

# 냉간금형용 합금강의 정밀입자가공에 의한 표면정밀도 향상 Improvement of Surface Morphology by Precision Particle Process for Cold Die Steel Alloy

왕덕현\*, 김원일\*

Duck-Hyun Wang\*, Won-II Kim\*

### <Abstract>

Experimental study was conducted for lapping process after WEDMed specimen. In order to decide the lapping depth of the specimen, the number of the grain size was increased from 400, 600 to 800 to obtain the better surface. Observation of scanning electron microscope, hardness test, surface roughness test and energy dispersive spectrum(EDS) analysis were used for this experimental study. From the comparison and analyses of the results of between the wire-cut electrical discharge machining and the lapping, the following results were obtained. The surface roughness after lapping was found to be improved as increasing the number of lapping process like 1st, 2nd, 3rd lapping and the number of grain size such as 400, 600, 800. The surface hardness after increasing the lapping depth of the specimen was slowly increased. It was found that after 3rd lapping process the hardness was reached the hardness of original base material. It was found that the small amount of coating components within 3% was remained after the 1st lapping process, compared to that approximately 16% after WEDM process

**Key Words:** Die-sinking EDM, MRR, DF,  $R_{max}$ , Cold Die Alloy, SEM

## 1. 서론

최근 방전가공기술의 발전이 금형산업의 급속한 성장을 초래하고 있으며, 또한 제품의 수명주기가 짧아짐에 따라 디자인을 중요시하게 되어 다양한 형상의 제품이 필요하게 되었다. 금형 산업분야에서는 다양한 특성을 갖는 신소재의 개발뿐만 아니라 복잡한 3차원 형상 및 고품위 가공을 위하여 방전가공에 관련된 핵심

기술들이 절실히 필요하게 되었다. 부품산업에서는 많은 소재들의 기능이 향상되어 사용되고 있으며, 그중 내마멸성과 내열성이 큰 초경합금을 주로 사용하고 있다. 초경합금은 기계가공성이 나쁘며 고도의 치수 정밀도와 정확한 형상의 제품의 가공을 위해서는 특수가공법인 와이어 컷 방전가공이 사용된다.<sup>(1)</sup>

그러나 재료를 와이어 컷 방전가공을 한 결과 와이어 전극의 주성분인 Cu와 Zn이 제품

\* 경남대학교 기계자동화공학부  
dhwang@kyungnam.ac.kr



면에 부착되어 피막이 형성되고, 표면 거칠기가 증가하였으며, 방전에너지로 인한 열영향에 따른 표면경도의 저하가 문제로 대두된다.<sup>(2)</sup> 이러한 문제의 해결을 위해서는 후 가공이 필요하다. 후가공법으로는 호우닝, 슈퍼피니싱, 폴리싱, 래핑 등의 가공법이 있는데 그 중에서 래핑은 고정밀, 고품위의 제품을 얻고자 할 때 행하여지는 가공법으로 보통 랩이라고 하는 공구와 공작물의 다듬질할 면 사이에 적당한 입자(기름 등에 혼합한 랩제를 넣고, 공작물을 적당한 압력으로 공구에 눌러대고 상대운동을 시킴으로써, 입자로 하여금 공작물의 표면으로부터 극히 미량의 칩을 깎아내게 하여 표면을 평평하고 매끄럽게 다듬는 공작법이다.

래핑에 관한 많은 연구가 진행되었는데 그중 최민석과 김정두<sup>(3)</sup>는 통계적 접근법에 의한 원통 래핑 공정을 실험 분석하였고, 안유민과 박상신<sup>(4)</sup>은 세라믹의 래핑 공정 중에 발생하는 표면 거칠기와 재료 제거율에 대한 연구를 했다.

본 연구는 래핑가공 이론들을 기초로 하여 제어인자 중 중요 인자들을 설정하고, 또한 가공 깊이를 일정하게 설정하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 금형산업에 주재료로 쓰이는 냉간 금형용 합금강(SKD11)을 여러 변수를 적용하여 와이어 컷 방전가공으로 장방향으로 가공한 시편을 전자현미경과 경도시험기 및 성분분석기로 분석한 후 래핑을 실시하고 동일한 측정을 실시하여 비교, 분석하여 가공 면의 표면 거칠기, 가공정밀도 및 표면경도의 개선을 위한 방법을 실험적으로 연구하고자 한다.

## 2. 재료 래핑 이론

### 2.1 재료 절삭

제안된 Chauhan et al.의 래핑 모델<sup>(5)</sup>은 기계가공이 작업 면에 대항하여 부하가 주어지는 연마재 입자의 미소작용에 의해 실행되는 점에 기초한 것이다. 래핑에서 재료 제거의 모델에 대한 뒷받침은 짧은 시간동안 이어서 래핑 처리된 탄성저하 재료의 고도로 연마된 표면에 대한 미세 관측에 기초한다. 표면은 수많은 준정적 상태 및 슬라이딩형의 압입과 일반적으로 원추형 또는 각추형 압입에 의해 발생된 측면

크랙에 의해 표시된 것으로 보여진다. 유사한 관측이 Ajayi and Ludema<sup>(6)</sup>에 의해 수행되었다. 더 나아가 세라믹의 래핑면 사이에서의 소성 변형 층의 존재는 날카로운 압입 모델이 무딘 즉, 구형의 압점을 갖는 압입 자국에 기초한 것보다 나은 가설임을 제안한다.

연마소재 접점에서의 열 발생과 연마재간의 상호작용은 무시된다고 가정하자. 활동중인 입자가 커팅 과정에서 실제로 참여하는 연마재 입자임이 증명된다. Slurry와 소재표면상의 연마재 입자의 통계적 분석을 이용하면 커팅 연마재 입자 수와 커팅 연마재 입자들 간의 부하 분포가 추정된다. 연마재 입자의 최대 압입 깊이의 추정으로부터 측면 크랙이 생기는 최대 깊이(최대 소성영역 크기)가 얻어진다.

Hill<sup>(7)</sup>에 의해 처음 제안되었고, Marsh<sup>(8)</sup>에 의해 실험적으로 수정 확장된 구형 이탈 홈 분석은 압입 부피, 압점 기하학, 그리고 H/E의 함수인 소성영역의 근사한 추정을 하기 위해 사용될 수 있다. 여기서, H는 압점 하의 평균 접촉압력(경도)이고, E는 고체의 Young계수이다. 내압 H하에서 팽창하는 무한의 탄소성 고체내의 반지름 r의 구형의 이탈 홈에 대해서 다음의 방정식은 H/E와 소성영역 반지름 (b)에 대한 이탈 홈 반지름 (r) 비의 관계를 나타낸다.

$$\left(\frac{b}{r}\right)^3 = \frac{E}{3(1-\nu)Y} \quad (1)$$

$$\frac{H}{Y} = 0.28 + \frac{1.8}{(3-a)} \ln \frac{3}{(a+3\beta-a\beta)} \quad (2)$$

여기서,  $a = (1-2\nu)\frac{Y}{E}$ ,  $B = (1+\nu)\frac{Y}{E}$  이고,  $\nu$ 는 고체의 Poisson비이다.

### 2.2 표면거칠기와 재료 절삭비

래핑에 사용된 연마재 slurry는 매개체(래핑유)에서 균일하게 떠도는 연마재 입자로 구성되어 있다. m을 다음과 같이 정의되는 slurry의 연마재 농도로 표시하면 다음과 같다.

$$m = \frac{\text{Mass of the abrasive}}{\text{Mass of the lapping liquid}} \quad (3)$$

연마재 입자는 모두 같은 크기가 아니며, 입자크기는 평균지름 d와 표준편차  $\sigma$ 를 갖는 일반적인 분포에 따르고, 측정될 수 있는 두 가지



모두 제조자에 의해 정해진다. 샘플 중에서 가장 큰 입자( $X_L$ )보다 작은 지름을 갖는 모든 입자는 회전하는 래핑 블록과 소재사이를 조정하고, 그 사이의 간격을  $X_L$ 라 가정한다. 부피  $AX_L$ 에서의 입자의 총수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$N = \frac{AX_L}{4/3\pi(d/2)^3} \left( \frac{V}{V' + V} \right) \tag{4}$$

$$= \frac{6A(d+\lambda\sigma)}{\pi d^3} \left( \frac{m\rho'}{\rho + m\rho'} \right)$$

여기서,  $A$ 는 소재의 표면적이고,  $V$ 와  $\rho$ 는 각각 총 부피와 연마재의 밀도이다.  $V'$ 와  $\rho'$ 는 각각 래핑유 의 총 부피와 밀도이고,  $\lambda$ 는 샘플의 표준편차( $\sigma$ )에 대한 절반의 범위의 비이다. 측면 크랙 면의 재료의 두께가 앞서 지정된 소성영역의 깊이와 같다고 가정한다면, 가장 큰 입자는 가장 큰 깊이에서 측면 크랙이 생성하므로, 각각 최대높이 표면 거칠기와 평균 표면거칠기를 식(5)과 식(6)로 나타낼 수 있다.

$$R_t = \xi a_{\max} = \xi \tan \theta \delta_{\max} \tag{5}$$

$$= \xi \frac{\tan \theta}{(1 + \sqrt{H/H'})} (X_L - X)$$

$$R_a = \frac{\xi \tan \theta \frac{N}{n}}{(1 + \sqrt{H/H'})} \int_x^{X_L} (x - X) \phi(x) dx \tag{6}$$

재료의 절삭비(MRR)의 정확한 예측을 얻기가 어렵더라도, MRR의 낮은 경계는 추정될 수 있다. 소재는 래핑시간동안 이동하지 않고 구름 접촉은 소재와 래핑 사이에서만 발생한다고 가정한다. 1행정 당 네 곳의 압점의 수와 구름 접촉에 절삭된 미소량 이라 가정한 것은 반구 형상의 변형소성구간과 같고, 단위 시간당 재료의 절삭비는 식(7)과 같다.

$$MRR_{\min} = \frac{8\pi DSN(\xi \tan \theta)^3}{3A} \int_x^{X_L} \frac{(x - X)^3}{x} \phi(x) dx \tag{7}$$

여기서,  $S$ 는 래핑 휠의 회전속도이고,  $D$ 는 래핑 휠의 중심을 따라 회전하는 활동 입자의 평균지름이다. 사실, 래핑 휠 내의 소재는 대개 래핑 하는 동안 회전한다. 회전접촉의 실제 수는 식(7)에서의 추정 치와는 다를 것이며, 실제

재료의 절삭 비는  $MRR_{\min}$ 보다 클 것이다. 미끄럼 절삭에 의해 절삭된 재료의 잔류 량은 구름 절삭에 의한 구름 저항보다 크고, 더 많은 미끄럼이 발생하는 래핑과정에서 더 많은 양의 재료가 식(7)에서 계산되는  $MRR_{\min}$ 보다 실제로 많이 제거된다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 래핑을 효과적으로 하기 위하여 치구 및 래핑을 제작하여 밀링머신에 장착하여 래핑을 하였다. 치구는 시편의 래핑작업시 압력을 전달하기 위하여 간단한 구조로 이루어졌으며, 래핑압력을 단계적으로 제어할 수 있는 압력추를 부착하여 대략 0.5kg/cm<sup>2</sup>의 일정한 압력을 유지할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 래핑은 주철 정반이고 래핑재는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계열 #400, #600, #800을 사용하였다. 실험에 사용된 실험장치와 측정기기를 Table 1에 나타내고 있다.

Table 1 Experimental equipments

Item	Model	Company
Milling M/C	CMV-2	Chungkongsa Co.
Lapping Compound	Grade 2A (#400, 600, 800)	Chemical grinding Co.

본 실험에 사용한 시편은 크롬이 많이 함유된 난삭재인 냉간금형용 합금강과 초경합금을 유량변화, 마무리가공, 와이어 속도, 와이어 장력, 에너지 공급시간 등을 변화시켜 장방향으로 40x5x5mm의 크기로 와이어 컷 방전가공 하여 제작하였으며, STD11과 P-20의 화학적 성분을 각각 Table 2와 Table 3에 나타내고 있다.

Table 2 Chemical composition of SKD11

Chemical composition(wt.%)								
Fe	C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mo
85.4	1.47	0.28	0.27	0.021	0.05	0.14	11.28	0.83

Table 3 Chemical composition of P-20

Chemical composition(wt%)				
Co	TiC	TaC	TiCN	WC
9	19	9	5	58

래핑작업은 습식 래핑법으로 시편의 자유운동을 고려하여 시편크기보다 폭 0.1mm, 길이



0.2mm 크게 제작하여 최대한 평면으로 일정한 압력을 가할 수 있도록 압력추를 설치하였다. 압력조절기는 래핑압력을 대략 0.5kg/cm<sup>2</sup>으로 유지할 수 있도록 하였으며, 랩은 주철 정반을 사용하였고, 랩제 또한 매 래핑조건에 따른 가공 1회당 3회씩 도포하면서 래핑면에 따라 래핑조건을 변화시키면서 실험을 하였다. 래핑작업시 시편의 위치는 여러 측면에서 중요하다고 할 수 있는데 시편의 위치가 랩 회전중심에 가까울수록 래핑 능률이 저하되므로 래핑 능률을 높이기 위하여 랩 중심에서 최대한 외각으로 치구를 설치하여 보다 더 정밀한 실험을 할 수 있도록 하였으며, Photo. 1은 특수 제작하여 설치한 치구를 보여주고 있다.

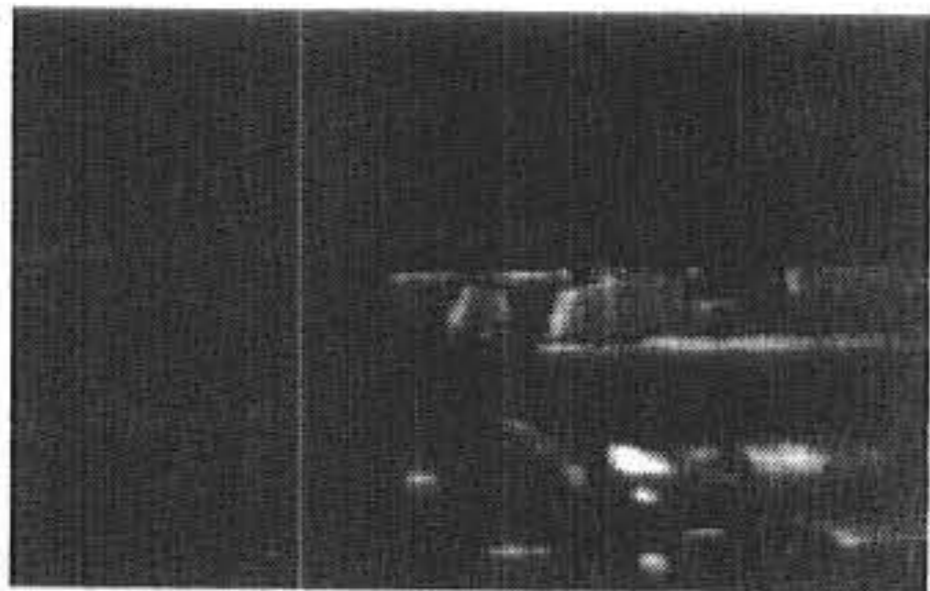


Photo. 1 Photograph of experimental setup

본 실험에서는 초경합금과 냉간금형용 합금강인 SKD11(HRC7, HRC60)의 경도를 달리한 재료를 각각 가공조건을 다양하게 변화시켜 가공하였다. 가공면은 와이어 커팅 시작면을 길이 방향으로 세워 다음 면부터 시계방향으로 A, B, C면을 가공하였고, Table 4에 가공조건을 나타내었다. 와이어 커팅 된 시편의 래핑을 하기 위하여 밀링머신의 절삭속도를 350RPM으로 고정하고 가공깊이를 0.01mm에서 0.03mm까지 0.01mm간격으로 하여 3종류의 깊이로 하였으며, 랩제는 400번에서 200간격으로 3종류로 변화시키면서 실험을 하였다. 표면거칠기 측정은 래핑작업의 특성상 가공면이 거의 균일한 상태를 나타내기 때문에 가공면을 표면거칠기 측정기에 바이스를 장착한 후 표면상태를 파악하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 여러 조건으로 와이어 커팅된 SKD11(HRC7) 시편의 면을 래핑조건으로 가공한 후의 표면 거칠기 형상을 나타낸 것이다. 거

칠기 형상을 와이어 가공면과 비교하여 나타낸 것으로 와이어 가공면보다 래핑가공된 면이 훨씬 표면 거칠기가 양호해진 것을 알 수 있다.

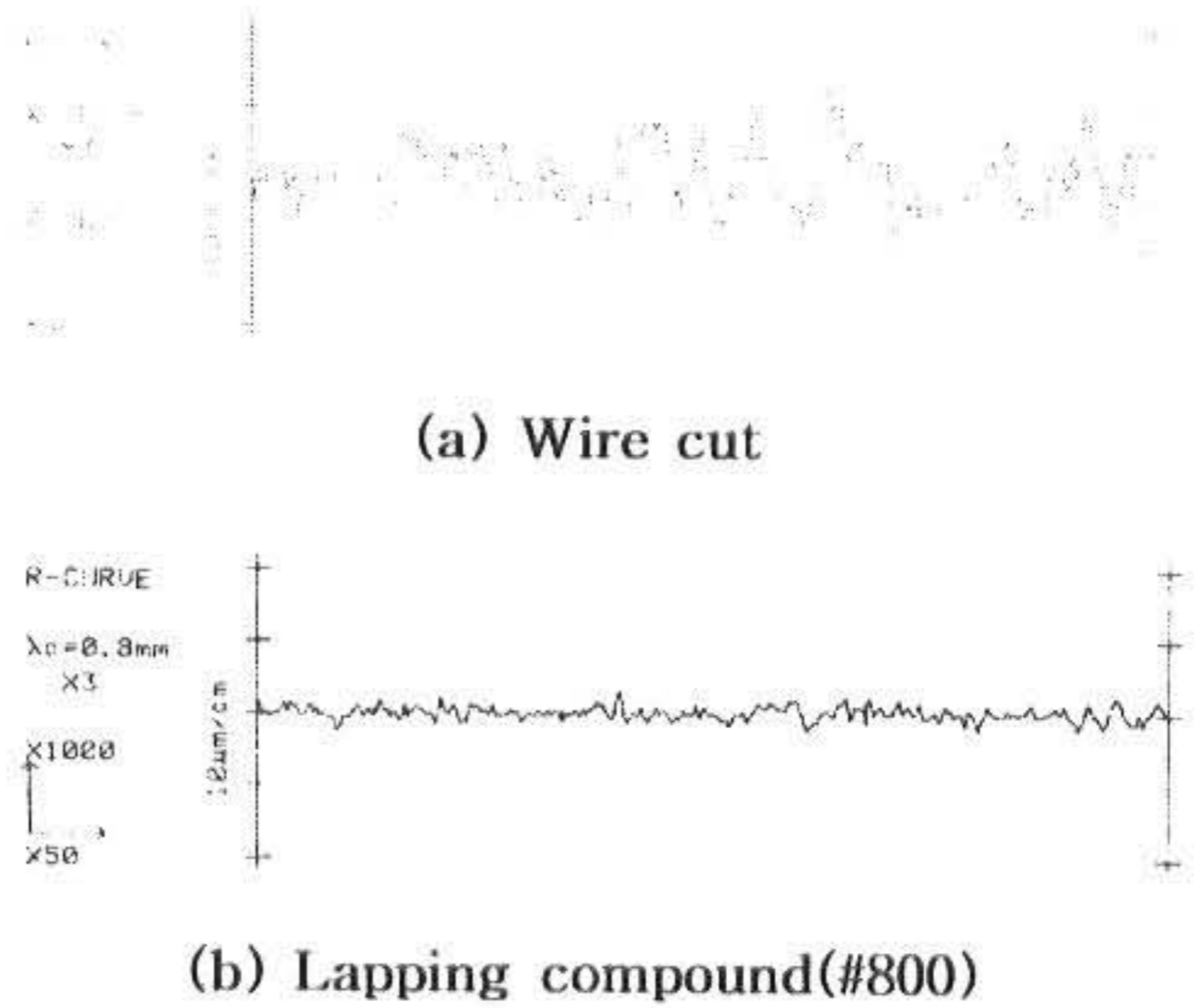


Fig. 1 Surface roughness profiles for SKD11(HRC7)

Fig. 2는 재료와 랩제의 가공조건 변화에서 실제가공면에서 측정된 최대표면거칠기상태를 보여주고 있다. 와이어가공한것과 3종류의 랩제를 이용한 표면상태에서 많은 차이를 보이고 있는데, 초경합금재(P-20)에서 표면상태가 가장 양호하다는 것을 알 수 있다.

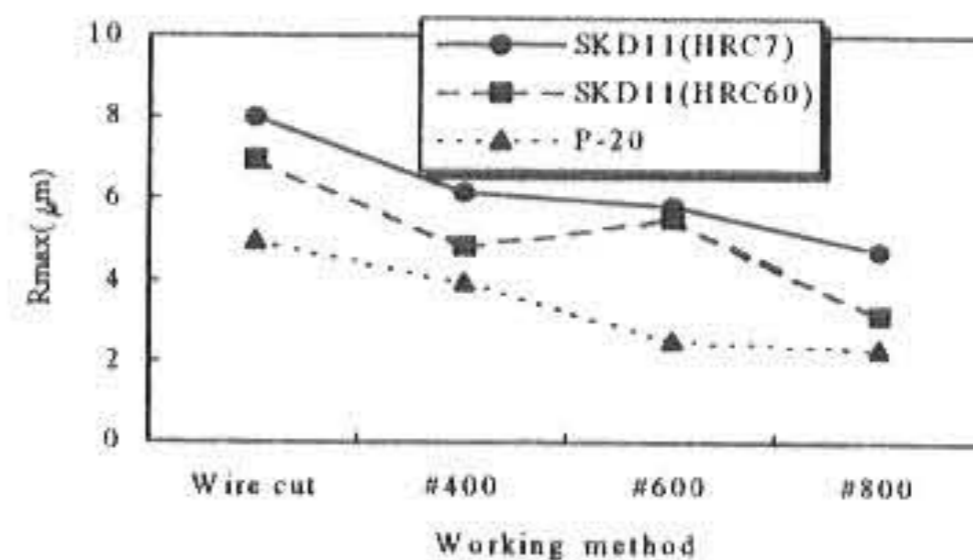


Fig. 2 Maximum height roughness for wire cutting and lapping EDMed workpiece

와이어 가공한 시편의 경도를 측정 후 각 면에 입자의 크기가 다른 랩제를 사용하여 가공깊이를 각각 0.01, 0.02, 0.03mm로 가공한 후 경도를 측정 후 결과를 Fig. 3에 그림으로 나타내었다. 비커스 경도기로 경도를 측정한 결과 와이어 가공면의 경도보다 래핑가공을 실시한 면의 경도 값이 점차적으로 원래의 모재 경도 값에 근접해짐을 알 수 있었으며 약간의 편차를 보이지만 작은 입자로 가공한 면으로 갈수록 경도 값이 점차적으로 증가함을 알 수 있었다.



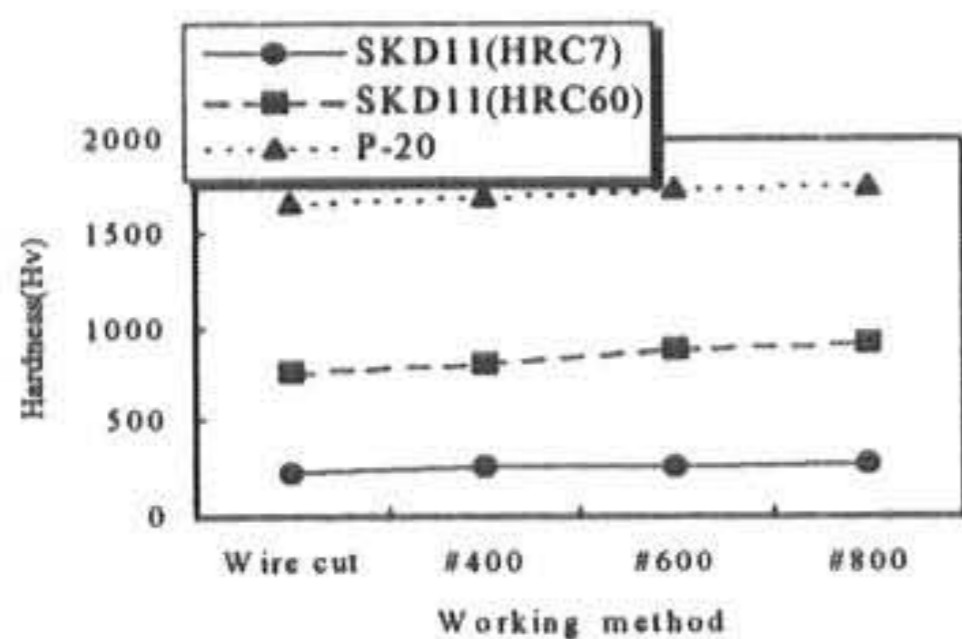
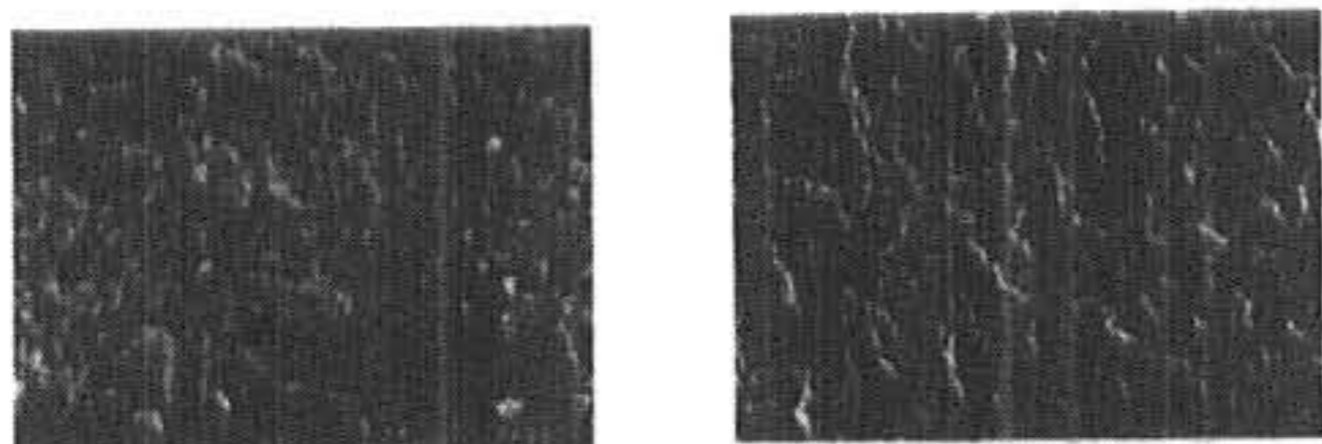
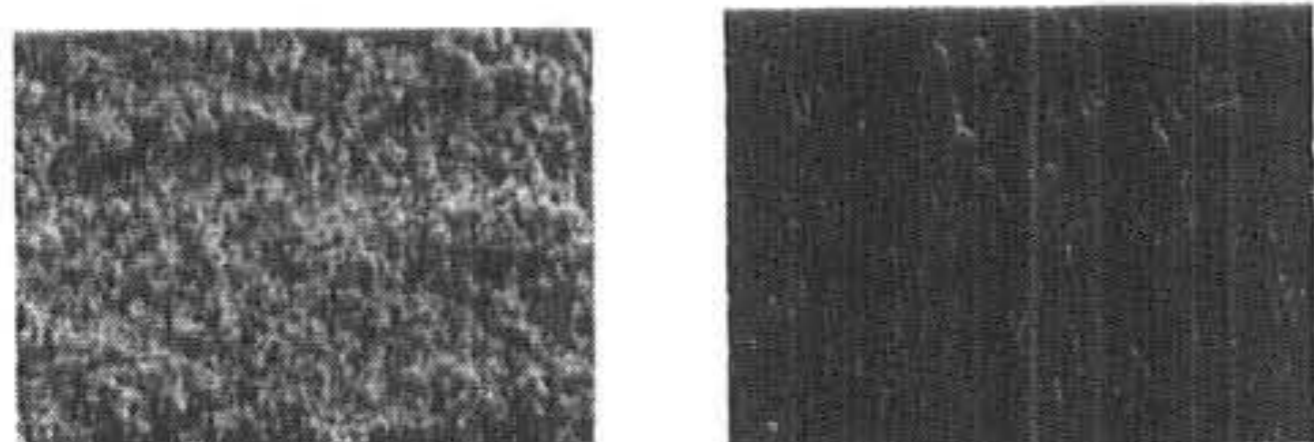


Fig. 3 Variation of hardness for wire cutting and lapping EDMed workpiece



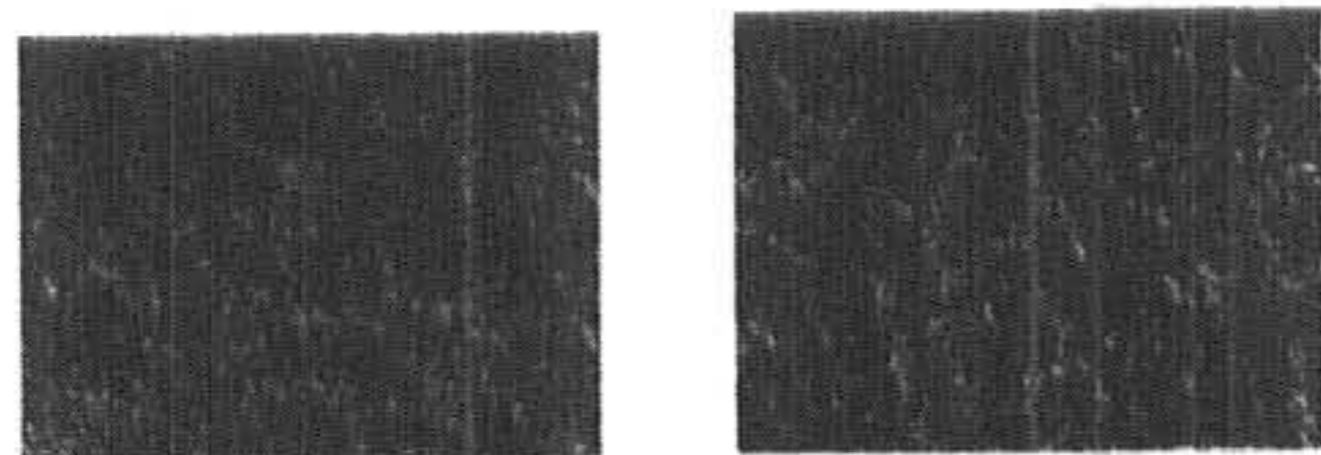
(a) Wire cutting (b) Lapping

Fig. 4 SEM micrographs of wire cutting and lapping EDMed workpiece(SKD11, HRC7)



(a) Wire cutting (b) Lapping

Fig. 5 SEM micrographs of wire cutting and lapping EDMed workpiece (SKD11, HRC60)



(a) Wire cutting (b) Lapping

Fig. 6 SEM micrographs of wire cutting and lapping EDMed workpiece (P-20)

와이어 가공면과 래핑 면의 표면형상을 비교하기 위하여 주사전자 현미경으로 400배율로 확대하여 SEM촬영을 실시하여 각각의 사진을 Fig. 4에서 Fig. 7까지 나타내었다. Fig. 4(a)는 와이어 가공면으로 방전 펄스시간 0.9 $\mu$ s로 가공한 것으로  $R_{max}$  값이 16.16 $\mu$ m의 사진이고 Fig. 4(b)는 래핑으로 랩제를 #400번을 사용하여 가공한 것으로  $R_{max}$  값이 6.02 $\mu$ m의 사진이다. Fig. 5(a)는 와이어 가공면으로 방전 펄스시간

0.9 $\mu$ s로 가공한 것으로  $R_{max}$  값이 19.83 $\mu$ m의 사진이고 Fig. 5(b)는 래핑으로 랩제를 #600번을 사용하여 가공한 것으로  $R_{max}$  값이 3.78 $\mu$ m의 사진이다. Fig. 6(a)는 와이어 가공면으로 방전 펄스 시간 0.9 $\mu$ s로 가공한 것으로  $R_{max}$  값이 14.45 $\mu$ m의 사진이고 Fig. 6(b)는 래핑으로 랩제를 #800번을 사용하여 가공한 것으로  $R_{max}$  값이 3.56 $\mu$ m의 사진이다. 위 사진에서 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서 약간의 가공 방향성이 나타난 것은 래핑 가공 시간이 짧음으로 인한 것이라고 추정되며 와이어 컷 방전가공 한 면들은 표면에 피막이 형성된 것을 볼 수 있으나 래핑가공을 실시한 후 피막이 거의 제거되었음을 알 수 있다.

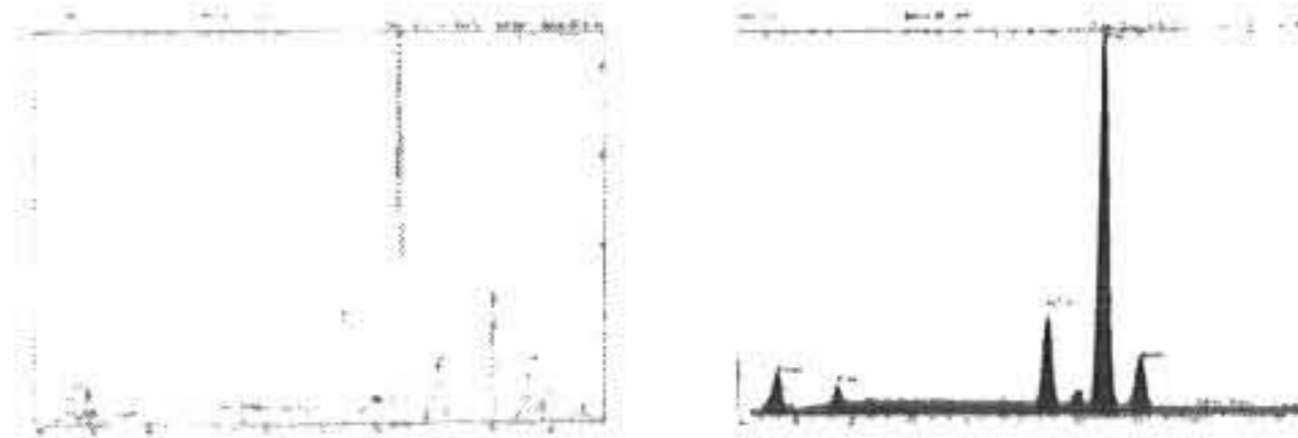


Fig. 7 Comparison of X-ray diffraction pattern for machined surface(SKD11, HRC7)



Fig. 8 Comparison of X-ray diffraction pattern for machined surface(SKD11, HRC60)

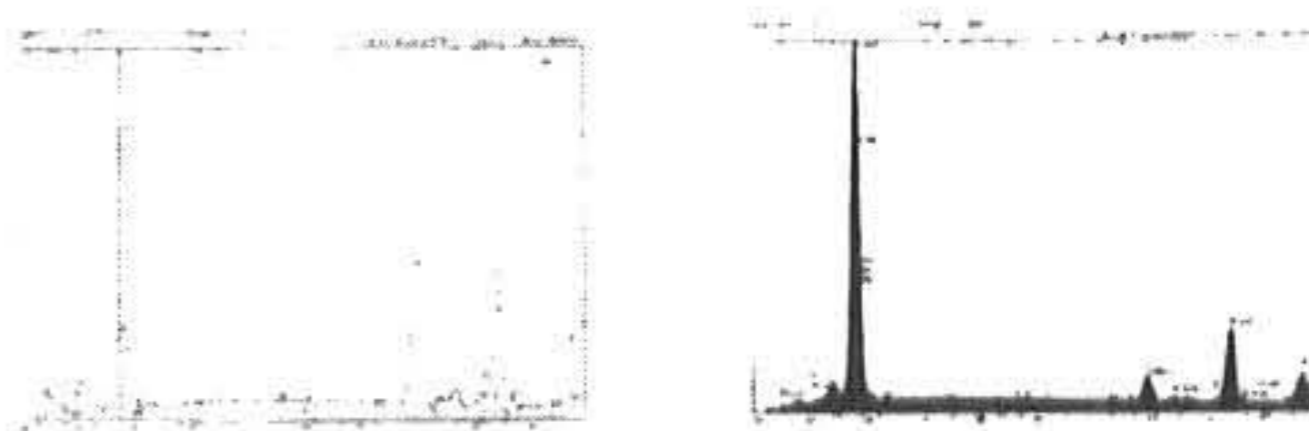


Fig. 9 Comparison of X-ray diffraction pattern for machined surface(P-20)

와이어 컷 방전가공을 실시한 후 와이어 전극의 주성분인 Cu와 Zn이 시편에 부착된 상태를 래핑가공을 실시한 후의 상태와 비교하기 위해 성분분석을 실시하여 그 결과를 각각 Fig. 7에서 9에 나타내었다.

Fig. 7(a)는 와이어 컷으로 방전펄스 시간



9 $\mu$ s로 가공한 것으로 EDS분석한 결과로써 Cr:8.75, Fe:52.08, Cu:26.82, Zn:12.35%이고, Fig. 7(b)는 래핑으로 랩제를 #400번을 사용하여 가공한 것으로 Cr:13.08, Fe:77.30, Cu:3.38, Zn:2.94%의 성분으로 되어있으며 Fig. 8(a)는 와이어 커팅으로 방전펄스 시간 9 $\mu$ s로 가공한 것으로써 Cr:10.37 Fe:53.71, Cu:26.32, Zn:9.60% 이고, Fig. 8(b)는 래핑으로 랩제를 #600번을 사용하여 가공한 것으로 Cr:14.00, Fe:76.62, Cu:3.36, Zn:3.06%의 성분으로 되어있으며 Fig. 9(a)는 와이어 커팅으로 4차 가공한 것으로써 W:67.72, Ti:0.55, Ta:2.12, Co:7.15, Cu:1.49, Zn:3.62%이고, Fig. 9(b)는 래핑으로 랩제를 #800번을 사용하여 가공한 것으로 W:79.07, Ti:1.36, Ta:8.27, Co:6.46, Cu:1.93, Zn:2.90%의 성분으로 되어있다. Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)의 경우는 래핑을 실시한 결과 시편표면에 코팅된 Cu와 Zn이 측정기의 측정오차범위(약 3%)에 근접하므로 거의 제거되었음을 알 수 있었고, Fig. 9(a)의 경우는 이미 와이어 컷 방전가공으로 4차 가공까지 실시한 상태에서 측정하였을 때 측정기의 측정오차범위 내에 있으므로 래핑은 표면성분에 큰 영향을 보이지 않았음을 알 수 있다.

## 5. 결론

순도가 높은 전극봉 구리를 사용하여 정극성으로써 피삭재인 고탄소-고크롬 공구강(SKD11)을 사용하고, 기존의 가공방법에서 전극봉의 내경 변화에 따른 방전유를 구멍속으로 분사시키면서 형조방전가공에 대한 공작물제거 속도, 최대표면거칠기, 진원도상태 및 미세조직 분석 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면거칠기는 와이어 컷팅 후 시편의 표면상태보다 래핑가공을 했을 경우 훨씬 양호한 값을 얻었다.
2. 가공깊이 증가에 따른 랩제를 #400, #600, #800으로 변화 시켰을 때 경도가 점차로 증가하여 3차가공후 본래의 정도값에 근접하였다.
3. 주사전자현미경으로 와이어 컷팅한 면과 래핑면의 표면형상 분석에서 많은 용융층들이 생긴 것을 알 수 있었고, 와이어 컷팅 후 래

핑가공에서 표면에 생긴 피막이 거의 제거되었음을 확인하였다.

4. 성분분석에서 시편에 부착되었던 피막이 래핑 1차 가공 후 3%내외의 미량이 잔류하였지만 성분분석기 자체의 오차범위( $\pm 3\%$ )를 감안할 때 거의 제거되었음을 알 수 있었다.

### 후기

이 논문은 2000년도 경남대학교 학술연구 조성비 지원에 의하여 씌여진 것임

### 참고문헌

- 1) N. Mohri, N. Saito and Y. Tsunekawa, "Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode", *Annals of the CIRP Vol. 42*, pp. 219-222, (1993)
- 2) 이재명, 김원일, 이윤경, 왕덕현, "초경합금재 와이어컷 방전 가공시 두께 변화에 따른 가공 특성," 韓國精密工學會 2000年度 春季學術大會論文集 pp. 820-823, (2000)
- 3) 최민석, 김정두, "통계적 접근법에 의한 원통 래핑 공정의 실험 분석", 大韓機械學會論文集 第17卷 第10號, pp.2509-2517, (1993)
- 4) Yoomin Ahn and Sang-Shin Park, "Surface Roughness and Material Removal Rate of Lapping Process on Ceramics," *KSME International Journal*, Vol, 11, No. 5, pp. 494-504, (1997)
- 5) Chauhan, R, 1992, "Free Abrasive Machining of Ceramics," M. S. Thesis, Purdue University, p. 59.
- 6) Ajayi, O. O. and Ludema, K. C., 1988, "Surface Damage of Structural Ceramics: Implications for Wear Modeling," *Wear*, Vol. 124, pp. 237-257.
- 7) Hill, R., 1985, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Clarendon Press, Chap. V.
- 8) Marsh, D. M., 1964, "Plastic Flow in Glass," *Proc. Roy. Soc. Lond.*, Vol. A279, pp. 420-435.

(2002년 6월 14일 접수, 2002년 11월 15일 채택)