

◆ 특집 ◆ 가공정밀도 향상을 위한 초정밀 가공기술

## 적외선 광학 소재의 초정밀 선삭가공시 발생하는 미세균열 연구

### Micro-Crack Analysis from Ultra-Precision Diamond Turning of IR Optic Material

정병준<sup>1</sup>, 김건희<sup>1,✉</sup>, 명태식<sup>2</sup>, 정의식<sup>2</sup>, 최환진<sup>1</sup>, 여인주<sup>3</sup>, 전민우<sup>1</sup>  
Byeongjoon Jeong<sup>1</sup>, Geon-Hee Kim<sup>1,✉</sup>, Tae Sik Myung<sup>2</sup>, Eui-Sik Chung<sup>2</sup>, Hwan-Jin Choi<sup>1</sup>, In Ju Yeo<sup>1</sup>,  
and Minwoo Jeon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀 (Center for Analytical Instrumentation, Korea Basic Science Institute)

<sup>2</sup> 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)

<sup>3</sup> 충남대학교 기계공학과 (College of Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: kgh@kbsi.re.kr, Tel: +82-42-865-3460

Manuscript received: 2016.9.13. / Accepted: 2016.10.18.

*Infrared (IR) optic lens can be fabricated by a single point diamond turning (SPDT) machine without subsequent polishing process. However, this machining process often leaves micro-cracks that deteriorate the surface quality. In this work, we propose an experimental design to remove micro-cracks on IR lens. The proposed design gathered data between cutting process condition and Rt surface roughness. This is of great importance because the scale of micro-cracks is a few micrometer. Rt surface roughness is suitable for analyzing maximum peak height signals of the profile. The experimental results indicate that feed per revolution variable is one of the most dominant variable, affecting the generation micro-cracks on IR lens surfaces.*

KEYWORDS: Surface roughness (표면 거칠기), Micro-Crack (미세 균열), Brittle materials (취성 재료), Ultra precision machining (초정밀가공)

#### 1. 서론

우주개발 중장기 계획의 일환으로 우주탐사에 대한 대중의 관심이 증가하고 있다. 대한민국은 21세기에 들어와 우주탐사에 적극적으로 참여하고 있다. 2020년까지 달 궤도선과 달 착륙선을 자력 발사하는 독자적인 달 탐사 계획을 수립했다. 달 탐사 연구에서 높은 관심을 갖고 추진하는 목표 중 하나는 달에 존재하는 희소자원이나 훗날 달기지 건설 등에 활용할 수 있는 He-3 등의 에너지자

원, 고체 또는 액체 상태의 물 자원을 달표면에서 원격으로 탐사하는 임무다. 이를 위해서는 고성능 적외선 분광이미징 탑재체의 자체개발이 필수적이며 광학계 제작 기술 확보가 요구된다.

2000년 대에 들어 적외선 광학계 개발을 위한 소재 가공 연구가 진행되고 있다. 적외선 소재는 주로 취성 재료로 구성되어 있다. 학계에서는 초정밀 다이아몬드 선삭 가공 기술을 응용하여 추가적인 연마 공정 없이 취성소재 광학 면을 가공할 수 있는 방법을 제안하였다.<sup>1,2</sup> 이후에는 더 양호한



Fig. 1 Ultra-Precision diamond turning machine (Nanotech 450 UPL, Moore technology)

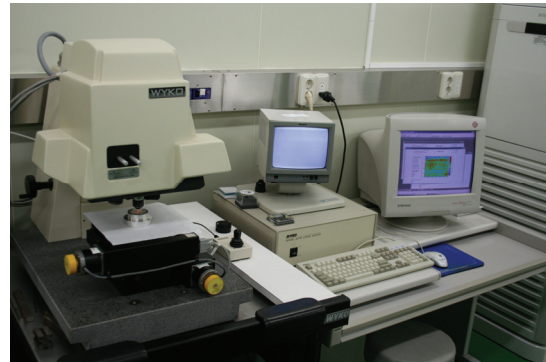


Fig. 2 White-Light interferometer (NT2000, Wyko)

표면 거칠기와 형상정밀도 확보를 위한 가공조건 분석이 진행되고 있다.<sup>3-5</sup>

적외선 광학 소재의 초정밀 선삭가공에서 품질에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 가공표면에 발생하는 미세균열이다. 미세균열은 공구의 마모로 인한 부분 비균일 절삭, 결정구조 소재의 결정 파괴로 인한 파임, 가공 칩의 소성변형에 의한 가공 표면 변형 등이 원인으로 지목되고 있다.

본 연구에서는 Ge, ZnS 적외선 소재에 대해 초정밀 선삭가공을 진행하여 가공 인자에 따른 표면 거칠기 특성을 파악하고 측정결과를 토대로 미세균열의 원인과 균열이 없는 최적의 가공조건을 분석하는 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 초정밀가공기

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 초정밀가공기로 Moore사의 Nanotech 450 UPL 다이아몬드 선삭기계(DTM)이다. 다이아몬드 선삭기계는 X축과 Z축이 직교를 이루며 이동한다. X축은 중심부에 주축 스피들이 고정되어 회전하며, 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z축은 다이아몬드 공구를 설치할 수 있으며 스피들의 회전방향과 수직방향으로 구동한다. 본 선삭기계는 최대  $\varnothing 450$  mm까지 가공이 가능하며, 3축 동시제어가 가능한 CNC 가공장비이다. 가공기의 이송분해능은 0.01 nm이다. 초정밀 가공 실은 온도  $21 \pm 1$  °C, 습도  $35 \pm 5\%$ 의 크린룸이다.

#### 2.1.2 초정밀 측정기

Fig. 2는 표면 거칠기 측정 장비로써 비접촉식

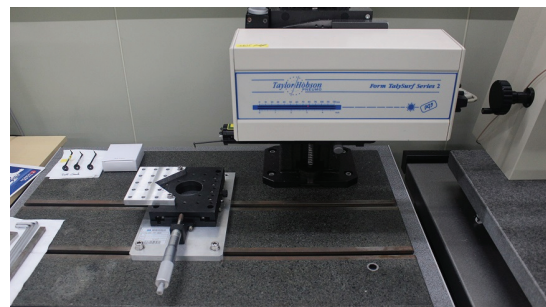


Fig. 3 Diamond stylus surface roughness measurement instrument (Form talysurf series 2, Taylor hobson)

표면형상측정기 WYKO 사의 NT2000를 사용하였다. 측정기의 측정 범위는 수평방향으로 최대 100 mm × 100 mm, 높이 방향으로는 0.1 nm - 150 nm이며, 분해능은 0.1 nm이다.

Fig. 3은 또 다른 표면 거칠기 측정 장비로써 Talyer Hobson 사의 Form Talysurf Series 2를 사용하였다. 다이아몬드 팁 접촉식 형상 측정기로 측정 범위는 120 mm이며, 분해능은 0.86 nm다.

측정방식이 다른 두 종의 측정장비를 사용하여 전체 구간뿐만 아니라 국부적인 영역의 미세균열 변화를 분석할 수 있도록 하였다.

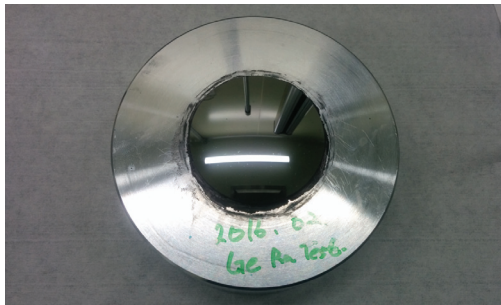
### 2.2 실험방법

표면 거칠기, 미세균열에 영향을 주는 인자는 RPM, 이송속도, 절삭 깊이로 예측할 수 있다. 본 실험에서는 가공인자를 Table 1과 같이 변화시키며 가공조건에 따른 표면 거칠기 (Ra, Rt) 값을 비교하였다.

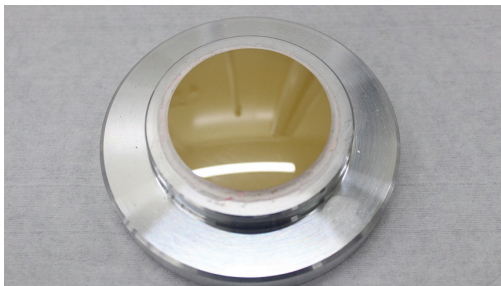
Ge, ZnS 소재는 일반적인 비철금속 가공과 달

Table 1 Experimental conditions

Item	Cutting condition
Workpiece	Ge, ZnS
RPM (rev/min)	1000, 1200, 1500
Feed rate (mm/min)	2, 5, 10
Depth of cut ( $\mu\text{m}$ )	0.1, 0.5, 1
Tool rake angle (deg)	- 25°
Nose radius (mm)	1.0
Cutting fluid	Mist



(a) Result of machining Ge by SPDT



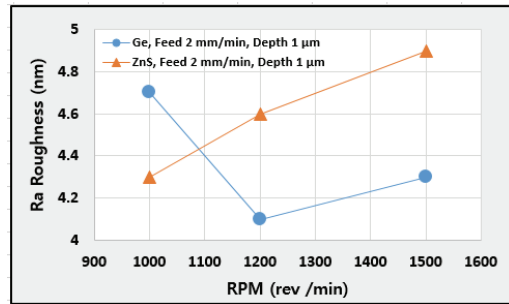
(b) Result of machining ZnS by SPDT

Fig. 4 Result of machining samples by SPDT

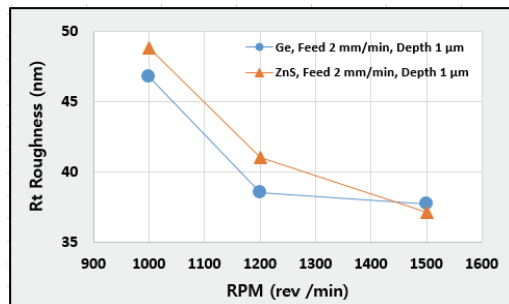
리 공구 경사각이 음의 방향인 경우에 가공성이 더 좋은 소재로 알려져 있다. 본 실험에서는 공구 경사각 - 25°, 공구반지름 1 mm 공구를 사용하였다.

Fig. 4는 적외선 렌즈의 초정밀 가공 특성에 대한 연구를 위하여 제작한 지름 46 mm 렌즈이다. 본 실험에서는 절삭 속도, 이송 속도 및 절삭 깊이에 대한 Ra, Rt 표면 거칠기 변화를 FTS 장비를 이용하여 측정하였다.

미세균열의 유무는 FTS와 NT2000장비를 이용하여 측정하였다. Rt 표면 거칠기는 취성 소재에서 발생하는 미세균열을 분석할 수 있는 중요한 자료이다. 이를 통하여 적외선 소재의 미세균열 생성 조건에 대하여 접촉, 비접촉식 방법으로 나누어 분석할 수 있었다.



(a) Ra surface roughness



(b) Rt surface roughness

Fig. 5 Surface roughness versus RPM

### 3. 실험 결과

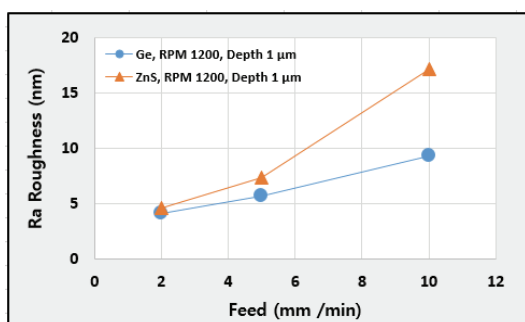
#### 3.1 절삭속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 5(a)는 절삭깊이 1  $\mu\text{m}$ , 이송속도 2 mm/min에서 절삭속도에 따른 Ra 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 절삭속도는 1000, 1200, 1500 rev/min 범위에서 변화시켰다. 그 결과 가공 소재에 따라 표면 거칠기가 가장 양호한 구간이 다른 결과를 얻었다. Ge 소재의 경우 1200 RPM에서 가장 양호한 Ra 값을 가지며 1200 RPM 이후에는 Ra가 악화되는 것을 알 수 있었다. 그러나 ZnS 소재의 경우에는 RPM이 증가할수록 Ra가 양호함을 알 수 있었다. 이는 소재에 따라 최적 절삭조건이 다를 수 있는 것으로 분석하였다.

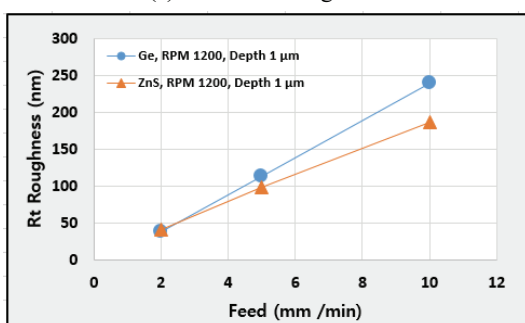
Fig. 5(b)는 위와 같은 가공조건에서의 Rt 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 두 소재모두 RPM이 증가할수록 Rt가 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 절삭속도가 증가할수록 가공면에 발생하는 미세균열이 감소하는 것으로 분석하였다.

#### 3.2 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 6(a)는 절삭깊이 1  $\mu\text{m}$ , 절삭속도 1200 RPM에서 이송속도에 따른 Ra 표면 거칠기를 측정된



(a) Ra surface roughness



(b) Rt surface roughness

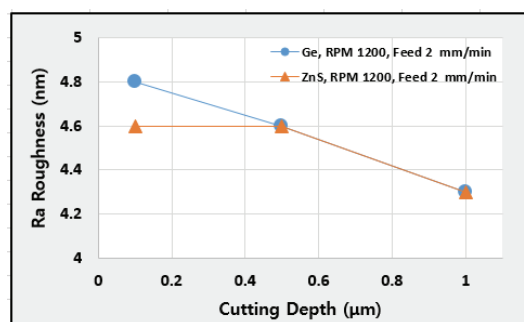
Fig. 6 Surface roughness versus feed rate

결과이다. 이송속도는 10, 5, 2 mm/min 범위에서 변화시켰다. 그 결과 소재 구분 없이 이송속도가 증가하면서 표면 거칠기가 악화하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 공작물의 회전당 이송량에 의해 기하학적으로 결정되는 이론적인 표면 거칠기 경향과 일치하였다.

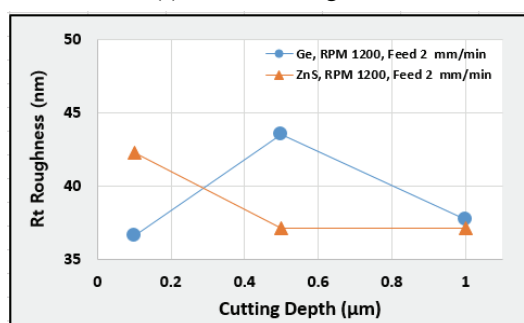
Fig. 6(b)는 위와 같은 가공조건인 Rt 표면 거칠기를 측정된 결과이다. Rt 표면 거칠기 또한 이송속도가 증가할수록 표면 거칠기가 악화한다. 이는 회전당 이송량에 따라 미세균열의 수와 깊이가 감소하는 참고문헌 결과와 일치하였다.

### 3.3 절삭 깊이에 따른 표면 거칠기

최근 학계에서는 취성 소재를 비롯한 난삭재에 대하여 절삭깊이를 수십 나노미터 크기로 감소하여 가공하는 실험을 논의 중이다.<sup>6</sup> Yan 논문은 절삭량을 수 나노미터로 줄여 취성 소재인 SiC 연성 모드 가공을 구현하고 표면 거칠기를 향상하였다.<sup>7</sup> 본 연구에서는 위 논문을 참고하여 1 마이크로 미터 이하의 절삭 두께를 입력하여 취성 소재인 적외선 광학소재에 대해 미소 절삭상태에서의 표면 거칠기를 분석하였다.



(a) Ra surface roughness



(b) Rt surface roughness

Fig. 7 Surface Roughness versus depth of cut

Fig. 7(a)은 이송속도 2 mm/min, 절삭속도 1200 RPM 에서 절삭깊이에 따른 Ra 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 깊이는 1, 0.5, 0.1 μm 범위에서 변화하였다. 절삭깊이는 표면 거칠기에 미치는 영향력이 작으므로 이송속도와 절삭속도 조건을 최적 가공 조건에 고정하여 실험하였다.

그 결과 절삭깊이에 따른 표면 거칠기 변화는 크지 않으며 Fig. 7 결과로 볼 때 절삭 깊이가 작을수록 표면 거칠기가 악화하는 경향을 볼 수 있다.

이러한 결과의 원인으로는 미세 절삭과정에서 배출되는 칩이 소성변형에 의해 잔류응력을 형성하여 표면 거칠기에 악영향을 끼치는 것으로 분석하였다.

### 3.4 회전당 이송량에 따른 미세균열 변화

미세균열 분석에 앞서 어떠한 가공 조건이 미세균열 발생에 가장 높은 연관성을 갖는지 파악하기 위해 상관계수 분석을 진행하였다. Table 2는 4개 가공조건과 Rt 표면 거칠기의 상관관계에 대한 분석결과이다. 주목할 점은 이송속도와 절삭속도를 통해 도출한 회전당 이송량 조건이 Rt 표면 거칠기와 가장 큰 상관계수 값을 가진다는 점이다.

Table 2 Results of Single Correlation Test

Variable	Coefficients of correlation
Feed	0.615
RPM	- 0.318
Cutting depth	- 0.160
Feed / Revolution	0.724

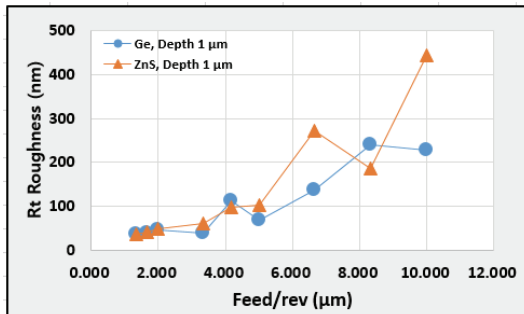


Fig. 8 Rt surface roughness versus feed/rev

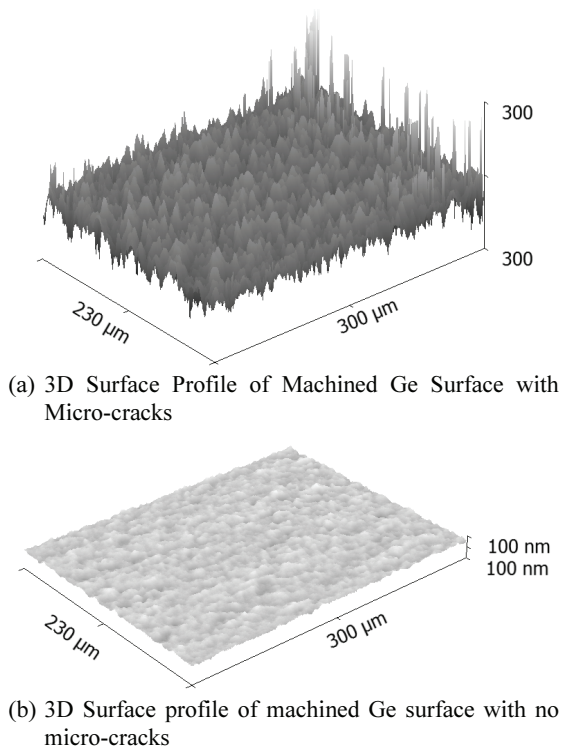


Fig. 9 Surface measurement of Ge samples

이를 통하여 회전당 이송량에 따라 Rt 표면 거칠기가 가장 민감하게 변하며, 비례하여 증가함을 예측할 수 있다.

Fig. 8은 절삭깊이 1 μm에서 회전당 이송량에 따른 Rt 표면 거칠기를 측정 한 결과이다. 회전당 이송량은 이송속도를 RPM으로 나누어 구하였다. 그 결과 회전당 이송량이 감소하면서 Rt 표면 거칠기가 양호해지는 경향을 볼 수 있었다. 그 중 3.33 μm/rev를 기점으로 Rt 표면 거칠기가 100 nm 이하로 감소하였으며 NT-2000 백색광 간섭계로 측정하였을 때 Fig. 9(b)와 같이 미세균열이 제거된 것을 확인했다.

미세균열이 제거된 원인으로서는 회전당 이송량이 감소하면서 절삭량이 감소하였고, 적외선 소재의 연성모드 가공의 원인이 된 것으로 분석하였다. 그러나 이러한 결과는 앞서 실험한 절삭깊이 실험결과와 다른 경향을 보이므로 추가 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 적외선 광학소재인 Ge, ZnS의 미세균열 특성을 파악하기 위하여 가공실험을 진행하였다. RPM, 이송속도, 절삭 깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 및 분석하여 미세균열에 대한 데이터베이스를 구성하였다. 이를 바탕으로 적외선 소재의 초정밀 선삭 가공으로 발생하는 표면 거칠기와 미세균열에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 적외선 소재의 표면 거칠기와 미세균열은 공작물의 회전당 이송량에 의해 기하학적으로 결정되는 이론적인 표면 거칠기 경향과 일치하였다.
- (2) 절삭가공 조건 중 미세균열에 가장 큰 영향을 미치는 조건은 회전당 이송량이었다. 3.33 μm / rev 보다 작은 조건에서는 양호한 표면 거칠기 50 nm Rt를 얻었으며 표면을 측정하여도 미세균열이 발생하지 않음을 확인하였다.
- (3) 실험에서 얻은 최적절삭조건을 이용하여 적외선 분광이미징용 ZnS의 비구면 형상가공결과 비구면 형상정밀도 P-V 0.185 μm, RMS 0.039 μm, Ra 1.63 nm, Rt 42 nm 의 평면 형상정밀도를 얻었다.

#### 후 기

이 논문은 한국기초과학지원연구원의 ‘적외선 분광이미징 탑재체 핵심기술 개발 사업 (PGF043)’ 과 ‘금속가공산업 선순환 사업화생태계 구축사업 (PRF058)’의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

**REFERENCES**

1. Nakasuji, T., Kodera, S., Hara, S., Matsunaga, H., Ikawa, N., et al., "Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 1, pp. 89-92, 1990.
2. Ikawa, N., Donaldson, R., Komanduri, R., König, W., McKeown, P., et al., "Ultraprecision Metal Cutting-the Past, the Present and the Future," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 2, pp. 587-594, 1991.
3. Kim, G. H., Yang, S. H., Kim, H. S., Lee, I. J., Kook, M. H., et al., "Ultra Precision Machining Technology of Infrared Optical System for Astronomy and Space," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 24, No. 2, pp. 25-32, 2007.
4. Ueda, K., Sugita, T., Hiraga, H., and Iwata, K., "A J-Integral Approach to Material Removal Mechanism in Micro-Cutting of Ceramics," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 1, pp. 61-64, 1991.
5. Yang, S. H., Kim, G. H., Kim, H. S., Shin, H. S., Hong, G. H., et al., "Ultra Precision Machining of Space Telescope IR Camera Lens," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 4, No. 1, pp. 31-26, 2005.
6. Choi, H. J., Jeon, E. C., Je, T. J., Kim, J. H., Choi, D. H., et al., "Ductile Mode Machining of the Micro Pattern Made on YSZ Using Ultra-Precision Shaping with a Diamond Tool," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 67, No. 11, pp. 1961-1965, 2015.
7. Yan, J., Syoji, K., Kuriyagawa, T., and Suzuki, H., "Ductile Regime Turning at Large Tool Feed," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, No. 2, pp. 363-372, 2002.