
유수분리기용 정전용량형 센서의 성능향상에 관한 연구

제우성* · 김경우* · 권휴상**

Enhancement in the Performance of Capacitive Sensor for Oily Water Separator

Woo-Seong Che* · Kyong-Woo Kim* · Hyu-sang Kwon**

이 논문은 2004년도 동명대학교 산학협력중심대학육성사업의 연구비를 지원받았음

요 약

해양환경규제 MEPC의 규제 강화로 인하여 더욱 정밀하고, 신뢰성을 확보한 bilge 분리 센서 시스템이 필요하다. bilge 분류기를 설계 제작하기 위해서는 기름과 물을 구별하는 정밀한 유수분리 레벨센서가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 정전용량형 레벨센서의 특성파악을 위해 3차원 시뮬레이션을 수행하여 특성을 파악하였으며, 이를 토대로 레벨센서의 설계시 주요한 설계인자를 추출하였다. 동작회로를 Digital 회로로 구성함으로써, 정전용량형 센서의 원천적인 기생커패시턴스 문제를 해결하였으며, 실험장치를 구성한 후 실험을 수행하였다. 실험결과를 보면 노이즈에는 강인해졌음을 알 수 있었다. 그리고 추출한 정전용량형 레벨센서의 설계인자를 이용하여 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 향후에 진행될 필요성이 있다.

ABSTRACT

Demand of enhanced bilge separation sensor system has been recently increased due to the severe regulation reinforcement of MEPC(Marine Environment Production Committee). Up to date bilge separation sensor has to be extremely accurate and highly reliable. To design and build such a bilge separator, a precise oily water separation level sensor that distinguishes oil from water is critical. Three dimensional simulations have been carried out to figure out the characteristics of capacitive level sensors, which grounds the finding of the parameters required to design the sensors. The parasitic capacitance problem which is inherent to capacitive level sensors has been taken care of. This paper concludes with the future research direction that can be pursued with the newly defined parameters of the capacitive level sensors.

키워드

레벨센서, 정전용량형, bilge분리기

* 동명대학교 메카트로닉스공학과

접수일자 : 2006. 5. 9

** 교신저자 : 한국표준과학연구원 기반표준부

I. 서 론

지구환경보전문제가 세계적인 중대현안으로 등장하고 있는 가운데 해상에서 발생하는 제반 오염물질에 대한 환경보호조치의 하나로 선박에 대한 각종 환경규제가 대폭 강화되고 있다. 국제해사기구(IMO)에서는 선박에서 발생하는 오염물질 등에 대한 규제강화를 위하여 최근 새로운 해상환경협약의 채택 및 발효를 강력히 추진하고 있다. 특히 해양환경보호정책의 일환으로 MARPOL Annex I 26규칙에서는 기름에 의한 해상오염을 효과적으로 대처하기 위하여 MEPC(Marine Environment protection Committee)에서는 빌지(배 내부의 오염된 물) 분리기 설치 의무화 하였다[1].

현재 규정하고 있는 빌지 분리는 15ppm 이하로 빌지를 분리할 수 있어야 하며, 대략적으로 그림 1의 구조를 가지고 있다[2]. 그림 1의 빌지분리시스템의 빌지분리기(Bilge Separator)는 유입되는 기름과 물을 비중차에 의해 기름과 물을 분리하기 위해서 사용되며 기름이 차지하는 높이를 측정하기 위해서 유수분리용 레벨센서가 필요하다. 현재 유수분리용 레벨센서로는 정전용량형 센서가 가장 많이 사용된다[3]. 본 연구에서는 정전용량형 레벨센서의 특성파악을 위해 3차원 시뮬레이션을 수행하여 특성을 파악하였으며, 이를 토대로 레벨센서의 설계시 주요한 설계인자를 추출하였다. 그리고 정전용량형 레벨센서의 원천적인 문제인 기생커패시턴스 문제를 해결하기 위하여 측정회로 설계시 이를 제거할 수 있는 방안을 고려했으며, 측정회로를 Digital 회로로 구성하여 외란에 강인성을 갖도록 하였다. 본 연구에서 개발된 정전용량형 레벨센서의 성능을 파악하기 위해서 3차원 시뮬레이션 결과를 토대로 실험장치를 구성한 후 실험을 수행하였다.

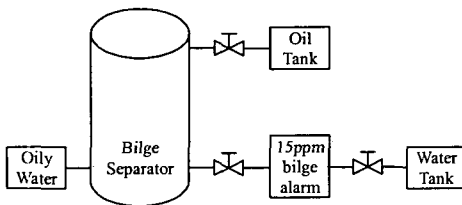


그림 1. 빌지분리장치의 선내설치기준
Fig. 1. Block diagram of bilge separator

II. 작동 원리

정전용량형 Level 측정원리는 전기특성중 하나인 정전용량을 Level 측정에 적용한 것이며, 전기적 특성 중에서 정전용량은 전하를 저장하는 기능이 있다. 정전용량은 극판의 유효면적에 비례하고 극판 사이의 간극에 반비례한다. 그리고 절연체의 성질에 의해서 크기가 결정된다 [4]. 본 연구에서는 서로 다른 유전상수를 가진 절연체의 혼합비율에 따라 정전용량값이 변화하는 원리를 이용하였다. 물과 기름이 혼합되어 있고 시스템이 구조적으로 복잡한 경우 해석해로 정전용량값을 계산하기는 한계가 있어 전산모의 실험을 통해 정전용량값을 계산할 필요가 있다.

III. 전산모의 실험

일반적으로 유수분리직전에는 Bilge Separator는 기름과 물의 혼합물이 가득찬 경우에 해당하므로 물의 높이를 알면 자동적으로 기름의 높이를 알 수 있으며, 물과 기름의 비율을 알 수 있다. 따라서, 물의 높이에 따른 정전용량값의 변화를 알아보기 위해 전산모의 실험을 수행하였다. 빌지 분리기의 시스템구조가 기하학적으로 복잡하여 정전용량값을 구하기 어렵다. 그래서 전자기장 해석프로그램(maxwell)을 통하여 정전용량값을 계산하였다. 그림 2와 같은 시스템에 관하여 전산모의 실험을 수행하였다.

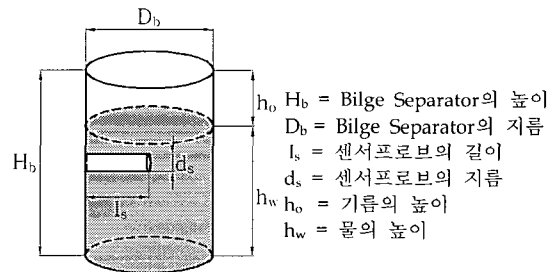


그림 2. Bilge Separator 개략도
Fig. 2. Bilge separator structure

전산모의 실험을 통해 물의 높이(h_w), 기름의 높이(h_o), Bilge separator의 높이(H_b), Bilge separator의 지름(D_b), 센서프로브의 길이(l_s), 센서프로브의 지름(d_s)의 크기 변화에 의한 각각의 정전용량값의 변화를 알아보았다.

그림 3, 4, 5는 전산모의 실험의 결과를 등전위면으로 나타낸 것이다. Bilge Separator의 길이 방향에서 정 가운데($h_0=h_w$) 센서가 위치하고 있다. 그림 3은 물이 60cm, 기름이 20cm일때 등전위면이고, 그림 4는 물이 40cm, 기름이 40cm일 때이므로, 물과 기름의 경계면에 센서가 위치하고 있을 때의 등전위면이다. 그리고 그림 5는 물이 20cm, 기름이 60cm일때 등전위면이다.

그림 3, 4, 5의 등전면위면 결과를 보면, 물과 기름의 경계면에 센서프로브가 위치할 경우 등전위면이 급격히 변하기 때문에 정전용량값 또한 경계면에서 급격히 변하는 것을 알 수 있다.

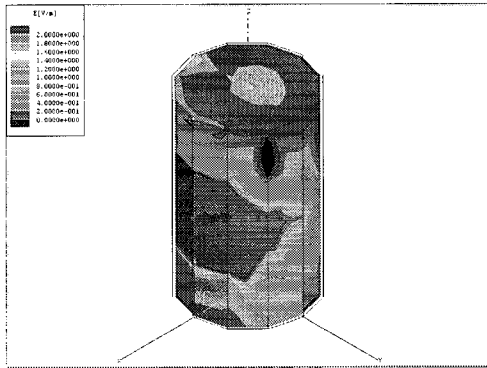


그림 3. 등전위면(물높이 45cm)
Fig. 3. Equipotential surface drawn for $h_w=45$ cm

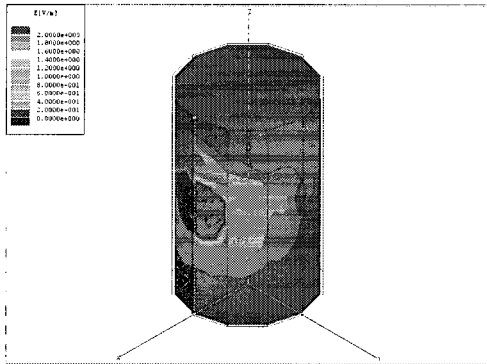


그림 4. 등전위면(물높이 40cm)
Fig. 4. Equipotential surface drawn for $h_w=40$ cm

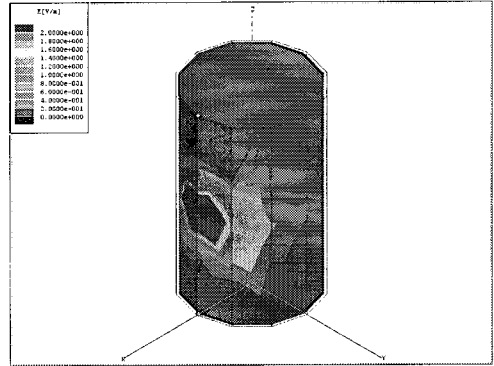


그림 5. 시뮬레이션 등전위면(물높이 35cm)
Fig. 5. Equipotential surface drawn for $h_w=35$ cm

센서의 설계시 필요한 인자를 추출하기 위해서 센서 프로브의 길이와 지름을 표 1과 같이 변화시키면서 전산 모의 실험을 수행하였다.

표 1.
Table. 1

	ls(cm)	ds(cm)
Case 1	17.5	1
Case 2	17.5	2
Case 3	35	1
Case 4	35	2

그림 6은 Bilge separator의 크기가 높이 80cm($H_b=80$ cm), 지름 40cm($D_b=40$ cm)인 경우에서 전산모의 실험을 한 결과이다. 전산모의 실험결과를 살펴보면 Bilge separator에서 센서 프로브의 지름(d_s)은 정전용량값에 큰 영향을 주지 못하고, 센서프로브의 길이(l_s)는 정전용량값에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 센서프로브의 지름에는 정전용량값의 변화에 영향을 주지 못한다는 전산모의 실험결과를 바탕으로 센서프로브의 지름을 기하학적 현상을 고려하여 1cm로 결정하였다.

그리고 Bilge separator의 크기 변화에 대한 정전용량값을 알아보기 위해 Bilge separator의 크기가 높이 160cm($H_b=160$ cm), 지름 80cm($D_b=80$ cm)인 경우에서 표 1의 4가지 경우에 대한 전산모의 실험을 하였고 그림 7에 전산모의 실험결과를 나타내었다.

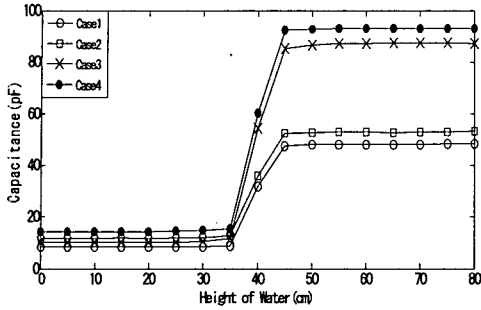


그림 6. 센서의 크기변화에 따른 정전용량값
Fig. 6. Capacitance values for various sensor parameters

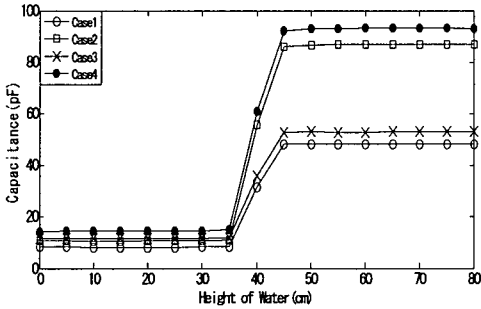


그림 7. 탱크의 크기변화에 따른 정전용량값
Fig. 7. Capacitance values for larger tank

그림 6의 전산모의 실험결과와 그림 7의 전산모의 실험결과를 비교하면 Bilge separator의 크기는 정전용량값의 변화에 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 6의 전산모의 실험결과에서 센서프로브 길이의 변화에 대한 정전용량값을 좀 더 자세히 알아보기 위해 길이를 좀 더 자세히 변화를 주면서 표 2의 경우에 대해서 전산모의 실험을 수행하였다.

그림 8의 전산모의 실험결과와 센서 프로브의 길이 변화에 따라 정전용량값이 급격히 변하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 센서 프로브의 길이는 Noise(기생 커패시턴스 포함)에 대한 정전용량값의 변화가 5pF임을 고려하여 Noise 신호의 정전용량값의 10배에 해당하는 50pF이 출력으로 나올 수 있게 센서프로브의 길이를 17.5cm로 결정하였다.

그림 6, 7, 8의 전산모의 실험결과를 종합하면, 유수분리용 정전용량형 센서의 정전용량값은 Bilge separator의

표 2.
Table. 2

	ls(cm)		ls(cm)
Case 1	10	Case 6	22.5
Case 2	12.5	Case 7	25
Case 3	15	Case 8	27.5
Case 4	17.5	Case 9	30
Case 5	20	Case 10	32.5

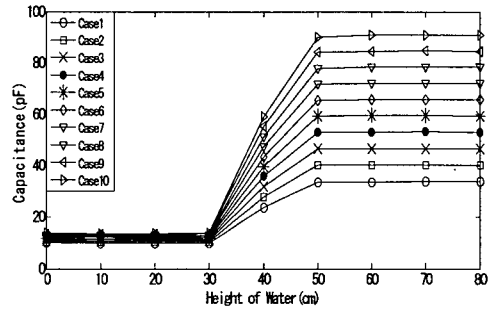


그림 8. 센서의 길이변화에 따른 정전용량값
Fig. 8. Capacitance values for various sensor lengths

크기, 센서프로브의 지름에는 큰 영향을 받지 못하고 센서프로브의 길이에는 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그리고 센서 프로브가 물과 기름의 경계면에 위치해 있을 때, 정전용량값이 급격히 변화하는 것을 알 수 있다.

전산모의 실험결과를 통하여 정전용량형 센서의 기구부의 설계시 필요한 주요인자를 추출할 수 있었다.

IV. 센서 설계제작

정전용량형 센서의 특성을 파악하기 위해 전산모의 실험결과를 바탕으로 간이실험장치의 탱크는 기존 유수분리장치에 사용되는 원통모양의 스테인레스를 사용하여 길이 80cm(L=80cm), 지름 40cm(D=40cm)로 제작하였다. 유수분리기의 정전용량형 센서는 크게 기구부와 신호처리부로 나눌 수 있다. 센서의 기구부는 또한 전산모의 실험결과를 바탕으로 $l_s=17.5\text{cm}$, $d_s=1\text{cm}$ 로 그림 9과 같이 설계하였다.

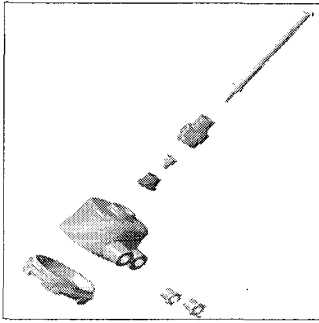


그림 9. 기구부 설계
Fig. 9. Structure Planning

센서의 Probe는 전극 면에 대한 액체의 부착력보다 액체 자체의 응집력을 증가시키기 위해서 모든 전극 표면을 테프론 등의 재질로 코팅하였다. 부착력이 응집력보다 크게 되면 물과 기름의 레벨변화 후에도 전극표면에는 액체가 묻어있게 되고 이것은 측정에 큰 오차를 만드는 원인이 되기 때문이다[5].

정전용량을 검출하는 회로에는 용량을 전압으로 변환하는 방식[6]과 펄스폭으로 변환하는 방식[7]등이 있지만 용량을 주파수로 변환하는 방식[8]은 출력이 주파수이기 때문에 잡음의 영향이 적으면서 디지털 처리가 용이하다[9].

센서의 신호처리부는 정전용량형 센서시스템의 오동작을 일으킬 우려가 있는 기생커패시턴스의 영향을 제거하고 잡음의 영향이 적은 용량-주파수 변환기(capacitance-frequency converter : C-F 변환기)를 사용하여 설계하였다. 기생커패시턴스는 한 개의 전극을 접지시킴으로써 해결할 수 있다[10]. 하지만 실험결과 기생커패시턴스의 감소

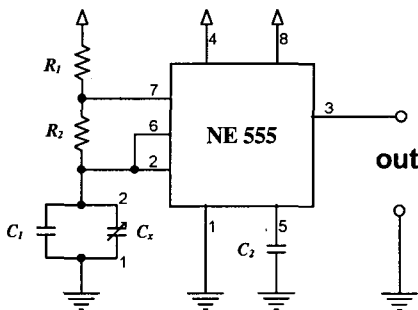


그림 10. C-F 변환회로
Fig. 10. C-F converter

는 확인할 수 있었지만, 시스템의 오동작을 일으킬 우려가 있어 정전용량형 센서와 병렬로 커패시턴스를 연결하여 기생커패시턴스의 영향을 최소화 하였다. 그림 10은 NE 555(타이머)를 사용한 C-F 변환회로이다. 그림 10에서 C_x 의 정전용량값보다 C_1 의 값이 상대적으로 큰 값일 때 기생커패시턴스를 최소화 할 수 있다. C-F 변환회로의 T_{out} 은 다음 식으로 표현된다[11].

$$T_{out} = 0.693(C_1 + C_x)(R_1 + 2R_2) \quad (1)$$

여기서 T_{out} 은 정전용량형 센서의 C_x 와 병렬로 연결된 C_1 의 합($C_x + C_1$)으로 구성된 발진주기이다. 시스템에서는 C_1 의 값은 고정된 값이고 변화하는 값은 정전용량형 센서의 C_x 뿐이다. 정전용량형 센서의 C_x 값을 무시한 발진주기 T_{C1} 은 다음과 같다.

$$T_{C1} = 0.693(C_1)(R_1 + 2R_2) \quad (2)$$

그리고 정전용량형 센서의 C_x 와 병렬로 연결된 C_1 의 값을 무시한 발진주기 T_{cx} 은 다음과 같다.

$$T_{cx} = T_{out} - T_{C1} \quad (3)$$

그러므로 정전용량형 센서의 C_x 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_x = \frac{T_{cx}}{0.693(R_1 + 2R_2)} \quad (4)$$

NE555로 구성된 C-F 변환회로의 출력은 디지털 신호이므로 잡음에 무관하게 용량값을 측정할 수 있다.

V. 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 그림2와 같은 구조로 $H_b=80\text{cm}$, $D_b=40\text{cm}$ 로 실험장치를 제작하여 실험한 결과 그림 11과 같이 정전용량값이 측정되었다.

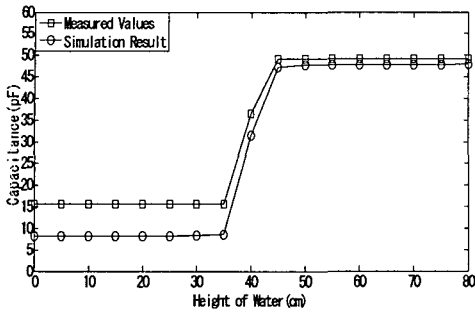


그림 11. 실험 측정 결과
Fig. 11. Prototype experiment results

실험결과에서 전산모의 실험과 동일하게 정전용량값이 물의 높이가 35cm에서 45cm 사이에 있을 때 즉, 센서프로브가 기름과 물의 경계면에 가까이 있을 때 정전용량값이 급격히 변하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 시스템은 기생커패시턴스의 영향을 최소화하였고 외란으로부터 강인성을 갖는 안정된 시스템이다.

VI. 결 론

전산모의 실험결과 Bilge Separator의 크기와 센서프로브의 지름은 정전용량값 변화에 큰 영향을 주지 못하였고, 센서의 길이는 정전용량값의 변화에 영향을 주었다. 이를 토대로 Bilge Separator의 크기는 $H_b=80\text{cm}$, $D_b=40\text{cm}$ 로 설계하였고, 센서 기구부는 $l_s=17.5\text{cm}$, $d_s=1\text{cm}$ 로 설계하였다. 설계치를 바탕으로 제작한 센서로 실험을 한 결과 전산모의 실험과 동일하게 물과 기름의 비율에 따라 정전용량값이 약 15pF ~ 50pF으로 변화하고 물과 기름의 경계치에서 정전용량값이 급격히 변하는 것을 알 수 있었다. 신호처리부의 회로설계시 기생커패시턴스를 제거하기 위한 노력을 하였으며, 잡음과 기생커패시턴스의 변화가 5pF임을 고려해볼 때 S/N비가 10이 되어 안정적으로 센서를 사용할 수 있다. 또한 정전용량의 변화로 측정된 범위의 측정값이 Digital 신호이기 때문에 측정값 Data를 항상 기록하고 저장할 수 있다.

감사의 글

본 과제는 교육인적자원부와 산업자원부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] IMO, "Report of The Marine Environment Protection Committee on Its forty-ninth session", PP. 6-8, 2003
- [2] IMO, "Report of The Marine Environment Protection Committee on Its forty-ninth session", PP. 12, 2003,
- [3] A J Jaworski, T Dyakowski, G A Davies, "A capacitance probe for interface detection in oil and gas extraction plant", Meas. Sci. Technol. 10, pp. L15-L20, 1999
- [4] Martin A. Plones, "Applied Electromagnetics", McGraw-Hill. 6th, pp. 165-167, 1988
- [5] H.J.Kim, R.D.Lee, J.H.Kang, Yu. P. Semenov, S.O.Han, "Study on Inclination Sensor by Capacitance Measurements", 한국전기전자재료학회, 하계학술대회 논문집, pp. 807-810, 2003
- [6] Craig S. Sander, "A Monolithic Capacitive Pressure Sensor with Pulse-Period Output", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-27, May 1980.
- [7] T. Kudoh, S. Shoji and M. Esashi, "An Integrated Miniature Capacitive Pressure Sensor", Sensor and Actuator, A29, pp. 185-193, 1991
- [8] H. D. Seo, G. B. Lim and M. Esashi, " Hybrid-Type Capacitive Pressure Sensor", Sensors and Materials, 4, 5, pp. 277-289, 1993.
- [9] 이윤희, 사와다 쿠지, 서희돈, 최세곤, "용량형 압력 센서용 디지털 보상 인터페이스 회로설계", 센서학회지, 제5권, 제5호, pp.63-68, 1996
- [10] Thomas Mohr, Uwe Ehrenbefrg and Hermann Uhlmann, "A new method for a self-calibrating capacitive sensor", IEEE Instrum. Meas. Technology Conference, pp. 454-459, 2001
- [11] Paul Horowitz, Winfield Hill, "The Art of Electronics", KALA, 2nd ed., pp. 286-288, 1989

저자소개



제 우 성(Woo-Seong Che)

1984년 한양대학교 기계공학과
공학사
1987년 한국과학기술원 생산공학과
공학석사

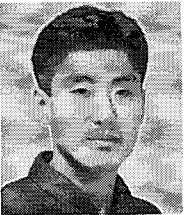
1997년 동 대학 공학박사
1995년~1998년 만도기계중앙연구소 선임연구원
1998년~현재 동명대학교 메카트로닉스공학과 부교수
※관심분야: 센서 및 센서 응용, MEMS



김 경 우(Kyong -Woo Kim)

2006년 동명대학교 메카트로닉스
공학과 공학사
2006년~현재 동명대학교 메카트
로닉스공학과 석사과정

※관심분야: 신호처리, 센서, 제어



권 휴 상(Hyu-sang Kwon)

1990년 한국과학기술원 기계공학과
공학사
1992년 동 대학원 공학석사
1997년 동 대학 공학박사

1998년~현재 한국표준과학연구원 선임연구원
※관심분야: 소음 및 진동, 신호처리 응용, 센서