

레이저 타깃 투영기법에 의한 암석의 3차원 절삭부피 측정

장수호, 최순옥, 이성원 (한국건설기술연구원)
유상화, 전석원 (서울대학교)

1. 서 론

암석 또는 암반 표면의 거칠기나 표면형상을 정량화하기 위하여 다양한 화상처리 기법과 사진계측 기법들이 적용되고 있다. 특히 최근 들어 터널, 사면 등 다양한 토목구조물의 연속적인 실시간 계측에 디지털 사진계측기법(digital photogrammetry technique)이 적용되기 시작하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대형 암석 시험편의 표면 형상을 비교적 신속하며 경제적으로 측정하기 위한 레이저 타깃 투영 방식의 적용성을 평가하고자 하였다. 특히, 레이저 타깃 투영기법의 실제 적용성을 파악하고자 TBM(Tunnel Boring Machine) 디스크 커터에 의한 암석 절삭과정에서 발생하는 3차원 절삭부피를 정량화하고자 하였다.

선형절삭시험기(Linear Cutting Machine, LCM)를 이용한 TBM의 성능 평가시, 절삭부피는 절삭성능을 평가하기 위한 매우 중요한 인자이다. 미국 CSM(Colorado School of Mines)에서는 선형절삭시험 전에 기계적으로 설정한 절삭깊이를 TBM 성능 예측에 사용하고 있으나(Rostami & Ozdemir, 1993), 1차원적인 절삭깊이로 TBM 커터의 3차원적인 절삭과정을 고려하는 것은 한계가 있으며 더욱이 실제로는 절삭성능에 따라 당초 설정한 절삭깊이와 다른 절삭결과가 얻어진다는 문제점이 있다(장수호 등, 2005). 일본에서는 선형절삭시험후에 변위계로 절삭깊이를 측정하고 있으나(이승복 등, 2004), 가로 및 세로 크기가 각각 1m 이상인 대형 시험편에서 절삭깊이를 변위계로 측정하는 과정은 비효율적이며 상당한 시간이 소요된다. 반면 영국 Transport and Road Research Lab.에서는 절삭시험후에 절삭파편들을 회수하여 그 무게를 계량하여 절삭부피를 추정하고 있으나 이 역시 측정과정이 신뢰적이지 못하고 비효율적이라고 할 수 있다(Snowdon 등, 1982).

따라서 본 연구에서는 정확한 TBM 디스크 커터에 의한 절삭 성능을 정확히 평가하기 위하여, 레이저 타깃 투영방식의 사진계측 기법에 의해 1차원적인 절삭깊이가 아닌 3차원적인 절삭부피를 정량화하여 커터의 절삭성능 평가에 활용하고자 하였다.

2. 레이저 타깃 투영기법에 의한 사진계측 시스템

2.1 시스템 구성

레이저 타깃 투영방식에 의한 사진계측 시스템에는 카메라, 타깃(target) 및 laser points projector 등이 필요하다. 본 연구에서는 Nikon사에서 제작한 400백만 화소급 카메라(CoolPix 4500)를 사용하였고, 사진 계측시 기준점의 역할을 하는 코드 타켓(code target)을 사용하였다(그림 1). 코드 타켓은 크기가 50mm×50mm인 광반사 타깃으로서 절삭시험전에 총 6개를 움직이지 않도록 고정 설치하였다.

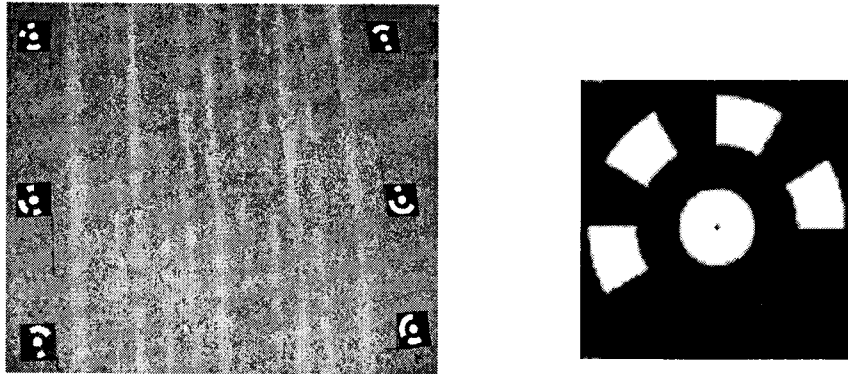


그림 1. 선형절삭시험용 시험편 표면에 설치된 코드 타깃

사진계측기법에는 필요한 만큼의 고정식 타깃을 설치한 후 피사체의 형상 또는 변형을 측정하는 방식과 수천개에서 수만개의 레이저 타깃을 피사체 투사시키는 방식이 있다. 본 연구에서는 가로 및 세로의 크기가 1m 이상인 비교적 대형 시험체의 표면 형상을 정량화하는데 목적이 있으므로, 레이저 타깃 투사방식(laser target projection)을 적용하였다.

레이저 타깃을 투사시키기 위하여 미국의 Geodetic Services사에서 제작한 상용제품인 Pro-Spot을 적용하였으며 그 형상과 제원은 각각 그림 2 및 표 1과 같다. Pro-Spot은 촬영 카메라와 유/무선으로 동조되어 촬영시 카메라 플래시의 작동과 동시에 빛 감지 센서가 작동하여 Pro-Spot내의 포인트 슬라이드(point slide)를 통해 원형 타깃들이 시험편에 투사되는 방식이다. 본 연구에서는 23,000개의 원형 타깃을 시험체 표면에 생성시켜 사진계측에 이용하였다.

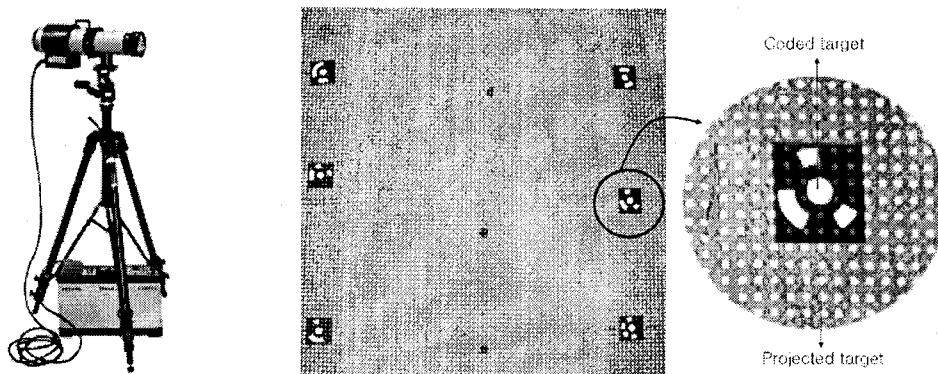


그림 2. 원형 레이저 타깃을 투사하는 Pro-Spot장비와 시험편에 투사시킨 예

표 1. Pro-Spot의 제원

구 분	값
정밀도	대상물 1 m 당 0.001~0.025 mm
투사 타깃 개수	6,000~23,000 개
무게	5.0 kg
작동 환경 온도	0~40 °C

2.2 자료처리 과정

레이저 타깃 투영기법에 의한 자료처리 과정은 촬영된 사진 상의 타깃들의 2차원 이미지를 자동적으로 인식되고 표시하는 마킹과정(marking), 마킹방법으로 표시된 다수의 사진 상에 나타나는 동일한 타깃의 이미지를 동일한 점으로 연결시켜주는 레퍼런싱(referencing) 작업, 그리고 각 타깃의 3차원 좌표를 계산을 하는 프로세싱(processing) 과정으로 구분된다. 이러한 일련의 과정들은 캐나다의 EOS system사에서 개발한 PhotoModeler Pro 5.2를 이용하여 이루어졌다.

2.2.1 카메라의 교정

본 연구에서는 그림 3과 같이 교정 격자(calibration grid)를 바닥에 놓고 총 12개의 서로 다른 각도에서 촬영하여 교정 작업을 수행하였다. 이때 카메라 교정 작업시 프로그램 상의 오차(error)가 0.3보다 작으면 교정이 잘 된 것이고, 일반적인 디지털 카메라의 경우 0.15 이하이면 대체로 잘 된 것으로 볼 수 있다(비전테크, 2004). 본 연구에서 사용된 카메라의 교정어러는 0.138로서 교정이 대체로 잘 된 것으로 나타났다.

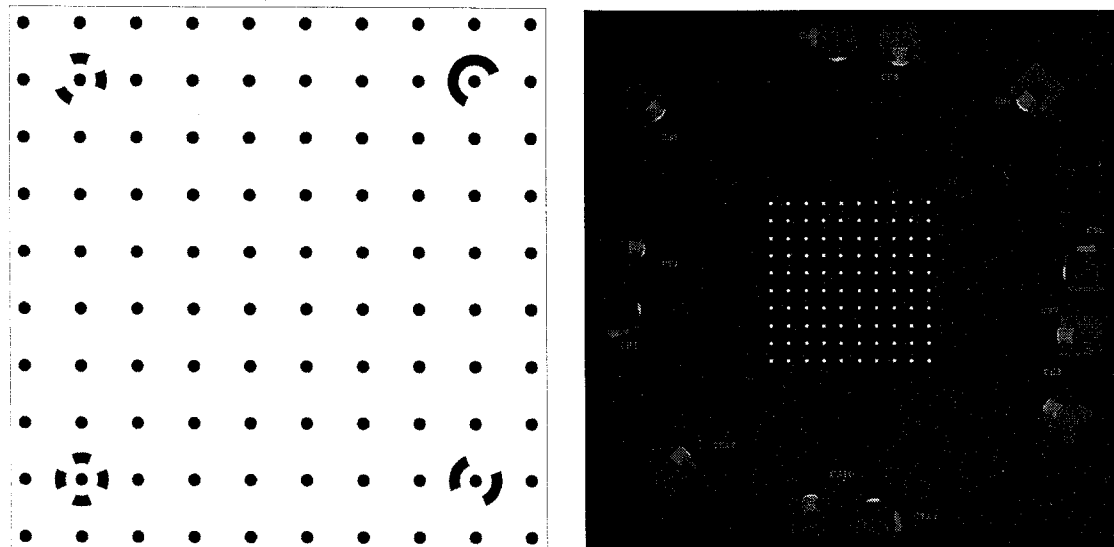


그림 3. 본 연구에서 사용된 교정 격자(Calibration Grid)와 촬영위치

2.2.2 촬영

Pro-Spot에 의해 시험편에 레이저 타깃들을 투사시킨 뒤 디지털 사진을 촬영할 때, 한 사진에 최소한 6개의 코드 타깃이 찍히도록 주의하여 최소한 3장 이상을 찍는다(그림 1). 본 연구에서는 레이저 타깃들의 인식률과 정확도를 높이기 위하여 여러 각도에서 4~8장의 사진을 찍어 자료 처리 과정에서 이용하였다. 또한 시험편 위에 설치된 코드 타깃들의 중심 간 거리를 정확히 측정하여 스케일 바(scale bar)의 역할을 대신하였다. 그리고 시험편에 투사되는 원형 타깃의 간격은 약 7~8mm이다(그림 2).

2.2.3 카메라 위치해석

정확하고 일관된 방식으로 점들을 마킹하도록 하는 서브픽셀 타깃 마커(Sub-pixel target marker)를 사용하여 원형 타깃을 마킹하였다.

여러 장의 사진을 중첩하여 2차원의 이미지를 3차원의 모델로 만들기 위해서는 기준점이 필요하다. 시험편 위에 부착된 6개의 코드 타깃을 기준점으로 하였고, 마킹된 각 점들에 대해 레퍼런싱을 한 후 프로세싱을 하여 카메라의 위치해석을 수행하였다. 프로세싱 과정에서 모델링의 최적화를 위해 PhotoModeler Pro 5.2내에 포함된 기능인 광역 최적화과정(global optimization)과 자기보정 과정(self-calibration)을 수행하였다.

2.2.4 자동 타깃팅

선형절삭시험 전과 후의 대형 암석 시험편 표면 형상을 3차원적으로 모델링하기 위해서는 코드 타깃을 기준으로 시험편에 투사된 원형 타깃들을 마킹하고 레퍼런싱을 해야 한다. 이러한 마킹 시 사진의 명암을 조절하여 타깃이 명확하게 보이도록 조정하여 타깃 인식률을 높였다(그림 4). 그리고 굴곡이나 촬영 각도에 따라 원모양이 아닌 타원 모양으로 보이는 타깃을 마킹하기 위해 이심률을 0.7로 조절하여 마킹하였고, 이러한 과정들에도 불구하고 마킹이 되지 않는 일부 타깃은 수동으로 마킹하였으며 위치가 잘못 인식된 타깃은 수정하거나 삭제하였다.

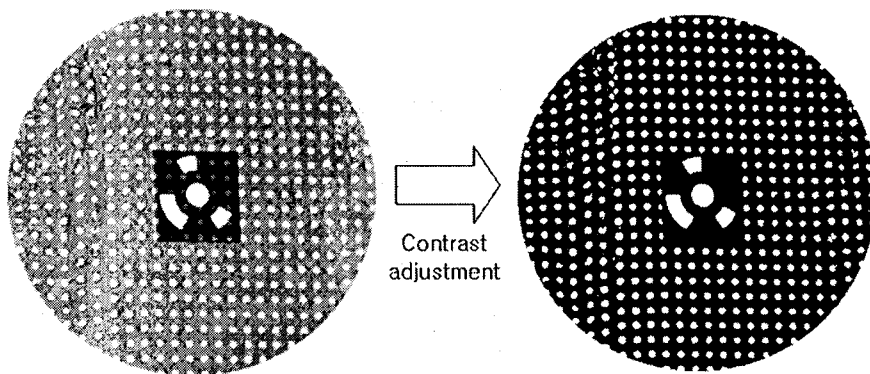


그림 4. 시험편에 투사된 레이저 타깃들에 대한 명암조정의 예

2.2.5 자동 레퍼런싱과 프로세싱

서로 다른 사진들에 마킹된 원형 타깃들을 자동 레퍼런싱 과정(auto-referencing)에 의한 동일화 작업을 통해 연결시키고 3차원 좌표를 얻기 위해 프로세싱을 수행한다. 정밀도를 극대화하고 오차 발생을 최소화하는 연산을 위해 몇 차례 자동으로 반복 작업을 하여 오차가 최소가 될 때까지 수행한다. 이를 위해 광역 최적화기법과 현장 보정과정(field calibration)을 수행하였다.

2.2.6 왜곡된 데이터 수정과 원점, 축, 길이 지정 및 저장

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 저장한다. 본 연구에서는 3차원 모델을 3차원 직교좌표(X, Y, Z)로 변환시킨 데이터를 저장하였다.

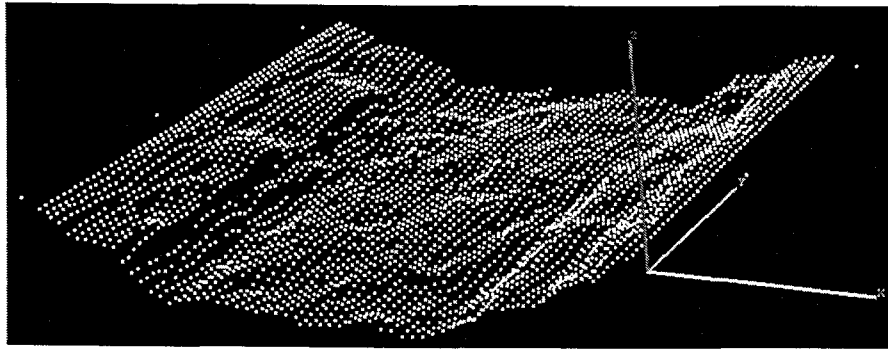


그림 7. 대형 암석 시험편에 대한 자료처리가 완료된 후의 3차원 모델링 결과의 예

2.2.7 레이저 타겟 투영기법의 정확도 평가

레이저 타겟 투영기법을 선형절삭시험에 적용하기 전에 사진계측 기법의 정확도를 평가하고자, 마이크로미터(micrometer)의 양쪽 끝단에 고정식 소형 타겟을 부착하고 사진계측을 실시하였다. 총 3가지의 이격거리 조건을 사진계측으로 측정된 결과, 표 2와 같이 마이크로미터(정밀도 1/100 in) 측정결과와의 오차율은 0.66~2.36 %로 나타났다. 따라서 마이크로미터의 수동 조작에 의한 오차를 고려하면 사진계측결과의 정확도가 매우 우수한 것으로 나타났다.

표 2. 마이크로미터와 사진계측결과의 비교 (단위: mm)

측정결과	1회	2회	3회
마이크로미터 측정결과 (A)	0.127	0.152	0.178
사진계측결과 (B)	0.130	0.151	0.176
절대오차 (A-B의 절대값)	0.003	0.001	0.002
오차율 $\left(\frac{A-B}{A} \times 100\%\right)$	2.36	0.66	1.12

3. TBM 성능예측을 위한 선형절삭시험 시스템

선형절삭시험기는 미국 CSM에서 개발되어 지난 20년 이상 동안 TBM의 설계인자를 도출하고 굴진성능을 예측하는데 널리 적용되어 오고 있다(Nilsen & Ozdemir, 1993). 또한 일본에서도 TBM 디스크 커터의 굴진효율을 평가하기 위하여 관련 시험을 수행한 바 있다(Uga 등, 1986). 영국에서도 선형절삭시험기를 활용하여 영국의 대표적인 암반조건에 대해 TBM 설계관련 자료를 획득하였다(Snowdon 등, 1982). 최근 들어 터키에서도 미국 CSM 연구진의 도움으로 선형절삭시험기 시스템을 구축하기에 이르렀다(Copur 등, 2001).

선형절삭시험기에는 TBM에 사용되는 실제 커터가 장착되며 TBM 굴착시 발생할 수 있는 커터 하중과 관입정도를 모사할 수 있기 때문에 TBM의 성능예측에 직접 적용할 수 있다. 특히 시험결과에 대한 크기효과를 배제할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Nilsen & Ozdemir, 1993).

이와 같이 선형절삭시험기는 TBM 커터헤드의 설계인자를 도출하고 TBM의 굴진성능을 예측하여 최적화된 급속 시공을 도모하기 위한 매우 유용한 시험장비임에도 불구하고 국내에 도입되고 있는 TBM의 커터헤드 설계시 활용되고 있지 않으며 이로 인해 실제 현장 기반조건에 적합한 커터헤드를 설계하는데 있어 기술적인 어려움을 겪고 있다. 최근 들어 국내 턴키설계시 선형절삭시험기시험이 수행된 바 있으나(이승복 등, 2004), 일본의 선형절삭시험기 장비와 기술을 활용한 것으로써 TBM 커터헤드 설계를 위한 설계인자 도출에 있어 기술의존이 심각한 실정이다.

본 연구에서 사용한 선형절삭시험기는 최대 50톤까지 커터의 연직방향으로 하중재하가 가능하며, H형강으로 구성된 시험 프레임은 최대 2배의 안전율을 갖도록 설계되었다(그림 8).

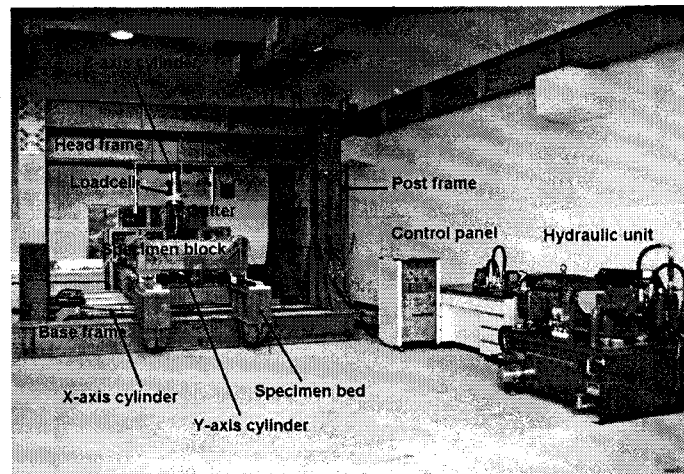


그림 8. 선형절삭시험기 시스템의 주요 구성

구동부는 총 3축이며 X, Y, Z방향으로 유압실린더에 의해 구동된다. X축은 시험편 블록 프레임은 2개의 실린더로 총 1,200mm의 스트로크(stroke)를 구동하여 커터 간격을 조절하고, Y축은 시험편 블록을 1개의 실린더로 1,500mm의 스트로크를 구동할 수 있는 구조로서 절삭속도를 제어한다. 또한 Z축은 시험시 실제 하중이 부하되는 축으로 최대 50톤의 하중을 가할 수 있으며 서보제어(servo-control)가 가능하다. 특히 Z축 실린더의 선단부에 3축 로드셀(loadcell)이 부착되어 있어 그림 9와 같이 커터에 작용하는 3방향의 하중성분을 동시에 측정할 수 있다.

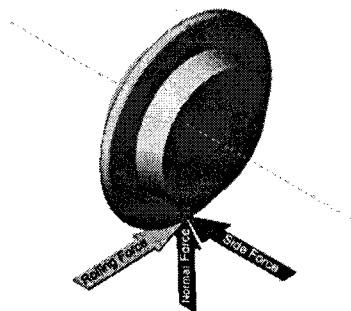


그림 9. 디스크 커터에 작용하는 세 방향의 커터 하중 성분

시험편이 설치되는 시험편 블록(specimen block)은 크기가 1.5m(길이)×1.4m(폭)×0.43m(깊이)이고 크레인으로 탈부착이 가능하며, 커터의 교체 또는 장착 역시 쉽게 볼트로 용이하게 할 수 있는 구조이다. 또한 유압밸브의 조절을 통해 시험편 블록의 이송속도를 조절할 수 있다. 그리고 다양한 커터의 절삭성능을 평가할 수 있도록 최대 직경 48cm(19")까지의 disc cutter 또는 drag bit 등을 장착할 수 있도록 제작되었다.

선형절삭시험에 사용되는 각종 계측 시스템은 그림 10과 같다. 첫 번째로 선형절삭시험기 시험동안 얻어진 3방향 커터 작용력을 측정하기 위한 자료획득시스템(data logging system)은 16 bit 해상도의 자료를 최대 200ks/s의 자료획득속도(sampling rate)로 측정할 수 있다. 특히 선형절삭시험기 시험시 1회의 절삭은 약 7초의 짧은 시간에 종료되므로 선형절삭시험 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 이와 같은 고속 자료획득시스템의 사용이 필수적이라고 할 수 있다. 또한 선형절삭시험 동안 절삭조건에 따른 TBM 커터의 절삭 메커니즘을 규명하고자 디지털 캠코더(digital camcorder)에 의해 매 시험시 연속촬영을 실시하게 된다. 마지막으로 선형절삭시험기에는 앞서 설명한 laser point clouds 투사기(Stroboscopic Target Projector)인 GSI사의 Pro-Spot이 장착된다. Pro-Spot은 자유곡면의 변형·편차 분석이 가능하도록 자유곡면에 3차원 point cloud를 생성하는 장비이다. 레이저 포인트의 밀도는 600~23,000개까지 조절이 가능하며 투사면적은 지름 6m이상까지 가능하다. 이 Pro-Spot장비에 의해 3차원 point cloud를 절삭 전·후의 시험편 표면에 투사하여 디지털 사진을 촬영하고 사진에 촬영된 레이저 타깃들의 3차원 좌표를 해석하여 TBM 커터에 의한 절삭깊이 및 절삭부피를 측정하게 된다.

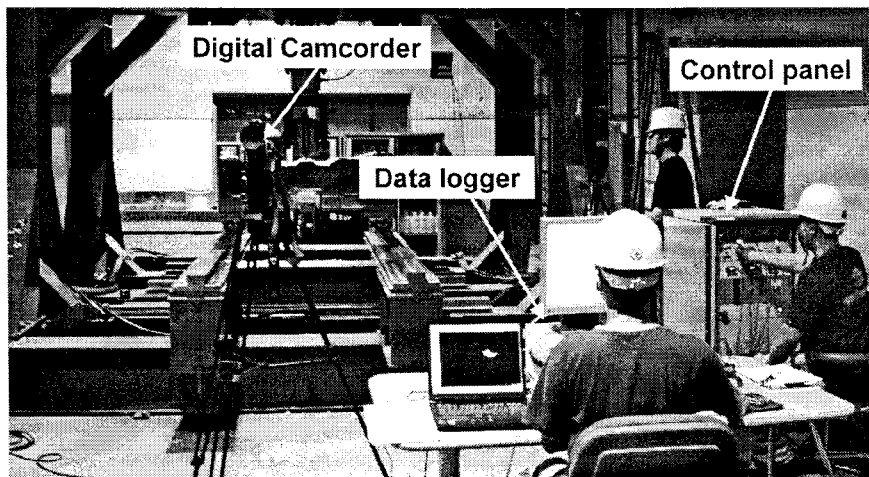


그림 10. 선형절삭시험기 계측시스템

4. 디스크 커터에 의한 3차원 절삭부피의 정량화

4.1 레이저 타깃 투영기법에 의한 3차원 절삭부피의 계산

대형 시험편에 대한 선형절삭시험전과 시험 이후의 표면 형상은 Golden Software사의 Surfer 8.0을 이용하여 재현하였다. 이때 절삭 부피는 절삭 전과 절삭 후의 시험편 표면 사이의 공간에 해당하는 부피를 구함으로써 이루어진다. 앞서 설명한 바와 같이 절삭부피는 식 (1)과 같이 TBM 커터에 의한 절삭성능을 평가하는데 있어 매우 중요한 인자이다

$$\begin{aligned}
\text{Specific energy} &= \frac{\text{rolling force} \cdot \text{cutting distance}}{\text{cutting volume}} \\
&= \frac{\text{rolling force} \cdot \text{cutting distance}}{\text{penetration} \cdot \text{cutting distance} \cdot \text{spacing}} \\
&= \frac{\text{rolling force}}{\text{penetration} \cdot \text{cutter spacing}}
\end{aligned} \tag{1}$$

대형 시험편 표면 형상의 정보를 포함하며 Photomodeller 프로그램에서 얻어지는 3차원 모델 파일인 raw 파일을 아스키(ASCII) 형식의 파일로 변환하여 절삭 전과 후의 시료 형상을 재현하면 다음의 그림 11 및 그림 12와 같다.

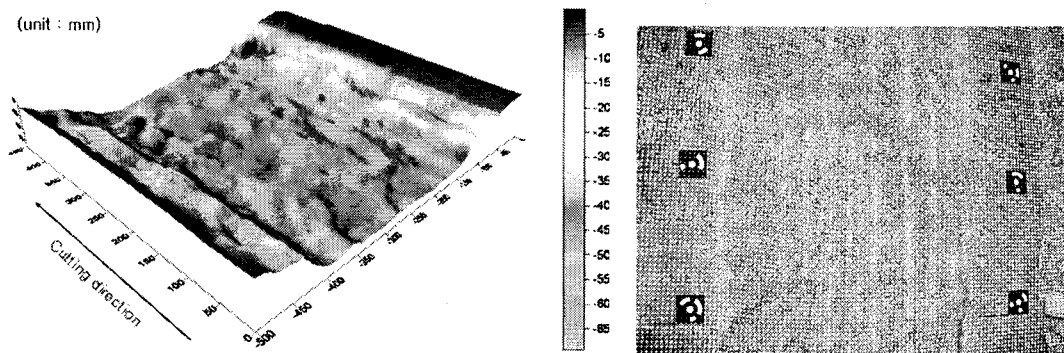


그림 11. 절삭 전 시험편 표면 형상의 예

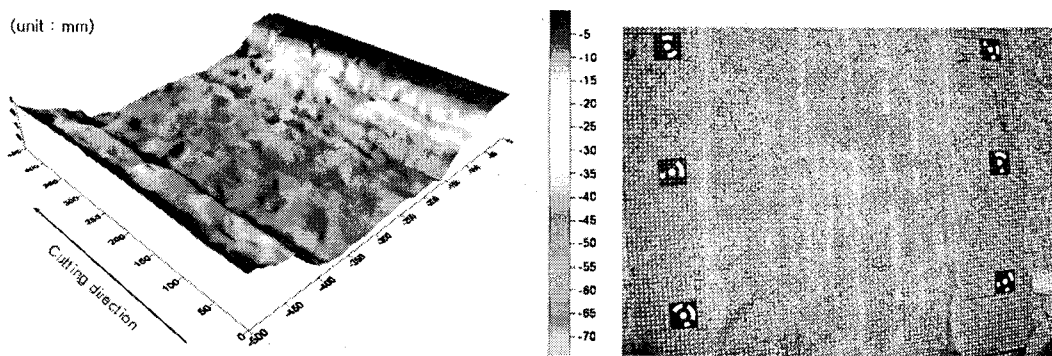


그림 12. 절삭 후 시험편 표면 형상의 예

4.2 모르타르 시험편에 대한 시험결과

균질한 시험편 조건에서 3차원 절삭부피에 의해 TBM 커터의 절삭성능을 평가하고자 모르타르 시험편을 제작하였다. 28일 양생 후 모르타르의 평균 일축압축강도와 할열인장강도는 각각 50.97 MPa과 4.93 MPa로 일축압축강도와 인장강도의 비율은 약 10.33이었다.

본 연구에서는 표 3과 같이 총 5가지 경우에 대해 7회의 선형절삭시험을 수행하였다. 표 3의 절삭조건에서 Case 1부터 Case 4의 경우에는 절삭깊이(penetration depth, P)를 1cm로 일정하게 설정하고 절삭간격(cutter spacing, S)을 달리하여 S/P가 7.5에서 15사이의 범위에 해당하도록 하였다. Case 5의 경우,

S/P는 동일하지만 S와 P의 절삭깊이 다른 경우에 시험결과의 차이를 분석하기 위해 절삭깊이와 절삭깊이를 각각 0.67cm과 10cm로 설정하여 S/P가 15인 Case 4의 경우와 비교하였고, 인접한 절삭과정으로 인한 영향을 배제하기 위하여 Case 4와 Case 5사이를 200mm 이격하였다. 시험에서는 직경이 17인치이고 커터 tip의 너비가 약 1.8cm인 디스크커터를 사용하였으며 절삭속도는 9m/min로 설정하였다.

레이저 타깃 투영기법에 의한 절삭 전과 절삭 후의 시험편 표면 형상자료로부터 표 4와 같이 각 절삭 시험조건에 따른 절삭 부피와 평균 절삭 깊이를 계산하였다. 이 때 실제 측정된 3차원 절삭부피뿐만 아니라 미국 CSM 등에서 적용하고 있는 기계적으로 계산되는 절삭부피(=절삭간격×절삭깊이×절삭거리)를 함께 분석에 활용하였다.

표 3. 모르타르 시험편에 대한 선형절삭시험 조건

시험조건	절삭간격(S)	절삭깊이(P)	S/P
Case 1	75mm	100mm	7.5
Case 2	100mm	100mm	10.0
Case 3	125mm	100mm	12.5
Case 4	150mm	100mm	15.0
Case 5	100mm	67mm	15.0

표 4. 모르타르에 대한 LCM 실험의 절삭 깊이와 절삭 부피의 추정 결과

절삭 조건	설정값		사진계측결과		A-B의 절삭깊이 (mm)	C-D의 절삭깊이 ($\times 10^5 \text{ mm}^3$)	절삭 깊이의 상대오차 (%)	절삭 부피의 상대오차 (%)
	절삭 깊이, A (mm)	절삭부피, C ($\times 10^5 \text{ mm}^3$)	평균 절삭 깊이, (mm)	절삭부피, D ($\times 10^5 \text{ mm}^3$)				
Case 1	10	6.75	16.18	8.74	6.18	1.99	61.8	29.5
Case 2	10	9.00	9.58	9.02	0.42	0.02	4.2	0.2
Case 3	10	11.25	12.62	9.26	2.62	1.99	26.2	17.7
Case 4	10	13.50	11.94	15.0	1.94	1.50	19.4	11.1
Case 5	6.7	6.03	4.35	7.94	2.35	1.91	35.1	31.7
평균					2.70	1.48	29.34	18.04

분석결과, 시험시 기계적으로 설정한 절삭깊이와 사진계측으로부터 측정된 절삭깊이는 평균 2.70mm의 차이를 보이며 상대오차는 29.34%까지 차이를 보였다. 그리고 절삭부피는 평균 $1.48 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 의 차이를 보였고 상대오차는 18.04%로 나타났다. 절삭조건에 따라 TBM 커터의 절삭성능이 다르기 때문에 시험전에 설정한 절삭깊이는 실제 절삭깊이와 상당한 차이를 보이는 것으로 고려된다. 따라서 선형절삭 시험으로부터 보다 정확한 TBM 설계인자를 도출하기 위해서는 레이저 타깃 투영기법을 통해 얻어진 실제 절삭깊이와 절삭부피의 측정값을 활용하는 것이 더 유용할 것으로 판단된다.

4.3 화강암 시험편에 대한 시험결과

본 연구에서는 황등화강암에 대한 최적 절삭간격/절삭깊이의 비율(S/P)을 유도하고, 이 때 절삭간

격(S)과 절삭깊이(P)가 절삭성능에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 황등화강암의 일축압축강도는 183.38 MPa, 할열인장강도는 9.81 MPa, 탄성계수는 42.27 GPa이고 포아송비는 0.18이었다. 시험조건 가운데 절삭깊이(P)를 2mm, 4mm 및 6mm로 하였고, 각각의 경우에 대해 S/P를 5, 7, 10, 15, 20으로 설정하였다(표 5). 또한 시험결과의 신뢰성을 높이고자 각 절삭조건에 대해 4~7회의 절삭시험을 반복하였다.

표 5. 황등화강암에 대한 선형절삭시험 조건

시험조건	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

황등화강암 시험편은 절삭방향의 길이가 110cm이고 절삭간격 방향의 길이는 80cm이며 높이는 30cm로 성형되었다. 화강암 시험편을 선형절삭시험기에 거치하고 시험편의 수평을 맞춘 후 모르타르를 채워 넣어 시험편에 충분한 구속이 가해질 수 있도록 하였다. 커터에 작용하는 3방향의 하중 자료는 고속 자료획득시스템에 의해 sampling rate를 100/sec로 하여 얻어졌다. 그리고 절삭 초기 부분과 절삭 종료 부분은 자유면과 가깝기 때문에 자유면의 영향을 배제하기 위하여, 절삭방향으로 시험체의 앞, 뒷면에서 각각 30cm 이격시킨 중앙의 50cm 영역에서만 얻어진 커터 작용하중 측정값만을 해석에 사용하였고 절삭부피도 이 영역에 대해서만 측정 및 분석하였다.

각각의 절삭 조건에 따른 절삭부피와 비에너지 추정결과는 표 6과 같다. 표에서 사용된 값들은 각 절삭 조건 별로 수행된 절삭 결과의 평균값들이다. 비에너지는 레이저 타깃 투영기법으로부터 측정된 3차원 절삭부피를 적용할 경우에는 식 (1)의 첫 번째 식에 의해 계산되며, 기계적인 설정값을 사용할 경우에는 세 번째 식을 이용하였다.

해석결과, 시험시 설정한 절삭부피와 사진계측으로부터 얻어진 절삭부피로부터 계산된 비에너지는 큰 차이를 보이지 않았으나 평균값만 유사할 뿐 편차와 상대 오차가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 절삭부피는 평균 $6.03 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 의 차이를 보이며 상대오차는 73.30%로 큰 차이를 보였으며, 특히 S/P가 20일 경우보다 S/P가 7~15일 경우에 절삭부피의 차이가 더 크게 나타났다. 이는 절삭과정에 의해 당초 기계적으로 설정한 절삭깊이 보다 더 많은 절삭이 이루어졌기 때문인 것으로 보인다. Snowden 등(1982)은 S/P가 5~15일 때 측정된 절삭부피가 계산된 절삭부피보다 더 크게 나타나고 이는 최적 절삭조건과 연관이 있다고 보고하였다.

표 6. 황등화강암의 절삭 조건에 따른 절삭 부피와 비에너지 추정 결과

절삭조건	S/P	절삭 부피($\times 10^{-5} \text{m}^3$)		A-B의 절대값 ($\times 10^{-5} \text{m}^3$)	절삭 부피의 상대오차 (%)	비에너지($\times 10^3 \text{tonf/m}^2$)	
		설정값	사진계측			설정값	사진계측
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
평균				6.03	73.30	3.43	3.33

절삭깊이가 6mm인 경우에 비에너지가 최소인 지점, 즉 최적 조건은 S/P가 약 10인 경우에 해당하였다(그림 13). 그리고 절삭깊이가 2mm인 경우의 최적 절삭조건은 S/P가 11~12일 때로 나타났다(그림 14).

절삭깊이가 4mm인 경우에, 기계적인 절삭조건으로부터 계산된 절삭부피를 적용하면 비에너지가 최소인 지점을 식별하기가 불가능하였고, 각 S/P조건별로 얻어진 비에너지의 편차도 크게 나타났다. 그러나 레이저 타깃 투영기법으로부터 얻어진 비에너지 경향에서는 S/P가 약 12일 때 최적 절삭조건임을 알 수 있었다(그림 15).

이상과 같이 레이저 타깃 투영기법으로부터 얻어진 3차원 절삭부피를 적용할 경우에는 시험결과의 신뢰도가 향상될 뿐만 아니라, 커터에 의한 3차원 절삭메커니즘에 더 부합하고 시험결과의 편차가 큰 경우에도 최적 S/P조건을 식별하는데 유용할 것으로 판단되었다.

레이저 타깃 투영기법으로부터 측정된 절삭부피와 기계적인 절삭조건으로 계산한 절삭부피의 차이를 S/P 비율에 따라 비교하면 그림 16과 같다. S/P가 5~15의 범위에서 측정된 절삭부피는 계산된 절삭부피보다 40% 이상 큰 것으로 나타났다. 이는 절삭조건에 따른 TBM 커터의 절삭성능에 따라 당초 설정한 절삭깊이 보다 더 깊게 절삭이 되었음을 의미한다. 즉, S/P가 5~15인 범위에서 최대의 절삭효율을 얻을 수 있는 최적 절삭조건이 포함되었다는 것을 알 수 있다.

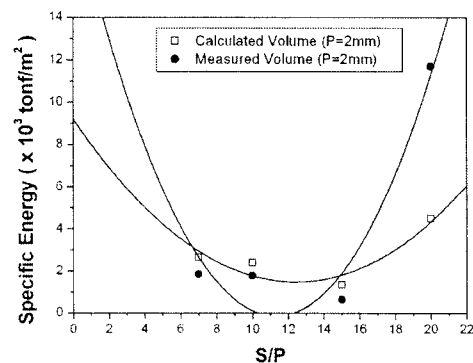
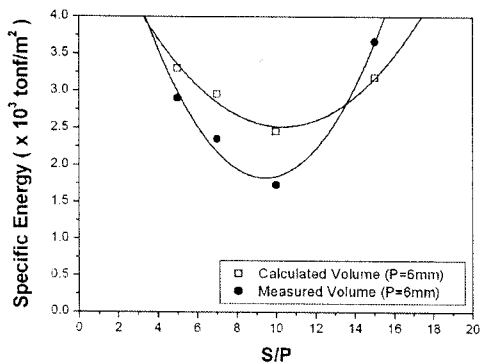


그림 13. 비에너지와 S/P의 관계(절삭깊이=6mm) 그림 14. 비에너지와 S/P의 관계(절삭깊이=2mm)

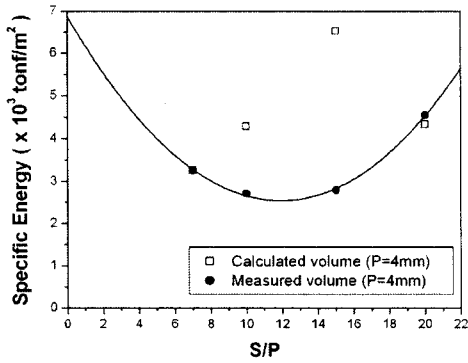


그림 15. 비에너지와 S/P의 관계(절삭깊이=4mm)

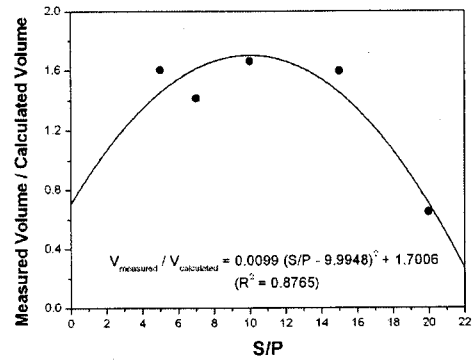


그림 16. S/P에 따른 실제 절삭부피와 절삭조건으로부터 계산된 절삭부피의 관계

반면 S/P가 20인 경우에는 레이저 타깃 투영기법에 의해 측정된 절삭부피가 계산결과보다 더 작게 나타났다. 이는 커터 간격이 크기 때문에 인접한 절삭사이에서 파괴가 발생하기 위해서는 더 큰 커터 작용하중이 필요하고 수회의 절삭이 이루어져야 하기 때문인 것으로 보인다. 즉, S/P가 20정도로 커터 간격이 큰 경우에는 절삭효율이 매우 떨어짐을 알 수 있다. 특히 측정된 절삭부피와 계산된 절삭부피의 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 선형절삭시험으로부터 최적 절삭조건을 유도할 경우에는 S/P와 비에너지 사이의 상관관계뿐만 아니라 S/P와 실제 절삭부피와의 관계로부터 최고의 절삭효율을 얻을 수 있는 절삭조건을 유도하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비교적 신속하며 경제적인 레이저 타깃 투영기법을 적용하여 대형 압석 시험편의 표면 형상을 측정하였다. 특히, 레이저 타깃 투영기법에 의해 TBM 디스크 커터에 의한 3차원 절삭부피를 정량화하여 기법의 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 주된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 TBM 커터에 의한 절삭성능을 정확히 예측하고 3차원 절삭부피를 정량화하고자, 레이저 타깃 투사방식의 사진계측 시스템과 해석과정을 확립하였다. 마이크로미터의 측정 결과와 비교하여 사진계측기법의 정확도를 검토한 결과, 사진계측결과의 오차율은 0.66~1.12%로서 마이크로미터의 수동 조작에 의한 오차 등을 고려하면 사진계측결과의 정확도가 매우 우수한 것으로 나타났다. 이와 같이 구축된 시스템과 해석과정을 최초로 선형절삭시험에 적용하여 절삭 전과 절삭 후의 3차원 시험편 표면형상으로부터 3차원 절삭부피를 정량화하는데 성공하였다.
- (2) 모르타르와 황등화강암에 대한 선형절삭시험 결과, 시험전에 기계적으로 설정된 절삭변수로부터 단순 계산된 절삭부피와 사진계측에 의해 실제로 측정된 절삭부피의 상대오차는 모르타르에서 18.04%, 그리고 황등화강암에서는 73.30%로 매우 큰 차이를 보였다. 특히 경암인 황등화강암에서 절삭부피의 차이가 더욱 크게 나타났다. 따라서 선형절삭시험으로부터 보다 정확한 TBM 설계인자와 절삭성능을 도출하기 위해서는 본 연구에서 시도한 레이저 타깃 투영기법을

- 통해 얻어진 실제 절삭깊이와 절삭부피의 측정값을 활용하는 것이 필수적이라고 판단된다.
- (3) 황등화강암에 대한 최적 절삭조건은 S/P가 약 10~12일 때로 나타났다. 그러나 기계적인 절삭조건으로부터 단순 계산된 절삭부피를 적용할 경우에는 비에너지가 최소가 되는 지점인 최적 절삭조건을 결정하기가 불가능하였다. 반면 레이저 타깃 투영기법을 통해 측정된 절삭부피를 적용한 경우에는 모든 절삭조건에 대해 최적 조건을 결정하기가 용이하였고 비에너지의 편차 또한 작게 나타났다. 특히 최적 절삭조건이 포함되는 범위인 S/P가 5~15일 때 실제 절삭된 3차원 부피가 기계적으로 단순 계산된 절삭부피보다 40%이상 크게 나타난다는 점을 고려하면, TBM 커터에 의한 최적 절삭조건을 유도하는데 있어 레이저 타깃 투영기법에 의한 절삭성능의 정량화가 필수적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2004 건설핵심기술연구개발사업인 “급속 터널 기계화시공을 위한 최적 굴착설계 모델 개발” 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 참여기업으로서 본 연구에 적극 협조해준 (주)희송지오텍 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

■ 참고문헌 ■

1. (주)비전테크, 2004, 포토모델러 프로 5 매뉴얼, (주)비전테크
2. 이승복, 김응태, 천윤철, Dan-Akihiro, Kitahra-Youich, 2004, 암반대응 실드TBM의 롤러커터 절삭성능에 관한 실험적 연구, 2004년도 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, 233-245.
3. 장수호, 최순욱, 박관인, 전석원, 2005, 디지털 사진계측기법에 의한 TBM 커터의 절삭 성능 정량화, 대한토목학회논문집, 25.6C, 421-428.
4. Copur, H., Tuncdemir, H., Bilgin, N. and Dincer, T., 2001, Specific Energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines, Trans. Instn Min. Metall.(Sect. A: Min. technol), 110, A149-A157.
5. Nilsen, B. and Ozdemir, L., 1993, Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance, Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference(RETC), 833-852.
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, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 107-121.
8. Uga, Y., Sakoi, K., Sugiyama, S., Kondo, Y., Nishimura, K. and Ono, H., 1986, Development of New Tunnel Boring Machine with Slurry Transport System-Penetration Efficiency of Disc Cutters, Kawasaki Heavy Industry Report, 91, 1-8(in Japanese).