞춘 후 모르타르를 채워 넣어 시험편에 충분한 구속이 가해질 수 있도록 하였다.

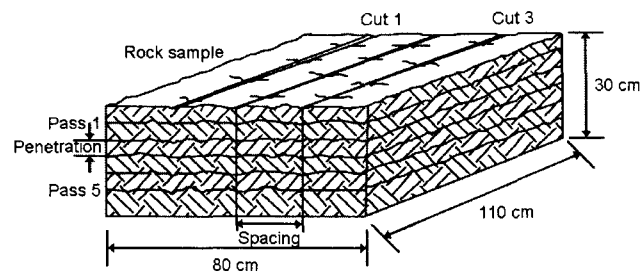


그림 7. 황등 화강암 시험편

2.2.4 선형절삭시험 방법

원하는 절삭 깊이를 얻기 위한 방법으로 single pass mode와 multiple pass mode가 있다. Single pass mode는 한 번의 디스크 커터의 절삭으로 원하는 절삭 깊이를 얻는 일반적으로 적용되는 방법이고, multiple pass mode는 같은 절삭 홈(groove)에 대하여 여러 번의 절삭으로 원하는 절삭 깊이를 얻는 매우 강한 암반에 적용되는 방법이다. 본 연구에서는 single pass mode를 적용하였고 디스크 커터는 직경이 17인치, 커터 팁(tip)의 너비가 약 1.5 cm인 CCS 커터를 사용하였으며 절

삭속도는 9 m/min로 설정하였다.

실제 TBM 굴진시 디스크 커터에 의한 절삭은 이전 절삭으로 인해 암반은 상당한 손상이 발생된 상태이기 때문에 이른바 “pre-conditioning”을 통해 실제 절삭시험이 수행되기 전에 시험편이 실제 터널 막장을 대표할 수 있도록 하여야 한다(Snowdon 등, 1982).

각 절삭조건에 대해서 실제 본 절삭에 적용될 절삭 깊이와 절삭간격으로 2~3회의 pre-conditioning을 실시하였다.

LCM 시험은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- (1) 절삭 case를 확인하고 사진계측을 위한 코드타겟을 시험편 위에 움직이지 않도록 고정하여 설치한다.
- (2) 해당 절삭 case와 같은 절삭 깊이와 간격으로 pre-conditioning을 2~3회 실시한다. 이 때 커터에 작용하는 하중을 관찰한다.
- (3) Pre-conditioning이 완료된 후, 본 절삭을 하기 전에 시험편의 표면에 대하여 사진계측을 실시한다.
- (4) 정해진 절삭 간격만큼 디스크 커터를 하강시키고 본 절삭을 수행한다.
- (5) 절삭 후의 시험편의 표면에 대하여 사진계측을 실시한다.
- (6) (1)~(5)의 과정을 해당 case별로 반복하여 실시한다.

2.3 절삭 부피 정량화를 위한 사진계측기법

디지털 사진계측기법을 세계 최초로 LCM 시험에 적용하여 실험 전, 후의 시험편 표면을 3차원 디지털 영상화하고 절삭 부피를 정량화하고자 하였다.

디지털 사진계측기법에 의한 자료처리 과정은 촬영된 사진 상의 타겟들의 2차원 이미지를 자동적으로 인식되고 표시하는 마킹과정(marking), 서로 다른 사진 상에 나타나는 동일한 타겟의 이미지를 동일한 점으로 연결시켜주는 레퍼런싱(referencing) 과정 그리고 각 타겟의 3차원 좌표가 계산을 하는 프로세싱(processing) 과정으로 구분된다(그림 8). 이러한 과정들은 EOS system사에서 개발한 PhotoModeler Pro 5.2를 이용하여 이루어졌다.

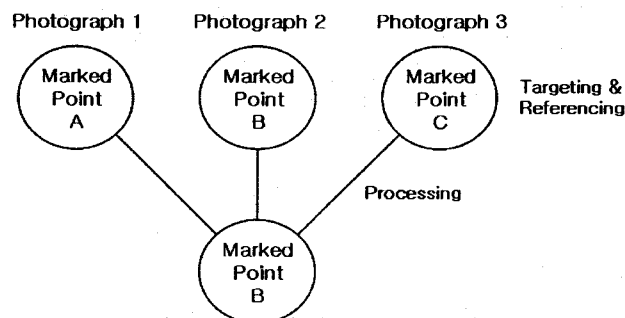


그림 8. Targeting, referencing and processing

사진 계측은 카메라를 측정 장치로 사용하기 때문에 측정 작업에 앞서 카메라에 대한 교정 작업이 필수적이다. 본 연구에서는 교정 격자를 바닥에 놓고 총 12개의 서로 다른 각도에서 촬영하

여 교정 작업을 수행하였다.

Pro-Spot에 의해 시험편에 레이저 타겟들을 투사시킨 뒤 디지털 사진을 촬영할 때, 한 사진에 최소한 6개의 코드 타겟들이 들어오도록 주의하여 최소한 3장 이상을 찍었다. 레이저 타겟들의 인식률과 정확도를 높이기 위하여 여러 각도에서 사진을 촬영하였고 4~8장을 자료 처리 과정에서 사용하였다. 또한 시험편 위에 설치된 코드 타겟들의 중심 간 거리를 정확히 측정하여 스케일 바의 역할을 대신하였다.

정확하고 일관된 방식으로 점들을 마킹하도록 하는 서브픽셀 타겟 마커(sub-pixel target marker)를 사용하여 원형 타겟을 마킹하였다. 서브픽셀 타겟 마커에는 중심 방법(centroid method)과 LSM(least-squares matching)방법이 있다. 중심 방법은 원에 가까운 형태면 뭐든지 마킹이 가능한 반면, LSM 방법은 타원이나 원 모양의 타겟에만 적용된다. LSM 방법은 좀 더 조밀하고 작고 낮은 명암에서도 가능하며 중심 방법보다 더 정확하지만 처리 속도는 느린 특징이 있다.

여러 장의 사진을 중첩하여 2차원의 이미지를 3차원의 모델로 만들기 위해서는 기준점이 필요하다. 본 연구에서는 시험편 위에 부착된 코드 타겟들을 기준점으로 하였고 마킹된 각 점들에 대해 레퍼런싱을 한 후 프로세싱을 하여 카메라의 위치해석을 수행하였다.

LCM 시험 전, 후의 시험편 표면 형상을 3차원적으로 모델링하기 위해서는 코드 타겟을 기준으로 시험편에 투사된 원형 타겟들을 마킹하고 레퍼런싱을 해야 한다. 이 때 타겟 인식률을 높이기 위해 사진의 명암을 조절하여 타겟이 명확하게 보이도록 조정하였다(그림 9). 그리고 굴곡이나 촬영 각도에 따라 원모양이 아닌 타원 모양으로 보이는 타겟을 마킹하기 위해 이심률을 0.7로 조절하여 마킹하였고, 이러한 과정들에도 불구하고 마킹이 되지 않는 일부 타겟은 수동으로 마킹하였으며 위치가 잘못 인식된 타겟은 수정하거나 삭제하였다.

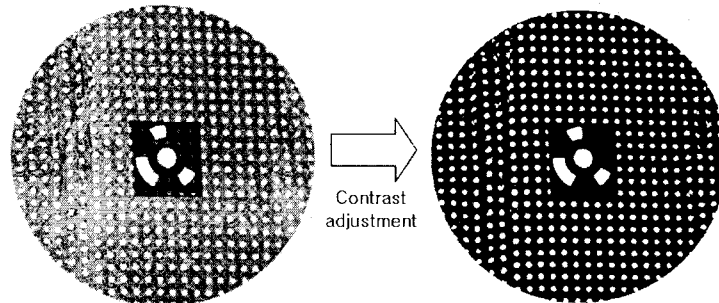


그림 9. 시험편에 투사시킨 레이저 타겟들에 대한 명암조정의 예

서로 다른 사진들에 마킹된 원형 타겟들은 자동 레퍼런싱 과정에 의한 동일화 작업을 통해 연결되고 3차원 좌표를 얻기 위해 프로세싱을 수행하였다. 프로세싱 결과, 왜곡된 데이터를 확인하는 기능들을 이용하여 왜곡된 점들을 삭제하거나 수정하여 3차원 모델링을 완료한 후, 시험편에 설치된 코드 타겟에 해당하는 점에 절삭 전과 후의 비교시 사용되는 원점과 축, 거리를 입력하고 데이터를 저장하였다.

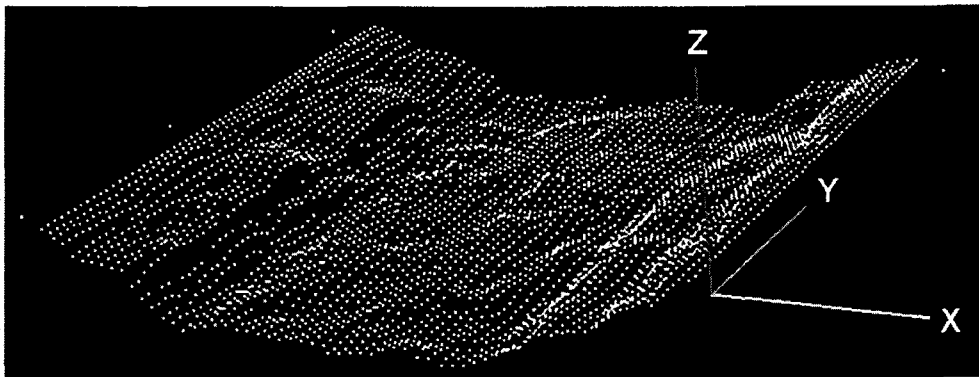


그림 10. 시험편 표면의 3차원 모델링 결과의 예

시험편의 절삭 전과 절삭 후의 표면 형상은 Golden Software사의 Surfer 8.0을 이용하여 재현되었다. 이 때 절삭 부피는 절삭 전과 절삭 후의 시험편 표면 사이의 공간에 해당하는 부피에 해당한다. PhotoModeler에서 얻어지는 시료의 표면의 3차원 모델 파일인 raw 파일을 아스키(ASCII) 형식의 파일로 변환하여 절삭 전과 후의 시료 형상을 Surfer로 재현하면 그림 11 및 그림 12와 같다.

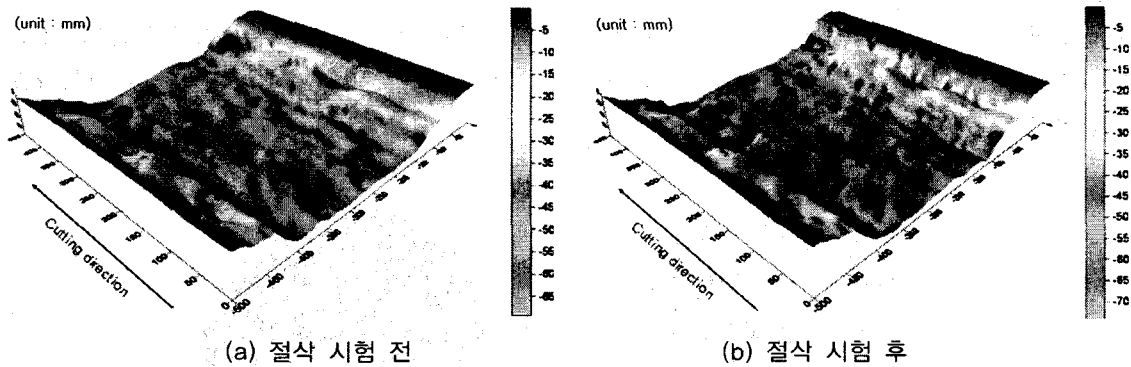


그림 11. 시험편 표면 형상의 예

2.4 황등 화강암에 대한 선형절삭시험 결과

선형절삭시험의 결과를 도출함에 있어 절삭 초기 부분과 절삭 종료 부분은 자유면과 가깝기 때문에 자유면의 영향을 배제하고자 시험편의 앞, 뒷면에서 각각 30 cm 이격시킨 중앙의 50 cm 영역에서 얻어진 커터 작용하중 측정값만을 해석에 사용하였다. 그리고 비에너지 산정에 이용되는 절삭 부피도 이 영역에 대해서만 측정, 분석하였다. 또한, 각 절삭 조건별 첫 번째 절삭선(cutting line)은 근접한 절삭홈(groove)과 상호작용에 따른 균열의 전파 및 압편 형성이 이루어지지 않기 때문에 해석 과정에서 무시되었다.

2.4.1 최적 절삭조건의 유도

각각의 절삭 조건에 따른 절삭 부피와 비에너지 추정결과는 표 2와 같다. 표에서 사용된 값들

은 각 절삭 조건 별로 수행된 절삭 결과의 평균값들이다. 비에너지는 사진계측으로부터 측정된 절삭 부피를 적용할 경우에는 식 (1)의 첫 번째 식에 의해 계산되었고, 기계적인 설정값을 사용할 경우에는 세 번째 식에 의해 계산되었다.

해석결과, 시험시 설정한 절삭 깊이에 의한 절삭 부피(=절삭간격×절삭 깊이×절삭거리)와 사진계측으로부터 얻어진 절삭 부피로부터 계산된 비에너지는 큰 차이를 보이지 않았으나 평균값만 유사할 뿐 편차와 상대 오차가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 특히 절삭 부피는 평균 $6.03 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 의 차이를 보이며 상대오차는 73.30%로 큰 차이를 보였다.

표 2. 절삭 조건에 따른 절삭 부피와 비에너지 추정 결과

Cutting Condition	S/P	Cutting volume ($\times 10^{-5} \text{ m}^3$)		$ A-B $ ($\times 10^{-5} \text{ m}^3$)	Relative error of volume (%)	Specific energy ($\times 10^3 \text{ tonf/m}^2$)	
		Setting (A)	Photo (B)			Setting	Photo
Case 1	20	33.6	31.61	1.99	5.92	4.33	4.55
Case 2	15	10.8	25.27	14.47	133.98	6.53	2.79
Case 3	10	7.2	25.27	18.07	250.97	4.29	2.71
Case 4	7	5.6	5.79	0.19	3.39	3.27	3.25
Case 5	15	27.0	35.50	8.50	31.48	3.18	3.67
Case 6	10	18.0	30.45	12.45	69.17	2.45	1.73
Case 7	7	12.6	19.61	7.01	55.63	2.95	2.35
Case 8	5	9.0	10.38	1.38	15.33	3.31	2.90
Case 9	20	4.0	1.49	2.51	62.75	4.50	11.70
Case 10	15	3.0	6.48	3.48	116.00	1.33	0.63
Case 11	10	2.0	3.4	1.40	70.00	2.40	1.78
Case 12	7	1.4	2.31	0.91	65.00	2.64	1.85
Average				6.03	73.30	3.43	3.33

TBM 디스크 커터에 의한 최적의 절삭은 최소의 에너지로 최대의 절삭효과를 얻을 수 있는 조건 즉, 최대의 절삭 부피를 얻는 절삭조건에서 이루어진다. 최적의 절삭조건은 그림 12와 같이 절삭간격(S)과 절삭 깊이(P)의 비 대 비에너지의 관계에서 최소가 되는 지점이 된다.

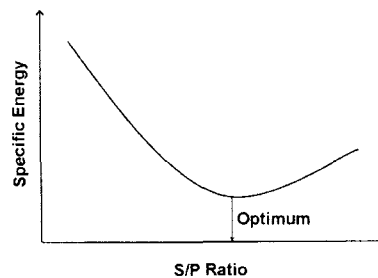
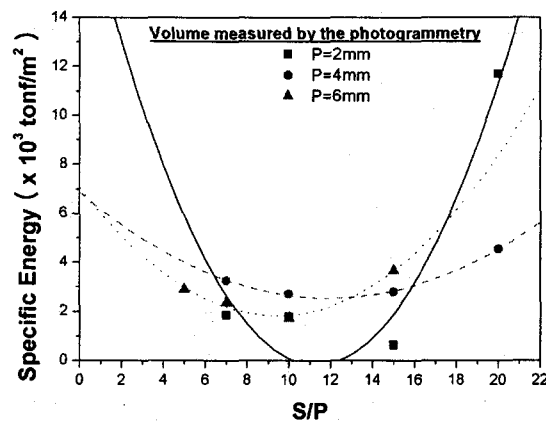


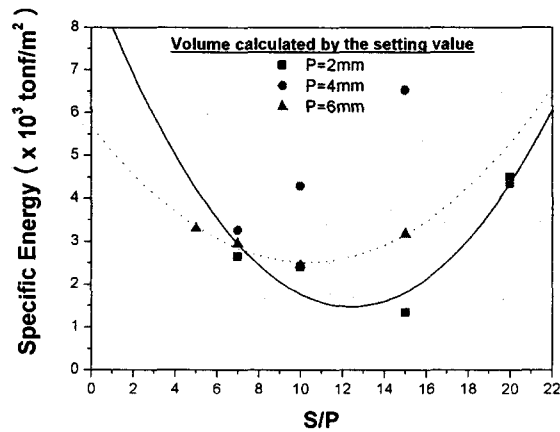
그림 12. 전형적인 절삭간격(S)과 절삭 깊이(P)의 비 대 비에너지의 관계

화강암의 최적 절삭조건은 그림 13에서 보는 바와 같이 비에너지가 최소가 되는 S/P가 10~12인 경우로 나타났다. 절삭 깊이가 6 mm인 경우에 비에너지가 최소인 지점, 즉 최적 조건은 S/P가 약 10인 경우에 해당하였다. 그리고 절삭 깊이가 2 mm인 경우의 최적 절삭조건은 S/P가 11~12일 때로 나타났다. 절삭 깊이가 4 mm인 경우에는 계산된 절삭 부피를 적용하면 비에너지가 최소인 지점을 식별하기가 불가능하였고, 각 S/P조건별로 얻어진 비에너지의 편차도 크게 나타났다. 그러나 사진계측으로부터 얻어진 비에너지 경향에서는 S/P가 약 12일 때 최적 절삭조건임을 알 수 있다.

이와 같이 사진계측으로부터 얻어진 절삭 부피를 적용할 경우에는 시험결과의 신뢰도가 향상될 뿐만 아니라, 커터에 의한 3차원 절삭메커니즘에 더 부합하고 시험결과의 편차가 큰 경우에도 최적 S/P조건을 식별하는데 유용할 것으로 판단된다.



(a) 사진계측으로부터 측정된 절삭부피를 이용한 결과



(b) 기계적인 설정값에 의해 계산된 절삭부피를 이용한 결과

그림 13. 절삭조건별 비에너지와 S/P의 관계

사진계측으로부터 측정된 절삭 부피와 설정값으로 계산한 절삭 부피의 차이를 S/P 비율에 따라

비교하면 그림 14와 같다. S/P가 5~15의 범위에서 측정된 절삭 부피는 계산된 절삭 부피보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 절삭조건에 따라 설정한 절삭 깊이 보다 실제로 더 깊게 절삭이 되었음을 의미한다. 따라서 S/P가 5~15인 범위에서 최대의 절삭효율을 얻을 수 있는 최적 절삭조건이 포함되었다는 것을 알 수 있다.

반면 S/P가 20인 경우에는 사진계측으로부터 측정된 절삭 부피가 계산결과보다 더 작게 나타났다. 이는 커터 간격이 넓기 때문에 인접한 절삭 사이에서 파괴가 발생하기 위해서는 더 큰 커터 작용하중이 필요하고 수 회의 절삭이 이루어져야 하기 때문인 것으로 보인다. 즉, S/P가 20정도로 커터 간격이 큰 경우에는 절삭효율이 매우 떨어짐을 알 수 있다.

측정된 절삭 부피와 계산된 절삭 부피의 차이가 최대가 되는 지점은 S/P가 약 10인 경우로서 앞서 S/P와 비에너지 사이의 관계로부터 유도된 최적 절삭조건인 S/P=10~12와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 LCM 시험으로부터 최적 절삭조건을 유도할 경우에 S/P와 비에너지 사이의 상관관계뿐만 아니라 S/P와 실제 절삭 부피와의 관계로부터 최고의 절삭효율을 얻을 수 있는 절삭조건을 유도하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

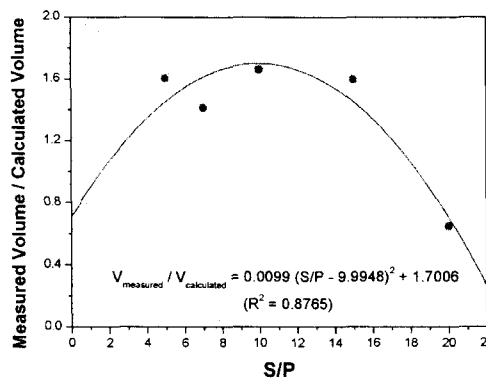


그림 14. S/P에 따른 사진계측으로 측정된 절삭 부피와 설정값으로 계산한 절삭 부피의 차이

이상과 같이 사진계측으로 측정된 절삭 부피와 단순 계산된 절삭 부피와의 상당한 차이를 보이고 절삭 깊이가 4 mm인 경우에 단순 계산된 절삭 부피를 사용할 때 비에너지가 최소가 되는 지점을 식별하기가 불가능(그림 13. (b))한 것을 고려하면 사진계측으로부터 얻어진 절삭 부피를 적용할 경우에는 시험결과와 신뢰도가 향상될 뿐만 아니라 커터에 의한 3차원 절삭메커니즘을 반영하는데 더 부합되며, 시험결과와 편차가 큰 경우에도 최적 S/P조건을 식별하는데 유용할 것으로 판단된다. 따라서 이후에는 사진계측으로부터 측정된 절삭 부피를 적용하여 얻어진 비에너지만을 이용하여 시험결과를 분석하였다.

2.4.2 절삭 깊이의 영향

절삭 깊이에 따른 비에너지의 변화 양상을 도시한 결과(그림 15), 절삭 깊이가 증가할수록 비에너지가 감소하는 경향을 보여 절삭 깊이가 증가함에 따라 절삭효율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 절삭 깊이가 4 mm 이상에서는 비에너지의 감소폭이 크지 않고 절삭 깊이가 어느 이상 커지게 되면 비에너지가 비교적 일정해지는 임계 비에너지가 존재할 것으로 예측된다.

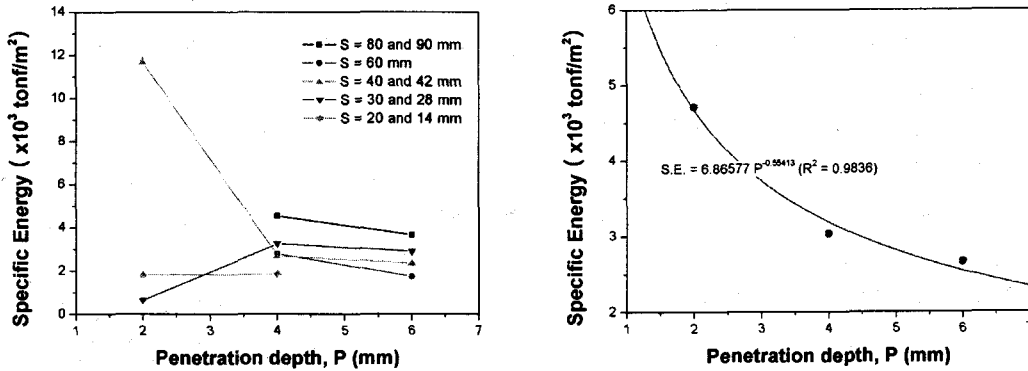


그림 15. 비에너지와 절삭깊이의 관계

절삭 깊이가 커질수록 커터 작용하중이 증가되기 때문에 (그림 16) 절삭 깊이에 비례하여 추력, 토크, 동력 등 TBM 용량 또한 증가되어야 한다. 따라서 커터와 TBM 장비의 최대 용량을 넘지 않으면서 최대의 절삭효율을 얻을 수 있는 최적 절삭 깊이를 결정하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

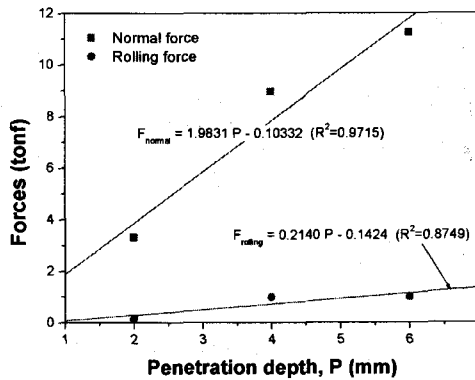


그림 16. 절삭력과 절삭깊이의 관계

절삭 깊이에 따른 평균 수직력(normal force) 및 평균 회전력(rolling force)의 비율은 그림 17과 같이 절삭 깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 즉, 평균 수직력과 회전력의 비율은 커터 간격에 독립적으로 절삭 깊이에 따라 달라지고 절삭 깊이가 증가할수록 평균 회전력의 비중이 커진다. 따라서 절삭 깊이를 증가시켜야 할 경우에는 회전력이 입력자료로 사용되는 TBM 장비의 토크와 동력 용량에 더욱 유의하여 설계할 필요가 있을 것이다.

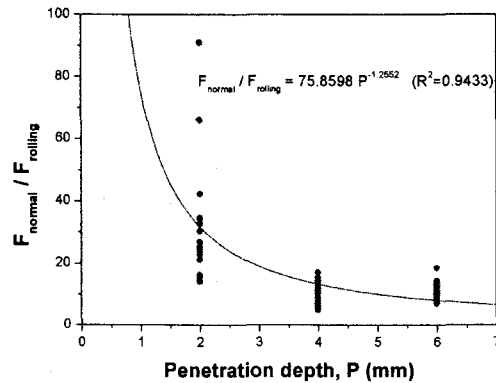
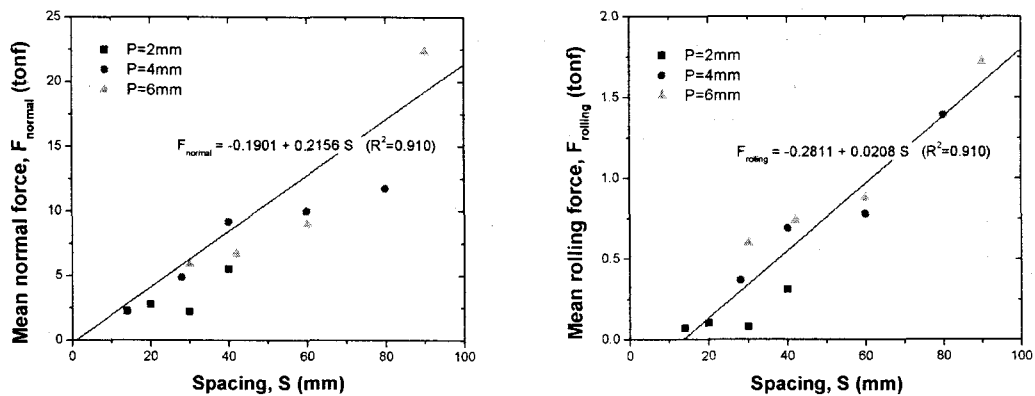


그림 17. 절삭깊이에 따른 수직력과 회전력의 비율 변화

2.4.3 절삭 간격의 영향

커터 간격에 따른 평균 커터 작용하중의 변화는 그림 18과 같다. 평균 수직력과 평균 회전력 모두 커터 간격의 증가에 따라 비례하여 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다.



(a) 평균 수직력

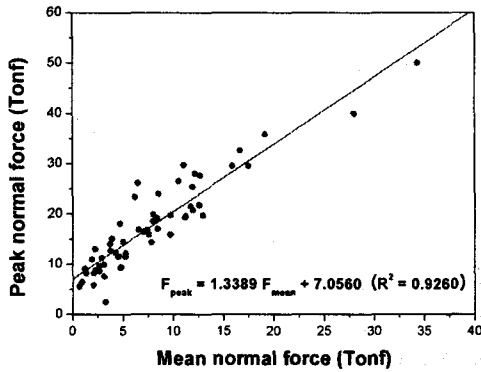
(b) 평균 회전력

그림 18. 절삭력과 절삭 간격의 관계

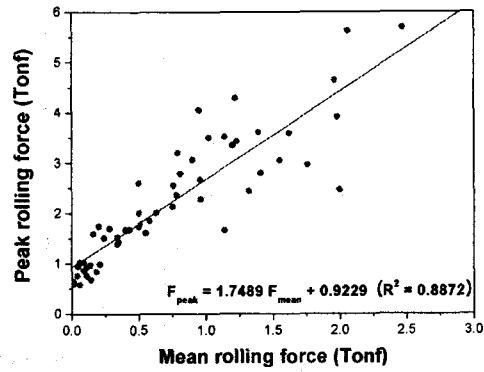
커터 간격이 커질수록 그만큼 절삭해야 할 암석의 부피가 커지기 때문에 이와 비례하여 커터 작용하중이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 커터 간격이 증가할수록 평균 회전력보다 평균 수직력의 증가폭이 약 10배 이상으로 나타난 결과에 근거하면, 커터 간격을 증가시켜야 할 경우에는 TBM의 토크와 동력보다는 수직력이 입력자료로 사용되는 추력 용량에 유의하여 TBM 장비를 설계해야 할 것으로 판단된다.

2.4.4 평균 커터 하중과 최대 커터 하중 간의 관계

평균 커터 하중과 최대 커터 하중과의 관계는 그림 19와 같다. 평균 커터하중이 커질수록 최대 커터 하중과 선형적으로 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 관계들은 TBM 굴진시 마주 치기 쉬운 최대 커터 하중을 예측하는데 사용될 수 있다.



(a) 수직력

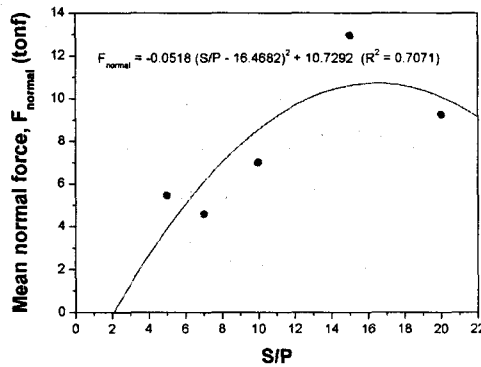


(b) 회전력

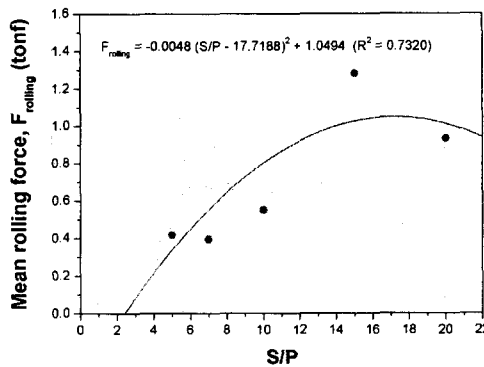
그림 19. 평균 절삭력과 최대 절삭력의 관계

2.4.5 절삭조건과 평균 커터 하중 간의 관계

S/P에 따른 평균 커터 작용하중의 변화를 도시하면 그림 20과 같다. S/P가 대략 16까지는 S/P가 증가할수록 평균 커터 작용하중도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 S/P가 16이상인 경우에는 평균 커터 작용하중이 오히려 감소하는 것으로 나타났는데 이는 측정결과의 편차로 인한 것으로 보이며, 실제로는 S/P가 어느 이상 증가하게 되면 더 이상 평균 커터 작용하중의 증가가 나타나지 않는 임계 S/P가 존재할 것으로 판단된다. 즉, 임계 S/P이상에서는 커터 간격이 크기 때문에 이전 절삭과의 상호작용이 발생되지 않는 것으로 보인다.



(a) 평균 수직력



(b) 평균 회전력

그림 20. S/P와 평균 절삭력의 관계

2.4.6 절삭과정을 모사하기 위한 수치해석 기법의 적용성 검토

디스크커터에 의한 암석의 파괴메커니즘을 모사하기 위하여 AUTODYN 2D를 이용하여 그 적용성을 검토하였다.

화강암 모델은 RHT 콘크리트 모델을 사용하였다. RHT 콘크리트 모델은 암석이나 콘크리트와 같은 취성물질에서 일반적으로 나타나는 응력강화, 변형률강화, 균열연화와 같은 거동을 모사할 수 있는 특징이 있다(Century Dynamics, 2004). 화강암 모델은 그림 21과 같이 500 mm × 200

mm (100,000개의 요소)로 하였다. 특히 커터 사이의 영역에 대한 정밀한 해석을 위해 화강암 모델의 중앙부 100 mm × 50 mm에 해당하는 요소들은 0.2 mm × 0.2 mm의 크기를 갖도록 하였고 양측과 아래 면의 경계는 변위가 생기지 않도록 고정하였다.

디스크 커터는 콘(cone) 모양으로 모델링하였고 팁의 너비는 15 mm로 하였으며 재질은 강재(steel)로 하였다. 그리고 커터에 작용하는 회전력(rolling force)은 2차원 해석이기 때문에 고려되지 않았다.

커터의 간격은 30, 60, 90 mm의 경우로 나누어 해석을 실시하였다. 절삭 간격에 따라 chipping 이 일어나는 절삭 깊이를 구하여 최적 절삭조건을 예측하고자 하였다.

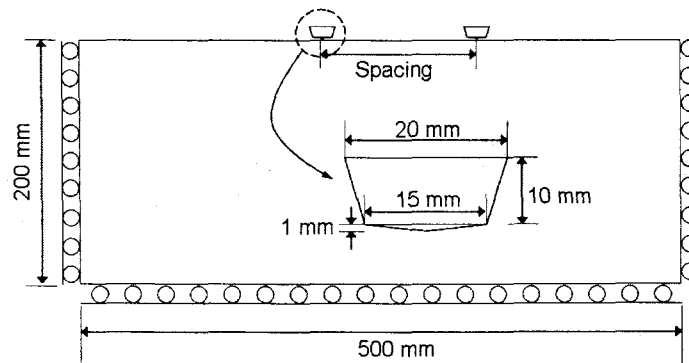


그림 21. 수치해석을 위한 화강암과 커터 모델

AUTODYN에 의한 각 커터 간격 별 해석 결과는 그림 22~그림 24와 같다. 모든 경우에서 커터 직하부에 화강암의 하부 방향으로의 중앙 균열(median crack)이 관찰되고 있다. 또한 커터가 관입함에 따라 인장균열들이 점차 성장하면서 결국 어떤 절삭 깊이에서 만나게 되어 cone 모양의 암편을 형성하는 것을 볼 수 있다. 암편을 형성할 때의 절삭 깊이를 이용하여 커터의 간격이 30, 60, 90 mm의 경우에 대해서 S/P를 구해보면 각각 12.5, 11.54, 15이다. 이는 앞서 실험적으로 예측한 최적 S/P가 10~12인 경우와 부합하는 결과로 볼 수 있다. 따라서 디스크 커터에 의한 암석의 절삭 메커니즘을 규명하는 데 있어 AUTODYN 2D를 적용하는 것은 타당하다고 판단된다.

AUTODYN 2D로 디스크 커터에 의한 암석의 절삭 과정을 모사할 때의 장점으로는 연속적인 동적 파괴과정을 모사할 수 있다는 점, 커터의 형상을 다양하게 모델링 할 수 있다는 점, 분할 가능한 요소수의 제한이 없다는 점 등이다. 반면, 단점은 동해석 프로그램이기 때문에 타임 스텝(time step)이 지나치게 짧아 해석속도가 느리다는 것이다.

위와 같은 것들을 정리하면, 커터 관입에 의해 커터 하부에 높은 응력 집중이 발생하고 그로 인해 암석은 파괴된다. 두 개의 커터로 관입을 할 때 각 커터의 양 끝으로부터 시작되는 파괴영역은 일정하지 않은 형상으로 전파되고 최종적으로 암석의 내부로 발달되는 균열이 연결되어 암편을 형성함을 알 수 있다. 이러한 암석의 chipping 메커니즘은 주로 인장파괴와 관련이 깊은 것으로 판단된다.

AUTODYN 2D에 의해 암석의 chipping 메커니즘을 규명시에는 균열의 전파는 잘 모사가 되지 만 2차원으로 해석하기 때문에 압입시험(indentation test)을 모사하게 되는 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 커터에 작용하는 회전력을 고려하기 위해서는 디스크 커터의 팁부분만을 모델링 하는 것이 아닌 디스크 커터 자체를 모델링하여 3차원적인 해석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

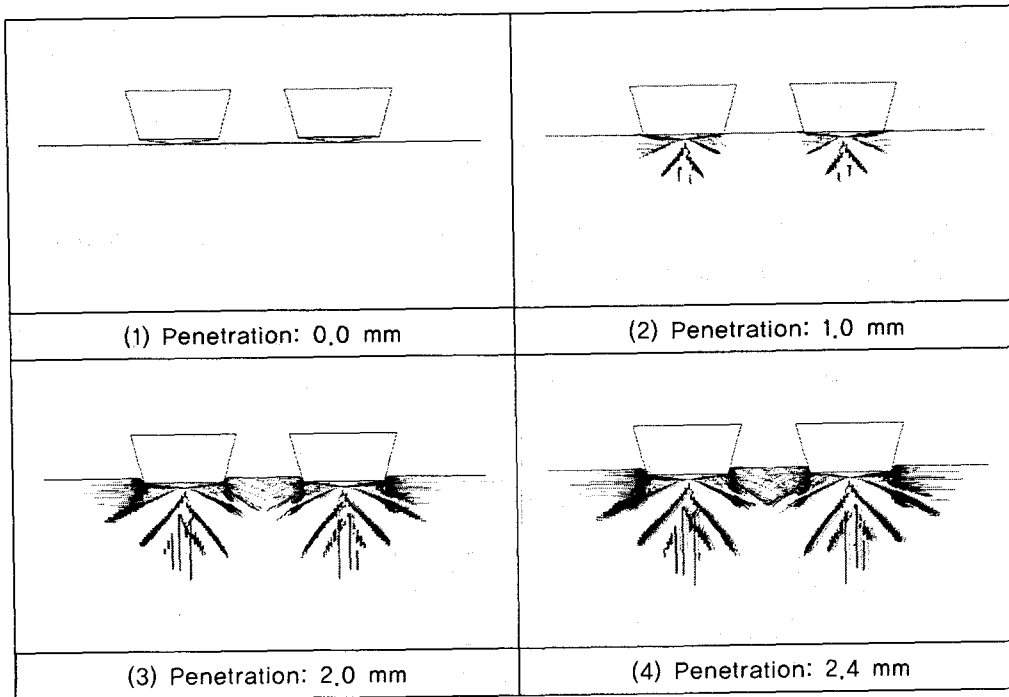


그림 22. 커터 관입에 따른 암석의 암편 형성과정(커터 간격=30mm)

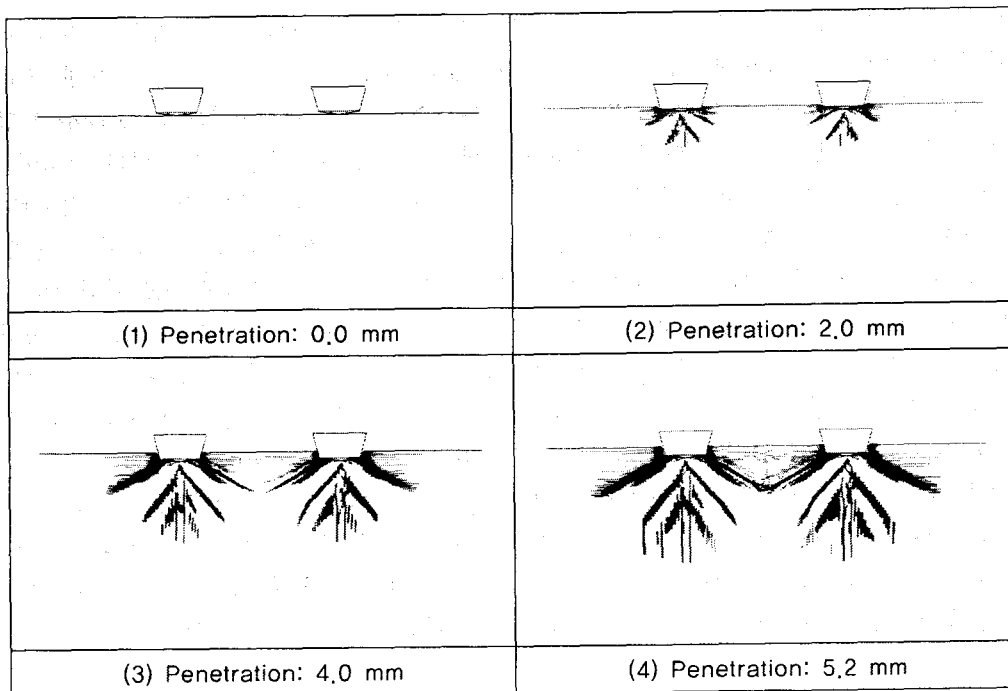


그림 23. 커터 관입에 따른 암석의 암편 형성과정(커터 간격=60mm)

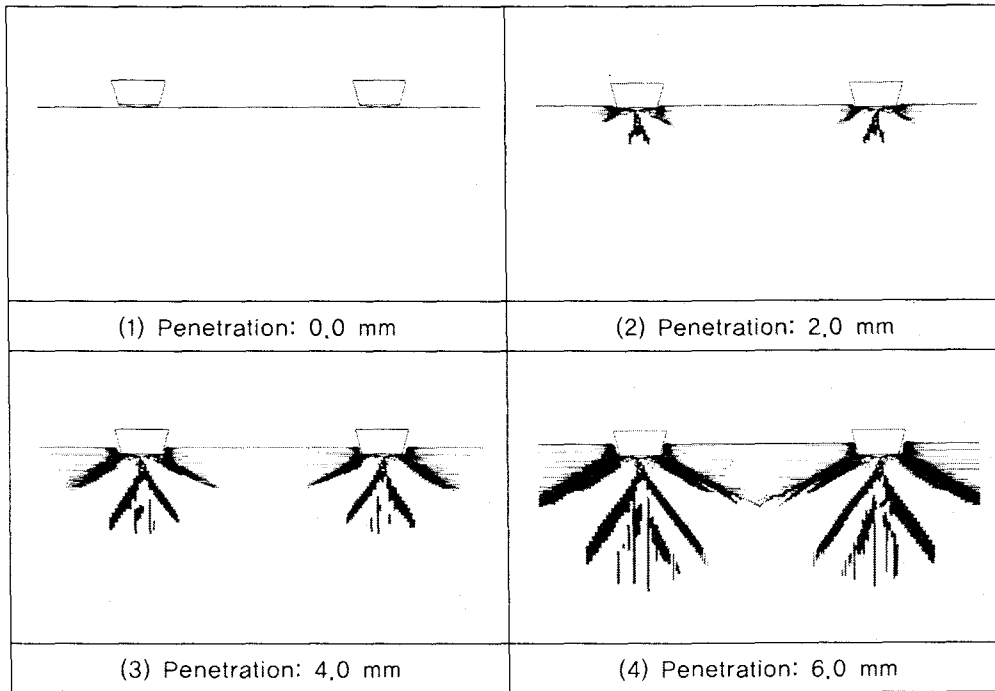


그림 24. 커터 관입에 따른 암석의 암편 형성과정(커터 간격=90mm)

3. 결 론

본 연구에서는 국내의 대표적인 암종 중의 하나인 화강암에 대해서 TBM 디스크 커터에 의한 최적 절삭 조건을 도출하기 위해 LCM 실험을 실시하였고 실험 결과의 정확성과 신뢰성을 향상시키기 위하여 시험편 표면의 3차원 형상을 디지털 영상화할 수 있는 사진계측 시스템을 구축하여 적용하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 황등 화강암에 대한 LCM 시험 결과, 최적의 절삭조건은 비에너지가 최소가 되는 지점인 S/P가 10~12인 경우로 나타났다. 특히 S/P가 20일 경우보다 7~15일 경우에 실제 사진계측으로부터 측정된 절삭 부피가 기계적 설정값에 의해 단순 계산된 절삭 부피보다 상당히 크게 나타났다. 이는 최적 절삭조건일수록 당초 설정한 절삭 깊이보다 TBM 디스크 커터에 의해 더 많은 절삭이 이루어졌기 때문이다. 따라서 TBM 커터에 의한 3차원적인 절삭 과정을 보다 정확히 고려하기 위해서는, 본 연구에서 처음으로 적용한 사진계측기법에 의해 절삭 부피를 정량화하여 TBM 설계인자 도출에 활용하는 것이 많은 장점을 갖는다고 할 수 있다.
- (2) 커터의 절삭 깊이가 증가할수록 비에너지가 감소하는 경향이 나타났다. 즉, 절삭 깊이가 증가할수록 절삭효율이 증가되고 급속 시공을 유도할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 절삭 깊이가 어느 이상이 되면 비에너지가 비교적 일정해지는 임계 비에너지가 존재하는 것으로 예측되었다. 또한 절삭 깊이의 증가는 추력, 토크, 동력 등 TBM의 주요 사양을 증가시키기 때문에, 이러한 임계 비에너지 수준을 고려하여 커터와 TBM 장비의 최대 용량을 넘지 않

으면서 최대의 절삭효율을 얻을 수 있는 최적 절삭 깊이를 결정하는 것이 매우 중요하다고 하겠다. 특히 절삭 깊이가 증가할수록 회전력의 비중이 점차 커지기 때문에 회전력이 입력 자료로 활용되는 TBM장비의 토크와 동력 용량에 더욱 유의하여 설계할 필요가 있다.

- (3) 커터 간격이 커질수록 커터 작용하중 역시 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다. 커터간격이 커질수록 그만큼 절삭해야 할 암석의 부피가 커지기 때문에 이에 비례하여 커터 작용하중이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 커터 간격이 증가할수록 평균 회전력보다 평균 수직력의 증가폭이 약 10배 이상으로 나타난 결과에 근거하면, 커터 간격을 증가시켜야 할 경우에는 TBM의 추력 용량에 유의하여 설계해야 할 것으로 판단된다.
- (4) S/P가 대략 16까지인 수준에서는 S/P의 증가에 따라 평균 커터 작용하중도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 S/P가 16이상인 경우에는 커터 작용하중의 증가폭이 크지 않고 대체로 일정한 값에 근접하는 경향을 보였다. 즉, S/P가 어느 이상 증가하게 되면 더 이상 커터 작용하중이 증가되지 않는 임계 S/P수준이 존재할 것으로 판단된다. 즉, 임계 S/P이상에서는 커터 간격이 크기 때문에 인접한 절삭과정과의 상호작용이 발생되지 않는 것으로 보인다.
- (5) AUTODYN 2D를 이용하여 디스크 커터에 의한 암석의 chipping 현상을 모사하였다. AUTODYN 2D는 실제 실험 결과에 부합하는 S/P 비를 나타내어 암석의 균열의 전파를 적절히 모사하였다. 그러나 이는 2차원으로 해석하기 때문에 압입시험(indentation test)을 모사하게 되는 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 커터에 작용하는 회전력을 고려하기 위해서는 3차원적인 해석이 수행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2004 건설핵심기술연구개발사업인 “급속 터널 기계화시공을 위한 최적 굴착설계 모델 개발” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

■ 참고문헌 ■

1. (주) 비전테크, 2004, 포토모델러 프로 5 매뉴얼.
2. 이승복, 김응태, 천윤철, Dan Akihiro, Kitahara Youich, 2004, 암반대응 쉴드TBM의 롤러커터 절삭성능에 관한 실험적 연구, 2004년도 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, 233-245.
3. 장수호, 배규진, 이성원, 최순욱, 임종진, 2004, 선형절삭시험에 의한 TBM의 굴진성능 평가에 관한 기초 연구, 제5차 터널기계화시공기술 심포지움 논문집, 97-112.
4. Century Dynamics Inc., 2004, User Manual AUTODYN Version 5.
5. Ozdemir, L. and Nilsen, B., 1999, Recommended laboratory rock testing for TBM projects, AUA Journal, 21-35.
6. Rostami, J. and Ozdemir, L., 1993, A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs, Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Boston, USA, 793-809.
7. Snowdon, R.A., Ryley, M.D. and Temporal, J., 1982, A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstract, Vol. 19, 107-121.