

◆ 특집 ◆ 가공정밀도 향상을 위한 초정밀 가공기술

초정밀 엔드밀링 가공조건 최적화를 통한 금속상의 3차원 이미지 구현

Realization of 3D Image on Metal Plate by Optimizing Machining Conditions of Ultra-Precision End-Milling

이재령^{1,2}, 문승환¹, 제태진^{1,3}, 정준호^{1,3}, 김휘², 전은채^{1,3,✉}
Je-Ryung Lee^{1,2}, Seung Hwan Moon¹, Tae-Jin Je^{1,3}, Jun-Ho Jeong^{1,3}, Hwi Kim², and Eun-chae Jeon^{1,3,✉}

1 한국기계연구원 나노공정연구실 (Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials)

2 고려대학교 전자및정보공학과 (Department of Electronics and Information Engineering, Korea University)

3 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스 (Department of Nanomechatronics, University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: jeonec@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7055

Manuscript received: 2016.9.8. / Accepted: 2016.10.20.

3D images are generally manufactured by complex production processes. We suggested a simple method to make 3D images based on a mechanical machining technology in this study. We designed a tetrahedron consisted of many arcs having the depth of 100 μm and the pitch of 500 μm , and machined them on an aluminum plate using end-milling under several conditions of feed-rate and depth of cut. The area of undeformed chip including depth of cut and feed-rate can predict quality of the machined arcs more precisely than the undeformed chip thickness including only feed rate. Moreover, a diamond tool can improve the quality than a CBN tool when many arcs are machined. Based on the analysis, the designed tetrahedron having many arcs was machined with no burr, and it showed different images when observed from the left and right directions. Therefore, it is verified that a 3D image can be designed and manufactured on a metal plate by end-milling under optimized machining conditions.

KEYWORDS: End-Milling (엔드밀링), 3D image (3 차원 이미지), Aluminum (알루미늄), Undeformed chip area (미변형 칩면적)

기호설명

s = Light source (Subscript)
c = Center of the arc (Subscript)
r = Right eye (Subscript)
l = Left eye (Subscript)
k = Position of object (Subscript)

1. 서론

3차원 이미지를 구현하는 홀로그래프는 레이저의 간섭효과를 이용한 것으로 1971년 Gabor가 발견한 원리^{1,2}이다. 이러한 3차원 이미지는 습식 에칭을 기반으로 만든 마스터를 이용해 필름을 제작하는 방식으로 제조 과정이 복잡하여 제조비용이 높고,

넓은 면적에 구현하기 힘든 단점이 있다. 이에 기존의 복잡한 3차원 이미지 제작방법과 달리 간단한 가공방법으로 3차원 이미지를 구현할 수 있는 스펙클러 홀로그램 방법^{3,6}이 제시되었다. 비록 일반적인 3차원 이미지에 비해 해상도가 낮지만, 주기적으로 가공된 호 형상을 통해 3차원 이미지를 구현할 수 있어 매우 간단하게 제조할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이에 본 저자들은 기존 연구^{7,8}를 통해 3차원 이미지를 구현하기 위한 설계 기법을 개발하고 이를 엔드밀을 이용해 기계적으로 가공하는 연구를 수행하였다. 그러나 기존 연구에서는 반투명한 소재의 아크릴을 사용해 3차원 이미지를 보는 방식으로 금속에 비해 반사율이 낮아 3차원 이미지를 관찰하기 힘든 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 가볍고 내구성이 좋으며 반사율이 높아 광 부품을 생산하는데 사용⁹되는 알루미늄 (99.999%)에 스펙클러 홀로그램 방식으로 3차원 이미지를 구현하였다. 그러나 알루미늄은 강도가 낮아 쉽게 변형되고 산화가 많이 일어나 피삭성이 나쁜 소재에 속한다. 이에 깨끗한 호 형태의 패턴 가공을 위해 가공조건을 최적화하였다.

2.3 차원 이미지 구현을 위한 설계

기존에 연구된 스펙클러 홀로그램은 관찰자가 호 상에 반사된 빛의 위치를 왼쪽 눈과 오른쪽 눈이 서로 다르게 인식하여 상 (Object)이 깊이를 갖는 3차원 이미지로 인식하게 되는 원리이다. 기존 연구⁸에서 제시한 이론들을 바탕으로 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 여기서 S는 외부광원, E_R은 오른쪽 눈, E_L은 왼쪽 눈의 위치를 의미하고 A_R과 A_L은 외부광원의 빛이 반사되어 각각 오른쪽 눈과 왼쪽 눈으로 들어갈 때 빛이 반사된 위치를 의미한다. A_R과 A_L의 위치 차이에 의해 사람은 빛이 반사된 위치가 실제의 위치와는 달리 K 위치로 인식하게 되어 실제 깊이 (z 방향)와 다르게 인식하게 된다. 이와 같은 원리를 기반으로 본 저자들이 참여한 기존연구에서 3차원 이미지를 구현 할 수 있는 프로그램을 MATLAB을 기반으로 개발⁷하였다. 본 프로그램은 가공 후 스펙클러 홀로그램을 통해 가공면에서 보고자 하는 3차원 이미지를 여러개의 점의 좌표로 나타낸 후 계산을 통해 C (X_C, Y_C, 0)로 변환한다. 그 후 K의 깊이에 따라 호의 반지름, 보고자 하는 각도에

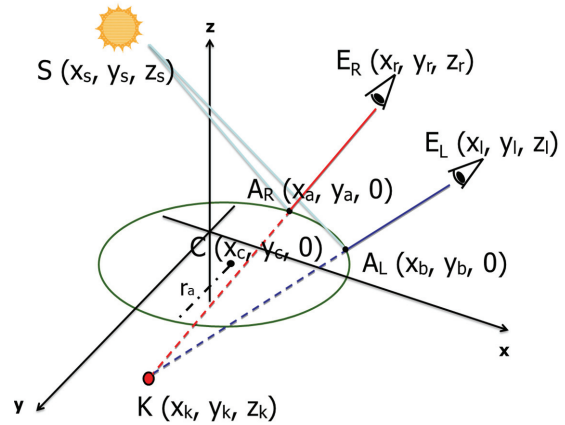


Fig. 1 A principle of the mechanically machined hologram and geometrical relationship among a light source, an arc and human eyes⁸

따라 호의 길이를 정해준 뒤 이를 엔드밀링을 이용해 가공할 수 있는 파일로 변환하도록 설계하였다.

본 연구에서는 동일한 호들로 구성된 정사면체의 밀변과 다른 깊이감을 위해 중심으로부터 호의 반지름이 커지는 세 윗변으로 이루어지도록 상을 설계하였다. 깊이감이 다른 변을 위해서는 연속되는 호간에 겹치게 되는 단점이 있지만 이를 통해 깊이감이 연속적으로 변해 하나의 깊이로 이루어진 상보다 3차원 이미지를 확연하게 느낄 수 있는 장점이 있다. 정사면체의 밀변의 길이는 60 mm이고 정사면체의 중심으로 이동하면 상이 높은 곳에 위치하도록 설계되었다. 밀변의 호의 반지름은 50 mm이고 중심부의 가장 높은 부분의 호의 반지름은 10 mm로 선정하였고 각 호들의 간격은 500 μm로 설계하였다.

3. 엔드밀링을 위한 가공조건

본 연구에서는 알루미늄(99.999%) 판 (110 mm * 110 mm)에 CBN (Cubic Boron Nitride) 불엔드밀을 이용해 연속적인 호를 가공하여 3차원 이미지를 구현하고자 하였다. 엔드밀링 시 Fig. 2와 같은 CBN 불엔드밀을 사용한 이유는 스펙클러 홀로그램의 특성상 여러 방향에서 관찰하기 위해 호의 단면이 반원형에 가까울수록 반사가 여러방향으로 유리해 3차원 이미지를 볼 수 있는 시야각이 넓어지기⁸ 때문이다.



Fig. 2 A CBN end-mill tool for machining the arcs

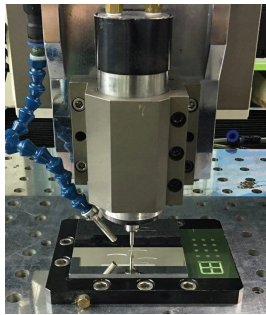


Fig. 3 An end-milling process of arcs for a 3D image on a aluminum plate

Table 1 Detailed specifications of an end-milling system

Item	Specifications
X-axis stroke (mm)	900
Y-axis stroke (mm)	900
Z-axis stroke (mm)	100
Stroke resolution (nm)	< 5
Maximum rotation speed (rpm)	50,000
Maximum feed rate (mm/sec)	500

엔드밀링에 사용한 가공기는 X-Y-Z 3축으로 구동되며, Z축에 2,000 - 60,000 rpm의 회전속도를 가지고 있는 에어스핀들이 설치된 대면적 가공기로서 Fig. 3에 나타냈다. 알루미늄 가공 시 구성인선의 생성을 최대한 방지하기 위해 본 연구에서는 에어스핀들이 안정적으로 구동되는 최대 속도인 50,000 rpm을 Z축 회전 속도로 선정하였다. 엔드밀링 시스템에 관한 자세한 사양은 Table 1에 나타냈다.

알루미늄에 가공조건 최적화를 위해 이송속도와 절삭 깊이 (Depth of Cut)를 변경하여 가공을 진행 하였다. 식(1)과 같이 기존 이론¹⁰에 따르면 미 변형 칩두께는 절삭 깊이가 아닌 이송속도의 영향을 받는다.

Table 2 Detailed specifications of experimental conditions

Case	Feed rate	DOC (Depth of cut)	Undeformed chip thickness
1	5 mm/s	10 μm	1.66 nm
2	5 mm/s	5 μm	1.66 nm
3	5 mm/s	1 μm	1.66 nm
4	2.5 mm/s	10 μm	0.83 nm
5	1 mm/s	5 μm	0.33 nm

$$chip\ max = \frac{feed\ rate}{number\ of\ edge \times rpm} \quad (1)$$

따라서 이송속도의 영향을 보기 위해 절삭 깊이를 고정하고 이송속도를 다르게 가공을 진행하였다. 또한 기존 연구에서도 절삭 깊이가 가공 품질에 영향을 미쳤기 때문에 절삭 깊이의 영향을 보기 위해 이송속도를 고정하고 절삭 깊이가 다른 실험도 진행하였다. 본 저자들이 아크릴에 호를 가공하는 방식으로 기존 연구를 진행⁸하였을 때 얻은 최적조건을 실험 1의 기본 가공 조건으로 선정하였다. 본 실험에서 사용된 알루미늄의 경도를 고려하여 실험 2부터 5의 가공 조건을 다음과 같이 선정하였고 각각의 가공 조건은 Table 2에 나타났다. 가공 시 최종 깊이는 100 μm 로 모두 동일하게 진행하였다.

4. CBN 불 엔드밀을 이용한 가공조건 최적화

실험 1부터 5까지의 가공을 진행하였고 CBN 불 엔드밀링으로 생성된 패턴의 상태를 관찰하였다. 우선 가공된 표면의 버를 정성적으로 분석하였다. 실험 1의 경우 발생된 버로 인해 두 개의 패턴이 겹쳐 보이는 현상이 있을 정도로 버가 많이 발생한 것을 확인하였다. 실험 2는 실험 1에 비해 버가 많이 줄어들음을 확인하였고, 실험 3의 경우는 육안으로 버가 거의 확인되지 않을 정도로 버가 줄어들었음을 확인하였다. 또한 실험 1, 2, 3에 비해 미변형 칩두께가 작은 실험 4는 실험 1보다 버가 적으나 실험 2와 3보다 버가 많이 발생됨을 확인하였고, 실험 5는 실험 3보다는 버가 있으나 부분적으로 버가 존재함을 확인하였다. 따라서 버를 관찰한 결과 실험 3의 패턴이 버가 가장 적으며 일정한 것을 확인하였다. 가공된 패턴의 버를 육안으로 관찰한 결과 버의 양은 실험 1 > 실험 4 > 실험 2 > 실험 5 > 실험 3 순으로 확인되었다.

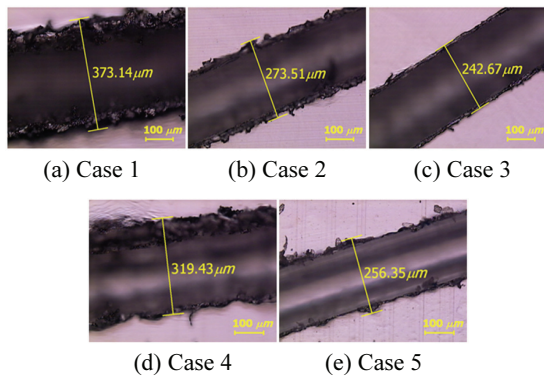


Fig. 4 Top views of machined arcs of (a) case 1(feed-rate: 5mm/s DOC: 10 μm), (b) case 2(feed-rate: 5mm/s DOC: 5 μm), (c) case 3(feed-rate: 5mm/s DOC: 1 μm), (d) case 4(feed-rate: 2.5mm/s DOC: 10 μm) and (e) case 5(feed-rate: 1mm/s DOC: 5 μm)

다음으로 현미경으로 가공된 패턴을 정량적으로 분석하여 육안으로 확인한 결과와 비교 관찰하기 위해 버를 포함한 패턴의 폭을 측정하였다. 실험 1의 경우 200 μm로 가공되었어야 할 패턴의 폭이 373 μm 이상으로 크게 가공이 되었으며 Fig. 4(a)와 같이 패턴주변에 버가 심해 가공이 되었다기보다는 알루미늄이 뜯겨져 나간 것을 확인할 수 있었다. 실험 2번의 경우 패턴의 폭이 273 μm 로 크게 가공이 되었으며 Fig. 4(b)와 같이 패턴주변에 버가 확인되었으나 실험 1에 비해 패턴 폭도 많이 줄어들었으며 버도 감소해 패턴의 품질이 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한 실험 3의 가공 결과 역시 패턴의 폭은 242 μm로 확인되었지만 Fig. 4(c)와 같이 패턴 주변에 생기는 버는 감소하였으며 일정한 두께로 생성되었음을 현미경을 통해 확인하였다. 실험4의 경우에는 패턴의 폭은 319 μm로 실험 1보다 200 μm에 가까웠으나 Fig. 4(d)와 같이 패턴 주변의 일정하지 못한 버가 많이 생성됨을 확인하였다. 마지막으로 실험 5의 경우에도 가공된 패턴의 폭은 256 μm로 200 μm에 가까웠으나, Fig. 4(e)와 같이 패턴 주변에 일정하지 않은 버가 생김을 확인하였다. 이에 현미경을 통해 패턴의 품질을 정량적으로 분석한 결과 실험3의 패턴 품질이 가장 우수함을 확인하였다. 다음과 같이 현미경으로 패턴의 품질을 비교한 결과 실험 3 > 실험 5 > 실험 2 > 실험 4 > 실험 1 순으로 육안으로 관찰한 결과와 동일함을 확인하였다.

위의 식(1)과 같이 이송속도에 따른 영향 즉

미변형 칩두께에 의한 영향을 확인하기 위해 실험 1과 4 그리고 실험 2와 5를 비교 하였다. 미변형 칩두께만 본다면 두께가 얇을수록, 즉 이송속도가 작을수록 좋은 패턴 품질의 결과로 예상되었다. 그러나 실험 4는 실험 1에 비해 패턴의 폭이 319 μm로 200 μm에 가깝게 가공되었지만 패턴에 버는 실험 1과 같이 많이 생성됨을 확인하였다. 이는 실험 1과 마찬가지로 패턴이 정상적인 가공을 통해 생성되지 못하고 뜯김에 의해 생성되었다고 볼 수 있다. 다음으로 실험 2와 5를 비교하였을 때 이 역시 이송속도가 작은 실험 5의 가공 품질이 더 좋음을 확인하였다. 그러나 실험 5 역시 일정 치 않은 버가 패턴 주변에 생성되어 3차원 이미지를 관찰할 때 이미지가 왜곡되어 보이는 현상이 발견되었다. 위와 같이 실험을 비교한 결과 패턴 품질은 실험 5 > 실험 2 > 실험 4 > 실험 1 순서로 이송속도와 절삭 깊이에 따라 예상했던 것과 다른 결과를 가짐을 확인하였다. 이에 이송속도는 패턴의 가공 품질에 영향을 미치지만 이송속도를 줄이는 것 만으로는 알루미늄에서 3차원 이미지를 볼 수 있는 충분한 가공 품질을 얻을 수 없음을 확인하였다.

다음으로 절삭 깊이가 가공품질에 미치는 영향을 보기 위해 실험 1부터 3을 비교 관찰하였다. 세 실험을 비교한 결과 절삭 깊이가 줄어들수록 패턴의 가공 품질이 확연히 좋아짐을 확인할 수 있었다. 실험 3의 결과는 패턴의 폭과 버의 상태가 위의 모든 실험에 비해 가장 좋음을 확인하였다. 이에 실험 3과 같이 절삭 깊이가 낮을수록 패턴의 품질이 좋아지나, 이송속도 또한 패턴 품질에 영향을 미침을 알 수 있었다.

위의 결과를 토대로 알루미늄을 가공할 시에는 가장 먼저 고려가 되는 칩두께는 물론 절삭 깊이도 고려해 주어야 함을 확인하였다. 이에 모두 고려할 수 있는 인자인 미변형 칩면적을 도출하였다. 미변형 칩면적은 식(2)와 같이 칩두께와 절삭 깊이를 모두 고려한 것으로 두 인자의 곱으로 이루어져 있다.

$$\text{area of undeformed chip} = \text{chip max} \times \text{depth of cut} \quad (2)$$

이에 실험 1이 가장 큰 미변형 칩면적인 16.66 nm² 를 가지게 되고 실험 2와 4 같은 미변형 칩면적인 8.33 nm² 를 가지며, 실험 3과 5 역시 Fig. 5와 같이 같은 1.66 nm²의 미변형 칩면적을 가지게 된다. 이렇게 실험 1과 실험 2, 4와 실험 3, 5로 나누

어 결과를 비교해 보면 미변형 칩면적이 작을수록 더 좋은 품질의 패턴이 가공됨을 알 수 있다. 그러나 같은 면적을 가지는 실험 2와 4의 실험 결과를 보면 절삭 깊이가 낮은 실험 2가 더 좋은 품질의 패턴이 가공되었다. 또한 실험 3과 5를 비교한 결과도 절삭 깊이가 낮은 실험 3에서 더 좋은 품질의 패턴이 가공되었다.

5. 공구 최적화를 통한 3차원 이미지 구현

본 논문에서는 3차원 이미지를 구현하기 위해서는 많은 개수의 호를 넓은 면적에 가공해야 한다. 따라서 가공 시간이 길어지며 공구의 마모가 발생할 수 있다. 이에 미변형 칩면적이 동일한 실험 3과 실험 5의 조건으로 하나의 호가 아닌 여러 개의 호를 가공해 공구 마모 상태를 확인하였다. 실험 3에서와 같은 조건으로 가공 시 사용된 공구를 관찰한 결과 Fig. 5(a)와 같이 공구의 앞이 약간의 마모 되었으나 구성인선은 발견되지 않았다. 반면 실험 5와 같은 조건에서 사용된 공구는 Fig. 5(b)와 같이 마모가 심하게 발생했으며 알루미늄이 달라붙어있는 구성인선 역시 발견할 수 있었다. 이는 절삭 깊이의 차이에 의해 위의 실험 3과 실험 5는 미변형 칩면적이 같지만 Fig. 6과 같이 공구를 사용하는 면적이 다르기 때문이다. 공구를 사용하는 면적이 넓은 실험 5에서 더 많은 구성인선이 발생하였으며 이는 패턴의 품질 저하와 공구 마모를 유발함을 확인하였다. 또한 CBN 공구는 소결 공구로 구성인선 발생 시 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 공구의 마모와 탈락이 쉽게 발생하는 단점이 있다. 따라서 넓은 면적에 오랜 시간 가공해야 하는 3차원 이미지는 CBN 공구를 사용하는 것이 적합하지 못하다고 판단하였다. 이에 기존 연구¹¹를 조사한 결과 순수한 알루미늄을 가공할 시 다이아몬드 공구를 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었다. 이에 다이아몬드 공구를 이용하여 3차원 이미지 구현을 위한 가공을 진행하였다.

앞서 진행한 가공 최적조건인 이송속도 5 mm/s 절삭 깊이 1 μm와 다이아몬드 공구를 사용하여 가공을 진행하였다. 공구가 다름에도 같은 조건을 쓴 이유는 최적화를 진행한 공구와 본 실험에서 쓰인 공구가 Fig. 7과 같이 반구형으로 형상이 같고 반지름 100 μm로 동일한 크기를 갖기 때문이다. 또한 위에서 최적화를 진행한 것과 동일한 알루미늄

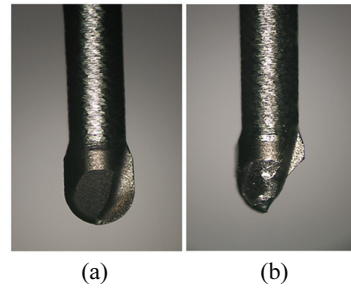


Fig. 5 Comparison of CBN end-mill tools after machining of arcs of (a) case 3 and (b) case 5

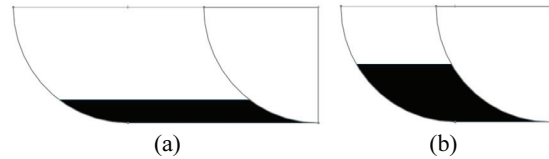


Fig. 6 Comparison of same undeformed chip having (a) low depth of cut and (b) deep depth of cut



Fig. 7 A diamond end-mill tool for machining of the arcs

늄 (99.999%) 판 (110 mm *110 mm) 위에 연속적인 호를 가공하여 3차원 이미지를 구현하고자 하였다. 홀로그램 형상은 앞서 2절에서 설계한 것과 동일한 사면체이고 밀변의 길이는 60 mm이고 밀변의 호의 반지름은 50 mm이고 중심부의 가장 높은 부분의 호의 반지름은 10 mm이고 각 호들의 간격은 500 μm로 가공하였다.

많은 호가 넓은 면적에 가공된 알루미늄을 육안으로 관찰하였고 설계된 사면체를 이루는 호가 Fig. 8(a)와 같이 가공되었음을 확인하였다. 가공된 호를 현미경을 통해 관찰한 결과 역시 Fig. 8(b)와 같이 패턴에 버 발생이 없이 깨끗한 상태로 가공되었음을 확인하였다. 가공 초반의 패턴뿐이 아니고 후반부의 패턴도 동일하게 가공되었다. 가공된 패턴 폭이 200 μm보다 작은 171 μm로 가공되었는

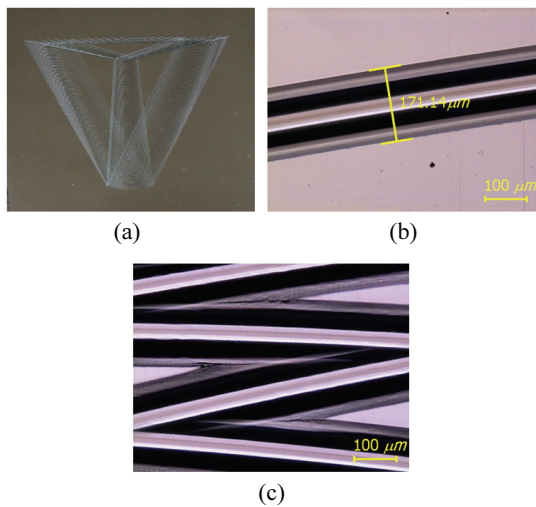


Fig. 8 Shape of (a) the machined tetrahedron consisting of mane arcs, (b) a single machined arc and (c) crossed machined arcs

데 이는 가공 시 공구와 알루미늄의 위치 설정 시 오차가 발생했기 때문으로 판단된다. 그러나 3차원 이미지를 구현하는데 있어서 가장 중요한 요소는 패턴의 반사에 있기 때문에 패턴의 폭보다 패턴 주변에 생성되는 버가 더 큰 영향을 미치므로 작게 가공된 패턴은 영향이 미비할 것으로 예측하였다. 또한 앞서 실험 조건 최적화를 위해 한 개의 호를 가공했을 때와 다르게 호들이 서로 겹치는 부분이 발생했기 때문에 그 부분 역시 현미경으로 관찰하였고 Fig. 8(c)와 같이 겹치는 부분에서도 버가 발생하지 않고 깨끗하게 가공되었음을 확인하였다.

마지막으로 엔드밀링 가공조건의 최적화를 통해 가공된 호형상 패턴의 3차원 이미지 구현 검증을 위한 광학 실험을 진행하였다. 3차원 이미지란 사람의 두 눈의 양안 시차를 통해 시현된다. 그렇게 때문에 하나의 렌즈를 가지는 카메라로 3차원 이미지를 확인하는 것은 불가능하다. 이에 기존 논문^{5,6}들에서는 다른 각도에서 촬영한 이미지를 비교해 3차원 이미지의 효과를 증명하였다. 이에 본 논문에서도 다른 각도에서 촬영된 3차원 이미지를 비교해 효과를 검증하였다. 본 실험에서는 가공된 시편을 중앙에 두고 빛을 좌우로 이동하면서 3차원 이미지를 관찰하였다. 광학실험을 진행한 결과 Figs. 9(a)와 9(b)와 같이 오른쪽과 왼쪽에서 확연히 다른 이미지를 확인 할 수 있었다. 또한 Figs. 9(a)에서 9(b)까지 빛을 이동할 때에도 3

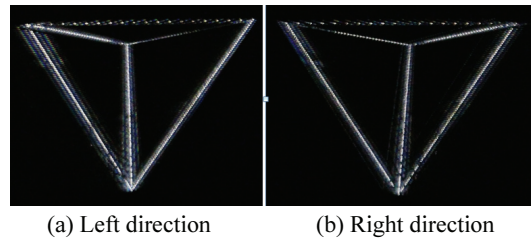


Fig. 9 Comparison of images of the machined tetrahedron taken at (a) left direction and (b) right direction

차원 이미지가 끊어지지 않고 각도에 따라 시시각각 변함을 확인하였다. 이를 통해 다이아몬드 공구와 최적화된 가공조건의 엔드밀링을 통해 알루미늄 위에 3차원 이미지를 구현할 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 엔드밀링 가공조건의 최적화를 통해 금속상의 3차원 이미지를 구현하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초정밀 엔드밀링으로 가공된 호의 빛 반사와 양안 시차를 이용해 3차원 이미지를 구현할 수 있는 이론을 정립하였다.

(2) 알루미늄 상에 CBN 불엔드밀 공구를 사용하여 호형태의 패턴을 가공함에 있어 가공조건 최적화를 진행하였고 이송속도와 가공 깊이가 모두 고려된 미변형 칩면적이 가공품질에 가장 큰 영향을 미친다.

(3) 3차원 이미지 구현을 위한 대면적 가공 시에는 공구 마모를 고려했을 때 소결 공구인 CBN 공구가 아닌 다이아몬드 공구를 사용하는 것이 유리하다.

(4) 미변형 칩면적을 고려한 호형태의 패턴을 알루미늄상에 가공하고 이를 통해 3차원 이미지를 구현하였다.

후 기

이 논문은 ‘산업통상자원부’의 산업핵심기술개발사업인 ‘폴-컬러 구현을 위한 표면 3D 나노구조체기반 회절광학소자 실용화 플랫폼기술 개발’과 ‘국가과학기술연구회’의 한국기계연구원 정부출연금사업인 ‘능동소자용 기능성 나노복합구조체 융합가공기술 개발’의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Gabor, D., "A New Microscopic Principle," *Nature*, Vol. 161, No. 4098, pp. 777-778, 1948.
2. Gabor, D., "Microscopy by Reconstructed Wavefronts," *Proc. of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, pp. 454-487, 1949.
3. Plummer, W. T. and Gardner, L. R., "A Mechanically Generated Hologram?" *Applied Optics*, Vol. 31 No. 31, pp. 6585-6588, 1992.
4. Beaty, W. J., "Drawing Holograms by Hands," *Proc. of International Society for Optics and Photonics in Electronic Imaging 2013*, pp. 156-167, 2003.
5. Duke, T., "Drawing Light-Fields: Hand-Drawn Approaches to Abrasion Holography," *Journal of Physics*, Vol. 415, pp. 1-8, 2013.
6. Brand, M., "Specular Holography," *Applied Optics*, Vol. 50, No. 25, pp. 5042-5046, 2011.
7. Lee, J.-R., Jeon, E.-C., Kim, H., Je, T.-J., Kim, H.-J., et al., "Micro-Pattern Design for Implementation of Specular Holography," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 297-298, 2013.
8. Jeon, E.-C., Lee, J.-R., Choi, H.-J. Je, T.-J., and Kim, H., "Modeling and Manufacturing of Mechanically Machined Hologram Based on Repeated Arcs and End-Milling," *Proc. of 4M/ICOMM Conference*, pp. 178-181, 2015.
9. Jeong, G.-E., "The Effect of a Grain Size on Mechanical Properties of Al and Strategies to Suppress Grain Growth of Nanocrystalline Al," M.Sc. Thesis, School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, 2015.
10. Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles," Oxford University Press New York, 2nd Ed., p. 20, 2005.
11. Roy, P., Sarangi, S., Ghosh, A., and Chattopadhyay, A., "Machinability Study of Pure Aluminum and Al-12% Si Alloys Against Uncoated and Coated Carbide Inserts," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 3, pp. 535-544, 2009.