

함정 적외선 신호 감소를 위한 폐기관의 디퓨저 설계에 관한 연구

윤석태¹, 조용진^{2*}, 고대은²
¹동의대학교 함정적외선신호연구소
²동의대학교 조선해양공학과

A Study on the Diffuser Design of Exhaust Pipes for the Infra-Red Signature Reduction of Naval Ship

Seok-Tae Yoon¹, Yong-Jin Cho^{2*}, Dae-Eun Ko²

¹Ship Infra-Red Signature Research Center, Dong-Eui University

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 현대의 함정에서는 추진 기관에서 생성된 고온의 폐기가스와 가열된 폐기관의 금속표면온도를 저감하기 위해 적외선 신호저감 장치(Infra-red Signature Suppression system, IRSS)를 설치하고 있다. 국내 함정에 탑재된 일반적인 IRSS는 이덕터, 믹싱튜브 그리고 디퓨저로 구성되며, 이 중 디퓨저는 금속표면에 내기·외기의 압력차에 의한 공기 막을 생성시켜 온도를 저감시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 국외 선진 기술사에서 설계한 IRSS의 디퓨저 형상을 분석하여 설계 변수를 선정하였으며, 분석 조건을 줄이면서 설계 변수의 특성을 효과적으로 파악 할 수 있는 다구치 실험계획법을 통해 IRSS 디퓨저의 성능에 영향을 미치는 설계 변수의 특성을 검토하였다. 디퓨저의 성능분석에는 선행 연구에서 정립한 열 유동해석 기술을 활용하였다. IRSS의 성능평가에는 함정 적외선 신호의 세기와 직접적으로 관련되는 디퓨저 출구에서의 폐기가스 온도와 금속표면온도의 면적평균 값을 기준으로 하였으며, 폐기가스의 온도는 디퓨저 출구의 직경 변화에 크게 영향을 받고, 디퓨저 금속표면의 온도는 디퓨저 링의 개수 변화에 크게 영향 받음을 확인하였다.

Abstract In modern naval ships, an infrared signature suppression (IRSS) system is used to reduce the metal surface temperature of the heated exhaust pipe and high-temperature exhaust gases generated from the propulsion system. Generally, the IRSS systems used in Koreannaval ships consist of an eductor, mixing tube, and diffuser. The diffuser reduces the temperature of the metal surface by creating an air film due to a pressure difference between the internal gas and the external air. In this study, design variables were selected by analyzing the shapes of a diffuser designed by an advanced overseas engineering company. The characteristics of the design variables that affect the performance of the IRSS were investigated through the Taguchi experimental method. A heat flow analysis technique for IRSS systems established in previous studies was used to analyze the performance of the diffuser. The performance evaluation was based on the area-averaged value of the metal surface temperature and exhaust gas temperature at the outlet of the diffuser, which are directly related to the intensity of the infrared signature. The results show that the temperature of the exhaust gas was significantly affected by changes in the diameter of the diffuser outlet, and the temperature of the diffuser's metal surface was significantly affected by changes in the number of diffuser rings.

Keywords : Diffuser Design, Heat Flow Analysis, Infra-Red Signature Suppression(IRSS), Naval Ship, Taguchi Experiment.

1. 서론

함정은 대형 복합 무기체계로 막대한 건조 비용과 퇴

역까지 매우 긴 수명주기를 갖고 있다. 따라서 여러 선진 해군 강국의 경우, 미래 해전양상에 필요한 작전 요구 조건과 군사과학기술의 발전 추세에 대한 심층적 분석을

*Corresponding Author : Yong-Jin Cho(Dong-Eui Univ.)

Tel: +82-51-890-2593 email: cyjdeu@deu.ac.kr

Received September 8, 2017

Revised October 12, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

통해 신규 함정의 개발·건조 계획을 수립하고 있다[1].

국내에서는 90년대부터 함정의 설계과정에서 생존성 향상을 위한 특수성능 관련 기술을 적용하기 시작하였으며, 적외선 스텔스 기술은 함정에 적용되는 특수성능 중 하나로 2000년대에 들어서서 국외 선진기술의 습득 등을 통한 관련 연구가 수행되고 있다[2].

적외선 스텔스 기술과 관련하여 국내에서 수행된 연구로는 한반도 해양환경을 고려한 함정의 적외선 신호 계산과 해양환경 변수의 민감도 분석에 관한 연구[3], 해석결과와 신뢰성 확보를 위한 실제 함정의 적외선 측정 및 검증에 대한 연구[4], 그리고 신호해석을 위한 기준 해양환경조건 정립에 관한연구[5] 등이 수행되었다.

IRSS에 대한 연구로는 항공기 분야에서 이덕터 형상의 변경에 따라 방사되는 적외선 신호 계산 및 형상 최적화에 관한 연구[6], 함정 분야에서 드레스 볼(Defense Research Establishment Suffield, DRES ball) 타입을 대상으로 유동 해석적 방법을 통해 성능을 파악하는 연구[7]가 수행 되었다. 하지만 드레스 볼 타입은 함정의 적외선 신호저감 효과는 우수하나 장치의 무게와 경제적인 측면 등을 이유로 현재 국내에서는 이를 적용한 함정은 없는 실정이다.

적외선 스텔스 기술과 관련하여 국외에서 수행된 연구로는 함정 적외선 신호원의 분류와 이를 저감시키기 위한 연구[8], 함정의 적외선 신호를 보다 정확하게 계산할 수 있는 분석 소프트웨어 개발 연구[9], 그리고 고온의 폐기가스에 의해 발생하는 적외선 신호의 저감을 위한 IRSS 시스템 개발에 관한 연구가 수행되었다.

지금까지 국외 선진 기술사에서 개발된 IRSS의 종류는 치즈강판(Cheese Grater)타입, 이덕터·디퓨저(Eductor-Diffuser) 타입, 드레스 볼 타입이 있으며, 일반적으로 국내의 함정에는 이덕터 디퓨저 타입의 IRSS가 탑재되고 있다. Fig. 1에 IRSS 시스템의 종류를 보였다.

본 연구에서 고려한 기준모델은 국외 선진 기술사에서 개발하여 국내 함정에 탑재된 이덕터 디퓨저 타입의 IRSS이다. 이 장비는 이덕터, 미싱튜브 그리고 디퓨저로 구성되어 있으며 본 연구에서는 적 위협무기체계에 직접적으로 탐지될 가능성이 높은 디퓨저를 고려하였다.

디퓨저의 설계 변수는 기준 모델의 디퓨저 형상을 분석하여 설정하였으며, 분석 조건을 줄이면서 설계 변수의 영향을 효과적으로 파악할 수 있는 다구치 실험 계획법 그리고 망소특성을 통해 IRSS 디퓨저의 설계 방안을

검토하였다.

디퓨저의 성능분석에는 선행 연구에서 정립된 열 유동해석기술을 활용하였으며, IRSS의 성능을 나타내는 디퓨저 출구에서의 폐기가스 온도와 폐기관의 금속표면 온도는 모형시험 수행기관에서 사용하는 지점계측이 아닌 온도의 면적평균으로 계측하여 분석결과의 신뢰성을 향상시켰다.

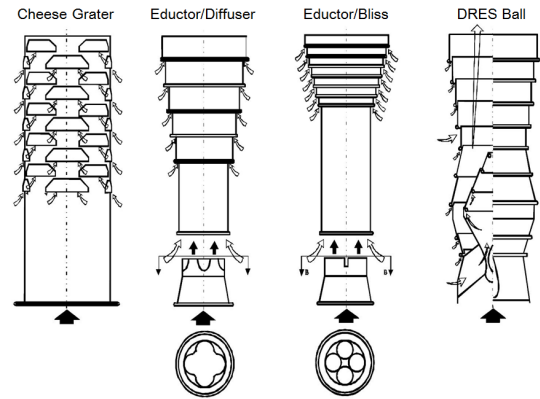


Fig. 1. Type of IRSS

2. 설계 변수와 분석 조건

2.1 디퓨저의 설계 변수

IRSS는 함정의 추진기관, 설치될 공간의 크기, 성능 요구조건 등을 고려하여 설계된다. 본 연구에서는 폐기관의 금속표면온도를 감소시키고, 적 위협무기체계에 직접적으로 탐지될 가능성이 높은 디퓨저를 고려하였다. 디퓨저의 설계 변수는 제품의 제작비용과 가공성에 직결되는 링의 개수(Number of Rings, NoR), 디퓨저 금속표면에 강제적으로 공기 막을 형성하는 링 끝 길이(Tip Size, TS), 내기·외기의 압력 및 흡입유량과 관계되는 링들 간의 직경 차이에 의한 간격(gap)을 조절하기 위한 디퓨저 링 끝의 직경(Diameter, D), 유량방정식과 베르누이방정식의 상관관계에 따라 내기와 외기의 압력차에 영향을 주는 링들 높이의 변화량(Difference of Ring Height, DRH)로 하였다.

함정의 추진기관에서 생성된 고온의 폐기 가스는 IRSS의 이덕터를 통과하면서 난류유동이 생성되고 미싱 튜브의 크기에 따라 주변공기와 혼합되는 정도가 달라진

다. 본 연구에서는 동일조건에서 디퓨저의 성능에 영향을 미치는 설계변수들의 특성파악을 목표로 함으로 이터와 믹싱튜브의 형상변화는 따로 고려하지 않았다.

디퓨저 설계 변수의 수준(level)과 관련하여 링의 개수는 제품의 제작비용과 가공성을 고려하여 3-5개로, 링 끝 길이는 공기 막을 강제적으로 형성하기 위해 기준 모델의 1-2배로, 디퓨저 출구의 직경은 내부로의 흡입 유량을 증감시키기 위해 440-500mm로, 링들의 높이는 디퓨저 출구로 갈수록 인접한 링 높이보다 조금씩 작아지도록 설정하였다. 여기서 링들 높이의 변화량은 링들 간의 직경차이에 의한 간격에서 발생하는 외기와의 압력차이 값들이 가능한 균일해 지도록 하기 위함이다.

본 연구에서 고려한 IRSS 기준 모델의 형상정보와 주요 치수를 Fig. 2에 보였다. 여기서의 치수는 실제 IRSS의 2분의 1배로 축소된 모형시험조건에 대한 것이다.

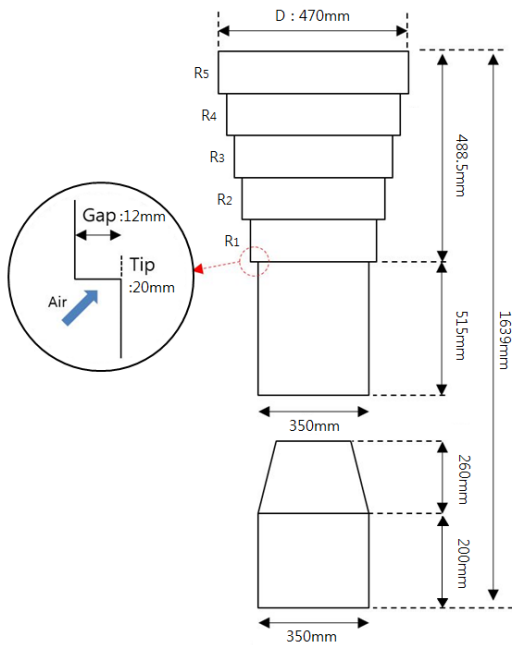


Fig. 2. Design variable of IRSS

2.2 설계변수의 분석 조건

본 연구에서 고려한 설계 변수는 링의 개수, 링 끝 길이, 디퓨저 출구의 직경, 링들 높이의 변화량으로 4개이고, 그 수준은 3수준으로 분석 조건은 총 81개가 된다. 하지만 이를 다루기 위해서는 많은 시간이 소요되므로, 분석 조건을 줄이면서 설계 변수의 영향을 효과적으로

파악할 수 있는 다구치 실험계획법[10]을 사용하였다.

디퓨저의 설계 변수와 그 수준에 대한 직교배열표 $L_9(3^4)$ 를 이용하여 불필요한 분석 조건을 배제한 최종 9개의 분석 조건을 Table 1에 보였다.

Table 1. Analysis condition

Case	NoR	TS (mm)	D (mm)	DRH (mm)
1	3	20	440	15.00
2	3	30	470	20.00
3	3	40	500	25.00
4	4	20	470	15.00
5	4	30	500	18.25
6	4	40	440	11.25
7	5	20	500	15.00
8	5	30	440	9.00
9	5	40	470	12.00

3. 열 유동해석

열 유동해석이란 유체 현상을 기술한 비선형 편미분 방정식인 나비에-스토크스(navier-stokes) 방정식과 열전달(heat transfer) 방정식을 이산화 하여 대수 방정식으로 변환하고, 이를 수치적으로 풀어 근사 해를 찾는 것이다.

본 연구에서는 선행 연구를 통해 정립된 열 유동해석 기법[11]을 사용하였으며, 해석에 반영된 초기 입력조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Initial condition of analysis

Mass flow (kg/s)	Gas temperature (°C)	Gas density (kg/m ³)
1.55	525	0.4424

폐기관 금속표면의 온도분포경향을 확인하기 위해 디퓨저 링의 개수가 다르지만 디퓨저 출구의 직경이 같은 Case 2, 4, 9의 결과를 Fig. 3에 보였다. 그리고 디퓨저 출구에서 폐기가스의 온도분포 경향을 확인하기 위해 링의 개수는 같지만 출구의 직경이 다른 Case 1, 2, 3의 결과를 Fig. 4에 보였다. 마지막으로 디퓨저 내·외기의 압력차에 따른 공기 막의 효과를 파악하기 위해 링의 끝 길이는 같지만 링의 개수가 다른 Case 1, 4, 7의 결과를 Fig.5에 보였다.

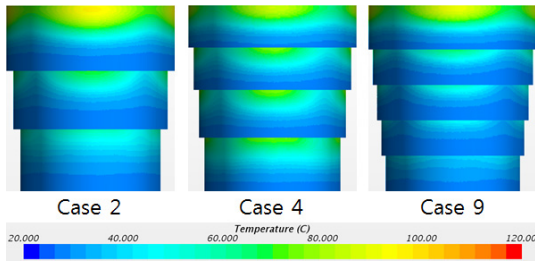


Fig. 3. Temperature distribution of metal surface according to the number of rings

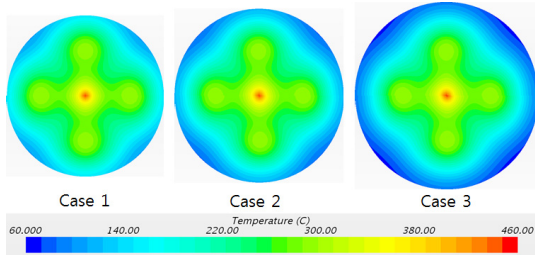


Fig. 4. Temperature distribution at the diffuser end according to diameter change

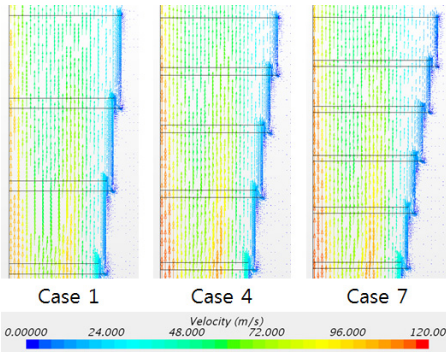


Fig. 5. Vector of air around diffuser according to the number of rings

4. 해석 결과 및 분석

4.1 해석 결과

본 연구에서는 IRSS의 성능평가를 위해 함정 적외선 신호의 세기와 직접적으로 관계되는 디퓨저 출구에서의 폐기가스 온도와 금속표면 온도의 면적평균 값을 이용하였다. 열 유동해석을 통해 얻은 온도결과 값을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Metal and gas temperature result

Unit(°C)	Gas temp.			Metal temp.			
	Case	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
	1	104	444	236	28	126	83
	2	89	431	226	28	100	74
	3	66	451	219	28	75	68
	4	82	417	226	28	88	50
	5	72	433	218	28	80	39
	6	104	445	237	28	115	52
	7	65	451	219	28	77	44
	8	102	434	238	28	106	58
	9	66	449	226	28	93	42

일반적으로 IRSS의 성능은 폐기가스의 평균온도가 250°C이하, 폐기관 금속표면의 평균온도가 대기온도 +30°C이하가 되는 조건을 만족해야 한다. 본 연구에서 설정한 대기 온도는 28°C이며, 링의 개수가 3개인 Case 1, 2, 3은 평균온도에 대한 성능요구조건(58°C이하)을 만족하지 못한다.

4.2 결과분석

디퓨저 설계변수의 민감도와 수준변화에 따른 영향을 파악하기 위해 다구치가 제안한 신호 대 잡음비(signal to noise, S/N)의 개념을 도입하여 해석결과를 분석하였다. 다구치가 제안한 신호 대 잡음비는 결과 값이 클수록 좋은 망대특성, 결과 값이 원하는 목표 값에 가까울수록 좋은 망목특성, 그리고 결과 값이 작을수록 좋은 망소 특성으로 나뉜다. 본 연구에서는 식(1)과 같은 망소특성을 사용하였다.

$$S/N = -10 \text{Log} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^2) \right) \quad (1)$$

여기서, n 은 해석 수행 횟수, y_i 는 해석 결과이다.

유동해석 결과에서 폐기가스온도와 금속표면온도의 평균값을 식(1)을 이용하여 S/N비로 변환하고, 설계 변수의 인자 수준이 동일한 경우를 평균하여 Table 4와 5에 각각 정리하였다. Table 4와 5를 통해 폐기가스의 온도에 크게 영향을 미치는 설계변수는 디퓨저 출구의 직경이고, 금속표면의 온도에 크게 영향을 미치는 설계변수는 링의 개수인 것을 알 수 있다.

Table 4. S/N of gas temperature

Gas temp. S/N	NoR	TC	D	DRH
Level 1	-47.1	-47.1	-47.5	-47.1
Level 2	-47.1	-47.1	-47.1	-47.1
Level 3	-47.1	-47.1	-46.8	-47.1
Sum of Squares	0.00	0.00	0.74	0.00
contribution ratio(%)	0.17	0.04	99.50	0.30

Table 5. S/N of metal temperature

Metal temp. S/N	NoR	TC	D	DRH
Level 1	-37.5	-35.1	-36.1	-34.3
Level 2	-33.5	-34.9	-34.7	-34.9
Level 3	-33.6	-34.6	-33.8	-35.4
Sum of Squares	31.4	0.5	7.5	1.7
contribution ratio(%)	76.4	1.2	18.3	4.1

Table 4에 보인 폐기가스 온도에 대한 신호 대 잡음비 결과를 설계변수별로 수준변화에 따라 도시하여 Fig. 6에 보였다. 각 설계변수에 대한 그래프의 기울기 변화가 클수록 디퓨저의 성능 변화에 민감함을 나타내며, 이에 따라 폐기가스의 온도는 디퓨저 출구의 직경변화에 크게 영향 받음을 확인할 수 있다.

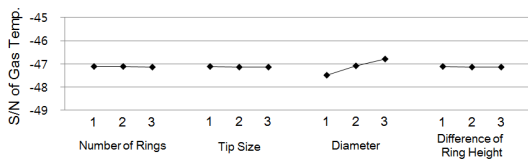


Fig. 6. S/N changing level of design variable

Table 5에 보인 금속표면 온도에 대한 신호 대 잡음비 결과를 설계변수별로 수준변화에 따라 도시하여 Fig. 7에 보였다. 폐기관 금속표면의 온도는 디퓨저 링의 개수 변화에 가장 크게 영향을 받으며, 디퓨저 출구의 직경 변화에도 영향 받음을 확인할 수 있다.

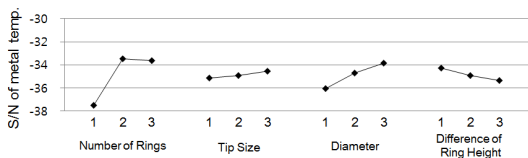


Fig. 7. S/N changing level of design variable

5. 결론

본 연구에서는 함정 적외선 신호감소를 위한 IRSS의 디퓨저를 대상으로 성능에 영향을 미치는 주요 설계변수를 도출하고 그 특성을 검토하였다. 본 연구의 내용과 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 함정의 IRSS에서 적 위협무기체계에 탐지될 가능성이 높은 디퓨저를 대상으로 그 성능에 영향을 미치는 주요 설계변수로서 링의 개수, 링 끝 길이, 링 끝의 직경 및 링들 높이의 변화량을 도출하였다.
- 2) 다구치 실험계획법을 통해 디퓨저의 성능에 영향을 미치는 설계변수의 분석조건을 최적화 하였으며, 총 9개의 최적화된 분석조건에 대하여 열 유동 해석을 수행하였다.
- 3) 망소특성의 신호 대 잡음비 개념을 도입하여 해석 결과를 분석하였으며, 이를 통해 폐기가스의 온도는 디퓨저 출구의 직경 변화에 크게 영향을 받고, 디퓨저 금속표면의 온도는 디퓨저 링의 개수 변화에 크게 영향 받음을 확인하였다.
- 4) 본 연구의 결과는 폐기가스의 유량과 초기온도가 특정한 경우(Table 2)에 대한 것으로서 폐기가스의 유량과 초기온도가 다른 경우에 대한 추가검토가 필요하다. 또한 추진기관에서 생성된 폐기가스의 난류유동에 관계되는 이덕터 및 믹싱튜브의 설계에 관한 연구가 필요하다.

References

- [1] The Society of Naval Architects of Korea, "Naval Ship", Text books, 2012.
- [2] Y. J. Cho, "A Study on the Management Methods of the Ship Infrared Signature", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 50, no. 3, pp.182-189, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3744/STAK.2013.50.3.182>
- [3] Y. J. Cho, "An Analytical Study on the Sensitivity of Ship's IR Signature According to the Meteorological Environment in Korean Waters", D. S. Thesis, Chung-nam National University, 2005.
- [4] Y. J. Cho, "Study on Calibration and Verification Method of Naval ship Infra-red Measurement Results", Study Report, 2009.
- [5] S. I. Han, "A study on the sampling methods of ocean meteorological for ship IR signature", M.S Thesis, Dong-Eui University, 2013.
- [6] J. G. Oh, "A Study on Optimization of Nozzle Shape for

IR Signature Reduction", M.S Thesis, Gyeong-sang National University, 2013.

- [7] S. I. Lee, "A Study for identification of critical design factor of DRES-Ball and for efficient cooling of exhaust gas by water spray in terms of numerical analysis", M.S Thesis, Seo-ul National University, 2006.
- [8] J. Thompson, D. Vaitekunas, A.M. Birk, "Infrared Signature of Modern Naval Ship", American Society of Naval Engineers 21th, Century Combatant Technology Symposium, 27-30 Jan. 1998
- [9] D. A. Vaitekunas, "SHIP/NTCS: A Naval Ship Infrared Signature Countermeasure and Threat Engagement Simulator", Proceedings for Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Infrared Technology XXII, April 8-12, 1996.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.243481>
- [10] Korea Advanced Institute of Science and Technology, "Experiment and Analysis : Taguchi method and Utilization of Orthogonal Tables", 2005.
- [11] S. T. Yoon, H. S. Jung, Y. J. Cho, D. E. Ko, "Numerical Simulation of Infra-Red Signature Suppression on the Naval Ship", The Korea Institute of Military Science and Technology, 8-9 June, 2017.

고 대 은(Dae-Eun Ko)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2008년 2월 : 삼성중공업(주) 구조설계팀
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

선박 및 해양구조물 구조설계, 용접변형 및 용접설계

윤 석 태(Seok-Tae Yoon)

[정회원]



- 2017년 2월 : 동의대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 부설 함정적외선신호연구소

<관심분야>

특수선 시스템 설계, 적외선 신호 및 복사열전달

조 용 진(Yong-Jin Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 조선해양공학과(공학석사)
- 2001년 2월 : 충남대학교 공과대학 조선해양공학과(공학박사)
- 1994년 7월 ~ 2007년 8월 : 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
- 2007년 9월 ~ 현재 : 동의대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

특수선 시스템 설계, 선체 진동·소음, 적외선 신호 및 복사열 전달