

볼엔드밀 절삭에서 전해복합에 의한 절삭력 저감 특성

Cutting Force Reduction Characteristics by Compounding Electrolytic Machining in Ball End Milling

이영표(울산대원), 박규열(울산대)

Young-Pyo Lee (Graduate School, Univ. of Ulsan), kyu-Yeol Park(Univ. of Ulsan)

Abstract

In this report, a new method compounding the electrolytic machining with ball end milling process to increase the machining efficiency was introduced. And the cutting characteristics by electrolytic machining conditions was examined. From the experimental results, it was confirmed that effect of cutting force reduction obtained at the condition of transpassive state of electrolytic machining conditions.

Key Words : Compound machining (복합가공), Electrolytic machining (전해가공), machining efficiency (가공능력), Cutting force (절삭력)

1. 서론

최근에 각종 기계부품 및 금형 등을 포함하여 기계가공 분야에서 고속화와 고정도화의 필요성이 증대되고 있다. 여기서 기계가공의 고능력, 고정도화는 다품종 소량생산 체제하에서 제품개발 능력의 신장 및 품질확보를 통한 기업의 기술경쟁력을 평가하는 요소로 작용한다. 즉, 금형은 제품을 양산하기 위하여 필수적인 도구로서 뿐만 아니라 최종 제품의 품질과 성능을 결정짓는 중요한 요인이다. 따라서 생산 가공기술 중에서 가장 높은 체적 제거효율을 갖는 절삭가공법에 관한 기술 개발에 관심이 고조되고 있다. 일반적으로 자유곡면을 갖는 금형은 볼엔드밀 공구를 이용한 절삭가공 혹은 방전가공 등으로 제작되어 진다. 그러나 볼엔드밀 공구를 사용하는 절삭가공에서는 공

구와 공작물이 직접 접촉하면서 가공이 진행되기 때문에 절삭반력이 발생하는 가공기구를 갖는다. 이는 절삭가공을 이용한 금형 등의 제작에 있어서 가공능률을 제한하는 커다란 요인으로 작용하게 된다.

따라서 본 논문은 볼엔드밀 가공 시 공작물의 절삭저항을 최소화 함으로서 절삭가공의 능률을 향상시키기 위하여 절삭가공에 전해가공을 복합하는 방법을 제안하였다. 즉, 절삭가공 중에 피삭재인 금속의 표면을 전해용출 시킴으로써 기계적 특성을 현저하게 감소시키고 이를 통하여 가공 시 발생하는 절삭저항에 따른 공구의 변형, 공구마모 열변형 등의 가공오차 요인을 감소시킴과 동시에 가공능률을 향상시키는 효과를 얻고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 전해복합에 따른 절삭력의 추이 및 각각의 전해조건이 절삭력의 감소에 미치는 영향에 관하여 조사하였다.

2. 전해복합 가공법의 개요

a) 금속 전해이론

전해액 속에 담겨있는 양극의 공작물과 음극의 공구가 접촉하지 않은 상태에서 근접해서 놓여지고 양쪽 전극사이에 전압이 가해지면 양극에서는 금속이 전자를 잃으면서 금속 이온의 형태로 변해 전해액 속으로 용해되는 산화반응이 일어난다. 반면 음극에서는 주변의 이온이 전자를 얻어 원자나 분자형태로 변하여 석출되는 환원반응이 일어나게 된다. 전해가공은 원론적으로는 양극의 산화반응을 이용하여 가공물의 원자를 1개씩 가공물에서 제거함으로써 가공하는 방법이다. 이러한 전해현상은 전기적 조건에 따라서 크게 영향을 받게

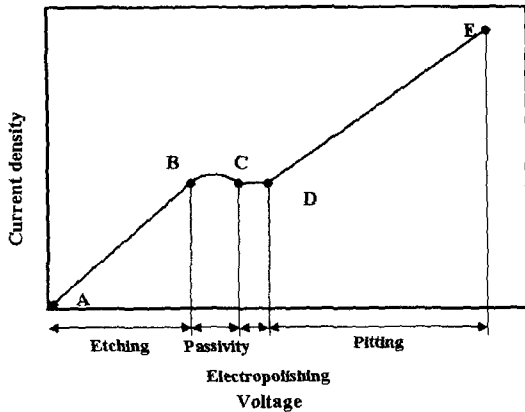


Fig. 1 Current density-Voltage curve of electrolysis

된다. Fig.1에서의 전압-전류밀도 곡선을 따라 크게 몇 가지 영역으로 나뉘어 진행되고, 각 구간은 다음과 같은 특징을 가지는 것으로 알려져 있다. AB구간은 낮은 전류밀도 하에서는 금속학적 조직이 나타나는 에칭현상이 발생하며, BC구간은 부동태 층(passivation layer)이 급속하게 성장된다. CD구간에서는 전압의 증가에 따른 전류밀도의 변화가 작은 구간이며, DE구간은 전압이 증가하면 전류밀도가 비례적으로 증가하는 구간으로서 과부동태에 따른 전해작용이 활발한 반면 피트(pit)와 같은 표면결함이 발생한다고 보고되어 있다.^[1] 따라서 본 연구에서는 절삭력을 경감시키기 위해서 가능한 최대한의 금속을 표면으로부터 전해용출 시키기 위해서 DE구간의 전해현상을 적극적으로 이용하고자 하였다.

b) 전해복합가공의 원리

Fig.2에 전해복합가공의 원리를 간략하게 나타낸다. 공작물(양극)인 금속표면에 별도로 설치된 전극(음극)과 그 사이에 전해액을 공급하여 전압을 인가한다. 여기에 적절한 전해액과 전기적 조건이 만족되면 금속인 가공물 표면은 양극의 산화반응에 의해 전해용출 되거나 또는 전해생성물이 형성되고 생성되어 가공물 표면의 기계적성질을 약화시킴으로써 절삭공구에 대한 저항이 상대적으로 감소하여 절삭력이 경감되는 효과를 얻을 수 있게 된다.

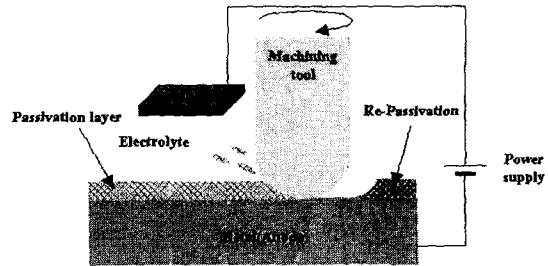


Fig. 2 principle of machining

3. 실험장치의 구성 및 실험방법

a) 실험장치의 구성

전해복합 가공법의 절삭력 저감 특성을 조사하기 위하여 구성된 실험 장치를 Fig.3에 나타낸다. 가공기는 수직형 머시닝센터를 사용하였으며, 절삭가공 중에 발생하는 절삭력을 스트레인 게이지(Strain gauge) 타입의 공구동력계 (AMT MC818)를 사용하여 가공 중에 실시간으로 측정하여 PC에 저장, 처리하였다. 또한 전해가공을 복합하기 위해서 전해조와 전용전극을 제작하여 머시닝센터에 설치하였으며, 직류전원공급 장치를 사용하여 전압을 인가하였다.

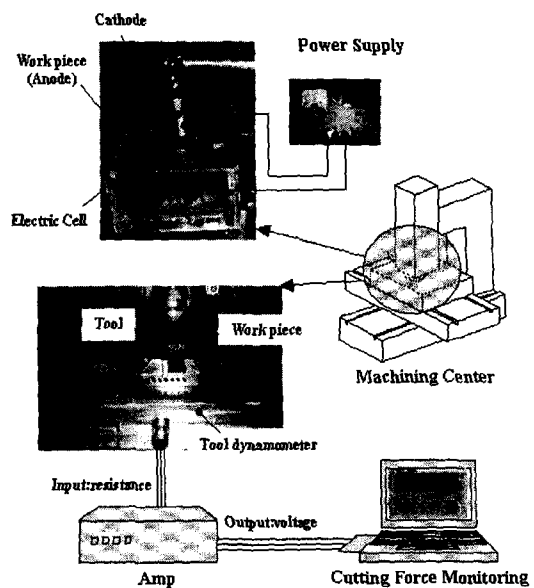


Fig. 3 Experimental set-up

Table.1 Experimental set-up and machining conditions

Cutting Tool	Al-TiN Coated Tungsten Carbide φ6 ball end mill	
Workpiece	S45C (25mm×30mm) Hardness : H _B 200	
Electrolyte	Sodium Nitrate (NaNO ₃) Solution	
Electrode gap	0.5 cm	
ECM Condition	Concentration [%]	20,10,1.0,0.1
	Applied Voltage [V]	20,10,5,3
	Applied time [sec]	60,30,20,10
Cutting Condition	Spindle Speed [rpm]	2000
	Feed [mm/min]	740

Table.2 Electrochemical machining conditions

Item	20% Solution	1.0% Solution
Applied voltage [V]	10	10
Applied time [sec]	30	30
Current [A]	7.9	0.83

전해용출 되어서 가공정밀도가 좋은 질산나트륨 (NaNO₃) 수용액을 사용하였다. Fig.4에 실험순서를 도식적으로 나타낸다. 공작물을 먼저 정면밀링 (Face Milling)을 통해 기준면을 생성한다. 다음으로 전해조 내에 전극을 설치하고 Table.1에 해당하는 가공조건으로 전해액을 통하여 전압을 인가한다. 이와 같은 상태에서 일정시간을 유지한 후에 공작물의 표면에 양극 생성물의 발생을 확인한 후에 전극을 제거하고 볼엔드밀을 사용하여 절삭가공을 수행하였다. 실험결과는 전해복합에 따른 절삭력의 추이를 실시간으로 측정하고 이를 토대로 절삭력 저감 특성을 평가하였다.

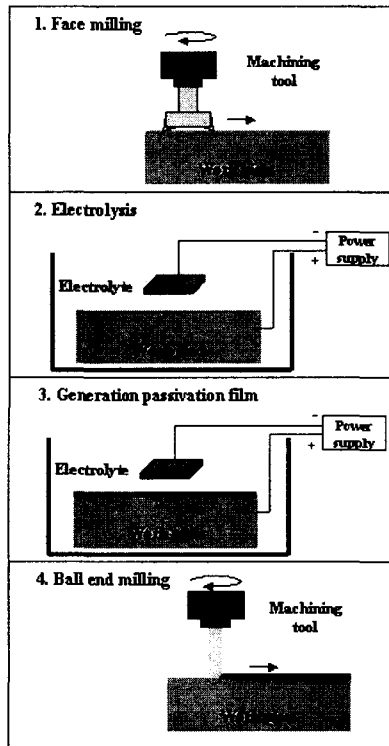


Fig. 4 Sequence of cutting experiment

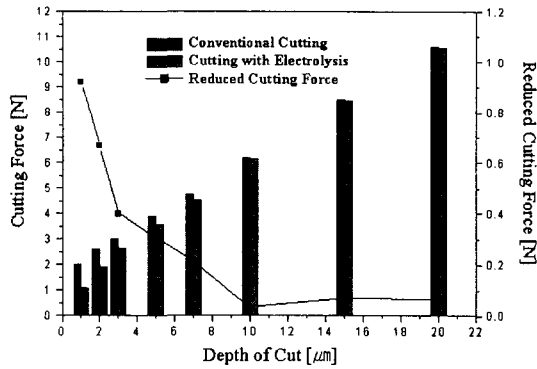
b) 실험방법

Table.1은 앞에서 기술한 전해복합에 따른 절삭가공에서 가공조건과 절삭력 특성을 조사하는데 사용한 가공조건과 공구와 피삭재의 제원을 나타낸다. 전해액은 중성염 수용액 중에서 부식성이 작고 전극에서 가까운 전류밀도가 큰 부분에서만

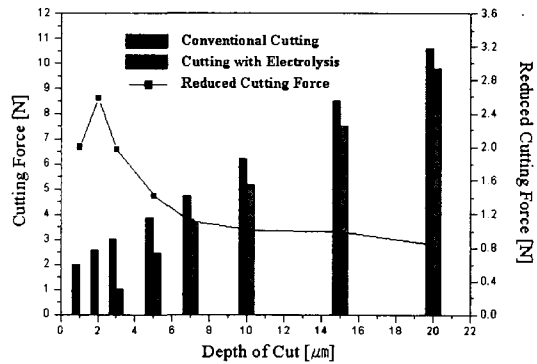
4. 전해조건에 따른 절삭력 저감 특성

a) 일반절삭과 비교

Fig.5 (a), (b)에 전해복합에 따른 절삭력 저감효과를 조사하기 위하여 일반절삭과 전해복합 절삭 시에 측정된 절삭력 및 절삭력의 감소량을 나타낸다. Table.2에 실험에 사용된 조건을 나타낸다. 결과에 나타난 바와 같이, 전기적 조건에 따라서 크게 두 가지 형태로 절삭력이 감소하는 경향을 볼 수 있다. (a)는 지속적인 전해용출 보다는 부동태 층의 생성에 따라서 절삭 저항이 미소하게 감소된 것으로 판단할 수 있다. 즉, 1μm 절입에서 일반절삭에 비해 1/2정도의 절삭력 감소한 것으로 나타나며, 전해생성물 피막 이상으로 절입 깊이가 증가하게 되면 10μm에서 부터는 일반절삭의 절삭력과 동일하게 되는 경향을 확인할 수 있다. 반면, (b)의 결과는 깊이 방향으로 2μm 이상으로 전해용출이 진행되어 절입깊이가 3μm에서 부터 절삭력이 검출되기 시작하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 전류밀도가 증가하면 피삭재인 금속의 표면에서의 전해현상이 Fig.1에 나타난 전압-전류 밀도곡선에서 DE구간으로 천이되어 전해용출 현상이 활발해지는 결과로 생각할 수 있다.



(a) Passive state



(b) Transpassive state

Fig. 5 Cutting force with electrical conditions

b) 전해조건의 영향

전해조건으로서 전해액의 농도, 인가전압, 전압 인가시간 중에 절삭력 감소에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 조사하였다. 이에 앞서 Fig.6은 질산나트륨(NaNO_3) 수용액의 농도에 따른 전압-전류밀도를 나타내었다. 질산나트륨 수용액은 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 이하의 낮은 전류밀도에서는 전류의 대부분이 부동태 막을 형성하고, 가스의 발생에 소비되어 이온화에 따른 공작물의 전해용출에는 전혀 기여하지 않아서 전류효율이 20%이하로 나타나는 것으로 알려져 있다.^[2] 이 결과에 의하면 전해액의 농도에 따라 전류밀도의 증가율이 다르고, 동일한 전해액 농도에서는 전압의 증가와 더불어서 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실제 금속의 전해작용은 전류밀도에 따라 크게 좌우되며, 본결과로부터 전류밀도가 작은 Fig.5(a)의 조건에서 전해작용이 Fig.1의 BC구간에 국한되어 절삭력의 감소가 미비한 것을 확인할 수 있다.

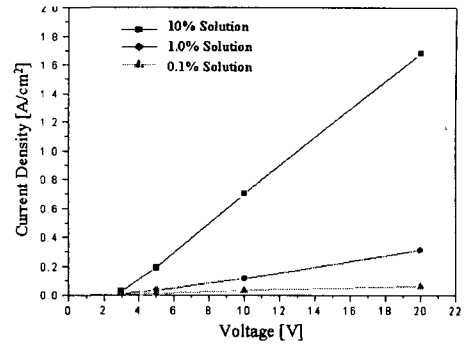


Fig. 6 Current density-Voltage curve of NaNO_3

[전해액 농도에 따른 차이]

인가전압이 10V, 전압인가 시간은 30sec의 조건에서 전해액 농도에 따른 절삭력의 차이를 Fig.7에 나타낸다. 절입깊이 $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 구간을 중심으로 살펴보면 전해액의 농도가 0.1%~20%까지 농도가 증가할수록 절삭력의 감소효과가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 전해액의 농도가 증가함에 따라 전해액의 비전도도가 증가하여 동일한 전압에서 전류밀도가 높아진 결과이다. 단, 전해액의 비전도도는 질산나트륨 수용액의 농도에 비례하여 증가하지 않고 1%이하 또는 20%이상에서는 변화가 상당히 작은 것으로 알려져 있다^[3]. 따라서 0.1%~1.0% 수용액은 전류밀도가 낮아서 효율이 떨어지므로 같은 전압에서 큰 절삭력 감소효과를 얻기 위해서는 질산나트륨의 전도도 특성을 고려하면 10%~20% 사이의 농도가 적당한 것으로 판단된다.

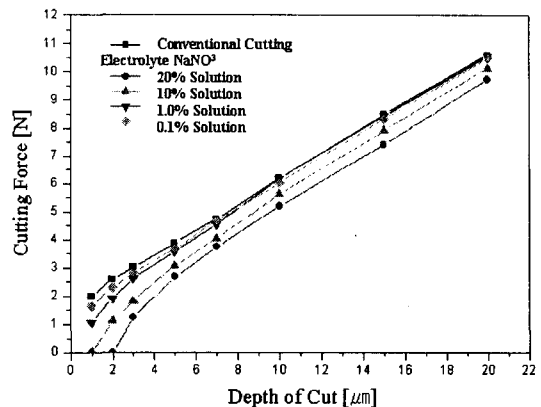


Fig. 7 Cutting force with electrolyte concentration

[인가전압에 따른 차이]

질산나트륨 농도 10%의 수용액을 사용하고 전압 인가시간은 30sec로 유지하면서 인가전압의 차이에 따른 절삭력의 차이를 조사하였다. Fig.8의 결과에 의하면, 전해액의 농도를 증가시키는 것보다 전해전압을 증가시킴으로써 보다 큰 절삭력 감소효과가 얻어지는 것을 알 수 있다. Fig.8에 나타난 바와 같이 전압이 증가하면 절삭력 감소효과는 비례하여 증가하는 경향을 갖는다. 이와 같은 결과는, Fig.6에서 전해액의 농도가 증가하면 전류밀도가 증가하는 기울기가 커지고, 동일한 농도에서는 전압의 증가하면 전류밀도도 비례적으로 증가한다는 사실로부터 타당성을 확인할 수 있다. 그리고 인가전압이 3V~5V 사이에서는 전해용출보다는 부동태 막의 형성에 의해 절삭력이 미소하게 감소하며, 10V~20V의 조건에서는 공작물의 표면에서 지속적인 전해용출로 인해 절삭력이 비교적 큰 폭으로 감소되는 것으로 판단할 수 있다.

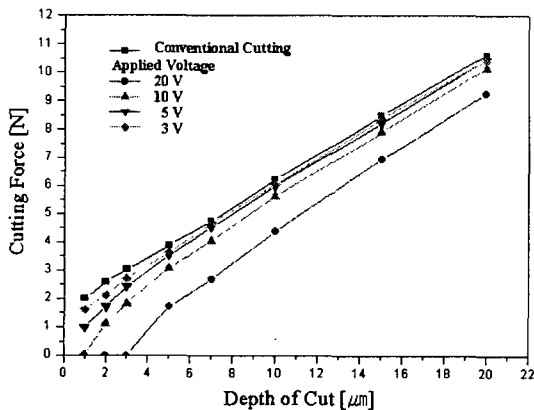


Fig. 8 Cutting force with open voltage

[전압인가 시간에 따른 차이]

질산나트륨 10% 수용액과 인가전압을 10V로 하고 전압인가 시간에 따른 절삭력의 차이를 조사한 결과를 Fig.9에 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 전류밀도가 1A/cm² 이상인 전해조건에서는 전체적으로 전해시간이 길어질수록 전해용출되는 양이 증가하여 절삭력 저감 효과는 비례하여 커지는 것으로 나타난다. 이런 결과로 볼 때 전해액의 농도와 인가전압이 결정되면 전압인가 시간에 따른 전해 용출량을 예상하는 것이 가능하다. 그리

고 본 연구와 같이 전해액의 유동이 없는 상태에서는 장시간 지속적으로 전류를 흐르게 하는 것이 어렵다. 그러나 Fig.9의 결과는 비교적 짧은 시간 동안 전압을 인가하였기 때문에 전해액 전도도의 변화가 크지 않아서 시간의 증가에 따라 절삭력의 감소량이 비례적으로 증가한 것으로 생각할 수 있다.

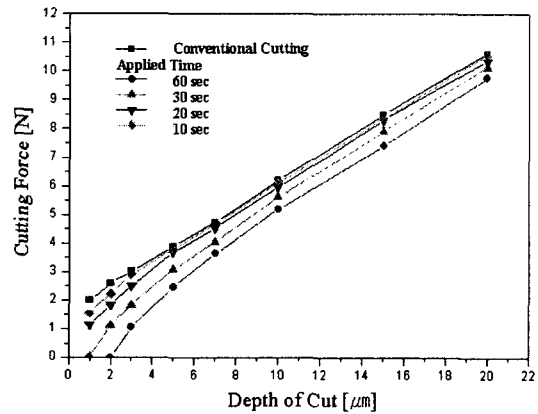


Fig. 9 Cutting force with current time

5. 결론

본 연구에서는 전해복합 가공법을 도입하여 전해현상에 있어서 전해액의 농도와 인가전압 및 전압인가 시간에 따른 절삭력 저감 특성의 차이에 관하여 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 구체적으로 정리하면 다음과 같다.

- 1) 전해가공을 복합 시킴으로써 공작물의 표면에서 전해용출 현상을 이용하면 절삭력을 감소시키는 것이 가능하다
- 2) 일정한 전압 하에서 절삭력 감소 효과를 향상시키기 위해서는 10%~20% 사이의 농도를 사용하는 것이 권장된다.
- 3) 전해액의 농도가 일정한 조건에서는 전압의 인가시간에 비하여 인가전압의 크기가 절삭력의 감소에 큰 영향을 미친다.
- 4) 전압의 인가시간이 일정한 조건에서는 전압을 높이는 것이 전해액의 농도를 증가시키는 것보다 큰 절삭력 감소효과를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 기계 부품 및 소재 특성평가 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. J. P. Caire, E. Chainet, B. Nguyen, P. Valenti, "Study of a New Stainless Electropolishing Process", E.N.S. d'Electrochimie et d'Electrometallurgie, pp.149~156
2. 杉江他曾宏, 藤井 知, 山川宏二, 吉澤四郎"電解加工における種な鐵鋼材料の電流密度と加工性能", 電氣加工學會, Vol. 46. No. 3, 1978
3. 佐藤敏一, "電解加工と化學加工", 韓倉書店, 1970.
4. 永田眞生, 若林公宏, 山田眞樹, 増澤隆久, "電解による切削抵抗低減效果を利用した微細切削", 日本電氣加工學會, Vol.33.No.74, 1999.
5. 佐藤教男, "金屬の不動態化と表面不動態皮膜", 電氣化學 Vol.46, N0.11, 1978.