

정밀 고분자 광섬유 어레이 제작 연구

조상욱* , 정명영# , 김창석** , 안승호***

Fabrication of Polymeric Optical Fiber Array

Sang Uk Cho* , Myung Yung Jeong# , Chang Seok Kim** and Seung-Ho Ahn***

ABSTRACT

This work is to fabricate a precise optical fiber array using polymer composite for optical interconnection. Optical fiber array has to satisfy low optical loss requirement less than 0.4 dB according to temperature change. For this purpose, design criteria for an optical fiber array was derived. The coefficient of thermal expansion of silica particulate epoxy composites was affected by volume fraction of silica particles. And also, elastic modulus of silica particulate epoxy composites was affected by volume fraction of silica particles. To obtain the coefficients of thermal expansion below $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ and elastic modulus more than 20 GPa , we chose the volume fraction more than 76%.

Using silica particulate epoxy composites with the volume fraction 76%, 8-channel optical fiber array with dimensional tolerances below $1 \mu\text{m}$ was manufactured by transfer molding technique using dies with the uniquely-designed core pin and precisely-machined zirconia ceramic V block. These optical fiber arrays showed optical loss variations within 0.4 dB under thermal cycling test and high temperature test.

Key Words : Fiber array (광섬유 어레이), Particulate epoxy composites (입자 강화 에폭시 복합재료), Optical loss (광손실), Coefficient of thermal expansion (열팽창 계수)

1. 서론

정보화 시대에 요구되는 초고속 멀티미디어 정보 서비스의 대용량 정보전달은 기존 전송용량의 한계를 불러오고 있다. 이러한 요구들에 의해 광통신의 사용이 확대되고 있으며, 그 기반으로 다채널 형태의 광케이블 사용이 증가하고 있다. 또한 광소자도 기존의 단일소자에서 광회로를 가지

는 하이브리드 집적 및 평면형 광소자가 널리 사용되고 있다. 평면형 광소자가 광섬유형에 대하여 가지는 장점으로는, 광섬유를 사용하여 제조하기 어려운 낮은 손실의 소자를 제작할 수 있으며, 광신호 분기 시 연속적인 접속을 할 필요없이 단일 기판상에 복잡한 회로를 가지는 소자를 제작할 수 있어 소형화가 가능하며, 제조 비용을 줄일 수 있다.

접수일: 2006년 11월 3일; 게재승인일: 2007년 2월 21일

* 부산대학교 나노과학기술대학

교신저자: 부산대학교 나노과학기술대학

E-mail: myjeong@pusan.ac.kr Tel. (055) 350-5675

** 부산대학교 나노과학기술대학

*** 한국전자통신연구원

평면형 광소자 기술은 광신호를 그대로 처리할 수 있으나, 신호의 입출력을 위해서는 다채널 광섬유 어레이 기술이 반드시 요구된다. 현재 평면형 광소자용 광섬유의 어레이는 실리콘이나 세라믹 V- 홈을 이용한 광섬유 캐리어로 접속하는 방법, 평면형 광도파로 소자와 동일 기판상에 V- 홈을 식각하여 광섬유를 직접 접속하는 방법 및 정밀한 어댑터를 이용하여 다심 광커넥터를 접속하는 방법 등이 사용되고 있다. 이러한 방법들 중 광섬유 캐리어를 이용한 접속방법이 접속점에서의 손실이 0.3dB 로 손실 수준으로 가장 낮아 널리 사용되고 있다.^{1,3} 그러나 세라믹이나 실리콘 V- 홈을 사용하는 광섬유 어레이는 정밀 가공이 수반되어야 하며, 접점당 접속비용이 높아 상용화에 지장을 초래하고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 고분자 복합재료를 이용하여 광섬유 어레이의 제작과 그 유효성을 평가하고자 한다.⁴

2. 광섬유 어레이 요구조건

2.1 이론적 고찰

평면형 광소자를 통한 광신호는 광섬유를 통하여 전달되며, 광섬유와 광소자 간의 연결수단으로 광섬유 어레이가 사용된다. 단일 모드 평면형 광소자는 미립자 형성공정, 고밀화 공정 및 식각공정을 통하여 필요로 하는 광회로를 형성하며, 코아의 크기는 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 의 정사각형이고, 코아간 피치는 $250 \mu\text{m}$ 를 사용하는 것이 일반적이다. 광섬유 어레이의 성능을 평가하는 데 가장 중요한 요소는 삽입 손실(Insertion Loss)이며, 삽입 손실은 아래와 같이 정의된다.

$$IL = 4.34 \times \left(\frac{L}{\omega}\right)^2 (dB) \quad (1)$$

ω 는 단일모드 광섬유의 모드필드 반경으로 정의에 의하여 $5 \mu\text{m}$ 이며, L 은 광섬유와 광소자간의 축 어긋남을 나타낸다. 일반적으로 허용 삽입손실이 0.3 dB 이며, Fig. 1로부터 $L \leq 1 \mu\text{m}$ 의 조건이 요구된다.

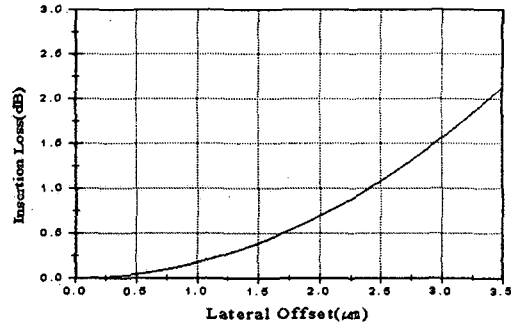


Fig. 1 Lateral offset and insertion loss

2.2 유효 열팽창계수 및 탄성계수

광섬유 어레이는 온도 변화에 대한 치수 안정성을 요구하며, 치수 안정성은 시험 환경에서 광전력의 손실에 의하여 평가된다. 손실의 요인은 평면형 광소자와 광섬유 어레이간 정렬의 호트리집에 의하여 발생하며, 이것은 기본적으로 평면형 광소자와 광섬유 어레이가 서로 다른 재질이기 때문에 발생하는 열팽창 계수의 불일치에 의한다. 또한, 두 구성 요소가 접촉체에 의하여 견고하게 접합되어 있으므로 변형은 두 재료의 탄성계수에도 영향을 받는다. 상용화를 위한 광섬유 어레이는 일반적으로 기판과 유사한 열팽창계수를 가지는 실리카 유리로 제작되며, 환경적 특성을 고려하여 실리카 유리에 V 홈을 형성하여 사용한다. 그러나 광섬유 어레이가 실리카 유리로 제작될 경우, V 홈 정밀도 $1 \mu\text{m}$ 이하로 유지시켜야 하며, 이는 공정 기술적 제약으로 다채널화에 부적합하며, 생산비용이 증가된다. 하지만, 광섬유 어레이를 고분자로 제작하면, 금형에 의해 한번의 공정으로 제작이 가능하여 저비용으로 제작할 수 있다. 광섬유 어레이가 고분자 수지로 형성될 때, 실리카 V 홈 구조의 공정 시 문제를 극복할 수 있어 상용화에 있어 대량 생산이 가능하다.

그러나 광섬유 어레이용 고분자 재료는 기계적 강도 및 치수 안정성이 뒷받침되어야 한다. 광섬유 어레이가 결합된 평면형 광소자는 $-40^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$ 의 온도 주기에서 안정된 특성을 유지하여야 하지만, 대부분의 경우 온도 변화에 의하여 내부에서 발생하는 응력에 의하여 변위가 발생하여 손실이 증가된다. 이 경우, 발생하는 응력 σ 은 다음과 같은 형태를 취한다.

$$\sigma(T, t) = K \int_{T_1}^{T_2} \bar{E}(T, t) \times \alpha(T) dT \quad (2)$$

K는 상수, T는 온도, t는 시간, α 는 열팽창계수를 나타내며, E 유효 탄성계수(Effective storage modulus)이다. 접합부 영역에서의 응력이 주로 전단에 의하므로, 기하적 적합성에 의하여, 유효 탄성계수를 Inverse rule of mixtures 를 사용하여 정의하면, 유효열팽창계수(Effective thermal expansion coefficient) Δ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta = \frac{(\alpha_A - \alpha_S)}{\left(\frac{E_A}{E_S} + 1\right)} \quad (3)$$

평면형 광소자 접속의 경우, 응력에 의한 변위에 의해 광손실을 유발시키므로 변위 제어가 요구된다. 변위는 Δ 를 선형 열팽창계수로 규정하며, Δ 는 식(3)에서 접합된 두 재료의 탄성계수 및 열팽창 계수에 의하여 정량화될 수 있다.⁵

광섬유 어레이는 온도주기 환경 및 시간에 대하여 안정성이 확보되어야 한다. 광소자가 N 채널일 경우, 피치가 250 μm 이므로 해석이 유효한 최대 거리 (L)는 $L = (N-1) \times 250 \times 10E-6(\text{m})$ 이다. 허용 접속 손실이 0.3 dB 이므로 ($L \leq 1 \mu\text{m}$), 광소자 시험에서 사용되는 온도 변화 $-40^\circ\text{C} \sim +75^\circ\text{C}$ 에서, $\Delta = 2.5 \times 10E-6/^\circ\text{C}$, $E_S = 40\text{GPa}$ 가 온도에 대하여 일정하다고 가정할 경우, 상용 시 가장 널리 사용하는 채널 수 $N=8$ 및 $N=16$ 에서의 광섬유 어레이의 탄성계수와 열팽창계수를 식에 의하여 계산하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 광섬유 어레이에 대한 탄성계수와 열팽창 계수에 관한 관계로부터, 본 연구에서는 8 채널의 광섬유 어레이의 경우 탄성계수 20GPa 이상 열팽창계수 $10 \times 10E-6/^\circ\text{C}$ 이하의 물성 요구조건을 도출하였다.

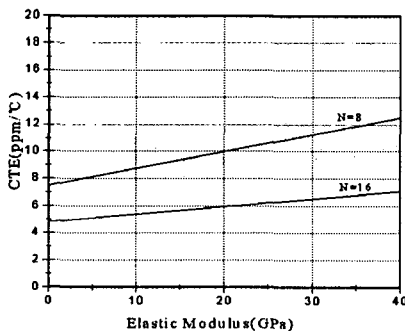


Fig. 2 Required elastic modulus and thermal expansion coefficients of fiber array for N=8 and N=16

3. 광섬유 어레이 물성 연구

3.1 입자 강화 에폭시 복합재료의 열팽창계수

복합재료에 있어 에폭시와 실리카 입자의 열팽창계수가 다르므로 인해 두 재료가 혼합시 온도 상승에 따른 열응력의 불일치가 두 재료의 계면에서 필연적으로 발생된다. 실리카 미립자 강화 에폭시 복합재료의 열팽창은 부피분률에 가장 큰 영향을 받으므로 이를 기반으로 실험을 수행하여 Fig. 3의 결과를 얻었다.

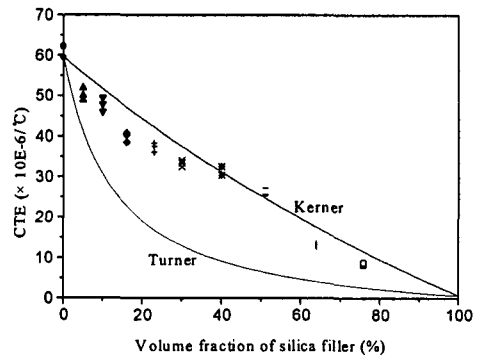


Fig. 3 Variations of CTE of silica particulate epoxy versus volume fraction

실험결과에 의하면, 열팽창계수는 실리카의 부피분률이 높을수록 현저하게 낮아지므로 부피분률을 제어하는 것이 가장 효율적이며, 실리카 미립자의 부피분률에 의한 강화 효과는 실험적으로 선형성을 나타내고 있다.

열팽창계수 $10 \times 10E-6/^\circ\text{C}$ 이하를 만족하는 실리카의 부피분률은 76% 이상이므로, 광소자 접속 용에 사용될 수 있는 광섬유 어레이의 실리카 부피분률 하한값을 76%로 설정하였다.

3.2 입자 강화 에폭시 복합재료의 탄성계수

실리카 미립자 강화 에폭시 복합재료의 탄성계수는 실리카 미립자의 부피분률, 에폭시 수지의 상 등에 의하여 결정된다. 따라서, 탄성계수는 이를 기반으로 실험을 수행 하였다. 탄성계수의 부피분률은 열팽창계수실험에 의해 결정된 76%의 시편과 비교를 위해 64%의 시편을 사용하여 $40^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 탄성계수 실험을 수행 하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

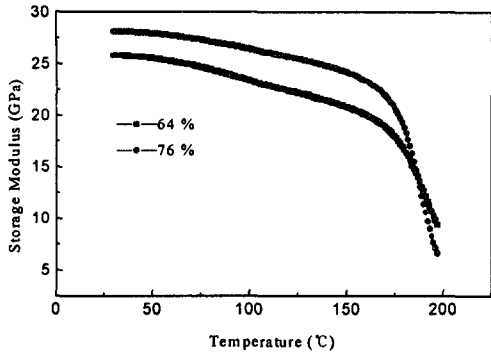


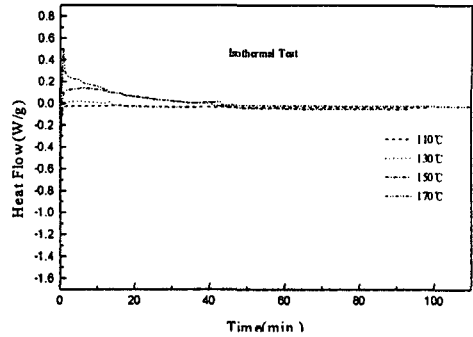
Fig. 4 DMA results as a function of silica filler volume fraction of 64 and 76 %

실험결과 Tg 온도 160°C 이상에서 탄성계수는 급격하게 감소하며, Tg 이하에서는 탄성계수가 음의 기울기로 거의 선형적으로 변화하였다. Tg 부근에서 탄성계수는 실리카의 부피분율이 76%인 경우, 64%인 경우에 비하여 급격하게 감소하는 현상을 보이고 있다. 부피분율 76%의 실리카 미립자 복합재료는 탄성계수 20GPa 이상의 조건을 만족하고 있다.

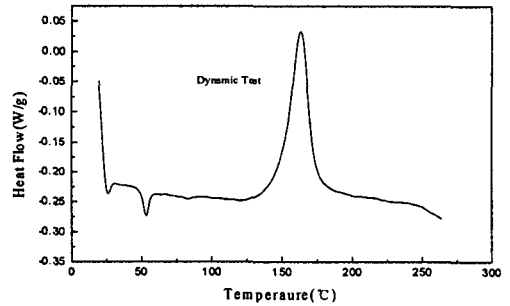
3.3 고분자 성형 조건 연구

고분자 복합재료의 최적성형을 위해서는 성형 온도와 압력 등의 성형 조건을 결정하여야 한다. 성형 온도는 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 실험을 통한 고분자 복합재료의 물성 변형특성을 통해 결정하였으며, 실험결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

실험결과, Fig. 5(b)로부터 최대 발열 반응은 160°C 부근에서 발생함을 알 수 있다. 등은 실험은 110°C, 130°C, 150°C 및 170°C에서 이루어졌으며, 저온(150°C 이하)에서는 반응 속도가 매우 느림을 알 수 있다. 이로 인해 공정시간이 매우 길어지므로 공정온도로 설정하기는 부적합하였다. 고분자 복합재료 소재는 170°C 이상의 온도에서 수 분 이내에 경화가 이루어지므로 최적 성형 온도를 175°C로 설정하였다.



(a) Isothermal test



(b) Dynamic test

Fig. 5 DSC results of silica particulate epoxy at volume fraction 76 %

고분자 복합재료의 성형 압력을 최적화하기 위하여 변수로 열팽창계수의 변화를 TMA (Thermo-mechanical Analysis)를 통해 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 실험결과, 최적 성형 압력을 8MPa로 설정하였다.

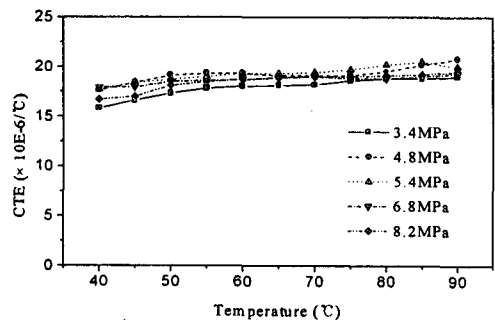


Fig. 6 CTE data of silica particulate epoxy versus temperature at several molding pressures

강도 및 치수 안정성을 고려하여 실리카 미립자가 강화된 에폭시 소재를 사용하여 광섬유 어레이를 제작하였으며, 실험 결과로부터, 성형 온도는 175℃, 성형 압력은 8MPa 결정하였다.

4. 광섬유 어레이 제작 및 특성평가

4.1 광섬유 어레이 제작

광섬유 어레이는 광통신 소자에서 가장 널리 사용될 수 있는 8 채널을 기본으로 제작하였으며, 이는 기존의 리본형 광섬유가 8 심으로 구성되어 있고, 평면형 광도파로 소자가 8 의 배수로 설계되는 경우가 많기 때문이다. 8 채널 광섬유 어레이는 손실 및 광소자와의 호환성을 고려하여, 광섬유 미세 구멍 간 피치를 250 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, 광섬유 홀의 크기를 126 $\mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 결정하였다.

열기계적 특성 분석에 의해 결정된 실리카 미립자가 함유된 에폭시 복합재료를 이용하여 이송 성형 (Transfer Molding)에 의하여 광섬유 어레이를 제작하였다. 광섬유 어레이 제작에서 가장 중요한 요소는 미세구멍의 크기와 피치를 제어하여 광손실을 최소화하도록 정밀하게 제작하는 것이다. 미세구멍의 크기는 정밀하게 제작된 코아 핀 (Core pin)에 의하여 제어하였다. 코아 핀은 정밀 가공성과 굽힘성을 고려하여, 입자 크기가 1.0 μm 이하, 경도 90 인 WC 를 주성분으로 하는 재료로 선정하여 1 μm 의 절입 깊이로 수동으로 이송하면서 가공하였다. Fig. 7 은 제작된 코아 핀을 보여 주고 있다.

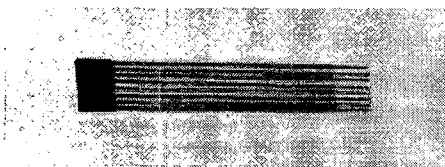


Fig. 7 Core pin

코아 핀은 피치의 정밀도 유지 및 금형에 코아 핀을 용이하게 고정하기 위하여 3 단으로 가공되었다.

두 개의 캐비티(Cavity)를 가지는 금형을 사용하였으며, 그 중 하나는 성형에서의 균형 유지를 위한 보조 (Dummy) 캐비티로 금형은 상하형으로 구성되어 있고, 상하형은 금형이 닫힐 때 4 개의 가이드 핀에 의해 정밀하게 정렬된다. 금형이 닫

힘으로써 내부적으로는 슬라이드 코아가 앞으로 밀려지면서 V 홈에 코아 핀이 장착되어지고, 금형이 완전히 닫힘으로써 코아 핀이 금형 내에 고정되어 진다. 게이트 (Gate)는 광섬유 어레이 앞단 측면으로 하였으며, 형상은 사각형이다. 기공(Air Vent)은 금형의 구조와 코아 핀을 독립적으로 구성하여 상호 보완에 의하여 정밀도를 확보할 수 있도록 하였다. 이러한 V 홈 블록이 금형의 상하형에 각각 장착되어 금형이 닫힐 때, 코아 핀과 V 홈 블록 간의 공간을 최소화하여 성형 시 발생하는 Burr 를 줄였다. 코아 핀을 고정하는 블록은, 코아 핀 조립의 난이성과 코아 핀 각각의 직경 차이로 인하여 고정이 되지 않는 경우를 방지하기 위하여 일체형 코아 핀 고정 블록을 고안하였다. 코아 핀 블록은 금형이 닫힐 때 자동으로 코아 핀이 V 홈에 장착되고 금형이 열릴 때 광섬유 어레이에서 이탈되는 구조로서 제작하였다.

Fig. 8 은 성형된 광섬유 어레이의 미세구멍 치수 분포를 나타낸 것이며, Fig. 9 는 광섬유 어레이 피치 분포를 나타낸 것이다.

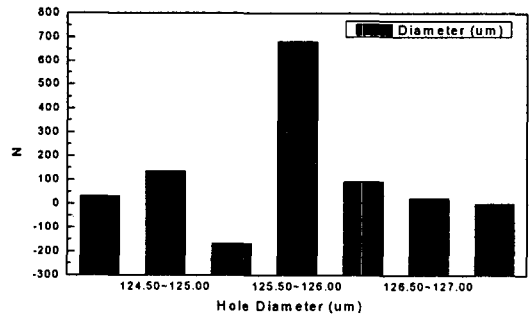


Fig. 8 Measured results of fiber hole diameter

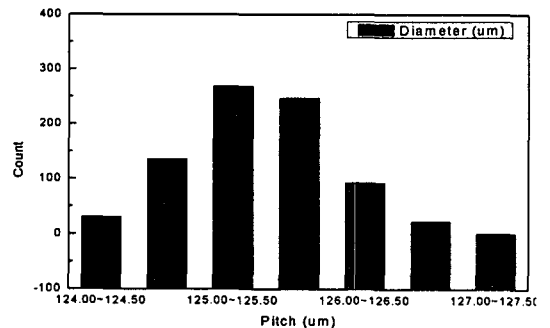


Fig. 9 Measured results of pitch

제작된 100 개의 광섬유 어레이에 대한 광섬유 미세구멍의 정밀도를 측정된 결과 광섬유 미세구멍 지름의 경우, 전체 성형된 800 개 구멍의 평균 지름은 125.4 μm 로 설계 공칭 값 보다는 약간 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 미세구멍 평균지름을 기준으로 볼 때, 100 개 중 미세구멍 지름이 125.5 ~ 126.5 μm 범위 내에 포함되는 것이 42 개였다. 미세구멍 간의 피치 평균은 249.9 μm 로서 모두 설계값인 $250 \pm 1 \mu\text{m}$ 이내에 분포하였다.

4.2 온도주기 및 고온환경에 의한 특성 평가

제작된 광섬유 어레이는, 온도 변화 시 광소자와의 열팽창계수 및 탄성계수의 차이에 의하여 발생하는 변위로 인한 사용환경에서의 유효성을 평가하기 위하여, 온도주기 시험과 고온 시험을 행하여 변위와 직접적인 관련성이 있는 손실 변화량을 측정하였다.

온도주기에 의한 특성 평가 실험은 $-40^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$ 에서 8 시간 12 주기로 삽입손실 변화량 측정하여 Fig. 10 에 나타내었다.

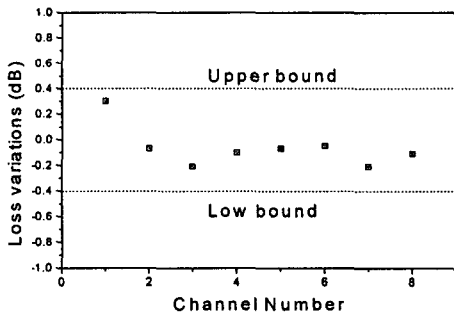


Fig. 10 Variations of insertion loss after temperature cycling test

손실은 최대 0.3 dB 증가하였으나, 이 값은 기준을 만족하는 값이며, 광섬유 어레이가 시험 온도 범위에서 사용 가능함을 보여 주고 있다. 온도주기 시험에서의 손실 변화는 광섬유 어레이와 광소자간의 재료 물성의 차이에 의한 변위 차가 주요인으로 판단되며, 손실의 감소는 초기 정렬이 완전하지 않음에 기인한다. 고온환경에 의한 특성 평가 실험은 80°C 에서 96 시간 동안 삽입손실 변화량을 측정하여 Fig. 11 에 나타내었다.

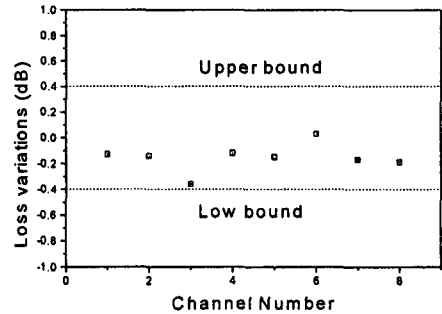


Fig. 11 Variations of insertion loss after high temperature test

손실은 최대 0.36dB 가 변화하였으며, 표준 조건을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 측정은 온도주기 시험과 유사한 조건으로 설정하였으며, 손실 감소는 초기 손실의 존재에 기인하는 것으로 판단 된다.

5. 결론

실리카 입자가 함유된 에폭시 소재를 사용하여 광섬유 어레이를 제작하였으며, 광소자와의 결합 손실 조건으로부터 설계 기준을 도출하였다. 이를 기반으로 하여, 물성 연구를 통하여 고분자 광섬유 어레이 소재로서 열팽창계수 $10 \times 10E-6/^{\circ}\text{C}$ 이하, 탄성계수 20GPa 이상을 만족하는 부피분율 76%의 실리카 미립자 강화복합재료를 제조하였으며, 고분자 어레이 성형 조건으로는 온도는 175°C , 압력은 8Mpa 을 결정하였다.

이송성형 공정을 이용하여, 광섬유 미세구멍은 코아 편을 이용하여 제어하였으며, 광섬유간 피치는 세라믹 V 홈을 이용하여 제어하였다. 100 개의 시제품에 대한 치수 정밀도 측정 결과, 피치는 평균 249.9 μm , 광섬유 미세구멍의 지름은 평균 125.4 μm 로 광섬유 어레이로 충분히 사용할 수 있는 수준이었다. 특성 평가는 $-40^{\circ}\text{C} \sim +75^{\circ}\text{C}$ 온도주기에서 96 시간, 80°C 에서의 고온에서 96 시간 수행하였으며, 시험 결과, 최대 손실 변화량이 0.36 dB 로 기준 0.4 dB 로 기준을 만족하였으며, 이는 저가격 광섬유 어레이로의 대체가 유효함을 보인 것이다.

후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Nagase, R., "Recent Progress on Optical Fiber Connectors for Telecommunication Systems," OECC 2003, pp. 117-118, 2003.
2. De Rosa, M., Carberry, J., Bhagavatula, V., Wagner, K. and Saravanas, C., "High-power performance of single-mode fiber-optic connectors," J. Lightwave Technol., Vol. 20, No. 5, pp. 879-885, 2002.
3. Van Zantvoort, J. H. C., Plukker, S. G. L., Dekkers, E. C. A., Khoe, G. D., Koonen, A. M. J. and De Waardt, H., "Laser Supported Fibre Array Alignment with Individual Fibre Fine Positioning," ECTC 2005, pp. 266-271, 2005.
4. Shin, D. K. and Lee, J. J., "A Study on the Mechanical Behavior of EMC and Thermal Stress Analysis in Plastic Packaging," Advances in Electronic Packaging, Vol. 1, No. 1, pp. 253-259, 1997.
5. Nielsen, L. E. and Lewis, T. B., "Temperature Dependence of Relative Modulus in Filled Polymer Systems," Journal of Polymer Science: Part A-2, Vol. 7, No. 10, pp. 1705-1719, 1969.