

논문 2010-4-18

HEMP 방호용 차폐실 최적설계를 위한 시뮬레이터 개발

A Development of the Optimized Shielding Room Design Simulator for HEMP Protection

민경찬^{*}, 김동일^{**}Gyung-Chan Min^{*} and Dong-Il Kim^{**}

요 약 HEMP분야에 대한 연구는 1950년대 이후 미국을 중심으로 핵을 보유한 국가에 의해 주로 국가방위를 목적으로 수천 건의 연구가 집중적으로 이루어졌다. HEMP 방호설비의 핵심은 차폐, 필터링, 접지, 과전압 보호로 구성된다. 이 중에서 투자비용이 가장 높은 차폐실 설계에 있어 기존에 나와 있는 이론식을 적용하여 시뮬레이션을 하면 특정 주파수 대역을 제외하고 실제 측정값과 전혀 맞지 않는 모순이 있었다. 본 논문에서는 HEMP 방호용 차폐실의 최적설계를 위해 기존 이론식을 개선하여 실제 측정값과 넓은 주파수 범위에서 잘 일치할 수 있는 이론을 제시하고, 각각의 재료정수에 따라 설계전에 충분히 시뮬레이션을 거쳐 경제적이고 효과적으로 HEMP 방호용 차폐실을 건설할 수 있도록 하는 시뮬레이터를 개발하였다.

Abstract Regarding HEMP has been studied as few thousand of paper by major nuclear bomb holding countries with USA for the self protection against nuclear bomb attract. Major HEMP protection facilities are consist of the shielding, filtering, grounding and high voltage protection circuits. Shielding room construction required a highest cost among the key protective facilities. Most of a theoretical formulas listed on the paper and related books has a little correlations in the certain frequency band between the theoretical formulas and field measuring results. For the reasons we proposed the advanced new theoretical formulas and developed the computer simulation S/W as enough as apply to the cost effective shielding room design for HEMP considering the various structural constants.

Key Words : HEMP : High Altitude Electro Magnetic Pulse, EMP: Electro Magnetic Pulse, SE : Shielding Effectiveness, PCI : Pulse Current Injection, CWI : Continuous Wave Immersion, POE : Point-Of- Entry

1. 서 론

HEMP 방호를 목적으로 하는 핵심설비 구성은 차폐실, 필터링, 접지체계, 과전압보호회로로 구성된다.

이 중에서 차폐실의 건설은 비용이 높으므로 다양한 고려요소를 사전에 충분히 검토되어야 한다. 본고에서

는 기존 문헌^{[1][2]}에 나와 있는 대부분의 차폐도를 구하는 이론식은 실제 시설공사 후 실측한 데이터와 특정 협대역 주파수에서만 상관성이 있고, 넓은 주파수 대역에서 차폐도를 예측하는 것은 거의 불가능하였다. 본고에서는 이런 문제점의 원인을 규명하고자 간과된 새로운 공식을 제시하고 이의 결과를 컴퓨터 시뮬레이션하여 비교적 넓은 주파수에서 실측값과 높은 상관성을 갖는 것을 확인하였다. 차폐도는 주로 차폐재료의 재료정수 도전을 σ , 투자율 μ 에 의해 결정된다. 일반적으로 차폐도를 구하는

^{*}정회원, 주)한국기술연구소

^{**}중신회원, 한국해양대학교 전파공학과
접수일자 2010.04.20, 수정일자 2010.07.20
게재확정일자 2010.8.13

데 있어 차폐실이 가지는 구조정수를 적용하지 않고 순수 재료정수만을 적용하여 구하게 되면 이론값과 실측값이 거의 일치하지 않게 된다. 따라서 본고에서는 기존 차폐도를 구하는 이론식에 차폐실 건설에 따라 달라지는 구조정수를 구하고 이를 재료정수의 실효값으로 적용하여 실측값과 근사한 값을 얻을 수 있었다.

II. 차폐도 관련 기존 이론

1. 차폐도 계산 기존 이론

금속으로 된 차폐체의 차폐도는 차폐재질에 전계가 인가되면 유도기전력이 발생되는데 이는 공급 기전력과 반대 방향이 되어 전류흐름을 방해한다. 도체의 중심부에 가까울수록 쇄교되는 자속이 증가하여 표면으로만 전류가 흐르려는 성질 즉, 표피효과에 의해 결정되는 흡수손실 A, 자유공간과 금속매질의 특성 임피던스로부터 반사손실 R, 보정계수 C를 구해 전체 차폐도는 이들 각각의 합이 차폐도로 다음과 같이 표현 된다.

$$\text{차폐도/S.E. [dB]} = A+R+C \quad (1)$$

가. 흡수손실

전자파가 매질에 투입되면 지수 함수적으로 감소되는데 감소되는 원인은 전자파가 금속에 입사되면 전류를 만들어 내고 이 전류는 금속의 저항에 따라 감소되거나 발열을 일으킨다. 매질내 거리 t에서 파의 감쇠 밀도는

$$E_1 = E_0 e^{-\frac{t}{\delta}}, H_1 = H_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2)$$

로 감쇠한다. 초기값의 1/e 또는 37%로 감소된 거리를 Skin depth, δ 로 흡수손실을 결정한다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \text{ [m]} \quad (3)$$

차폐도 계산을 위해 식(2)를 log를 취하여 흡수손실을 dB로 표현하면 $A = 20\left(\frac{t}{\delta}\right)\log(e)$ [dB] 가 된다.

여기서, $\log(e) = 0.4345$ 이므로 흡수손실 A는 다음 식(4)로 나타내 진다.

$$A = 8.69\left(\frac{t}{\delta}\right)\text{[dB]} \quad (4)$$

나. 반사손실

원방계에서 반사손실을 구하기 위해서 매질내 특성임피던스 Z_0 는 다음 식

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \text{ 으로 주어진다.}$$

도체의 경우 $\sigma \gg j\omega\epsilon$ 이 성립하므로 차폐 임피던스 Z_s 는 다음 식으로 표현된다.

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (5)$$

자세한 유도과정은 참고문헌^[2]에 상술되어 있으므로 생략하고 반사손실의 결과 식은 식(6)과 같이 표현된다.

$$\text{반사손 } R = 20 \log \frac{|Z_w|}{4|Z_s|} \text{ [dB]} \quad (6)$$

여기서 Z_w 는 파동임피던스이다.

2. 차폐도 관련 수정이론

기존의 차폐도를 구하는 이론에서 투자율 적용에 있어 재료 자체의 상대 투자율 대신 차폐실 자체가 단일 도체로 되어있지 않고, 이음매에 의한 공극이 존재하므로 공극에 의한 실효투자율을 적용하였고, 도전을 역시 공극에 의해 낮아져 실효 도전율을 갖게 된다. 또한 투자율 자체가 주파수에 따라 투자율 값이 급격하게 낮아지므로 이들 3가지 요소를 차폐도 계산이론에 적용하였다.

가. 공극(Air gap)이 있는 차폐실에서 실효 투자율

차폐실의 둘레 길이를 L_c [m], 단면적을 S [m^2], 투자율을 μ [H/m]라 하고, 이음매 공극의 길이를 L_g [mm], 단면적을 S [m^2]라 하며, 이음매 공극의 투자율은 μ_0 로 가정한다. 자속 Φ 는 차폐금속 내부나 공극에서나 모두 단면적 S 내를 균등하게 통과하는 것으로 가정하면, 차폐재 금속 부분과 공극 부분의 자기 저항 R_c 와 R_g 는 각각 다음과 같다.

$$R_c = \frac{L_c}{\mu S} = \frac{L_c}{\mu_0 \mu_r S} \text{ [AT/Wb]}$$

$$R_g = \frac{L_g}{\mu_0 S} \text{ [AT/Wb]}$$

이 자기 회로는 자기 저항 R_c 와 R_g 가 직렬로 접속되어 있으므로, 공극이 있는 경우의 합성 자기 저항 R_m 은 다음 식(7)과 같이 표현 된다.

$$R_m = R_c + R_g = \frac{L_c}{\mu S} + \frac{L_g}{\mu_0 S} = \frac{L_c}{\mu S} \left(1 + \frac{L_g}{L_c} \mu_s \right) \quad (7)$$

만일 차폐재간에 공극이 없는 경우, 즉 공극에 차폐재와 같은 투자율 μ 인 재료로 채워졌다고 할 때 합성 자기 저항 R_{m0} 는 다음 식(8)과 같다.

$$R_{m0} = \frac{L_c}{\mu S} \left(1 + \frac{L_g}{L_c} \right) \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 비교하면 차폐재에 공극이 있기 때문에 합성 자기저항의 괄호내 $\frac{L_g}{L_c}$ 가 $\frac{L_g}{L_c} \mu_s$ 만큼 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉, $\mu_s = 1,000$ 인 철의 차폐재인 경우 차폐실 전체길이와 합성 공극의 비 $\frac{L_g}{L_c} = 1/1,000$ 이 될 때 $R_m = 2R_{m0}$ 이 되어 자기 저항을 크게 증가 시킨다는 것을 알 수 있다. 자기저항이 증가하는 다는 것은 그의 역수로 표현되는 투자율 즉, 실효투자율이 그만큼 감소한다는 것을 의미한다. 실제 시뮬레이션 툴에서는 그림 1과 같이 차폐실 둘레의 길이는 L [m]로 하고 하나의 이음매 두께, 여기서는 L_g 를 [mm]로 대치하여 계산된다.

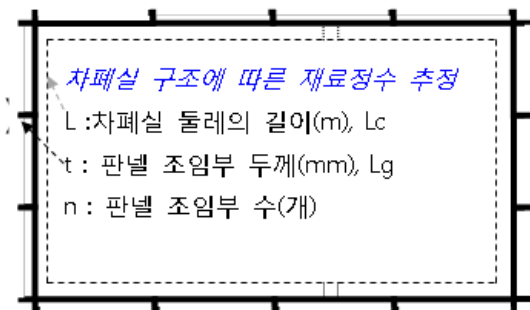


그림 1. 차폐실 구조에 따른 재료정수 추정
Fig. 1. Extrapolation of the structural constants

나. 이음매가 있는 차폐실의 차폐재 도전을 계산

이음매가 있는 차폐실 전체에 대한 도전율을 이론적으로 정량화 시키는 것은 한계가 있다. 왜냐하면 일반적으로 PAN type 차폐실의 이음매는 볼트 조립방식으로 전체의 도전율이 얼마인지는 실측을 하기 전에 계산상으로 어렵다. 설령 이론식 정립이 가능하다고 해도 매우 복잡한 식이 되어 실무에 적용하는데 한계가 있다.

따라서 본고에서는 시뮬레이션 툴에서 100분율을 적용하여 사용자가 임의로 설정해 줄 수 있도록 하였다.

다. 투자율의 주파수 특성^{[3][4]}

투자율의 주파수 특성은 특별한 경우를 제외하고 Snoek 법칙에 따라 $f \cdot \mu = 5,600$ [MHz]로 사용주파수의 제한을 받는다. 그러나 철을 포함한 자성재료는 재료의 종류에 따라 변수가 많다. 다만 물성적인 공통점은 투자율이 높을수록 사용주파수가 낮아지는 특성을 갖고 있다.

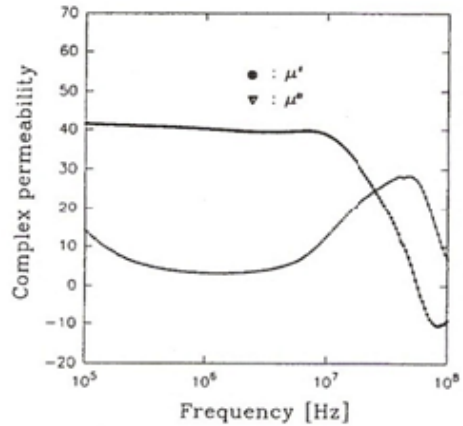


그림 2. 차폐재료 투자율의 주파수 특성
Fig. 2. Permeability on frequency domain

**3. 수정이론에 따른 차폐도 시뮬레이션 결과
가. 시뮬레이션 툴 개발**

개발한 툴의 형태는 다음 그림3과 같다. 우선 차폐실의 재료를 메뉴에서 선정하면 재료의 고유투자율, 도전율이 자동으로 삽입된다. 차폐도 계산결과는 주파수 표에 자동으로 표현되는 기능을 갖고 있다. 기존 이론식에 따라 계산된 차폐도는 “ADD” 1회 클릭으로 계산되는데 만일 본고에서 제안한 차폐실의 기구적 상수를 삽입하여 계산하고자 할 때는 차폐실의 둘레길이, 이음매 두께,

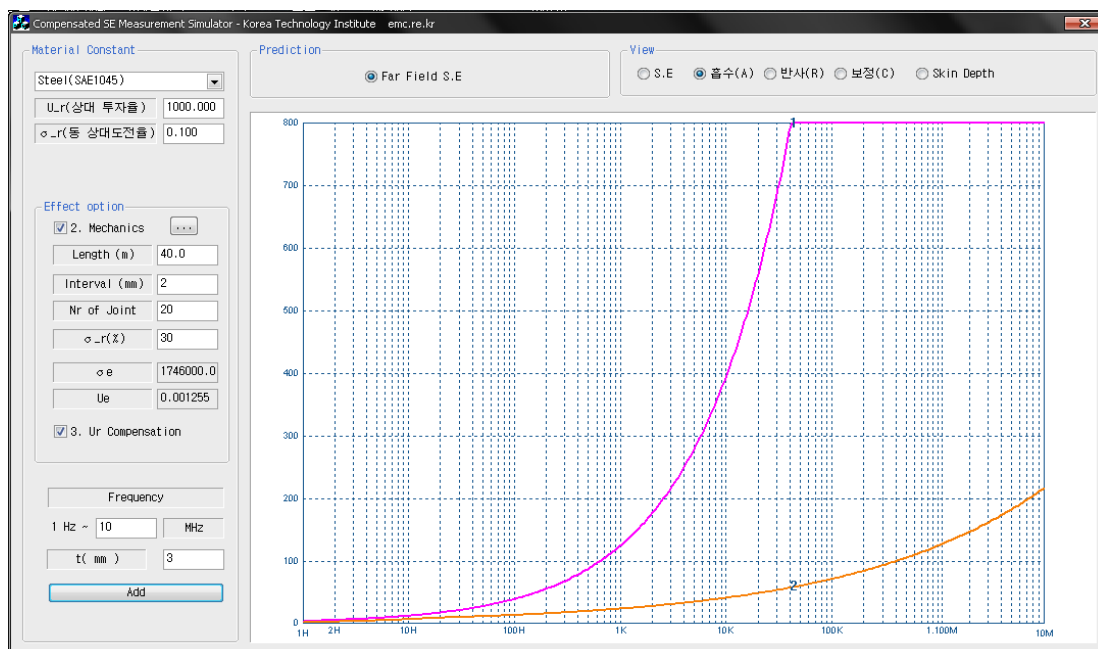


그림 3. 흡수손실에 의한 차폐도 비교. 1 : 기존이론, 2 : 제안이론

Fig. 3. Comparison of the shielding effectiveness for absorption loss between 1) existed theory and 2) improved theory,

이음매 수를 삽입하면 자동으로 실효투자율이 구해지도록 되어있다.

도전율은 사용자가 고유도전율의 100분율로 임의로 선정하거나, 알고 있는 경우 직접 입력하고 “ADD”를 클릭하면 원방계, 근접계 조건에서 흡수손, 반사손, 종합차폐도, 표피깊이 등이 자동으로 계산되도록 되어 있다.

나. 저주파 자계차폐도의 결과 비교

일반적으로 차폐실의 차폐도 실측값은 낮은 주파수^{[5][7]} 10kHz 미만에서 50~60dB 정도 된다. 그림3에서 결과 값을 비교하면 그래프 1은 기존이론에 의한 흡수손 차폐도이고, 그래프2는 제안자의 수정 이론에 따라 추정된 흡수 손 차폐도로 비교적 실측값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 물론 실효투자율의 경우 이음매 조임 장력, 삽입된 가스킷의 종류 그리고 도전율 등 많은 변수가 존재하나 기존 이론식보다 현실적인 차폐도를 유도해 낼 수 있다.

다. 개발된 시뮬레이션 툴을 이용한 HEMP 대비 지하 구조물에서 지층 두께에 따른 HEMP 전계차폐도

일반적으로 사용되는 철 재료로 제작된 차폐실의 차폐도의 경우 기존 이론식에 의한 차폐도 계산결과는 그림4의 그래프 1과 같고, 본고에서 제안한 차폐실 구조의 이음매에 의한 실효 투자율, 실효 도전율 그리고 투자율의 주파수 특성 3가지를 함께 고려하여 시뮬레이션한 결과는 그래프2와 같다.

그라프 3은 지층의 두께 1m, 토양의 투자율 4, 평상시 대기 도전율^{[6][7]} 0.001의 조건에서 차폐도이다. 일반적으로 HEMP 에너지의 주파수 분포^{[7][8]}는 150MHz 이내로 1m 이상 지하에 있는 구조물은 토양자체로도 충분한 차폐도를 보장 받을 수 있다는 것을 알 수 있다.

III. 결론

기존 차폐도 관련 이론에 연구자가 차폐실의 기구적 설계 및 제작조건에 따라 변하는 실효 투자율, 실효 도전율 그리고 차폐재료 고유투자율의 주파수 특성 3가지를 추가 적용하여 실무에 적용할 수 있는 차폐도 계산 툴을 개발하였고, 이들 각각에 대한 결과를 비교하였다. 본 연

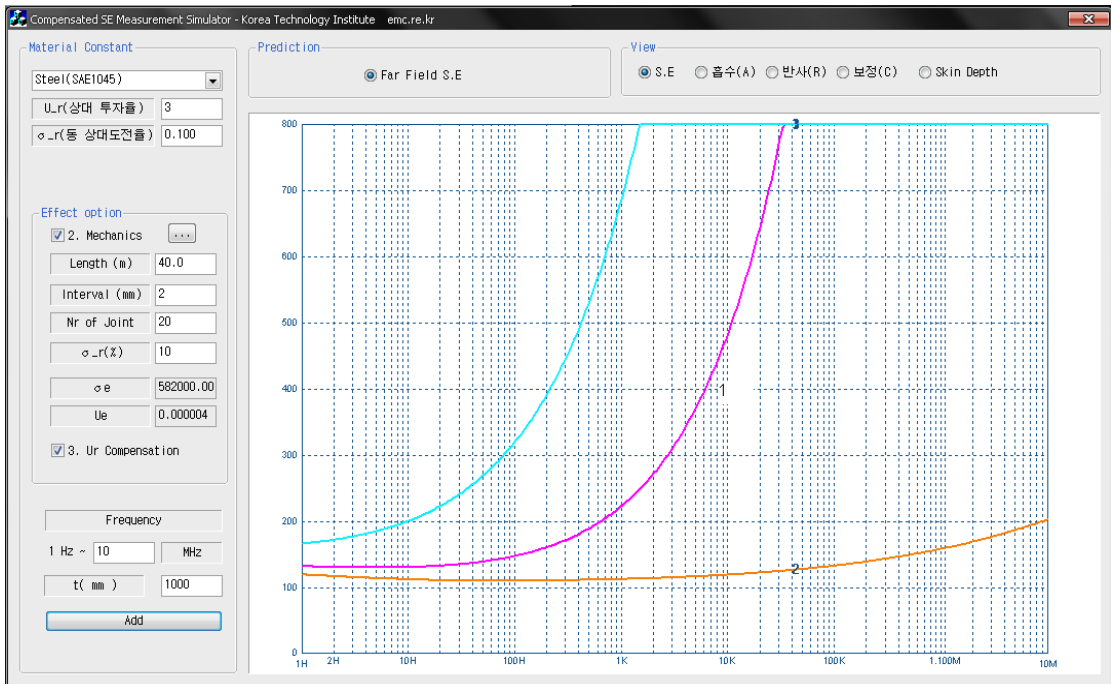


그림 4. 평면파 차폐도 비교, 1 : 기존이론, 2 : 제안이론, 3 : 1m 두께의 토양의 차폐도
 Fig. 4. Comparison of the shielding effectiveness in the far field. 1) Existed theory and 2) Improved theory, 3) Shielding effectiveness in the 1[m] soil under ground

구결과는 HEMP 방호용 차폐실 설계뿐만 아니라 HEMP 방호시설에 사용되는 콘크리트 구조물, 토양과 암반의 종류 및 함수량이 차폐도에 미치는 영향^[9]을 추정하여 경제적이고 실용적인 HEMP 방호시설 설계 및 건설에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 연구결과 100MHz 대역까지는 비교적 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 그 이상 GHz 대역 주파수 대역에서는 계산상 차폐도 추세선이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 120dB 이상 차폐도는 물리적 의미가 없거나, 측정 기기의 제약으로 실측을 할 수 없는 경우에 해당 될 것이다. 다만, 실측 결과 특정 또는 GHz 주파수 대역에서 부분적으로 차폐도가 80dB까지 낮아지는 대역이 발견되는 데, 이 원인은 POE 등 차폐실 자체의 미세한 개구부 존재, 사용된 전원 및 신호용 필터의 감쇠특성에 원인이 있을 것으로 추정되므로 이에 대한 연구가 추가로 이루어졌으면 한다.

참 고 문 헌

- [1] Henry W. Ott. "Noise Reduction Techniques in Electronic system ", 166-180쪽
- [2] 민경찬 " 전자파 환경공학", 171-185쪽, 한국기술 연구소. 03. 2008
- [3] 김성재, 정명득, 백중규 " 주파수 변화에 따른 다결정 MgFe₂O₃의 초기 투자율 특성연구", 한국자기학회지 Vol.4. June 1994
- [4] EPCOS, " Ferrite and Accessories ", Sep. 2006
- [5] R. L. Monroe " EMP Shielding Effectiveness and MIL STD 285", July 1973
- [6] J. H. Scott, R. D. Carroll, and D. R. Cunningham, "Dielectric Constant and Electrical Conductivity of Moist Rock from Laboratory Measurements", 17. Aug 1964, U.S. Geological Survey. EMP SSN
- [7] J. H. Scott "Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil ", May 26.1966
- [8] F.M Tesche Lutech, Inc " A Study of Overhead

Line Responses to High Altitude Electromagnetic Pulse Environments”, Dec. 1986

- [9] Carl. E. Baum “ The Reflection of Pulsed Wave From the Surface of a Conducting Dielectric”, 18. Feb. 1967. EMP Theoretical Note 025.

저자 소개

김 동 일(정회원)



- 1984.03 일본 동경공업대학 공학박사
- 1977.02 한국해양대학교 공학석사
- 현, 한국해양대학교 전파공학과 정교수 한국전자과학회 명예회장
- dikim@hhu.ac.kr
- 2002 한국전자과학회 회장 역임
- 전, 정보통신부 주파수 심의위원

- 전, 한국해양대학교 대학원장
- 2002-2003년 IEEE EMC Korea Chapter Chairman
- 주요 수상;
- 산학협동 대상/ 산학협동재단 이사장
- 학술상/ 한국전자과학회장
- 과학기술진흥 유공 대통령 표창
- 2008 학술연구조성 우수성과 50선/ 한국학술진흥재단
- 2010.04. 제6회 한국교육대상/ 한국교직원공제회
- 논문류
- 국내학술지 : 212편
- 국제학술지(SCI급) : 33편
- 국내학술회의 발표논문 : 232편
- 국제학술회의 발표논문 : 47편
- 저서류
- 전자파 환경공학, 대영사 2001. 외 11권
- <주관심분야 : EMC 환경공학, 전파흡수체, 전파전파 해석>

민 경 찬(종신회원)



- 1996.02 한국해양대 전파공학과 공학박사
- 1983.08 경희대학교 전자공학과 공학석사
- 1979.02 광운대학교 통신공학 학사
- 1977.02 국립목포해양대 통신공학과 졸업

- emc.re.kr minkti@naver.com
- 전, 경희대학교 전파공학과 겸임교수, 통신시스템, 안테나와 전파전파
- 전, 한국해양대학교 전파공학과 겸임교수, 전자파 환경공학
- 전, IEC 80, 65 등 한국 전문위원/ 산업안전관리공단
- 전, CISPR 국내 전문위원/ 정보통신부
- 전, 국가정보통신표준화 위원/ 정보통신부
- 전, EMP 연구위원/ 정보통신부
- 중소기업지원 공모 중소기업청장상 수상
- 현, 사단법인 한국인터넷방송통신학회 부회장
- 현, 주) 한국기술연구소 대표이사/ 소장
- 저서류
 - 유선무선 설비. 1987. 성안당
 - 노이즈 종합대책. 1990. 성안당
 - 전자파 환경공학. 2008.03 한국기술연구소
- 논문류
 - 전자파 내성향상기술에 관한 연구 등 다수
- <주관심분야 : 전자파 환경공학/ EMC, HEMP방호기술, EMC Engineering, 접지 최적 설계, HPEM, 전파전파 해석 >