

색분산 보상을 위한 선형 칩 광섬유 격자의 Apodization

박제형 · 최선민 · 한영근[†] · 김상혁 · 이상배

한국과학기술연구원 광기술연구센터
Ⓣ136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

(접수일 2003년 12월 19일 받음, 2004년 4월 14일 수정본 받음)

색분산 보상에 사용되는 선형 칩 광섬유 격자의 제작에 있어서 Group Delay Ripple(GDR)을 줄이기 위한 apodization 기술에 대해 이론적으로 분석하고 실험적으로 규명하고자 한다. 칩격자의 제작에는 위상 마스크를 이용한 UV 빔 스캐닝 기법을 적용하였고, PZT(Piezoelectric transducer)를 이용하여 위상 마스크를 빔 스캐닝 중에 적절하게 흔들어줌으로써 apodization이 일어나도록 하였다. 이러한 모든 과정이 컴퓨터 제어에 이루어지기 때문에 다양한 apodization 프로파일을 적용할 수 있었다. Gaussian, Raised-cosine, Blackman, 그리고 Hyperbolic tangent 등의 프로파일을 적용하여 칩격자를 제작하였으며 실험 결과 0.05 nm 구간평균 peak-to-peak GDR이 20ps 이하로 감소하였다.

주제어 : apodization, chirped fiber Bragg gratings, dispersion compensation, fiber grating fabrication

I. 서 론

광섬유 격자(Fiber grating)는 in-fiber 소자이면서 적은 삽입손실, 높은 필터링 효과, 저렴한 가격 등의 장점으로 인해 광통신의 핵심 소자로 주목을 받고 있다.^[1] 특히 선형 칩 광섬유 격자(linearly chirped fiber gratings, LCFGs)는 넓은 대역폭과 선형적인 group delay 특성으로 인해 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) 시스템의 필터와 색분산 보상기 등으로 널리 사용되고 있다. 그러나 광섬유 칩격자의 가장 큰 단점 중의 하나는 Group Delay Ripple(GDR)이 크다는 점이다. GDR이 큰 칩격자 소자를 사용할 경우 광통신 시스템의 성능이 심각하게 저하될 수 있다. GDR은 격자 제작 시스템 자체에 존재하는 시스템 에러와 격자 제조에서 불규칙적으로 발생하는 잡음성 에러에 의해서 생겨난다.^[2-3] 일반 광섬유 칩격자의 경우, 격자의 시작과 끝부분에서 갑작스런 굴절률 변화가 일어나기 때문에 필연적으로 큰 GDR이 발생하게 된다. 이러한 GDR을 줄이면서 group delay의 선형성을 유지하기 위한 방법이 바로 칩 광섬유 격자의 apodization 기술이다.^[2]

칩 광섬유 격자의 apodization 기술의 동작 개념은 광섬유상의 격자 굴절률 변화곡선의 포락선(envelope)을 종모양 형태(예를 들어 Gaussian 형태)로 만들어 시작과 끝의 자연스러운 굴절률 변화를 만들어 내는 것이다.^[2] 이러한 굴절률 변화곡선의 포락선 형태를 apodization 프로파일이라고 하는데, 다양한 프로파일을 적용함으로써 칩격자의 반사 스펙트럼의 형태와 group delay 특성을 다양하게 변화시킬 수 있다.

광섬유 격자 기반의 분산보상기의 경우 요구되는 분산값 $|D_2|$ 은, $|D_2| = 1/(B\Delta\lambda)$ 의 식으로 표현된다. 여기서 B 는 전

송률이고, $\Delta\lambda$ 는 신호의 대역폭이다. 예를 들어 10 Gbits/s 시스템의 경우 0.1 nm 신호 대역폭을 가정했을 때 $|D_2|=1,000$ ps/nm가 된다. 이때, 허용되는 GDR은 다음과 같이 표현될 수 있다^[3].

$$\Delta\tau \ll \Delta\lambda |D_2| = B^{-1} \quad (1)$$

식 (1)에 기초하여, 실용적으로 허용되는 최대 peak-to-peak GDR값은 $\Delta\tau_{\max} = 0.2B^{-1}$ 로 표현된다. 예를 들어 10 Gbits/s 전송 시스템에서 허용되는 최대 GDR 값은 20ps(± 10 ps)임을 알 수 있다.

Apodized 칩 광섬유 격자의 제작 방법은 여러 가지로 알려져 있으나 위상 마스크(phase mask)를 이용한 제작 방법이 가장 널리 쓰인다. 위상 마스크를 이용하는 방법에도 여러 가지 방식이 존재하는데, 격자 회절 효율(diffraction efficiency)을 길이 방향에 따라 조절하여 만든 위상 마스크를 사용하는 방법과 진폭 마스크(amplitude mask)를 함께 사용하여 평균 DC 굴절률 변화량을 일정하게 만들어주는 이중 노출 방식 등이 있다.^[4] 그러나 이러한 방식들은 다양한 형태의 apodization profile을 적용할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 UV 레이저가 위상 마스크를 스캐닝하는 중에, 위상 마스크를 PZT(Piezoelectric transducer)를 이용하여 흔들어 줌으로써 광섬유의 굴절률 변화량을 자유롭게 조절할 수 있도록 하였다.^[5]

이 방법을 사용하면 PZT를 제어하는 컴퓨터 프로그램으로 레이저 스캔 위치에 따른 PZT 진동 진폭을 임의대로 조절할 수 있기 때문에 다양한 형태의 apodization 함수를 적용할 수 있게 된다. 또한 노출되는 UV 빔의 세기(intensity)는 제작 과정 동안 일정하게 유지되므로 이중 노출^[4]을 하지 않고도, 격자 전체를 통해 일정한 DC 굴절률 변화량을 실현할 수 있다.

[†]E-mail: yyghan@kist.re.kr

II. Apodized 선형 칩 광섬유 격자의 모델링

광섬유 칩격자는 광민감성(photosensitivity)을 갖는 광섬유에 UV 빔을 쏘이면 굴절률의 변화를 보이는 현상을 이용하여 광섬유 길이 방향으로 특정한 칩(chirp) 패턴이 부가된 굴절률 변화를 일으킨 것을 말한다. 이때 광섬유에 유도된 1차원 길이 z 방향의 굴절률 변화패턴을 유효 굴절률(effective index) n_{eff} 의 변화량 $\overline{\delta n_{eff}}$ 으로 표현하면 다음과 같다^[6].

$$\overline{\delta n_{eff}}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2)$$

여기서 $\overline{\delta n_{eff}}$ 는 한 격자 주기 당 평균적인 “DC” index 변화율로서 일반적으로 z 의 함수로 나타난다. v 는 격자무늬 가시성(fringe visibility) 값이고, Λ 는 중심 격자 주기(grating period)이고 $\phi(z)$ 는 z 방향의 격자 칩(chirp)을 나타내는 함수이다. 그림 1은 유효 굴절률 변화 그래프의 두 가지 예를 보여준다. 그림 1의 a)는 $\overline{\delta n_{eff}} \neq 0$ 인 Gaussian apodization된 격자의 유효굴절률 변화 그래프이고, b)는 $\overline{\delta n_{eff}} = 0$ 인 Gaussian apodization된 격자의 유효 굴절률 변화 그래프이다. b)에서 $\overline{\delta n_{eff}} = 0$ 이지만 $v \rightarrow \infty$ 일 때 $v \times \overline{\delta n_{eff}}$ 은 유한한 값을 가지고, 이 경우 $v \times \overline{\delta n_{eff}}$ 은 Gaussian 함수가 된다.

다양한 프로파일의 Apodization이 적용된 선형 칩 광섬유 격자의 특성을 분석하기 위해서, 본 논문에서는 광섬유 격자를 통과하는 정방향 모드 신호 $R(z)$ 와 반대방향 모드 신호 $S(z)$ 에 대한 다음과 같은 결합 모드 방정식(Coupled Mode Equations)의 해를 구하였다.^[6]

$$\begin{aligned} \frac{dR(z)}{dz} - j\hat{\sigma}R(z) &= j\kappa S(z) \\ \frac{dS(z)}{dz} + j\hat{\sigma}S(z) &= -j\kappa^* R(z) \end{aligned} \quad (3)$$

이 식에서 $\hat{\sigma}$ 는 “DC” 자기결합계수(self-coupling coefficient)이고, κ 는 “AC” 결합계수(coupling coefficient)이며 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\sigma} = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} v \overline{\delta n_{eff}} \quad (5)$$

여기서 λ_D 는 칩격자의 중심 파장이며, 약한 격자($\overline{\delta n_{eff}} \rightarrow 0$)를 가정할 경우 $\lambda_D = 2n_{eff}\Lambda$ 으로 표현된다. 위 식에서도 알 수 있듯이 $\hat{\sigma}$ 와 κ 는 z 의 함수이다.

식 (3)의 해를 구하기 전에 우리는 약한 격자($\overline{\delta n_{eff}} \rightarrow 0$)를 가정하여 식을 풀기로 한다. 이러한 가정은 본 연구에서 사용한 칩격자 제작방식이 기술적으로 격자 전체 길이에 대해 동일한 UV 빔의 세기를 광섬유에 노출시키기 때문에 유효하다. 즉, 제작되는 광섬유 칩격자는 그림 1의 b)와 같이 “DC” 인덱스 변화값 $\overline{\delta n_{eff}}$ 이 전체 길이에서 동일하게 ‘0’이 되는 유효 굴절률 변화곡선을 나타내도록 제작된다. 단,

“DC” 인덱스 변화값 $\overline{\delta n_{eff}}$ 이 0이 되더라도, $v \rightarrow \infty$ 로 가정하면 $v \times \overline{\delta n_{eff}}$ 을 특정한 유한값으로 나타내어질 수 있다. 이 값 $v \times \overline{\delta n_{eff}}$ 을 우리는 새로운 z 에 관한 함수 $V(z)$ 으로 표현하기로 한다. 이때 “AC” 결합계수 κ 는 $V(z)$ 로 표현될 수 있다.

$$V(z) = v \times \overline{\delta n_{eff}} \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} V(z) \quad (7)$$

$V(z)$ 는 격자무늬 가시성 v 를 포함하고 있으며, 결합 계수를 결정짓는 역할을 하는 함수이다. 결국 $V(z)$ 는 유효 굴절률의 변화량 곡선의 포락선 곡선을 의미하게 되는데 이 함수를 본 논문에서는 apodization 함수로 명명하기로 한다.

선형 칩격자의 경우 칩 함수 $\phi(z)$ 는 다음과 같은 z 에 대한 미분값으로 표현되어 $\hat{\sigma}$ 의 계산에 사용된다.

$$\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} = - \frac{4\pi n_{eff}}{\lambda_D^2} \frac{d\lambda_D}{dz} \quad (8)$$

여기서 $\frac{d\lambda_D}{dz}$ 의 값을 칩률(chirp ratio)이라고 하며 선형 칩격자의 경우 이 값은 상수값이다.

식 (3)의 결합 모드 방정식의 해를 닫힌 형태로 풀어내는 것은 정확한 값을 구할 수 있다는 장점은 있으나 계산 시간이 많이 드는 단점이 있다. 그러나 전달행렬(Transfer Matrix Method, TMM)을 이용하여 칩격자를 충분히 많은 수의 구간(section)으로 나누고 각 구간을 하나의 단주기 브래그 격자로 가정하여 계산하면 충분히 정확한 계산 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 그 계산시간도 현저히 줄일 수 있다.^[4,6]

i 번째 구간의 $R(z)$ 와 $S(z)$ 의 값을 각각 R_i 와 S_i 로 표현하면 TMM에 의해 다음의 식이 성립한다.^[6]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} &= \vec{f}_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} &= \vec{f}_M \cdot \vec{f}_{M-1} \cdots \vec{f}_i \cdots \vec{f}_1 \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

이때, M 은 구간의 총 개수를 의미하고, \vec{f}_i 는 단일 주기 광섬유 브래그 격자의 전달행렬로서 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{f}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i \Delta z) - j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta z) & -j \frac{\kappa_i}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta z) \\ j \frac{\kappa_i}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta z) & \cosh(\gamma_i \Delta z) + j \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta z) \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 $\gamma_i = \sqrt{(\kappa_i^2 - \hat{\sigma}_i^2)}$ 이고, Δz 는 각 구간의 길이이다. 이제 초기 경계 조건을 선택하여 R_0 과 S_0 에 대입하면 전체 광섬유 칩격자에 대한 식 (3)의 해 R_M 과 S_M 의 값을 구할 수 있게 된다. 구해진 R_M 과 S_M 으로부터 칩격자의 반사 스펙트럼(reflectivity spectrum)과 group delay는 다음과 같이 구해진다.

$$\text{Reflectivity [dB]: } r = 10 \log_{10} \left| \frac{S_M}{R_M} \right|^2 \quad (11)$$

$$\text{Group Delay [ps]: } \tau = \frac{d\theta}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (12)$$

단, $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[S_M/R_M]}{\text{Re}[S_M/R_M]} \right)$, $\text{Im}[\]$ 은 허수부 값을, $\text{Re}[\]$ 은 실수부 값을 뜻한다.

식 (7)에서 우리는 "AC" 결합 계수 κ 는 $V(z)$ 로 표현될 수 있다는 것을 설명하였다. 이 $V(z)$ 함수를 "apodization 함수"라고 부르며, 이 함수의 형태에 따라 칩격자의 굴절을 변화 곡선이 결정되면서 apodization 효과를 보여줄 수 있게 된다. Apodization 함수 $V(z)$ 는 다양한 apodization 프로파일에 따라 상이한 형태의 함수로 표현될 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 네 가지 프로파일에 대한 Apodization 결과를 분석해 보았다.^[7]

1) Gaussian profile(변수 : a)

$$V(z) = k \exp \left[-\left(\frac{1}{a} \cdot \frac{z}{L} \right)^2 \right] \quad (13)$$

2) Raised Cosine profile(변수 : b)

$$V(z) = k \left(\cos \left[\frac{\pi}{L} z \right] \right)^b \quad (14)$$

3) Blackman profile(변수 : B)

$$V(z) = k \left(\frac{1 + (1+B) \cos \left[\frac{2\pi}{L} z \right] + B \cos \left[\frac{4\pi}{L} z \right]}{2 + 2B} \right) \quad (15)$$

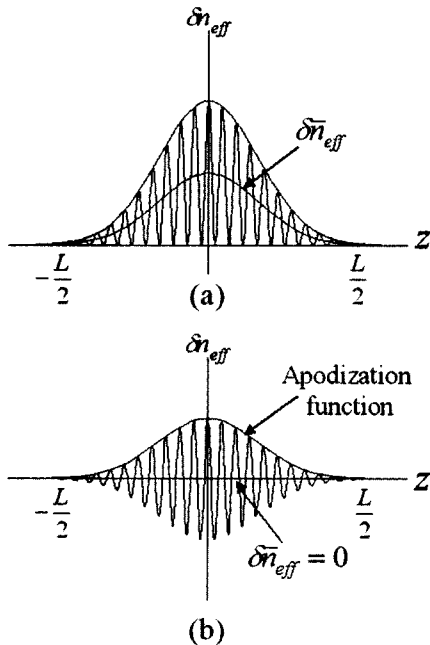


그림 1. Gaussian Apodization된 광섬유 격자의 유효 굴절률 변화 곡선 a) δn_{eff} 이 Gaussian 형태일 때, b) $\delta n_{eff}=0$ 일 때 (굴절률 변화 곡선의 포락선(envelope) 함수를 apodization 함수라 부른다.).

4) Hyperbolic Tangent (Tanh) profile(변수 : a, β)

$$V(z) = k \frac{1}{2} \left(1 + \tanh \left[\beta \left(1 - 2 \left| \frac{2z}{L} \right|^a \right) \right] \right) \quad (16)$$

위의 apodization 함수들은 모두 $(-L/2 \leq z \leq L/2)$ 의 범위에서 정의되는 함수들이고, L 은 칩격자의 길이에 해당한다. 모든 함수에 대해 k 라는 상수가 곱해지는데, 이 값은 실험적으로 구해지는 최대 유효 굴절을 변화값에 해당한다. 또한 각 프로파일에 대해 특정 변수가 존재하여 함수의 형태를 알맞게 조절할 수 있다. 그림 2는 여러 가지 변수값에 대한 각 apodization 프로파일 함수들의 그래프를 보여주고 있다.

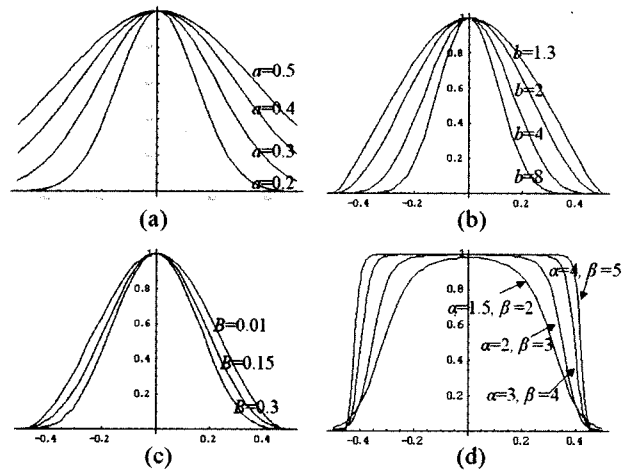


그림 2. 네 가지 apodization 프로파일 함수들의 그래프 a) Gaussian, b) Raised Cosine, c) Blackman, d) Tanh. 각 프로파일별 변수값에 대한 그래프의 변화 패턴을 보여주고 있으며 그래프의 x축과 y축은 각각 $L=1, k=1$ 로 normalize 되었음.

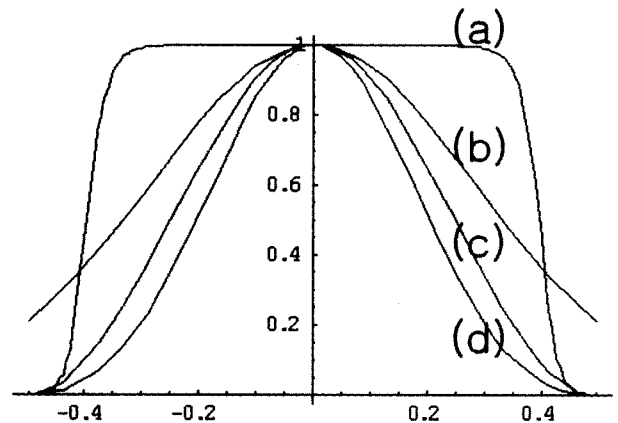


그림 3. 이론적 분석 및 실험에 사용된 네 가지 Apodization 함수의 그래프. a) Tanh($\alpha=3, \beta=4$), b) Gaussian($a=0.4$), c) Raised Cosine($b=2$), d) Blackman($B=0.18$). x축은 $L=1$ 로 normalize 되었음.

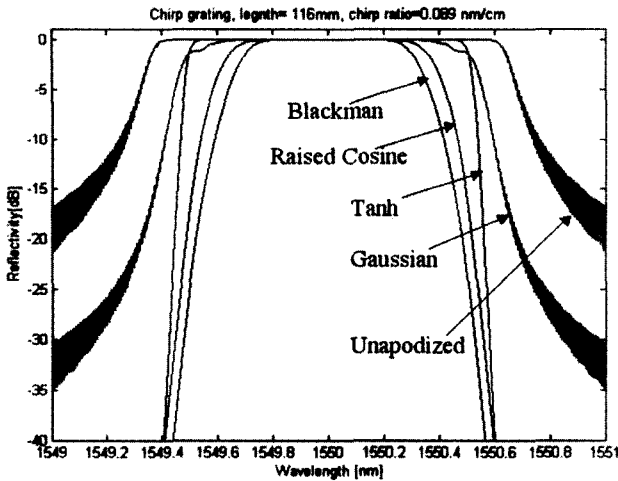


그림 4. 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 이론적인 반사 스펙트럼(칩격자의 길이 $L=116$ mm, chirp ratio = 0.069 nm/cm).

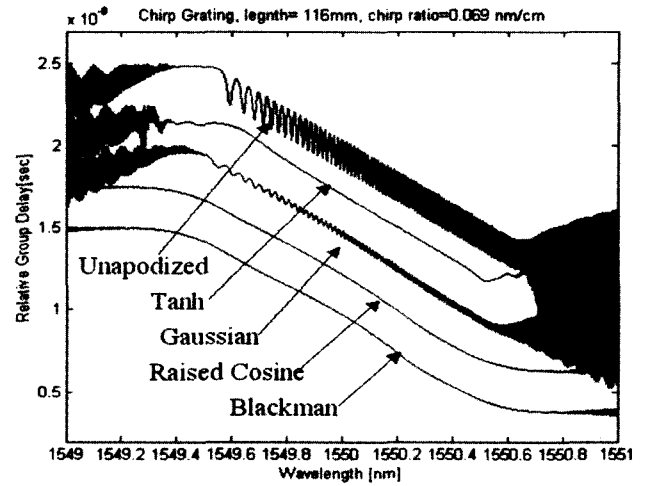


그림 5. 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 이론적인 group delay 특성(칩격자의 길이 $L=116$ mm, chirp ratio = 0.069 nm/cm).

표 1. 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 반사 스펙트럼 대역폭과 sidelobe peak값의 실험값과 이론값의 비교

칩격자 종류	FWHM 대역폭 (실험값/이론값) [nm]	Sidelobe peak값 (실험값/이론값) [dB]
Unapodized	1.14 / 1.34	-10 / -15
Tanh	0.95 / 1.09	-22 / -Inf
Gaussian	0.70 / 1.04	-21 / -25
Raised Cosine	0.62 / 0.79	-26 / -Inf
Blackman	0.53 / 0.70	-27 / -Inf

위의 식 (13)~(16)까지의 apodization 함수 $V(z)$ 를 식 (7)에 적용하면 각 Apodization 프로파일에 대한 반사 스펙트럼과 group delay 특성을 구할 수 있다. 본 논문에서는 프로파일별 특성을 잘 나타내어 주는 변수들을 하나씩 선택하여 각 apodization 함수에 대한 반사 스펙트럼과 group delay 특성을 계산하고 비교 분석하였다. 그림 3은 선택된 네 가지 apodization 함수의 그래프를 보여주고 있다. 그림 3의 a)는 Tanh 프로파일($\alpha=3, \beta=4$), b) Gaussian 프로파일($a=0.4$), c) Raised Cosine 프로파일($b=2$), d) Blackman 프로파일($B=0.18$)의 apodization 함수 그래프이다.

그림 4는 네 가지 apodization과 apodization되지 않은 칩격자에 대한 이론적인 반사 스펙트럼 특성을 식 (11)을 이용하여 계산한 결과 그래프이다. 그림 4에서 보듯이, apodization되지 않은 (unapodized) 칩격자의 반사 스펙트럼에는 -15 dB 이상의 sidelobe가 존재하고 있음을 볼 수 있고, 이러한 sidelobe가 Gaussian apodization의 경우 10 dB 이상 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 나머지 세 가지 apodization, 즉 Tanh, Raised Cosine, Blackman의 반사 스펙트럼에서는 이상적인

경우 sidelobe가 발생하지 않는다. Gaussian의 경우 sidelobe가 존재하는 이유는, apodization 함수가 격자의 처음과 끝에서 0이 아닌 값으로 시작되고 있기 때문이다. 반사 대역폭 (FWHM)을 살펴보면, Unapodized, Tanh, Gaussian, Blackman, Raised Cosine의 순서대로 대역폭이 작아지는 것을 확인 할 수 있다(표 1 참조). 대역폭이 줄어드는 이유는 그림 3의 apodization 함수 그래프에서 볼 수 있듯이, apodization 기술 자체가 격자의 양쪽 끝부분에서 격자가 새겨지는 것을 일정량만큼 방해하고 있기 때문이다. 대략적으로 그림 3의 apodization 함수 그래프의 대역폭의 크기 순으로 그림 4의 반사 스펙트럼의 대역폭 크기가 결정되는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 네 가지 apodization과 apodization되지 않은 칩격자에 대한 이론적인 group delay 특성을 식 (12)를 이용하여 계산한 결과 그래프이다. 그림 5를 살펴보면, unapodized 칩격자의 경우 Group Delay Ripple(GDR)이 peak-to-peak 약 200 ps 정도로 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나 네 가지 apodization의 경우, Gaussian을 제외한 모든 apodization의 GDR이 이상적인 경우 거의 존재하지 않게 되는 것을 볼 수 있다. 다만 Gaussian의 경우 peak-to-peak 약 10 ps의 GDR이 나타나고 있으나, 식 (1)로 계산된 10Gbits/s 전송 시스템의 경우 허용하는 GDR peak-to-peak 20 ps 값을 충분히 만족하고 있다.

이상을 종합해 볼 때, Tanh, Gaussian, Blackman, Raised Cosine 등 네 가지 apodization 프로파일을 광섬유 칩격자에 적용하였을 때 GDR을 현저하게 줄일 수 있어 10Gbits/s 전송 시스템에 대한 분산 보상기로서 충분히 사용될 수 있음을 확인하였다. 또한 네 가지 프로파일 중에 적절한 프로파일을 선택함으로써 원하는 반사 스펙트럼 대역폭을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

III. Apodized 선형 칩 광섬유 격자의 제작 실험 및 분석

II장에서의 이론적 분석을 근거로 실제 apodized 칩격자를 제작하여 그 특성을 이론적인 결과와 비교·분석하고자 한다. Apodization이 적용된 광섬유 칩격자의 제작 시스템은 그림 6과 같이 구성된다. 120 mm 길이의 위상 마스크(phase mask)를 격자가 새겨질 광민감성 광섬유의 부위에 미세한 간격을 주고 평행하게 근접시킨 후, 마스크와 광섬유에 대해 평행하게 움직이는 트랜슬레이터(translator) 위에 고정된 UV 거울에서 반사되는 UV 레이저 빔이 마스크에 정 수직으로 입사하면서 마스크의 전체 길이를 스캔할 수 있도록 구성한다.^[5]

II장의 식 (6)에서 설명한 바와 같이, apodization 함수 $V(z)$ 는 위상 마스크 격자의 가시성(visibility)에 비례하기 때문에 우리는 이러한 가시성을 조절함으로써 원하는 apodization 프로파일을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 PZT를 사용하여 위상 마스크를 빔의 위치에 따라 적절한 진폭과 주기로 흔들어서 줌으로써 위상 마스크의 가시성을 조절하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 위상 마스크의 아래쪽에 PZT(Piezoelectric transducer)를 설치하여 마스크를 광섬유와 평행한 방향으로 흔들어서 줄 수 있도록 구성하였다.

PZT와 빔 트랜슬레이터는 자동으로 조종되도록 제어 컴퓨터에 연결되어 제어 프로그램이 이들을 정밀하게 제어할 수 있도록 하였다. 이렇게 컴퓨터를 통한 빔 이동과 PZT 동작의 정밀 제어가 가능하게 됨으로써 원하는 apodization 프로파일이 적용된 칩격자를 손쉽게 제작할 수 있게 되었다.

PZT가 위상 마스크를 흔들 때 진동함수의 진폭(dithering amplitude)과 진동수(Frequency)를 변화시켜줌으로써 광섬유에서 본 위상 마스크 격자무늬의 가시성(visibility)을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 빔이 위상 마스크를 스캔하는 속도는 일정하게 유지하면서, PZT의 흔들어주는 진폭을 빔 스캐닝 중에 변화시켜 가시성의 적절한 변화를 이끌어 내었다. 다양한 apodization 프로파일을 적용하기 전에, PZT 진동함수의 진폭/진동수와 가시성 사이의 상관관계를 정확하게 실험적으로 얻어내야 하는데, 이 과정의 정확성이 바로 apodization 기술의 성공의 관건이다. 이러한 상관관계를 규정하는 중요

한 요소가 소멸진폭(extinction amplitude)의 결정이다.

소멸 진폭이란, 위상 마스크 격자의 가시성을 완전히 사라지게 만드는 PZT 진동함수의 진폭 크기를 말한다. 이 소멸 진폭은 PZT 진동함수가 sine 형태인가, 톱니모양 형태인가, 또는 직사각형 형태인가에 따라 다르고, 위상 마스크의 격자 주기에 비례한다. 일반적으로 소멸진폭은 실험을 통해 구해지는데, 광섬유에 새겨지는 브래그 격자의 반사 스펙트럼이 완전히 사라지는 때의 진폭으로 결정한다. PZT 진동함수의 진폭이 소멸 진폭보다 작은 경우에는, 위상 마스크 격자무늬의 가시성이 흐드는 진폭 크기에 비례하게 되는데, 우리는 이를 실험적으로 확인하였다. 이러한 상관관계로부터 다양한 apodization 프로파일에 따른 알맞은 PZT 진동 함수를 결정할 수 있게 된다. 본 연구에서는 이러한 진동 함수가 컴퓨터 제어 프로그램에 의해 apodization 프로파일에 맞추어 자동으로 결정도록 하였다.

본 연구에서는 PZT를 sine 함수 형태로 흔들어주는 방법을 택하였다. 톱니모양 형태 또는 직사각형 형태로 PZT를 흔들어서 주게 되면 PZT 동작상의 갑작스런 위치 또는 속도 변화가 발생하여 격자의 위상 오차(phase error)가 발생할 가능성이 커진다. PZT의 성능에 따라 그 정도가 달라지겠지만, 실제 실험 결과 sine 함수 형태로 PZT를 흔들어주는 것이 톱니모양 또는 직사각형 모양의 경우보다 실험적 오차가 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

PZT의 흐드는 양을 칩격자가 새겨지는 중에 빔의 위치에 따라 적절하게 변화시켜주면 원하는 apodization 함수 형태의 apodization이 일어나게 된다. 본 논문에서는 그림 3과 같은 네 가지 apodization 프로파일에 대한 광섬유 선형 칩격자의 apodization 실험을 수행하였으며, 제작된 네 가지 apodized 광섬유 칩격자에 대한 반사 스펙트럼과 group delay 특성을 각각 그림 7과 그림 8과 같이 얻을 수 있었다.

제작된 칩격자의 group delay는 modulation phase shift 방식을 이용하여 측정하였다.^[13] Tunable 레이저 소스로부터 나온 CW 광신호를 특정한 전자신호(참조신호, reference signal)에 맞게 세기 변조(intensity modulation) 시킨 후 제작된 칩격자에 입사시킨다. 이때 반사되어 나온 반사광을 광검출기를 통해 전자신호로 변환한 후 이 신호와 기존의 참조신호를 비교하여 위상차(phase shift)를 측정함으로써 group delay를 구할 수 있다. 본 실험에서 사용한 변조 주파수(modulation frequency)는 780 MHz이다.

그림 7에서 볼 수 있듯이, unapodized 칩격자의 sidelobe는 -10 dB까지 존재하고 있는데 반해서 apodization된 네 가지 칩격자는 모두 -21 dB 이하의 sidelobe를 갖고 있다. 즉 apodization에 의해 광섬유 선형 칩격자 반사 스펙트럼의 sidelobe가 10 dB 이상 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한 그림 4의 이론적인 반사 스펙트럼 대역폭과 비교해 봤을 때, 제작된 네 가지 apodized 칩격자의 반사 스펙트럼 대역폭은 이론적인 결과와 동일한 크기 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 이론적인 대역폭의 크기에 비해서 실제 제작된 칩격자의 대

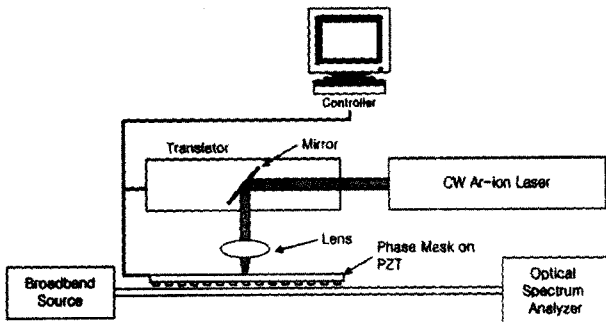


그림 6. Apodized 광섬유 칩격자 제작을 위한 시스템 구성도

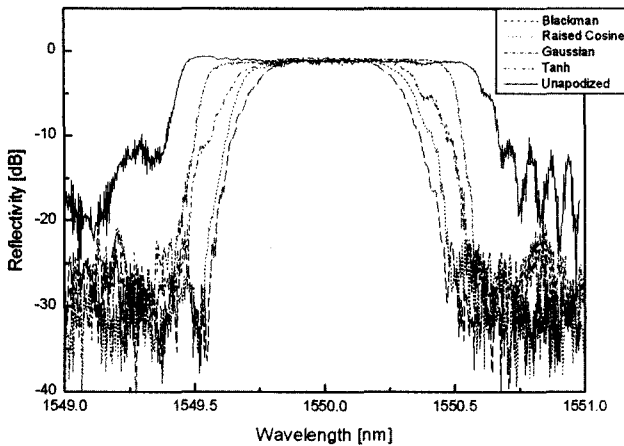


그림 7. 제작된 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 반사 스펙트럼 측정 결과(칩격자의 길이 $L=116$ mm, chirp ratio=0.069 nm/cm) 그래프의 왼쪽부터 순서대로 Blackman, Raised Cosine, Gaussian, Tanh, Unapodized 칩격자의 반사 스펙트럼.

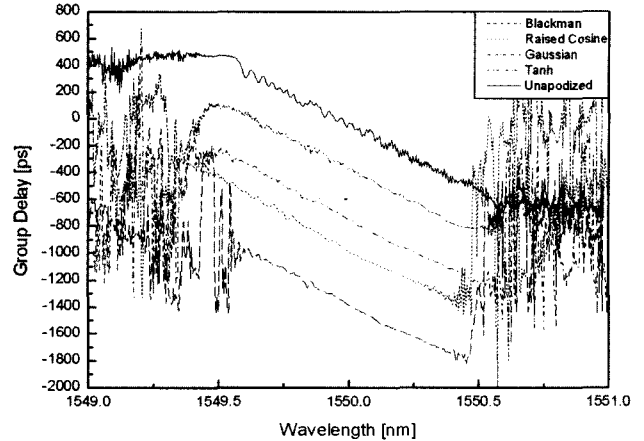


그림 8. 제작된 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 group delay 특성 측정 결과(칩격자의 길이 $L=116$ mm, chirp ratio=0.069 nm/cm) 그래프의 아래쪽부터 순서대로 Blackman, Raised Cosine, Gaussian, Tanh, Unapodized 칩격자의 group delay.

역폭이 최대 0.34 nm에서 최소 0.14 nm 정도만큼 작게 나타나고 있었다. 이는 실제 PZT의 흔들리는 양과 apodization 함수의 상관관계에서의 비선형성, 위상 마스크의 불안전성, 제작 시스템의 정렬(alignment) 오차 등의 시스템 에러, 그리고 제작 시에 발생하는 불규칙 에러 등에 의해 나타나는 것으로 보인다. 이와 같은 대역폭 크기와 sidelobe peak치의 측정값을 표 1에 정리하였다.

그림 8은 제작된 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 상대적인 group delay 특성을 보여준다. Apodization이 적용된 칩격자의 GDR이 unapodized 칩격자에 비해 상당히 감소하였으며 대역폭 내에서 보다 매끄럽게 선형적으로 감소하고 있음을 볼 수 있었다. Apodized 칩격자들의 최대 GDR 크기는 일정 부위에서 크게 나타나지만 이러한 일부 지점에서의 큰 GDR은 제작상의 시스템 에러와 random 에러 등에 의해 발생하는 값으로서 큰 의미를 지니지 못한다. 즉 전체적인 group delay 특성의 좋고 나쁨을 판단하는 데에는 최대 GDR 값보다는 일정 구간 동안의 평균 GDR 값을 측정하여 비교하는 것이 필요할 것이다. 표 2에서는 0.05 nm 구간 동안의 평균 GDR 값을 측정하여 그중 최대값을 기록하였다. 이때, Gaussian과 Blackman의 0.05 nm 구간 평균 GDR의 최대값이 각각 16 ps와 18 ps로 20 ps 이하로 측정되었다. Raised Cosine의 경우는 32 ps로 약간 높게 측정되었으며, Tanh의 경우 52 ps로 비교적 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. Unapodized 칩격자의 경우 0.05 nm 구간 평균 GDR는 비교적 일정하게 나타났으며 최대 154 ps 값을 나타내었다. 이 값은 이론적인 unapodized 칩격자의 GDR 값 200ps보다 적게 나타난 것인데, 이는 측정 오차를 비롯하여 격자 제작 시스템의 불안전성에 의해 일부 apodization 효과가 나타난 것으로 생각해 볼 수 있을 것이다.

표 2. 네 가지 apodized 칩격자와 unapodized 칩격자의 Group Delay Ripple(GDR)의 0.05 nm 구간 평균의 최대값의 실험값과 이론값의 비교

칩격자 종류	최대 peak-to-peak GDR (실험값/이론값) [ps]
Unapodized	154 / 200
Tanh	52 / 0
Gaussian	16 / 10
Raised Cosine	32 / 0
Blackman	18 / 0

IV. 결 론

본 논문에서는 초고속 광통신망에서의 색분산 보상을 위해 사용될 선형 칩 광섬유 격자의 Group Delay Ripple(GDR)을 줄이기 위한 방법, 즉 apodization 기법에 대해서 연구하였다. 이를 위해 위상 마스크를 이용한 빔 스캐닝 방식의 칩격자 제작 시스템에 PZT를 첨가하여 위상 마스크의 가시성을 정밀하게 제어하는 시스템을 구현함으로써, 컴퓨터로 제어되는 정밀하고 유연성 있는 apodization 기술을 획득하였다. 또한, 이를 적용한 칩 격자를 직접 제작, 이론적인 결과와 비교 분석하였으며, 다양한 apodization 프로파일을 적용하여 이들을 비교 분석함으로써, 10 Gbits/s 이상의 초고속 광통신망의 색분산 보상을 위한 적용 가능성을 탐구하였다.

연구 결과, 제작된 apodization된 선형 칩격자의 0.05 nm 구간 평균 GDR 크기를 20 ps 이하로 줄일 수 있었다. 20 ps 이하 크기의 GDR은 10 Gbits/s 전송 시스템의 분산 보상기에 적용될 수 있는 적절한 크기이다. Apodized 광섬유 칩격자의 제작은 위상 마스크를 PZT에 달아서 흔들어 줌으로써

빔의 가시성(*beam visibility*)을 조절하는 기법을 사용하였으며, 컴퓨터 프로그램으로 PZT의 흔들리는 크기를 빔 위치에 따라 적절하게 조절할 수 있도록 함으로써 다양한 apodization 프로파일을 적용할 수 있도록 하였다. 네 가지 apodization 프로파일, 즉 Gaussian, Raised Cosine, Blackman, Hyperbolic Tangent 등을 적용하여 칩격자의 apodization을 제작하였으며, 각 칩격자의 측정된 반사 스펙트럼과 group delay 그래프를 이론적인 값과 비교 분석하였다.

Apodized 선형 칩 광섬유 격자의 제작은 제작 시 발생하는 시스템 에러와 불규칙 에러 등에 영향을 받는다. 이러한 에러를 줄이기 위해서는 제작 시스템의 정밀한 정렬(*alignment*) 및 셋업, 외부 잡음 유입 차단, 위상 마스크의 완전성 확보, 그리고 정밀한 PZT 및 빔 스캐닝 제어가 필요할 것이다. 앞으로 이러한 에러를 줄이는 방법에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보이며, 더 향상된 제작 시스템이 갖춰질 경우, 40 Gbits/s 이상의 초고속 전송 시스템의 색분산 보상기에 적용할 수 있는 선형 칩 광섬유 격자의 제작도 가능할 것으로 본다.

참고문헌

- [1] P. Fernandez, F. Alonso, J. Aguado, I. Miguel, F. Gonzalez, J. Blas, J. Duran, R. Lorenzo, E. Abril and M. Lopez, "Simulation and Design Tool for Spectral Characterization of Fiber Bragg Gratings," In ICTON 2002, Warsaw, Poland, pp. 57-60, Apr. 2002.
- [2] B. Malo, S. Theriault, D.C. Johnson, F. Bilodeau, J. Albert and K.O. Hill, "Apodised in-fibre Bragg grating reflectors photoimprinted using a phase mask," *Electron. Lett.* vol. 31, no. 3, pp. 223-225, 1995.
- [3] A.V. Buryak and D.Y. Stepanov, "Correction of Systematic Errors in the Fabrication of Fiber Bragg Gratings," *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 13, pp. 1099-1101, July 2002.
- [4] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Academic Press, San Diego, USA, 1999), pp. 195-226.
- [5] M. Cole, W.H. Loh, R.I. Laming, M.N. Zervas and S. Barcelos, "Moving fibre/phase mask-scanning beam technique for enhanced flexibility in producing fibre gratings with a uniform phase mask," *Electron. Lett.* vol. 31, no. 17, pp. 92-94, 1995.
- [6] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *J. of Lightwave Technology*. vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, Aug. 1997.
- [7] K. Ennser, M.N. Zervas and R.I. Laming, "Optimization of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Optical Communications," *J. of Quantum Electron*, vol. 34, no. 5, pp. 770-778, May 1998.
- [8] D. Pastor, J. Capmany, D. Ortega, V. Tatay and J. Maru, "Design of Apodized Linearly Chirped Fiber Gratings for Dispersion Compensation," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 11, pp. 2581-2588, Nov. 1996.
- [9] M. Zervas, K. Ennser and R.I. Laming, "Design of Apodized Linearly-Chirped Fiber Gratings for Optical Communications," In *22nd ECOC '96*, Oslo, Norway, pp. 3.223-3.236, 1996.
- [10] M. Sumetsky, P.I. Reyes, P.S. Westbrook, N.M. Litchinitser and B.J. Eggleton, "Group-delay ripple correction in chirped fiber Bragg gratings," *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 10, pp. 777-779, May 2003.
- [11] H. Singh and M. Zippin, "Apodized fiber Bragg gratings for DWDM applications using uniform phase mask," In *ECOC '98*, Madrid, Spain, pp. 189-190, Sep. 1998.
- [12] M.J.N. Lima, A.L.J. Teixeira and J.R.F. da Rocha, "Optimization of apodized fiber grating filters for WDM systems," In *LEOS '99*, vol. 2, pp. 876-877, Nov. 1999.
- [13] D. Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*, (Prentice Hall PTR, 1st ed. USA, 1998), pp. 482-485.

Apodization of Linearly Chirped Fiber Gratings for Dispersion Compensation

Je-Hyeong Bahk, Sun-Min Choi, Young-Geun Han[†], Sang-Hyuck Kim, and Sang Bae Lee

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, KOREA

[†]*e-mail : yyghan@kist.re.kr*

(Received December 19, 2003, Revised manuscript April 14, 2004)

We theoretically and experimentally investigate the effect of apodization on the transmission characteristics of linearly chirped fiber Bragg gratings(CFBGs). Based on the UV beam scanning method along a phase mask, we fabricated several apodized CFBGs with different apodization profiles such as Gaussian, Raised-cosine, Blackman, and Hyperbolic tangent. During the UV beam scanning, the phase mask is dithered by a PZT(Piezoelectric transducer) which is precisely controlled by a computer program so that the apodization profiles can be flexibly applied to the grating. We measured the reflection spectra and group delay characteristics of CFBGs with the different apodization profiles, and compared them according to their properties such as reflectivity, sidelobes, and group delay ripple (GDR). The peak-to-peak of GDR could be suppressed to less than 20 ps.

OCIS Codes : 050.2770, 060.2340, 220.1230, 260.2030.