

SEM 영상의 자체검정에 의한 미세구조물의 3차원 표면모델 생성 3D Surface Model Generation of Micro Structure by Self Calibration of The SEM Image

이효성¹⁾, Hyo-Sung Lee · 박형동²⁾, Hyeong-Dong Park

¹⁾ 서울대학교 공학연구소 연구원, Researcher, Research Institute of Eng., Seoul Nat'l Univ.

²⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS: This study presents method for self-calibration of the SEM(Scanning Electron Microscope) stereo image using the standard microprobe with same grid pattern and using parallel and central perspective projection equation. Result showed that parallel projection method is more suitable for standard microprobe. The maximum error of 3D coordinates acquired by this method did not exceed 5 μm , and DSM(Digital Surface Model) for three dimensional measurement of the rock sample was generated by the digital photogrammetry. This result can be used for quantification of micro scale change of shape and analysis of the micro morphology of rock due to weathering.

Key words: SEM, stereo image, parallel and central perspective projection, Digital Surface Model, Digital Photogrammetry

1. 서론

주사전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope) 영상은 미생물학, 재료학, 전자학, 지질학, 범죄학 등 다양한 분야에 활용되고 있으며, 대부분의 경우 미립자의 대상시료로부터 촬영되어진 SEM의 단영상에서 시각적인 2차원 분석에 적용되어 왔다(Ghosh, 1988). 그러나 1970년대에 이르러 사진측량학적인 원리와 항공사진으로부터 지형도 제작에 사용되는 입체식 도화기에 의하여 SEM 시스템의 기하학적 요소(영상의 축척, 촬영경사각, 초점거리 등)와 입체영상으로부터 3차원 분석가능성이 제시됨에 따라 대상시료에 대한 보다 정량적인 조사가 가능하게 되었다(Oshima et al., 1970; Waldhausl, 1978).

최근에는 컴퓨터 하드웨어와 영상처리 기술 및 소프트웨어의 발달로 인하여 SEM 입체영상에서 수치 사진측량학적인 접근방법에 의하여 DSM(Digital Surface Model) 획득을 위한 연구가 수행된바 있으며(Hemmler and Albertz, 1996; Stampfl et al., 1996), 대상시료의 3차원 시각화를 위한 입체모형 제작 및 영상에서 특이점들에 대한 3차원 위치정보 획득에 관한 연구가 수행된바 있다(Minnich et al., 1999; Bethel and Bastacky, 1999; Bethel et al., 2002).

대상시료의 SEM 영상으로부터 DSM을 획득한 후, 이를 보다 실용적인 목적으로 활용하기 위하여 Stampfl 등(1996)은 SEM 입체영상으로부터 XLTT(eXpandable Light Tablet Tool) 사진측량 시스템을 이용하여 금속 절리면의 변형정도를 파악하였다. Hemmler와 Albertz(2000)는 상대적인 높낮이가 존재하는 사다리꼴 모양의 표준시료와 일정한 격자모양의 표준시료로부터 획득한 SEM 영상 각각에 대하여

중심투영방식과 평행투영방식으로 자체검정을 실시한 후, Polymer에 대한 마찰전과 마찰후의 DSM을 추출하여 침식 변화량을 제시하였다. 이상의 기존연구 결과를 토대로, SEM으로부터 획득한 미립자의 DSM은 모든 마이크로 구조물을 분석하는데 있어서 보다 정확하고 효율적인 정보를 제공할 수 있게 되었다

본 연구에서는 암석 시료표면의 SEM 영상에서 2차원의 시각적인 분석에 의존하지 않고, 보다 효과적인 표면분석을 위하여 SEM 입체영상으로부터 수치사진측량 기법을 적용하여 암석 시료표면에 대한 DSM을 추출한 후, 3차원 표면분석 가능성을 제시하고자 한다. 또한 동일한 격자모양을 가진 표준시료의 SEM 영상으로부터 중심투영과 평행투영방식으로 자체검정을 실시한 후, 이를 비교 검토하여 사용한 표준시료에서의 적합한 투영방식을 결정하고자 한다.

2. SEM영상의 자체검정과 3차원 위치결정

2.1 SEM 영상의 자체검정

SEM으로부터 취득된 영상은 여러 가지 왜곡을 포함하고 있으며, 이로 인하여 3차원 위치결정과정에서 심각한 영향을 미칠 수 있다. 왜곡의 종류로는 축척 및 경사왜곡, 방사방향과 나선모양의 왜곡, 접선방향왜곡 등이 있으며, 일반적으로 왜곡의 영향이 큰 축척과 경사왜곡, 방사 및 나선왜곡을 주로 보정한다 (Ghosh and Nagaraja, 1976; Maune, 1976; Hemmleb and Albertz, 2000).

또한 이러한 영상의 왜곡을 규명하기 위해선 표준시료(standard microprobe)로부터 3차원 위치와 이에 대응하는 영상좌표를 미리 측정된 자료(기준점)들을 이용하여 자체검정을 실시하여야만 한다. 표준시료를 이용한 자체검정방법으로는 중심투영조건(식 1)과 평행투영조건(식 2)을 적용할 수 있다(Fig. 1). 식(1)은 중심투영조건에서 공선조건식을 달리 표현한 직접선형변환(DLT; Direct Linear Transformation)이며(Slama et al., 1980), 식(2)는 평행투영조건식을 나타낸 것이다(Ghosh, 1988).

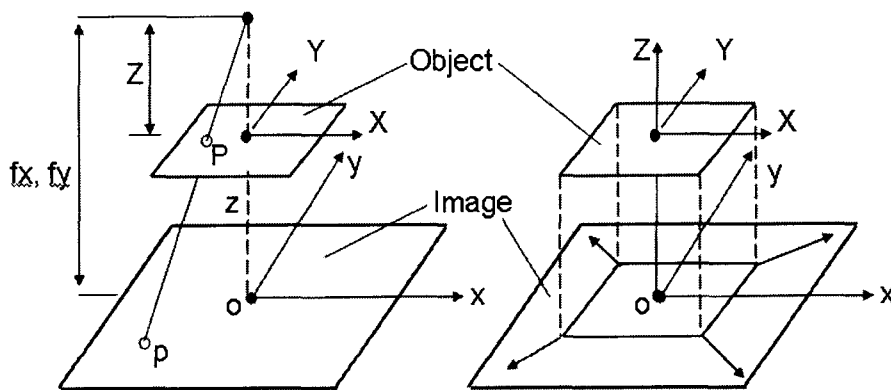


Fig. 1. Perspective and parallel projection(Ghosh, 1988).

$$\begin{aligned}
 x + \Delta x &= \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\
 y + \Delta y &= \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, x, y, X, Y, Z 는 영상좌표와 3차원 위치, $L_1 \dots L_{11}$ 는 DLT 계수이며, $\Delta x, \Delta y$ 는 영상좌표 왜곡량이다.

$$\begin{aligned} x + \Delta x &= M_x [m_1 X + m_2 Y + m_3 Z] \\ y + \Delta y &= M_y [m_4 X + m_5 Y + m_6 Z] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $m_1 \dots m_6$ 은 평행투영식의 계수이며, M_x, M_y 는 방향별 축척을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= D_1 x^3 + D_2 xy^2 + S_1(x^2 y + y^3) \\ \Delta y &= D_3 y^3 + D_4 x^2 y + S_2(x^3 + xy^2) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, D_1, D_2, D_3, D_4 는 방사왜곡 보정계수, S_1, S_2 는 나선왜곡 보정계수이다.

중심투영조건으로 DLT계수와 영상왜곡 보정계수를 한꺼번에 결정하기 위해선 먼저 식(1)을 관측방정식 형태로 정리한 후(식 4), 이를 테일러 시리즈에 의한 선형화 방법과 최소제곱법(식 5)에 의한 반복계산으로 해를 구할 수 있다(Slama et al., 1980).

$$V_x = -\frac{X}{A} L_1 - \frac{Y}{A} L_2 - \frac{Z}{A} L_3 - \frac{1}{A} L_4 + \frac{xX}{A} L_9 + \frac{xY}{A} L_{10} + \frac{xZ}{A} L_{11} + \frac{x}{A} + \Delta x = 0 \quad (4)$$

$$V_y = -\frac{X}{A} L_5 - \frac{Y}{A} L_6 - \frac{Z}{A} L_7 - \frac{1}{A} L_8 + \frac{yX}{A} L_9 + \frac{yY}{A} L_{10} + \frac{yZ}{A} L_{11} + \frac{y}{A} + \Delta y = 0$$

$$\Delta = (B^t \cdot W \cdot B)^{-1} (B^t \cdot W \cdot F) \quad (5)$$

평행투영조건으로는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 기준점들을 이용하여 기하학적 교차조건(Intersection geometry)으로 영상의 경사각과 축척을 최소제곱법으로 결정할 수 있으며 (식 6), 방사왜곡과 나선왜곡 보정계수는 식(2)로부터 최소제곱법을 적용하여 구할 수 있다. 그러나 DLT 또는 평행투영식의 계수와 왜곡 보정계수 사이에 높은 상관성이 존재할 가능성이 크기 때문에 이로 인하여 정확한 결과값을 구하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 상관성을 피하고 신뢰성 있는 해를 구하기 위하여 투영식의 계수와 왜곡 보정계수를 분리하여 계산하는 방법을 사용하였다.

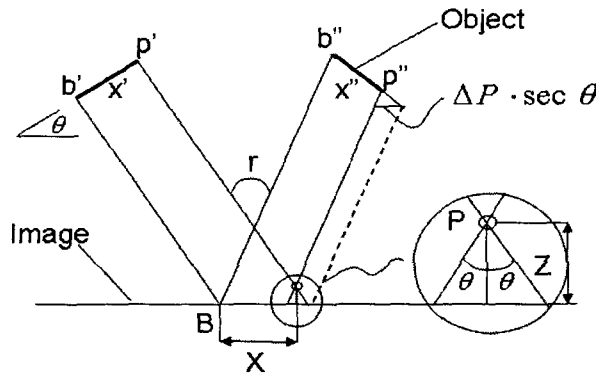


Fig. 2. Intersection geometry(Ghosh, 1988).

$$Z = (x' - x'') / (2 \cdot \sin \theta \cdot M_x)$$

$$X = (x' \cdot \sec \theta - Z \cdot \tan \theta) / M_x \quad (6)$$

$$Y = y' / M_y = y'' / M_y$$

2.2 3차원 위치 결정

일반적으로 사진측량의 경우, 대상영역의 입체영상에 대한 3차원 위치는 기준자료로부터 기준점에 대한 3차원 위치정보를 취득하고, 그 기준점들을 이용하여 카메라 센서에 대한 물리적인 요소(또는 외부 표정요소)의 결정에 의하여 획득되어진다.

SEM 영상에서는 기준점에 대한 3차원 위치정보를 획득할 수 없을 뿐만 아니라 사진측량과 같이 센서의 이동에 의한 입체촬영이 불가능하다. SEM 영상으로부터 대상시료 표면 내의 임의의 점에 대한 3차원 위치를 획득하기 위해선 SEM 시스템의 좌, 우 방향에 대하여 대상시료를 동일한 경사와 축적으로 촬영한 후, 임의의 점들에 대한 동일한 영상좌표를 획득하고, 이를 이용하여 평행투영조건의 기하학적 교차조건(식 6)을 적용하면 된다(Ghosh, 1988). 이 경우, 표준시료로부터 자체검정에 의한 축척과 경사각 보정계수만 적용 가능하다.

따라서 표준시료로부터 투영 방정식에 의해 결정된 방사 및 나선왜곡 보정계수를 고려하여 대상시료의 3차원 위치를 획득하기 위해선 기하학적 교차조건으로부터 획득한 임의의 점의 3차원 위치를 기준점으로 활용하고, 이로부터 투영 방정식 계수를 추출한 후, 대상시료 입체영상의 동일지점에 대한 영상좌표와 왜곡 보정계수를 고려하여 최소제곱법을 적용하면 된다.

3. 적용실험

본 연구에 사용된 SEM 시스템의 모델명은 Phillips XL-20이며, 영상의 해상력은 최대 3.5 nm 이다. SEM 시스템에서 영상의 축척, WD(Working Distance), spot size, 가속전압, 밝기 값 조정 등과 같은 전반적인 작업은 컴퓨터에 의해 제어되며, 촬영지점 선택, 대상시료의 이동 및 회전은 SEM의 기계적인 작동에 의해 이루어진다. Fig. 3은 SEM 시스템과 이를 이용한 작업모습을 나타낸 것이다.

SEM 영상의 자체검정을 위한 표준시료는 서울대학교 전기공학부 마이크로머신 연구소에서 정밀 제작한 정사각형의 도금마스크 레이아웃을 사용하였다. 정사각형 내에서 X, Y 방향의 크기는 각각 100 μ m, 높이는 5 μ m로 모두 동일한 크기와 높이로 제작되었으며, 격자간 간격도 동일한 거리로 제작되었다. 해상력 0.01 μ m의 VF-7510 레이저 프로파일러로 측정된 표준시료의 정밀도는 X, Y, Z 방향에 대하여 약 1 μ m이다(Fig. 4).

Fig. 4는 SEM으로 취득한 표준시료의 좌·우측 원 영상에서 절취한 입체영상을 나타낸 것이다. 촬영 당시의 축척은 39배이며, 좌·우측 동일 경사($\pm 6^\circ$)로 촬영하였다. 또한 앞에서 언급한 이론을 바탕으로 영상 왜곡보정을 위한 기준점의 3차원 위치정보는 표준시료에 대한 사양을 참조하였으며, 영상좌표는 ERDAS IMAGINE 소프트웨어(ver. 8.4)를 사용하여 화소이하의 단위로 측정하였다. 평행투영식에 의한 왜곡보정을 위하여 좌·우영상 각각에 대하여 격자의 모서리 바깥쪽 지점인 36점(높이: 0 μ m)을 기준점으로 선정하였으며, DLT에 의한 왜곡보정을 위하여 앞에서 선정한 36점 외에 모서리 안쪽 지점의 36점(높이: 5 μ m)을 추가하여 모두 72점을 기준점으로 선정하였다(Fig. 5)

암석 시료에 대한 DSM 결정을 위하여 화강암의 시편을 약 1×1cm로 절취한 후, 표준시료와 동일한 조건으로 촬영하였다(Fig. 6). 한편, SEM 영상은 전자빔에 의하여 대상시료의 표면에서 방출되는 전자를 검출하기 때문에 일반적인 표면은 선명한 영상을 취득하기 힘들다. 따라서 촬영 전에 미리 표면에 백금코팅을 실시하였다. 대상시료의 DSM 획득을 위한 전반적인 작업수행과정은 Fig. 7과 같다.

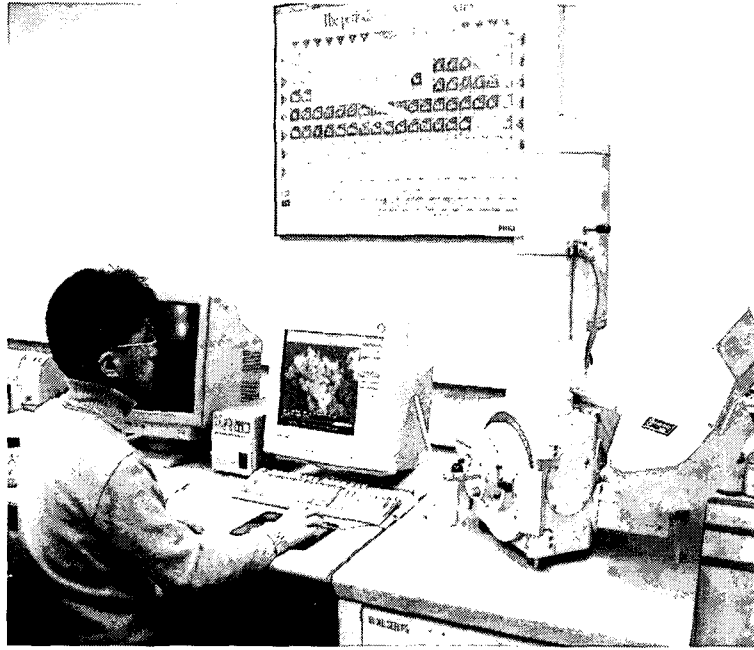


Fig. 3. SEM system for acquisition of microprobe image data.

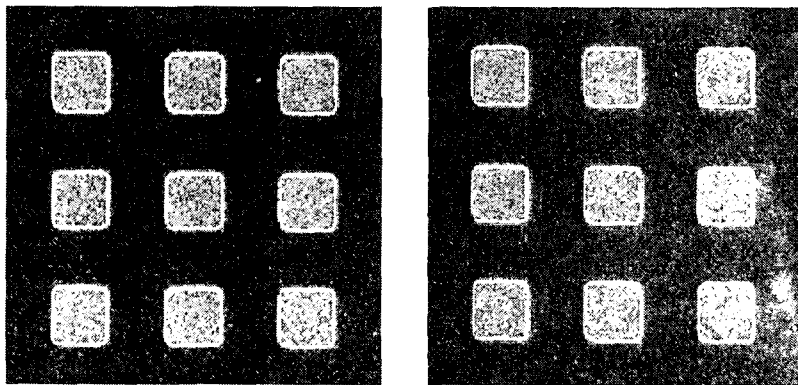


Fig. 4. Stereo image of the standard microprobe acquired from SEM system
(Scale: 1:39, Tilt angle: Left image -6° , Right image $+6^\circ$)

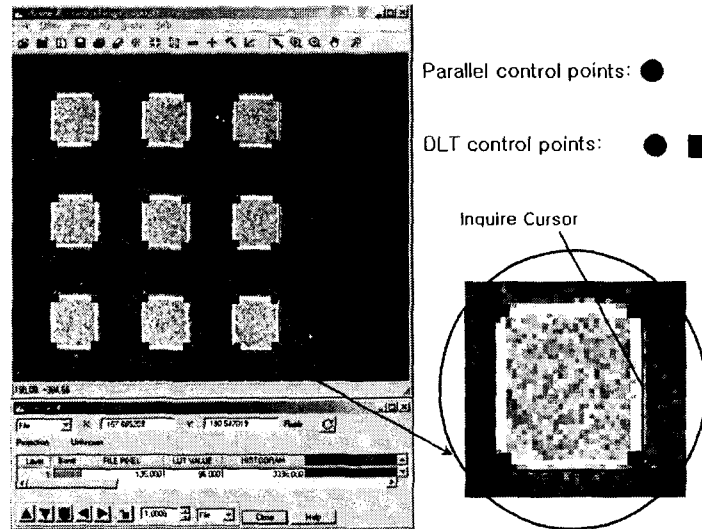


Fig. 5. Control points for self-calibration using the parallel projection and DLT equation.

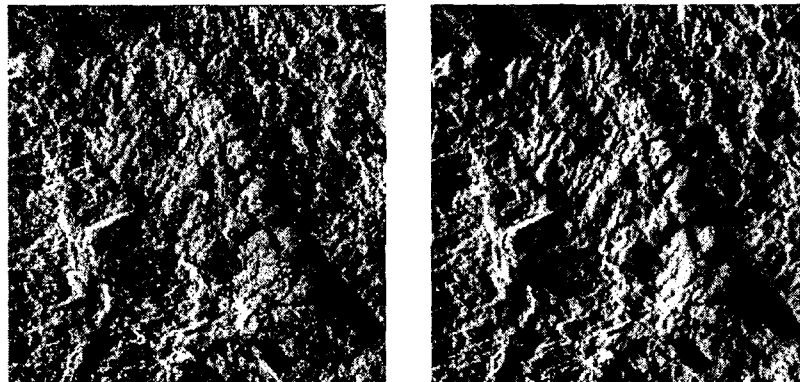


Fig. 6. Stereo image of the rock sample acquired from SEM system.
(Scale: 1:39, Tilt angle: Left image -6° , Right image $+6^\circ$)

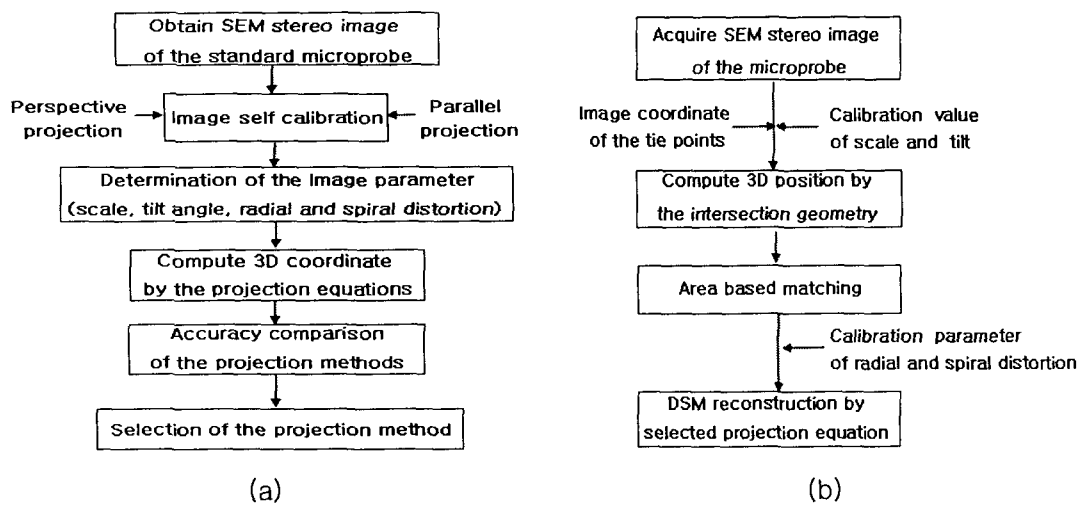


Fig. 7. Flow chart of the self-calibration using the standard microprobe(a) and the DSM reconstruction(b).

4. 비교 및 평가

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 표준시료의 입체영상을 이용하여 평행투영과 DLT 방정식의 계수 및 영상왜곡 보정계수를 결정하였으며(Table 1), 이를 이용하여 기준점에 대한 3차원 위치결정 정확도를 비교하였다(Table 2). Table 1에서 보는바와 같이 평행투영방정식의 경우, 축척과 경사왜곡에 의한 영향이 가장 컸으며, 특히 X축에 의한 왜곡이 심하게 나타났다. 물론 경사에 의하여 X방향의 축척왜곡이 더 크다고 인식할 수 있으나 본 연구에서 별도로 경사 없이 촬영한 결과, X방향에 대한 축척왜곡이 Y축에 비해 심하게 발생하였다. 이는 SEM에서 영상의 축척을 Y축 기준으로 축척을 결정하기 때문인 것으로 보여지며, 경사각에 있어서는 SEM 자체에 표시된 눈금을 사용자가 시각적으로 판단하여 조정하기 때문에 이 과정에서 발생한 측정오차로 판단된다. 방사왜곡과 나선왜곡계수의 경우, 축척과 경사왜곡에 비해 상대적으로 미소한 오차량을 보였으며, 두 방법 모두 다른 센서와 마찬가지로 방사왜곡이 조금 더 크게 발생하였다.

Table 2에서 평행투영법에 의한 3차원 위치결정 정확도는 영상 한 화소의 실제크기가 약 3.3 μm (한 화소의 사진상 크기: 130 μm , 축척: 1:39)인 것을 감안한다면 비교적 정확한 결과 값을 얻을 수 있었다. 이는 투영계수, 영상왜곡계수 및 축척과 경사각을 각각 분리하여 계산함으로써 계수간의 상관성을 소거하였기 때문인 것으로 판단된다. 반면, DLT 방식에 있어서는 평면위치 오차에 비해 높이오차가 심하게 발생하였다. 여기서, DLT는 기준점 배치상태에 매우 민감하며, 기준점에 대한 높이 값의 분포도 골고루 분포되어 있어야만 대상영역의 표면특성을 잘 반영할 수 있다(Slama et al, 1980). Fig. 4에서 보는 바와 같이 사용된 표준시료는 모든 격자의 높이가 동일할 뿐만 아니라 모서리가 완만하게 되어 있음으로 추가적으로 선정한 기준점을 정확하게 측정하지 못한다에 따른 오차로 판단된다.

Table 1. Distortion parameters determined from projection methods

Cases Parameter		Parallel		DLT	
		Left image	Right image	Left image	Right image
Tilt angle		7° 12' 00"	7° 11' 24"	-	-
Scale	X	35.17	35.49	-	-
	Y	40.11	40.11	-	-
Radial distortions	D1	-5.97e-009	-5.12e-008	1.47e-008	-3.03e-008
	D2	3.60e-008	3.25e-008	-7.73e-008	2.08e-007
	D3	-2.60e-008	-2.47e-007	-2.81e-007	-4.50e-007
	D4	-2.99e-008	6.82e-008	5.97e-008	9.45e-008
spiral distortions	S1	3.03e-008	-9.58e-009	1.11e-008	-2.37e-008
	S2	5.72e-009	4.38e-009	-1.24e-008	1.49e-009

Table 2. 3D positional errors of control points generated from DLT and Parallel projection equation (unit; μm)

Coordinates Error Cases	X		Y		Z	
	RMSE	Max.	RMSE	Max.	RMSE	Max.
DLT (72 points)	2.44	5.55	3.03	7.01	42.88	80.43
Parallel (36 points)	1.93	3.45	2.14	3.80	0.15	0.33

따라서 본 연구에서는 평행투영방식에 의한 자체검정 방법을 선택하였으며, 앞에서 추출한 왜곡계수를 표준시료에 적용한 후, 평행투영방식으로 DSM을 작성하였다. 암석시료에 대해서도 동일한 방법과 조건으로 DSM을 작성하였다. Fig. 8과 9는 표준시료와 암석시료에 대하여 10 μm 간격으로 작성한 DSM을 나타낸 것이다.

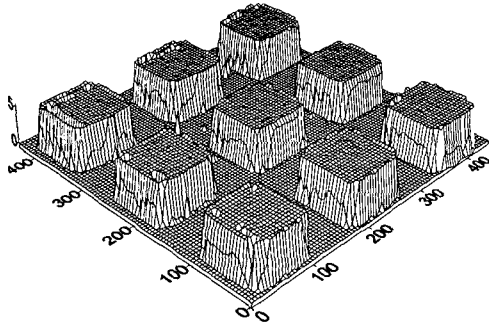


Fig. 8. DSM of the standard microprobe.

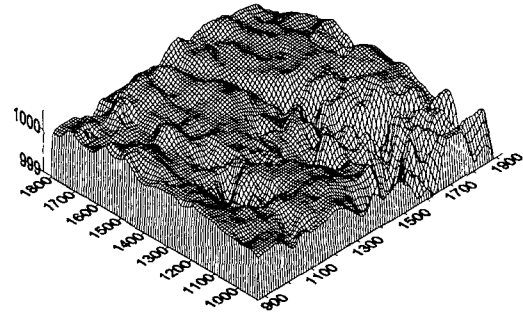


Fig. 9. DSM of the rock sample.

표준시료의 경우, 격자 테두리(Edge)영역에서만 자동매칭 결과가 양호하였으며, 그외 지역(상대적으로 낮은 지역과 격자 안쪽 영역)에서는 두 영상간의 밝기 값 차이가 거의 없는 것으로 인해 대부분 불량매칭이 발생하였다. 따라서 Fig. 8은 재구성 과정에서 격자 테두리 영역에 대해서만 3차원 위치를 추출한 후, DSM으로 작성한 것이다. 자체검정에 의해 작성된 DSM은 거의 원래 표준시료에 가까운 형상임을 확인할 수 있다. 암석시료의 경우에는 절리 안쪽의 폐색영역으로 인해 이 부분에 대한 3차원 위치 추출 오차가 크게 발생하였지만 전반적으로 시료표면의 특성을 잘 반영한 것으로 판단되어지며, 이로부터 암석 시료의 형상특징에 대한 정량적인 분석 가능성을 제시할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 암석시료의 SEM 입체영상으로부터 3차원 분석 가능성을 제시하고자 표준시료를 이용하여 중심투영방식과 평행투영방식으로 SEM 영상의 왜곡에 대한 자체검정을 실시하였다. 그 결과, 동일한 높이와 격자간격으로 이루어진 표준시료의 경우에는 평행투영조건에 의한 자체검정방법이 중심투영조건에 비해 정확도가 높았으며, 평행투영조건에서 축척에 의한 영상왜곡이 가장 크게 나타났다. 또한 이 방법으로 3차원 위치를 최대오차 5 μm 이내의 정확도로 추출할 수 있었다.

표준시료 및 암석시료에 대한 DSM 추출과정에 있어서 불량매칭 지점에서선 정확한 위치를 계산할 수 없었지만 전반적으로 대상시료에 대한 표면의 형상과 특성을 잘 반영한 것으로 판단되어지며, 이를 이용하여 암석 시료의 형상특징에 대한 정량적인 분석 가능성을 제시할 수 있었다. 이러한 분석을 통하여 각기 다른 광물로 구성된 암종별 샘플로부터 침식 또는 풍화에 의한 암종별 변화량 차이에 대한 조사가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

Bethel, E.W. and Bastacky, S.J., 1999, "Measurement of Perceived Objects," *Proc. of the IEEE Vis99*, San Francisco, CA., Oct.

Bethel, W. and Bastacky, S.J. and Schwartz, K.S., 2002, "Interactive Stereo Electron Microscopy Enhanced with Virtual Reality," <http://www-vis.lbl.gov/Publications/2002/LBNL-48336-StereoEM.pdf>, Accessed 2002 Feb. 12.

Ghosh, S.K., 1988, *Analytical Photogrammetry*, 2nd Ed., USA Press, New York, USA, pp.

236-251.

Ghosh, S.K. and Nagaraja H., 1976, "Scanning Electron Micrography and Photogrammetry," *J. of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 5, pp. 649-657.

Hemmler, M. and Albertz, J., 1996, "Digital Microphotogrammetry with the Scanning Electron Microscope," *Proc. of the International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Commission V, Vol. XXXI, Part B5, pp. 225-230.

Hemmler, M. and Albertz, J., 2000, "Microtopography -The Photogrammetric Determination of Friction Surfaces," *Proc. of the International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Working Group V/1, Vol. XXXIII, Amsterdam.

Maune, D.F., 1976. "Photogrammetric Self-Calibration of Scanning Electron Microscopes," *J. of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 9, pp. 1161-1172.

Minnich, B., Leeb, H., Bernroder, E.W.N. and Lametschwandtner, A., 1999, "Three-Dimensional Morphometry in Scanning Electron Microscopy: a technique for accurate dimensional and angular measurements of microstructures using stereopaired digitized images and digital image analysis," *J. of Microscopy*, Vol. 195, pp. 23-33.

Oshima, T., Kimoto, S. and Sukanuma, T., 1970, "Stereomicrography with a Scanning Electron Microscope," *J. of Photogrammetric Engineering*, Vol. 36, No. 8, pp. 874-879.

Slama, C.C., Theurer, C. and Henriksen, S.W., 1980, *Manual of Photogrammetry*, 4th Ed., USA Press, Virginia, USA, pp. 801-803.

Stampfl, J., Scherer, S., Gruber, M. and Kolednik, O., 1996, "Reconstruction of Surface Topographies by Scanning Electron Microscopy for Application in Fracture Research," *J. of Applied Physics A Materials Science & Processing*, Vol. 63, pp. 341-346.

Waldhausl, P., 1978, "An Approximate Solution for the Restitution of Stereo Electron Micrographs," *J. of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 8, pp. 1005-1009.