

Close-Range Photogrammetry에 의한 절대변형해석 시스템의 개발 Development of Absolute Deformation Analysis System by Close-Range Photogrammetry

배연성¹⁾

Bae, Yeon Sung

Abstract

The calibration of lens to be used and the planning of photographing planning layout is very important to achieve the requested accuracy in the precision measurement by close-range photogrammetry. Establishment of absolute coordinate system is regarded as another important factor for the purpose of measuring absolute deformation of photogrammetric object. In this study, the following tasks were performed : (1) calibration of super-wide-angle lens of focal length 21mm for close-range photographing used by 35mm metric camera, (2) development of the measuring system for monitoring of absolute deformation through periodic observation of small area, and, (3) application of this system to monitor the absolute deformation of surface of underwater structure in fixed cycle and to present the efficiency of the system.

Keywords : Wide angle lens, 35mm camera, Close-range photogrammetry, Absolute deformation analysis

요 지

근점사진측량에 의한 정밀측정에서는 사용하는 렌즈의 검정, 요구정확도에 따른 촬영계획이 매우 중요하다. 또한 사진측량에 의한 대상물의 절대변위·변형측량을 위해서는 절대좌표계의 설정이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 35mm 측정용 카메라를 이용한 초근점 촬영을 위해 초점거리 21mm의 초광각 렌즈에 대한 렌즈 검정을 실시하였으며, 소규모 영역에 대한 주기적 관측을 통해 절대변화량을 모니터링 할 수 있는 측정시스템을 개발하고, 이 시스템을 일정한 주기로 수중구조물의 표면에 대한 절대변화량 모니터링에 적용함으로써 개발한 시스템의 효율성을 제시하였다.

핵심용어 : 광각렌즈, 35mm 카메라, 근점사진측량, 절대변형해석

1. 서 론

정밀측정 분야에서 지상사진측량은 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 35mm카메라는 소규모 영역에 대한 정밀측정에 매우 효율적이다. 근점사진측량에 의한 정밀측정은 사용하는 렌즈의 검정 및 정오차 보정요소의 도출, 요구정확도에 따른 촬영계획 등이 매우 중요하다(Brown, 1971; Abdel-Aziz Y.I., 1974; C. S. Fraser, 1987). 또한 사진측량에 의한 대상물의 절대변위·변형측량을 위해서는 절대좌표계의 설정이 매우 중요하다.

본 연구는 호주의 University of Tasmania에서 수행한

연구이다. 태즈메니아 주는 남한 면적의 약 70% 크기의 섬으로 대부분의 전력을 수력발전에 의존하고 있으며, 주 내에는 현재 27개의 발전소가 운영 중에 있다. 댐은 대부분 콘크리트 아치 형식을 채택하고 있으며, 낙차가 큰 자연지형을 갖는 곳에 발전소를 설치하고 댐으로부터 발전소까지 관수로나 개수로를 이용하여 물을 이동시키고 있다. 관수로는 직경이 1.2m부터 9.1m에 이르며, 길이는 49m에서 8.93km에 이르기까지 다양하고 총 연장길이는 약 105km에 이른다. 대부분의 관수로는 steel로 제작되어 있으나 일부는 콘크리트 또는 목재로도 만들어져 있다. 개수로의 총 연장길이는 약 114km로 대부분이 특별한 표면처

1) 정회원 · 충청대학 건설교통과 교수(E-mail:baeys@ok.ac.kr)

리가 되어있지 않으며 극히 일부지역에만 콘크리트로 특별 표면처리가 되어있다. 이러한 수로의 표면에는 다양한 종류의 이끼류가 서식하고 있으며, 이들로 인해 수두의 손실과 함께 수로의 내구성에도 좋지 않은 영향이 있는 것으로 조사되어 있다(Brett, 1980). 따라서 이들을 제거하기 위해 연 2회 정도의 청소작업을 실시하나 여러 가지 측면에서 그 효율성이 떨어져 개선이 요구되어져 왔다. 따라서 근본적으로 이러한 수중구조물의 표면에 이끼류의 서식을 막아주고 친환경적이며 경제성도 우월한 최적의 표면처리재료를 도출하기 위해 수자원, 기계 및 전기공학, 환경공학, 미생물학, 정밀측정학등의 분야에서 공동으로 연구를 추진하였다. 1차년도에는 개수로의 표면처리에 대하여 그 재료를 알칼리과 비알칼리 혼화제의 콘크리트와 에폭시와 비 에폭시로 표면을 각각 다르게 화학 처리한 일정 크기의 8개 steel plate를 제작하여 개수로의 수중에 설치하고 주기적으로 plate의 표면에 서식하는 생물들의 성장특성 및 표면의 변화특성 등을 조사하고자 하였다. 이 조사에서 일정 주기로 steel plate 표면의 절대변화를 모니터링하기 위해서 소규모 영역에 대한 정밀측정분야에 그 효율성이 입증된 근접사진측량기법을 도입, 적용하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 steel plate 표면에 대한 3차원 해석은 절대변화량으로 정밀측정하여야 함에 따라 주기적 관측을 통해 절대변위·변형 해석에 필요한 절대좌표계 확보방안을 설계, 확립하여 절대변형량을 효율적으로 도출하고 이를 모니터링 함으로서 그 활용성을 검토하고자 하였다. 또한 초근접 촬영으로 요구정확도를 향상시키기 위해 초광각 렌즈를 장착한 35mm 측정용 카메라를 활용하고자 하였으며 초광각 렌즈에 대한 렌즈

왜곡을 보정하여 정확도를 향상하고자 하였다.

2. 촬영시스템 설계

2.1 초광각 렌즈의 왜곡보정계수

렌즈를 통해 사진에 나타난 상과 대상물과의 투영관계로부터 대상물의 공간적 좌표를 결정하는 사진측량기법에서는 렌즈왜곡이 상의 위치를 변화시키므로 이에 대한 보정은 사진측량의 정확도 향상에 매우 중요하다. 특히 왜곡이 큰 35mm 카메라에 사용하는 비측정용 렌즈의 경우 방사방향 및 접선방향의 렌즈왜곡 보정계수 도출은 근접사진측량을 이용한 정밀측정분야에서는 중요한 의미를 지닌다(Karras, 1998 ; Osborn, 1995).

본 연구에서는 측정용 카메라로서 35mm Leica R5 Elcovision을 사용하였다. 렌즈는 초점거리 21mm의 LEITZ WETZLAR Super Angulon-R 4/21을 사용하였다. 사용한 렌즈의 왜곡보정계수 도출을 위해 1inch 간격의 정교한 선을 필름 면에 새겨 총 100점의 교차점을 갖는 격자판을 제작하였다. 이 격자판의 교차점 좌표는 1급 해석도화기를 이용하여 좌표를 취득하였다. 이 격자판에 대한 촬영거리는 220mm로 그림 1과 같이 격자판 위의 네 모서리와 중앙부 및 상·하·좌·우등 총 9군데에서 수렴촬영을 하였다. 촬영 시 f-stop은 22, 셔터속도는 $1/8$, 그리고 필름은 Kodak Elite Chrome ASA 200을 사용하였다. 그림 3과 그림 4는 각각 촬영위치 ②와 중앙의 ⑤에서 촬영한 필름이다. 각 위치에서의 촬영 시 피사계 심도를 고려하여 촬영하였다.

렌즈왜곡보정계수 도출을 위해서는 실험적 방법인 평면

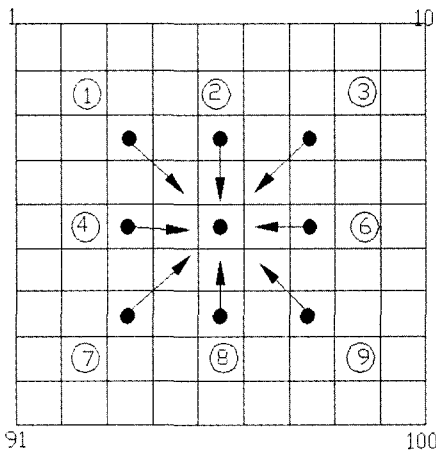


그림 1. 촬영위치와 방향

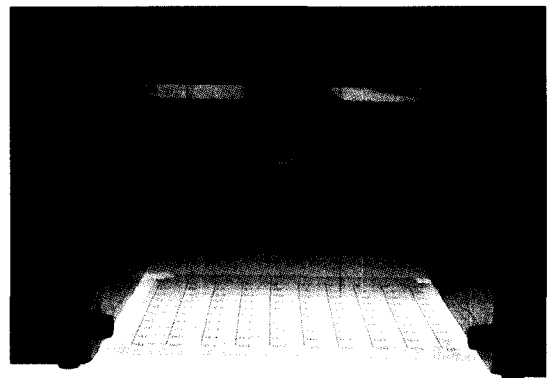


그림 2. 사진촬영

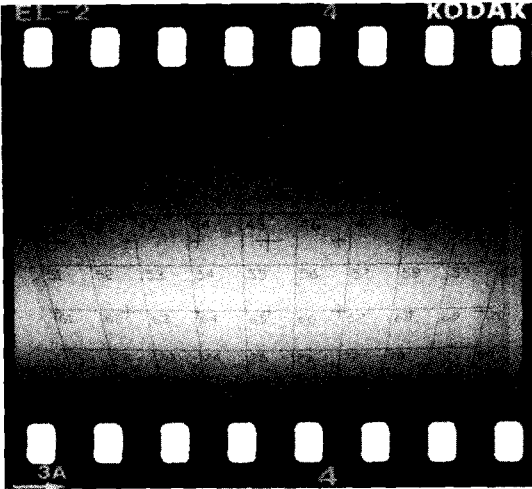


그림 3. 촬영사진(위치②)

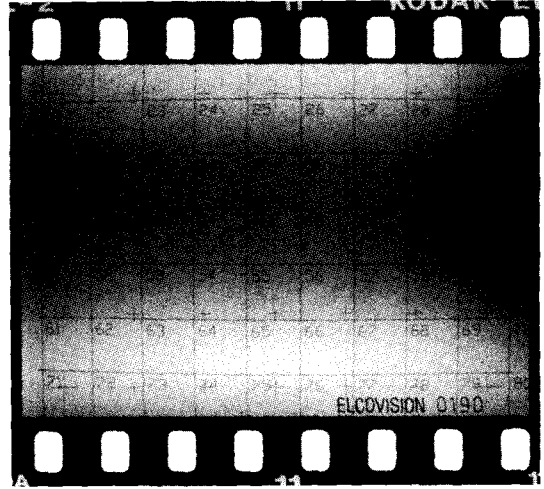


그림 4. 촬영사진(위치⑤)

표 1. 렌즈왜곡계수 산출 결과

사용된 사진번호	focal length(mm)	K_1	K_2	P_1	P_2
①③④⑥⑦⑨	23.3535	-1.612973e-004	1.593499e-007	-7.547898e-006	-4.174331e-005
①②③⑦⑧⑨	23.2876	-1.619733e-004	1.643198e-007	-1.028288e-005	-4.237755e-005
①③⑤⑦⑨	23.3673	-1.656559e-004	1.732559e-007	-4.588328e-006	-4.650937e-005
②④⑤⑥⑧	23.2570	-1.667819e-004	1.848960e-007	-1.090974e-005	-4.352960e-005

투영변환식을 이용한 방법으로 해석하였다. 해석 모델은 Matlab으로 프로그램화 하였으며, 서로 다른 위치에서 촬영한 9장의 필름에 촬영된 교차점들의 상 좌표와 해석도화기로 얻은 교차점 좌표를 이용하여 왜곡보정계수를 도출할 수 있도록 하였다(Roger, 1987; Heikkila, 1996). 본 연구에서 촬영한 필름은 총 9장으로 그 중 5~6매로 해석한 결과가 표 1과 같다. 각각의 해석결과 방사방향 왜곡계수 K_1 , K_2 및 접선방향 왜곡계수 P_1 , P_2 가 미세한 차이를 보였다.

2.2 절대위치 측정시스템

각 steel plate의 표면에 대한 주기적인 절대변화량을 측정하기 위해 그림 5와 같이 8개의 steel plate에는 정삼각형의 위치로 세 개의 일자형 볼트를 plate에 완전히 고정하였으며, 각 볼트의 일자 홈 방향은 삼각형의 중심을 향하도록 하였다. 또한 삼각형의 중심에는 지름 약 2mm, 높이 약 5mm 크기의 원통형 볼트를 고정하여 절대변화량 관측의 신뢰성을 점검할 수 있도록 하였다.

각 steel plate의 세 개의 볼트머리에 고정적으로 한 위치로만 카메라 고정장치를 장착하기 위해서 카메라 고정장치

의 바닥에는 볼트머리의 홈에 적당하도록 세 개의 발을 장착하였다. 지름은 약 3mm, 길이는 3~5mm 크기의 원뿔 형태로 제작하였고, 카메라 고정장치의 바닥에 완전히 고정하였다. 그림 6은 steel plate위에 카메라 고정장치를 올려놓은 상태로 각각의 plate에 같은 방법으로 측정시스템을 위치시킨다. 이 시스템에서 좌·우 사진의 중복도는 자유롭게 조절이 가능하도록 카메라 고정장치 부분은 이동성으로 설계하였으며, 촬영거리도 약 200mm 전·후에서는 자유롭게 조절이 가능하도록 카메라 고정틀의 지지대를 설계하였다. 이 시스템의 입체촬영 영역 가장자리에는 동일평면상에 8점의 기준점을 정교하게 새겨 넣었다. 이 기준점 면은 피사계심도를 고려하여 최대한으로 steel plate의 표면에 밀착되도록 촬영틀 바닥 면으로부터 약 8mm 깊이의 홈을 만든 후 기준점을 새겨 넣었다. 이 기준점의 좌표는 촬영틀을 완전히 조립하기 전 1급 해석도화기에 장착하여 평면좌표를 획득하였다. 촬영틀의 각 부위를 완전히 조립한 후 촬영시스템의 초기값 산출과 아울러 측정값의 타당성을 검토하기 위해 두께 10mm의 평면유리 위에 격자판을 붙여 입체촬영한 후 해석도화기를 이용하여 초기 평면성을 검토하였

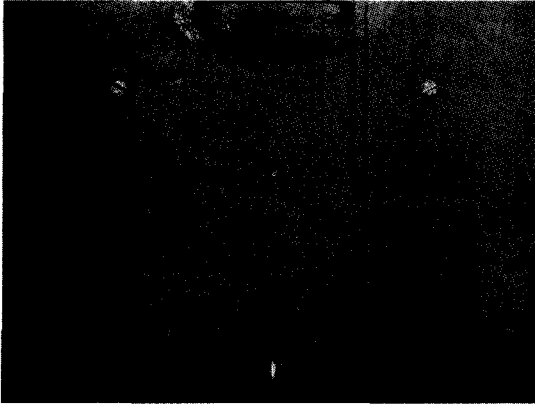


그림 5. Steel Plate

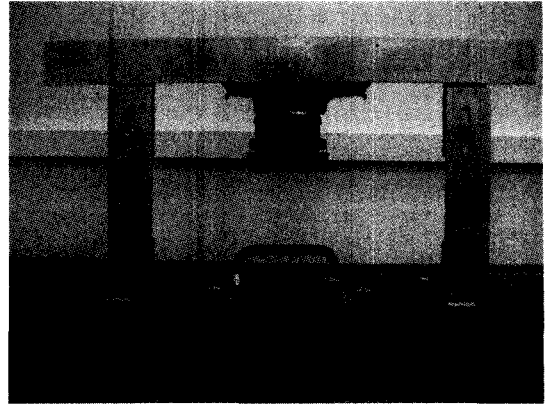


그림 6. 카메라 고정장치와 측정시스템

다. 그 결과 일정한 양으로 표면의 기울기가 발생함을 알 수 있었다. 이와 같이 설계, 제작한 촬영시스템은 8개의 steel plate 각각에 항상 같은 위치에 위치함으로써 각 plate 의 표면에 대한 절대좌표계가 매우 용이하게 설정될 수 있도록 하였다.

3. Steel plate 촬영

정밀 사진측정을 위해서는 우선 요구되는 정확도에 따라 촬영계획이 수립되어야 한다. 촬영계획에는 정확도와 매우 밀접한 관계가 있는 사진축척과 중복도, 수렴각, 상좌표에서 얻을 수 있는 추정 표준편차 등을 정하여 표준오차를 산출하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 한 쌍의 입체 사진으로 3차원 좌표를 산출할 때 기대할 수 있는 표준오차를 다음 식에 의해 산출 하였다(Abdel-Aziz, 1974).

$$m_x = \frac{D}{C} \frac{(1 + \tan \alpha \tan \phi)}{(1 - \tan(\alpha - \phi) \tan \phi)} m \quad (1)$$

$$m_y = \frac{D}{C} \frac{\sec \phi}{(1 - \tan(\alpha - \phi) \tan \phi)} m \quad (2)$$

$$m_z = \frac{D/C}{B/D} \sqrt{2} \frac{(1 + \tan \alpha \tan \phi)}{(1 - \tan(\alpha - \phi) \tan \phi)} m = \frac{\sqrt{2}}{B} D \cdot m_x \quad (3)$$

여기서, m_x, m_y, m_z 은 X, Y, Z좌표의 표준오차, m 은 상좌표의 추정 표준편차, C 는 렌즈의 초점거리, D 는 촬영거리, B 는 기선거리, ϕ 는 수렴각의 1/2을 각각 의미한다.

35mm 카메라에서 초점거리 21mm의 초광각 렌즈를 이용하여 직각수평촬영으로 3차원 해석을 한다고 할 때 식 (1), (2), (3)의 정확도 예측모델로 3차원 좌표에 대한 표준오차를 산출한 결과 Z축 좌표에 대한 평균 표준오차를 100 μ m 정도로 얻기 위해서는 상좌표에서 얻을 수 있는 추정 표준편차를 10 μ m라 가정할 때 중복도는 50%, 이 때의 기선



그림 7. 개수로에 설치된 plate

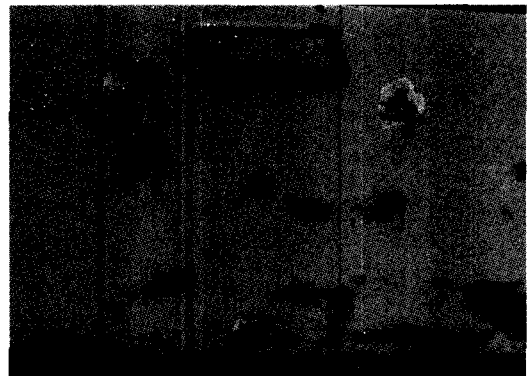


그림 8. plate C

길이는 110mm, 사진축척을 1:6으로 직각수평 촬영한다면 가능할 수 있다. 사용한 필름은 Kodak Elite Chrome ASA 400 슬라이드 필름이다. 제작한 steel plate는 그림 7과 같이 댐과 발전소를 연결하는 개수로 측면의 수중에 장착시킨 후 약 1~2개월의 주기로 꺼내어 촬영하였다. 제작한 steel plate는 수로의 상류지역과 하류지역에 시기를 조금씩 달리하여 설치, 관측하였다. 그림 8은 steel plate표면에 발생한 이끼류의 상태를 보여주는 것으로 이와 같이 각 단계에서 steel plate에 대해 촬영한 필름은 MPS-2 해석도화기를 이용하여 plate표면에 대해 3차원 해석을 하였다. 이때 사진 좌·우의 내부표정에 대한 표준편차는 각각 10 μ m 이내였으며, steel plate의 표면 중 해석 영역은 약 100×130mm이었으며, 실제 분석하고자 하는 영역은 이보다 작

은 80×110mm의 영역으로 각 plate에서 약 1500~2500점에 대한 좌표를 취득하였다.

MPS-2에서는 수동으로 측정점들의 위치를 정하였으며, 경사변환점을 제외하고 가능한 한 등 간격으로 배치하고자 하였다. 모델 영역에 대한 상호표정 및 절대표정 결과도 매우 양호하여 전체 영역에서 매우 안정된 좌표측정이 가능하였다.

그림 9~그림 18은 각 단계에서 촬영한 각각의 plate에 대한 좌우 측정사진이다. 모든 촬영이 야외에서 이루어 졌으므로 각각의 노출상태가 다르게 나타났다. 또한 촬영을 위해 수중에서 plate를 꺼냈을 때 표면에 서식하는 이끼류가 건조되기 전에 다시 수중에 장착하도록 요구되어 촬영은 매우 신속하게 이루어 져야 했다. 각 plate는 A, B, C,

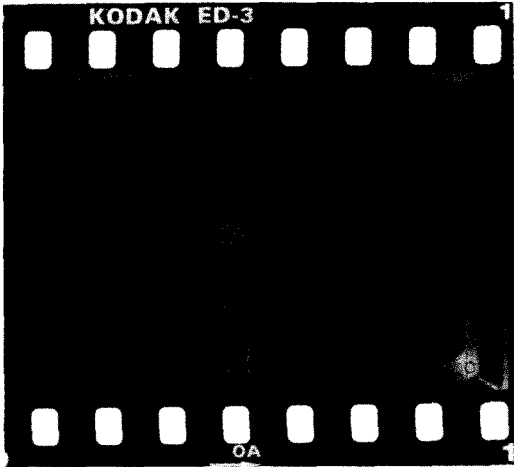


그림 9. plate A1(left)

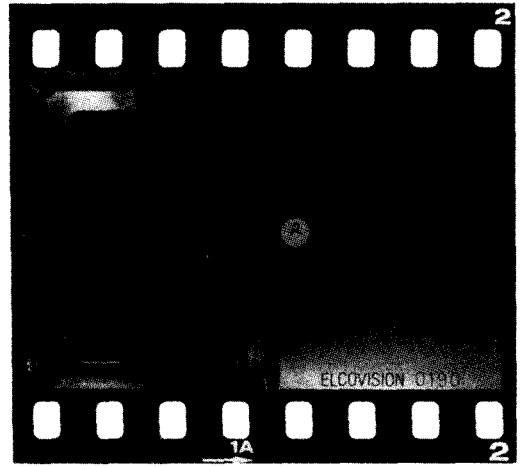


그림 10. plate A1(right)

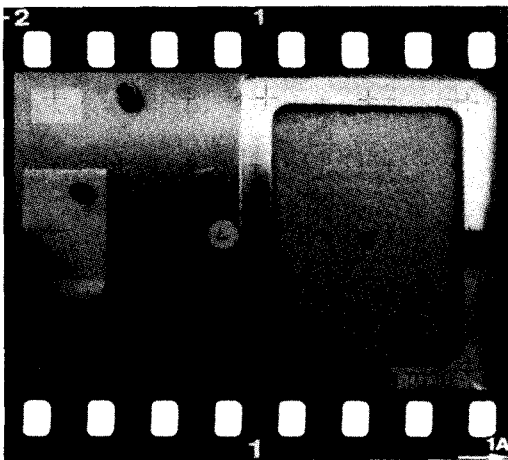


그림 11. plate C2(left)

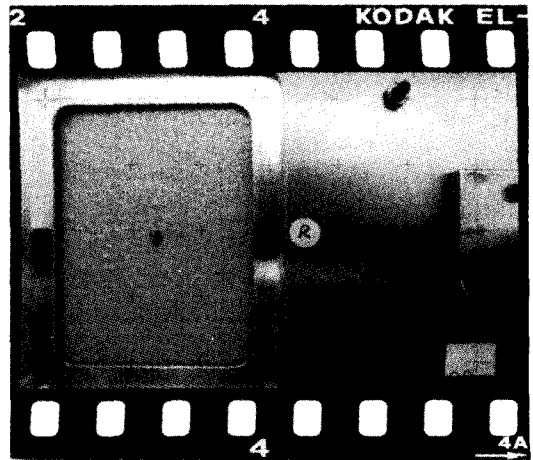


그림 12. plate C2(right)

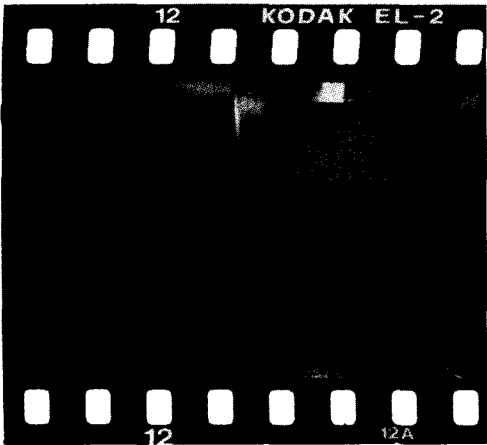


그림 13. plate C4(left)

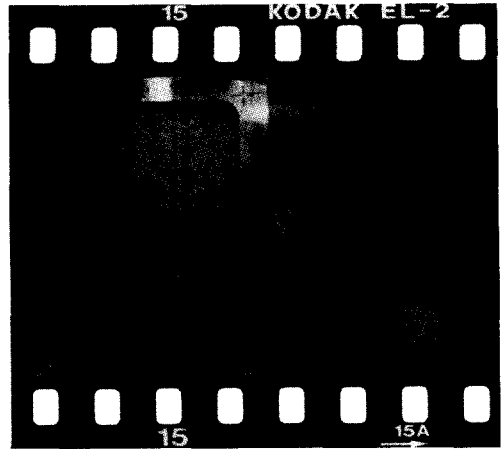


그림 14. plate C4(right)

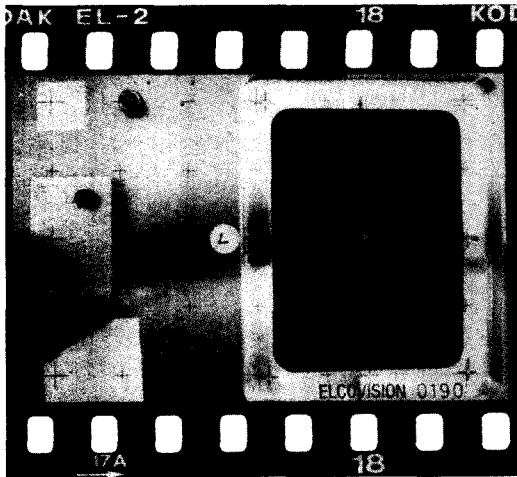


그림 15. plate D2(left)

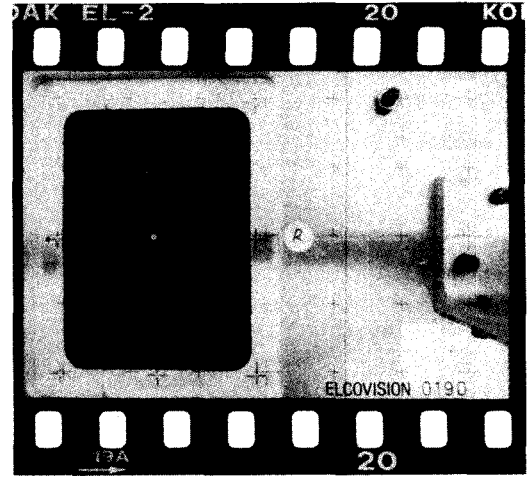


그림 16. plate D2(right)

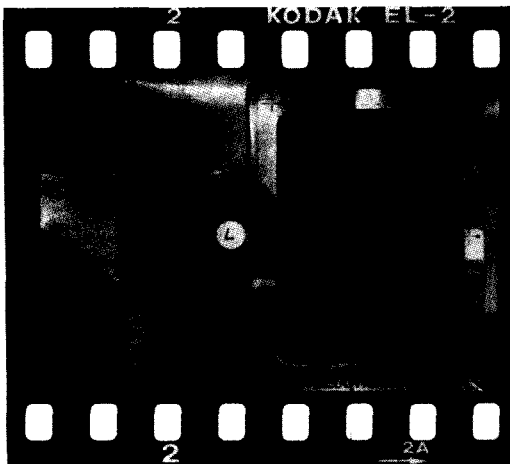


그림 17. plate D3(left)

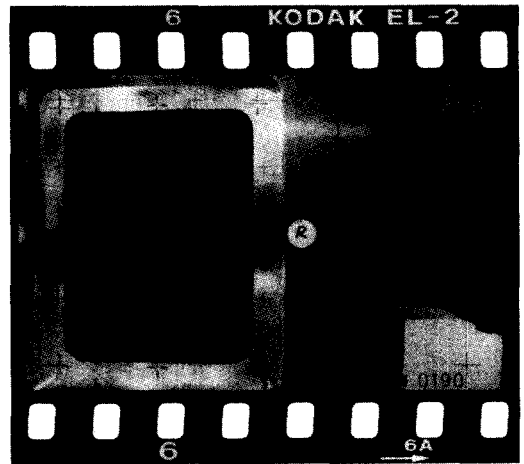


그림 18. plate D3(right)

D, E, F, G, H로 구분하였으며, 1~2개월마다 측정된 각 plate의 측정 순서를 번호로 구분하였다. 8개의 plate중 plate A는 초기측정 A1과 두 번째 측정된 A2 이후에 표면 처리부분이 박피되어 더 이상의 관측이 곤란하였다. plate B의 경우는 B2, B3 측정까지 표면 변화가 전혀 없었으며 B4에서 약간의 변화가 있는 등 각 plate의 변화상태가 서로 달라 본 연구에서는 그 중 변화가 있는 plate만을 선정하여 해석하고자 하였다. 표면 변화가 육안으로 확인된 plate는 A2, B4, C2, C4, D2, D3, E5, F4등 이었다.

4. 결과분석

촬영한 입체사진으로부터 steel plate표면의 입체촬영 영역에 대한 3차원 측정에는 해석도화기인 MPS-2를 이용하였다. 해석영역의 크기는 steel plate 중심부에 약 80×110mm이었으며, 평균 2000점의 3차원 좌표를 획득하였다. 그림 19~그림 24는 각 plate의 표면 변화량을 0.1~0.2mm의 등고선으로 표현한 결과이다. 그림 19는 plate A의 경우로 두 번째 측정된 표면 값 A2와 초기표면 값 A1의 차이를 등고선으로 표현한 결과이다. 등고선 간격

은 0.2mm로 최대 1mm 높이까지 표현되는 등 상당히 많은 표면 변화가 있었다. 이러한 표면의 변화는 모두 이끼류의 성장에 기인한 것으로 이끼 서식이 매우 용이한 표면 재료임을 알 수 있다. 이 영역에서 총 이끼의 부피는 6,031mm³로 이끼류의 평균 두께가 약 0.685mm에 해당한다. 그림 20은 plate B의 경우로 두 번째와 세 번째 단계에서는 표면의 변화가 없었으나 네 번째에서 부분적으로 이끼류의 서식이 발견되었다. 그러나 plate A에 서식하는 이끼류와는 종류가 다른 것으로 성장 및 서식 특성도 달리 나타났다. 이끼류의 양은 27mm³이었다.

그림 21은 steel plate C의 네 번째 표면과 초기 표면과의 변화량으로 두 번째 측정부터 부분적으로 이끼류가 발생하였다. 중앙부의 절대변화량 점검을 위해 설치한 볼트 주변과 표면에 돌출부위가 있는 곳의 주변에 특히 이끼류가 많이 서식하고 있다. 네 번째 측정에서 얻은 이끼의 양은 252mm³이었다. 그림 22는 steel plate D의 경우로 매 측정마다 plate의 표면 변화가 가장 심하게 발생했다. 두 번째 측정에서는 상당히 많은 양의 이끼류가 측정 대상 영역의 80%에서 발생했으며, 나머지 20%의 영역에서는 표면의 침식이 발생했다. 측정된 이끼의 부피는 1,493mm³로 발

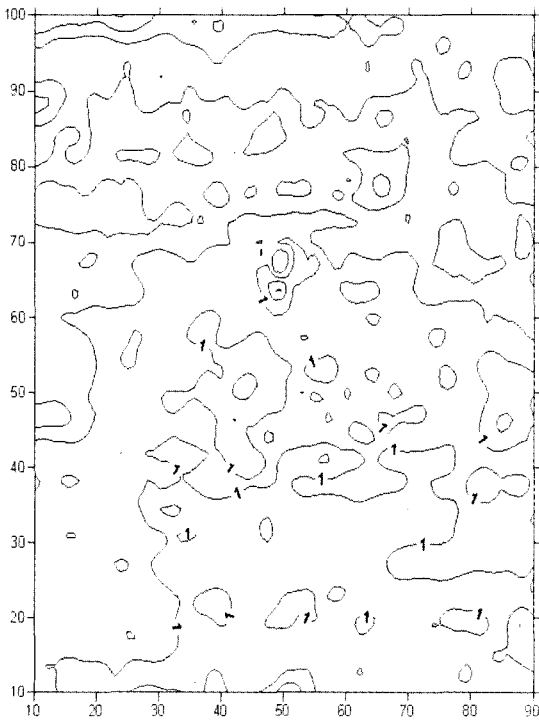


그림 19. A2-A1

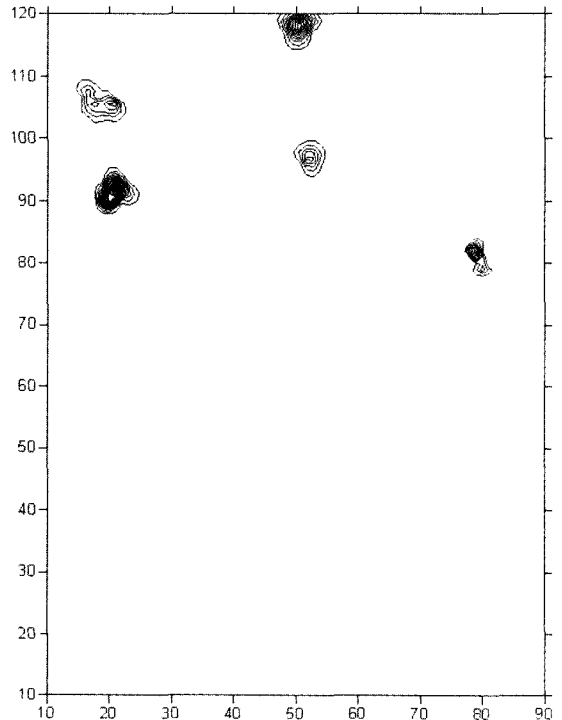


그림 20. B4-B1

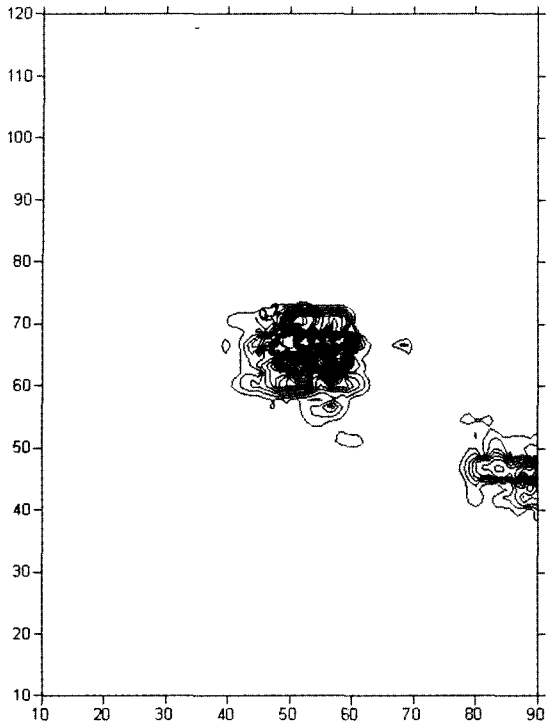


그림 21. C4-C1

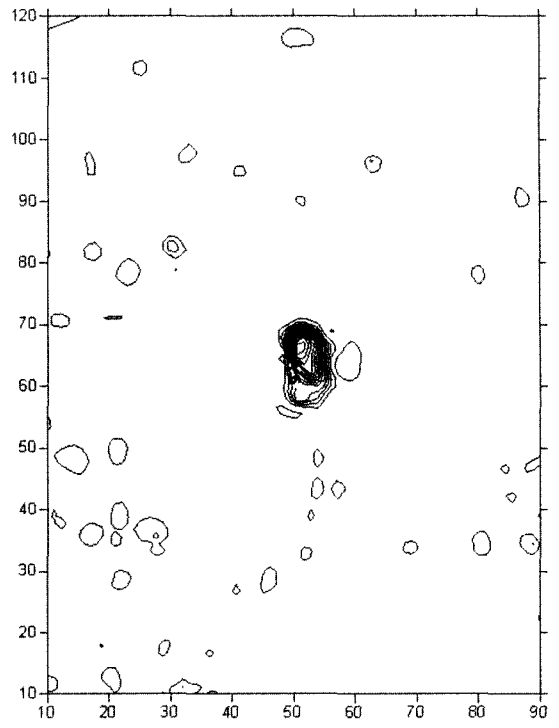


그림 22. D3-D1

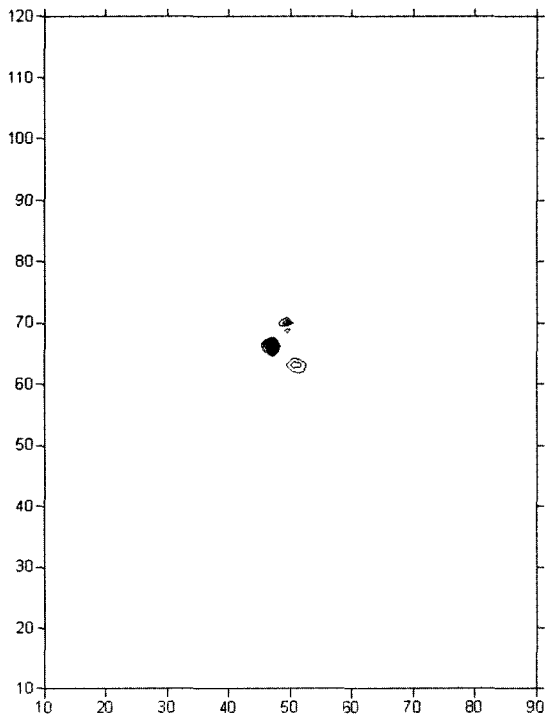


그림 23. E5-E1

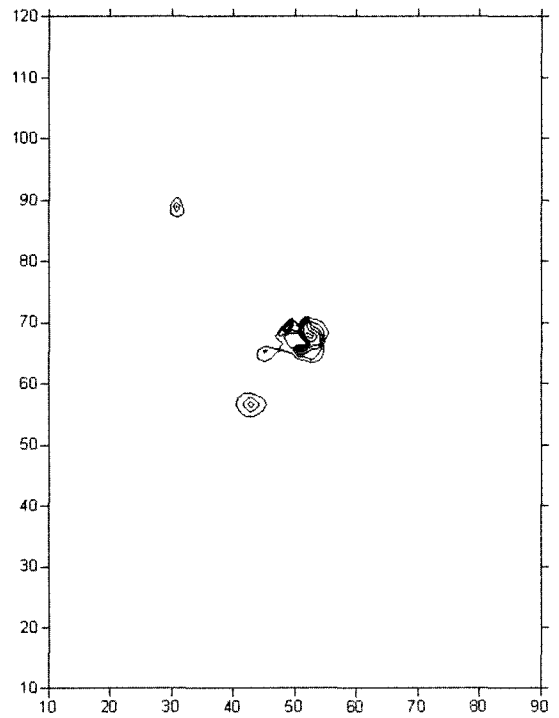


그림 24. F4-F1

표 2. Steel Plate 표면의 체적 변화량

Difference		a2-a1	b4-b1	c4-c1	d2-d1	d3-d1	e5-e1	f4-f1
Volume (mm ³)	Positive	6031	27	252	1493	267	6	20
	Negative	0	0	0	130	1840	0	0
	Net	6031	27	252	1362	-1573	6	20

생영역 평균 0.21mm의 두께였다. 또한 표면의 침식량은 130mm³로 발생영역 평균 0.077mm 깊이로 침식되었다. 그러나 세 번째 측정에서는 그 양상이 다르게 나타났다. 우선, 이끼류의 서식 분포가 현격히 줄었으며, 상대적으로 plate의 표면 침식 영역은 상당히 증가하였다. 이끼류의 서식 분포는 측정영역의 약 4%에서만 서식하는 것으로 측정되었으며, 나머지 96%의 영역에서는 모두 침식이 발생한 것으로 나타났다. 측정된 이끼의 부피는 267mm³로 발생영역 평균 0.78mm의 두께로 발생 면적은 줄었지만 이끼가 서식한 영역에서는 두께는 증가하였다. 표면의 침식량은 1,840mm³로 발생영역 평균 0.218mm 깊이로 침식되어 침식 영역뿐만 아니라 깊이도 매우 크게 증가하였다.

그림 23과 그림 24는 각각 steel plate E와 F의 표면 변화량을 나타낸 것으로 부분적으로 매우 적은 양의 이끼가 발생했다. 이 결과는 표 2와 같다. 표에서 positive는 발생한 이끼류의 부피, negative는 표면의 침식량으로 각각 판단된다.

5. 결 론

소규모 영역에 대한 정밀 3차원 측정에 초점거리 21mm의 초광각 렌즈를 장착한 측정용 카메라인 Leica R5 Elcovision에 부착하여 렌즈의 정오차 보정계수를 도출하고, 절대변형측정이 요구되는 8개의 steel plate의 표면에 대해 촬영거리 약 220mm의 근접사진측정에 적용한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

소규모 영역에 대한 정밀측정에서 35mm 카메라와 정확한 렌즈 왜곡계수를 도출한 비측정용의 초광각 렌즈를 이용한다면 3차원 정밀측정을 요하는 대상에 충분히 활용할 수 있음을 입증할 수 있었다. 또한 본 연구에서 설계한 촬영시스템은 요구정확도에 따라 촬영거리, 중복도 등이 편리하게 조정이 가능할 뿐만 아니라 촬영이 신속하게 이루어져야하는 대상에 대해서도 매우 편리하였다. 이 시스템은 각각의 plate에 대한 절대변위측정에서 요구되는 절대좌표계의 설정에 매우 편리함에 따라 다양하고 많은 대상물에 대한 절대변위측정이 요구될 때 특히 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서 설계한 촬영시스템은 주기적 관측으로부터 절대변위 측정이 요구되는 다양한 분야에서 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원비에 의하여 연구되었으며, 연수과정에서 많은 도움을 주신 University of Tasmania의 Jon Osborn 교수와 Jane Sargison 박사께 감사드립니다.

참고문헌

- 배연성, 오원진, 한승희 (2003), 근접사진측량에 의한 3차원 변형 해석, 한국측량학회 추계학술발표회논문집, pp. 135-140.
- Brown, D.C. (1971), Close-Range Camera Calibration, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8 pp. 855-866.
- Abdel-Aziz Y.I. (1974), Expected Accuracy of Convergent Photos, *Photogrammetric Engineering*, pp. 1341-1346.
- C. S. Fraser (1987), Multiple Exposures in Non-Metric Cameras Application, PE & RS, Vol. 42, pp. 62-72.
- Brett, T. M. (1980), Head-Loss Measurements on Hydroelectric Conduits, Proceedings of American Society of Civil Engineers, *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 106, No. HY1, January, pp. 173-190.
- Karras G. E., Mountrakis G., P. Patias, E. Petsa (1998), Modeling Distortion of Super-Wide-Angle Lenses for Architectural and Archaeological Application, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 5, pp. 570-573.
- Osborn J. E. (1995), Design and Calibration of Close-Range Stereo Photogrammetric Systems in Biology and Biomedicine, Univ. of Tasmania, PhD thesis, pp. 107-112.
- Tsai R. Y. (1987), A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Camera and Lenses., *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, August, pp. 323-343.
- J. Heikkila and Silven O. (1996), Accurate 3-D Measurement Using a Single Video Camera, *Int. Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence.*, Vol. 10, No. 2.

(접수일 2004. 5. 16, 심사일 2004. 5. 20, 심사완료일 2004. 5. 31)