

## 회전자력연마시스템에 의한 곡관내면의 경면가공에 관한 연구

### Internal Mirror-like Polishing of Curved Tubes

### Using Rotating Magnetic Field

최 민석\*, 김 정두 (KAIST)

#### 1. 서 론

곡관 형상의 진공챔버(vacuum tube), 위생튜브(sanitary tube), 도파관(wave guide)등은 고품위의 내면을 요구하고 있으며 현재의 수작업에 의존하고 있는 내면다듬질 작업의 기계화가 필요시되고 있다. 기존의 기계적 연마법으로는 이와같이 구부러진 곡관의 내면다듬질이 어려우나 최근에 개발된 회전자력연마법(polishing technique using rotating magnetic field)[1,2]은 공작물을 회전시키지 않기 때문에 곡관의 내면다듬질이 가능하다.

본 연구에서는 비자성체 곡관 내면의 정밀다듬질을 위한 컴퓨터구동 회전자력연마가공시스템을 개발하였다. 이를 위한 자극(magnetic pole)의 설계방법 및 기본 구동방법, 기본 특성등을 알아보고 적합한 구동모드를 결정하기 위해 유한요소법을 이용한 자력선의 분포를 알아보았다. 또한 위생튜브(SUS316)의 내면을 회전자력연마시스템을 이용하여 가공함으로써 그 성능을 확인하였다.

#### 2. 회전자력연마가공시스템의 제작

Fig.1은 회전자기장을 이용한 비자성체 튜브내면의 가공원리를 나타낸다. 전자석코일에 전류를 흐르게 하면 자극은 자화되고, 발생한 자속은 자극, 원형 요오크, 공극 및 다듬질 공구로 구성되는 자기회로(magnetic circuit)상을 흐르

게 된다. 이 때 공구와 자극사이의 공극에는 자력이 작용하게 되며 공구는 튜브내면쪽으로 이끌리게 된다. 공극에 자기연마재(magnetic abrasive)를 공급하면 이들은 자기장에 의해 자기브러쉬(magnetic brush)를 형성하고 튜브내면에 가공압력을 발생시키며 공구와 튜브사이에 상대운동에 의한 튜브내면의 가공이 이루어진다.

## 2.1 자속밀도 및 가공력의 계산

Fig.2는 회전자력연마시스템의 자극에서 발생하는 자속밀도를 근사적으로 계산하기 위한 자극시스템의 개략도 및 등가자기회로를 나타낸다. 폐회로의 전류순환방정식으로부터 mmf(magnetomotive force)[3,4]  $\mathcal{F}$ 는

$$\mathcal{F} = \oint H \cdot dl = Ni \quad [A] \quad (1)$$

로써 자속발생의 원인이되고 이 때 자속의 흐름을 방해하는 각 구성성분의 자기저항(magnetic reluctance)  $R_i$ 은

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_i A_i} \quad (2)$$

와 같다. Fig.2의 자기회로 전체에 대한 자기저항은 다음과 같다.

$$R = R_y + 2R_p + 2R_g + R_i \approx 2R_g \quad (3)$$

여기서 요오크, 자극 및 다듬질공구는 강자성체이므로 공극에 비해 자기저항이 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 계산에서 제외하도록 한다. 또한 모든 자속손실을 무시하면 발생하는 자속은  $\phi = \mathcal{F}/R$ 이기 때문에 공극의 자속밀도  $B_g$ 는 결과적으로 다음과 같이 계산된다.

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \approx \frac{\mathcal{F}}{2A_g R_g} = \frac{\mu_0 Ni}{2l_g} \quad [T] \quad (4)$$

공극에 저장되는 자기에너지  $E_g$ 는 다음과 같다.

$$E_g = \frac{B_g^2}{2\mu_0} V_g \quad [ J ] \quad (5)$$

이 때 공극에 발생하는 자력은 다음과 같다.

$$F_g = \frac{\partial E_g}{\partial l_g} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} A_g \quad [ N ] \quad (6)$$

제작한 전자석의 코일권수  $N$ 은 1040회, 구동전류  $i$ 는 2A, 공극길이  $l_g$ 는 3.5mm, 공극부의 단면적  $A_g$ 는  $20 \times 10 \text{mm}^2$ 이라 하고 공극의 투자율  $\mu_0$ 는  $4\pi \times 10^{-7}$ 을 대입하면 자속밀도 및 가공력은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{공극자속밀도} \quad : \quad B = 0.37 \text{ T}$$

$$\text{공극자력(가공력)} \quad : \quad F = 10.89 \text{ N}$$

위에서 자속의 손실을 무시한 단순화된 계산으로 실제의 자속 및 가공력이 어느정도인지 예측할 수 있다. 이와같은 자속밀도 및 가공력이 자기브러쉬에 작용하면 자기브러쉬는 공작물에 가공압력을 발생시키고 내면의 폴리싱가공이 이루어진다. 실제의 가공에서는 다듬질 공구의 회전으로 인한 원심력이 추가 되기 때문에 보다 높은 가공압력으로 가공이 이루어진다.

## 2.2 구동시스템의 구성

Fig.3은 회전자력연마가공 시스템의 전체적인 구성 및 구동메카니즘을 나타낸다. 컴퓨터의 구동신호에 따라 기본적인 구동이 이루어지며 그 대상이 되는 작동부분은 공작물 회전을 위한 주축대, 다듬질 가공압력 발생을 위한 전자력 발생부, 공작물의 축방향 진동을 위한 진동발생부로 구성되어 있다. PC의 명령은 다시 컨트롤러에서 증폭되고 실제적인 전자석 구동신호로 바뀌어 전자력 및 가공압력을 얻게된다. 제작한 회전자력연마가공 시스템의 개략도 및 사진은 Fig.4에 나타난 바와 같다. 공작물(원형튜브) 주위에 여섯개의 자극(magnetic pole)이 있어 이들을 순차적으로 자화시킴으로써 회전자화를 발생시키고 튜브내면에 있는 자기입자들을 튜브내면에 가압시킨 상태에서 회전시킨다. 회전자력연마 시스템은 일반적인 자력연마와는 달리 자극에 자화가 동

적으로 이루어지기 때문에 자화의 상승시간(rising time) 및 소거시간이 작아야 한다. 따라서 본 시스템에서는 0.3mm의 규소강판을 적층하여 자극을 제작함으로써 와류에 의한 열발생 및 잔류자화를 최소화 하였다. 또한 회전자력을 극대화 하기 위해 자극의 끝단은 사다리꼴 모양으로 하고 끝면은 공작물과 같은 곡률을 주었다. 각각의 전자석에 감긴 코일은 직경 0.9mm의 동선으로써 감김횟수는 1040회, 저항은 8 $\Omega$ 이고 구동 전압에 의해 코일에 흐르는 최대 전류밀도는 3.1A/mm<sup>2</sup>으로 제한하였다. 원형요오크는 연강인 SS41을 사용하였으며 모든 기계가공이 끝난 후 풀림처리(annealing)를 하여 잔류자화를 작게 하였다. 또한 가공능률을 향상시키기 위해 공작물 축방향 진동 메카니즘을 추가하였다. 진동발생은 기어드모터를 이용하였으며 축방향 진폭이 0~50mm까지 변경 가능하고 진동속도는 0~60rpm까지 변화가 가능하다. 또한 공작물을 회전시키기 위한 주축은 0~1800rpm까지 가능하다. 전자석 및 요오크 부분과 진동발생기 부분은 3방향 이송이 가능한 각각의 테이블에 장착되어 그 위치를 조절할 수 있다. 다듬질 공구는 연강으로 원활한 회전이 이루어지도록 인접한 자극간 거리와 같은 크기로 하였으며 튜브내면과의 접촉부위는 곡률이 같게 하였다.

여섯개의 전자석에 회전자화를 발생시키기 위한 입력 전류신호는 두 가지의 방법을 생각할 수 있다. 첫째는 6단계 자화모드로써 Fig.5(a)에 나타난 바와 같이 여섯개의 자극 각각을 순차적으로 자화시킴으로써 6단계로 자화를 1회전시키는 방법이다. 두번째는 3단계 자화모드로써 Fig.5(b)에 나타난 바와 같이 마주보는 두 개의 코일을 직렬로 연결하여 동시에 자화시킴으로써 N극과 S극을 형성시키고 3단계로써 자화를 1회전시킨다. 컨트롤러로부터 코일에 인가되는 전압신호는 Fig.6과 같이 구형파로 하였으며 공작물 내부의 공구 또는 연마입자가 큰 회전력을 받도록 인접한 두 자극에 인가되는 신호가 그림과 같이 1/3씩 겹치도록 하였다. 실험결과 신호를 겹치지 않을 경우 하나의 자극에서 인접한 자극으로 자화가 진행되는 천이(transition)순간에 전자석에서의 응답 지연 때문에 순간적으로 작용하는 자력이 중력보다 약해지게 되어 공구가 회전하지 못하고 밀로 떨어졌으나 이와같이 신호를 겹쳐놓으면 자력이 연속적으로 작용하기 때문에 중력을 이겨내고 공작물의 내면에 압력을 가하면서

회전함을 알 수 있었다.

이 두 가지 구동모드에 대해 유한요소법을 이용하여 자력선의 분포를 알아보고 가공영역에서의 자속밀도 세기를 계산함으로써 보다 효과적인 구동방법에 대해 고찰하고자 한다.

### 3. 가공영역에서의 자력선분포

원형 요오크, 여섯개의 자극 및 공간에서의 자력선 분포를 구하기 위해 전체 영역에 2차원 유한요소법을 적용하였다. 전자석 재료는 규소강판으로 재료에 대한 균일성과 균질성을 가정하면 2차원 포텐셜 문제의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times [\mu \nabla \times A] = J \quad (7)$$

$$J = \frac{Ni}{S}$$

여기서  $\mu$ 는 투자율(magnetic permeability),  $A$ 는 벡터적으로 표현한 자기포텐셜(magnetic potential),  $J$ 는 전류밀도,  $N$ 은 코일의 권선수,  $i$ 는 코일에 흐르는 전류,  $S$ 는 코일부분의 단면적을 각각 나타낸다. 자속밀도(magnetic flux density)  $B$ 는 자기포텐셜을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

2차원 해석인 경우 자기포텐셜은  $z$ 방향으로 존재하고 전류밀도와 같은 방향을 갖기 때문에 식(7)은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (9)$$

변분법(variational method)을 적용하기 위한 energy Functional은 다음과 같은 형태를 갖는다[5].

$$F(A) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} B \cdot H \, d\Omega - \int_{\Omega} J \cdot A \, d\Omega \quad (10)$$

식(10)를 A로 미분하여 F가 최소일때의 A값을 구함으로써 자기포텐셜에 대한 해를 구할 수 있다. Fig.7은 앞에서 언급한 두 가지 자화구동모드 중 첫번째 방법인 3단계 모드의 유한요소해석을 위한 경계조건 및 요소분할형태를 나타내고 있다. 이것은 3단계 자화모드의 대칭성에 의해 전체의 1/4 만을 고려한 경우이다. 경계조건은 중심점을 포함한 박스둘레에서의 포텐셜이 영이라고 가정하였고 대칭면에서는 포텐셜의 수직방향 미분치가 영이 되는 Neumann경계조건[5,6]을 적용하였다.

$$A = 0, \text{ on } S1 \quad (11)$$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0, \text{ on } S2$$

두 번째 모드인 6단계 자화의 경우도 대칭성에 의해 전체의 1/2 을 고려하였을 뿐 이와 동일한 경계조건을 가정하였다.

Table 1은 해석에 이용한 유한요소법의 조건들을 나타낸다. 모든 요소는 삼각형 요소(triangular element)로 하였고 대칭성을 고려하여 최소의 부분만을 다루었기 때문에 해석에 사용된 노드(node) 및 요소(element)의 갯수는 모드에 따라 다르다. 그러나 각 부분에서의 요소의 크기는 두 가지 모드에 대해 되도록 같게 하였다.

Fig.8은 두 가지 구동모드의 정지상태 및 천이상태에 대해 자력선의 분포를 유한요소해석으로 구한 결과이다. 여기서 정지상태는 자기장이 하나의 코일에 인가된 경우이고 천이상태는 인접한 자극으로 자화가 옮겨가는 도중의 상태로 인접한 두 개의 자극이 자화된 상태를 나타낸다. 코일이 표시된 자극은 자화상태임을 나타내는 것으로 하였다. 전체의 자속분포는 상하 또는 좌우 대칭이며 구동자극에서 발생한 자속의 대부분은 바로 인접한 자극으로 빠져나감으로써 그 부위에 자력이 집중됨을 알 수 있다. 자기입자에 미치는 힘은 자속밀도 및 자속밀도 구배에 비례하고 자속밀도는 자기포텐셜을 위치에 대해 미분함으로써 구할 수 있다. 자극과 공작물 사이의 공극을 2mm라 하고 튜브의 두께를 1mm로 가정하면 가공영역(working zone)은 자극으로부터 3mm 떨어진 곳이 된다.

(a)는 6단계 구동모드의 정지상태에 대한 유한요소 해석결과를 나타낸다. 대부분의 자속은 구동되고 있는 자극에 인접한 자극을 통해서 빠져나가고 나머지 자극으로는 자속이 거의 들어가지 않음을 알 수 있다. 가공영역의 자속밀도는 0.7 T로 나타났다. (b)는 6단계 구동모드의 천이상태에 대한 자력선의 분포를 나타낸다. 가공영역에서의 자속밀도는 0.94 T이다. (c)는 3단계 구동모드의 자력선 분포에 대한 유한요소 해석 결과를 나타낸다. 이 지점에서의 자속밀도는 0.85 T로 계산되었으며 6단계의 같은 상태보다 높게 나타났다. (d)는 3단계 구동모드의 천이상태의 자력선 분포를 나타낸다. 이 때의 자속밀도가 다른 경우보다 높은 1.26 T로 계산되었다.

유한요소법을 이용하여 계산한 가공영역의 최대자속밀도는 앞에서 등가자기회로법을 이용한 경우의 자속밀도( $B=0.37T$ )보다 두 배 이상 크게 나타났다. 또한 가공영역은 정지상태의 경우 자극의 끝단이 되나 천이상태에서는 두 인접한 자극 사이의 공간이 된다. 이와같이 전류신호를 겹쳐서 코일에 인가함으로써 공구로 하여금 천이순간에 충격을 이기고 연속적인 회전이 가능하게 한다.

#### 4. 곡관내면의 가공

Fig.9는 회전자력연마시스템을 이용하여 가공한 예를 나타낸다. 공작물은 엘보우 형상의 곡관(SUS316)으로 두께는 1.5mm이고 전체직경은 50mm이다. 자기장의 회전속도는 2000rpm, 코일전류는 1.8A, 사용한 자기연마재는 평균직경 100 $\mu$ m의 입자(Fe+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 사용하였다. 축방향을 따라 천천히 이동시키면서 회전자화에 의한 튜브내면의 다듬질 가공을 총 60분 동안 수행한 결과 초기 표면거칠기 Ra 1.5 $\mu$ m의 거칠은 표면을 Ra 0.05 $\mu$ m로 향상시켰다.

#### 5. 결 론

기존의 다듬질 가공법으로는 가공이 어려운 곡관의 내면다듬질을 위한 컴퓨터구동 회전자력연마가공 시스템을 개발하고 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 튜브 내면의 다듬질공구를 원활히 회전시키기 위해서는 인접한 자극에 인가되는 전압신호를 일정기간 겹치게 하여야 한다. 개발된 시스템은 인가되는 전압신호로 구형파를 사용하였으며 1/3씩 겹치도록 하였다.
- (2) 유한요소법을 이용하여 하나의 자극만이 자화되어 있는 정지상태와 인접한 두 자극이 동시에 자화되고 있는 천이상태의 자력선분포 해석결과 3단계 구동모드의 정지상태 및 천이상태에서 가공영역의 자속밀도가 6단계 구동모드에 비해 더 크게 나왔으며 그 값은 정지상태인 경우 0.85T, 천이상태인 경우 1.26T였다. 따라서 튜브내면의 다듬질을 가능하게 하기 위해서는 3단계 구동모드로 회전자화를 발생시켜야 한다.
- (3) 엘보우형 곡관(SUS316)의 내면경면가공을 실시한 결과 그 가능성을 확인하였다.



## 참고문헌

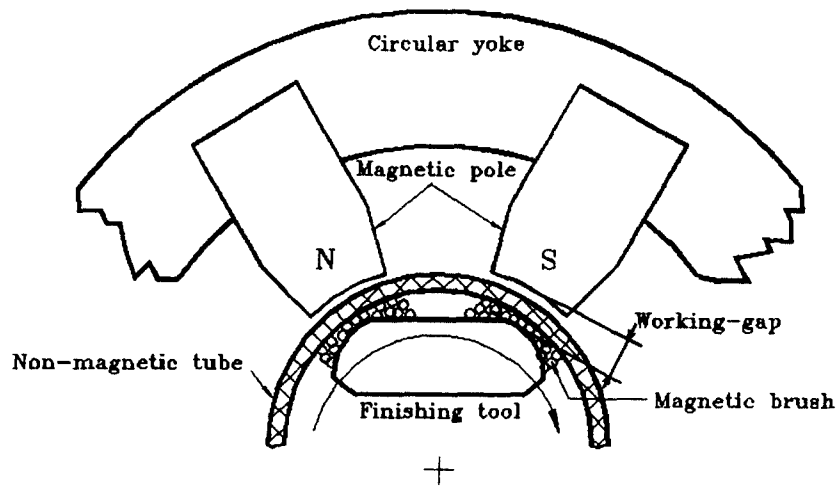
- [1] T.Shinmura et al., "The Development of Magnetic-abrasive Finishing and its Equipment by Applying a Rotating Magnetic Field", JSPE, vol.29, No.258, pp.4437-4443, 1986.
- [2] T. Shinmura, et al., "A New Internal Finishing Process of a Non-ferromagnetic Tubing by Applying a Rotating Magnetic Field", JSPE, vol.26, No.4, pp.302-304, 1992.
- [3] Herbert C.Roters, Electromagnetic Devices, John Wiley & Sons, 1970
- [4] S.J.Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill, 1985
- [5] Jianming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Willey & Sons, 1993.
- [6] P.P.Silvester and R.L.Ferrari, Finite Elements for Electrical Engineers, Cambridge Univ. Press, New York, 1983.

Table 1 Data used in finite element analysis

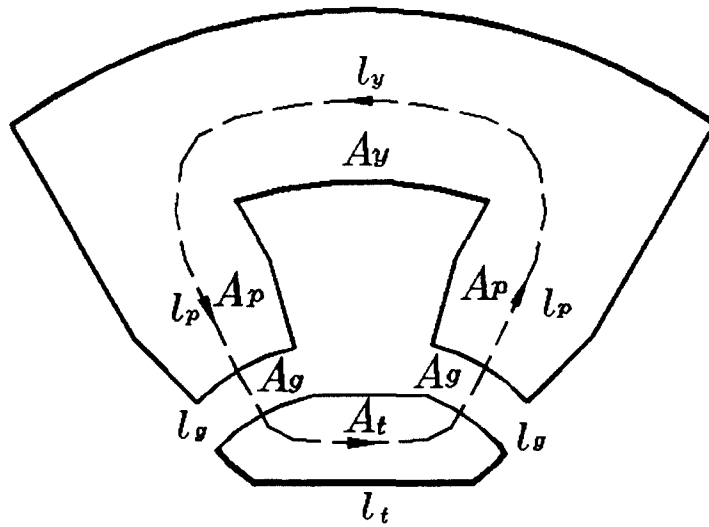
Element type	triangular	
Current density	3.1 A/mm <sup>2</sup>	
Number of coil turns	1040 turns	
Number of nodes	3-step mode(Fig.8, Fig.9)	55
	6-step mode(Fig.10, Fig.11)	109
Number of elements	3-step mode(Fig.8, Fig.9)	84
	6-step mode(Fig.10, Fig.11)	187

Table 2 Comparison of the magnetic flux density in working zone between the 3-step mode and the 6-step mode

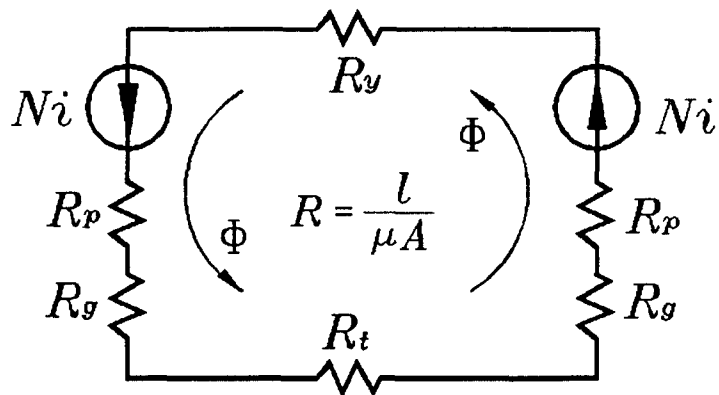
mode \ content	Magnetic flux density in working zone $B_{max}$ [Tesla]	
	3-step mode	Static state
Transition state		1.26
6-step mode	Static state	0.70
	Transition state	0.94



**Fig.1 Magnetic polishing principle of non-ferromagnetic tube using rotating magnetic field**

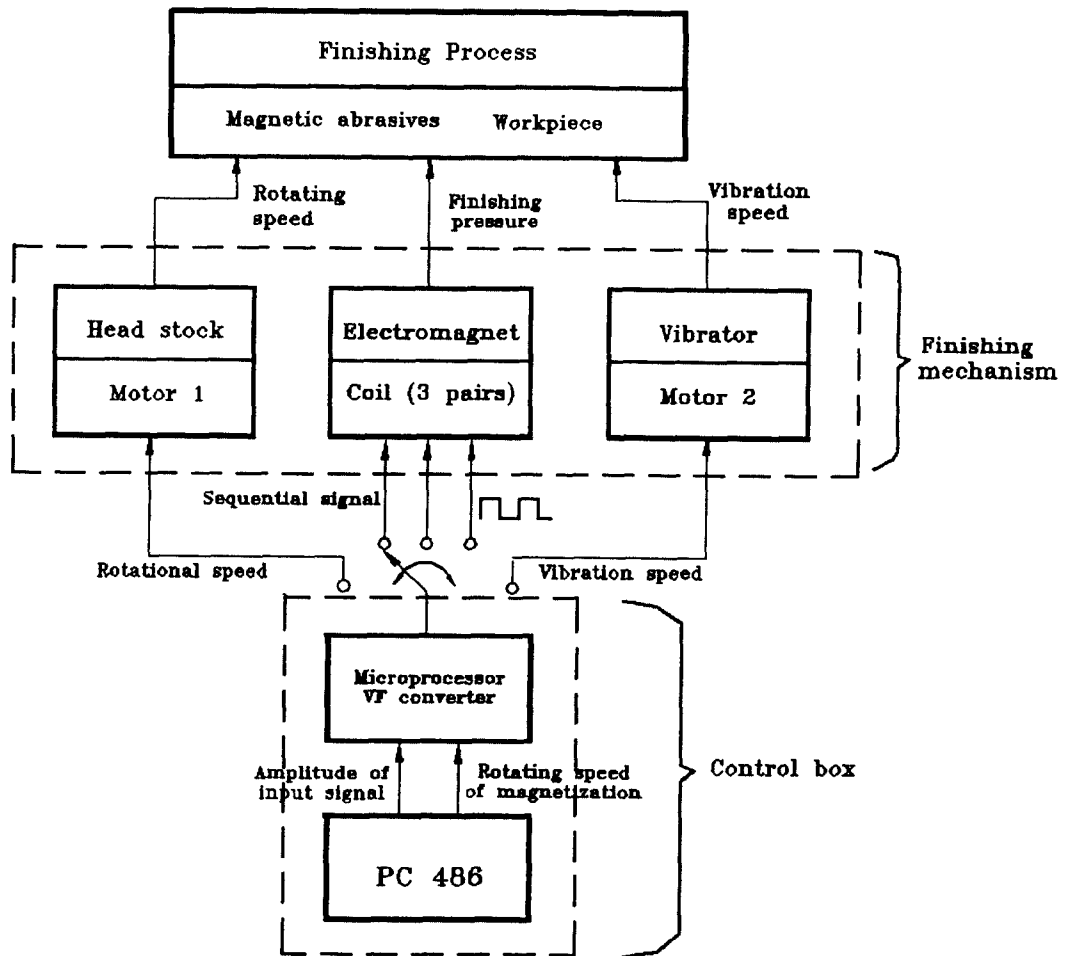


(a) Simplified magnetic pole part

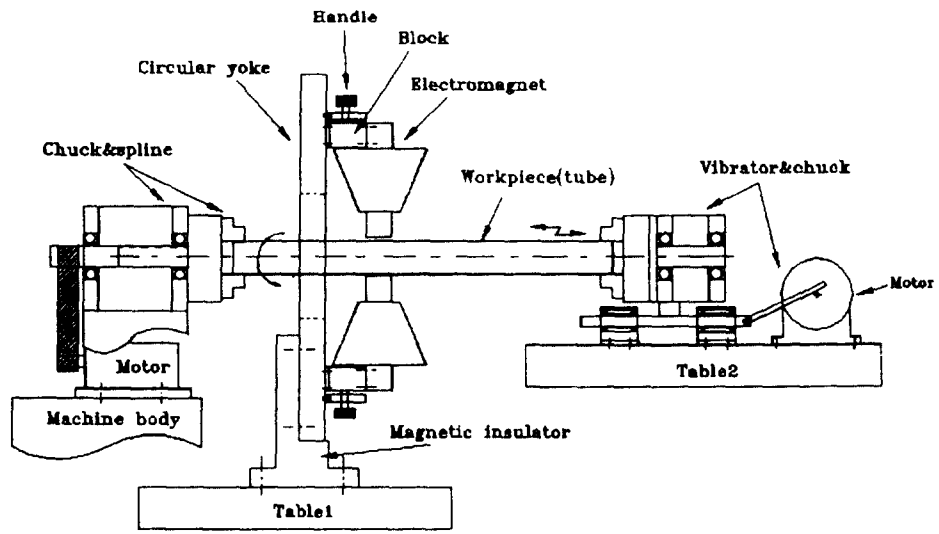


(b) Equivalent magnetic circuit

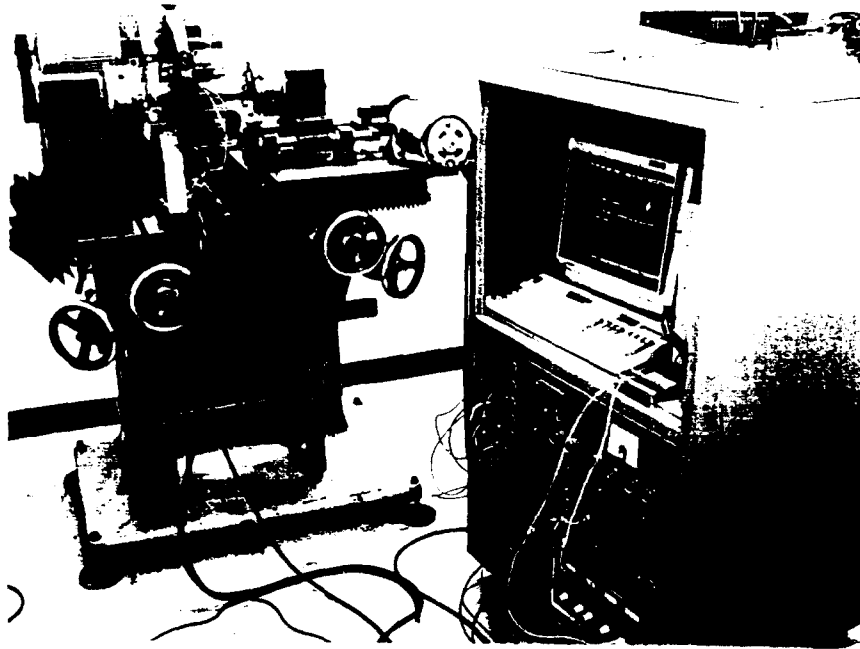
Fig.2 Calculation method of magnetic flux



**Fig.3 Schematic diagram of polishing system layout including the driving system**

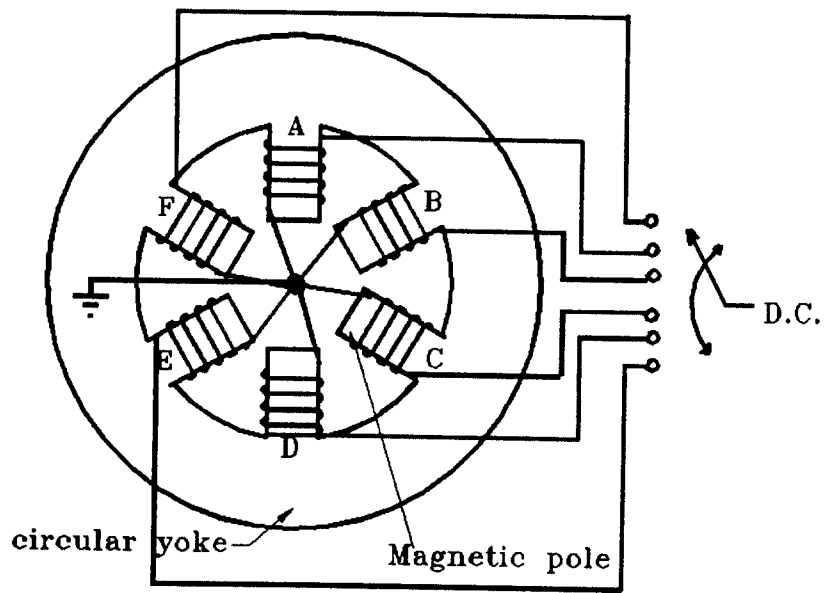


(a) Schematic diagram of mechanism

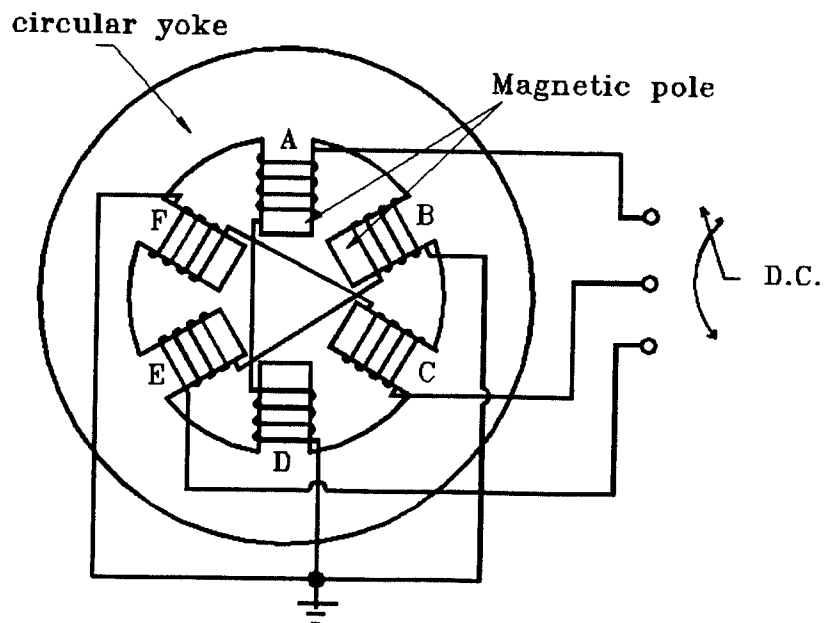


(b) Magnetic polishing system

**Fig.4 Schematic diagram and photograph of the magnetic polishing system using rotating magnetic field**

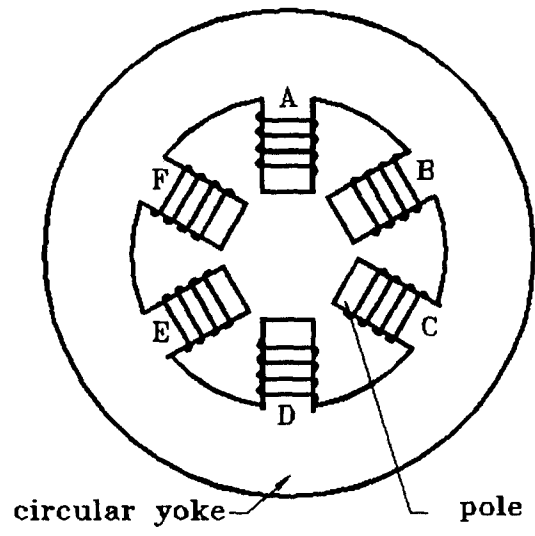


(a) 6-step mode

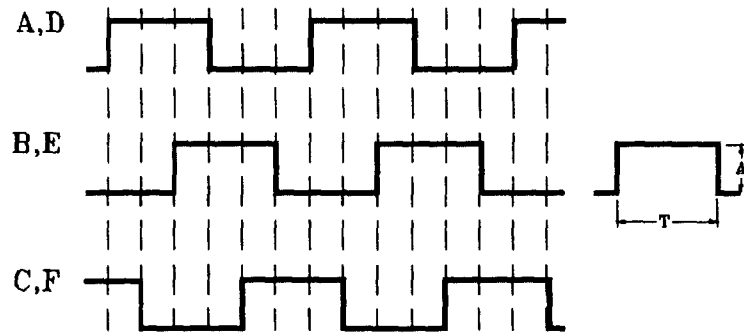


(b) 3-step mode

**Fig.5** Wiring diagram for two driving mode of electromagnets



(a)



(b)

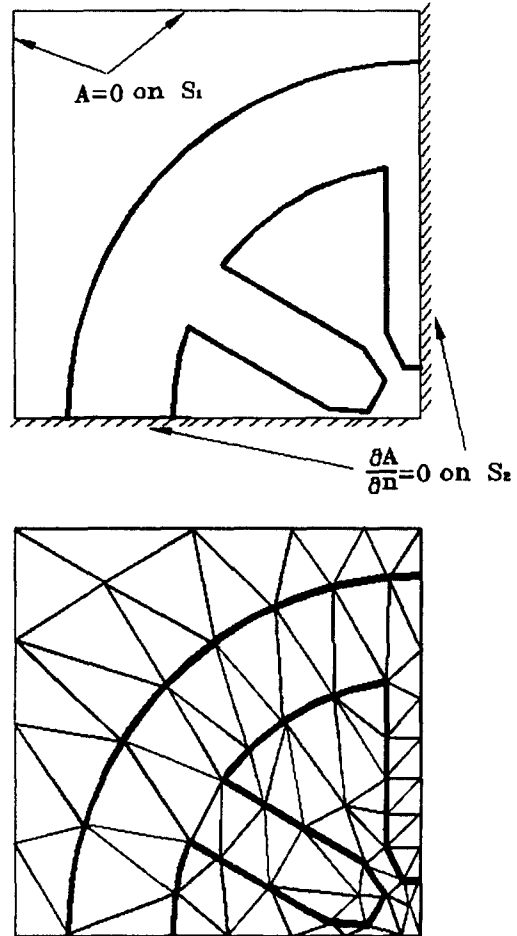
(a) Six electromagnets: A,B,C,D,E,F

(b) Input signal for generating the rotating magnetic field in 3-step driving mode

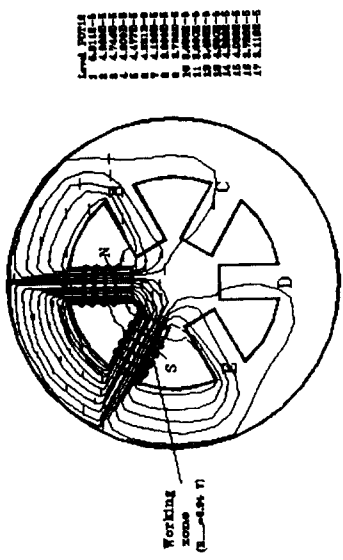
( A: 0~30V, T  $\geq$  0.5msec)

**Fig.6 Input signal to the six electromagnets in 3-step mode**

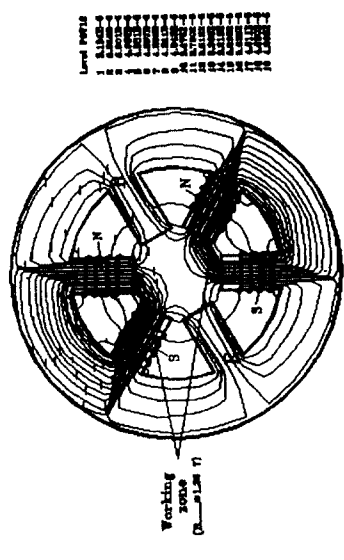




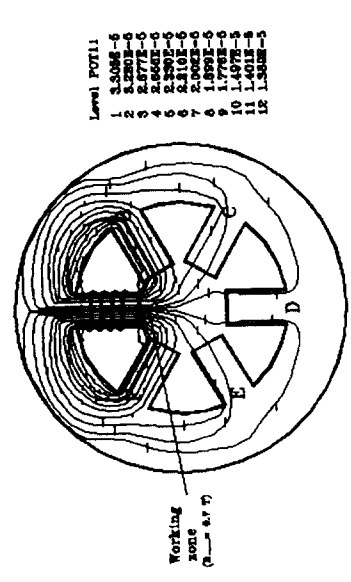
**Fig.7 Boundary condition and mesh configuration used in finite element analysis**



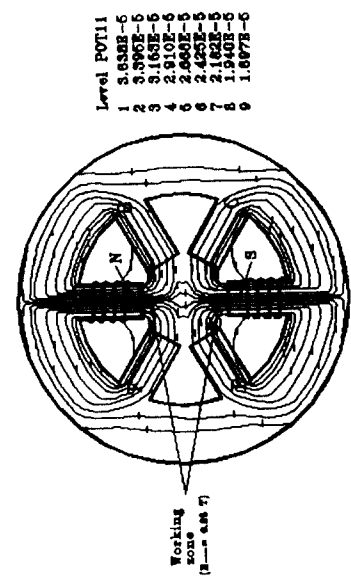
(a) 6-step mode: static state



(b) 6-step mode: transition state

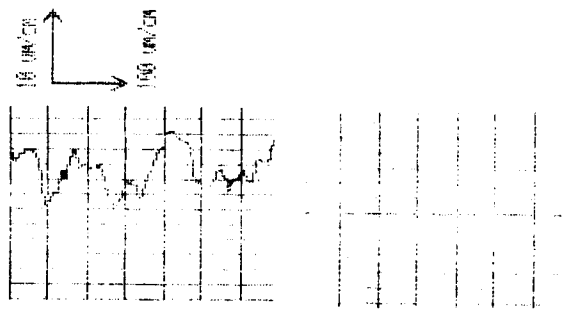
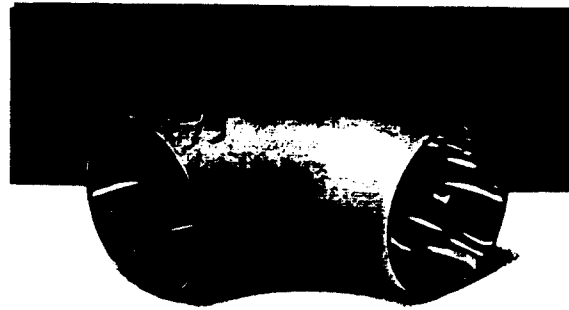


(c) 3-step mode: static state



(d) 3-step mode: transition state

Fig.8 Magnetic force lines for each state of two modes



가공전(Ra1.5  $\mu\text{m}$ )    가공후(Ra0.05  $\mu\text{m}$ )

**Fig.9 Curved tube(SUS316) polished using  
the magnetic polishing system**