

論文

광섬유 브래그 격자의 제작 방법에 따른 기계적 강도 특성

강동훈^{*,+}, 박상오^{*}, 김천곤^{*}Mechanical Strength Characteristics of Fiber Bragg Gratings
with Fabrication ProcessD. H. Kang^{*,+}, S. O. Park^{*}, C. G. Kim^{*}

ABSTRACT

Application fields on structural health monitoring of fiber Bragg gratings (FBGs) are gradually expanded even to a primary structure as well as a secondary structure and a specimen. For the reason, verification for the reliability of FBGs such as signal characteristics and mechanical strength becomes much more important. In this study, mechanical strength characteristics of FBGs with their fabrication process and reflectivity are investigated with various grating lengths. From the results of tension tests, it is shown that the mechanical strength of optical fibers decreases about 50 % just by jacket stripping and the amount of decrease is dependent on stripping methods. About 55 % of mechanical strength of stripped optical fibers decreases if gratings are formed in the core and it is regardless of grating lengths and reflectivity. However, the width of strength distribution increases relative to increases in reflectivity.

초 록

광섬유 브래그 격자를 이용한 모니터링 연구는 시편 단위의 연구뿐만 아니라 최근 2차 구조물을 비롯하여 주 구조물로부터 그 적용 영역이 점차 확대되고 있어 신뢰성에 대한 검증이 더욱 중요해지고 있다. 본 연구에서는 광섬유 브래그 격자의 제작 방법과 반사율에 따른 기계적 강도 특성을 다양한 격자의 길이에 대해 고찰하였다. 인장 시험을 통해 광섬유는 피복 제거만으로도 약 50 % 정도의 강도 저하가 발생하며 피복 제거 방법에 따라 감소량이 달라짐을 확인하였다. 피복이 제거된 광섬유에 브래그 격자를 형성하게 될 경우 반사율과 격자의 길이와는 무관하게 약 55 % 정도의 강도 저하가 발생하였다. 반면, 반사율이 증가할수록 강도의 분산도는 상대적으로 증가하였다.

Key Words: 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating), 격자 길이(grating length), 기계적 강도(mechanical strength), 반사율(reflectivity)

1. 서 론

최근 스마트 구조물에 대한 관심이 높아지면서 그 감지계로서 광섬유 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 다른 여러 광섬유 센서에 비해 다중화가 용이하다는 큰 장점을 가지고 있는 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg

gratings, FBGs) 센서는 변형률과 온도의 함수인 반사파장의 변이를 측정함으로써 변형률과 온도 등을 간단히 측정할 수 있다. 뿐만 아니라, FBGs는 크기가 작아 물성에 영향을 주지 않고 구조물에 삽입이 가능하고 사용온도 범위가 넓으며 전자파의 영향을 받지 않는 등의 장점으로 인해 주로 복합재료 내부에 삽입 적용되는 연구가 많이 이루어지고 있다[1].

*+ 한국철도기술연구원 남북철도기술개발사업단, 교신저자(E-mail:dhkang@krri.re.kr)

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

FBGs는 이전 주로 시편 단위의 연구가 이루어지던 것과 달리 최근 2차 구조물을 비롯하여 주구조물로까지 그 적용 영역이 점차 확대되고 있다. FBGs의 사용영역이 확대됨에 따라 신뢰성에 대한 검증이 더욱 중요해져 FBGs의 신호 특성, 즉 복합재료 내부에 삽입할 경우 복굴절 영향이나 구조물의 국부적인 변형을 구배로 인한 신호 왜곡 현상 등에 대해 많은 연구가 이루어졌다[2-5]. 이러한 신호 왜곡 현상을 방지하기 위한 방법으로 리코팅(recoating)이나 유리 모세관(glass capillary tube)을 이용하는 방법이 주로 이용되었지만 제작이 어렵고 다중화(multiplexing)의 이유로 인해 요즘은 격자 길이를 조절함으로써 신호 왜곡 현상에 보다 안정적인 FBGs를 제작하는 기법이 개발되었다[6].

신호 왜곡 현상과 함께 센서의 강도 또한 FBGs의 신뢰성 확보를 위해 매우 중요한 요소이다. 특히, FBGs는 제작 과정에서 여러 가지 강도 저하요인이 존재하므로 보다 FBGs의 강도와 관련하여 많은 연구가 이루어졌다.

Wei 등[7]은 센서 제작을 위한 UV 레이저의 파장, 펄스 강도(pulse intensity), 그리고 총 에너지량(total dose)에 따른 FBGs의 강도를 측정하였으며 광섬유의 광민감성(photosensitivity) 향상을 위해 고온 수소 처리(high temperature hydrogen loading)를 할 경우 센서의 강도가 초기 강도의 50 %정도로 저하됨을 확인하였다. Askins 등[8]은 draw tower에서 광섬유에 직접 브래그 격자를 형성한 후 피복을 씌워 FBGs를 제작할 경우 강도 저하가 발생하지 않음을 확인하였다. Starodubov 등[9]은 334 nm의 파장을 갖는 빛을 Boron co-doped germanosilicate 광섬유에 조사함으로써 피복을 제거하지 않고 20 %의 반사율을 갖는 FBGs를 제작하였다. Espindola 등[10]은 257 nm의 파장 영역에서 빛을 투과하는 vinyl ether-based polymer를 피복으로 사용한 광섬유를 이용하여 주석(Tin)이나 붕소(Boron) 등의 첨가없이 99.99 %이상의 높은 반사율을 갖는 FBGs의 제작이 가능함을 확인하였다.

이상의 연구들로부터, FBGs는 제작 시 UV 파장이 짧을수록, 펄스 파워가 낮을수록 그리고 수소처리를 하지 않은 경우가 높은 강도를 가지며 광섬유의 피복 제거법에 따라 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 하지만, 신호의 안정성을 위해 개발된 짧은 격자 길이를 갖는 FBGs의 경우와 같이 격자의 길이와 FBGs의 반사율에 대해서는 아직 연구가 이뤄지지 않아 FBGs의 보다 효율적인 사용을 위해서 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 광섬유의 피복 제거 방법에 따라, 그리고 제작된 FBGs의 반사율과 격자 길이에 따른 기계적 강도를 측정하였다.

2. FBG 센서의 제작

여러 FBGs의 제작 방법 중 현재 Hill이 고안한 위상 마스크(phase mask)에 의한 제작 방법[11]이 대량 생산에 적합하고 제작 방법이 간단해 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 상용 위상 마스크의 경우 격자의 길이가 고정되어 있으며 일반적으로 10 mm를 가진다. 본 연구에서는 센서 제작 시 레이저가 통과하는 위상 마스크의 격자 부분을 조절함으로써 다양한 격자 길이를 갖는 FBGs를 제작하였다. 이를 위해 엑시머 레이저의 파장 대역과 같은 248 nm의 빛을 99 %이상 반사하는 반사 프리즘을 이용하여 위상 마스크를 통과하는 빛의 양을 조절함으로써 격자 길이를 조절하였다. 센서 제작을 위한 장치의 모습은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서와 같이 3축 이송장치와 CCD 카메라를 이용해 위상 마스크와 반사 프리즘과의 간격을 조절함으로써 제작된 FBGs의 격자 길이를 임의로 조절할 수 있다.

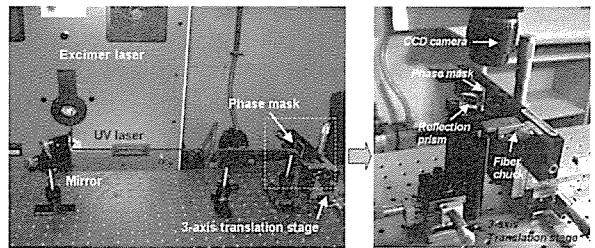


Fig. 1 Experimental setup for the fabrication of FBG sensors with various grating lengths.

실험에 사용된 반사 프리즘의 사양은 Table 1과 같다. 표에서 알 수 있듯이 프리즘의 경사면에는 248 nm의 파장에 대해 99 %이상의 반사율을 가지는 특수 코팅이 되어 있다. 그러므로, 입사된 레이저 중에서 프리즘이 반사하지 않는 부분에 대해서만 레이저가 위상 마스크에 도달하게 되고 결과적으로 FBGs의 격자 길이를 조절할 수 있다.

Table 1 Specifications of the reflection prism

	Specifications
Material	Fused Silica
Size	0.5"×0.5"×0.5"
Coating	R>99.0%, At λ=248nm
Model	KRF-RAP-050-UV
Producer	Korea Electro-Optics Co., LTD.

본 연구에서는 2 mm, 5 mm, 10 mm의 격자 길이를 갖는 세 가지 FBG 센서를 제작하였다. 센서는 IBSEN의 위상 마스크와 MPB사의 ASX-750 엑시머 레이저를 이용하여 제작하였으며 25 %(1.25 dB), 50 %(3 dB), 90 %(10 dB)의 반사율에 대해 각각 제작하였다.

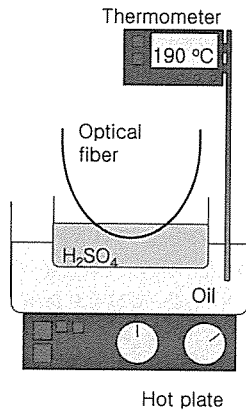


Fig. 2 Experimental setup for acid stripping.

Table 2 Fiber sets prepared for a tension test

Fiber set	Fiber type	Reflectivity(%)
Pristine	Pristine fiber	
A	Stripper	
B	Acid strip	
C	Acid strip + Recoat	
D	Irradiated (2 mm)	0, 25, 50, 90
E	Irradiated (5 mm)	0, 25, 50, 90
F	Irradiated (10 mm)	0, 25, 50, 90

3. FBG 센서의 강도 측정

3.1 광섬유의 전 처리 과정

브래그 격자를 새기기 위해 광섬유의 피복을 제거하는 방법에 따른 강도의 차이를 평가하기 위해서 피복 제거기(stripper)를 이용하여 기계적으로 제거하는 방법과 고온의 황산(high temperature sulfuric acid)을 이용하여 제거하는 방법[12]으로 피복을 제거하였다. 또한, 피복을 제거한 후 다시 리코팅을 하는 경우에 대해서도 알아보았다. 그리고, FBG 센서의 반사율에 대한 영향을 평가하기 위해 25 % (1.25 dB), 50 % (3 dB), 90 % (10 dB)의 반사율을 갖도록 10 mm, 5 mm, 2 mm의 세 가지 격자 길이로 제작하였다. 광섬유의 전 처리 과정에 따라 Table 2와 같이 일곱 가지의 세트로 분류하였다. 광섬유에 FBGs가 형성되는 D, E, F 과정은 모두 황산을 이용하여 피복을 제거하였다.

전 처리 과정에서는 시편 제작을 위해 필요한 부분에 대한 피복 제거를 수행하였다. 광섬유는 125 μ m 직경의 클래딩과

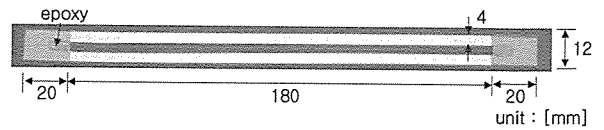


Fig. 3 Configurations of a test specimen.

245 μ m 직경의 아크릴레이트(acrylate) 피복을 가지고 있는 Ge-B doped 광민감성 광섬유(PS1250/1500, Fibercore)를 사용하였다. 피복은 B~F 까지 모두 게이지 길이의 중간 부분에 동일하게 35 mm만큼 제거하였으며 모든 광섬유 세트에 대해 에폭시 접착을 위해 양쪽 끝부분의 피복을 15 mm만큼 제거하였다. 피복은 Fig. 2와 같은 형태의 오일 수조(oil bath)에서 중탕을 통해 95 wt.%의 황산 용액을 전열기(hot plate)로 190 °C까지 가열한 후 광섬유를 얹혀 약 5 초간 담그는 방법으로 제거하였다. 피복이 제거된 광섬유는 다시 증류수(deionized water)와 아세톤(acetone)을 이용해 피복 제거과정에서 발생한 잔존물(debris)을 제거하였다.

리코팅은 VYTRAN의 VYT-200-C 리코팅기를 이용하였으며 리코팅 재료로는 아크릴레이트를 이용하였다. FBGs 제작을 위한 레이저 펄스 피크 강도(pulse peak intensity)는 7.3×10^6 W/cm² 이다.

3.2 시편 제작

광섬유의 강도를 측정하는 시험 방법에는 일반적으로 2-점 굽힘 시험(2-point bending test)과 인장 시험(tension test)이 주로 이용되며 본 연구에서는 인장 시험을 통해 강도를 측정하였다. 인장 시험을 위해 Fig. 3과 같은 형태의 시편을 제작하였다. 일곱 가지의 전 처리 과정을 거친 광섬유 세트에 대해서 각각 15 개씩 시편을 제작하였다. 시편은 판지(cardboard)의 중간부분에 광섬유의 끝부분을 상온 경화 에폭시(araldite, Ciba)를 이용해 고정하고 광섬유의 취급 과정에서의 손상 방지를 위해 양쪽 판지를 얇은 가이드 종이(guide sheet)를 이용하여 고정하였다.

3.3 인장 시험

Fig. 3과 같이 제작된 시편을 통해 아무런 처리 과정을 거치지 않은 광섬유(pristine fiber)와 A~F의 일곱 가지 시편 세트에 대한 인장 시험을 수행하였다. 시험 방법은 시편을 Fig. 4와 같은 형태의 인장 지그에 장착한 후 광섬유의 손상 방지를 위한 가이드 종이를 절단한다. 그리고, 광섬유 강도 시험 관련 규정인 IEC 60793-1-31을 따라 7 mm/min (3~5 % of gage length)의 변위 제어로 Instron Model 4482에서 100 N 용량의 로드셀(load cell)을 이용하여 수행하였다. Fig. 4의 우측 그림에서 알 수 있듯이 지그는 공기압을 통해 작동하므로 지그에 의해 광섬유가 파손되는 것을 방지할 수 있다.

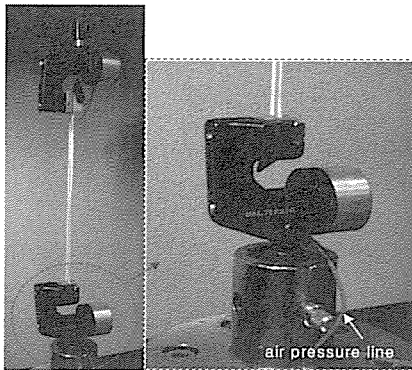


Fig. 4 Experimental setup for a tension test.

4. 실험 결과

4.1 광섬유의 피복 제거 방법에 따른 강도 변화

광섬유의 피복 제거로 인한 강도 변화를 관찰하기 위해 그 기준값이 될 초기 상태의 광섬유에 대한 인장 시험을 수행하였다. 그리고, 광섬유의 피복 제거 방법 - 피복 제거기를 이용하여 제거할 경우(A), 고온의 황산을 이용하여 제거할 경우(B), 그리고 피복 제거 후 리코팅을 할 경우(C) - 에 따른 강도 변화를 관찰하였으며 실험 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 초기 상태의 광섬유에 비해 피복을 제거한 A, B, C의 경우 모두 강도가 저하되었다. 실험 결과는 모두 웨이블 분포(Weibull distribution)를 보였다. 정량적으로는, 초기 상태의 광섬유의 경우 2,670 MPa, A의 경우 1,111 MPa, B의 경우 1,316 MPa, C의 경우 1,403 MPa의 평균 강도(mean strength)를 보였다. 다시 말해, 황산으로 피복 제거를 할 경우 약 50 % 정도의 강도 저하가 발생하였으며 피복 제거기를 사용할 경우 황산으로 피복을 제거할 경우에 비해 약 7 % 정도의 강도 저하가 추가적으로 발생하였다. 강도 저하의 원인으로는 황산을 이용한 피복 제거 과정과 인장 시험 사이의 시간 경과(time lapse)에 따른 온도나 습도 등의 환경적인 영향, 그리고 광섬유 자체의 불균일성과 결함 등의 영향으로 생각된다[13]. 본 연구에서는 피복 제거과정과 인장 시험까지 24 hr이 소요되었으며 시험 시 환경은 Pristine, A, B, C의 경우 온도 22 °C, 습도 36 %이었으며 D, E, F의 경우 온도 23 °C, 습도 44 %였다. 한편, 다시 리코팅을 수행할 경우 하지 않은 경우에 약 6 % 정도 강도가 증가하였으며 이는 피복 자체의 강도때문으로 생각된다.

한편, 피복 제거기를 이용하여 피복을 제거할 경우에는 피복 제거과정에서 광섬유 표면에 미소 결함(scratch)이 발생할 수 있어 강도 저하의 요인이 된다. 이를 확인하기 위해

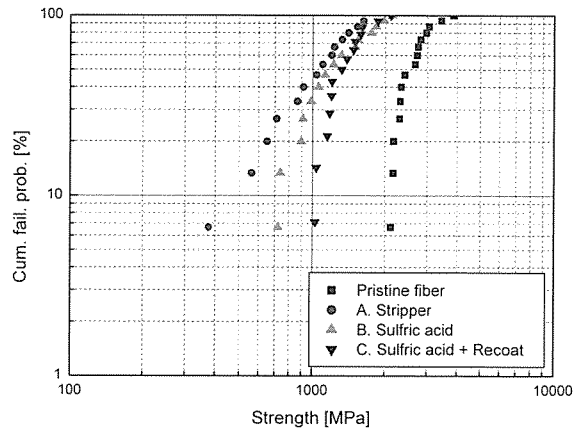


Fig. 5 Mechanical strength of optical fibers with stripping methods.

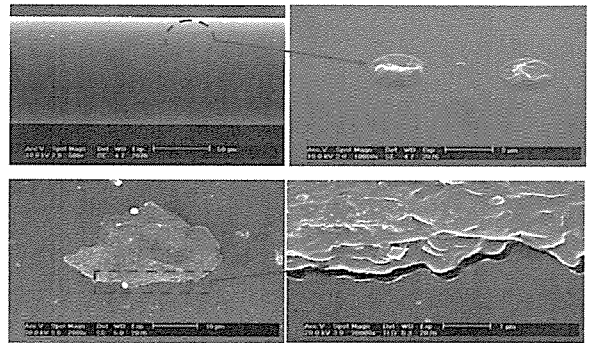


Fig. 6 SEM photographs of a stripped optical fiber.

피복이 제거된 광섬유의 클래딩 표면에 대한 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM) 사진을 촬영하였다.

Fig. 6에서와 같이 광섬유의 클래딩 표면에서 2~20 μm 정도의 미소 결함들이 관찰되었으며 이는 피복 제거 과정에서 피복 제거기와 클래딩 사이의 물리적 접촉에 의한 것으로 생각되며 강도 저하의 원인으로 판단된다.

4.2 반사율이 다른 브래그 격자의 강도 변화

2 mm, 5 mm, 10 mm의 세 가지 격자 길이를 갖는 FBG 센서들에 대해 센서의 반사율이 강도에 미치는 영향을 알아 보았다.

2 mm의 격자 길이를 갖는 FBGs의 경우 Fig. 7과 같이 반사율이 0 %인 경우, 즉 단지 피복만 제거한 B의 경우와 비교해 반사율이 25 %, 50 %, 90 %인 경우는 강도가 감소하였다. 평균 강도는 25 %의 경우 593 MPa, 50 %의 경우 634 MPa, 90 %의 경우 582 MPa로 각 경우에 따라 격자 형성으로 인해 약 52~55 % 정도의 추가적인 강도 저하를 보였다.

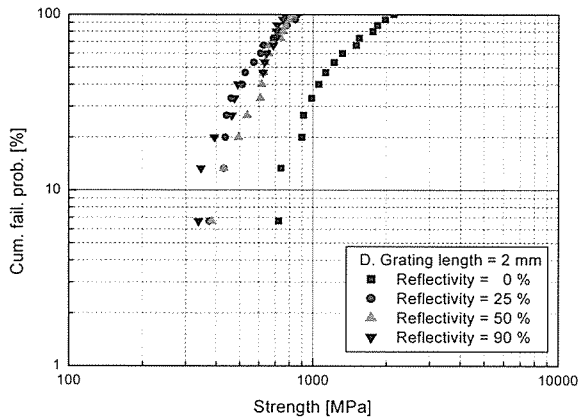


Fig. 7 Mechanical strength of 2 mm FBGs with reflectivity.

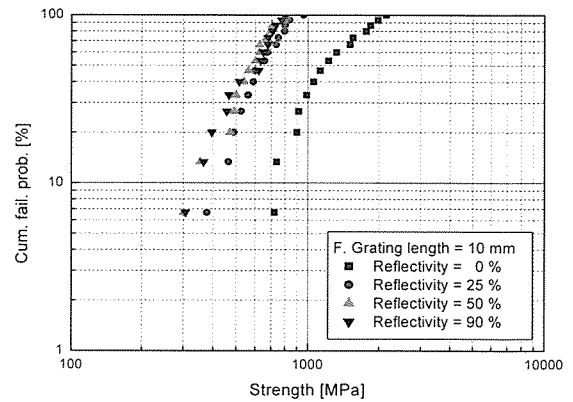


Fig. 9 Mechanical strength of 10 mm FBGs with reflectivity.

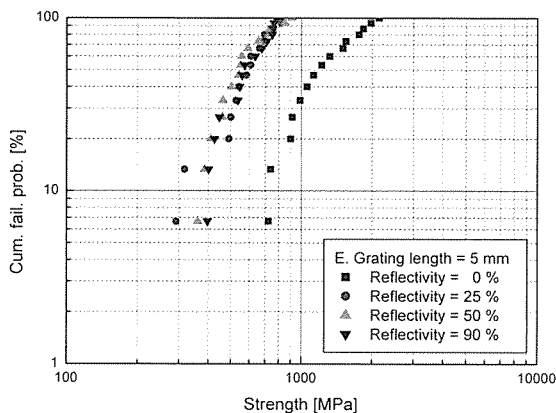


Fig. 8 Mechanical strength of 5 mm FBGs with reflectivity.

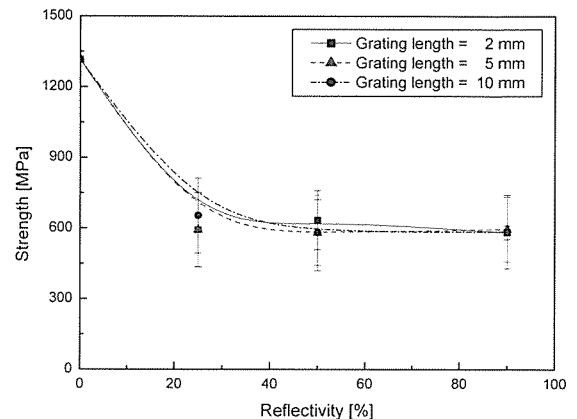


Fig. 10 Relation between mechanical strength and reflectivity with grating lengths.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 5 mm의 격자 길이를 갖는 FBGs의 경우 또한 Fig. 7과 마찬가지로 반사율이 0 %인 경우와 비교해 반사율이 25 %, 50 %, 90 %인 경우는 강도가 감소하였다. 평균 강도는 25 %의 경우 593 MPa, 50 %의 경우 579 MPa, 90 %의 경우 596 MPa로 격자 형성으로 인해 약 55~56 % 정도의 감소가 추가적으로 발생하였으며 반사율에 따른 경향성은 발견되지 않았다.

Fig. 9와 같이 10 mm의 격자 길이를 갖는 FBGs의 경우 또한 반사율 증가와 함께 강도 저하가 발생하였다. 평균 강도는 25 %의 경우 653 MPa, 50 %의 경우 582 MPa, 90 %의 경우 585 MPa로 격자 형성으로 인해 약 50~56 % 정도의 추가적인 감소를 보였다.

세 가지 격자 길이에 대해 반사율 값에 따른 경향성 없이 확산으로 피복이 제거된 광섬유에 비해 모두 약 55 % 정도의 일정한 강도 저하가 추가적으로 발생하였다. 다시 말해, 특정한 반사율 이상이 되면 반사율 증가량과 관계없이 일정한 정도의 강도 저하가 발생함을 알 수 있다.

하지만, 격자 길이가 다른 FBG 센서가 같은 반사율을 갖기 위해서는 격자 길이가 짧아질수록 대략 선형적인 관계로 단위 길이에 대한 굴절률 변화 값이 증가해야 한다. 즉, 격자 길이가 짧아질수록 레이저 조사 시간이 증가하게 되며 같은 반사율을 형성하기 위해서는 광섬유 코어 부분의 굴절률 변화 밀도가 증가하게 된다. 이러한 점을 생각할 때, 격자 길이에 관계없이 일정한 강도 감소를 보인다는 점은 매우 중요한 의미를 갖는다. 한편, 광섬유에 브래그 격자를 형성한 경우에는 모든 시편에서 격자가 형성된 부분과 형성되지 않은 부분의 경계 지점에서 광섬유의 파단이 발생하였다.

Fig. 10과 같이 반사율에 대한 강도 그래프로부터 반사율 증가와 관계없이 강도 감소가 일정함을 확인할 수 있으며 본 연구에서 수행된 모든 시편 세트에 대한 인장 시험 결과를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3에서 m 값은 웨이블 계수(Weibull modulus)로 시험 데이터들 사이의 상관관계를 나타내는 인자이며 값의 측정을

Table 3 Mechanical strength and Weibull modulus

Fiber set Property	Pristine	A	B	C	D	E	F
σ_{mean} [GPa]	2.67	1.11	1.32	1.36	0.60	0.59	0.61
m	48.3	1.12	23.0	4.29	3.09 2.45 0.85	3.49 2.07 1.41	2.90 1.20 0.83

위해 2-매개변수 웨이بل 모델(two-parameter Weibull model)을 도입 하였다.

$$\ln(-\ln(1-F(\sigma))) = m \ln \sigma - m \ln \bar{\sigma} \quad (1)$$

식 (1)에서 $F(\sigma)$ 는 각 응력 레벨, σ 에서의 누적 파손 확률(cumulative failure probability at each stress level), $\bar{\sigma}$ 는 63.3 %의 표본이 파손되는 강도, m 은 각 표본 세트의 분포 비율(distribution scale)을 나타낸다. 간단히 말해, m 값이 클수록 데이터들의 상관관계가 크고 값이 작을수록 분산이 크다고 할 수 있다.

Table 3의 웨이بل 계수로부터 초기 상태의 광섬유 피복을 제거할 경우 강도의 분산이 커지게 되며 피복 제거기를 사용하여 피복을 제거한 경우가 고온의 황산을 이용한 경우보다 분산이 더 크게 나타났다. 한편, 세 가지 격자 길이에 대해 반사율 값과 관계없이 평균 강도는 약 0.59~0.61 GPa로 초기 광섬유 강도의 약 22~23 % 정도로 거의 일정한 값을 갖지만 반사율이 증가할수록 강도의 분산은 상대적으로 증가하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 FBGs의 제작 방법과 제작된 FBGs의 격자 길이와 반사율에 따른 기계적 강도 특성에 대해 연구를 수행하였으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 광섬유는 피복 제거만으로도 피복 제거과정 중의 손상, 그리고 온도, 습도 등의 환경에 노출됨으로써 약 50 % 정도의 강도 저하가 발생한다.
2. 피복 제거기로 피복을 제거하는 경우, 고온의 황산을 이용하는 경우와 비교하여 약 7 %의 추가적인 강도 저하가 발생하며 피복 제거과정에서의 클래딩과 피복 제거기 사이의 물리적 접촉 때문으로 생각된다.
3. 광섬유에 다시 리코팅을 하게되면 피복 자체의 강도로 인해 약 6 % 정도의 강도 증가가 발생한다.

4. 광섬유에 브래그 격자를 형성하게 되면 형성하지 않은 경우에 비해 약 55 % 정도의 일정한 강도 저하가 추가적으로 발생하며 반사율이나 격자 길이와 무관하다. 하지만, 반사율이 증가하면 반사율 증가를 위해 레이저 조사 시간이 상대적으로 길어지기 때문에 강도의 분산도가 상대적으로 증가한다.

이를 통해, 광섬유 브래그 격자의 제작 과정에서 피복 제거 방법에 따른 강도 영향을 평가하였고 브래그 격자의 격자 길이와 반사율이 강도에 미치는 영향을 알아보았다. 또한, 브래그 격자를 제작하는 과정에서 피복의 제거만으로도 큰 강도 저하가 발생할 수 있으므로 피복을 제거하지 않고 격자를 형성하는 방법에 대한 연구가 필요함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 21C 프런티어 연구개발 사업에서 지원하는 위탁연구과제로 수행한 것이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) H. K. Kang, D. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Simultaneous monitoring of strain and temperature during and after cure of unsymmetric composite laminate using fiber optic sensors," *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, No. 1, 2003, pp. 29-35.
- 2) J. A. Guemes, J. M. Menendez, "Response of Bragg grating fiber-optic sensors when embedded in composite laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, pp. 959-966.
- 3) Y. Okabe, S. Yashiro, R. Tsuji, T. Mizutani and N. Takeda, "Effect of thermal residual stress on the reflection spectrum from fiber Bragg grating sensors embedded in CFRP laminates," *Composites - Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 991-999.
- 4) S. Huang, M. M. Ohn, M. LeBlanc and R. M. Measures, "Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, 1998, pp. 248-256.
- 5) S. Huang, M. M. Ohn, M. LeBlanc and R. M. Measures, "Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp. 248-256, 1998
- 6) D. H. Kang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Fabrication of

- fiber Bragg grating sensors with various grating lengths and signal characteristics of reflected spectra," *Composites Science and Technology*, 2004, submitted.
- 7) C. Y. Wei, C. C. Ye, S. W. James, R. P. Tatam and P. E. Irving, "The influence of hydrogen loading and the fabrication process on the mechanical strength of optical fibre Bragg gratings," *Optical Materials*, Vol. 20, 2002, pp. 241-251.
- 8) C. G. Askins, M. A. Putnam, H. J. Patrick and E. J. Friebele, "Fibre strength unaffected by on-line writing of single-pulse Bragg gratings," *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 15, 1997, pp. 1333-1334.
- 9) D. S. Starodubov, V. Grubsky and J. Feinberg, "Efficient Bragg grating fabrication in a fibre through its polymer jacket using near-UV light," *Electronic Letters*, Vol. 33, No. 15, 1997, pp. 1331-1333.
- 10) R. P. Espindola, R. M. Atkins, N. P. Wang, et al., "Highly reflective fiber Bragg gratings written through a vinyl ether fiber coating," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 7, 1999, pp. 833-835.
- 11) K. O. Hill, B. Malo and F. Bilodeau, et al., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 10, 1993, pp. 1035-1037.
- 12) M. J. Matthewson, C. R. Kurkjian and J. R. Hamblin, "Acid stripping of fused silica optical fibers without strength degradation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 3, 1997, pp. 490-497.
- 13) C. W. Wei, S. W. James, C. C. Ye, R. P. Tatam, P. E. Irving, in: *Proc. of the 6th Annual Inter. Symposium on Smart Materials and Structures*, SPIE3670, 1999.