

## 마이크로 광 조형기술을 이용한 3 차원 형태의 응용제품 제작 및 이의 평가

이인환\*(포항공대 기계공학과), 김동성(포항공대 대학원 기계공학과),  
조동우(포항공대 기계공학과), 권태현(포항공대 기계공학과)

### Development and Evaluation of Applications Using Micro-stereolithography Technology

In Hwan Lee, Dong Sung Kim, Dong-Woo Cho, Tai Hun Kwon (Mechanical Engineering Dept. POSTECH)

#### ABSTRACT

The micro-stereolithography technology made it possible to fabricate a freeform 3D micro-structure. Using this technology, two kind of applications were fabricated and tested: micro-lens and micro-mixers. The focal length and f-number of the micro-lens were 5 mm and 2.5, respectively. The focusing ability of the micro-lens was verified by defocusing the He-Ne laser beam after passing the lens. Two mixers are Kenics micro-mixer and BEKM. BEKM is a modified Kenics micro-mixer by introducing barriers on the pipe wall periodically to enhance the mixing via the chaotic mechanism in the helical flow of Kenics micro-mixer. Experimental result shows good mixing performance of developed mixers. Especially, the BEKM shows better mixing performance than Kenics micro-mixer.

**Key Words :** Micro-stereolithography(마이크로 광 조형), micro-lens(마이크로 렌즈), micro-mixer(마이크로 믹서)

#### 1. 서론

마이크로 광 조형 기술 (micro-stereolithography technology)은 현재 산업분야에서 많이 이용되고 있는 쾌속조형(rapid prototyping) 기술을 마이크로 크기의 제품제작 기술에 이용한 것으로서, 이를 이용하면 자유로운 단면 형상을 갖는 3 차원 마이크로 제품을 제작 할 수 있다.

현재까지 마이크로 크기의 형상을 제작 하는 기술의 대부분은 반도체 제작공정을 기반으로 하는 것들이 대부분 이었다. 이들 기술은 대량생산에 적합하고 또한 제작되는 장치에 전자회로를 일체화 할 수 있는 등의 장점이 있다. 하지만 복잡한 단면형상을 갖는 3 차원 형상을 제작하는 것은 쉽지 않다. 비록 마이크로 광 조형기술이 기존의 쾌속조형 기술에 기반을 두고 있지만, 이를 바로 마이크로 제품제작에 이용하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 즉, 마이크로 광 조형에서는 매우 작은 부피의 광 경화성 수지가 굳어지게 되며 따라서 스케일 효과(scale effect)가 크게 작용하게 된다. 그러므로

이에 따르는 매우 정밀한 3 축 스테이지(stage), 광학계 및 제어시스템의 구성이 필요하게 된다. 또한 이에 따르는 광 경화성 수지의 경화현상에 대한 연구도 필수적이다.

이러한 특징을 갖는 마이크로 광 조형장치를 개발하고, 이를 이용하여 다양한 형태의 3 차원 마이크로 구조물의 제작과 관련한 연구가 발표된 바 있다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서는 기존의 이러한 연구를 바탕으로, 마이크로 광 조형기술을 이용하여 특정한 기능을 갖는 마이크로 렌즈 및 마이크로 믹서를 제작하고, 이에 대한 성능을 평가하여 보았다.

#### 2. 마이크로 렌즈

##### 2.1 개요

최근 들어 마이크로 렌즈는 광학계에서 널리 이용되고 있으며, 이들의 제작을 위하여 많은 기술들이 개발되고 있다. 특히, 회절 광학요소들은 부피가 작고, 몇 가지 광학적 특성으로 인하여 주목받고 있으며, 이에 따라서 이진(binary) 마이크로 렌즈

에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

키노폼(kinoform)은 얇은 재료에 위상 형상(phase profile)을 만든 회절광학요소로서<sup>(2)(3)</sup> 주로 근사화된 계단형상으로 제작된다. 한편, 반도체 공정을 이용하는 MEMS 기술로 이러한 형태의 렌즈를 제작하는 데에는 마스크 정렬 및 노광공정상의 문제가 발생하기도 한다<sup>(4)</sup>. 또한, 이러한 렌즈는 외곽부분에서 선폭이 매우 작아지기 때문에 제작이 어려우며, 따라서 이를 극복하기 위하여 제시된 것이 고차 키노폼 렌즈(higher-order kinoform lens)<sup>(5)(6)</sup>이다.

마이크로 광 조형기술을 이용하면 다양한 층 두께의 제어가 가능하고, 사용되는 광 경화성 수지가 투명하기 때문에, 상대적으로 용이하게 이러한 형태의 렌즈 제작이 기대된다. 본 연구에서는 마이크로 광 조형기술을 이용하여 이러한 특징을 갖는 고차 키노폼 렌즈를 제작 하였다.

## 2.2 고차 키노폼 렌즈

파장  $\lambda$ 의 평행 파(plane wave)가 광축상에 있는 초점거리  $f$ 인 렌즈를 통과하게 되면 수렴되는 파장의 위상이 변화하게 된다. 이 때, 렌즈가  $N$ 차의 키노폼 렌즈이고, 파장의 위상이  $2N\pi$ 의 위상구조(phase structure)를 갖도록 톱니 형상으로 만들면 위상( $\psi_{FN}(\gamma)$ ) 및  $m$  번째 영역의 안쪽반경( $\gamma_m$ )은 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 표현되게 된다.

$$\psi_{FN}(\gamma) = \psi(\gamma) + 2m\pi N \quad (1)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{\gamma_m^2 + f^2} - f) = 2m\pi N \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 은 광축에서부터의 거리이다.

한편, 매질과 렌즈의 굴절률 차이가  $\Delta n$ 이고, 광축에서  $\gamma$ 만큼 떨어진 거리에서의 렌즈 두께가  $T(\gamma)$ 이라면, 렌즈의 두께는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T(\gamma) = \frac{\lambda}{\Delta n} \left[ \frac{\psi_{FN}(\gamma)}{2\pi} + N \right] \quad (3)$$

이러한 형태의 렌즈들은 계단형상으로 근사화하여 제작하는 것이 일반적이다. 즉, 식 (3)의 렌즈 형상을 계단형상으로 만들기 위하여는 Fig. 1과 같은 근사화가 필요하다. 근사화된 계단형상과 원래 렌즈형상과의 교점을 ( $T_i, \gamma_{mi}$ )라 하면, 교점의 좌표는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\gamma_{mi} = \sqrt{\{\Delta n T_i - \lambda(m+1)N - f\}^2 - f^2} \quad (4)$$

이상의 결과를 이용하여 고차 키노폼 렌즈를 설계하였다. 설계변수들은 다음과 같다. 즉, 적용파장  $\lambda=632.8$  nm, 초점거리  $f=5$  mm, 렌즈 반경 = 1mm 그리고 굴절률 = 1.49 이다. 이상의 값들을

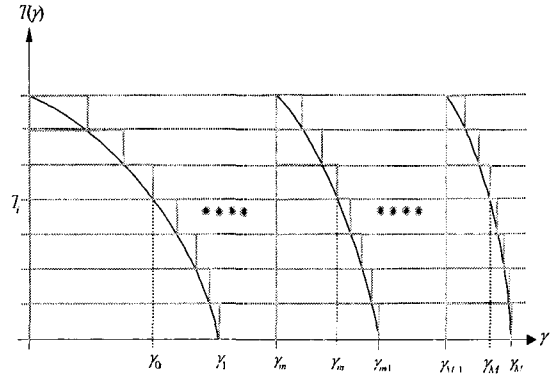


Fig. 1 Approximated profile of  $T(\gamma)$ .

이용하여 계산된 렌즈의 f-수는 2.5 이다. 설계된 렌즈를 제작하기 위하여  $N=65$  그리고 단수 = 4 를 적용하였다. 최종적으로 설계된 렌즈의 두께는 84  $\mu\text{m}$  이고, 3 개의 영역을 갖는다.

## 2.3 렌즈의 제작 및 평가

마이크로 광 조형에서는 레이저 빛의 파워 및 이송속도 등의 레이저 빛의 주사조건에 따라서 광 경화성 수지의 경화 폭이 변화하게 된다. 마이크로 광 조형기술을 이용하여 렌즈를 제작하기 위하여는 동일한 평면에 다양한 선폭을 제작하여야 한다. 한편, 이를 위하여는 광 경화성 수지로 전달되는 레이저 빛의 에너지를 다양하게 변화시켜야 한다. 하지만, 마이크로 광 조형에서 성형 과정 중에 레이저 파워를 조절하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 레이저의 파워를 200  $\mu\text{W}$ 로 일정하게 유지하면서, 레이저 빛의 이송속도를 다양하게 주고 이에 따른 광 경화성 수지의 경화폭을 측정하였다. 이 실험 결과를 이용하여 레이저의 주사속도에 따른 광 경화성 수지의 경화폭에 대한 실험식을 식 (5)와 같이 구할 수 있었다.

$$w = -210.18 \ln(V_s) + 1131.5 \quad (5)$$

여기서  $w$ 는 광 경화성 수지의 경화 폭이고,  $V_s$ 는 레이저 빛의 이송속도(mm/min)이다.

Fig. 2는 제작된 마이크로 렌즈의 전자현미경 사진이며, 3 개의 영역으로 구성되는 렌즈 형상이 성형된 것을 알 수 있다. 하지만 계단형상이 선명히 성형되지 않았으며, 이는 (1) 세척 시 손상을 방지하기 위하여 적용된 가열공정에서 일부 액체상태의 광 경화성 수지가 굳어져 제거되지 않았고, (2) 레이저 빛에 의하여 경화된 광 경화성 수지의 표면의 일부가 세척공정에서 손상된 것에 기인한다.

He-Ne 레이저를 이용하여 제작된 렌즈에 대한 초점성능을 평가하였다. 이때, 렌즈의 초점거리가 매우 짧아서 빔 프로파일러(beam profiler) 등의 장비

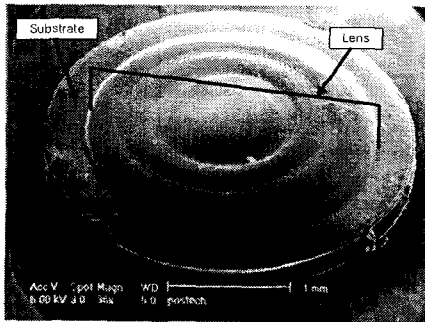


Fig. 2 SEM photograph of the fabricated micro-Fresnel lens.

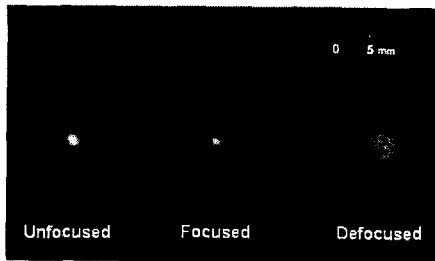


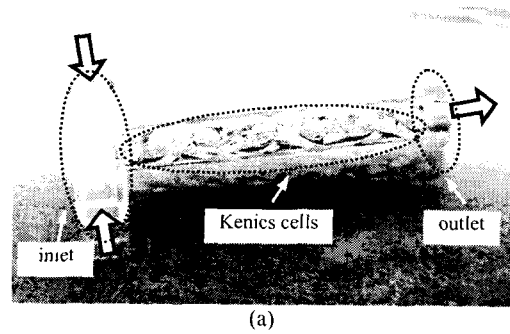
Fig. 3 Comparison of the He-Ne laser beam profiles: unfocused, focused and defocused laser beam.

를 이용한 정확한 측정이 불가능하였다. 따라서 렌즈를 통과한 빛이 스크린에 상이 만들어 지도록 하고, 이를 측정하는 방법을 이용하였다. Fig. 3 은 렌즈를 통과하기 전 및 후의 레이저 빛의 형상을 비교한 것이다. 초점된(focused) 빛의 형상은 초점 평면에 스크린을 위치시킨 상태에서 측정되었으며, 초점이탈(defocus) 평면에서의 빛은 초점평면에서 8mm 후방에 스크린을 위치시키고 측정한 결과이다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이, He-Ne 레이저 빛이 렌즈를 통과하면 레이저 빛의 지름이 초점평면에서 작아지게 된다. 또한 초점평면을 지난 후의 레이저 빛의 지름은 급격히 증가하게 되며, 이는 제작된 렌즈의 초점거리가 매우 짧기 때문이다.

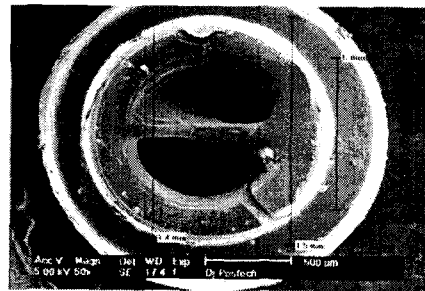
### 3. 마이크로 믹서

#### 3.1 개요

BioMEMS 와  $\mu$ TAS 분야에서 유체의 혼합은 매우 중요하다<sup>(7)(8)</sup>. 이때 카오스 혼합(chaotic mixing)을 통해 매우 높은 혼합효율을 얻을 수 있으며, 이에 기존의 Kenics 믹서나 SMX 믹서를 소형 크기로 구현한 마이크로 믹서가 발표된 바 있다<sup>(8)</sup>. 이들 믹서들은 카오스 혼합을 발생시키기 위하여 유체들을 일련의 분할 및 재배열 (splitting/reorientation) 과정들을 일으키게 한다. 본 연구에서는 기존 연구<sup>(8)</sup>와 달리 180° 로 서로 반대방향으로 뒤틀린 일련의 분리벽을 갖는 Kenics 마이크로 믹서 및 좀 더 발



(a)



(b)

Fig. 4 (a) photograph of the fabricated micro-Kenics mixer and (b) SEM photograph of the cross-section.

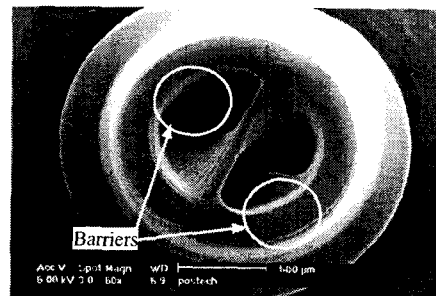


Fig. 5 SEM photograph of the cross-section of BEKM.

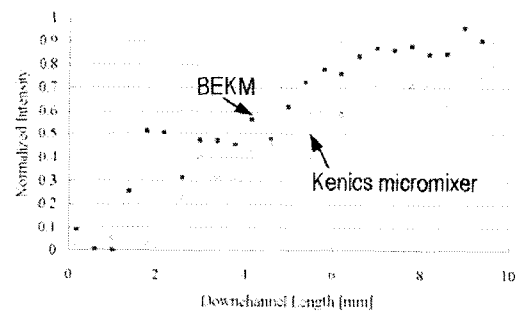


Fig. 6 Normalized average intensity change or red color along the downstream direction of Kenics micromixer and BEKM.

진된 형태의 새로운 마이크로 믹서인 BEKM (Barrier Embedded Kenics Micromixer)을 제작 하였다.

### 3.2 마이크로 믹서의 구성

본 연구에서는 혼합 성능 비교를 위하여 동일한 내경 및 길이를 가진 지름 1mm 의 원형 관(tube)에 Kenics 믹서 및 BEKM 을 각각 제작하여 그 특성을 비교하였다. Fig. 4(a)는 길이가 1640  $\mu\text{m}$ 인 제작된 Kenics 믹서의 사진이고, Fig. 4 (b)는 믹서단면의 SEM 사진이다. Kenics 믹서는 서로 반대방향으로 뒤틀린 두께 100  $\mu\text{m}$ 의 일련의 분리벽, 서로 다른 두 유체가 들어가는 입구 그리고 믹서 부분을 거쳐 혼합된 유체가 배출되는 출구로 구성되어 있다.

Fig. 5 는 성형된 BEKM 단면의 SEM 사진이다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 BEKM 의 경우, 서로 반대방향으로 뒤틀린 분리벽 이외에 관 벽에 일련의 배리어(barrier)들이 추가로 성형되었다. 각 배리어들은 100  $\mu\text{m}$  두께에 150  $\mu\text{m}$  높이로 관 내부로 튀어나온 형태이며, 각각의 길이는 413  $\mu\text{m}$  이다. 이 주기적인 배리어들은 믹서 내의 유체의 유동 속도장의 주기적인 교란(perturbation)을 유도하여 신장 및 접음(stretching/ folding)의 카오스 유동을 야기하여 Kenics 믹서의 분할 및 재배열의 메커니즘보다 높은 수준의 카오스 혼합을 유도하게 된다.

제작된 마이크로 믹서들의 혼합성능을 평가하기 위하여 페놀프탈레인(phenolphthalein) 용액 및 NaOH 용액을 이용하였다. 페놀프탈레인은 산성에서 무색이지만 pH 가 8 보다 커질 경우 두 유체의 경계면 에서 붉은 색을 보이게 된다. 시린지 펌프(syringe pump)를 이용하여 두 유체를 마이크로 믹서에 일정 유량으로 주입하여 혼합성능을 평가하였으며, 이때 주입되는 유체의 레이놀드 수는 대략 10 이었다. 각 믹서의 혼합성능을 정량적으로 평가하기 위하여, 유체의 흐름방향을 따라 붉은색의 농도를 측정하였다. Fig. 6 은 측정된 두 믹서의 혼합성능을 보여준다. Fig. 6 에서 알 수 있듯이 두 믹서 모두 낮은 레이놀드 수에도 두 유체를 매우 잘 혼합할 수 있음을 알 수 있으며, 특히 새로 개발된 BEKM 의 경우가 Kenics 믹서보다 높은 혼합성능을 보이고 있다.

### 4. 결론

마이크로 광 조형기술을 이용하여, 실제 적용 가능성이 매우 높은 두 가지 서로 다른 형태의 제품을 제작하고, 각각의 성능을 평가하여 보았다. 제작된 마이크로 렌즈는 투과파장 632.8 nm, 초점거리 5mm 그리고 F/# 2.5 의 키노폼 렌즈이다. He-Ne 레이저를 이용하여 초점성능을 평가 한 결과, 렌즈를 통과한 He-Ne 레이저 빛이 초점이 만들어 지는 것을 확인 할 수 있었다.

또한, 두 가지 형태의 마이크로 믹서(Kenics 및

BEKM)를 개발 하였으며, 두 믹서 모두 매우 낮은 레이놀드 수를 갖는 서로 다른 두 유체의 혼합 시, 높은 혼합성능을 보인다. 특히 새로 개발된 BEKM 의 경우, Kenics 믹서보다 높은 혼합성능을 보임을 알 수 있다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업(과제번호: M102KN010001 - 02K1401- 00211)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. 이인환, 조동우, "극소 광 조형기술을 이용한 3 차원 구조물의 제작", 한국정밀공학회 2001 년 추계 학술대회논문집, 수원, 경희대학교, 2001.10.26-27, pp.1080-1083, 2001.
2. Lenro Miyamoto, "The Phase Fresnel Lens," Journal of the Optical Society of America, Vol. 51, No. 1, pp. 17-20, 1961.
3. Dale, A. Buralli, G. Michale Morris and John, R. Rogers, "Optical Performance of Holographic Kinoforms," Applied Optics, Vol. 28, No. 5, pp. 976-983, 1989.
4. Margaret B. Stern, Michale Holtz and Theresa R. Jay, "Fabrication Binary Optics in Infrared and Visible Materials," Miniature and Micro-Optics, SPIE Vol. 1751, pp. 85-95, 1992.
5. Michale Bass, Eric W. Van Stryland, David R. Williams and William L. Wolfe, "Handbook of Optics," Vol. 2, pp. 8.14-8.18, McGraw-Hill, 1995.
6. J. C. Marron, D. K. Angell and A. M. Tai, "Higher-order Kinoforms," Computer and Optically Formed Holographic Optics, SPIE Vol. 1211, pp. 62-66, 1990.
7. D. S. Kim, S. W. Lee, T. H. Kwon and S. S. Lee, "Barrier Embedded Chaotic Micromixer," Proc.  $\mu$ TAS 2002 Symposium, Nara, Japan, Nov. 3-7, pp. 757-759, 2002.
8. A. Bertsch, S. Heimgartner, P. Cousseau and P. Renaud, "Static Micromixers Based on Large-Scale Industrial Mixer Geometry," Lab on a Chip, Vol. 1, pp. 56-60, 2001.