

광섬유격자센서와 회전광학커플러를 사용한 새로운 회전축의 토크 측정방법

Torque Measurement of Rotating Shaft Using Fiber Bragg Grating Sensors and Rotary Optical Coupler

이 중 민* · 황 요 하†

Jong Min Lee and Yoha Hwang

(2007년 9월 27일 접수 ; 2007년 10월 31일 심사완료)

Key Words : Fiber Bragg Grating Sensor(FBG sensor, 광섬유격자센서), Rotary Optical Coupler(회전광학커플러), Rotating Shaft(회전축), Torque Measurement(토크 측정), Condition Mointoring(상태 모니터링)

ABSTRACT

Torque of a rotating shaft has been mostly measured by strain gages combined with either a slip ring or telemetry. However, these methods have severe inherent problems like low S/N ratio, high cost, limited number of channels and difficult installation. In this paper, a new method using FBG(fiber bragg grating) sensors and a rotary optical coupler for online non-contact torque monitoring is suggested. FBG sensor can measure both strain and temperature, and has much better characteristics than those of a strain gage. A rotary optical coupler is a optical connecting device between a rotating shaft and stationary side without any physical contact. It has been devised for transmitting light between a rotating optical fiber and a stationary optical fiber. The proposed method uses this rotary optical coupler to connect FBG sensors on the rotating shaft to instruments at stationary side. And a reference FBG sensor is also applied to compensate the insertion loss change of the rotary optical coupler due to rotation. Three FBG sensors have been fabricated in a single optical fiber. Two FBG sensors are attached on the shaft surface to measure torque and one sensor is installed at the shaft center to compensate the insertion loss change. The torque of a rotating shaft has been successfully measured by the suggested method proving its superior performance potential.

1. 서 론

헬리콥터의 블레이드(blade)나 터빈 같은 회전하는 기계요소는 기계시스템에서 많이 사용되는 중요한 요소이다. 따라서 예상치 못한 갑작스런 파손을 방지하고 유지보수 비용을 줄이기 위한 회전하는 부

품의 온라인 상태 모니터링(online condition monitoring)은 매우 중요하다. 회전체를 정확하게 모니터링하기 위하여는 베어링하우징(bearing housing)에서 가속도를 측정하는 것과 같은 간접측정보다는 회전체에 스트레인 게이지(strain gauge)와 같은 센서를 직접 부착하여 신호를 측정하는 것이 일반적으로 훨씬 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 회전체에 부착되어 회전하는 센서와 외부에 설치되는 센서신호처리 장비 사이에 전원과 신호를 주고받기 위해서는 슬립링(slip ring)이나 무선송수신 장치와 같은

† 교신저자: 정희원, 한국과학기술연구원 지능시스템연구본부
E-mail : yoha@kist.re.kr
Tel : (02)958-5656, Fax : (02)958-5659

* 정희원, 한국과학기술연구원 지능시스템연구본부

특별한 장치를 사용해야 한다^(1,2). 그러나 슬립링이나 무선송수신장치는 낮은 S/N비, 고비용, 채널 수 제한, 회전수 제한, 어려운 설치 방법 등 많은 문제점을 수반하고 있다⁽³⁾.

광섬유격자센서(FBG sensor; fiber bragg grating sensor)는 변형률(strain)과 온도를 동시에 측정할 수 있고 스트레인 게이지 보다 훨씬 좋은 특성을 지니고 있다⁽⁴⁾. 광섬유격자센서는 교량이나 터널과 같은 대형 토목구조물을 모니터링하는데 사용되어 왔으며⁽⁵⁾, 최근에 들어서 기계분야에 적용되기 시작하였다. 최근의 풍력발전 산업의 급속한 성장세에 맞추어 블레이드의 상태모니터링에도 광섬유격자센서가 적용되고 있다. 많은 광섬유격자센서를 가진 광섬유들이 풍력발전기 블레이드에 설치되어 변형률과 온도를 모니터링하고 균열을 감지해 내는 역할을 하고 있으며^(6,7), 이와 같은 연구에서는 신호처리장치들이 회전체 허브(hub)내에 설치되어 무선통신을 사용하여 지상으로 데이터를 전송하는 방법을 사용하고 있다.

이 논문에서는 광섬유격자센서를 사용하면서도 무선전송장치를 필요로 하지 않는 새로운 온라인 토크(torque) 측정법을 제안한다. 이 방법은 회전하는 센서의 신호를 정지해 있는 신호처리장치와 연결하기 위하여 회전광학커플러(rotary optical coupler)를 사용하고, 축에 기준 광섬유격자센서를 설치하여 회전에 따른 회전광학커플러의 삽입손실의 변화를 보상하는 기법을 이용한다⁽⁸⁾. 세 개의 광섬유격자센서(두 개는 토크 측정용, 한 개는 보상용)가 있는 하나의 광섬유를 회전축에 설치하고, 풍력발전기의 경우와는 달리 고속광학검출기(dynamic optical interrogator)는 고정축에 위치한다. 회전광학커플러는 슬립링이나 무선전송장치에 비하여 많은 장점을 지니고 있다.

광섬유격자센서와 다양한 광학 커플링 방법을 이용한 연구들이 있었다. Li 등은 축에 부착된 광섬유격자센서와 광학커플러를 사용하여 회전축의 온도를 측정하는 연구를 수행하였는데, 축이 1회전할 때마다 1번씩 온도를 측정할 수밖에 없는 구조로 회전 중에 계속해서 모니터링 해야 할 경우에는 문제점이 있었다⁽⁹⁾. Kruger 등은 광섬유격자센서와 광학커플러를 결합하여 회전축의 토크를 측정에 관한 연구를 하였는데, 회전에 따른 광학커플러의 삽입손실의 변화 때문에 실시간 측정을 하지는 못하고 광학스펙트럼

을 평균화(averaging)한 결과만을 보여주었다⁽¹⁰⁾. 이 논문에서는 회전에 따른 광학커플러의 삽입손실 변화를 실시간으로 보상하면서 온라인으로 회전축의 토크를 측정하여, 제안된 방법의 우수한 성능을 실험으로 입증하였다.

2. 토크 측정 시스템

2.1 제안된 토크 측정 시스템

Fig. 1은 제안된 회전축 토크 측정 시스템의 개념도이다. 두 개의 토크 측정용 광섬유격자센서, S_1 과 S_2 는 축 방향에 대하여 45° 기울어지도록 축 표면에 부착했다. 한 개의 기준 광섬유격자센서, R은 축 중심에 축방향으로 설치했다. 하나의 C-렌즈⁽¹¹⁾는 축 중심에 축방향으로 설치하고 또 다른 C-렌즈는 그 림과 같이 반대편 고정축에 두 C-렌즈가 마주보도록 설치했다. 두 C-렌즈는 공간을 통과하는 광선의 단면적을 넓히기 위하여 렌즈에서 나오는 광선을 평행하게 하고 렌즈로 들어오는 광선을 초점으로 모으는 역할을 한다. 측정원리에 대하여 설명하면, 우선 고속광학검출기 내부에 있는 광대역광원으로부터 나온 광대역 광선이 오른쪽 렌즈에 도착한다. 오른쪽 렌즈는 광선을 평행광선으로 만들고 단면적을 확대하여 공간으로 내보낸다. 두 개의 렌즈사이의 공간을 통과한 광선은 왼쪽 렌즈에 의하여 초점에 모아져서 왼쪽 회전축에 부착된 광섬유 속으로 전달된다. 각 광섬유격자센서에서 반사된 빛은 다시 역순으로 회전광학커플러를 통과하여 고속광학검출기로 돌아온다. 이 광학커플링 방법으로 축이 회전할 때에도 끊어진 두 광섬유 사이를 통과하는 광선을 계속해서 손실을 최소화 한 상태로 연결할 수 있다.

그러나 이러한 회전광학커플러에서는 광선이 두 렌즈사이의 공간을 통과할 때 불가피하게 삽입손실이 발생하게 되고, 축이 회전함에 따라 기계적인 정렬

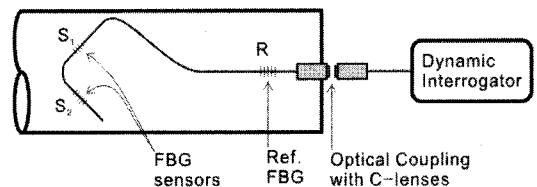


Fig. 1 Torsion sensing set-up using FBG sensors and rotary optical coupler

오차와 광학적인 문제로 이 삽입손실은 변하게 된다. 따라서 정확한 측정을 하려면 회전에 의한 삽입손실을 보상해 주어야만 한다. 이 문제를 해결하기 위하여 회전축에 부착된 모든 광섬유격자센서에서 측정된 회전에 의한 삽입손실이 동일하다고 가정하였다. 따라서 원심력에 의한 센서 변형을 최소한으로 하기 위하여 회전축 중심에 Fig. 1의 R과 같이 기준 광섬유격자센서를 설치하면, 이론적으로 기준 광섬유격자센서는 삽입손실만을 측정하게 될 것이고, 토크 측정용 광섬유격자센서, S₁과 S₂에서 측정된 신호에는 삽입손실 성분과 측정된 토크 성분이 포함되어 있다. 그러므로 기준 광섬유격자센서의 신호와 토크 측정용 광섬유격자센서의 신호사이의 차이를 구하면 회전축에 가해진 토크를 구할 수 있다.

2.2 회전축의 토크

측정된 두 45° 방향의 변형률로 회전축의 토크를 구하는 방법은 다음과 같다. Fig. 2에서 r 은 회전축의 반지름, T 는 인가된 토크 그리고 τ 는 전단응력이다. 단면 2차 극관성 모멘트를 J 라고 하면 전단응력, τ 는 다음 식(1)과 같다.

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (1)$$

그리고, 45° 방향의 변형률, ϵ_1 와 ϵ_2 의 관계는

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 \quad (2)$$

와 같으므로, 평균변형률, ϵ 은 다음 식(3)과 같다.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} = \frac{\tau}{E} \cdot (1 + \nu) \quad (3)$$

여기서, E 와 ν 는 각각 축 재료의 영(Young) 계수와 푸아송(Poisson) 비이다. 식(1)을 식(3)에 대입하고, 균일한 밀도를 가진 원기둥 축에 대한 단면 2차 극관성 모멘트, J 가 $\pi r^4/2$ 임을 고려하면, 측정된

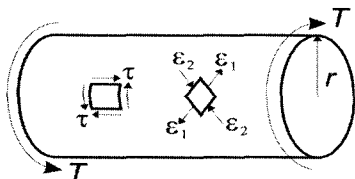


Fig. 2 Torsion sensing method

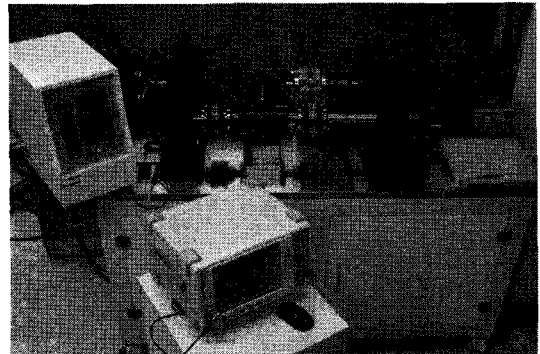
변형률로부터 토크는 다음 식(4)와 같이 평균변형률, ϵ 의 함수이다.

$$T = \frac{E \cdot J}{r \cdot (1 + \nu)} \cdot \epsilon \quad (4)$$

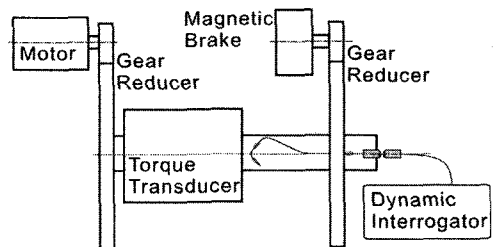
3. 회전하는 블레이드의 변형을 측정

3.1 실험장치 구성

Fig. 3(a)는 회전축을 비틀어 토크를 측정하기 위한 장치로, 그 구성요소는 개략적으로 Fig. 3(b)와 같다. 회전속도를 정속으로 유지하고 토크를 키우기 위하여 그림의 왼쪽 위에 있는 교류서보모터와 감속기어를 사용하여 회전축을 구동하였다. 회전축에 부착된 광섬유격자센서로 측정된 토크와 비교하기 위하여 토크측정기를 회전축에 설치하였다. 또한 회전축에 부하 토크를 인가하기 위하여 그림의 오른쪽 위에 있는 전자석 브레이크를 사용하였다. 전자석 브레이크는 전자석에 인가되는 전류와 전자석 브레이크 축 회전수에 비례하는 회전 저항 토크를 발생시키는 장치로, 발생토크를 키우기 위하여 증속기어를 사용하여 회전축과 연결하였다. 2개의 토크 측



(a) Overview



(b) Schematic diagram

Fig. 3 Experimental setup for torque measurement

정용 광섬유격자센서와 1개의 기준 광섬유격자센서를 2.1절에서 설명한 것과 같이 회전축에 설치하였다. 기준 광섬유격자센서는 주위의 진동으로부터 격리하기 위하여 온도 측정용으로 특별히 처리된 광섬유격자센서를 방진물질로 포장하여 축에 설치하였다. 이 센서들의 파장 반사특성은 Fig. 4와 같은데, 왼쪽의 피크가 기준센서에서 반사된 광선의 파장이고 나머지 두 피크가 토크측정용 센서에서 반사된 광선의 파장이다. 이 피크들의 파장은 대략 1521, 1554, 1563 nm 근처에 위치해 있다.

회전광학커플러는 Fig. 3의 오른쪽에 있으며, 확대한 사진은 Fig. 5와 같다. 그림의 왼쪽 회전축에는 축 끝단에 상하좌우 4개의 볼트를 사용하여 렌즈의 자세를 조절할 수 있는 구조를 고안하여 설치하고, 회전축의 회전중심선과 회전축 렌즈의 광축이 일치시킬 수 있도록 하였다. 그리고 그림의 오른쪽과 같이 고정축 렌즈의 위치를 조절할 수 있는 3축 변위 조절 작업대(stage)위에 피치-요(pitch-yaw)각을 조절할 수 있는 각변위 조절 작업대를 설치하고 그 위에 렌즈를 고정시켜 고정축 렌즈의 위치와 자세를

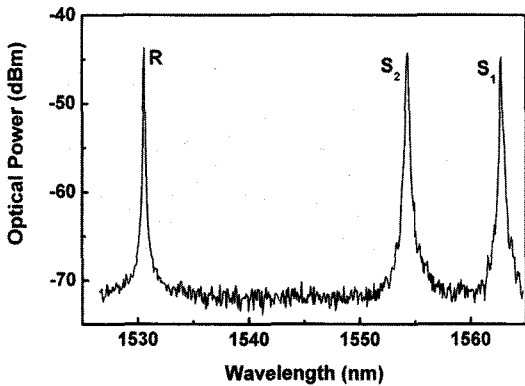


Fig. 4 Characteristic wavelengths of three FBG sensors

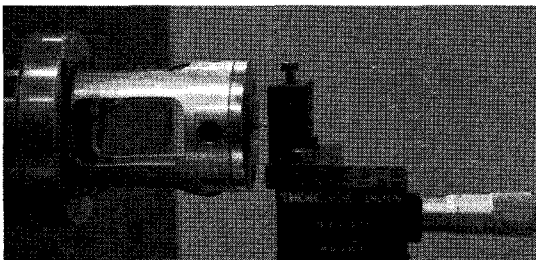


Fig. 5 Rotary optical coupler

회전축에 맞출 수 있도록 하였다. 광신호 처리와 변형을 계산에 사용된 자체 개발한 고속광학검출기는 Fig. 3의 앞쪽에 있다. 정적광학검출기(static optical interrogator)와는 달리 주파수 영역 변조법을 사용하였는데, 이는 고속 광신호 처리를 위하여 각 광섬유격자센서의 신호마다 튜너블필터(tuneable filter)⁽⁸⁾를 할당하는 방법이다. 이 고속광학검출기는 12개의 광섬유격자센서 신호를 동시에 처리할 수 있으며, 최대 샘플링속도는 채널당 8 kHz이다.

3.2 삽입손실 변화 보상

Fig. 6은 전자석 브레이크를 끄고서 회전하고 있는 축에서 측정된 신호를 보상한 예를 보여주고 있다. Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 기준 광섬유격자센서와 토크 측정용 광섬유격자센서에서 축이 회전할 때 측정된 광량의 변화를 보여주고 있다. 주기적인 광량의 변화는 회전광학커플러에서 발생한 삽입손실의 변화를 보여주고 있고, 평균 광량의 차이는 증감속기어 때문에 발생한 회전축에 걸린 토크에 의한 변형을 보여주고 있다. 예상한 바와 같이 두 신호의 주기적인 광량변화가 매우 비슷한 크기와 형태를 보여주고 있다. 이는 회전에 기인한 삽입손실의 변화가 모든 광섬유격자센서에서 동일하게 측정되고 있다는 것을 입증하고 있다. 이 두신호의 차이로 보상된 신호는 Fig. 6의 (c)이다. 이렇게 보상된 신호로 광섬유격자센서에서 반사된 광선의 파장 변화량을

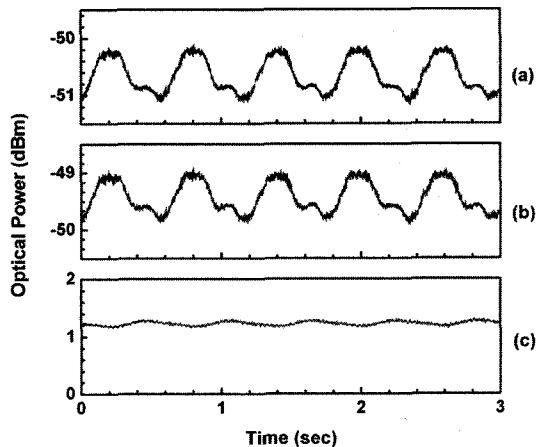


Fig. 6 Compensation result of insertion loss change due to rotation: (a) reference FBG sensor signal (b) torsion sensing FBG sensor signal (c) signal after compensation

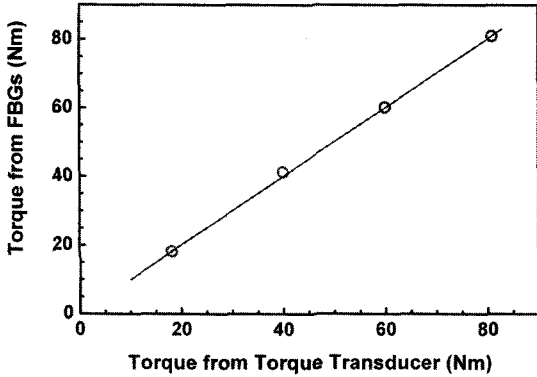


Fig. 7 Measurement comparison between torque meter and proposed method

구하여 다음 식 (5)를 사용하여 온도가 일정할 경우에 축 표면의 변형률을 계산한다.

$$\Delta\lambda = \alpha \cdot \Delta\epsilon + \beta \cdot \Delta K \quad (5)$$

여기서, $\Delta\lambda$ 는 광섬유격자센서에서 반사된 광선의 파장의 변화량(pm)이고 ΔK 는 온도변화량(°C), α 는 변형률감도, β 는 온도감도이다. α 와 β 는 대략 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 이고, $11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 이다⁽¹²⁾.

3.3 토크측정 결과

제안된 회전축 토크 측정 장치로 회전축에서 45° 방향의 두 변형률을 측정하여 구한 토크와 토크 측정기로 측정된 토크를 Fig. 7에서 비교하였다. Fig. 7에서 가로 축은 토크측정기로 측정된 토크 값을 나타내는 축이고, 세로축은 제안된 방법으로 구한 토크 값을 나타내는 축이다. 부하 축이 1,000 rpm으로 회전하고 있을 때 전자석 브레이크에 흐르는 전류를 바꾸어 제동력을 증가시키면서 토크를 측정하였다. 그림에서 작은 원으로 표시된 지점이 두 방법으로 측정된 토크를 비교한 것이고, 직선은 이 작은 원들을 1차 방정식으로 곡선적합(curve fitting)한 직선이다. 그림에서 보면 제안된 방법으로 회전하고 있는 축에 작용되는 토크를 정확하게 구할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 광섬유격자센서와 회전광학커플러를 사용한 새로운 토크 측정법을 제안하였다. 일반

적으로 사용되는 스트레인 게이지와는 달리 이 방법은 슬립링이나 무선 송수신 장치를 필요로 하지 않는다. 단지 3개의 광섬유격자센서가 연결된 하나의 광섬유를 축에 부착하고 나머지 모든 장비나 장치는 고정된 장소에 위치시키면 된다. 회전광학커플러로 회전부와 고정부의 사이의 광신호를 연결하므로, 스트레인 게이지를 사용한 방법에 비하여 높은 S/N비 특성을 가지고 있고, 전자기파에 영향이 없고, 여러 센서를 한 선으로 연결하여 신호를 주고받을 수 있어서 설치가 간단하고 질량영향이 없고, 회전속도에 제한이 없는 등 많은 장점을 지니고 있다. 그러나 회전광학커플러에서 삽입손실이 필연적으로 존재하고, 이 회전손실은 축의 회전에 따라 변한다. 기준 광섬유격자센서를 도입하여 이 문제를 성공적으로 해결하였다. 실험결과를 제안된 새로운 방법이 스트레인 게이지와 슬립링 또는 무선송수신장치를 연계한 기존 토크 모니터링 방법이 가지고 있는 낮은 S/N비, 고비용, 채널 수 제한, 회전속도 제한, 어려운 설치 방법 등의 제한 조건을 극복할 수 있음을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

- (1) Cesnik, C. E. S., Shin, S. J. and Wibur, M. L., 2001, "Dynamic Response of Active Twist Rotor Blades", *Smart Materials and Structures*, 10, pp. 62~76.
- (2) Nam, Y., Park, M. and Yoo, N., 2006, "A Calibration and Uncertainty Analysis on the Load Monitoring System for a Low Speed Shaft and Rotor Blade of a Wind Turbine", *Transactions of the KSME A*, Vol. 30, No. 5, pp. 560~567.
- (3) Lawson, C. P. and Ivey, P. C., 2005, "Tubomachinery Blade Vibration Amplitude Measurement through Tip Timing with Capacitance Tip Clearance Probes", *Sensors and Actuators A*, Vol. 118, pp. 14~24.
- (4) Schmidt-Hattenberger, C., Naumann, M. and Borm, G., 2003, "Fiber Bragg Grating Strain Measurements in Comparison with Additional Techniques for Rock Mechanical Testing", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 50~55.

(5) Gebremichael, Y. M., Li, W., Meggitt, B. T., Boyle, W. J. O., Grattan, K. T. V., McKinley, B., Boswell, L. F., Aarnes, K. A., Aasen, S. E., Tynes, B., Fonjallaz, Y. and Triantafillou, T., 2005, "A Field Deployable, Multiplexed Bragg Grating Sensor System Used in an Extensive Highway Bridge Monitoring Evaluation Tests", IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 3, pp. 510~519.

(6) Immerkar, N. P. and Mortensen, I., 2004, "Blade Monitoring System", Proceedings of the 2004 European Wind Energy Conference (EWEC2004), London U.K.

(7) Sabrina, K., 2006, "Advanced Wind Turbine Controls Input Based on Real Time Loads Measured with Fiber Optical Sensors Embedded in Rotor Blades", Proceedings of the 2006 European Wind Energy Conference (EWEC2006), Athens Greece.

(8) Lee, I. J., Lee, J. M., Lee, S. B. and Hwang, Y. H., 2006, "On-line Strain Measurement of Rotating Blade Using Fiber Bragg Grating Sensors and Beam Coupler", Transactions of the Korean

Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1172~1178.

(9) Li, X. and Prinz, F., 2004, "Analytical and Experimental Study on Noncontact Sensing with Embedded Fiber-optic Sensors in Rotating Metal Parts", Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 7, pp. 1720~1727.

(10) Kruger, L., Swart, P. L., Chitchebakov, A. A. and Wyk, A. J. V., 2004, "Non-contact Torsion Sensor Using Fibre Bragg Gratings", Measurement Science and Technology, Vol. 15, pp. 1448~1452.

(11) Jing, W., Jia, D., Tang, F., Zhang, H., Zhou, G., Yu, J., Kong, F. and Liu, K. 2004, "Design and Implementation of a Broadband Optical Rotary Joint Using C-lenses", Optics Express, Vol. 12, No. 17, pp. 4088~4093.

(12) Betz, D. C., Tursby, G., Culshaw, B. and Staszewski, W. J., 2006, "Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette", Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, No. 2, pp. 1019~1026.