Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 14, No. 9 pp. 4507-4513, 2013

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4507

탁도가 높은 수중작업현장에 사용 가능한 소나시스템의 성능 분석

신창주[1], 장인성[1], 김기훈[2], 최현택[2], 이승현[3*]
[1]한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부, [2]한국해양과학기술원 해양시스템연구부, [3]선문대학교 토목공학과

Performance Analysis of Sonar System Applicable to Underwater Construction Sites with High Turbidity

Changjoo Shin[1], In-Sung Jang[1], Kihun Kim[2], Hyun-Tack Choi[2] and Seung-Hyun Lee[3*]

[1]**Coastal Engineering and Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology,**

[2]**Ocean System Engineering Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology**

[3]**Department of Civil Engineering, Sunmoon University**

요 약 수중사석고르기와 같은 수중공사작업을 수행하기 위하여 개발 진행 중인 무인수중장비를 수중공사현장에 투입할 경우, 작업 시 발행하는 부유물들로 인하여 탁도가 높아진다. 이러한 수중환경에서 광학카메라를 이용할 경우, 수중전방인식이 불가능할 수 있다. 이를 극복하기 위하여 무인수중장비에 소나를 탑재하고자 한다. 소나를 무인수중장비에 적용하기에 앞서, 본 연구에서는 소나의 분해능, 탁도가 높은 물 속에서 스캐닝한 소나이미지를 확인하여 장비의 성능을 분석하였다. 그리고 수중공사현장의 경계면을 표시하기 위한 방법을 제안하였다. 이를 통하여 무인수중장비에 적용하기 위한 소나의 기초 성능을 확인하였다.

Abstract The developing unmanned underwater equipment can be used for underwater construction site such as underwater leveling works. If a optical camera is applied to the unmanned underwater equipment, recognition in underwater can be gone to low due to high turbidity in working field. To overcome this problem, a sonar will be installed to the unmanned underwater equipment.
In this study, the resolution of the sonar and the quality test of the sonar image under high turbidity environment were conducted. And the method to indicate the boundary of the underwater construction site was proposed. By these results, the basic performance of the sonar was evaluated.

Key Words : Recognition, Sonar, Turbidity, Unmanned underwater equipment

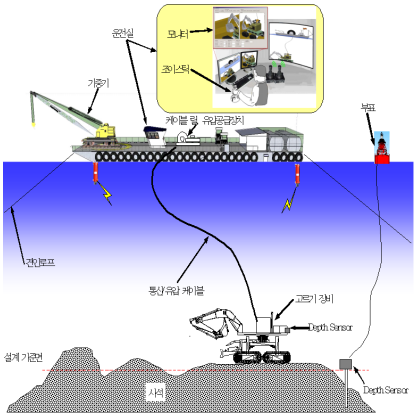
1. 서론

항만 공사 시 소요되는 수중공사작업의 대부분은 다이버들에 의해 수행되고 있다. 수중작업현장에서 직면하게 되는 깊은 수심, 높은 파도, 강한 조류 및 높은 탁도 등의 다양한 악조건들은 다이버들을 매우 힘들게 한다[1]. 특히, 케이슨 설치 작업에 앞서 수행되는 수중사석고르기 작업은 다이버들에게 있어 매우 비효율적인 작업으로 이를 극복하기 위하여 Fig. 1과 같은 무인수중장비를 개발하고 있다.

Fig. 2는 무인수중장비가 투입될 수중공사현장이다. 수상에 있는 바지선에는 무인수중장비를 운영하기 위한 운전실, 케이블릴 및 유압공급장치 등이 설치된다. 그리고 장비는 수중의 사석고르기 사이트에서 작업을 수행한

본 논문은 한국해양과학기술원 '항만 수중공사용 무인 다목적 기계화 시공장비개발' 연구과제로 수행되었음. (해양수산부)
*Corresponding Author : Seung-Hyun Lee(Sunmoon Univ.)
Tel: +82-41-530-2328 email: shlee02@sunmoon.ac.kr
Received June 3, 2013 Revised August 13, 2013 Accepted September 6, 2013

[Fig. 1] Underwater equipment for rubble mound leveling



[Fig. 2] Layout of the rubble mound leveling site

다. 바지선 위에서 기중기가 물 속으로 사석을 투입한다. 물 속으로 떨어진 사석들은 불규칙하게 착저하게 된다. 이러한 사석들을 무인수중장비가 작업공간 내에서 설계 기준면에 따라 공사를 수행하게 된다.

무인수중장비가 물 속에서 사석고르기 작업을 수행하기 위해서는 장비의 전방을 명확히 인식하여야만 작업을 수행할 수 있고 또한 작업공간을 벗어나 장비가 전도되는 것과 같은 일을 예방할 수 있다. 그러나 장비가 수중공사현장에 투입될 경우, 작업 시 발생하는 많은 부유물들로 인하여 광학카메라를 이용해서는 전방인식이 불가능해질 수 있다. Jang[2]은 탁도가 심한 수중에서 광원 및 광학카메라의 각도 및 거리를 바꾸어 가며 물체를 확인한 결과 8.6NTU를 넘어설 경우 물체 인식인 불가능한 것을 확인하였다. 이처럼 탁도가 높은 수중에서 발생하는 전방인식의 어려움을 극복하기 위하여 소나를 수중사석고르기 장비에 탑재하여 수중전방인식을 위한 센서로 사용하고자 한다.

수중공사현장에 적용할 소나를 선택함에 있어 다양한 조건들을 고려해야 한다. 시시각각 변하는 수중공사현장을 빠르게 대응하여 영상화시킬 수 있는 조건을 비롯하여, 공사현장 및 장비의 주변을 관찰하기 위한 넓은 조사각 그리고 공사현장에서 사용하기에 적합한 관찰거리 조건 등이다.

국외의 소나에 관한 연구로 Clausner[3]는 해안구조물 건설현장에 사이드스캔소나를 적용하였다. Elena[4]는 국가적 재난 등과 같은 거친 환경에서 사용할 수 있는 로봇에 광학카메라 및 소나를 동시에 적용하였다. Taketsugu[5]는 수중굴삭기에 피드백포스가 적용된 햅틱시스템을 적극 이용하여 소나 외에도 수중전방인식을 할 수 있는 연구를 수행하였다.

국내의 소나에 관한 연구로는 사이드스캔소나를 이용하여 연안의 홍수퇴적물 분포를 확인[6], 배열 소나를 이용한 목표물 판별[7], 소나 센서 설계 및 개발[8]과 같은 다양한 연구가 수행되었다. 이처럼 국외에서는 수중공사현장과 같은 중작업에 사용 가능한 다양한 소나 연구 및 햅틱 시스템과 같은 여타 기술들을 많이 수행하고 있는 반면, 국내에서는 해저지형조사, 군사용 또는 소나 설계 등과 같은 연구가 주를 이루며, 수중사석고르기 공사와 같은 거칠고 중작업 환경에 사용 가능한 소나에 관한 연구가 매우 드물다.

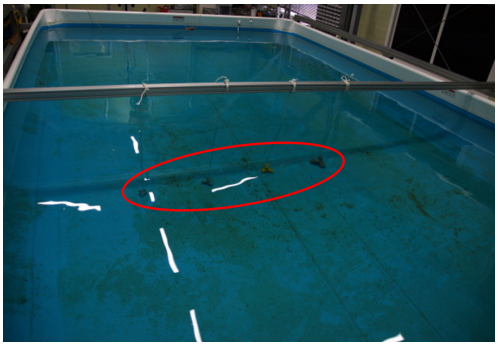
본 연구에서는 개발 중인 수중사석고르기 장비에 탑재할 소나로서 장비의 성능 및 경제성 등을 고려하여 Blueview의 2D 멀티빔 이미징 소나인 P900-90을 선정하였다. 해당 소나를 실현장에 투입하기에 앞서 그 성능을 알아보고자 관찰대상의 크기 및 종류, 관찰거리, 탁도 등을 변경하며 소나의 성능을 확인하였다. 또한, 수중공사현장의 경계면을 소나로 인식하기 위한 방법을 제안하였다.

2. 실험 장비 및 수조

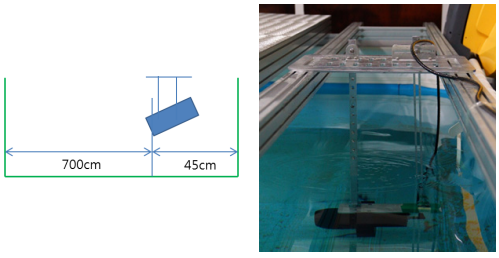
본 실험에 사용된 소나는 Blueview의 2D 멀티빔 이미징 소나 P900-90으로 Fig. 3과 같다[9]. 사용된 소나의 작동주파수는 900kHz, 조사각은 90°, 그리고 빔의 수는 512개이다. 해당 소나의 최대 관찰거리는 100m이며 사용가능한 최대수심은 1000m이다. 수중사석고르기 장비에 적용될 해당 소나는 싱글빔 이미징 소나에 비하여 전방물체 인식을 빠르게 할 수 있어 시시각각 변하는 수중공사현장에 빠르게 대응할 수 있다.

소나 실험은 Fig. 4와 같이 한국해양과학기술원이 보유한 간이수조(400cm * 745cm * 98.5cm : 가로 * 세로 * 깊이)에서 수행하였다. 당시 물의 탁도는 0.54NTU였다. 수조의 크기가 작을 경우 반사파 영향으로 인해 소나 영상의 품질을 나쁠 수 있다. 이를 최소화시키기 위하여 Fig. 5(a)와 같은 위치에 소나를 설치하였으며, 지그를 이용하여 Fig. 5(b)와 같이 고정하였다.

[Fig. 3] Blueview P900-90



[Fig. 4] Lab water tank with different size of TTPs



(a) (b)

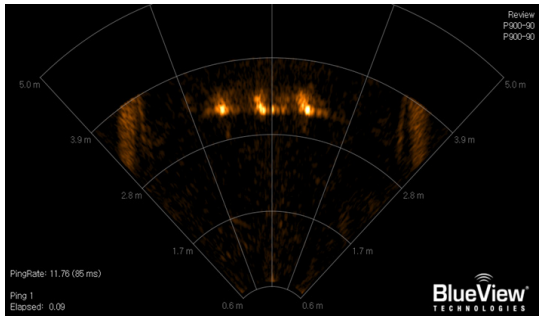
[Fig. 5] Installation of Sonar
(a) Location of Sonar
(b) Layout of Sonar & jig

3. 소나이미지 분석

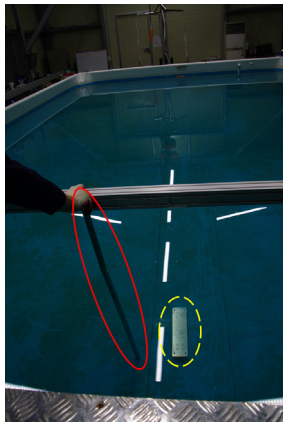
관찰 대상물을 TTP로 설정하고 서로 다른 크기의 TTP 4종류(가로크기 : 7cm, 9.5cm, 11cm, 15cm)를 Fig. 4의 빨간색 실선 원 안의 모습과 같이 소나 전방 3m 거리의 수조바닥에 두었다. 각 TTP들은 50cm 간격을 두고 설치하였다.

Fig. 6은 서로 다른 크기의 TTP들을 관찰한 소나이미지이다. 4개의 TTP를 설치하고 관찰하였으나 영상을 통해 확인할 수 있는 TTP는 3개(가로크기 : 9.5cm, 11cm, 15cm)였다. 반사강도가 강하게 나타난 3개의 TTP 이미지, 그리고 이미지 뒤로 보이는 그들의 음영을 통하여 TTP의 자세를 추정할 수 있다. 수조의 벽은, 소나영상 좌우로 희미한 세로선으로 나타났다.

Fig. 6에서 7cm 크기의 TTP가 나타나지 않은 이유를 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 알루미늄판(노란색 점선 원, 8cm * 30cm * 8mm : 가로 * 세로 * 두께)을 이용하였다. 그리고 파이프(빨간색 실선 원)를 알루미늄판 가까이 다가가며 두 물체를 식별할 수 있는지 소나의 분해능을 확인해보았다. 파이프 위치 이동의 용이함을 위하여 알루미늄판은 소나전방 1.5m거리의 수조 바닥에 내려놓았다.



[Fig. 6] Sonar image for TTPs

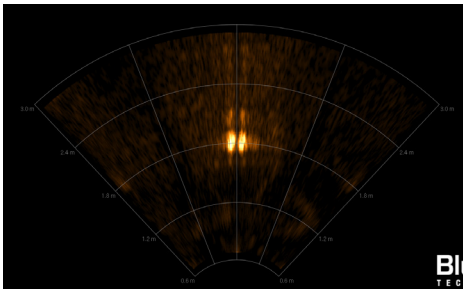


[Fig. 7] Aluminum plate in lab water tank

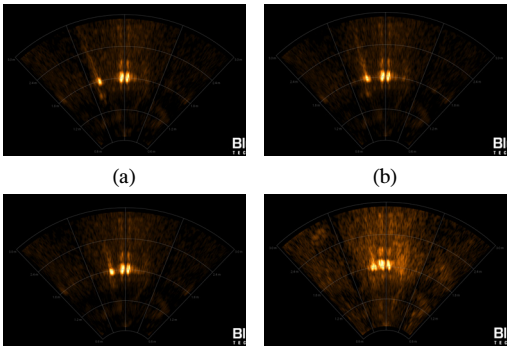
Fig. 8은 알루미늄판 만을 관찰한 소나이미지이다. 두 개의 점과 같은 강한 반사이미지가 보이는데 이것은 소나의 전면과 마주보고 있는 알루미늄판의 두 모서리 부분이다. 그리고 해당 두 개의 점 바로 뒷부분에서 또 다른 두 개의 점이 보이는데 이것은 알루미늄판 뒷부분의 두 모서리이다. Fig. 8을 통하여 같은 관찰대상물이더라도 광학적 이미지와 소나 이미지는서로 다르게 보일 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서, 다양한 대상물에 대한 소나이미지의 데이터베이스 구축이 필요할 것으로 보인다.

Fig. 9는 알루미늄판과 파이프 사이의 거리를 변화함에 따라 관찰한 소나 이미지이다. 알루미늄판과 파이프 사이의 거리가 30cm, 20cm 그리고 10cm일 경우 두 물체의 강한 반사이미지를 얻을 수 있었고, 또한 두 물체 사이에 음영이 존재하여 각각의 물체가 서로 떨어져 있음을 확인할 수 있다.

반면 두 물체 사이가 7cm 떨어져 있을 경우 해당 물체가 떨어져 있는지 또는 붙어있는지 구분하기 매우 힘들다. 즉, 분해능의 한계로 인해 7cm 이하 대상물은 구분하기 힘들 것으로 판단할 수 있다. 따라서 Fig. 6의 소나이미지에서 7cm 크기의 TTP가 나타나지 않은 것은 해당 소나의 분해능 한계 때문인 것으로 판단할 수 있다.



[Fig. 8] Sonar image for Aluminum plate only



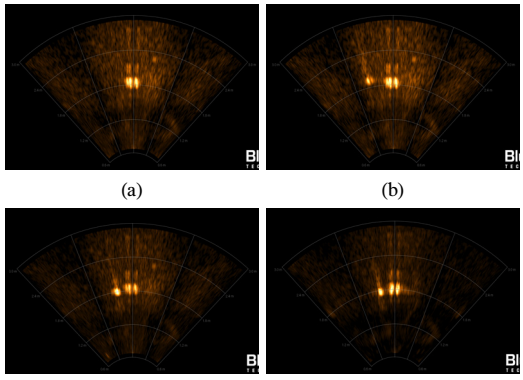
(a) (b) (c) (d)

[Fig. 9] Sonar images for variation of the distance between aluminum plate and pipe (a)30cm (b)20cm (c)10cm (d)7cm

실제 수중사석고르기 작업을 수행할 경우 발생될상황을 고려하여 Fig. 10과 같이 카올리나이트를 투입하여 수조 속의 물 탁도를 26.4NTU로 만들고 동일한 실험을 수행하였다. 해당 탁도 조건에서는 수면 밖에서 알루미늄판을 관찰할 경우, 수조 바닥에 놓여있는 대상물이 전혀 보이지 않았다.

Fig. 11은 수조 내 물의 탁도 26.4NTU 조건에서 관찰한 소나이미지이다. 물속의 부유물로 인하여 전반적으로 소나이미지 배경에 노이즈가 많은 것을 확인할 수 있다. Fig. 10과 같이 광학이미지로서는 물속의 상황을 전혀 관찰할 수 없는 탁도 조건을 가진 환경이었지만 소나이미지를 통해서는 센서 전방의 물체를 인식할 수 있음을 알 수 있다. 탁도조건 0.54NTU에서 확인한 Fig. 9의 소나이미지와 비교 시 배경 노이즈를 제외하면 동일한 결과를 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

[Fig. 10] Lab water tank under turbidity of 26.4NTU



(a) (b) (c) (d)

[Fig. 11] Sonar images for variation of the distance between aluminum plate and pipe under turbidity of 26.4NTU condition (a) aluminum plate only (b) 30cm (c) 20cm (d) 10cm

4. 수중공사현장 경계면 인식을 위한 이미지 분석

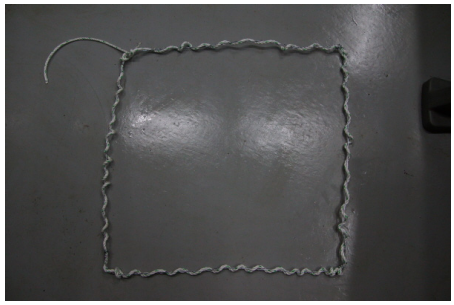
수중공사현장에서 공사현장의 경계면을 정확히 인식하기 못한 채 무인수중장비가 작업을 수행하게 되면 작업공간을 벗어날 수 있다. 또한, Fig. 2에서 보인 것과 같이 경사진 경계면에서는 장비가 불안정하게 있을 경우 전복될 수도 있다. 무인수중장비가 수중공사현장에서 작업 경계면을 명확히 인식하면 이를 극복할 수 있다.

수중공사현장의 경계면을 효과적으로 표시하기 위한 방법을 찾기 위하여 Fig. 12과 같은 나일론 사각프레임을 만들었다. 먼저 지름 1mm의 철사를 이용하여 사각형프레임(30cm * 30cm : 가로 * 세로)을 만들고 지름 8mm의 나일론 줄을 철사 주위로 감았다. 그 결과 나일론 줄이 감긴 사각형프레임의 한변의 지름은 약 2cm가 되었다. 해당 나일론 사각프레임을 소나 전방 3m 거리의 수조바닥에 내려놓았다.

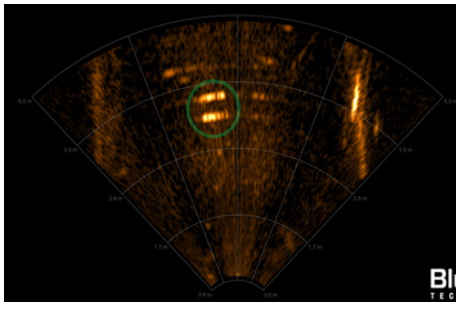
Fig. 13은 탁도 26.4NTU 조건 하에 관찰된 소나이미지로서 나일론 사각프레임은 녹색 원 안의 모습과 같이 나타났다. 사각프레임의 가로변에 해당하는 부위는 소나 전방에 대하여 30cm의 길이를 가졌기 때문에 Fig. 13과 같이 영상에 나타났다. 반면, 세로변은 영상에서 나타나지 않았다. 이것은 소나전방에 대하여 사각프레임이 약 2cm의 두께를 보이도록 놓여있어서 소나의 분해능 한계로 인해 나타나지 않은 것이다. 즉, 소나 분해능 이상의 크기 조건을 만족되면 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 나일론 줄을 이용하여 수중사석고르기 공사현장의 경계면을 나타낼 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

수심 약 7m의 부둣가에서 Fig. 14와 같이 소나를이용하여 나일론 줄을 관찰할 수 있는지 실험해보았다. 나일론 줄을 하나의 밴드 형태로 만들고 한쪽은 Fig. 14와 같이 정박되어 있는 배에 고정하였다. 반대쪽은 무게추를 달아 물속에 잠기도록 만들었다.

Fig. 15는 소나를 이용하여 부둣가에 설치한 나일론 줄을 관찰한 이미지이다. 해저면에 놓여있는 다양한 돌들이 불규칙하게 점박이 형태로 나타나고 있으며 그것들의 음영을 통해 현재 해저면 상태를 파악할 수 있다. 불규칙한 해저면의 영상 속에서도 녹색의 원 안에서 나일론 줄이 선명한 직선으로 나타났다. 따라서 나일론 줄을 이용하여 수중사석고르기 공사현장의 경계면을 효과적으로 표현할 수 있을 것으로 기대된다.

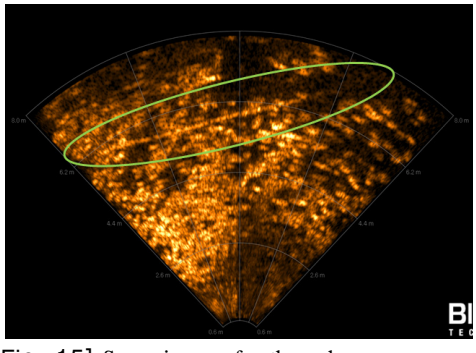


[Fig. 12] Nylon rectangular frame



[Fig. 13] Sonar images for the nylon rectangular frame

[Fig. 14] Nylon rope test at quayside



[Fig. 15] Sonar images for the nylon rope

5. 결론

본 연구에서는 수중사석고르기 장비에 탑재하여 수중전방인식을 하기 위한 소나의 성능실험을 수행하였다. 실제 수중사석고르기 공사 상황을 고려하여 소나의 분해능, 탁도 조건 변화에 의한 소나이미지 변화 그리고 수중공사현장 경계면 표시를 위한 방법을 확인한 결과는 아래와 같다.

(1) 실험에 사용된 소나의 경우 분해능의 한계로 인해 7cm 이하의 물체는 인식이 어렵다.

(2) 탁도가 높아질 경우 소나이미지의 배경노이즈가 증가한다.

(3) 소나이미지와 광학이미지는 다르게 표현될 수 있기 때문에 소나이미지에 대한 데이터베이스 구축이 필요하다.

(4) 나일론 줄을 이용하여 수중공사현장의 경계면을 표현하더라도 소나를 이용하여 이를 인지 할 수 있다.

본 연구의 결과를 숙지 후 해당 소나를 이용할 경우 수중공사현장에서 투입하여 수중전방인식을 성공적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] In Sung Jang, Changjoo Shin, Kihun Kim and Won Dae Baek, "Development of Underwater Equipment for Rubble Mound Leveling of Port Construction Works", Proceeding of Autumn Vonference on Korean Unmanned Underwater Vehicle, pp.27-32, Nov, 2012.

[2] In-Sung Jang, Sung-Jun Jung, Won-Dae Baek and Heejung Youn, "Visibility with Different Location and Projection Angle of Light under Turbid Water", Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 8, pp.3758-3765, 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.8.3758

[3] Clausner, James E. ; Pope, Joan, *Side-Scan Sonar Applications for Evaluating Coastal Structures*, Information for the Defencse Community, 1988.
DOI: http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.48347

[4] Elena Messina, Adam Jacoff, "Performance standards for urban search and rescue robots", *Proc. SPIE 6230, Unmanned Systems Technology VIII,* May, 2006.

[5] Hirabayashi Taketsugu, Yamamoto Takashi, Sakai Hiroshi, Kato Hideo, Yokoi Hiroshi, "Construction of Teleoperation System with Bilateral Control for Underwater Construction Machine", Report of the Port and Airport Research Institute, Vol. 44, No. 4, pp. 53P, 2005.

[6] Cheol-Ku Lee, Seom-Kyu Jung, and Seong-Ryul Kim, "Distribution of Flood Sediment Deposits using the Seafloor Image by Side Scan Sonar near the Northern Coast of Gungchon-ri, East Sea", Journal of Korean Earth Science Society, Vol. 34, No. 1, pp. 41-50, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.5467/JKESS.2013.34.1.41

[7] Hyunwoo Park, Tae-Jin Jung, Bum-Soo Kwon and Kyun Kyung Lee, "Performance Analysis of a Criterion to Verify the Consistency of Measured Angles of Towed Array and Frank Array", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 188-195, 2010.

[8] Yu-Shin Chang, Joong-Eup Keh, Heung-Gi Jo and Man-Hyung Lee, *Development of the Side Scan Sonar Using the Multi-Beam Sensors : Sensor Design*, Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers,, Vol. 54, No. 10, pp. 581-586, 2005.

[9] http://blueview.com/

신 창 주(Changjoo Shin) **[정회원]**

- 2006년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학석·박사)
- 2012년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임연구원

<관심분야>
수중로봇, 센서융합, 소음진동

장 인 성(Kil-Dong Hong) **[정회원]**

- 1995년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2002년 12월 : 한국해양과학기술원 연수연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직

<관심분야>
지반공학, 지반조사, 해양구조물, 수중시공장비

김 기 훈(Kihun Kim) **[정회원]**

- 1998년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
- 2000년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (석사)
- 2005년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (박사)
- 2005년 10월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임연구원

<관심분야>
수중로봇, 수중항법, 수중인지

최 현 택(Hyun-Taek Choi) **[정회원]**

- 1991년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 8월 : 한양대학교 전자공학과 (공학박사, 제어 및 로보틱스)
- 1993년 2월 ~ 1995년 8월 : KT 연구개발원 S/W연구소
- 2000년 11월 ~ 2003년 10월 : 미국 하와이 주립대학교 기계공학과 ASL 연구실 박사후 연구원
- 2003년 11월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>
수중로봇, 해양시스템, 강인제어

이 승 현(Seung-Hyun Lee) **[정회원]**

- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학