

광통신용 비구면 렌즈 초정밀 성형 공정 연구

Study on the Superprecision Glass Molding of Aspherical Lens for Optical Communication Module

장경수¹, 이태호¹, 노태영², 김창석³, 정명영^{3,✉}
Kyung Su Jang¹, Tae Ho Lee¹, Tae Yung Rho², Chang Seok Kim³ and Myung Yung Jeong^{3,✉}

1 부산대학교 나노융합기술학과 (Department of Nano Fusion Technology, Pusan National Univ.)

2 (주)디나옵틱스 (DINA Optics Co., Ltd.)

3 부산대학교 인지메카트로닉스공학과 (Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: myjeong@pusan.ac.kr, Tel: 055-350-5284

Manuscript received: 2009.3.5 / Revised: 2009.7.16 / Accepted: 2009.10.5

Efforts to obtain more efficient coupling of light from a laser diode to a single mode fiber have continued for various applications such as links for optical fiber communication systems. In TO-can package, configuration of optimized aspherical lens is bi-aspheric and its diameter is 2.4mm. We designed and fabricated aspherical coupling lens by means of glass molding technique under consideration of glass shrinkage. By controlling the aspherical profile error and surface roughness which were below 90nm and 10nm, respectively, we obtained the low coupling loss, 5.40dB, which was able to use for coupling a single mode fiber to laser diode.

Key Words: Aspherical Lens (비구면 렌즈), TO-Can (티오-캔), Slanted Axis Manufacturing (경사 축 가공), Glass Molding Process (유리 성형 공정), Insert Molding (인서트 성형)

1. 서론

최근, 멀티미디어의 사용량이 증가함에 따라 데이터 전송량이 증가되면서 광통신 모듈의 고속 전송에 대한 요구가 증대되고 있다.¹

광통신용 렌즈는 광통신 모듈의 송수신단에 사용되는 핵심부품으로 송신기에서는 변조된 레이저 빛을 집속시켜 효과적으로 수신기로 전달해주고, 수신기에서는 송신기로부터 전달된 빛을 활성면적이 작은 광 다이오드에 효과적으로 집광시키는 기능을 하며, 광섬유와의 결합손실을 줄여 고속 광통신 모듈의 성능을 향상 시킨다.² 현재 광통신용 렌즈에는 볼렌즈, 구면렌즈, 비구면 렌즈 등이 있다.

볼렌즈와 구면렌즈의 경우, 제조단가와 공정이 단순하지만 구면 수차의 발생으로 단일모드 광섬유와 결합효율이 떨어진다.³

비구면 렌즈의 설계에서 고려하여야 할 사항으로는 렌즈가 결상하는데 있어서 렌즈의 결함 즉, 수차에 의하여 발생한다. 그 중 렌즈가 구면의 형태인 것에 기인하는 수차로는 구면, 코마, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차가 있지만 광통신용 광학계에서는 광축에 평행한 광선에 대해서 큰 의미를 가짐으로 광통신용 광학계에서는 구면수차가 중요하다.

광통신용 모듈에서 렌즈의 기능은 같은 크기의 렌즈에서 얼마만큼 잘 집광되느냐에 있다. 따라서 광통신용 광학계의 선택에 있어서 고려해야 할 가

장 중요한 수차는 구면 수차이다. 이러한 요구를 만족하기 위해서 구면 수차의 개선이 필요하다.

구면 수차를 어떠한 방법으로 제거하느냐에 따라 광통신 시스템의 성능 및 가격에 큰 영향을 미치게 된다.

구면 수차를 제거하기 위하여 높은 차수의 수식을 적용하고,⁴ 하나의 렌즈에 다양한 굴절률을 가지게 하며,^{5,6} 수차 보정용 렌즈를 같이 사용하기도 한다.⁶ 이러한 방법들은 근본적인 해결방안이 아니라 단순히 보정하는 것에 국한되어 있다. 그러나 비구면 렌즈 광학계는 초점 집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거하고 복잡한 렌즈 조합을 필요하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 장점이 있다.

Fig. 1 은 일반렌즈와 비구면 렌즈의 초점 위치에서의 광선 세기 분포를 통해 수차 보정 효과를 보여주는 그림이다.

광통신용 렌즈의 결합효율은 사용되는 결합렌즈의 집광능력에 의해 좌우되며 광섬유 코어의 직경인 9 μ m 이내로 laser Diode 의 발산된 광을 집광하여 효율을 극대화 하기 위해서는 그림 1 과 같은 비구면 렌즈가 적합하다.

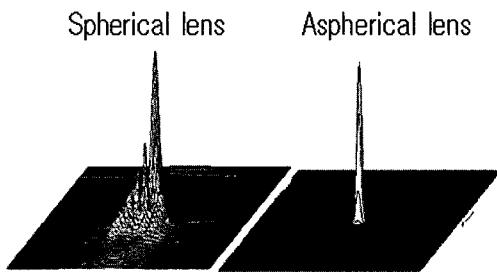


Fig. 1 Light intensity distribution using spherical lens and aspherical lens

이러한 비구면 렌즈는 사출성형, 절삭과 연삭 그리고 유리 압축 성형 공정 등을 통해 제작될 수 있다. 사출성형의 경우 대부분 플라스틱 재질을 사용하며 유리재질 보다 투명도가 떨어지고 내열적인 측면에서 신뢰도가 떨어지기 때문에 고정밀 렌즈나 고 신뢰도를 요구하는 제품에는 적용에 제약이 따른다. 그리고 유리 재질의 렌즈는 기존의 절삭과 연삭 공정을 통하여 직접 가공하는 방법이 있으나 진동, 이송 정밀도, 공구의 형상 오차와 공구 경로가 렌즈에 남게 되고 렌즈의 소형화에 따

라 연삭 공구가 급속하게 마멸되어 고 정밀 비구면 형상을 만들기 어렵다.

국내의 경우 선진국 수준의 약 80% 기술을 보유하고 있지만 설계상에 어려움과 많은 가공시간이 소요되고 균일한 비구면 유리렌즈를 생산하기 어렵다는 문제점을 가진다.³

최근 초정밀 가공의 발전으로 초경합금과 같은 경취성 재료에 비구면 형상 가공이 가능해짐으로써 유리 압축 성형공정으로 유리렌즈를 전사하는 복제방법에 의하여 짧은 시간에 형상오차가 작은 비구면 유리렌즈를 생산할 수 있게 되었다.^{7,8}

따라서 본 연구에서는 렌즈 설계 시뮬레이션을 통하여 광통신용 비구면 렌즈를 설계하고 금형을 제작하였고, 유리 압축 성형 공정을 통해 균일하고 정밀한 광통신용 비구면 렌즈를 제작하였다. 성형 공정 중 insert molding 방법을 적용하여 metal can 과 글래스 렌즈를 일체화 시키므로 생산시 공정시간 및 단가를 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

2. 비구면 렌즈 설계

광 통신용 모듈의 렌즈로 사용되는 구면렌즈에서는 구면수차로 인해 고속으로 데이터전송에 어려움이 있다. 구면 수차를 보정하기 위해 비구면 렌즈가 대안으로 대두되고 있으며, 이러한 비구면 렌즈는 출력되는 광이 한 점에 정확히 맺히도록 설계가 되어야 한다.⁹

기하광학에서 렌즈의 배율과 상의 위치를 작도하기 위해서 광선추적 방식이 적용된다.

광선의 수차는 광 축 근처의 곡률은 일정하게 유지하고 입사점의 곡률과 위치를 변형시키는 것으로 보정할 수 있으며, 동일한 광속 내에 있는 몇 개의 대표적인 광선에 대해서 굴절방향 제어를 통해 그 광속 전체의 수차가 보정된다.¹⁰

광통신 모듈용 렌즈를 제작하기 위하여 렌즈 소재의 선정이 중요한 부분이며, 광 접속 거리를 최소화 하면서 광 연결 손실을 줄여주는 소재가 필요하다. 광통신 모듈의 특성을 향상시키기 위하여 BK7 보다 투과율과 굴절률이 높은 SUMITA material 사의 K-VC89 을 사용하였다.

광통신에서 사용되는 파장인 1550nm 에서 소재의 굴절률은 1.77940 이다. 그러나 소재의 굴절율은 렌즈형성 조건의 온도와 압력에 의해서 1.77450 으로 감소하며, 이는 분산식 상수에 의해

계산되어 진다.

소재의 분산값과 유리전이온도(Tg)는 각각 41.0, 528℃이다. 비구면 렌즈의 설계는 Schulz 관계식(식 (1))을 기반으로 한 광학 설계 시뮬레이션을 이용하였다.¹⁰

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^2 + Br^4 + Cr^8 + Dr^{10} \dots$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \tag{1}$$

c: 정점의 곡률, k: 원추 상수, A, B, C, D: 비구면 계수

광통신용 비구면 렌즈의 설계는 광섬유와의 결합효율을 고려하여 개구수의 배율차인 5 배율로 최적화 하였으며, insert molding 공정을 고려하여 렌즈의 크기 2.4mm 및 두께 1.5mm 에 대한 구속조건을 주었다. Table 1 에 코닉 상수와 비구면 계수의 설계결과를 나타내었다. K 는 렌즈의 코닉 상수, A~D 는 4 차항까지 고려된 렌즈의 비구면 계수이다. 또한 주곡률 계수(C1)는 1.5337 로 나타났다.

Table 1 Optimization design parameters of conic constants and aspherical coefficients

R1 Surface		R2 Surface	
K	-4.557310	K	-0.360796
A	-1.713×10 ⁻¹	A	6.713×10 ⁻²
B	1.261×10 ⁻¹	B	-3.560×10 ⁻³
C	-1.305×10 ⁻¹	C	1.450×10 ⁻³
D	3.725×10 ⁻²	D	7.226×10 ⁻⁴

설계된 상거리는 6.765116mm 이며, 비구면 렌즈의 결합효율 공차적용시 R1, R2 면의 곡률 공차는 각각 0.08mm, 0.02mm, 두께 공차는 5μm 로 설계 되었다. 아래 Fig. 2 는 공차가 적용된 광통신용 비구면 렌즈의 최종 설계도면이다.

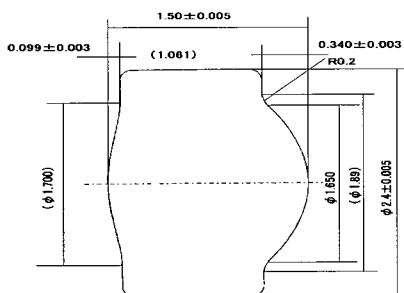


Fig. 2 Design drawing of aspherical lens

3. 비구면 렌즈 성형 기술

3.1 금형 수축을 고려한 설계 및 제작

광통신용 비구면 렌즈의 금형 설계시 비구면 형상부에 대한 설계가 가장 중요한 부분이며, 비구면 렌즈의 설계 도면에 의하여 렌즈 소재의 수축율을 고려한 설계가 되어야 한다. 이때 렌즈 소재의 수축율을 계산하여 성형후의 렌즈의 형상이 완성도면과 같이 되어야 하므로 소재 수축에 대한 보정값을 고려해 비구면 렌즈의 코어 형상부를 설계하였다.

공정시 사용된 비구면 렌즈의 소재는 SUMITA 사(일본)의 K-VC89 이고, 금형의 상, 하 코어 소재는 TANGLOY 사(일본)의 AF-1 이며, 선행창 계수는 각각 8.3×10⁻⁶/℃, 10.2×10⁻⁶/℃이다. 성형공정시 비구면 렌즈 상하부 금형 코어부분이 동심원 정중앙에 위치되도록 하였으며, 온도 585℃에서 하중 70kg 을 가하였다. 인가된 온도와 하중 하에서 상, 하 코어의 열팽창으로 인하여 각각 6.04μm, 54.69μm 만큼의 팽창이 발생된다. 이는 렌즈 제작시 고온의 소재가 다시 상온으로 떨어질 때 코어의 형상이 전체적으로 0.25%수축된다는 것을 예상할 수 있으며, 그에 따른 수축율을 0.25%적용하여 금형을 설계하였다. 아래 Table 2 는 보정값을 고려하여 수정된 코닉상수와 비구면 계수를 나타낸 것이다.

아래의 Fig. 3 은 상온 상태의 공차와 성형온도 585℃시의 공차를 감안하여 상부코어와 하부코어를 설계한 도면이다.

Table 2 Optimization of the design parameters for glass molding process

R1 Surface		R2 Surface	
K	-4.557310	K	-0.360800
A	-1.700×10 ⁻¹	A	6.6627×10 ⁻²
B	1.245×10 ⁻¹	B	-3.349×10 ⁻³
C	-1.282×10 ⁻¹	C	1.1424×10 ⁻³
D	3.064×10 ⁻²	D	7.7065×10 ⁻⁴

비구면 형상이 직경 2.4mm 인 비구면 금형의 코어를 가공하기 위하여 일반적인 연삭 방법이 아닌 경사 축을 이용한 가공방법을 적용하였다

아래 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 금형코어와 지석이 경사각을 이루면서 연삭이 되도록 하면 코어의 R 값이 커져도 지석과 코어의 간섭이 되지 않으면서 정밀소형 가공이 가능하다.

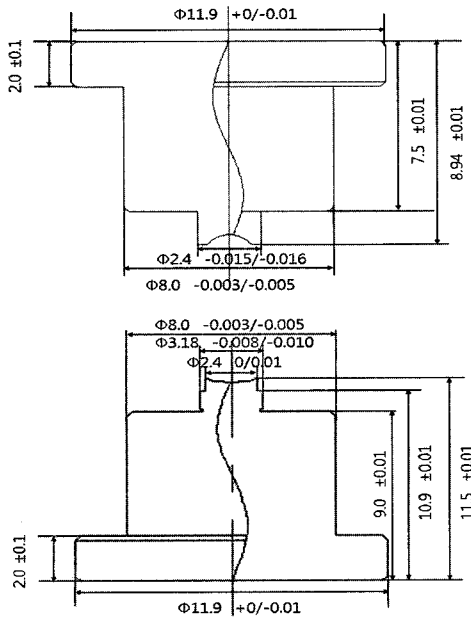


Fig. 3 Design of upper core and under core mold

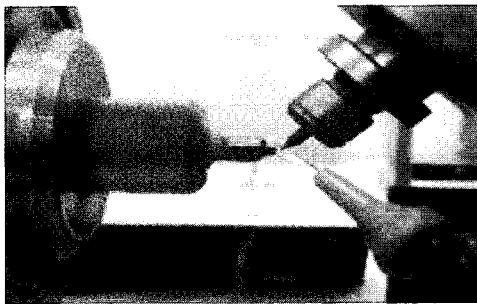


Fig. 4 Slanted axis process of core mold

비구면 금형 코어의 가공 공정은 기준면 가공, 구면가공, 비구면 가공, 폴리싱 가공완성의 순서로 가공이 이루어진다. 기준면은 외경과 두께를 $1\mu\text{m}$ 정밀도로 가공하였으며, 비구면 가공을 하기 위한 전단계 작업으로 구면을 형성하였다. 비구면 가공은 황삭으로 비구면 계수를 적당하게 맞춘 후에, 중삭 및 정삭 연마로 가공 정밀도가 $0.1\mu\text{m}$ 가 되도록 하였다. 최종 연마는 KURODA 사의 비구면 표면 폴리싱 장비를 활용하여 표면조도를 10nm 이하로 연마하였다.

아래의 Fig. 5 는 경사축 가공에 의해 제작된 비구면 금형 코어의 형상을 측정된 값이다.

Fig. 5 에서 측정된 형상오차의 값은 7nm , 표면 조도는 8nm 로 나타났다.

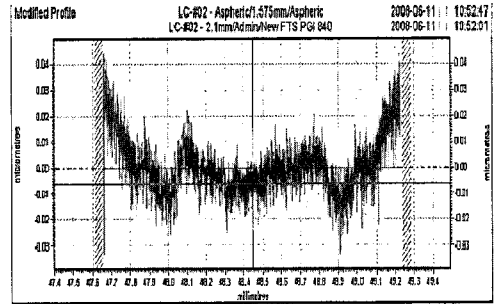


Fig. 5 Surface profile of the core mold of aspherical lens

3.2 렌즈 성형

유리 성형 공정에 의한 비구면 렌즈의 제조 공법은 금형을 만들고 렌즈의 소재를 용융 온도 이상으로 가열하여 압력을 가함으로써 금형의 형상으로 렌즈를 전사시켜서 만드는 공법이다.^{11,12}

아래 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 예열 1, 예열 2, 예열 3, 프레스, 냉각 1, 냉각 2, 냉각 3 의 7 단계로 구성되어 있으며, 각 단계별 금형이 이동하면서 Table 3 에 설정된 온도, 압력 그리고 시간에 준하여 작업이 이루어진다.

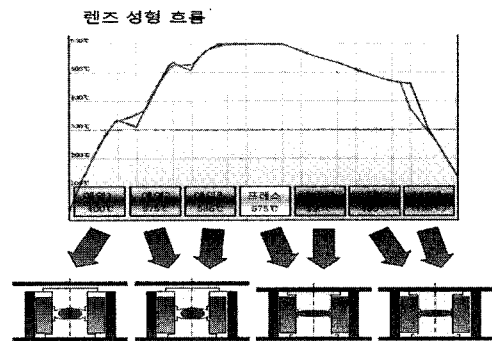


Fig. 6 Flowchart of glass molding process for movable type presser

Table 3 General process condition of temperature and pressure

	Heating 1	Heating 2	Heating 3	Press	Cooling 1	Cooling 2	Cooling 3
Temp.	480°C	540°C	585°C	$585/585^\circ\text{C}$	530°C	460°C	150°C
Press Load	-	-	10kg (0.01)	70kg (0.1)	30kg (0.1)	-	-
Head Height	25mm	25mm	23mm	20mm	20mm	23mm	25cm

GMP 에서는 비구면 렌즈의 제작에 사용되는 금형 코어의 성능이 곧 제작되는 렌즈의 성능을 좌우한다. 따라서, 성형렌즈의 비구면 계수, 주곡률 계수 등의 특성을 향상시키기 위해서 금형 코어를 정밀하게 만들 필요가 있다. 성형된 비구면 렌즈를 광 통신용으로 사용하기 위해서는 metal can 에 결합하여야 한다.

본 논문에서는 공정시간 줄임과 가격 경쟁력을 갖추기 위하여 insert molding 방법을 사용하여 metal can 에 소재를 삽입하여 한번에 광 통신용 비구면 렌즈를 제작하였다. Table 4 에서 insert molding 방법의 예열, 프레스, 냉각 등 각 단계의 성형조건을 나타낸 것이며, 반복 실험을 통하여 최적조건을 설정하였다. metal can 은 열팽창으로 렌즈 성형 온도 585℃에서 상부코어의 직경에 비해 metal can 이 약 72μm 더 팽창하게 되고 글래스가 유입되어 이형이 되지 않는다. 이에 metal can 의 열팽창을 고려한 수정된 insert molding 성형조건 설정하였다.

Table 4 Insert molding process condition of temperature and pressure

	Heating 1	Heating 2	Heating 3	Press	Cooling 1	Cooling 2	Cooling 3
Temp.	475℃	535℃	580℃	580/580℃	520℃	450℃	150℃
Press Load	-	-	10kg (0.01)	70kg (0.1)	30kg (0.1)	-	-
Head Height	25mm	25mm	23mm	20mm	20mm	23mm	25cm

아래 Fig. 7 은 insert molding 방법으로 metal can 에 비구면 렌즈를 결합한 실제 시제품이고 이로써 광통신용 비구면 렌즈를 완성하였다.



Fig. 7 Assembled aspherical lens

4. 시험 평가 분석

4.1 비구면 렌즈의 형상정밀도

제작된 비구면 렌즈의 R1, R2 면의 면형상 정도, 중심 두께, 외경 등을 형상 측정을 통해 분석하였다.

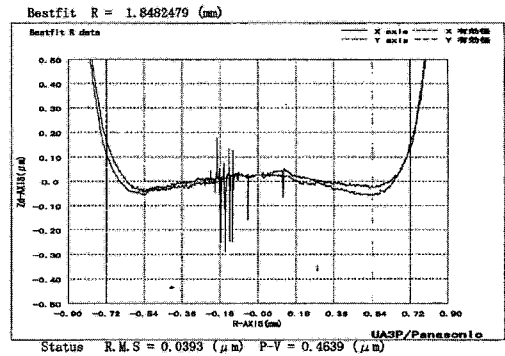


Fig. 8 R1-surface profile of aspherical lens

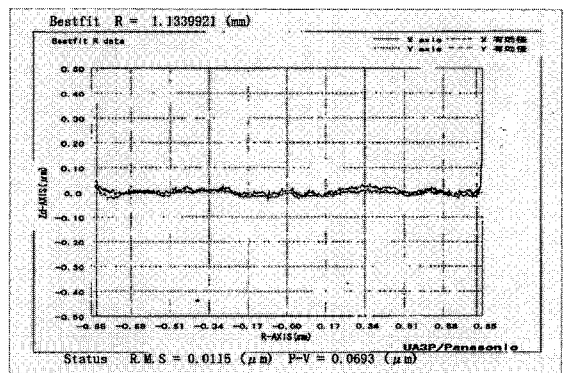


Fig. 9 R2-surface profile of aspherical lens

비구면 렌즈의 각 면에 대한 형상 측정데이터를 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타내었다. 측정결과는 R1 (1.8428)과 R2(1.1338)면에서의 곡률반경을 나타내며, Fig. 8 에서의 X 축과 Y 축은 각각 파란색과 빨간색 Fig. 9 에서는 X 축과 Y 축을 실선과 점선으로 나타내었다. 측정결과로부터 성형된 비구면 렌즈의 표면조도 RMS(Root-mean-square)값은 모두 40nm 미만으로 나타났다.

Fig. 8 및 Fig. 9 에서 X 축과 Y 축의 그래프는 정확히 일치하지 않고, 약간의 차이를 보이고 있음을 알 수가 있다. 이러한 차이는 insert molding 공정시 인가되는 압력의 요동이 X 축과 Y 축의 흔들림을 유발시켜 문제가 발생된 것이다. 렌즈의 기울어짐 현상은 집광된 광이 광섬유에 정확히 결합하는데 큰 영향을 주는 매우 중요한 변수이고, 측정결과 일반적인 기울어짐 공차인 약 30nm 범위를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 비구면 렌즈의 광학적 특성

비구면 렌즈의 광학적 특성평가를 위해서는 설

계상에서 결합손실을 측정하였다.

제작된 비구면 렌즈의 결합손실을 알아보기 위해서 구성된 측정 시스템을 Fig. 10 에 나타내었다. 먼저 TO-can 형태의 LD 와 LD 컨트롤러(LDC 3724B, ILX Inc.)를 이용하여 LD 의 출력세기를 조절한다. 제작된 비구면 렌즈와 LD 와 결합시킨 후 power meter(1835C, Newport Inc.)를 사용하여 광원에서 입력한 파워와 출력단의 파워를 측정하였다. 또한 적외선 카메라(7290A, Electrophysics Inc.)와 beam profiler(13SKP543, MGKK Inc.)를 사용하여 출력단의 빔의 형태를 관찰하였다.

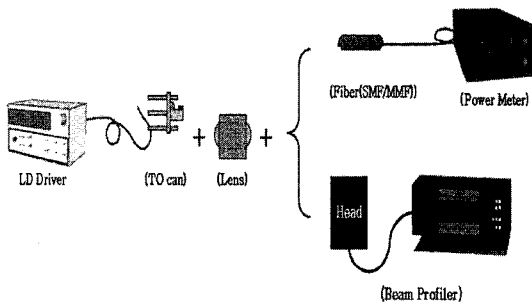


Fig. 10 Composition of TO-can measurement system

사용된 레이저 다이오드의 파장은 1550nm 이고 70mA 의 전류 인가시에 광섬유 결합효율은 출력광을 렌즈를 통해 광섬유로 입사시켰을 때 광섬유를 통해 전달된 광의 세기값을 측정함으로써 계산할 수 있다. 측정된 결과 발생하는 출력광의 세기는 12.32dBm 이다. 여기에 제작된 비구면 렌즈를 삽입하여 광학적 특성인 결합손실을 측정하였다. 제작된 비구면 렌즈 5 개를 추출한 결합손실은 평균 5.40dB 로 측정되었다.

형상 정밀도를 향상시킨 제작된 비구면 렌즈가 상용화가 가능한지를 정확히 판단하기 위해서 현재 상용화되고 있는 비구면 렌즈를 측정하여서 비교 분석할 필요가 있다. 상용화(외국 A 사) 비구면 렌즈와 제작된 비구면 렌즈를 앞에서 측정된 것과 같은 방법으로 측정하였다. 상용화되고 있는 렌즈를 결합손실은 평균 5.66dB 로 측정되었다.

마지막으로 상용화 비구면 렌즈와 제작된 렌즈의 결합손실을 측정한 그래프를 아래의 Fig. 11 에서 나타내었다.

제작된 광통신용 비구면 렌즈의 결합손실이 우수하다는 것을 알 수 있고, 실제 광통신에서 사용이 가능할 것으로 판단된다.

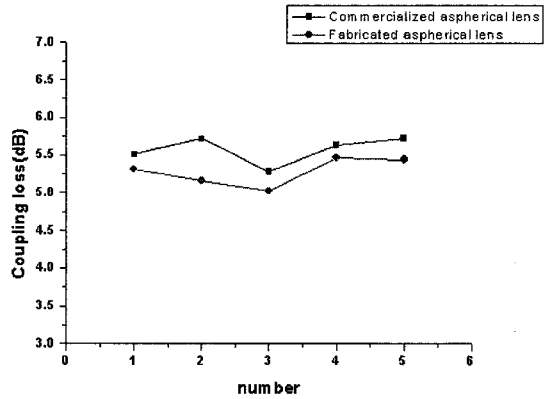


Fig. 11 Comparison of coupling loss of commercialized aspherical lens and fabricated aspherical lens

5. 결론

본 논문에서는 비구면 렌즈를 틀을 이용해 설계하였고, 형상 정밀도를 향상시킬 수 있는 초정밀 금형을 제작하였다. 제작된 금형을 사용해 유리 압축 성형공정으로 균일하고 정밀한 광통신용 비구면 렌즈를 제작하였다.

본 연구를 위해 먼저 광통신용 비구면 렌즈를 틀을 이용하여 설계 파라미터 R1 면과 R2 면의 코닉상수는 각각 -4.557310, -0.360796 나타났고 R1 면의 비구면 계수는 각각 -1.713×10^{-1} , 1.261×10^{-1} , -1.305×10^{-1} , 3.725×10^{-2} 이고, R2 면의 비구면 계수는 각각 6.713×10^{-2} , -3.560×10^{-3} , 1.45×10^{-3} , 7.226×10^{-4} 로 최적화하였고 소재 및 금형의 열팽창 계수가 다르므로 인해 발생하는 수축을 고려해 금형 설계를 하였다. 또한 경사축 가공을 통해 형상오차의 값은 7nm, 표면조도는 8nm 인 초정밀 금형을 제작하였고, 금형을 사용해 metal can 과 글래스 렌즈를 일체화 시켜 제작하는 insert molding 공정을 통하여 직경 2.4mm 인 초소형, 초정밀 비구면 렌즈를 제작하였다. 제작된 비구면 렌즈의 광학적 특성을 평가하였고, 현재 상용화되고 있는 비구면 렌즈와 비교 분석하였다.

개발된 비구면 렌즈의 형상오차는 90nm 로써 상용화되고 있는 비구면 렌즈 데이터와 비교하여 볼 때 보다 약 60% 향상되었고, 표면조도는 10nm 약 10 배 향상되었으며, 결합손실은 평균 5.40dB 로 평균 5.66dB 로 약 10%가 향상된 것으로 나타났다.

초정밀 유리 성형 공정에 의해 개발된 비구면 렌즈의 광학적 특성 삽입손실을 볼 때, 상용화 제

품의 수준만큼 우수성을 갖고 있으며, 또한 Insert molding 방법으로 인해 성형공정이 단순해졌다.

따라서 우수한 특성을 갖고 있는 제작된 비구면 렌즈는 ADSL, FTTH 등 광대역 통신망에서 광결합 효율 및 전송특성 향상에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌

1. Park, I. K. and Lee, J. U., "Optical design of Gradient-Index objective for optical pick-up," Journal of the Optical Society Korea, Vol. 18, No. 4, pp. 256-263, 2007.
2. KISTI, "Optical device technology development status," pp. 89-98, 2005.
3. Park, S. S., Lee, K. Y., Lee, H. J. and Kang, S. D., "Research on a micro aspherics glass lens manufacture technology," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 393-394, 2006.
4. Beamonte, J. I., "Stability of the spherical aberration up to the fifth order in cemented doublets," Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, Vol. 2, No. 3, pp. 161-168, 2000.
5. Roman, I., "Gradient-index meniscus lens free of spherical aberration," Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, Vol. 2, No. 5, pp. 449-451, 2000.
6. Möller, K. D., "Optics" University Science Books, pp. 1-73, 434-464, 2000.
7. Kang, S. D., "A Study on the Ultra-precision Compensation Machining of Axisymmetric Lens core," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 108-114, 2005.
8. Itoh, S., "Study on Measurement of Axi Symmetrical form Grnerated by Ultra-Precision Machining," Journal of the Japan Society of Precision Engineering Vol. 61, No. 3, pp. 1280-1284, 1997.
9. Nabil, F. and El, N., "Longitudinal spherical aberration and mass of bi-aspheric aphakic rigid contact lenses," Ophthal. Physiol. Opt., Vol. 19, No. 5, pp. 441-445, 1999.
10. Lee, K. U., Park, S. C., Park, J. D. and Lim C. S., "Optical Design actual using CODE V," Bookshill Co., pp. 168-172, 2005.
11. Cha, D. H., Kim, H. O., Kim, H. J. and Kim, J. H., "A Study of Optimum Molding Condition of Aspheric Glass Lens(I); Annealing Condition Effect," The Optical Society of Korea Summer Meeting, pp. 197-198, 2006.
12. Chang, S. H., Lee, Y. M., Shin, K. H. and Heo, Y. M., "A study on the aspheric glass lens forming analysis," The Optical Society of Korea Summer Meeting, pp. 205-206, 2007.