

# 새로운 형태의 휴대폰용 2상 진동모터의 설계

## Novel Design of Two-Phase PM Vibration Motor Used for Cell-Phones

이홍주\*·김광석\*·이창민\*·황건용\*\*·황상문†

Hong-Joo Lee, Kwang-Suk Kim, Chang-Min Lee, Gun-Yong Hwang and Sang-Moon Hwang

**Key Words** : vibration motor(진동모터), coin motor(동전형 모터), finite element analysis(유한 요소해석)

### ABSTRACT

Cell-phone becomes a necessary communication device in modern society. However, a paging signal by a sound transducer often acts as an unpleasant noise, thus necessitating a paging signal by a vibration motor. The conventional flat type vibration motor uses three-phase windings with three phase coils. In this article, a new design of a vibration motor using a V connection with two phase coils is presented, increasing mass productivity. For electromagnetic field analysis, due to the motor symmetry, two-dimensional modeling can be implemented for fast computation, and performance is predicted by the finite element method. The winding distribution angle turns out to be the most important design parameter for the elimination of dead points, and a new coil configuration is suggested which has no adverse effect on motor size and weight. Experimental tests of vibration confirm the validity of the proposed design.

## 1. 서론

증가하는 고객의 요구로 인해, 휴대전화는 기존의 성능과 동일하거나 보다 월등하면서 그 크기는 점점 작아질 필요성이 대두되고 있다. 이러한 실정에 맞추어 볼 때 휴대폰 내부에 장착되는 여러 가지 서브 부품들의 크기 또한 동일한 성능을 요구하면서 소형화를 시켜나가야 하는 실정이다. 휴대폰의 착신 감지 장치로써 사용되는 진동 모터 또한 예외는 아니다. 그러나 무리한 소형화를 하다 보면 기존의 성능을 보다 저하시키는 문제점을 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해소하기 위해 새로운 구조를 가지는 진동자를 제시하고자 한다.

기존의 진동모터는 코일이 3 개 있는 3상 Y형 진동모터가 주류를 이루고 있다. 그러나, 이러한 모터는 크기를 줄이는데 한계가 있다. 본 논문에서는 기존의 3상 구조를 2상 구조로 변형하여, 즉 과감하게 1상을 제거함으로써 소형화 추세에 부응하면서도 기존의 성능을 결코 저하시키지 않는 2상 V형 진동 모터를 제시하고 설계 및 제작을 추진하였다. 이 모터는 기존의 2상 진동모터와 같이 토크가 작용하지 않는 지점(Dead zone)이 존재하지 않으며, 3상 진동모터에 비해 더욱 간단한 구조를 가지고 있다. 그래서, 더 낮은 비용으로 생산성을 높일 수 있다.

자속밀도 분포, 전류파형, 역기전력, 출력토크와 같이 영구자석 모터의 특성에 대한 연구는 많이 되어 왔다.<sup>(1)-(3)</sup> 이 논문에서는 링 타입의 영구자석을 가진 축방향모터의 자기 분포를 계산하는 데 있어서 유한요소해석(Finite Element Analysis: FEA)이 사용되었으며, 축방향의 자속밀도를 이용하는 코인형 진동모터를 2차원 유한요소해석을 통해 해석하고 설계하는 기법을 제시하였다. 그리고, 새로운 형태의 2상 진동모터를 제시하고자 한다.

## 2. 해석 방법

진동은 편심을 가진 회전자에 의해 발생한다. 가진력은 다음과 같이 편심량과 회전속도의 함수로 표현된다.

$$F = me\omega^2 \quad (1)$$

여기서  $m$ ,  $e$ ,  $\omega$ 는 각각 회전자의 질량, 편심량, 회전속도이다. 수식에서 알 수 있듯이, 가진력은 각속도의 제곱에 비례하므로, 회전자의 회전속도가 가장 중요한 인자이다. 회전 속도는 운동방정식에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f \quad (2)$$

† 황상문; 부산대학교 기계공학부  
E-mail : shwang@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510- 3204, Fax : (051) 581-3104

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 영산대학교 컴퓨터공학과

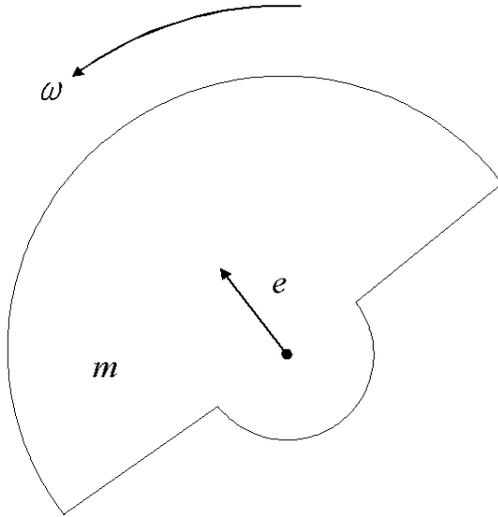


Fig. 1. Unbalanced force

여기서  $T, J, D, T_f$ 는 각각 출력토크, 관성모멘트, 감쇠계수, 마찰토크를 가리킨다. 정적 상태, 다시 말해 회전자의 회전속도가 일정하다면, 회전자의 회전속도를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega = \frac{T - T_f}{D} \quad (3)$$

마찰 토크와 감쇠계수는 모터를 기계적인 관점에서 접근할 수 있으나, 출력토크는 가진력을 증가시키기 위해 전기적인 관점에서 접근이 가능하며, 관련수식은 다음과 같다.

$$T\omega = \sum_j e_j i_j \quad (4)$$

여기서,  $e_j$ 와  $i_j$ 는 각각 각 코일당 상역기전력과 상전류이다. 역기전력은 자속쇄교량의 시간에 대한 변화율로 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 자속쇄교량은 자속밀도와 위치의 함수로 표현이 가능하다.

$$e_j = \frac{d\lambda_j}{dt} = \frac{d\lambda_j}{d\theta} \omega \quad (5)$$

$$\lambda_j = N \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}_j = Nr \int \mathbf{B} \cdot d\theta_j \quad (6)$$

상전류는 다음과 같이 전압방정식을 통해 구할 수 있다.

$$V = \sum_j \left( Ri_j + L \frac{di_j}{dt} + e_j \right) \quad (7)$$

여기서,  $V, R, L$ 은 각각 각 코일의 입력전압, 저항, 인덕턴스이다. 코일의 저항은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (8)$$

여기서,  $l, \sigma, S$ 는 각각 턴수를 고려한 코일의 길이, 고유도전율, 단면적이다. 코일의 길이와 단면적은 코일의 형상에 관한 변수이지만, 고유도전율은 코일의 재료에 따른 특성이다. 인덕턴스의 정의는 다음과 같다.

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (9)$$

코어리스 모터의 경우 전류로 인해 발생하는 자속쇄교량은 영구자석에 의해 발생하는 자속쇄교량에 비해 매우작으므로 인덕턴스를 무시할 수 있다. 인덕턴스항을 제외하면 상전류를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V = \sum_j (Ri_j + e_j) \quad (10)$$

출력토크를 증가시켜 진동을 최소화 시키기 위해서는 역기전력상수를 최대화해야 한다.

여기서,  $i_j, N, B, V, A, R, L$ 은 각각 각 코일의 자속밀도, 턴수, 자속밀도, 입력전압, 코일 단면적, 저항, 인덕턴스이다.

### 3. 2차원 유한요소 해석

전자기 시스템을 해석하기 위해서 2차원 유한요소법(Finite Element Analysis: FEA)이 사용되었으며, FEA에 사용된 정자계 지배방정식인 맥스웰방정식을 자기벡터포텐셜의 함수로 표현하면 아래와 같다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s + \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{M}) \quad (11)$$

여기서  $\mu, \mathbf{A}, \mathbf{J}_s, \mathbf{M}$ 은 각각 투자율, 자기벡터포텐

설, 전류밀도, 자기모멘트벡터이다. 자속밀도는 자기벡터포텐셜의 컬 형태로 표현이 가능하며 수식은 아래와 같다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (12)$$

여기서  $\mathbf{A}$  는 자기벡터포텐셜이다. 그리고, 자속쇄교량은 수식(6)과 스톡 이론(Stoke's theorem)을 이용하여 다음과 같이 자기벡터포텐셜의 형태로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \lambda_j &= N \int (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S}_j \\ &= N \int r \int dA = N \int r (A_1 - A_2) \end{aligned} \quad (13)$$

마찬가지로 역기전력도 자기벡터 포텐셜의 형태로 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} e_j &= \omega \frac{d}{d\theta} \left( N \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \right) \\ &= N \omega \int r \frac{d}{d\theta} (A_1 - A_2) \end{aligned} \quad (14)$$

역기전력은 속도에 비례하므로, 회전속도로 나누면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_e = N \int r \sum_j \frac{d}{d\theta} (A_{j1} - A_{j2}) \quad (15)$$

출력토크를 자기벡터 포텐셜의 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$T = \sum_j N i_j \int r \frac{d}{d\theta} (A_{j1} - A_{j2}) \quad (16)$$

역기전력은 속도에 비례하므로, 회전속도로 나누면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_t = N \int r \sum_j \frac{d}{d\theta} (A_{j1} - A_{j2}) \quad (17)$$

수식 (15)와 수식 (17)을 살펴보면 역기전력 상수와 토크 상수가 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 토크의 출력토크를 키우기 위해서는 역기전력 상수를 키워야 한다.

그림 2 는 2 상 진동모터의 구조를 3 차원으로 보여준다. 코일이 2 상인 것을 제외하고는 3 상 진동모터와 동일한 구조를 가지고 있다. 축방향 모터에 있어서 3 차원 문제를 2 차원 문제로 바꾸기 위해서 자기회로를 반경방향으로 여러 번 나누어서 회전방향 단면을 적분하였다. 그림 3 은 2 차원 문제로 바꾸기 위해서 회전방향으로 잘린 단면의 형상을 보여준다. 그림 4 는 그림 1 에서 보여준 기존의 3 상 진동모터와 2 상 진동모터의 단면을 비교한 것이며, 그림 5 는 기존의 3 상 진동모터와 논문에서 제시한 2 상 진동모터의 권선방식을 비교한 것이다. 두 모터의 차이점을 표 1 에서 보여준다. 제시한 타입은 일정한 정류를 통해 각 코일이 교번하여 도통되는 V 형이 적용되었다. 그리고, 그림 6 에서 3 상 진동모터와 2 상 진동모터의 이상적인 특성, 즉 자속밀도, 자속쇄교량, 역기전력, 전류파형, 출력토크를 비교하여 보여준다. 이 것은 2 상 진동모터가 3 상 진동모터에 비해 더 간

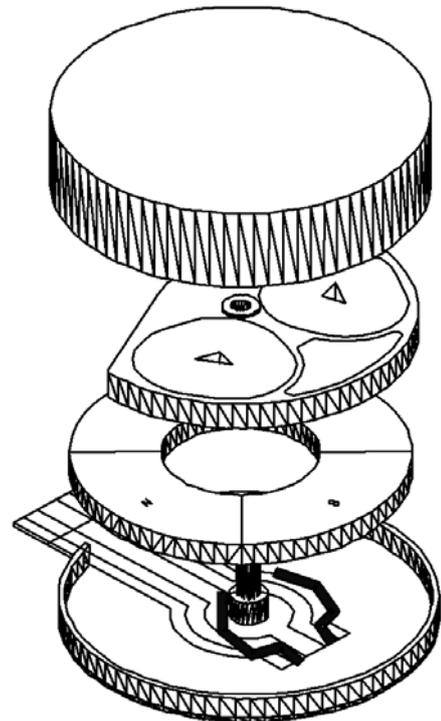


Fig. 2. Schematic of two-phase vibration motor

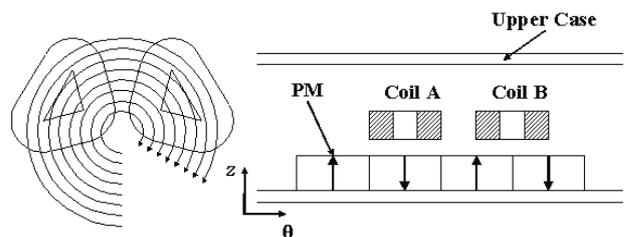


Fig. 3. Modeling for two dimensional FEA (a)2-D geometric approximation, (b)2-D cross section for FEA

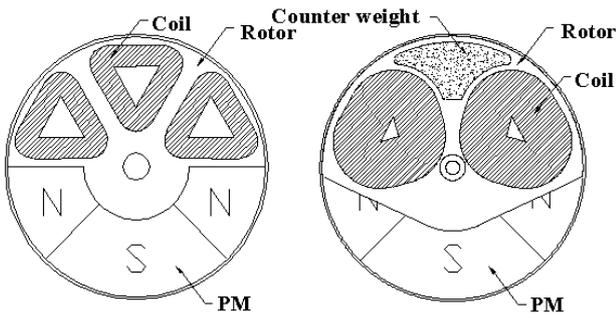


Fig. 4. Cross section of each type; (a) three phase vibration motor, (b) two phase vibration motor

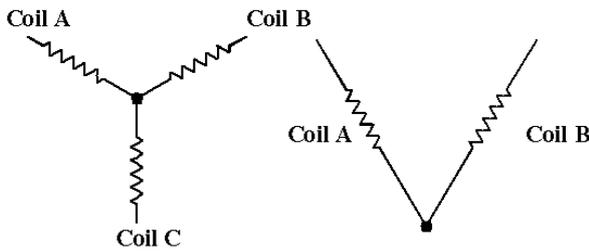


Fig. 5. Connections of winding coils; (a) Y: three phase, (b) V: two phase

Table I. Characteristic features of vibration motors

	conventional	proposed
number of poles	4	4
number of coils	3	2
dimension	Φ10Xt3.4	Φ10Xt3.4
connection	60°	100°
number of active coils	always 2	1 or 2

단한 구조를 가지면서도 출력토크 측면에서 크게 떨어지지 않는다는 것을 보여준다. 그러나, 그림 6의 2 상 진동모터의 토크파형을 살펴보면 60 도, 150 도 부근에서 기동토크의 감소로 인해 기동이 되는 않는 지점이 존재할 가능성이 있다는 단점이 있다.

#### 4. 코일 형상 설계

최적 설계를 수행하기 전에 축방향과 반경방향으로 자속밀도의 변화를 살펴보았다. 그 결과는 그림 7 과 8 에 나타나 있다. 그림 7 과 같이 영구자석에 가까울수록 자속밀도가 커지는 것을 볼 수 있으며, 그림 8 과 같이 반경이 커질수록 영구자석이 커지는 효과를 가져오므로 자속밀도가 커지는 경향을 확인할 수 있다. 토크특성에 가장 밀접한 설계변수 대부분이 모터 크기상 제한으로 인해 쉽게 설계하기 힘들다. 그러므로, 코일의 형상이 크

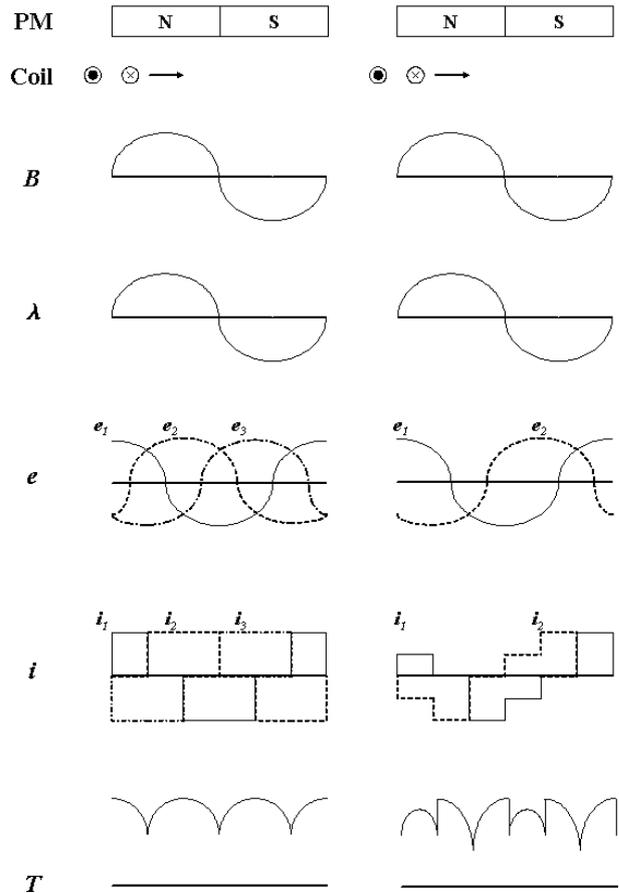


Fig. 6. Idealized characteristic of three phase & two phase vibration motor

기와 무게의 제약에 상대적으로 영향을 적게 받으므로 출력토크를 증가시킬 수 있는 가장 중요한 설계변수 중 하나이다. 그림 9 는 코일 형상에 대한 설계변수를 보여준다. 설계변수 중 코일배치각에 대한 민감도 해석을 수행하였으며, 그 결과로 그림 10 과 표 2 에서 역기전력 상수의 변화를 나타내었다. 마찬가지로, 코일 피치에 대해서도 수행하였으며, 그 결과를 그림 11 과 표 3 에 나타내었다. 역기전력 상수의 최소값은 그림 6 에서 알 수 있듯이 모터의 기동특성과 매우 밀접한 관계가 있으며, 역기전력 상수의 평균값은 출력토크의 평균값이므로, 진동량에 기여를 한다. 코일 피치가 100 도일 경우 역기전력 상수의 최소값과 평균값이 모두 최대가 되지만, 코일 배치각의 경우에는 130 도일 때 역기전력 상수의 평균값과 최소값이 최대가 되는 것을 확인할 수 있었다. 코일 배치각이 130 도까지는 코일 배치각이 커질수록 역기전력 상수가 증가하다가 그 이상에서는 회전각이 90 도에서 120 도 사이에서 역기전력이 감소하는 것을 알 수 있다. 모터가 기동만 한다면 역기전력

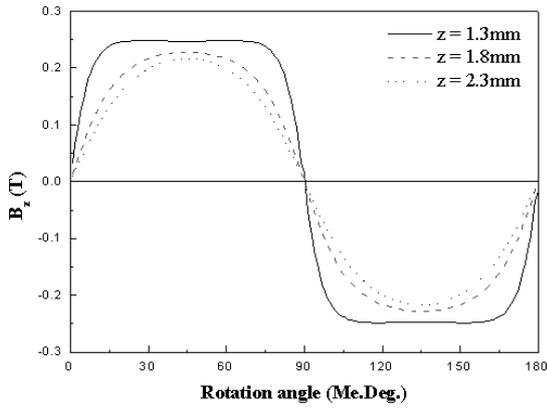


Fig. 7. Flux density according to axial position

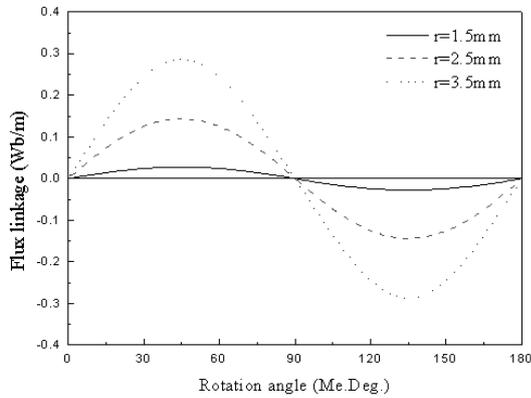


Fig. 8. Flux density according to radial position

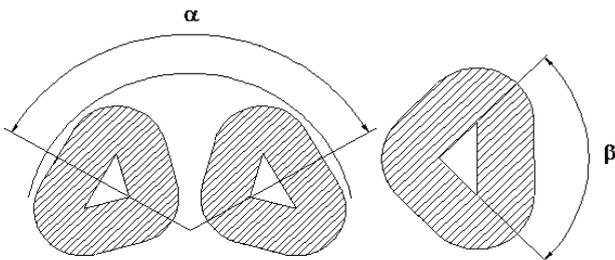


Fig. 9. Design parameters;

(a)  $\alpha$ : coil distribution angle, (b)  $\beta$ : coil pitch

상수의 평균값이 진동량에 비례하므로, 본 논문에서 서는 역기전력 상수의 평균값이 더욱 중요한 변수로 판단된다. 따라서, 코일 형상에 관한 설계변수로 모터의 기동특성을 개선이 가능하다는 것을 확인하였다. 그림 12는 코일 형상 설계 후 역기전력파형이 어떻게 변화하였는지 보여준다. 역기전력 상수의 최소값이 21% 증가하였다.

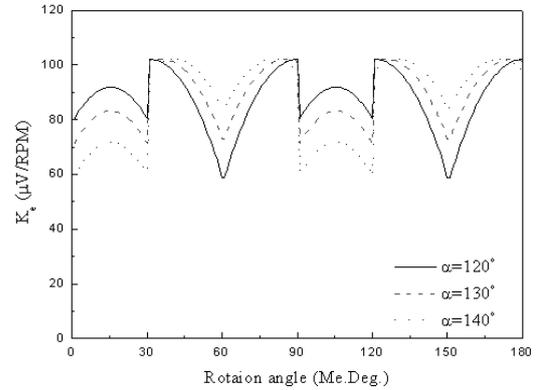


Fig. 10. Back-EMF constant according to coil distribution angle

Table II. List of back-EMF constant according to coil distribution angle

$\alpha$	avg. of $K_e$ ( $\mu\text{V}/\text{rpm}$ )	min. of $K_e$ ( $\mu\text{V}/\text{rpm}$ )
100°	77.5	22.6
110°	84.0	41.9
120°	87.8	59.0
130°	89.0	71.4
140°	87.6	59.9

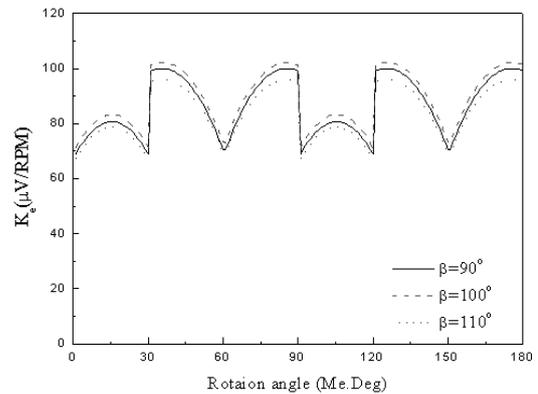


Fig. 11. Back-EMF constant according to coil pitch

Table III. List of back-EMF constant according to coil pitch

$\beta$	avg. of $K_e$ ( $\mu\text{V}/\text{rpm}$ )	min. of $K_e$ ( $\mu\text{V}/\text{rpm}$ )
80°	82.4	65.1
90°	86.5	69.1
100°	89.0	71.4
110°	83.9	67.4
120°	75.5	61.2

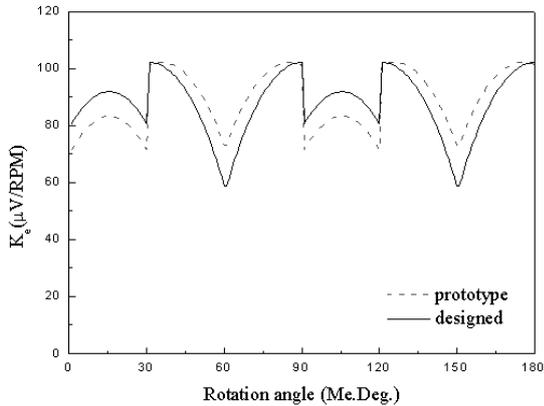


Fig. 12. Back-EMF constant of prototype and designed model

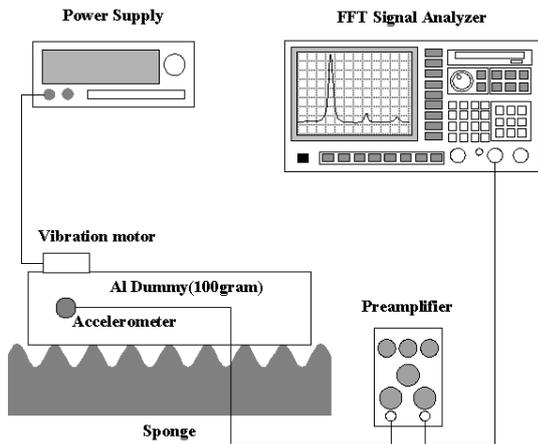


Fig. 13. Test setup for acceleration measurements of vibration motor

Table IV. Instruments used for vibration test

instruments	type
accelerometer	B&K type 4393
preamplifier	B&K type 2635
FFT signal analyzer	HP 35670A
power supply	HP E3642
test dummy	aluminum 110 X 40 X 18 (mm <sup>3</sup> )

Table V. Test results

	conventional	proposed
RPM	11760	12540
voltage (V)	3.0	3.0
current (mA)	60	70
Acceleration (g)	2.14	2.36

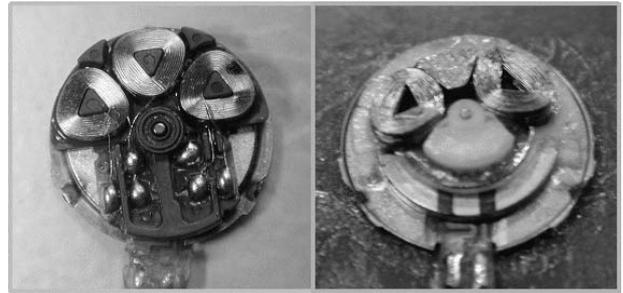


Fig. 14. Photographs of each type; (a)conventional three phase motor, (b)designed two phase motor

## 5. 진동실험

진동모터의 가속도는 가장 일반적인 성능측정 요소이다. 진동측정에 있어서, 실험장치 구성은 그림 13 과 표 4 와 같으며,<sup>(4)</sup> 표 5 에서는 진동실험결과를 보여준다. 제시한 타입의 진동모터가 회전속도를 증가시켜 더욱 큰 가속도를 가지는 것을 알 수 있다. 입력전류 또한 3 상 진동모터에 비해 약간 커서 더 큰 진동량이 발생한 것으로 보인다. 그림 14 는 기존의 3 상 진동모터와 코일 형상이 최적화된 2 상 진동모터의 사진을 보여준다. 그림에서 보듯이 2 상 진동모터는 코일간의 공간을 활용해 무게를 가중시킴으로써 더욱 효율적인 진동 발생을 유도할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문은 새로운 형태의 2 상 V 형 권선방식을 가진 휴대폰용 진동모터를 제시한다. 해석과 실험 결과에 따라 본 논문에서 제시한 모터가 기존타입에 비해 성능이 크게 떨어지지 않으면서도 구조가 간단하여 소형화에 유리하다. 그러나, 토크리플이 심해 진동과 소음을 수반하므로 출력토크가 일정해야 하는 모터로는 부적합한 단점이 있지만, 진동모터로는 적합한 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- (1) M. Alhamadi and N Demerdash, IEEE Trans. Energy Conversion 9, 15 (1994).
- (2) Z. J. Liu, C. Bi, H. C. Tan, and T. S. Low, IEEE Trans. Magn. 30, 4317 (1994).
- (3) E. P. Furlani, IEEE Trans. Magn. 28, 2061 (1992).
- (4) 신태명, 인진철, 2003, “ 휴대폰용 일체형 음향 및 진동 발생장치 개발을 위한 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 11 호, pp. 875~881.