레이저 센서를 이용한 워터젯 절삭 자유면 모니터링

오태민¹ · 홍창호² · 조계춘^{3*}

¹정회원, KAIST, 건설및환경공학과 박사 후 연구원

²비회원, KAIST, 건설및환경공학과 박사과정

³정회원, KAIST, 건설및환경공학과 교수

Monitoring of waterjet cutting free surface using laser sensor

Tae-Min Oh¹, Chang-Ho Hong², Gye-Chun Cho^{3*}

¹KAIST, Department of Civil & Environmental Engineering, Post-doctoral Fellow

²KAIST, Department of Civil & Environmental Engineering, Graduate Student

³KAIST, Department of Civil & Environmental Engineering, Professor

ABSTRACT: The monitoring of a free surface generated by waterjet cutting technology is very important for an efficient construction process. In this study, experiments using a laser sensor were performed to provide a data processing method and to determine optimized parameters. The experimental parameters here are the angular resolution, measurement distance, and free surface cutting shape. The results show that the monitoring resolution increases with a decrease in the angular resolution and the horizontal measurement distance and with an increase in the cutting (free surface) width. This laser monitoring method can be applied during the measurement of free surface shapes and depths in situ.

Keywords: Laser sensor, Free surface monitoring, Free surface depth, Rock cutting, Waterjet

초 록: 워터젯 절삭기술을 이용한 자유면 생성에 있어서, 생성된 자유면 내부의 모니터링은 효율적인 작업 진행을 위해서 매우 중요하다. 본 연구에서는 레이저 센서를 이용하여 자유면 측정 실험을 수행하고 실질적 현장적용을 위한 변수의 영향 정도와 최적변수 범위를 제시하였다. 영향을 미치는 변수를 레이저의 분해각(angular resolution), 측정 이격거리(measurement distance), 그리고 자유면의 절삭형상(cutting shape)으로 나누어 실험 수행 및 결과 분석을 하였다. 그 결과 분해각과 측정 이격거리가 감소할수록 그리고 절삭 폭이 증가할수록 보다 정밀한 모니터링이 가능함을 확인할 수 있었다. 본 레이저 측정 시스템을 이용하면 자유면 형상과 깊이의 측정이 실제 현장에서 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

주요어: 레이저 센서, 자유면 모니터링, 자유면 깊이, 암반 절삭, 워터젯

1. 서 론

지하공간의 효율적인 이용을 위해서 암반 굴착공사는 필수적이다. 기존의 암반 굴착은 주로 발파를 이용하여 진행된다. 발파를 이용한 굴착공법의 경우, 경제적이거나 주변지역에 심각한 수준의 진동을 발생시켜 다양한 민원을 야기시킨다. 또한 터널 계획선을 따라

정확하게 발파하기 힘들기 때문에 미굴과 여굴이 많이 발생하는 단점이 있다. Oh et al. (2013)은 연마재 워터젯을 이용하여 터널 계획선을 따라 선행 자유면을 생성하는 공법을 제안하였다. Kim (2012)은 터널 계획선에 일련의 최외곽공 형성 후, 연마재 워터젯을 이용하여 최외곽공의 공과 공 사이를 연결시켜 자유면을 형성하는 터널굴착 공법을 제안하였다. 선행 자유면에 의해 분리된 발파구역은 미굴과 여굴의 최소화 뿐만 아니라 발파 진동을 감소시키는 효과가 있다 (Richart et al., 1970; Park et al., 2009; Oh, 2012). 상기 공법을 효과적으로 적용하기 위해서는 일정한

*Corresponding author: Gye-Chun Cho

E-mail: gyechun@kaist.edu

Received July 23, 2013; Revised August 12, 2013;

Accepted August 23, 2013

깊이의 연속된 자유면이 요구된다. 그러므로 시공 중 워터젯에 의한 자유면의 형태를 확인하는 과정은 필수적이다. 특히 자유면 깊이의 측정은 목표로 하는 깊이에 도달하였는지 파악하는데 있어서 매우 중요하다.

레이저 센서(laser sensor)는 레이저 광을 연속적으로 쏘아서 목표 대상 표면에 반사되어 돌아오는 반사광의 각도 또는 소요시간을 이용하여 거리를 측정하는 장치이다. 이러한 원리를 이용한 레이저 측정 기술은 다양한 분야에서 유용하게 사용되고 있다(Thiel and Wehr, 2004). 특히 공간의 거리 좌표를 획득하는 3차원 레이저 스캐너의 경우 토목분야에서 광범위하게 적용되고 있는데, 터널 시공 시 과대 및 과소 굴착 평가를 하거나 시공 후 터널 내부의 유지관리 상태를 관리하는 연구가 수행 및 적용된 사례가 있다(Sagong et al., 2006; Kim and Lim, 2007; Lee et al., 2011; Park et al., 2012).

본 연구의 목적인 레이저를 이용한 자유면 형상 및 깊이 측정에 있어서 몇 가지 현장 상황이 고려되어야 한다. 자유면이 터널 막장면 내부에 생성되어 있고 자유면 절삭 계획선 주변에는 워터젯 노즐 이동장치가 설치되어 있기 때문에 바닥에 고정적으로 설치되어 사용하는 기존의 3차원 레이저 스캐너를 이용하기에 적합하지 않다. 그러므로 레이저 스캐너를 자유면

을 따라 이동시키며, 자유면 내부의 거리 정보를 연속적으로 획득 할 수 있는 시스템이 요구된다.

레이저 센서의 결과는 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다. 레이저 센서에 영향을 미치는 인자들에 따른 측정 신뢰도를 검토하기 위해 다음과 같은 실험 변수를 구성하였다. 일반적으로 레이저 센서는 고성능이기 때문에 측정오차의 수준은 미미하다. 그러나 자유면 내부의 정확한 측정을 위해서는 레이저 센서의 설치 위치가 큰 영향을 미친다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 설치 위치에 영향을 주는 분해각 그리고 수평 이격거리를 변수로 선정하여 적용 가능한 범위를 제시하였다. 또한 연마재 워터젯에 의해 생성된 자유면 형상에 따라 레이저 측정결과에 영향을 줄 수 있기 때문에, 절삭 형상을 실험변수로 고려하고 그 영향을 고찰 하였다.

2. 자유면 측정을 위한 레이저 시스템의 특징

워터젯을 이용한 자유면 생성은 터널 계획선을 따라 수행된다. 현장에서 워터젯을 이용한 선행 절삭 결과 예는 Fig. 1과 같다. 자유면의 측정은 워터젯 노즐이 절삭 작업을 마치면 이동장치를 이용하여 굴착 계획선을 따라 수행된다. 자유면 측정을 위한 레이

Fig. 1. Generation of the free surface cutting line by an abrasive waterjet

Fig. 2. Laser scanning system

저 시스템은 기존의 3차원 스캐너 방법과는 차이가 있다. 먼저 레이저 장치를 바닥이 아닌 노즐 이동장치에 설치해서 후방으로 거리 정보를 전송해야 한다. 자유면 측정을 위한 현장 레이저 시스템은 Fig. 2와 같다.

현장 상황을 고려하면, 레이저 장치는 터널 내부에서 사용되기 때문에 외부의 충격에 강해야 하고 방수 및 방진 기능이 필수적이다. 또한 공법의 특성상 이동 장치에 탑재해야 하기 때문에 크기가 작고 가벼워야 한다. 또한 터널 내부의 막장 근처는 위험하기 때문에 레이저 장치의 명령(input) 및 결과값(output) 확인은 막장에서 떨어진 후방에서 이루어져야 한다.

2.1 레이저 측정 장치

레이저 측정 장치는 획득되는 좌표의 차원에 따라 3가지 형태로 분류할 수 있다. 먼저 1차원 레이저 측정 장치(1D laser range finder)는 한 차원의 결과값만 획득하기 때문에 결과 값이 레이저 설치 지점에서의 단순 거리를 의미한다. 2차원 레이저 측정 장치(2D laser scanner)는 레이저 광 포인트(point)가 회전하며 거리와 회전각의 정보를 획득하여 단면에 대한 거리 정보를 보여준다. 마지막으로 3차원 레이저 측정

장치(3D laser scanner)는 3차원의 좌표값(X,Y,Z)이 획득되어 공간에 대한 거리 정보를 제공할 수 있다.

3 차원 레이저 측정 장치가 높은 해상도의 다양한 정보를 제공할 수 있으나, 매우 고가이고 무겁기 때문에 1차원 또는 2차원의 레이저 장치를 선택하는 것이 합리적이다. 자유면 깊이의 측정은 절삭 작업 진행 관리 측면에서 필요하고, 자유면 형상 측정은 워터젯 노즐의 삽입 정도를 판단하는데 필요하다. 만약, 자유면 깊이 정보만 필요하면 1차원 레이저 거리 측정기를 자유면 절삭 방향으로 이동시켜 2차원 거리 정보를 획득할 수 있다. 형상 정보가 추가적으로 필요하면 2차원 레이저 스캐너를 이동시켜 3차원 거리 정보를 획득 할 수 있다.

2.2 레이저 센서의 설치위치

레이저 센서의 설치 위치는 지면에서부터의 수직위치(vertical measurement distance)와 막장에서부터의 수평위치(horizontal measurement distance)로 나눌 수 있다(Fig. 3(a)). 레이저 센서의 설치 수직거리는 막장에 생성된 자유면의 높이와 동일한 위치에 설치되어야 방해 물질 없이 자유면 내부의 정보를 정확하게 획득할 수 있다(Fig. 3(a)). 만약, 레이저가 통과할 수

없는 물질이 레이저 센서 앞에 존재하면 레이저는 방해 물질 이후의 거리정보는 획득할 수 없다. Fig. 3(b)는 레이저 장치를 바닥에 설치하여 자유면 내부가 측정되지 않는 경우를 보여준다. 그러므로 레이저의 수직 설치거리를 자유면 중심에 맞추는 것은 정확한 자유면 내부 측정을 위해서 매우 중요하다. 일반적으로 워터젯 노즐과 동일한 수직 위치에 설치하는 것이 적절하다.

레이저 센서의 설치 수평거리는 자유면 측정 신뢰도 요구 수준과 레이저 센서의 사양에 따라 결정된다. 왜냐하면 설치 수평거리가 멀어지면 자유면 내부로 들어가서 반사되어 돌아오는 레이저 측정점의 개수가 줄어들어 정확도가 떨어지기 때문이다.

3. 실험방법 및 자료처리

3.1 실험 변수의 결정

자유면 내부의 정확한 측정을 위해서는 영향인자들에 대한 검토가 필수적이다. 레이저 측정에 영향을 미칠 수 있는 인자를 1)레이저의 분해각(angular resolution), 2)수평 측정 이격거리(horizontal measurement distance), 그리고 3)자유면 절삭 단면형상(cutting shape)으로 결정하여 실내 실험을 수행하였다. 분해각은 레이저 발진부에서 발사된 레이저가 초고속 회전거울에 반사되면서 일정한 간격으로 측정하게 되는데 이때 측정 간격이 분해각으로 정의된다. 레이저의 분해각은 장비 사양에 의해 결정되며, 본 연구에서는 0.25° 와 0.5°

Fig. 3. Measurement with the vertical installation position of a laser scanner

로 설정하였다.

수평 측정 이격거리는 막장에서부터 이격된 거리로 정의된다. 일반적으로 레이저 센서의 수평 설치 위치는 현장에서 1-2 m 이내로 가능할 것으로 판단되나, 현장 여건상 보다 먼 거리에서 레이저를 설치해야 되는 상황이 발생할 수도 있다. 그러므로 수평 이격거리 1-2 m 이상의 먼 거리에서 측정 정확성 검토가 필요하다. 이를 위해 수평 측정 이격거리는 0.2 m에서 8 m까지 증가시키며 실험을 수행하였다. 한편, 자유면 절삭 단면형상은 대표적인 워터젯 자유면 절삭형태인 V 절삭형태와 V-W 절삭형태로 결정하였다(Oh and Cho, 2012). 실내실험에서 수행된 실험 변수를 정리하면 Table 1과 같다.

3.2 자유면이 형성된 시편의 준비

연마제 워터젯의 기하학적 변수(이격거리 또는 노즐 입사각 등)를 이용하여 화강암 암석 시편에 서로 다른 자유면(절삭) 단면형태가 형성 되도록 시편을

준비하였다. 워터젯 노즐의 기하학적 변수를 조정하여 V 절삭 단면형태와 V-W 절삭 단면형태를 획득하였다(Oh and Cho, 2012). 이때 연마제 워터젯을 이용한 선행 자유면 절삭은 압력 250 MPa, 노즐 이격거리 300 mm, 그리고 이송속도 10 mm/s에서 수행되었다. 자유면이 생성된 시편의 준비는 Fig. 4와 같다.

3.3 레이저 장치와 데이터의 처리

자유면이 생성된 암석 시편에 레이저의 분해각과 이격거리에 따라 레이저 센서를 설치하여 자유면 내부를 측정하였다(Fig. 5). 레이저 센서로부터 측정된 결과 값은 10회 평균값을 사용하여 측정 오차를 최소화 하였다. 본 연구에서는 2차원 레이저 장치로 SICK사의 LMS151모형을 사용하였다. 레이저 장치의 제원은 Table 2와 같다.

측정된 데이터는 SOPAS-ET (Sick Open Portal for Applications and Systems Engineering Tool) 프로그램 이용하여 극 좌표(polar coordinate) 형태로 표현된

Table 1. Laboratory test cases

Cutting Shape	Angular resolution [°]	Horizontal measurement distance [m]												
		0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
V	0.5													
V	0.25													
V-W	0.5													
V-W	0.25

Fig. 4. Cross-section area of the rock cutting with geometric parameters using a combined nozzle (a) V cutting shape (b) V-W cutting shape

다. 본 실험에 사용된 장비의 최대 스캔 범위 각은 270°이다. 모든 스캔 범위가 필요하지 않기 때문에, 효율적인 데이터 처리를 위해 목표하는 범위 각을 결정하여 범위 각 이내의 데이터만을 처리하였다. 본

연구에서는 60°(기준점에서 $\pm 30^\circ$ 범위)의 범위 각을 기준으로 하였다. 범위 각 이내의 획득된 극 좌표 데이터는 직교 좌표 데이터로 변환하였다. 직교 좌표에서 각각의 측정 점들을 연결하여 실제 단면형상을

Fig. 5. Laser monitoring system setup for the laboratory tests

Fig. 6. Processed measurement data in rectangular coordinates (angular resolution of 0.25° and horizontal measurement distance of 1 m)

Table 2. 2D Laser scanner specifications

Weight (dimensions)	1.1 kg (105 mm·102 mm·162 mm)
	Light source	Infrared (905 nm)
	Field of view	270°
	Scanning frequency	25 Hz / 50 Hz
	Response time	40 ms / 20 ms
	Angular resolution	0.25°, 0.5° adjustable
	Operating range	0.5 m - 50 m (18 m at 10% reflectivity)
	Operating temperature	-30°C to + 50°C
	Statistical error	±12 mm

구현할 수 있도록 하였다. 이와 같은 데이터 처리 과정은, 현장에서 직관적으로 자유면 단면형태 및 깊이를 파악할 수 있도록 해준다. 최종 처리된 데이터의 결과 예는 Fig. 6(a)와 같다. Fig. 6(b)는 직교 좌표로 변환된 점들을 연결한 단면형상을 보여준다.

4. 측정 결과 및 분석

처리된 측정 결과는 레이저의 분해각, 레이저 센서의 이격거리, 그리고 자유면 절삭형태에 따라 절삭 깊이를 기준으로 실제 측정치와 비교하여 분석하였다. Fig. 7과 8은 각각 V 절삭형태와 V-W 절삭형태에서 이격거리와 분해각에 따른 전형적인 레이저 모니터링 결과를 보여준다. 각각의 영향인자에 따른 자세한 분석 결과는 다음과 같다.

4.1 레이저 분해각의 영향

레이저의 분해각은 스캔하려고 하는 영역에서 측정점의 개수와 상관관계를 가진다. 일정한 영역에서 분해각이 감소하면(각 분해능이 증가하면) 자유면 내부

에서 반사되어 돌아오는 측정점 개수는 증가한다. 본 레이저 센서의 분해각은 0.25° 와 0.5° 로 조절 가능하다. 넓은 지역에서의 레이저 측정은 분해각이 크더라도 크게 영향을 받지 않지만, 암석내부에 생성된 자유면 측정의 경우 자유면 입구로 들어갈 수 있는 레이저 빔(beam) 포인트 개수가 한정적이기 때문에 분해각은 매우 중요하다. 본 연구에서 목표로 하고 있는 자유면의 경우, 자유면 입구의 폭은 약 70-80 mm이다. 짧은 레이저 측정 이격거리에서는 레이저 빔 측정점들의 개수가 충분하여 분해능의 영향을 많이 받지 않지만 이격거리가 커짐에 따라 자유면 내부로 들어갈 수 있는 측정점들이 제한되어 결과값에 오차가 발생할 수 있다. 0.25° 분해각의 경우, 0.5° 분해각의 경우보다 2배 정도 많은 측정점 획득이 가능함을 보였다. 이와 같은 이유로, 같은 이격거리의 조건에서 낮은 분해각(0.25°)일 때, 더 정밀한 자유면 형상을 보여준다(Fig. 7과 8).

4.2 레이저 수평 측정 이격거리의 영향

일반적으로 레이저 센서는 10 m 이상의 이격거리

Fig. 7. Monitoring results for the V cutting shape with a horizontal measurement distance at angular resolutions of 0.5° (top) and 0.25° (bottom)

Fig. 8. Monitoring results for the V-W cutting shape with a horizontal measurement distance at angular resolutions of 0.5° (top) and 0.25° (bottom)

에서도 측정오차가 미미할 정도로 고성능이기 때문에 단순히 이격거리에 따른 측정 정확도는 의미가 없다. 본 레이저 장치의 경우 0.5-50 m까지 측정가능하고 거리에 따른 오차는 ± 12 mm에 불과하다. 단, 사용 가능한 최소의 이격거리(0.5 m) 미만에서는 실제보다 다소 큰 값을 가지는 것으로 확인되었다(Fig. 10).

앞서 기술한 바와 같이, 측정점의 개수가 자유면 형상 및 깊이를 측정함에 있어서 중요하기 때문에 레이저의 이격거리는 이격거리에 따른 측정오차가 아닌 측정점 개수와 연관시켜 분석해야 한다. Fig. 9는 자유면 입구 폭 약 70-80 mm 조건에서, 이격거리 (horizontal measurement distance)에 따른 자유면 내부의 레이저 측정점 개수를 보여준다. 본 결과에서 레이저 측정점의 개수는 이격거리에 따라 기하급수적으로 감소함을 확인 할 수 있었다. Fig. 10은 레이저 측정 이격거리(horizontal measurement distance)에 따른 측정 깊이(free surface depth)와 실제 수작업으로 측정한 깊이를 비교한 결과이다. V 절삭형태와 V-W 절삭형태의 실제 자유면 깊이는 각각 약 160 mm와 130 mm로 측정되었다.

V 절삭형태 시편에 수행한 0.25° 의 분해각 조건에서, 레이저 측정결과는 실제 측정값과 비교하여 이격거리 약 1.5 m까지는 신뢰성 있는 결과를 보였다(Fig. 10(a)). V-W 절삭형태의 시편의 경우, 이격거리 약 2.5 m까지 신뢰성 있는 결과를 보였다(Fig. 10(b)).

Fig. 9. The number of measurement points with the horizontal measurement distance at a free surface width of 80 mm

4.3 자유면 절삭형상 영향

자유면 내부의 절삭형상은 레이저 측정에 있어서 영향을 미친다. 절삭형상은 크게 절삭 폭과 깊이로 대변할 수 있다. 자유면 절삭 폭이 증가하면 다수의 레이저 측정점들이 획득되어 보다 정확한 결과를 제공할 수 있다. 일반적으로 결합노즐로 자유면을 형성하는 경우, V 절삭형태 단면보다는 V-W 절삭형태의 단면에서 더 큰 절삭 폭을 가진다(Oh and Cho, 2012). 본 실험에서 사용한 시편의 경우 V 절삭형태 단면의 시편은 약 70 mm의 폭을 가지고, V-W 절삭형태 시편은 약 80 mm로 폭이 10 mm 정도 크다. Fig. 10은 V-W 절삭형태의 시편이 V 형태의 시편보다 신뢰성 있는 측정 이격거리가 더 큼을 보여준다. V-W 형태 시편의 측정(분해각 0.25°)에서, V-W 절삭형태가 측정되는 이격거리는 약 1.5 m인 반면에 측정 깊이에 대한 신뢰성을 가지는 이격거리는 약 2.5 m이다.

Fig. 10. Free surface depth results for (a) the V cutting shape and (b) the V-W cutting shape specimen

비록 V-W 절삭형태에서 이격거리가 멀어지면 V 형태로 측정이 되는 현상은 보여지지만 대략적인 자유면 형성 관찰에 있어서는 크게 문제되지 않을 것으로 판단된다(Fig. 8). 다만 이격거리가 멀어짐에 따라 자유면의 절삭 깊이가 실제 측정치보다 작아지는 경향을 보이기 때문에 신뢰성 있는 이격거리의 확인은 필수적이다. 자유면 절삭 깊이가 실제 보다 작은 이유는, 레이저 측정점이 줄어들에 따라 가장 깊은 부분에 서 반사되어 돌아올 확률이 줄어들기 때문이다.

5. 신뢰성 있는 측정을 위한 변수의 최적화

신뢰성 있는 레이저 측정을 위해서는 자유면 절삭 폭에 따른 최적의 분해각과 수평 측정 이격거리를 결정해야 한다. 절삭 폭이 충분히 크다면 분해각과 이격거리를 증가시켜도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 분해각의 증가는 낮은 사양의 레이저 장치가 적용 가능함을 의미한다. 또한 적용 가능한 이격거리의 증가는 설치 위치의 제약이 상대적으로 적음을 의미한다.

그러나 일정한 절삭 폭에서 실질적으로 분해각이

작으면 작을수록 정밀한 결과를 얻을 수 있지만, 분해각이 작을수록 레이저 센서의 성능이 높아져야 하기 때문에 장비에 따른 한계가 있다. 그러므로 일정한 조건(절삭 폭과 분해각)에서, 실질적으로 조절 가능한 변수는 레이저의 수평 설치(측정) 이격거리이다. 본 연구의 실험결과 최소 5점 이상의 레이저 측정점이 확보되면, 깊이에 대한 신뢰성 있는 모니터링이 가능한 것으로 판단된다. 레이저 측정점의 개수는 자유면 절삭 폭(free surface width), 분해각(angular resolution), 그리고 수평 이격거리(horizontal measurement distance)와 같은 기하학적 변수들에 의해 결정된다. 기하학적 변수는 Fig. 11과 같이 정의 된다. 상기 기술한 기하학적 변수들의 관계를 이용하여 측정점 개수 산정 식을 아래와 같이 유도할 수 있다.

먼저, 자유면의 절삭 폭(W)은 식 (1)과 같이 이격거리(D_m)와 최대 측정각(θ_m)으로 표현 할 수 있다.

$$W = 2D_m (\tan \theta_m) \quad (1)$$

한편, 측정점 개수(N)는 식 (2)와 같이 자유면 폭에 대한 최대 측정각(θ_m)을 분해각(θ_r)으로 나눈 것으로 정의 할 수 있다.

Fig. 11. Definition of the geometric parameters for the determination of the number of measurement points

$$N = \frac{2\theta_m}{\theta_r} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 자유면 내부에서 반사되어 획득된 측정점 개수(N)는 기하학적 변수들의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$N = \frac{2 \tan^{-1}(W / 2D_m)}{\theta_r} \quad (3)$$

도출된 측정점 개수 산정 식을 검증하기 위해 실내 실험과 동일한 조건의 변수로 측정점을 예측하여 실제 결과와 비교하였다. Fig. 9는 실제 측정된 측정점 개수와 점선으로 표시된 식로부터 획득된 측정점 개수를 보여준다. 비교결과, 측정점 개수 산정 식은 실제와 상당히 부합함을 확인하였다. 본 결과에서 수평 이격거리가 증가함에 따라 측정점 개수는 기하학적으로 감소함을 보여준다.

측정점 개수 산정 식을 이용하여, 분해각과 수평 이격거리에 따른 측정점 개수를 분석하였다(Fig. 12). 5개의 측정점을 모니터링 가능한 최소 개수로 하였을 때, 분해각에 따라 측정 가능한 이격거리는 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 사용된 장비의 최대 분해각은 0.25° 로 이상적인 절삭형상에

Fig. 12. Parametric analysis: the number of measurement points with the horizontal measurement distance and the angular resolution at a free surface width of 80 mm

서 3.5 m의 이격거리에서까지 측정이 가능할 것으로 판단된다. 만약 분해각이 0.125° 의 장비가 준비된다면 최대 이격거리 7 m에서 측정이 가능할 것으로 생각된다. 이와 같이, 측정점 개수 산정 식을 이용한 상관관계도(Fig. 12)의 작성은 일정한 조건에서 수평 이격거리 또는 장비의 분해각을 결정하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

6. 현장 검증: 적용을 위한 데이터의 처리

레이저 센서의 현장 적용성을 확인하기 위해 현장 검증을 실시하였다. 현장에서 레이저 센서는 Fig. 2와 같이 구성하여 설치하였다. 현장 검증은 시공중인 자유면 깊이가 약 40 cm 일 때에 수행하였다. 이격거리가 약 40-50 cm 일 때의 직교 좌표로 처리된 자유면 내부 측정 결과는 Fig. 13(a)와 같다. 실험결과, 3 mm 미만의 측정점들이 관찰되었다(Fig. 13(a)의 점선원 내부의 측정점 참조). 이와 같은 현상은 레이저 센서 표면에 워터젯 자유면 시공으로 인한 물입자와 흡입자가 붙어 근접거리에서 레이저가 반사되어 측정된 것으로 판단된다. 이와 같은 측정점들은 단면 형상 및 깊이를 모니터링하는데 있어서 잘못된 결과를 도출시킬 수 있다. 본 현장 검증에서 3 mm 미만의 측정점들은 데이터 필터링(data filtering)을 통해 제거하였다. Fig. 13(b)는 데이터 필터링을 통하여 처리된 결과이다. 이와 같이 현장 환경은 실내실험과 다르게 깨끗하지 못하기 때문에 실제 자유면 표면에서 획득된 측정점들 뿐만 아니라 원하지 않는 부분들에 의해 반사된 측정점들도 같이 획득된다. 그러므로 현장 적용 시 미소거리에 대한 데이터 필터링은 필수적이라 판단된다. 실제 현장에서는 자유면 깊이가 수평 이격거리보다 항상 멀리 떨어져 있기 때문에 이격거리 미만, 그리고 최소 3 mm 이상으로 거리 필터링 기준점을 결정하면 적합할 것으로 판단된다.

Fig. 14는 처리된 최종 측정 형상과 실제 현장암반

Fig. 13. An example of the error data filtering process: (a) law measurement data and (b) filtered data

Fig. 14. An example of an in-situ test result

단면적을 스케치한 그림이다. 실제 자유면 단면 형상과 비교하여 레이저로 측정된 형상은 매우 단순화된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 실제 자유면 내부는 굴곡을 가지기 때문에 레이저가 반사되어 돌아 오지 못하는 부분이 발생되기 때문이다. 본 레이저 시스템이 자유면 내부를 높은 해상도로 획득하지는 못하지만 자유면 생성 작업시 필요한 대략적인 형상을 확인하기에는 충분하다. 특히 자유면 깊이 측정에 있어서는, 실제 깊이와 비교하였을 때 신뢰성 높은 결과를 나타냈다.

7. 결론

본 연구는 레이저 센서를 이용하여, 워터젯으로 형성된 자유면 내부의 측정을 실험적 방법으로 적용성 검증을 수행하였다. 레이저 장치를 현장에 설치함에 있어서, 영향을 미치는 인자를 분해각, 수평 이격거리, 그리고 절삭형상으로 나누어 실험결과를 분석하고 사용 가능한 범위를 제시하였다. 본 연구로부터 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1. 획득된 레이저 측정점들은 효율적이고 정확한 데이터 처리를 위해 목표 각을 설정하고 거리에 따른 데이터 필터링이 필요하다. 본 연구의 자유면 조건에서 목표 각은 기준점 $\pm 30^\circ$ 범위 그리고 거리에 따른 필터링은 이격거리 내에서 3 mm 이상이면 적합한 것으로 판단된다.
2. 레이저의 각 분해능이 증가(분해각의 감소)할수록 그리고 레이저 센서의 이격거리가 감소할수록 보다 더 정밀한 결과를 얻을 수 있다. 또한 절삭형상에서 자유면 폭의 크기는 자유면 내부에서 반사되어 획득된 레이저 측정점 개수와 밀접한 관계를 가진다. 자유면 폭이 클수록 정밀한 결과를 보여준다.
3. 자유면 내부에서 반사되어 획득된 측정점 개수가 최소 5개만 존재하면 대략적인 자유면 형상 및 깊이 측정이 가능할 것으로 판단된다. 실내실험 결과를 바탕으로 분석하면 분해각 0.25° 조건에서 약 1.5-2.5 m의 이격거리까지 신뢰성 높은 결과를 보여준다.
4. 현장 검증에서, 본 레이저 시스템이 실제 자유면 내부를 높은 해상도로 측정하지는 못하지만, 현장에서 대략적인 자유면 형상을 관찰하기에는 충분한 것으로 판단된다. 특히, 자유면 깊이 측정에 있어서는 실제 깊이와 비교하여 높은 신뢰성을 보였다.
5. 본 연구에서는 주로 실내실험을 통해 변수들의 영향 정도를 검증하고 적용성을 검토하였다. 그러나 정확한 현장적용을 위해서는 다양한 현장조건에서의 추가적인 실험은 필수적이다. 비록 본 연구가 현장에서 발생할 수 있는 모든 변수들을 고려하지는 못하였지만, 본 실험 결과와 데이터 처리방법은 추후 워터젯 자유면 모니터링 시스템 개발 시 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원

사업과 미래창조과학부의 2012년 특구기술사업화사업에 의해 지원되었음에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Kim, I.S., Lim, S.B. (2007), "A study on 3D section profiling surveying in tunnel excavation using a laser scanner", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 4D, pp. 541-546.
2. Kim, J.G. (2012), "Reduction of blasting-induced vibration in tunnelling using abrasive water jet notch and disc cutting", Ph.D. Dissertation, Seoul National University, pp. 57-62.
3. Lee, K.H., Heo, I.W., Kim, D.H., Lee, I.M. (2011), "The construction management of tunnel using 3D laser scanner", Journal of the Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 3, pp. 159-176.
4. Oh, T.M. (2012), "Rock excavation using abrasive waterjet", Ph.D. Dissertation, KAIST, pp. 93-115.
5. Oh, T.M., Cho, G.C. (2012), "Effects of geometric parameters of a combined nozzle for rock cutting using an abrasive waterjet", Journal of the Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 5, pp. 517-528.
6. Oh, T.M., Cho, G.C., Ji, I.T. (2013), "Effects of free surface using waterjet cutting for rock blasting excavation", Journal of the Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 49-57.
7. Park, D.H., Jeon, B.K., Jeon S.W. (2009), "A numerical study on the screening of blast-induced waves for reducing ground vibration", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, pp. 449-473.
8. Park, J.J., Shin, J.C., Hwang, J.H., Lee, K.H., Seo, H.J., Lee, I.M. (2012), "Assessment of over / under-break of tunnel utilizing BIM and 3D laser scanner", Journal of the Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14,

- No. 4, pp. 437-451.
9. Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D. (1970), *Vibration of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 247-262.
10. Sagong, M., Moon, C.Y., Lee, J.S., Hwang S.K., Kim B.H. (2006), "Development of a 3D laser scanner based tunnel scanner", *Journal of the Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 8, No. 4, pp. 377-388.
11. Thiel, K.H., Wehr, A. (2004), "Performance capabilities of laser-scanners-an overview and measurement principle analysis", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 8), W2.