

# 자동차 부품용 고속, 고부하 BLDC 모터내의 전자기적 토크 맥동 저감

## Reduction of Electromagnetic Torque Ripple in High-Speed, High-Load Brushless DC Motors used for Automobile Parts

황 상 문\*  
S. M. Hwang

### ABSTRACT

For permanent magnet brushless DC motors used for high speed fuel pumps, torque ripple is an important origin of vibration, acoustic noise and speed fluctuation. In this paper, the output torque profile of a PM motor with one phase energized is decomposed into the commutation torque, the reluctance torque and the armature reaction torque according to their source origins. It verifies that the output torque profile is qualitatively equivalent to the BEMF profile for low reluctance motors. This paper discusses the effect of magnet pole shaping and magnet arc length on the output torque and torque ripple. A magnet edge shaping is proposed to design a trapezoidal BEMF motor without torque ripple, with minimal sacrifice of the maximum output torque.

주요기술용어 : Torque Ripple(토크 맥동), Permanent Magnet Brushless DC Motors(영구자석 직류 전동기), Trapezoidal Back Electro-Motive Force(사다리형 BEMF), High Speed Fuel Pump Motor(연료 펌프용 고속 모터)

### 1. 서 론

토크 맥동(torque ripple)은 모터 내에서 발생하는 최대 토크와 최소 토크의 차를 최대 토크로 나눈 값의 백분율로 표시되는데, 전자기적 토크 변동(electromagnetic torque ripple)과 코깅 토크(cogging torque or reluctance torque)로

분류될 수 있다. 코깅 토크 저감을 통한 토크 맥동 저감은 설계 변수의 민감도 해석 및 다양한 설계 기술을 통해 광범위하게 연구되어 왔다.<sup>1,2)</sup> 본 연구에서는 영구자석과 전기자 부하(armature current)의 상호작용에 의해 발생하는 전자기적 토크 변동에 의한 토크 맥동을 저감함으로써 자동차의 연료 펌프와 같은 고속, 고부하 직류 전동기 내의 진동과 소음을 저감시키고자 한다. 영구자석 직류 모터의 설계 방법 중 많이 사

\* 정회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술 연구소

용되는 방법은 사다리형 역기전력(trapezoidal back electro-motive force) 방법인데, 전기자 코일에 유기되는 사다리형 BEMF의 평평한 부분에 직류를 공급함으로써 토크 맥동을 줄이는 방식이다. 만약 커뮤테이션 기간 중에 어떠한 BEMF의 변화가 있으면, 그것은 토크 맥동으로 나타나서 심각한 진동, 소음 문제를 야기시킨다. 따라서, 완벽한 모양의 사다리형 BEMF 모터를 설계할 수 있다면 이러한 토크 맥동을 제거할 수 있다. 여러 가지 설계에 대한 BEMF의 측정은 실험을 통해서 가능한데 이는 많은 시간과 비용을 요구하므로, 모델링을 통한 모터의 BEMF를 계산할 수 있는 방법이 연구되어야 한다.

전자기적 토크 변동에 의한 토크 맥동 연구는 예전부터 직류 전원의 스위칭에 의한 부하전류의 인덕턴스 제어에 많은 관심을 보이고 있다. 직류 전원의 완벽한 스위칭을 가정한 모터 내의 자기장 해석을 통한 토크 맥동의 저감은 근래에 많은 연구가 진행되고 있다. De La Ree et al.<sup>3,4)</sup>과 Gangla<sup>5)</sup>는 고정자 슬롯 아래의 자속을 제로(zero)라 가정하고, 영구자석 모터 내의 자기장과 토크를 이론적으로 계산하였다. Jufer<sup>6)</sup>는 고정자 슬롯의 효과를 고려하기 위해 공극 퍼미언스 함수(gap permeance function)를 고려한 이론적 해석으로 발전시켰는데, 이들 이론적 해석은 모터의 복잡한 형상과 물질의 비선형성을 고려하지 못하는 점에서 그 한계가 있다. 유한 요소법에 의한 해석으로는, Carlson et al.<sup>7)</sup>과 Ishikawa et al.<sup>8)</sup>에 의하여 고정자 슬롯 스퀘어, 영구자석 쉬프트 등의 자기장 attenuation에 의한 토크 맥동의 저감 연구등이 있다.

본 연구에서는 영구자석 모터의 한 상(phase)에 부하를 걸었을 때 나타나는 출력 토크 파형을 유한 요소법과 맥스웰 응력 방법(Maxwell stress method)으로 계산한다. 출력 토크가 발생하는 소스에 따라 각 토크 성분을 분해한 다음, 출력 토크 파형이 그 특성상 BEMF 파형과 정성적으로 동일함을 보이고, 모델링을 통해 얻은 출력 토크 파형을 이용하여 토크 맥동이 없는 사다리형 BEMF 모터를 설계하고자 한다. 제안된 설계 방법으로는 자석 형상 변화, 자석 극호 변화,

자석 모서리 형상 변화 등이며, 이러한 설계 변수의 변화는 출력 토크에 약간의 감소를 초래하지만, 거의 사다리형에 가까운 BEMF 모터를 설계할 수 있음을 보여 준다.

## 2. 본 론

### 2.1 토크 해석

전자기장 해석에 사용되는 비선형 유한 요소법 프로그램인 TOSCA가 Fig.1에 보이는 영구자석 BLDC 모터(permanent magnet brushless DC motor) 내의 자속 밀도를 구하는 데 사용되었다. 주기적인 형상과 대칭 경계 조건을 사용하면 1/2 모델의 해석으로서 전체 해석이 가능함을 알 수 있다.

맥스웰 응력 방법에 의하여 모터 내의 토크는 공극(airgap)내의 폐면을 따라 토크 밀도를 적분함으로써 구해지므로, 식 (1)과 같이 표시된다.

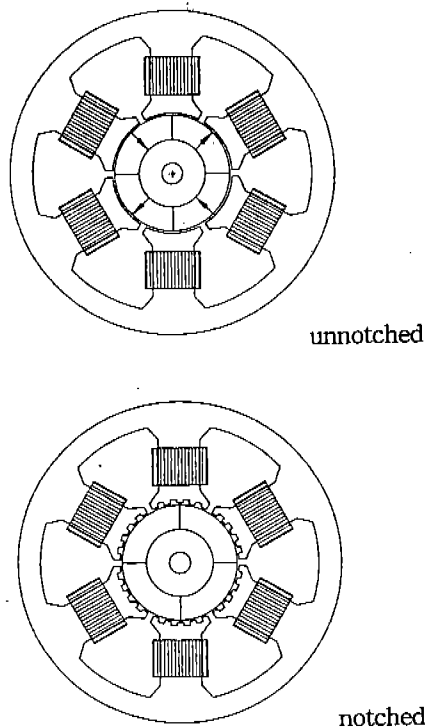


Fig.1 4-pole 6-teeth permanent magnet motors

$$T(\theta) = \oint_{\Gamma} \mathbf{r} \cdot \mathbf{f}_\theta d\Gamma \times \mathbf{h} = \frac{1}{\mu_0} \oint_{\Gamma} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_r \cdot \mathbf{B}_t d\Gamma \times \mathbf{h} \quad (1)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $\Gamma$ 는 임의의 폐면에 따른 적분 경로,  $r$ 은 반경,  $B_r$ ,  $B_t$ 는 반경 및 접선 방향의 자속밀도,  $h$ 는 축방향 높이이다. 공극 중심을 적분 경로로 잡으면 모터의 토크는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(\theta) = \frac{h}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_r \cdot \mathbf{B}_t r d\theta = h \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(n\theta + \Psi_n) \quad (2)$$

여기서  $A_n$ 은  $n$ 번째 고조파의 Fourier 계수이고  $\Psi_n$ 은 거기에 해당하는 위상 변이(phase shift)이다. 모터 내의 자기 자속 밀도는 자기장의 다른 소스들, 즉 영구자석과 전기자 코일에 의한 비선형적 합( $B_r$ )  $PM+coil$ , ( $B_t$ )  $PM+coil$ ) 이므로 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T(\theta) = \frac{h}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_{r)PM+coil} \cdot \mathbf{B}_{t)PM+coil} r d\theta \quad (3)$$

반경 자속 밀도 및 접선 자속 밀도는 그 소스의 근원에 따라 다시  $B_r) PM$ ,  $B_t) PM$ ,  $B_r) coil$ ,  $B_t) coil$ 으로 나눌 수 있다.  $B_r) PM$ 과  $B_t) PM$ 은 무부하 상태, 즉 영구자석 소스만을 고려함으로써 구할 수 있고,  $B_r) coil$ 과  $B_t) coil$ 은 영구자석 소스를 제거한 후(공기로 모델링), 전기자 코일 소스만에 의한 자속 밀도로써 구할 수 있다. Fig.2는 노치가 없는 모터 내 공극의 반경 및 접선 방향 자속 밀도를 보여주고 있으며, 회전자의 위치는 wye권선(1620 Amp-turn)시 최대 토크 발생 위치이다. Fig.2에서와 같이 자기 포화(1.5 Tesla) 아래에서는  $B_r) PM+coil$ (nonlinear)과  $B_r) PM + B_r) coil$ (linear sum)이 거의 일치함을 알 수 있는데, 이는 출력 토크가 그 발생 소스에 따라 여러 가지 토크 성분의 선형적 합으로 표시될 수 있으므로 식 (3)을 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

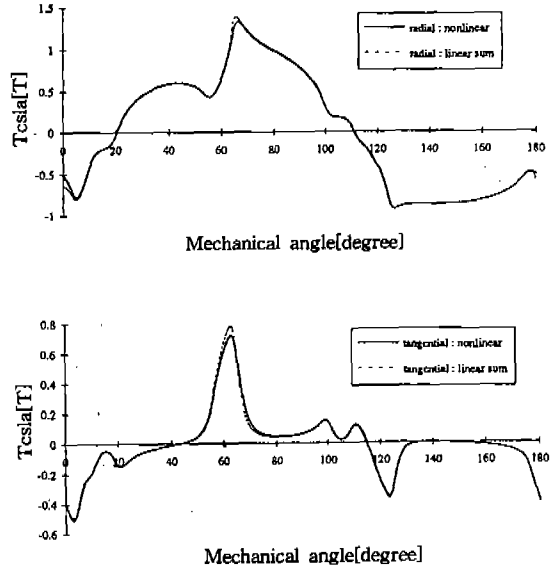


Fig.2 Flux densities of the motor with permanent magnet and armature winding

$$\begin{aligned}
 T(\theta) &= \frac{h}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_{r)PM} \cdot \mathbf{B}_{t)PM} r d\theta \\
 &\quad : \text{cogging torque} \\
 &+ \frac{h}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_{r)coil} \cdot \mathbf{B}_{t)coil} r d\theta \\
 &\quad : \text{vanished} \\
 &+ \frac{h}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_{r)coil} \cdot \mathbf{B}_{t)PM} r d\theta \\
 &\quad : \text{armature reaction torque} \\
 &+ \frac{h}{\mu_0} \int_0^{2\pi} \mathbf{r} \cdot \mathbf{B}_{r)PM} \cdot \mathbf{B}_{t)coil} r d\theta \\
 &\quad : \text{commutation torque} \quad (4)
 \end{aligned}$$

식 (4)의 첫 번째 항은 코깅 토크를 나타내는 것으로 부하 전류와는 상관없이 항상 토크 맥동으로 작용하므로 최소화되어야 한다. 코깅토크에 의한 토크 맥동은 Fig.1의 고정자 잇날 노칭(notching) 설계를 사용하면 거의 무시할 만한 수준으로 줄일 수 있다. 두 번째 항은 거의 제로에 가까운 토크를 발생시키는데, 그 이유는 영구

자석이 공기로 모델링되어 아주 큰 공극(airgap) 같이 작용하므로 자속이 고정자 쪽으로 모두 단락되기 때문이다. 세 번째 항은 직류전류의 커뮤테이션 작용에 의해 영향을 받는 전기자 반력 토크(armature reaction torque)이다. 네 번째 항은 출력 토크의 대부분을 차지하는 커뮤테이션 토크 혹은 BEMF 토크이다. 역기전력(BEMF)은 회전하는 영구자석의 반경 방향 자속 변화에 의해 권선에 유도되는 기전력이므로 커뮤테이션 토크는 BEMF 파형과 정성적으로 동일해야 함을 알 수 있다. 또한, BEMF 토크가 부하 전류에 선형적으로 비례하는 반면, 역기전력은 영구자석의 회전 속도에 비례함을 알 수 있다.

주어진 모터의 한 상(phase)에 부하를 걸었을 때 나타나는 출력 토크 파형이 전기적 한 주기에 대하여 Fig.3(wye winding)과 Fig.4(delta winding)에 나타나 있다. 코깅 토크(혹은 reluctance torque)에 의한 간섭은 매우 큰 부하 전류에 의한 영향으로 매우 작으며, Fig.1에서와 같이 고정자에 노치를 제공함으로써 그 영향을 더 줄일 수 있다.<sup>1,2)</sup> 전기자 반력 토크는 약 20% 가량을 차지하며 그 형상은 출력 토크 파형과 거

의 일치함을 알 수 있다. 이것은 모터의 형상이나 권선 형태와는 무관한데, 그 이유는 전기자 반력 토크나 출력 토크 모두 주어진 모터의 자기 회로와 부하 전류만의 함수이기 때문이다. 마찬가지로 이유로 BEMF 토크는 약 80% 상당의 크기를 가지고 그 형태는 출력 토크 파형과 일치함을 알 수 있는데, 이는 모델링에 의한 출력 토크 파형으로 역기전력 파형, 즉 BEMF 파형을 설계할 수 있음을 말한다. 또한, Fig.3과 Fig.4는 서로 다른 소스에 의한 세가지 토크의 선형적 합이 모든 소스를 함께 고려해서 구한 출력 토크(output torque)와 거의 일치함을 보임으로써 모터가 자기 포화(magnetic saturation) 이하에서 작동하고 있음을 보여준다.

## 2.2 토크 맥동의 해석

3상, 4극 직류 모터의 경우 커뮤테이션은 매 30°마다 일어나며(0°~30° : wye권선, -15°~15° : delta 권선), Fig.3과 Fig.4에서 보는 바와 같이 토크 맥동은 커뮤테이션 구간에 대하여, delta 권선의 경우 7.0%이고 wye 권선의 경우 그보다 훨씬 큰 24.8%임을 관찰할 수 있다. Wye 권선

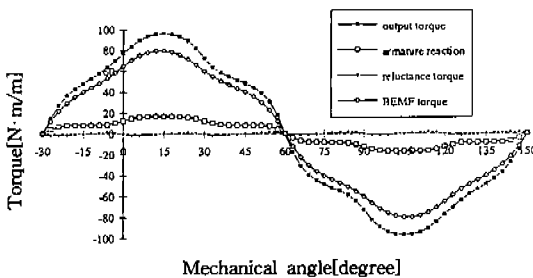


Fig.3 Output torque profile with its frequency spectrum(wye winding, 1620Amp-turns /phase)

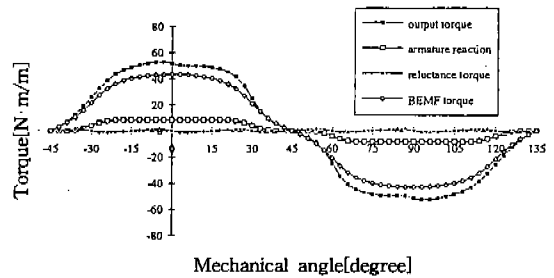


Fig.4 Output torque profile with its frequency spectrum(delta winding, 1620Amp-turns /phase)

의 큰 토크 맥동은 영구자석 극 천이(pole transition)부분의 자속 누출에 의해서 설명될 수 있다. Fig.5는 wye 권선과 center tapped wye 권선의 경우에 대하여 커뮤테이션 기간 중 최소 및 최대 토크의 위치를 보여주고 있다. Delta 권선의 경우 전기적 특성을 무시한 준정적(quasi-static) 자기장이라 가정하면 center tapped wye 권선과 똑같은 결과를 보여주므로 delta 권선 대신 구조가 간단한 center tapped wye 권선으로 표시하였다. Delta 권선(혹은 center tapped wye 권선)의 경우는 영구자석 각 극의 90° 원호 부분 중 단지 가운데 60° 원호 부분만을 커뮤테이션 기간 동안에 사용하므로, 극의 천이에 의한 자속 누출의 영향을 받지 않는다. 한편, wye 권선의 경우 각 극의 90° 원호 전부를 커뮤테이션 기간에 사용하므로, 최소 토크 위치에서 극의 천이에 의한 자속 누출의 영향을 받아, 필연적으로 토크 맥동이 증가됨을 알 수 있다. 토크 맥동은 그 정의상 커뮤테이션 기간 중의 최대 토크를 작게 하거나, 최소 토크를 크게 하거나, 혹은 둘 다 동시에 실현하면 된다. 최소 토크는 극 변이의 자속

누출을 줄임으로써 크게 할 수 있고, 최대 토크는 극 중앙의 자속 밀도를 줄임으로써 작게 할 수 있음을 알 수 있다.

앞으로의 해석 결과는, 코깅 토크의 영향을 최대한 줄이기 위해 Fig.1의 노치 형상의 고정자를 가진 모터를 사용하였고, 부하 전류도 노치 주위의 자기포화를 방지하기 위해 1080 Amp-turns/phase로 낮추어서 토크를 구하였다. Delta 권선의 경우 코깅 토크를 제외하면, 출력 토크 파형 혹은 BEMF 파형이 사다리형에 가까우므로 앞으로의 연구 과정은 wye 권선에 대하여 수행되었다.

### 2.3 사다리형 BEMF 모터의 설계

Fig.6에 영구자석 형상을 변화시켰을 때 출력 토크 파형을 보여주고 있다. 영구자석은 같은 기자력(magneto-motive force)을 제공하기 위해 같은 부피를 유지하면서 그 형상이 변화되었다.

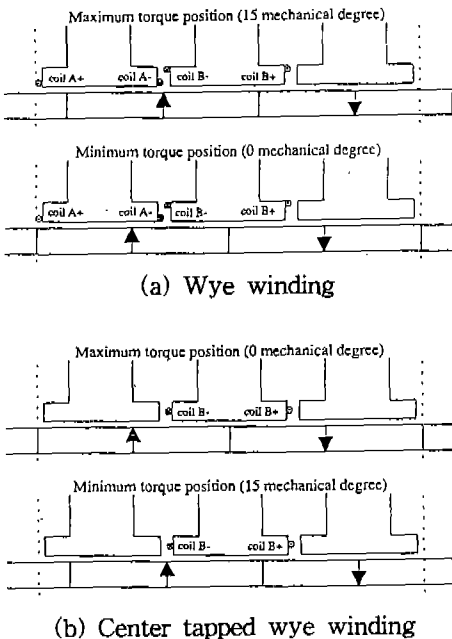


Fig.5 Maximum and minimum torque positions during commutation

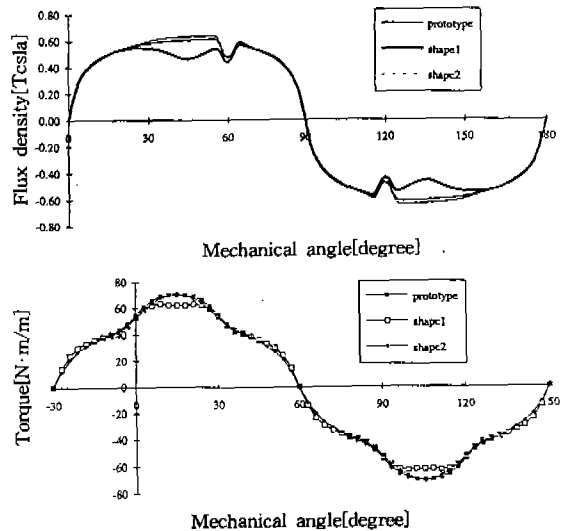
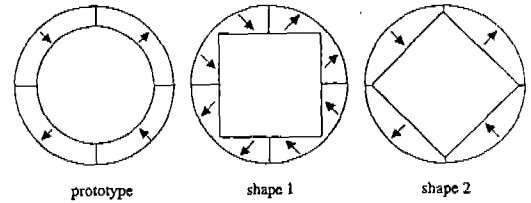


Fig.6 Effect of magnet pole shaping on the output torque

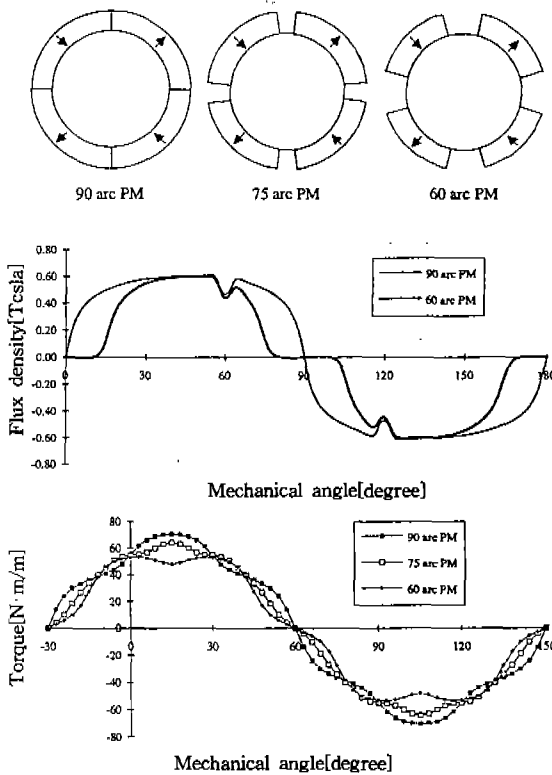


Fig.7 Effect of magnet arc length on the output torque

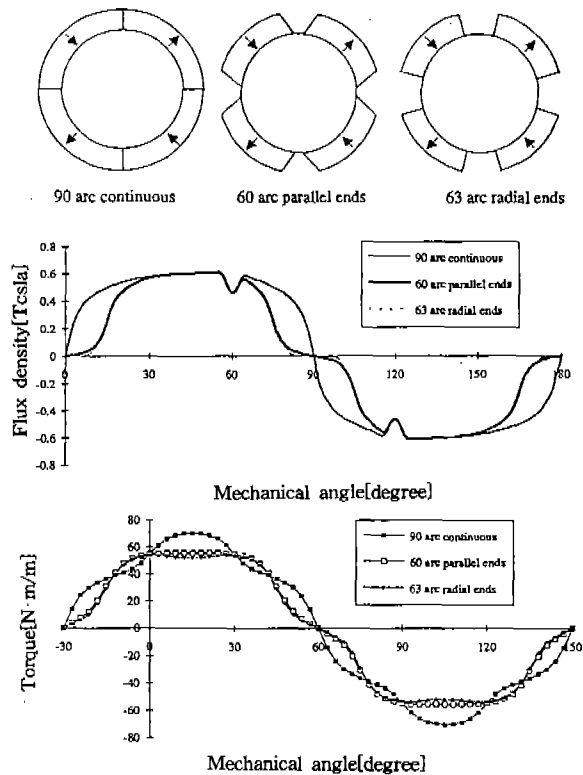


Fig.8 Design of trapezoidal shape BEMF motor

토크 맥동을 줄이는 방법으로, 형상 1(shape 1)에서는 극 중앙의 자속 밀도를 줄이기 위해 그 중앙 부위의 부피를 줄였으며, 극 천이 부분의 자속 누출을 줄이기 위해 자석의 모서리 부피를 증가시켰다. 형상 2 (shape 2)에서는 비교의 목적으로, 토크 맥동을 더 크게 하기 위해 그 반대의 경향으로 자석의 형상을 변화시켰다. 커뮤테이션 기간 중 최저 토크는 그 크기가 변하지 않고 거의 일정한데, 이는 극의 천이에 의한 자속 누출이 자극 형상 변화로써는 거의 영향을 받지 않음을 보여 주고 있다. 한편 극 중앙의 자속 밀도는 자석 형상 변화에 영향을 받는데 형상 1의 경우 최대 토크가 약 13% 감소하였고 형상 2의 경우 최대 토크가 약 2% 증가하였다. 토크 맥동의 경우도 최대 토크변화의 영향으로 형상 1의 경우 22.3%에서 13.7%로 감소하였고, 형상 2의 경우 26.5%로 증가하였다. 그러나 극단적인 자석 형상 변화가 작은 공극을 가진 모터의 경우 자기장이나 출력

토크 특성을 많이 변화시키지 못함을 알 수 있다. 앞에서의 관찰로 미루어 보아, wye 권선, 90° 극 호(arc length)의 자석의 경우에는, 토크 맥동이 극의 천이 부분의 자속 누출에 기인하므로 커뮤테이션 위치에서의 최저 토크의 감소를 가져온다. 따라서, 큰 토크 맥동은 필연적인 결과임을 알 수 있다.

한편, Fig.7은 영구자석 극호를 변화시켰을 때의 출력 토크 파형을 보여 주는데, 토크 맥동의 저감이 최대 출력 토크의 감소를 감수하면 가능함을 알 수 있다. 자석 극호가 감소함에 따라 최대 출력 토크는 감소하지만(75° arc : 8.8% 감소, 60° arc : 24.4% 감소), 토크 맥동도 같이 감소함(90° arc : 22.3%, 75° arc : 14.6%, 60° arc : 9.4%)을 알 수 있다. 극호 60° 자석의 경우 출력 토크 파형은 커뮤테이션의 중앙 부분을 제외하고는 거의 사다리형임을 알 수 있는데, 가운데 부분은 60° 극호의 경우에도 출력 토크가 또 다시 자석

모서리 부분의 자속 누출의 영향을 받았음을 쉽게 추론할 수 있다.

극호 60° 자석 모서리 부분의 자속 누출은 자석 모서리 형상 변화(magnetic edge shaping)로서 자속 누출의 영향을 없앨 수 있다. Fig.8에 보인 바와 같이 반경 방향 끝(radial ends)의 경우는 극호를 63°로 증가시키면 가능하고, 평행방향 끝(parallel ends)의 경우는 영구자석의 외경 극호를 60°로 함으로써, 내경 극호는 60°보다 더 증가하여 자속 누출의 영향을 제거하였음을 알 수 있다. 최대 출력 토크는 63°의 반경 방향 끝의 경우 23.5% 감소 하였고, 60°의 평행 방향 끝의 경우 21%가 감소하였음을 알 수 있다. 한편, 두 가지 설계 방법 모두 토크 맥동의 저감(63° radial ends : 3%, 60° parallel ends 2%)을 가져와 출력 토크 파형, 즉 BEMF 파형이 거의 사다리형에 가까움을 관찰할 수 있다.

### 3. 결 론

자동차 연료펌프와 같은 고속, 고부하 영구자석 직류 모터의 경우, 토크 맥동은 모터 내의 진동 및 소음 문제에 아주 심각한 영향을 초래한다. 본 연구에서는 모터의 한 상(phase)에 부하를 가함으로써 얻어지는 출력 토크 파형이 정성적으로 BEMF 파형과 동일함을 보임으로써, 저진동 모터 설계, 즉 사다리형 BEMF 모터 설계를 실험에 의존하지 않는 모델링에 의한 방법을 제시한다. Wye 권선, 극호 90° 자석(continuous magnets)의 경우 극의 천이 부분에 존재하는 자속 누출은 필연적인 최저 출력 토크의 저감을 가져와 자석 형상 변화 등 여러 가지 방법으로도 맥동 토크를 효과적으로 저감시키지 못한다. 한편 극호를 감소시킴으로써 최대 출력 토크는 감소하지만, 맥동 토크는 현저히 줄어들어 사다리형 BEMF에 가까운 출력 토크 파형을 얻을 수 있음을 몇 가지 설계 방법을 통해 제시하고 있다. 또한, 본 연구는 사다리형 BEMF와 마찬가지로 교류 부하에 대해 맥동 토크가 거의 없는 정현파 BEMF 모터(sinusoidal BEMF motor)의 설계에도 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

1. 황상문, “영구자석 직류 전동기 내의 코깅 토크 저감을 위한 설계 변수의 민감도 해석”, 한국 자동차 공학회 추계 학술 대회 논문집, Vol. 1, pp. 404~410, 1996.
2. 황상문, “전기 조향 장치용 직류 전동기에서의 코깅 토크 저감을 위한 설계 기술 개발”, 한국 자동차 공학회 추계 학술 대회 논문집, Vol. 2, pp. 276~284, 1996.
3. J. De La Ree and L. Jaime, “Permanent Magnet Machines Torque Considerations”, IEEE Inds. Appl. Annual meeting, Vol. 1, pp. 32~37, 1988.
4. J. De La Ree and N. Boules. “Torque Production in Permanent Magnet Synchronous Motors”, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 25, No. 1, pp. 107~112, Jan./Feb. 1989.
5. V. Gangla and J. De La Ree, “Electromechanical Forces and Torque in Brushless Permanent Magnet Machines”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 546~552, Sep. 1991.
6. M. Jufer, “Brushless DC Motors-Gap Permeance and Permanent Magnet-MMF Distribution Analysis”, Proceedings IMCSD, pp. 21~25, 1987.
7. R. Carlson, A. A. Tavares, J. P. Bastos and M. Lajoie-Mazenc, “Torque Ripple Attenuation in Permanent Magnet Synchronous Motors”, IEEE Ind. Appl. meeting, Vol. 1, pp. 58~62, 1989.
8. T. Ishikawa and G. R. Slemon, “A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors without Skewing”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 2, pp. 2028~2031, March 1993.

## Appendix

### Physical data of the prototype

Airgap length = 1.2mm

Inner radius of rotor = 6.8mm

Outer radius of rotor = 9.525mm

Inner radius of magnets = 9.525mm

Outer radius of magnets = 16.325mm

Inner radius of stator = 17.525mm

Outer radius of stator = 46.355mm

Magnet height = 6.8mm

Number of poles = 4

Number of teeth = 6

Magnet material = Magnequench MQII-E

Magnet coercivity = -1,440 kA/m

Stack height = 100mm

Notch depth = 1.2mm