

전기기폭장치의 발열선에 설치되는 광섬유 센서의 최적위치 분석

An Analysis of Optimized Position of the Fiber Optic Sensor Installed near the Bridge Wire of Electro-explosive Device

김응조* · 윤기은* · 최태인* · 윤태훈** · 김재창**

Eung-Jo Kim* · Ki-Eun Yoon* · Tae-In Choi* · Tae-Hoon Yoon** · Jae-Chang Kim**

요 약

EED 내부의 화약을 제거하고 광섬유센서를 발열선에 근접 설치하면 EED의 발열선 온도를 정확하게 측정할 수 있다. EED의 발열선과 광섬유 센서간의 이격할 수 있는 최적거리 계산을 열전달 이론에 근거하여 구하였고, 발열선의 온도-이격거리 관계식을 도출하였다. 연구결과는 외부 전자파환경에 의해서 유기된 전류로 인해 발생하는 발열선의 온도를 측정하는 전자파방사 위해도 시험에 활용할 수 있다.

Abstract

In order to measure the temperature of bridge wire, the explosive material is removed from EED and a fiber optic temperature sensor is installed near the bridge wire. Using the heat transfer theory, the optimum position of the fiber optic sensor in the EED is determined and the temperature-distance equation is derived from test result. The measuring technique can be utilized to the real electromagnetic radiation hazard test.

I. 서 론

휴대폰과 같은 송신매체의 사용이 증가됨에 따라 전자파환경이 다양하게 급변하고 있다. 자동차의 경우 개인의 안전을 위해 에어백이 설치되어 운용되지만 에어백에 연결된 신호케이블과 전자박스의 차폐율이 저하될 경우, 전자파 간섭신호가 내부로 침투되어 에어백이 우발적으로 작동할 가능성이 있다. 에어백에는 충격센서 및 전기기폭장치(EED: Electro-

Explosive Device)등이 설치되어 있지만 EED의 경우 전자파환경에 민감하여 오동작의 확률이 높다. EED는 보통 직경 1 cm 내외의 작은 금속관에 화약과 발열선이 부착되어 있고, 전기신호가 인가되면 폭발 또는 화염을 발생시킨다. 시스템에 설치된 EED의 경우 외부 전자파환경에 의한 기폭 가능성을 확인하려면 EED가 폭발되지 않는 상태에서 안전도를 분석할 수 있어야 하며, 또한 전자파에 영향을 받지 않고 발열선의 온도를 실시간 측정이 가능하도록 EED에서 화약을 제거하고, 광섬유 센서를 발열선에

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

** 부산대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Pusan National University)

· 논문 번호 : 990903-069

· 수정완료일자 : 1999년 10월 11일

근접하여 설치할 필요가 있다.

본 연구에서는 발열선에 광섬유 센서를 근접 설치하여 거리를 점차로 이격시키면서 발열선의 온도 분포를 측정하였다. 열전달 이론 및 경험을 근거로 광섬유 센서의 최적위치를 결정하였고, 시험결과를 분석하여 온도-이격거리 방정식을 구하였다.

연구결과는 향후 외부 전자파환경에 의해서 유기된 전류로 인해 이차적으로 발생하는 발열선의 온도를 측정하고, 그 결과를 분석하여 전자파환경에 대한 EED의 안전도분석을 하고자 한다.

II. 열전달 방정식 이론

발열선을 수직으로 놓여진 수직면으로 가정할 경우 열의 전달특성에 따라 열의 분포도는 그림 1과 같이 하부영역보다는 상부 위치에서 보다 더 넓어지게 된다. 온도 경계층(boundary layer)은 정상상태이고 수직면에서 자연대류가 존재한다고 가정할 수 있다. 층류(laminar) 상태라는 조건에서 자연대류와 연관이 있는 미소한 열 흐름이 형성되고, 그 속도 때문에 에너지 방정식 (3)에서 점성에너지(viscous energy)의 소산 항은 무시할 수 있다. 이

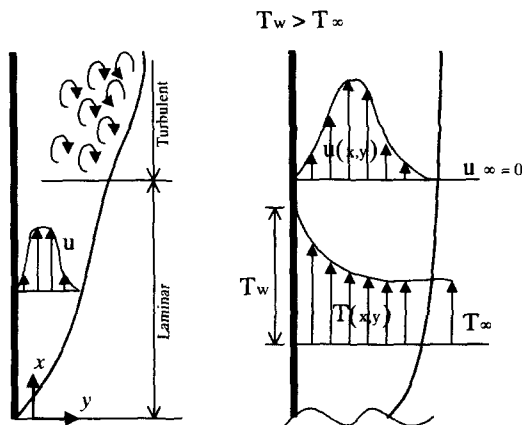


그림 1. 수직면에서 자연대류의 경계층

Fig. 1. Boundary layer for free convection on a vertical plate.

경우 연속방정식 (1), 운동방정식 (2) 및 에너지방정식 (3)은 각각 식 (4), (5) 및 (6)과 같이 정리할 수 있다^{[1],[2]}.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{dP}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$\rho c_p(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu (\frac{\partial u}{\partial y})^2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$\rho c_p(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (6)$$

여기서 u 는 x 방향의 속도[m/sec], v 는 y 방향의 속도[m/sec], T 는 각 방향의 온도분포[°K], g 는 중력가속도[m/sec²], ρ 는 유체밀도[kg/m³], P 는 압력[N/m²], c_p 는 정압비열[KJ/kg°C], μ 는 유체의 점성[dyne · s/cm²], k 는 유체의 열전도계수[W/m°C]이다.

운동방정식 (5)의 우측항에서 $-\rho g$ 는 (-) x 방향으로 유체요소(fluid element)에 미치는 중력(body force)으로서, 작은 온도차이로 인해 밀도 ρ 는 온도에 따라 변하게 되지만, 상기 방정식에서 밀도는 상수로서 간주한다. 압력 구배(gradient)항인 $\partial P/\partial x$ 의 결정을 위해 운동방정식 (5)는 $u \rightarrow 0$, $\rho \rightarrow \rho_\infty$ 와 같은 가정조건에서 유속 경계층의 모서리 부분에서 평가할 필요가 있다. 여기에서 식 (7)을 얻을 수 있으며, ρ_∞ 는 경계층 외부의 유체밀도로서 식 (5)의 $-\rho g - \partial P/\partial x$ 는 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_\infty g \quad (7)$$

$$-\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} = (\rho_\infty - \rho)g \quad (8)$$

β 가 유체의 열팽창계수[1/K]라고 하면 온도에 따른 밀도의 변화는 식 (9)와 같다.

$$-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p = \beta \quad (9)$$

유한차분(finite difference)과 연관이 있는 미분항으로 표시하면 식 (9)는 식 (10)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= -\beta\rho\Delta T \\ \rho_\infty - \rho &= -\beta\rho(T_\infty - T) \end{aligned} \quad (10)$$

그때 식 (10)은 식 (11)과 같이 된다.

$$-\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} = -\beta\rho(T_\infty - T)g \quad (11)$$

식 (11)을 운동방정식 (5)에 대입하면 수직면에서 자연대류에 대한 결과방정식은 다음과 같이 요약할 수 있다. 여기서 ν 는 유체의 동점성 계수[m²/s]이다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (13)$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (14)$$

유체가 이상적인 가스라고 가정할 경우 식 (15)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 R 은 기체상수[J/kg·K]이다.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (15)$$

식 (10)에서 팽창계수 β 는 식 (16)과 같다.

$$\beta = \frac{(\rho_\infty/\rho) - 1}{T - T_\infty} = \frac{(T/T_\infty) - 1}{T - T_\infty} = \frac{1}{T_\infty} \quad (16)$$

유동체의 경우 β 값은 특성표에서 구할 수 있으며^[1] 자연대류에서 열전달을 통제하는 무차원 파라미터를 구하기 위해 위의 연속방정식을 무차원화 시킬 필요가 있다. 따라서 식 (17)과 같이 가정조건을 정의할 경우 여기서 L 은 특성길이, U_0 는 기준속도, T_w 는 벽면온도이고, T_∞ 는 발열면에서 멀리 떨어진 곳에서 유동체의 온도이다.

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{U_0} \\ V &= \frac{v}{U_0}, \theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)의 변수를 식 (12)에서 부터 식 (14)에 각각 대입하면 그 결과 식 (18), (19), (20)과 같이 된다.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial Y} &= \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L}{U_0^2} \theta \\ &+ \frac{1}{R_e} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \end{aligned} \quad (19)$$

$$U\frac{\partial \theta}{\partial X} + V\frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{R_e P_r} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (20)$$

Reynolds 수 및 Prandtl 수는 식 (21)과 같이 정의한다. 여기서 α 는 열확산계수[m²/s]이다.

$$R_e = \frac{U_0 L}{\nu}, P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad (21)$$

운동방정식에서 무차원 그룹은 식 (22)와 같이 재 배열할 수 있다. Grashof 수 G_r 은 식 (23)과 같이 정의된다. Grashof 수는 유체에서 중력과 점성력간의 비로서 나타난다. 강제대류에서 Reynolds 수는 유체에서 작용하는 관성력과 점성력간의 비로서 나타난다.

$$\frac{g\beta(T_w - T_\infty)L}{U_0^2}$$

$$= \frac{g\beta L^3(T_w - T_\infty)/\nu^2}{(LU_o/\nu)^2} \equiv \frac{G_r}{R_e^2} \quad (22)$$

$$G_r = \frac{g\beta L^3(T_w - T_\infty)}{\nu^2} \quad (23)$$

그러므로 자연대류에서 Grashof 수는 강제대류에서 Reynolds 수와 같이 동일한 역할을 한다. 온도분포를 식 (24)와 같이 2차 다항식으로 나타낼 수 있다. 식 (25)와 같이 다음의 조건식은 경계층 두께 δ 의 관점에서 3개의 계수 a_o , b_o 및 c_o 에 각각 적용할 경우, $y=0$ 에서는 식 (25)와 같이 되고, $y=\delta$ 에서는 식 (26)과 식 (27)과 같이 된다. 그 결과 온도분포는 식 (28)과 같이 정의될 수 있으며 경계층 두께는 식 (29)와 같이 된다^[3].

$$T(x, y) = a_o + b_o y + c_o y^2 \quad (24)$$

$$T = T_w, \quad y = 0 \quad (25)$$

$$T = T_\infty, \quad y = \delta \quad (26)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = \delta \quad (27)$$

$$\frac{T(x, y) - T_\infty}{T_w - T_\infty} = \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 \quad (28)$$

$$\delta = 3.93 P_r^{-\frac{1}{2}} (0.952 + P_r)^{\frac{1}{4}} G_r^{-\frac{1}{4}} x \quad (29)$$

III. 실험 및 결과고찰

3-1 측정시스템

발열선의 온도를 측정하기 위해 설치된 광섬유 센서는 10~200°C를 감지할 수 있고, 응답시간은 65 msec 이하이며, 열전도계수(K)는 3.0 이하이다. 광섬유 센서는 광섬유 끝단에 150×150×200 um 크기의 파이렉스와 박막의 실리콘 층으로 구성되어 있는데, 열전달 효율을 증가시키기 위해 박막의 금속필름을 실리콘층 위에 접합시켰다. 측정시스템은 Metricor 1420 EMC System, 신호발생기, 위치조종기

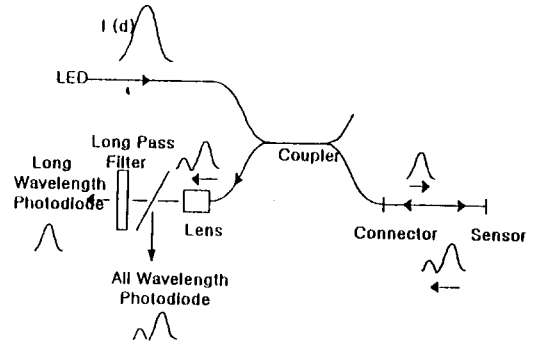


그림 2. Metricor 1420 EMC 시스템 운용도

Fig. 2. Operation diagram of the Metricor 1420 EMC system.

및 마이크로미터 등으로 구성하였다. 발열선의 온도 변화에 따라 광경로차가 변하면 입사광의 반사계수가 달라진다. 반사계수는 입사광의 파장의 함수이므로 온도변화에 따라 광섬유 센서 프로브에서 반사되는 빛의 스펙트럼이 달라지게 된다. 광원인 LED에서 발생하는 신호는 중심파장이 850 nm이고, 폭은 36 nm인 적외선을 방출하는데 이 입사광이 방향성 결합기를 지나 센서 프로브에 입사되면 센서 프로브 끝에 달려있는 마이크로칩 간섭계에서 간섭을 일으킨다. 이 반사광이 글라스 필터를 통과한 후 장파장 영역과 전파장 영역의 두 부분으로 분리되며 이 두 영역의 비율(Ratio)를 측정한다. 온도변화에 따라 비율값이 변하므로 비율값의 변화량과 온도에 대한 교정 데이터로부터 발열선의 온도를 알아낼 수 있다. 여기에서 사용한 비율값의 영역은 0.61~0.81 정도이며 측정시스템의 전체적인 운용개념도는 그림 2와 같다.

3-2 온도 분포도 해석 및 측정결과

EED의 구조는 그림 3과 같으며 온도 분포도 해석을 위해 발열선과 플러그 및 단자선을 제외한 화약과 외부 금속껍질(Shell)을 제거하여 그림 4와 같이 변경시켰다. 발열선이 수직으로 놓이고 광섬유

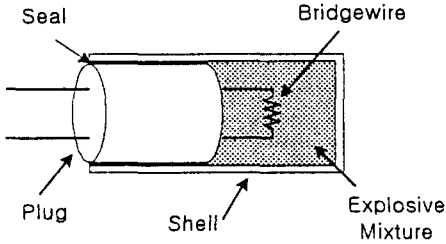


그림 3. EED의 구조
Fig. 3. Diagram of EED structure.

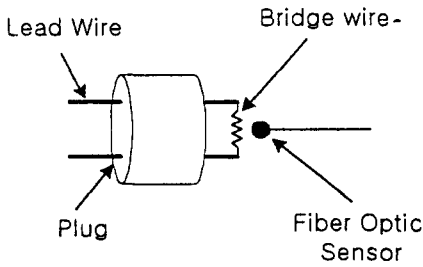


그림 4. 변경된 EED의 구조
Fig. 4. Diagram of the modified EED structure.

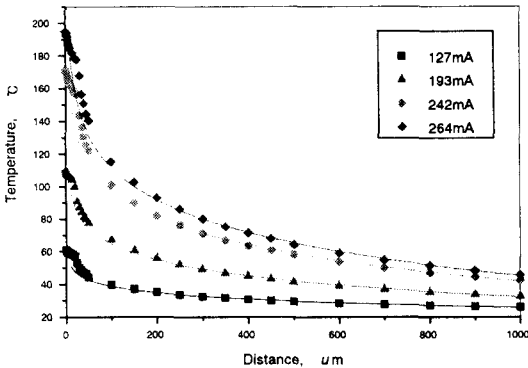


그림 5. 온도-이격거리 특성곡선
Fig. 5. Curves of the temperature vs separation distance.

센서가 좌우로 이동 가능하도록 마이크로미터, 현미경 및 위치조종기를 사용하였다. 측정장비를 연결하고 전류를 그림 5와 같이 4단계로 구분하여 각각 다른 전류값을 인가하면서 이격거리에 따른 발열온도

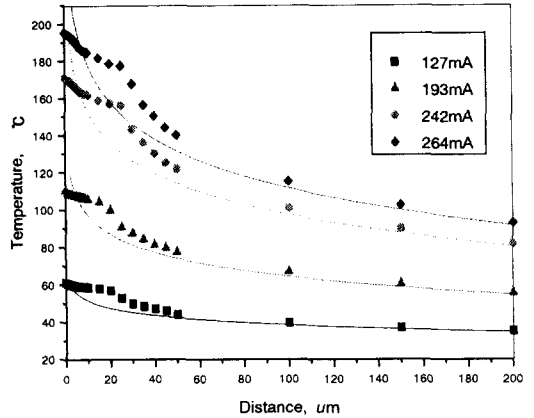


그림 6. 온도-이격거리(200 μm) 특성곡선
Fig. 6. Curves of the temperature vs distance(200 μm).

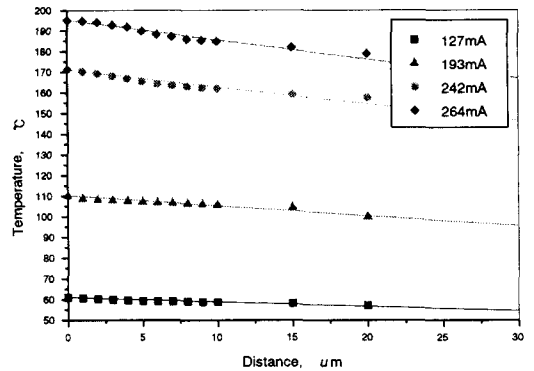


그림 7. 온도-이격거리(20 μm) 특성곡선
Fig. 7. Curves of the temperature vs distance(20 μm).

를 측정하였다. 측정결과를 정리하면 그림 5와 같이 전체적인 온도 분포곡선을 얻을 수 있다.

이론적 전개를 통해서 제시된 온도 분포는 식 (28)과 같으나 이 식은 발열체가 수직평판인 경우에 대한 것이므로 0.0635 mm×3.6 mm인 EED의 발열선에는 그대로 적용할 수 없다. 실험결과에 대한 curve fitting을 하였을 때 그림 5와 같이 로그함수와 일치하지만, 거리를 200 μm로 제한할 경우 그림 6과 같이 약 50 μm이하에서는 잘 맞지 않으며, 또한 약 20 μm 근방에서 불연속점이 존재함을 확인하였다. 또 20 μm 까지의 데이터를 curve fitting 한

결과 온도분포가 2차적으로 변화였고 발열선이 매우 짧고 가는 선이므로 δ 값을 평판의 경우에서 구한 값을 그대로 사용할 수 없다.

실험 데이터로부터 δ 값을 구해본 결과 20 μm 까지는 평판의 경우에 구한 δ 값의 1/10로 수정하였을 때 그림 7과 같이 일관성을 보여주고 있다. 따라서 온도증가에 따라 광섬유 센서를 이격시켰을 때 신뢰할 수 있는 거리는 20 μm 로 판단이 된다.

이때 실제 온도 분포식은 식 (30)과 같이 이격거리 y 에 따른 발열선의 온도식으로 귀착된다.

$$T(x, y) = T_{\infty} + (T_w - T_{\infty}) \left(1 - \frac{10y}{\delta}\right)^2 \quad (30)$$

3-3 향후 연구방향

본 연구에서는 EED 외부 껍데기를 제거한 상태에서 시험을 수행하여 경계조건을 간략화 하였으나 향후 경계조건을 보완하여 이론적 접근 및 실험을 추진할 계획이다.

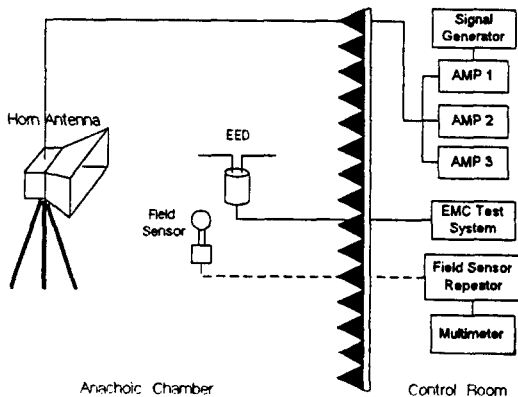


그림 8. 전자파 방사 위해도 시험구성도
Fig. 8. Test configuration for HERO.

또한 그림 7과 같이 EED의 단자선에 신호선을 반파장 다이폴안테나처럼 구성하고 EED에 전자파를 인가하였을 때 유기되어 흐르는 전류에 의해 이

차적으로 발생된 온도를 측정하여 EED 내부의 화약 기폭 가능성을 상세히 분석하고자 한다^{[4],[5]}.

자동차의 에어백과 같은 실용 시스템에서는 대상 EED의 화약을 제거하고 광섬유 센서를 설치한 후 시스템에서 설계된 위치에 EED를 장착한다. 시스템을 정상 운용하면서 주파수 대역별로 예측된 전자파를 인가하면서 EED 발열선의 온도를 측정하면 시스템에 설치된 EED의 안전도를 평가할 수 있다.

IV. 결 론

전자파환경에 EED가 노출되었을 때 폭발되지 않고 안전도를 분석하고, 발열선의 온도를 실시간 측정이 가능하도록 EED에서 화약을 제거하고, 광섬유 센서를 발열선에 근접하여 설치하였다. 발열선에 광섬유센서를 근접 설치할 때 이격거리에 따른 발열선의 온도분포 특성을 고찰하여 광섬유센서를 발열선과 이격시킬 수 있는 최적영역을 도출하기 위해 열전달 이론을 이용한 수식적 접근과 실험결과와 경험적 분석을 상호 적용하였다. 그 결과 이격거리에 따른 발열선의 온도방정식을 도출할 수 있었다. 본 연구에서 확보한 결과를 응용하여 시스템에 설치된 EED에 대한 전자파방사 위해도시험에 적용할 계획이다^[6].

참 고 문 헌

- [1] M. Necati Ozisk, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, pp. 416-439, 1989.
- [2] J. Tabor, G. F. Hewitt, N. Afgan, *Heat Exchangers Theory and Practice*, McGraw-Hill, pp. 19-33, 1983.
- [3] J. P. Holman, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, pp. 323-339, 1986.
- [4] Thomas A. Milligan, *Modern antenna Design*, McGraw-Hill Book Company, pp. 66-72
- [5] Y. T. Lo, S. W. Lee, *Antenna Handbook*, pp

3-13~3-16, VAN NOSTRAND REINHOLD
[6] Emil J. Eichblatt, Jr., "Test and evaluation of the tactical missile", *American Institute of*

Aeronautics and Astronautics, Inc. pp. 311-312, 1989.

김 응 조

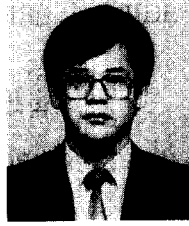


1984년: 한양대학교 전기공학과(공학사)
1986년: 한양대학교 전기공학과(공학석사)
1997년: 부산대학교 전자공학과 박사과정 수료
1989년~현재: 국방과학연구소 선

임연구원

[주관심 분야] EMI/EMC

윤 태 훈



1979년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
1982년: 한국과학기술원 전자공학과(공학석사)
1986년: 한국과학기술원 전자공학과(공학박사)
1986년~현재: 부산대학교 전자공

학과 부교수

[주관심 분야] LCD, Laser Diodes, Photonic switching devices

윤 기 은



1976년: 한양대학교 전자공학과(공학사)
1976년~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주관심 분야] EMI/EMC, HERO, RF 필터설계

김 재 창



1969년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
1979년: University of Alabama (공학석사)
1981년: University of Alabama (공학박사)
1975년~현재: 부산대학교 전자공

학과 교수

[주관심 분야] LCD, Optical information processing, Sonar signal processing

최 태 인



1974년: 서울대학교 응용물리학과(공학사)
1980년: University of Florida(공학석사)
1984년: University of Florida(공학박사)
1977년~현재: 국방과학연구소 책임연구원

연구원

[주관심 분야] EMI/EMC, Magnetic sensor, System performance test