

삽입된 장주기 광섬유 격자를 이용한 VARTM 공정에서의 수지이동 및 변형 과정 예측 시스템 설계에 관한 연구

윤영기*, 정승환**, 이우일†, 이병호**, 변준형***

(2003년 2월 17일 접수, 2004년 3월 26일 심사완료)

A Study on the Measurement System Design for the Resin Flow and Curing in the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding(VARTM) Process Using the Long Period Fiber Bragg Grating

Youngki Yoon, Seunghwan Chung, Woo Il Lee, Byoungcho Lee and Joonhyung Byun

Key Words : Long Period Gratings(LPG: 장주기 광섬유 격자), Fiber Bragg Grating(FBG: 광섬유 브래그 격자), Resin Flow(수지 흐름), Composite(복합재료), Vacuum Assisted Resin Transfer Molding(VARTM: 진공식 RTM), Optical Spectrum Analyzer(OSA: 광 스펙트럼 분석기)

Abstract

Long Period Gratings (LPG) is currently receiving considerable attention because of their consistent measuring results for pressure, temperature, strain and flow. LPG is easier to prepare and has a high sensitivity compared with Fiber Bragg Gratings (FBG). In addition, this kind of optical fiber sensors could be used for implementations in various structures. In this paper, LPG was used to monitor *in situ* the resin flow and the curing process in VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding). In order to demonstrate the effectiveness of the method, FBG is inserted into the glass mat to monitor the resin flow using optical spectrum analyzer (OSA). The curing reactions in VARTM are also observed using the same method. From the results, the attenuation wavelength shift and the loss change of attenuation band can be obtained from the status of the RTM (Resin Transfer Molding) sample owing to the internal variations of the refractive index, temperature, and pressure. It is shown that the proposed LPG is more effective in monitoring the curing reaction than FBG.

기호설명

Λ : 굴절률 변화의 주기
 β : 모드의 전파 상수
 I_{out} : 출력 세기

η : 표준화된 코어 또는 클래딩 모드
 α : 손실 상수
 n : 코어와 클래딩의 유효지수
 z : 격자사이의 간격
 D_{core} : 코어의 직경
 D_{clad} : 클래딩의 직경

* 서울대학교 정밀기계공동연구소
 † 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
 E-mail : wilee@snu.ac.kr
 TEL: (02)880-7116 FAX : (02)883-0179
 *** 서울대학교 전기전자공학부
 **** 회원, 한국기계연구원(KIMM) 복합재료그룹

1. 서론

일반적인 폴리머 계열의 복합재료는 생산에 있어서의 경비를 혁신적으로 줄이는 것이 그 응용의 확대를 위하여는 절실히 필요하다. 이를 위해서는 무엇보다도 생산 과정에서 공정을 최적화하거나

스크랩(scrap)과 같은 작업상에서 발생할 수 있는 조각들을 줄이는 것이 중요하다. 보통 원하는 제품 형태의 몰드 내에 수지를 흘려 보낸 후 열과 압력을 가해 줌으로써 제품을 생산하는 RTM (Resin Transfer Molding) 공정에 있어서 제작된 제품을 보다 정교하게 만들기 위하여 제품의 성형 과정을 모니터링 할 수 있도록 하는 것은 많은 작업자들이 요구하는 것 중의 하나이다. 제품의 공정을 모니터링하고 제어할 수 있다는 것은 제품 생산에 있어서 경비를 줄일 수 있을 뿐 아니라 기계적 물성치에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 따라서, 생산하는 제품을 완벽한 제품으로 제작하기 위한 생산 공정을 개발하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 대부분의 경우 생산된 제품들의 불량률을 관찰하고 판단 기준에 의해 생산 공정을 개선하고 발전시킴으로써 작업을 수행하고 있다. 하지만 이러한 방법은 시간적으로나 경제적으로 비 효율적이며 신뢰성도 높일 수 없는 단점이 있다.

RTM 공정은 복합재료 생산 공정 중 생산성면에서 각광을 받고 있는 공정 중 하나이다. 그러나 RTM 공정의 경제성을 더욱 향상시키고 그 응용 범위를 확대하기 위해서는 제품의 불량률 감소시켜야 하는데, RTM 공정의 경우 가장 흔한 불량은 기공(void)의 발생이다. 따라서 공정 중에 기공의 생성 여부를 알아 공정을 제어할 수 있다면, 생산성과 품질은 더욱 향상될 것이다.

기존의 RTM 기술보다 수지(resin)의 이동거리를 단축시켜 생산 시간을 크게 줄일 수 있는 혁신적인 제조공법인 VARTM(vacuum assisted resin transfer molding) 공정의 경우 디지털 비디오(DV: Digital Video) 캠코더를 이용해 void의 함량을 구하려는 시도가 있었으나 대부분의 작업이 시각적인 관찰에 의해 이루어져 다소 오차가 발생할 수 있을 뿐 아니라 내부의 수지(resin) 유동 보다는 단지 표면에서의 수지유동을 보여 주고 있다는 문제가 있다.⁽¹⁾ 더욱이, 제품의 성형 과정에서의 수지의 경화 과정을 모니터링 하려는 시도는 많이 이루어지지 못하고 있다.

최근 몇몇 연구자들에 의해 광섬유를 이용한 유체 유동에 관한 연구가 이루어져, 유체 흐름을 관찰할 수 있는 최적의 센서로서 광섬유를 제시하고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 하지만 이러한 연구는 기초단계의 작업으로써 센서를 설계하는데 많은 기술적 노하우가 필요할 뿐만 아니라 제작된 센서에 따라 측정 결과와 다를 수 있다는 단점이 있다. 그러나, 광섬유 격자를 이용한 변위, 진동, 온도 및 유체 흐름 등에 대한 측정을 시도하여 많은 성과를 이루고 있

으며 일반적으로 삽입형 센서의 경우 구조물 자체의 내부에서의 수지의 함침 과정을 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

장주기 격자(LPG: Long Period Grating)의 주기는 약 100~500 μm 으로 격자사이의 간격의 변형을 이용하여 각종 구조물은 물론 장치에서 센서로써 널리 사용되고 있으며, 광섬유 코어(core)의 굴절률을 주기적으로 변조하여 특정 파장의 빛을 반사시키는 일반적인 단주기 광섬유 브래그 격자(FBG: Fiber Bragg Grating)에 비해 격자 주기가 매우 넓다. 장주기 격자는 일반적인 광섬유 센서가 지니고 있는, 작고 가볍다는 장점을 가지고 있어 복합재료 구조물에 특별한 결함으로 남지 않은 채 삽입되어 사용될 수 있다. 또한 전자기 간섭으로부터 영향을 받지 않아 이러한 시스템에서 수지의 절연 성질을 보여줄 수 있다는 강점을 가지고 있다. 특히, LPG의 경우 FBG에 비해 온도에 매우 민감할 뿐만 아니라 주변의 변화에도 격자 사이의 간격 변형이 쉽게 일어난다는 장점이 있다.

본 연구에서는 일반적인 광섬유의 수지 유동에 대한 센싱 민감도를 높이기 위해서 광섬유에 레이저를 이용해 일정 간격의 격자를 새긴 장주기 격자를 제작하였다. 장주기 격자는 원래 브래그 격자와 유사하지만, 코어로부터 나오는 빛을 클래딩 모드로 coupling 시키며 감쇠 파장은 오직 코어와 클래딩의 굴절률 차이에 영향을 받는다. 따라서 장주기 격자가 새겨진 광섬유 센서에 있어서 굴절률의 차이는 매우 중요하다고 할 수 있다. 장주기 격자의 경우 코어와 클래딩의 굴절률 차이에 큰 영향을 받는 반면에, 브래그 파장은 코어의 순수한 굴절률에 매우 민감하다. 특히, 제작상 매우 간편할 뿐만 아니라 소요 비용이 작다는 것은 생산 현장에서 사용하는데 있어 매우 큰 장점이라고 할 수 있다. 또한, 이러한 장주기 격자 센서의 장점을 이용하여 RTM 공정 과정에서의 수지 유동은 물론 경화 과정을 모니터링 하는데 목적이 있다. 일반적으로 광섬유 격자의 경우 RTM 공정과정에서 사용되는 복합 재료 내에 삽입이 가능할 뿐 아니라, 격자를 복합재료 내부에 삽입하여 수지 유동을 측정하여도 재료 자체에 결함으로 발생하지 않는다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구들에서 수지의 흐름 측정에 한정되어 있는 것들을 온도 변화와 함께 수지의 굴절률이 변하는 것을 물리적으로 추정하며, LPG 시뮬레이션과 함께 경화 과정에 대한 스펙트럼을 제시함은 물론 수지의 흐름을 이론적으로 분석하여 제시하는데 목적이 있다. 또한, 장주기 격자를 이용하여 RTM 공정에 있어서 매우

중요한 요소 중 하나인 수지 유동은 물론 수지의 경화 과정을 모니터링 할 수 있는 가능성을 보이 고자 한다.

2. 장주기 격자센서의 작동원리 및 제작

2.1 장주기 격자의 원리

장주기 광섬유 격자는 광섬유의 코어 영역의 굴절률이 주기적인 변화를 가지는 구조로 이루어진다. 이때 굴절률의 변화의 주기는 수백 μm 의 크기를 가지며 소자의 길이는 수 cm 가 된다. 장주기 광섬유 격자는 코어로 진행하는 기본 모드를 같은 진행방향의 다수의 클래딩 모드로 결합을 시키는 특징을 가지고 있다(Fig. 1). 이때 기본파와 2차 조화파의 위상속도를 맞춰주기 위한 단주기 격자에서 입사된 기본 모드의 방향 벡터와 격자의 방향 벡터의 합이 격자를 통해 산란된 빛의 방향 벡터인 위상 정합(phase matcing) 조건은 식 (1)과 같다.

$$\beta_{co} - \beta_{cl}^n = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

여기서 Λ 는 굴절률 변화의 주기이며 β 는 각 모드의 전파 상수이다.⁽⁶⁾

2.2 장주기 격자 제작 방법

Fig. 2는 장주기 광섬유 격자의 제작을 보여 주고 있다. 광 민감성(photosensitivity)을 가지는 단일 모드 광섬유를 amplitude 마스크의 뒤에 위치시키고 cylindrical lens를 사용하여 UV를 광섬유에 조사 시키는 방법으로 제작을 한다.

실험에 사용한 장주기 격자를 제작하기 위해 자외선 레이저 (KrF, 248nm)을 이용하여 제작하였다.

2.3 장주기 격자를 이용한 수지흐름 측정원리

광섬유의 코어에 존재하는 기본 모드가 다수의 클래딩 모드와 결합을 하면, 투과 손실의 크기는 코어 모드와 각각의 클래딩 모드와의 결합 세기의 크기에 따라 결정이 된다. 클래딩 모드의 유효굴절률은 주위 물질의 굴절률에 관계되므로 주위 물질의 굴절률을 알면 장주기 격자의 스펙트럼을 통

해 그 굴절률을 예측할 수 있다.⁽⁷⁾

기하 광학 근사식(geometric-optics approximation)으로 유도한 코어와 클래딩의 굴절률 관계식은

$$(2\pi / \lambda) D_{core} [(n_{co})^2 - (n_{0p}^{co})^2]^{1/2} - \frac{\pi}{2} = 2 \cos^{-1} \left[\frac{(n_{co})^2 - (n_{0p}^{co})^2}{(n_{co})^2 - (n_{clad})^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$(2\pi / \lambda_p) D_{clad} [(n_{clad})^2 - (n_{0p}^{cl})^2]^{1/2} - (p - \frac{3}{4})2\pi = 2 \cos^{-1} \left[\frac{(n_{clad})^2 - (n_{0p}^{cl})^2}{(n_{clad})^2 - (n_{sur})^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

이며, 여기서 n_{co} , n_{clad} , n_{0p}^{co} , n_{0p}^{cl} 는 각각 코어, 클래딩의 유효굴절률과, p 번째 모드에서의 코어와 클래딩의 유효 굴절률이다.⁽⁸⁾

식 (2)와 (3)의 우변은 경계면에서 위상 변화의 X축 성분을 의미한다. 식 (3)에서 좌변과 우변을 도식한 다음, 그 교차점을 찾으면 p 차 모드의 공진 정점(resonance peak)을 찾을 수 있다. 일반적으로 클래딩 외부 물질의 굴절률에 따라 모드의 공진 정점도 영향을 받는데, 외부 물질의 굴절률이 점점 증가하면 공진 정점은 단파장 쪽으로 이동한다. 그러다 외부 물질의 굴절률이 클래딩의 굴절률과 같게 되면, 클래딩 모드는 외부로 새나가게 되어 공진 정점이 사라지게 된다. 외부 물질의 굴절률이 계속 더 증가하면, 처음보다 약간 장파장 쪽으로 이동한 위치에서 다시 공진 정점이 나타나기 시작한다. 이제는 굴절률을 더 증가시켜도 파장은 변화가 없고, 손실만 더 커지게 된다. 이는 외부 물질의 굴절률이 커지면, 프레넬 반사(Fresnel Reflection)의 반사도가 더 커져 손실이 커지기 때문이다. 외부 물질의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 큰 경우를, 새나감 클래딩 모드(leaky cladding mode)라고 한다.

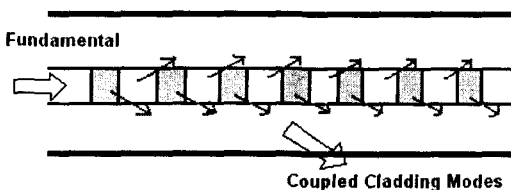


Fig. 1 Power coupling in long period grating (LPG)

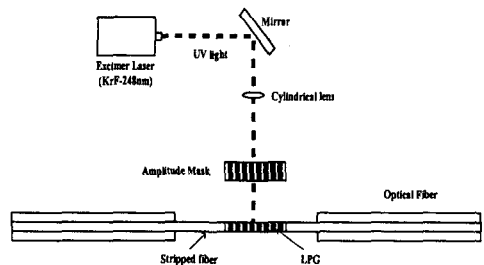


Fig. 2 Bragg wavelength-encoding operation

3. 실험 방법

3.1 재료 준비 및 제작

복합재료 내의 수지 유동 및 경화 과정을 모니터링할 수 있도록 하기 위해 장주기 격자를 삽입한 복합재료 구조물을 제작하였다. 실험에서 사용된 복합재료 매트는 유리섬유이며, 매트의 크기는 제작된 몰드에 삽입이 가능하도록 폭 10mm, 길이 30mm 크기로 절단하였다. 수지는 몰성치가 명확하게 제시되어 있는 2-관능성 에폭시 수지인 국도화학의 YD-128(Diglycidyl ether of bisphenol A, 에폭시 당량 = 184~194, 밀도=1.16 g/cm3)을 사용하였다.

3.2 실험장비 구성 및 절차

제작된 장주기 격자의 복합재료 구조물 내 삽입 후 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 장주기 격자의 스펙트럼으로 수지의 경화 과정을 측정하였다.

센서를 몰드 내의 유리섬유 매트의 중간 지점에 수지 흐름 방향으로 삽입하였다. 격자를 수지 흐름 방향으로 배열하기 위해 몰드의 양 끝단을 미세한 구멍을 뚫어 삽입시켜 반대쪽으로 나오도록 했으며 격자가 지나가는 미세 구멍은 밀봉과 함께 수지 흐름에 의해 격자의 위치가 변하지 않도록 고정하였다.

일정한 수지의 흐름을 유지시켜주기 위해 저장기의 수지를 반대편의 진공 펌프를 이용하여 진공 상태에서 빨아 들여 몰드 내에서 수지의 흐름을 발생시켰다. 몰드 내에 삽입된 격자의 위치에 수지가 도착하였을 때 격자 부분에서 발생하는 스펙트럼의 변화를 통하여 수지 흐름을 모니터링 하였다. 본 실험을 위해 사용된 광원은 120mA 광원을 가지며 실리카 광섬유의 저손실 파장대역인 1.55 μ m 파장대를 증폭시키는 Er³⁺이온을 이용한 광섬유 증폭기인 EDFA (Erbium Doped Fiber

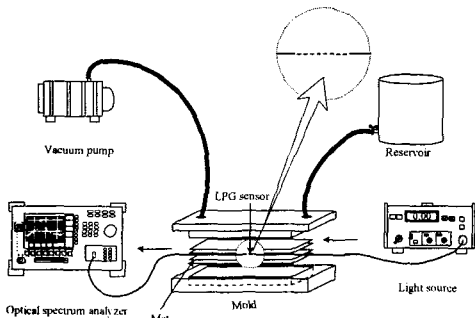


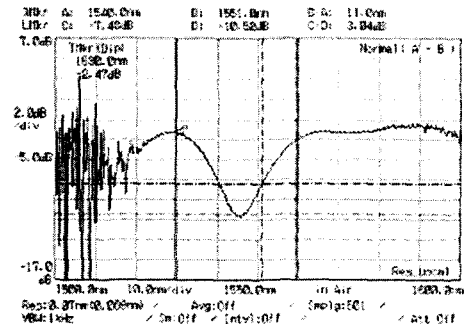
Fig. 3 Schematic of the setup used in this study

Amplifier)이었으며, 광 스펙트럼 분석기는 Anritsu의 Model MS9780A (0.6~1.75 μ m) Optical Spectrum Analyzer 이었다. Fig. 3은 실험 장치 구성도를 보여주고 있다.

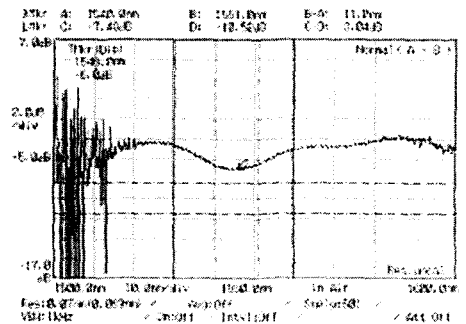
4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 수지 흐름에 따라 격자 스펙트럼이 변화하는 것을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 장주기 격자의 일반적인 스펙트럼인데, 수지의 흐름이 전혀 없는 경우로 매트 내에 수지가 주입되지 않은 상태이다. Fig. 4(b)는 수지가 매트 내에서 주입되어 흘러 들어감에 따라 수지가 장주기 격자 부분에 도달하였을 경우의 광 스펙트럼 양상이다. 수지가 센서 역할을 하는 장주기 격자 부분을 덮을 때, 광 스펙트럼의 골이 다소 감소하여 광 출력이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5은 수지의 경화 과정에 따른 격자의 스펙트럼 변화를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 매트에 삽입



(a)



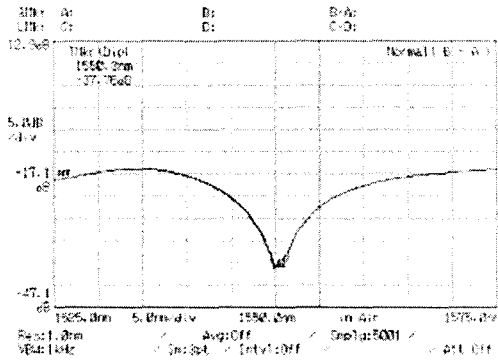
(b)

Fig. 4 Spectrum of an optical fiber containing LPG shown at 1550nm in (a) its clean state, (b) when the LPG is covered by the resin

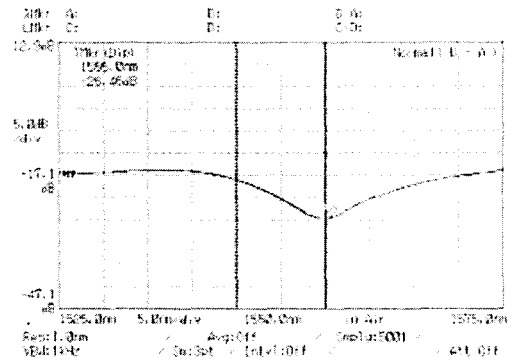
된 장주기 격자에 수지를 흘려 보내기전의 광 스펙트럼이다. 광 스펙트럼의 골은 1550.3nm 에서 -37.76dB 의 출력을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 매트 에 삽입된 장주기 격자에 수지가 흘러 센서 부분을 완전히 덮었을 때의 양상을 보여주고 있다. 이때의 광 스펙트럼 골은 1555.0nm 에서 -26.46dB 의 출력 값을 보여주고 있으며 골의 깊이는 작아 지면서 광 스펙트럼이 오른쪽으로 이동해 있음을 알 수 있다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 주입된 수지가 경화되는 과정에서 나타나는 광 스펙트럼 형태이다. 장주기 격자는 온도에 비례하여 공진 정점의 파장이 이동하는데, 수지의 경화 과정에 따라 온

도가 감소하므로 스펙트럼은 오른쪽에서 왼쪽으로 이동되어감을 알 수 있으며 스펙트럼의 골 또한 깊어짐을 알 수 있다.

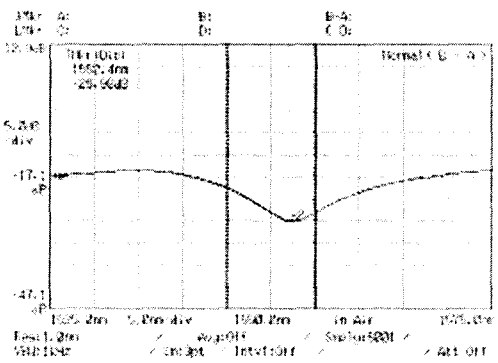
Fig. 6 은 수지의 흐름에 따른 장주기 격자의 광 스펙트럼의 변화 과정을 보여주고 있다. 수지가 묻지 않은 원래의 장주기 격자의 경우 스펙트럼의 골이 깊으나 수지가 광섬유격자를 덮어 가는 과정에 따라 스펙트럼의 골 깊이가 현격하게 작아져 가는 것을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 장주기 격자 부분을 덮는 수지가 센서 부분의 굴절률을 크게 변화시키며 이로 인하여 광섬유를 통과 하는 광원의 양상을 바꾸기 때문이다.



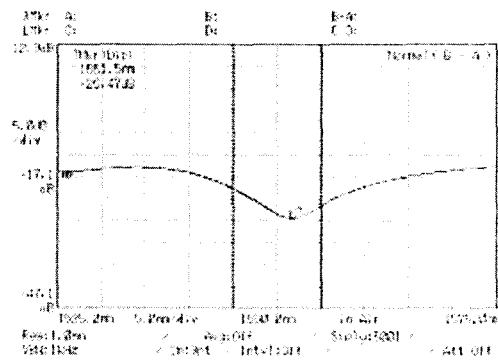
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Variation in the radiation loss of the long period grating (LPG) with the change in the refractive index of the resin during cure of the resin

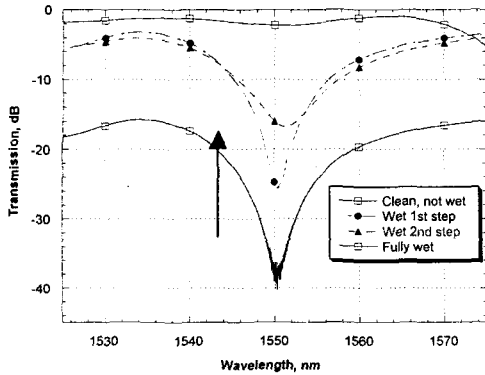


Fig. 6 Typical long period grating (LPG) response to the resin flow steps. The arrow indicates the direction of the optical spectrum shift.

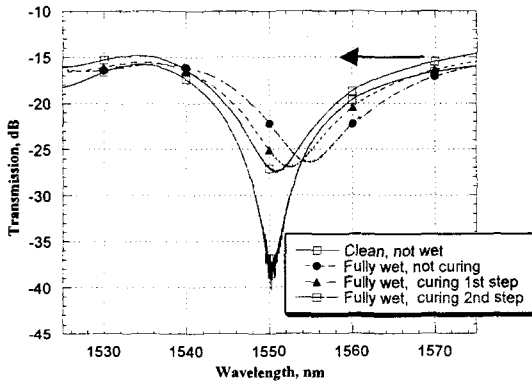


Fig. 7 Typical long period grating (LPG) response to the resin curing steps. The arrow indicates the direction of the optical spectrum shift

Fig. 7은 수지 경화 과정에 따른, 매트에 삽입된 광섬유의 출력 변화를 보여주고 있다. 초기 매트 내에서 수지가 주입되지 않은 경우 깊은 골을 갖는 광 스펙트럼을 보여주나 일단 매트에 수지가 주입되면 스펙트럼의 골이 현격히 낮아지며 오른쪽으로 파장이 이동됨을 알 수 있다. 그러나, 매트에 주입된 수지의 경화가 시작되면 스펙트럼은 왼쪽으로 이동하면서 골 또한 다시 약간 깊어져 감을 알 수 있다.

5. 결론

(1) 장주기 격자를 가지고 있는 광섬유 센서를 이용하여 VARTM에서의 수지 흐름 및 수지의 경화 과정을 측정하였다.

(2) 매트에 삽입된 장주기 격자에 수지가 덮일 경우 광 출력의 손실에 따라 스펙트럼의 골(dip) 부분이 올라감을 확인할 수 있었으며 이러한 출력 변화 경향을 이용하여 매트 내에서의 수지의 흐름 상태를 모니터링할 수 있었다.

(3) 또한, 매트에 삽입된 장주기 격자를 가진 광섬유 센서를 이용하여 매트 내에 주입된 수지의 경화 과정을 모니터링 하였다. 모니터링 결과 경화 과정에서의 스펙트럼은 초기 수지가 센서 부분을 덮을 경우 출력의 현격한 감소를 알 수 있었으며 경화가 시작함에 따라 스펙트럼은 오른쪽에서 왼쪽으로 이동되어 파장이 작아짐을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부 프론티어 사업과 교육부 Brain Korea 21 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Se-Won Eun, 2002, "Experimental Study of the Microvoids Formation and Transport in the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding," *Master's thesis of Mechanical Engineering*, Seoul National University.
- (2) Joy P. Dunkers et al., 2001, "Fiber Optic Flow and Cure Sensing for Liquid Composite Molding," *Optics and Lasers Engineering*, Vol. 35, pp. 91~104.
- (3) Sylvia R.M.Kueh et al., 2002, "A Methodology for Using Long-Period gratings and Mold-Filling Simulations to Minimize the Intrusiveness of Flow Sensors in Liquid Composite Molding," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 311~327.
- (4) J.X.Fang et al., 1998, "Fiber-Optic Fabry-Perot Flow Sensor," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 18, No. 3, pp. 209~211.
- (5) Y.Zhou et al., 1999, "Dynamic Strain Measurements of a Circular Cylinder in Cross Flow Using a Fibre Bragg Grating Sensor," *Experiments in Fluids*, Vol. 37, pp. 359~367.
- (6) Raman Kashyap, 1999, "Fiber Bragg Gratings," pp. 171-178, Academic Press, USA.
- (7) D.B.Stegall et al., 1999, "Leaky Cladding Mode Propagation in Long-Period Fiber Grating Devices," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, Vol. 11, No.3, 343~345.
- (8) Byeong Ha Lee et al., 1997, "Displacements of the Resonant Peaks of a Long-Period Fiber Grating Induced by a Change of Ambient Refractive Index," *Opt. Lett.*, Vol. 22, No. 23, 1769~1771.