

긴 광섬유격자의 새로운 제작방법 및 특성분석

(A new Fabrication Method for Long Fiber Bragg Grating and the Characteristics of the Fiber Grating)

李鍾勳*, 李景植*

(Jong Hun Lee and Kyung Shik Lee)

요 약

본 논문에서는 유니폼 위상마스크를 이용하여 긴 광섬유격자를 제작할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 짧은 유니폼 위상마스크 한 개를 이용하여, 유효굴절률이 일정하거나 선형적으로 변하는 여러개의 부광섬유격자(subgrating)를 직렬로 연속적으로 제작함으로써 긴 광섬유격자를 제작하는 방법이다. 길이가 25mm인 한 개의 유니폼격자를 사용하여 길이가 200mm이고, 반사율이 95% 이상인 유니폼 광섬유격자를 제작하였으며, 길이가 250mm이며 대역폭과 분산보상기울기의 평균값이 각각 0.5nm와 4,965ps/nm인 선형처프된 광섬유격자를 제작할 수 있었다.

Abstract

A new method for fabricating long fiber Bragg gratings(FBGs) using uniform phase mask is proposed. The proposed method is characterized by forming a number of subgratings sequentially in series and varying linearly the effective refractive index of each subgrating. The reflectivity of a 200mm long uniform FBG fabricated by the method is about 95%. Also, the bandwidth and dispersion slope of a 250mm long linear-chirped FBG developed here are $\sim 0.5nm$ and $\sim 4,965ps/nm$, respectively.

I. 서 론

광섬유격자는 광섬유 코어에서 일정한 굴절률이 주기적으로 변하는 형태의 광섬유 소자로써 이에 빛을 입사시키면 도파되는 빛 중 특정파장의 빛만을 반사시키는 특성을 가지고 있다. 광섬유격자는 벌크 형태의 같은 기능을 하는 소자에 비해서 전체가 광섬유로 되어 있고, 삽입 손실이 적고, 반사율이 크며, 가격이 저

렴하다는 장점을 가지고 있다. 현재 광섬유격자는 분산 보상^[1], 펄스 압축^[2], 광섬유증폭기의 이득 평탄^[3], 협대역 필터, WDM용 필터^[4], 광센서^[5] 등 여러 분야에서 이용되고 있으며, 특히 WDM용 필터와 분산 보상은 각각 유니폼 광섬유격자(uniform fiber Bragg grating)와 선형처프된 광섬유격자(linear chirped fiber Bragg grating)에 의해서 많은 응용이 되고 있다. 그러나, 길이가 짧은 선형 처프된 광섬유격자는 분산보상 가능한 대역폭과 분산보상 가능한 거리에 한계가 있다. 따라서, 반사 특성이 우수한 WDM용 필터와 분산보상 대역폭이 넓고 분산보상 거리가 긴 성능이 우수한 분산 보상을 구성하기 위해서는 각각 길이가 긴 광섬유격자가 필요하다. 따라서, 최근들어 긴 유니폼 광섬유격자와 선형 처프된 광섬유격자를 제작하기 위한 여러 가지 방

* 正會員, 成均館大學校 電氣電子 및 컴퓨터工學部
(The school of Electrical and Computer Engineering,
Sung Kyun Kwan University)

接受日字 : 1999年1月12日, 수정완료일 : 1999年11月9日

법이 여러 연구가들에 의해서 연구가 한창 진행되고 있다^{6,8)}.

긴 광섬유격자를 제작하는 방법들은 긴 위상마스크 방법⁹⁾, 부격자연속연결 방법(consecutive subgratings)¹⁰⁾, 그리고 superstep-chirped grating 방법^{17, 11)} 등이 있다. 이들 방법중에서 긴 위상마스크 방법과 부격자연속연결 방법은 주로 유니폼 광섬유격자를 제작하기 위해 사용되며, superstep-chirped grating 방법은 주로 선형 처프된 광섬유격자를 제작하기 위해 사용된다. 여기서, 긴 위상마스크방법은 위상마스크 방법의 장점인 제작 시스템이 간단하고 안정된 격자를 제작할 수 있으며 대량생산이 가능하다는 특징이 있으나, 긴 위상마스크를 제작하는데 있어서 상당한 어려움과 비용이 든다는 단점이 있다. 부격자연속연결 방법은 반사대역폭이 매우 좁은 광섬유격자를 제작할 수 있고 여러 가지 굴절률 분포를 가진 긴 광섬유격자를 제작할 수 있다는 장점이 있으나, 제작 시간이 길고 제작 시스템이 복잡하며 제작 시스템 구성시에 많은 비용이 든다는 단점이 있다. 그리고 superstep-chirped grating 방법은 성능이 우수하고 간단하게 긴 광섬유격자를 제작할 수 있다는 장점이 있으나, 격자주기가 다른 여러개의 위상마스크를 사용해야 하기 때문에 많은 비용이 든다는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 간단한 제작 시스템과 적은 비용으로 성능이 우수한 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자를 제작할 수 있는 새로운 방법을 제안하고, 이 방법을 통해서 직접 제작한 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자의 특성을 분석하고자 한다. 이 방법은 가격이 싼 짧은 유니폼 위상마스크 한 개를 사용하기 때문에 제작이 쉽고, 제작비용이 저렴하다는 장점이 있다. 여기에서 제안하는 제작방법은 우리가 아는 한도 내에서는 아직까지 보고된 바 없는 새로운 방법이다.

본 논문에서 2장은 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자를 제작하기 위한 기본원리와 본 논문에서 제안하는 방법으로 긴 광섬유격자를 제작하기 위한 제작시스템에 대해서 살펴볼 것이고, 3장은 새로운 방법을 통해서 실제 제작된 길이가 200mm인 긴 유니폼 광섬유격자와 길이가 250mm인 선형처프된 광섬유격자의 반사 스펙트럼과 시간지연스펙트럼이 어떻게 되는지 살펴보고자 한다.

II. 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자의 제작원리 및 실험장치

광섬유격자는 광섬유 코어 내에 강한 자외선(UV)빔의 간섭패턴을 일정한 시간 동안 만들어 줌으로써 굴절률을 주기적으로 변화시킨 광섬유소자이다. 반사형 광섬유격자는 입사된 여러개의 파장중 브래그 조건(Bragg condition)을 만족시키는 특정파장만을 반사시키고 나머지 빛은 투과시키는 특성을 가지고 있다. 브래그 조건에 의해서 반사되는 중심파장은 광섬유격자의 격자주기와 유효굴절률에 따라서 결정되며 아래 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

여기서, λ_B 는 반사되는 중심파장, n_{eff} 는 광섬유격자의 유효굴절률 그리고 Λ 는 광섬유격자의 격자주기를 나타내고 있다. 본 논문에서는 광섬유격자의 유효굴절률(n_{eff})과 광섬유격자의 격자주기(Λ)의 곱을 광섬유격자의 유효격자주기(Λ_{eff} , the effective grating period)라 정의하겠다.

유니폼 광섬유격자와 선형처프된 광섬유격자는 유효 격자주기를 이용하여 정의할 수 있다. 즉, 유니폼 광섬유격자는 광섬유격자의 길이에 관계없이 일정한 유효 격자주기를 가지고 있는 광섬유격자인 반면, 선형처프된 광섬유격자는 광섬유격자의 길이에 따라 유효격자주기가 감소 또는 증가하는 광섬유격자를 말한다. 여기서, 유효격자주기는 유효굴절률 또는 격자주기를 변화시켜줌으로써 변하게 된다.

본 논문에서 유니폼 위상마스크를 이용하여 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자를 제작할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 길이가 짧고 일정한 격자주기를 가진 유니폼 위상마스크를 이용하는 방법으로써 여러개의 부광섬유격자(subgrating)를 직렬로 연속해서 제작함으로써 하나의 긴 광섬유격자를 제작하는 방법이다. 이때, 긴 유니폼 광섬유격자는 유효격자주기가 동일한 여러개의 부광섬유격자를 직렬로 연속적으로 제작함으로써 얻어질 수 있으며 긴 선형처프된 광섬유격자는 여러개의 부광섬유격자의 유효 격자주기를 각각 광섬유격자 전체길이에 대해서 증가 또는 감소시킴으로써 얻어질 수 있다. 여기서, 위상마

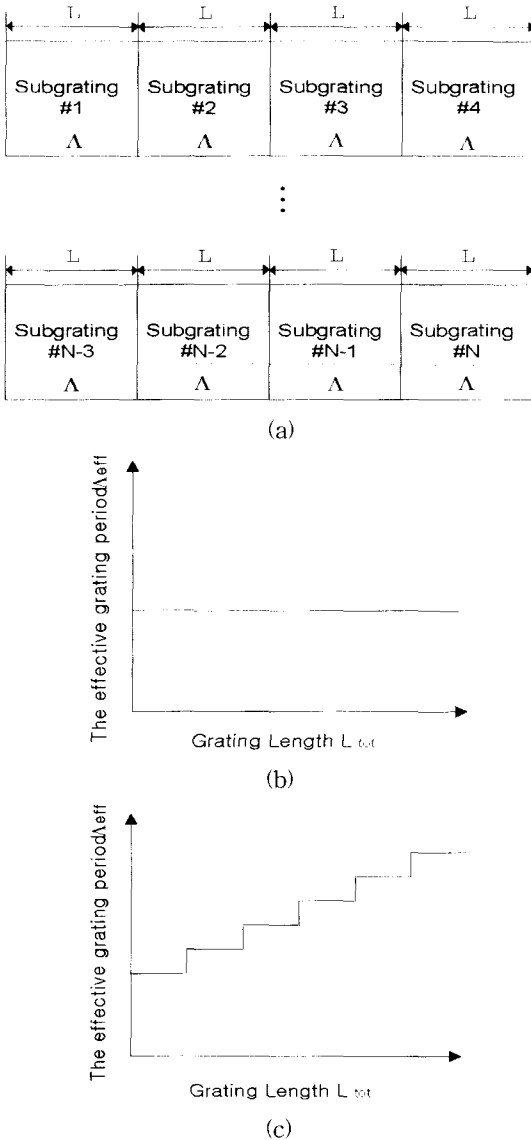


그림 1. 부격자가 직렬연결되어 구성된 긴 광섬유격자
 (a) 기본 개념도
 (b) 긴 유니폼 광섬유격자의 격자길이에 따른 유효격자주기변화
 (c) 긴 선형처프된 광섬유격자의 격자길이에 따른 유효격자주기변화

Fig. 1. The fabrication principle for long uniform and linear chirped fiber Bragg gratings(FBGs).
 (a) The schematic representation
 (b) The variation of the effective grating period along the grating length in uniform FBG
 (c) The variation of the effective grating period along the grating length in linear chirped FBG

크의 격자주기가 일정하기 때문에 광섬유코어의 유효 굴절률을 변화시켜줌으로써 부광섬유격자의 유효격자 주기를 변화시킬 수 있다. 일반적으로 광섬유코어의 유효굴절률은 광섬유 코어에 조사되는 UV빔의 세기, 조사시간 그리고 펄스반복율(pulse repetition rate) 등에 따라서 변화한다.

그림 1은 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자의 제작원리를 나타내고 있다. 그림 1(a)는 길이(L)가 짧고 일정한 격자주기(Λ)를 가진 부광섬유격자 N 개를 직렬로 연속적으로 연결하여 길이가 $NL(=L_{tot})$ 인 광섬유격자를 제작하기 위한 기본 개념도를 나타내고 있다. 그림 1(b)는 길이가 L_{tot} 인 유니폼 광섬유격자의 길이에 따른 유효격자주기(the effective grating period Λ_{eff})를 나타내고 있다. 여기서, 길이가 L_{tot} 인 유니폼 광섬유격자를 제작하기 위해서는 N 개의 부광섬유격자의 유효격자주기 즉, 유효굴절률이 모두 동일해야 함을 알 수 있다. 그림 1(c)는 길이가 L_{tot} 인 선형처프된 광섬유격자의 길이에 따른 유효격자주기를 나타내고 있다. 여기서, 길이가 L_{tot} 인 선형처프된 광섬유격자를 제작하기 위해서는 N 개의 부광섬유격자의 유효격자주기 즉, 유효굴절률을 각각 광섬유격자 길이에 따라서 증가시켜야 함을 알 수 있다. 이때, 광섬유 코어에 조사되는 UV빔의 세기, 조사시간, 그리고 펄스반복율(pulse repetition rate)를 변화시킴으로써 유효굴절률을 변화시킬 수 있다.

다음은 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하여 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자를 제작하기 위한 실험장치를 살펴보도록 하겠다. UV광원인 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik사 COMpex205)에서 나온 248 nm의 UV빔을 원통형 렌즈를 통하여 에너지밀도를 높이고 이 빔을 유니폼 위상마스크에 의해 $-1, 0, +1$ 차 회절빔으로 나누어지도록 한다. 이때, 대부분의 빔은 $-1, +1$ 차 회절빔에 존재하며 이 회절빔은 광감도 광섬유의 코어에 주기적인 간섭패턴을 형성하여 유니폼 광섬유격자를 만든다. 그리고, 여러개의 부광섬유격자를 직렬로 연속적으로 제작하기 위해서 이미 형성된 부광섬유격자가 존재하는 광섬유를 LM 가이드(Linear motion stage, 최대 이동거리: 20cm, 정확도=10 μ m)를 사용하여 광섬유격자길이만큼 이동하고 다시 부광섬유격자를 제작하는 방식을 여러번 반복함으로써 여러개의 부광섬유격자가 직렬로 연속적으로 제작된 하나의 긴 광섬유

격자를 제작할 수 있다. 여기서, 사용한 위상마스크(QPS)는 길이가 25mm이고 격자주기가 1060nm인 유니폼 위상마스크이다. 그리고 사용한 광섬유는 일반광통신용 광섬유에 광감도를 향상하기 위해서 100atm, 90°C에서 7일 동안 수소처리한 것이다. 또한 LED와 분해능(resolution)이 0.1nm인 OSA(Optical Spectrum Analyzer)를 사용하여 광섬유격자 형성과정을 실시간에 측정하였다.

III. 실험결과

그림 2는 200mm인 유니폼 광섬유격자의 제작과정동안 광섬유격자의 길이에 따른 투과스펙트럼을 실시간 측정한 결과를 나타내고 있다. 여기서, 길이가 25mm인 유니폼 위상마스크를 이용하여 25mm인 부광섬유격자를 제작하였다. 그리고 제작된 25mm인 부광섬유격자가 존재하는 광섬유를 LM 가이드로 25mm씩 이동한 후 다시 동일한 위상마스크를 사용하여 25mm인 부광섬유격자를 형성함으로써 길이가 50mm인 광섬유격자를 제작할 수 있었으며, 이와같은 방법을 여러번 반복함으로써 최종적으로 길이가 200mm인 유니폼 광섬유격자를 제작할 수 있었다. 이때, 모든 부광섬유격자의 제작조건은 에너지 밀도와 펄스반복율을 각각 $90\text{mJ}/\text{cm}^2$ 와 10Hz로 하였으며 UV빔에 대한 광감도 광섬유의 노출시간은 4분으로 하여 부광섬유격자의 유효굴절률을 일정하게 하였다. 이론적으로 광섬유격자의 길이가 길어짐에 따라 반사율은 증가하는 것으로 예측할 수 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 광섬유격자길이가 길어짐에 따라 반사율이 증가하고 있어 실제로 길이가 긴 유니폼광섬유격자가 제작되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 광섬유격자의 길이가 길어짐에 따라서 반사대역폭이 증가하는 원인으로는 인접 부광섬유격자사이의 위상이 서로 맞지 않음으로 인해서 생기는 스티칭 에러 이외에도 제작된 광섬유격자의 유효굴절률이 Gaussian beam의 조사로 광섬유격자의 위치에 따라서 다르기 때문인 것으로 생각할 수 있겠다¹⁹⁾. 그림 2의 투과스펙트럼상에서 보이는 여러개의 peak는 격자특성을 측정하기 위해서 사용한 광원 LED의 power가 낮아서 광섬유격자의 중심파장에서 LED power가 noise level만큼 낮아졌어 noise성분이 포함된 것으로 추측할 수 있다. 이 사실은 그림 3으로부터 알 수 있듯이, 최종적으로 제작

된 200mm인 유니폼 광섬유격자의 반사스펙트럼상에서 여러개의 peak가 사라졌다는 사실을 통해서 확인할 수 있다.

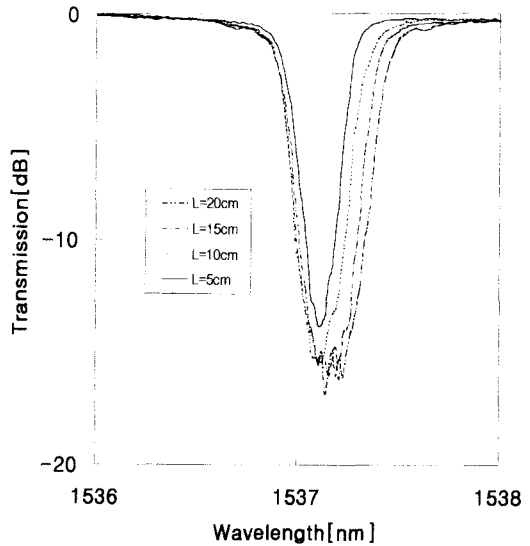


그림 2. 200mm인 유니폼 광섬유격자의 제작과정동안 광섬유격자의 길이에 따른 투과스펙트럼의 실시간 측정

Fig. 2. Transmission spectra of a growing uniform fiber Bragg grating.

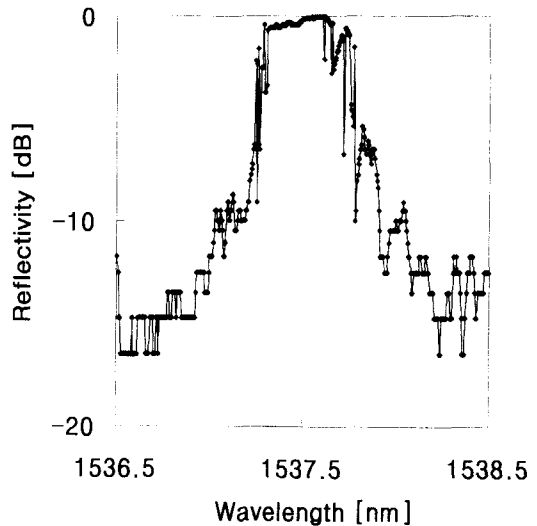


그림 3. 제작된 200mm인 유니폼 광섬유격자의 반사스펙트럼 측정

Fig. 3. The reflectivity measurement of a 200mm long uniform fiber Bragg grating.

그림 3은 제작된 200mm인 유니폼 광섬유격자의 반

사스펙트럼을 나타내고 있다. 이때, 제작된 광섬유격자의 반사스펙트럼은 분해능이 0.001nm인 tunable laser source(Anritsu사 GM9638A)와 PD(photodiode)를 이용하여 측정하였다. 실제로 제작된 200mm인 유니폼광섬유격자의 반사대역폭과 반사율은 각각 대략 0.5nm + 0.1nm와 95% + 3% 이상이었다.

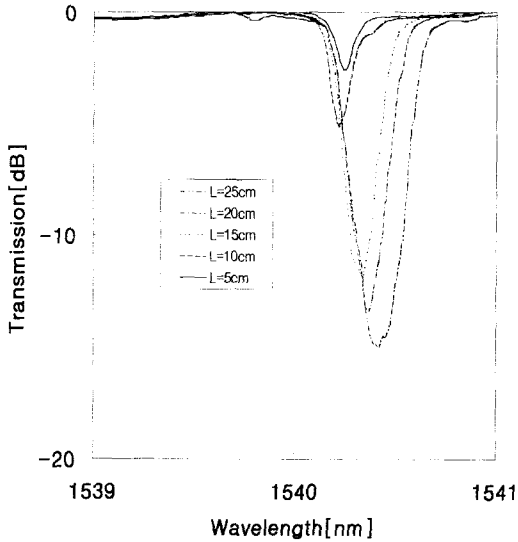
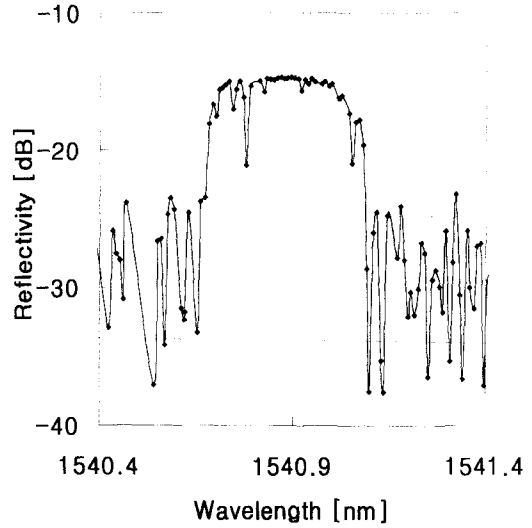
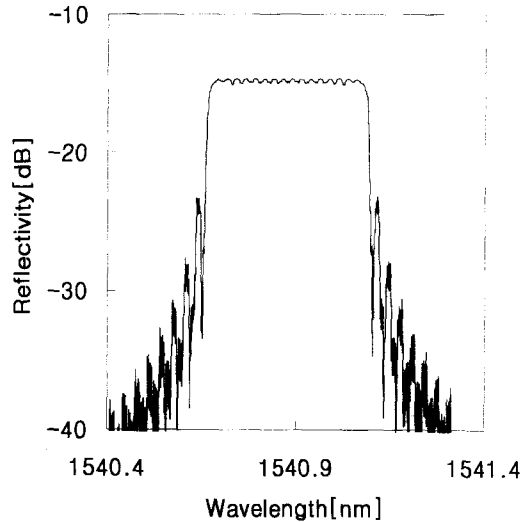


그림 4. 250mm인 선형처프된 광섬유격자의 제작과정 동안 길이에 따른 투과스펙트럼의 실시간 측정
Fig. 4. Ttransmission spectra of a growing linear-chirped fiber Bragg grating.

그림 4는 250mm인 선형처프된 광섬유격자의 제작과정 동안 광섬유격자의 길이에 따른 투과스펙트럼을 실시간 측정된 결과를 나타내고 있다. 이때, 앞에서 살펴본 긴 유니폼 광섬유격자를 제작하는 방법과 동일한 방법으로 길이가 25mm인 유니폼 위상마스크와 LM 가이드를 이용하여 여러개의 25mm인 부광섬유격자를 직렬로 연속적으로 연결제작함으로써 길이가 250mm인 선형처프된 광섬유격자를 제작할 수 있었다. 여기서, 긴 유니폼 광섬유격자와 선형처프된 광섬유격자의 제작상의 차이점은 유니폼 광섬유격자의 경우 부광섬유격자의 유효굴절률이 일정하나 선형처프된 광섬유격자의 경우 부광섬유격자의 유효굴절률을 광섬유격자길이에 따라서 선형적으로 증가시켰다는 사실이다. 부광섬유격자를 제작할 때, 에너지밀도와 노출시간을 각각 240mJ/cm²와 3분으로 모두 동일하게 하고서 펄스반복율을 1Hz에서 10Hz로 선형적으로 증가시킴으로써 부



(a)



(b)

그림 5. 제작된 250mm인 선형처프된 광섬유격자에서 반사스펙트럼

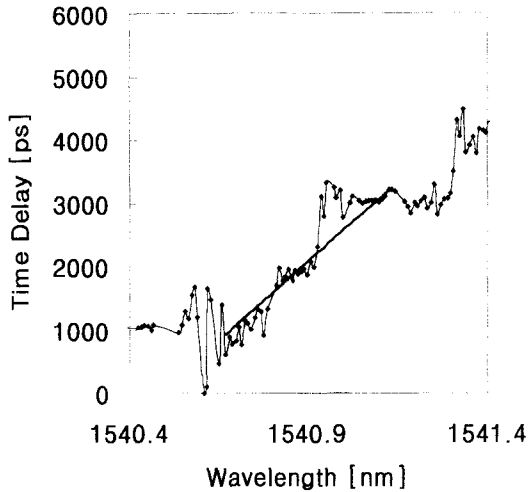
- (a) 실험결과
- (b) 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Reflectivity spectra of a 250mm long linear-chirped FBG.

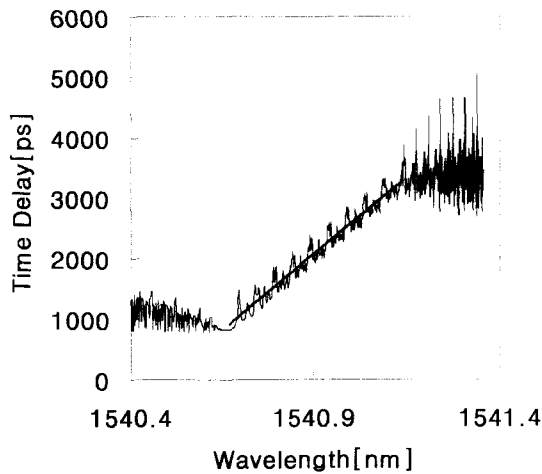
- (a) experiment
- (b) simulation

광섬유격자의 유효굴절률을 거의 선형적으로 증가시킬 수 있었다. 그림 2와 그림 4에서 알 수 있듯이, 긴 유니폼 광섬유격자의 경우(그림 2), 광섬유격자의 길이가 길어짐에 따라서 반사되는 중심파장이 거의 변함이 없음을 알 수 있다. 하지만, 긴 선형처프된 광섬유격자의

성우(그림 4), 광섬유격자의 길이가 길어짐에 따라 예상대로 반사율이 점점 더 증가하고 반사되는 중심파장이 장파장쪽으로 이동함을 알 수 있다. 중심파장이 장파장쪽으로 이동하는 것은 광섬유격자의 유효굴절률의 평균값이 점점 커지기 때문이다.



(a)



(b)

그림 6. 제작된 250mm인 선형처프된 광섬유격자에서 시간지연스펙트럼

- (a) 실험결과
- (b) 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Time delay response of a 250mm long linear-chirped FBG.

- (a) experiment
- (b) simulation

그림 5(a)와 그림 5(b)는 각각 제작된 250mm인 선형

처프된 광섬유격자에서 반사스펙트럼의 실험결과와 시뮬레이션결과를 나타내고 있다. 그림 5(a)에서 제작된 광섬유격자의 반사스펙트럼은 분해능이 0.001nm인 tunable laser source(Anritsu사 GM9638A)와 PD(photodiode)를 이용하여 측정하였다. 그리고, 그림 5(b)에서는 10개의 부광섬유격자를 직렬로 연속적으로 연결한 250mm인 선형처프된 광섬유격자의 반사스펙트럼을 시뮬레이션한 결과이다. 실제로 제작된 선형처프 광섬유격자의 처프량은 대략 0.5nm이었다.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 각각 제작된 250mm인 선형처프된 광섬유격자에서 시간지연스펙트럼의 실험결과와 시뮬레이션결과를 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 제작된 광섬유격자의 시간지연스펙트럼은 분산측정기 SET(HP 83420A)를 사용하여 측정한 실험결과이다. 여기서, 실선은 분산보상대역내에서 실험치에 대한 fitting 결과를 나타내고 있다. 이때, 분산보상기울기의 평균치값은 대략 4.965ps/nm으로써, 색분산이 17ps/nm-km인 1.3μm용 기존 광섬유를 통해서 초고속 광전송을 할 경우, 광펄스를 분산없이 최대 290km이상까지 전송할 수 있는 큰 값이다. 그림 6(b)의 실선은 분산보상대역내에서 시뮬레이션에 대한 fitting결과를 나타내고 있다. 이때, 분산보상기울기의 평균값은 대략 5.020ps/nm으로써 실험치와 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 제작한 선형처프된 광섬유격자의 분산보상대역폭 값은 0.5nm로써 시뮬레이션결과와 일치한다. 물론 반사스펙트럼과 시간지연스펙트럼상에 보이는 잡음과 roughness 그리고 실험결과와 시뮬레이션결과와의 차이는 스티칭에러(stitching error), 격자내의 Fabry-perot 현상 및 직렬로 연속적으로 제작되는 부광섬유격자에서 유효굴절률의 비선형적인 증가 등이 원인인 것으로 생각할 수 있겠다.

IV. 결론

본 논문에서는 유니폼 위상마스크를 이용하여 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자를 쉽게 제작할 수 있는 새로운 제작방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 한 개의 짧은 유니폼 위상마스크로 유효굴절률이 일정한 부광섬유격자를 직렬로 여러번 연속적으로 제작함으로써 하나의 긴 유니폼 광섬유격자를 제작할 수 있으며, 광섬유격자길이에 따라서 유효굴절률이 선형적으로 증가되도록 부광섬유격자를 연속적으로 직렬로 제작함으

로써 선형처프된 광섬유격자를 길게 제작할 수도 있는 방법이다. 제안하는 방법을 사용하여 200mm인 유니폼 및 250mm인 선형처프된 광섬유격자를 제작하였으며 각각의 제작된 광섬유격자의 반사스펙트럼과 시간지연 스펙트럼을 분석하였다. 이때, 200mm인 유니폼 광섬유격자의 반사율은 95%이상이었으며, 250mm인 선형처프된 광섬유격자의 분산보상대역폭과 분산보상기울기의 평균치 값은 각각 대략 0.5nm와 4,965ps/nm이었다 개발한 선형처프된 광섬유격자의 분산보상기울기 값은 색분산이 17ps/nm-km인 1.3 μ m용 기존 광섬유를 통해서 초고속 광전송을 할 경우, 광펄스를 분산없이 최대 290km이상까지 전송할 수 있는 큰 값이다. 본 논문에서 제안하는 새로운 방법을 통해서 길이가 긴 유니폼 및 선형처프된 광섬유격자를 성공적으로 쉽게 제작할 수 있었으며, 제작된 선형처프된 광섬유격자의 분산보상기울기와 대역폭은 시뮬레이션결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 앞으로 제안하는 제작시스템을 좀더 개선시킨다면 스티칭 어려웠고 리플 없는 긴 광섬유격자를 개발할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 조상연, 이경식, "Apodized 선형처프된 광섬유 grating의 분산보상특성에 대한 연구", 대한전자공학회 논문지, 제35권, S편, 제1호, pp. 23-28, 1998
- [2] N. G. R. Broderick, D. Taverner, D. J. Richardson, M. Ibsen, and R. I. Laming, "Experimental observation of nonlinear pulse compression in nonuniform Bragg gratings", *Optics Letters*, Vol. 22, No. 24, pp. 1837-1839, 1997.
- [3] R. Kashyap, R. Wyatt and P. F. Mckee, "Wavelength flattened saturated Erbium amplifier using multiple side-tap Bragg grating", *Electronics Letters*, Vol. 29, No. 11, 1993.
- [4] K. N. Park, Y. T. Lee, M. H. Kim, K. S. Lee and Y. H. Won, "All-fiber Drop-Pass Filters with Fiber Bragg Gratings", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, No. 4, pp. 555-557, 1998.
- [5] M. Sudo, M. Nakai, K. Himeno, S. Suzaki, A. Wada, R. Yamauchi, "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain using PANDA Fiber Grating", *Conference Proceedings of OFS-12*, paper OWC7, 1997.
- [6] M. Durkin, M. Ibsen, M. J. Cole and R. I. Laming, "1m long continuously-written fiber Bragg gratings for combined second- and third-order dispersion compensation", *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 22, pp. 1891-1893, 1997.
- [7] R. Kashyap, P. F. Mckee, R. J. Campbell and D. L. Williams, "Novel method of producing all fiber photoinduced chirped gratings", *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 12, pp. 996-998, 1994.
- [8] R. Kashyap, "Design of step-chirped fibre Bragg gratings", *Optics Communications* Vol. 136, pp. 461-469, 1997.
- [9] J. Martin and F. Ouellette, "Novel written technique of long and highly reflection in-fiber gratings", *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 10, pp. 811 - 812, 1994.
- [10] A. Asseh, H. Storoy, B. E. Sahlgren, S. Sandgren, and R. A. H. Stube, "A Writing Technique for Long Fiber Bragg Gratings with Complex Reflectivity Profiles", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1419-1423, 1997.
- [11] R. Kashyap, H. G. Froehlich, A. Swanton and D. J. Arnes, "Super-step-chirped fibre Bragg gratings", *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 15, pp. 1394-1396, 1996.

저 자 소 개

李 景 植(正會員) 第 34卷 D編 第 4號 參照
현 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수

李 鍾 勳(正會員) 第 35卷 D編 第 8號 參照
현 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 박사과정