

◆특집◆ 초정밀가공기술

초정밀가공기를 이용한 VGA급 전방위 카메라시스템 개발

김건희*, 양순철*, 김효식*, 이인제*, 복민갑*, 권경일**

The Development of VGA Level Omni-Directional Surveillance Camera used Ultra Precision Machine

Geon Hee Kim*, Sun Choel Yang*, Hyo Sik Kim*, In Je Lee*, Min Gab Bok* and Gyeong Il Kweon**

Key Words : SPDTM(간결정 다이아몬드 터닝머신), Aspheric mirror(비구면 미러), Surface Roughness(표면거칠기), Cutting force(절삭력)

1. 서론

현대 산업기술의 발달로 인하여 새로운 기술 분야에서 초정밀 가공에 대한 의존도가 높아지고 있고 적용분야의 폭이 확대되고 있다. 특히 IT 산업 분야에서 초정밀 가공기를 이용한 비구면 전방위 반사경 가공에 있어서 정밀성, 호환성, 경제적인 생산에 따른 문제점을 해결하고 보완하기 위하여 초정밀 가공기술과 치공구의 정밀한 설계와 제작이 이 분야의 중요한 위치를 차지하고 있다. 이에 최근 산업체에서 초정밀 가공기술과 치공구에 대한 전문적인 기술력이 요구하고 있으나 아직 까지도 국내 업체의 열악한 환경으로 인하여 자체 기술만으로는 역부족인 실정이다. 이러한 환경에 대처하기 위하여 전방위 설계기술과 아이디어를 바탕으로 반사경의 초정밀가공 및 시스템 설계 제작을 통한 기술력 확보가 필요한 상태이다.¹

전방위 영상 시스템이나 전방향 영상 시스템은 건축물, 자연 경관, 천체 등의 촬영과 같은 전

통적인 분야뿐만 아니라, CCD(charge-coupled device) 카메라를 이용한 보안감시 시스템, 부동산이나 호텔, 관광지 등의 가상 여행(virtual tour), 또는 이동 로봇이나 무인 비행기 등의 분야에 적용하기 위한 많은 연구와 개발이 이루어지고 있다.^{2,3}

이제까지 광학 부품의 렌즈에는 구 또는 구면 형상의 렌즈가 이용되었으나 현재에는 성능향상과 고정밀도를 높이기 위하여 렌즈의 비구면화가 진행되고 있으며 이것은 초정밀 경면가공 기술에 의하여 실현되고 있으며, 비구면 렌즈는 다수의 구면 렌즈를 하나의 비구면 렌즈로 대체할 수가 있어서 VGA 급 직선수차 보정 광각카메라의 경량화, 고정도화에 이르는 주요 역할을 하고 있다.^{4,5}

전통적인 가공방법으로는 낮은 생산 효율과 자동으로 조절 능력이 부족하고 공작물의 edge effect 와 같은 많은 결점을 가진 폴리싱이 있다. 게다가 폴리싱은 수요가 증가하고 있는 비구면을 가공할 수 없다. 단결정 다이아몬드 선삭은 적당한 연성 때문에 가공하기 쉬운 알루미늄, 동과 같은 비철금속의 광학 반사경 제조에 널리 사용되고 있다.^{6,7}

VGA 급 전방위 카메라시스템과 같은 시야각이 넓은 광각시스템 개발을 위한 반사경에 사용되는 알루미늄합금의 초정밀 선삭 기술은 광학계의 설계기술 뿐만 아니라 요구정밀도를 만족시키는 초

* 한국기초과학지원연구원 연구장비개발부 초정밀가공팀
Tel. 042-865-3460, Fax. 042-865-3469

Email : kgh@kbsi.re.kr

초정밀 선삭, 연삭, 폴리싱 등 대구경 비구면 초정밀가공 공정기술 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 호남대학교 광전자공학과

정밀 가공기술의 수반이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 VGA 급 전방위 카메라 시스템에 사용되는 광학계의 소재인 Al6061 과 Al7075 에 대한 최적 초정밀 가공 조건을 찾기 위해서 초정밀 가공에 사용되는 주축속도, 절삭깊이, 이송속도에 대한 초정밀 최적가공조건을 찾아내었으며, Kistler 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정하였다. 초정밀 절삭특성 실험 결과 Al6061 의 소재가 표면 거칠기면에서 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻은 초정밀 가공조건을 이용하여 VGA 급 전방위 카메라에 적용되는 비구면 반사경을 제작하였으며, 시스템 조립을 통한 전방위 영상을 얻은 초정밀가공 기술개발 사례에 관하여 기술하였다.⁸

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에서 절삭력을 측정하기 위해 초정밀 가공기인 Nanoform 600 을 사용하였으며, Fig. 1 과 같은 절삭력 측정 장치를 구성하였다. 절삭력 측정을 위한 공구 동력계로는 Kistler Type 9256 A2, 충전앰프(Charge Amplifier)는 Kistler Type 5019 를, DAQ Card 는 National Instruments(NI)사의 Lab PC+ 를 사용해 검출한 절삭력 신호를 컴퓨터 응용 소프트웨어를 사용해 주분력, 배분력, 이송분력을 절삭력 데이터로 저장하여 분석하였다.

초정밀 가공 시 절삭력 측정기술은 절삭 다이 나믹스를 이해하고 제어기법을 개발하는데 필수적이다. 이 힘들은 단지 다른 기본적인 금속절삭 초정밀 가공기(DTM)에 공구 동력계를 장착할 수 있도록 지그(Jig)를 설계 제작하여 부착하였다. 실험은 단결정 다이아몬드 공구로 40mm 크기의 알루미늄합금을 단면절삭방법으로 절삭 실험을 실시하였다. 초정밀 가공기에 설치된 압전형 공구동력계를 이용하여 얻은 아날로그 3 축 절삭력 신호를 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 PC 에 전송하여 데이터 처리하였다. 단면 절삭에 의한 절삭력 측정으로 Y 축 방향에 작용하는 힘인 주절삭력을 Ft(Tangential force)로 표기 하였으며, Z 축 방향으로 작용하는 절삭력인 배분력을 Fp(Passive force)로 나타내고, X 축 방향에 작용하는 힘인 이송분력을 Ff(Feed force)로 표기하였다.

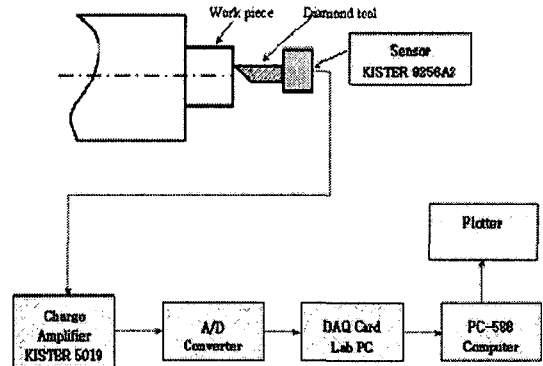


Fig. 1 Experimental setup

실험에 사용된 재료는 Al6061 과 Al7075 로써 물성치는 Table 1 에 나타내었다. 초정밀가공 실험에 사용된 천연 다이아몬드 공구는 코너 노우즈 반경 R=1.0, 경사각 -0° , 여유각 10° 로 예리하게 완성된 바이트를 사용하였다. 또한, 가공액은 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 방법을 취하였다.

Table 1 Component of Al-alloy

Al 6061-T651		Al 7075-T651	
Al	95.8 ~ 98.6	Al	87.1 ~ 91.4
Cr	0.04 ~ 0.35	Cr	0.18 ~ 0.28
Cu	0.15 ~ 0.4	Cu	0.2 ~ 0.2
Fe	Max 0.7	Fe	Max 0.5
Mg	0.8 ~ 1.2	Mg	2.1 ~ 2.9
Mn	Max 0.15	Mn	Max 0.3
Si	0.4 ~ 0.8	Si	Max 0.4
Ti	Max 0.15	Ti	Max 0.2
Zn	Max 0.25	Zn	5.1 ~ 6.1

Fig. 2 은 절삭력 측정을 위한 초정밀 가공 시편과 공구동력계 위에 천연다이아몬드 공구를 장착하여 실험하는 장면과 데이터 수집 분석시스템을 나타낸다.

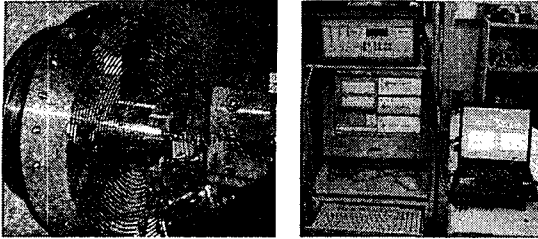


Fig. 2 Cutting experiment apparatus

2.2 실험방법 및 조건

초정밀 가공기의 절삭력을 측정하기 전에 우선 초정밀 가공기의 특성을 파악하기 위하여 가공을 하지 않을 경우 주축속도에 따라 공구 동력계의 신호를 비교 분석하였다. 그리고 절삭조건인 주축속도, 절삭깊이, 이송속도에 따른 절삭력을 공구 동력계에서 나오는 신호를 컴퓨터에서 분석하였다.

실험방법은 일차 초정밀 가공한 알루미늄합금을 주축의 진공척에 20psi 로 고정하여 회전시키고 공구대에 천연다이아몬드 공구를 장착한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였고, 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 비접촉 표면조도 측정기인 NT2000 으로 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다. 이때 측정 방법은 시편의 ϕ 30mm 되는 부분을 선정하여 가공표면의 네 포인트를 지정하여 항상 같은 위치에서 16 번 반복 측정하여 그 중 오차 범위가 큰 값을 제외하고 데이터의 평균을 내어 측정값을 얻었다.

Table 2 는 본 실험에 선정된 절삭 조건들을 나타낸 것이다.

Table 2 Cutting condition

Material	Al6061, A7075
Cutting speed(m/min)	140, 170, 200, 230, 260
Feed rate(mm/min)	2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(μ m)	2, 4, 6, 8, 10
Vacuum pressure	-21 kg f/cm ²
Nose radius (mm)	1.0
Cutting fluid	Air+EDM oil

3. 실험결과 및 고찰

3.1 알루미늄 합금의 표면 거칠기 특성

Fig. 3 은 단결정 다이아몬드 바이트를 사용하여 알루미늄합금을 이송속도 4 mm/min, 절삭깊이 4 μ m로 고정하고, 절삭 조건에서 주축속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 한 결과이다. 절삭속도를 140~260 m/min 까지 절삭속도를 단계적으로 변화시켰으며, 그 결과 Al6061 은 절삭속도에 따른 변화는 거의 나타나지 않으나, 230 m/min 까지 표면 거칠기가 양호하다 그 이상에서 표면이 악화되는 경향이 나타났다. Al7075 는 절삭속도 230 m/min 에서 8nm Ra로 가장 양호한 표면거칠기가 나타나고 있다. Al6061 과 Al7075 의 절삭속도 변화에 대한 표면거칠기 특성 결과 Al6061 에서 표면거칠기가 Al7075 에 비하여 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있었으며, 실험결과 절삭속도 230 m/min 에서 2.93 nm Ra 의 최고 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

Fig. 4 는 Al 6061 과 Al 7075 를 단결정 다이아몬드 바이트로 절삭속도 230 m/min, 이송속도를 4 mm/min 으로 고정하고, 절삭 깊이가 2~10 μ m까지 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 한 결과이다. 절삭 가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭 깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 4 의 결과를 볼 때 4 μ m까지 표면 거칠기가 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있고, 4 μ m 이상에서는 표면 거칠기가 거의 일정하나 조금씩 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

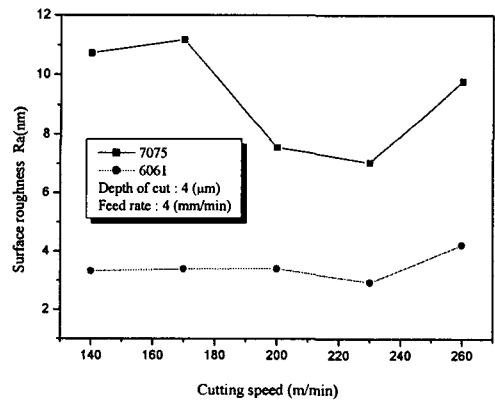


Fig. 3 Surface roughness versus cutting speed

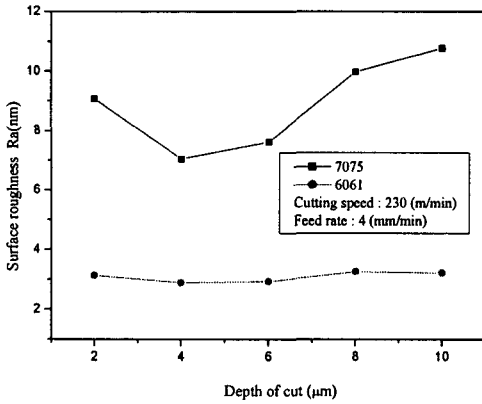


Fig. 4 Surface roughness versus depth of cut

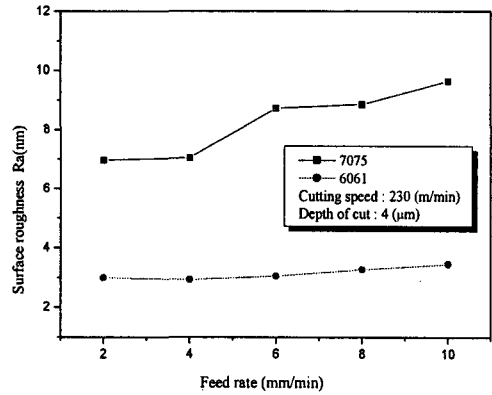


Fig. 5 Surface roughness versus feed rate

Fig. 5 은 Al6061 과 Al7075 의 최적표면을 얻기 위해 표면 거칠기가 가장 좋은 230 m/min 의 절삭 속도, 절삭 깊이 4 μm 로 고정하고 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기 실험결과를 나타낸다. 이 때 이송속도의 변화는 2~10 mm/min 까지 변화를 주었으며, 그 결과 본 초정밀 가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선형의 표면을 형성시키고, 2 차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송률 만큼 간격을 두고 반복적으로 이루어진다. 이송속도는 동일한 절삭 깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면 거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 표면 거칠기 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1 회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기($R_{max}=f^2/8R$)⁵ 와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 실험결과와 이론적 표면 거칠기 값과는 차이가 있는데, 이와 같은 이유는 실험에 사용된 알루미늄 합금이 연성이고, 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2 알루미늄 합금의 절삭력 특성

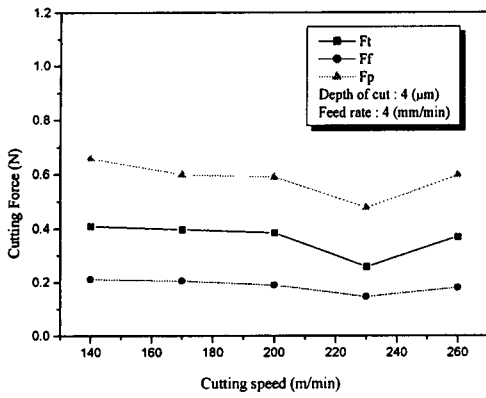
Fig. 6 은 알루미늄 합금을 이송속도 4 mm/min, 절삭 깊이 4 μm 의 조건에서 절삭속도 변화에 따른 동적상태의 절삭력을 측정된 결과이다.

절삭속도가 증가함에 따라 절삭력은 서서히 증가한다. 절삭속도 230 m/min 이하에서는 삼분력이 일정하지만 230 m/min 이상에서 절삭력이 급격히 증가한다. 그 원인은 주축의 고속회전에 의한 공진 등의 외부요인으로 인하여 급격히 증가하여 나타난다. 이 실험으로 초정밀가공기의 안정된 최대 절삭속도 한계가 230 m/min 임을 알 수 있다.

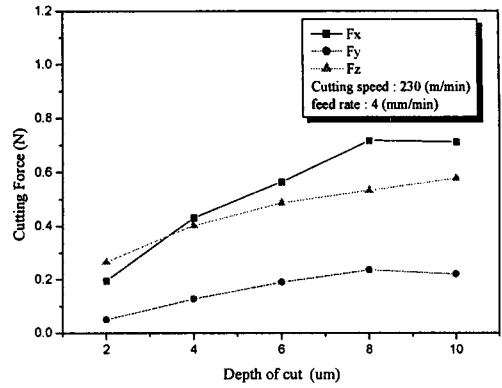
또한, 그림 Fig. 6 에서와 같이 Al 6061 보다 Al 7075 가 절삭력이 높다는 것을 알 수 있다. Al 7075 가 Mg, Cr 과 같은 성분이 보다 많이 함유를 하므로 Al 6061 보다는 경도가 높으며, 초정밀 가공 시 주변력(F_t)보다 배분력(F_p)이 높게 된다.

Fig. 7 은 알루미늄합금을 절삭속도 230 m/min, 이송속도를 4 mm/min 의 절삭조건에서 절삭 깊이 변화에 따른 절삭력을 측정된 결과이다

절삭깊이 변화에 따른 절삭력의 경향을 보면,

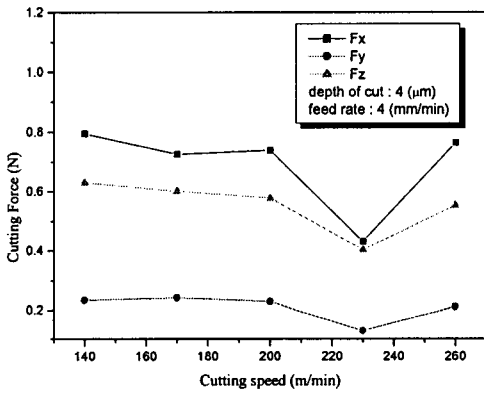


(a) Al6061-T651



(b) Al7075-T651

Fig. 7 Dynamic cutting force versus depth of cut

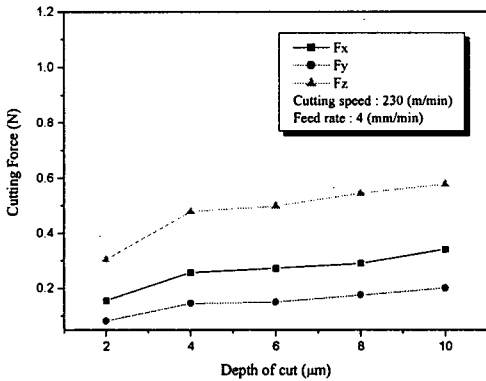


(b) Al7075-T651

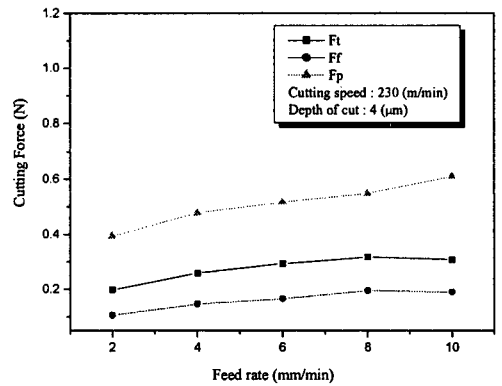
이론적인 표면거칠기 식에서는 절삭깊이에 대한 영향은 없지만, 실제 가공에 있어서는 절삭깊이가 증가함에 따라 절삭력도 증가함을 알 수 있다.

알루미늄 합금의 이송에 대한 절삭력을 Fig. 8 에 서와 같이 절삭속도 230 m/min, 절삭 깊이 4 μm로, 이송속도 변화에 대한 동적상태의 절삭력을 나타낸 것이다. 이송에 따른 절삭력의 경향을 보면, 이송 속도가 빠를수록 절삭력이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 이송이 클수록 절삭 면적이 증가하기 때문이다

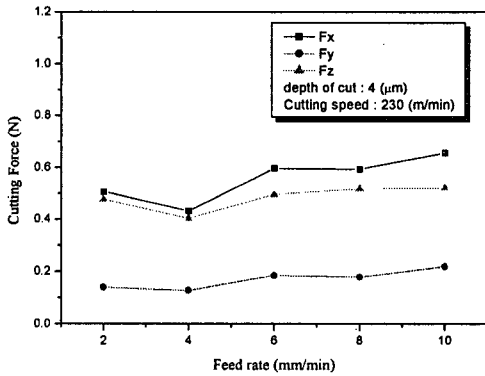
Fig. 6 Dynamic cutting force versus cutting speed



(a) Al6061-T651



(a) Al6061-T651



(b) Al7075-T651

Fig. 8 Dynamic cutting force versus feed rate

4. VGA 급 전방위 카메라 시스템 개발

알루미늄합금의 초정밀 가공 특성 실험을 바탕으로 전방위 카메라의 주 반사경에 대한 초정밀 가공을 수행하였다. 전방위 카메라용 반사경의 재료는 Al6061 과 Al7075 의 표면거칠기 특성결과 표면 거칠기가 양호한 Al6061 의 소재를 선택하였으며, Table 3 은 사용된 알루미늄합금의 최적가공 조건을 나타낸다.

VGA 급 전방위 카메라시스템의 핵심부품으로 사용되는 비구면 반사경은 형상과 표면정밀도에 의해 반사되는 이미지를 CCD 센서에 반사시킴으로써 표면 형상과 거칠기에 의해 이미지의 해상도를 결정하므로 비구면 반사면의 초정밀가공은 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그리고 전방위 카메라시스템의 대부분은 반사경을 사용하고 있으며,

Table 3 Cutting conditions of Al6061

Material	Al6061
Cutting speed (m/min)	230
Depth of cut (μm)	4
Feed rate (mm/min)	4
Nose radius of tool (mm)	1.0
Cutting fluid	Air+EDM oil (MQL)

렌즈보다 반사경을 사용함으로써 갖은 많은 장점들로 인하여 비구면 반사경의 연구가 활발히 이루어 지고 있다.^{2,3}

초정밀가공 요구형상정밀도 1.0 μm Rt 값을 얻기 위하여 황삭, 중삭가공을 하고, 최적 절삭조건인 절삭속도 230 m/min, 절삭깊이 4 μm, 이송속도 4 mm/min,로 정삭가공을 하였으며, 가공된 표면의 비구면 형상정밀도는 Form talysurf series2 를 이용하여 측정하였다. 또한 국부적인 표면 형상은 백색광간섭원리를 이용하는 NT2000 을 이용하여 측정하였다. Fig. 9 는 전방위 카메라 용 비구면 반사경을 초정밀가공기로 가공하고 있는 장면을 나타내며, Fig. 10 는 비구면 형상측정기를 이용한 형상측정결과를 나타낸다. 측정결과 비구면 반사면의 Rt 값은 0.9233 μm로써 요구정밀도 이내이다. Fig. 11 은 국부적인 표면거칠기 2.93nm Ra 를 얻은 결과이며, Fig. 12 는 시제품을 나타내며, Fig. 13 에 관측 결과 이미지를 보여주고 있다.

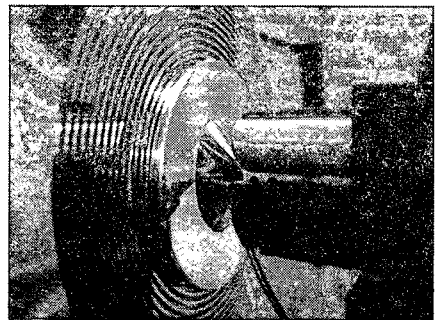


Fig. 9 Machining reflector mirror by SPDTM

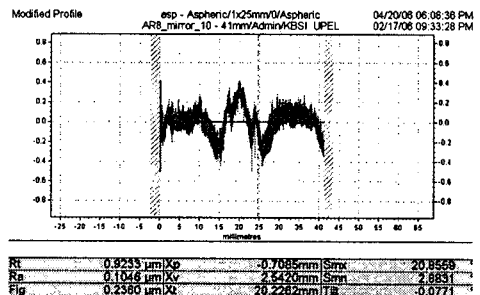


Fig. 10 Measure of aspheric reflector mirror by Form talysurf series2

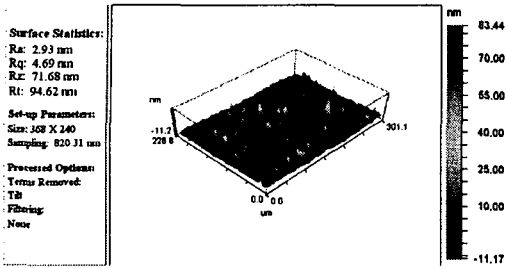


Fig. 11 Measure of aspheric reflector mirror by NT2000

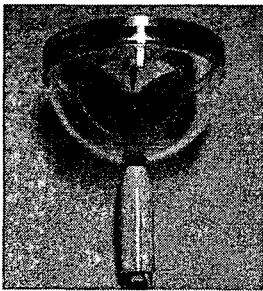


Fig. 12 Photograph of the fabricated panoramic mirror with a rectilinear projection scheme

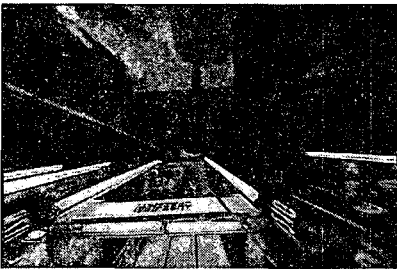


Fig. 13 Exemplary panoramic image taken using the panoramic mirror along with a CCD sensor

5. 결론

VGA 급 전방위 카메라에 사용되는 알루미늄합금의 초정밀절삭특성 실험을 통하여 Al6061 과 Al7075 의 표면 거칠기 및 절삭력을 측정하였다. 실험결과를 이용하여 360 도 전방향을 한대의 카메라로 관측할 수 있는 VGA 급 전방위 카메라를 설계 제작하여 영상이미지를 관측하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 알루미늄합금의 초정밀 절삭특성 실험을 통한 표면거칠기 특성에서 최적절삭조건은 절삭속

도 230 m/min, 절삭 깊이가 4 μ m, 이송속도 4 mm /min 일 때 Al6061 소재에서 2.93 nm Ra, 와 Al7075 재료에서 7.041 nm Ra 의 표면 거칠기 결과를 얻을 수 있었다.

2. 절삭력 측정결과 표면거칠기 특성과 동일한 실험 조건에서 가장 낮은 절삭력을 얻을 수 있었으며, Al6061 의 주절삭력은 0.2N, Al7075 는 0.5 N 의 주 절삭력을 얻을 수 있었다.
3. VGA 급 전방위 카메라 설계와 반사경에 대한 초정밀가공을 통하여 비구면 반사면에 대한 0.9233 μ m Rt 의 측정 결과를 얻을 수 있었다.
4. 전방위 카메라를 실내에 설치하여 영상을 촬영하였으며, VGA 급의 영상을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Sugano, T., Ihara, Y., Nnkatsu, Y. and Shinohara, A., "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror," Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, pp.17~20, 1987.
2. Hicks, R. A. and Bajcsy, R., "Image and Vision Computing," Vol. 19, pp.773, 2001.
3. Ishiguro, H., "Panoramic Vision: Sensors, Theory, and Applications," Springer, New York, pp. 23-38, 2001.
4. Suzuki, H., Hara, S. and Matsunaga, H., "study on Aspherical Surface Polishing Using a Small Rotating Tool," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 59, No. 10, pp. 1713~1718, 1993.
5. Itoh, S., "Study on Measurement of Axi-Symmetrical Form Generated by Ultra-Precision Machining(3rd Report)," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 391~395, 1995.
6. Donaldson, D. D. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine." Ann. CIRP, Vol. 35, PP. 373-376, 1986.
7. Kim, J. D. and Kim, D.S., "On the size effect of Micro-Cutting Force in Ultraprecision Machining," JSME, Vol. 39, No. 1, pp. 164~169, 1986.
8. Kweon, G I., Kim, T. K., Choi, Y. H., Kim, G. H. and Yang, S. C., "Catadioptric Panoramic Lens With a Rectilinear Projection Scheme," JKPS, Vol. 48, No. 4, April 2006, pp. 554~563, 2006.