# 십자돌기형 페라이트 전파흡수체의 광대역 설계

# Broad-Band Design of Ferrite Absorbers in Cross-Shaped Projection Type

김동일 · 박종구 · 원영수

Dong Il Kim · Chong-Goo Park · Young-Soo Won

## 요 약

전자공학 및 전파 통신기술의 눈부신 발전은 우리의 생활을 풍요롭게 해주는 반면, 전파의 사용증가로 인한 EMC대책이 사회적으로 중요하게 부각되고 있다. EMI/EMC 측정을 위한 전파무향실이 국제기준을 만족하려면 이를 구성하는 전파흡수가 30 MHz~1 GHz까지의 주파수 대역에서 20 dB 이상의 전파흡수능을 가져야 한다. 그러나, 1998년 11월 CISPR11은 주파수대역을 30 MHz~18 GHz까지 확장하였다. 본 논문에서는 위의 조건을 만족하는 십자돌기형 및 테이퍼진 십자돌기형 전파흡수체를 제안하고 등가재료정수법으로 광대역 설계하였다. 나아가서, 그 결과를 FEM 및 FDTD법의 결과와 비교하였다.

## Abstract

The remarkable progress of electronics and radio communications technology has made our life abundant. On the other hand, the countermeasure of EMC becomes more important socially according to the increased use of electromagnetic waves. It had been required that the absorbing ability of an electromagnetic wave absorber is more than 20 dB, the bandwidth of which is required through 30 MHz to 1,000 MHz for satisfying the international standard about an anechoic chamber for EMI/EMS measurement. From November of 1998, however, the CISPR11 has accepted the extended frequency band from 30 MHz to 18 GHz in the bandwidth of EMI measurement. In this paper, we proposed the cross-shaped type and tapered cross-shaped type absorbers satisfying the above requirments and carried out broadband design using the equivalent material constants method. Futheremore, the results have been compared with FEM, and FDTD.

## I. 서 론

최근의 전자통신기술의 발달은 일상생활을 편리하게 해주는 반면, 전자파 발생요인의 증가와 함께 심화되고 있는 전자파장해에 대한 대책이 사회적으로 큰 관심을 끌고 있다. 이에 대한 대책으로, 국제적으로는 CISPR, 미국에서는 FCC, ANSI 등의 규제가 제정되었으며, 우리나라에서도 전자통신용장비의 전자파장해(EMI: Electromagnetic Interference)/전자파 양립성(EMC: Electromagnetic Compatibility) 규제를 만들어 수출에 대비하고 있다. 따라서 EMI/EMC 규제에 대비하여 전파암실(Anechoic Chamber)용 전파흡수체의 수요가 급격하게 증가되고 있는 실정이다. 특히, EMI/EMC 규제와 관련하여 전기 · 전

「본 연구는 1997년도 한국과학재단의 특정기초과제(번호: 97-01-01-04-01-2)의 연구지원에 의하여 이루어졌음」
한국해양대학교(Korea Maritime University)
· 논 문 번 호 : 991019-090
· 수정완료일자 : 1999년 12월 13일

자기기에서의 방사전자파를 측정하기 위한 전파암실용 전파흡수체가 국제규격기준(ANSI C634-1991, CISPR A SEC 109, 또는 IEC 801-3)을 충분히 만족시키기 위해서는, 20 dB 이상의 전자파흡수능을 가지는 주파수대역이 30 MHz에서 1 GHz 정도의 성능이 요구되어 왔다.

그러나, 1998년 11월 6일 CISPR(국제무선장해특별위원회)에서는 논의되어 왔던 방사(Emission)측정 주파수 범위를 종래의 30 MHz~1 GHz에서 18 GHz까지로 CISPR11로서 확장되었다[1]. 따라서, 곧이어 ANSI(America National Standard Institute) 및 IEC(International Electrotechnical Commission) 등에서도 후속조치가 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 등가재료정수법[2]~[4]으로 30 MHz ~ 약 3 GHz까지의 대역폭을 얻은 십자돌기형 전파흡수체를 설계하고 FDTD 및 FEM법을 이용하여 흡수특성을 비교·분석하였다. 나아가서 전체 높이가 28.6 mm인 경사진 십자돌기형 전파흡수체를 제안하고, 등가재료정수법을 이용하여 유효 주파수대역을 30 MHz에서 26 GHz까지 광대역화하여 새로운 CISPR11규격을 만족시켰다 .

## Ⅱ. 등가재료정수의 계산

### 2-1 십자돌기형 전파흡수체

#### 2-1-1 등가유전율

그림 1과 같이 $y$방향으로 폭 $w$, $x$방향으로 두 평판 사이의 간격이 $g$인 평행판 전송선로에서 $z$방향으로 전류가 흐르는 경우, $z$방향의 단위길이당 용량을 계산한다. 이때 $z=0$에서 평행판 사이의 전위차 $V(t)$는 일정하며 정상전류가 흐르는 것으로 한다. 아래쪽 평판의 전위는 +I, 위쪽 평판의 전위는 -I로 하면 전계 $E_x$는 $+x$ 방향을 향한다.

금속판에서 $y$방향의 폭 $w$, $z$방향의 길이 $a$의 구역에 있는 전하를 $Q$, 평행도체판간의 총 용량을 $C$, 전송선로에 채워진 물질의 유전율을 $\varepsilon$이라고 하면.. 단위길이당 용량은 식 (1)과 같다.

$$\frac{C}{a} = \frac{\varepsilon W}{g} \tag{1}$$

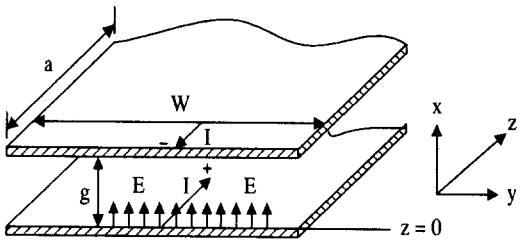



그림 1. 평행판 전송선로
Fig. 1. Parallel plate transmission line.

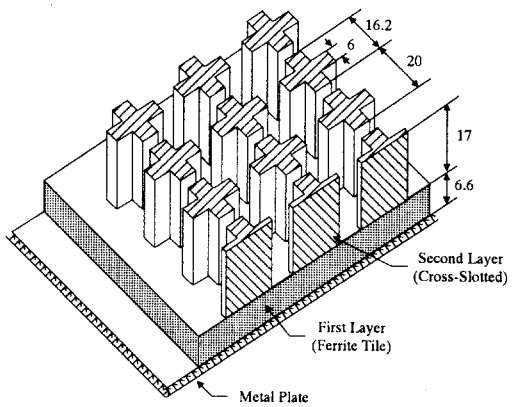



그림 2. 십자돌기형 전파흡수체
Fig. 2. Cross-shaped electromagnetic wave absorber.

위와 같은 해석을 바탕으로 그림 2의 십자돌기형 전파흡수체의 등가유전율을 구해 보자. 본 연구에서 제안한 십자돌기형 전파흡수체는 그림 2와 같은 구조를 가지며, 재료정수는 초투자율이 2,000, 비유전율은 14로 하였다.

우선 기본적으로 각층을 나누어 다층 구조로 해석하며, 십자돌기형 전파흡수체는 그림 2에서 알 수 있듯이 금속판을 제외한 2층 구조를 가짐을 알 수 있다. 따라서, 제1층의 페라이트 Tile을 먼저 계산한다.

1층의 페라이트 Tile의 경우 합성용량 $C$와 등가유전율 $\varepsilon_{eff}$를 구하면 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[3],[4].

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \Delta z \tag{2}$$

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_r \tag{3}$$

2층의 경우, 그림 3과 같이 해석영역을 나타낼 수 있다. 이 구조는 $x$축 및 $y$축이 대칭의 구조이므로

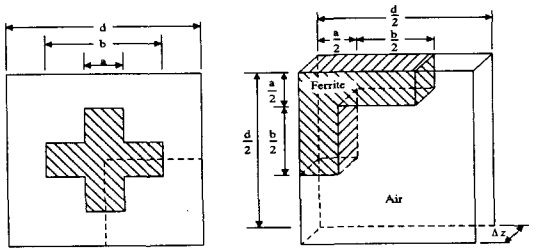



그림 3. 등가재료정수 계산을 위한 해석영역

Fig. 3. A model for calculation of equivalent material constants.

한 부분만을 해석하여도 전체의 특성을 파악할 수 있다[2]~[4].

따라서, 2층의 합성용량 $C$와 등가유전율 $\varepsilon_{eff}$를 구하면 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$C = \varepsilon_o \Delta z \cdot \left\{ \frac{\varepsilon_r a}{\varepsilon_r(d-b)+b} + \frac{\varepsilon_r(b-a)}{\varepsilon_r(d-a)+a} + \frac{d-b}{d} \right\} \tag{4}$$

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_r \cdot \left\{ \frac{a}{\varepsilon_r(d-b)+b} + \frac{b-a}{\varepsilon_r(d-a)+a} + \frac{d-b}{\varepsilon_r d} \right\} \tag{5}$$

### 2-1-2 등가 투자율

그림 1에서 $L$을 자기인덕턴스라고 하면, ga영역을 자르는 자속으로부터 등가 투자율의 계산이 가능하다. 전송선로에서 아래쪽 판에서는 $+z$방향으로, 위쪽판에서 는 $-z$방향으로 흐르는 전류를 I, $+y$방향으로 유기되는 자계를 H, 자속밀도를 B, 전송선로에 채워진 물질의 투자율을 $\mu$, ga를 자르는 자속을 $\Phi$, 평행도체판간의 총 합성인덕턴스를 $L$이라고 하면, 단위길이당 인덕턴스는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\frac{L}{a} = g\frac{\mu}{W} \tag{6}$$

그림 2의 십자돌기형 전파흡수체에서는 등가유전율과 마찬가지로 1층의 등가투자율을 먼저 계산한다. 같은 방법으로 1층의 합성인덕턴스 $L$과 등가투자율 $\mu_{eff}$를 구하면 식 (7)과 식 (8)로 구할 수 있다[3],[4].

$$L = \mu_r \mu_0 \Delta z \tag{7}$$

$$\mu_{eff} = \mu_r \tag{8}$$

또한, 제2층의 합성인덕턴스 $L$과 등가투자율 $\mu_{eff}$는 각각 식 (9)와 식 (10)으로 구할 수 있다.

$$L = \mu_o \Delta z \cdot \left\{ \frac{\mu_r a}{\mu_r(d-b)+b} + \frac{\mu_r(b-a)}{\mu_r(d-a)+a} + \frac{d-b}{d} \right\} \tag{9}$$

$$\mu_{eq} = \mu_r \cdot \left\{ \frac{a}{\mu_r(d-b)+b} + \frac{b-a}{\mu_r(d-a)+a} + \frac{d-b}{\mu_r d} \right\} \tag{10}$$

## Ⅲ. 경사진 십자돌기형 전파흡수체의 설계

경사진 십자돌기형 전파흡수체의 설계는 십자돌기형 전파흡수체와 크게 다르지 않다. 전체 형상과 평면도 및 측면도를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 기둥부분이 위로 올라갈수록 좁아지는

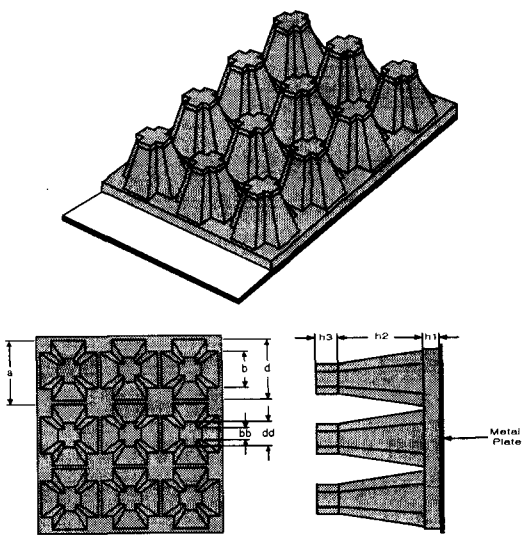



그림 4. 경사진 십자돌기형 전파흡수체

Fig. 4. Taperd cross-shaped electromagnetic wave absorber.

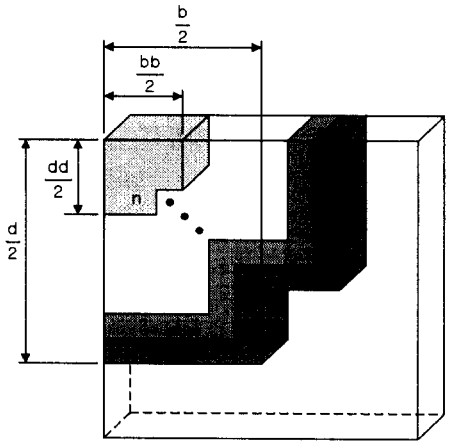



그림 5. 등가재료정수 계산을 위한 해석영역
Fig. 5. A model for calculation of equivalent material constants.

형상을 가지고 있다. 해석 역시 1층과 2층을 각각 하게 되는데, 1층의 경우 십자돌기형과 동일하므로 어려움이 없다. 그러나, 2층의 경우 돌기의 형태가 기울어져 있으므로 다른 해석 방법이 요구된다. 이를 해석하기 위해 본 연구에서는 그림 5와 같이 다단으로 해석하는 방법을 채용하였다[5].

1층의 경우, 앞 절과 마찬가지로 Ferrite Tile의 등가재료정수가 그대로 쓰여진다. 따라서, 계산식은 십자돌기형과 동일하다.

2층의 경우는 그림 4에 나타내는 바와 같이 경사진 기둥 형태이므로 일정한 두께의 페라이트판이 $n$개 채워져 있다고 간주하고 계산한다. 이 경우 각 층의 등가재료정수를 계산한 후 마지막 $n$번째 층에서 최종결과식을 얻게 된다. 그림 5에 해석영역 평면도를 나타내었다.

따라서 2층의 합성용량 $C$와 등가유전율 $\varepsilon_{eff}$을 식 (11)과 식 (12)로 구할 수 있다.

$$C = \left\{ \frac{b \cdot \varepsilon_r}{\varepsilon_r(a-d)+d} + \frac{(d-b) \cdot \varepsilon_r}{(a-b) \cdot \varepsilon_r + b} + \frac{d-b}{a} \right\} \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta z \tag{11}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{b \cdot \varepsilon_r}{\varepsilon_r(a-d)+d} + \frac{(d-b) \cdot \varepsilon_r}{(a-b) \cdot \varepsilon_r + b} + \frac{d-b}{a} \tag{12}$$

한편, 2층의 합성인덕턴스 $L$과 등가투자율 $\mu_{eff}$도 같은 방법으로 식 (13)과 식 (14)로 아래와 같이 구할 수 있다.

$$L = \left\{ \frac{b \cdot \mu_r}{\mu_r(a-d)+d} + \frac{(d-b) \cdot \mu_r}{(a-b) \cdot \mu_r + b} + \frac{d-b}{a} \right\} \cdot \mu_0 \cdot \Delta z \tag{13}$$

$$\mu_{eff} = \frac{b \cdot \mu_r}{\mu_r(a-d)+d} + \frac{(d-b) \cdot \mu_r}{(a-b) \cdot \mu_r + b} + \frac{d-b}{a} \tag{14}$$

3층의 합성용량 $C$와 등가유전율 $\varepsilon_{eff}$도 식 (15)와 (16)으로 구할 수 있다.

$$C = \left[ \frac{\varepsilon_r b}{(a-b)\varepsilon_r + b} \right] \varepsilon_o \Delta z \tag{15}$$

$$\varepsilon_{eff} = \left[ \frac{\varepsilon_r b}{(a-b)\varepsilon_r + b} \right] \tag{16}$$

또한, 같은 방법으로 합성인덕턴스 $L$과 등가투자율 $\mu_{eff}$를 식 (17)과 식 (18)로 아래와 같이 구할 수 있다

$$L = \left[ \frac{\mu_r b}{(a-b)\mu_r + b} \right] \mu_o \Delta z \tag{17}$$

$$\mu_{eff} = \left[ \frac{\mu_r b}{(a-b)\mu_r + b} \right] \tag{18}$$

## Ⅳ. 설계결과 및 검토

### 4-1 십자돌기형 전파흡수체의 흡수특성 비교

그림 6에 십자돌기형 전파흡수체의 등가재료정수법 해석 결과를 나타내었다.

등가재료정수법은 흡수체의 주기가 사용전파의 파장에 비하여 충분히 작다는 가정을 하고 있으므로, 파장이 대단히 짧아지면 오차를 포함하게 된다. 대체로 등가재료정수법의 사용 주파수 상한치는 약 5 GHz 정도로 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 등가재료정수법의 정확도를 평가하기 위해 FDTD법[6]과 FEM[7]에 의한 결과를 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 세가지의 그래

프 개형이 거의 일치함을 알 수 있다. 등가재료 정수법의 결과는 가장 좋은 약 3 GHz까지 20 dB의 흡수능을 가지고 있음을 알 수 있다. FDTD법의 결과는 약 1.9 GHz까지 20 dB의 흡수능을 보이고 있다. 또한, FEM은 그 보다는 특성이 좋지 못하나 약 2.5 GHz 부근까지 17~18 dB라는 좋은 흡수능을 유지하고 있음을 알 수 있다.

표 1 및 표 2의 재료정수는 본 연구를 위하여 제작된 각각의 소결 페라이트에 대한 비유전율 $\varepsilon_r$, 초투자율 $K$ 및 완화주파수 $f_m$을 나타낸다. 또한, 십자돌기형 전파흡수체의 설계치수 및 20 dB 흡수대역폭을 나타내었다. 페라이트의 재료정수는 크게 복소 유전율 $\varepsilon_r$과 초투자율 $K$, 완화주파수 $f_m$이다. 본 설계에서는 복소 유전율의 허수부를 무시하고, 실수부 값은 14를 취하였으며, 복소투자율의 주파수 분산식은 식 (19)를 사용하였다[8].

표 1. 십자돌기형 전파흡수체의 설계 파라미터 및 흡수능

Table 1. Design parameters and absorption ability of cross-shaped electromagnetic wave absorber.

| 재료정수 | 치수 (mm) | | | | | 20 dB 흡수대역폭 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t_1$ | $t_2$ | a | b | d | |
| $\varepsilon_r$ = 14.0<br>$K$ = 2,500<br>$f_m$ = 2.5 MHz | 6.6 | 17 | 6 | 16.2 | 20 | 30 MHz ~ 3 GHz |

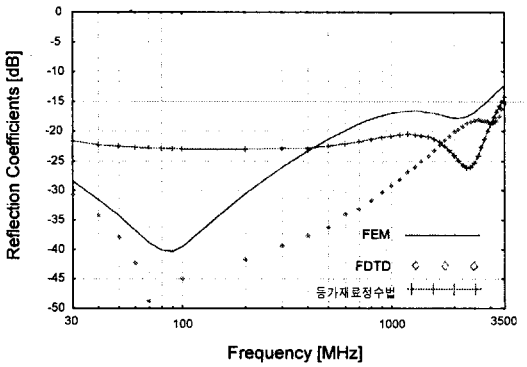



그림 6. 등가재료정수법, FEM 및 FDTD법에 의한 흡수 특성

Fig. 6. The characteristic of the electromagnetic wave absorber in cross-shaped type.

$$\mu_r = 1 + \frac{K}{1 + j\frac{f}{f_m}} \tag{19}$$

위와 같은 파라미터로 시뮬레이션을 행한 결과 전체두께 23.6 mm의 두께로 30 MHz~3 GHz에 이르는 주파수 대역에서 20 dB의 전파흡수능을 얻었다.

### 4-2 경사진 십자돌기형 전파흡수체의 특성

2층부가 경사진 십자돌기형 전파흡수체를 제안하여 설계하고, 표 2에 설계 파라미터를 나타내었다. 그림 7에 전파흡수특성을 나타내었다.

등가재료정수법으로 해석한 결과, 표 2에 나타낸 바와 같이 전체 28.6 mm의 높이로 20 dB의 전파흡수능을 가지는 주파수 대역이 30 MHz~26 GHz에 이르는 광대역 특성을 얻을 수 있었다. 이는 기존의

표 2. 경사진 십자돌기형 전파흡수체의 설계 파라미터

Table 2. Design parameters of taperd electromagnetic wave absorber.

| 재료정수 | 전파흡수체의 치수 (단위 : mm) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | d | dd | b | bb | h1 | h2 | h3 |
| $K$ = 2,000<br>$f_m$ = 3.1 MHz<br>$\varepsilon$ = 14 | 20 | 19 | 8.3 | 12.4 | 5.3 | 6.4 | 18 | 4.2 |

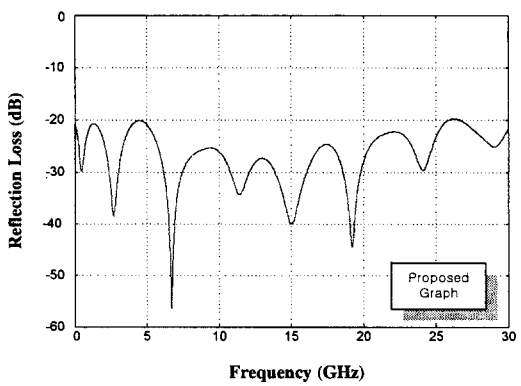



그림 7. 경사진 십자돌기형 전파흡수체의 특성

Fig. 7. The characteristic of the electromagnetic wave absorber in taperd type.

규격은 물론 새로이 적용될 CISPR11도 충분히 만족할 수 있는 특성이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 23.6 mm의 두께로 30 MHz에서 약 3 GHz의 주파수 대역에서 20 dB 이상의 반사감쇠량을 가지는 십자돌기형 전파흡수체를 설계하였다. 또한 이를 다른 해석방법인 FEM 및 FDTD법과 비교·분석 하였다. 두 가지 해석법 모두 등가재료정수법의 특성과 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. FDTD법의 경우 약 2 GHz까지 20 dB의 흡수능을, FEM도 약 2.5 GHz까지 17 ~ 18 dB의 좋은 흡수능을 가짐을 확인하였다.

또한, 새로운 CISPR11의 규격을 만족시킬 수 있는 경사진 십자돌기형 전파흡수체라는 새로운 형상의 전파흡수체를 제안하고 그 특성이 30 MHz ~ 26 GHz 대역을 커버하는 특성을 가지도록 설계하여 CISPR11을 만족할 수 있게 하였다. 특히, 전체 높이가 28.6 mm에 지나지 않아 기존의 전파무향실에서 사용되고 있는 두께 1.8 m정도의 전파흡수체에 비하여 주파수 대역폭, 유효공간의 확보, 가격경쟁력 및 제작의 용이성 등의 면에서 대단히 우수한 것으로서, 전기·전자기기로부터 방사되는 전자파를 측정하기 위한 전파무향실, GTEM Cell 및 EMC/EMI 대책용, 벽재 등으로 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구를 수행함에 있어서 수치계산에 도움을 주신 한국표준과학연구원의 정연춘 박사님께 깊이 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

[1] CISPR/B/220/RVC, CISPR11, 1998. 11. 8.

[2] Dong Il Kim, M. Takshashi, H. Anzai, and S. Y. Jun, "Electromagnetic Wave Absorber with Wide-Band Frequency Characteristics Using Exponentially Tapered Ferrite," *IEEE Trans. EMC*, vol. 38, no. 2, pp. 173-177, Feb., 1996.

[3] Dong Il Kim, S. Y. Jun, "Design of Improved Grid Type Electromagnetic Wave absorber Using Exponentially Tapered Ferrite," *'96 KJJC-EMCT*, 논문집, pp. 627-630, 1996.

[4] 김동일, 전상엽, 정세모, "제2층에 십자형 슬롯을 가지는 2층형 초광대역 전자파흡수체의 개발", 한국전자파학회 종합학술대회 논문집, pp. 8-12, 1995.

[5] 전상엽, "超廣帶域 페라이트 電波吸收體의 開發에 관한 硏究", 박사학위논문, 한국해양대학교, pp. 63-86. 1997. 8.

[6] Allen Taflove, "*Advances in Computational Electrodynamics*," Artech House, pp. 345-405, 1998.

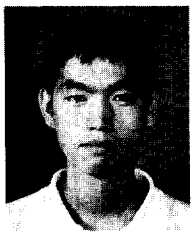
[7] Peter P. Silvester and Ronald L. Ferrari, "*Finite elements for electrical engineers*," Cambridge University Press, pp. 183-212, 1996.

[8] 內藤喜之 外, "フェライト電波吸收體の整合周波數についで"、日本電子通信學會 論文誌 B, 52-B, 7, pp. 398-404, 1969. 1.

## 김 동 일

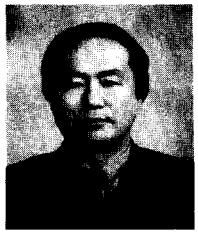
1952년 2월 26일생
1975년 2월: 한국해양대학교 항해학과(공학사)
1977년 2월: 한국해양대학교 대학원 전파공학전공(공학석사)
1984년 3월: 일본 동경공업대학원 전기전자공학과(공학박사)
1975년 3월~1993년 9월: 한국해양대학교 조교~부교수
1993년 10월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
1990년 3월 10일: 산학협동상 대상 수상
1993년 12월 11일: 본 학회 학술상 수상
1995년 4월 21일: 과학기술진흥 대통령 표창 수상
1998년 9월 30일: 한국항해학회 우수논문상 수상
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로의 설계, CATV 전송회로의 설계, 고성능 전파흡수체의 개발, EMI/EMC 대책 등

## 박 종 구



1974년 8월 7일생
1999년 2월: 한국해양대학교 전파공학과(공학사)
1999년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 광대역 전파흡수체의 개발, EMI/EMC 대책 등

## 원 영 수



1950년 5월 25일생
1976년 3월~1994년 10월: 한국방송공사 방송송출분야 근무
1991년 2월: 경일대학교 전자공학과(공학사)
1994년~현재: PSB 부산방송 기술국장/기술연구소장
1997년 2월: 한국해양대학교 해사산업대학원 전파공학전공(공학석사)
1997년 3월~현재: 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과 박사과정
※현 동의공업대학 전자통신과 겸임교수
[주 관심분야] 마이크로파 능동 및 수동소자, 안테나 설계