

超精密加工技術의 現況과 展望

송 지 복*

1. 머리말

Micro-electronics를 핵으로 하는 기술혁신의 물결이 눈부시고, 우리 주변의 일상생활이 하루가 다르게 변해가고 있다.

Leading-edge technology, high technology, advanced technology 등으로 호칭되는 일군의 새로운 기술의 절대적 level이 현재 어디에 위치해 있는지 確認 조차 하기 어렵고 첨단기술 제품의 성능에 눈을 잃을 지경이지만 고려청자나 이조백자에 대해서는 현재의 기술을 가지고도 그 재현이 困難하다.

이와 같이 시차의 이중성 속에서 제품의 부가가치를 높이고 생산성을 올리기 위해서는 가공기술의 고도화를 기하지 않으면 안된다.

어떤 소재를 설계된 모양대로 변화시키는 일련의 과정을 가공이라 한다면 이에겐 변형가공(주조, 소성가공), 부가가공(용접), 제거가공(절삭, 연삭) 등을 생각할 수 있으며 이들 사이의 가공정도의 개략치는 다음과 같다.

공작물에 요구되는 가공정도는 시대의 변천과 더불어 level up되고 이를 위한 기술 개발이 부단히 이어오고 있다.

1960 - 70년대의 생산가공 기술은 μm 단위인 10^{-5} -- 10^{-6}m 의 범위의 가공정도를 생산 line으로 실현하는 것이 중점개발 목표였다. 그러나, 현재는 10^{-5} -- 10^{-7}m 를 목표로 한 submicron 가공정도 實用期에 들어서고 있다.

다음의 Target는 10^{-8} -- 10^{-10}m 의 가공정도인 nano technology의 실현이며 그 주요 기술개발과제로 (i) 비구면 가공, (ii) X선용 광학부품의 가공 (iii) $\phi 1000$ 이상의 대형부품의 가공, (iv) 난삭재료의 능률적 가공 등을 들 수 있다.

그 어느것 하나 거액의 연구비, 다수의 인원, 폭넓은 분야의 기반기술 없이는 목표도달이 어려운 것들이다.

2. 超精密 高速 切削

Diamond 工具에 의한 초고속 가공은 연구단계에서 실용단계로 이행된 것이 20여년전의 일이다.

처음에는 사무기기 Computer 주변기기 음향영상 제품에 사용되는 단순형상의 부품이 그대상이 되었으나 근래에 이르러서는 건식복사기의 感光 Drum, Computer 자기 Disc 기판, laser print의 多面鏡, CO₂ laser 가공기의 集光 lense 등 점점 그 종류가 증가하고 있으며 그 需要 또한 급속히 늘어만 가고 있다.

초정밀 가공의 基本原理는 nm level 공작기계의 작동과 절삭성이 좋은 공구의 切刃形狀을 가공물에 바르게 轉寫하는 것으로 치수 및 形狀의 精度가 10^3nm 이하고 표면거칠기는 10nm R_{max}精度이다. 때문에 초정밀 가공 부품은 그 하나 하나가 貴重品으로 質과 量을

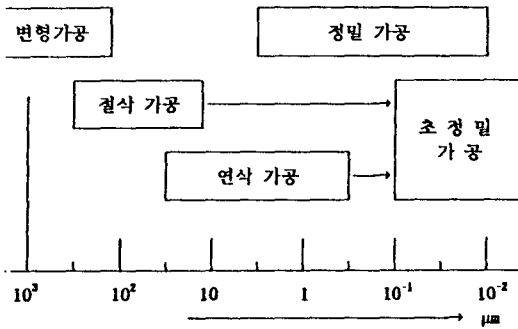


그림.1 加工工程에 따른 加工精度

* 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

충족시키기 위한 고정도 고능률 가공의 요구가 높아지고 있다.

1) 초고속 절삭기수

加工能率은 단위 시간에 배출되는 chip의 量(= $v \cdot f \cdot t$)으로 절삭 속도(v), 가공 깊이(t), 이송량(f)에 의해 결정되나 경제적 기술적 制約 조건 때문에 이들 3요소의 임의 조작에 어려움이 많다.

예로써, 이송량의 고속도화는 가공면을 거칠게 하고 가공 깊이의 증대는 저항을 급증시켜 공구와 工作機械에 과대한 負荷를 작용케 한다. 또한 절삭속도의 증가는 절삭온도를 높여 공구마모를 촉진하고 공구수명을 단축시키는 결과를 가져온다. 그러나 이들 중 기술적 구속조건이 적으면서 加工能率과 精度를 改善 할 수 있는 것으로 절삭속도의 고속화가 끊임없이 연구되어 왔으며 공구재료의 진보에 따라 실용가능한 上限 속도(High speed Cutting)의 목표치는 주철 또는 鋼材인 경우 700-1000m/min, 실용절삭속도 域은 500--700m/min이고 항공기체 부품에 많이 쓰이는 A1합금은 2000--10000m/min이지만 연구실에서 실험적 절삭 속도(ultra high speed Cutting)는 10000m/min 이상을 개발목표로 하고 있다. 이는 경부 고속 전철의 시속 500Km를 훨씬 상회하는 가공 속도이다.

일반적으로 절삭 속도가 증가하면 chip이 생성되는 전단 소성 변형의 전단 strain이 작아지는 반면, 전단 각이 커지기 때문에 chip은 얇아져 절삭저항은 감소하고 가공면의 거칠기는 좋아진다.

또한 절삭 Energy의 상대적 증가비는 둔감해지지만 궁극적 절삭 온도는 상승하며 공구의 열화학적 마모가 증가하고 공구 수명은 단축된다. 따라서 절삭 油劑의 적절한 사용은 냉각과 청결 그리고 Rebinder 효과를 가져와 공구는 마모가 억제되고 절삭저항과 가공면은 한층 더 良好한 결과를 가져오게 된다.

2) 초고속 절삭 실용화를 위한 요소 기술

절삭 속도의 고속화는 절삭온도의 상승에 따른 공구 수명 단축이라는 demerit를 가져오나 加工能率의 개선, 가공저항의 감소, 가공면 거칠기의 개선이라는 관점에서 期待 되며 이의 실현을 위해 필요한 기술개발요소를 例示한 것이 그림 2이다.

고속 절삭의 應用分野는 선반과 milling가공이 주가 되며 그 대표적 요소 기술을 열거하면 다음과 같다.

i) 고속 절삭용 bearing

Endmill에 의한 A1을 고속절삭 할 경우 10000-

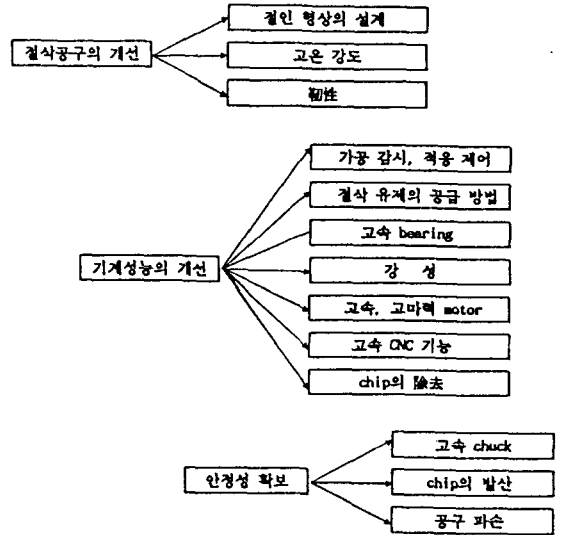


그림.2 超高速 切削에 必要한 技術開發要素

50000rpm의 고속회전에 장시간 견딜 수 있는 bearing 기구의 개발의 必要하며 그 대표적인 예로써 비접촉 자기 bearing이 있다. SKF사가 개발하여 Turchan사의 Machine Center EXTREMON용으로 納入된 磁氣 bearing식 Motor Spindle은 9.7KW, 60000rpm의 용량으로 100N/μm의 bearing 강성을 갖고 있다.

Power-electronics의 응용에 의한 AMB(Active Magnetic Bearing)은 프랑스의 S2M Group이 공작기 용으로 개발한 것이다. 그 특징은 비접촉 bearing이기 때문에 기계적으로 원심 파괴속도 75000rpm까지 운할 보수없이 장시간 고속화가 가능한 것이다. 또한 接觸式 bearing으로 Ex-Cell-0사가 개발한 ball bearing 방식의 motor 直結 spindle이 있다. 최고 37Kw, 150000 rpm까지 제품이 series화 되어 있지만 운할과 냉각 방식에 특별한 주의가 요하고 보수기간이 짧아 특별한 경우를 제외하고는 실용화 되어 있지 않다.

이상은 Endmill 가공용 고속 bearing에 대해 기술하였지만 선삭인 경우에는 공작물 支持系의 고속 bearing이 문제가 된다. 고속 회전에 의해 지지계 마찰 저항이 커지기 때문에 구동력도 그 용량을 크게하지 않으면 안된다.

현재 고속회전 조건 하에서는 마찰저항과 발생열을 억제하고 나아가 보수 수리의 간이화를 목적으로 개발한 공기 또는 油靜壓 bearing이 많이 쓰이고 있다.

ii) 기계 제어

고속 절삭에 의해 절삭能率이 높아지면 3차원 절삭에 필요한 X, Y, Z의 各軸方向의 운동 변화가 단시간에 발생하여 심한 부하 변동력을 가져오기 때문에 안정된 가공품질을 보충하고 자동 생산을 실현하기 위해 현재 CNC 공작기계에는 多數의 sensor를 이용, 공작물과 공구를 감시하고 있다.

고속 절삭에서는 단시간에 공구수명에 이르므로 공구 monitoring기능과 자동교환기능이 필요하다.

그림3. 은 현재 실용화 되고있는 절삭 저항, 절삭 동력 등의 변동력 pattern을 check함으로써 공구파손을 monitoring할 수 있는 한 예를 제시한 것이다.

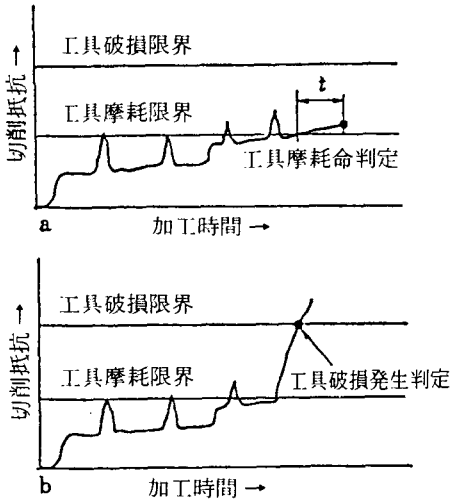


그림.3 切削抵抗檢出에 의한 工具 Monitoring

iii) 고속 회전 chuck

旋削 加工에 있어서 高速回轉시 安全性 확보상 커다란 문제점은 遠心力에 의한 chuck의 공작물 保持力 저하이다. 이를 위한 보상기구로 counter balance 방식이 많이 쓰이고 있다.

3. 정밀연삭 기구

고속 연삭은 i) 가공 정도의 향상, ii)가공능률의 증대, iii)정도와 능률을 동시에 개선 할 수 있는 手段으로 이용되어 왔으며 기본적으로 스톨의 周速을 종래의 2010m/min의 前後에서 5000m/min 이상 까지 증가시켜 加工함으로써 그 목적을 효과적으로 달성할 수 있

다.

1) 미소절입 고속연삭

연삭 가공에 있어서 생성되는 가공면의 최대 거칠기 R_{max} 는 다음과 같이 표시한다.

$$R_{max} = \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{1}{ds} + \frac{1}{dw} \right) \cdot \left(\frac{v_w}{v_s} \cdot a \right)^2 + \frac{1}{8} \cdot b^2/r \cdot \left(\frac{f}{B} \right)^2$$

여기 v_s, ds 와 v_w, dw 는 각각 스톨과 工作物의 速度와 지름이고 a 는 研削 粒子의 평균 간격이다. 따라서 주어진 조건 하에서 연삭 깊이 Δ 와 v_w 를 감소시키고 v_s 를 增加시키면 발생하는 chip이 微細化되어 理論적으로 가공면의 거칠기 R_{max} 값을 무한히 작게 할 수 있다. 그러나 실제에 있어서 연삭 과정이 과도적 절삭에 의해 이루어지고 연삭 입자 개개가 random하게 분포해 있기 때문에 현실적으로 $0.01\mu m$ R_{max} 정도의 초정밀도를 얻을 수 있다.

2) 연삭 가공 조건의 설정

도입한 고속 연삭법이 가공 精度를 향상 할 것 인지, 연삭 능률을 증대 시킬것 인지, 또는 精度와 能率을 동시에 改善 할 것 인지는 v_s 를 증가 하였을때 이에 대응할 v_w 를 어떻게 選定 하느냐에 의해 결정된다.

이는 배출되는 chip의 두께와 길이, 그리고 切刃의 切入角등이 v_w/v_s 의 함수로 표시되기 때문이다.

그림 4.는 高精度, 高能率 연삭을 행할 경우 스톨 속도 v_s 와 공작물 속도 v_w , 그리고 速度比 $k_v (=v_w/v_s)$ 를 어떤 範圍에서 설정할 것 인지를 스톨 절입량을 일정하게 하였을 때 그 값을 표시한 것이다.

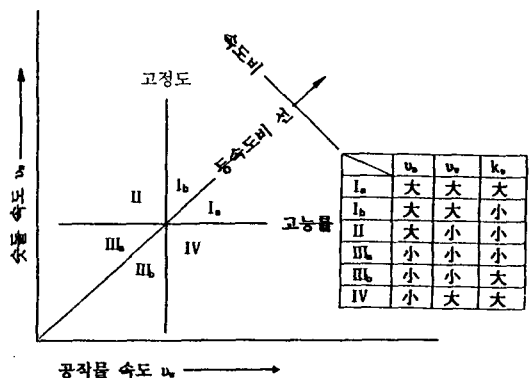


그림.4 고정도 고능률 연삭 조건의 설정 범위

점 P에서 주어지는 연삭속도(v_s, v_w)를 변화 시킬 경우 슷돌과 공작물의 속도 증감에 따라 速度比 k_v 의 변화 범위는 I_a, I_b, II, III_a, III_b, IV의 6개로 分割된다.

먼저 제1상한은 v_s 와 v_w 가 같이 증가하는 범위로 等速度比線에 의해 2개의 범위로 나누어 진다. I_a에서는 k_v 는 증가하고 I_b에서는 k_v 가 감소한다.

제2상한에서는 v_s 는 증가하지만 v_w 가 감소하여 그 결과 k_v 가 감소하게 된다.

제3상한은 v_s 와 v_w 가 함께 감소하는 곳이므로 等速度比線에 따라 2개의 범위로 分割되고, III_a에 있어서 k_v 는 감소, III_b에서 k_v 가 증가한다.

제4상한은 v_s 는 감소되고 v_w 는 증가하여 결국 k_v 는 커진다.

고속 연삭에 있어서는 슷돌의 속도 v_s 는 감소되고 v_w 는 증가하여 결국 k_v 는 커진다.

고속 연삭에 있어서는 슷돌의 속도 v_s 가 增加하여야 하기 때문에 제1상한과 제2상한의 速度가 아니면 안된다.

한편, v_s 를 一定하게 하고 v_w 를 증가 시키면 연삭 能率은 v_w 에 比例하여 증가하지만 v_w 의 증가는 速度比 k_v 의 증가 때문에 chip形狀은 크게 되어 加工負荷의 變化를 가져온다. 반면 v_w 를 一定하게 하고 v_s 增加시키면 연삭능률은 거의 변하지 않지만 속도비 k_v 의 減少로 chip形狀이 작아져 加工面의 精度는 향상된다. 따라서 제품의 高精度의 品質을 保證하기 위한 고속 연삭에 있어서 속도 條件을 제1상한의 I_b내에 設定하여야 한다.

4. 맺는말

超精密 加工을 필요로 하는 공작물의 형상은 해를 거듭 할 수록 大形化 되어가고 요구 되는 精度 또한 높아만 가고 있다.

이와같은 가공 條件에 對應하기 위한 초정밀 加工機의 성능 改善도 끊임없이 계속 되고 있다.

초정밀 가공은 입자 가공에 비해 절삭 가공이 비용과 시간 공히 1/10 - 1/20정도로, 鏡面 가공의 實現이 가능하다.

초정밀 가공에서의 需要가 diamond공구에 의한 대형 mirror의 구성 재료인 Al합금 無酸素鋼 등의 旋削 가공 분야가 대부분을 차지하기 때문에 초정밀 가공기의

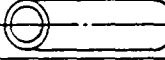
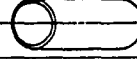



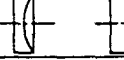



개발 대상은 선반과 milling으로 국한 시킬 수 있다.

超精密 加工機는 現用의 공작기계구조를 根本的으로 개선 하여야 하며 이의 개발은 종합 기술 향상을 위한 과급 효과가 클 것으로 생각 되나 比量産 기종이기 때문에 국가 예산에 의해 개발하여야 할 것이다.

미국에서 초정밀 가공기술의 연구개발이 원자력 energy개발의 관련 thema로 정부 예산에 의해 추진되고 있으며 California 대학 Los Alamos Scientific laboratory에서 개발 하고 있는 Co₂ pulse laser 核融合 실험 장치가 그 한 예이다.

현재 양산 되고 있는 초정밀 절삭 가공 제품의 형상과 이에 活用되고 있는 가공기계를 정리하면 표 1.과 같으며 이 分野에 있어서 미국과 일본이 선두로, 그뒤를 추격하고 있는것이 Europe의 각 maker들이다.

표 1. 超精密 切削 部品과 加工機械

部 品 名	部 品 形 状	加 工 機 械
인쇄 Roller		超精密(円筒)旋盤
감광 Drum		超精密(円筒)旋盤
자기 Disc		超精密正面旋盤
多面鏡		超精密正面旋盤
平面鏡		超精密正面旋盤
구면경·lense		球面加工機 CNC 超精密旋盤
포물면경·lense		CNC 超精密旋盤
포물면경		CNC 超精密旋盤
비구면경·lense		CNC 超精密旋盤

앞으로 尖端技術分野는 nano meter의 정밀도를 갖는 초정밀 光學 部品이 그주대상이 될 것으로 豫想되며 들 光素子의 특징은 거대하고 초정밀한 것이다.

특히 그 형상정도 0.01 μ m이하, 또는 nm程度를 요구하기 때문에 超精密 旋盤의 機械要素중 추축과 안내면의 운동 오차를 억제하고 강성을 가일층 높이는 것이 중요한 과제이다. 또한 table의 위치 결정 精度를 向

上 시킬 수 있는 servo system의 開發도 아울러 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 井川直哉, "超精密 切削" 超精密 加工技術, V-2 章, 砥粒加工 研究會 編(1984)293.
2. N. Ikawa and S. Shimada : Cutting Tool for Ultra-precision Machining, Proc. 3rd ICPE, Kyoto(1977)357.
3. S. R. Patterson : Thermal Management of a Large Diamond Turning machine, precision of 3rd, Int, precision Engineering Seminar, Interlaken, (1985)52.
4. 藤井捻 : 小形ディスク加工用 AHP20×25形 超精密 旋盤, 豊田工機技報, 25, 3(1985)23.
5. 河野嗣男 : 高精度 金屬 反射鏡の製作技術, 計測と制御, 25, 5(1986)25
6. 井上永夫 : CNC研削盤の意義と課題, 機械と工具, 35. 8(1991)14.
7. B. Karaskopf : Diamond Turning, Manufacturing Engineering, (May 1984) 90.
8. [機械と工具]編輯部編 : 生産加工技術最前線, 工業調査會, (1992)156.
9. 先端加工技術研究會編 : 超生産加工技術への批戦, (1992)1-45.