

황동과 금형강의 와이어 컷 방전가공을 통한 가공특성 평가

김정석*, 이득우*, 강명창**, 이기용***, 성준경***, 황경현****

Evaluation of Machining Characteristics through Wire-Cut EDM of Brass and SKD 11

J.S.Kim*, D.W.Lee*, M.C.Kang**, K.Y.Lee***, J.K.Seong***, K.H.Hwang****

Abstract

The demand for wire-cut EDM is increasing rapidly in the die and tool making industry. In this study machining characteristics such as machining rate, surface roughness, hand drum form and hardness of machined material are investigated experimentally under the conditions varying pulse on time, pulse off time, peak voltage, wire tension after fixing other conditions in SKD 11 and brass workpiece. It was found that various operating conditions had significant influences on machining characteristics. But the hardness of workpiece was unaffected by operating conditions. Also it was obtained experimentally that brass workpeice had better machinability than SKD 11 one

Keywords : Wire-Cut EDM(와이어 컷 방전가공), Machining rate(가공율), Surface roughness(표면거칠기), Hand drum form(북현상), EDM Conditions(방전조건)

1. 서론

최근 과학기술의 발달과 함께 기계가공 분야에서 난삭성재료의 사용이 증가하고 있다. 또한 종래의 기계가공 방식에서 얻어지는 정밀도보다 고정도가 요구되고, 고능력 및 가공형상의 복잡화, 미소화의 요구에 따라 기존의 역학적 에너지를 사용하는 기계적 가공법을 대체할 수 있는

새로운 가공법이 폭넓게 도입되고 있다. 그 예로서 전기적 에너지에 의한 제거가공의 한 분야인 방전가공(EDM) 또는 스파크 에러전 가공(Spark-Erosion Machining)은 이러한 요구에 부응하고 있는 특수가공법이다.⁽¹⁾

일반적으로 방전가공기는 형조 방전가공기와 와이어 컷 방전가공기로 크게 나누는데, 와이어 컷 방전가공기는 타 가공법에 비해 난삭성재료의 우수한 가공특성으로 인하여

* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구센터
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 대학원
**** 한국기계연구원

우주항공과 자동차산업의 부품가공 및 형조용 전극가공 등에도 폭넓게 사용되고 있어 앞으로는 점점 그 적용분야가 넓어질 것으로 기대된다.⁽²⁾

와이어 컷 방전가공의 가공성으로서는 와이어 전극의 소모는 고려하지 않아도 되기 때문에 가공율 및 가공면 특성이 중요하며 방전조건에 따른 가공성 해석은 제품의 가공면 품위, 신뢰성 등 품질에 관한 중요한 문제가 된다.⁽³⁾ 따라서 가공율 및 가공면 특성을 동시에 향상시키기 위해^(4,5) 와이어의 단선을 고려한 적절한 방전조건 선정은 가공효율을 향상시키기 위해서 필요한 사항이다.

본 연구에서는 고능률, 고정도, 고품위의 가공을 실현할 수 있는 적절한 가공조건을 얻기 위하여, 와이어 컷 방전가공에 있어서 방전 가공성에 지배적으로 영향을 미치는 방전조건들을 고려한다. 즉 방전시간, 방전휴지시간, 피크전압 및 와이어 장력과 가공물의 두께를 변화시켜 금형재료인 SKD 11과 황동(Brass)을 방전가공하여 가공율, 가공면 거칠기, 복현상(Hand Drum Form) 및 경도의 변화를 조사하여 가공특성을 평가하고자 한다.

2. 와이어 컷 방전의 가공특성

2.1 방전조건에 따른 가공율

방전시간 및 방전휴지시간의 대소는 가공율에 큰 영향을 미치는데, 방전시간의 증가에 따라 방전에너지가 커지면 단발방전의 횟수가 증가하게 되어 가공율은 향상하게 된다. 하지만 같은 방전시간과 방전휴지시간이라도 가공물 재질의 특성에 따라 가공율은 달라지게 되는데, 구리와 아연이 주성분인 황동은 연성이 강하기 때문에 탄소와 크롬의 함유량이 많고 가공경화성, 강도 및 경도가 높은 금형강에 비해 높은 가공율을 얻을 수 있다.

피크 전류와 피크 전압은 방전에너지에 관계되는 중요한 방전조건으로서 공작물과 전극을 서서히 접근시켜 전압을 가한 후 전류를 흘려 방전을 시킨다. 이때 피크 전압과 피크 전류가 크면 높은 방전에너지에 의해 가공율은 크게 향상된다.

또한 가공율과 관계되는 것으로 면적효과라는 현상이 있다. 이것은 가공면적이 작아지면 가공율이 저하되는 것을 말하는데, 방전이 안정되게 행해지기 위해서 방전을 유발하기 위한 미소돌기가 가공면 전면에 걸쳐 분산 분포되어 있을 필요가 있지만 면적이 작아질수록 분산분포의 정도가 작아져 방전이 1개소에 집중하여 일어나기가 쉽다.

또한 와이어 컷 방전가공은 미세한 와이어 전극에 대항하는 미소면이 가공면으로 되기 때문에 항상 면적효과를 받기 쉽다.⁽⁵⁾ 하지만 가공물의 두께가 커질수록 가공율은 계속적으로 증가하지 않고 오히려 감소된다. 이것은 노출에서 분사되는 가공액의 흐름이 중간부분으로 갈수록 감소해짐으로써 칩의 배출이 더디어지고 가공홀의 막힘이나 부착, 냉각효과의 저하등으로 인해 가공율이 감소하기 때문이다.

가공율이 빨라지면 그에 비례하여 와이어 전극의 가열과 와이어 전극소모도 증대하므로 와이어 이송속도를 증대시킬 필요가 있다. 그러나 와이어 이송속도를 계속 빠르게 하더라도 가공율은 항상 향상하지 않고 와이어 전극에 진동이 일어나기 시작하여 복현상이 증가하며 가공율은 저하한다. 이때 와이어 장력을 증가시키면 이러한 현상을 개선시킬 수가 있다.

와이어 장력의 증가에 따라 와이어 진동의 진폭이 작게 되므로 가공홀폭이 좁게 되고 그 만큼 전진방향으로의 가공율이 증가하여 가공이 안정되나 와이어 장력이 너무 강하게 되면 역으로 와이어가 끊어지기가 쉽다.

2.2 방전조건에 따른 가공면 특성

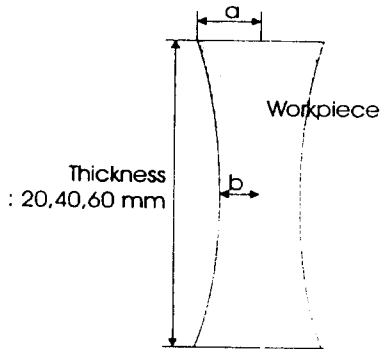
와이어와 가공물의 거리가 충분히 가까워지면 방전이 시작되고 이 때 발생하는 열에 의해서 가공물과 와이어의 일부가 용해되어 1회의 단발방전이 완료되는데, 가공면 거칠기는 이러한 단발방전에 의한 방전흔의 깊이와 그 주변에 있어서의 밀어 올려진 듯한 부위의 크기로 크게 나누어지게 되며 이것은 단발방전에 의한 제거 현상의 누적이라고 볼 수 있다.⁽⁶⁾

일반적으로 가공율을 높게 되면 가공면 거칠기가 악화되는데, 가공면을 형성하는 방전흔(Crater)의 크기는 가능한 작게하고 방전흔의 집적을 많게 하여 가공율과 표면거칠기를 동시에 향상시키는 것이 바람직하다.

금형강이 황동에 비해 가공면 거칠기가 다소 거친데, 이것은 금형강의 주성분인 탄소와 크롬을 포함하는 단단한 칩이 용융이 더디고 배출이 느리기 때문에 방전영역에 잔류하여 가공물과 2차방전을 일으켜 가공물 표면에 엉키고 용융, 용착되는 현상이 빈번하게 일어나기 때문이다. 또한 불꽃 방전에 의한 재료의 열적인 용융제거현상을 이용하기 때문에 가공면은 모재와는 질적으로 다른 가공면질층이라는 이상층이 생긴다. 또한 가공액으로 물을 사용하기 때문에 미세균열외에 전해현상도 발생하여 가공표

면은 상당한 영향을 받는다.

와이어 컷 방전가공 특유의 현상인 복현상은 Fig. 1과 같이 가공면의 중앙부가 움푹 들어가는 현상으로 최종적인 치수정도에 영향을 미치는데, 가공면의 상부와 하부보다 중앙부의 치수가 작게 되어 가공정도가 저하되는 원인이 된다. 복현상의 발생원인에 대해서는 일반적으로 와이어의 진동에 의한 와이어진폭증가와 중앙부가 방전에 의해 이온화됨으로써 비저항이 작아져 그 부분에서 발생된 가공칩이 2차방전을 일으켜 상하부에 비해 가공량이 많아지기 때문이다. 두께가 증가할수록 진동의 진폭이 커지고 복현상은 더욱 증가한다.



a-b=value of hand drum form

Fig. 1 Geometry of hand drum form

가공면은 가공액으로서 탈이온수를 사용하기 때문에 형조방전가공의 유중방전에 의한 것과는 상당히 다르며 가공후 가공면은 가공연화층의 생성에 의해 경도가 모재에 비해 작아지게 된다. 이것은 유중방전가공의 경우 가공표면 가까이의 기름이 분해하여 탄소가 표면층에 침투하여 급열 급냉에 의해 용융 재용고층의 생성에 의해 모재보다 경도가 높게 나타나지만, 와이어 컷 방전가공에서는 이러한 현상이 전혀 없으며, 극히 소량이지만 물의 전해작용에 의해서 표면층이 용해하기 때문이다.

3. 실험장치의 구성 및 방법

3.1 실험장치 및 가공물

본 실험에 사용된 와이어 컷 방전가공기는 일본

Sodick사의 수치제어장치를 내장한 대우중공업의 NC-WEDM이며, 절연액은 순수물을 사용하였다. 와이어 전극은 $\phi 0.25\text{mm}$ 의 황동을 사용하여 실험을 하였다. 실험장치 개요도는 Fig. 2에 나타내었다.

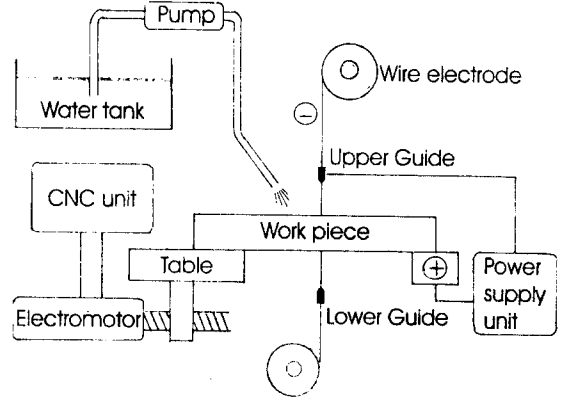


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

가공면 거칠기의 중심 평균거칠기(Ra)와 복현상은 최대 $1/1000\mu\text{m}$ 까지 샘플링이 가능한 Mitutoyo의 SV-400 표면거칠기 측정기를 이용하였으며, 0.8mm의 차단주파수 필터를 사용하여 측정하였다. 사용한 가공물은 SKD 11과 황동을 이용하여 20, 40, 60mm의 두께별로 방전가공을 행하여 결과를 비교하였다. 금형강과 가공물 및 전극의 재료인 황동의 화학적 성분 및 경도는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions and hardness of SKD 11 and brass

Chemical Composition (%)							Hardness (H_{RF})
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	
1.44	0.23	0.27	0.13	12.0	0.90	0.24	81.1
Cu	Zn	Pb	Sn	Fe			58.0
63.04		36.86	0.03	0.02	0.03		

3.2 실험방법

가는 와이어를 전극으로 하여 이 와이어에 장력을 준 상태로 감으면서 방전조건을 변화시켜 와이어와 가공물 사이에 방전을 일으키고 이때 발생된 방전에너지에 의하여 실패식 2차원 윤곽형상으로 가공을 행하였다.

즉 와이어의 공급속도, 피크 전류, 서보기준전압 및 테이블의 이송속도는 일정하게 두고 방전시간, 방전휴지시간, 공작물의 두께, 피크 전압, 와이어의 장력을 변화시키면서 가공성인 가공율과 가공면 거칠기, 복현상, 경도에 미치는 영향을 조사하였다. 가공은 전극이 음극(-)을 띄고 공작물이 양극(+)을 띄는 정극성 가공을 하였고 가공액의 분출압력을 11Kgf/cm²로 일정하게 두고 실험을 하였다. 본 실험을 위한 방전가공조건은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Experimental conditions

Cutting parameters	Condition
Wire speed(m/min)	6
Wire tension(kgf)	0.8, 1, 1.3, 1.5
Peak current(A)	40
Servo voltage(V)	21
Servo speed(mm/min)	7.5
Pulse on time(μ s)	0.4, 0.5, 0.6, 0.7
Pulse off time(μ s)	5, 10, 15, 20
Peak voltage(V)	60, 80, 100, 270

방전가공은 금형강과 황동을 와이어 전극으로 가공물의 두께별로 가로·세로 13×10mm로 가공하였고, 가공율은 화면에 표시된 가공량(mm/min)과 두께(mm)를 곱하여 면적가공속도로서 나타내었다. 가공면 거칠기는 가공면의 가로로 2.5mm씩 5번씩 측정하여 각각의 평균치를 구하였다. 또한 복현상은 가공면의 상부에서 중간부까지 3번씩 측정하여 상부와 중간부의 차이값의 평균을 구하였고, 가공면의 표면상태를 살펴보기 위해서 광학 현미경과 주사식 전자현미경인 SEM장비를 이용하여 100배와 1000배 확대 촬영하여 표면상태를 살펴보았다. 또한 가공변질층은 광학 현미경으로 가공면의 옆면을 100배 확대 촬영하였으며 가공면의 경도는 로크웰 F스케일(하중 60kg)로 3번씩 측정하여 평균치를 구하여 모재와의 경도변화를 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 방전조건에 따른 가공율

방전시간의 증가에 따른 가공율의 변화상태는 Fig. 4

에 나타낸 바와 같이 방전시간의 증가에 따라 단발방전의 횟수가 증가하게 되어 가공율은 상승하고 있다. 황동의 경우에는 면적효과의 영향에 의해 가공물 두께에 따라 가공율은 증가하고 있으나, SKD 11에서는 큰 변화가 없으며 두께의 변화에 일관성있는 가공율의 변화를 나타내고 있지 않다. 이것은 금형강에서 판두께가 커질 때 가공홈내의 중간부분에서 유속이 급격히 감소하여 전극칩에 의해 면적효과의 영향이 줄어들기 때문이다.

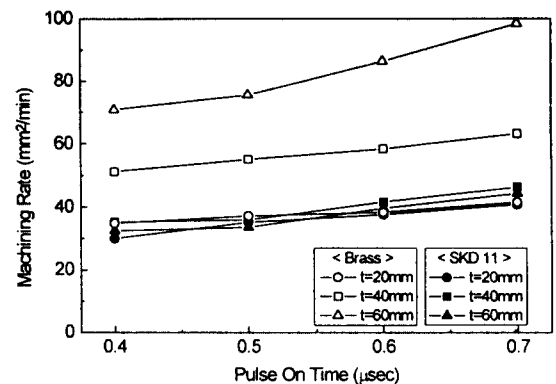


Fig. 3 Variation of machining rate according to pulse on time and workpiece thickness (pulse off time : 10 μ s, peak voltage : 100V, wire tension : 1.5kgf)

Fig. 4는 방전휴지시간이 증가하면 가공율이 감소한다는 것을 나타내고 있는데 같은 방전조건에 대해 방전휴지시간을 크게 하면 단발방전에 의한 방전 반복횟수의 감소와 방전에너지의 감소로 인하여 가공율은 저하하게 된다. 또한 가공물의 두께가 두꺼울수록 면적효과에 의해 가공율은 증가하지만 Fig. 3에서와 마찬가지로 금형강의 두께 60mm에서는 가공율이 오히려 감소하였고 황동이 금형강에 비해 높은 가공율을 보였다. 황동과 금형강의 두께 20mm에서 방전휴지시간이 10 μ s보다 낮은 5 μ s에서는 가공율이 커져야 하지만 오히려 가공율이 낮은 현상이 나타나는데, 이는 방전휴지시간이 감소함에 따라 칩이 유출될 있는 시간이 줄어들어 칩에 의해 방전 방해현상이 일어나는 것으로 사료된다.

피크 전압과 가공율의 관계는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 피크전압이 증가할수록 가공율이 증가하고, 면적효과에 의해 가공물의 두께가 얇아질수록 가공율은 감소한다.

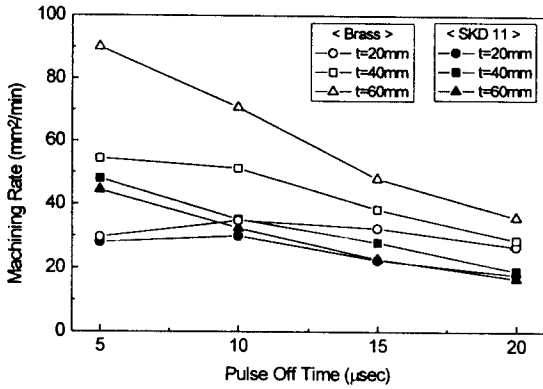


Fig. 4 Variation of machining rate according to pulse off time and workpiece thickness (pulse on time : $0.4\mu s$, peak voltage : 100V, wire tension : 1.5kgf)

황동의 가공율이 높으며 금형강에서는 면적효과의 영향을 크게 받지 않았다.

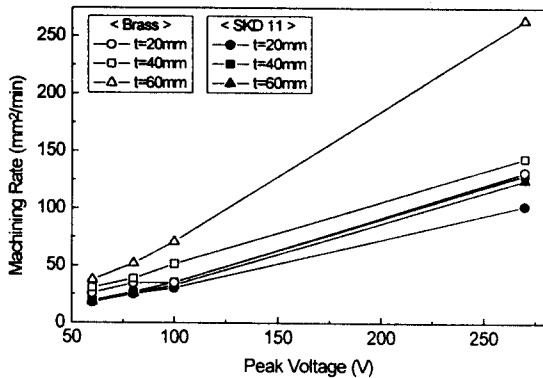


Fig. 5 Variation of machining rate according to peak voltage and workpiece thickness (pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, wire tension : 1.5kgf)

Fig. 6은 와이어 장력과 가공율의 관계를 나타낸 것인데 와이어의 장력이 커질수록 와이어 진동진폭의 감소로 전진방향속도가 증가하여 가공율은 상승하는 경향을 보이며 마찬가지로 황동의 가공율이 크다는 것을 알 수 있다.

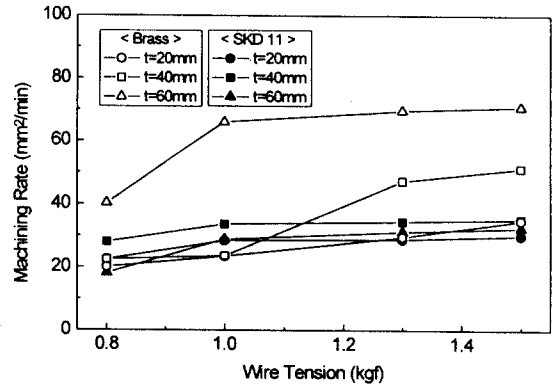


Fig. 6 Variation of machining rate according to wire to wire tension and workpiece thickness (pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, peak voltage : 100V)

4.2 방전조건에 따른 가공정도

가공물의 두께별로 방전시간과 방전휴지시간의 변화에 따른 가공면 거칠기는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나는 바와 같이 방전시간이 증가하면 나빠지고 방전휴지시간에 대해서는 양호한 경향을 보이고 있다. 두께에 따른 거칠기의 변화는 없으며 난삭재인 금형강이 황동에 비해 가공면 거칠기가 다소 거친것을 알 수 있는데, 이것은 황동에서 배출되는 칩보다 금형강에서 배출되는 칩이 경도가 높고 단단한 경질칩이기 때문이다.

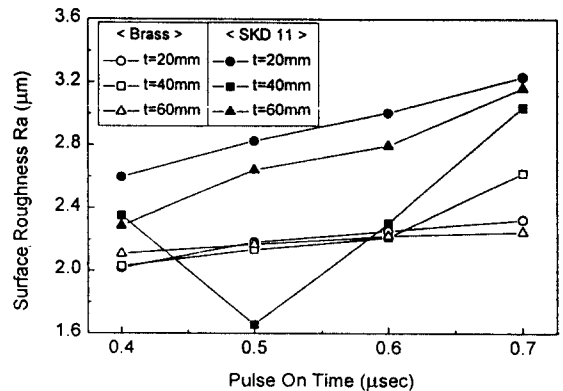


Fig. 7 Variation of surface roughness according to pulse on time and thickness (pulse off time : $10\mu s$, peak voltage : 100V, wire tension : 1.5kgf)

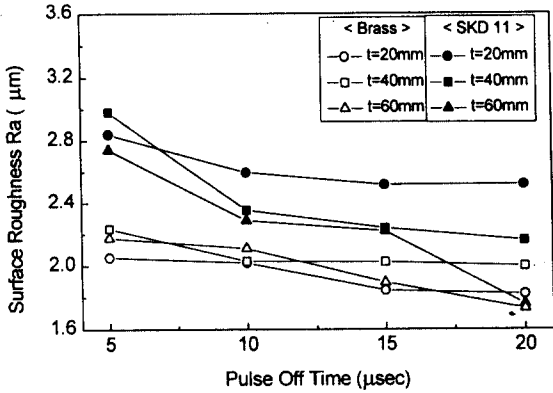


Fig. 8 Variation of surface roughness according to pulse off time and thickness(pulse on time : $0.4\mu s$, peak voltage : 100V, wire tension : 1.5kgf)

피크 전압의 변화에 따른 가공면 거칠기의 변화는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 피크 전압이 증가하면 단발방전의 흔적이 커지기 때문에 가공면 거칠기가 거칠어지는 것을 알 수 있다.

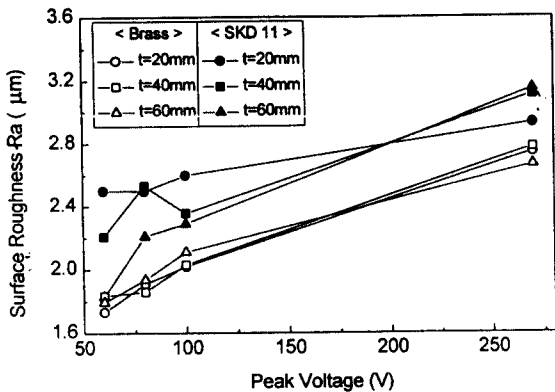


Fig. 9 Variation of surface roughness according to peak voltage and thickness(pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, wire tension : 1.5kgf)

Fig. 10은 와이어 장력이 증가할수록 가공면 거칠기가 향상되는 것을 나타내는데, 이것은 와이어 진동진폭이 작

아져서 가공이 안정되게 진행하기 때문이다. 방전조건에 따라 가공율과 가공면 거칠기는 반비례관계가 있으나 와이어 장력의 증가에 따라서는 비례관계가 성립되어 두 가공성 모두 향상시킬 수 있다.

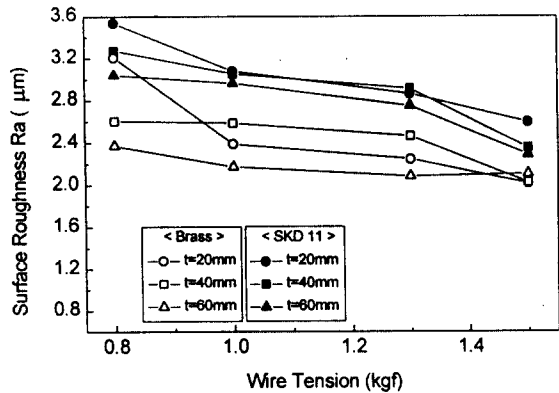


Fig. 10 Variation of surface roughness according to wire tension and thickness (pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, peak voltage : 100V)

Fig. 9과 Fig. 10에서도 난삭재인 금형강의 가공면 거칠기가 황동보다 거칠고 각각 두께에 따른 가공면 거칠기의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 실제 극간에 흐르는 평균 전류를 측정해서도 알 수 있는데 경질의 금형강에서 더 높은 평균 전류가 흘러 방전상태가 불안정하기 때문에 가공면 거칠기는 황동에 비해 좋지 않았다. 따라서 가공정도에서는 황동이 금형강보다 우수하였다.

Fig. 11는 광학현미경과 SEM장비를 이용하여 황동과 금형강의 가공표면을 100배와 1000배로 확대 촬영하여 비교한 것이다. 여기서 황동의 방전가공표면에 비해 금형강의 표면이 방전에 의한 방전흔이 더 뚜렷하게 드러나 보이고 칩들이 심하게 응착되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 칩들의 엉킴, 용융 및 응착에 의해 금형강의 표면이 질게 그을려 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 황동과 금형강의 가공면질층을 나타낸 것으로서 가공면의 옆면을 광학현미경을 이용하여 100배 확대 촬영하였다. 가공면질층의 영역이 모재와는 구별되고 금형강이 황동에 비해 미세균열이 뚜렷하게 많으며 열영향부도 많이 존재하고 있음을 알 수 있다.

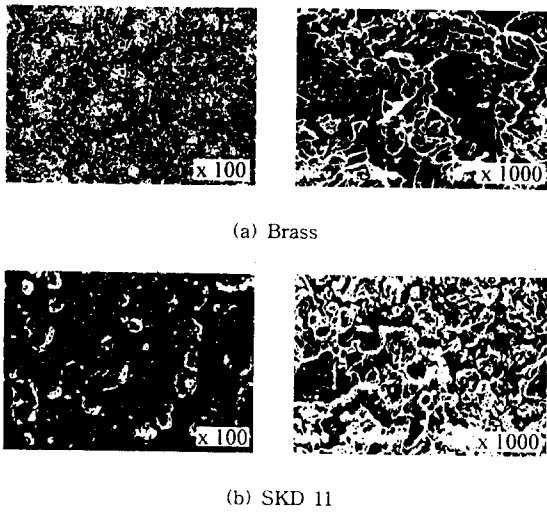


Fig. 11 Surface texture of machined brass and SKD 11(pulse on time : $10\mu s$, peak voltage : 270V, wire tension : 1.5kgf)

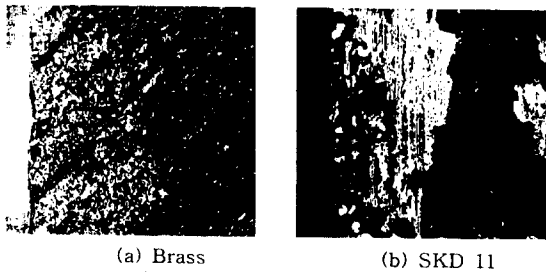


Fig. 12 The deformed layer of machined brass and SKD 11(pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, peak voltage : 270V, wire tension : 1.5kgf)

Fig. 13은 와이어 장력의 변화에 따른 복현상의 크기 변화를 나타낸 것으로 복현상은 장력이 커질수록 작아지는 현상을 보였다. 두께가 두꺼울수록 황동이 금형강에 비해 복현상의 정도가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

방전시간, 방전휴지시간 및 피크전압의 변화에 따른 복현상의 변화는 두께가 증가함에 따라서는 커지나 이러한 방전조건들의 변화에 대해서는 크게 영향을 받지 않았다. 이것은 위의 방전조건들이 진동에 크게 관여하지 않기 때문인 것으로 사료되며 복현상의 크기는 마찬가지로 금형강보다 황동이 더 큰 값을 보였다.

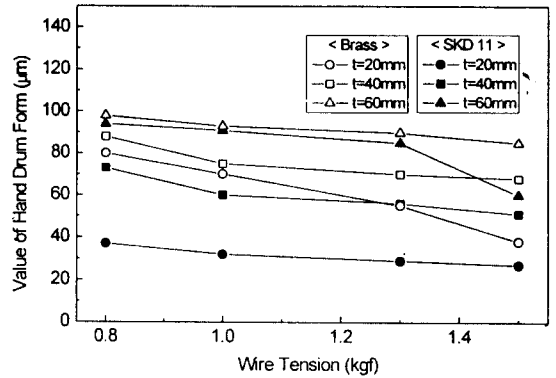


Fig. 13 Variation of hand drum form according to wire tension and thickness(pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, peak voltage : 100V)

황동과 금형강의 복현상의 크기를 나타내는 프로파일은 Fig. 14에 나타난 바와 같이 연성이 강한 황동이 금형강에 비해 중간부분으로 갈수록 움푹들어간 정도가 x-x'만큼 크다는 것을 알 수 있다.

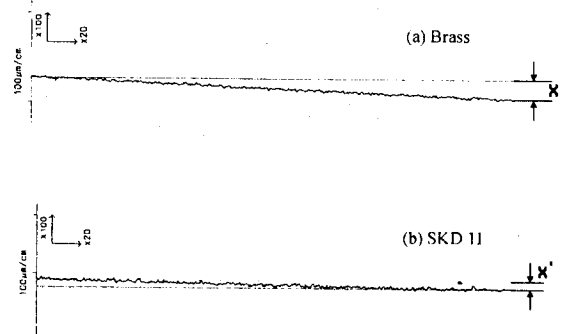


Fig. 14 The hand drum form profile of brass and SKD 11(pulse on time : $0.4\mu s$, pulse off time : $10\mu s$, peak voltage : wire tension : 0.8kgf)

Fig. 15는 방전시간에 따른 두께별 경도의 변화를 나타내는데 가공면의 경도는 가공연화층의 형성에 의해 Table 1에 나타난 각각의 소재의 경도, 즉 로크웰 F스케

일로 황동 58H_{RF}, 금형강 81.1H_{RF}에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 방전시간변화에 따른 경도의 변화는 미세하며 두께에 따라서도 차이를 보이지 않았다. 방전휴지 시간, 피크전압 및 와이어 장력도 이러한 조건들과 두께 변화에 따른 경도의 변화는 거의 없으며 모재에 비해 낮은 경도값을 나타내었다.

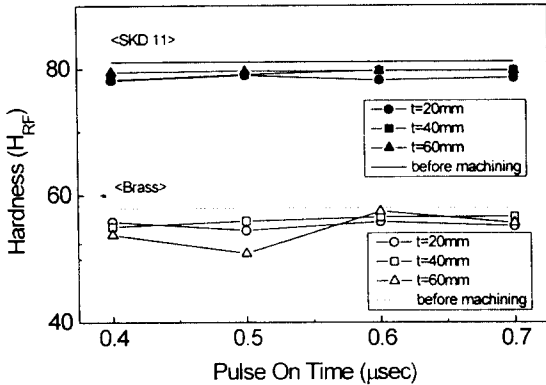


Fig. 15 Hardness of machined surface according to pulse on time

5. 결론

황동과 금형강을 방전조건 변화에 따라 와이어 컷 방전가공을 행하여 가공특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방전조건 변화에 따른 가공율은 황동이 금형강에 비해 우수하며, 면적효과에 의해 두 재료 모두 두께가 두꺼울수록 가공율은 증가하였다.
- (2) 황동이 금형강에 비해 가공면 거칠기는 양호한 특성을 보이며, 가공물 두께의 영향은 거의 받지 않았고, 가공면의 표면도 우수하였다.
- (3) 방전시간과 피크전압이 증가할수록 가공율은 증가하고 가공면 거칠기는 감소하나 방전휴지시간에 대해서는 상반된 결과를 나타내며, 와이어 장력에 대해서는 두가지 특성이 모두 증가하는 경향을 보이고 있다.
- (4) 복현상은 와이어 장력과 가공물의 두께가 증가할수록 커지고 황동이 금형강에 비해 더 큰 값을 보였으며, 방전조건에 영향을 받지 않았다.

- (5) 황동과 금형강의 가공면 경도는 가공연화층 형성에 의해 모재보다 다소 낮은 값을 보였고, 방전조건과 두께의 변화에 영향을 받지 않았다.

후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Snoeys, R. and Dekeyser, W. and Tricarico, C., "Knowledge-Based System for Wire EDM", Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 197~202, 1988.
2. Tarng, Y. S. and Ma, S. C. and Chung, L. K., "Determination of Optimal Cutting Parameters in Wire Electrical Discharge Machining", Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 35, No. 12, pp. 1693~1701, 1995.
3. 増井清徳, 曹根 匠, "放電加工面の 性状と 高品位化", 日本精密工學會誌, 6, pp. 13~16, 1991.
4. Balley's F., "Removal Rate versus Accuracy in Wire EDM", Proceedings of the ISME 5, Switzerland, Wolfsberg, pp. 157~159, 1977.
5. YAN, H. S. and Lee, R. S. and YANG, Y. C., "An Algorithm for Surface Design and Tool Path Generation in Wire-Cut Electrical Discharge Machining", Int. J. MTM, Vol. 35, No. 12, pp. 1703~1714, 1995.
6. Dauw, D. F. and Albert, L., "About the Evolution of Wire Tool Performance in Wire EDM", Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, pp. 221~225, 1992.