

자유곡면 금형가공면의 급속자력폴리싱 시스템에 관한 연구

(Study on the Rapid Magnetic Polishing System of Free-Surface Die/Mold)

최 민석*(KAIST), 김 정두(KAIST)

NOMENCLATURE

- H : 자기장의 세기(magnetic field strength)
- l : 자기회로상의 길이(length in the magnetic circuit)
- x : 가공공극의 길이(working-gap length)
- B : 자속밀도(magnetic flux density)
- B_r : 영구자석의 잔류자속밀도(residual magnetic flux density)
- μ : 투자율(magnetic permeability)
- μ_r : 영구자석의 상대투자율(relative magnetic permeability of magnet)
- φ : 자속(magnetic flux)
- A : 단면적(cross sectional area)
- F_g : 가공공극에서의 자력(magnetic force in the working-gap)
- m, w, g : 자석, 공작물, 공극을 나타내는 첨자 (indicate magnet, workpiece and working-gap, respectively)

1. 서론

곡면의 폴리싱은 형상 및 공정 자체의 복잡성 때문에 아직까지 기계화 및 자동화가 잘 이루어지지 않고 있으나 정밀 기계부품 및 금형 관련 산업현장에서 매우 중요한 공정이기 때문에 곡면 폴리싱 공정의 기계화 또는 자동화 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 자석의 힘을 이용하는 자력폴리싱(magnetic polishing) 방법을 이용한 곡면폴리싱 공정에 대한 연구가 최근에 진행됨으로써 곡면폴리싱 공정의 기계화 및 자동화의 가능성이 매우 높아지고 있다.

평면의 자력폴리싱[1]은 전자석 및 자기연마입자(magnetic abrasive)를 이용하여 자성체 또는 얇은 비자성체 공작물 표면을 고능률로 정밀다듬질하여 자력폴리싱의 다듬질 성능을 확인하였고 이 외에도 원통외면, 튜브내면등의 자력폴리싱에 관한 많은 연구결과들이 십

수년 동안 발표되어 오고 있다. 최근에 와서는 자력폴리싱법을 자유곡면 폴리싱에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있는데 로보트 장착용 자력폴리싱 공구[2] 및 같은 원리를 이용한 유성치차식 자력폴리싱 공구의 연구[3]등이 발표된 바 있다. 또한 3차원 금형의 자동 폴리싱에 관한 연구로써 CNC 밀링을 이용한 자력폴리싱에 관한 연구보고[4,5]도 있다.

본 연구에서는 능률적이면서 정밀한 곡면 폴리싱을 위하여 유연성 있는 두 가지 형태의 자력폴리싱 공구를 제작·해석하고 이를 이용한 곡면의 2단계 자력폴리싱 방법에 대하여 실험을 수행하고 고찰하였다.

2. 곡면의 2단계 자력폴리싱

Fig.1은 본 연구에서 다루고 있는 두 가지 형태의 자력폴리싱 공구의 개략도를 나타낸다. (a)는 초기 거칠은 표면의 폴리싱용으로 연삭지석과 공작물의 접촉이 세점에서 이루어지도록 제작한 지석휠형(abrasive wheel type) 자력폴리싱 공구를 나타낸다. (b)는 자기연마입자를 가공공극(working-gap)에 충전시키고 이들이 형성하는 자기브러쉬(magnetic brush)를 사용하여 표면을 폴리싱하는 자기브러쉬형 자력폴리싱 공구를 나타낸다. 자기브러쉬는 공작물 표면에 수직인 방향의 압력을 발생시키고 동시에 수평방향의 강성을 갖고 있으나 각 입자간 상대위치에 대한 유연성이 존재하기 때문에 강제 절삭작용보다는 일정 압력에 의한 다듬질 작용이 지배적으로 일어나고 따라서 부가적인 가공 스크래치를 남기지 않고 표면을 정밀하게 다듬질가공할 수 있다. 이 때문에 자기브러쉬형 공구는 지석휠형 공구를 이용한 1단계 자력폴리싱 이후에 최종의 다듬질을 위하여 사용하는 것이 바람직하다. 2단계 자력폴리싱은 이와같이 거칠은 표면에 대한 폴리싱의 능률성과 정밀성을 모두 만족시킬 수 있도록 두 단계로 자력폴리싱을 수행하는 방법을 의미한다.

자력폴리싱 공구는 그림에 나타난 바와 같이 가공압

력이 영구자석으로부터 발생되기 때문에 별도의 압력발생장치가 필요치 않고 또한 이 힘에 의해 공구의 중심축은 곡면 공작물 표면에 항상 수직한 자세를 취하기 때문에 복잡한 공구제작의 제어가 필요없는 자동폴리싱이 가능하다. 이러한 수평과 수직방향의 곡면 추종을 위한 공구의 유연성은 유니버설조인트와 직선운동 스플라인

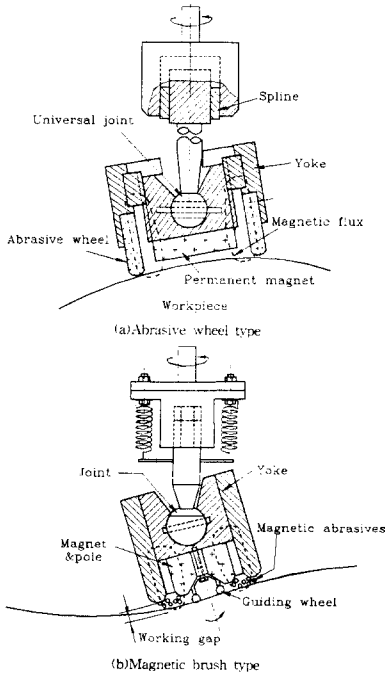


Fig.1 Schematic diagram of the 3-D magnetic polishing tools

인을 통해 이루어진다.

현재 자유곡면의 복잡한 형상을 갖는 금형등을 제작할 경우 최종 다듬질 가공을 대부분 수작업에 의존하고 있으나 CNC 밀링가공 후에 사용한 NC데이터를 그대로 이용하여 2단계 또는 다단계 자력폴리싱을 수행하면 경면 자동폴리싱을 비교적 손쉽게 수행할 수 있다.

3. 자력폴리싱 공구의 가공력 해석

Fig.2는 이와같은 자력폴리싱 공구의 모델을 나타내고 있다. 자기적인 해석을 위하여 (a)와 같이 단순화시켰으며 (b)는 등가 자기회로(magnetic circuit)를 나타낸다. 폐회로에 대한 전류순환방정식으로부터 다음과 같은

식을 얻는다.[6]

$$\oint H \cdot dl = H_m l_m + H_s l_s + H_w l_w + H_{g1} l_{g1} + H_{g2} l_{g2} = 0 \quad [A] \quad (1)$$

요오크 및 공작물은 강자성체라고 가정하여 자기저항을 무시하도록 한다. 영구자석을 통과해서 흐르는 자속밀도 B_m 은 잔류자속밀도가 B_r 일 때 다음과 같다.

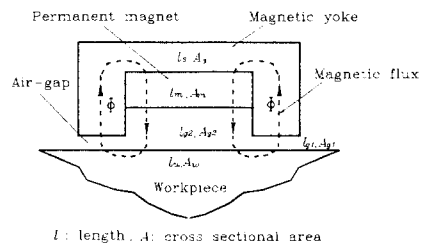
$$B_m = B_r + \mu_r \mu_0 H_m \quad [T] \quad (2)$$

자속의 연속성(continuity of magnetic flux)에 의하여 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Phi = B_m A_m = B_{g1} A_{g1} = B_{g2} A_{g2} \quad [Wb] \quad (3)$$

요오크 및 공작물의 자기저항을 무시하고 식(1), 식(2) 및 식(3)에서 공극에서의 자속밀도 B_{g1} 및 B_{g2} 를 구하면 다음과 같다..

$$B_{g1} = \frac{B_r}{\left(\frac{A_{g1}}{A_m} + \mu_r \frac{l_{g1}}{l_m} + \mu_r \frac{A_{g1}}{A_{g2}} \frac{l_{g2}}{l_m} \right)} \quad [T] \quad (4)$$



l: length, A: cross sectional area

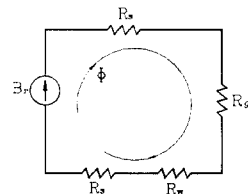


Fig.2 Simplified model of the magnetic polishing tool and equivalent magnetic circuit

$$B_{gl} = \frac{B_r}{\left(\frac{A_{gl}}{A_m} + \mu_r \frac{l_{gl}}{l_m} + \mu_r \frac{A_{gl}}{A_{gl}} \frac{l_{gl}}{l_m}\right)} \quad [T] \quad (5)$$

Table1은 계산에 사용된 수치들을 나타낸다. 이 수치들을 위의 식에 대입하여 공극에서의 자속밀도를 구하면 다음과 같다.

$$B_{gl} = \frac{1.2}{1.586 + 0.428x} \quad [T] \quad (6)$$

$$B_{gl} = \frac{1.2}{1.525 + 0.412x} \quad [T] \quad (7)$$

대부분의 자기에너지(magnetic energy)는 자기저항이 큰 가공공극에 집중하게 되고 이것을 미분하면 다음과 같은 공극에서의 자력(magnetic force)을 얻게 된다.

$$F_g = F_{gl} + F_{gl} = \frac{B_{gl}^2}{2\mu_0} A_{gl} + \frac{B_{gl}^2}{2\mu_0} A_{gl} \\ = 130B_{gl}^2 + 125B_{gl}^2 \quad [N] \quad (8)$$

Table 1 Numerical values used in the calculation

Strength of permanent magnet	$B_r = 1.2 \text{ T (Nd-Fe-B)}$
Relative permeability of permanent magnet	$\mu_r = 1.05 \text{ (Nd-Fe-B)}$
Magnetic permeability of air-gap	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{H}$
Area of air-gap 1	$A_{g1} = 326.7 \text{ mm}^2$
Area of air-gap 2	$A_{g2} = 314.2 \text{ mm}^2$
Area of permanent magnet	$A_m = A_{g1}$
Length of air-gap 1	$l_{g1} = x(=0 \sim 10) \text{ mm}$
Length of air-gap 2	$l_{g2} = x - 2.5 \text{ mm}$
Length of permanent magnet	$l_m = 5 \text{ mm}$

Fig.3은 가공공극의 길이에 따른 자속밀도에 대한 계산값과 측정값을 나타낸다. 그림에서 계산값은 자력폴리싱 공구가 가공상태에 있을 때, 즉 공작물과 함께 자기회로를 이루고 있을때의 값을 나타내며 측정값은 공작물이 있을 때와 공작물이 없고 공구만 있을 때의 자속밀도 값을 나타내는데 계산값과 잘 일치하고 있고 가공공극이 증가함에 따라 자속밀도는 비선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 또한 가공중에는, 즉 공구와 공작물이 하나의 폐회로를 이루고 있을 때는 공구만 있는 경우의 자속밀도보다 큰 값을 갖는데 그 이유는 공작물의 자기저항이 공구의 자기저항보다 작아서 회로 전체에 대한 자기저항이 감소하였기 때문이다.

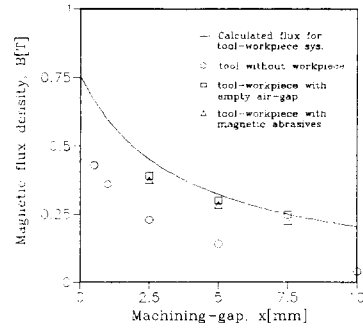


Fig.3 Magnetic flux density of the 3-D magnetic polishing tool with respect to machining-gap

Fig.4는 가공공극 및 자속밀도에 따라 공극에 발생하는 힘의 크기를 나타내고 있다. 이것은 지석휠형 자력연마 공구에 대한 해석 및 측정 결과이며 실제 폴리싱 가공을 일으키는 폴리싱력으로 작용한다. 발생하는 힘은 공극의 증가에 반비례하여 감소하고 자속이 증가함에 따라 비선형적인 증가경향을 보이고 있다. 이와같은 경향은 자력의 측정결과에서도 나타나며 그 크기는 계산치의 약 1/2 수준으로 차이가 나는데 이는 자기회로 모델이 매우 단순화 되었고 계산의 편의상 자속의 손실을 고려하지 않았기 때문이다. 폴리싱압력은 이와같이 구할 수 있는데 실제 가공실험에서 사용한 조건에서 가공력은 16N, 가공압력은 133kPa이다.

이와같은 등가자기회로의 해석을 통하여 자력폴리싱의 가공공극에서의 자속밀도 및 가공압력 예측이 가능하고 이를 이용하여 원하는 가공압력이 발생되도록 공구를 설계, 제작할 수 있다.

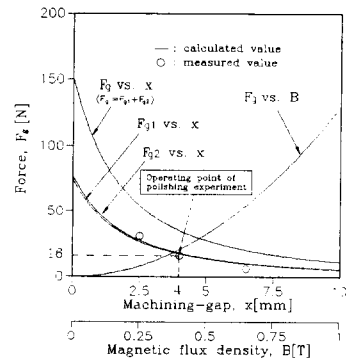


Fig.4 Polishing force of 3-D magnetic polishing tool with respect to gap and magnetic flux density

4. 폴리싱 실험

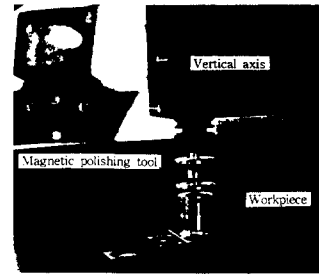
4.1 실험장치 및 방법

Fig.5는 실험장치 및 곡면용 3-D자력폴리싱공구의 사진이다. 제작한 3차원 자력폴리싱 공구를 소형 3축 CNC밀링기에 공구대신 장착하여 폴리싱 실험을 실시하였다. 공작물의 표면형상은 평면 및 곡면이 가능하고 사용한 공작물의 크기는 평면의 경우 $80 \times 40(\text{mm}^2)$, 곡면 공작물의 경우 $150 \times 55(\text{mm}^2)$ 의 크기를 갖는다. 반면에 자력폴리싱공구의 직경은 30mm이므로 공작물 전면을 폴리싱하기 위해 CNC밀링기의 테이블을 이동시켰다. 공구의 유연성에 의한 곡면 추종성을 테스트하기 위해 경사면(inclined surface)과 사인파면(sine wave surface)에 대해 복잡한 공구궤적제어를 적용하지 않고 폴리싱 작업을 수행하였다. 즉, 자력폴리싱공구를 수평 방향으로만 이동시키면서 폴리싱 실험을 수행하였다. Table 2는 가공조건을 나타낸다.

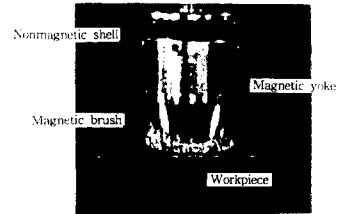
지석휠형 공구와 자기브러쉬형 공구의 폴리싱 특성 및 가공성능 파악을 위해 평면 공작물에 대한 실험을 하였고 절삭유의 영향을 알아보았다. 두번째 실험으로 경사면과 사인파면에 대해 두 가지 형태의 자력연마공구를 단계적으로 이용한 2단계 자력폴리싱 실험을 실시하였다. 영구자석은 네오디뮴(Nd-Fe-B)영구자석을 사용하였고 가공압력은 지석휠형 공구의 경우 133kPa이다. 기타 실험장치에 대한 사양은 Table 1에 나타난 바와 같다. 각 실험에 대해 가공전·후에 표면거칠기를 측정하였으며 측정부위에 따라 세 곳을 측정한 후 평균을 취하였다.

Table 2 Conditions for polishing experiment

working clearance	2 mm (equivalent to gap l)
working pressure	133 kPa (abrasive wheel type)
spindle rotating speed	700 r.p.m. for flat surface 500 r.p.m. for curved surface
table feed rate	40mm/min for flat surface 30mm/min for curved surface
oil type	kerosene
abrasive wheel	GC #400, $\phi 30$
magnetic abrasive	Fe #100 + Al2O3 #4000
workpiece	SM45C, $80 \times 40 \text{ mm}^2$ (for flat surface) mild steel, $150 \times 55 \text{ mm}^2$ (for curved surface)



(a) Experimental setup



(b) Magnetic polishing tool

Fig.5 Experimental setup and the view of the magnetic polishing tool

4.2 실험결과 및 고찰

Fig.6은 두 가지 형태의 자력폴리싱 공구를 사용하여 폴리싱 성능을 보기 위한 실험의 결과이다. GC #400의 지석휠형 자력폴리싱공구를 사용한 경우에는 $R_a 0.7 \mu\text{m}$ 의 초기공작물을 6분동안 가공한 이후에는 표면거칠기가 더 이상 향상되지 않았으며 그 때의 표면거칠기 값은 습식(wet polishing)의 경우 $R_a 0.25 \mu\text{m}$, 건식(dry polishing)의 경우 $R_a 0.245 \mu\text{m}$ 이다. 따라서 표면거칠기 향상에 미치는 절삭유의 영향은 거의 무시할 정도로 작았다. 자기브러쉬형 자력폴리싱공구를 사용하여 폴리싱한 경우는 가공시간이 지남에 따라 꾸준한 표면거칠기의 향상이 이루어졌으며 절삭유를 사용하지 않은 경우에 40분 후의 표면거칠기는 $R_a 0.08 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 절삭유를 사용한 경우에는 초기 가공시간 20분까지는 절삭유를 사용하지 않은 경우보다 능률적인 가공이 이루어졌으나 20분 이후에는 표면거칠기의 향상이 느려짐을 알 수 있다. 사진은 가공전과 40분 폴리싱한 후의 평면 재료의 반사면을 나타낸다. 결과적으로 능률적인 폴리싱 가공을 위해서는 초기 6분까지는 지석휠형 공구를 사용하여 초기 거칠은 면의 폴리싱 능률을 높이고 그 이후에는 자기브러쉬형 공구를 사용하여 최종다듬질면을 얻는 2단계 자력폴리싱을 수행하는 것이 바람직하다.

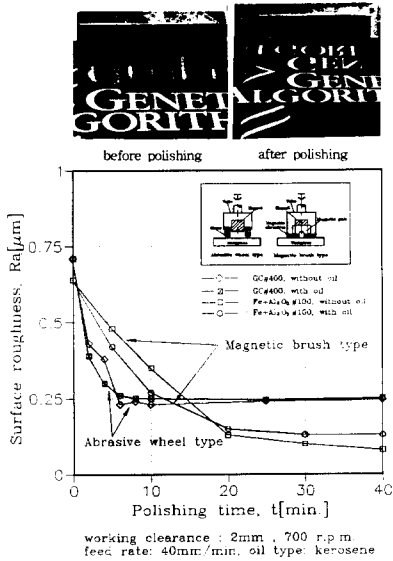


Fig.6 Finishing performance of the 3-D magnetic polishing tools for two types

Fig.7은 2단계 자력폴리싱 실험결과를 나타낸다. 공작물은 경사면을 갖는 것과 사인파면을 갖는 것을 사용하였다. 표면거칠기 측정 위치는 그림에 나타난 바와 같이 경사면(측정면a)과 두개의 경사면이 만나는 부분(측정면b) 그리고 사인파면의 정상부분(측정면c)을 택하였다. 공작물은 연마페이퍼(#220)를 사용하여 무방향 전가공을 실시한 결과로 $R_a 0.64 \mu\text{m}$ 의 초기 표면거칠기 값을 갖는 것을 사용하였다. 이에 대해 처음 6분간은 지석휠형 공구를 사용하였고 그후 30분간은 자기브러쉬형 공구를 사용하여 폴리싱 실험을 수행하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 경사면(측정면a)의 표면거칠기가 가장 좋지 않고 경사면이 만나는 부분(측정면b)의 경우에는 경사면보다는 표면거칠기가 양호하나 사인파면의 정상부분(측정면c)보다 좋지 않음을 알 수 있다. 이것은 경사면을 가공할 경우 가공압력이 크고 공구의 회전 중심이 고정되어 요동이 없는 회전상태에서 폴리싱이 이루어지기 때문에 지석휠형 공구의 사용시 지립에 의한 깊은 표면 스크래치(scratch)가 발생하고 이와같은 스크래치가 두번째 단계인 자기브러쉬형 공구에 의해 제거되지 않고 남아있기 때문이다. 또한 실험결과 곡률이 있는 정상부분에 대해서는 측정면b보다 곡률반경이 큰 측정면c의 경우에 좋은 표면거칠기를 얻었으나 곡률반경이 무한히 커짐에 따라 앞에서와 같은 효과가 나타나기 때문에 곡률에 따라 최적의 가공압력이 존재할 가능성

이 크다. Fig.8은 이와같이 폴리싱된 곡면의 반사면 사진을 나타낸다. 사인파면의 정상부위에서의 표면거칠기는 $R_a 0.09 \mu\text{m}$ 로 측정되었다.

실험에서 복잡한 공구궤적 제어 없이 공구자체의 유연성만으로 완전한 곡면의 폴리싱을 성공적으로 수행함에 따라 CNC머신등에 자력폴리싱공구를 장착하여 형상가공 후에 연속적인 공정으로 자동폴리싱을 수행할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 표면의 요구 정밀도에 따라 더욱 미세한 지석입자를 사용하고 2단계 또는 다단계 폴리싱법을 적용함으로써 경면 폴리싱이 가능하다. 이와 같은 방법을 적용한다면 현재 수작업에 의존하고 있는 자유곡면 금형등의 경면폴리싱 및 공정의 기계화 또는 자동화를 손쉽게 이룰 수 있으리라 사료된다.

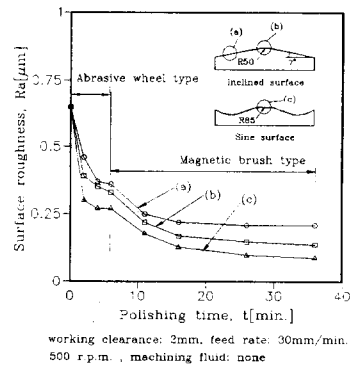


Fig.7 Polishing of the curved surfaces by two stage polishing experiments

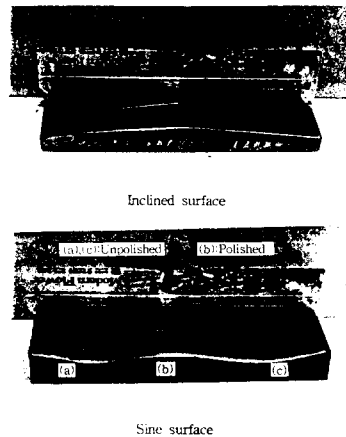


Fig.8 Curved surfaces after magnetic polishing (for working cond., see Fig.7)

5. 결 론

제작한 두 가지 형태의 자력폴리싱 공구 및 소형 CNC밀링기를 이용하여 곡면에 대한 2단계 자력폴리싱을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 등가자기회로를 이용한 계산에 의해 폴리싱 가공압력의 예측이 가능하고 이를 이용하여 원하는 가공압력을 나타내는 자력폴리싱공구를 설계,제작할 수 있다.
- (2) 개발된 두 가지 형태의 자력폴리싱 공구를 사용하면 표면이 거칠은 초기 공작물을 2단계 자력폴리싱에 의해 능률적으로 폴리싱 할 수 있다.
- (3) 실험결과 초기 표면거칠기 R_a 0.64 μ m 정도의 곡면 (150x55mm²)을 36분 동안 2단계 폴리싱에 의해 R_a 0.09 μ m 수준으로 향상시킬 수 있었다.
- (4) 자력폴리싱 공구에 미세한 지석을 사용하고 자기브러쉬형 폴리싱공구를 사용함으로써 2단계 자력폴리싱법에 의한 자유곡면의 경면가공 가능성이 높다.
- (5) 자력폴리싱 공구를 사용하면 복잡한 공구궤적의 정확한 제어가 필요하지 않고 대략적인 위치결정만으로 곡면의 폴리싱 가공이 가능하기 때문에 자유곡면을 갖는 금형등의 폴리싱공정 자동화 가능성이 매우 높다.

참고문헌

- [1] T.Shinmura, F.H.Wang and T.Aizawa, " Study on a New Finishing Process of Fine Ceramics by Magnetic Abrasive Machining - On the Improving Effects of Finishing Efficiency Obtained by Mixing Diamond Magnetic Abrasives with Ferromagnetic Particles- ", Int. J. of JSPE, Vol.28, No.2, pp.99-104, 1994.
- [2] M.Kunieda, T.Nakagawa and T. Higuchi, " Robot-Polishing of Curved Surface with Magnetically Pressed Polishing Tool", JSPE, Vol.54, No.1, pp.125-131, 1988.
- [3] M.Kunieda, T.Nakagawa and M. Yokotsuka, " Development of a Magneto-Pressed Polishing Tool of Planetary Motion type", JSPE, Vol.54, No.2, pp.115-120, 1988.
- [4] 安齋正博, 須藤 亨, 眞崎浩一, 大龍久規, 中川威雄, " 磁氣を利用した金型曲面の表面仕上", JSPE, Vol.57, No.12, pp.129-132, 1991.
- [5] 安齋正博, 中川 威雄, " 磁石を利用した金型磨き自動化の試み", 機械と工具, No.3, pp.41-46, 1992.
- [6] G.R.Slemon, *Electric Machines and Drives*, Addison-Wesley, U.S.A, 1992.