

광섬유 센서를 이용한 스마트 구조 기술의 연구 동향

Research Trend in Smart Structures Using Fiber Optic Sensors

류치영*

Chi-Young Ryu*

1. 서론

발전소의 터빈이나 원자력 발전소 시스템과 같은 대형 기계 구조물과 고속전철, 잠수함, 항공기와 같이 매우 복잡한 구조물은 사고 시 많은 인명피해를 유발하는 대형 사고를 초래한다. 적절한 보수유지를 통한 시스템의 잔존 수명 예측과 시스템의 안전 유지를 위해서는 시스템의 전반적인 이해와 그에 따른 적절한 진단기술이 필요하다. 또한 이러한 구조물의 경우 시스템의 안전 유지를 위한 검사방법의 절차가 매우 복잡하거나 전체 시스템의 광범위한 검사에 어려움이 있다. 현재는 구조물의 작동 또는 운행 후 주기적으로 구조 손상의 발생과 진전을 점검하는데 이는 검사 비용의 증가, 운행 시간의 제약, 운행 중 구조 신뢰성에 대한 문제점 등을 야기시킨다. 그러므로 구조물의 변형상태 및 파손여부를 운행 중 실시간으로 감지하고 능동적으로 대처할 수 있는 기능이 구조물 자체에 부여된 스마트 구조물에 관한 연구가 외국 선진국을 중심으로 최근 활발히 진행되고 있다[1-3].

Fig. 1은 스마트 구조물의 일례인 스마트 복합재 구조물의 개념도를 나타내고 있다. 스마트 구조물은 구조물에 작용하는 외부환경의 변화 및 내부환경의 변화에 구조물 스스로 능동적으로 대처할 수 있는 구조물을 말하며 생물체와 유사하게 환경변화를 감지하는 신경계와 환경변화에 따른 구조물의 상태를 판단하는 두뇌계, 그리고 환경변화에 적절히 대응하는 작동계로 이루어진다. 두뇌계

는 신호처리 및 구조물 특성의 데이터베이스를 내장하고 있는 마이크로 프로세서로 구성되며, 작동계는 주로 압전 세라믹(piezo ceramic), 가제어성 ER유체(electrorheological fluid) 및 MR유체(magnetic fluid), 형상기억합금(shape memory alloy) 등을 사용하며 감지계는 반도체 센서, 금속박막 센서, 압전센서, 광섬유 센서 등이 주로 사용된다.

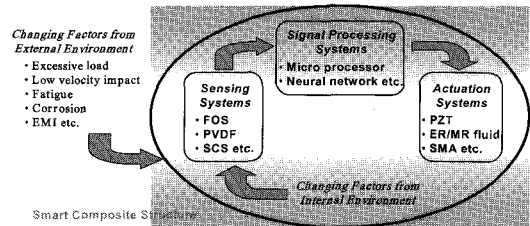


Fig. 1 Conceptual schematic of smart composite structures

스마트 구조물의 감지계로 사용되는 센서체계에서 최근에는 전자파의 영향을 받지 않고, 센서 수명과 직결되는 환경적 영향에 강하며 신호의 원거리 전송이 가능하고 매우 높은 해상도를 갖으며 하나의 라인에 여러 개의 센서를 구성하여 전체 구조물 검사에 용이한 광섬유 센서의 사용이 주목을 받고 있다. 선진국에서는 스마트 구조물에 광섬유 센서의 적용이 1980년대 중반부터 연구가 활발히 이루어지고 있으며 이전의 광섬유 센서 자체에 대한 연구에서부터 현재에는 주로 우주, 항공과 같은 첨

단 분야와 국방에 관련된 분야에 적용이 활발하게 진행되고 있으며 일반 기계 구조물에 대한 적용도 점차 시도되고 있는 단계에 있다. 국내에서도 광섬유 센서의 연구 및 광섬유 센서의 기계구조물로의 적용이 일부 대학 연구소와 기업연구소에서 행해지고 있으며 실용적인 성과가 나오고 있는 실정이다. 그러나 광섬유 센서를 일반 기계구조에 적용하기 위해서는 광학 및 전자, 전기공학, 기계공학 등 폭 넓은 학제적 사고 및 이해를 기반으로 하여야 하나 저변 부족으로 국내 연구기반은 일부에 국한되어 있는 실정이다.

이 글에서는 스마트 구조물을 구성하는 매체 중 광섬유 센서에 대하여 다른 센서와의 장단점을 비교하고 국내에서의 수행된 광섬유 센서를 적용한 스마트 구조물의 적용 사례와 선진국의 연구현황 및 국내 연구현황에 대하여 소개하고자 한다.

2. 광섬유 센서 시스템의 연구 및 적용현황

2.1. 광섬유 센서

전형적인 광섬유 센서 시스템은 광원, 광섬유 센서, 광검출기 그리고 신호처리 부분으로 구성되어 있다. 광원은 주로 반도체로 만들어진 레이저 다이오드가 많이 사용되고 있으며 레이저 다이오드는 크기가 매우 작으므로 소형의 경량화된 시스템을 구성할 수 있다.

광섬유 센서는 기존 일반 센서에 비해 다음과 같이 많은 장점을 가지고 있다. 광섬유 센서는 유전재료인 유리로 구성되어 있으므로 온도특성이 우수하며[4] 전자기파의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 전자기적 노이즈가 많이 존재하는 우주환경이나 고속전철 선로 등에 유용하게 쓰일 수 있는 장점이 있다. 또한 광섬유는 매우 유연하고 외경은 $125\mu\text{m}$ 로 매우 작으므로 설계자가 원하는 크기로 만들 수 있다. 광섬유를 이용하는 센서체계는 광섬유의 전달손실이 매우 적으므로 원거리 송수신이 가능하며 광섬유 한 선에 여러 개의 센서를 구성할 수 있으므로 댐, 교량, 민간 항공기와 같은 대형 구조물이나 원자력발전소와 같은 위험환경의 센서체계로서 이용될 수 있다.

광섬유 센서의 가장 큰 장점은 한 개의 광원과 광검출기를 갖는 시스템에서 광섬유 한 가닥에 여러 개의 센서를 구성하여 감지할 수 있는 다점측정(multiplexing)이 가능한 것이며 복잡한 구조물이나 대형 구조물의 센서체계

에 적용될 경우 전체 센서 시스템의 소형 경량화를 이룩할 수 있다. 또한 공용 통신망에 사용되는 광케이블은 점차 기존의 동축케이블을 급속히 대체해가고 있으며 이러한 광통신망은 광섬유 센서시스템과 쉽게 연계되어 향후 기존의 다른 센서체계보다 통합된 시스템 구성에 매우 용이하다. 특히 항공우주분야에서 광섬유 센서의 연구와 적용이 활발하게 진행되고 있는데 이는 항공우주 구조물에 많이 사용되고 있는 고등 복합재의 강화재와 특성이 유사하여 구조물의 특성을 저하시키지 않고 복합재 내부에 삽입이 용이하고 소형 경량화된 센서망을 구성할 수 있기 때문이다[5].

2.2. 연구 현황 및 실제 적용 예

선진국의 경우 스마트 구조물에서 광섬유 센서의 연구는 1980년대부터 시작되었으며 Fig. 2에서 보는 바와 같이 80년대 중반부터 90년대 초까지 주로 개별적인 광섬유 센서의 제작 및 특성에 관한 연구가 진행되었다. 초기에는 첨단분야 즉 군수 및 항공우주 분야에 집중되어 있었으나 80년대 중반에는 일반 산업계의 센서로서도 사용이 확장되었다. 80년대 말부터 댐, 교량과 같은 대형 기간산업에 적용되기 시작하였다. 항공우주분야에서 스마트 구조물로서 광섬유 센서의 연구는 고등 복합재료내에 삽입이 용이하므로 복합재료 경화과정을 모니터링하거나 파손감지에 대한 연구가 진행되었다. 복합재 구조물의 경우 저속충격에 매우 취약하므로 저속충격시 복합재료의 파손 및 파손위치 검출과 같은 연구가 진행되었다. 최근에는 하나의 광섬유에 N개의 개별적 센서를 설치하여 다점측정(multiplexing)에 관한 연구가 진행중에 있으며 다점측정 방법으로는 TDM(time division multiplexing), WDM(wavelength division multiplexing), CDM(coherent division multiplexing) 등이 있다. 초기의 연구에서는 한 가지 방법을 사용하였으나 센서 개수의 제한을 극복하기 위해 TDM/WDM과 같이 두 가지 방법을 결합한 하이브리드(hybrid) 방법이 쓰인다. 다점측정에 관한 연구는 개별 센서에 대한 연구에 비해 신호처리가 매우 중요한 역할을 차지한다. 광섬유 센서를 실제 구조물에 적용하여 스마트 구조화하기 위해서는 실시간 데이터 처리가 필수적인 요건이 된다. 그러나 기존의 신호처리 방법은 실시간 데이터 처리에 많은 제약을 갖고 있고 실제 환경의 모호한 데이터의 처리를 할 수 있어야 하므로 근래에는 전문가 시스템이나 퍼지이론 및 신경망 회로와 같은 신

호처리 방법에 대하여 광섬유 센서 시스템에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

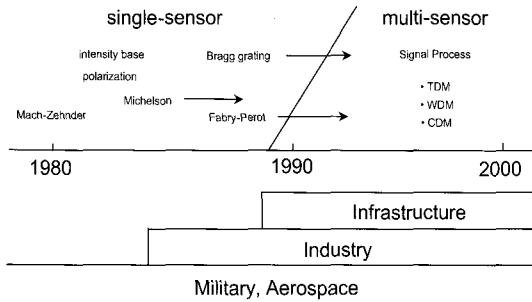


Fig. 2 History of the fiber optic sensor in smart structures

광섬유 센서는 군수산업과 일반산업에 광범위하게 적용되고 있으며 의료기기 및 환경분야 센서로써 많이 적용되고 있다. Fig. 3은 광섬유 센서의 적용분야를 보여주고 있으며 상당부분 산업계에 상용화된 제품으로 나오고 있다. 그러나 실제 구조물에 대한 적용은 광섬유 센서가 전투기, 위성체 및 잠수함과 같은 군수 및 항공우주와 같은 첨단분야에 적용되고 있으므로 이에 대한 구체적인 자료가 부족하며 잠수함이나 군함의 음향탐지기, 항공기의 구조진단 센서체계 그리고 위성체의 센서계로 많이 적용된다고 알려져 있다. 일반 구조물에서의 적용은 주로 토목, 건축과 같은 기간산업에 많이 적용되고 있으며 실제 구조물에 적용된 예는 다음과 같다.

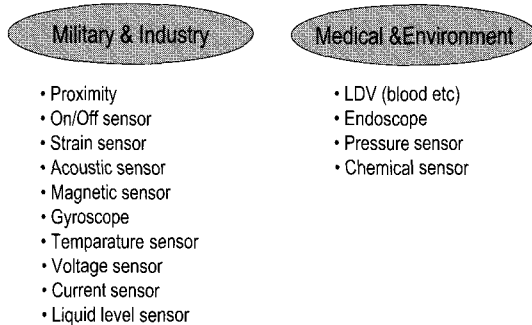


Fig. 3 Application of fiber optic sensors

● F-15 full scale fatigue test(1991)

F-15 날개에 광섬유 센서 배열을 삽입하여 기존 센서와 결과를 비교하고 센서자체의 피로수명에 대해 연구하였다.

● Airbus structures of carbon fiber reinforced plastics

Airbus의 손상 검출을 위해 고등 복합재료로 구성된 부분에 광섬유 센서 시스템을 구성하였다.

● Schiessbergstrasse 교량(1992)

Leverkusen에 있는 다리(길이 53 m, 폭 10 m)에 광섬유 센서를 설치하여 교량의 과대하중, 변형정도, 교량의 손상 및 파손 정도와 변형의 검출에 사용하였으며 광섬유 chemical 센서는 교량의 콘크리트 구조물의 탄화와 염수에 따른 부식 정도를 검출하는데 사용하였으며 교량의 이러한 상태를 초기 검출함에 의해 교량의 유지와 보수 비용이 감소한다고 보고하였다.

● Rock-Hill dam

댐과 같이 습도가 높고 발전설비가 있어 전자기파의 영향이 매우 심한 곳에서는 기존의 센서는 부식 등의 이유로 사용에 제한을 받게 된다. 특히 댐과 같이 매우 넓고 긴 영역의 검사에 있어서는 더욱 기존 센서의 사용에 제약을 받게되므로 댐의 구조적 안정성과 스펠(span) 연결부의 검사에 광섬유 센서를 사용하여 댐의 구조안전진단을 하였다.

● Interstate-89 highway bridge(1989)

Burlington 근처 Winooski 강에 있는 교량에 광섬유 SMS(statistical mode sensor)를 부착하여 교량의 동적 특성을 검사하였다.

● Stafford building(1992)

University of Vermont 에서 Stafford Biotechnology Research Complex를 짓는데 약 8 개월에 걸쳐 2.5 마일 이상의 광섬유를 사용하여 건물 전체에 광섬유 센서망을 구성하였다. 구성된 광섬유 센서망을 이용하여 건물의 진동측정, 풍압, 건물의 하중상태, 균열, 온도 등을 검사하였으며 콘크리트가 경화될 때까지는 콘크리트의 경화과정 검사에도 사용하였다.

● Winooski hydroelectric dam(1992)

댐(용량 7.5 MW)에 4 마일 이상의 광섬유를 사용하여 다양한 길이와 형태의 광섬유 센서망을 구성하였다. 댐의 경우 매우 크고 고습도, 발전기로 부터 발생하는 매우 높은 전자기 환경으로 인해 기존 센서는 많은 제약을 받게 된다. Winooski 댐의 발전기 주위에서 광섬유 센서를 사용하여 발전기의 전자기에 영향을 받지 않고 발전기에 대한 동특성과 수압을 검사하였으며, 발전기의 표면에 광섬유센서를 부착하여 발전기의 안전진단 검사에 적용하였다.

● Middlebury rail bridge(1994)

철도 선로안에 0.4 km 정도의 광섬유 센서를 사용하여 원거리, 실시간 구조안전진단 검사를 하였다.

3. 광섬유 센서 시스템의 종류

Fig. 4에 나타나 있듯이 광섬유 센서는 구조물에 작용하는 외란에 대해 광원의 세기(amplitude), 편광(polarization), 산란(scattering), 간섭(interferometer) 그리고 브래그 격자(Bragg grating) 등을 측정에 이용한다. 이러한 외란에 의해 변조(modulation)된 광신호는 구조물의 변형률, 압력, 온도 등과 같은 물리적 정보를 가지고 있다. 구조물에 가해진 외란을 광신호로 변조하는 방법에서 가장 기본적인 센서 형태는 광섬유의 굽힘 등에 의해 빛의 세기에 손실이 발생하며 이 손실된 양으로부터 외란을 감지하는 방법이다. 이 방법은 매우 단순한 방법으로 산업계에서 많이 사용되고 있다. 두 번째 방법으로 편광을 이용하는 방법이 있다. 일반적으로 사용되는 광원은 편광되어진 광원을 사용하며 빛이 광섬유를 통과할 때 외란에 의해 광섬유 내부의 굴절률의 변화로 인해 빛의 편광특성이 변화하게 되며 빛의 편광된 정도로 외란을 측정하는 방법이다. 또한 빛이 광섬유 내부에서 전파될 때 일반적으로 여러 종류의 산란이 발생하며 이러한 산란 현상을 이용하여 긴 게이지 길이를 갖는 센서나 온도 센서를 만들 수 있다. 그러나 위와 같은 방법은 일반적으로 해상도가 떨어지고 국부적인 측정이 어려운 단점을 가지고 있으므로 최근에는 이러한 단점을 극복한 간섭계 센서와 브래그 격자 센서가 스마트 구조물에 많이 사용되고 있다.

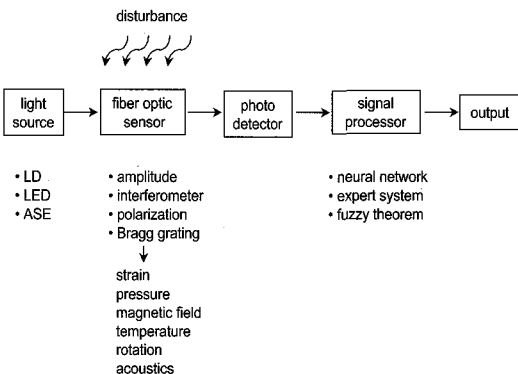
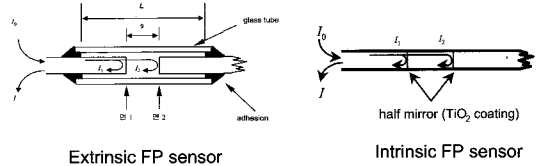
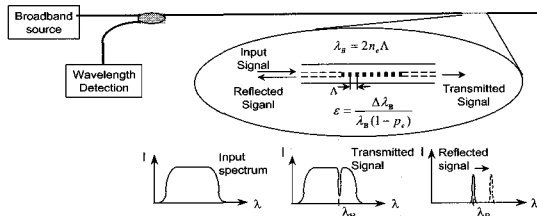


Fig. 4 Typical fiber optic sensor system



(a) Fabry-Perot interferometer



(b) fiber Bragg grating sensor

Fig. 5 Schematic diagram of the FPI and FBG

Table 1 Intracore Bragg grating versus Fabry-Perot interferometer

Bragg grating	Fabry-Perot
<p>Merits</p> <ul style="list-style-type: none"> ● absolute measurement ● automated fabrication ● minimal strength degradation ● multiplexed/demultiplexed ● fast response time ● localized with a few mm spatial resolution <p>Demerits</p> <ul style="list-style-type: none"> ● strain resolution may be limited with broadband light source 	<p>Merits</p> <ul style="list-style-type: none"> ● excellent stain resolution ● fast response time (demo modulation limited) ● localized with mm spatial resolution ● absolute measurement with coherent multiplexing <p>Demerits</p> <ul style="list-style-type: none"> ● limited strength(intrinsic) ● difficulty in automated fabrication slow time response with coherent multiplexing

간섭계 센서에는 여러 종류가 있으며 스마트 구조물에서 대표적인 간섭계 센서는 패브리-페로(Fabry-Perot)가 많이 사용되고 있다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 패브리-페로 센서는 extrinsic 방법과 intrinsic 방법이 있으며 레이저의 파장이 매우 짧으므로 빛의 파장단위 정도의 정밀 측정이 가능하다. Fig. 5(b)에서 브래그 격자 센서는 광섬유 코어에 그레이팅이 새겨져 있으며 넓은 파장대역을 갖

는 빛이 그레이팅된 광섬유에 입사되면 그레이팅 간격에 따라 고유 파장의 빛이 반사되는 특성을 이용하여 측정한다. Table 1에 패브리-페로 센서와 브래그 격자 센서를 비교하였다. 다음 장에는 앞에서 말한 바와 같이 현재 스마트 구조의 감지제로 사용되는 광섬유 센서 중 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 대표적인 두 가지 종류의 센서인 외부 패브리-페로 간섭계(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI)를 이용한 광섬유 센서와 파장 분할 다중화 기법(Wavelength Division Multiplexing, WDM)을 이용한 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating, FBG) 센서 두 가지 종류의 광섬유 센서에 관하여 한국과학기술원 항공우주공학과 스마트 구조 및 복합재료 연구실에서 수행된 연구 내용을 비교적 상세히 소개하고자 한다.

3.1. EFPI 센서를 이용한 복합재 보의 층간분리 좌굴 및 진전 검출

3.1.1. EFPI 센서의 측정원리 및 신호처리

EFPI의 개략도는 앞의 Fig. 5(a)에 나타내었다. 그림에서 L은 EFPI의 케이지 길이이다. EFPI를 이용하여 구조물의 변형을 및 파손을 측정할 수 있는 원리는 다음과 같다. 입사광의 세기 I₀가 첫 번째 광섬유의 단면에서 4%의 반사를 일으켜 I₁을 발생하고, 96%는 매질이 공기인 간극 s만큼의 거리를 통과하여 두 번째 광섬유의 단면에서 다시 반사를 일으켜 I₂를 발생시켜 I₁과 I₂가 서로 간섭을 일으킨다. 여기서 두 번 이상 반사한 빛들은 돌아오는 양이 매우 적으므로 그 빛들을 무시하면 I₁과 I₂가 간섭한 빛의 세기는 근사적으로 I가 된다. 하중이 가해지거나 간극 길이 s가 늘어남에 따라 I는 보강간섭과 상쇄간섭이 교대로 나타나는 정현파의 형태를 보인다. 이러한 관계를 간단히 정리하여 쓰면 식 (1)과 같다.

$$I = A(1 + B \cos 2ks) \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)에서 보면 간섭이 발생하는 출력광 빛의 세기 I는 진폭에만 관계되고, s에 따른 빛의 세기 I의 주기성은 변하지 않음을 알 수 있다. s가 증가 혹은 감소함에 따라 식 (1)에서 알 수 있듯이 발생하는 빛의 세기 I는 코사인 함수로 나타나며 식 (1)에서 위상과 변위와의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = 2ks \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)에 증분을 취하고 케이지 구간 내에서 광섬유는 자유단 상태이므로 $\Delta L = \Delta s$ 임을 이용하여 정리하면 다음과 같은 식 (3)이 된다.

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = \frac{4\pi}{\lambda} = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \dots\dots\dots (3)$$

λ_0 는 진공 중에서 레이저의 파장이고, n은 케이지 구간 내에서 광매질의 굴절률을 의미한다. 식 (3)에서 광원인 레이저 다이오드(laser diode)의 파장($\lambda_0 = 1310\text{nm}$)과 공기의 굴절률($n \approx 1$)을 대입하면 식 (4)가 된다.

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = 0.9593 \times 10^7 \text{ (rad/m)} \dots\dots\dots (4)$$

실험에서 얻어지는 간섭프린지(interferometric fringe)의 개수를 N이라 하면 (즉 보강간섭에서 상쇄간섭 혹은 상쇄간섭에서 보강간섭이면 $N = 1$) 위상차 $\Delta\phi$ 는 $\Delta\phi = N\pi$ 라고 할 수 있으며 케이지 길이에서 변형률은 $\epsilon = \Delta s/L$ 이다. 그러므로 ΔL 은 $\Delta L = \epsilon L$ 이 되고 $\epsilon = \Delta s/L = \Delta L/L$ 를 식 (4)에 대입하여 변형률로 표시하면 최종적으로 다음과 같은 식이 된다.

$$\epsilon = \frac{N\pi}{0.9593 \times 10^7 L} = 3.275 \times 10^{-7} N/L \dots\dots (5)$$

식 (5)에서 EFPI의 케이지 길이 L이 1cm이고 N이 1이라고 가정하면, EFPI는 0.003275%의 변형률을 측정할 수 있다. 그러므로 EFPI는 구조물의 변형률 및 파손을 측정하기 위한 충분한 해상도를 가지고 있음을 알 수 있다.

간섭형 광섬유 센서는 식 (1)에서 보는 바와 같이 구조물의 변형량에 대한 정보를 정현파의 형태로 표현하며, 이는 변형을 간섭무늬의 주파수 특성으로 표현될 수 있음을 의미한다. 그러므로 광섬유 센서를 이용한 구조물의 변형 및 파손을 주파수 영역에서 관찰하게 되면 유용한 정보를 얻을 수 있다. 기존의 시간영역의 데이터를 주파수 영역으로의 변환은 Fourier Transform (FT)을 이용하였다. 그러나 FT는 stationary 신호라는 가정 하에 쓸 수 있으며, 국소적인 변화나 일시적인 변형(transient process) 및 nonstationary process에는 적합하지 않다. 또한 FT에 의해 주파수 영역으로 변환된 정보는 어느 사건의 발생시점과 같은 시간영역의 정보를 잃어버리는 단점을 가지고 있다. 근래에는

이러한 기존 방법의 단점을 해결하기 위해 시간-주파수 영역을 동시에 관찰하거나, 기존의 신호처리 방법으로 해결하기 어려운 미분불가능 점, 일시적 현상 및 non-stationary 데이터를 처리할 수 있는 방법으로 Wigner-Ville transform(WVT), shorttime Fourier transform (STFT) 및 wavelet transform (WT) 등이 있다. WVT와 STFT는 시간-주파수 영역을 동시에 관찰할 수 있는 장점이 있다. 기존의 FT는 $f = 1/T$ 의 관계에 의해 시간영역의 해상도와 주파수 영역의 해상도는 역수관계에 있으므로 STFT는 시간-주파수 두 영역에서 해상도의 향상에 제한을 갖고 있으나, 이에 비해 WVT는 시간-주파수 두 영역에서 높은 해상도를 보인다[6]. 그러나 WVT는 STFT에 비해 많은 계산시간을 요하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 실제 연구에서는 복합재료의 층간분리 좌굴 및 층간분리 성장 시 발생하는 간섭형 광섬유 센서의 신호특성을 정량적으로 평가하기 위해 STFT와 WT를 사용한다.

STFT는 non-stationary 신호를 처리하는데 있어서 기존 FT의 단점을 보완하기 위해 사용되는데, non-stationary 신호 $f(t)$ 의 STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g^*(t-\tau)e^{-i\omega t} dt \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)에서 알 수 있듯이 신호 $f(t)$ 는 τ 만큼 크기를 갖는 윈도우 함수 $g(t)$ 에 의해 윈도우되어진 FT이다. 그러므로 STFT는 시간정보와 주파수 정보를 동시에 나타낼 수 있다. WT는 기존의 신호처리 방법에서 쉽게 놓칠 수 있는 trend, breakdown 점이나 미분불가능한 불연속점의 처리에 매우 유리하다. 신호 $f(t)$ 의 WT는 다음과 같이 정의된다.

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)에서 $a > 0, b \in R$ 이며 각각 dilation과 translation을 의미한다. 함수 $\Psi(t)$ 는 analyzing wavelet이라고 하며, '*'는 복소수의 공액(complex conjugate)을 의미한다. dilation과 translation의 특성 때문에, 'a'와 'b'의 값을 조절함에 의해 특정한 시간에 대한 관찰이 가능하다. WT는 기존의 신호처리 방법에서 발생하는 신호의 소실 등이 없이 데이터 압축 및 잡음제거에 이용되기도 하며, 또한 decompose되어진 신호를 재구성하는 경우 데이터의

손실없이 완벽하게 재구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 여기서는 복합재료의 층간분리 좌굴 및 층간분리 성장 시 취득된 광섬유 센서의 신호처리를 위해 MATLAB toolbox[®]를 사용하여 처리하였다. WT에 사용된 analyzing 함수는 다부치(Daubechy) 함수(db4)를 사용하였으며, decomposition은 한차례 수행하였다.

3.1.2. 좌굴시점 및 층간분리 성장 검출

적층된 복합재 구조물과 같은 평판 및 셸구조는 압축 강도보다 현저히 낮은 좌굴강도를 가지고 있으므로 매우 낮은 하중하에서 구조물의 파손이 발생할 수 있다. 그러므로 손상허용개념에서 좌굴의 예측과 실제검출은 매우 중요한 요소이다. Fig. 6(a)는 층간분리된 복합재보에 압축하중을 가하여 좌굴시 스트레인 게이지, 로드셀 및 삽입된 EFPI의 신호이다. 좌굴의 결정은 여러 가지 방법이 있으나, 여기서는 표면의 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률에 접선을 그어 만나는 교점으로 하였다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 간섭형 광섬유 센서는 변형을 정현파의 형태로 표현하며 변형의 속도는 정현파의 주파수와 비례하는 특성을 가지고 있다. 그러므로, Fig. 6(a)의 EFPI의 신호에서 좌굴이전까지는 낮은 주파수의 간섭신호를 내보내다가 좌굴이 발생한 후 주파수의 급격한 변화를 나타내고 있다. 이로부터 광섬유 센서 신호의 급격한 주파수특성의 변화를 통해 구조물의 좌굴을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 이와 같은 방법은 좌굴시 발생하는 급격한 주파수 특성의 변화를 평가자의 주관적 판단 등으로 인해 정량적으로 평가하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러므로 주파수 특성의 정량적인 평가를 위해 시간-주파수 영역을 동시에 관찰할 수 있는 STFT를 통해 Fig. 6(a)의 광섬유 센서 신호를 처리하였다.

Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 STFT에 의해 처리된 광섬유 센서 신호가 시간에 따른 주파수특성을 보여주고 있다. Fig. 6(b)에서 좌굴이 발생하기 전($u = 0 \sim 0.22$ mm)의 광섬유 센서 신호의 간섭무늬 주파수는 약 0.25 Hz를 유지하고 있으나, 좌굴이 발생하는 $u \cong 0.2$ mm에서 주파수가 약 0.25Hz에서 0.75Hz로 천이가 발생함을 정량적으로 보여주고 있다. 그러므로 구조물의 좌굴이 발생할 때 광섬유 센서 신호를 동시에 시간-주파수 영역을 관찰할 수 있는 STFT를 사용하여 정량적이고 효율적으로 좌굴을 감지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 시편이 파손될 때까지 스트레인 게이지, 로드셀 및 EFPI의 신호이다. Fig. 7(a)의 광섬유 센서 신호로부터 좌굴 및 층간분리 성장을 평가하기 쉽지 않은데 비해 STFT에 처리된 Fig. 7(b)는 시간-주파수 영역의 동시 관찰함에 의해 정량적으로 좌굴 및 층간분리 성장을 감지할 수 있다. $u \cong 0.2$ mm에서 좌굴 발생으로 인해 주파수의 천이가 발생하고 있고, $u \cong 1.1$ mm과 $u \cong 4.2$ mm에서 층간분리가 성장하는 순간을 잘 묘사하고 있음을 보여준다. 그러나, STFT로 처리된 결과는 식 (6)에서 볼 수 있듯이 윈도우함수의 윈도우 크기 때문에 시간영역과 주파수영역에서 해상도에 제한을 받게된다. 그러므로 층간분리 성장과 같이 매우 짧은 시간에 순간적으로 발생하는 경우($u \cong 1.1$ mm, 4.2 mm)에도 선으로 표현하지 못하고 일정폭을 갖는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 WT에 의해 처리된 Fig. 8 (b)는 좌굴시점 및 층간분리가 성장하는 점을 매우 정확하게 감지함을 알 수 있다. 또한 층간분리가 점진적으로 성장하는 $u \cong 1.1 \sim 1.6$ mm구간에서 STFT의 결과보다 WT에 의해 처리된

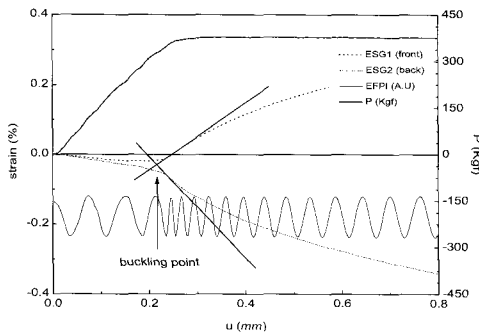
결과가 더 세밀하게 감지하고 있음을 보여준다.

위 결과로부터 간섭형 광섬유 센서가 변형률을 정현파 형태의 간섭무늬로 표현하므로, 시간-주파수 영역을 동시에 관찰할 수 있는 STFT와 신호의 급격한 불연속점 등을 잘 처리할 수 있는 WT는 좌굴 및 층간분리 성장을 검출할 수 있는 유용한 신호처리 방법임을 알 수 있다. STFT는 해상도의 단점을 가지고 있으나 시간-주파수 영역을 동시에 관찰함에 의해 전체적인 현상이해에 유리하고, WT는 시간영역에서 매우 뛰어난 해상도를 갖고 있음을 알 수 있다[7].

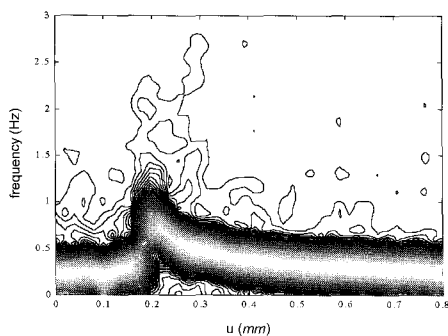
3.2. FBG 센서를 이용한 구조물 실시간 건전성 모니터링

3.2.1. FBG 센서의 측정원리

광섬유에서 브래그 격자는 광섬유의 코어부분에 새겨진 굴절률이 주기적으로 변하는 격자이다. 이러한 격자는 광

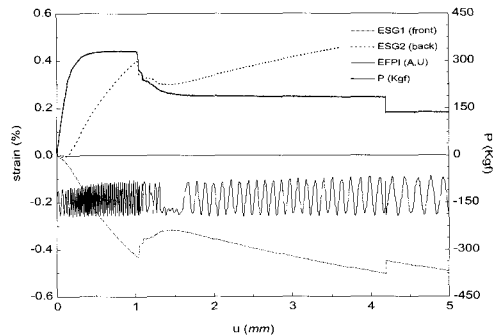


(a) displacement vs. signals

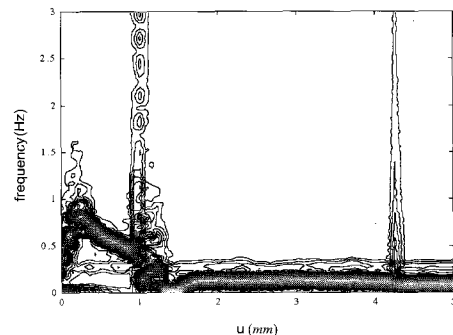


(b) STFT of EFPI signal

Fig. 6 Detection of buckling in (a) signals of sensors and (b) STFT of EFPI signal



(a) displacement vs. signals



(b) STFT of EFPI signal

Fig. 7 Signals of sensors and STFT of EFPI signal up to failure

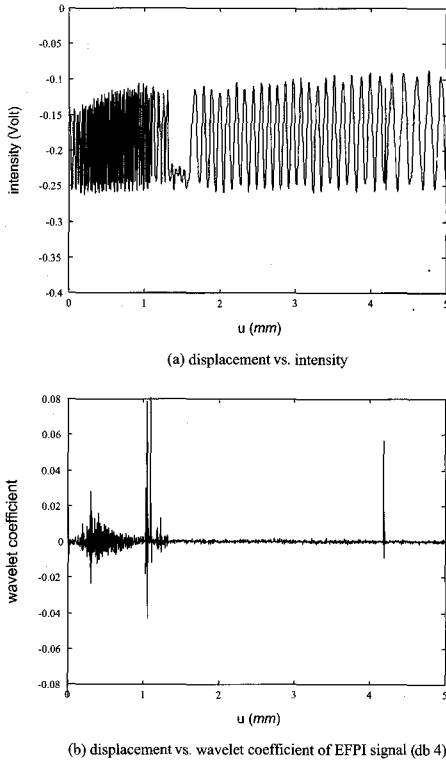


Fig. 8 Intensity and wavelet coefficient of EFPI

대역 스펙트럼(broadband spectrum)을 광섬유에 입사시킬 경우 (8)식과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 나머지 파장 부분은 그냥 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2 n_e \Lambda \dots\dots\dots (8)$$

이러한 과정은 Fig. 5(b)에서 이미 도시하였다. 식 (8)에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 그러므로 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 스트레인 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분 하면 식 (9)를 얻을 수 있다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형 등의 물리량을 식 (9)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \dots\dots\dots (9)$$

$$p_e = \left(-\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu (p_{11} + p_{12})] \dots\dots\dots (10)$$

여기서 ΔT 는 센서에 작용된 온도 변화이며 ϵ 는 센서에 가해진 기계적 변형률을 나타낸다. 또한 α 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도 변화에 따른 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. p_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이고 p_{11} 과 p_{12} 는 스트레인 광학 텐서의 성분이며 n 은 코어의 굴절률, ν 는 포와송 비이다. 본 연구에서는 센서들간의 온도 변화에 의한 중심파장의 변화를 보정하기 위하여 기준 FBG 센서를 광섬유 센서 어레이에 병렬로 추가하였으므로 $\Delta T=0$ 으로 둘 수 있다. 그러므로 식 (9)는

$$\epsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \dots\dots\dots (11)$$

와 같이 되어 구조물의 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구해진다.

이와 같이 FBG 센서는 그 측정량이 브래그 반사파장의 변화량이기 때문에 측정이 간단하고 명확하며 광섬유 격자의 광 반사 파장의 선평이 좁기 때문에 분해능이 높은 센서를 구성할 수 있다. 또한 브래그 반사 파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않는 파장 분할 다중화의 특성으로 인해 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 광섬유 한 라인(line) 상에서 동시에 여러 지점의 변형률 측정이 가능하다.

3.2.2. FBG 센서를 이용한 복합재 wing box의 실시간 좌굴거동 모니터링

항공기 구조 설계 시 일반적으로 세미모노코크(semi-monocoque) 구조가 적용되며 이는 스킨(skin)이나 웹(web) 등의 두께가 얇은 부재가 비틀림에 의한 전단력을 감당하고 스트링거(stringer)나 스파캡(spar cap)은 굽힘 모멘트에 의한 축 방향 하중을 주로 감당하는 구조이다. 알루미늄 등의 금속재를 이용한 항공기 구조 설계 시에 위의 구조는 전통적으로 사용되는 방법일 뿐만 아니라 금속재가 아닌 고동복합재료를 이용하는 경우에도 위의

구조 개념은 그대로 적용되어진다. Box beam은 얇은 벽으로 된 닫혀진 모양의 보(thin-walled closed section beam)이며, 적은 무게로 고강도, 고강성의 특징을 나타내고, 구조 요소의 설계에 있어 특히 적은 무게가 아주 중요한 척도가 되는 곳에서 널리 사용된다.

기존에 수행되어진 날개의 구성 요소인 판넬이나 보강된 판넬 등의 연구에서는 제한된 경계 조건과 하중 조건으로서 실제 구조물의 거동, 파손형태 및 변형의 예측에 한계를 가지고 있었다[8]. 그러므로 실제 구조물에 보다 가까운 wing box 등과 같이 항공기의 구조에 실제 적용되고 있는 구조물에 대한 연구가 필수적이다. Wing box 형태의 구조는 실제로 비행기 구조에서 주익, 후익 등 다양한 부분에 이용되고 있다. 그런데 wing box 구조와 같이 복잡한 거동을 보이는 대상에 대해서는 그 거동을 적절히 모니터링하기 위해서는 많은 수의 센서가 요구되어지나 기존의 센서로는 비용이나 무게 등의 문제점으로 인해 항공기 운항 중 실시간으로 구조 건전성을 모니터링 하는데는 한계가 있었다.

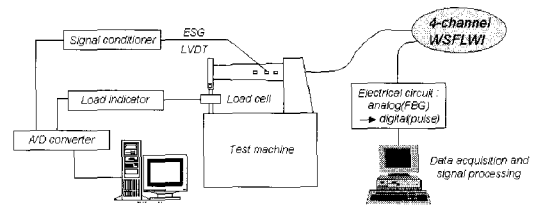
광섬유 센서 중에서도 비교적 최근에 연구가 활발히 진행되기 시작한 FBG 센서는 앞에서 설명한 바와 같이 변형률과 온도 등의 외란을 반사 파장의 변이를 측정함으로써 간단히 측정할 수 있고 파장 분할 다중화 기법을 사용함으로써 동시 다점 측정 기술을 쉽게 구현할 수 있다. 이러한 FBG 센서는 변형의 절대량 측정이 가능하고, 출력 신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광강도의 변화에 무관하여 시스템 구성이 용이하고, 출력 신호가 변형에 대하여 선형적이며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도 특성이 우수하다는 장점이 있고, 현재 개발된 광섬유 센서 중 다점 측정에 가장 효율적으로 사용될 수 있는 센서로 인정되고 있다[9-13].

실제로 축소 모형 복합재 wing box에 FBG 센서를 적용하여 하중 증가에 따른 변형률 및 좌굴 거동을 실시간 모니터링 하는 연구를 수행하였으며 Fig. 9에 실험장치에 대한 개략도와 실제 실험 사진을 나타내었다. 실험에서 굽힘 하중 증가에 따라 복합재 wing box 내부에 삽입된 24개의 FBG 센서로 변형률을 실시간으로 측정하여 굽힘 거동을 실시간으로 모니터링 하였다. 각각의 센서라인에는 총 6개의 센서가 연결되어 있으며 그 중 세 개의 센서는 스킨 적층면 상부에 삽입되었고, 나머지 세 개는 적층면 상부에 삽입된 센서위치와 스펀 방향으로 같은 지점에 적층면 하부에 삽입되었다. 이렇게 적층면 위, 아래로 대칭되게 삽입위치를 결정한 이유는 하중 증가에 따

라 위, 아래 센서의 변형률 신호가 잘라져 적절히 국부 좌굴 발생을 모니터링 할 수 있기 때문이다. Fig. 10은 실험 중 wing box의 상부 스킨의 스티프너와 스파 사이에 삽입된 6개의 FBG 센서로 변형률을 측정된 결과 그림이다. 결과 그림에서 알 수 있듯이 FBG 센서로 측정된 변형률은 비교의 목적으로 스킨 외부에 부착한 스트레인 게이지(electrical strain gage, ESG)로 측정된 변형률과 거의 일치함을 알 수 있고, 굽힘 하중이 증가함에 따라 wing box의 root 부근에 가까운 지점에서부터 스킨의 국부 좌굴이 진행되어 감을 확연히 확인할 수 있다.

5. 맺음말

광섬유 센서자체에 대한 연구가 여전히 진행중이며 센서계를 이루는 부분 및 부품의 높은 가격 등의 어려움이 없지는 않으나 선진국의 경우 점차로 센서자체에 대한 연구의 안정화 추세와 상품화가 이루어지고 있으며 공용 통신망의 광케이블화로 인한 대량 생산으로 광섬



(a) schematic of experimental setup



(b) overall view of experimental setup

Fig. 9 Experimental setup for the bending test of wing box structure

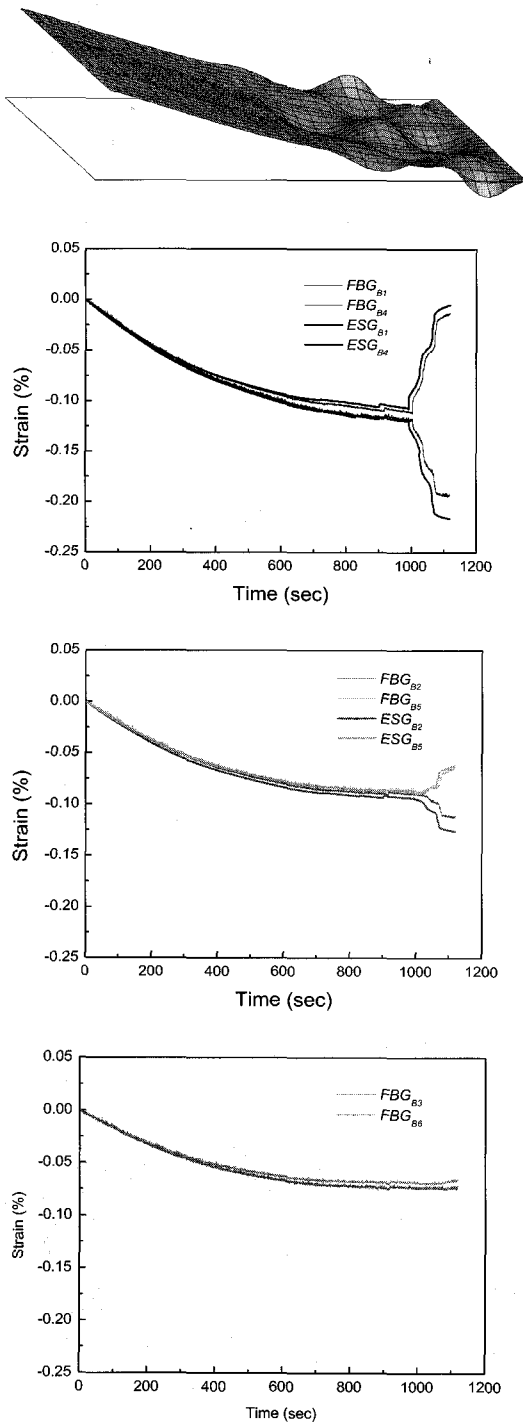


Fig. 10 Comparison of strains measured by FBG and ESG

센서 시스템의 부품들 가격이 급격히 떨어지고 있으므로 점차로 기존 센서에 비해 많은 장점을 보유하고 있는 광섬유 센서의 적용이 우주항공과 같은 첨단분야 뿐만 아니라 일반 기계구조물로의 사용이 점차로 확대되어질 것이다. 그러나 국내의 광섬유 센서의 연구 및 광섬유 센서의 기계구조물로의 적용은 태동기라고 볼 수 있으며 광섬유 센서 자체의 기본적 연구는 일부 대학 연구소와 기업연구소에서 행해지고 있으나 주로 광학 및 전자공학 분야와 같은 제한적인 부분에서 연구되고 있으며 항공이나 기계구조에 적용은 전무한 실정이다. 광섬유 센서를 일반 기계구조물로의 적용을 위해서는 광학, 전자 및 전기, 기계공학의 폭 넓은 이해를 기반으로 해야하나 저변 부족으로 국내 연구기반은 매우 취약하다고 할 수 있다.

세계는 점차로 하나의 정보망으로 통합되어가는 추세이며 이러한 추세는 광섬유를 이용한 광통신망을 통해서 가능하다. 향후 광섬유 센서는 일반 산업기계, 자동차, 항공기와 같은 일반 기계구조물 뿐만 아니라 원자력 발전소, 도로, 교량, 댐과 같은 기간산업에 적용시 점차 확대되어가는 광통신망과의 연계가능성으로 인해 구조물들간의 정보교환을 통해 효율적이고 적은 유지비용을 갖는 통합된 진단시스템을 갖출 수 있고 점차 지능화되어가는 구조물의 센서체계에 적합하다. 선진국에서는 광섬유 센서를 비롯하여 광학과 전자공학에 근간을 둔 많은 연구들을 수행하고 있으며 이러한 연구는 정보화, 지능화 등으로 불리는 기술들과 연계하여 향후 인류 사회에 많은 변화를 예고하고 있다. 특히 광섬유 센서는 센서 자체의 민감성, 유연성과 다중성 등으로 인해 광섬유 센서가 적용된 스마트 구조물이 향후 10년 이내에 다량 출현할 것으로 기대되며 이에 따라 광섬유 센서에 대한 연구와 응용개발이 국내에서도 활발하게 진행되어져야만 한다.

후 기

본 해설은 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 항공우주전공 스마트 구조 및 복합재료 연구실에서 수행된 연구를 토대로 하였음.

참고문헌

[1] E. Udd, Fiber Optic Smart Structures, John Wiley and Sons, (1995)

- [2] B. Culshaw, *Smart Structures and Materials*, Artech House, (1996)
- [3] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, Proc. of the IEEE, Vol. 84, No. 1, pp. 60-67, (1996)
- [4] C. E. Lee, R. A. Atkins and H. F. Taylor, "Performance of a Fiber-Optic Temperature Sensor from -200 to 1050 °C," *Optics Letters*, Vol. 13, No. 11, pp. 1038 - 1040, (1988)
- [5] 류치영, 박중완, 강현규, 김대현, 구분용, 홍창선, 김천곤, "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형률 측정에 관한 연구", *한국항공우주학회지*, 제28권, 제5호, pp. 44-52, (2000)
- [6] A. Swami, J. M. Mendel and C. L. Nikias, *Higher-Order Spectral Analysis Toolbox*, The Math Works, Inc., (1998)
- [7] J. W. Park, C. Y. Ryu, H. K. Kang, and C. S. Hong, "Detection of Buckling and Crack Growth in the Delaminated Composites Using Fiber Optic Sensor," *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 19, pp. 1602-1623, (2000)
- [8] M. C. Y. Niu, *Airframe Structural Design*, Technical Book Company, L.A., (1988)
- [9] A. D. Kersey, *A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology*, *Optical Fiber Technology*, Vol. 2, pp. 291-317, (1996)
- [10] A. D. Kersey, M. A. Davis and H. J. Patrick, et al., *Fiber Grating Sensors*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1462, (1997)
- [11] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, *Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor System with a Fiber Fabry-Perot Wavelength Filter*, *Optics Letters*, Vol. 18, No. 16, pp. 1370-1372, (1993)
- [12] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, *High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection*, *Electronics Letters*, Vol. 28, pp. 236- 238, (1992)
- [13] D. A. Jackson, A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie and J. L. Archambault, *Simple Multiplexing Scheme for a Fiber-Optic Grating Sensor Network*, *Optics Letters*, Vol. 18, No. 14, pp. 1192-1194, (1993)