

論文99-36D-5-10

# 광섬유 격자를 이용한 재순환 광섬유 지연선로 필터

## (Optical Fiber Delay-Line Filter with Recirculating Loop Structure Using a Fiber Grating)

金聖哲\*, 權瑞遠\*\*, 李相培\*\*, 崔相三\*\*, 李竝浩\*

(Sungchul Kim, Seo Won Kwon, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi, and Byoungho Lee)

### 요 약

본 논문에서 새로운 구조의 재순환 광섬유 지연선로 필터를 제안한다. 필터의 구조는 재순환 광섬유 루프에 광섬유 격자를 부분 반사거울로 사용하며, 이를 통해 새로운 필터의 주파수 응답을 얻을 수 있음을 보였다. 필터에서 사용된 광결합기의 결합계수와 광섬유 격자의 반사율, 광증폭기의 이득 등의 필터 변수를 조절함으로써 필터의 주파수 응답을 조절할 수 있음을 이론적으로 계산하였고 실험을 통하여 증명하였다.

### Abstract

We propose a new recirculating fiber delay-line filter structure. In proposed system, we insert a fiber Bragg grating(FBG) into a recirculating fiber delay line and it operates as a partially reflection mirror. Therefore, the transfer function of the system is given by the recirculating delay output part and the mutiple-reflected output part due to a FBG. By adjusting the parameters such as coupling coefficient, reflectivity of FBG, and gain, we can make the system operate in various filter.

### I. 서 론

광섬유 지연선로는 위상 배열 안테나(phased array antenna)<sup>[1]</sup>, 광메모리<sup>[2]</sup>, 정합필터(matched filter)<sup>[3]</sup>, 시분할다중화(time division multiple access)<sup>[4]</sup> 등에 이용되어 왔다. 특히 광섬유 지연선로를 이용한 광필터는 고속 대용량의 신호처리가 가능하고 전자과 장애의 영향을 받지 않는 장점으로 인해 많은 연구가

진행되고 있다<sup>[5-8]</sup>. 광섬유 지연선로 필터는 RF (radio frequency), 마이크로웨이브(microwave) 주파수 대역의 필터, 상관기(correlation), 콘벌루션(convolution), 정합필터(matched filter) 등에 응용이 되었다. 또한 광섬유 브래그 격자를 반사 거울로 사용하여 시간 지연을 조절한 광섬유 필터가 제안되었다<sup>[9,10]</sup>. 이러한 필터는 사용된 브래그 격자와 같은 수량의 시간 지연 소자를 갖게 되어 유한한 임펄스 응답(finite impulse response)을 나타내는 transverse 형태이다.

따라서 많은 개수의 시간 지연 소자를 가지는 필터가 필요하게 되었고, 반사율이 다른 두 개의 브래그 격자를 사용한 무한한 임펄스 응답(infinite impulse response)을 갖는 필터가 최근에 발표되었다<sup>[11]</sup>. 본 논문에서는 한 개의 브래그 격자를 사용하여 무한한 임펄스 응답을 가지는 재순환 광섬유 지연선로 필터를 제안한다<sup>[12,13]</sup>. 이 필터는 재순환 형태의 필터

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學部  
(School of Electrical Engineering, Seiu National Institute)

\*\* 正會員, 韓國科學技術研究院 光技術센터  
(SPotonics Research Cetner, Korea In stitute of Science and Technogy)

※ 본 연구는 과학기술부의 미래원천기술개발사업의 지원에 의한 것입니다. (97-NF-02-14-a-01)

接受日字:1999年2月2日, 수정완료일:1999年3月23日

로서는 처음으로 광섬유 브래그 격자를 사용하였고 이로 인해 기존의 필터가 얻지 못한 새로운 필터 특성을 지니고 있다. 즉, 기존의 광섬유 지연선로 필터는 필터 특성이 저주파 영역에서만 피크(peak)가 존재하지만, 본 논문에서 제안된 필터는 고주파 피크도 동시에 존재한다. 고주파 영역에서 피크를 갖기 위해서는 필터의 전달함수에서 음수의 값을 갖는 pole이 존재해야만 한다.

이를 위해 기존에 제안된 방법은 광-전 변환에 의해 전기적으로 pole 값을 음수로 만들었지만, 본 논문에서 제안된 방법은 광-전 변환이 없이 광학적으로 구현할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 기존의 필터에 비해 새로운 필터 변수인 광섬유 브래그 격자의 반사율을 도입함으로써 다양한 필터의 특성을 얻을 수 있었다.

II. 이론

광섬유 지연선로 필터는 디지털 필터로서 광신호의 특정 주파수 영역을 통과시키거나 걸러낼 때 사용된다. 광섬유 지연선로 필터는 일반적으로 주파수 응답 특성에 따라 재순환(recirculation) 구조와 transverse 구조로 나눌 수 있다.

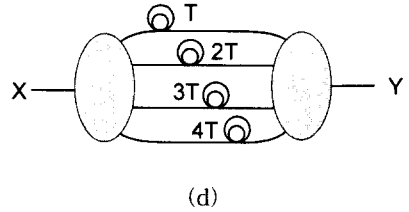
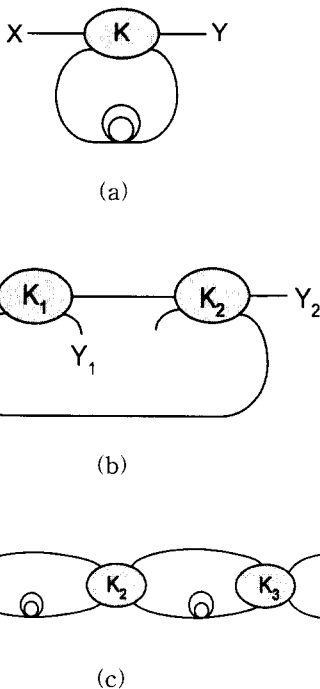


그림 1. 다양한 형태의 광섬유 지연선로 필터 (a) (b) 재순환 구조, (c) (d) transverse 구조  
 Fig. 1. Various optical fiber delay-line filters (a) (b) recirculating structures, (c) (d) transverse structures.

그림 1 (a), (b)는 재순환 구조를 나타내고, 이러한 구조에서 임펄스 응답은 손실과 광검출기의 최저 입력 파워를 고려하지 않는다면 무한한 펄스가 나오게 된다. 그리고 (c), (d)는 transverse 구조인데 이 구조에서 임펄스 응답은 광섬유 지연선로의 개수 만큼의 펄스가 나오게 된다. 본 연구에서는 그림 1 (a)의 구조에 광섬유 격자를 첨가하여 새로운 특성을 갖도록 하였고 구조는 그림 2와 같다.

제안된 광섬유 필터는 기존에 많이 사용된 재순환 광섬유 지연선로 구조에 광섬유 브래그 격자를 첨가하여 새로운 필터 특성을 가지도록 하였다. 광섬유 지연선로 필터는 선형 필터(linear filter)이므로 필터의 특성을 알기 위해서는 임펄스(impulse)의 입력에 대한 필터의 응답인 임펄스 응답(impulse response)과 주파수 응답(frequency response)을 알아야 할 필요가 있다.

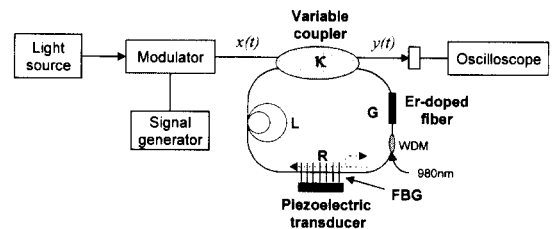


그림 2. 제안된 새로운 구조의 광섬유 지연선로 필터  
 Fig. 2. Proposed recirculating fiber delay-line filter with a fiber grating.

그림 2는 제안된 광섬유 필터의 기본 구조이며, 본 실험에서는 그림 2의 구조와 같이 방향성 결합기와 광섬유 브래그 격자(FBG)를 사용하였다. 광섬유 격자는 광섬유 루프(loop) 내에 삽입이 되어 부분 반사거울의 역할을 하게 되므로 광섬유 격자의 반사율은 1보다 작

아야 한다. Er 첨가 광섬유는 광손실을 보상하기 위한 것이고, piezoelectric transducer는 광섬유 격자의 반사율을 조절하기 위한 것이다.

필터의 특성을 알기 위해서는 입력단의 광원을 duty ratio가 매우 큰 값을 갖고 시간폭이 작은 펄스로 만들어, 이를 필터에 입력하여 시간 지연되어 계속해서 나오는 펄스들을 광검출기로 측정하여 임펄스 응답을 얻는다. 또한 펄스열을 푸리에 변환하여 주파수 응답을 얻어 제작된 필터의 특성을 확인할 수 있다. 제안된 필터의 특성을 확인하고 원하는 필터 특성을 얻기 위해서 필터의 여러 변수들(방향성 결합기의 결합계수, 광섬유 격자의 반사율, Er 첨가 광섬유의 이득)에 따른 필터의 주파수 응답을 계산해 보았다. 그림 3은 필터의 주파수 응답을 계산하기 위해 그림 2의 구조를 바탕으로 한 개략도이다.

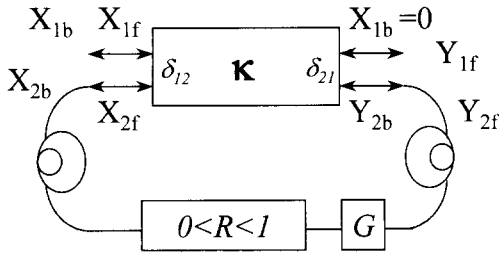


그림 3. 주파수 응답을 계산하기 위한 개략도  
Fig. 3. Block diagram to calculate the frequency response.

그림 3에서 방향성 결합기의 입력과 출력의 관계를 아래의 식 (1)로 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 Y_{1f} &= \delta_{12}(1-\kappa)X_{1f} + \delta_{12}\kappa X_{2f} \\
 Y_{2f} &= \delta_{12}\kappa X_{1f} + \delta_{12}(1-\kappa)X_{2f} \\
 Y_{2f} &= G(1-R)z^{-1}Y_{2f} + Rz^{-1}X_{2b} \\
 X_{2b} &= \delta_{21}(1-\kappa)Y_{2b} \\
 Y_{2b} &= G(1-R)z^{-1}X_{2b} + G^2Rz^{-1}Y_{2f}
 \end{aligned} \tag{1}$$

위의 식 (1)에서  $\kappa$ 는 방향성 결합기의 결합계수,  $G$ 는 Er 첨가 광섬유의 이득,  $R$ 은 광섬유 격자의 반사율,  $\delta_{12}$ ,  $\delta_{21}$ 는 방향성 결합기의 입력손실을 나타낸다. 그리고 광섬유 루프로 인한 광손실은 무시했다. 식 (1)을 정리하여 주파수 응답을 계산하였고 결과는 식 (2)와 같다.

$$H(z) = M \frac{1-az^{-1}-bz^{-2}}{(1-cz^{-1})(1-dz^{-1})} \tag{2}$$

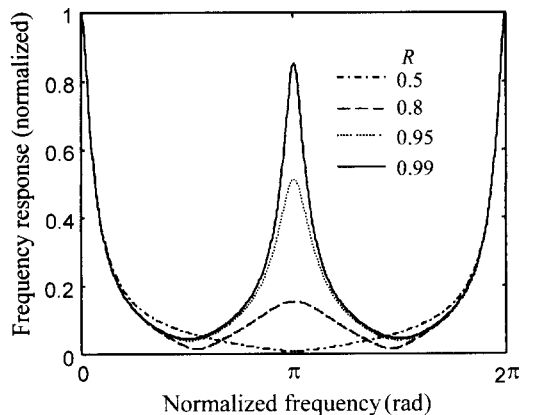
$$\begin{aligned}
 M &= 1-\kappa \\
 a &= \frac{\delta G(1-R)(\kappa^2-4\kappa+2)}{1-\kappa} \\
 b &= \delta^2 G^2(2\kappa-1)(1-2R) \\
 c &= \delta G(1-\kappa) \\
 d &= \delta G(1-\kappa)(1-2R)
 \end{aligned}$$

위의 식에서  $\delta_{12} = \delta_{21} = \delta$ 로 계산하였다. 식 (2)에서 pole의 하나인  $d$  값이  $R > 0.5$  일 때, 음수가 되고 이것은 주파수 특성이 고주파 영역에서 피크를 갖게됨을 의미한다. 이것이 기존의 광섬유 필터에서 구현하지 못한 것이고, 새롭게 제안된 필터에서 얻을 수 있는 필터 특성이다. 한편, 이 필터가 안정적으로 동작하기 위한 조건이 존재한다. 즉, 식 (2)에서 pole의 절댓값이 1보다 작아야 하는 것이고 (식 (3)), 이를 통해 필터 변수 값에 제한이 존재한다. 즉  $\kappa$ 와  $R$  값이 정해져 있을 때, 이득  $G$ 는 다음식 (4)를 만족해야만 한다.

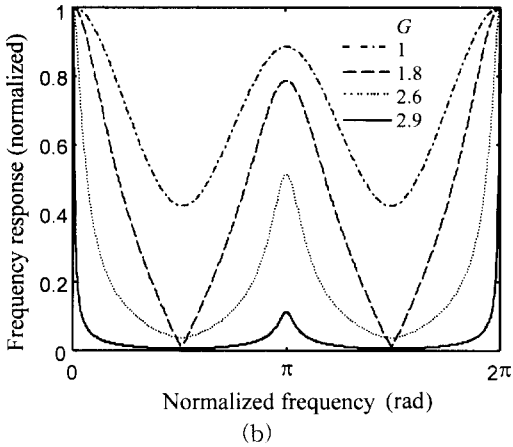
$$|c| \text{ and } |d| < 1 \tag{3}$$

$$G < \min\left(\frac{1}{\delta(1-\kappa)}, \frac{1}{\delta(1-\kappa)|1-2R|}\right) = \frac{1}{\delta(1-\kappa)} \tag{4}$$

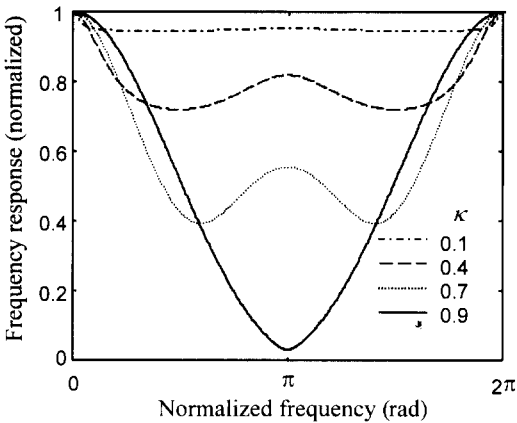
다음의 그림 4는 필터 변수인 결합계수  $\kappa$ , 반사율  $R$ , 이득  $G$ 의 변화에 따른 필터의 주파수 특성을 보여준다. 여기서 결합손실  $\delta = 1$  즉, 손실이 없는 것으로 가정했다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 주파수 응답 특성 (a)  $G = 2.6$ ,  $\kappa = 0.66$  (b)  $R = 0.95$ ,  $\kappa = 0.66$  (c)  $R = 0.8$ ,  $G = 1$   
 Fig. 4. Frequency responses (a)  $G = 2.6$ ,  $\kappa = 0.66$  (b)  $R = 0.95$ ,  $\kappa = 0.66$  (c)  $R = 0.8$ ,  $G = 1$ .

그림 4 (a)에서 보면 특정 필터 변수값에 대해 고주파 피크가 존재함을 알 수 있고, 이것은 실험을 통하여 입증하였다. 또한 변수값을 바꿈에 따라서 고주파 피크의 크기를 조절할 수 있으며, low-pass, all-pass, high-pass 필터 특성을 보여준다.

### III. 실험

본 실험에서는 그림 2의 구조를 기본으로 광섬유 delay-line을 제작하였다. 본 실험에서는 Er 첨가 광섬유를 사용하지 않았으며 본 실험에 사용한 광원으로 써 passive mode-locking된 광섬유 레이저를 제작하여 사용하였고, 이 때의 펄스간의 시간 간격이 4.44  $\mu\text{s}$  (227.3kHz)이고, 펄스폭은 30ns이며 중심파장은

레이저 내부에 장착된 polarization controller를 사용하여 약 3nm정도 변화시킬 수 있었다.

그리고 파장폭은 약 0.4nm~1.2nm 이었고 그림 5와 같은 스펙트럼을 얻었다. 실험에 사용된 방향성 결합기는 가변형으로 외부에서 조절하여 결합계수를 1% - 99% 까지 변화시킬 수 있었으며, 광섬유 격자는 중심 파장이  $\lambda_1 = 1459.3\text{nm}$ 와  $\lambda_2 = 1458.3\text{nm}$ 의 두 개를 사용하였고 중심 파장이 그림 6의  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 에 해당하며, 각각의 투과 스펙트럼을 그림 6에 나타내었다. 그리고 이에 해당하는 광섬유 격자의 반사율은 각각 0.60, 0.75이었다.

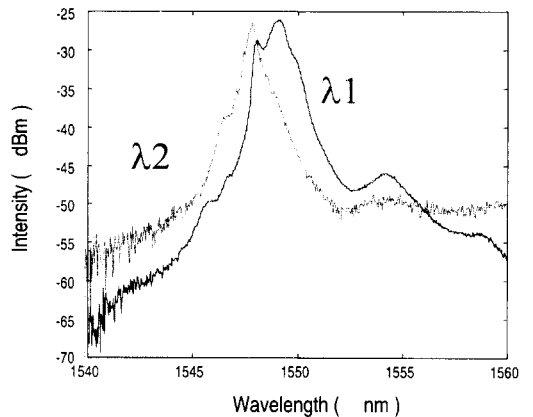
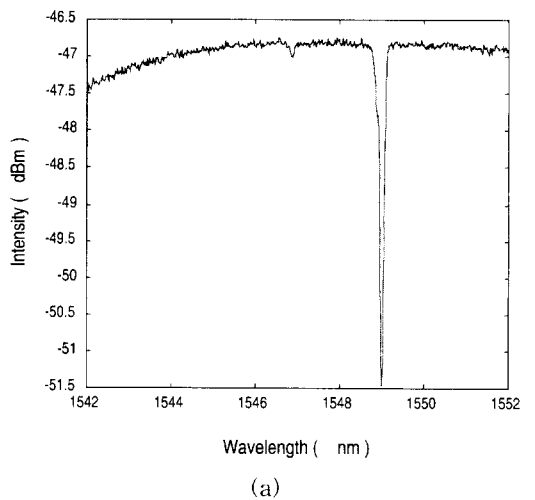


그림 5. 사용된 2개의 펄스 광원의 스펙트럼 ( $\lambda_1 = 1459.3\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 1458.3\text{nm}$ )  
 Fig. 5. Spectrums of the two light sources ( $\lambda_1 = 1459.3\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 1458.3\text{nm}$ ).



(a)

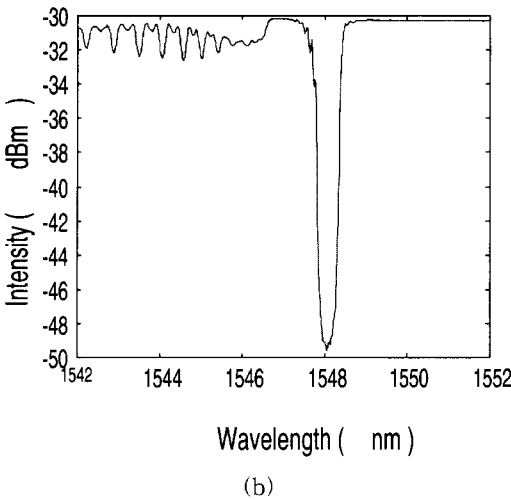


그림 6. 광섬유 격자의 스펙트럼 (a)  $\lambda_1=1459.3\text{nm}$  ( $R=0.60$ ) (b)  $\lambda_2=1458.3\text{nm}$  ( $R=0.75$ )  
 Fig. 6. Spectrums of fiber gratings (a)  $\lambda_1=1459.3\text{nm}$  ( $R=0.60$ ) (b)  $\lambda_2=1458.3\text{nm}$  ( $R=0.75$ ).

실험에서는 광섬유 루프의 길이를 짧게 하면 할수록 필터의 특성이 좋지만 펄스폭이 30ns로 매우 넓은 관계로 간섭을 방지하기 위해 루프의 길이를 37m로 하였다. 이 길이에 대한 필터의 임펄스 응답은 펄스간의 시간간격이  $37\text{m}/(\text{광섬유내에서의 광속도} = \text{약 } 2 \times 10^8 \text{ m/s})$ 로 나타나며, 주파수 응답에서 한 주기는  $1/(\text{펄스시간차})$ 로 나타나게 되는데 실험결과와 일치하였다. 실험에 사용된 파라미터의 값은 다음과 같다. 먼저 방향성 결합기의 결합계수는  $\lambda_1$ 에 대해 각각  $\kappa = 0.11, 0.39, 0.93$ 이고  $R = 0.60$ 이었고,  $\lambda_2$ 에 대해서는  $\kappa = 0.11, 0.37, 0.93, R=0.75$ 이었다.  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에 대해  $\kappa$  값이 조금씩 차이가 나는 이유는 방향성 결합기가 결합계수 조절기의 같은 눈금에 대해서도 광원의 파장이 달라지면 값이 변하기 때문이다. 그러나 값의 차이가 그렇게 크기 않기 때문에 실험에서는 같은 값이라고 생각해도 무방하다. 따라서 실험은 결합계수  $\kappa$ 의 세 값과 광섬유 격자의 반사율  $R$ 의 두 값에 대해 임펄스 응답과 주파수 응답을 측정하였다. 실험 결과는 다음과 같다. 37m의 광섬유 루프에 대한 펄스간의 시간차는 180ns이고, 이에 대한 주파수 응답의 한 주기는 5.56MHz이었다. 또한 측정 결과를 확인하기 위해서 각각의 필터 변수에 대한 실험치와 계산치를 비교하여 시스템의 성능을 입증하였다.

그림 7에서 12는 실험에서 측정된 결과들이다. 그림

에서 계산된 주파수 응답은 측정된 주파수 응답의 한 주기만을 나타낸다.

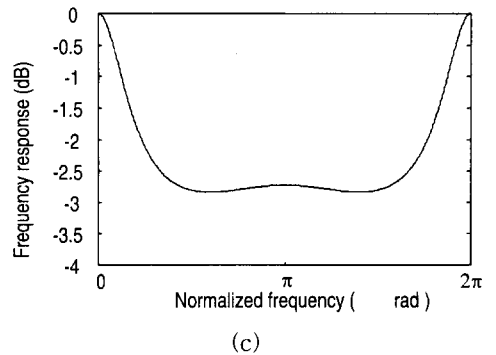
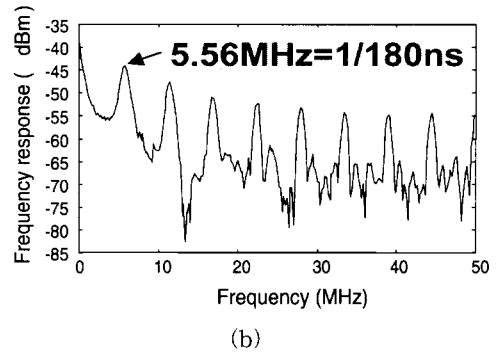
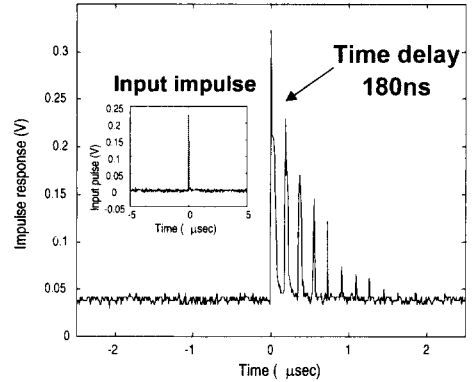


그림 7. 임펄스 응답과 주파수 응답 ( $\kappa = 0.39, R = 0.60$ ) (a) 임펄스 응답 (b) 측정된 주파수 응답 (c) 계산된 주파수 응답  
 Fig. 7. Impulse response와 frequency response ( $\kappa = 0.39, R = 0.60$ ) (a) impulse response (b) measured frequency response (c) calculated frequency response.

그림 7 (a)는 필터 변수  $\kappa=0.39, R=0.60$ 에 대한 임펄스 응답을 나타내며 펄스간의 시간간격이 180ns로서 37m의 광섬유 루프길이를 하나의 펄스가 진행하

는데 소요되는 시간에 해당한다. 그림 7 (b)는 오실로스코프로 측정된 주파수 응답이며, 기본 주파수 5.56MHz의 정수배에 해당하는 주파수에서 피크가 존재함을 알 수 있다. 그림 7 (c)는 필터 변수  $\kappa$ ,  $R$  값에 대해 그림 7 (b)의 기본 주파수의 한 주기에 대한 계산 결과이다. 그림에서 가로축의  $2\pi$ 는 5.56MHz에 해당하며, 가로축은 이 기본 주파수 5.56MHz에 대해서 상대화한 주파수이다. 그림 7의 실험 결과는 low-pass 필터의 특성을 보여준다.

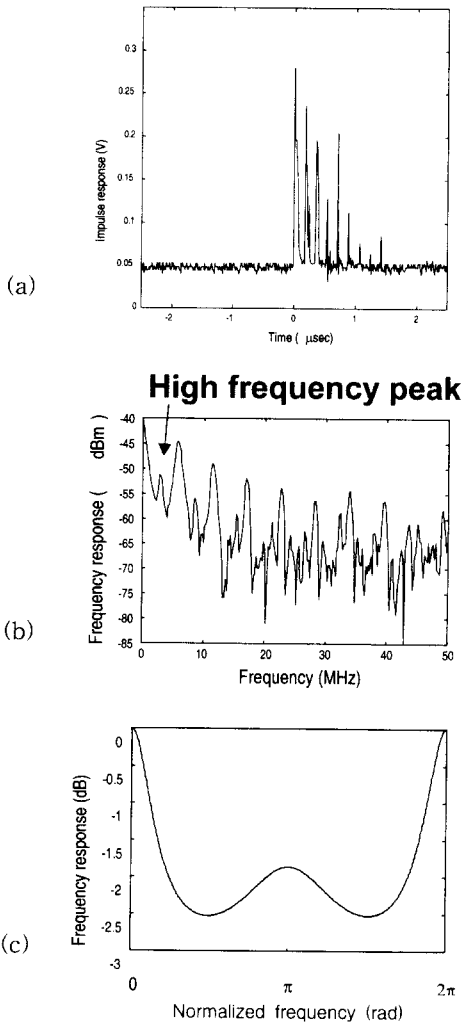


그림 8. 임펄스 응답과 주파수 응답 ( $\kappa = 0.37, R = 0.75$ ) (a) 임펄스 응답 (b) 측정된 주파수 응답 (c) 계산된 주파수 응답

Fig. 8. Impulse response와 frequency response ( $\kappa = 0.37, R = 0.75$ ) (a) impulse response (b) measured frequency response (c) calculated frequency response.

그림 8은 그림 7의 파라미터에서  $R$  값을 0.75로 변화시켰을 때의 결과이며 그림 8 (b)에서 보면 알 수 있듯이 기본 주기 5.56MHz 사이에 또 하나의 peak가 존재하며 그 값은 기본 주파수의 1/2인 2.78MHz이고 그림 8 (c)의 계산 결과와 일치한다. 이것이 디지털 필터에서는 고주파 피크이며 제안된 필터의 새로운 주파수 특성임을 보여주었다.

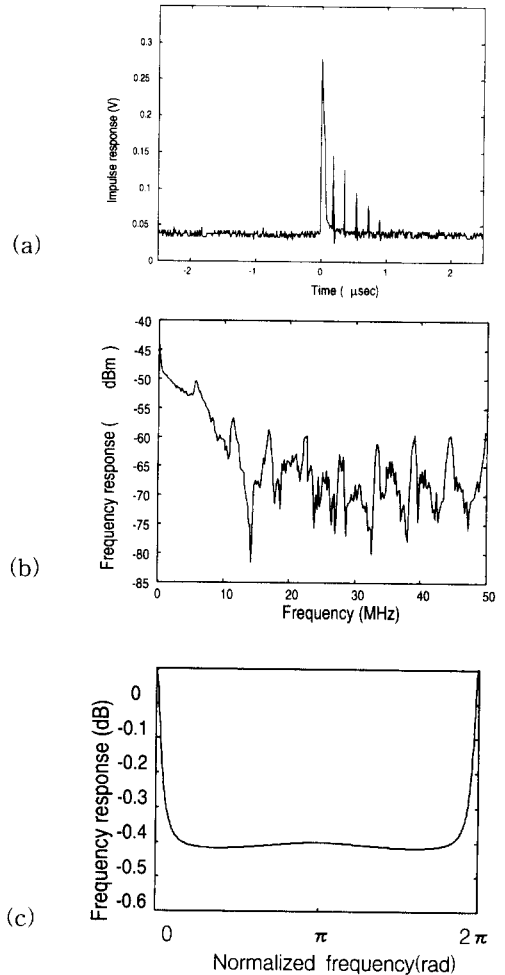


그림 9. 임펄스 응답과 주파수 응답 ( $\kappa = 0.11, R = 0.60$ ) (a) 임펄스 응답 (b) 측정된 주파수 응답 (c) 계산된 주파수 응답

Fig. 9. Impulse response와 frequency response ( $\kappa = 0.11, R = 0.60$ ) (a) impulse response (b) measured frequency response (c) calculated frequency response.

그림 9는 필터 변수  $\kappa = 0.11, R = 0.60$ 에 대한 임펄스 응답과 주파수 응답이며, 주파수 응답에 대한 측정결과와 계산결과를 보면 all-pass 필터의 특성을

보여준다.

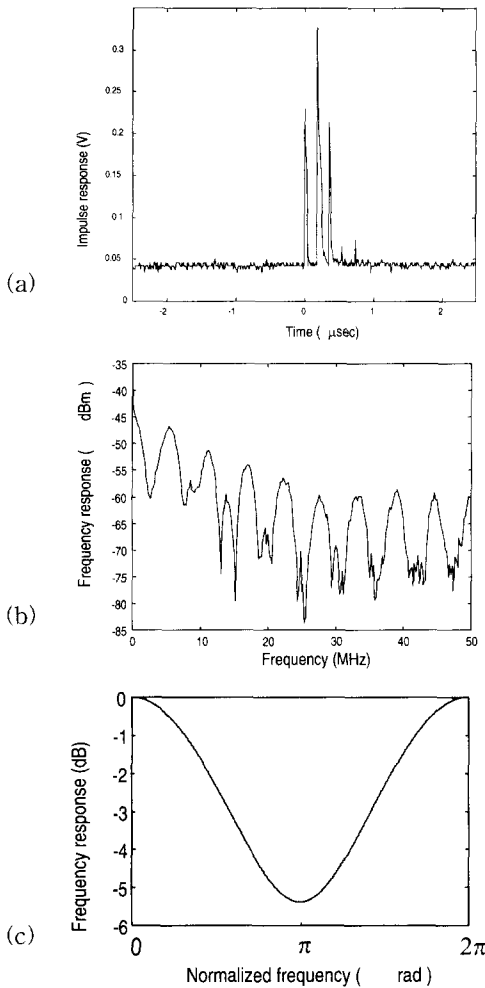


그림 10. 임펄스 응답과 주파수 응답 ( $\kappa = 0.93, R = 0.60$ ) (a) 임펄스 응답 (b) 측정된 주파수 응답 (c) 계산된 주파수 응답

Fig. 10. Impulse response와 frequency response ( $\kappa = 0.93, R = 0.60$ ) (a) impulse response (b) measured frequency response (c) calculated frequency response.

그림 10은 필터 변수  $\kappa=0.93, R=0.60$ 에 대한 결과이며 주기가 2.78MHz의 정수배에 해당하는 주파수에서 notch가 존재하며 5.56MHz의 정수배에 해당하는 주파수가 투과되는 low-pass 필터특성을 보여준다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자를 이용한 새로운

구조의 재순환 지연선로 필터를 제안하였다. 제안된 필터는 재순환 구조에는 처음으로 광섬유 브래그 격자를 채택하였고, 기존의 광섬유 지연선로 필터가 갖지 못한, 광-전 변환을 사용하지 않고 광학적인 방법으로 고주파 영역에서 피크를 가질 수 있음을 이론적으로 예측하였고, 실험을 통하여 확인하였다. 제안된 광섬유 필터에서 방향성 결합기의 결합계수, 브래그 격자의 반사율 등의 필터 파라미터를 변화시켜가면서 실험을 수행하여 여러가지 필터 특성을 보여주었다. 또한, 필터구조에서 Er 첨가 광섬유를 사용하면 광손실을 보상하여 주파수응답 특성을 개선할 수 있으며, 광원의 펄스폭을 1ns이하로 낮추고, 광섬유 지연선로의 길이를 수십 cm로 줄이면, 100MHz - 수 GHz 대역의 필터 개발이 가능하다.

#### 참고 문헌

- [ 1 ] A. Molony, C. Edge, and I. Bennion, "Fiber grating time delay element for phased array antennas," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 17, pp. 1458-1486, 1995.
- [ 2 ] T. J. Soukup, R. J. Feuerstein, and V. P. Heuring, "Implementation of a fiber-optic delay-line memory," *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 7, pp. 3233-3240, 1992.
- [ 3 ] M. Tur, J. W. Goodman, B. Moslehi, J. E. Bowers, and H. J. Shaw, "Fiber-optic signal processing with applications to matrix-vector multiplication and lattice filtering," *Opt. Lett.*, vol. 7, pp. 463-465, 1982.
- [ 4 ] P. R. Prucnal, M. A. Santoro, and S. K. Sehgal, "Ultra all-optical synchronous multiple access fiber networks," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. SAC-4, no. 9, pp. 1484-1493, 1986.
- [ 5 ] C. C. Wang, "High-frequency narrow-band single-mode fiber optic transversal filters," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, pp. 77-81, 1987.
- [ 6 ] B. Moslehi, "Fiber-optic filters employing optical amplifiers to provide design flexibility," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 226-228, 1992.

- [ 7 ] J. Capmany and J. Cascon, "Discrete time fiber-optic signal processors using optical amplifiers," J. Lightwave Technol., vol. 12, pp. 106-117, 1994.
- [ 8 ] S. Sales, D. Pastor, J. Capmany, and J. Marti, "Fiber-optic delay-line filters employing fiber loops: signal and noise analysis and experimental characterization," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 12, pp. 2129-2135, 1995.
- [ 9 ] G. A. Ball, W. H. Glenn, and W. W. Morey, "Programmable fiber optic delay line," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, pp. 741-743, 1994.
- [ 10 ] D. B. Hunter and R. A. Minasian, "Reflectively tapped fibre optic transversal filter using in-fiber Bragg gratings," Electron. Lett., vol. 31, pp. 1010-1012, 1995.
- [ 11 ] D. B. Hunter and R. A. Minasian, "Photonic signal processing of microwave signals using active-fiber Bragg-grating-pair structures," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 1463-1466, 1997.
- [ 12 ] 김성철, 이상배, 최상삼, 김상용, 이병호, "광섬유 브래그 격자를 이용한 재순환 지연선로 필터에 관한 연구," 제 5회 광전자공학 학술회의 논문 ThA1-3, pp. 18-19, 1998
- [ 13 ] S. Kim and B. Lee, "Recirculating fiber delay-line filter with a fiber Bragg grating," Appl. Opt., vol. 37, pp. 5469-5471, 1998.

---

 저 자 소 개
 

---

金 聖 哲(準會員) 第 34卷 D編 第 1號 參照

1994년 2월 서울대학교 전기공학 공  
학사, 1996년 2월 서울대학교 전기공  
학 공학석사, 현재 서울대학교 전기공  
학부 박사과정

崔 相 三(正會員) 第 35卷 D編 第 12號 參照

한국과학기술연구원(KIST) 정보전  
자 연구부 광기술센터 책임연구원

權 瑞 遠(正會員) 第 35卷 D編 第 12號 參照

1997년 2월 고려대학교 전자공학 공  
학사, 1999년 2월 고려대학교 전자공  
학 공학석사, 현재 삼성전자 근무

李 竝 浩(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 조교수

李 相 培(正會員) 第 35卷 D編 第 12號 參照

한국과학기술연구원(KIST) 정보전  
자 연구부 광기술센터 책임연구원