

인장 응력에 따른 자성체의 B-H Curve 특성 연구

Study on B-H Curve Characteristic of Magnetic Substance According to Tensile Stress

김 종 왕* · 김 상 현* · 양 훈 석* · 김 지 호** · 정 현 주*** · 이 향 범†

(Jong-Wang Kim · Sang-Hyun Kim · Hoon-Suk Yang · Ji-Ho Kim · Hyun-Ju Jung · Hyang-Beom Lee)

Abstract - In this paper, study for B-H curve characteristics of the magnetic material due to tensile stresses of submarine for magnetic silence. For the experiment, made the sample of the material of AH36 and made to a B-H curve Tracer. In addition, design and made a system of stress by the weight in order to apply a tensile stress, it was possible to obtain results for the change of the magnetization.

Key Words : AH36, B-H Curve Tracer, Stress, Magnetic Silence

1. 서 론

최근 천안함 사건의 대응책과 적 잠수함의 레이더 기술의 무력화 방법으로 스텔스 기능이 부각되고 있다. 스텔스 기능은 적의 레이더에 노출을 최소화하는 방법으로 실제 크기에 비하여 더 작은 크기로 레이더에 보이게 하거나 보이지 않게 한다. 이러한 스텔스 기능은 음향, 적외선, 자기장등의 신호를 최소화해야 하는데 주 재질이 철로 이루어진 잠수함의 경우 자기장 신호에 취약할 수 밖에 없다. 또한 잠수함 운항에 위협을 주는 요소인 어뢰와 기뢰등의 자기센서의 측정 분해능이 nT 단위로 기술이 발달함에 따라, 잠수함 운항시 지구자기장을 교란시키는 신호를 감지하기가 더 쉬워지고 있다. 이러한 잠수함의 위협요소로부터 안전한 운항을 위해서는 자기 정속화(Magnetic Silence)를 실현해야 한다[1,2].

자기 정속화는 잠수함의 자기장 신호를 최소화 시키는 방법으로 탈자(Derperming)와 소자(Degaussing)방법을 사용한다[3,4]. 탈자는 잠수함에 남아있는 잔류 자화 성분을 최소화 시키는 방법으로 별도의 탈자 처리 시스템을 구축하여 자기 소거법을 적용하는 방법이다. 소자는 탈자 후 남아있는 잔류 자화 성분과 지구자기장에 의하여 유도되는 유도 자기장 성분을 최소화 시키는 방법으로 내부에 3축방향의 코일을 감아 발생하는 신호에 반대되는

방향으로 전류를 인가시키는 방법이다. 탈자 방법은 잠수함이 운항하기 전 1회만 적용을 하게 되지만 소자는 잠수함이 운항하는 방향에 따라 유도되는 값이 다르기 때문에 잠수함의 재질 특성과 현재 위치에서의 지구자기장 크기를 정확하게 알고 있어야 한다. 하지만 잠수함의 주 재질인 자성체 경우 수압에 따라 자화 특성이 변하게 되기 때문에 외부 응력에 따른 재질의 자화 특성을 알아야 한다.

본 논문에서는 인장 응력에 따른 자성체의 자화 특성을 연구하기 위하여 AH36 재질의 시편을 제작하고 B-H Curve Tracer를 제작하였다. 또한 인장 응력을 인가하기 위하여 추를 이용하였으며, 3~83kg의 추를 인가함으로써 인장 응력에 따른 자화량 변화를 측정하였다.

2. 자기 정속화

자기 정속화는 잠수함의 자기장 신호를 최소화 하는 방법으로

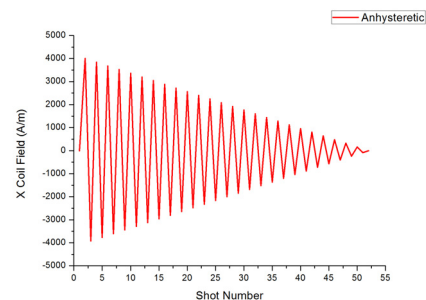


그림 1 Anhyseretic 탈자 프로토콜

Fig. 1 Anhyseretic Deperm Protocol

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.

E-mail: hyang@ssu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.

** Enertech

*** Agency for Defense Development

Received : October 20, 2014; Accepted : February 26, 2015

탈자와 소자방법을 사용한다. 탈자는 잠수함 내부에 남아있는 잔류 자화 성분을 최소화 하는 방법으로 그림 1과 같이 점점 감소하는 크기의 자기장을 교번하여 인가하면 그림 2와 같이 포화영역과 보자력을 지나면서 원점에 가까워질수록 잔류 자화 성분이 0에 가까워지는 원리를 이용한다. 일반적으로 왕복하는 횟수와 자기장이 감소하는 크기가 작아질수록 탈자 성능이 향상되게 되며, 실제 잠수함의 경우 탈자 처리 시설에서 Anhyseretic, Flash-D, Deperm-me 등의 정규화된 탈자 프로토콜을 일정기간마다 인가하여 잔류 자화 성분을 최소화 한다.

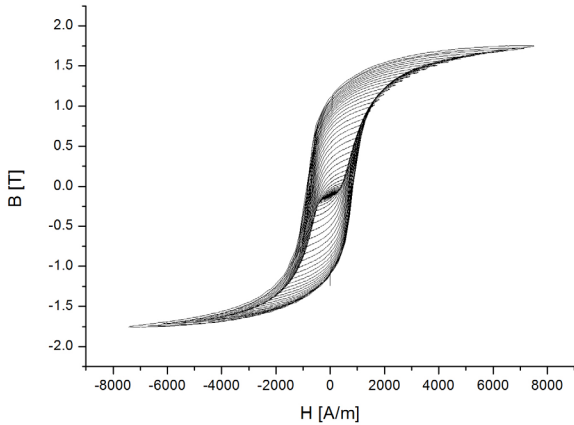


그림 2 자기 소거법
Fig. 2 Degaussing Method

소자 방법은 잠수함에 일시적으로 유도되는 유도 자화성분을 제거하기 위한 방법으로 그림 3과 같이 잠수함 내부에 3축 방향의 코일을 감아 유도 자화의 반대 방향으로 전류를 인가하여 자

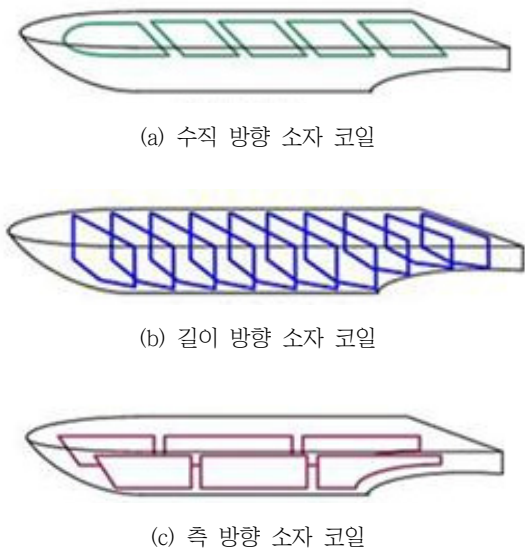


그림 3 3축 방향 소자 코일
Fig. 3 3-axis Degaussing Coil

기장을 제거하는 방법이다[5]. 소자 방법을 적용하기 위해서는 역 문제 해석을 통한 선체의 유도 자화를 정확히 예측하고 소자 코일에 전류를 인가하는 것이 가장 중요하다. 선체의 유도 자화 성분예측은 재질 특성인 B-H 커브로부터 계산되며, 정확한 계산을 위해서는 B-H 커브 예측이 가장 우선시 된다. 만약 B-H 커브가 변하게 될 경우 동일한 지구자기장 내에서 유도 자화 성분의 크기가 달라지게 되며, 소자 코일에 전류를 인가하더라도 외부에서 자기장성분이 측정되게 된다. 그림 4는 소자 방법의 개념도를 나타내고 있다.

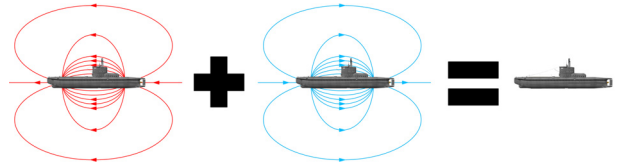


그림 4 소자 방법 개념
Fig. 4 Degaussing Method Concept

3. 인장응력에 따른 자기화 과정

그림 5는 인장 응력에 따른 자성체의 자구 변화를 나타내고 있다. (a)~(c)과정은 외부 자기장이 인가되었을 경우 자구의 거동과 유사하지만 외부 자기장이 없는 상태에서 인장 응력이 인가되었을 경우 자구가 (a)~(c)과정을 통하여 응력 방향의 자구 방향으로 재배열되게 된다. 결정 구조에 따라 응력의 방향과 다른 형태로 자구의 배열이 생성되는 경우도 있으나, 일반적으로 불순물이 첨가된 철의 경우 그림 1의 자구 배열을 따라가게 된다. 따라서 (c)단계에서 작은 자기장만 인가해주어도 쉽게 자화가 되기 때문에 인장 응력에 대한 방향으로 자화 특성이 향상되고 응력과 수직인 방향에 대한 자화 특성은 감소하게 된다. 일반적으로 잠수함의 경우 수심 300~500m에서 운항하게 되며, 30~50 기압의 높은 수압을 받게 된다. 따라서 외부 응력에 따라 탄성 영역(Elastic Region)내에서 변형이 일어나게 되며, 변형 방향에 대한 자화 특성이 달라지게 된다. 자화 특성의 변화는 잠수함의 유도

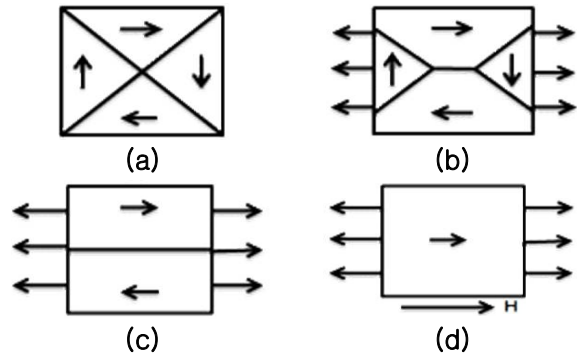


그림 5 인장 응력에 따른 자구의 변화
Fig. 5 Change in Magnetic Domain according to Tensile Stress

자화 예측에 직접적인 영향을 미치게 되며, 잠수함의 정밀한 소자를 위해서는 수심에 따라 다른 자화 특성을 고려하여 유도 자화 성분을 예측해야한다.

4. 시스템 구성

본 논문에서는 AH36 자성체의 B-H Curve를 측정하기 위해서 그림 6과 같이 회로를 구성하였다. 1차측 저항의 전압을 측정하여 식 1과 같이 자계 강도를 측정하고 2차측의 전압 신호를 적분기 를 통하여 측정된 전압을 식 2를 이용하여 자속 밀도를 측정한다. 1차측 코일에서 발생하는 열로 인하여 시편의 자화 특성이 변하지 않도록 1차측은 단면적이 큰 코일을 사용하여 저항의 크기를 낮추었으며, 큰 전류가 흐르지 않는 2차측 코일은 단면적이 작은 코일을 사용하여 공간 사용을 극대화 하였다. N_1 은 1차측 턴 수, V_1 은 1차측 측정 전압, R 은 저항, L 은 시편의 평균 둘레, N_2 는 2차측 턴 수, A 는 단면적, V_2 는 2차측 적분된 측정 전압이다. 또한 본 논문에서는 B-H Curve Tracer를 이용하여 측정하기 위해 시편을 포화시킬 수 있는 NF BP4610 Power Supply와 B-H Curve Tracer 회로, 데이터 수집을 위한 DAQ 보드로 구성하였다. Power Supply는 시편을 충분히 포화 시켜야하기 때문에 낮은 내부 저항과 높은 전류 출력을 필하며, 본 논문에서 사용한 NF BP4610은 최대 $\pm 10A$ 의 전류 출력을 낼 수 있어 전원으로 적합하다. 데이터 수집을 위한 DAQ 보드의 경우 16비트의 분해능과 250kS/s의 샘플링 속도를 가지고 있어 1Hz의 B-H Curve를 측정하기 위해서 충분한 성능을 갖추고 있다.

$$H = \frac{N_1 \times \frac{V_1}{R}}{L} \quad (1)$$

$$B = \frac{1}{N_2 \cdot A} \times V_2 \quad (2)$$

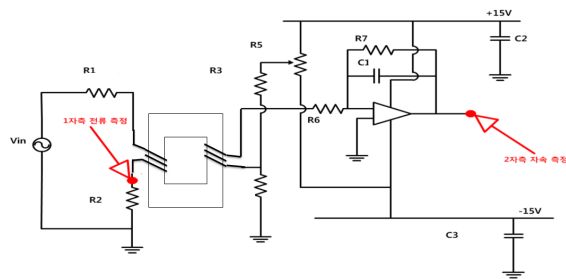


그림 6 B-H Curve Tracer

Fig. 6 B-H Curve Tracer

시편에 응력을 인가하기 위해서 본 논문에서는 그림 7과 같이 AH36 시편을 제작하였으며, 시편을 당기기 위한 걸림쇠 부분은 자기회로에 영향을 주지 않도록 설계 하였다. 그림 8은 추를 이용하여 시편에 응력을 인가할 수 있도록 제작된 시스템을 나타내고 있다. 시편에 10kg의 추를 8개까지 연결할 수 있으며, 기본

봉의 무게를 포함하여 3~83kg의 무게를 인가할 수 있다. 83kg의 추를 연결할 경우 중력 가속도와 질량의 곱으로 814.23N의 힘이 시편에 인가되며, AH36의 한계 탄성 영역인 355MPa보다 작은 최대 23MPa의 압력이 시편에 인가되게 된다. AH36의 탄성 영역을 벗어나는 힘을 인가하게되면 비가역적 변형이 이루어지기 때문에 자화특성도 영구적으로 변하게 되어 실험의 의미가 없다.



그림 7 AH36 시편

Fig. 7 AH36 Specimen



그림 8 응력에 따른 B-H Curve 측정 시스템

Fig. 8 B-H Curve Measurement System according to Tensile Stress

5. 실험 결과

실제 잠수함은 운항하는 수심에 따라 응력이 변하게 되고, 내부 전기 시설에 따라 발생하는 자기장의 세기가 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 AH36의 응력에 따른 B-H Curve 특성을 측정하기 위해서 인장 응력과 인가 자기장의 세기가 증가할 경우에 대하여 실험을 하였다. 인장 응력은 추의 무게를 3~83kg까지 10kg단위로 증가시켰으며, 자기장의 세기는 40A/m부터 포화

표 1 무게와 자기장 세기에 따른 B-H Curve의 최대 자속밀도

Table. 1 Maximum Magnetic Flux of B-H Curve according to Magnetic Field Strength and Weight

단위 [T]	3kg	13Kg	23Kg	33Kg	43Kg	53Kg	63Kg	73Kg	83Kg	최대 변화율 [%]
±40A/m	0.0087	0.0088	0.0089	0.0091	0.0096	0.0096	0.0097	0.0100	0.0101	12.01
±80A/m	0.0220	0.0233	0.0233	0.0228	0.0250	0.0241	0.0259	0.0249	0.0269	22.35
±120A/m	0.0466	0.0495	0.0494	0.0489	0.0523	0.0519	0.0539	0.0542	0.0571	22.68
±160A/m	0.0836	0.0893	0.0908	0.0911	0.096	0.0966	0.1008	0.1018	0.1068	27.72
±200A/m	0.1370	0.145	0.1478	0.1500	0.1572	0.1591	0.165	0.1674	0.1729	26.16
±240A/m	0.1998	0.2081	0.2131	0.217	0.2239	0.228	0.2351	0.2372	0.2463	23.24
±280A/m	0.2608	0.2685	0.2741	0.2789	0.2871	0.2916	0.2989	0.3040	0.3114	19.37
±320A/m	0.3135	0.3208	0.3268	0.3322	0.3409	0.3465	0.3532	0.3591	0.3663	16.85
±360A/m	0.3578	0.3660	0.3727	0.3782	0.385	0.3919	0.3984	0.4045	0.4109	14.83
±400A/m	0.3957	0.4045	0.4109	0.4164	0.4231	0.430	0.4365	0.4418	0.4482	13.26
±600A/m	0.5234	0.5301	0.5356	0.5401	0.5461	0.5512	0.5566	0.5607	0.5658	8.103
±800A/m	0.5863	0.5911	0.5964	0.5999	0.6051	0.6103	0.6143	0.6187	0.6224	6.168
±1200 A/m	0.6512	0.6540	0.6579	0.6618	0.6668	0.6713	0.6753	0.6789	0.6825	4.807
±1600 A/m	0.6892	0.6894	0.6937	0.6973	0.7021	0.7063	0.7102	0.7135	0.7169	4.012
±2000 A/m	0.7126	0.7145	0.7226	0.7226	0.7271	0.7310	0.7350	0.7386	0.742	4.169

영역인 2000A/m까지 증가시키면서 측정하였다. 그림 9는 변화율이 가장 큰 ±160A/m에서 3kg와 83kg일 때 B-H Curve를 나타내고 있으며, 3kg과 83kg의 최대 변화율은 약 27%이다. 그림 10은 40A/m ~ 2000A/m에서 3kg과 83kg의 응력을 증가하였을 경우 자속밀도 최대값을 나타내고 있다. 자기장의 세기가 높아질수록 자속밀도의 변화값이 증가하지만 3kg과 83kg의 변화율을

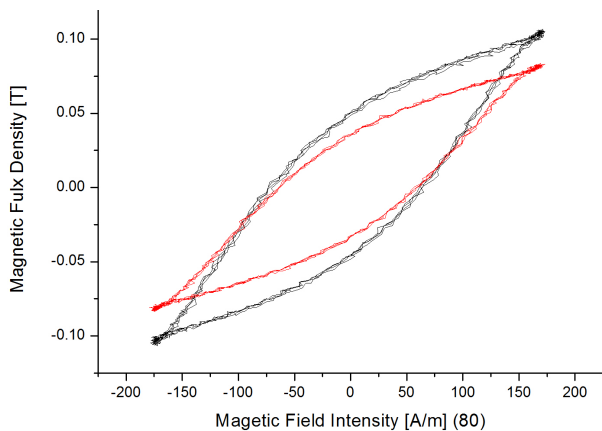


그림 9 ±160 A/m 에서 B-H Curve
Fig. 9 At ±160 A/m B-H Curve

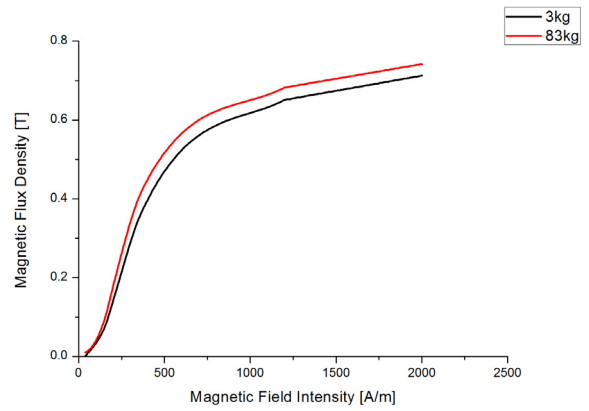


그림 10 40 A/m ~ 2000 A/m 의 자속밀도 최대값
Fig. 10 Maximum Magnetic Flux Density of 40 A/m to 2000 A/m

비교시 포화영역에 비하여 자벽이동 구간이 더 변화율이 높게 나타났다. 또한 표 1은 무게와 자기장의 세기에 따른 AH36의 B-H 곡선의 최대자속 밀도를 나타내고 있으며, 자벽이동 구간에서는 12~27%의 높은 변화율을 나타내고 있지만 포화영역에서는 5% 미만의 낮은 변화율을 나타내고 있다.

3. 결 론

본 논문은 잠수함의 자기 정속화를 위하여 응력에 따른 재질의 B-H 곡선 변화를 측정하였다. 실험을 위하여 AH36재질을 이용하여 시편을 제작하였으며, B-H Curve Tracer를 제작하여 자화 특성을 측정하였다. 또한 인장 응력을 인가하기 위하여 추를 이용하였으며, 3kg~83kg의 추를 10kg 단위로 인가하여 탄성 영역내에서 응력 변화에 따른 자화량 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 실험 결과 지구자기장 크기인 ±40 A/m 영역에서 응력이 인가됨에 따라 자속밀도의 변화율이 12%로 측정되었다. 잠수함이 운항함에 있어서 동일한 지구자기장 내에서 수심에 따라 받는 응력이 다르기 때문에 유도 자화의 크기가 12%이상 차이가 발생할 수 있으며, 정확한 소자를 하기 위해서는 응력에 따른 자화율 변화를 고려해주어야 한다. 또한 내부 전기설비로 인한 유도 자화성분을 고려하기 위해서는 발생하는 자기장의 크기에 따라 자기장 변화율을 고려해주어야 한다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] John J, Holmes "Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures (1st Edition)", Morgan & Claypool.

[2] S. J. Davidson , T. Bailey, A. Parker, R. Twelvetrees and M.Turener "Advanced signature control system", Ultra Electronics PMES, United Kingdom, 2000.

[3] S. J. Davidson and G. J. Webb "Why bother with signature reduction", Ultra Electronics PMES, United Kingdom, 1998 (report)

[4] T.M. Baynes, G.J. Russell and A. Bailey "Laboratory Simulation of the Deperm Process", SCIENCE & TECHNOLOGY August. 2002

[5] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey "Comparison of Stepwise Demagnetization Techniques" IEEE Trans. Magn., vol. 38, July. 2002

[6] John J. Holmes, "Exploitation of a ship's magnetic field signature", Naval Surface Warfare Center, USA, 2006.

[7] UK Defence Standardization(July 2008), "Guide to the Design of Ferro-magnetic Signature Control Systems and Degaussing, Defence Standard 02-612", Ministry of Defence Issu 2.

[8] Bartington Instruments, "Mag-03 Three-axis Magnetic Field Sensors", Operation Manual", 2003.

[9] Timothy Malcolm Baynes BSc "Analysis of the Demagnetisation Process and Possible Alternative Magnetic Treatments for Naval Vessels" The University of New South Wales, School of Physics, Faculty of Science.

[10] John J, Holmes "Modeling a Ship's Ferromagnetic Signatures (1st Edition)", Morgan & Claypool

[11] John J. Holmes, "Exploitation of a ship's magnetic field signature", Naval Surface Warfare Center, USA, 2006.

[12] Olivier Chadebec, Jean-Louis Coulomb, Jean-Paul Bongiraud, Gilles Cauffet, and Philippe Le Thiec, "Recent Improvements for Solving Inverse Magnetostatic Problem Applied to Thin Shells", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, march 2002.

[13] P. G. Rawlins, S. J. Davidson and P. B. Wilkinson, "Aspects of corrosion related magnetic (CRM) signature management", Conference Proceedings UDT 1998, Wembley Conference Centre, London, UK, pp. 237 - 240, 1998.

[14] P. G. Rawlins, S. J. Davidson, "Modelling of AC vessel signatures using time dependent dipoles", Marelec 99, pp. 257-265, 1999.

저 자 소 개



김 종 왕(Jong-Wang Kim)

1984년 9월 29일생. 2011년 송실대 전기공학부 졸업. 2011년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 02-817-9228
E-mail : kimjwgtgh@ssu.ac.kr



김 지 호(Ji-Ho Kim)

1977년 8월 1일생. 2004년 송실대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 미래기술연구소 박사 후 연구원
Tel : 02-817-9228
E-mail : magnetic1@ssu.ac.kr



김 상 현(Sang-Hyun Kim)

1989년 06월 14일생. 2013년 송실대 전기공학부 졸업. 2013년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 031-817-9228
E-mail : comemom@naver.com



양 훈 석(Hoon-Seok Yang)

1989년 04월 04일생. 2013년 송실대 전기공학부 졸업. 2013년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 02-817-9228
E-mail : abemaria32@naver.com



정 현 주(Hyun-Ju Jung)

1975년 12월 05일생. 2000년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002~현재 국방과학연구소 선임연구원
Tel : 055-540-6341
E-mail : hyunju30@add.re.kr



이 향 범(Hyang-Beom Lee)

1967년 10월 21일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995~1996년 기초전력공학공동연구소 전임연구원. 1996~1998년 군산대학교 전기공학과 전임강사. 2004~2005년 미국 Michigan State University 방문교수.

1998년~현재 송실 대학교 전기공학부 교수
Tel : 02-820-0641
E-mail : hyang@ssu.ac.kr