

# 새로운 형태의 휴대폰용 브러쉬리스 센서리스 진동모터의 설계 Novel Design of Brushless and Sensorless 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** : sensorless(센서리스), vibration motor(진동모터), 유한요소해석(finite element analysis)

## ABSTRACT

With the wide use of mobile phones, a paging signal by a sound transducer acts as an environmental noise on many occasions, thus necessitating an alternative paging signal by a vibration motor. Conventional vibration motors employ three-phase windings with mechanical brushes for commutation. In this paper, a new one-phase brushless and sensorless vibration motor is introduced utilizing digital signal processor chips in cell-phones. For electromagnetic field analysis, two-dimensional modeling can be implemented to determine the back electromotive force using axisymmetric boundary conditions. Geometric design parameters, such as coil pitch and magnet pitch, are considered for performance optimization. Through the experiments, it is shown that the proposed design has the equivalent performance with reduced number of parts, thus enhancing manufacturing productivity and reducing manufacturing cost.

## 1. 서론

최근 정보통신 산업의 급격한 발전과 성장은 현대의 통신기술 발달로 이어지고 있으며, 이 중에서 주목할 만한 것 중의 하나가 개인용 이동 통신기기의 등장이다. 이러한 통신기기 중 가장 대표적인 것이 휴대폰이다. 휴대폰에 걸려온 통화 또는 메시지의 착신 신호를 감지하는 방법으로는 청각을 이용해 감지하는 음향모드와 촉각을 이용하는 진동모드가 있다. 진동모드에서는 편심을 이용하여 진동을 발생시키는 진동모터를 주로 사용하고 있다. 진동모터는 전기신호를 외부로부터 입력받아 진동모터 내부의 편심 질량을 일정속도로 회전시킴으로써 원심력에 의해 반지름 방향으로 진동을 발생시키는 액추에이터이다. 종래의 진동모터는 휴대폰 통신 단말기에 장착될 때 많은 공간을 필요로 하게 되며, 단말기 내부 구조의 조밀화에 따라 여러 부품을 장착하는 것이 더욱 어려워지고 있다. 고성능의 소형 진동모터의 필요성이 부각되고 있지만, 휴대폰 이동통신 단말기 내의 협소한 공간에 이들 부품을 장착하기에 많은 어려움 있으며, 본 논문에서 제시한 브러쉬리스 센서리스 진동모터는 이러한 문제점을 극복하기 위해 고안되었다. 또한, 휴대폰에 들어가는 기존의 디지털 신호 처리장치(Digital Signal Processor: DSP)를 이용하여 브러쉬도 필요없고 회전자의 위치를

감지할 센서도 필요없으며, 구조가 간단하여 제작이 쉽고 소형화에 유리하며, 비용면에서도 유리하다. 따라서, 새로운 형태의 진동모터를 제시하고, 진동모드를 발생시키는 진동모터를 사용함에 있어서 사용자가 느끼는 진동량을 극대화시키기 위한 설계방안을 제시하고자 한다.

## 2. 시작기

본 논문에서 제시한 모터는 일정한 시작점이 필요한 단상 구동이므로 두 개의 직렬로 연결된 코일을 가지고 있다. 그림 1(a)는 본 논문에서 제시하는 새로운 형태의 브러쉬리스 센서리스 진동모터의 구조를 3 차원 형상으로 보여주고 있다.

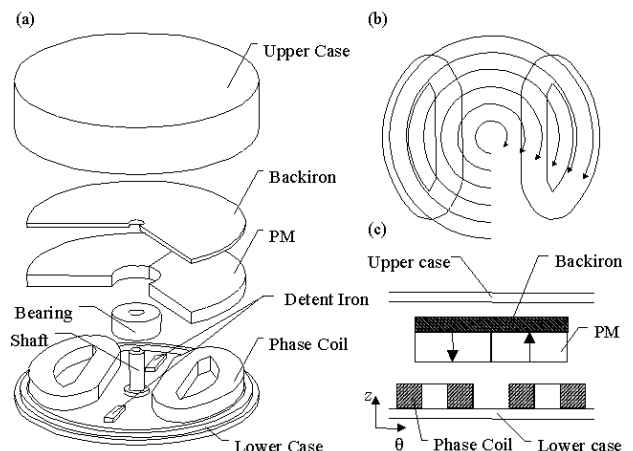


Fig. 1. Schematic of proposed vibration motor;  
(a)3-D schematic,  
(b)2-D geometric approximation,  
(c)2-D cross section for FEA

† 황상문; 부산대학교 기계공학부  
E-mail : shwang@pusan.ac.kr  
Tel : (051) 510-3204, Fax : (051) 581-3104  
\* 부산대학교 기계공학부  
\*\* 영산대학교 컴퓨터공학과

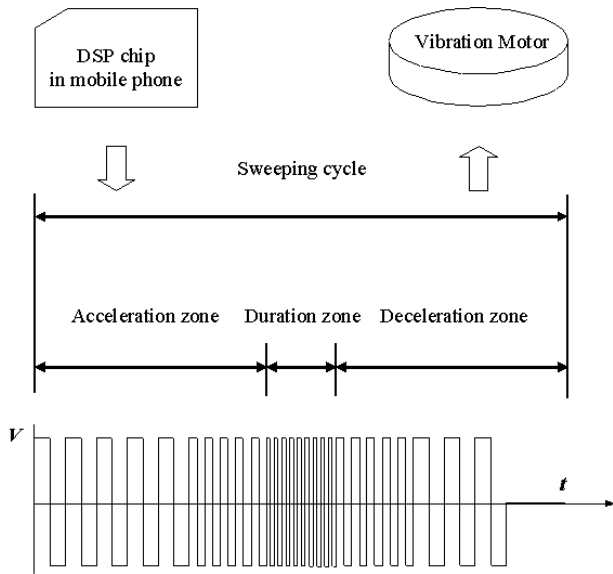


Fig. 2. Cyclic sweeping algorithm

back iron 과 영구자석이 편심을 가질 수 있는 형상이며, 코일의 2 개로 되어 있으나, 제어가 쉽도록 단상인 특징을 가지고 있다. 단상이기 때문에 토크가 0(zero)가 되는 지점이 존재하므로 초기 위치를 일정하게 하도록 detent iron 이 필요하다. 그림 1(a)에서 보이듯이 lower case 에 detent iron 이 붙어있어 코깅토크를 효과적으로 유도할 수 있다. 휴대폰의 호출기능은 특정지역이나, 특정상황에 있어 음향호출보다는 진동호출이 선호되는 경우가 많으며, 일정한 진동이 계속되기 보다는 그림 2 와 같이 가속구간, 지속구간과 감속구간으로 나누어져 반복되는 신호가 발생한다면, 사용자에게 더 큰 효과를 발휘하리라 예상되며, 진동모터의 수명에도 유리하다. 이러한 구간 반복 설정은 기존의 휴대폰에 내장되어 있는 DSP 칩을 이용하면 손쉽게 신호를 만들 수 있다. 코인형 모터의 경우 2 차원으로 해석이 가능하며, 그 방법은 그림 1. (b)에서 보듯이 반경방향으로 여러 번 나누어 해석한 후 합산하는 것이다. 이러한 방법은 축방향이나 회전방향으로만 자속밀도가 존재할 뿐, 반경방향으로는 자속밀도가 발생하지 않는다는 가정하에 가능하다. 그림 1 의 (c)는 그림 1(b)의 여러 단면중 하나를 보여주는 것이다.

### 3. 해석 이론

#### 기계 시스템

진동모터에 있어서 편심을 가진 회전자에 의해 발생하여 사람이 느낄 수 있는 반경방향의 힘, 다시 말해 불균형 가진력은 다음과 같다.

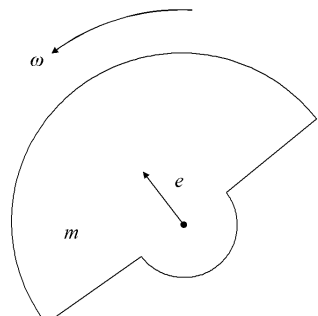


Fig. 3. Unbalanced force

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

여기서  $m, e, \omega$  는 각각 회전자의 질량, 편심량, 회전속도이다. 불균형 가진력을 증가시키기 위하여 가장 효율적으로 접근할 수 있는 것은 회전속도이다. 회전속도는 다음과 같이 운동방정식에 의해 계산할 수 있다.

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

여기서  $T, J, D, T_f$  는 각각 출력토크, 관성모멘트, 감쇠계수, 마찰토크이다. 만약 일정한 속도로 회전한다면 회전속도와 토크의 관계식이 다음과 같이 매우 간단히 표현할 수 있다.

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

여기서 마찰토크와 감쇠계수는 모터의 기계적 설계로 인해 결정되지만 출력토크는 전자기적 설계를 통해 증가시킬 수가 있으며, 본 논문에서 시도하려는 접근방법이다. 다시 말해, 사람이 느끼는 진동을 증가시키기 위해 회전속도에 비례하는 출력토크를 증가시키면 된다.

#### 전자기 시스템

모터의 전자기 특성을 해석하기 위해 출력을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $T, e_j, i_j$  는 각각 출력 토크, 각 코일에 걸리는 역기전력과 전류이다. 인덕턴스의 영향을 무시할 수 있는 코어리스타입의 모터에 있어서 역기전력은 자속쇄교량과 회전속도의 함수로 표현이

가능하며, 자속쇄교량은 자속밀도를 적분하여 구할 수 있다. 그리고, 전류와 역기전력의 관계식은 아래와 같다.

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

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

$$V = \sum_j Ri_j + e_j \quad (7)$$

여기서  $N$ ,  $\lambda$ ,  $S$ ,  $r$ ,  $V$ 와  $R$ 은 각각 코일의 턴수, 코일에 걸리는 자속쇄교량, 코일의 2 차원 단면적, 회전반경, 입력전압 그리고, 저항이다.

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

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s + \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{M}) \quad (8)$$

여기서  $\mu$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{J}_s$ ,  $\mathbf{M}$ 은 각각 투자율, 자기벡터포텐셜, 전류밀도, 자기모멘트벡터이다. 자속밀도는 자기벡터포텐셜의 컬 형태로 표현이 가능하며 수식은 아래와 같다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} \lambda_j &= N \int (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S}_j \\ &= Nr \oint dA = Nr(A_1 - A_2) \end{aligned} \quad (10)$$

마찬가지로 역기전력도 자기벡터 포텐셜의 형태로 바꿀 수 있다.

$$\begin{aligned} e_j &= \omega \frac{d}{d\theta} \left( N \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \right) \\ &= N\omega r \frac{d}{d\theta} (A_1 - A_2) \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$K_e = Nr \sum_j \frac{d}{d\theta} (A_{j1} - A_{j2}) \quad (12)$$

출력토크를 자기벡터 포텐셜의 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$T = \sum_j Ni_j r \frac{d}{d\theta} (A_{j1} - A_{j2}) \quad (13)$$

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

$$K_t = Nr \sum_j \frac{d}{d\theta} (A_{j1} - A_{j2}) \quad (14)$$

수식 (12)와 수식 (14)를 살펴보면 역기전력 상수와 토크 상수가 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 토크의 출력토크를 키우기 위해서는 역기전력 상수를 키워야 한다.

## 4. 해석 결과

### 시작기 해석

역기전력을 계산하기 위해서는 단상이며, 2 개의 코일이 서로 다른 방향으로 감겨있기 때문에 각 코일에 걸리는 역기전력의 차를 구해야 하며, 코일에 걸리는 자속쇄교량에 대한 계산이 선행되어야 하며, 이를 위해서는 자속밀도 계산이 수행되어야 한다. 자속밀도를 계산하기 위해서 2 차원 FEA가 수행되었으며 시작기의 경우 그림 3에서 한 단면에서 구한 자속밀도를 자속선과 벡터로 표현하였다. 2 차원 해석 결과를 합산한 3 차원 해석결과는 그림 4와 같다. 그림 4의 (d)에서는 실험한 상 역기전력과 해석한 상 역기전력을 비교해 놓았으며, 이를 보아 논문에서 사용된 해석방법이 타당함을 알 수 있다. 그림 4의 (f)에서 알 수 있듯이 150°와 330°에서 토크가

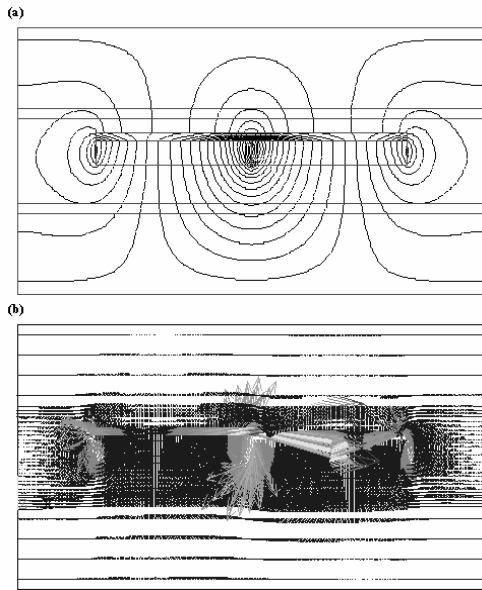


Fig. 3. Results of 2D-FEA; (a) flux line, (b) vector plot

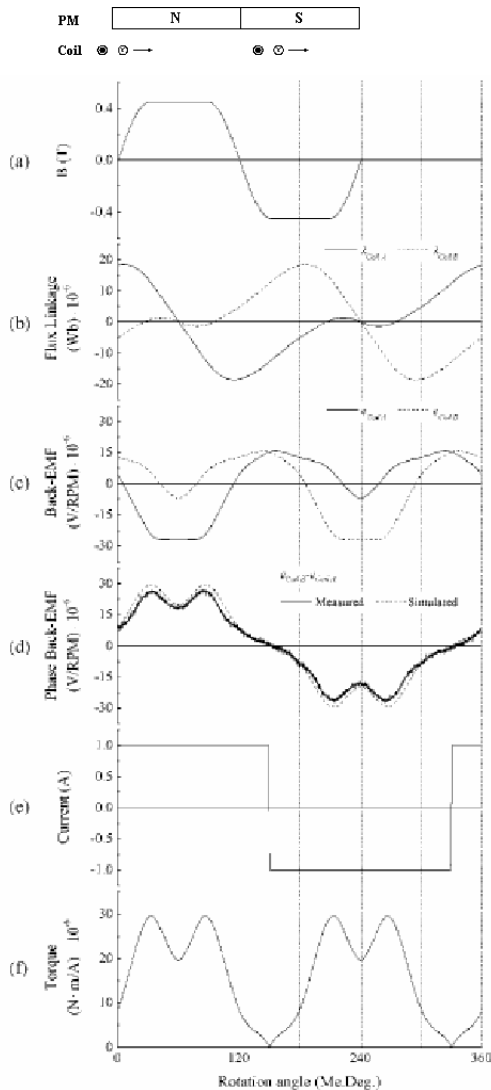


Fig. 4. FEA results of proposed vibration motor

0(zero)가 되는 구간이 존재하며, 초기에 구동하기만 하면, 이러한 구간도 관성으로 인해 회전이 가능하지만, 초기에 회전자가 150°와 330°의 위치에 놓여있으면 회전하지 못하게 된다. 따라서, detent iron의 위치는 그 중간지점이면서, 출력토크가 높은 60°와 240°가 되어야 한다.

### 최적 설계

역기전력을 최대화하기 위해서 회전자의 각도 및 코일의 각도를 설계변수로 이용되었으며, 그림 4에 표시되어 있다. 각 설계변수에 대한 역기전력변화를 그림 5에 나타내었다. 코일 각도에 비해 영구자석의 각도가 역기전력에 더 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있으며, 영구자석의 각도는 회전자의 편심량에도 영향을 미친다. 시작기의 회전자의 각도가 240°이므로 이 보다 더 큰 각도가 되면 편심량은 줄어들지만, 질량은 커지

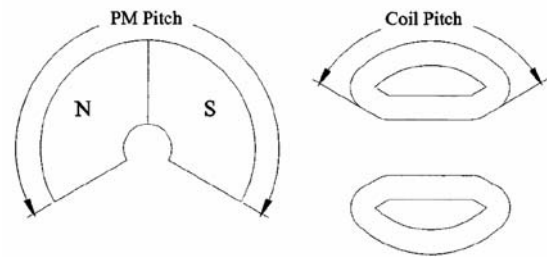


Fig. 5. Design parameter for performance optimization

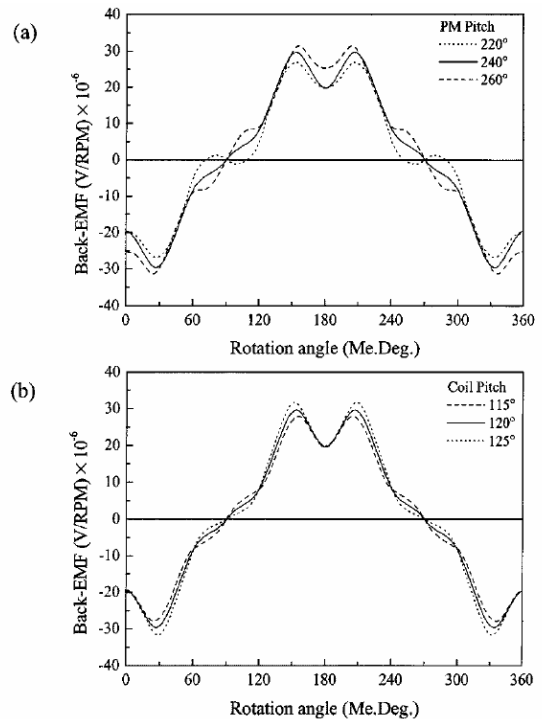


Fig. 6. Effects of design parameters on phase back-EMF; (a) PM pitches, (b) Coil pitches

므로 각도가 커진다고 해서 기계시스템측면에서 유리하거나, 불리하다고 선불리 판단할 수는 없다. 그리고, 전자기적 효율을 위해 영구자석의 각도와 back iron 의 각도는 일치해야 한다.

**실험 결과**

진동모터의 성능을 측정하기 위해서 가속도를 측정하는 것이 일반적이다. 그림 7 은 가속도를 측정하기 위한 방법을 나타낸 것이며, (5) 표 I 은

Table I. Frequency range and mount of time for each zone

operation zone	frequency range (Hz)	time (second)
acceleration	15~200	0.8
duration	200	1.4
deceleration	200~0	0.6

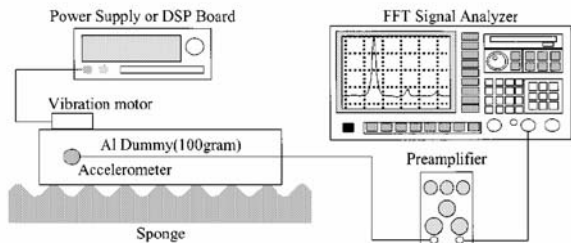


Fig. 7. Test setup for acceleration measurements

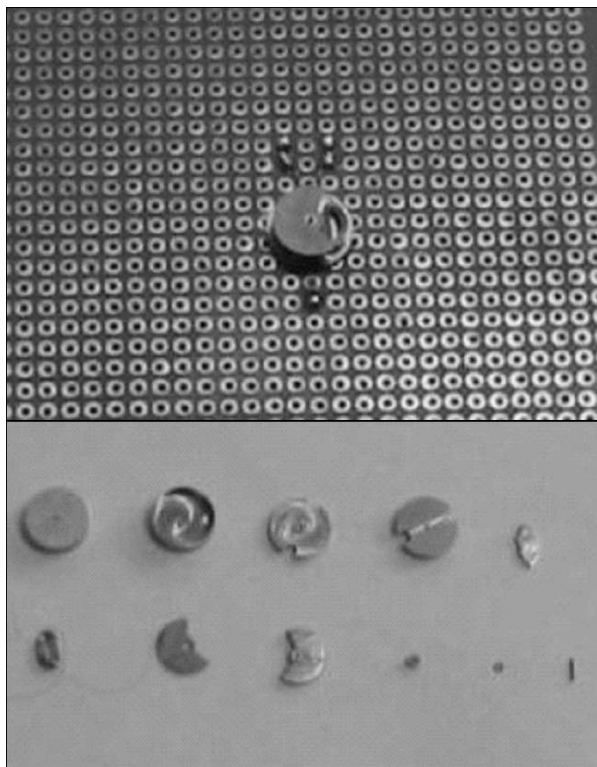


Fig. 8. Photographs of vibration motors; (a) assembly of proposed vibration motor, (b) parts of proposed vibration motor

Table II. Test results of vibration motors

	conventional	proposed
size(mm <sup>3</sup> )	Φ10 X t3.0	Φ10 X t2.5
speed (rpm)	11760	12540
current (mA)	60	70
acceleration (g)	1.2	1.1
number of parts	15	10

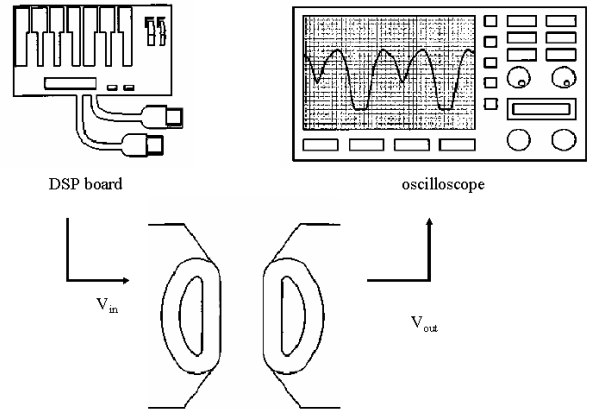


Fig. 9. Test setup for back-EMF and applied voltage measurements

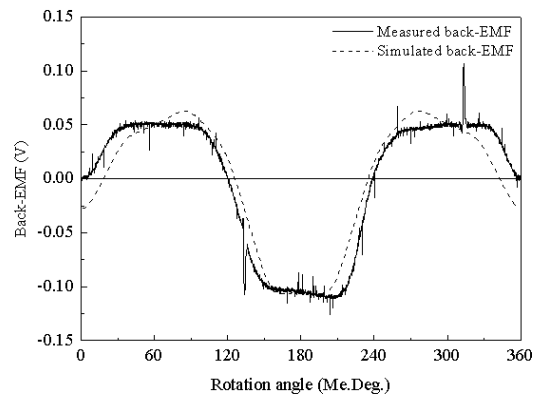


Fig. 10. Comparison of measured and simulated back-EMF

각 구간별 주파수 범위와 시간을 나타낸 것이다. 그림 8 은 실험에서 사용된 진동모터와 그 부품들의 사진이다. 표 II 는 실험결과를 비교한 것이다. 여기서 기존의 진동모터에 비해 논문에서 제시하는 진동모터가 지속구간에서는 결코 진동량이 크게 떨어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 9 는 역기전력과 입력전압을 측정하기 위한 시스템을 보여준다. 그림 10 은 최적화된 모델의 역기전력을 실험한 결과와 해석한 결과를 비교한 것이며, 그림 11 은 실험을 통해 측정된 역기전력과 입력전압이다. 입력전압과 역기전력간에는

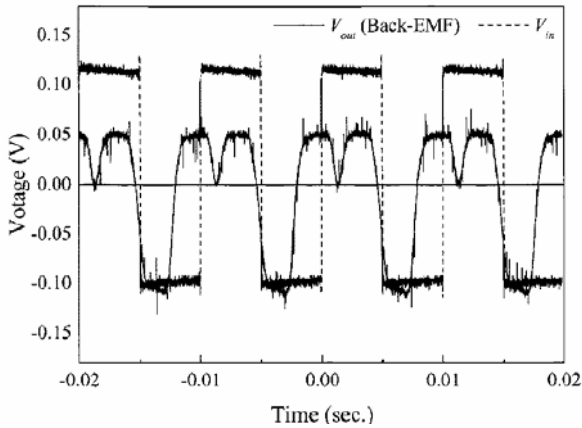


Fig. 11. Comparison of measured back-EMF and applied voltage

위상차가 존재하는 것을 알 수 있다. 이것은 이 모터의 구동원리에 의해서 항상 존재하는 현상이며, 모터의 회전속도가 빠를수록 커지고, 효율을 감소시킨다. 또한, 이것은 관성보다는 회전자의 편심에 더 큰 영향을 받는다.

## 5. 결 론

본 논문은 새로운 형태의 단상 브러쉬리스 센서리스 타입의 휴대폰용 진동모터를 제시한다. 해석과 실험결과에 따라 본 논문에서 제시한 모터가 기존타입에 비해 성능이 크게 떨어지지 않으면서도 구조가 간단하여 소형화에 유리하다. 그러나, 역기전력과 입력전압간의 위상차로 인해 효율이 떨어지는 등 여러 단점이 있어 추후 더 많은 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

## 참 고 문 헌

- (1) Leo, L. B. and Eric, E. U., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Lee, Y. K., Choi, S. K., Yoon, K. C. and Lee, Y. S., 2003, "NRRO Analysis of 3.5inch HDD Spindle Ball Bearings utilizing the Measured Geometric Imperfection", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 585~591.
- (3) Jeong, S. W. and Jang, G. H., 2001, "Analytical Theory of Ball Bearing Considering

Waviness of Rolling Elements", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.11, No.7, pp.275~286.

(4) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(5) 신태명, 인진철, 2003, "휴대폰용 일체형 음향 및 진동 발생장치 개발을 위한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 11 호, pp. 875~881.