

디지털 사진매핑에 의한 공학적 암반분류와 터널의 보강 김치환*

Supporting The Tunnel Using Digital Photographic Mapping And Engineering Rock Classification

Kim Cheehwan

Abstract The characteristics of rock fractures for engineering rock classification are investigated by analyzing three dimensional point cloud generated from adjusted digital images of a tunnel face during construction and the tunnel is reinforced based on the supporting pattern suggested by the RMR and the Q system using parameters extracted from those images. As results, it is possible saving time required from face mapping to tunnel reinforcing work, enhancing safety during face mapping work in tunnels and reliability of both the mapping information and selecting supporting pattern by storing the files of digital images and related information which can be checked again, if necessary sometime in the future.

Key words Tunnel face mapping, Digital photo, Point cloud, Engineering rock classification

초 록 터널의 페이스매핑(face mapping)을 신속하고 신뢰성 있게 수행하기 위하여 디지털 사진으로부터 3차원 좌표의 점군(point cloud)을 생성하고 이로부터 절리면의 방향과 간격 및 암질지수(R.Q.D), 절리면 거칠기 등을 분석하였다. 분석결과를 공학적 암반분류 방법인 RMR(Rock Mass Rating)과 Q 시스템에 입력하여 보강방법을 결정하고 터널을 시공하였다. 그 결과 터널 페이스매핑 작업의 안전성을 높이면서, 분석부터 보강작업까지의 시간을 절약하였다. 또 터널 막장면의 디지털 영상과 공학적 암반분류용 정보를 객관적으로 평가하고 필요 시 재분석이 가능하도록 보존함으로써 보강등급 결정과 터널보강 방법의 신뢰도를 높였다.

핵심어 터널 페이스매핑, 디지털 사진, 점군, 공학적 암반분류

1. 서 론

터널을 시공함에 있어 막장면 주변 암반의 공학적 상태를 파악하고 보강방법을 신속히 또 합리적으로 결정하기 위해서는 터널 페이스매핑(tunnel face mapping)이 중요하다. 터널의 역학적 안정성은 암석의 강도, 암반 내 절리의 특성, 지하수상태 등에 따라 달라지는데 터널 시공 전에 수행하는 조사와 설계과정에서 암반 내 모든 특성을 파악하기 어렵고 또 매 막장의 보강방법을 미리 결정해 놓는 것도 불가능하므로 시공 중 조사와 굴진을 반복하면서 터널을 시공해야 한다. 이와 같은 방

법은 터널을 설계하고 시공하는 여러 이론 중 하나로 경험적 방법이라고 한다. 경험적 터널시공법은 암반을 몇 개의 공학적 등급으로 분류하고 그 등급에 따라 제시된 보강방법을 기준 삼아 터널을 보강하는 것으로 가장 널리 이용되는 방법은 RMR(rock mass rating)법과 Q 시스템이다. RMR과 Q 시스템은 암석의 강도, 암질지수(R.Q.D; rock quality designation), 절리간격, 절리면 거칠기, 절리군의 수, 절리면 풍화도, 지하수유입 상태, 암반 내 초기응력 등 암반 상태를 정량적 지수로 산정한 후 이를 토대로 보강방법을 결정할 수 있도록 되어 있다. 그런데 암질지수, 절리간격 등 각각의 항목별 요소에 대한 정량적 값은 대부분 터널 페이스매핑을 통하여 구하여야 한다. 그러므로 터널시공에서는 터널 막장면의 페이스매핑에 따라 보강방법과 공사비가 결정되고 이에 따라 터널의 역학적 안정과 터널시공 중 작업의 안전을 유지할 수 있기 때문에 터널 시공 중의 페

¹⁾ 우석대학교 토목환경공학과

* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일 : 2011년 10월 31일

심사 완료일 : 2011년 12월 6일

게재 확정일 : 2011년 12월 6일

이스매핑은 정밀하게 수행되어야 한다.

그런데 터널 페이스매핑 작업을 수행하는 데는 현실적으로 많은 어려움이 있다. 가장 큰 어려움은 터널 페이스매핑은 터널시공 중 수행해야 하는 작업 임에도 불구하고 매핑기술자가 터널 막장 앞에 머물면서 막장을 관찰할 수 있는 시간이 부족하다는 것이다. 즉 터널시공은 천공, 발파, 부석제거, 버려처리, 보강작업 등이 연속적으로 빠르게 진행되는데 직접적인 공중이 아닌 페이스매핑과 같은 기술지원 과정에 충분한 시간을 할애받기 어려운 것이 현실이고 특히 국내에서는 페이스매핑에 소요되는 시간이 공사기간에 반영되어 있지 않는 것이 일반적인 터널설계에서의 관례가 되었다. 또 다른 어려움은 굴진 후 노출되는 터널막장은 그 면적이 넓기 때문에 관찰자가 한눈에 파악하는 것이 어렵다. 육안으로 막장면에 노출된 절리 방향을 모두 관찰하고 그 길이를 측정하는 등 막장면 전체에 대하여 암반분류에 필요한 10여 개의 요소값을 구하고 이를 지질도로 그려 페이스매핑 자료로 정리 하는데 많은 시간과 숙련된 기술이 필요하다. 이러한 제한 때문에 터널 시공 중 페이스매핑이 형식적으로 수행되는 것이 사실이다. 즉 절리의 방향을 측정하는 보통 수준의 매핑조사에서 클리노컴파스(clinocompass)를 이용하여 육안 상으로 보아 가장 뚜렷한 절리 중 하나의 절리에서만 그 방향을 측정하고 기타의 암반 공학적 요소는 정성적으로 분석하고 있는 것이다. 따라서 터널 페이스매핑에서 얻는 정보의 질과 양이 부족하다. 이와 같은 한계를 보완하고 더 많은 암반공학적 정보를 체계적으로 얻기 위하여 조사선법(scanline method)과 조사창법(window method)을 이용할 수 있다(Priest, 1993). 이 두 가지 방법 중 조사선법은 절리가 있는 암반에 줄자 등 조사선을 설치하고 조사선과 절리가 교차하는 곳에서 개개 절리면의 방향과 간격, 절리의 길이, 절리면의 거칠기, 절리면의 강도 등을 조사하는 방법이다. 따라서 각각의 절리 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. 이에 비하여 조사창법은 조사대상 부분을 가상의 격자모양으로 분할하여 각각의 격자 내 영역을 조사창으로 가정한다. 두 방법 모두 암반의 절리특성을 체계적으로 조사할 수 있지만 현장에서 실제 이용함에는 여러 가지 불편한 점이 있다. 첫째는 조사선법과 조사창법 모두 절리의 특성 조사에 많은 시간이 필요하다. 둘째는 조사영역이 제한된다. 셋째는 조사한 정보의 양이 적다. 넷째는 이미지 정보가 빈약하고 재분석할 수 있는 정보로 구축이 어렵다. 다섯째는 오차를 가지고 있다. 즉 조사선법이나 조사창법에서도 절리면의 방향은 클리노컴파스를 사용하여 측정한다. 그런데 절리면은 완전한 평면이 아니므로 절리면

이 크고 굴곡이 있는 경우 절리면 중 클리노컴파스를 놓는 위치에 따라 측정되는 절리의 방향이 달라지게 되기 때문이다(Herda, 1999).

이와 같이 터널 페이스매핑에 필요한 작업시간은 길고 얻는 정보는 부족한 점을 개선하기 위해서 디지털 사진이나 라이더(LIDAR, Light Detection and Ranging) 스캔 등 디지털 기술을 원용하여 암반의 특성을 분석하려는 연구가 보고되어 있다. 라이더는 3차원 레이저 스캔이라고도 한다. 이러한 디지털 방법을 이용한 암반 절리 조사는 신속하게 많은 정보를 비 접촉식으로 얻을 수 있고, 정보의 저장과 재분석이 용이하므로 조사선법이나 조사창법의 불편도 개선할 수 있는 장점이 있다. 즉 전체 암반사면이나 노출된 암반에 나타난 절리 관련 정보를 원격 자동으로 신속하게 얻을 수 있다. 디지털 방법에 의한 암반절리 조사 연구사례를 보면, 디지털 사진을 이용한 연구(Kemeny et al., 2003, Pringle et al., 2004)와 라이더를 이용한 연구(Kemeny et al., 2006a, Kemeny et al., 2006b, Kemeny et al., 2006c, Pringle et al., 2004, Mah et al., 2008, Matt et al., 2008, Bäcktröm et al., 2008)가 있다. 국내에서도 사진 측량학을 이용한 절리 조사방법의 연구(Park, 2008, 김종훈 등, 2008, 김기석 등, 2008, 김종훈 등, 2007, 한정훈 등, 2007, 김종훈 등, 2001, 류동우 등, 2000)와 3차원 레이저를 이용하여 암반 절리를 조사하는 연구(김치환 등 2008a, 김치환 등 2008b, 박의섭 등, 2008)가 보고되었다. 디지털 사진 방법과 라이더 스캔 방법을 비교하면 두 방법 모두 터널 막장면 등에 대한 3차원 좌표값을 얻을 수 있고 측정에서 자료처리까지 소요되는 시간도 큰 차이가 없으나 디지털 사진으로부터 3차원 좌표를 만드는 과정은 다소 복잡하다. 반면에 라이더에서는 3차원 좌표가 직접 측정되므로 3차원 좌표를 생성하기 위한 별도의 처리과정이 필요하지 않은 장점이 있으나 장비가격이 디지털 사진기보다 훨씬 비싼 것이 단점이다. 라이더의 측정결과나 디지털 사진으로부터 측정간격에 따라 수백만 개 이상의 점에서 3차원 좌표값이 얻어진다. 이와 같이 수 많은 점은 구름처럼 보이기 때문에 점군(point cloud)이라고 한다. 디지털 사진의 영상이니 점군으로 부터 터널 막장면에 분포되어 있는 절리의 방향, 길이, 간격 등 절리특성을 추출할 수 있다. 이번 연구에서는 터널 막장면을 촬영한 디지털 사진으로부터 점군을 생성한 다음 점군 처리용 소프트웨어를 사용하여 터널 막장면에 나타난 절리의 특성 중 절리군의 방향, 절리면의 거칠기 등을 분석, 그 결과를 공학적 암반분류법인 RMR과 Q 시스템에 입력하여 시공 중인 터널의 보강방법을 결정하였다. 각각의 절리면에 대

해서는 방향뿐만 아니라 그 크기, 즉 절리면의 넓이를 측정할 수 있으므로 절리면을 스테레오네트(stereonet)에 표시할 때 극점의 크기를 절리면의 크기에 비례하도록 하였다. 절리의 간격과 길이는 디지털 사진을 이용하여 분석하였다. 여기서 사용한 디지털 사진기는 Nikon D90이다. 또 디지털 사진으로부터 점군을 생성하기 위해 사용한 소프트웨어는 Photomodeler-Scanner(ver.2011.0.3.367, Eos Systems Inc., 2011)이고 점군 처리용 소프트웨어는 Split-Fx(ver.2.0.0.184, Split Engineering LLC., 2011)이다.

2. 지질과 터널단면

터널을 굴착한 현장의 지질은 경기 편마암 복합체인 편마암류로 풍화가 심하게 진행되어 노두가 없는 상태이며 열리구조가 발달되었으나 수 차례에 걸친 습곡작용 등에 의해 그 방향성이 불규칙하다. 지질의 구성광물은 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석으로 나타난다. 시추조사에 따르면 암질지수는 3-75%로 심도와 시추위치에 따라 큰 변화를 보였다. 암석의 단축압축강도는 약 811-1,086kgf/cm², 탄성계수는 1.0×10⁵-1.6×10⁵kgf/cm²이었다.

이번 연구의 대상 터널은 4차선 도로터널로 폭이 약 20m, 높이가 약 10m이고 상부와 하부로 나누어 굴착하고 시공하였다. 그림 1은 터널의 단면을 보인 것이다.

3. 사진기렌즈의 왜곡보정과 소프트웨어

터널 막장면 촬영을 위한 사진기는 Nikon D90을, 렌즈는 AF Nikkor 20mm f/2.8D를 사용하였다. 터널 막장면을 촬영하기 전에 사진기의 렌즈에서 발생하는 영상왜곡을 보정하여야 정확한 좌표값을 구할 수 있다. 사진기의 렌즈에서는 반경방향의 왜곡(radial distortion)과

탈중심의 왜곡(decentering distortion)이 발생하고 이를 보정하기 위한 식은 다음 (1), (2)와 같다.

$$x_c = x + (dr)x + dpx \quad (1)$$

$$y_c = y + (dr)y + dpy \quad (2)$$

여기서 x_c, y_c 는 왜곡보정 후 영상의 좌표값, x, y 는 보정 전 mm단위의 영상 좌표값, 식 (3)의 dr 은 반경방향 왜곡보정식, dpx 와 dpy 는 각각 x 와 y 방향의 탈중심 왜곡보정식으로 다음 (4), (5)와 같다.

$$dr = k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6 \quad (3)$$

$$dpx = p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy \quad (4)$$

$$dpy = p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy \quad (5)$$

여기서 $r^2 = x^2 + y^2$ 이고 $k_1(\text{mm}^{-2}), k_2(\text{mm}^{-4}), k_3(\text{mm}^{-6}), p_1(\text{mm}^{-2}), p_2(\text{mm}^{-2})$ 들은 다음과 같은 보정작업에 의해 결정되는 계수이다.

사진기의 렌즈왜곡을 보정하기 위하여 한 장에 5개의 자동인식 원형표식(RAD, ringed automatically detected target)이 있는 9장의 보정용지를 그림 2와 같이 배열하여 보정판을 만들고 이를 촬영한 사진을 이용하였다. 먼저 사진기를 수평방향으로 삼발이에 고정시키고 보정판 주변의 서로 다른 네 방향에서 촬영하였다. 이어서 사진기를 왼쪽으로 회전하여 연직방향이 되도록 세워서, 그 다음 사진기를 오른쪽으로 회전하여 연직방향이 되도록 세워서 보정판 주변의 서로 다른 네 방향에서 각각 촬영한 총 12장의 사진을 Photomodeler-scanner 소프트웨어에 입력하여 보정계산을 수행하였다.

보정계산 결과 계수 k_1 은 2.656e-4, k_2 는 -4.508e-7, k_3 는 0.e0, p_1 는 4.993e-6, p_2 는 -1.052e-6이었다. 또 초

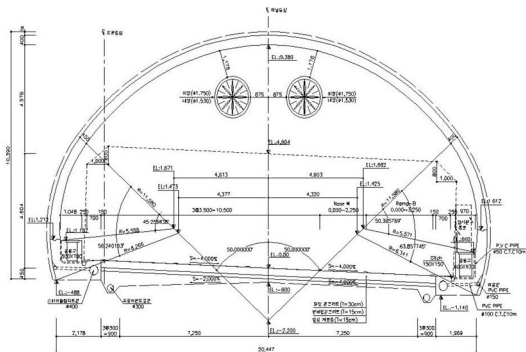


그림 1. 터널의 단면도

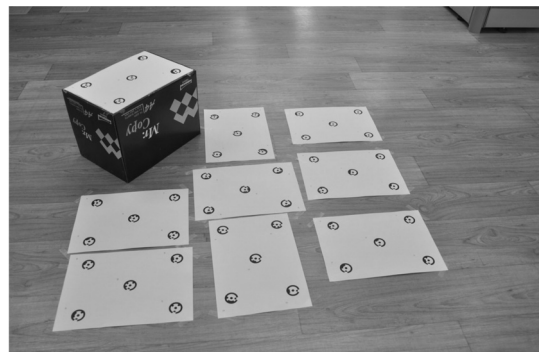


그림 2. 사진기 렌즈 보정용 표시 배치도

점거리는 21.02mm, 주점(principal point)의 좌표로 x 는 11.9328, y 는 8.0872이었다.

렌즈왜곡을 보정한 사진기로 촬영한 터널 막장면 사진으로부터 점군을 생성해야 하는데 이를 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. 그런데 터널의 단면이 크기 때문에 막장면을 여러 부분으로 나누어 촬영하되 3차원 좌표표를 얻기 위하여 인접한 사진은 부분적으로 중복되도록 하였다. 또 여러 장의 디지털 사진 영상들은 서로 정합하여 하나의 3차원 모델로 만들어야 한다. 이를 위하여 서로 인접한 사진의 영상에서 터널 막장면의 재질과 특성을 비교하여 동일위치나 기준점 등 암반 막장면의 특징을 자동으로 찾아내고 하나의 3차원 모델로 생성하면서 상호표정(relative orientation)을 계산하도록 하였다. 이 과정을 부분 촬영한 모든 사진에 대하여 반복 수행하여 터널 전체 막장면에 대한 3차원 모델을 만들고 절대표정(absolute orientation)도 계산하였다. 이와 같이 생성된 3차원 디지털 영상으로부터 3차원 특정위치의 좌표값과 색채값을 생성 하는데 생성할 위치의 간격에 따라 수 백만 개 이상의 좌표값이 생성될 수 있고 이를 점군이라고 한다. 이 작업도 소프트웨어 Photomodeler-Scanner를 사용하여 수행하였다.

디지털 사진을 이용해서 생성된 점군을 적절한 소프트웨어로 처리하면 터널 막장면에 분포한 여러 절리의 특성을 추출할 수 있다. 암반공학적인 특성을 고려한 점군 처리용 소프트웨어로 Split-FX를 사용하였다. Split-FX의 특징은 점군에서 암반 절리면을 자동으로 추출해내고 그 절리면의 방향, 절리면의 넓이와 형상, 절리면의 거칠기를 계산할 수 있다. 추출한 절리면을 방향과 경사에 따라 절리군으로 자동 분류할 수 있고 피셔상수(fisher constant) 등 암반절리 관련 통계값을 계산하는 기능과 점군으로부터 자동으로 인식 분류된 절리면을 스테레오네트(stereonet)로 출력할 수 있다. 또 이미지 처리(image processing) 기능으로 점군에서 또는 디지털 사진을 점군 위에 겹친 후 절리면의 윤곽 또는 절리를 따라 선을 그리면 절리의 간격과 길이, 방향 등을 추가로 계산할 수 있다.

4. 분석방법과 결과

4.1 절리면의 추출과 방향

이번 연구를 위한 터널 막장면의 모습은 그림 3과 같다. 이것은 폭 20m의 터널 중 높이 약 7m의 상부단면을 굴착하고 부석정리가 끝난 상태로 막장면은 비교적 평탄하고 연직에 가까운 경사를 이루고 있다.

터널 막장 절리면의 방향과 연장성 및 거칠기를 3차

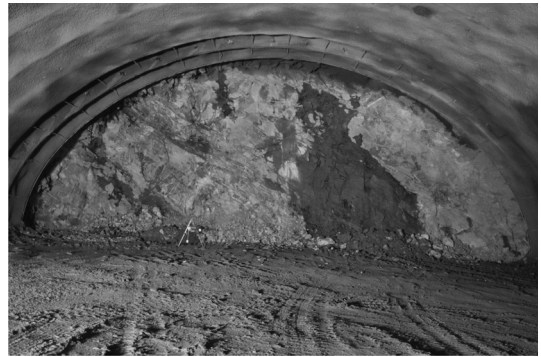


그림 3. 터널 막장면의 전경

원으로 분석하기 위해서는 3차원 좌표의 집합인 점군이 필요하다. 디지털 사진으로부터 3차원 모델을 생성하기 위하여 한 지점을 대상으로 서로 다른 위치에서 촬영한 중복사진을 이용하였다. 즉 서로 다른 방향에서 중복촬영된 부분을 3차원 모델로 생성하였다. 이때 정확하고 상세한 절리방향 등을 분석하기 위해서는 터널막장에 최대한 근접하여 사진을 촬영하여야 한다. 이번 연구 대상 터널의 폭이 크고 높이가 높기 때문에 여러 부분으로 나누어 중복 촬영하였는데, 수평방향 횡중복도를 약 60% 이상 또 상하부의 종중복도는 30% 이상이 되도록 하였다. 즉 터널을 상부와 하부로 나누고 상부는 4장의 사진이, 하부는 5장의 사진이 순차적으로 또 수평방향과 상하부가 중복되도록 하였다. 수평방향의 사진들이 띠(strip)모양을 이루므로 상부 또는 하부촬영띠라고 한다. 이 때 사진기에서 터널막장까지의 거리는 약 7-10m이었고 촬영지점은 약 4-5m 간격으로 터널막장에 거의 평행하게 옮겨가면서 터널 막장면에 수직인 방향으로 사진을 촬영하였다. 사진촬영을 위한 조명으로 1,000와트의 할로겐 전구 4개를 터널 중앙부의 막장 전방 약 7-10m에 설치하였다. 그림 4는 터널막장을 중복하여 부분 촬영한 것인데 (a)-(d)는 상부촬영띠를, (e)-(i)는 하부촬영띠를 보인 것이다.

터널막장을 상하부 두 개의 띠로 나누어 부분적으로 중복 촬영한 9장의 사진에서 인접한 사진들을 비교하여 막장의 특징을 자동 분석하고 두 사진을 정합시킨 후 터널막장의 형상에 대한 3차원 모델을 생성하였다. 터널 막장 및 절리면의 방향과 크기를 알기 위하여 그림 5와 같은 스케일바(scale bar)를 그림 3, 그림 4의 (f)와 (g)에 보인 것처럼 터널 막장면 앞에 두고 촬영하였다. 스케일바에는 수평과 연직방향으로 이격된 3개의 표식(target)이 고정되어 있는데 그 중심간격은 50cm이다. 사진을 촬영할 때는 스케일바의 전면이 연직이 되도록

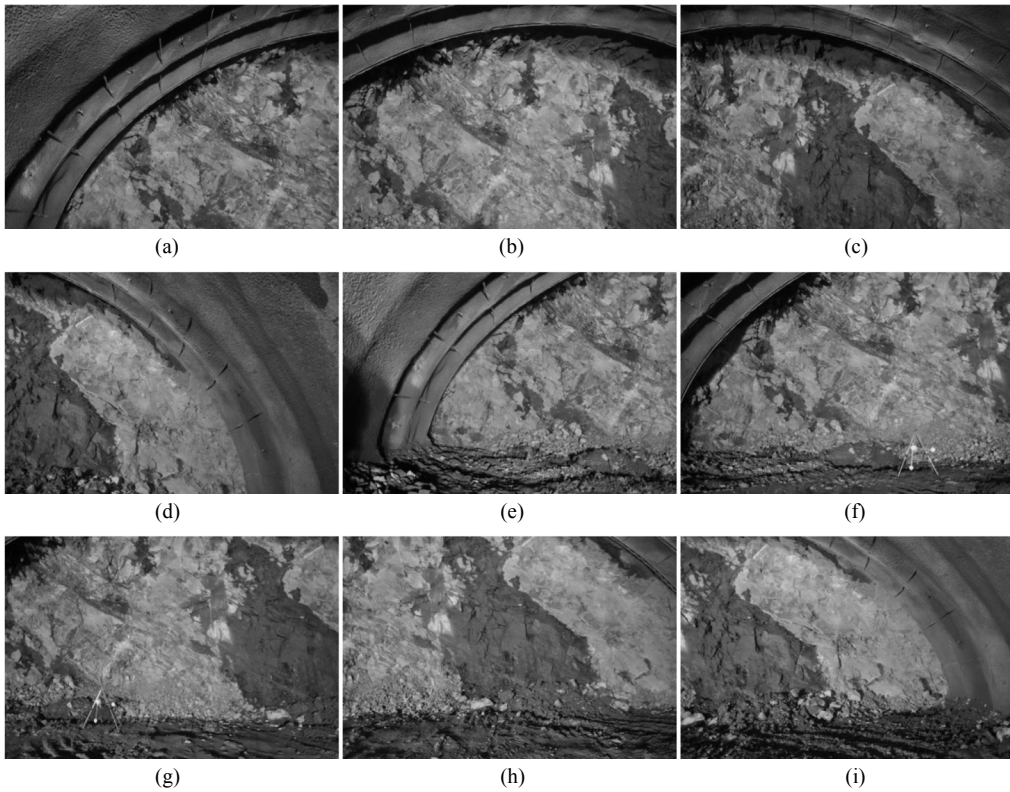


그림 4. 터널 막장면 부분 촬영 사진

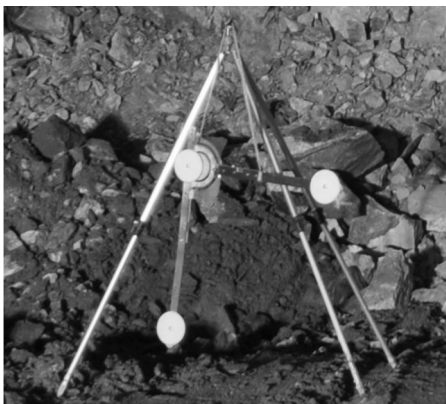


그림 5. 스케일바

또 상면은 수평이 되도록 삼발이로부터 매달아 늘어뜨린 후 그 방향을 클리노컴파스로 측정하였다. 여기서 측정한 스케일바의 방위각은 N4E이었다.

다음으로 점군을 생성하였는데, 그림 6은 중복하여 부분 촬영한 9장의 터널 막장면 사진을 정합시킨 후 생

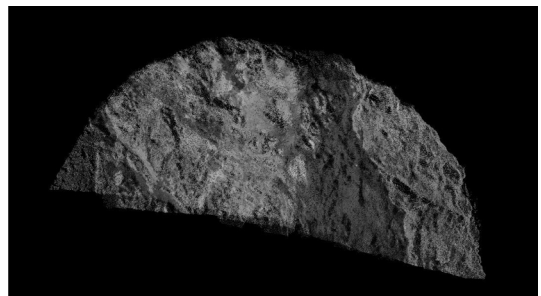


그림 6. 터널 막장면의 3차원 점군

성한 3차원 좌표의 점군을 보인 것이다. 즉 터널 막장면 디지털 사진으로부터 3차원 좌표의 점군을 생성한 것이다. 여기서 터널 막장면에 대한 점군 좌표들은 약 50mm의 간격으로 생성한 것이고 총 개수는 약 90만 개이다.

다음 단계로 암반 절리면을 추출하기 위하여 인접한 좌표점들을 연결하여 3차원의 삼각평면을 생성하였다. 그림 7은 인접한 3차원 좌표점을 이용하여 생성한 3차

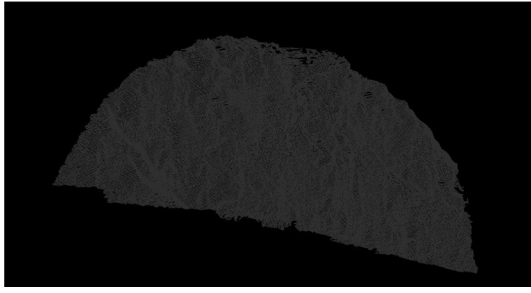


그림 7. 터널 막장면의 3차원 삼각평면 그물망

원 삼각평면들을 그물망으로 보인 것이다.

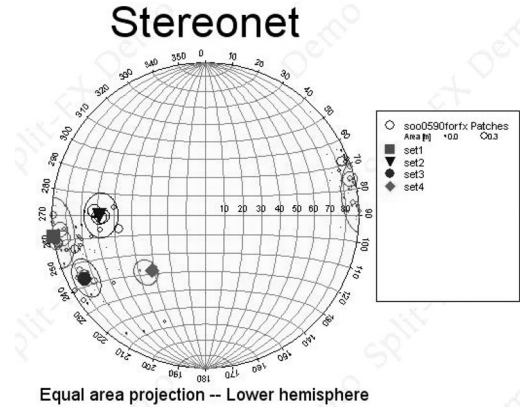
터널 막장면에 대한 3차원 삼각평면들로부터 절리면을 추출하였다. 비교적 매끄러운 자연 절리면과 터널굴착 중 무결암이 파쇄되어 만들어진 불규칙하고 거친 파쇄면을 구별하기 위하여 삼각평면의 방향을 비교하고 같은 방향의 면들이 인접하여 모여있는 부분을 자연 절리면으로 결정하였다. 이번 연구에서는 인접한 면의 방향이 10도 이내이고 인접하여 모여있는 면의 개수가 10개 이상일 경우를 절리면으로 간주하였다. 그림 8은 추출된 절리면이고 방향이 같은 절리군에 따라 색을 다르게 표시하였다.



그림 8. 터널 막장면의 절리면

터널 막장면의 3차원 모델에서 추출된 절리면을 동일한 방향의 절리군들로 분류하여 스테레오네트 상에 표시하면 그림 9와 같다. 절리군의 수는 4개로 분석되었고 각 절리군의 대표적인 경사방향과 경사는 각각 260/90, 270/60, 243/77, 240/30 이었다. 스테레오네트에 표시한 절리군의 색깔은 그림 8의 터널 막장면에 나타난 동일한 색깔의 같은 방향 절리들을 표시한 것이다. 빈도수가 가장 많이 측정된 절리는 붉은색으로 표시하였고 그 경사방향/경사는 260/90이었다.

터널을 보강하기 위한 RMR분류에서 터널의 굴진방향과 절리군의 방향에 따른 보정이 필요하다. 터널은



Equal area projection -- Lower hemisphere

그림 9. 터널 막장면 절리의 방향

서쪽에서 동쪽으로 굴진되고 있는데, 절리들은 터널의 굴진방향과 직교도 평행도 아니나 직교에 가깝고 경사는 30-90도이지만 RMR분류에서의 절리방향 보정값은 보수적인 선택으로 -5로 결정하였다. 또 Q시스템을 위한 절리군의 수(J_n)는 절리군이 4개이므로 그 요소값은 15가 된다.

4.2 암질지수와 절리의 간격 및 길이

RMR과 Q 값을 결정하는데 필요한 또 다른 요소인 절리의 간격과 길이 및 암질지수도 디지털 사진 또는 점군 상에서 분석하였다. 점군은 3 차원 좌표이므로 절리의 방향에 수직한 방향에서 그 간격을 구할 수 있다. 또 절리의 윤곽 또는 경계선을 알 수 있으면 절리의 간격을 구할 수도 있다. 자동으로 절리의 윤곽을 도출해 내는 것으로 모서리 감지(edge detector) 알고리즘도 있는데 이는 이미지 처리(image processing)기능의 일부이다 (Gonzalez and Wintz, 1987). 암반 내 절리를 감지하기 위한 모서리감지 기능의 알고리즘은 여러 연구자에 의해 보고되었고(Hadjigeorgiou et al., 2003, Kemeny et al., 2003) 본 연구에서 사용한 Split-FX 외 여러 이미지 프로세싱 소프트웨어에서도 사용되고 있으나 다음과 같은 이유로 이번 연구에서는 사용하지 않았다. 첫째 이유는 그림 6의 점군에서 보인 것과 같이 여러 가지 작은 규모의 절리를 포함한 모든 불연속구조의 윤곽을 복잡하게 보여주므로 절리군에 따라 각각의 통계값을 구하기 위해서는 편집이 필요하다. 둘째는 노출된 암반의 이미지는 복잡하기 때문에 자동으로 절리의 윤곽을 감지하는 것이 완전하지 않다. 따라서 보정편집이 필요하다. 셋째는 디지털 사진 상에서 절리면의 윤곽을 그리는 것이 복잡하지 않고 시간이 많이 소요되지 않기

때문에 자동 감지를 이용하지 않아도 불편이 거의 없다는 것이다.

따라서 이번 연구에서도 디지털 사진에서 절리의 간격과 길이를 구하였고, 절리의 빈도를 이용하여 암질지수도 계산하였다. 터널을 굴착한 암반은 편마암으로 좁은 간격의 층리가 있고, 여러 방향의 절리군에 임의 방향의 절리가 혼재된 상태이다. 그리고 발파에 의해 생긴 파쇄면으로 노출된 절리면 들이 불분명해졌고 또 부석제거 작업으로 막장면은 거의 평면으로 정리되었기 때문에 선으로 나타난 절리는 많으나 3차원 점군 상에서 절리면을 추적해서 그 간격과 길이를 판단하기 어려웠다. 즉 연구대상의 터널 막장면 전체에서 발파에 의해 발생한 불규칙한 형상의 파쇄면이 없는 자연절리만이 규칙적으로 나타나는 것은 드물었다. 이와 같은 조건을 고려하여 이번 연구에서는 디지털 사진 상에서 조사선법(scanline method)을 이용하였다. 즉 디지털 사진 위에 조사선을 설정하고 이 선과 교차한 절리의 간격과 길이를 계산하였다. 암반 내 절리의 간격은 통계적 변량이므로 조사선의 방향에 영향을 받지 않을 것이다(Priest, 1993). 그러나 디지털 사진 상에서 절리의 간격과 길이를 3차원으로 측정하기 위하여 막장면을 서로 다른 위치에서 중복 촬영한 2장의 사진을 이용해야 하였다. 그림 10은 디지털 사진 위에 표시한 조사선과 절리의 길이 및 간격을 보인 것이다. 절리의 간격을 구하기 위한 절리의 위치는 조사선 위에 x로 표시한 것이다.



그림 10. 터널 막장면 상의 조사선과 절리의 길이 및 간격

또 절리의 간격으로부터 암질지수를 구하였다. 터널의 막장면에서 개별 절리군 내의 간격을 알기 어렵기 때문에 절리의 방향에 관계없는 조사선 상에서 구한 절리의 간격과 빈도로 암질지수를 구하였다. 절리의 간격이 음지수함수 $f(x)=\lambda e^{-\lambda x}$ 의 분포(negative exponential distribution)를 따르는 것으로 연구 보고되어 있고 이를

이용한 이론적인 암질지수 TRQD_i는 다음 식 (6)과 같다(Priest, 1993).

$$TRQD_i = 100[e^{-\lambda t}(1+\lambda t) - e^{-\lambda L}(1+\lambda L)] \quad (6)$$

여기서 t는 암질지수의 판정길이로 10cm이고, L은 조사선의 길이, λ는 절리의 빈도이다.

그림 10에서 조사선의 길이 L은 약 6.63m, 절리는 129개이므로 절리빈도 λ는 약 19.46, 절리간격은 약 0.05m이었다. 따라서 위 식에 의한 암질지수는 약 42이다. 그러므로 RMR분류를 위한 항목 중 암질지수 요소값은 8이고, 절리간격 요소값은 5가 된다. Q시스템을 위한 암질지수는 42이다.

절리의 길이도 디지털 사진에서 구하였다. 그림 10의 디지털 사진에서 점선은 조사선과 교차한 절리 중 길이를 계산하기 위한 것이다. 디지털 사진은 3차원의 좌표를 포함하고 있으므로 사진 상에 절리의 시점과 종점 좌표로부터 그 길이를 구하였고, 여러 개의 절리길이로부터 다음 식 (7)을 사용하여 평균 절리길이를 계산하였다.

$$\mu_c = \frac{c}{-\ln\left(1 - \frac{r}{n}\right)} \quad (7)$$

여기서 μ_c은 터널 막장면에 나타난 절리의 평균길이, c는 측정가능 최대절리길이(curtailment), r은 c보다 길이가 짧은 절리의 개수, n은 길이를 측정할 절리의 총 개수이다.

그림 11은 위 식을 이용하여 절리의 길이를 구한 결과인데, 직선의 기울기가 절리평균길이 μ_c이 된다. 절리 길이를 측정할 개수는 26개이므로 터널 막장면에서의 평균 절리길이는 약 1.71m이고 따라서 RMR분류를 위한 요소값은 4가 된다.

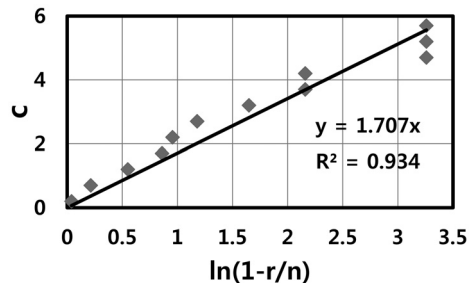


그림 11. 터널 막장면의 평균 절리길이

4.3 절리면의 거칠기

터널 막장면 점군으로부터 절리면의 거칠기를 구하였다. 암반 내 절리면의 거칠기를 정량화하기 위하여 여러 방법이 제안되어 있지만, 그 중에서 절리면 거칠기를 표준절리면곡선과 비교하여 계수로 표시하는 방법(JRC, joint roughness coefficient)(Barton, 1973), 통계적 방법(Tse and Cruden, 1979), 프랙탈(fractal)방법(Carr and Warriner, 1989, Hsiung et al, 1993)이 이용되고 있다. 이 중 절리면의 요철을 표준절리면곡선과 비교하여 절리면 거칠기계수 JRC를 결정하고 대규모 절리의 길이에 따라 보정하는 것이 가장 일반적인데, 적합한 표준 절리면곡선을 선택할 때 측정자에 따라 달라지는 경우가 많다. 따라서 대규모 암반 절리면의 거칠기계수 JRC는 길이에 따른 보정 없이 직접 측정하는 것이 정확할 것이나 측정방법에 한계가 있다. 대규모 암반 절리면의 거칠기를 구하는 방법을 Barton(1981)이 연구 보고한 바 있다. 이 방법에 의하면 절리의 길이 L과 절리면에서 돌출된 부분(asperity)중 최대높이와 최소높이의 차이 진폭 a로부터 대규모 암반 절리의 JRC 값을 구하도록 되어있다. 즉 작은 길이인 10cm의 짧은 암반절리에 사용하는 표준 절리면 거칠기 곡선을 이용할 필요가 없고, 절리의 길이를 고려한 치수보정 과정을 거치지 않고 대규모 암반 절리면의 거칠기계수 JRC를 구할 수 있다(Barton, 1981, Barton et. al., 1990). 이 때 절리면 위에서의 측정길이 L과 절리면에서 돌출된 높이의 진폭 a에 의해 절리면 거칠기계수 JRC는 다음 식들을 기준으로 L에 따라 내삽하여 계산된다.

$$\begin{aligned} JRC &= 400a/L, & L &= 0.1\text{m일 때} \\ JRC &= 450a/L, & L &= 1\text{m일 때} \\ JRC &= 500a/L, & L &= 10\text{m일 때} \end{aligned}$$

L : 측정된 절리길이(m)

a : 절리면의 돌출높이진폭(m)

대규모의 암반 절리면에 대한 거칠기를 라이다를 이용하여 측정한 연구(김치환 등, 2008b)와 유사하게 본 연구에서도 터널 막장면 중 면적이 가장 넓은 절리면에서 상하방향의 거칠기 측정선 L을 설정하고 점군 중 이 선에 따른 3차원 좌표를 이용하여 돌출부 높이의 진폭 a로부터 절리의 거칠기계수 JRC를 구하였다. 그림 12는 터널 막장면 중 거칠기를 측정할 위치의 절리면을 표시한 것이고 그림 13은 이 절리면의 요철을 표시한 단면도이다. 그림 13에서 절리의 상하방향 길이 L은 약 0.6m이고 진폭 a는 약 0.03m이므로 JRC는 약 18이었다.

그런데 RMR분류법 중 절리의 거칠기는 정성적으로

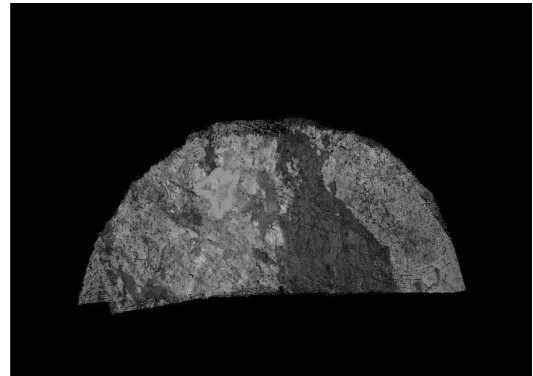


그림 12. 터널 막장면에서 절리면거칠기 측정위치

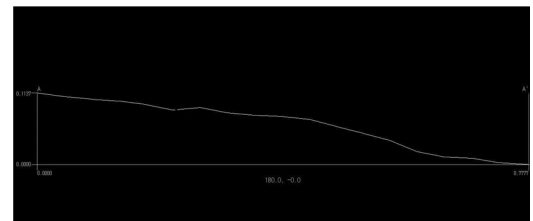


그림 13. 터널 막장면 절리면의 거칠기곡선

판정하고 정량적으로 표시한 JRC 값과의 연계성은 없으나 이번 연구에서는 RMR에서 거칠기 등급이 5개로 나누어진 것을 따라 0-20의 범위에 있는 JRC 값을 5개 등급으로 나누어 RMR의 거칠기 등급에 대응하도록 하였다. 이에 따라 JRC 값 18은 RMR 분류를 위한 절리면 거칠기 등급의 최상등급으로 그 요소값은 6이 되었다. Q 시스템을 위한 절리면 거칠기(Jr)은 ‘거칠고 불규칙하며 기복이 있는 상태’이고 그 요소값은 3이 된다.

4.4 절리틈과 절리면의 상태

RMR과 Q를 구하는데 필요한 터널 막장면의 절리특성 중 절리틈과 절리면 내의 충전상태 및 풍화상태는 디지털 사진이나 점군에서 관찰하기 어려우므로 사진을 촬영하기 전에 관찰한 정성적인 평가에 따라 그 요소값을 결정하였다. 절리틈은 발파에 의한 영향 때문에 절리틈이 벌어져 굴착에 따라 과대 평가하기 쉬울 것이지만 여기서는 층리 위주의 편마암이므로 절리틈이 밀착된 것보다 약간 틈이 있는 0.1-1mm로 판정하였고 그 등급값은 4로 결정하였다. 또 편마암의 절리 틈에는 방해석이 있을 수 있으므로 단단한 충전물로 간주하였고 그 두께는 5mm 이하로 등급값은 4로 결정하였다. 절리면의 풍화도는 디지털 사진 상에서도 판정할 수 있으나 직접적인 육안관찰이 더 유리하였고 약간 풍화되었으

므로 그 등급값은 5로 결정하였다. Q 시스템을 위한 절리면 풍화도(Ja)는 ‘절리면이 약간 풍화, 비연화광물막으로 덮힘’으로 그 요소값은 2가 되었다.

4.5 지하수 상태

지하수 상태는 그림 3의 터널 전경사진으로 알 수 있었다. 터널의 막장면은 대부분 건조상태이나 부분적으로는 습윤한 상태를 보였으므로 RMR분류법 중 지하수에 의한 요소값은 10이 된다. Q 시스템을 위한 지하수 감소(Jw)의 요소값은 ‘건조 굴착 또는 약간의 지하수 유입’으로 판단되고 그 값은 1이 되었다.

4.6 암석의 점하중강도

암반분류를 위해 암석의 강도는 암석 코어를 이용한 단축압축시험, 점하중시험 등으로 구할 수 있다. 이번 연구에서는 시공현장에서 장비이용이 가능하여 신속하게 강도를 측정할 수 있는 점하중강도 시험을 수행하였다. 시험방법은 한국암반공학회(한국암반공학회, 2005)을 따랐다. 이에 따른 암석의 점하중 강도 Is(50)은 약 3.6MPa이었다. 그러므로 RMR분류법 중 암석의 강도에 의한 요소값은 7이 되었다. Q 시스템을 위한 응력감소계수(SRF)는 터널의 심도가 약 50m이고 암

석의 단위중량은 2.6t/m³로 최대주응력 σ₁은 약 130t/m², 단축압축강도 α_c가 약 8,000t/m²으로 α/σ₁은 약 61이므로 ‘중간응력’으로 그 응력감소계수의 등급값이 1.0이 되었다. 그러나 터널의 안정성을 높이기 위하여 그 등급값을 2.5로 적용하였다.

4.7 터널보강방법

위와 같은 과정을 통하여 구한 RMR과 Q값은 각각 48과 4.2이었고 이를 기준으로 보강방법을 결정하였다. 그런데 RMR법으로는 폭이 약 20m인 터널의 보강방법이 제시되지 않았으므로 Q 시스템을 이용하여 보강방법을 결정하였다. 본 터널은 토목용 터널이므로 ESR(excavation support ratio)를 1로 선정하면 그림 14와 같이 록볼트의 길이와 간격은 각각 5m와 2.1m이고 강섬유가 포함된 습식샷크리트의 두께는 약 9cm로 제시되었으나(Hoek, 2011) 안전을 고려한 실제 보강은 샷크리트 두께 약 15cm, 록볼트 길이와 간격은 각각 5m, 2m로 시공하였다.

5. 결론

터널에서 버력을 터널 밖으로 운반해 내는 동안 지

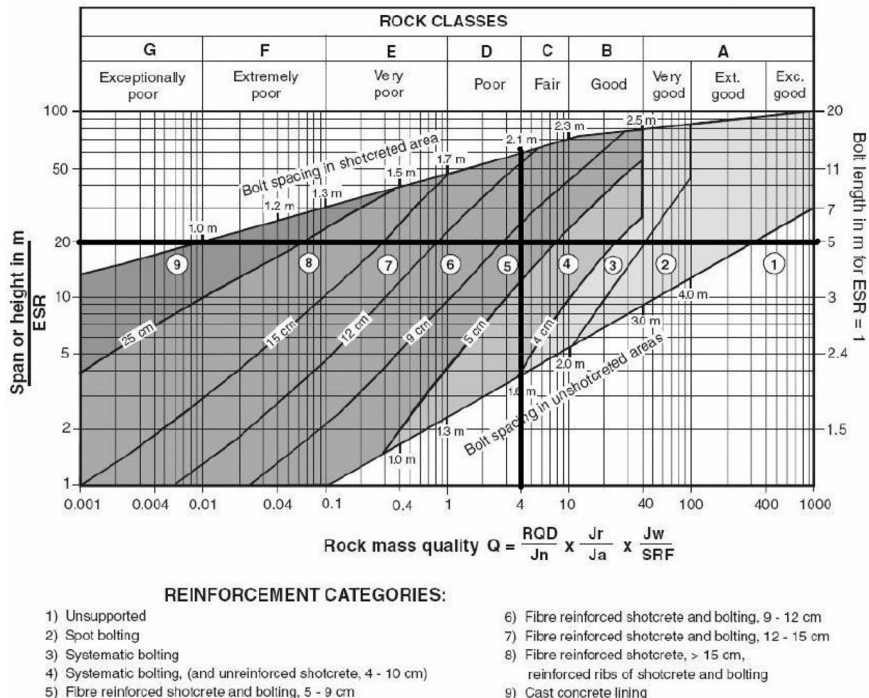


그림 14. Q 시스템에 의한 터널 보강방법

터널사진과 3차원 점군좌표의 분석과정을 통하여 절리면의 방향과 간격, 거칠기 등을 분석한 후 그 결과를 공학적 암반분류 방법인 RMR과 Q 시스템에 적용하여 록볼트의 간격과 슛크리트의 두께 등 보강등급을 결정함으로써 터널을 보강시공할 수 있었다. 터널의 보강방법을 결정하기 위한 암반공학적 정보는 시공자, 감리자 및 발주자가 시각적으로 볼 수 있는 디지털 사진과 3차원 좌표값이므로 이를 분석한 결과는 객관성이 높고 필요 시 재분석하고 재확인할 수 있도록 컴퓨터에 저장 보존할 수 있다. 이와 같이 저장된 정보는 터널완공 후 사용 중 유지관리 단계에서도 재분석하여 필요 시 대책공법을 선정하거나 유사 터널의 시공에도 활용할 수 있을 것이다. 또 디지털 사진과 수십만 개 이상의 3차원 점군좌표를 분석하여 추출한 절리면 등의 특성은 기존의 육안관찰에 의한 매핑방법으로 획득한 정보의 양보다 훨씬 풍부하여 분석결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것이다. 따라서 디지털 사진을 이용한 터널 페이스매핑은 신속하고 신뢰도가 높으므로 터널의 보강시공에 유용할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2011학년도 우석대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김기석, 최현길, 박연준, 최시영, 김중훈, 2008, 암반사면 절리구조의 기하학적 특성 분석을 위한 원격 조사기술의 적용 사례, 한국암반공학회 2008년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 267-271.
- 김중훈, 김재동, 2001, 암반 사면 영상을 이용한 절리의 방향성 해석, 한국암반공학회 2001년도 추계공동학술발표회 논문집, pp. 59-68.
- 김중훈, 김기석, 김재동, 2007, 수렵다중촬영기법에 의한 암반사면 절리구조 조사 기법 개발에 관한 연구, 한국암반공학회 2007년도 특별심포지엄 논문집, pp. 350-361.
- 김중훈, 김기석, 김재동, 이승호, 김용수, 천성열, 김동민, 2008, 차량탑재 암반비탈면 절리조사시스템 개발에 관한 연구, 한국암반공학회 2008년도 국제학술회의, pp. 239-247.
- 김치환, John Kemeny, 2008a, LIDAR와 Split-FX소프트웨어를 이용한 암반 절리면의 자동추출과 절리의 특성 분석, 터널과 지하공간, 제19권 제1호, pp. 1-10.
- 김치환, John Kemeny, 2008b, LIDAR를 이용한 대규모 암반 절리면의 거칠기 측정, 터널과 지하공간, 제19권 제1호, pp. 52-63.
- 류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 제10권, 329-343.
- 박의섭, 전대성, 정용복, 류장하, 선우춘, 최용근, 허승, 2007, 역분석공학기법을 이용한 불연속면 분석 프로그램 개발, 터널과 지하공간, 제17권 제3호, 165-174.
- 한국암반공학회, 2005, 암석의 점하중강도 표준시험법.
- 한정훈, 2007, 입체사진측량기법의 암반절리조사에 대한 적용성 연구, 터널과 지하공간, 제17권 제2호, pp. 139-151.
- Barton, 1981, Experimental studies of scales effects on the shear behaviour of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18, pp. 1-21.
- Bäcktröm, A., Feng Q. and Lanaro F., 2008, Improvement of fracture mapping efficiency by means of 3D-laser scanning. *ARMA* 08-106.
- Eos Systems Inc., 2011, Photomodeler-Scanner, <http://www.photomodeler.com>.
- Hoek E, 2011, Practical Rock Engineering, <http://www.rockscience.com>.
- Gonzalez, R. C. and P. Wintz. 1987. *Digital image processing*, 2 ed. Addison-Wesley, Boston.
- Hadji Georgiou, J., Lemy, F., Co te', P., and X. Maldague. 2003. An Evaluation of Image Analysis Algorithms for Constructing Discontinuity Trace Maps *Rock Mech. Rock Engng.*, 36(2), 163-179.
- Herda, 1999, Strike standard deviation for shallow-dipping rock fracture sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 32(4), 2451-255.
- Hsiung, S. M., Ghosh, A., Ahola, H. P., Chowdury, A. H., 1993, Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination. *J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 30(7), 825-829.
- J. R. Carr and J. B. Warriner, 1989, Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient, *Bull. Association of Engineering Geologists XXVI*(2), pp. 253-263.
- Jamie Pringle, Andy Gardiner, Robin Westerman, 2004, Virtual geological outcrops-fieldwork and analysis made less exhaustive? *Geology Today*. Vol. 20, No. 2, March-April pp. 67-72.
- John Kemeny, Randy Post, 2003, Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computers & Geoscience* 29, pp. 65-77.
- Kemeny, J., Norton, B. and K. Turner. 2006a. *Rock Slope Stability Analysis Using Ground-Based LIDAR and Digital Image Processing*, Felsbau - Rock and Soil Engineering, Nr. 3/06, 8-15.
- Kemeny, J., Turner, K. and B. Norton. 2006b. *LIDAR for Rock Mass Characterization: Hardware, Software, Accuracy and Best-Practices*, Proceedings of the Workshop on Laser and Photogrammetric Methods For Rock Mass Characterization: Exploring New Opportunities, Golden, CO.
- Kemeny, J., Donovan, J. and C. Rodriguez. 2006c. *Application of Ground-Based LIDAR for Pre-Blast Rock Mass Characterization*, Proceedings of *Fragblast 8*, the 8th International Conference on Fragmentation by Blasting, Santiago, Chile.
- Mah, J., Samson, C., McKinnon, S., and Aikman, D.,

- 2008, Triangulation-based 3D laser imaging for underground rock mass characterization: Impact of operational parameters. ARMA 08-249.
26. Matt Lato, Mark S. Diederichs, D. Jean Hutchinson, Rob Harrp, 2008, Optimization of LiDar Scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.04.007.
27. N. Barton, 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. Eng Geol 7, pp. 287-332.
28. N. Barton, S. Bandis, 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Proc. Int. Conf. Rock joints. pp. 603-610.
29. Park, E. S., Cheon, D. S., Synn, J. H., Jung, Y. B. and Choi, Y. K., 2008, Characterization of discontinuities using 3-D laser scanner. ARMA 08-187.
30. S. D. Priest, 1993, Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, London.
31. R. Tse and D. M. Cruden, 1979, Estimating joint roughness coefficients. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 16, pp. 303-307.
32. Split Engineering LLC., 2011, Split-Fx, <http://www.spliteng.com/>.



김치환

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-290-1468

E-mail: kimcheen@korea.com

현재 우석대학교 토목공학과 교수
