

다결정 다이아몬드 공구를 이용한 Al-Mg계 합금의 미소선삭가공특성에 관한 연구

황 준*, 남궁 석**

A Study on the Micro Turning Machinability of Al-Mg Alloy Using Polycrystalline Diamond Tool

Joon Hwang*, Suk Namgung**

ABSTRACT

In this study, machinability of some aluminum-magnesium alloy are experimentally investigated using polycrystalline diamond tool with turning, and evaluated some independent cutting variables affected micro metal cutting characteristics as cutting force, specific cutting resistance, shear angles.

To know the effect of cutting parameters of single point diamond machining, experiments were performed to measure cutting forces for high speed turning of aluminum alloy 6061-T6, SM45C and FC20 with polycrystalline diamond and coated cemented carbide tool.

Independent cutting variables were changed to a variety of cutting speed, feed rate, rake angles, material properties of workpiece and tool. Futhermore, Some useful informations are obtained in this study can guide micro metal cutting of aluminum alloy with diamond tool.

Key Words : Micro turning machinability (미소선삭가공특성), Polycrystalline diamond tool (다결정 다이아몬드 공구), Specific cutting resistance(비절삭저항), shear angle(전단각)

1. 서 론

최근들어 전자, 항공, 자동차등 각종 尖端産業의 발전과 함께 新素材 및 난삭재의 개발 및 등장은 새로운 製品加工 方法論의 모색을 필요로하고 있으며, 마이크로미터(μm) 또는 나노미터(nm)의 제품정밀도를 요구하는

超精密部品の 제작 및 개발, 超高速 加工技術의 개발과 그 응용등이 그 중요성을 더해가고있다. 이러한 산업 기술 요구에 부응할 수 있는 각종 加工技術의 확립은 그 무엇보다도 시급히 해결해야 할 課題로서 부상하고 있다.

加工技術確立을 목적으로 다양한 기간기술들이 개발

* 한국타이어 중앙연구소
** 충남대학교 기계공학과

되고 있으며^(1,2)超精密切削 또한 주요 초정밀가공 기술의 하나로서 관심을 모으고 있다. 그런데, 切削工具에 의한 切削加工은 오늘날 가장 보편화된 가공기술중의 하나이지만, 신소재 및 새로운 가공영역의 출현은 절삭가공공정 및 그 mechanism에 대한 재조명을 필요로 하고 있으며, 또한, 주로 강구조 중심으로 구축되어온 가공 know-how와 데이터 베이스에서 벗어나 보다 다양한 재질의 공구, 공작물에 대한 기초 절삭성 실험들이 뒤따라야 할 것으로 판단된다. 특히, 최적의 가공인자 및 품도의 도출을 위해 다양한 절삭인자와 절삭특성의 상관성을 파악하여야 하며, 또한, 일부 연구들을 통해 미소 절삭영역에서의 절삭거동은 일반절삭과는 다른 양상과 현상을 나타내는 치수효과, 공구날끝 반경, 절삭력 변동등에 의해 적절한 절삭조건의 선택 및 "加工前 製品信頼性" 확립상의 난점 발생으로 인한 비용의 상승 또한 무시할 수 없다.

따라서, 本 研究에서는 근간에 관심의 대상이 되고 있는 비철금속의 절삭가공에 주안점을 두어, 다결정 단인 다이아몬드 공구를 이용한 열처리 비철금속의 하나인 Al-Mg계 합금의 微小切削特性 고찰을 목적으로 切削速度, 移送速度, 工具傾斜角, 切削깊이, 공작물 및 공구재질 등의 다양한 獨立切削因子의 변경실험에 따른 切削力, 比切削에너지, 剪斷角등의 從屬切削因子와의 상관성을 중심으로 측정 및 분석을 수행하였으며, 이를 통하여 각종 기계부품의 기초 가공자료로 제시코자 한다.

2. 실험장치

다이아몬드 공구를 이용한 切削은 주요 精密加工방법의 하나이며, 우수한 경도 및 내마모성과 작은 인선반경의 제작이 가능하여 미세절입 및 경면사상이 가능하다. 또한, 높은 열전도성으로 切削熱 발생이 적으며, 마찰계수가 낮아 Chip유동이 원활한 것으로 알려지고 있다. 그러나, 다이아몬드 공구는 고온산화 및 흑연화의 열화학적 취약성과 철계금속의 탄소와의 친화성으로 인해 비철금속 합금류 및 세라믹등의 정밀가공에 사용 되고 있다.

本 研究에서 切削抵抗의 측정은 압전형 工具動力計를 사용하였으며, 피삭재는 직경 50mm, 길이 250mm인 AL6061-T6, SM45C, FC20재의 환봉을 사용하였으며, 다결정 다이아몬드공구 (polycrystalline diamond, PCD)를 이용하여 알루미늄 합금의 선삭을 주로 수행하였다. 또한, 공작물재질에 따른 切削力 및 比切削抵抗의 변동을 고찰코자 탄소강인 SM45C와 주철FC20을 각각

절삭시편으로 사용하였다.

시편준비는 가공시 공작물의 편심에 의한 영향을 배제하기 위하여 실험에 앞서 절삭깊이를 0.5mm로 하여 양 센터작업에 의해 초경공구를 이용하여 전 가공을 실시한 후, PCD를 이용하여 0.2mm 사상한 후, 아세톤과 알콜을 이용하여 가공표면을 닦은 뒤, 실험을 실시하였다. 또한, 공구재질에 따른 절삭특성을 고찰키 위해 다이아몬드인 COMPAX와 함께 초경공구 P종을 사용한 절삭실험도 실시하였다.

측정된 切削抵抗의 평균치를 구하기 위하여 절삭저항신호의 1.5 Hz이하 Low-Pass Filtering을 통해 얻은 주분력(Fz or Fc), 이송분력(Fx or Ft), 배분력(Fy)을 도출하였으며, Spectrum Analyzer를 이용한 주파수 분석도 병행하였다. 본 실험에서 측정된 주분력 및 이송분력을 통해 비절삭에너지를 계산하기 위하여 하기의 식을 이용하여 계산, 비교하였다.⁽⁴⁾

Table 1 Chemical composition of workpiece (W_i, %)

	C	Mo	Si	Mg	Mn	P	S	Fe
SM45C	0.45	-	0.24	-	0.74	0.01	0.015	Bal.
FC20	3.20	0.24	1.98	-	0.52	-	-	Bal.
	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Al
AL6061-T6	0.15	0.10	0.80	0.25	0.15	0.30	0.70	Bal.

Table 2 Mechanical properties of workpiece

	Tensile Strength (Kg/mm ²)	Hardness (H _B)
SM45C	78	220
FC20	25	168
AL6061-T6	20	95

Table 3 Designation of cutting tool and chuck system

Cutting Tool	Back rake angle : 0° Side rake angle : 0°, 3°, 10° End relief angle : 6° Side relief angle : 6° End cutting Edge angle : 6° Side Cutting Edge Angle : 0° Nose radius : 0.4 mm Height : 25 mm Width : 25 mm Length : 160 mm Type : Polycrystalline Diamond 초경 P10종
Chuck	3-Jaw Scroll Chuck

$$K_s = F_c / A \quad (2.1)$$

여기서,

F_c : 절삭력

K_s : 비절삭저항 또는 비절삭에너지

A : 절삭면적

2次元 切削모델로 가정할 경우 剪斷面에 작용하는 剪斷力 F_s 는

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (2.2)$$

여기서,

F_c : 주분력 성분

F_t : 이송분력 성분

ϕ : 전단각

剪斷面에서의 剪斷應力 τ_s 는

$$\begin{aligned} \tau_s &= F_s / A_s \\ &= (F_c \cos \phi \sin \phi - F_t \sin^2 \phi) A_0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

이때, $A_0 = t_w$

또한, 본 연구에서 사용된 시편의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에, 공구형상과 Chuck계를 Table 3에 각각 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 切削抵抗에 미치는 切削速度的 影響

切削抵抗에 영향을 주는 인자로서는 절삭조건, 피삭재 재질, 공구형상 및 재종, Chip 생성기구, 공작기계-공구-공작물계등을 들 수 있으며, 이들은 실제 절삭과정에서 獨立 切削因子와 從屬 切削因子의 복잡한 상관성으로 나타난다.

Fig.1에는 공구경사각 $\alpha=0^\circ$, 절삭깊이 $t=0.20\text{mm}$, 공구를 PCD로 알루미늄합금을 절삭할 경우, 절삭속도의 변화와 이송속도의 변화가 절삭력에 미치는 영향을 정리한 결과이며, 이때 이송속도 $f=0.11, 0.21, 0.32 \text{ mm/rev}$ 이다.

주분력 및 이송분력은 절삭속도 및 이송속도의 증가에 비례하는 경향을 나타내고 있으며, Fig.2에는 측정된 절삭력으로부터 계산된 比切削抵抗을 도시한 결과이다.

比切削抵抗은 단위절삭면적에 대한 절삭력으로 정의되는 만큼 比切削에너지와 동일하며, 일반적으로 절삭속도가 높을수록 比切削抵抗은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 다이아몬드 공구를 이용한 미소선삭에서는 공구

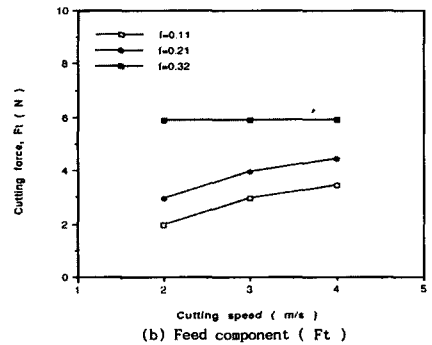
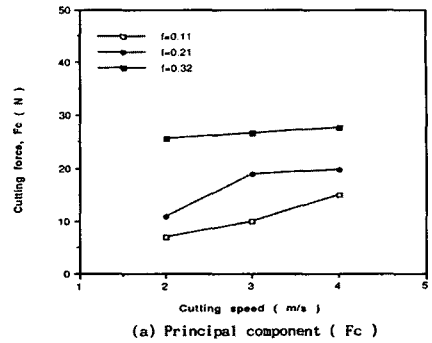


Fig.1 Variation of cutting force with respect to cutting speed. ($t = 0.20 \text{ mm}$, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6)

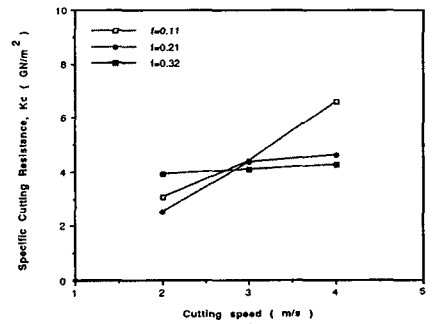


Fig. 2 Variation of specific cutting resistance with respect to cutting speed. ($t = 0.20 \text{ mm}$, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6)

특성상 절삭온도상승율이 낮고, 또한 마찰계수의 변화도 크지 않으므로 절삭저항은 절삭체적의 변화에 주로 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

Fig.3에는 전단각을 절삭속도 및 이송속도별로 도시하였으며, 본 실험에서 채택한 시험조건에서의 전단각은 $\phi = 35^\circ \sim 40^\circ$ 범위내에 있음을 알 수 있다.

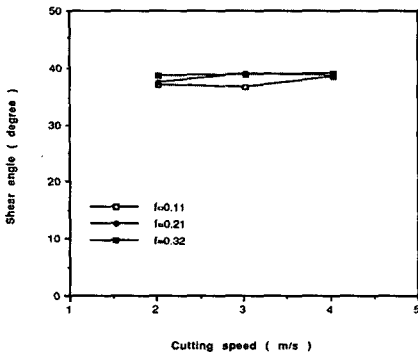


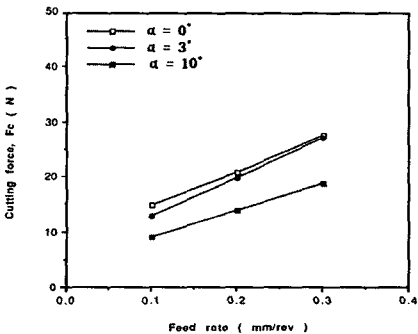
Fig. 3 Variation of shear angle with respect to cutting speed and feed rate.
($t = 0.20$ mm, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6)

3.2 切削抵抗에 미치는 移送速度 및 工具傾斜角의 影響

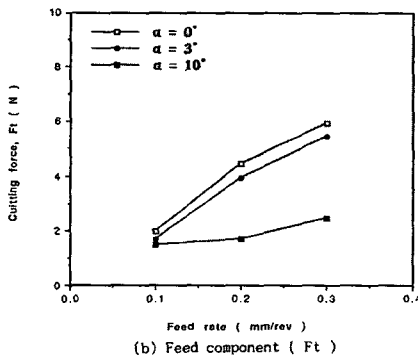
공구경사각 $\alpha = 0^\circ$, 절삭깊이 $t = 0.20$ mm, PCD공구로 알루미늄합금을 절삭할 경우, 주분력 및 이송분력은 이송속도의 증가에 비례하며, 공구경사각의 증가에 따라 절삭

력은 감소한다. 이는 이송속도의 증가는 전체 切削 體積을 증가시키는 결과를 초래하므로 절삭력은 점진적으로 증가하는 것며, 공구경사각의 증가는 Chip의 압축계수가 작아져 공구상면에서의 Chip 유출저항이 크게 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.4에는 이송속도 및 공구경사각 변화에 따른 절삭력 분포를 Fig.5에는 측정된 절삭력으로 부터 계산된 比切削抵抗을 도시한 결과로써, 이송속도의 증가에 따라 전체 절삭면적의 증가에 따른 절삭력 증가현상을 보이는 반면, 단위절삭면적에 대한 절삭력 비는 감소하는 치수효과 (size effect)에 의해 比切削抵抗은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 한편, 공구경사각의 경우 전체 比切削抵抗은 실제적으로 투영되는 단위절삭면적에 차이는 있겠지만, 경사각의 증가에 따라 절삭력, 비절삭저항은 비례적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 전단각은 약 $\phi = 40^\circ$ 내외에 있음을 알 수 있다.



(a) Principal component (F_c)



(b) Feed component (F_t)

Fig. 4 Variation of cutting force with respect to feed rate and tool rake angle
($t = 0.20$ mm, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6)

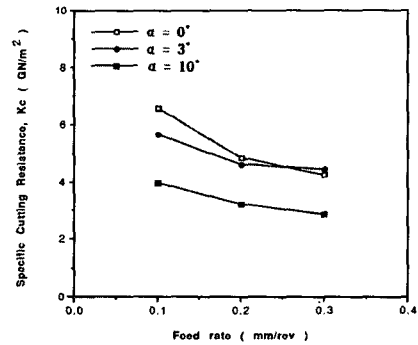


Fig. 5 Variation of specific cutting resistance with respect to feed rate and tool rake angle.
($t = 0.20$ mm, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6)

3.3 切削抵抗에 미치는 切削깊이의 影響

일반적으로 초정밀가공 또는 미소절삭가공과 같이 절삭공구의 인선 반경 (nose radius) 보다 절삭깊이가 작은 경우, 공구인선에 의한 절삭 보다 공작물에 작용하는 압피력의 증가로 인한 치수효과가 발생하는 것으로 알려져 있다.^(3,4)

본 실험에서는 통상적으로 절삭깊이 0.20mm이하의 微小切削에 주안점을 둔 바, 절삭깊이를 0.05mm ~ 0.20mm로 변경시키면서 그 때의 切削力, 比切削抵抗, 剪斷角의 변화경향을 고찰하였다.

Fig.6에는 절삭깊이에 변화에 따른 절삭력 측정신호를

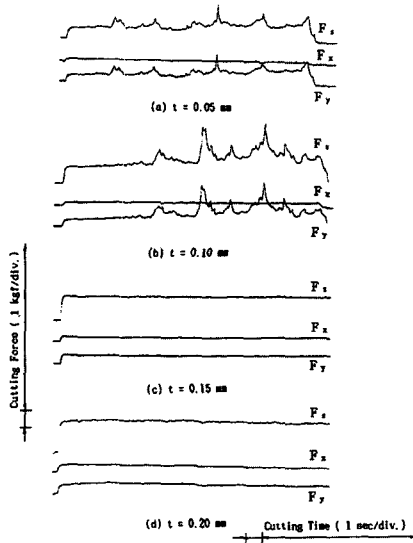


Fig. 6 Variation of cutting force with respect to depth of cut ($f = 0.21$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, Tool : PCD, Workpiece : AL6061-T6, $\alpha = 0^\circ$)

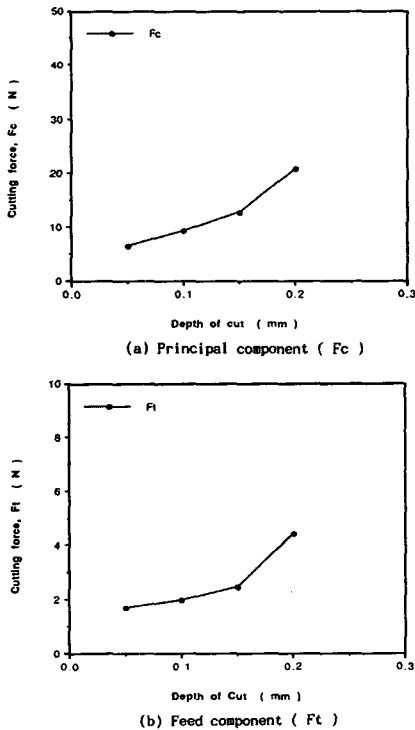


Fig. 7 Variation of cutting force with respect to depth of cut. ($f = 0.21$ mm/rev, $V = 4$ m/s, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6, $\alpha = 0^\circ$)

도시한 결과이다. 절삭깊이의 증가에 따라 절삭력도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히, 알루미늄합금은 Chip의 연성이 높아 Chip이 쉽게 끊어지지 않으며, 절삭깊이가 작을수록 공구와 공작물 사이에 Chip이 축적되는 현상이 심화되어 Chip배출이 용이하지 않기 때문에 주분력 및 배분력의 변동이 크게 나타나고 있다. Fig.7에는 절삭깊이에 따른 주분력 및 이송분력의 변화를, Fig.8에는 비切削抵抗의 변화를 각각 도시하였다.

절삭깊이의 증가에 따라 주분력 및 이송분력은 비례증가 경향을 보이며, 이는 전체 절삭체적의 증가에 기인하는 것으로 판단되며, 비切削抵抗는 단위절삭면적당 절삭력으로 정의되므로 전반적으로 切削面積의 감소에 따라 비절삭저항이 증가하는 경향을 나타내는데 이는 치수효

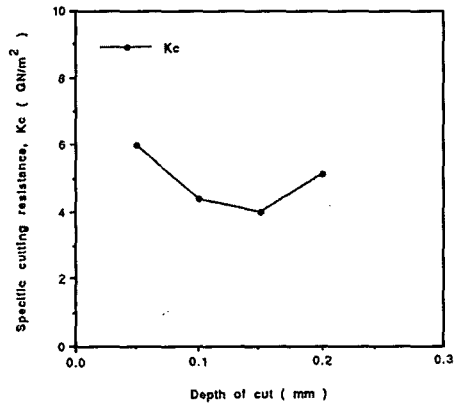


Fig. 8 Variation of specific cutting resistance with respect to depth of cut. ($f = 0.21$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6, $\alpha = 0^\circ$)

과에 기인하는 것으로 사료된다. 또한, 본 실험에서는 절삭깊이 0.15mm에서 비절삭저항이 최소로 나타나는데 절삭깊이 증가에 따라 압입력이 감소하고 절삭인에 의한 절삭효율이 증대되는 절삭조건이라 판단된다. 따라서, 微小切削의 경우에도 가공동력을 최소화할 수 있는 最適切削條件의 선정이 가능할 것으로 판단된다. Fig.9에서 절삭깊이가 전단각에 미치는 직접적인 영향은 찾을 수 없으나, 전단각은 공구경사각, 절삭속도, 이송속도와 같이 절삭시 Chip배출속도 및 배출각도등에 관계있는 獨立切削因子에 더 큰 영향이 있음을 관찰할 수 있다.

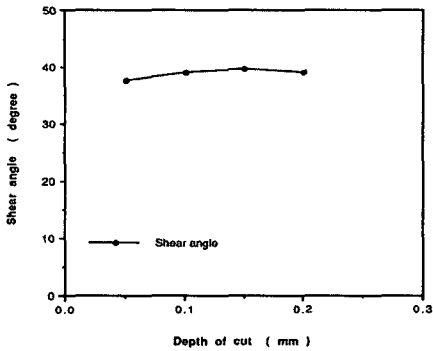


Fig. 9 Variation of shear angle with respect to depth of cut. ($f = 0.21$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, Tool: PCD, Workpiece : AL6061-T6, $\alpha = 0^\circ$)

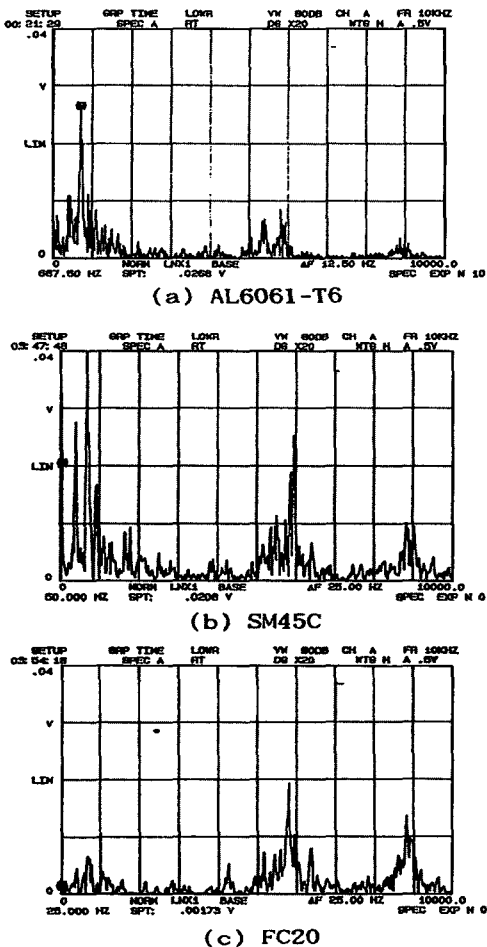


Fig. 10 Spectral analysis of cutting force with respect to material properties of workpiece. ($f = 0.32$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, Tool: PCD, $\alpha = 0^\circ$)

3.4 切削抵抗에 미치는 工作物 材質의 影響

Fig.10은 공작물 재질을 AL6061-T6, SM45C, FC20로 변경하여 절삭조건 $f=0.2$ mm/re, $t=0.2$ mm, $\alpha=0^\circ$, $V=4$ m/s, PCD공구로 절삭실험 하였을 때 10kHz 대역의 주파수 특성을 분석한 결과이다.

탄소강의 경우는 연속형의 청색 Chip이, 알루미늄합금의 경우는 연속형 Chip의 중간중간에 전단자국이 생기는 Chip형상을 나타내었다. 특히, 탄소강 가공시 발생된 Chip이 청색인것으로부터 절삭열의 발생이 다른 재료보다 높을것으로 유추할 수 있으며, 400Hz의 주파수분석도로부터 탄소강 및 알루미늄합금의 연속형 Chip과 주철의 가루형Chip의 주파수 형상은 서로 상이함을 알 수 있다. 또한, 10kHz 스펙트럼에서 보면, 주파수 5 ~ 7 kHz 대역에서 발생하는 peak치가 탄소강의 경우가 가장 크며, 이는 전체 절삭력을 반영하는 것으로 판단된다.

Fig.11에는 工作物 材質별 主분력 및 이송분력 변화를 절삭시간에 대하여 도시하였다. 主분력 및 이송분력의 크

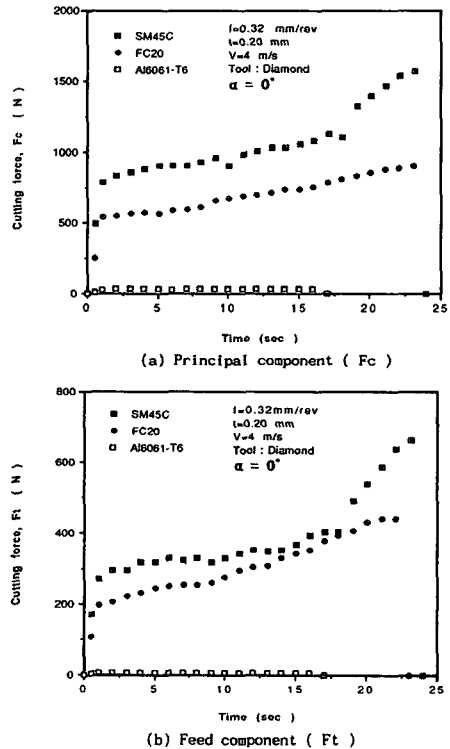


Fig. 11 Variation of cutting force with respect to material properties of workpiece versus cutting time. ($f = 0.32$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, Tool: PCD, $\alpha = 0^\circ$)

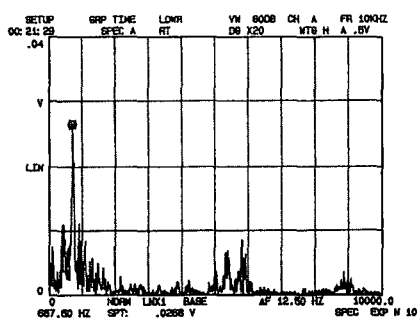
기는 탄소강이 가장 크며, 다음이 주철, 알루미늄합금의 순으로 나타났는데, 이는 공작물경도 및 강도에 비례하여 크게 나타나는 것으로 판단된다. 특히, 본 실험조건하에서 탄소강의 주분력은 알루미늄 합금의 것보다 약 45배 정도 큰 절삭력이 요구되는 것으로 파악되었다.

전단각의 변화는 주철, 탄소강, 알루미늄 합금의 순으로 전단각이 증가하는 경향을 나타내며, 이는切削比(cutting ratio)와 주분력/이송분력의 비가 클수록 증가하는 것으로 사료된다.

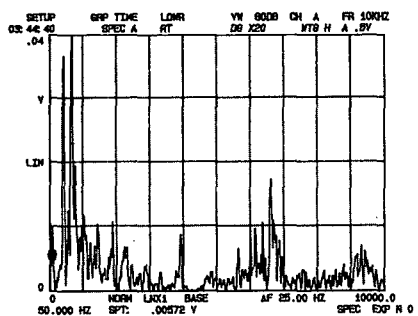
3.5 切削抵抗에 미치는 工具材質의 影響

다음은 공구재질이 절삭력, 비절삭저항, 전단각등에 미치는 영향을 고찰코자 공구를 PCD인 COMPAX와 초경 P10종을 사용하여 공작물 AL6061-T6의 절삭실험을 수행하였다.

Fig.12은 10 kHz이하 주분력의 주파수 분석결과를 도시하였으며, 주파수 5 ~ 7 kHz 대역에서 발생하는 peak치를 관찰해 보면, 초경 P10종 공구가 COMPAX



(a) PCD



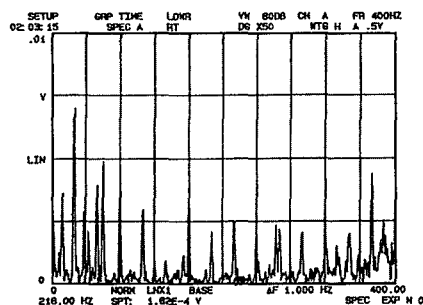
(b) P10

Fig. 12 Spectral analysis of cutting force with respect to material properties of tool.
($f = 0.32$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, Workpiece : Al6061-T6, $\alpha = 0^\circ$)

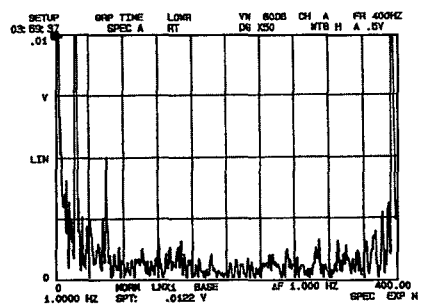
공구의 실험보다 약 2배 정도 크게 나타난다. 이는 切削工具 경사면과 Chip과의 摩擦係數 및 Chip배출정도의 영향도에 기인할 것으로 사료된다. 또한, 초경공구의 경우가 다이아몬드를 사용한 절삭실험에서 얻은 주분력의 약 2배 정도 크게 나타나며, 이는 다이아몬드 공구의 摩擦係數가 초경보다 낮아 Chip의 유동이 원활하여, Chip生成을 위한 塑性變形에너지의 감소가 주 원인인 것으로 판단된다.

3.6 CHIP 形狀에 따른 周波數 特性

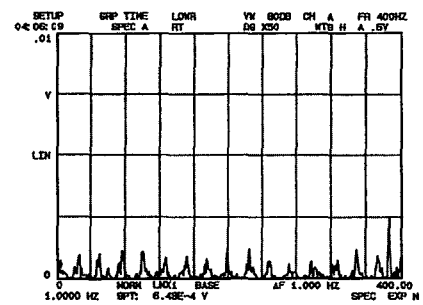
절삭가공에 있어서 용이한 Chip처리를 위해서는 공작



(a) AL6061-T6



(b) SM45C



(c) FC20

Fig. 13 Variation of autospectrum of cutting force with respect to type of chip form and workpiece (0 ~ 400 Hz)
($f = 0.32$ mm/rev, $t = 0.20$ mm, $V = 4$ m/s, $\alpha = 0^\circ$, Tool:PCD)

물, 공구의 재질변화에 따른 Chip형상에 대한 사전 분석이 매우 중요하다고 할 수 있다.

Fig.13에는 절삭공구를 PCD로, 공작물 재질을 변경하여 알루미늄합금, 탄소강, 주철을 절삭했을때 측정된 절삭력 신호의 400Hz까지의 주파수 분석결과이며, 이때의 Chip형상은 알루미늄합금의 경우 전단자국을 갖는 연속형 Chip형상을, 탄소강의 경우 청색의 연속형 Chip형상을, 주철의 경우 약 1~2mm의 길이를 갖는 파단형 Chip형상을 각각 나타내었다. 또한, 주파수 분석에서 연속형 Chip의 경우 Chip생성 균열주파수에 해당하는 400Hz 이하에서 하모닉이 발생하고 있으며, 주철의 경우 일정한 크기의 파단형 Chip생성에 기인하는 주파수가 하모닉으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

産業의 발전과 함께 새롭게 요구되는 加工素材의 개발 및 加工 know-how의 확립은 信賴性 있는 製品生産에 직접 응용가능한 核心要素技術이라 할 수 있으며, 특히, 切削加工과 같이 加工因子간의 복잡한 상관성 때문에 그 mechanism을 정확히 밝히는 것이 어려운 부문인 경우, 다양한 理論的 解析과 實驗을 반드시 필요로 한다.

따라서, 本 研究에서는 최근 다양한 部品需要를 가지고 있는 알루미늄합금의 加工特性을 고찰코자 다이아몬드 공구를 이용한 微小切削을 수행 하였으며, 측정된 切削力을 근간으로 하여 獨立切削因子 변경에 따른 比切削에너지, 剪斷角, Chip형상등 절삭mechanism에 관련된 내용들을 重點的으로 考察하였다. 本 研究를 통해 도출된 結果들을 정리하면 다음과 같다.

1) 절삭속도의 증가에 따라 比切削에너지 (比切削抵抗) Kc 는 이송량 $f=0.11\text{mm/rev}$ 의 경우만 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 공구경사각 $\alpha = 0^\circ$ 인 다이아몬드 공구를 사용한 경우 剪斷角 $\phi = 35^\circ \sim 40^\circ$ 범위의 인 것을 알 수 있다.

2) 이송속도의 증가에 따라 比切削에너지는 감소하는 경향을 나타내며, $t=0.2\text{mm}$ 이하의 절삭깊이에서는 Chip형상이 전단자국을 갖는 연속형이 주류를 이루고 있다.

3) 다이아몬드공구의 경사각을 $\alpha = 0^\circ, 3^\circ, 10^\circ$ 로 변경실험한 결과, 공구경사각이 감소할수록 Chip배출에 소요되는 절삭에너지가 감소하여 比切削抵抗 KC는 감소하

는 경향을 나타내며, 이때의 剪斷角은 $\phi = 35^\circ \sim 40^\circ$ 범위에 존재한다. 특히, 본 실험의 경우 공구경사각 3° 에서 剪斷角이 최소로 되었으며, 이는 獨立切削條件의 선정에 따라 우세적인 獨立切削因子가 있는것으로 판단된다.

4) 절삭깊이를 $t = 0.05 \sim 0.20\text{mm}$ 로 변경한 경우, 절삭 깊이가 증가할 수록 전체 절삭체적의 증가로 인한 절삭력(주분력 및 이송분력)은 증가 하는 반면, 比切削抵抗은 절삭깊이의 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내는데 이는 치수효과에 기인하는것으로 판단된다.

5) 공작물재질의 변경은 크게 알루미늄 합금, 탄소강, 주철을 선정하여 실험한 결과, 주로 공작물의 경도및 강도에 비례하여 절삭력이 크게 나타났다.

6) 공구재질의 변경실험은 인조다이아몬드공구 COM-PAX와 초경공구 P10종을 비교 실험하였으며, 초경공구의 경우가 약 2배의 절삭력, 比切削抵抗치를 나타냈으며, 이는 공구경사면과 Chip사이의 마찰계수, Chip배출에너지에 기인하는것으로 판단되며, PCD의 경우 剪斷角은 약 $\phi = 40^\circ$, P10의 경우는 $\phi = 35^\circ$ 의 범위에 있는것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

1. N.Ikawa et al, "Ultra precision metal cutting-The past, the present and the future", Annals of CIRP
2. J.B.Brayan, "Design and construction of an ultraprecision 84in diamond turning machine", Precision Eng., Vol.1, No.1, pp.13-18,1979.
3. M.E.Merchant, "Mechanics of metal cutting process", J. Appl.Phys., Vol.16, No.5, pp.267-269, 1945.
4. Geoffrey Boothroyd, "Fundamentals of metal machining and machine tools", McGraw-Hill, 1975.
5. J.H.Dautzenberg, J.A.G.Kals and A.C.H.Van der Wolf, "Forces and plastic work in cutting", Annals of the CIRP, Vol. 32, pp. 223-227, 1983.
6. J.S.Strenkowski and J.T.Carroll III, "A finite element model of orthogonal metal cutting", J. of Eng. for Ind., Vol.107, pp.346-

- 354, 1985.
7. 황 준, 남궁 석, “마찰특성이 미소절삭기구에 미치는 영향에 관한연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.166-171, 1993.
 8. 황 준, 임순재, 김영석, 남궁 석, “Al-Mg계 합금의 미소절삭특성에 관한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.194-199, 1994.
 9. 서남섭, “金屬切削理論”, 동명사, 1985.