

## 희토류 영구자석 서보모터의 코깅토크 저감방법 및 시제품에의 적용

한 문규  
호성중공업 기술연구소

### Reduction of cogging torque of Servo motor with Rare earth Permanent Magnets & Its application

Moon-Kyu Han  
R & D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd

**Abstract** - In a recent as the compact and the precision motor is needed, the use of rare earth permanent magnet with high energy product is frequent. Accordingly it is important to reduce the cogging torque for improving the control precision of motor.

In order to develop the motor with low cogging torque which is contented with the requirement of customer, the prototype is designed and complete based on analysis method to reduce the cogging torque. The experimental results verify the validity.

#### 1. 서 론

공작기계등에 이용되는 초정밀 가공용 모터는 가공정도에 중요한 영향을 미치는 회전리플을 최대한 작게할 필요가 있다. 따라서 회전리플의 주 원인인 코깅토크의 저감은 매우 중요한 과제이다. 최근에는 가공정도가 마이크로이하 단위의 정밀한 모터가 요구됨에 따라 코깅토크의 감소는 더욱 중요시되고 있다.

FA기기로서의 서보모터는 고정밀, 초고속화 됨에 따른 소형, 경량화의 요구가 대두되고 있으며, 이를 실현하려면 기존의 페라이트에서 고에너지적을 가진 희토류 자석으로의 대체가 불가피하다.

최근들어 SmCo보다 저가인 NdFeB계 자석이 많이 보급됨에 따라 이를 사용한 모터의 요구도 증가하고 있다. 희토류자석은 기존의 페라이트보다 자력이 강하므로 코깅토크의 감소에 관한 연구는 더욱 절실한 상황이다. 이와 관련된 연구논문들이 계속 발표되고는 있으나, 직접 모터의 설계에 적용된 예는 많지 않다.

따라서, 본 논문에서는 수용가의 요구를 만족하는 저코깅토크 모터를 개발하고자, 코깅토크 감소과 관련된 연구논문을 토대로, 2가지 타입의 희토류 자석 서보모터를 설계하고 시제품을 제작하여 그 특성을 시험 및 분석하였다. 이에 양호한 결과를 얻었으므로 여기에 소개한다.

#### 2. 코깅토크 저감의 기술적인 과제

##### 2.1 해석 이론

코깅토크는 계자자석과 전기자 구조사이의 상호작용, 다시말하면 공극부에 쌓인 자기에너지가 회전자의 이동과 함께 생긴다. 따라서, NdFeB계 같은 고에너지적을 가진 희토류자석을 사용한 모터에서는 공극에 축적된 에너지가 크므로 이에 따른 코깅토크리플도 크게된다. 이 코깅토크는 관성이 작거나, 저속운전을 하는 모터의 경우 모터의 회전리플의 요인으로 작용한다

코깅토크 리플과 회전리플의 관계는 다음식으로 표현된다. 모터가 발생하는 코깅토크 리플  $\tau$ 를

$$\tau = \Delta\tau \cdot \sin(n\omega t) \quad (1)$$

$\Delta\tau$  : 코깅토크 리플의 편진폭,  $\omega$  : 로터 각속도

$n$  : 코깅토크 리플의 차수,  $t$  : 시간  
라 표시할 때, 회전리플  $\Delta\omega$ 는

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\tau}{J \cdot n \cdot \omega} \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서,  $J$  : 로터의 관성모멘트이다.

따라서, 회전리플을 작게 하려면 (2)식에 나타난 바와 같이 코깅토크 리플은 작게하고, 리플의 차수는 크게, 로터의 관성은 크게 하면 된다. 그러나 로터의 관성이 크면 파워레이프가 적어 응답성이 떨어지므로 실제로 모터설계시에는 위의 2가지 경우를 고려하여 설계하고 있다.

##### 2.2 코깅토크 저감방법

코깅토크를 줄이려면 모터설계에 의한방법과 제어기의 설계에 의한 방법이 있는데, 제어기 설계의 경우 모터의 코깅토크 변화를 정확히 예측하여 코깅토크를 제거하도록 전류제어를 해야 하기 때문에 고도의 제어기술이 요구된다. 따라서, 여기서는 모터설계에 의한 방법만을 토대로 기술하기로 한다.

##### 2.2.1 계자기자력 분포의 정현파 화

FEM 자체해석방법을 적용하여 계자기자력 파형을 정현파화 하는 것으로 코깅을 작게 하는 방법이 있는데, 이것은 슬롯 개구폭, 자석의 착자방향을 고려하여, 자석의 표면형상 및 자석 극호율을 최적화하는 것이다.

당사에서는 페라이트 AC 서보모터에 이 방법을 적용하여 제작 시판하고 있다. 이 모터는 3상 8극이고 스테이터는 24슬롯으로 되어있으며, 계자인 로터부에는 영구자석을 부착, 계자기자력 분포가 정현파가 되도록 양끝으로 갈수록 두께가 작아지는 편심구조로 되어 있다. 이 모터의 코깅토크는 정격의 1% 이하이다.

##### 2.2.2 슬롯 및 자석부에 skew 적용

모터가 소형·경량화되고 고정도화의 요구가 높아지면서 고에너지적을 가진 희토류 자석이 사용됨에 따라, 코깅토크도 상대적으로 커지게 된다. 따라서, 코깅토크리플의 진폭을 줄이는 방법으로 고정자 슬롯 또는 회전자 자석에 리플이 상쇄되도록 skew를 줌으로써 코깅토크를 감소시킬 수 있다. 이 방식은 모터구조가 더 복잡해지고 누설인덕턴스 및 stray loss 증가, 토크출력이 감소 하는 등의 단점이 있지만, 코깅토크 감소에 큰 효과가 있으므로 희토류자석 서보모터에 많이 적용되고 있다.

##### 2.2.3 분수슬롯 분포권 권선방식 채용

이 방식은 상당극당슬롯수(q)가 분수이며 분자가 1이 아닌 권선방식으로, 자극에서 본 퍼어미언스의 변화에 위상차를 줌으로써 코깅토크를 감소시키는 것으로, 기

존 정수슬롯권선방식은 위상차가 없기 때문에 회전시 각 자극마다 발생하는 코깅토크는 모두 동일하여 가산되어 나타나지만, 이 방식은 위상차가 있기 때문에 각 자극에서 발생하는 힘의 크기와 방향이 다르므로 코깅토크는 서로 상쇄되어 나타나는 효과를 준다. 그리고 슬롯수와 극수의 최소공배수로 나타나는 리플의 차수도 크기 때문에, 코깅토크는 정수슬롯권선에 비해 많이 감소된다. 일반적으로, 정수슬롯권선방식은 모터직경이 커서 슬롯수에 여유가 있고, 코일의 분포권이 가능한 페라이트 모터의 경우에 많이 적용되며, 분수슬롯 분포권 권선방식은 모터직경이 작아서 슬롯수의 제약이 다른 소형 고출력 모터에 주로 적용된다.

### 3. 시제품에의 적용

당사에서는 연구개발과제로 회토티류 영구자석을 이용한 8극 12Slot 중형 회토티류 서보모터 및 8극 9Slot의 소형 고출력 서보모터를 개발, 전자는 skew를 주는 방식으로 후자는 분수슬롯 분포권 권선방식으로 코깅토크에 위상차를 주어 시제품을 설계 및 제작하고 각각의 코깅토크를 측정 및 분석하였다. 그 결과를 아래에 소개한다.

#### 3.1 3상 8극 12 Slot

모터를 3상 8극으로 설계하면 슬롯은 9, 12, 18, 21, 24 등으로 선택 할 수 있지만, 소형 경량화에 따른 모터 크기의 감소를 위해서는 코일엔드부를 최대한으로 적게 하는 것이 바람직하다. 따라서, 이번 시제품에서는 이점을 고려하여 코일을 분리형으로 하고 코일에 코일을 직접 감는 방식을 선택, 권선배치를 감안 12개의 슬롯을 선정하였다.

모터의 코깅토크는 일반적으로 1회전당 슬롯수와 극수의 최소공배수만큼 리플이 발생한다. 따라서, 8극 12Slot 모터는 1회전에 24회의 리플이 생기고, 매 15도 주기마다 리플이 반복되어 나타난다.

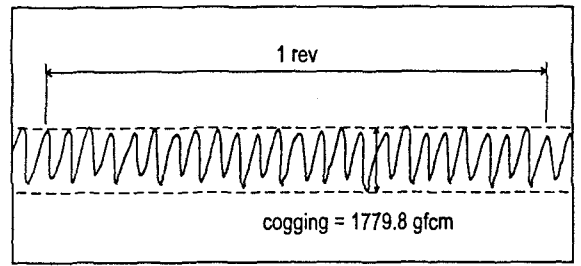
코깅토크 리플을 줄이려면, 코깅토크에 위상차를 주면 되므로, 여기서는 skew를 주는 방식을 채택하였다. 스테이터부는 분리형으로 되어 있기 때문에 skew 적용이 어려우므로 회전자로터에 skew를 줄 수 있도록 모터를 설계하였다. 또한, 고조파성분을 줄이기 위하여 자석을 편심으로 설계하고, 로터의 단수를 3단으로 하여 skew를 줄 수 있도록 하였다. 코깅토크 리플이 기계각으로 15° 주기마다 반복되기 때문에 자석이 3단인 경우 각 단마다 5° 씩 총 10°의 위상차를 줄 때, 즉 리플의 전기각이 120°의 위상차가 날 때, 리플이 최소가 됨을 알 수 있었고, 이 때의 유기전압이 정현파가 되도록 자석의 형상을 최적화 하였다.

코깅토크에 대한 대부분의 해석이론들은 자석의 착자상태가 명확하지 않은 경우에도 자석의 크기가 모두 동일하고 방향이 평행 또는 반경방향으로 가정하여 해석한 경우가 대부분이므로, 실제 모터에 적용하는 데에는 큰 오차를 수반하는 경우가 많다.

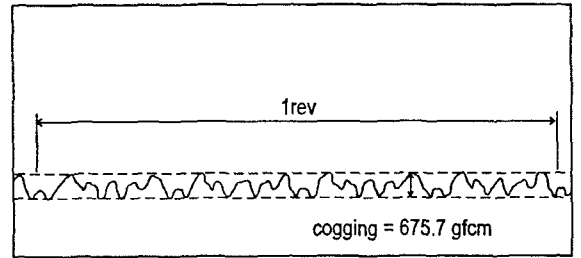
따라서, 본 시제품에서는 자석의 착자 후 코깅토크 파형 및 유기전압파형이 실제로 어떻게 나타나는가를 알아보기 위하여, skew각도를 변화시켜 가면서 그 때의 코깅토크 및 파형을 측정하였다. 코깅토크는 당사가 보유하고 있는 코깅토크 시험장치를 이용하였다. 먼저 skew가 없을 때의 코깅토크 파형을 측정하였고, 그 결과를 그림 1(a)에 나타내었다.

그림 1의 (a)를 보면 코깅토크 리플이 1회전동안 24회 나타나며, 그 파형모양은 거의 유사함을 알 수 있다. 그림 1의 (a)는 위상차가 없는 경우이므로 각 단의 코깅토크의 합성값으로 나타난 것임을 알 수 있다.

그림 1(b)는 코깅이 최소로 될 때의 파형을 측정하는 것이다.

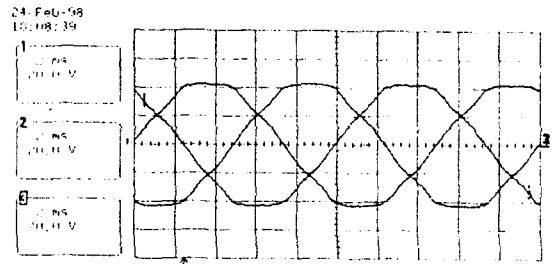


(a) skew = 0°

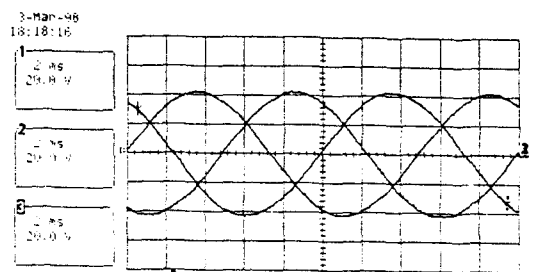


(b) skew = 10°

그림 1. 코깅토크 파형(8P 12Slot)



(a) skew = 0°



(b) skew = 10° (기계각)

그림 2. U, V, W 相 유기전압파형(1000rpm)

그림 1(b)를 보면 1회전동안의 리플파형이, 각 단의 위상차로 인하여 리플의 서로 상쇄되어 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 파형모양은 불규칙한 형태로 되고, 그 진폭은 거의 1/3로 줄어드는 효과가 있었다.

그림 2(a)는 skew가 없을 때의 유기전압파형을 나타낸 것이다. 그 파형모양은 구형파에 가까움을 알 수 있다. 그림 2(b)는 코깅이 최소로 될 때의 유기전압 파형이고, 정현파와 유사하다. 이 시험결과 skew가 유기전압파형에 미치는 영향은 매우 크다는 것이 입증되었다.

Skew각의 변화에 따른 코깅토크 및 유기전압을 아래의 표1에 정리하였다.

표 1. Skew에 따른 코깅토크 및 유기전압 비교

정격토크 (gf·cm)	skew 각도	유기전압 (mV/rpm)	코깅진폭 (gf·cm)	%코깅
85.000	회 토 류	0	31.11	2.09
		10	29.76	0.79
	페 라 이트	0	-	557.6

표1을 살펴보면 skew가 각10° 일 때 측정된 코깅토크 값은 정격토크대비 2.09%에서 0.79%로 대폭 줄어들었음을 알 수 있고, 페라이트 자석을 이용한 서보 모터의 코깅토크 수치 0.66과 거의 차이가 없음을 보여주고 있다.

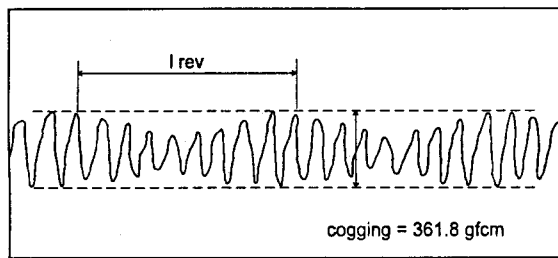
모터의 유기전압은 구동용 모터에 측정모터를 연결하여 1000rpm으로 돌리면서 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 skew가 없을 때는 31.11V였으나, skew각을 10° 로 하였을 때에는 29.76V로 약5%정도가 감소한 것을 알 수 있었다.

이번 시험을 통하여, skew에 따른 코깅토크 및 유기전압의 변화분포를 아는 데에 도움이 되었으며, 이 결과를 토대로 자석의 착자분포상태를 해석하는데 응용한다면, 좋은 결과가 기대된다.

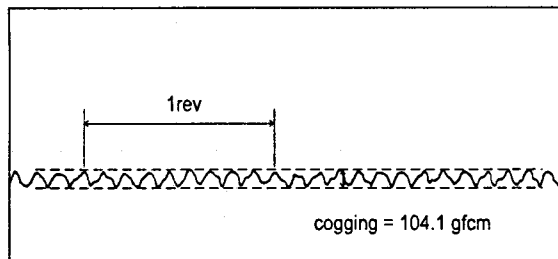
### 3.2 3상 8극 9 Slot

소형 고회력 모터는 로터관성이 작고 고속에서 견디는 구조로 설계해야 하므로 모터 직경이 작아야 하며 따라서 슬롯수에도 제약이 따른다. 그래서, 모터를 3상 8극으로 설계하려면, 코일의 인서팅이 가능하고 코깅토크의 감소효과도 얻을 수 있는 9slot으로 하는 것이 적당하다. 이는 상당극당슬롯수(q)가 3/8로 정수슬롯권선의 q=3인 경우와 동등한 분포권 효과를 가지기 때문에, 유기전압파형의 정현파가 가능하다는 잇점도 있다.

따라서, 당사에서는 이 방식을 적용하여 모터를 설계 및 제작하였다. 자석형상도 제작기자력 분포를 정현파화하기 위하여 편심으로 하였다. 그리고, 시제품의 코깅토크를 측정, 그 결과를 그림 3(a)에 나타내었다.



(a) 1차



(b) 2차

그림 3. 코깅토크 파형(8P 9Slot)

그림 3(a)를 보면 예상한 결과와 전혀 상반되는 것을 알 수 있다. 이론적으로는 모터 1회전에 극수와 슬롯수의 최소공배수인 72개의 리플이 나오는 것이 정상적이거나 슬롯수와 같은 9개의 리플이 나온 것이다. 따라서 모터의 코깅토크도 상대적으로 크게 나타나고 있다.

이는 자석의 착자배치의 호트러짐 또는 조립시의 가공오차로 인하여 나타난 결과로 생각되며, 분수슬롯권선방식을 실제 모터에 적용하는 데에는 상당한 주의가 필요하다는 것을 알게 되었다.

따라서, 자석가공오차를 최대한 줄이고 조립부품의 정밀도를 최대한으로 높여, 다시 모터를 재제작하여 코깅토크를 측정해 본 결과, 정격토크대비 1.67%보다 훨씬 작은 0.48%로 감소되는 효과를 얻을 수 있었다. 그 결과를 그림 3(b)에 나타내었다.

1차분과 2차분과의 코깅토크 비교를 표2에 정리하여 나타내었다.

표2. 분수슬롯권선방식의 모터 코깅토크 비교

항 목	정격토크 (gf·cm)	코깅진폭 (gf·cm)	%코깅
1차분	21717	361.8	1.67
2차분		104.1	0.48

## 4. 결 론

지금까지 회토류 자석 서보모터의 코깅토크를 줄이기 위한 방법으로 기존해석이론들을 설계에 적용하여, 실제로 모터를 제작하고 시험하였다. 코깅토크의 감소 방법으로 중형 회토류 서보모터에는 skew를 주는 방식을 적용하고, 소형 고회력 서보모터에는 분수슬롯 분포권 권선방식을 적용하여 직접 코깅토크를 시험하였다. 그 결과, skew를 주는 방식에서는 상당히 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 분수슬롯 분포권 권선방식에서는 착자의 불균일 또는 조립공차로 인한 영향이 코깅토크에 민감하게 작용하므로, 가공 및 조립시 신중을 기하지 않으면 코깅토크 감소에 별로 효과가 없음을 알게 되었다.

따라서, 앞으로는 이번 경험을 토대로 모터 제작시에 발생하는 여러 문제점들을 분석, 이를 설계에 적용하여 보완해 나갈 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] B. Ackermann, "New technique for reducing cogging torque in a class of brushless DC motors", IEE Proceedings, Vol 139, No.4, July 1992
- [2] Yasuhiro Miyamoto, Hirofumi Inokuchi "Extremely Low Cogging Torque Motors", 安川電機, 機報, 제53卷, 1989
- [3] Touzhu Li and Slemon, G. "Reduction of cogging torque in permanent magnet motors", IEEE Trans., Vol.24, No.6., 1988