

## 회전자력연마시스템의 개발과 유한요소 해석에 관한 연구 (Development and Finite Element Analysis of the Finishing System Using Rotating Magnetic Field)

최 민석\*(한국과학기술원), 김 정두(한국과학기술원)  
Min-Scog Choi(KAIST), Jeong-Du Kim(KAIST)

### 1. 서론

진공챔버(vacuum tube), 위생튜브(sanitary tube) 등 정밀한 내면을 필요로 하는 부품의 경우 표면기질기를 향상시키기 위한 방법으로 전해가공 및 수작업을 하는 경우가 대부분인데 이는 가공비가 비싸고 다듬질 시간이 많이 걸리는 등 매우 비경제적이다. 더구나 길이가 긴 관이나 구부러진 관의 내면은 기계적으로 다듬질이 매우 어렵다. 그러나 최근에 개발된 회전자기장(rotating magnetic field)을 이용한 자력연마가공법[1,2]은 기존의 기계적인 가공법과는 달리 실제 가공을 행하는 공구부와 이를 구동하는 구동부 사이에 공극(air gap)을 허용하기 때문에 이를 이용하여 회전이 불가능한 곡관의 내면다듬질을 가능하게 하였다. 지금까지 연구들은 단순히 전자석 및 전원으로 이루어진 수동가공 시스템으로서 가공공정 자체의 특성파악에 집중되어 왔으나 자력연마법의 장전중의 하나인 다듬질 공정의 자동화 가능성을 실현시키기 위해서는 공정의 제어와 필요하다.

본 연구에서는 이를 실현시키기 위한 기초연구로서 컴퓨터 구동 회전자력연마가공(rotating magnetic polishing) 시스템을 개발하고 그 기본 특성을 알아보기 위해 유한요소법(finite element method)을 이용하여 원형 요오크(circular yoke) 및 여섯개의 자극(magnetic pole)에 대해 자력선(magnetic force line)의 분포를 알아보았다. 또한 이로부터 가공영역의 지속밀도(magnetic flux density)를 계산하고 다듬질 가공을 가능케 하기 위한 회전자력의 발생방법에 대해 고찰하였다.

### 2. 회전자력연마가공의 원리

#### 2.1 전자석의 회발생 메카니즘

Fig.1은 공극을 포함하는 기본적인 전자석의 공극에서 힘의 발생 메카니즘을 나타낸다. 자극 사이의 공극 변화에 따라 공극에 축적되는 자기에너지가 변하고 이의 거리에 대한 미분치가 두 자극사이에 작용하는 힘으로 나타난다. 그 크기는 다음과 같이 계산된다[3,4].

$$Force = -\frac{dW_m}{ds} = -\frac{1}{2} F_a^2 \frac{dP_a}{ds} [N] \quad (2.1)$$

여기서  $dW_m$ 은 공극이  $ds$ 만큼 감소할 때 공극에 축적된 자기 에너지와 같은 량의 기계적인 에너지를 나타내며  $F_a$ 는 전자석의 진자기력(magnetomotive force),  $P_a$ 는 공극의 퍼어미언스(magnetic permeance)를 나타낸다. 마찬가지로 본 연구에서 고려하는 바와 같이 회전하는 메카니즘에서의 회진토크에 관한 식은 다음과 같다.

$$Torque = -\frac{1}{2} F_a^2 \frac{dP_a}{d\theta} \quad (2.2)$$

#### 2.2 튜브내면의 자력연마가공

Fig.2는 자기장을 이용한 튜브내면 연마가공 시스템의 기본적인 동작원리를 나타내며 이와같이 다듬질 공구로 자기입자를 사용할 경우 자기장 내의 하나의 자기입자가 받는 힘의 크기는  $x$ 가 자력선(magnetic force line)의 방향,  $y$ 가 등자위선(equipotential line) 방향을 각각 나타낸다고 할 때 다음과 같다[5].

$$\begin{aligned} F_x &= VX_m \mu_0 H \frac{\partial H}{\partial x} \\ F_y &= VX_m \mu_0 H \frac{\partial H}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.3)$$

이들은 식(2.1)과 식(2.2)를 구하는 방법과 같이 공극에 축적된 에너지를 각각의 방향에 따라 미분한 결과이며 여기서  $V$ 는 자기입자의 체적,  $\chi_m$ 은 자기입자의, 치화율(magnetic susceptibility),  $\mu_0$ 는 진공에서의 투지율(magnetic permeability),  $H$ 는 입자가 존재하는 위치에서의 자기장 세기(magnetic strength)를 각각 나타낸다. 이러한 힘들에 의해 공작물의 표면에 의해 구속되어 있는 입자와 공작물 사이에 작용하는 가압력은 다음과 같다[5].

$$P = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \quad (2.4)$$

여기서  $\mu_m$ 은 자기입자들 덩어리의 상대 투자율을 나타낸다. 또한 자화가 일어난 자기입자들 상호간에는 인력이 작용하게 되는데 그 힘의 크기는 입자들을 반지름  $r$ 를 갖는 구라 가정할 때 다음과 같다[5].

$$F_m = \frac{3}{2} \frac{\pi r^2 \mu \chi_m^2 I I^2}{(3 + \chi_m)^2} \quad (2.5)$$

이 힘에 의해 자기장 내에서 입자들은 중력 및 원심력에 의해 흩어지지 않고 자기브러쉬(magnetic brush)[5]를 형성해 공작물의 표면을 가공하게 된다.

### 3. 회전자력인마가공 시스템의 개발

Fig.3은 회전자력인마가공 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 전자식 구동신호로 바뀌어 전자력 및 가공압력을 얻게된다. 제작한 회전자력인마가공 시스템의 개략도 및 사진은 Fig.4에 나타난 바와 같다. 공작물(인형튜브) 주위에 여섯개의 자극(magnetic pole)이 있어 이들을 순차적으로 지하시킴으로써 회전자화를 발생시키고 튜브내면에 있는 자기입자들을 튜브내면에 가압시킨 상태에서 회전시킨다. 회전자력인마 시스템은 일반적인 자력인마와는 달리 자극이 자화가 동적으로 이루어지기 때문에 자화의 상승시간(rising time) 및 소기시간이 작아야 한다. 따라서 본 시스템에서는 0.3mm의 규소강판을 척중하여 자극을 제작함으로써 와류에 의한 열발생 및 전류자화를 최소화 하였다. 또한 회전자력을 극대화 하기 위해 자극의 끝단은 사다리꼴 모양으로 하고 끝면은 공작물과 같은 곡률을 주었다. 각각의 전자식에 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. 원형요크는 연강인 SS41을 사용하였으며 모든 기계가공이 끝난 후 풀립처리(annealing)를 하여 잔류자화를 작게 하였다. 또한 가공능률을 향상시키기 위해 공작물 축방향 진동 메카니즘을 부기하였다. 진동발생은 기어드모터를 이용하였으며 축방향 진폭이 0~50mm까지 변경 가능하고 진동속도는 0~60rpm까지 변화가 가능하다. 또한 공작물을 회전시키기 위한 주축은 0~1800rpm까지 가능하다. 전자식 및 요크 부분과 진동발생기 부분은 3방향 이송이 가능한 각각의 테이블에 장착되어 그 위치를 조절할 수 있다.

컨트롤러로부터 코일에 인가되는 전압신호는 Fig.5(b)와 같이 구형파로 하였으며 공작물 내부의 공구 또는 인마입자가 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 전자식에서의 응답 지연 때문에 순간적으로 입자들에 작용하는 자력이 중력보다 약해지게 되어 입자가 회전하지 못하고 밀로 떨어졌으나 이와같이 신호를 겹쳐 놓으면 자력이 연속적으로 작용하기 때문에 인마입자들은 중력을 이겨내고 공작물의 내면에 압력을 가하면서 회전함을 알 수 있었다.

여섯개의 전자식에 회전자화를 발생시키기 위한 입력 전류 신호는 두 가지의 방법을 생각할 수 있다. 첫째는 3단계 자화 모드로서 Fig.6(a)에 나타난 바와 같이 마주보는 두 개의 코일을 직렬로 연결하여 동시에 지하시킴으로써 N극과 S극을 형성시키고 3단계로써 자화를 1회전시킨다. 둘째는 6단계 자화 모드로서 Fig.6(b)에 나타난 바와 같이 여섯개의 자극 각각을 순차적으로 지하시킴으로써 6단계로 자화를 1회전시키는 방법이다. 이제 이 두 가지 구동모드에 대해 유한요소법을 이용하여 자력선의 분포를 알아보고 가공영역에서의 지속밀도 세기를 계산함으로써 보다 효과적인 구동방법에 대해 고찰하고자 한다.

### 4. 자력선분포 해석 및 고찰

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

$$\nabla \times [\mu \nabla \times A] = J \quad (4.1)$$

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

여기서  $\mu$ 는 투자율(magnetic permeability), A는 벡터적으로 표현한 자기포텐셜(magnetic potential), J는 전류밀도, N은 코일의 권선수,  $i$ 는 코일에 흐르는 전류, S는 코일부분의 단면적을 각각 나타낸다. 자속밀도(magnetic flux density) B는 자기포텐셜을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$B = \nabla \times A \quad (4.2)$$

2차원 해석인 경우 자기포텐셜은 z방향으로 존재하고 전류밀도와 같은 방향을 갖기 때문에 식(4.1)은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (4.3)$$

변분법(variational method)을 적용하기 위한 energy Functional은 다음과 같은 형태를 갖는다[6].

$$F(A) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} B \cdot H \, d\Omega - \int_{\Omega} J \cdot A \, d\Omega \quad (4.4)$$

식(4.4)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 1/4만을 고려한 경우이다. 경계조건은 중심점을 포함한 박스틀레에서의 포텐셜이 영이라고 가정하였고 대칭면에서는 포텐셜의 수직방향 미분치가 영이 되는 Neumann경계조건[6,7]을 적용하였다.

$$A = 0, \text{ on } S1 \quad (4.5)$$

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

두 번째 모드인 6단계 자화의 경우도 대칭성에 의해 전체의 1/2을 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 3단계 구동모드의 자력선 분포에 대한 유한요소 해석 결과를 나타낸다. 코일이 표시된 자극은 자화상태임을 나타는 것으로 하였다. 전체의 자속분포는 상하, 좌우 대칭이며 구동자극에서 발생한 자속의 대부분은 바로 인접한 자극으로 빠져 나감으로써 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. 이 지점에서의 자속밀도는 0.85 T로 계산되었다. Fig.9는 3단계 구동모드에서 인접한 자극이 동시에 자화되는 천이상태(transition state)의 자력선 분포를

나타낸다. 이 경우는 하나의 자극만 자화된 경우보다 가공영역의 자속밀도가 높은 1.26 T로 계산되었다. 또한 가공영역은 Fig.8의 경우 자극의 끝단이었으나 이러한 천이상태에서는 두 인접한 자극 사이의 공간이 된다. Fig.10은 6단계 구동모드의 정지상태에 대한 유한요소 해석결과를 나타낸다. 마찬가지로 대부분의 자속은 구동되고 있는 자극에 인접한 자극을 통해서 빠져나가고 나머지 자극으로는 자속이 거의 들어가지 않음을 알 수 있다. 가공영역의 자속밀도는 0.7 T로서 3단계 구동모드의 경우보다 약간 낮은 값으로 나타났다. Fig.11은 6단계 구동모드의 천이상태에 대한 자력선의 분포를 나타낸다. 가공영역에서의 자속밀도는 0.91 T로서 같은 상태의 3단계 구동모드에 비해 그 값이 낮음을 알 수 있다. 이와같이 진류신호를 Fig.5(b)와 같이 겹쳐서 코일에 인가함으로써 천이순간에 자기브러쉬가 중력에 의해 부서지지 않고 연속적으로 회전할 수 있게 된다. 또한 구동자극의 인접한 영역에서 밀집된 자속의 분포는 순차적으로 자화되면서 회전하는 자력을 따라 튜브내면의 자기입자(magnetic abrasive)를 원주방향으로 구동하여 자력인마가공을 가능하게 한다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 기존의 다듬질 가공법으로는 가공이 어려운 곡관의 내면 다듬질을 위한 컴퓨터 구동 회전자력인마가공 시스템을 개발하였다.
- (2) 튜브 내면의 자기입자가 공작물에 압력을 가하면서 외부 자극의 회전자화를 따라 연속적으로 회전하기 위해서는 인접한 자극에 인가되는 전압신호를 일정기간 겹치게 하여야 한다. 개발된 시스템은 코일에 인가되는 전압신호로 구형파를 사용하였으며 인접한 자극간에 1/3씩 겹치도록 하였다.
- (3) 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 정지 상태인 경우 0.85T, 천이상태인 경우 1.26T였다. 따라서 튜브내면의 다듬질을 가능하게 하기 위해서는 3단계 구동모드로 회전 자화를 발생시켜야 한다.

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] T.Shinmura et al., "Study on Magnetic-Abrasive Finishing(1st Report) -On Process Principle and a Few Finishing Characteristics(In Japanese)", JSPE, vol.52, No.5, pp.851-856, 1986.

[6] Jianming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, 1993.

[7] 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	0.85
Transition state		1.26	
6-step mode	Static state	0.70	
	Transition state	0.94	

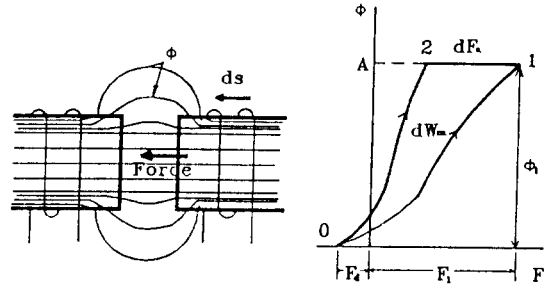


Fig.1 Diagram showing the principle of generating magnetic force from the magnetic energy in the air-gap

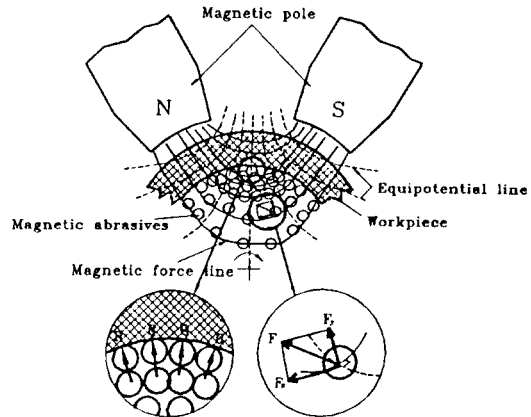


Fig.2 Magnetic abrasive finishing principle of the internal surface of tubes

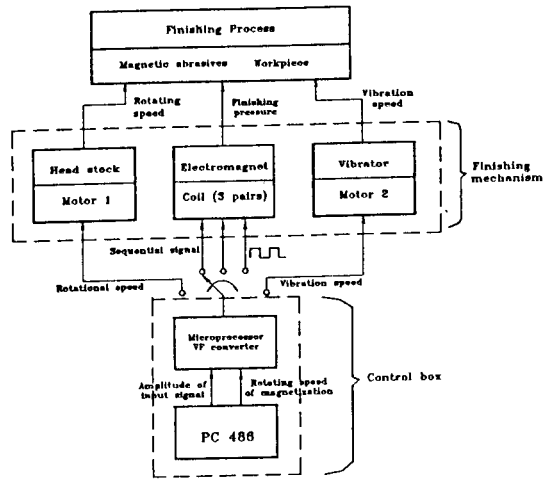
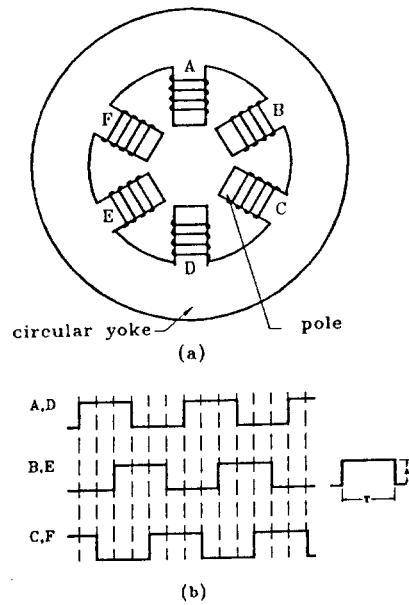


Fig.3 Schematic diagram of the finishing system layout using rotating magnetic field



(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 >= 0.5msec)

Fig.5 Input signal to drive the six electromagnets by 3-step method

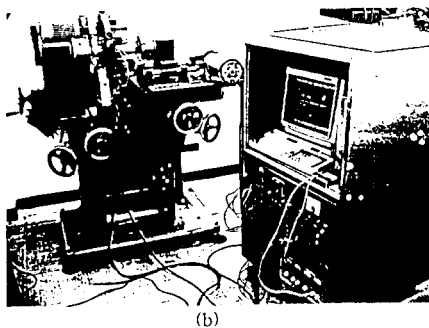
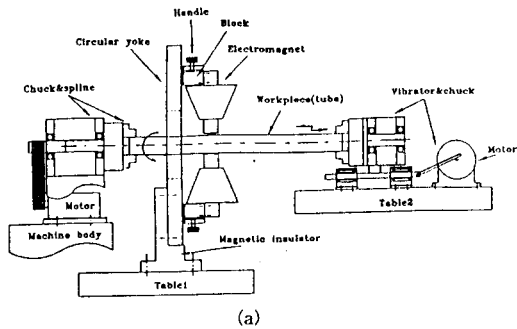


Fig.4 Schematic diagram and photograph of the magnetic abrasive machining system

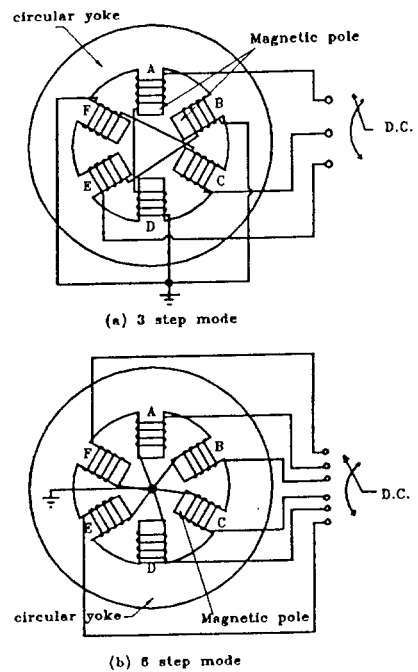


Fig.6 Wiring method of electromagnets for two driving modes

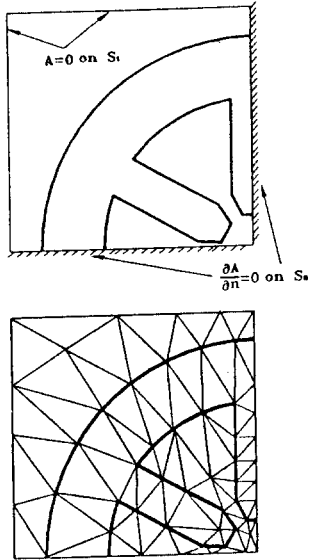


Fig.7 Boundary condition and mesh plot for finite element method

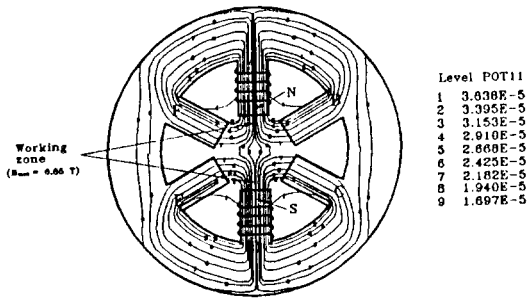


Fig.8 Magnetic force lines for 3-step mode in static state

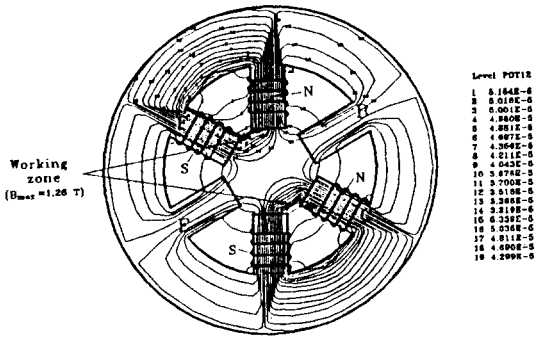


Fig.9 Magnetic force lines for 3-step mode in transition state

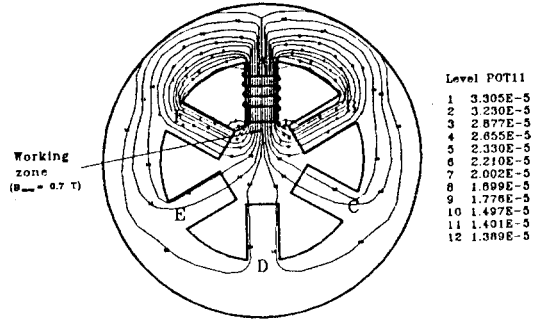


Fig.10 Magnetic force lines for 6-step mode in static state

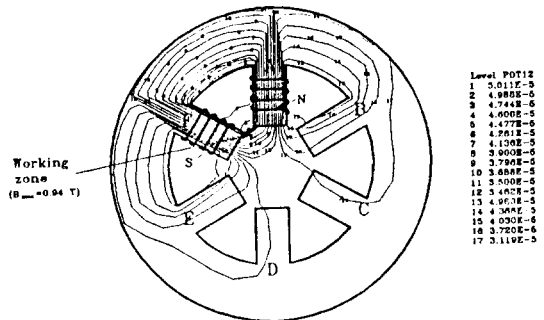


Fig.11 Magnetic force lines for 6-step mode in transition state