

# 잠수함용 프로펠러 표면부 균열 발생에 대한 연구

정운화<sup>1\*</sup>, 이형신<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국방기술진흥연구소 해상기술기획팀, <sup>2</sup>국방기술품질원 함정센터 2팀

## A Study on the Cause of Crack on the Surface of the Propeller for Submarine

Un-Hwa Jung<sup>1\*</sup>, Hyeong-Sin Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Naval Systems Technology Planning Team, Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT)

<sup>2</sup>Naval Sea System Team 2, Defence Agency for Technology and Quality(DTaq)

**요약** 본 연구는 잠수함용 프로펠러 표면부에 균열이 발생하여 원인규명을 위하여 수행하였다. 프로펠러 균열은 해군에 인수된 후 약 5년이 경과된 시점에 발견되었으며, 프로펠러 보수용접부 표면을 따라 실금형태로 형성되었지만, 제작(함정건조)시 보수용접부 표면균열은 없는 것으로 파악되었다. 원인분석을 위하여 주사전자현미경, 균열구간 미세조직 관찰, 인장테스트, 물성 평가 등을 수행하였다. 주사전자현미경, 균열구간 미세조직 관찰 결과 프로펠러 보수용접부 용착금속 표면부의 기공성 결함이 기점으로 작용해 균열이 발생되었으며, 이후 용접 HAZ의 선형성 또는 기공성 결함과 연결되어 모재 내부까지 균열이 전파된 것으로 분석되었다. 소재특성을 평가 결과 화학성분, 항복강도 및 연신율은 규정을 만족하였다. 따라서 함 인도후 운용기간동안 프로펠러의 응력누적이 보수용접부위의 기공성 결함에 작용하여 최종 표면균열로 전달되어 표면부 결함이 발생된 것으로 결론을 얻었다. 향후 해군에서 요구되는 해외직도입품과 동등한 품질로 개선하기 위해서는 적절한 주조방안으로 건전한 주물품을 제작해야 함은 물론 적절한 보수 용접 방안의 정립이 필요하며, 이를 통해 기공성 및 선형성 결함이 없는 건전한 용접부를 확보해야 한다.

**Abstract** The purpose of this study was to establish the cause of crack formation on the surface of a submarine propeller. The propeller crack was found after five years of the takeover of the submarine by the Navy. In particular, a fine crack was formed along the repaired welding surface, even though there was no crack formation on repair welds during the ship building. To further analyze the developed crack, measurement methods such as SEM (scanning electron microscopy), observation of fine tissue on the crack section, tensile coupon test, and cause analysis through material properties evaluation were used. The SEM and crack microstructure observation results showed that an initially formed small crack acts as a starting point due to defects in the repair weld surface and spreads into the base material as it is connected with linearity or porous defects in the weld heize. Moreover, the material properties evaluation results show that the chemical composition, yield strength, and elongation rate were satisfied. The failure mechanism further involves the transfer of stress accumulation from the propeller to the surface during the ship's operational period, leading to the creation of a final surface crack at the repaired area. More than understanding this mechanism, it is also necessary to establish proper repair and welding methods by researching surface cracks of submarines to achieve the same quality improvement as the one's obtained by researchers overseas. Also, suitable repair welding methods must be established to ensure a sound weld without porosity and linearity defects.

**Keywords** : Crack, Cause Analysis Through Material Properties Evaluation, Propeller, SEM, Tensile Coupon Test.

\*Corresponding Author : Un-Hwa Jung(KRIT)

email: 10780dtaq@dtaq.re.kr

Received September 16, 2021

Accepted January 7, 2022

Revised October 28, 2021

Published January 31, 2022

## 1. 서론

북한이 잠수함에서 모의탄도탄 사출시험에 성공하면서 한반도 주변의 잠수함 전력에 관심이 쏠리고 있다. 앞으로 북한이 실제 잠수함 발사 탄도미사일(SLBM)의 개발에 성공해 전력화 한다면 한반도 주변 수중전력의 지형도에도 변화가 예상되고 있다. 잠수함은 은밀성과 기동성을 갖추고 있어 가장 신뢰성 있는 보복 수단 중 하나로 꼽힌다. 잠수함 전력은 적은 비용과 소수전력으로도 상당한 효과가 있는 비대칭 전력으로 인식돼 각 국은 지속적으로 증강하고 있다. 대한민국 해군은 총0척의 209급 잠수함을 건조하여 전력화하고 실전에 배치했으며, 또한 214급 잠수함을 0척을 확보하고, 모두 우수한 성능과 신뢰성을 보여주고 있다.

한편, 214급 잠수함 사업은 독일 HDW사에서 개발한 TYPE 214급 잠수함을 국제기술협력에 의한 국내건조함정사업으로 '00.12.12 국내계약에 의해 '07~'09년까지 0척의 잠수함을 건조하여 해군에 인도한 사업이다.

본 연구의 관심대상인 잠수함 프로펠러는 214급 잠수함 건조사업에서 체계개발 국산화에 해당되는 품목으로 관련 프로펠러 재질 등이 HDW사에 귀속된 사양으로 초기 제작시 재질연구 단계로부터 진행했다면 상세한 정보가 제공되지만, 국산화 단계에서는 관련 재질의 화학적 성분, 기계적 성질 및 형상치수로 이루어진 사양서를 토대로 검사 및 시험평가로 보증한 제품이다.

하지만, 인도한 잠수함중 5년 경과된 시점에서 국산화 개발한 프로펠러 표면에 다량의 실금형태의 균열이 확인되어 이에 대한 원인규명 및 후속조치를 위한 연구가 필요하였다.

## 2. 본론

### 2.1 프로펠러 현장조사

잠수함용 프로펠러 재질은 MnCuAlBz 계열로 일반적 인 재질보다 Mn성분이 다량 함유되어 강도는 높으나 취성이 약한 특징을 가지고 있으며[4], 이는 피탐 효과를 최소화하기 위하여 채택한 재질로 개발당시 독일 선급에서 재질에 대한 품질보증을 하였으며 사형주조로 생산한 제품이다. 본 프로펠러는 해군에 인수된 후 5년이 경과된 시점에서 잠수함 야전정비가 기간이 도래되어 상가 후 프로펠러 외관검사 결과 프로펠러 날개의 절반에서

총 151개소의 균열을 확인하였으며, 그 표면부위는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1. Visual inspection results of cracks on surface of the propeller

균열상태는 표면을 따라 실금형태로 형성되었으며, 깊이 이어질 가능성(최고 7mm)이 있는 것으로 판단되었고, 균열개소의 크기를 측정된 결과 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of propeller surface crack visual inspection records

Spec.	Crack / Size	
	Front side	Rear side
No. 1	5 point (8~48mm)	10point (7~25mm)
No. 2	9point (10~32mm)	9point (3~30mm)
No. 3	6point (11~30mm)	15point (11~30mm)
No. 4	2point (15~23mm)	10point (8~35mm)
No. 5	32point (10~72mm)	7point (12~23mm)
No. 6	21point (10~42mm)	2point (10~26mm)
No. 7	10point (5~78mm)	13point (10~25mm)

균열은 프로펠러의 모든 블레이드에서 동일한 양상으로 발생되었으며, Fig. 2는 전체 블레이드중 균열발생이 가장 많은 블레이드 1개를 본 연구를 위한 시편채취를 위해 절단한 상태를 보여주고 있으며, Fig. 3은 블레이드에 이 물질을 제거한 상태에서 균열표면을 확인하였다.



Fig. 2. Propeller blade cutting for specimen



Fig. 3. Check blade crack point and mark specimen position

## 2.2 시편제작

프로펠러 블레이드 표면 균열발생의 원인분석을 위하여 시편 채취를 하였으며, 평가항목은 파손부 육안 및 파면 관찰 그리고 소재특성 평가를 수행하였으며, Fig. 4는 시편채취 위치로 균열시편 2개(균열1, 균열2), 화학성분 분석 시편 각 1개 및 인장시편 4개를 제작하였다.

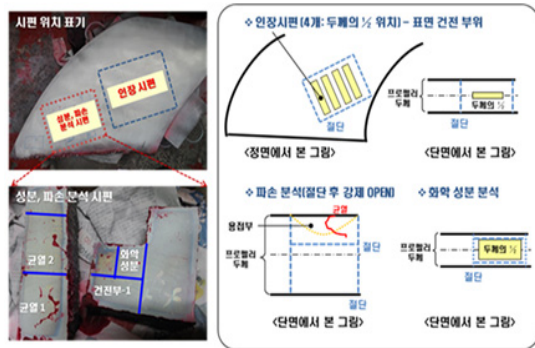


Fig. 4. Methods and positions Specimen

## 2.3 파손부 육안 관찰

균열부를 대상으로 파손유형의 확인을 위해 육안 관찰한 결과, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 소재 건전부와 보수 용접부의 영역으로 구분할 수 있었으며, 모든 균열들은 보수 용접부 영역 내에서 관찰되었다. 정확한 손상 양상의 확인을 위해 "균열 1" 시편은 강제 개방하였고, "균열 2" 시편은 균열 단면부의 상태를 관찰하기 위해 광학 현미경과 전자현미경을 이용하여 파면 및 미세조직 관찰을 수행하였다.

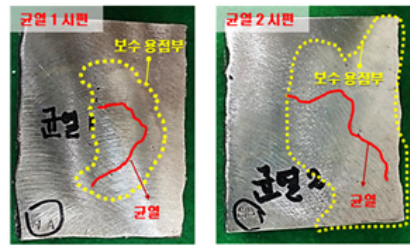


Fig. 5. Blade specimens "crack 1" and "crack 2"

## 2.4 파면 SEM 관찰

Fig. 5의 "균열 1" 시편을 강제개방 후 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과로 Fig. 6에서 보듯이 균열 기점부에는 기공성 결함이, 그 부근에서는 연성 파괴인 dimple pattern이 각각 관찰되었다. 그러나 그 외의 전파부 영역에서는 2차 오염물이 덮여 있어 파면 양상을 확인하기가 어려웠다. Fig. 7은 균열전파부 2차 오염물에 대한 EDS 분석 결과인데, Mg과 Ca 원소의 복합산화물임이 확인되었다. 이와 같은 Mg-Ca 복합산화물은 프로펠러 손상 후 파면과 바닷물의 화학반응에 의해 형성된 것으로 판단되었다.

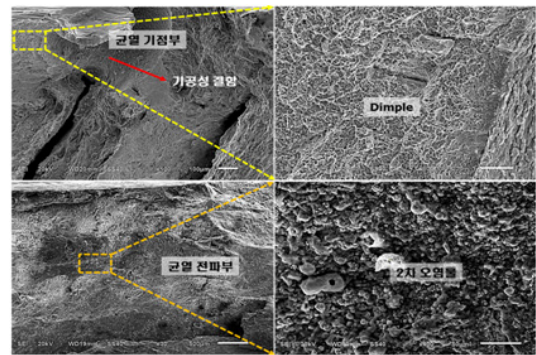


Fig. 6. Result of SEM observations for each part of the crack

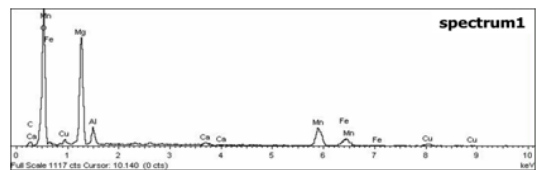


Fig. 7. Result of EDS analysis of pollutant

## 2.5 균열 단면부 미세조직 관찰

Fig. 8은 Fig. 5의 "균열 2" 시편의 절단 후 단면부에 대한 광학현미경 관찰 결과로서 Fig. 8에 나타낸 것과

같이 “균열 2” 시편의 단면부는 보수 용접부-1, 보수 용접부-2, 열영향부 및 모재로 구분할 수 있었고, 균열은 네 영역 모두를 관통하는 형태로 확인되었다. Fig. 8의 각 부위별 확대 관찰 결과에서도 알 수 있듯이 모재에서는 주상정 조직이, 보수 용접부-1은 모재의 미세조직 대비 미세하면서 밀도가 높은 주상정 조직이, 보수 용접부-2에서는 보수 용접부-1보다 더 미세한 구상화 상들이 각각 관찰되었다. 또한, 용접 열영향부에서는 다수의 선형성 결함 및 기공성 결함이 관찰되었고, 주상정 조직이 보수용접 열영향에 의해 상당수 구상화가 진행되었다. 이처럼 용접 열영향부에서 확인된 결함은 용접 중 열영향에 의해 형성되었을 것으로 판단된다[5]. Fig. 9은 Fig. 8의 단면부의 구분된 영역의 경도 결과 값으로 보수 용접부-2에서 가장 높은 경도 값을, 반면 모재는 가장 낮은 경도 값을 각각 나타냈다. Fig. 8에서 보수 용접부는 미세조직적으로 2개 영역으로 구분할 수 있고, 2개 영역의 경도 결과 값도 큰 차이를 보여주고 있으며, Fig. 10은 각 부분의 EDS 분석 결과인데, 모재와 열영향부의 어두운 부분의 상은 밝은 부분의 상에 비해 상대적으로 Mn-rich한 상으로 분석되었고, 보수 용접부-1은 모재와 동일한 성분을 보이는 반면, 보수 용접부-2는 상대적으로 Cu-rich한 Ni-Al Bronze 성분 결과와 유사하였다. 이와 같은 분석결과로부터 보수 용접시 Ni-Al Bronze 용착재료를 먼저 용접하고, 그 용접 비드 상부에 모재와 화학성분이 유사한 용접재료를 이용하여 2차 용접한 것으로 판단되었다. 즉, 단일 용접재료가 아닌 2개의 용접 재료를 이용해서 보수 용접을 수행한 것으로 판단되었다.

Fig. 11은 단면부 균열을 좀 더 자세히 관찰하기 위해 SEM을 이용하여 관찰한 결과로서 Fig. 8의 광학 현미경 관찰시에는 하나의 균열로 관찰되었으나, 확대 관찰한 결과 균열은 2개의 균열이 서로 연결되어 있었다.

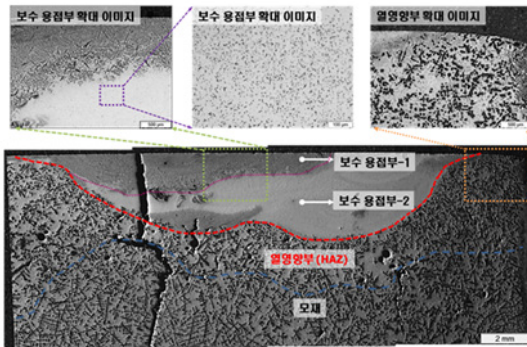


Fig. 8. Result of microstructure observation of "crack 2"

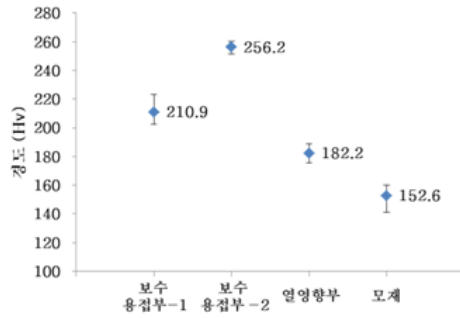


Fig. 9. Result of hardness test for each area of the "crack 2"

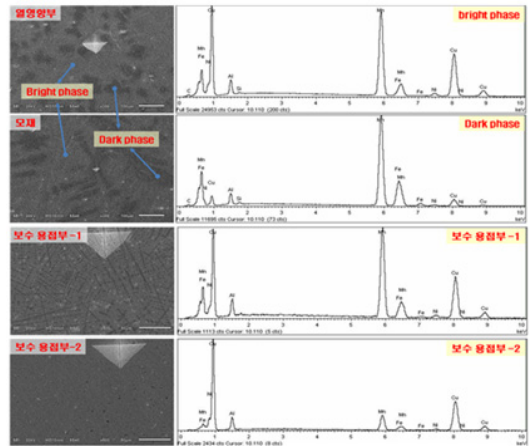


Fig. 10. Result of EDS analysis for each area of the "crack 2"

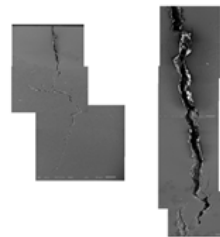


Fig. 11. Result of SEM observations of the "crack 2"

즉, 균열은 보수 용접부 표면의 기공성 결함에서 개시된 후 내부로 전파되어 내부에 존재하는 선형 결함 또는 기공성 결함과 연결되는 과정을 통해 균열이 전파된 것이라 판단되었다. Fig. 12은 “균열 2” 시편의 균열 내부에서 관찰된 이물질에 대한 EDS 분석결과로서 균열 내부에 존재하는 것은 마운팅 재료인 탄소로 확인되었고 그 외 다른 개재물은 확인할 수 없었다.

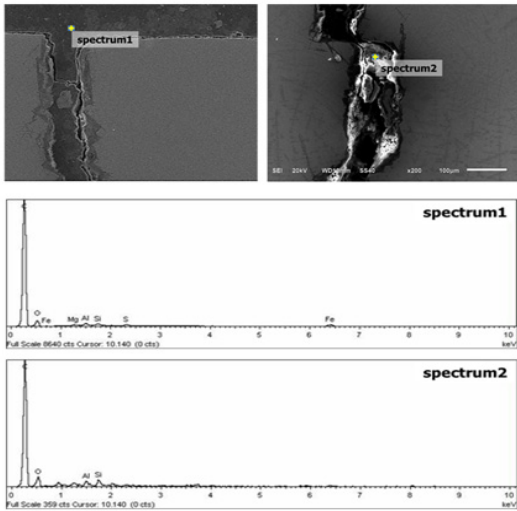


Fig. 12. Result of EDS analysis

### 2.6 파면 인장시편 시험

Fig. 13은 본품 블레이드에서 샘플링한 인장시편의 시험완료 후 파단 위치 및 인장 파면 관찰 결과로서 인장 파면에서 주조 결함이 관찰되었으며, 이 부위를 대상으로 파면 SEM 관찰 및 EDS 분석을 수행하였다. 그 결과, 본 주조 결함은 기공성 결함으로 확인되었고, 파단 전파 방향은 주조 결함에서 시작하여 화살표와 같이 파단이 진행되었다.

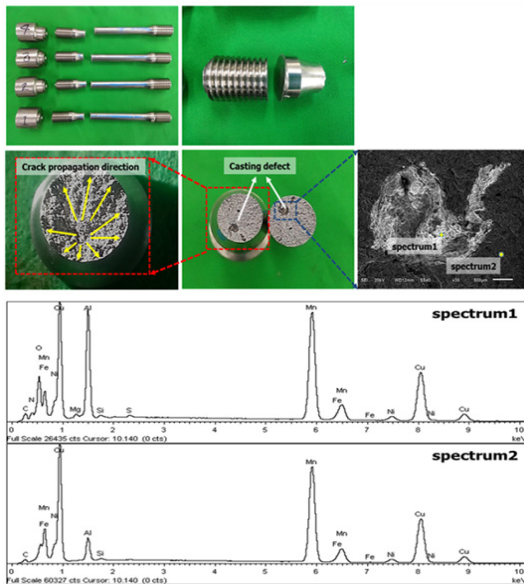


Fig. 13. After tensile test, specimen fracture casting defect and EDS result

### 2.7 소재특성 평가

Table 2는 파손품 모재에 대한 화학성분 분석 결과인데, G-MnCuAlBz 규정을 만족하였다.

Table 2. Result of chemical composition of the propeller

	Chemical composition(wt, %)								
	Cu	Mn	Al	Fe	Ni	Sn	Pb	Si	Zn
발주	** ** *	** ** *	* **	* **	* **	** ** *	* **	* **	* ** *
Original	Rem.	** ** *	* **	* **	* **	** ** *	* **	* **	* ** *

Table 3은 파손품 모재 건전부에서의 인장시험 평가 결과로서 일반적으로 선급 규정에서는 본품에 대한 인장 특성 요구치 규정은 없고 별주 시편에 대한 요구치가 있으며, 이를 반영하여 시험 결과와 규정을 비교하였다. 항복강도와 연신율은 관련 규정을 만족하였으나, 인장강도는 규정에 미달되었다. 이처럼 본품 주조품에서의 인장 특성의 저하는 주조결함에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 주조 특성상 주조 결함이 없는 본품을 제작하기 어렵고, 질량 효과(mass effect)에 의해 주조품의 크기가 증가하면, 별주 블록 시편 대비 응고속도가 감소해 결정립 크기가 커질 뿐만 아니라 편석 및 주조 결함이 발생할 가능성이 증가하므로 인장 특성이 감소하는 특징이 있다[6]. 별주 시편 인장 특성 대비 본품에서의 인장 특성은 30% 저하된다는 보고가 있다. 본품 주조품에서의 항복강도의 상승의 원인을 확인할 없으며, 이를 확인하기 위해서는 별주 시험편과 본체 시험편의 미세조직을 비교해야하나, 현재 별주 시험편이 없어 비교할 수 없었다. 하지만, 이와 같은 인장 특성은 “A new high damping alloy” 보고서 동일한 결과로서[2] 실제 별주 시편에서는 인장시험 시 A zone(게이지 내에서 파단)에서 파단이 발생되었으

Table 3. Result of tensile test of the 'original propeller' and 'separately produced specimen'

	Chemical composition(wt, %)		
	Y.S	T.S	EL
Original propeller 4	** ** *	** ** *	* ** *
Original propeller 3	** ** *	** ** *	* ** *
Original propeller 2	** ** *	** ** *	* ** *
Original propeller 1	** ** *	** ** *	* ** *
Separately produced specimen	** ** *	** ** *	* ** *
Rule 'G-MnCuAlBz'	** ** *	** ** *	* ** *

나, 본품 시편의 경우 B 혹은 C zone(게이지 외 파단)에서 파단이 발생하였다. 이를 확인하기 위해 인장 시편 파 단면을 육안으로 관찰을 수행한 결과, Fig. 11와 같이 파 면 내부에서 주조 결함이 관찰되었다.

즉, 인장시험시 이와 같은 주조결함은 노치효과에 의 해 인장강도 및 연신율을 동시에 저하시킨다고 보고되고 있다.

### 3. 결론

잠수함용 프로펠러 표면균열은 프로펠러 보수용접부 에서 발생한 것으로 제작(합정건조)시 보수용접부 표면 균열은 없었으나, 함 인도후 운용기간동안 프로펠러의 응력누적이 표면으로 전달되어 보수용접부위에서 최종 표면균열로 발생된 것으로 파손분석을 실시한 결과 다음 과 같은 결론을 얻었다.

프로펠러는 보수용접부 용착금속 표면부의 기공성 결 함이 기점으로 작용해 균열이 발생되었으며, 이후 용접 HAZ의 선형성 또는 기공성 결함과 연결되어 모재 내부 까지 균열이 전파되었다. 파면 관찰 결과, 표면 균열 개 시부 근처에는 연성파괴가 관찰되었으나 균열 전파부에 서는 2차 오염으로 인해 파괴 양상을 관찰하기 힘들었다.

소재특성을 평가 결과, 화학성분은 G-MnCuAlBz 규 정을 만족하였다. 인장특성은 항복강도 및 연신율은 관 련 규정을 만족하였으나 인장강도가 규정에 미달되었는 데, 이와 같은 인장특성은 본품과 별주 블록 샘플간의 질 량 효과에 기인된다.

향후 해군에서 요구되는 해외지도입품과 동등한 품질 로 개선하기 위해서는 적절한 주조방안으로 건전한 주물 품을 제작해야 함은 물론 적절한 보수 용접 방안의 정립 이 필요하며, 이를 통해 기공성 및 선형성 결함이 없는 건전한 용접부를 확보해야 한다.

### References

[1] R. Winston Revie, Uhlig's Corrosion Handbook, p.1302, John Wiley & Sons Inc, 2000, pp.732-752  
 [2] John M. Langham: "A new high damping alloy", the 17th Annual Pacific Conference of the American Foundrymen's Society, paper no. 6(1968)  
 [3] GL Rules & Guidelines: II-Part 1, chapter 5, section 1, G, page 1-2 (2009)

[4] Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen:Andreas Malletschek, 1. Auflage, Hamburg, Technische UniversitätHamburg-Harburg, 2011, ISBN 978-3-89220-656-9  
 [5] Sindo Kou, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, Inc. 2002  
 [6] W Kurz; D J Fisher, Fundamentals of solidification, Aedermannsdorf, Switzerland. 1992

정 운 화(Un-Hwa Jung)

[정회원]



- 2010년 2월 : 부산대학교 조선해 양공학과 (공학박사)
- 1993년 4월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원(DTaQ) 책임연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진 흥연구소(KRIT) 책임연구원

<관심분야>

해상/수중 기술기획, 물분사추진기, 선박프로펠러.

이 형 신(Hyeong-Sin Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 홍익대학교 조선해 양공학과 (공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품 질원(DTaQ) 선임연구원

<관심분야>

조선공학, 정보통신