

光纖維에 대한 熱中性子 效果 研究

(A Study for the Thermal Neutron Effects on Optical Fiber)

金 雄 基*, 孫 錫 元*, 李 容 範*, 李 鍾 旻*

(Woong Ki Kim, Surg Won Sohn, Yong Bum Lee, and Jong Min Lee)

要 約

本 研究에서는 光纖維에 대한 熱中性子 效果를 理論적으로 考察하고 熱中性子 照射에 따른 光纖維의 傳送損失變化를 0.85 μm 및 1.3 μm 光波長에서 각각 測定하고 그 結果를 分析하였다.

熱中性子は 光纖維 구성 원소와의 핵반응을 통해 높은 에너지를 가진 이차이온화 放射線을 발생시킨다. 칼라 센터는 이차 이온화 放射線에 의해 생성되며 光纖維 코아내에서 진행하는 빛을 흡수함으로써 光纖維의 傳送損失을 증가시킨다.

實驗 結果, 光波長 1.3 μm 에서 Ge, P, B 도우핑 효과로 인해 다중모드 光纖維의 損失이 단일모드 光纖維보다 5배 정도로 크게 나타났다. 다중모드 光纖維의 경우, 방사선에 민감한 光波長 0.85 μm 영역에서의 損失이 1.3 μm 에서의 損失보다 2배 정도 큰 것으로 測定되었다.

Abstract

In this study, the thermal neutron effects on optical fiber are examined theoretically. Also, the induced loss by thermal neutron irradiation in optical fibers is measured at the optical wavelengths of 0.85 and 1.3 μm , respectively, and the results are analyzed.

Thermal neutrons cause nuclear reaction with fiber compositions. So secondary ionizing radiations of high energy are generated. Color centers formed by these secondary ionizing radiations increase transmission loss of optical fiber by absorbing propagating light in fiber core.

As a result of experiment, owing to Ge, P, and B doping effects, the induced loss in multimode fibers has been 5 times larger than that in single mode fibers at 1.3 μm wavelength. In case of multimode fibers, the loss at 0.8 μm wavelength region more susceptible for radiations has been twice higher than at 1.3 μm .

I. 序 論

光纖維는 低損失, 廣帶域情報傳送特性, 小形, 輕量 등의 장점을 갖추고 있어 光通信 뿐만 아니라 일반

산업분야에서 다양하게 이용되고 있다. 또한, 耐電磁 波干涉性和 耐環境性이 우수하여 原子力分野에서의 信號傳送 및 센서로 응용함으로써 원자력시설의 신뢰성을 향상시키려는 노력이 지속되고 있다. 현재 우리나라는 전력 수요량의 절반을 原子力發電에 의존하고 있으며 그 비중이 점차 확대되고 있어 原子力 施設の 신뢰성과 안정성향상을 위해 光纖維를 적용

*正會員, 韓國原子力研究所

(Korea Atomic Energy Research Institute)

接受日字: 1990年 10月 5日

해야 한다. 특히 1996년에 완공될 계획으로 있는 영광 3, 4호기 原子力發電所의 DAS 채널, coreprotection system 등에 光纖維를 이용한 시스템이 적용될 예정으로 있어 이에 대한 관심뿐만 아니라 국내 기술 향상이 더욱 필요하다.

原子力施設에 光纖維를 응용하기 위해서는 우선적으로 光纖維에 대한 放射線 效果를 고려해야 한다. 光纖維가 감마선, X-선, 中性子 등의 放射線에 노출되면 光纖維 유리구조내에 칼라 센터가 형성되며 이 칼라 센터는 光纖維 코어내에서 진행되는 빛을 흡수하여 光纖維의 傳送損失을 증가시킨다. 放射線에 의한 손실증가는 수 십 내지 수 천 dB/km이며 이는 光纖維의 장점중 하나인 자손실 특성이 상실됨은 물론 시스템간의 송수신을 두절시켜 심각한 현상을 초래할 수도 있다.

本 論文에서는 앞서 연구된 光纖維의 감마선 효과¹⁾에 이어서 熱中性子에 대한 效果를 理論적으로 考察하고 국내 4개 회사에서 제조된 일반 光通信用 단일모드 및 다중모드 光纖維와 외국에서 제조된 순수실리카코어 光纖維에 대해 熱中性子를 照射시켜 光纖維材質, 光纖維모드 및 光波長에 따른 熱中性子 效果의 차이를 각각 測定하고 그 結果를 분석하였다.

II. 光纖維에 대한 熱中性子 效果

1. 熱中性子和 칼라 센터와의 관계

감마선이나 X선 등의 放射線은 光纖維에 직접적인 영향을 미쳐 光纖維코어내에 칼라 센터를 형성시킴으로서 光纖維의 傳送損失을 증가시킨다. 그런데 熱中性子는 일반적으로 수 eV 이하의 낮은 에너지를 가진 저속 中性子이므로 光纖維에 직접적인 타격을 가해 칼라 센터를 생성시키기에는 불충분하지만 光纖維 구성 원소인 실리카나 붕소 등에 쉽게 포획되어 핵반응을 일으킨다. 그 結果, 수 MeV의 높은 에너지를 가진 알파입자, 베타선, 감마선 등이 생성된다. 이차 이온화 放射線 (secondary ionizing radiation) 이라 불리는 이들은 光纖維 코어내에 칼라 센터를 생성시킨다. 생성된 칼라 센터는 光纖維 코어내를 진행하는 빛을 흡수함으로써 傳送損失을 증가시킨다.²⁻⁵⁾

표 1은 光纖維 구성 원소들에 대한 熱中性子 效果를 보여준다. 구성 원소에 따라 熱中性子 포획 단면적이 다르게 나타난다. 그 중에서 붕소가 가장 크며 게르마늄과 실리카도 비교적 크다. 포획 단면적이 큰 원소는 이차 이온화 放射線을 다량 발생시켜 칼라 센터의 수를 더욱 증가시키며 이는 隆纖維 傳送

損失의 증가를 의미한다. 특히 붕소는 熱中性子와의 반응으로 생성된 1.4MeV의 에너지를 가진 알파입자 영향으로 熱中性子 效果가 가장 크게 나타나는 것으로 사료된다.⁶⁻⁸⁾

표 1. 光纖維 구성 원소

Table 1. Constituent elements of optical fibers.

element	secondary radiation	capture cross section(barn)*	radioactivity (Ci) #
Si	$\beta^- \beta^- \gamma$	0.16	2.1×10^{-6}
O	$\beta^+ \beta^- \gamma$	0.00027	9.7×10^{-8}
B	$\alpha \beta^+ \beta^- \gamma$	759	5.1×10^{-3}
Ge	$\beta^+ \beta^- \gamma$	2.3	3.0×10^{-6}
N	$\beta^+ \beta^- \gamma$	1.85	4.1×10^{-5}
C	$\beta^+ \beta^- \gamma$	0.0034	2.2×10^{-5}
H	$\beta^+ \beta^- \gamma$	0.322	1.1×10^{-9}

*barn: 中性子和 原子核이 충돌할 때 반응이 일어날 수 있는 정도를 나타내는 단위로서 中性子和 原子核이 작용을 일으킬 수 있는 확률을 의미한다. (1 barn= 10^{-24} cm²)
 #Ci : 放射能의 세기를 나타내는 단위로서 1 Ci는 라듐 226 1g의 放射能과 같으며 초당 370억개의 原子核이 붕괴 되는 세기이다.

2. 이온화 放射線에 의해 생성되는 칼라 센터

칼라 센터는 이온화 放射線에 의해 생성되며 광에너지를 흡수함으로써 光纖維의 傳送損失을 증가시킨다. 칼라 센터는 형태가 매우 다양하며 도우펀트가 도우핑될수록 더욱 복잡한 형태로 나타난다. 그중에서 가장 효과가 큰 대표적 형태는 다음과 같다.⁹⁾

1) E' 센터

E' 센터는 인접한 두 실리칸 原子 사이의 결합이 放射線에 의해 분리되면서 電子가 방출되어 생성되며 光波長 215nm 영역에서 높은 광흡수 밴드를 가지고 있어 波長이 짧은 영역의 損失을 크게 증가시킨다. E' 센터는 붕소(B), 게르마늄(Ge), 인(P) 등의 도우펀트가 도우핑된 경우에 영향을 미친다.

2) Peroxy radical 센터

Peroxy radical 센터는 ≡Si-O-O-Si≡의 peroxy 결합에서 放射線에 의해 중앙에 위치한 두 산소 原子 사이의 결합이 분리되면서 생성된다. Peroxy radical 센터는 光波長 163nm 영역에서 높은 광흡수 밴드를 가지고 있어 E' 센터와 마찬가지로 波長이 짧은 영역의 損失 증가에 큰 영향을 미친다.

3) Nonbridging oxygen hole 센터(NBOHC)

NBOHC는 光纖維내에 존재하는 OH 결합이 放射線에 의해 분리되면서 산소 原子에서 생성된 홀센

터이다. NBOHC는 고순도 플루즈드 실리카에서 생성되며 波長이 긴 영역에서의 광흡수로 인하여 長波長 영역의 損失 증가에 영향을 미친다.

4) Phosphorus-oxygen hole 센터(POHC)

POHC는 인(P)이 도핑된 실리카 글래스의 경우 두 개의 nonbridging 산소 原子에서 放射線 照射에 의하여 電子가 방출되어 생성되는 호울 센터이다.

III. 實驗 및 結果

1. 光纖維 샘플

熱中性子 照射에 의한 光纖維 傳送損失 特性變化 測定 實驗을 위해 국내 4 개 회사에서 제조된 일반 光通信用 단일모드 및 다중모드 光纖維와 ensign-bickford사(미국)의 순수실리카코어 光纖維가 각각 사용되었다.

표 2는 사용된 光纖維샘플들의 제원을 나타낸다. 光纖維샘플 각각의 길이는 50m이며 9.5cm 직경의 원형으로 50m 감아서 熱中性子를 照射시켰다.

표 2. 光纖維 샘플의 제원

Table 2. Specifications of optical fibers.

종류	* Mode	Coating 재 질	Core/Clad/ Coating Dia. um	Core Composition(mol%) SiO ₂ -GeO ₂ -P ₂ O ₅ -B ₂ O ₃
A	Single	Acrylate	8.3/125/245	96.9-3.1----
	Multi	Acrylate	50/125/245	89.8-9.0-1.2--
B	Single	Acrylate	10/125/245	94.5-5.1-0.4--
	Multi	Acrylate	50/125/245	80.5-17.5-1.7-0.3
C	Single	Silicon	10/125/900	97.0-3.0----
	Multi	Silicon +Nylon	50/125/900	89.5-10.0-0.5--
D	Single	Acrylate	10/125/245	94.5-5.1----
	Multi	Acrylate	50/125/245	86-10-4--
E	PSCF	Tefzel	110/125/245	100-----

* SINGLF:single mode fiber. MULTI:multimode fiber
PSCF:pure silica core fiber

2. 實驗裝置構成

熱中性子 照射裝置로는 研究用 原子爐 Triga-Mark II(250kW)의 thermal column을 이용하였다. 原子爐에 설치된 實驗裝置構成은 그림 1 과 같다.

3. 實驗 方法

1) 熱中性子 flux 및 감마선 준위 測定

감마선은 光纖維의 칼라 센터 형성에 직접적인 영향을 미치므로 熱中性子 效果만을 고려하기 위해서 감마선 준위는 100 R/hr 이하의 낮은 수치가 요구

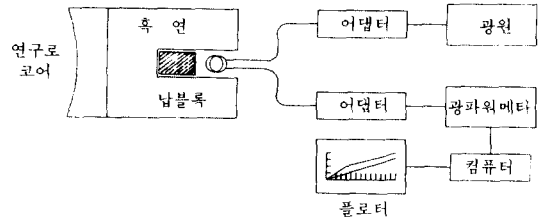


그림 1. 熱中性子에 의한 光纖維 傳送損失 測定 시스템 構成圖

Fig. 1. Block diagram of radiation-induced loss measurement system in optical fibers by thermal neutron irradiation.

된다. 따라서 熱中性子에 대해서는 투과력이 높고 감마선을 차폐시킬 수 있는 납블록을 설치하여 감마선 준위를 70 R/hr로 낮추었다. 이때 熱中性子 flux (<0.5eV)는 9.8×10^7 n/cm²/sec 이었다.

2) 光纖維의 傳送損失 測定

光纖維는 9.8×10^7 n/cm²/sec의 熱中性子 flux로 3시간 동안 照射되었다. 光源으로는 출력이 안정된 0.85μm 및 1.3μm 波長의 LED를 각각 사용하였다. 광원에서 나온 빛은 원자로 내부에 설치된 광섬유를 통과하여 광파워메타에 입력되어 광전변환이 이루어진다. 광파워메타에 연결된 컴퓨터는 시간의 변화에 따른 광파워 데이터를 수치로 저장하고 처리하여 그래프로 표시한다. 熱中性子 效果로 인해 발생한 光纖維 傳送損失은 다음과 같이 계산된다.

$$PL = (Pa - Pb) / D \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

여기서, PL은 熱中性子에 의하여 증가된 단위길이당 傳送損失(dB/km), Pa는 熱中性子照射 前에 測定된 광파워(dBm), Pb는 熱中性子照射 後에 測定된 광파워(dBm), D는 熱中性子에 照射된 光纖維샘플의 길이(km)를 각각 나타낸다. 시간의 증가에 따라 Pa, D는 일정한 반면 Pb는 감소하므로 PL은 증가하게 된다.

4. 實驗 結果

熱中性子에 의해 증가된 光纖維의 단위길이(1km)당 傳送損失을 측정한 結果 그래프는 그림2, 3, 4, 5와 같다.

그림 2는 光波長 1.3μm에서 熱中性子에 의해 증가된 단일모드 光纖維의 傳送損失을 보여준다. 전반적으로 損失 증가가 0.5 dB/km이하로 작게 나타났으며 D光纖維의 損失이 가장 크고 C光纖維의 損失이 가장 작았다. D의 손실 증가는 감마선에 민감한

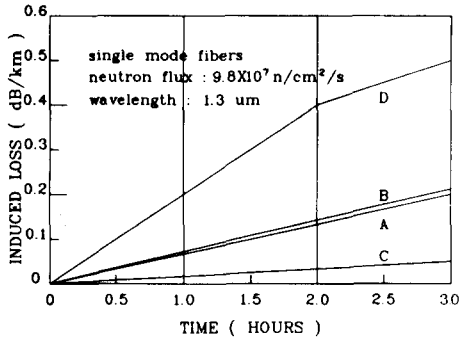


그림 2. 熱中性子 照射시 光波長 1.3 μ m에서 測定된 단일모드 光纖維의 傳送損失 증가
 Fig. 2. Growth of radiation-induced loss at 1.3 μ m in single mode fibers during thermal neutron irradiation.

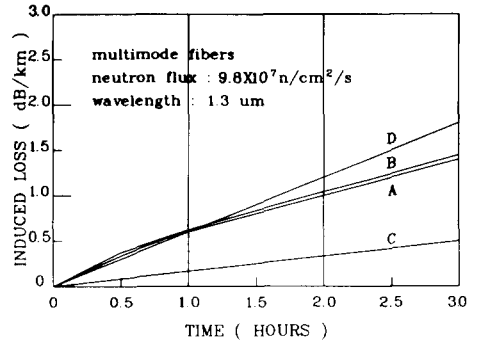


그림 3. 熱中性子 照射시 光波長 1.3 μ m에서 測定된 다중모드 光纖維의 傳送損失 증가
 Fig. 3. Growth of radiation-induced loss at 1.3 μ m in multimode fibers during thermal neutron irradiation.

도우펀트 인(P)이 가장 많이 도우핑되었기 때문에 분석된다. A光纖維와 B光纖維에 있어서는 비슷한 코어材質과 코팅材質으로 인해 損失의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

C光纖維는 A, B와 유사한 코어材質을 가지고 있지만 코팅材質에 차이가 있다. C는 실리콘코팅 위에 나일론코팅이 한 층 더 존재한다. 나일론은 감마선 照射 實驗에서 우수한 차폐성을 보여 주었는데,¹¹⁾ 本 實驗에서도 熱中性子에 대한 우수한 차폐성을 나타냈으며 熱中性子로 인해 코어에 미치는 영향을 감소시킨 것으로 분석된다.

그림 3은 光波長 1.3 μ m에서 熱中性子에 의해 증가된 국내제조 다중모드 光纖維의 傳送損失을 나타낸다. 단일모드와 유사한 경향을 보여주고 있는데 D의 損失이 가장 크고 C의 損失이 가장 작다. D의 損失 증가는 단일모드의 경우와 같이 인의 영향으로 분석된다. A, B에 있어서는 유사한 코어材質과 코팅材質으로 損失의 차이가 크지 않았다. C의 損失이 가장 작게 나타난 이유는 단일모드의 경우와 같이 나일론코팅의 熱中性子 차폐 效果 때문으로 분석된다.

그림 4는 光波長 0.85 μ m에서 熱中性子에 의해 증가된 다중모드 光纖維의 傳送損失을 보여준다. C의 損失이 가장 작았으며 C를 제외한 A, B, D는 損失이 유사하게 증가하였다. C의 損失이 가장 작게 나타난 것은 나일론코팅의 熱中性子 차폐 效果로 인한 것이다. A, B, D를 비교해 보면 0.85 μ m 영역에서 표 2에 나타난 코어材質의 차이에 따른 효과는 크게 나타나지 않았다.

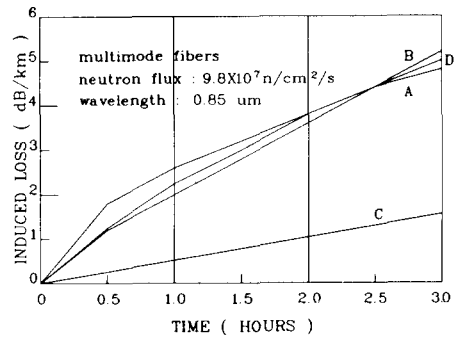


그림 4. 熱中性子 照射시 光波長 0.85 μ m에서 測定된 다중모드 光纖維의 傳送損失 증가
 Fig. 4. Growth of radiation-induced loss at 0.85 μ m in multimode fibers during thermal neutron irradiation.

그림 5는 光波長 0.85 및 1.3 μ m에서 熱中性子에 의해 증가된 순수 실리카코어 光纖維의 傳送損失을 나타낸다. 0.85 μ m에서의 損失이 1.3 μ m에서의 損失보다 2.5배 크게 나타났다. 이는 이차 이온화 放射線에 의해 생성되는 칼라 센터의 광흡수영역이 1.3 μ m 영역보다 0.85 μ m영역이 많이 분포하기 때문이다.

그림 2와 3에서 다중모드 光纖維의 損失이 단일모드 光纖維의 損失보다 5내지 10배 큰 값을 나타냈다. 같은 1.3 μ m 영역에 대해 다중 모드 光纖維의 損失이 큰 이유는 코어 材質의 차이 때문이다. 게르마늄

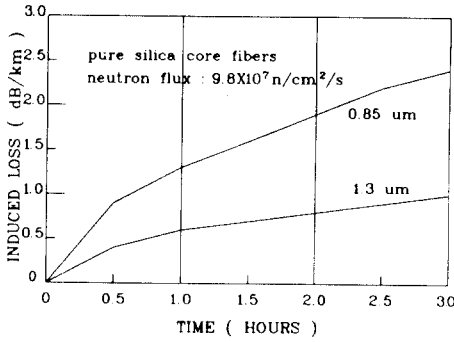


그림5. 熱中性子 照射시 光波長 0.85 μ m 및 1.3 μ m에서 測定된 순수 실리카 光纖維의 傳送損失 증가

Fig. 5. Growth of radiation-induced loss at 0.85/1.3 μ m in pure silica core fiber during thermal neutron irradiation.

의 경우 다중모드 光纖維가 3배 정도 많이 도우핑되어 있으며 인의 경우도 다중모드 光纖維에 많이 도우핑되어 있다. 표 1을 보면 게르마늄의 熱中性子 포획 단면적 및 radioactivity가 Si보다 커서 게르마늄과 熱中性子 반응으로 발생하는 이차 이온화 放射線이 Si의 경우 보다 클 뿐만 아니라 게르마늄 자체의 이온화 放射線에 대한 민감도 또한 크기 때문에 다중모드 光纖維의 損失이 큰 것으로 분석된다.

그림 3 과 4에서 다중모드 光纖維의 경우 0.85 μ m에서의 損失이 1.3 μ m에서의 損失보다 3배 크게 나타났다. 따라서 감마선效果과 마찬가지로 熱中性子效果에 대해서도 光波長 0.85 μ m 영역이 1.3 μ m영역보다 민감하다는 것을 보여준다.

전체적으로 단일모드 光纖維의 損失이 가장 작게 나타났으며 순수실리카코어 光纖維의 경우 코아에 도우펀트가 도우핑되지 않아서 작은 損失을 나타냈다.

IV. 結 論

本 研究에서는 光纖維에 미치는 熱中性子 效果를 理論적으로 考察하고 熱中性子에 照射된 光纖維의 傳送損失 變化를 測定하였다. 熱中性子は 光纖維를 構成하는 물질과 반응하여 이차 이온화 放射線을 발생시키며 발생된 放射線은 光纖維 코아내에 칼라 센터를 생성시켜 傳送損失을 증가시킨다. 傳送損失 測定 實驗에는 국내 4개 회사에서 제조된 光纖維와 외국에서 제조된 순수 실리카코어 光纖維가 사용되었

다. 이들에 대한 熱中性子 效果를 測定분석한 結果를 요약하면 다음과 같다.

1) 코아에 도우핑된 P는 이차 이온화 放射線에 민감한 도우펀트이기 때문에 P가 다량 도우핑된 光纖維의 傳送損失이 크게 증가하였다.

2) 코아에 도우핑된 도우펀트 Ge는 熱中性子와의 반응시 radioactivity가 높아서 이차 이온화 放射線을 많이 발생시킨다. 이로 인해 Ge가 다량 도우핑된 다중 모드 光纖維의 傳送損失이 크게 나타났다.

3) 생성된 칼라 센터의 에너지 준위가 1.3 μ m영역에서보다 0.85 μ m 영역에서 다량 분포하기 때문에 0.85 μ m에서의 損失 증가가 크게 나타났다.

4) 다중모드 광섬유의 경우, 순수한 실리카코어 광섬유가 코어 재질의 영향으로 손실이 작게 측정되었다.

5) 나일론코팅 光纖維가 코팅材質의 熱中性子 차폐 效果로 인해 유사한 코어材質을 가진 光纖維에 비해 損失이 가장 적었다.

本 研究 結果는 감마선 效果 測定結果와 함께 앞으로 放射線環境에 적용될 수 있는 광섬유모재 및 케이블 제조와 光通信 시스템 적용을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

[1] W.K. Kim, Y.B. Lee, and J.M. Lee, "A study on the radiation-induced loss of optical fiber by γ -ray irradiation,"

[2] W.K. Kim, Y.B. Lee, J.M. Lee, et al, "Application technology for optical fiber in nuclear facilities (II)," *KAERI/RR 727/* pp. 24-44, 1988.

[3] W.K. Kim, Y.B. Lee, J.M. Lee, et al, "Application technology for optical fiber in nuclear facilities (III)," *KAERI/RR-831/* pp. 22-41, 1989.

[4] J.A. Wall and J.F. Bryant, "Radiation effects on fiber optics," *NTIS U.S. Department of Commerce*, pp. 7-54, April 1975.

[5] A. Robinson, "Ionizing radiation effects on doped silica and pure silica core fibers," *Proceeding of SPIE*, vol. 721, pp. 63-74, September 1986.

[6] S. Karasawa, Y. Hatori, T. Takada, T. Sakai, and K. Shibuya, "Fiber optic signal attenuation by secondary ionizing radiation in nuclear environments," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. NS-34, no. 5, pp.

1105-1109, October 1984.

- [7] E.J. Friebele, P.C. Schultz, and M.E. Gingerich, "Compositional effects on the radiation response of ge-doped silica-core optical fiber Waveguides," *Applied Optics*, vol. 19, no. 17, pp. 2910-2916, September 1980.
- [8] K. Lengweiler, P.L. Mattern, and P.W. Levy,

"Studies on nonmetals during irradiation: the growth of fcenters in KCl at 85°K," *Physical Review Letters*, vol. 26, no. 22, pp. 1375-1378, May 1971

- [9] D.L. Griscom and E.J. Friebele, "Effects of ionizing radiation on amorphous insulators," *Radiation Effects*, vol. 65, pp. 63-72, 1982.

著 者 紹 介

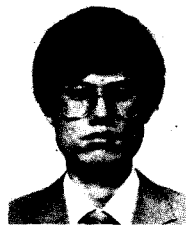
金 雄 基 (正會員) 第27卷 第4號 參照
 현재 한국원자력연구소 연구원



李 容 範 (正會員) 第27卷 第4號 參照
 현재 한국원자력연구소 연구원



李 鍾 旼 (正會員) 第13卷 第3號 參照
 현재 한국원자력연구소 책임 연구원(기초연구부장)



孫 錫 元 (正會員)
 1962年 6月 24日生. 1985年 2月
 인하대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1987年 2月 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1987年 3月~현재 한국원자력연구소 연구원. 주관심분야는 광통신, 실시간 영상처리, 병렬처리 컴퓨터, 자연어 처리 등임.