

광원의 위치와 투사각에 따른 탁도별 시계 측정

장인성¹, 정성준², 백원대¹, 윤희정^{3*}

¹한국해양연구원 연안개발·에너지 연구부

²대림산업(주) 토목 플랜트 설계팀

³홍익대학교 건설도시공학부

Visibility with Different Location and Projection Angle of Light under Turbid Water

In-Sung Jang¹, Sung-Jun Jung², Won-Dae Baek¹ and Heejung Youn³

¹Coastal Development and Ocean Energy Department, KORDI

²Civil Design Engineering, Daelim Industrial Co. Ltd

³School of Urban & Civil Engineering, Hongik University

요약 항만이나 수중공사를 위한 수중 건설장비를 개발함에 있어 수중에서의 작업자의 시야확보는 작업장의 안전성은 물론 효율적인 장비운용에도 매우 중요한 요소이다. 특히 탁도가 높은 것으로 알려진 우리나라의 서해안에서는 시계가 30cm이내일 정도로 시계가 불확실하다. 본 연구에서는 실내수조실험을 통해 수중 건설장비에 사용할 수 있는 적합한 광원의 위치와 투사각도를 알아보고자 하였다. 연구결과, 광원은 피사체의 주변에 위치하여 정면보다는 45° 각도에서 투사하는 경우 시계가 가장 많이 확보되는 것으로 나타났다.

Abstract The operators' visibility of underwater construction equipments plays a key role for safe and efficient construction. The visibility can be limited within 30cm in the West Sea of South Korea where water is considerably turbid. This paper investigates the appropriate location and projection angle of light to be used for construction equipments using model tests. It was discovered that visibility was obtained when the light was located near the target objects with a projection angle of 45°.

Key Words : Underwater visibility, Turbid water, Underwater construction, Turbid water

1. 서론

항만이나 해저면에서 사용 가능한 수중 건설장비를 안전하고 효율적으로 운용하기 위해서는 작업자의 충분한 시계 확보가 필수적이다. 비교적 바닷물이 맑은 남해나 동해에서는 수중 장비 운전이 용이할 것으로 여겨지나 서해처럼 탁도가 높은 해역에서는 30cm 앞의 사물도 분간이 어려울 정도로 시계가 불확실하다. 또한 수중장비가 세립질 해저지반 위에서 작업을 할 경우 작업에 의해 부유하기 쉬운 세립질 입자들이 물을 더욱 혼탁하게 할 가

능성이 높다. 더욱이 수중장비의 경우 해상의 선박에 설치된 모니터를 통해 원격으로 조정하는 경우가 많으므로 시계가 확보되지 않는 경우, 수중에서의 작업이 불가능할 수도 있다.

수중에서의 시계는 물체와 주변환경간의 대비(contrast)와 물체의 반사광이 관찰자에게 까지 도달하는 과정에서 발생하는 감쇠현상에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다 [1-5]. 이런 감쇠현상은 수중을 혼탁하게 만드는 부유체나 용해물질등에 의해 영향을 받게 되며 탁도(turbidity)나 입자물질(particulate matter)에 의해 영향을

본 논문은 국토해양부의 '항만 수중공사용 무인 다목적 기계화 시공장비 개발' 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 한국해양연구원의 '해중터널 실용화를 위한 핵심기술 개발' 연구사업의 지원으로 작성되었기에 이에 감사드립니다.

*교신저자 : 윤희정 (geotech@hongik.ac.kr)

접수일 11년 06월 28일

수정일 11년 07월 27일

제재확정일 11년 08월 11일

받는다. 수중에서 최대 가시거리를 낼 수 있는 최적의 색깔은 광원

의 종류에 따라 다르며, 각 광원 종류별 최적의 색깔은 표 1과 같다. 표에 의하면 탁도와 조명에 따라 적합한 색깔은 근소하게 다르다는 것을 알 수 있으며, 대부분의 조건에서 식별에 가장 적합한 색깔은 형광 황색으로 보여진다. 반대로 수중에서 가장 식별하기 어려운 색깔은 회색이나 검정색 같은 어두운 계열의 색깔임을 알 수 있다.

수중에서 탁도에 따른 가시거리의 변화나 적합한 피사체의 색깔에 대한 연구는 몇몇 사례가 있으나, 수중건설장비에 설치될 광원의 위치나 투사각에 따른 시계의 변화에 대한 연구는 선행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 모형실험을 통해 수중 건설장비를 운용하는데 필요한 시계확보와 물체식별력 향상을 위한 최적의 광원의 위치를 알아보기로 하였다. 본 실험에서는 시계(visibility)를 대표하는 값으로 수중에서 물체를 식별할 수 있는 최대거

리를 사용하였으며 이를 최대 식별가능거리로 본문에 기술하였다.

2. 실내모형 실험

2.1 실험장비

본 연구는 암막천으로 광원을 차단한 어두운 실내에 설치되어 있는 수조의 양 끝단을 물막이 하여 수밀한 크기 7.0m(L) x 1.0m(W) x 1.25 (H)의 수조에 물을 0.8m 채워 수행하였다. 수조에 채워진 총 물의 양은 약 5,600L정도로 계산되었으며, 일반 수돗물을 사용하였다. 수조 내부에는 광원으로 사용된 적외선 (730nm, 840nm, 940nm)과 LED 램프가 설치되어 있는 원형 디스크판과 카메라 그림 1-a, 그리고 식별체인 테트라포드 그림 1-b가 원하는 위치에 배치되었다. 실험도중 얻어지는 수중 카메라

[표 1] 조명별 최대 식별가능거리를 위한 최적색상 [3]

[Table 1] Best colors for visibility under different illumination [3]

Visibility	Illumination	Best Colors
murky, turbid water of low visibility (rivers, harbors, etc.)	natural illumination	fluorescent yellow, orange, and red
		regular yellow, orange, and white
	incandescent illumination	fluorescent and regular yellow, orange, red and white
	mercury light source	fluorescent yellow-green and yellow-orange
		regular yellow and white
moderately turbid water (sounds, bays, coastal water)	natural illumination	any fluorescent in the yellows, oranges, and reds
		regular yellow, orange, and white
	mercury light source	fluorescent yellow-green and yellow-orange
		regular yellow and white
clear water (southern water, deep water offshore, etc.)	any type of illumination	fluorescent paints are supior
	natural illumination	fluorescent paints
		regular yellow, orange, and white
	incandescent illumination	fluorescent paints
		regular yellow, orange, red and white
	mercury light source	flourescent paints
		regular yellow and white



[그림 1] a) 적외선과 LED광원 디스크와 수중카메라, b) 테트라포드
 [Fig. 1] a) Disk with infrared radiation & LED light, and underwater camera, b) target tetrapod



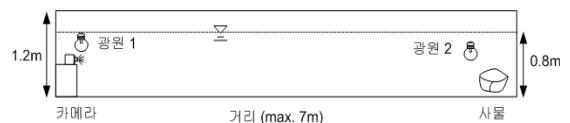
[그림 2] a) 이미지 영상장치와 데이터 저장장치, b) 탁도 측정기
 [Fig. 2] a) Image displaying and data storage system, b) turbidity meter

영상은 그림 2-a에 보여지는 영상수집장치로 전송되어 화면으로 확인할 수 있으며 저장이 가능하다. 그림 2-b는 실험에 사용된 탁도 측정기를 보여주고 있다. 첫 번째 실험에서 적외선이 일반 광원에 비해 식별력 향상에 도움이 되는지 알아보았으나 효과가 없는 것으로 나타나 두 번째 실험에서는 그림 1-a에 보여지는 LED 광원이 아닌 일반적으로 잠수부들이 수중에서 사용하고 있는 20W 광원을 사용하였다.

2.2 실험방법

그림 3은 실내시험에 사용된 수조의 크기, 피사체 (tetrapod), 카메라, 그리고 광원의 위치등에 대한 대략적인 개념도를 보여주고 있다. 수조는 양쪽 끝면이 수밀되어 물은 잔잔하게 고여 있으며 카메라는 좌측면, 사물은 우측 끝면에 위치하였다. 수조의 왼쪽 끝단부터 오른쪽 끝단까지의 거리는 수중건설장비의 길이를 고려하여 최대 7m로 결정하였다. 실험은 2회에 걸쳐 나누어 수행하였으며, 첫 번째 실험은 광원의 위치에 따른 최대 식별거

리를 측정하는 실험으로 LED 램프와 3종류 파장을 가진 적외선 (730nm, 840nm, 940nm)을 사용하여 1) 파장에 따른 식별력의 차이, 그리고 2) 광원의 위치에 따른 식별력의 차이에 대하여 알아보기자 하였다. 두 번째 실험에서는 광원의 위치와 투사각도에 따른 식별력의 차이에 대하여 실험을 수행하였다.



[그림 3] 모형시험을 위한 시험장치의 개념도
 [Fig. 3] Schematic view of test set-up for model test

실험 1. 광원의 위치에 따른 최대 식별거리 측정

수조에 피사체를 위치시킨 후 광원을 사물 옆에 위치시켜 투사하는 경우와 카메라의 옆에 위치시켜 투사하는 경우에 대해 각각 최대 식별가능거리를 측정하였다. 또한 각각의 위치에서 네 종류의 광원을 사용하여 파장에 따

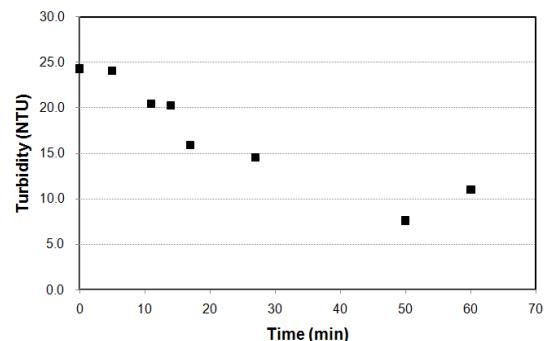
른 식별력의 변화에 대하여 측정하였다. 첫 번째 실험에서는 최대 식별가능거리를 측정하고자 하였기 때문에 광원의 투사 각도는 자유롭게 변화시켜이며 실험자의 판단에 의해 최대 식별가능거리를 측정 및 기록하였다. 따라서 본 실험 결과는 정해지지 않은 임의의 최적의 투사각도에 대한 최대 식별가능거리를 나타내며, 실험순서는 다음과 같다.

- 1) 수조에 광원과 테트라포드를 원하는 위치에 고정한 후 탁도를 발생시키기 위해 카울리나이트를 수조에 첨가한다.
- 2) 카울리나이트가 충분히 균질하게 퍼지게 하기 위하여 인력을 이용하여 물을 휘저어 주며, 균질해졌다 고 판단된 경우에 수조의 한 가운데에서 물을 채취하여 탁도 측정기로 탁도를 측정한다
- 3) 탁도별로 광원을 그림 3에서 보여지듯이 1이나 2에 위치시킨 후에 네 종류의 파장을 변화해 가며 최대 식별가능거리를 측정, 기록한다. 이때 시험시간과 측정시간의 합이 5분이 초과할 경우에는 균질한 탁도를 위하여 수조를 다시 휘저어 준다.
- 4) 탁도를 증가시키기 위하여 카울리나이트를 10g 더 첨가하고 1) - 3)의 과정을 반복한다.

실험 2. 광원의 투사각과 위치에 따른 최대 식별 거리 측정

광원의 투사각에 따라 최대 식별거리가 다르다고 판단하여 광원의 위치는 물론 다른 투사각에 대한 최대 식별가능거리를 측정하였다. 이는 실제 수중현장에서 사용하는 광원은 고정되어 투사각이 변하지 않기 때문에 최대 식별거리를 확보하는 투사각을 예측해 보고자 수행되었다. 투사각은 물체옆에서 45° 각도에서 투사한 경우와 물

체의 정면에서 투사한 경우에 대하여 조사했다. 또한 광원이 양쪽 45° 각도로 투사할 때 광원의 개수가 식별가능거리에 영향이 있는지에 대하여 조사했다 (Cases 1-3). 추가로 광원의 위치가 카메라에 인접한 경우 광원이 카메라 렌즈와의 상대적인 위치에 따라 빛의 산란이 다르다고 여겨져 사례를 세분화하여 광원을 카메라의 앞면, 옆면, 뒷면에 위치시킨 후 최대 식별거리를 조사했다 (Cases 4-6). 두 번째 실험에서 사용된 총 6가지 사례는 표 2와 같으며, 실험의 순서는 첫 번째 실험과 동일하다.



[그림 4] 탁도 발생 후 시간에 따른 탁도의 변화

[Fig. 4] Turbidity variation with time

3. 실험 결과

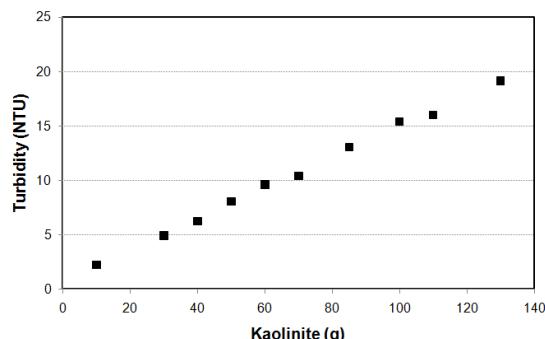
시간에 따른 물의 탁도 변화를 살펴보기 위하여 30cm 거리에서 사물을 인식할 수 없는 정도의 탁도를 발생시켰으며, 탁도측정기로 시간별 탁도를 3회씩 측정하여 평균값을 산정하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 탁도의 초기 값은 24.3 Nephelometric Turbidity Units (NTU) 였

[표 2] 사례별 광원의 위치와 투영각도

[Table 2] The light location and project angle per each case

	Case 1	Case 2	Case 3
광원의 위치 (사물에 인접)			
광원의 위치 (카메라에 인접)			

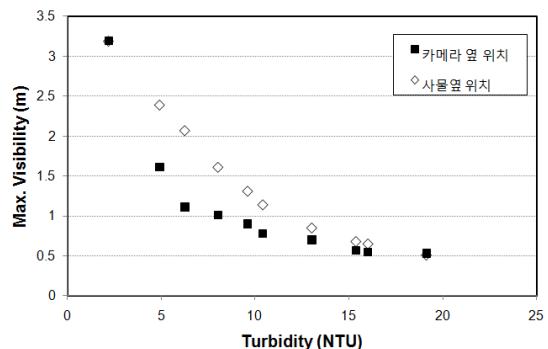
으나, 시간이 지남에 따라 천천히 감소하다가 한 시간 이후에는 약 10 NTU까지 감소하였다. NTU는 탁도를 측정하는 단위로 물속의 부유 입자들이 빛을 산란시키는 정도를 측정한다. 시험결과로부터 수조실험시 탁도를 유지 하려면 각 탁도별로 시험기간이 5분을 경과하지 않는 것이 좋으며, 5분이 초과하는 경우에는 수조의 물을 다시 휘저어 탁도를 유지하는 것으로 결정하였다. 그림 5는 수조에 첨가한 카올리나이트의 양에 따른 수조의 탁도변화에 대하여 보여주고 있다. 카올리나이트가 첨가되지 않았을 경우에 탁도는 0.63NTU였으며 카올리나이트가 10g씩 첨가될 때마다 탁도는 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 카올리나이트가 100g 첨가되었을 경우 15NTU남짓의 탁도가 측정되었으므로, 10g당 약 1.5NTU의 탁도증가를 발생시킨다는 것을 알 수 있었다.



[그림 5] 카올리나이트의 양에 따른 탁도의 변화
[Fig. 5] Turbidity variation with added kaolinite

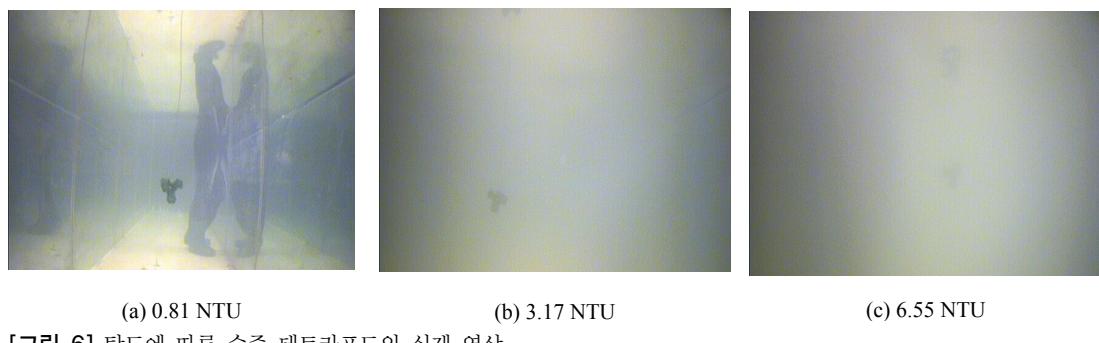
탁도의 증가에 따라 사람의 육안으로 볼 수 있는 거리는 급격히 제한된다. 그림 6은 10cm정도 크기의 테트라포드를 카메라로부터 1m 앞에 설치한 후 탁도를 0.81NTU, 3.17NTU, 그리고 6.55NTU로 증가함에 따라 육안상으로는 물체식별이 가능한지에 대하여 개략적으로

보여주고 있다. 탁도 0.81NTU에서는 사물의 형태 구분이 가능할 뿐만 아니라, 수조의 반대쪽 끝인 7m 까지도 시계가 확보된다. 하지만 광원이 없는 경우에 탁도가 2.17NTU에 도달한 경우 물체의 형태는 식별되나 수조 내부가 전체적으로 뿐여짐을 알 수 있다. 6.55NTU의 탁도가 발생하는 경우에는 물체식별은 매우 어려웠다.



[그림 7] 광원의 위치에 따른 탁도별 최대 식별 가능거리
[Fig. 7] Visibility with turbidity depending on the location of light

그림 7은 첫 번째 실험의 결과로 탁도와 광원의 위치에 따른 최대 식별거리를 보여주고 있다. 네 가지 종류의 광원이 사용되었으나 적외선의 경우 LED 램프보다 식별 가능거리가 더 짧은 것으로 밝혀져 본 시험결과에는 포함하지 않았다. 식별거리는 광원이 가시광선의 파장에 접근할수록 증가했다. 광원의 위치에 상관없이 탁도가 증가함에 따라 최대 식별가능거리도 감소하는 것을 알 수 있었다. 최대 식별 가능거리는 카올리나이트가 첨가되지 않았을 경우인 탁도 0.63NTU에서 7m 이상이었으며 수조 내부의 모든 물체의 식별이 가능했다. 이후 카올리나이트가 10g 첨가됨에 따라 탁도는 2.2NTU로 최대식별가능거리는 광원의 위치에 상관없이 3m 남짓으로 감소했다.



[그림 6] 탁도에 따른 수중 테트라포드의 실제 영상
[Fig. 6] Pictures of underwater tetrapod at different turbidity

하지만 탁도 4.92NTU에서는 광원이 사물 옆에 위치했을 경우가 카메라 옆에서 비추고 했는 경우에 비해 식별거리가 1.61m에서 2.39m로 약 50%가량 증가했으며, 증가분은 6.26NTU 탁도에서 최대 86%에 도달한 후 탁도가 증가할수록 감소했다. 탁도가 매우 높은 15.38NTU 이후에는 광원의 위치에 따른 최대 식별거리차이가 20% 이내로 감소했으며, 이후에는 탁도가 높아질수록 최대 식별거리의 차이가 거의 발생하지 않았다. 비록 탁도가 높은 수중에서는 광원의 위치가 큰 차이를 발생시키지는 못했으나, 탁도가 낮은 수중에서는 광원이 카메라 옆에 위치했을 때보다 피사체 옆에 위치했을 때 피사체 식별이 더

용이하다는 것을 알 수 있었다.

두 번째 실험으로부터 실험변수인 탁도, 광원의 위치, 그리고 광원의 투사각에 따른 최대 식별거리를 측정했으며, 실험결과는 표 3과 그림 8에 제공되었다. 탁도가 2.08NTU부터 13.6NTU까지 증가하는 동안 최대 식별가능거리에 대하여 6가지 사례별로 측정했다. 탁도가 증가함에 따라 최대식별가능거리는 감소했으며, 각 사례에 따라 최대식별거리가 변화하는 것을 알 수 있었다. 최대식별가능거리는 적은 탁도에서는 광원의 위치나 투사각에 따라 큰 차이가 없었으나 탁도가 커질수록 거리가 사례별 식별거리에 차이가 발생함을 알 수 있다. 첫 번째 실

[표 3] 탁도별 최대 최대 식별가능거리

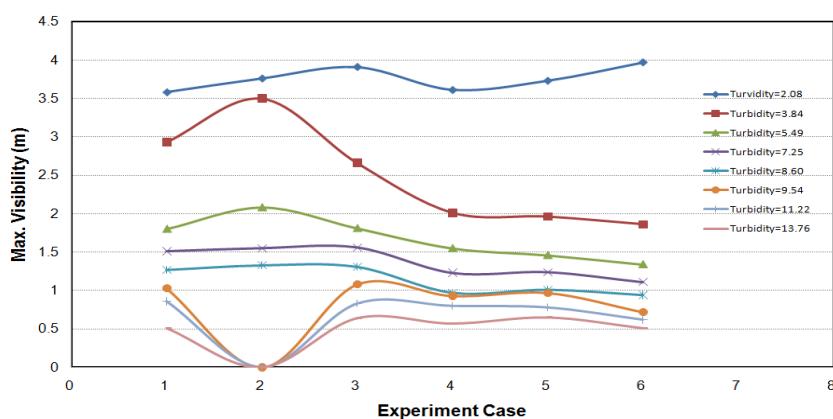
[Table 3] The visibility ranges for each case at different turbidity

Turbidity							
2.08 NTU		3.84 NTU		5.49 NTU		7.25 NTU	
Case	Visibility (m)	Case	Visibility (m)	Case	Visibility (m)	Case	Visibility (m)
1	3.58	1	2.93	1	1.80	1	1.51*
2	3.76	2	3.50*	2	2.08*	2	1.55*
3	3.91*	3	2.66	3	1.81	3	1.56*
4	3.61	4	2.01	4	1.55	4	1.23
5	3.73	5	1.96	5	1.46	5	1.24
6	3.97*	6	1.86	6	1.34	6	1.11

Turbidity							
8.60 NTU		9.54 NTU		11.22 NTU		13.76 NTU	
Case	Visibility (m)	Case	Visibility (m)	Case	Visibility (m)	Case	Visibility (m)
1	1.27	1	1.03*	1	0.86*	1	0.51
2	1.33*	2	NG**	2	NG	2	NG
3	1.31*	3	1.08*	3	0.83*	3	0.64*
4	0.97	4	0.93	4	0.80*	4	0.57
5	1.01	5	0.97	5	0.78	5	0.65*
6	0.94	6	0.72	6	0.62	6	0.51

*각 탁도별 시야 확보가 큰 경우

**빛의 산란으로 인한 측정 불가능



[그림 8] 6개의 사례에 따른 탁도별 최대 식별가능거리

[Fig. 8] The visibility ranges for each case at different turbidity

험에서와 같이 광원의 위치가 카메라 주변에 위치한 경우 피사체 주변에 위치한 경우에 비해 최대식별가능거리가 짧아짐을 알 수 있다.

광원의 투사각에 따른 차이는 사례 1, 2, 그리고 3으로부터 알 수 있는데, 탁도가 8.60NTU보다 작은 경우에는 빛이 피사체의 정면에 투사된 사례 2일 때 최대식별가능거리가 길게 나타났다. 그러나, 그 이상의 탁도에서는 빛의 산란에 의해 오히려 식별이 불가능했다. 또한 광원이 1개인 경우와 두 개인 경우를 대표하는 사례 1과 3를 비교했을 때, 광원이 두 개인 경우가 식별가능거리가 근소하게 긴 것으로 나타났다.

수중 물체의 경우 탁도가 심하지 않다면 수중 카메라를 활용하여 전방의 물체를 인식하는 것이 가장 확실하고 효율적인 해결책이 될 것으로 판단되었다. 또한 저자의 경험에 의하면 광원의 위치나 투사각 등도 중요한 인자이기도 하지만 피사체의 색깔도 매우 중요한 인자로 판단되었다. 본 실험에 포함되지는 않았으나 피사체가 빛을 반사하는 밝은 계열의 페인트를 칠했을 경우에 어두운 색을 칠한 피사체에 비해 식별가능거리가 긴 것을 알 수 있었다.

4. 결론

탁도가 심한 수중에서 건설장비를 안전하고 효율적으로 운전할 수 있도록 시계화보가 필수적이며, 현장에서 사물 식별력을 향상할 수 있는 광원의 위치를 확인해 보고자 모형 실험을 수행하였다. 실험 결과, 광원의 위치는 카메라옆에서 투사하는 경우보다 물체에 직접적으로 투사하는 경우에서 최대식별

가능거리가 긴 것으로 나타났다. 또한 사물식별가능거리는 투사각에 따라 변하는 것을 알 수 있었는데, 사물에 직각으로 투사한 사례 2의 경우에는 최대식별가능거리가 높은 수준의 값을 보여주다가 일정한 탁도 (본 실험에서는 8.6NTU)를 넘어서게 되면 빛이 산란하게 되어 물체 식별이 불가능한 것으로 밝혀졌다. 또한 양방향에 광원이 위치할 때가 한방향에서 투사하는 경우보다 최대식별가능거리가 근소하게 긴 것으로 밝혀져 사례 3과 같이 사물의 양방향에서 45° 각도로 투사하는 경우가 수중 물체식별에 가장 적합한 것을 알 수 있었다. 사례 3의 경우에는 다른 경우와 비교했을 때 탁도별로 25-50%정도의 최대식별가능거리가 길어짐을 알 수 있었다.

본 실험에 사용된 테트라포드는 실제현장에서 사용될 사석에 비해 모형크기로 작아 사물의 크기효과 및 빛의 산란현상에 대한 추가연구가 필요하다. 또한 사물에 칠해

진 페인트색에 따라 식별거리가 변하므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] S. Q. Duntley, "Light in the Sea," *Journal of the Optical Society of America*, 53, pp. 214-233, 1963.
- [2] N. G. Jerlov, "Marine Optics," Amsterdam: elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [3] S. M. Luria, J. A. Kinney, "Underwater Vision," *Science*, 167(924), pp. 1454-1461, 1970.
- [4] J. N. Lythgoe, "The Ecology of Vision," Oxford: Clarendon Press, 1979.
- [5] J. N. Lythgoe, "Light and Vision in the Aquatic Environment," In. J. Atema, R.R. Fay, A.N. Popper, & W. N. Tavolga (Eds), *Sensory Biology of Aquatic Animals*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, pp. 57-82, 1988.

장 인 성(In-Sung Jang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2002년 12월 : 한국해양연구원 연수연구원
- 2002년 12월 ~ 2009년 2월 : 한국해양연구원 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국해양연구원 책임연구원

<관심분야>

지반공학, 지반조사, 해양구조물, 수중시공장비

정 성 준(Sung-Jun Jung)

[정회원]



- 2005년 2월 : 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2010년 2월 : 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 (공학박사)
- 2010년 4월 ~ 2010년 09월 : 한국해양연구원 연수연구원
- 2010년 10월 ~ 현재 : 대림산업 토목플랜트 설계팀 대리

<관심분야>

기초공학, 지반공학, 지반조사, 수중장비

백 원 대(Won Dae Baek)

[정회원]



- 1981년 2월 : 동도공업고등학교 토목과
- 2006년 9월 : 안산공과대학 토목 공학과
- 1980년 3월 ~ 1983년 11월 : 한국해양개발연구소 기능원
- 1985년 1월 ~ 2009년 9월: 한국해양연구원 기술원
- 2009년 9월 ~ 현재 : 한국해양연구원 선임기술원

<관심분야>

해양관측, 수중탐사, 수중장비

윤 희 정(Heejung Youn)

[정회원]



- 2005년 5월 : 아이다호대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 12월 : 텍사스대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2009년 1월 ~ 2010년 8월 : 한국해양연구원 연수연구원
- 2010년 8월 ~ 현재 : 홍익대학교 건설도시공학부 전임강사

<관심분야>

지반공학, 기초공학, 해양기초구조물