

## 수중 가시화 구명줄 시스템의 설계 및 제작

김우현<sup>1</sup> · 왕국명<sup>2</sup> · 길경석<sup>†</sup> · 김도정<sup>3</sup> · 서봉원<sup>4</sup> · 김수영<sup>5</sup> · 김영문<sup>6</sup>

(Received September 13, 2018 ; Revised November 28, 2018 ; Accepted November 28, 2018)

### Design and fabrication of an underwater visualization rescue-rope

Woo-Hyun Kim<sup>1</sup> · Guoming Wang<sup>2</sup> · Gyung-Suk Kil<sup>†</sup> · Do-Jung Kim<sup>3</sup> · Bong-Won Seo<sup>4</sup> · Su-Young Kim<sup>5</sup> · Young-Moon Kim<sup>6</sup>

**요약:** 구명줄은 시야 확보가 열악한 수중에서 잠수부에게 정확한 가이드라인과 귀로를 제공하기 위해 사용한다. 기존 구명줄은 무발광이거나 휘도가 매우 낮아 구분되는 표식을 제공하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 광섬유(Optical fiber)와 고출력 LED로 수중 구명줄의 가시화를 실현하였다. 수중 구명줄에 있어 가시화의 척도는 구명줄 표면 휘도이며, 활동 반경에서의 수중 투과성으로 광 파장, 휘도 및 효율의 최적화를 목적으로 실험적 연구를 수행하였다. 최종적으로 개발된 구명줄은 직경 10 mm, 인장강도 100 kg/cm<sup>2</sup>의 광섬유와 525 nm의 녹색 고출력 LED 광원으로 구성된다. 구명줄의 표면 휘도는 1,650 cd/cm<sup>2</sup>으로 탁한 수중에서도 반경 10 m 이상의 활동 반경을 제공할 수 있었다.

**주제어:** 구명줄, 광섬유, LED, 휘도, 수중

**Abstract:** Rescue-ropes are used to provide divers with a guideline and a return route under water with poor visibility. Existing lifelines can not provide a distinct indication owing to the absence of light source and/or the low luminance. Therefore, in this paper, an optical fiber and a high power LED were used to achieve the visualization of underwater rescue-rope. The visibility of lifeline is measured by the surface luminance of the optical fiber and therefore experimental studies were conducted to optimize the light wavelength, luminance, and efficiency with underwater permeability in the activity radius of drivers. The proposed rescue-rope system is composed of an optical fiber with a diameter of 10 mm and a tensile strength of 100 kg/cm<sup>2</sup>, as well as a high-power green LED with a wavelength of 525 nm. The surface luminance of rescue-rope was measured as 1,650 cd/cm<sup>2</sup>, which ensured that it can provide an activity radius more than 10 m even in the muddy water.

**Keywords:** Rescue-rope, Optical fiber, LED, Luminance, Underwater

## 1. 서론

잠수 장비를 사용하여 수중의 물체나 구조물의 상태를 조사·탐색·촬영·채집하고 시설물과 구조물을 검사 및 보수하는 산업 잠수사들은 수중으로 잠입 시 원활한 활동과 귀로 확보를 위해 구명줄을 이용한다. 빛이 없고 부유물이 많아 시야확보가 힘든 수중 구조물이나 좌초 선박 내에서 인명구조 또는 연구 조사 시, 잠수부들은 오직 손에 쥐고 있는 구명줄에만 의지할 수밖에 없다[1]. 가시화 구명줄은 잠수사들의 순간적인 공간지각능력의 저하로 방향성을 잃게 되었을 때 광섬유의 발광과 귀로의 시각적 표현으로 안정감을 제공할 수 있는 획기적 특징이 있다.

그러나 **Figure 1 (a)**의 기존 구명줄의 경우, 끊어지거나 꺾임 등 전기, 기계적 문제는 없으나 단순 가이드라인으로써 강한 인장강도와 경량화에만 집중되어 제작되었고, 발광체가 없어 잠수부의 활동 반경이 극히 제한적이다. 이를 개선하고자 최근 수중 구명줄에 **Figure 1 (b)**의 전계 발광(Electro-luminescent, EL)선을 적용하여 가시화에 대한 연구 및 시제품 제작이 진행되어 왔다. 하지만 전계 발광선은 길이에 비례하여 높은 전압과 큰 전류가 필요하며 기타 조명기구와 비교하여 휘도가 매우 낮고 방수, 절연 등의 문제가 있다. 또한 수중조사에 구명줄과 병용하여 가시화를 위해 비닐 투명호스에 LED(Light emitting diode)를 삽입한라이트

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1672-2812>): Professor, Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: kilgs@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4414

1 MS candidate, Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: steady92@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4893

2 Ph.D candidate, Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: journey@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4893

3 Investigator, Department of Scientific Investigation, Busan Metropolitan Police Agency, E-mail: kdj5667@gmail.com, Tel: 051-899-2971

4 Investigator, Department of Scientific Investigation, Busan Metropolitan Police Agency, E-mail: nstop2000@hanmail.net, Tel: 051-409-0305

5 Investigator, Department of Scientific Investigation, Busan Metropolitan Police Agency, E-mail: poleagle63@hanmail.net, Tel: 051-409-0277

6 Investigator, Department of Scientific Investigation, Busan Metropolitan Police Agency, E-mail: 001kym@hanmail.net, Tel: 051-899-2973

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

라인을 수중에서 사용해보려 했으나, 낮은 인장강도와 LED가 수압에 파손되는 등의 문제로 적용되지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 구명줄의 가시화를 목적으로, 광섬유를 구명줄로 하면서 동시에 고효율 LED광원을 적용하여, 구명줄과 가시화 기능을 모두 확보하였다. 수중 실험으로부터 수중에서 최적의 광파장과 휘도 등 전기광학적 특성을 도출하였으며, 본 연구결과는 잠수사의 활동 영역을 확대시키고 동시에 안전을 확보하는데 기여할 수 있다고 판단된다.



Figure 1: Rescue-rope

## 2. 이론

### 2.1 구명줄의 가시화

기존 전계 발광선을 이용한 구명줄은 두 개의 평단 전극 사이에 길이에 따라 수십 V ~ 수백 V의 높은 전압을 인가하여 전극 사이에 미소한 발광을 이용한 것이며, 제조 시 형광물질에 따라 색상이 정해지므로 발광색의 변경은 불가능하다. 이들 제품들은 휘도가 40 cd/cm<sup>2</sup> 정도의 미소한 전계발광으로 매우 낮아 수중에서 시계(視界)확보는 거의 어려운 실정이다. 또한 외부 충격이나 전극 손상 시 절연 파괴의 위험이 있으며, 방수를 위해 추가적인 방수 구조의 설계와 제작이 필요하다. 그리고 전계 발광선의 인장 강도 보강을 위해 강선 등 별도의 보조선이 요구되나, 수중에서 최소한의 발광을 얻을 수 있는 다른 대책이 없어 현재 일반적으로 사용되고 있다.

수중 구명줄의 가시화를 위해 사용된 또 다른 방법은 투명 고무호스에 LED 소자를 내장하여 적용을 시도하였다. 고효율 LED 사용으로 휘도를 높게 할 수 있으나, 고무호스의 꺾임이나 수압으로 절연이 파괴되는 문제점이 있어 상용화되지 못하였다.

본 논문에서 구명줄의 가시화에 적용한 광섬유(Optical fiber)는 PMMA(Poly-methyl methacrylate) 재질로 가시광선의 투과율이 90% 이상으로 높고, 요구되는 강도를 직경에 따라 충분히 얻을 수 있다. 비금속으로 부식의 문제가 없고 광의 투과와 반사로 전파됨으로써 절연 파괴 등의 전기적 문제가 발생하지 않는다. 기존 전계 발광선이나 LED 고무호스를 이용한 것과는 달리 전기적 회로를 내장하지 않으므로 발열이 없고 최고등급인 IP 69인 방수가 가능하다. 또한 수중 조사 시 광원의 색상은 녹색이 최적화 하지만 기타 목적에 따라 광섬유에 입사하는 광원을 바꾸어 다양한 색상 연출이 가능하며, 광원의 발산 광속의 조절로 구명줄의 휘도를 쉽게 조절할 수 있어 신호, 표시, 조사용 등 광범위한 활용이 가능하다[2].

### 2.2 빛의 수중 투과

수중 구명줄의 가시화 기능은 구명줄에서 발산하는 광속이 수중에서 멀리 투과되어야 하며, 또한 잠수사가 쉽게 인지 가능한 파장이어야 한다. 따라서 본 논문에서는 가시광의 수중 투과와 인간의 눈에 잘 인지되는 정도를 나타내는 비시감도(Relative luminous efficiency)에 대한 분석을 하였다.

Figure 2는 해수면에 입사되는 일광(日光)의 가시광 대역에서 수면 입사광의 세기를 기준으로 1%까지 감소되는 수심을 나타낸 것이다[3][4]. 연안(Costal water)의 경우, 청색 파장(450 ~ 480 nm)은 수심 75 m, 녹색 파장(500 ~ 540 nm)은 80 m 그리고 적색 파장 (620 ~ 750 nm)은 18 m로 나타났다. 국립해양조사원에 따르면, 한반도 주변 연안 및 서해안의 경우 100 m 내의 수심을 보이며 동해 먼 바다의 경우 최대 2,000 m의 수심을 보인다[5]. 일반적으로 잠수사가 투입되어 탐색, 조사 및 구조 활동을 할 수 있는 깊이는 50 m 이내로, 가시광 대역에서 수중 투과도가 가장 높은 파장은 450 nm ~ 540 nm의 청색과 녹색이다. 인간의 시각 특성 즉, 가시 영역에서의 비시감도를 고려하면, Figure 3에서와 같이

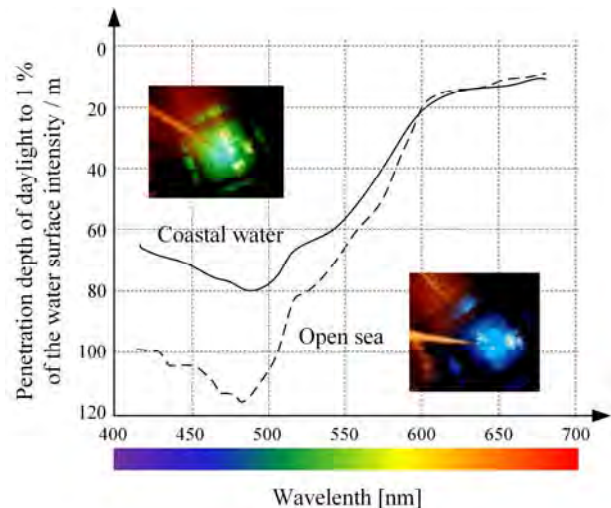


Figure 2: Penetration of light into the water

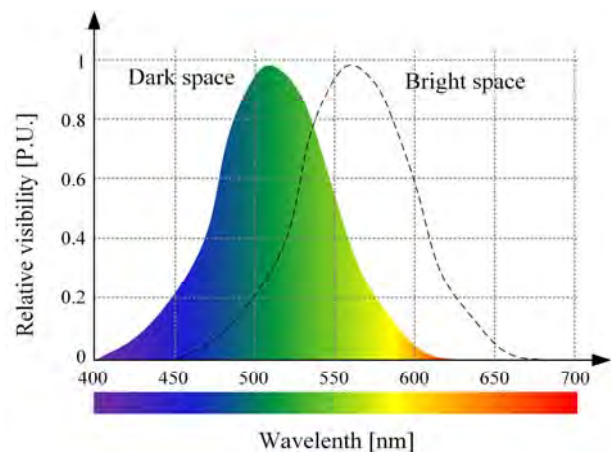


Figure 3: Purkinje effect and relative visibility

주간 밝은 곳에서는 555 nm의 황록색이 가장 잘 보이는 반면, 수중 구조물이나 야간에는 퍼킨제 효과(Purkinje effect)로 녹색이 가장 잘 보이게 된다. 다른 광원과는 달리 LED는 파장 선택과 구명줄 표면의 휘도 조절이 용이하므로 적색(R), 녹색(G) 및 청색(B)의 LED광원과 측면발광(Side glow)구조의 광섬유를 적용하여 수중에서 빛의 투과와 인지능력을 분석하였다.

### 3. 수중 투과 실험

빛의 수중 투과와 잠수사의 구명줄 인지 정도를 평가하기 위한 실험용 구명줄 시스템은 적색, 녹색 및 청색 3가지 색상의 선택이 가능한 제어부와 전원부 그리고 광섬유로 구성하였다. LED 광원의 제어부는 정격전압 36 V, 1 A의 고출력 RGB 3색 LED와 방열장치(Heat sink)로 제작하고, 전원은 36 V 연축전지를 사용하였다.

LED 구동과 광량은 정전류(Constant current)형 강압(Step-down)컨버터로 제어하였다[6][7]. 광섬유는 수중에서 코어(Core)의 보호를 위해 클래드(Clad)가 입혀진 형태로 측면 발광을 하며, 총 길이는 50 m이고 5 m마다 표시가 되어 있으며 가이드라인과 고정을 위한 클립이 부착되어 있다. 광섬유는 빛을 전파시키는 통로로써 빛 에너지를 전반사 원리로 전송하는 역할을 하며 부분 손상이 되더라도 절단되지 않는 한 광을 말단까지 보낼 수 있으며, 방수에 문제가 없다.

빛을 발산하는 광섬유의 정량적 특성은 단위 면적당 밝기(눈부심)의 정도를 나타내는 휘도  $cd/cm^2$ 를 기준하였으며, 이는 구명줄이 특정 방향으로 빛을 조사하기 위한 것이 아니라 잠수사가 구명줄을 인지하게 해야 되기 때문이다[8].

광원별 광섬유 표면에서의 측정된 파장 및 휘도를 Table 1 및 Figure 4에서 보여준다. 실험에 사용된 LED는 각각 36 W이며, 광섬유 표면의 휘도는 녹색이 가장 높았다.

Table 1: Luminance by LED color

LED color	Wavelength [nm]	Luminance [ $cd/cm^2$ ]
Red	636	100
Green	517	120
Blue	457	57.1

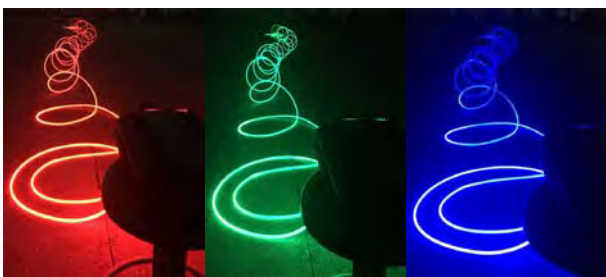


Figure 4: Visualization rescue-rope

이것은 소비전력은 동일하지만 LED의 광효율은 녹색이 높기 때문이며, 광섬유의 광전달 특성에 기인한 것은 아니다.

수중 실험은 민간 잠수사 및 경찰청 과학수사과와 공동으로 수행하였으며, Figure 5와 같이 정박시킨 선박에서 무게추를 부착한 광섬유를 수직으로 내려 수심 5 m 마다 영상을 촬영하였다. 실험은 주간 및 야간에 총 2 회 실시하였으며, 주간에 소형 선박을 이용해 수심 20 m 이상의 연안에서 진행하였다. 주간 실험의 경우, 상당 수심까지 태양광 투과로 구명줄의 가시화를 정량적으로 평가하는데는 적합하지 않았다. 야간 실험은 동일한 조건에서 광섬유를 내려 시감도 분석과 깊이에 따른 광섬유의 측면발광으로 시계 거리를 측정하였다.

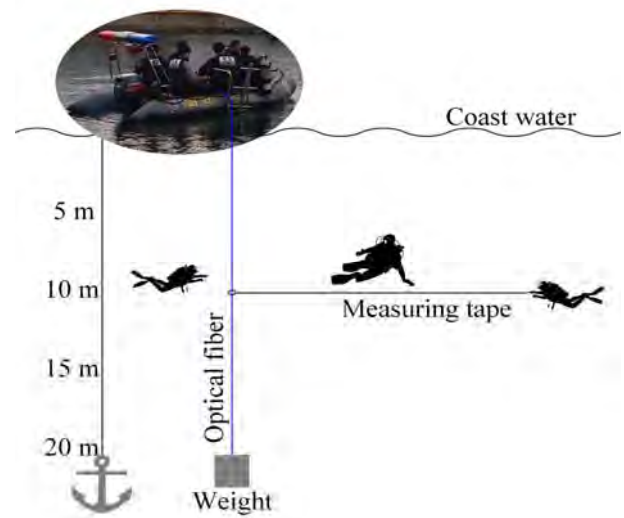


Figure 5: Underwater experiment

Figure 6은 수중실험 당시 촬영한 사진으로 수심 10 m, 광섬유로부터 3 m 거리에서 각 파장별로 촬영한 사진이다. 빛이 없는 야간 실험에서는 가시화 구명줄 근처에서 구명줄을 인지할 수 있었다.

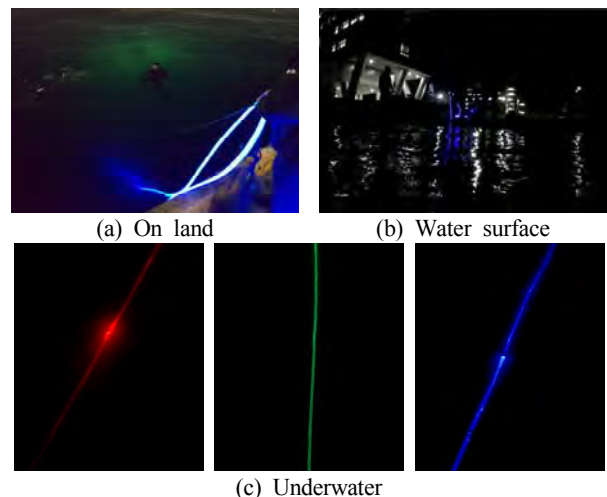


Figure 6: On-site experiment

동일한 출력을 가지는 LED로 실험을 진행하였으나, 적색 파장의 경우 광섬유로부터 4 m 이상 멀어지면 점으로 보이며 구분이 불가능하였다. 이는 코어를 보호하는 클래드의 제조 시 결함으로 균일한 모양이 아니거나 물리적 손상으로 인해 변형된 부분에서 빛의 집중 발산으로, 휘도가 높지만 빛의 손실이 많기 때문이라고 판단하였다.

청색 파장은 6 m에서 시계 확보가 어려웠으며, 녹색 파장의 경우 8 m까지 잠수사가 인지할 수 있었다. 광섬유로 발산되는 빛이 10 m 이내인 이유는 수중의 부유물들로 인한 빛의 산란 때문인데, 비시감도가 높은 녹색 파장에서 휘도가 높아 광의 전달거리는 증가하게 된다[9].

### 4. 설계 및 제작

#### 4.1 구명줄 시스템

수중실험으로부터 녹색(525 nm)파장을 가지는 고효율 LED를 광원으로 적용하였다. LED는 COB(Chip on board)형으로 정격은 Table 2와 같다.

Table 2: Specification of COB

Characteristics	LED
Rated forward voltage	5.2 V
Max. forward current	13.5 A
Max. luminous flux at 13.5 A	2,250 lm
Luminous area	12 mm <sup>2</sup> (4 mm×3 mm)
Chromaticity coordinates	x = 0.167, y = 0.704
Lifetime	60,000 h

LED광원의 형태는 LED의 발광면적이 광섬유의 단면적이내가 되어 입사손실이 없도록 고효율 COB(Chip on board)형을 선정하였다. 본 실험에 있어서는 최대 정격전류이내인 10 A로 구동하였으며, 이 때 총 광속은 1,900 lm, 순방향 전압은 4 V로 소비전력은 40 W가 된다.

기존 수중실험용으로 제작한 것은 LED광원과 광섬유만으로 구성하였지만, 최종 제작된 시제품은 Figure 7과 같

이 광 손실을 줄이기 위한 집광판과 결합부, 5 m마다 체결된 집광렌즈 그리고 중단에서의 광손실을 방지해주는 반사판으로 구성하였다[10]. 사용된 광섬유의 사양은 Table 3과 같다. 코어의 수명은 LED와 비슷한 5만 시간 정도이며 인장강도는 100 kg/cm<sup>2</sup>으로 구명줄에 요구되는 충분한 강도를 확보하고 있다[11]. 광섬유에서 광이 전파할 때, 감쇄는 0.15 dB/m이며, 수온의 영향은 받지 않고 곡률 반경과 회복력이 크기 때문에 구명줄로 기계적, 전기광학적 및 환경적으로 매우 적합하다.

Table 3: Specification of optical fiber

Item	Specification
Outer diameter	10 mm
Spool length	100 m/RL
Cladding material	Clear PVC
Typical attenuation	< 0.15 dB/m
Weight	2.5 kg/RL
Working lifetime	50,000 h
Working temperature	-40 ~ 70 °C
Tensile strength	100 kg/cm <sup>2</sup>
Core material	Polymethyl methacrylate

#### 4.2 가시화 증대 방안

해수에서 빛의 수중 투과율은 해수 온도, 플랑크톤 종류, 염분 및 농도에 따라 차이가 있으며, 부유물이 많아 빛의 투과가 힘든 해저에서는 휘도를 높게 해야 한다. 따라서 구명줄의 표면 휘도를 증가시키기 위해서 광섬유에 적용 가능한 방법으로, 외부에 일정 간격으로 폴리카보네이트 재질의 집광렌즈를 부착하는 것과 구명줄 전체에 재킷을 씌워 광 손실을 최소화하고 일정 간격마다 재킷을 벗겨내어 점선(點線)형태로 사용하는 것이다.

광 손실을 줄이는 또 다른 방법으로 시제품에 적용된, 중단에 반사판을 설치하는 것이다. Figure 8의 점선은 반사판을 사용하지 않았을 때 전류에 따른 광섬유 표면의 휘도

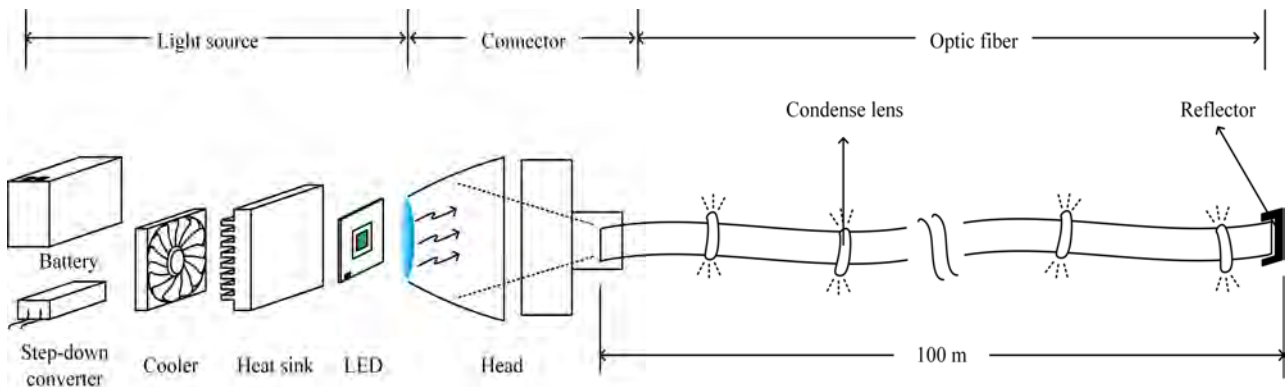


Figure 7: Structure of visualization rescue-rope system

이고, 청색선은 반사판을 사용한 경우이다. 시스템의 정격 전류인 10 A에서 반사판의 유무로 휘도는 4.63 % 차이가 났으며 최대 동작전류인 13.5 A에서는 휘도를 약 10.1 % 증가시킬 수 있었다.

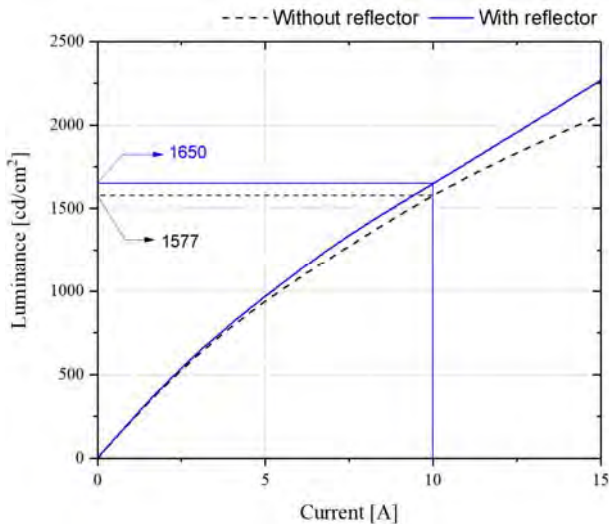


Figure 8: Current-luminance curve

## 5. 결 론

잠수사의 효율적인 수중활동과 귀로에 필요한 생명줄을 가시화하기 위하여 광섬유를 적용한 LED 광시스템을 제작하였다. 최종 시제품은 소비전력 40 W의 LED 모듈을 이용하여 최적 시감도의 녹색 파장(525 nm)으로 광을 전송한다. 구명줄로 광섬유를 적용하여 충분한 인장강도를 얻을 수 있었으며, 외부 충격으로부터의 굽힘과 손상에 대한 내구성이 강하고, 추가적인 방수구조도 필요하지 않으므로 수중 구명줄 기능으로 최적합하다고 판단된다.

최종 시제작 가시화 구명줄 시스템에서 구명줄 표면의 휘도는 1,650 cd/cm<sup>2</sup>로 수중 실험용 시스템에서 표면휘도 120 cd/cm<sup>2</sup>와 비교해 13.5배 증가한 것으로, 수중에서 10 m 이상 충분히 인식이 가능할 것으로 판단된다. 제작된 가시화 구명줄 시스템은 목적에 따라 광원을 변경으로 다양한 색상 연출과 휘도 조절도 가능하여 광범위하게 활용이 가능할 것으로 기대한다.

## References

[1] W. H. Kim, G. M. Wang, G. S. Kil, D. J. Kim, B. W. Seo, S. Y. Kim, and Y. M. Kim, "Visualization of a underwater rescue rope using optical fiber," Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Korean Society of Marine Engineering Spring Conference, p. 278, 2018 (in Korea).

[2] I. K. Kim, H. E. Cho, H. S. Kwon, H. G. Cho, and G. S. Kil, "Design guide of surface and watertight

LED luminaires for naval vessels," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 5, pp. 654-660, 2011 (in Korean).

- [3] Advanced Aquarist, <https://www.advancedaquarist.com/2012/10/aa-feature>, Accessed October 1, 2012.
- [4] S. K. Choi, J. S. Choi, K. S. Jung, U. Y. Jang, and G. S. Kil, "Analysis on sea water penetration characteristics of high brightness LED," Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering 2009 First Conference, pp. 441-442, 2009 (in Korean).
- [5] Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, <http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>, Accessed January 24, 2018.
- [6] D. G. Kim, I. K. Kim, S. Y. Yu, W. Kwon, and G. S. Kil, "Comparative analysis on heat radiation of LED luminaires," Proceedings of the Korean Society for Railway Conference, pp. 1530-1535, 2011 (in Korean).
- [7] S. K. Choi, S. J. Kim, D. W. Park, G. S. Kil, C. Y. Choi, and S. B. Song, "Design and fabrication of an energy saving LED fishing lamp," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 4, pp. 515-521, 2010 (in Korean).
- [8] H. K. Ji, S. K. Choi, S. J. Kim, S. J. Park, and G. S. Kil, "A study on the application of high brightness LED to shipboard light," Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering 2009 First Conference, pp. 93-94, 2009 (in Korean).
- [9] S. J. Kim, S. W. Cha, G. S. Kil, H. S. Shin, C. Y. Choi, and W. Kim, "Field test and analysis of LED fishing lamps," Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering 2010 First Conference, pp. 429-430, 2010 (in Korean).
- [10] S. J. Kim, S. J. Kim, H. J. Ha, G. S. Kil, and I. K. Kim, "Design and fabrication of a high power LED searchlight," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 6, pp. 737-743, 2014 (in Korean).
- [11] S. H. Kang and Y. S. Kim, "Effects of thickness and applied load on wear mechanisms of PMMA(Poly Methyl Methacrylate) coating layers," Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 152-155, 2004 (in Korean).