한국마린엔지니어링학회지 제30권, 제3호, pp. 449~454, 2006. 5 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

마이크로밴딩 장주기 광섬유 격자를 이용한 다중위치 압력감지 센서

손경락† · 최영길* · 장세인* · 최재윤* · 심준환**

(원고접수일 : 2006년 3월 18일, 심사완료일 : 2006년 5월 4일)

Multipoint Pressure-detection Sensors using Microbanding-induced Long-period Fiber Gratings

Kyung Rak Sohn† · Young Gill Choi* · Se-In Jang* · Jae-Yun Choi* · Joon-Hwan Shim**

Abstract : We present a pressure sensor based on the mechanically induced long-period fiber gratings(LPFG) for detecting the multi-location strain variation. The theoretical analysis is performed using a graphic method for a weakly guiding step-index fiber. The calculated results are in good agreement with the experimental results. In this study, from the fact that the optical parameters of a single-mode fiber slightly differ from manufacturing company to manufacturing company, the multipoint pressure-detection sensor systems composed two identical LPFGs are realized. When the pressure is applied two LPFG sensors at once, the resonance peaks are separated as much as about 40 ㎚. These types of sensor systems are well suited as a multipoint monitoring of strain or temperature in the ship or the smart structure.

Key words : Fiber optic sensors(광섬유센서), Long-period fiber gratings(장주기 광섬유 격자), Pressure sensors(압력센서), Strain-induced gratings(응력유기 격자)

1. 서 론

광섬유 격자는 광섬유형 센서 또는 광통신 소자를 효과적으로 구현할 수 있는 획기적인 방법이다[1]. 광을 제어하는 도파로로 통신용 단일모드 광섬유를 사용하며 광섬유의 코어 또는 클래딩에 주기적인 굴절률 변화를 유도하여 필터특성을 얻는 것을 기본 원리로 하고 있다. 격자주기에 따라 단주기 광섬유 격자와 장주기 광섬유 격자로 구분되는데 단주기 광섬유 격자는 수백 ㎚의 주기를 가지며, 일반적으로 UV 레이저 빔과 위상 마스크를 이용하여 제작하게 된다.

장주기 광섬유 격자는 압력, 온도, 응력, 굴절률 등의 가공 물리량 또는 화학적인 변화를 측정할 수 있는 다양한 센서의 기본 동작 소자로도 응용 될 수 있다. 또한 특정파장 제거 또는 투과 필터, 초고속 광 전송 시스템에서의 색분산 보상을 위한 분산 보상 소자, ASE 필터, 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 이

† 책임저자(한국해양대학교 전파정보통신공학부),E-mail:krsohn@bada.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4312
* 한국폴리텍 VI 구미대학
** 한국해양대학교 전파정보통신공학부

득 평탄화 필터 등의 응용을 위하여 많은 연구가 되고 있다[2],[3]. 장주기 광섬유 격자는 격자 주기가 수백 ㎛로 격자주기가 넓기 때문에 제작 방법도 다양해 질 수 있다. UV 레이저와 진폭 마스크를 사용하여 광섬유의 코어에 격자를 제작할 수 있을 뿐만 아니라 광섬유의 클래딩에 주기적인 외부 섭동을 가하여 제작할 수도 있다. 최근 CO/CO_2 레이저 또는 아크 방전을 이용하여 광섬유에 주기적인 열을 가함으로서 격자를 구현하는 기술들이 보고되었다. 스탠포드 대학의 S. Savin 연구그룹에서 V-groove를 이용하여 기계적 압력에 의해서 장주기 격자를 형성하는 방법을 발표하였다[4]. 국내에서도 유사한 방법으로 장주기 격자를 형성하는 연구를 진행하고 있다[5-7]. 이 방법은 광섬유에 주기적인 압력이 가해짐으로서 생기는 광탄성 효과를 이용하는 것으로 비교적 간단한 방법으로 구현이 가능하고 중심파장의 가변도 가능하다.

본 연구에서는 금속선을 이용한 기계적으로 형성된 장주기 격자를 이용한 다중 위치의 압력 측정이 가능한 센서를 보고하고자 한다. 동일한 주기를 가지는 두개의 마이크로밴딩 광섬유 격자소자를 사용하면서도 다른 위치에 있는 압력의 변화를 동시에 측정할 수 있는 특징을 가지고 있다. 서로 다른 두 종류의 단일모드 광섬유를 사용하여 소자 구현이 가능함을 보이고 선박 등의 구조물에 대한 다중 압력 센서로 적용 가능함을 보이고자 한다.

2. 동작원리 및 소자 제작

Fig. 1은 동일한 주기를 가지는 두개의 마이크로밴딩 격자소자를 사용한 다중 압력 센서와 제안된 마이크로밴딩 광섬유 격자 센서의 개략도를 보여주고 있다.

Fig. 1 (a)에서 광섬유 클래딩에 주기적인 굴절률 변조를 유도하기 위하여 250㎛ 직경의 금속선을 이용하였다. 격자의 주기보다 작은 직경의 금속선을 주기적으로 배열하기 위하여 520㎛로 일정하게 주름진 골이 새겨진 고정 지그를 사용하였다. 먼저 적당한 길이로 잘라낸 금속선을 지그의 골에 배열한다. 배열된 금속선이 움직이지 못하게 평판을 이용하여 지그상부에서 눌러준다.

이 상태에서 금속선의 양 끝에 평판 유리를 상하로 겹쳐 붙인다. 금속선의 양 끝단이 고정된 다음 지그를 제거하게 되면 지그가 제거된 부분은 광섬유에 기계적인 격자를 형성하기 위한 부분으로 이용된다. 금속 격자위에 광섬유를 두고 상부에서 평판 덮개로 덮은 뒤 적당한 압력으로 누르게 되면 금속선과 광섬유가 맞닿는 부분에 기계적인 응력이 가해지고 광섬유의 클래딩에 주기적인 굴절률 변화가 유도된다.

본 연구에서 사용한 금속선은 기존에 발표된 방법에 비하여 몇 가지 장점을 가진다. 기계적으로 유도된 장주기 광섬유 격자는 상부에서 누르는 압력과 광섬유와의 기계적인 접촉에 의하여 마모되거나 손상될 우려가 있다.

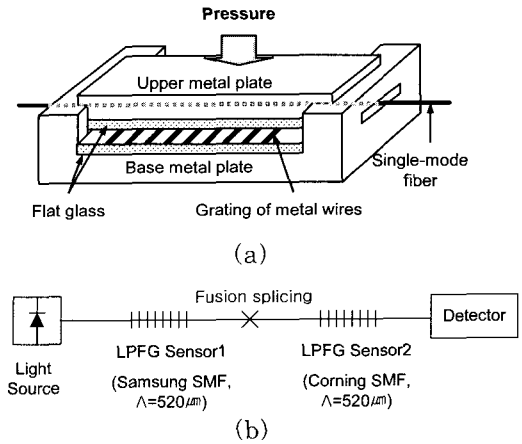


Fig. 1 Schematic of the proposed LPFG pressure sensor system. (a) Structure of LPFG sensor, (b) cascaded multi-pressure detection sensors with same grating period

그러나 금속선은 내구성이 우수하고 견고하므로 반영구적으로 사용할 수 있다. 또한 광섬유보다 강도가 높음에 따라 압력에 의한 광섬유 클래딩의 굴절률 변조가 쉽게 일어나며 금속선의 변형이 발생하지 않는다.

Fig. 1 (b)는 제작된 마이크로밴딩 격자소자 두 개를 이용하여 구성한 센서 시스템이다. 동일한 격자소자에 대하여 센서응답이 서로 다른 파장에서 일어나게 하기 위하여 광섬유의 광학적인 특성이

다른 두개의 광섬유를 직렬 연결하였다. 본 연구에서는 코닝사의 단일모드 광섬유와 삼성의 단일모드 광섬유를 융착함으로서 간단하게 구현할 수 있었다. 각각의 격자소자는 서로 다른 광섬유상에 위치하게 된다.

기계적으로 형성된 장주기 광섬유 격자는 클래딩의 외부에서 가해지는 주기적인 응력에 의해서 굴절률 변조가 유도된다. 이때 광섬유 코어의 LP_{01}모드는 클래딩의 특정모드 LP_{0m}와 광 결합을 하게 되는데 위상 정합 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_m = (n_{co}^{01} - n_{cl}^{0m})\Lambda \tag{1}$$

여기서, Λ는 격자주기, n_{co}^{01}과 n_{cl}^{0m}은 각각 LP_{01} 코어모드와 LP_{0m} 클래딩 모드의 유효 굴절률을 나타낸다. 코어와 클래딩 모드의 유효 굴절률은 전파파장과 광섬유의 구조에 대한 함수로 주어진다. 계단형 굴절률 분포를 가지는 단일모드 광섬유에 대한 코어와 클래딩 모드의 모드 굴절률을 산출할 때 기하 광학적 근사법은 유용하게 사용되어진다. 단일모드 광섬유에 대하여 LP_{01} 모드가 지원되므로 m차 클래딩 모드에 대한 모드 방정식은 다음과 같이 주어진다[8].

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_m}\right) d_{cl}\left((n_{cl})^2 - (n_{cl}^{0m})^2\right)^{1/2} - \left(m - \frac{3}{4}\right)2\pi = 2\cos^{-1}\left(\frac{(n_{cl})^2 - (n_{cl}^{om})^2}{(n_{cl})^2 - (n_{sur})^2}\right)^{1/2} \tag{2}$$

여기서 d_{cl}은 클래딩의 직경이며, n_{sur}은 클래딩 주위의 굴절률이다. 식 (2)의 양변을 그래픽적 방법으로 파장의 함수로 나타내면 Fig. 2와 같다. 두 곡선의 교차점은 주어진 n_{sur}에 대한 모드별 공진파장이다.

n_{sur}이 광섬유의 굴절률보다 높은 일반적인 광섬유 조건에서 계산된 투과 스펙트럼은 그림 3과 같다. 전산모의를 위한 도구는 OptiGrating (OptiWave 사)이다. 식 (2)를 이용한 그래픽적 해석 방법과 거의 유사한 공진 파장 위치를 보여주고 있다. 주어진 파장영역에서 3개의 공진점을 보여주고 있다.

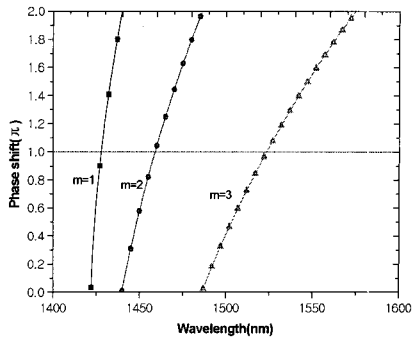


Fig. 2 Graphic method for obtaining the resonance wavelengths.

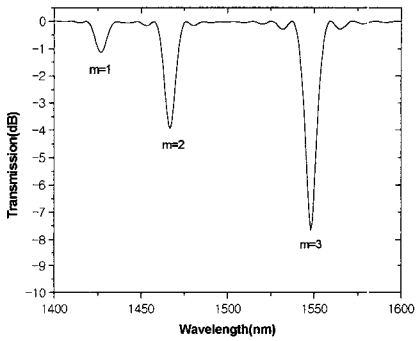


Fig. 3 Calculated transmission spectrum

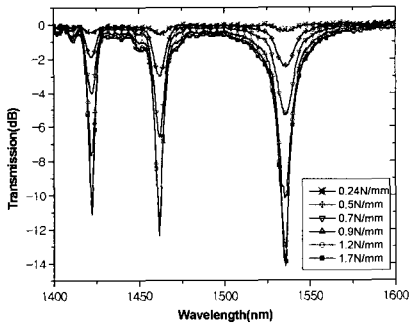
광섬유 코어의 LP_{01} 모드는 광섬유 클래딩의 LP_{01} 모드(m=1)와 1420nm 부근에서 광결합을 하게 되며 1460nm 부근에서는 LP_{02} 클래딩모드(m=2), 1540nm 부근에서는 LP_{03} 모드(m=3)와 광결합을 하게 된다. 코어모드의 광전력이 클래딩 모드와 광결합을 하면서 클래팅 층으로 빠져나가게 되는데, 이때 특정파장에서 광 감쇠가 발생하는 대역제거 필터 특성이 나타나게 된다.

3. 실험결과 및 토의

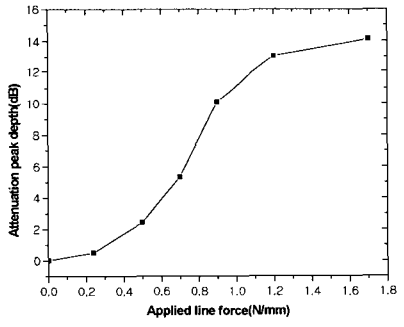
3.1 압력에 대한 마이크로밴딩 격자소자의 투과 특성

Fig. 4 (a)는 Fig. 1 (a)의 형태로 제작된 마이크로밴딩 광섬유 격자센서에 대한 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 격자구조 내부에 위치하게 되는 광섬유는 삼성에서 제작한 단일모드 광섬유를 사용하였으며 기계적인 압력에 대한 내구성을 보장하기 위하여 플라스틱 코팅을 제거하지 않았다. 금속선이

광섬유의 클래딩과 직접 접촉되지 않고 플라스틱 코팅이 완충층 역할을 하게 되므로 삽입 손실은 1dB 이하로 나타나고 있다. 격자에 가해지는 압력이 증가하면 공진파장의 감쇠 깊이도 깊어진다. 이것은 금속선과 접촉하는 광섬유상에 압축응력이 작용하여 주기적인 굴절률 변화를 유도하게 되는데 응력이 커지면 굴절률의 변화 또한 커지게 되어 코어모드에서 클래딩 모드로 광 결합을 위한 광 전력전달이 잘 일어나기 때문이다. 1540nm 파장대역에서 14dB 정도의 감쇠를 얻기 위하여 1.7N/mm 정도의 압력이 광섬유에 인가되어야 한다. Fig. 4 (b)는 압력에 대한 3차 클래딩 모드(m=3)의 광 결합력의 변화를 보여주고 있다. 압력이 증가함에 따라 일정 구간에서는 감쇠 깊이가 비선형적으로 깊어지다가 1.2N/mm 부근에서는 감쇠 기울기가 둔화되어지며 1.7N/mm 부근의 압력에서는 감쇠정도가 포화됨을 보여주고 있다. 이로부터 광섬유의 클래딩에 가해지는 압축응력으로 인한 광탄성효과가 한계에 이르렀음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Spectral response as a function of an applied line force. (a) Transmission spectrum, (b) Attenuation peak depth at 1540㎛ wavelength range (m=3).

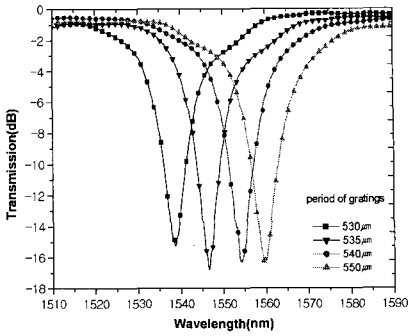


Fig. 5 Transmission spectrum for different grating periods (m=3)

동일모드에서 공진파장을 가변시킬 수 있는 방법은 식 (1) 로부터 마이크로밴딩 격자주기를 바꾸는 것이 효과적임을 알 수 있다. Fig. 5는 격자의 주기를 조절하여 파장을 가변시킨 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 격자의 주기가 늘어남에 따라 동일모드에서의 공진 파장은 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 다중 위치 압력센서 시스템을 구성할 수 있다. 그러나 정확한 격자주기의 조절이 필요하며 격자주기가 다른 여러 개의 마이크로밴딩 격자 소자를 제작하여야 한다. 주기가 동일한 마이크로밴딩 소자를 복수개 이용하여 센서 시스템을 구현할 수 있다면 한 개의 격자 구조로도 다중위치의 물리량을 동시에 감지할 수 있다.

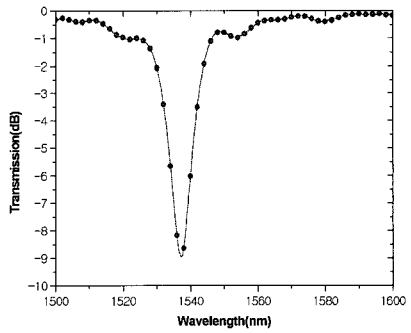
3.2 이종 단일모드 광섬유를 이용한 다중 위치 압력 감지센서

520 ㎛의 주기를 가지는 동일한 형태의 마이크로밴딩 격자 소자를 사용하여 다중 위치의 압력을 감지할 수 있는 센서 시스템을 구현하고 실험하였다. 격자의 주기가 동일할 경우 공진파장이 동일하지만 광섬유의 광학적 파라미터(비 굴절률차, numerical aperture 등)가 달라지면 동일한 주기에서도 공진파장이 달라진다. 각각의 측정된 모드는 LP_{03} 클래딩 모드 (m=3)이다. Fig. 1 (b) 와 같이 두 종류의 단일모드 광섬유를 직렬연결하고 각각의 광섬유에 마이크로밴딩 격자소자를 구현하여 개별 센서에 압력을 가하면서 출력 스펙트럼을 측정한다. Fig. 6은 520 ㎛ 주기의 동일한 마이크로밴딩 격자

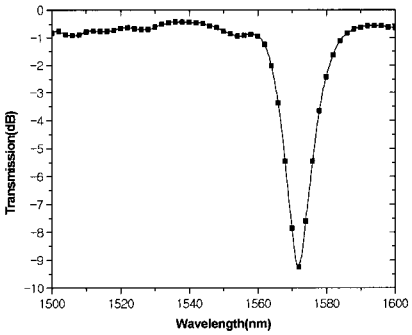
소자를 사용하여 측정한 투과 스펙트럼이다.

먼저 LPFG sensor1에만 압력이 가해지고 LPFG sensor2에는 압력이 가해지지 않으면 Fig. 6 (a)와 같이 공진 파장이 1540 ㎚ 부근에서 일어남을 알 수 있다. 사용된 단일모드 광섬유는 삼성에서 제작된 것이다. Fig. 6 (b)은 코닝사의 단일모드 광섬유로 구성된 LPFG sensor2에만 압력이 가해진 경우의 출력 스펙트럼이며 1570 ㎚ 부근에서 공진이 일어나고 있다. 단일모드 광섬유라 하더라도 제조사에 따라서 광학적인 파라미터들이 달라짐을 이용한 것이다.

LPFG sensor1과 LPFG sensor2에 동시에 압력이 가해지면 Fig. 7과 같은 투과 스펙트럼이 나타난다. 두개의 센서에 대한 압력 응답 특성을 동시에 측정할 수 있음을 보여주고 있다.

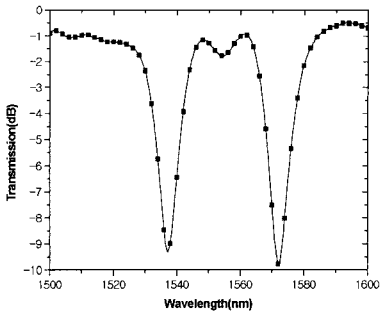


(a)



(b)

Fig. 6 Transmission spectra for different single-mode fibers made by (a) Samsung and (b) Corning. The microband gratings have the same periods as a 520㎛.



(c)

Fig. 7 Measured transmission spectrum when the LPFG sensor1 and LPFG sensor 2 is pressed, simultaneously.

4. 결 론

동일한 주기로 제작된 마이크로밴딩 격자소자를 사용하여 다중위치의 압력을 동시에 측정할 수 있는 광섬유 센서 시스템 구조를 제안하고 두 종류의 단일모드 광섬유를 직렬 융착하여 실험적으로 구현하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같이 결론지을 수 있다.

1. 금속선의 주기적 배열을 이용한 마이크로밴딩 광섬유 격자는 외부에서 가해지는 압력 또는 응력을 광 감쇠량으로 측정할 수 있다.
2. 다중위치의 압력 변화를 동시에 측정하기 위해서는 마이크로밴딩 격자의 주기를 달리하여야 한다. 이러한 방법은 주기가 다른 개별소자를 각각 제작해야 하므로 제작공정이 복잡하고 비경제적이다.
3. 동일한 주기를 가지는 마이크로밴딩 격자를 이용하여 다중위치 압력을 동시에 측정할 수 있는 방법으로 광 파라미터가 다른 단일모드 광섬유를 직렬 융착하여 구현하였다. 제작사가 다른 두 종류의 광섬유상에 520㎛ 의 동일한 주기를 가지는 마이크로밴딩 격자를 배열하였을 때 압력에 대해 서로 독립적인 응답특성을 보였다. 이러한 센서구조의 특징은 선박이나 구조물 내에서 다중위치에 대한 물리적/화학적인 변화량을 동시에 검출할 수 있는 감시시스템으로 활용할 수 있다.

참고문헌

[1] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," J. Lightwave Technol., Vol. 15, pp. 1277-1294, 1997.

[2] G. Rego, J. R. A. Fernandes, J. L. Santos, H. M. Salgado, and P. V. S. Marques, "New technique to mechanically induce long-period fiber gratings," Opt. Commun., Vol. 220, pp. 111-118, 2003.

[3] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, and P. J. Lemaire, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," Opt. Lett., Vol. 21, pp. 336-338, 1996.

[4] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Show, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," Opt. Lett. Vol. 25, pp. 710-712, 2000.

[5] K. R. Sohn and K. T. Kim, "Thermo-optically tunable band-rejection filters using mechanically formed long-period fiber gratings," Opt. Lett., Vol. 30, pp. 2688-2690, 2005.

[6] 손경락, 최영길, 장세인, 최재윤, "선박적용을 위한 장주기 광섬유 격자 압력센서의 기초연구,"한국마린엔지니어링 후기 학술대회, pp. 201-202, 2005.

[7] 손경락, 김광택, 장세인, 최영길, "단일모드 광섬유의 비틀림을 이용한 기계적으로 형성된 장주기 격자소자의 편광 무의존성," Photonics Conference 2005, pp. 418-419, 2005.

[8] B. H. Lee, Y. Liu, S. B. Lee, S. S. Choi, and J. M. Jang, "Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber grating induced by a change of ambient refractive index," Opt. Lett., Vol. 22, pp. 1769-1771, 1997.

저 자 소 개

손경락 (孫慶洛)

1966년 3월생, 1992년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 2002년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 1992년~1993년 현대전자 산업전자연구소, 1995년~1999년 현대자동차 울산연구소, 2003년~현재 한국해양대학교 전파정보통신공학부 조교수

최영길 (崔永吉)

1961년 7월생, 1985년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1988년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1988~1992년 LG정밀(주)연구소, 1992년~1997년 한국산업전자(주), 1997년~현재 한국폴리텍VI 구미대학 조교수

장세인 (張世寅)

1965년 3월생, 1987년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1989년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 2006년 경북대학교 전자공학과 박사과정, 1989년~1994년 LG전자 중앙연구소 선임연구원, 1995년~1998년 삼성전자 통신연구소 선임연구원, 1999년~2003년 현대전자 통신연구소 책임연구원, 2004년~현재 한국폴리텍VI구미대학 정보통신시스템과 조교수

최재윤 (崔在鈗)

1965년 9월생, 1988년 경남대학교 전자공학과 졸업, 1994년 경남대학교 전자공학과 공학석사, 2000년 경남대학교 전자공학과 공학박사, 2000년~2001년 한국전기연구원 Post Doc., 2001년~현재 한국폴리텍 VI 구미대학 정보통신시스템과 조교수

심준환 (沈俊煥)

1966년 2월생, 1991년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1998년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 2003년 8월~2005년 2월 텍사스주립대(알링톤소재)방문교수, 1998년~현재 한국해양대학교 전파정보통신공학부 부교수