

# 브러시리스 직류 전동기의 자기 가진력에 의한 진동 해석

論 文

50B-1-1

## The Analysis of Vibration Due to Magnetic Exciting Force in the Brushless DC Motor

韓 基 晉\* · 曹 翰 삼\*\* · 鄭 炫 教\*\*\*

(Ki-Jin Han · Han-Sam Cho · Hyun-Kyo Jung)

**Abstract** - In this paper, the general research on the analysis of the vibration due to magnetic exciting force in the small brushless DC(BLDC) motor, which is used in the Digital Versatile Disk(DVD) ROM driving system, is performed. The first part of the study is the analysis of the magnetic exciting force in the air gap region. As a verification of the exciting force by numerical analysis, the magnetic exciting force distribution in the airgap region is computed by using Reluctance Network Method(RNM). In addition, the effect of the eccentricity on the magnetic exciting force is discussed. The other part of the research is the structural analysis of the rotor structure of the BLDC motor. The natural mode analysis of the rotor structure is performed, and the vibration response due to magnetic exciting force is found. As a result of the procedures, the basic estimation of the effect of the magnetic exciting force on the vibration of BLDC motor is suggested.

**Key Words** : Brushless DC motor, Magnetic exciting force, Reluctance network Method, Vibration response

### 1. 서 론

전기 기기의 진동 문제는 실제적인 측면에서 오래 전부터 제기되어 왔던 문제이나, 최근에 산업용 또는 가전용 각종 전동기의 진동 및 소음 문제에 대한 연구가 활발히 진행되기 시작하는 추세이다. 특히, 자기 가진력에 의한 진동은 전동기의 피할 수 없는 진동원 중의 하나로, 최근의 고성능 전동기 개발에서 더욱 중요한 가진원으로 인식되고 있다. 따라서 종래의 전동기 진동 연구가 순수하게 기계 공학적인 접근으로만 이루어졌던 것과는 달리, 최근의 진동 연구는 전자기 현상에 의한 가진력의 규명 및 이의 기계구조에의 영향을 함께 고려하는 전기, 기계 공학적인 접근으로 이루어지고 있다[1]-[3].

본 논문에서는 DVD ROM 구동용 소형 브러시리스 직류 전동기의 자기 가진력에 의한 진동 현상을 해석하고 분석 평가하여, 소형 스피들 전동기의 자기 가진력에 의한 진동 연구의 주요 과정을 확립하고, 소형 스피들 전동기 고유의 자기 가진에 의한 진동 특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 먼저 전동기의 회전자 자계 해석을 릴럭턴스 방법을 이용해 수행하였고[9][10], 이로부터 공극 부분의 회전자 쪽에 작용하는 자기 가진력의 분포를 구하였다. 또한 회전자의 기계적인 구조를 모델링하여 유

한요소법을 이용해 고유 주파수와 고유 모드를 구하고, 앞에서 구한 가진력 분포를 직접 구조 해석에 입력하여 그 응답을 살펴보았다. 이러한 과정을 통해 자기 가진력의 회전자 구조 진동에의 영향 평가에 대한 기본적인 접근이 가능하고, 소형 스피들 전동기의 구조적인 특성에서 기인하는 자기 가진에 의한 진동 특성을 규명할 수 있다. 현재까지의 연구 경향에서 소형 스피들 전동기의 자체적인 진동 현상은 중요한 문제로 고려되고 있지 않으나, 회전속도의 증가와 고에너지 영구자석 채용에 의한 가진력 세기의 증가로 인해 향후 스피들 전동기 자체의 진동 문제가 고려될 것이다.

### 2. DVD ROM 구동용 소형 브러시리스 직류 전동기

최근에 정보 저장 및 재생 기술의 중요성이 날로 높아짐에 따라 여러 가지 정보 저장 및 재생 매체의 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 DVD시스템은 차세대 영상 및 음성 정보의 저장, 재생 매체로서 근래에 주목받기 시작하여 설계 및 실용화에 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다.

DVD 시스템의 정보 저장의 고밀도화 및 재생 속도 증가는 DVD시스템의 성능 향상에 있어 가장 중요한 요소로, 현재 이를 위해 디스크의 고밀도화 및 픽업 액추에이터의 제어 특성 개선, 디스크 회전운동 특성 개선 등의 연구가 이루어지고 있다. 한편, 재생 속도의 증가는 결과적으로 디스크를 회전시키는 구동체인 전동기의 속도 증가를 가져오며, 현재까지는 문제가 되지 않던 전동기의 진동 효과가 두드러지게 나타나는 주파수 대역의 속도에서 DVD시스템을 구동할 경우 전동기의 진동 문제가 중요해질 것이다.

\* 準 會 員 : LG이노텍(株) 龍仁 研究所 研究員

\*\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 2月 10日

最終完了 : 2001年 1月 8日

DVD ROM 구동용 소형 브러시리스 직류전동기에서의 가진원으로는 베어링의 불균형 가진, 전자기력 및 기타 외란에 의한 불규칙 가진 등이 있다. 이 중 자기 가진력은 고에너지 영구자석의 적용 및 전동기의 속도 향상에 따라 중요한 가진원이 될 것이기 때문에 자기 가진력에 대한 연구 및 자기 가진력에 의한 진동 저감 방안에 대한 연구가 필수적이다.

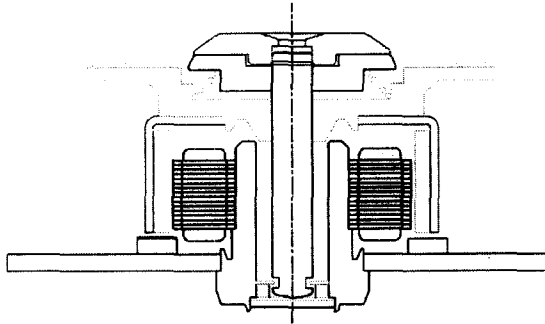


그림 1. DVD ROM 구동용 브러시리스 직류 전동기의 단면도  
Fig 1. Side view of BLDC motor used in DVD ROM drives

표 1. 브러시리스 직류 전동기의 주요 사양  
Table 1. Specifications of the BLDC motor

치 수		자기회로 및 영구자석	
회전자 내경	9.3(mm)	극 수	12
회전자 외경	11.05(mm)	슬롯 수	9
고정자 외경	4.25(mm)	슬롯 당 턴 수	55
고정자 내경	9.0(mm)	보자력	5000(Oe)
고정자 높이	5.25(mm)	잔류 자속밀도	6400(G)
공극 길이	0.3(mm)		

구동 특성	
정격 토크	7.85E-3(Nm)
슬롯 당 인가 전류	600(mA)
정상 상태 회전 속도	6000(r.p.m.)

기계적 재질 특성				
부품	재질	영률 [Pa]	포아송비	밀도 [(g/cm <sup>3</sup> )]
턴테이블	Soft Yellow Brass	109.6E9	0.331	8.47
사프트	Stainless Steel	190.3E9	0.305	8.03
영구자석	Nd Sintered	1.60E11	0.240	7.50
회전자 요크	Mild Steel	220.0E9	0.275	7.86

### 3. 자기 가진력의 해석

#### 3.1 회전자 표면에 작용하는 가진력의 계산

전자기력 및 전자기 힘 밀도를 구하기 위해 맥스웰 응력 텐서법을 사용하였다. 원통 좌표계의 경우 각 방향의 자계 값이 알려져 있는 임의의 점에서의 맥스웰 응력 텐서는 다음과 같다[4][5].

$$T_{mn} = \mu H_n H_m - \frac{\mu}{2} \delta_{mn} H_k H_k \quad (1)$$

$T_{mn}$  :  $m$  방향의 법선 벡터를 갖는 표면에 작용하는  $n$  방향 응력 [N/m<sup>2</sup>]

$H_n$  :  $n$  방향 자계 강도 [A/m]

$\mu$  : 투자율 [H/m]

$\delta_{mn}$  : 크로네퉀 델타

$m, n, k$  :  $r$  또는  $\theta$  또는  $z$

외전형 브러시리스 직류전동기에서의 회전자 표면 또는 고정자 표면과 같이 투자율이 다른 두 개의 영역간의 경계에 해당하는 표면에 작용하는  $m$  방향 힘 밀도는

$$T_m = (T_{mn}^a - T_{mn}^b) n_n \quad [N/m^2] \quad (2)$$

$n_n$  :  $n$  방향 법선 벡터 성분

전동기 공극에서의 가진력 해석을 위해 위의 힘 밀도 계산을 매 시간 간격마다 수행하면 전동기의 회전에 따른 가진력 분포의 변화를 볼 수 있으며, 이 시간축에서의 파형을 주파수 해석의 입력으로 사용한다.

#### 3.2 가진력의 주파수 해석

맥스웰 응력 텐서법으로 얻은 각 시간 단위에서의 가진력 파형으로부터 주파수 영역에서의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 공극 상의 영역에 걸쳐 나타나는 힘 밀도의 스펙트럼은 슬롯 구조 및 영구자석의 자화 패턴의 영향을 시간 영역에서의 힘 밀도 파형 보다 더 효과적으로 보여준다.

정속 운전하의 브러시리스 직류 전동기의 회전속도를  $\omega_m$  이라 하면 가진력이 나타나는 주파수들은 다음과 같다[6].

$$\omega_{\alpha} = nN_p \omega_m \quad [\text{rad/sec}] \quad (3)$$

$n$  : 양의 정수

$N_p$  : 전동기의 극 수

수치해석에서 얻어지는 힘 밀도의 파형은 한 주기 당  $N$  개의 샘플링을 갖는 이산화된 주기함수이므로, 이산 푸리에 변환으로부터 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다[7]. 힘 밀도 파형  $T(t)$  의  $k$  번째 고조파 성분은

$$T_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} \{ T(t) \}_r e^{-j(2\pi k/N)} \quad [N/m^2] \quad (4)$$

일반적으로  $T_k$  는 복소수이며, 고조파 성분의 크기와 위상을 나타낸다. 한편, 다음의 푸리에 역변환 식으로부터 힘 밀도 파형의  $r$  번째 샘플링 값을 얻는다.

$$\{ T(t) \}_r = \sum_{k=0}^{N-1} T_k e^{-j(2\pi k/N)} \quad [N/m^2] \quad (5)$$

위의 푸리에 변환 관계식에서 의미 있는 주파수의 범위는

$$f_k = \frac{k}{N\Delta t} \leq \frac{1}{2\Delta t} \quad [\text{Hz}]$$

$$k=0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (6)$$

이며, 이 값 이상의 주파수 성분들은 새넨의 정리에 의해 일라이어싱된 성분들로 앞의 주파수 성분들의 거울상으로 나타난다. 즉  $N$  개의 샘플링된 파형의 경우 이산 푸리에 변환으로부

터 평균값 및 기본 주파수부터  $N/2$  차 고조파 성분까지 얻을 수 있다.

### 3.3 릴럭턴스 방법을 이용한 자계 해석

앞 절에서 언급한 힘 밀도 및 순시 평균 힘의 계산의 전 단계로서 전동기의 자계 해석이 필요하다. 본 논문에서는 자계 해석 방법으로 릴럭턴스 방법을 이용하였다[8][9].

릴럭턴스 방법은 기존의 자기 등가 회로법에 유한 요소법과 같은 수치 해석적 개념을 도입한 방법으로, 자기 등가 회로 방법이라고도 한다. 이 방법은 자기저항을 정의 하고 자기회로를 구성하여 자기회로의 각 절점에서의 포텐셜 값으로부터 자계를 구한다는 점에서 자기 등가회로법과 유사하나, 해석 영역을 유한 요소법에서와 같이 요소 분할하여 각 요소의 자계를 구해 주어진 해석 영역에서의 자계 분포를 얻을 수 있다는 점에서 자기 등가 회로법과 차이를 보인다. 릴럭턴스 방법의 대략적인 과정은 다음과 같다.

- 가. 주어진 해석 영역을 릴럭턴스 요소로 분할한다.
- 나. 각 릴럭턴스 요소에서의 각 방향 릴럭턴스 값과 각 방향 기저력 값을 구한다.
- 다. 자기회로에서의 키르히호프의 전류 법칙을 적용한다. 이는 자계에서의 가우스 법칙과 같다. 즉,

$$\sum_{x^* = r, \theta} \phi_{x^* q} = 0 \quad (7)$$

$\phi_{x^* q}$  : 릴럭턴스 요소의 한 절점에서  $+x^*$  ( $q=+$ ) 또는  $-x^*$  ( $q=-$ ) 방향으로 흐르는 자속 [Wb]

$x^*$  : (2차원 해석의 경우)  $r$  또는  $\theta$

$q$  : + 또는 -

각 요소에 대해 (7)식을 적용한 뒤 이들을 행렬로 나타내면 아래와 같다.

$$[P]\{\phi\} = \{F^{m.f}\} \quad (8)$$

라. (8)식을 풀어 각 절점에서의 포텐셜을 구하고 이로부터 각 점에서의 자속 밀도를 얻는다.

### 3.4 편심 현상의 고려

그림 2와 같이 고정자 축과 회전자 축간의 정적 편심이 유지되면서 회전자가 회전할 경우 고정자의 한 점에서 바라보는 가진력의 주파수는 편심이 없는 경우와 동일하게  $N_p \omega_m$  이다. 또한 전체적인 코깅 토크 또는 맥동 토크의 주파수도 편심이 없는 경우와 동일하게 나타난다. 그러나 가진력 파형의 공간적인 분포는 편심이 있을 때와 같이 모든 슬롯에 대해 동일하지 않고, 공극이 작은 부분에서 더 큰 가진력이 나타난다. 편심을 정확히 구현하기 위해서는 고정자 축과 회전자 축이 일치하지 않는 편심 모델을 구성하여야 하나, 본 논문에서는 자화 분포에 편이를 주어 등가적으로 편심 효과를

구현하였다.

그림 2와 같이 고정자와 회전자 사이에 편심이 있는 구조에서 공극 길이  $\delta(\theta)$  를 각  $\theta$  에 따라 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다[10][11].

$$\delta(\theta) = \delta^*(1 - \epsilon \cos \theta) \quad [m] \quad (9)$$

여기서  $\delta^* = R - r$  이고,  $\epsilon = \frac{e}{R-r}$  이다. 즉,  $\epsilon$  은 편심이 없을 때의 공극 길이와 편심의 길이의 비로 편심의 정도를 나타낸다. 정적 편심을 가정할 경우 회전자와 고정자의 편심 구조는 변하지 않으면서 회전자가 회전하게 되므로 시간에 대한 이동 없이 이와 같은 공극 상태는 일정하게 유지된다. 이러한 편심 효과를 등가적으로 구현하기 위해 본 논문에서는 다음과 같이 자화 분포의 편이를 정의한다.

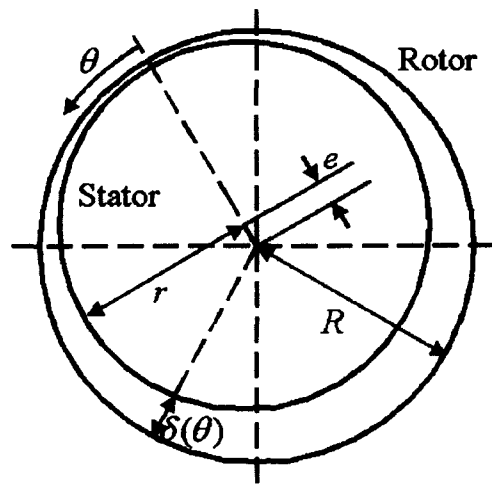


그림 2. 편심이 있는 전동기 모델  
Fig 2. Model of an electric machine with an eccentricity

$$M(\theta) = M^*(1 + \epsilon \cos \theta) \quad [T] \quad (10)$$

여기서  $M^*$  는 편심이 없을 때의 등가적으로 균일한 자화 분포 값이며, 공극 길이가 편심에 의해 짧아지는 부분에서 자화의 영향을 크게 받으므로 (9)식과 부호가 다르게 하였다. 또한 편심의 정도가 커져  $\epsilon$  이 커질수록 자화 분포의 편이도 심해진다.

### 4. 전동기 회전자 구조의 진동 해석

본 절에서는 브러시리스 직류 전동기의 회전자 부분에 대한 진동 해석의 기본 이론을 소개한다. 진동 해석은 기본적으로 동역학에 기초를 두고 있으며, 실제적인 구조물의 진동에 대한 해석을 위해서는 고체 역학적인 접근이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 구조 유한 요소법을 이용한 회전자 구조의 모드 해석 및 가진력에 대한 응답 해석을 수행하였다.

4.1 모드 해석의 기본 이론

일반적인 기계구조에 대한 고유 주파수 및 각 고유 주파수 당 모드 형상의 해석은  $N$  자유도계의 이산화된 구조로 모델링 하여 다음의 과정을 통해 이루어진다.  $N$  개의 각 자유도에 대한 일반적인 운동방정식은 인접한 질점과의 결합 관계가 존재하여 아래와 같이 쓸 수 있다[12].

$$\sum_{j=1}^N m_{ij} \ddot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^N c_{ij} \dot{x}_j(t) + \sum_{j=1}^N k_{ij} x_j(t) = f_i(t) \quad (11)$$

$i = 1, \dots, N$

- $m_{ij} = \delta_{ij} m_i$  : 질점  $i$ 의 질량 계수 [kg]
- $c_{ij}$  : 질점  $i$ 와  $j$ 간의 댐핑 계수 [kg/sec]
- $k_{ij}$  : 질점  $i$ 와  $j$ 간의 강성 계수 [N/m]
- $x_j(t)$  :  $j$ 번째 질점의 변위 [m]
- $f_i(t)$  :  $j$ 번째 질점에 작용하는 외력 [N]

이를  $N \times N$ 의 행렬 형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (12)$$

- $[M]$  : 관성 행렬 [kg]
- $[C]$  : 감쇠 행렬 [kg/sec]
- $[K]$  : 강성 행렬 [N/m]
- $\{x(t)\}$  : 변위 벡터 [m]
- $\{f(t)\}$  : 외력 벡터 [N]

구조의 모드 해석은 구조 자체로부터 기인하는 고유한 응답을 얻는 과정으로, 외력 벡터  $\{f(t)\} = \{0\}$  으로 놓는다. 또한 감쇠 행렬  $[C]$ 는 고유 주파수 해석시 소거하며, 이는 고유 주파수 자체의 정의 및 실제적인 이유 때문이다. 한편 대부분의 기계 구조의 진동에 있어서 동기 운동의 가정이 적용될 수 있는데, 이는 각 질점에서의 상대적인 변위비가 항상 일정함을 의미한다. 이를 아래와 같이 변위 벡터에 적용할 수 있다.

$$x_j(t) = u_j q(t) \quad (13)$$

(13)식을 (11)식에 대입하여 정리하면

$$-\frac{\ddot{q}(t)}{q(t)} = \frac{\sum_{j=1}^N k_{ij} u_j}{\sum_{j=1}^N m_{ij} u_j} = \lambda = \omega^2 \quad (14)$$

(14)식의 첫번째 시간에 관한 미분방정식의 해는

$$q(t) = A_1 e^{j\omega t} + A_2 e^{-j\omega t} = C \cos(\omega t - \phi) \quad (15)$$

로 정현적인 응답을 보인다. 동기 운동을 가정할 경우 운동 방정식을 행렬형으로 쓰면

$$[M]\{u\} \ddot{q}(t) + [K]\{u\} q(t) = \{0\} \quad (16)$$

$\ddot{q}(t) = -\omega^2 q(t)$  이므로 (16)식에 대입하면

$$(-\omega^2 [M] + [K])\{u\} = \{0\} \quad (17)$$

고유치 문제에서 위 식이 특이해(Nontrivial solution)를 가지려면

$$\Delta(\omega^2) = \det[-\omega^2 [M] + [K]] = 0 \quad (18)$$

(18)을 특성 방정식이라 한다. 특성 방정식은  $N$  개의 해를 가지며 이들  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$  를 고유 주파수라 한다. 각 고유 주파수를 (18)식에 대입하면

$$(-\omega_r^2 [M] + [K])\{u\}_r = \{0\} \quad (19)$$

이며, 여기서 얻어지는  $\{u\}_r$  을 고유 벡터라 한다. 고유 벡터는 각  $x_i$  간의 비로, 진동의 모양을 표현한다. 각 고유 벡터는 성분간의 상대적인 비가 같으며, 이 값들을 여러 가지 방법으로 스케일링할 수 있으나, 본 논의에서는 다음과 같은 질량 표준화를 사용한다.

$$\{u\}_r^T [M] \{u\}_r = 1 \quad (20)$$

4.2 자기 가진력에 의한 진동 응답 해석

4.1 절에서 보였던 운동 방정식 (12)의 감쇄항을 제거한 식을 다시 쓰면

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (21)$$

한편  $\{x(t)\}$  를 4.1절에서 유도했던 고유벡터들의 선형결합들로 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$\{x(t)\} = [u]\{q(t)\} \quad (22)$$

여기서

$$[u] = [\{u\}_1, \{u\}_2, \dots, \{u\}_N]$$

$$\{q(t)\} = \{q_1(t), q_2(t), \dots, q_N(t)\}^T$$

이며, 각  $q_r(t)$  는 각 모드에 가해지는 외력에 의한 시간 응답 함수이다. (22)을 (21)에 대입하고 (21)식 좌측에  $[u]^T$  를 곱하면

$$[u]^T [M] [u] \{\ddot{q}(t)\} + [u]^T [K] [u] \{q(t)\} = [u]^T \{f(t)\} \equiv \{N(t)\} \quad (23)$$

여기서  $\{N(t)\}$  는 외력 벡터로 본 논문에서는 자기 가진력이 입력되는 부분이 된다. (20)식과 고유치 문제에서의 직교성에 따라 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} \ddots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots \\ 0 & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \{\ddot{q}(t)\} + \begin{bmatrix} \ddots & 0 \\ 0 & \omega_r^2 & \ddots \\ 0 & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \{q(t)\} = \{N(t)\} \quad (24)$$

식 (24)로부터 각 자유도 간의 결합이 없는  $N$ 개의 독립적인 시간에 대한 미분 방정식이 얻어지며, 각 자유도에 가해지는 전자기력을 포함한 임의의 가진력  $\{N(t)\}$  에 대해 각 고유 주파수 성분들의 응답을 구할 수 있다. 한편 실제 문제의 경우 감쇄가 없는 위와 같은 방정식으로는 발산 또는 진동하는 해가 나오므로 다음과 같이 적절한 모드 감쇄  $\zeta_r$  를 정의하여 자기 가진력에 대한 응답을 얻는다.

$$\ddot{q}_r(t) + 2\zeta\omega_r\dot{q}_r(t) + \omega_r^2q_r(t) = N_r(t) \quad (25)$$

### 4.3 회전자 구조의 모델링

전동기의 진동에 대한 초기 연구에서 전동기의 고정자(내전형인 경우) 구조는 간단한 2차원 환형 구조로 모델링 되었으며 이에 대한 수치 해석적, 실험적 접근 등이 이루어져 왔다 [13]. 2차원 환형 구조는 산업용 유도기 및 동기기 등의 중대형 원통형 전동기에 적용될 경우 실제 결과와 큰 오차가 없으나, 본 연구에서 다루는 외전형 브러시리스 직류 전동기의 회전자의 경우 축 방향 길이가 상대적으로 짧고 샤프트 부분의 변형이 중요하기 때문에 더 세부적인 3차원 모델링이 필요하다.

본 논문에서는 구조해석을 위한 전동기의 회전자 모델을 그림 3과 같이 구성하였다. 회전자 모델은 샤프트 및 베어링부, 요크 및 영구자석부, 테이블 부로 구성되어 있으며, 각 부분의 결합 상태는 무한 강성으로 연결된 것으로 가정하였다. 경계조건은 샤프트의 하단 중심부를 세 방향의 병진 운동에 대해 고정시키고, 베어링을 등가 강성으로 가정하여 샤프트 측면에 인가되는 것으로 하였다. 회전자 모델의 주요한 치수를 그림에 표시하였으며, 이를 상용 유한요소 해석 패키지 ABAQUS로 유한요소 모델링하였다[14].

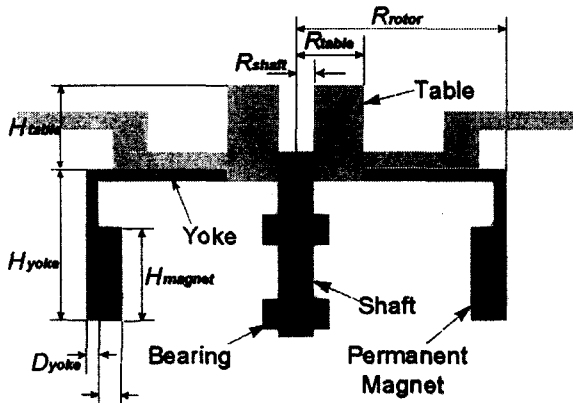
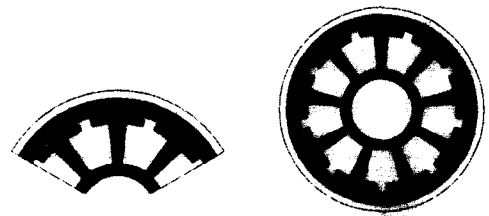


그림 3. 브러시리스 직류 전동기 회전자 부분의 구조 모델의 기략도  
Fig 3. The rotor structure model of BLDC motor

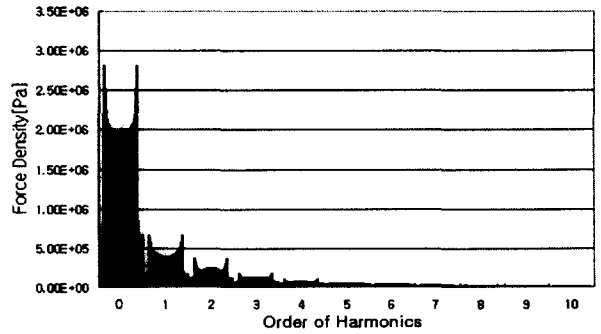
## 5. 해석 결과 및 검토

### 5.1 자기 가진력의 분포

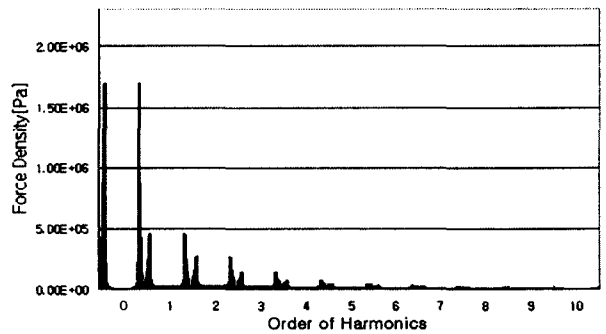
편심이 없는 경우와 편심이 존재하는 경우( $\epsilon=0.5$ )에 대하여 각각 자기 가진력 분포를 해석하였다. 해석 전동기의 모델은 그림 4에 보이는 바와 같으며, 편심이 없는 경우는 120도 영역에 대해 주기 경계조건을 가정하여 해석하였으며, 편심이 있는 경우



(a) 120도 모델 (b) 360도 모델  
그림 4. 브러시리스 직류 전동기 해석 모델  
Fig 4 Analysis models of BLDC motor

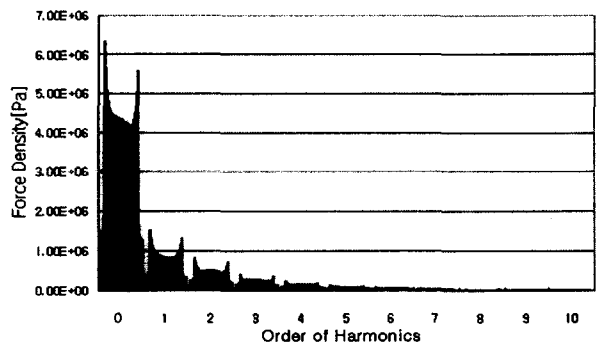


(a) 반경 방향



(b) 접선 방향

그림 5. 편심이 없을 경우의 가진력 분포 스펙트럼  
Fig 5 Exciting force spectrum without the existence of an eccentricity



(a)  $0^\circ \leq \theta < 40^\circ$

그림 6. 편심이 있을 경우의 반경방향 가진력 분포 스펙트럼  
Fig 6. Exciting force spectrum with the existence of an eccentricity

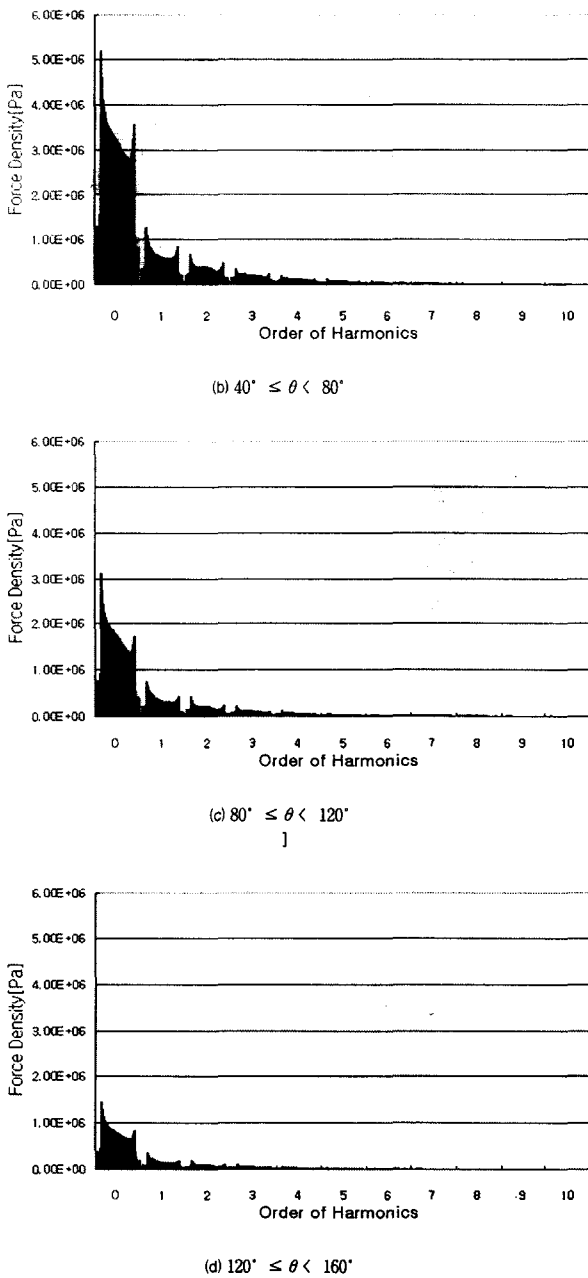


그림 6. 편심이 있을 경우의 반경방향 가진력 분포 스펙트럼(계속)

Fig. 6. Exciting force spectrum with the existence of an eccentricity(Continued)

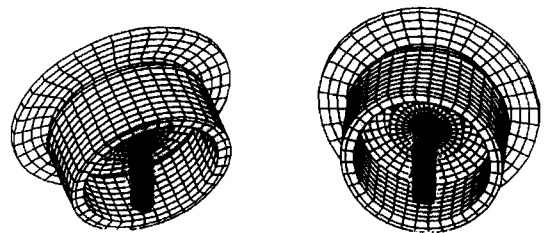
는 360도 전 영역에 대해 해석하였다. 자화 분포는 반경 방향 균일 자화로 가정하였다. 그림 5와 6에 회전자에 작용하는 가진력 분포의 스펙트럼을 보인다. 각 스펙트럼에서 기본 주파수 성분은 3.2 절에서 명시한 바와 같이 전동기의 회전 주파수의 극 수배이며, 각 주파수 성분마다 슬롯 피치( $40^\circ$ )에 걸친 가진력 공간분포가 도시되어 있다. 모든 경우에 대하여 슬롯 양 끝에서의 가진력의 크기가 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 한편 스펙트럼 분포로부터 편심이 없는 경우와 편심이 있는 경우의 차이점을 알 수 있다. 즉, 편심이 없는 경우 가진력 분포는 각 슬롯 피치에 대해 모두 일정하며, 결과적으로 각 슬롯 피치에서 회전자에 가해지는 힘의 크기가 균일하다.

그러나 편심이 있는 경우 가진력 분포는 각 슬롯 피치마다 다르게 나타나며, 전체적인 반경방향 평균력에 불균형을 초래한다.

### 5.2 고유 주파수 및 고유 모드

ABAQUS의 20개 절점을 갖는 육면체 요소인 C3D20요소를 이용하여 기본 모델을 구성하고 이에 대한 모드 해석을 수행하였다. 이 중 가장 낮은 주파수의 고유 모드는 강체 모드(0 Hz)로 모드 벡터에서의 변형은 없고, 수학적으로 경계조건이 불충분하여 시스템 행렬이 양의 반정부호인 경우 나타나는 모드로 실제적인 의미는 없다. 다음으로 나타나는 모드는 피치모드(1249Hz)로 샤프트가 회전축에 고정된 채 회전자 구조가 전체적으로 축방향에 대해 기울어지는 모드이며 이때 테이블 및 요크, 자석부는 강체와 같이 나타난다. 이 모드는 고유 주파수의 크기가 현재 모델의 자기 가진력 주파수대역과 비슷하여 자기 가진력의 국부적인 가진으로 진동이 야기될 수 있는 모드이다. 한편 4740Hz에서 편심 모드가 나타나는데, 피치모드와 마찬가지로 회전자의 요크와 테이블 부는 강체로 변형이 없는 모드 형상을 보인다. 그러나 샤프트가 전체적으로 중심축에서 벗어나 있으며 테이블 및 요크 부분은 단지 샤프트의 굽힘에 의해 중심에서 평행하게 벗어난 형상을 보인다. 이 모드는 가진력의 편향이 있을 경우 중요한 진동원으로 나타날 수 있다. 일반적인 2차원 회전기 모델의 구조해석에서 주요한 모드로 나타나는 요크부의 변형 모드는 본 모델에서는 13240Hz의 고유 주파수에서 나타나며, 고유 주파수가 매우 크기 때문에 실제적인 중요성은 없다. 또한, 테이블 부분이 z방향(수직 방향)으로 변형되는 모드가 두 개 나타나는데, 이들은 z방향 가진에 의해 진동이 일어날 수 있는 가능성을 보인다.

그림 7에 각 모드에 대한 모드 형상을 보인다. 여기서 테이블 변형 모드와 같이 중심축에 대칭인 모드는 하나의 고유 주파수/고유 모드 벡터로 나타나며, 피치 모드와 같이 중심축에 대칭이 아닌 모드는 동일한 변형이면서 그 방향만이 다른 고유 주파수/고유 모드 벡터가 쌍으로 나타난다.



(a) 피치 모드 (1249 Hz)

그림 7. (-1, -1, -1) 방향에서의 회전자 구조의 모드 형상 및 C3D20요소 해석시 고유 주파수

Fig. 7. Natural modes and their natural frequencies of the rotor structure in the (-1, -1, -1) direction

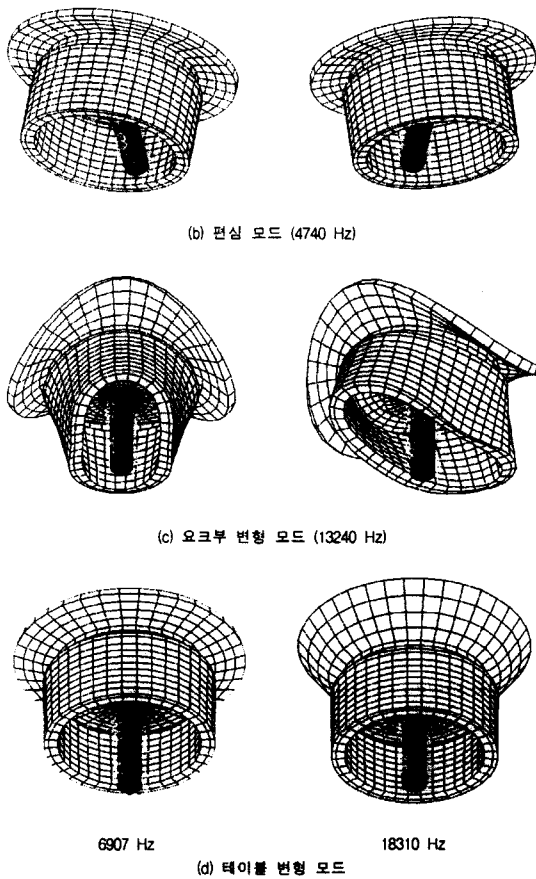


그림 7. (-1, -1, -1) 방향에서의 회전자 구조의 모드 형상 및 C3D20요소 해석시 고유 주파수(계속)  
 Fig 7. Natural modes and their natural frequencies of the rotor structure in the (-1, -1, -1) direction (continued)

5.3 가진력 입력에 따른 응답

5.1 절에서 구한 반경 방향 가진력을 회전자 구조에 인가하여 회전자 구조의 변형 및 응답 스펙트럼을 얻었다. 이로부터 가진력 성분이 구조 진동에 어떤 식으로 영향을 미치는지 구체적으로 예측할 수 있다. 이론적으로는 4.2 절에서 논한 바와 같이 모드 당 가진력 입력에 따른 응답의 선형 결합의 형태로 전체 응답이 나타나며, 이를 ABAQUS의 STEADY STATE DYNAMICS를 이용하여 구하였다[14].

편심이 없는 경우의 가진력 분포와 편심이 있는 경우 ( $\epsilon=0.5$ )의 반경 방향 가진력 분포를 입력하여 보았다. 구조의 변형은 전체 요소 및 절점들 각각의 변형으로 나타나며 구조의 일부분만이 특정 가진에 의해 변형되는 경우도 있으나, 회전자 구조와 같은 경우 관심 있는 주파수 범위에서는 전체적인 변형이 큰 경우 각 절점의 변위 및 가속도 역시 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 정량적인 가속도 스펙트럼을 추출하기 위해 그림 8과 같이 내부 영구자석 부분의 한 점을 측정점으로 잡고 그림 9와 같은 가속도 스펙트럼을 구하였다.

먼저 편심이 없는 경우 가속도 응답 스펙트럼에서는 주파수에 따른 응답이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 실

제로 관심 주파수 범위에서 주어진 고유 모드들은 편심이 없는 경우의 가진에 대해 거의 영향을 받지 않음을 의미하는데, 편심이 없는 경우 가진력의 분포가 전체 공극 영역에 대하여 대칭적으로 인가되므로 피치 모드나 편심 모드와 같이 자석 및 요크부가 강체로 나타나는 모드에서는 그 영향이 없고, 자석 및 요크부의 형상 변형이 나타나는 요크 변형 모드는 그 고유 주파수가 매우 높으므로 가진력의 고조파 성분이 기여를 못하기 때문이다.

편심이 있는 경우 가속도 응답 스펙트럼에서는 편심 모드 (4740 Hz) 부근에서의 가속도 응답이 상대적으로 매우 크게 나타난다. 피치 모드(1249 Hz)가 더 낮은 고유 주파수를 갖는 모드임에도 불구하고 그 응답이 작게 나타나는 이유는 가진의 방향이 반경 방향이기 때문이다. 즉, 피치 모드의 변형은 회전자의 중심 축의 편향 없이 요크 및 테이블 부가  $r-z$  평면의 수직 축을 중심으로 회전하는 양상을 보이기 때문에 반경방향 가진 만으로는 이러한 변형이 나타나지 않는다. 한편, 편심 모드의 모드 형상은 샤프트가 중심에서 벗어나 회전자 구조 자체가 전체적으로 중심축에서 벗어나는 양상을 보이므로 불평형 가진에 대해 큰 응답을 보인다. 따라서 본 소형 브러시리스 직류 전동기에서의 해석 모델은 편심이 있는 경우의 가진에 대해 편심 모드(4740 Hz)에서의 진동이 전자기 가진에 의한 진동 특성에서 가장 중요함을 알 수 있다. 그림 10에 편심 모드에서의 두 방향에서의 회전자 구조의 변형 형상을 보인다.

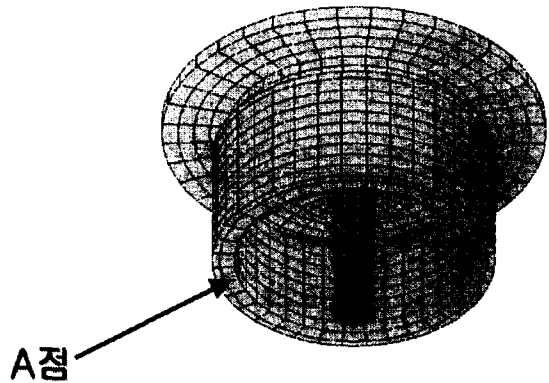


그림 8. 회전자 구조변형에 따른 가속도 응답 해석의 측정점  
 Fig 8. A measurement point of the acceleration response analysis according to the deformation of the rotor structure

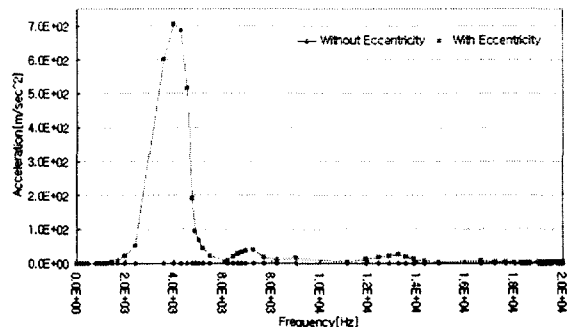
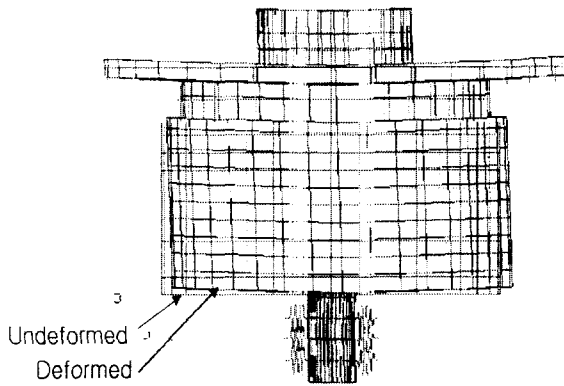
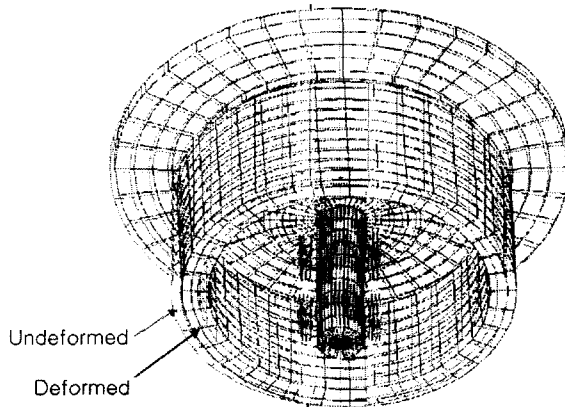


그림 9. A점에서의 가진력 인가에 따른 가속도 응답 스펙트럼  
 Fig 9. Acceleration response spectrum of the point A by the exciting force



(a) (0,-1,0) 방향



(b) (0,-1,-1) 방향

그림 10. 편심이 있는 경우의 가진력 입력시 편심 모드 부근에서의 변형  
 Fig 10. Deformation pattern of the rotor structure by the exciting force with eccentricity in the eccentric mode

## 6. 결 론

본 논문에서는 DVD ROM 구동용 소형 스피들 브러시리스 직류 전동기의 자기 가진력에 의한 진동 현상의 해석에 대한 전반적인 과정을 제시하였다. 이 과정에는 전자기 해석을 통한 가진력 분포의 해석과 전동기 구조 자체의 모드 해석 및 가진에 대한 응답 특성 해석의 과정이 포함된다. 자기 가진력 분포의 해석은 릴렉턴스 방법을 이용한 자체 해석과 맥스웰 응력 텐서법을 적용하였으며, 편심이 없는 이상적인 경우와 편심이 있는 경우에 대하여 각각 가진력 분포를 얻었다. 다음으로 전동기의 회전자 구조에 대한 모드 해석과 자기 가진력에 의한 응답 특성을 유한요소법을 이용해 수행하였다. 소형 스피들 전동기의 구조는 현재까지 주로 쓰이는 전동기 구조 해석의 주요 모델인 2차원 단순 원통형 모델로 구현하기에 어려움이 있어, 본 연구에서는 3차원의 단순화된 전동기 회전자 구조를 모델링하여 모드 해석을 수행하였다.

구조해석을 가진력 해석 결과와 결부시켜 다음의 사실들을 도출할 수 있었다. 2차원 원통형 모델에서와 달리 3차원 회전자 구조의 모드해석에서는 중심축으로부터 요크 및 테이블 부가 기울어지는 형태의 피치모드와 샤프트가 기울어지면

서 테이블 및 요크부가 중심축에서 벗어나는 편심모드가 가장 낮은 고유 모드로 나타나며, 요크 부분의 변형 모드는 매우 높은 고유 주파수를 갖는다. 최종적으로 앞에서 해석한 자기 가진력을 회전자 구조에 입력한 결과, 편심이 없는 경우의 이상적인 가진력 분포시에는 모든 모드에서 진동 특성이 거의 나타나지 않으나, 편심이 있는 가진력 분포를 입력한 경우 편심 모드에서 높은 진동 응답을 보이는 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 LG연암재단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. J. Yang, *Low Noise Electrical Machines*, Clarendon Press, Oxford, 1981.
- [2] P.L. Timar et al., *Noise and Vibration of Electrical Machines*, 1989, Elsevier.
- [3] R. Belmans et al., *Vibrations and Audible Noise in Alternating Current Machines*, 1988, Kluwer Academic Publishers.
- [4] Herbert H. Woodson, James R. Melcher, *Electromechanical Dynamics, Part 2: Fields, Forces, and Motion*, Robert E. Krieger Publishing Company, 1985, chap 8, pp. 445-447.
- [5] R.S. Rahman, D.K. Lieu, *The Origin of Permanent Magnet Induced Vibration in Electric Machines*, *Trans. of the ASME*, Vol. 113, October 1991, pp. 476-481.
- [6] Gunhee Jang, *Analysis of Magnetic Force and Torque in Brushless DC Motor*, 1993.
- [7] 이장무, *모드해석의 이론과 응용*, 제 2판 수정본, 비매품, 1998.
- [8] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석모터의 자체해석", 대한 전기학회논문지, 제43권, 9호, pp. 1432-1439, 1994. 9.
- [9] J. Perho, E. Ritchie, *Analysis of a Permanent Magnet Machine Using Reluctance Network Method*, *International Conference on Electrical Machine, ICEM96* Vigo, September 1996, Vol.1, pp. 44-47.
- [10] Vlado Ostovic, *Dynamics of Saturated Electric Machines*, Springer Verlag, 1989, chap 2, pp. 6-29.
- [11] Chong-Won Lee, *Vibration Analysis of Rotors*, 1993, Kluwer Academic Publishers.
- [12] L. Meirovich, *Elements of Vibration Analysis*, McGraw-Hill, 1986, chap 4.
- [13] C. Couturier, B. Cassoret, P. Witczak, J.F. Brudny, *A Contribution to The Study of Induction Machine Stator Resonance Frequencies*, *International Conference on Electrical Machine, ICEM 98*, Vol. 1, pp. 485-489, September 1998.
- [14] *ABAQUS/Standard Users Manual Version 5.7*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.



저 자 소 개



한 기 진 (韓 基 晉)

1975년 생. 1998년 서울대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 LG이노텍 연구소 연구원

Tel : 031-288-9352, Fax : 031-285-0199

E-mail : kjhan@lginnotek.com



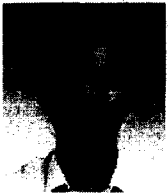
정 현 교 (鄭 炫 敎)

1955년 생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년-1989년 뉴욕 Polytechnic Univ. 객원 교수. 1984년-1993년 강원대 전기공학과 부교수. 현재 서울대 전기공학

부 교수

Tel : 02-880-7262, Fax : 02-878-1452

E-mail : hkjung@snu.ac.kr



조 한 삼 (曹 翰 삼)

1967년 생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년-1999년 LG전자 주임연구원. 현재 서울대 대학원 전기공학부 박사과정

Tel : 02-880-7262, Fax : 02-878-1452

E-mail : hansam@hanimail.com