

근거리 수중통신을 위한 가시광 LED 적용에 관한 연구

손경락[†]

(원고접수일 : 2013년 2월 27일, 원고수정일 : 2013년 5월 2일, 심사완료일 : 2013년 5월 14일)

A study on the short-range underwater communication using visible LEDs

Kyung-rak Sohn[†]

요약: 수중통신은 지상통신에 비하여 통신채널의 강건성과 고속데이터 전송 측면에서 상당한 제약 요인을 가지고 있다. 공기 중에서 RF 통신은 장거리 전송에도 높은 데이터 전송률을 보이지만, 수중에서는 매질의 전도특성으로 인하여 전파에너지의 심각한 감쇠현상이 발생하여 통신이 어려운 실정이다. 현재 수중에서 수 십 킬로미터 이상의 장거리 통신이 가능한 음향과 통신 모뎀이 개발되어 사용되고 있지만 낮은 전송율과 높은 전력 소모, 느린 전송속도가 문제로 거론되고 있다. 이 문제를 보완할 수 있는 방안으로 빛을 이용한 근거리 수중무선통신이 대안으로 연구되고 있다. 본 논문에서는 가시광 파장영역에서 수중통신 채널 특성을 분석하였다. 자유공간 광무선 통신과 비교하여 수중 가시광 통신기술의 가능성을 제시하고, LED 기반 트랜시버와 CMOS 센서를 통신시스템에 장착하여 수중이미지 전송을 위한 광무선 통신 시스템을 시연하였다.

주제어: 수중 통신, 가시광 통신, 광무선통신, 발광다이오드, 소멸계수

Abstract: Robust and high speed underwater communication is severely limited when compared to communications in terrestrial. In free space, RF communication operates over long distances at high data rates. However, the obstacle in seawater is the severe attenuation due to the conducting nature. Acoustic modems are capable of long range communication up to several tens of kilometers, but it has low data-rate, high power consumption and low propagation speed. An alternative means of underwater communication is based on optics, wherein high data rates are possible. In this paper, the characteristics of underwater channel in the range of visible wavelength is investigated. And the possibility of optical wireless communication in underwater is also described. The LED-based transceiver and CMOS sensor module are integrated in the system, and the performance of image transmission was demonstrated.

Keywords: Underwater communication, Visible light communication, Optical wireless communication, Light emitting diode, Extinction coefficient

1. 서 론

대기 중 또는 수면 위의 영역에서 통신은 라디오 주파수 (Radio frequency: RF) 영역의 전자파 통신이 채널의 대다수를 지속적으로 제공할 것으로 전망한다. 그러나 수중의 경우 MHz 이상의 주파수

영역에서는 물의 전도성으로 인하여 심각한 수준의 감쇠를 겪게 된다. 더군다나 주파수가 높아지면 감쇠도 커져서 GHz 영역의 주파수에서는 지상에 사용하는 소자는 수중에서 더 이상 사용할 수 없게 된다. 예를 들면, 와이파이 주파수대역인 2.4 GHz 영역은 해수에서 ~1700 dB/m, 민물에서는 ~

[†] 교신저자: (606-791) 부산광역시 영도구 태종로 727,

한국해양대학교 전자통신공학과, E-mail: krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4312

190 dB/m 정도의 큰 손실을 보이므로 사실상 적용할 수 없다[1]-[3]. 2006년 영국의 Wireless Fibre Systems에서 수중 RF 모델을 처음으로 상용화했지만 100 bps 데이터 전송률로 수십 m 통신하는 수준이었다. 2007년 1-10 Mbps 통신 속도를 보이는 새로운 모델을 내놓았지만 통신영역은 1m 범위 이내였다[4].

음향파는 RF와 달리 해수에서도 잘 전송이 되며 수 km 이상 도달할 수 있기 때문에 수중통신에 폭넓게 응용되고 있다[5][6]. 그러나 최근 수중 무선 센서 네트워크를 위한 솔루션에서 음향파 통신의 제한된 대역폭과 저속통신, 거리에 따른 전송지연 시간의 차이로 인한 다중 채널간 간섭과 페이딩(fading) 등으로 이러한 제한점을 극복하고 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 여전히 찾고 있는 중이다. MIT에서는 영상신호전송을 음향파 링크를 실현하기 위하여 데이터 압축 알고리즘과 대역폭의 효율적인 사용을 위한 가변 M-ary QAM을 적용하였다. 150kbps 전송속도로 영상신호를 송신할 수 있었지만 시스템이 복잡하여 실제적용에는 어려움이 많다[6].

수중광무선 통신의 경우 미국, 캐나다, 호주 등에서 이론적인 연구와 실험이 병행 진행되고 있으나 많은 연구 활동이 있는 것은 아니며, 상용화된 수중 광무선 모델도 찾아보기 힘들다. 그러나 최근 수중센서 네트워크와 해저 관측소에 대한 관심이 근거리 고속 수중 광무선 통신에 쏠리고 있다[7]. 예를 들면 2006년 미국의 우즈홀(Woods Hole) 해양연구소에서는 부분적으로 유선화된 해저 관측소를 기반으로 근거리 광대역 인터넷 서비스를 수중에서 제공하는 것을 목표로 광무선 모델 네트워크를 위한 프로토타입의 시스템을 개발하고 성능실험을 수행하였다. 실험용 플랫폼은 6 개의 청색 LED와 광증배관(photomultiplier tube: PMT)으로 구성되어져 있고, 해중 10 m 거리에서 10 MHz의 구형파가 복원되어짐을 확인하였다[8].

한편, 수중 또는 해저에서 탐사 및 작업을 위한 무인 자율이동체와 로봇에는 많은 양의 데이터 처리를 위한 고속 통신이 요구되고 있다. 대부분 유선 케이블을 연결하여 통신채널을 구성하였으나,

데이터 전송을 위한 케이블의 물리적인 연결은 시스템의 운용적인 측면과 기술적인 측면에서 적절한 방법이 아니다. 지금까지는 수중 음향파 기술에 의존하여 저속의 무선통신을 수행하였지만, 고휘도 청색과 녹색 LED 개발로 근거리에서 수중통신을 위한 연구들이 다양하게 진행되고 있다[9][10]. 2010년 미국 MIT에서는 수중로봇을 제어하기 위한 광무선 수중 모델을 개발하고 있음을 발표하였다[11]. 케이블 연결 없이 어지러운 수중환경 하에서도 로봇을 안정적으로 제어할 수 있는 광 링크를 확보하는 실험으로, 5W 청색 LED 6개와 애버런치 포토다이오드를 사용하여 수중 1 m 깊이에서 1.2 Mbps 단방향 통신을 30 m 거리까지 성공적으로 수행하였다.

국내의 경우 음향파를 이용한 수중 통신 및 센서 네트워크 구현에 대한 연구는 군사용 또는 산업용으로 한국해양연구원을 비롯하여 여러 기관에서 활발히 진행되고 있다[12][13]. 그러나 수중 광무선 통신 및 센서 네트워크에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 논문에서는 가시광 파장영역에서 수중통신 채널의 특성을 해석하고 통신거리에 따른 광 손실을 예측하였다. 근거리 수중통신의 가능성을 보기 위하여 1개의 LED로 구현된 방수형 광원과 다수개의 수광소자로 구성된 수신단을 제작하였고, 이를 이용하여 CMOS 이미지 센서로 획득된 디지털 정보를 수조 실험 조건에서 성공적으로 전송됨을 보였다. 제안된 시스템은 수중에서 근거리 영역의 통신 수단으로 응용될 수 있을 것이다.

2. 수중통신채널

가시광 영역에서 양방향 통신을 위한 수중통신 채널의 개략적인 모형을 Figure 1에 나타내었다. 트랜시버의 광원이 LED 라면 광도(Luminous intensity)와 광 전력 전송의 두 가지 기본적인 특징을 이용하여 채널 모델링이 가능하다. 우선 자유공간에서 광무선 링크 채널의 특징은 식 (1)으로 해석할 수 있다[14][15].

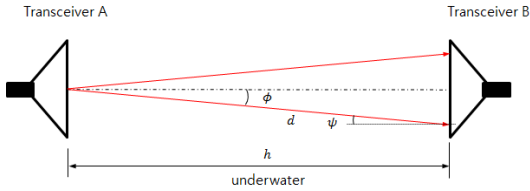


Figure 1: Basic schematic of the underwater communication channel.

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) \mathcal{I}(\psi)g(\psi)\cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (1)$$

여기서 m 은 람베르시안 방사 차수, A 는 수광 소자의 물리적인 수광 영역의 크기, d 는 발광소자와 수광 소자간 거리, ϕ 는 발광소자의 발산각, ψ 는 입사각, $\mathcal{I}(\psi)$ 는 광 필터의 이득, $g(\psi)$ 는 집광구조에 의한 이득, Ψ_c 는 수신단의 시야영역의 폭을 의미한다.

출력 광 전력 (P_r)에 대한 수신 광 전력 (P_t)의 관계는 식 (2)로 주어진다.

$$P_r = H(0)P_t \quad (2)$$

만약 가시광 통신을 수중에 적용하는 경우 수중 매질에 의한 빛의 산란과 흡수가 소멸계수로서 나타나므로 전송손실 (L_{pr})은 식 (3)으로 계산되어진다.

$$L_{pr} = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} e^{-\alpha(\lambda)d} \right) \quad (3)$$

여기서 $\alpha(\lambda)$ 는 파장의존성을 가지는 소멸계수이다. 일반적으로 순수한 해수의 경우 0.00043 cm^{-1} , 항구 주변 해수는 0.0219 cm^{-1} 의 소멸계수를 가진다.

Figure 2는 산란계수 $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ 인 수질에서 1W급 파워 LED를 이용한 광원의 조도와 빔 프로파일을 계산한 결과이다. 광원의 초기조도는 35,000 lux 이다. 채널 손실로 인하여 1 m 떨어진 거리에서는 500 lux 이하로 조도가 감소하며 2 m 거리에서는 60 lux 이하이다. 수중 통신 채널의 특

성상 상당한 광 감쇠가 발생함을 알 수 있다.

Figure 2의 결과를 바탕으로 자유공간과 수중에서 발생하는 광 손실을 수신단의 광 전력 분포로 계산하여 비교하면 **Figure 3**과 같다. 1 m 거리에서는 자유공간에 비하여 수중채널이 2 배 이상의 광 전력 손실이 발생하며 거리가 멀어질수록 그 차이는 더욱 커지고 있음을 보여준다. 동일한 조건으로 자유공간에서 2m 까지 통신이 가능하다면 수중에서는 1 m 정도로 제한됨을 예측할 수 있다.

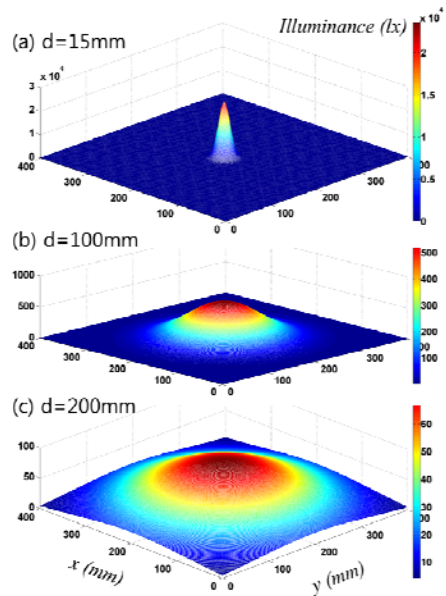


Figure 2: Calculated beam profile of the light source in terms of distance in water ($\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$).

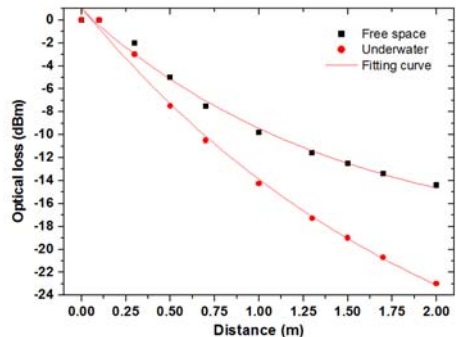


Figure 3: Calculated optical losses in free space and water

3. 시스템 설계 및 제작

가시광 무선통신을 위한 송수신부의 기본 개략도를 Figure 4에 나타내었다. 송신부는 백색 파워 LED와 이를 변조하기 위한 구동회로로 구성된다. 시스템의 출력신호에 대응하는 LED 스위칭 신호를 만들기 위하여 MAX232와 인버터(inverter)로 구성된 LED 구동회로를 구현하였으며 제작된 광원부는 1MHz의 변조대역폭을 가짐을 확인하였다. 수신부는 수광 소자와 광전변환 신호처리부분으로 구성되어있다. 수광 소자로서의 광 검출기는 PIN 구조로 된 오스람사의 SFH213을 사용하였다. 응답 시간은 5ns로 200 MHz의 대역폭을 제공한다. 광전 변환된 전기적인 신호는 1 MHz의 대역폭을 가지는 고속 증폭기(trans-impedance gain: 80 V/A in dB)에서 증폭되어진다. 증폭된 신호는 고속비교기를 통과함으로써 low와 high 의 이진신호로 복구되고 UART를 통해 신호처리를 위한 프로세서로 입력된다.

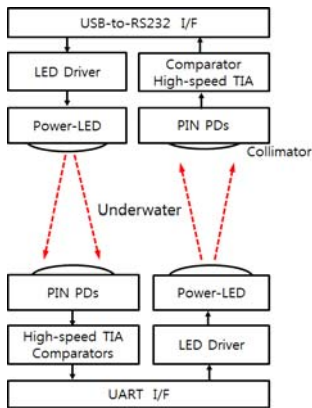


Figure 4: Basic schematic of visible light transceiver.

Figure 5는 수중에서 방사되는 광원의 빔 폭을 고려하여 제작한 수신기의 사진이다. 수신 성능은 일반적으로 수신기의 감도와 수광 면적에 의존한다. 동일한 광 검출기를 사용할 경우 다수개의 소자를 병렬 연결하면 수광 면적을 확장할 수 있다. 그러나 응답속도가 느려지는 문제가 발생할 수 있으므로 적절한 개수를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 7 개의 광 검출기를 병렬 연결하였고 별집 형

태의 반사판에 장착하였다. 반사판은 집광기를 역할을 함으로서 수광 효율을 높이는데 기여한다.

Figure 6은 CMOS 이미지 센서가 장착된 백색 LED 기반 수중 가시광 통신 시스템의 개략적인 구성도이다. CMOS 이미지 센서는 디지털 영상신호 처리를 위한 프로세서 (VC0706, VIMICRO)와 연결되어 모듈 형태로 구성되어 있다. VC0706은 하드웨어적으로 연결된 JPEG 코덱과 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 인터페이스를 제공하므로 CMOS 센서에서 캡처한 영상 스트림은 Motion JPEG (M-JPEG)으로 압축되어져서 UART를 통해 출력된다. UART에는 광무선 통신을 위한 광원으로 LED와 광 검출기인 포토다이오드 (Photodiode: PD)가 연결된다. 이미지 획득 및 전송 관련 통신 알고리즘은 PC의 모니터링 프로그램에서 구현된다.

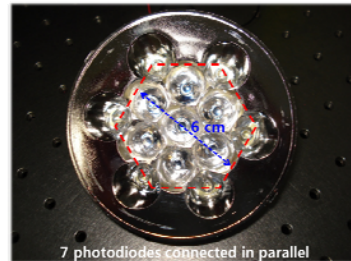


Figure 5: Photograph of the receiver with 7 photo-diodes.

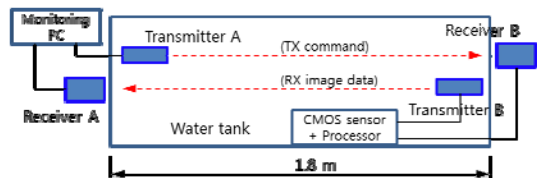


Figure 6: Schematic of the underwater visible-light communication system

4. 실험결과 및 고찰

수중 가시광통신 실험을 수행하기 위하여 제작한 장치도는 Figure 7과 같다. 1.8 m 길이의 수조에 적당량 물을 채우고 광원과 CMOS 이미지 센서모듈을 수조 내부에 설치하였다. 광원은 100 m 방수

를 보장할 수 있게 밀봉되어져 있으며 CMOS 센서 모듈은 플라스틱 케이스를 이용하여 방수가 가능하도록 하였다. 그러나 수신단의 경우 방수처리용 용이하지 않아 수조 바깥에 설치하였다. 통상 송수신기는 빛 통과가 용이한 투명 유리 또는 플라스틱으로 창을 만들기 때문에 수조 외부 수신기를 설치하더라도 실험결과에는 미치는 영향은 무시할 수 있다. 송수신단이 분리되어 있으므로 양방향 통신을 위하여 서로 어긋나게 배치함으로써 시계영역이 확보될 수 있도록 하였다. 수중에서 양방향 통신을 보장할 수 있는 조도는 수신단에서 500 lux 정도 보장되어야 한다. 본 연구에서 사용한 1개의 백색 LED로 통신이 가능한 거리는 1 m 내외였다. 여러 개의 광원을 병렬 연결하여 광 출력을 높이고 콜리메이터 또는 렌즈를 광 검출기에 사용하여 집광할 수 있는 구조를 적용한다면 통신거리를 수 미터 까지 늘릴 수 있을 것이다.

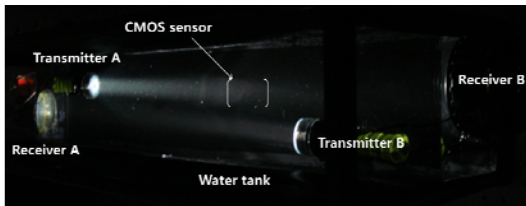


Figure 7: Experimental setup

Figure 8은 수중에서 가시광 통신에 의해 양방향 데이터 전송이 수행되고 있음을 보여주는 측정과정이다. 먼저 모니터링 PC에서 트랜스미터 A를 통해 CMOS 센서 모듈로 이미지 획득을 위한 명령을 내리면 리시버 B에서 수신한다. 이 명령을 CMOS 센서 모듈에서 인지하고 수중 이미지 획득을 위한 촬영을 한다. 촬영된 이미지는 JPEG로 압축되고 순차적으로 수행되는 데이터 전송 명령에 의해 디지털 영상신호처리 프로세서의 UART로 내보내면 트랜스미터 B와 리시버 A의 경로를 통해 데이터를 보내게 된다. 데이터 크기는 48.3 Kbyte이며 한 개의 이미지 데이터를 촬영하여 수신하는데 12초 가량 소요됨을 알 수 있다.

Figure 9는 정상적으로 이미지 데이터가 전송되었는지 확인하기 위하여 LabVIEW®로 제작한 모니

터링 프로그램의 화면이다. 통신포트설정을 확인하고, 통신 상태를 감시하면서 전송된 이미지를 보여준다. 화면의 이미지는 수중에 설치된 CMOS 센서 모듈에서 수조내부를 촬영한 것이다. 비록 1 m 정도의 제한된 범위에서 수중 이미지를 촬영하고 가시광 통신으로 전송하였지만 향 후 광원의 출력을 향상시키고 수신단의 광전변환 효율을 개선한다면 대용량의 실시간 수중영상을 전송하는 시스템으로 발전시킬 수 있을 것이다.

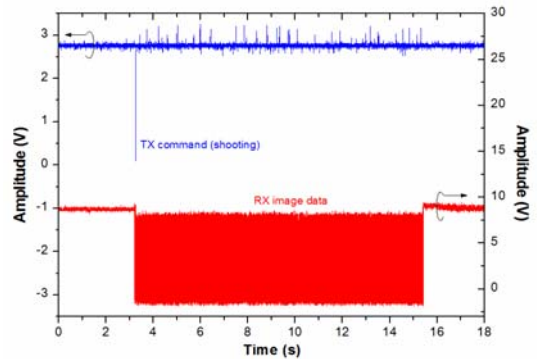


Figure 8: Captured waveform during the bidirectional data transmission

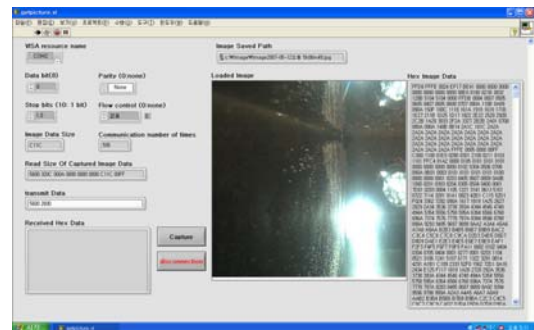


Figure 9: Monitoring screen programmed with LabVIEW®

5. 결 론

본 논문에서는 근거리 수중광무선 통신에 대한 연구를 보고하였다. 가시광 영역에서 수중채널의 감쇠특성을 고려하여 광 손실을 계산하였고 자유 공간에서의 전송특성과 비교하였다. 기존에 발표된 다양한 자료를 근거로 백색 LED 기반 가시광

통신 시스템을 설계하고 수중에서 양방향 통신이 가능함을 보였다. 조명용 광원으로 사용하는 백색 LED 1개와 저가격의 포토다이오드 7개로 구성된 송수신기를 통하여 CMOS 이미지 센서로 획득한 정지영상이 1 m 거리에서 성공적으로 전송됨을 보였다. 수중 채널의 광 감쇠 문제를 극복할 수 있는 고효율 광원의 설계와 광전변환 효율이 높은 수신기를 적용하여 통신거리를 늘린다면 실시간 해양 환경모니터링, 해저 탐사를 위한 센서네트워크, 수중 자율 이동체 및 로봇간의 통신, 수중 근거리 기밀통신 등에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] M. Stojanovic, "Underwater wireless communications: current achievements and research challenges," IEEE Oceanic Engineering Society Newsletter, pp. 1-6, 2006.

[2] R. B. Manjula, S. M. Sunilkumar, "Issues in underwater acoustic sensor network," Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 101-110, 2011.

[3] F. Schill, U. R. Zimmer, and J. Trumpp, "Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications," Proceeding of Australasian Conference on Robotics and Automation, pp. 1-8, 2004.

[4] <http://www.wirelessfibre.co.uk>; Accessed 4 Feb 2013.

[5] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," vol. 3, pp. 257-279, Ad Hoc Networks, 2005.

[6] D. Anguita, D. Brizzolara, and G. Parodi, "VHDL modules and circuits for underwater optical wireless communication systems," WSEAS Trans. Communications, vol. 9, pp. 525-552, 2010.

[7] L. Liu, S. Zhou, and J-H. Cui, "Prospects and problems of wireless communication for under-

water sensor networks," Wireless communications & mobile computing, pp. 977-994, 2008.

[8] N. Farr, A. D. Chave, L. Freitag, S. N. White, D. Yoerger, and F. Sonnichsen, "Optical modem technology for seafloor observatories," Oceans, pp. 1-6, 2006.

[9] N. Farr, A. Bowen, J. Ware, C. Pontbriand, and M. Tivey, "An integrated, underwater optical/acoustic communications system," Ocean Physics and Engineering, pp. 1-6, 2010.

[10] D. Anguita, D. Brizzolara, G. Parodi, and Q. Hu, "Optical wireless underwater communication for AUV: preliminary simulation and experimental results," IEEE Oceans, pp. 1-5, June 2011.

[11] M. Doniec, C. Detweiler, I. Vasilescu, and D. Rus, "Using optical communication for remote underwater robot operation," International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4017-4022, 2010.

[12] <http://moeri.kordi.re.kr>; Accessed 7 Feb 2013.

[13] <http://155.230.104.21>; Accessed 7 Feb 2013.

[14] Y. J. Kim and K. R. Sohn, "A study on the frequency modulation-based audio transmission system for short-range underwater optical wireless communications," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 1, pp. 166-171, 2012 (in Korean).

[15] K. R. Sohn and C. W. Sohn, "Optical wireless remote control using indoor LED lightings," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 8, pp. 1111-1116, 2012 (in Korean).