

디지털 영상을 이용한 수중구조물 측량 Submerged Structure Surveying using Digital Image

박경식¹⁾ · 정성혁²⁾ · 안정욱³⁾ · 이재기⁴⁾

Park, Kyeong Sik · Jung, Sung Heuk · An, Jeong Ook · Lee, Jae Kee

Abstract

Presently many constructions establish in underwater, but approaching to underwater constructions are difficult, for comparing with ground, underwater environment is different in media. Usually measurement methods for underwater constructions are using tapes, using depth gauges, using acoustic positioning systems. But, tapes are hard to measure the correct distance, for applying a right tension is not easy in underwater. Depth gauges have a weakness in settling, for it takes long time to do it. Acoustic positioning systems don't work well in confined spaces and cost a lot. Hence, the purpose of this study is, at first, to understand rays path in multimedia like water, glass and air. The second thing is to perform a camera calibration at the field to compare with the interior orientation parameter. And the third thing is to find out whether photogrammetry is applied for underwater object in using cube for accuracy examination. The last thing is to perform underwater photogrammetry about underwater object, which is pier model and riverbed. We came to the conclusion through this experiment that the applying underwater photogrammetry for underwater constructions and underwater ground is possible.

Keywords : Underwater Construction, Digital Image, Underwater Photogrammetry

요 지

현재 많은 구조물들이 수중에 건설되고 있으나, 수중환경은 지상과 비교하여 다른 매질로 이루어져 있기 때문에 수중구조물의 측정이 어려운 실정이다. 일반적으로 수중 구조물의 측정 방법은 줄자나, 깊이 게이지, 음향 위치 시스템 등을 사용한다. 그러나, 줄자는 수중에서 정확한 장력을 가하기가 어렵기 때문에 정확한 거리를 측정하기 어렵고, 깊이 게이지는 설치에 장시간이 걸리는 단점이 있으며, 음향위치시스템은 제한된 공간에서 밖에 작업을 할 수 없고, 가격이 고가이다. 따라서, 본 연구에서는 첫째, 물-유리-공기와 같은 다중매질에서 광선의 경로를 이해하며 둘째, 현장에서 카메라 검정을 실시하여 내부표정요소를 비교하였다. 셋째, 큐브를 이용한 정확도 실험을 통해 사진측량을 수중대상물에 적용할 수 있는지의 여부를 알아보고, 마지막으로 교각모형과 하상의 수중 대상물에 대해 수중사진측량을 수행하였다. 실험결과 수중 구조물과 수중지형에 수중사진측량을 적용하는 것이 가능하다는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 수중 구조물, 디지털 영상, 수중사진측량

1. 서 론

기술이 발달함에 따라 인간의 활동범위는 지상에서 하천, 해양 및 호수와 같은 다양한 범위로 확대되어가고 있

으며, 생활에 필요한 여러 가지 구조물, 즉, 가스전, 유전 및 망간단괴와 같은 해양 자원 채굴을 위한 해저구조물이나, 하천, 호수에 설치되는 교량, 댐 등이 있다(Barry F. Kavanagh, 1992). 그러나, 이러한 구조물들은 수중에 있

1) 정회원 · 인하공업전문대학 항공지형정보시스템과 조교수(E-mail:pks@inhac.ac.kr)
2) 연결저자 · 정회원 · 충북대학교 토목공학과 공학박사(E-mail:idealharry@gmail.com)
3) 정회원 · 충북대학교 토목공학과 석사과정(E-mail:junguk78@naver.com)
4) 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail:leejk@chungbuk.ac.kr)

기 때문에 유지관리를 위해 쉽게 접근하여 측정하기 어려운 실정으로 그에 따라 교각 세굴이나 해저구조물의 손상으로 인한 대형사고 발생의 위험을 내재하고 있다.

현재까지의 유지관리를 위한 측량방법은 줄자, 깊이 게이지, 음향위치시스템을 사용하여 측정하는 방법이 대부분이었다(Peter Holt, 2003). 그러나, 줄자는 수중에서 정확한 장력을 가하기가 어렵고 깊이 게이지는 수중에 설치된 구조물의 형상을 측정할 수 없으며, 음향위치시스템은 제한된 공간에서만 작업해야 하고, 정성적인 관측이 어려운 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 접근하기 어려운 대상물의 측정이 가능하며, 균일한 정확도를 가지고, 비접촉 측정 및 정성적인 측정이 가능한 사진측량기법의 가능성 여부를 확인 할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 공기, 물과 같은 매질이 서로 다른 공간상에서의 빛의 굴절에 대한 물리적 성질을 고려해 카메라 내부표적요소들의 특성을 파악하여 수중촬영 한 디지털 영상을 비교 분석함으로써 수중 구조물의 유지관리를 위한 또 하나의 기법을 제시하고 사진측량 기법의 활용 가능성을 확장하는데 목적이 있다.

2. 수중사진측량

수중은 지상 환경과는 다른 광학적 특성을 가진 매질로 구성되어 있다. 지상환경에 대한 수중환경의 주요한 차이점은 수중에서는 빛의 전달이 약하고, 영상의 명암과 해상도가 떨어지며, 수중카메라에서의 빛은 물-유리-공기의 매질을 통과하며 굴절된다는 것이다. 또한, 수중 환경은 물의 수심이나 시간에 따라 특성이 다르다. 온도, 밀도 및 염도의 변화와 침전물이 이동하는 것과 같은 모든 요소는 빛의 전달과 굴절지수에 영향을 줄 수 있다.

2.1 수중사진의 광학적 특징

수중에서의 빛의 전달은 흡수와 산란에 의해 급격히 감소된다(H. M. Karara, 1989). 광선이 광학적 특성이 서로 다른 두 개의 매체 간 경계를 통과하면 굴절되며, 굴절량은 각 매체의 굴절지수에 의해 결정된다(Edward M. Mikhail, 2001).

물질의 굴절지수는 매체 속에서의 빛의 속도에 대한 진공 속에서의 빛의 속도($2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$)의 비율이다. 표준온도 및 기압에서 황색광의 공기에 대한 굴절지수는 약 1.00029이며, 황색광의 각 매질에 대한 굴절지수는 표

표 1. Index of refraction by yellow ray

Media	Index of Refraction
Air	1.0002926
CO ₂	1.00045
Polystyrene	1.59
Glass	1.5~1.7
Water	1.33

1과 같다(서울대학교 광학연구회, 1997).

2.2 수중렌즈의 기하광학

공기중에서 대칭인 두꺼운 렌즈의 초점거리(f)는 주요점(cardinal point)의 위치에 의해 결정되며, 절점(nodal point)과 주점(principal point)은 일치하고, 무한대로부터의 근축광선(paraxial ray)은 주점으로부터 f 의 거리에서 광축(optical axis) 위에 위치하는 초점(focal point)에 수렴한다(조재홍 등, 2002).

그러나, 수중 렌즈의 기하광학에 있어 대상물 공간의 물과 영상공간의 공기가 함께 있는 경우에는 주요점의 위치는 변한다. 주점과 초점의 위치는 그림 1과 그림 2에서 보여지는바와 같이 광선을 추적함으로써 얻을 수 있다.

무한대의 대상물로부터, 광축에 작은 각도로 입사하는 근축광선은 제2초점 F_2 에 수렴하는 반면에, 제1초점 F_1 은 무한대에서 영상이 맺히는 것과 같이 광축 위에 위치한다. 광선의 추적으로부터 주면(principal plane)은 입사(incident)광선과 출사(emergent)광선의 교차점을 통과하는 것으로 정의된다. 그것들의 교차점은 광축과 함께 렌즈의 주점 P_1 과 P_2 를 규정한다. 초점거리는 식 (1)과 같고,

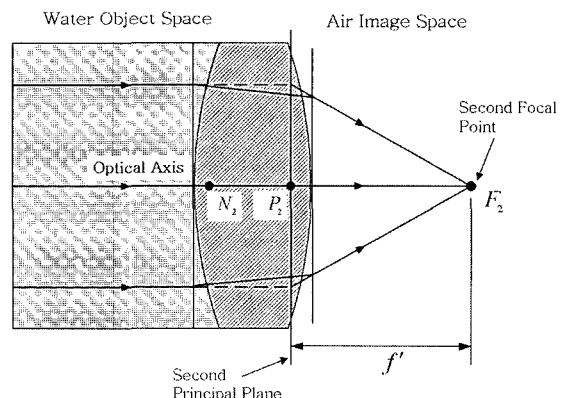


그림 1. Second principal plane

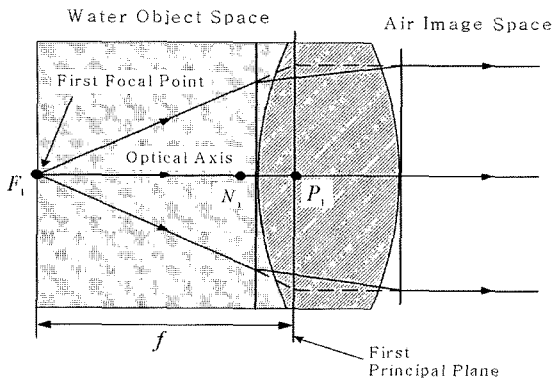


그림 2. First principal plane



그림 3. Olympus 3040Z

값은 두꺼운 렌즈 공식에 의해 주어진다(H. M. Karara, 1989).

$$f = P_1 F_1 \quad f' = P_2 F_2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{n}{f} - \frac{(n'-n)}{r_1} - \frac{(n'-1)}{r_2} + \frac{d(n'-n)(n'-1)}{n' r_1 r_2} \quad (2)$$

여기서, n 은 물의 굴절지수, n' 은 렌즈의 굴절지수 이고, r_1 과 r_2 는 렌즈의 첫 번째 면과 두 번째 면의 반경이며, d 는 렌즈의 두께이다.

절점(N_1, N_2)은 더 이상 주점으로 고려되지 않으며, 굴절률이 높은 물의 매질 쪽으로 옮겨지게 된다. 주점과 절점 사이의 거리는 식 (3)과 같다.

$$N_1 P_1 = \frac{f'(n-1)}{n} \quad N_2 P_2 = f(n-1) \quad (3)$$

3. 수중카메라 검정

3.1 수중촬영 장비

본 실험에서는 330만 화소의 디지털 카메라인 그림 3의 Olympus3040Z를 사용하였고, 수중하우징은 평면 형태의 포트를 가진 그림 4와 같은 PT-005를 사용하였다.

3.2 카메라 검정

비측량용 디지털 카메라를 측량에 이용하기 위해서는 카메라의 초점거리, CCD포맷의 크기 주점의 위치, 렌즈의 왜곡 요소등과 같은 카메라 내부표정 요소를 산출하여 사진측량에 반영시켜야 한다.

검정은 표 2와 같이 Olympus3040Z 카메라로 대기중에

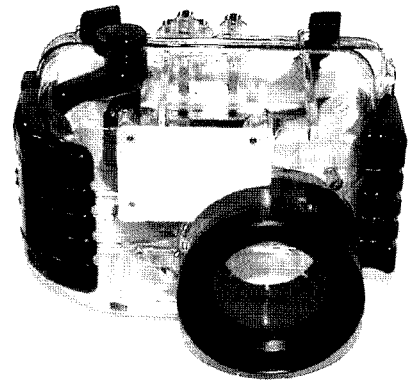


그림 4. Water housing for Olympus3040Z

표 2. Test case

Case	Equipment	Media
Case1	Olympus3040Z	Air
Case2	Olympus 3040Z Water Housing	Air
Case3	Olympus3040Z Water Housing	Water

서 직접 촬영한 경우(Case1)와 3040Z 카메라를 수중 하우징에 넣어 대기중에서 촬영한 경우(Case2)와 3040Z 카메라를 수중 하우징에 넣어 수중에서 촬영한 경우(Case3)로 나누어 실시하였다. 특히, Case3의 경우에는 수중에서의 정확한 초점거리를 얻기 위해 지상에서 얻은 format size를 이용하여 수중에서 자체검정을 실시하여 카메라

내부표정요소를 획득하였다.

Case1, Case2, Case3에서의 초점 거리는 표 3과 같이 각각 7.6224mm와 7.6496mm과 10.2247mm였다. 수중사진에서의 대상물의 축척이 그림 5와 같이 물의 굴절에 의해 1.33배 증가하므로, f_{water} 는 $1.33f_{air}$ 로 되어야 한다. 즉, 수중에서의 초점거리는 그림 5와 같이 대기중과 비교해서 물의 굴절률에 의해 가시권이 감소하기 때문에 1.33배의 값을 가진다(Mark R Shortis, 1998).

그러나, 대상지역의 온도, 압력, 염도 및 부유물질 등에 따라 물의 굴절률은 달라지며, 본 실험에서 사용한 카메라의 검정 결과 약 1.33663배로 계산되었다(H. M. Karara, 1989 ; Chester C Slama, 1988).

비축물점으로부터의 주광선(chief ray)을 고려해볼 때 두꺼운 렌즈에 대한 초점거리는 출사광선의 절점(N_1, N_2')으로부터 초점 평면까지의 거리이다(서울대학교 광학연구회, 1997 ; Paul R. Wolf, 2000 ; 장수 등, 응용광학). 실험을 통해 얻은 Case2와 Case3의 초점거리의 차이(2.5751mm)는 그림 5와 같이 렌즈의 절점이 초점면에서 멀어져 밀도가 높은 물쪽으로 옮겨졌다는 것을 의미하며(H. M. Karara, 1989), 이것은 절점의 변위량 계산식인 식 (2.3)으로부터 같은 결과를 확인할 수 있다. 또한,

표 3. Calibration result (unit : mm)

	Case1	Case2	Case3	
Focal Length	7.6224	7.6496	10.2247	
Format Size	7.4239×5.5649	7.4580×5.5896	7.4504×5.5896	
Principal Point	3.7579×2.7050	3.7784×2.7186	3.7690×2.7638	
Radial Distortion	K_1	4.431e-003	4.377e-003	8.710e-004
	K_2	-5.624e-005	-5.864e-005	-7.777e-005
Decentering Distortion	P_1	-2.158e-005	-3.083e-005	-2.876e-005
	P_2	1.096e-005	1.941e-005	2.280e-004

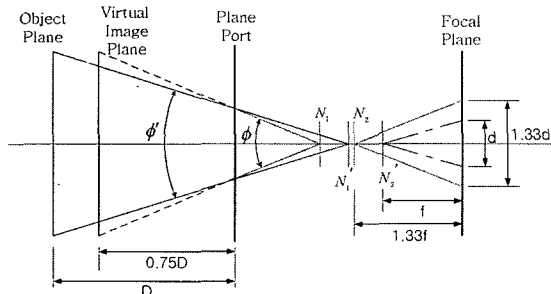


그림 5. Alteration of focal length in underwater

Case1과 Case2의 초점거리가 다른 이유는 수중대상물 거리와 마찬가지로 수중하우징 유리의 두께와 굴절률에 의해 발생한 것이다.

3.3 정확도 분석

정확도 분석을 위해 그림 6과 같이 평면 가공된 철재 직육면체를 제작하였으며 각각의 모서리 길이를 측정하여, 제시한 사진측량기법의 정확도를 분석 하였다. Case1, Case2, Case3의 상태로 촬영하여 계산한 각각의 모서리 길이를 10 μ m의 정밀도를 가진 마이크로미터를 이용해 대상물을 실측한 값과 비교하였다.

각 Case의 모서리길이를 측정하여 마이크로미터를 이용해 실측한 값과 비교한 결과 잔차는 표 4와 같으며, 12개의 모서리를 세 축(X, Y, Z)으로 구분하여 각각의 축에 대한 평균제곱근오차를 비교한 결과 표 5와 같다.

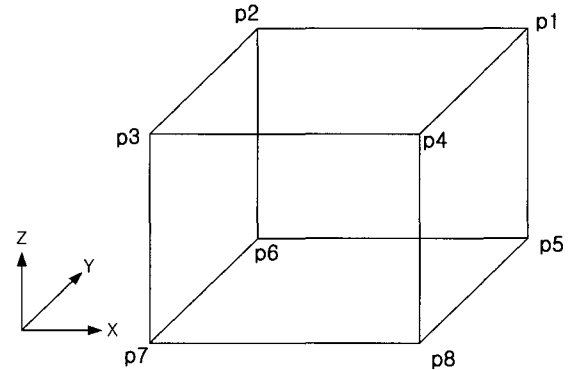


그림 6. Position of edge points

표 4. The residual error (unit : mm)

Edge	Case1	Case2	Case3
P1P2	-0.0122	-0.0511	-0.1043
P2P3	-0.1529	-0.1279	0.0372
P3P4	0.0983	0.0357	-0.1053
P4P1	-0.0918	-0.0841	0.014
P5P6	-0.0353	-0.0938	0.0346
P6P7	-0.1841	-0.1203	0.0242
P7P8	-0.0233	-0.1045	-0.0643
P8P5	-0.0732	-0.0251	0.0481
P1P5	-0.3780	-0.3495	0.1137
P2P6	-0.2604	-0.3484	-0.1802
P3P7	0.1460	0.0773	-0.5419
P4P8	0.0729	0.1207	-0.1986

표 5. RMSE of case test (unit : mm)

Condition	RMSE XYZ
Case1	0.170555238
Case2	0.172208726
Case3	0.193126106

4. 실험 및 결과 분석

4.1 대상물 선정 및 사진촬영

실험대상지역은 충북 청원군 현도면 죽전리 부근의 시목천(외천)으로 실험당시 수온은 20℃, 수심은 1.5m이다. 타원형의 교각모형을 대상지역에 설치하였으며, 교각모형과 지형에 대한 모델링을 실시하였다.

실험을 위해 그림 7과 같이 스트립 타겟을 부착한 교각모형과 측척을 알기 위한 스케일바 및 지형 측량을 위한 타겟을 설치하였으며, 사진의 중복도를 고려하여 그림 8과 같이 71매의 사진을 촬영하였다.

4.2 교각 모델링

처리과정은 카메라 검정데이터와 촬영된 영상을 불러온 뒤, 코드 타겟에 대한 자동 마킹과 매칭을 실시하고, 표정을 통해 외부표정요소를 계산하고, 이를 이용하여 교각모형과 하상지형에 있는 도트 타겟들의 3차원 위치를 그림 9와 같이 취득하였다.

추출된 점 데이터의 좌표축을 설정하고, 교각 모형부분과 지형부분을 각각 분리한 뒤 모델링을 실시하고 분석을

실시하였다. 교각모형 부분을 모델링하기 위해 점 데이터를 dxf 포맷으로 export하여 CAD에서 모델링을 실시함으로써 그림 10과 같은 결과를 얻었다.

교각모형의 체적을 산출한 결과, 상층부와 하층부는 각각



그림 8. Image of underwater object

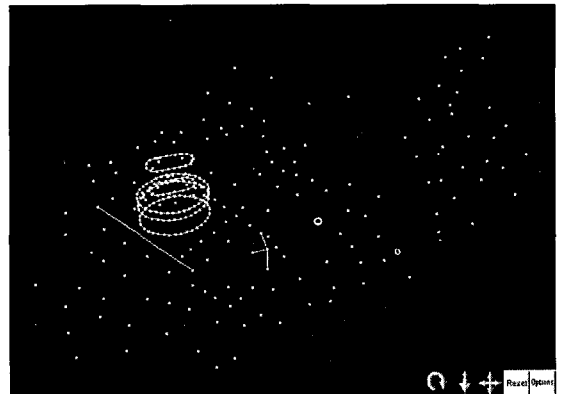


그림 9. Extracted target points

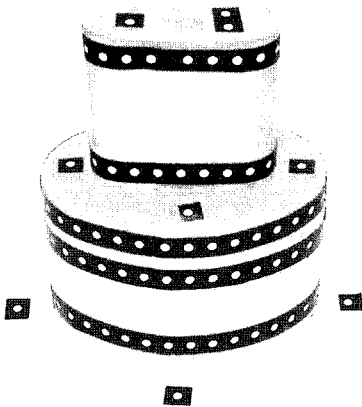


그림 7. Installation of strip targets

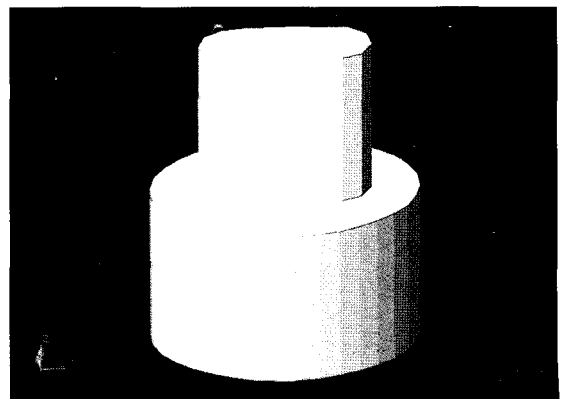


그림 10. 3D model of pier

365.865cm³, 1,529.763cm³였으며, 전체 체적은 1,895.629cm³였다. 또한 교각모형의 평면도, 정면도, 측면도는 각각, 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같다.

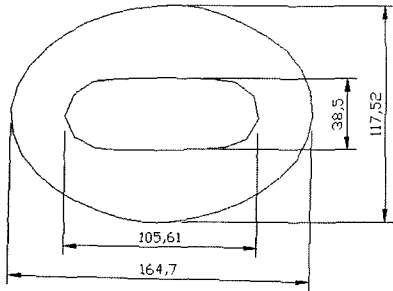


그림 11. A top view

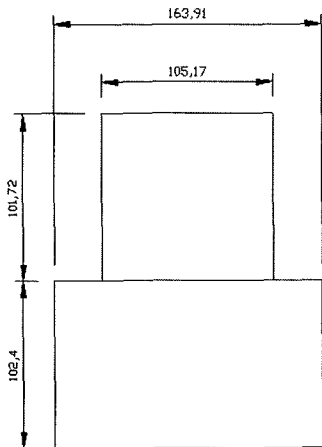


그림 12. A front view

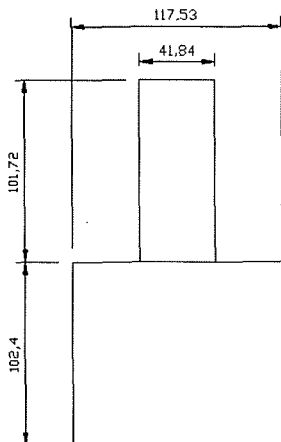


그림 13. A side view

4.3 수중지형 분석

추출된 점 데이터로부터 객관적이고 정량적으로 지형을 비교, 분석하기 위해 ArcView GIS3.2를 이용했다. 추출된 점을 이용해서 생성한 수치지형모형은 그림 14와 같다.

대상지역에서 임의의 지역에 대한 단면도를 생성함으로써 표고와 경사 자료를 생성하여 수중지형을 분석할 수 있는 기초자료를 생성하였다.

그림 15와 같이 수치지형모형에 수평방향의 H1-H5 단면과 수직방향의 V1-V5 단면에 대해 7배의 과고감을 주어 그림 16과 같은 단면도를 얻었다.

수중 사진을 촬영하여 취득한 디지털 영상으로부터 얻은 데이터를 바탕으로 구축된 수치지형모형을 이용하여 3

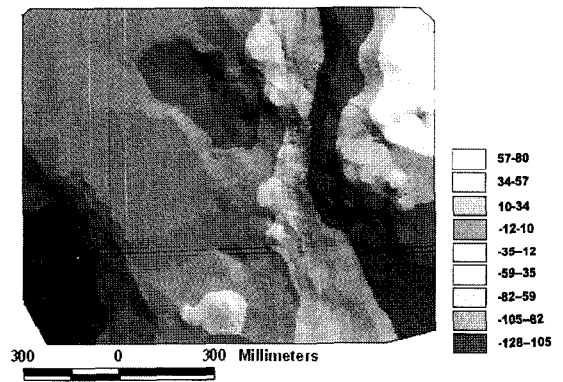


그림 14. DTM model of underwater coverage

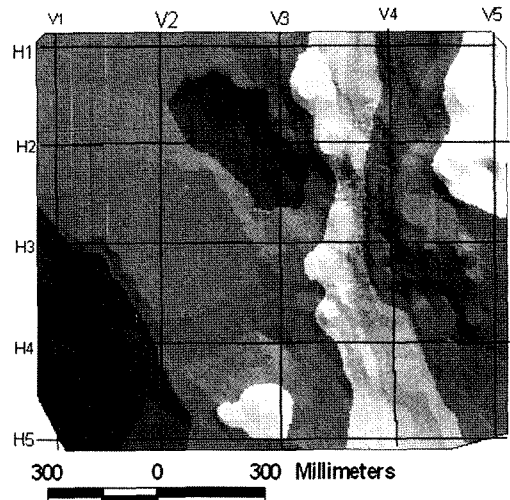
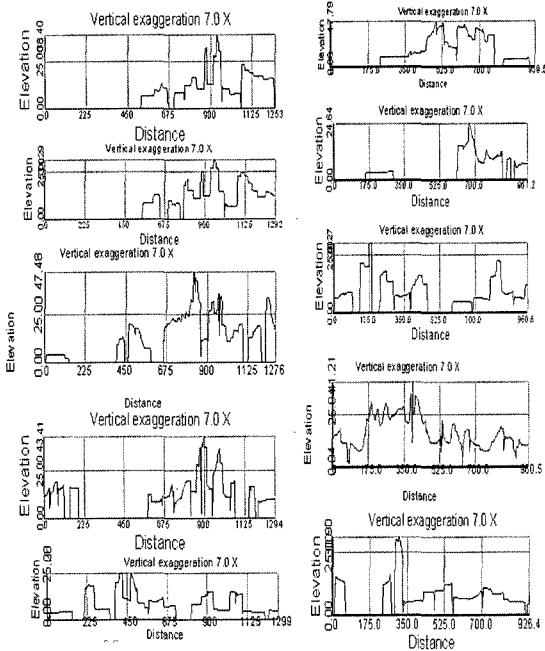


그림 15. Profile line on DTM



Profile of H1-H5

Profile of V1-V5

그림 16. Profile from DTM



그림 17. 3D View of underwater coverage

차원 조감도를 생성하고, 그 조감도 내에 3차원 모델링을 실시한 교각모형을 삽입하여 실험 대상지역을 그림 17과 같이 실제적으로 재현할 수 있었다.

또한, 지역을 3차원으로 가시화 한 도형정보를 인터넷 상에서 3차원 모형을 벡터형식으로 표현할 수 있는 모델링 언어인 VRML 포맷으로 export 하였으며, 웹을 통하여 서버에 접속한 결과 그림 18과 같다.

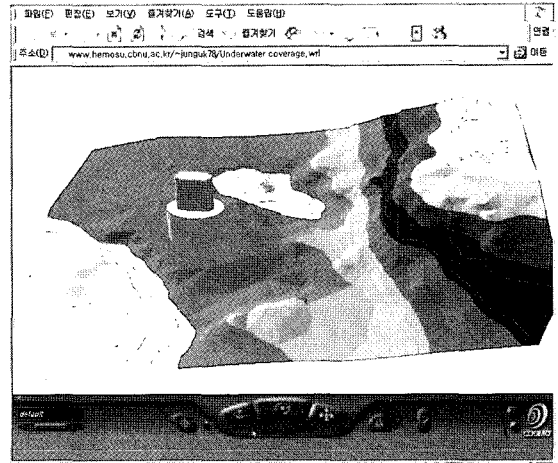


그림 18. Display of coverage on web

5. 결 론

수중사진측량을 이용해 구조물을 측량하여 수중사진측량의 활용가능성 여부를 확인하기 위해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대기중에서 촬영한 경우, 카메라를 수중하우징에 넣어 대기중에서 촬영한 경우 및 카메라를 수중하우징에 넣어 수중에서 촬영한 경우 등을 나누어 검정을 실시한 결과 하우징을 장착하여 공기중에서 촬영한 경우에 비해 하우징을 장착하여 수중에서 촬영한 경우의 초점거리는 1.33663배 이었다.

2. 지상에서 직접 촬영한 경우 0.1706mm, 수중에서 하우징을 장착하여 촬영한 경우 0.1931mm의 평균제곱근오차를 보였으며, 따라서, 실험에서 사용한 수중사진촬영장비를 이용하여 수중사진측량에 사용할 수 있다.

3. 수중사진을 이용하여 취득된 교각모형에 대한 모형화를 실시하여, 주요점의 좌표를 취득하여 평면도, 정면도, 측면도의 도면을 얻음으로써 수중구조물의 유지관리를 위한 데이터를 취득할 수 있었다.

4. 수중사진측량에 의한 하상의 3차원 지형도를 생성함으로써 단면도 제작 등과 같은 수중지형분석을 실시할 수 있었다.

이와 같이 연구를 통하여 해양, 하천, 호수 등에 접해 있거나 수중에 설치된 구조물의 관리를 위해 수중사진측량을 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 서울대학교 광학연구회 (1997), 현대광학, 교문사, pp. 15-17.
- 장수, 조재홍 외 공역 (2002), 응용광학, Fourth Edition, 두양사, pp. 1-147.
- 조재홍, 장수, 황보창권, 조두진 (2002), 광학, 4th Edition, 두양사, pp. 194-197.
- Barry F. Kavanagh, S. J. Glenn Bird (1992), Surveying principles and applications, Third Edition, pp 543-572.
- Chester C Slama, Charles Theurer, Soren W, Henriksen (1988), Manual of Photogrammetry, Fourth Edition, American Society of photogrammetry, pp. 838-846.
- Edward M. Mikhail and James S. Bethel, J. Chris McGlone (2001), Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons, Inc, pp. 11-39.
- H. M. Karara (1989), Non-Topographic Photogrammetry, Second Edition, American society for photogrammetry and remote sensing, pp. 147-163.
- Jeremy Green, Matthew gainsford (2003), Evaluation of underwater surveying techniques, *International Journal of Nautical Archaeology*, 32. 2, pp. 252-261.
- Mark R. Shortis and Euan S. Harvey (1998), Design and calibration an underwater stereo-video system for the monitoring of marine fauna population, *International Archives Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(5), pp. 792-799.
- Paul R. Wolf, Bon A, Dewitt (2000), Elements of photogrammetry with applications in GIS, Third Edition, McGraw-Hill, pp. 2-3.
- Peter Holt (2003), The site surveyor guide to surveying underwater, 3H Consulting Ltd, pp. 1-53.

(접수일 2005. 11. 29, 심사일 2005. 12. 12, 심사완료일 2005. 12. 27)