

Cusp 패턴 조정과 미소 볼엔드 밀링을 이용한 3차원 자유곡면의 다듬질

심 총 건*, 양 민 양**

Finishing of Sculptured Surface through Cusp Pattern Control and Micro-ball End Milling

C. G. Sim*, M. Y. Yang**

ABSTRACT

The ball-end milling process is widely used in the die/mold industries, and it is very suitable for the machining of free-form surfaces. However, cusps(or scallops) remaining at the machined part along the cutter paths require another finish process such as polishing or grinding. In this study, a high speed micro ball-end milling method has been suggested for the finish of free-form surfaces. A new tool path which makes the geometrical roughness of workpiece be constant through the machined surface has been developed. In the high speed machining of micro ball-end mulling experiments, the developed tool paths have been successfully applied. And it was concluded that the surface roughness from this finish cuts of micro ball-end milling process was acceptable.

1. 서 론

3차원 자유곡면에는 항공기의 동체, 자동차 외관, 터빈 블레이드 및 일반 가전제품들에 있어서 미관상의 목적 또는 유체기기의 설계형태로서 그 이용이 집중하고 있다. 자유곡면체의 가공에는 주로 볼 엔드밀 공구가 널리 이용되고 있는데, 그 가공방식을 하드웨어적 측면에서 분류하면 copy 밀링방식과 NC 밀링방식으로 나눌 수 있다. 그러나, 최근 동시 3축 제어 CNC 동작기계의 보급과 더불어 CAD/CAM 소프트웨어의 발달에 따라 NC 밀링방식이 많이 이용되고 있다.

엔드밀 공구가 주로 공구의 측면 절삭날에 의하여 가공물의 기하학적 형상을 만드는데 비하여 볼 엔드밀 공구는 바닥 볼 부위의 절삭날에 의하여 가공물의 기하

학적 형상을 만드는 것이 특징이다. 이러한 공구/공작물의 기하학적 특성으로 말미암아 볼 엔드밀 공구에 의한 자유곡면체 가공에 있어서는 cusp 또는 scallop이라는 공구의 이동 흔적이 경로를 가공물 표면에 남게 된다. 따라서, 이의 제거와 더불어 곡면체의 표면조도를 만족하기 위하여 마무리 공정이 필요하다.

일반적으로 자유곡면체 가공의 마무리 다듬질은 주로 직접 사람의 손기술에 의존하여 이루어져 왔는데, 이는 인건비의 상승에 따라 생산성 및 비용면에서 점차 부담이 되고 있다. 이에 따라 최근 로봇을 이용한 연마가공으로 대체하려는 연구(1, 2)도 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 Cusp 패턴 조정의 미소 볼엔드 밀링을 이용한 고속기계가공으로 다듬질에서의 수작업 의존도를 감소시키려는데 목적을 두고 있다. 일반적으로 3차원

* 대우중공업 우주항공연구소

** 한국과학기술원 정밀공학과 부교수

자유곡면체의 가공면에 남는 Cusp의 형태는 공구의 가공경로를 따라 그 크기가 일정하지 않게 되는데, 이는 모든 가공면에서 일정한 표면조도를 요구하는 마무리 공정에 또하나의 비효율적 요소가 되고 있다. 따라서, 기계가공 자체만으로 요구되는 일정한 표면조도를 얻기 위하여는 기계가공 단계에서 일정한 기하학적 조도를 가져다 주는 공구경로의 창생이 무엇보다 필요하다. 본 연구는 크게 자유곡면체에서의 기하학적 조도를 일정히 유지시켜 주는 공구의 가공경로 창생과 얻어진 공구 경로를 따라 미소의 절입량을 가지고 고속의 공구 이송을

실현하는 고속 미소 블랜드 밀링가공을 하는 절삭실험으로 나누어진다. 본 가공경로의 창생은 Ferguson 곡면 모델을 기초로 하고 있으며, 실험은 일반 금형의 소재로 이용되는 강(steel, S45C)을 시편으로 하여 공작기계의 허용 주축속도내에서 고속 가공을 수행하였다.

2. 가공경로의 창생

2.1 가공경로와 기하학적 조도

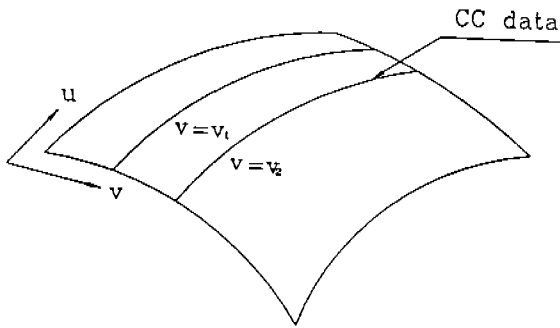
기존의 Iso-parametric Machining과 Cartesian Machining 방법에서 얻어지는 경로⁽³⁾를 비교하면, Ferguson Composite Surface의 한 단위 곡면(Patch)에서 Fig.1에서와 같이 나타난다. 임의 점 4개에 의하여 결정되는 한 단위곡면에서 Iso-parametric Machining은 Iso-parametric Curve를 따라 가면서 얻는 방식이고, Cartesian Machining은 임의로 설정된 절삭 평면(Cutting plane)과의 교선을 따라 가면서 가공정보를 산출하는 방식이다. 일반적으로 Iso-parametric Machining 방법은 수치적 계산이 간단하며 비교적 규칙적인 사각 Patch들로 된 자유곡면의 가공에 적합하다. Cartesian Machining은 수치적 계산이 복잡하지만 patch들이 위상학적으로 불규칙하여 Iso-parametric Machining에서는 바람직하지 못할 경우 쓰게 된다.

일반적으로 공구의 이송으로 생기는 절삭날의 흔적은 공구의 경로간에 생기는 흔적에 비하여 그 값이 매우 미미하다. 여기서는 공구 가공경로들간의 간격에 의해서만 발생되는 cusp의 높이로부터 기하학적 조도를 산출한다. 기존의 연구⁽⁴⁾에서 Fig.2에서와 같이 공구경로 간격방향(pick feed direction)의 곡면 순간 곡률반경이 ρ 이고, 공구경로간의 존재하는 공구중심의 원호거리가 l 일때 다음과 같이 cusp의 기하학적 높이 h 를 구하게 된다.

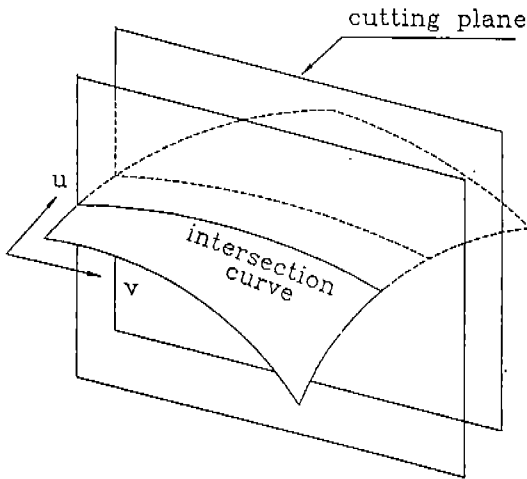
$$h = \frac{l^2}{8R} \left(1 - \frac{R}{R + \rho} \right) \quad (1)$$

즉, 식 (1)의 기하학적 Cusp Height를 분석해보면 같은 공구반경에 대하여 그 크기가 곡면체의 곡률반경 ρ 와 더불어 공구중심간의 원호거리 l 에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

기존의 가공경로 산출법에서 식 (1)에 의한 cusp height 형태를 고찰해보면 먼저, Fig.1에서 보듯이 Iso



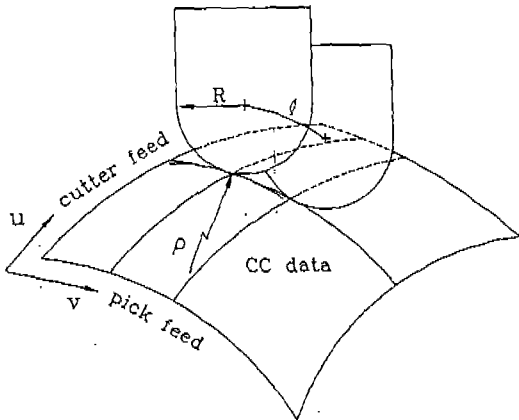
(a) Iso-parametric Machining



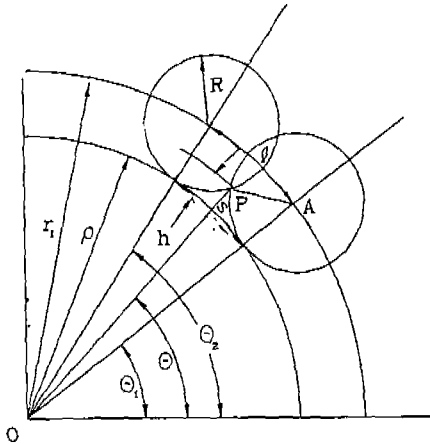
intersection curve
 [= CL data : CL Cartesian
 [= CC data : CC Cartesian

(b) Cartesian Machining

Fig.1 Generation of cutter paths in the two machining methods



(a) instantaneous radius of curvature in the pick feed direction



(b) cusp height

Fig.2 The height of cusp on the surface of Ferguson model

-parametric Machining 방법에서는 patch의 형태에 의존하여 공구경로간의 간격이 결정되므로 pick feed 방향으로 얻어지는 공구중심간의 원호거리 ℓ 의 공구의 경로를 따라 다양하게 변하게 된다. Cartesian Machining 방법 역시 곡면체의 곡률에 관계없이 일정한 간격으로 정해진 절삭평면에 의하여 절단하므로 곡면체위의 공구경로 간격은 곡면의 구배형태에 의존하여 변하게 된다. 이러한 기존의 양방법은 식 (1)에 의하여 그 가공경로를 따라 cusp pattern이 불규칙적으로 가공물에 남게됨을 알 수 있으며, 가공면에서 일정한 기하학적 조도를 가져다 주지 못함을 예측할 수 있다.

2.2 일정한 기하학적 조도를 위한 가공경로의 산출

Ferguson은 3차 다항식 곡면을 여러개 합성하여 전체적으로 부드러운 곡면을 형성하는 방법(5, 6)을 제시하였는데, 점 데이터를 근간으로 이루어지는 곡면의 한 patch를 다음과 같이 매개변수 u, v 에 대하여 전개할 수 있다.

$$R(u, v) = U C Q C^T V^T$$

$$= [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{00} & R_{01} & T_{00} & T_{01} \\ R_{10} & R_{11} & T_{10} & T_{11} \\ S_{00} & S_{01} & X_{00} & X_{01} \\ S_{10} & S_{11} & X_{10} & X_{11} \end{bmatrix}$$

$$[0 < u < 1, 0 < v < 1]$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & -2 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ v \\ v^2 \\ v^3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

R=position vector of point

T=tangential vector in the v direction

S=tangential vector in the u direction

X=twist vector

즉, patch위의 어떤점의 위치벡터도 매개변수 u 및 v 로서 표현할 수 있게 된다.

일단의 한 기준 공구경로가 Fig.3(a)에서와 같이 Iso-parametric이나 Cartesian 방식으로 결정되어지면 이로부터 u 또는 v 의 한 매개변수를 따라 일정한 cusp height를 가지는 공구의 다음 가공경로를 창생하게 된다(7). Fig.3(a)에서와 같이 v 매개변수 진행방향으로 pick feed 방향이 결정된다고 가정할 때, 기준 가공경로부터 매개변수 v 의 각 증분치 Δv_1 을 구하여보자. 식 (1)로부터 두 가공경로상의 위치하는 공구중심간의 원호거리는 다음과 같다.

$$\ell = \sqrt{8Rh \left(1 - \frac{R}{R + \rho}\right)} \quad (3)$$

Fig.3(b)에서보면, 매개변수 v 의 진행방향과 가공경로의 진행방향은 각 α 을 이루게 되는데, 가공경로간의 간격이 크지 않을 경우 양 가공경로에서 같은 곡률의 반경이 적용되어 실제 매개변수 v 진행 곡선상에서의 요구되는 원호거리 ℓ 는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\ell = \sqrt{\frac{8Rh}{\sin^2(\alpha)} \left(1 - \frac{R}{R + \rho_w}\right)}$$

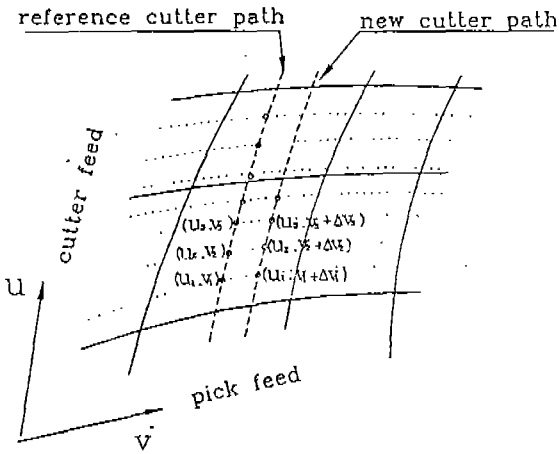
$$\sin(\alpha) = \frac{|R_u \times R_v|}{|R_u| |R_v|} \quad (4)$$

$R_u = u$ 방향 접선벡터,
 $R_v = v$ 방향 접선벡터

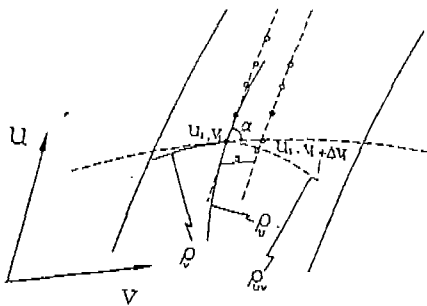
윗식에서 ρ_{uv} 는 최단거리방향으로 이루어지는 곡율의 반경을 나타내며 다음의 곡율 K_{uv} 으로부터 구하여 진다.

$$\rho_{uv} = 1 / K_{uv} \quad (5)$$

여기서 임의의 곡면상의 한점 (u, v)에서의 각 방향 곡율이 K_u 와 K_v 라면, 그 중간의 방향(최단거리방향)으로 존재하는 곡면의 곡율은 보간법을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.



(a) increment of parameter, v



(b) increment of segment length, s

Fig.3 Increment of parameter v for the given cusp height, h

$$K_{uv} = K_u(1-\beta) + K_v\beta, \beta = \sin(\alpha) \quad (6)$$

따라서, 식 (5), (6)으로부터 임의의 공구위치 정보 (u1, v1)에서의 ρ_{uv} 및 $\sin(\alpha)$ 만 얻어지면 주어진 기하학적 조건, h를 만족하는 식 (4)의 공구중심간의 원호거리 l 를 구할 수 있게 된다.

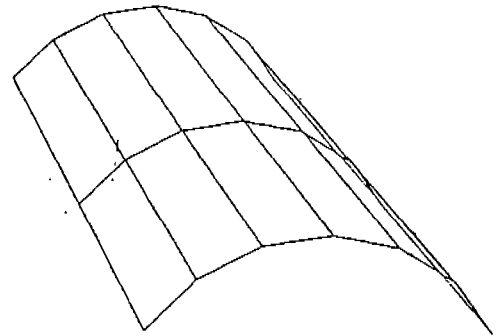
또한, Fig.2(b)를 보면 두 원호 중심각의 사이각 $\theta_2 - \theta_1$ 는 다음과 같은 관계로부터,

$$l = (R + \rho_v)(\theta_2 - \theta_1) \quad (7)$$

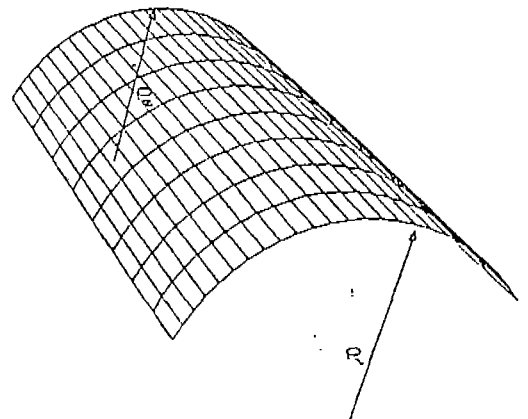
식 (8)과 같이 얻어진다.

$$\theta_2 - \theta_1 = l / (R + \rho_v) \quad (8)$$

따라서, 곡면상의 원호길이가 s는 다음 식 (9)과 같으므로 식 (8)를 이용하여 식 (10)로 표현된다.



(a) the designed patches



(b) Ferguson Surface Model

Fig.4 The designed Ferguson surface in the experiments

$$s = \rho_v (\theta_2 - \theta_1) \quad (9)$$

$$= \frac{\rho_v}{R + \rho_v} \ell \quad (10)$$

결국, 최종 얻고자 하는 증분치 Δv_1 는 다음과 같이 구하게 된다.

$$\Delta v_1 = \frac{s}{|R_v|} \quad (11)$$

$$= \frac{\rho_v}{|R_v|(R + \rho_v)} \sqrt{\frac{8Rh}{\sin^2(\alpha)} \left(1 - \frac{R}{R + \rho_w}\right)} \quad (12)$$

위의 방법으로 기존 가공경로상의 모든 공구위치 정보(u, v)집합에 대하여 각 증분치 Δv 를 구하게 된다. 여기서 얻어진 새로운 가공경로정보는 새로운 곡률의 곡면위를 지나므로 기존가공경로에서와 같은 직선보간공차가 보장되지 못한다. 따라서, 얻어진 공구경로정보를 따라 이루어지는 곡면위의 곡선을 다시 직선보간함으로써 최종적인 가공경로를 창생하게 된다. 이렇게 만들어진 최종 가공경로는 다음 가공경로의 창생을 위한 새로운 기준경로가 되어 전 가공면서 cusp에 의한 기하학적 조도를 일정히 만들게 된다.

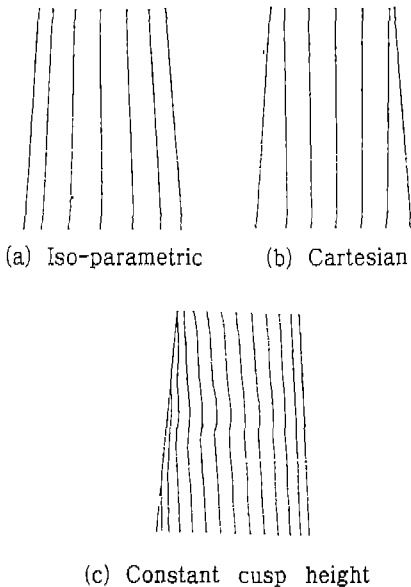
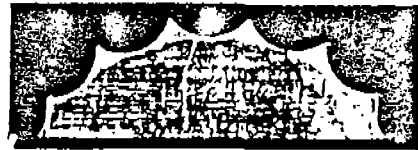


Fig.5 Comparisons of cutter location data

3. 실험 및 고찰

실험에 적용된 자유곡면은 측정 및 관찰의 용이성을 위하여 Fig.4에서와 같이 두개의 크고 작은 원호를 보간하여 설계되었다. Fig.5는 본 연구에서 설계된 자유곡면의 가공을 위한 공구경로 산출에 있어서 기존의 Iso-parametric Machining과 Cartesian Machining 방법들과 비교하여 본 연구에서 제시된 방법에 의한 공구경로를 보여주고 있다. Fig.6은 Iso-parametric Machining으로 가공한 결과 양 원호의 단면에서 관찰된 cusp의 형태를 보여주고 있다. 또한, Fig.7은 Cartesian Machining으로 가공한 결과 양 원호의 단면에서 관찰된 cusp의 형태를 보여주고 있다. 반면, Fig.8는 cusp의 기하학적 조도 h를 860 μ m로 조정하였을 경우 얻어진 결과를 보여주고 있는데, 예상하였듯이



(a) section at the large circle



(b) section at the small circle

Fig.6 Cusp in Iso-parametric machining



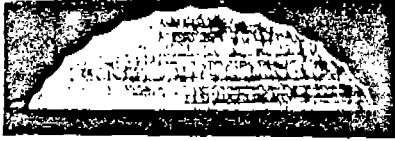
(a) section at the large arc



(b) section at the small arc

Fig.7 Cusp in Cartesian machining

기존의 방법을 이용할 경우 원호부위와 단면의 위치에 따라 cusp 형태가 일정하지 않으나 본 제시된 방법의 가공경로르 적용할 경우 주어진 csup의 기하학적 조도

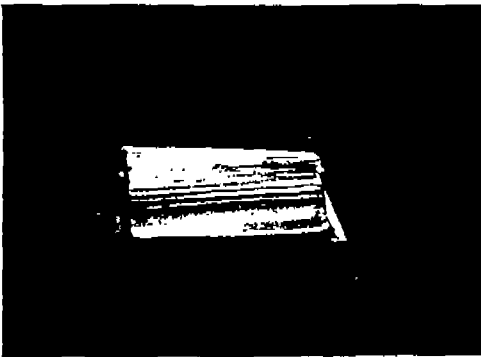


(a) section at the large arc

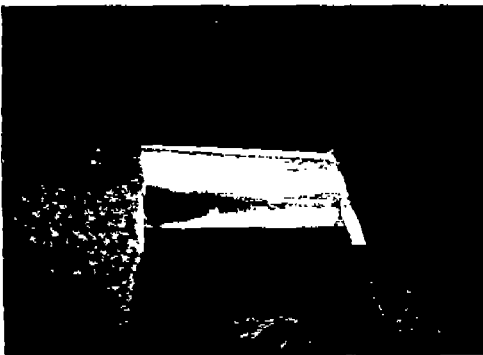


(b) section at the small arc

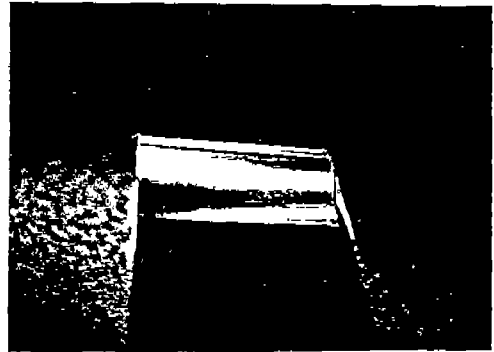
Fig.8 Cusp in the suggested machining method



(a) rough machined workpiece by HSS cutter ($h=56\mu\text{m}$)



(b) micro-ball end milled workpiece by TiC cutter ($h=14\mu\text{m}$)



(c) micro-ball end milled workpiece by TiC cutter ($h=4\mu\text{m}$)

Fig.9 The rough and finished workpieces

h에 의하여 그 형태가 전 곡면위에서 일정히 조정되고 있음을 볼 수 있다.

Fig.9(a)은 황삭 가공한 후의 가공면(기하학적 조도 h , $56\mu\text{m}$)를 보여주고 있는데, 실험은 시편-S45C 강/공구-고속도강(HSS, $\phi 20\text{mm}$)을 사용하여 제시된 가공 경로 산출법에 의하여 3축 동시 제어 밀링 머신센터에서 수행하였다. 일반적으로 고속도강 공구는 충격에 강하고 초경에 비하여 저가의 매력으로 밀링공정에서와 같은 단절절삭에 많이 이용되어 왔다. 그러나, 고속도강의 절삭속도는 저속의 영역이고 가공시간이 길다는 것이 단점이다. 따라서, 저속의 고속도강으로 다듬질 공정을 수행할 경우 가공시간은 물론 가공면의 거칠기가 좋지 못하다. 비교적 고속의 절삭속도를 가지는 초경공구의 경우 절삭시간을 줄일 수 있으나, 충격에 약하여서 밀링 공정과 같은 단속절삭 공정에서의 이용은 제한적일 수 밖에 없다.

본 연구는 비교적 충격이 작은 미소 블랜드 밀링을 수행함으로써 초경공구 특성을 살리고자 한다(실험에 이용된 공구, 외날 삼입형 Tic, $\phi 20\text{mm}$). 실험은 위에서 얻어진 황삭가공된 시편에 대하여 절입깊이를 $50\mu\text{m}$ 로 제한하였으며 곡면의 기하학적 조도 $h=14$, $4\mu\text{m}$ 에 대하여 공구 경로를 각각 창생하여 미소 블랜드밀링을 수행하였다. 이때 공구의 절삭속도는 100 m/min 이상이 되도록 하였다. Fig.9(b) 및 Fig.9(c)은 각각 본 실험에서 얻어진 곡면의 다듬질 가공면을 보여 주고 있다. Fig.10은 미소 블랜드 밀링 절삭중의 시편을 보여주고 있으며, 그때 생성된 칩에 대한 사진이다. 미소블 엔드 밀링에 의한 실제 절삭이 일어나고 있음을 보여주고 있

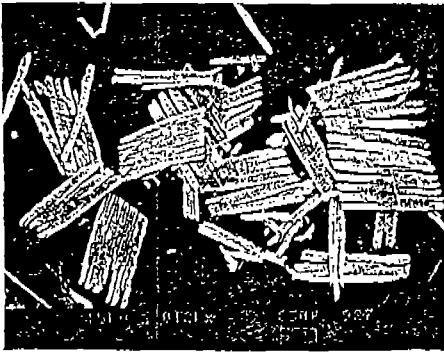


Fig.10 The chip shape in these micro-ball end milling process

다. 일반적으로 가공면의 표면조도는 공구/공작물의 기하학적 조도에 여러 요소의 영향을 받을 수 있는데, 외적 용소를 크게 보면 금속 접착(metal adhesion)과 공구 절삭날에 발생하는 진동으로 볼 수 있다(4). 금속 접착 현상은 저속가공에서 발생하는 빌드 업 에지(build-up edge)에 의하는 것으로 본 실험조건외의 고속가공에서는 표면조도에 영향을 주고 있지 않는 것으로 관찰되었다. 본 미소 볼엔드 밀링 실험에서 얻어진 결과를 고찰하여 보면 4 μ m까지의 표면조도를 충분히 만족시키고 있음을 알 수 있다. 특히, 볼엔드밀 공구의 특성상 끝 부위(직경=0)에서는 절삭속도가 영에 접근됨으로써 나타날 수 있는 절삭 특이성은 표면조도에 크게 영향을 미치고 있지 않는데 이는 미소 절삭이 이루어짐에 따른 결과로 추측된다.

5. 결 론

3차원 자유곡면의 볼엔드 밀링 공정후 다듬질 공정에서의 수작업 의존을 줄이기 위하여 고속의 미소 볼엔드 밀링을 연구한 결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 자유곡면체 가공면에서 일정한 기하학적 조도를 가

져다 줄 수 있는 새로운 공구경로 산출법을 제시하였으며 이는 전 가공면에서 일정한 표면조도를 요구하는 다듬질 공정에 유용한 수단이 되었다.

(2) 초정공구를 이용한 고속의 미소 볼엔드 밀링을 수행함으로써 기계가공에서의 가공면 조도를 크게 개선시킬 수 있었다.

특히, 본 cusp 패턴 조정과 미소 볼엔드 밀링을 이용한 다듬질 공정은 기존의 로봇트를 이용한 연마 마무리 공정에서와 같이 새로운 시설이나 공정을 추가할 필요가 없으므로 그 실질적 효용성이 기대된다.

참고문헌

1. 정성중, 국금환 및 최기봉, "자유곡면의 연마공정을 위한 오프라인 로봇작업 프로그래밍 시스템의 개발", 한국정밀공학회지, 제8권, 제4호, pp.84~94, 1991
2. Motoshi Suzuki, Shumpei Ichiyasu, etc, "Development of Die-finishing Robotics System Controlled by CAD/CAM System", JSPE-58-08, pp.43~48, 1992
3. 최병규, NC 절삭가공과 CAM 시스템, 청문각, 1989
4. Shinichi Miyazawa and Koji Takada, "Micro Milling of Three Dimensional Surface", JSPE-47-2, pp.234~239, 1981
5. I. D. Faux, M. J. Pratt, Computational Geometry for Design and Manufacture, John Wiley & Sons, 1981
6. J. C. Ferguson, "Multivariate Curve Interpolation", J. of ACM, Vol. 11, No. 2, pp.221~228, 1964
7. 심충건, 양민양, 자유곡면 볼엔드밀링 공정에서의 cusp pattern 조정, '92 추계정밀공학 학술대회, 연세대학교