

— 마이크로 가공의 최전선 특집 —

광 조형법에 의한 마이크로 가공 (액정 마이크로 광 조형 법)

三好隆志

MIYOSHI Takashi

1. 서 론

최근, 기계 가공 기술의 진보에 의하여 구성 요소의 소형화, 고집적화가 추진되고 있다. 장래 제품의 다양화, 고 기능화에 대응하기 위해서는 이와 같은 미세 미소 부품의 제작 기술과 더불어 제작 형상 및 그 기능을 용이하게 평가하는 기술 즉, RP(Rapid Prototyping) 기술이 필요하다. 형상의 시각 및 평가를 하기 위한 기술로서는 광 조형 법이 가장 일반적이고, 이 기술에 의하여 3차원 CAD 데이터로부터 복잡한 3차원 형상을 용이하게 제작하는 것이 가능하다. 그러기 위해서 최근에는 여러 가지 마이크로 광 조형 법이 제안되고 있어서, 익형 광 압력 회전체나 치차 등의 미소 기계 요소를 제작한 예가 보고되고 있다.

여기에서는 우선, 지금까지 보고되어 있는 주요 마이크로 광 조형 기술의 원리, 특징 등에 대하여 그 개요를 기술한다. 다음에 저자 등이 현재 개발 중인 고속·고정도화를 지향한 액정 마이크로 광 조형 법에 대하여 상세하게 소개한다. 즉, 액정 마스크를 2치화(値化) 마스크, 명암 마스크로써 이용한 광 조형 법의 원리, 액정 광조형 장치의 구성 그리고 몇 가지 고속 2차원/3차원 마이크로 형상 조형에 대하여 기술한다. 나아가 본 수법을 확장하여 액정의 동화상을 다중 마스크로써 이용한 고정도의 3차원 입체 마이크로 광 조형 예를 소개한다.

2. 마이크로 광 조형 법의 현상

마이크로 광 조형 법의 대부분은 레이저광을 주

사하는 점노광 방식이지만, 이외에도 마스크를 이용한 면노광 방식을 고려할 수 있다. 또 1층별로 모델 단면을 묘사하여 단면의 적층과 묘사를 반복하는 적층 방식이 일반적이지만 수지 내부에 집광 레이어법을 3차원적으로 주사하는 비적층 방식도 있다. 이들의 방식을 조합한 여러 가지 광 조형 법이 최근 제안되고 있어 표 1에 지금까지 보고된 주요 마이크로 광 조형 법의 원리, 특징 및 사용 수지를 나타낸다.

3. 비적층 광 조형 법의 원리

액정 마이크로 광 조형 법은 그림 1에 나타낸 것과 같이 액정 마스크를 2치화 마스크, 명암 마스크 또는 다중 마스크로써 이용한 표 1에 있어서 면 노광 비적층형의 광 조형법으로, 종래의 수법과 비교하여 고속성은 물론, 고정도화가 기대되는 수법이다.

액정 디스플레이(LCD)를 노광 마스크로써 이용한 액정 광 조형 법의 기본 원리를 그림 2에 나타낸다. 우선, CAD에 의하여 모델링된 입체 형상의 기하학적인 특징에 근거하여 수지의 경화 깊이와 노광 에너지의 관계를 구한다. 구한 노광 에너지의 분포를 공간적인 노광 분포를 부여하는 한 장 또는 여러 장의 바이너리 마스크 패턴이나 명암 마스크 패턴으로 변환한다. 2차원 명암화상은 마스크의 명암을 3차원 형상의 높이에 대응시킴으로써 3차원 정보를 표현할 수 있다. 따라서 명암 마스크에 의하여 투과광의 강도 분포를 변화시키면 3차원 정보를 갖는 상에 의하여 수지를 노광시킬 수 있다.

표 1. 지금까지 보고된 주요 마이크로 광조형법

조형 방식	조형 원리	특 징	사용 수지
주사노광 적층형 (점노광)	DVD 광헤드에 의한 타상형 광조형장치	스피나 방식에 의한 두께 수 μm 층의 생성에 의한 두께 방향의 분해능 향상, DVD 헤드 이용에 의한 장치의 소형화	가시광수지
주사노광 적층형 (점노광/면노광)	냉각고형화식 광조형법	수지를 냉각 경화하고, 광을 노광하기 위한 서포터가 필요없는 조형이 가능. 냉각 경화 수지 상에 자외광 흡수 잉크로 마스크를 그리면 면 노광 조형도 가능	자외선 경화 수지
면노광적층형 (점노광)	액정 디스플레이를 동적 마스크로 이용한 마이크로 광조형법	액정 디스플레이를 패턴 변경이 가능한 동적 마스크로 이용하여 파장 515 nm의 광에 의하여 마이크로 기어 등의 조형을 한다.	가시광수지
주사노광 비적층형 (점노광)	내부경화 마이크로 광조형법 2광자 흡수를 이용한 3차원 미소입체 구조의 형성 수지액 중의 버블을 이용한 3차원 노광	투과성이 높은 파장 442 nm의 미약한 광을 집광하여 초점 부근만으로 수지를 경화, 높은 분해능으로 수지 내부에서의 3차원적인 주사를 실현 2광자 흡수현상을 이용하여 초점 부근만으로 수지를 경화시킨다. 서브 미크론 단위의 분해능을 실현 수지안에 파이프를 넣어 기포를 생성시키고, 그 기포로부터 광을 조사하여 수지 내부에서의 3차원 주사를 실현	자외선 경화수지
면노광 비적층형	액정 마스크를 이용한 비적층 마이크로 광조형법	액정 마스크에 병암 화상이나 등화상을 출력하여 파장 488 nm의 가시광에 의하여 수지 내부의 경화 현상을 제어하여 미세구조를 고속, 고정도로 조형한다.	가시광수지

	노광 마스크	노광 에너지	경화 깊이	형상
(a) 2치화 마스크			균일조명 경화깊이 액정마스크 광경화성수지	
(b) 병암 마스크			경화 깊이	
(c) 다중 마스크			경화 깊이	

그림 1. 액정 노광 마스크에 의한 광 조형법

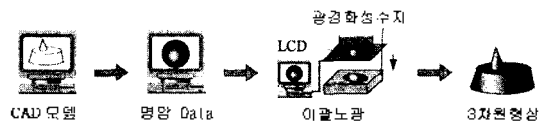


그림 2. 액정 광조형법의 기본 원리

일반적으로 광 경화성 수지의 경화 깊이 $d(\text{mm})$ 는 노광 에너지 밀도 $E(\text{mJ}/\text{mm}^2)$ 라 하면

$$d = D_p \ln (E/E_c) \quad (1)$$

에 의하여 구할 수 있으며, 경화 깊이는 노광 에너지

지의 대수에 비례한다. 따라서 이 관계를 이용하면 다시 명암 정보를 높이 정보로 회복할 수 있다. 이러한 명암 화상을 노광 함으로써 비직층으로 3차원 형상을 일괄하여 조형하는 것이 가능하다.

4. 액정 광 조형 장치

그림 3에 액정 광 조형 실험 장치의 구성을 나타낸다. 본 장치는 Ar 레이저, 대물 렌즈, 회전 확산판 등으로 구성되는 조명 광학계, 편광 성분 흡수 축이 서로 직교하도록 배치된 편광판 두 장과 액정 패널로 이루어진 액정 마스크, 나아가 결상 렌즈와 수지 탱크, 베이스 플레이트, 핀볼 등으로 이루어진 노광 광학계의 세 가지로 구성되어 있다.

Ar 레이저(파장 488 nm)에 의하여 발생된 가시광은 폴리 메타에 의하여 빔 경을 확대하고, 회전 확산판에 의하여 평균화되어 액정 마스크 전체를 균일하게 조명한다. 액정 마스크에는 PC로부터 직접 마스크 패턴이 출력되어, 그 패턴의 명암 화상에 의하여 투과광 강도가 변조된다. 액정 마스크에 의하여 변조된 광은 줌 렌즈에 의하여 축소되어 수지 베이스 위에 상을 맺는다. 이 때에 렌즈와 베이스 플레이트 사이에는 공간 주파수 필터로써 핀 볼을 배치하여 1차 회절광 등의 노이즈 제거를 한다. 또, 1/4 파장판 및 1/2 파장판은 입사광 편광면을 변환하여 광의 이용 효율과 액정 마스크의 콘트라스트를 향상시키고 있다. 나아가 광 경화성 수지에는 파장 488 nm 부근의 감도를 갖는 우레탄 아크릴레이트 계의 가시광 감광성 수지를 이용하고 있다. 노광 강도는 사출 시에 100-600 mW 이고, 노광면에서의 광 강도는 1.5-1.7 mW/cm² 이다.

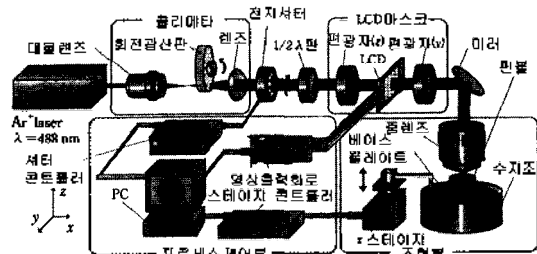


그림 3. 액정 마이크로 광조형 실험장치의 구성

5. 수지 및 액정 마스크의 기본 특성

5.1 수지의 경화 특성

광경화성 수지의 경화 깊이를 제어하기 위해서는 광원인 파장 488 nm의 광에 대한 수지의 임계 노광량과 투과심도를 미리 구할 필요가 있다. 식 (1)에 의하여 편대수 그래프의 x축에 노광량, y축에 수지의 경화 깊이를 플롯하면, 각 점은 1직선 상에 위치하는 것이 예상된다. 이 직선의 경사가 식 (1)의 $D_p(\mu m)$ 에 상당하므로 투과 심도를 구할 수 있다. 또, 이 직선과 x축의 교점이 $E_c(mJ/cm^2)$ 가 되어 임계 노광을 나타낸다. 그림 4에 파장 488 nm의 광에 대한 수지의 노광량과 경화 깊이 관계 (Working Curve)를 나타낸다. 플롯한 경화 깊이가 직선 상에 위치하므로 수지의 경화 깊이와 노광량의 관계는 식 (1)에 나타낸 란 버드의 법칙을 적용할 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 구한 이번에 사용한 수지의 임계 노광량은 5 mJ/cm², 투과 심도는 473 μm 이다.

5.2 표시 계조(階調 : 역자주 참고)와 경화 깊이

본 수법에서는 액정 마스크의 광 투과율이 표시 계조별로 다른 성질을 이용하여, 조명광의 강도 분포를 변화시켜 노광량 제어를 한다. 거기에서 액정 마스크를 이용한 비직층 조형을 하기 위하여 액정 표시 계조와 경화 깊이의 관계를 구하였다. 그림 5에 액정 표시 계조에 대한 수지의 경화 깊이 및

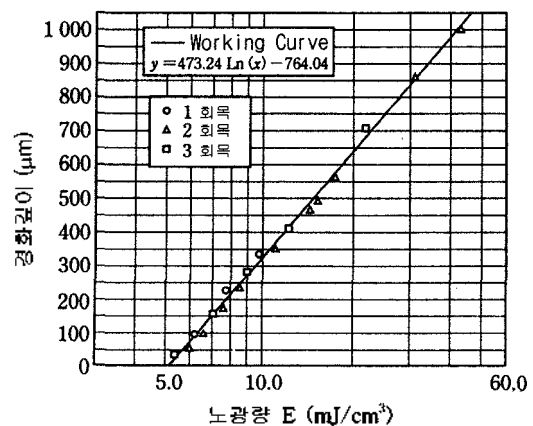


그림 4. 노광량과 경화 깊이의 관계

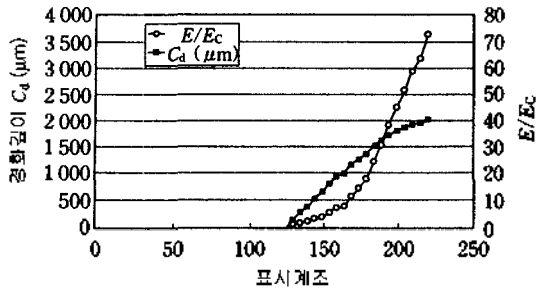


그림 5. 경화 깊이 및 E/E_c 와 표시 계조의 관계

노광량과 임계 노광량의 비(E/E_c)의 관계를 나타낸다. 액정 표시 계조의 증가와 더불어 E/E_c 는 지수 함수적으로 증가하고 있고, 한편 수지의 경화 깊이는 선형적으로 증가하고 있다. 이 관계는 식 (1)의 관계와 잘 일치하고 있다. 표시 계조는 100 변화하면 경화 깊이는 약 2 mm 변화하고 있으므로 1 계조 당 약 20 μm 씩 경화 깊이의 제어가 가능하다.

5.3 횡 분해능 특성

조형의 횡 분해능은 액정 패널의 화소 사이즈 외에 노광에 이용하는 축소 광학계의 축소율이나 광경화성 수지의 최소 경화 단위 등에 의하여 결정된다. 그림 6(a)에 나타난 테스트 패턴은 그림 6(b)에 마스크 패턴(폭 1픽셀-6픽셀)을 약 40%로 축소 노광하여 조형한 것이다. 액정 패널의 화소 사이즈 (33 μm)를 40% 축소하면 횡 분해능은 13 μm 가 되어 조형한 테스트 패턴을 보면 1픽셀 폭에 상당하는 클리어런스 a가 명확하게 조형되어 있다. 나아가 25% 축소까지 실험적으로 확인하고 있어 8 μm 정도의 횡 분해능을 얻을 수 있다.

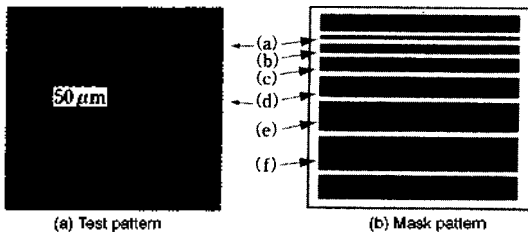


그림 6. 횡 분해능 평가 Test Pattern

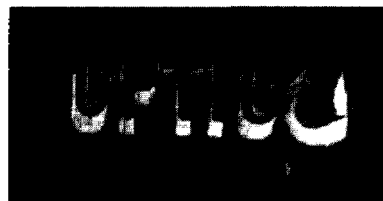
6. 미소 구조들의 시작(試作)

6.1 2치(値) 화상 조형

우선 액정 마스크의 다양한 형상에 대한 조형 특성을 검증하기 위하여 흑백 2치 화상을 이용한 2차원적 형상의 조형 실험을 하였다. 그림 7(a)에 6 문자의 알파벳(OPTIC@)을 동시에 조형한 예를 나타낸다. 이들 문자 조형에 요한 시간은 4초이다. 문자는 선폭 100 μm 로 그려져 있고, 그 높이는 500 μm 이다. 그림 7(b)는 세 개의 기어를 동시에 조형한 예이다. 조형에 요한 시간은 문자의 경우와 마찬가지로 4초이다. 세 개 기어의 외형은 각각 3 mm, 1.5 mm, 0.75 mm 이고, 기어원지름은 각각 2 mm, 1 mm, 0.5 mm 이다. 모든 기어의 두께는 1 mm 이고, 최소 기어의 폭은 약 80 μm 이다. 이들의 조형 결과는 조형 형상을 자유로 선정할 수 있고, 다양한 마이크로 형상을 고속이면서도 고정도로 조형할 수 있는 것을 시사하고 있다.

6.2 명암 화상 조형

액정 마스크의 명암 마스크로써 효과를 검증하기 위하여 256 계조로 표현된 명암 화상을 이용한 조형 결과를 그림 8, 9에 나타낸다. 그림 8(a)는 Gray Scale의 명암 마스크(b)에 의하여 조형된 피라미드

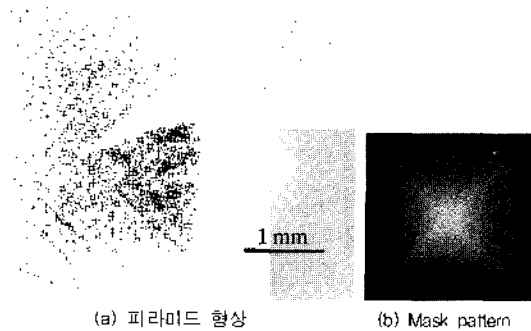


(a) 알파벳 문자

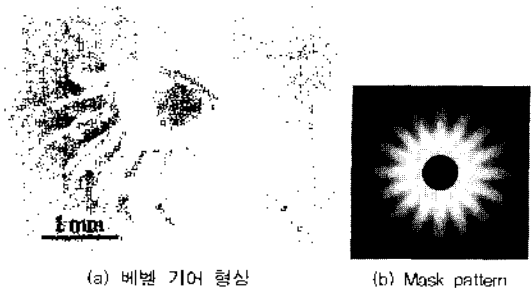


(b) 각종 기어 형상

그림 7. 2치 화상에 의한 비적층 조형 예



(a) 피라미드 형상 (b) Mask pattern
그림 8. 명암 화상에 의한 피라미드의 비적층 조형 결과



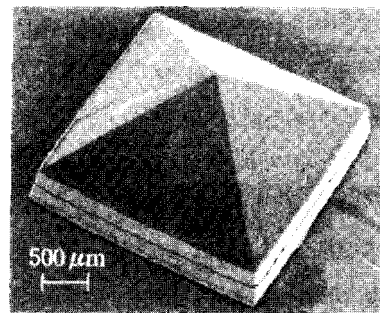
(a) 베벨 기어 형상 (b) Mask pattern
그림 9. 명암 화상에 의한 베벨 기어의 비적층 조형 결과

형상이다. 정점의 높이가 1.5 mm, 밑변의 폭이 2.5 mm로 조형에 요한 시간은 2초이다. 마스크 패턴에 사용된 표시 제조는 150-200 계조까지의 50 계조로 30 μm 가 1 계조에 상당한다. 마찬가지로 그림 9(a)는 명암 마스크(b)에 의하여 조형된 베벨기어(밑면 외경 3 mm, 내경 1 mm)이고, 피라미드 형상과 비교하면 복잡하므로 조형 시간은 15초로 길다.

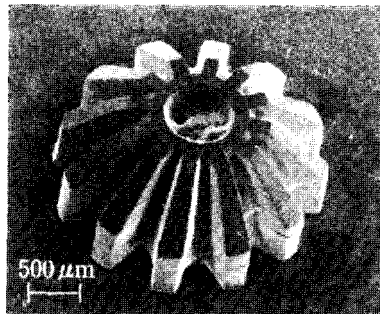
이들의 실험 결과로부터 3차원 형상을 적층하지 않고 조형할 수 있는 것이 확인되어 제안한 액정 명암 마스크를 이용한 비적층 광 조형법의 유효성을 실증할 수 있었다.

6.3 동화상 연속 적층 조형

명암 화상 조형은 깊이 방향의 제어가 2 mm 범위 안에서는 가능하지만, 높이가 2 mm를 넘는 형상이나 보다 복잡하고, 보다 미세한 형상이 요구되는 경우에 적용 가능성이 높은 동화상 연속 적층 조형법을 소개한다. 이 조형법은 액정 화상을 연속



(a) 피라미드 형상



(b) 베벨 기어 형상

그림 10. 동화상에 의한 연속 적층 조형 결과

적으로 변화시켜 그 각각의 화상에 동기시키면서 수지 탱크를 이동하여 적층하는 수법으로, 조형 시간은 약간 길어지지만 고정도의 3차원 입체 조형이 가능하다.

그림 10(a),(b)는 10 μm 의 피치(적층 두께)로 조형한 피라미드 형상(a)와 베벨 기어 형상(b)이다. 사방 2 mm의 피라미드 조형에는 100층을 쌓아 올리는데 약 20분 걸리고, 50층을 쌓아올리는 베벨 기어의 조형 시간은 10분이다. 이와 같이 본 수법은 1층 단면 형상의 크기나 복잡함에 관계없이 1층 당의 조형 시간은 약 12초로 일정하다. 또 10 μm 피치로 Sharp 한 윤곽 형상을 얻을 수가 있어서 고정도로 미세한 3차원 마이크로 광조형이 가능하다.

7. 결 론

미소 부품에 대한 새로운 RP 기술로써, 액정을 이용한 고정도이며 고속인 비적층 마이크로 광 조형법을 제안하고, 실제의 액정 광조형 장치의 개발을 하였다. 복수개의 마이크로 기어 및 미소 피라

미드 형상, 베벨 기어의 시작에서 본 수법에 의하여 다양한 미소 구조물을 단시간에 그려면서도 고 정도로 조형 가능한 것을 확인하였다. 이후에는 Overhank 형상의 조형 기술 개발이나 동화상을 이용한 연속 적층 조형법을 더욱 발전시켜 적층하지 않고 조형하는 동화상 비적층 조형법의 개발을 추진할 예정이다.

[역자주]

계조(階調) : Scale 또는 Gradation으로 화상의 명암을 몇 개의 단계로 나누어서 표현할 때의 각 단계. 예를 들면 1 바이트를 8비트로 하면 화상을

나타내는 데이터의 조합은 $2^8(=256)$ 이고, 이 경우에 256 계조를 갖는다고 한다.

본 기사는 전국대학교의 이성수 편집위원이 “일본정밀공학회지” 2002년 2월호 pp.189-192를 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

- 주소 : ㊦ 102-0073 東京都千代田區 九段北 1-5-9, 九段誠和Building 2F
- 전화 : +81-3-5226-5191
- FAX : +81-3-5226-5192
- URL : <http://www.jspe.or.jp/>

