

HEMP 분석과 방호 효율성

이선의*, 김진영*, 박우철*

HEMP Analysis and Shielding Effectiveness

Sun Yui Lee*, Jin Young Kim* and Woo Chul Park*

요 약

본 논문에서는 HEMP의 개념을 소개하고, 안테나 요소의 배치 변화에 따른 방호 효율성을 분석한다. 높은 주파수의 EMP를 맥스웰 방정식을 이용하여 LOS에서 근사한다. 전자기파 감쇄의 영향을 분석하기 위하여, 차폐룸을 구성하여 측정 데이터를 얻는데 이용한다. 수신 안테나의 거리와 주파수를 변화시켜 차폐 정도를 측정한다. 기준이 되는 미국 규격문서와 측정값을 비교하고 측정방법을 간소화해본다. 차폐룸 내부를 3가지 조건으로 만들어 변화를 차폐 정도를 측정한다. 정방향 측정과 역방향 측정의 차이를 살펴보고 차폐룸 측정에 영향을 미치는 요소를 찾는다.

Key Words : HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse), SE(Shielding effectiveness).

ABSTRACT

In this paper, we introduce a concept of HEMP systems and analyze a shielding effectiveness by varying placements of the antenna elements. Maxwell's equations for the high frequency of the EMP is represented in the LOS. In order to investigate the effects of electromagnetic attenuations, a shielding room was constructed and employed to obtain measured data. Shielding effects were measured by changing frequency and the distance of receiving antenna. Each measured value was compared to U.S. standard and measuring method was simplified. Shielding effects were measured by three different conditions of shielding room. Find the difference between forward measurement and reverse measurement and factors which affects the measurement in shielding room.

I. 서 론

EMP(electromagnetic pulse)에 대한 연구는 군사 분야에서 많은 관심을 받고 있다. EMP는 비살상의 광범위한 전자 기기들을 마비시켜 전술적으로 아주 중요한 역할을 할 수 있기 때문이다. 그에 대한 방호가 되지 않으면 많은 피해를 당할 수 있고 범위가 1000km 되기 때문에 주요 시설은 반드시 EMP 대처를 해야한다. EMP가 높은 상공에서 폭발한 HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse)에 대한 이론은 실제 측정 결과와 핵무기 사용을 실험한 국가에서 가장 많은 성과를 가지고 있다. 핵폭발로부터 발생 되는 감마 레이는 지표 상공 20~40Km에서 폭발하여 Compton 전자를 발생 시킨다. 이 전자는 거의 1 MeV 급의 전하량을 가지고 지구 대기의 분자와 충돌하거나 지구의 자기장과 충돌하여 이온화 되는데 이 과정을 통하여 강력한 전류를 발생시키는

전자기장이 된다. 이 전자기장 펄스는 10kV 이상의 최대값을 가지고 있다. EMP의 실제 이론은 최대 전기장의 값과 시간에 따른 분포로 설명할 수 있다. 하지만 1962년 이후 부터는 공중 핵폭발 실험이 금지되고 부터는 실험으로 얻을 수 있는 자료는 제한되었다.

EMP 연구자들은 이론적으로 실험 데이터를 대신할 방법을 연구하였다. 소스로부터 오는 전자는 같은 지점에서 동시에 진행되어 오는 평면파로 보고 분석을 한다. 공기분자가 있는 평면으로 감마 레이가 직교 입사 되는 층을 고려한다. 이것은 EMP 파동 방정식으로 높은 주파수의 EMP를 근사할 수 있다.

이 근사 방법은 1963년에 Karzas, Latter and Longmire에 의해서 개발 되었다 [1]-[3].

본 논문에서는 STD(Software Test Description)표준과 MID(Military Standard) 표준을 토대로 맥스웰 방정식을 통

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-(H0301-13-1005) 광운대학교 전파공학과 소속 유비쿼터스 통신 연구실 (*sunyui12@naver.com), (*jinyoung@kw.ac.kr), (*king818@ktr.or.kr)
접수일자 : 2013년 7월 18일, 수정완료일자 : 2013년 8월 30일, 최종게재확정일자 : 2013년 9월 3일

해서 높은 주파수의 EMP 근사식을 살펴보고 실제 차폐를 통하여 SE(Shielding Effectiveness)를 측정한다. 주파수에 따른 차폐 효과를 SE값으로 나타내고 송수신 안테나의 위치를 달리하여 변화를 측정하고 원인을 분석한다.

II. EMP 파동 방정식

어떤 지점 r' 에서 시간 t 일 때의 전기장 $E(r',t)$ 은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E(r',t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{source} \left[\frac{\rho(r,t_r)}{R^2} \hat{R} + \frac{\dot{\rho}(r,t_r)}{cR} \hat{R} - \frac{\ddot{J}(r,t_r)}{c^2R} \right] dV, \quad (1)$$

dV 의 부피에서의 소스 위치를 r 이라고, $R=|r-r'|$ 는 소스와 관찰자의 거리, r' 은 관찰자이고 r 은 폭발 지점, $t_r=t-R/c$ 는 지연시간, $\rho(r,t_r)$ 은 전하 밀도, 그리고 $J(r,t_r)$ 는 전류밀도이다. 식 (1)은 Jefimenko 적분을 이용한 맥스웰 방정식이다. 식 (1)의 다음 term 은 연속방정식과 지연시간 변환을 이용하여 식 (2)로 다시 쓸 수 있다.

$$E(r',t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{source} \left[\frac{\rho(r,t_r)}{R^2} \hat{R} - \frac{J(r,t_r)}{cR^2} + 2R \frac{J(r,t_r) \cdot R}{cR^4} + R \frac{\dot{J}(r,t_r) \cdot R}{c^2R^3} - \frac{\ddot{J}(r,t_r)}{c^2R} \right] dV, \quad (2)$$

식 (2)에서 $\partial/\partial t \rightarrow \partial/\partial t_r$ 그리고 $\nabla_t \rightarrow \nabla_r - \hat{R}\partial/\partial t_r$ 이다. 여기서 우리가 관심있는 것은 전자기장 방사이기 때문에 $1/R$ 비율의 term 만을 고려하여 다시 쓰면 식 (3)이 된다.

$$E(r',t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{source} \left[R \frac{\ddot{J}(r,t_r) \cdot R}{c^2R^3} - \frac{\ddot{J}(r,t_r)}{c^2R} \right] dV. \quad (3)$$

식 (3)은 LOS에서 전기장의 가로축 성분을 제거하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$E_t(r',t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{source} \frac{J_\theta(r,t_r) \sin\theta_s \cos\chi}{c^2R} dV, \quad (4)$$

여기서 χ 는 LOS 에서의 관찰자와 소스의 각도이고 θ_s 는 관찰자와 연결된 라인과 소스간의 각도, 방향 $J_\theta(r,t_r)$ 는 EMP 소스 이다. 시간 변화 전류 밀도 $\dot{J}_\theta(r,t_r)$ 는 폭발 지점의 수직이다 [4].

III. HEMP 방호시설의 SE 측정

1. EMP 방호시설 차폐효과

이미 지어진 주요시설의 EMP 방호시설을 구축하여 그 효과를 측정하기 위해서는 주파수에 따른 각 SE값의 측정이 필요하다. 그리고 방호시설의 환기를 위하여 환기구도 고려하여 시공을 하여야 한다. 또한 외부에서 연결되는 모든 케이블은 대 EMP 방어 필터를 장착하여야 한다.

HEMP는 E1,E2와 E3로 구성되는데 E1과 E2가 핵심이다. E1에서 높은 short pulse가 도달하고 E2에서 지속적인 전자기파가 오기 때문에 순간적인 영향인 E1은 전자기기의 내부 회로를 태우며 다음 도달하는 E2 시간에서의 지속적인 전자기파는 전력망을 공격한다. 따라서 중요시설은 외부와 연결된 모든 케이블은 필터와 E1을 방어하기 위한 도체 외벽이 필요하다 [5].

그 시설의 측정은 미국의 MIL 규격에 따르면 굉장히 다양한 측정과정을 요구한다. 측정방법은 외부의 Tx 안테나를 배치하고 내부의 Rx 안테나를 배치해 전자기파의 감쇄정도를 측정하는 것이다. 또한 내부 시설을 무수히 많은 격자로 나누고 일일이 그 격자 내부에서의 SE값을 측정한다. 그리고 시설의 외벽을 두께 2.05m의 콘크리트 두께를 두고 그 안쪽을 도체로 감싸야하는데 이럴 경우 상당한 공간 손실을 주게 되어 많은 비용을 부담해야 한다. skin depth는 그 물질의 유전율과 손실 탄젠트가 클수록 작아진다. 콘크리트의 특성을 보면 물-시멘트비에 따른 전자기 특성 변화는 1970년도부터 많이 시도 되어 왔다.

콘크리트의 전자기 특성에 가장 큰 변화를 미치는 포화도에 따른 전자기 특성 변화를 요구한다. 전도율의 경우는 주파수가 커질수록 증가하고 유전상수의 경우는 감소하는 것으로 알려져 있고 포화도 100%와 20% 수준에 대한 측정이다. 다공성 매질인 콘크리트는 수분 포화도가 높을수록 전자파 감쇄효과가 큰 것을 알 수 있다.

따라서 차폐률의 SE값을 결정하는 요소는 외벽 콘크리트의 수분함량에 따른 전도성과 두께, 도체 외벽의 전도성과 두께, 외부 환경과의 고유 인피던스 차이에 의한 반사계수로 결정된다.

2. EMP 방호측정결과

본 연구에서는 차폐효과를 측정하기 위하여 외부에서 송신 안테나를 두고 내부에 수신안테나를 두는 고전적 방법과 측정을 간소화하기 위하여 내부에 송신안테나를 두고 외부에 수신안테나를 두는 두 가지 방법을 측정하고 차이점을 분석하였다. 실험 수행 시 안테나의 각도, 높이, 거리의 오차에 의해 측정 조건이 달라지면 결과 값이 달라지기 때문에 고정된 측정 조건이 필요하다. 그림 1은 측정을 수행한 실험구성이다. 수신안테나를 차폐물 내부에 위치시키고 정방향으로 측정을 수행하였다.

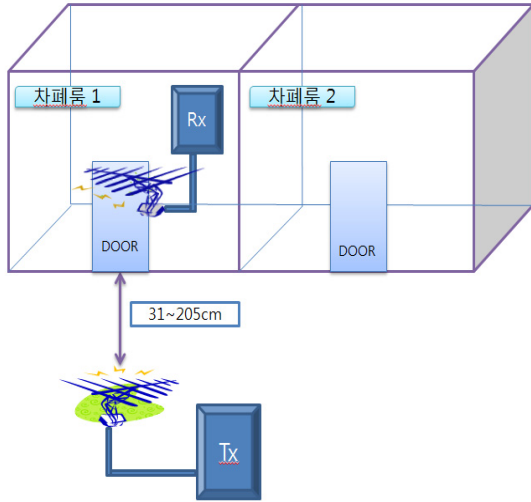


그림 1. 정방향 실험구성.

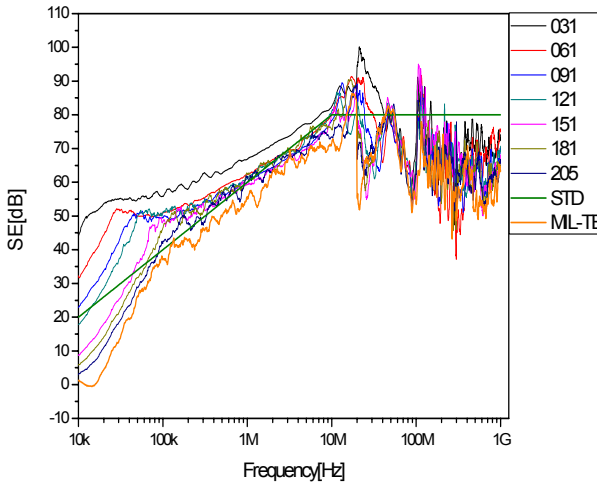


그림 2. 정방향 측정결과.

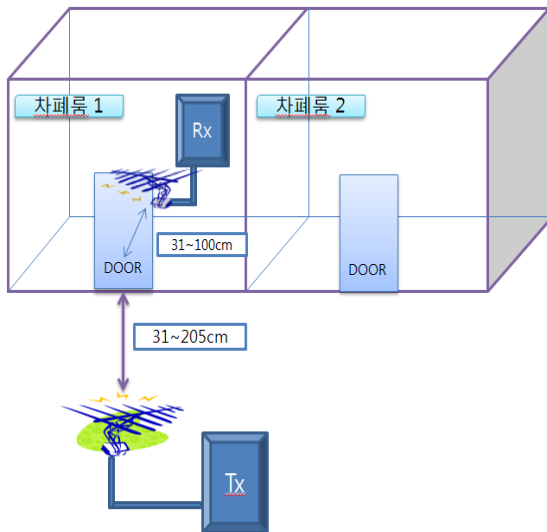


그림 3. 역방향 실험구성.

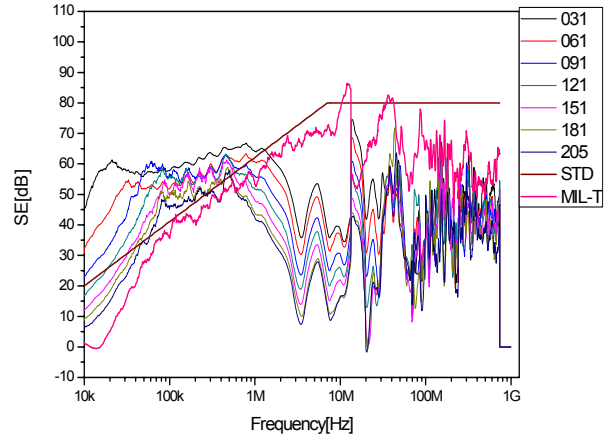


그림 4. 역방향 측정결과

내부의 수신안테나의 거리를 31cm 거리에 고정하고 송신 안테나의 거리를 31, 91, 121, 151, 181, 205cm로 변화시켜서 측정을 수행하였다. 그림 2는 송신안테나의 거리를 변화시켜 SE값을 측정하는 것이다. STD와 MIL은 미국 표준문서에 나온 SE값을 나타낸다. 결과 값을 보면 가까운 경우 낮은 주파수에서는 SE값이 높아지고 주파수가 높아질수록 안테나의 거리에 따른 영향이 적어지는 것을 알 수 있다. 실제 공개된 MIL 규격을 보면 10kHz 이하의 차폐 효과는 고려하지 않는 것을 알 수 있다[6]. 가장 중요한 구간은 20MHz에서 1GHz 영역의 평면과 구간에 SE 값이 80dB 이상을 가져야 한다. 따라서 실험결과 주요 구간에서 MIL 규격과 높은 유사성을 보였다. 다음으로 측정과정을 간소화하기 위하여 내부에 송신안테나를 배치하여 실험을 구성하였다.

그림 3은 역방향 실험구성이고, 그림 4은 역방향의 측정결과이다. 정방향보다 MIL 규격과 상당한 편차를 보이는 것을 보아 실험 오류가 있는 것으로 보인다. 따라서 편차가 발생한 원인을 찾기 위하여 실험구성을 변화시켜 재측정을 하였다. 정 방향과 다른 점은 차폐룸은 내부의 난반사로 인하여 측정장비에 영향을 미치는 것이다. 다시 실험을 구성하면 그림 5과 같다. 그림 6는 Tx-Rx 정방향, Rx-Tx 역방향의 측정 SE값을 표시한 것이다. 측정값을 비교하면 낮은 주파수 영역에서 SE값이 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 내부 차폐룸의 난반사에 의한 안테나 특성의 저하로 인한 것으로 보인다. 실제로 이 값을 얻은 후 다시 정방향으로 측정을 하게 되면 역방향보다 더 높은 값을 얻는 것을 알 수 있다. 난반사의 영향을 고려하여 차폐룸의 SE 값을 얻기 위하여 다시 실험 구성을 바꾸어 실험을 실시하였다. 그림 7과 그림 8은 차폐룸의 난반사를 없앤 측정 결과를 얻기 위하여 내부를 전자파 흡수 소재로 감싸고 실험한 그림이다. 전파가 입사되는 방호시설의 금속 부분만이 전자파 흡수 물질이 입혀있지 않고 나머지 공간에서는 안테나가 반사 되어 안테나 특성이 나빠지는 것을 막기 위하여 전자파 흡수물질을 부착하여 실험한 것이다.

그림 9의 측정 결과 앞에서 실험한 결과와 저주파 대역의 SE값이 더 유사하게 나온 것을 확인할 수 있다. 실험 결과 차폐룸 내부의 Tx 안테나를 배치하여 시험할 경우 외벽 도체를 반사하여 안테나로 돌아오는 난반사 파에 의해서 안테나 성능을 저하시켜 SE값에 영향을 주는 것으로 보인다. 따라서 건설된 차폐시설의 방호성능을 정확히 측정하기 위해서는 실험에서 보인 것처럼 난반사의 영향을 줄이기 위하여 실험 장비의 난반사 영향을 줄여 측정하여야 한다. 또한 안테나의 주변의 도체가 위치할 경우 성능 저하를 보이기 때문에 난반사로 인한 안테나 성능 저하를 고려하여 외부 도체벽의 SE값을 측정하여야 한다.

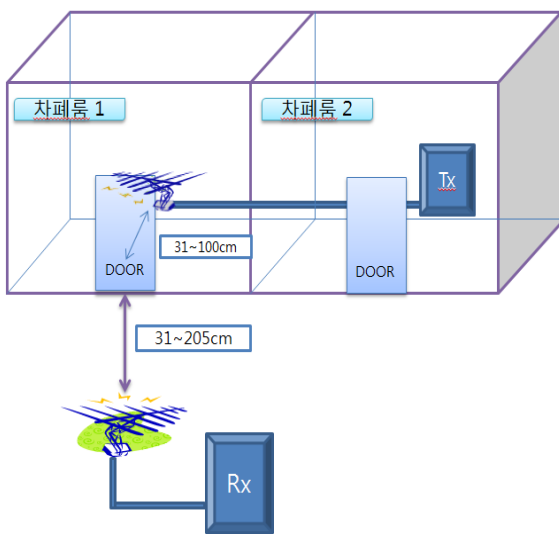


그림 5. 역방향 송신부 장비 차폐 실험구성.

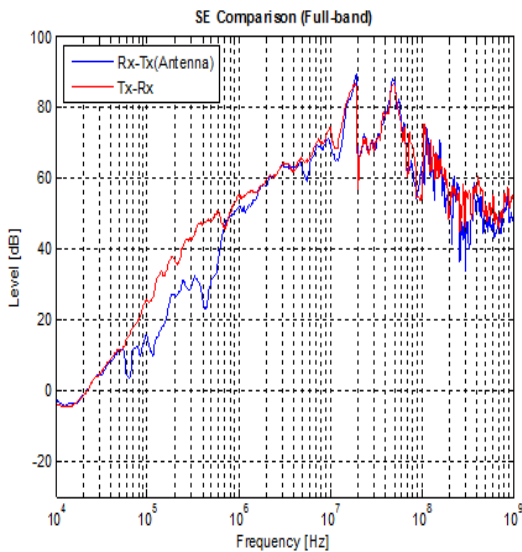


그림 6. 정방향과 역방향의 SE 값 비교.

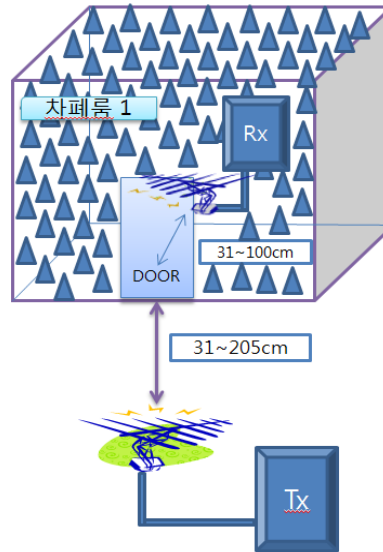


그림 7. 무반사 정 방향 실험구성.

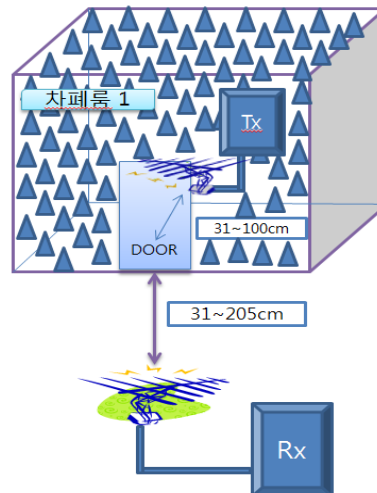


그림 8. 무반사 역방향 실험구성.

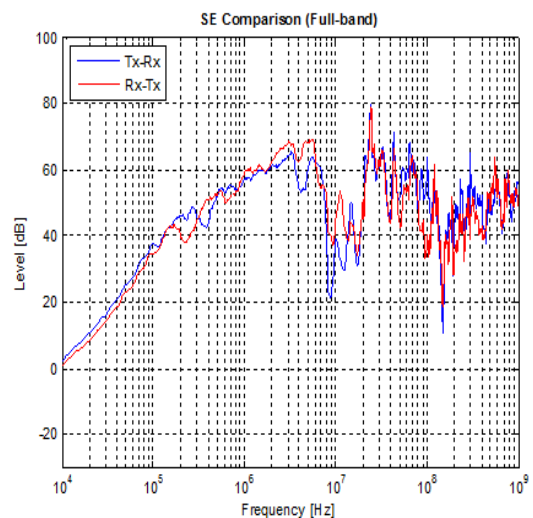


그림 9. 무반사 정방향 및 역방향 SE 값 비교.

IV. 결론

높은 고도에서 폭발한 핵폭발로 발생하는 EMP는 근사적으로 1-D의 맥스웰 방정식으로 표현할 수 있다. 실제 방호 시설에서 받게 되는 EMP는 거의 평면파 형태로 도달하기 때문이다. 또한 실제 방호시설에 사용하는 철판의 두께는 2mm~5mm이다. 방호시설의 성능을 검증하기 위하여 정 방향으로 측정을 실시한다. 내부 도체벽의 송신 안테나의 전계 강도를 고려하여 역 방향으로 측정을 하면 복잡한 절차 없이 검증을 할 수 있을 것으로 보였다. 그래서 차폐률의 SE값 측정 시에는 차폐물 내부의 위치한 장비의 감소정도를 고려하거나 외부 전자파의 영향을 받지 않는 장비를 사용하여야 한다. 또 안테나의 전계강도 분포 치에 따른 영향 분석을 통해서 안테나로 돌아오는 전자기파는 안테나의 성능을 저하시키므로 안테나의 특성 저하를 고려하면 안테나 위치를 바꿔 측정할 결과 약간의 오차가 발생 되는 것을 해소해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Chester D. Eng, "Development of the time dependence of the nuclear (E1) HEMP electric field," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 53, no. 3, pp. 737-748, 2011.
- [2] W. A. Radasky and M. W. Wik, "Development of high-power electromagnetic (HPPEM) standards," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 46, no. 3, pp. 439-445, 2004.
- [3] S. R. Roger and R. A. Perala, "HEMP field penetration into an ideal shelter without a floor through a lossy earth," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. NS-28, no. 6, pp. 4462-4466, 1981.
- [4] M. Ianoz, B. I. C. Nicoara and W. A. Radasky, "Modeling of an EMP conducted environment," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 38, no. 3, pp. 400-413, 1996.
- [5] Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4 - 32: Testing and Measurement Techniques - High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Simulator Compendium, IEC 61000-4-32, Oct. 2002.
- [6] MIL-STD-188-125-2, Mar. 1999.

저자

이 선 의(Sun Yui Lee)



- 2013년 2월 : 광운대학교 전파공학과 졸업
- 2013년 2월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정
- <관심분야> : 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신, 양자통신

김 진 영(Jin Young Kim)

종신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 4G 이동통신

박 우 철(Woo Chul Park)



- 2011년 2월 : 아주대학교 NCW 학과 (박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : KTR 전자파연구소(EMP 팀장)
- 2006년 4월 : 방위사업청 서기관 (위성통신팀장)

· 1996년 8월~06년 2월 : AirMedia(주) 연구소장

· 1994년 2월~96년 8월 : AirTouch(주) 연구소

<관심사항> : 위성통신시스템설계, 모바일이동통신, 고출력전자기파