

# 영구자석 모터의 코어 형상에 따른 코깅 토크 저감에 관한 연구

박일환\*, 조성열, 김동석, 박관수  
부산대학교 전자전기공학과 전자기응용연구실

## 1. 서론

영구자석 전동기는 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능하며, 다양한 구조 설계가 가능하여 여러 분야에 걸쳐 오래전부터 연구되고 사용되어왔다. 특히 최근에는 고에너지 밀도의 영구자석 재질이 개발되고 발달함에 따라 고출력의 영구자석 전동기의 설계도 가능해져 수만 rpm 이상의 고속 전동기뿐만 아니라 MW급 이상의 고 토크 전동기의 설계도 가능해졌다. 그러나 고성능 영구자석 모터는 필연적으로 큰 코깅 토크를 수반하므로 진동 소음의 원인이 되는 Cogging Torque 의 저감이 반드시 필요하다. Cogging Torque의 저감방법은 고정자나 회전자에 Skew를 주는 방법, fractional pole/slot을 사용, slot open 감소, 공극 길이 증가, Sub Slot 사용, 고정자 형상 변화 등이 있다.[1-3] 본 논문에 적용된 모델은 Skew, fractional pole/slot, slot open, 고정자 형상에 관한 방법이 설계 시 적용된 모델이며, 정격 토크 대비 22.23% 의 Cogging Torque 를 가지는 모델로서, 여전히 Cogging 저감의 필요성을 가지는 모델이다.

따라서 본 논문에서는 영구자석 모터의 Cogging Torque 를 저감하기 위한 방법 중, Core 에 Sub Slot을 사용하는 방법에 있어서, 일반적으로 알려진 Square-Type Sub Slot 방식을 변형하여 Arc-Type Sub Slot을 설계하고, 유한 요소해석을 통해 영구자석형 동기 전동기에 적용하여 그 성능을 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 Sub Slot법과 Cogging Torque 저감

영구자석 모터의 Cogging Torque는 회전자와 전기자와의 관계에 있어서 자석에서 본 자기회로의 Permeance 가 최대인 방향으로 유지하려는 경향 때문에 발생하는 Oscillatory Torque이다. Oscillatory Cogging Torque의 기본 주기는 360도를 극수, 슬롯수의 최소공배수로 나눈 값을 기계각으로 가지는데, 극수, 슬롯수의 최소공배수가 커지면, Cogging Torque의 주파수가 커지게 되므로 Cogging Torque는 감소하게 된다.

따라서, 고정자 Core에 Sub Slot을 주는 방법은 극수, 슬롯수의 최소공배수를 증가 시켜 Cogging Torque의 주기를 감소시켜 Cogging을 감소시키게 된다. 4극 6슬롯 모델에서는 Sub Slot을 1개 추가시마다 슬롯수는 6개씩 증가하는 효과가 있으므로 구조적 한계를 고려하여 Sub Slot을 1개에서 5개까지를 고려해볼 때, 본 모델에서는 Sub Slot이 2개 일 때가 코깅 주기 10도로서 Cogging을 감소시키기 위한 적절한 개수라고 볼 수 있다.

### 2.2 Sub Slot 형상의 적용

설계 대상 모델은 3상 4극 6슬롯 영구자석형 동기 전동기로서 fractional pole/slot 이 적용되었고, slot open 은 2.2mm 로 최소화 하였으며, 공극은 효율을 위해 0.4mm 로 유지하였다. Square-type Sub Slot Model 은 <그림 2>에 서와 같이 Sub Slot을 1개, 2개, 3개인 고정자 Core형상에 대하여 Sub Slot의 크기별로 Sub Slot 모델을 선정하였다.

### 2.3 Arc-Type Sub Slot Model

본 논문에서 제안하는 Arc-Type은 Sub Slot의 효과를 줄 수 있음과 동시에 Permeance 변화를 정현적으로 만들기에 회전시의 에너지변화를 줄일 수 있어, 보다 효과적으로 Cogging을 감소시킬 수 있다. 이를 확인하기 위해 <그림 3>에 서와 같이 Sub Slot을 1개, 2개, 3개인 고정자 Core형상에 대하여 Sub Slot의 Arc 반경반향으로 0.1mm 씩 만입시키면서 Sub Slot 모델을 선정하였다.

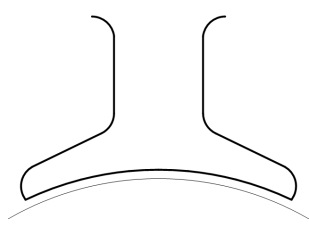


그림 1 Default

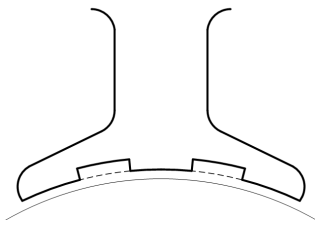


그림 2 Square-type

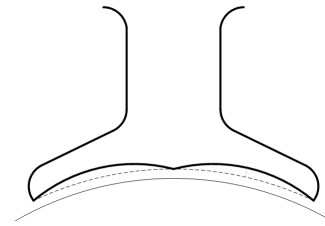


그림 3 Arc-type

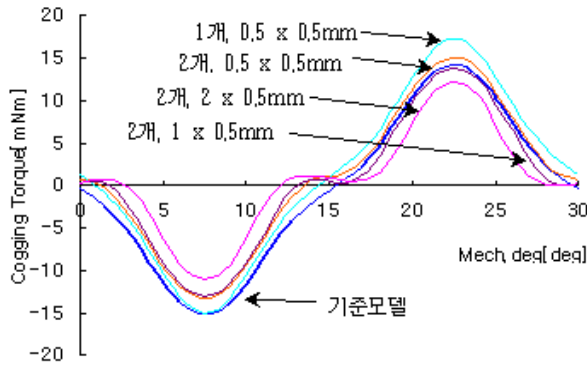


그림 4 Square-Type Sub slot Model

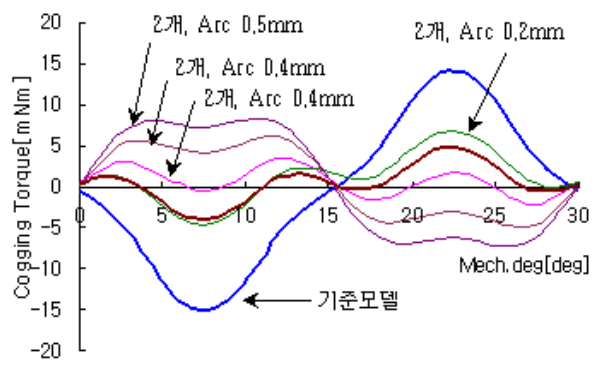


그림 5 Arc-Type Sub Arc Model

표 1 Square-Type Sub Slot 적용 결과

Model (sub,WxH)	성능파라미터			성능증감율			토크 대비 코깅
	출력 [W]	T_shft [mNm]	T_코깅 [mNm]	출력	T_shft	T_코깅	
기준모델	62.37	132.30	29.41	-----	-----	-----	22.23%
1개,1x0.5	62.89	133.47	37.84	0.83%	0.88%	28.64%	28.35%
1개,0.5x0.5	62.44	132.51	32.34	0.11%	0.16%	9.94%	24.40%
1개,0.2x0.5	63.25	134.21	30.66	1.40%	1.44%	4.26%	22.85%
2개,2x0.5	60.86	129.15	23.29	-2.42%	-2.38%	-20.82%	18.03%
2개,1x0.5	62.06	131.70	27.01	-0.50%	-0.45%	-8.17%	20.51%
2개,0.5x0.5	62.25	132.10	28.37	-0.20%	-0.15%	-3.55%	21.48%
2개,0.2x0.5	62.78	133.22	28.54	0.65%	0.70%	-2.96%	21.42%
3개,0.5x0.5	62.92	133.51	29.06	0.87%	0.91%	-1.19%	21.77%

표 2 Arc-Type Sub Slot 적용 결과

Model (sub,H)	성능파라미터			성능증감율			토크 대비 코깅
	출력 [W]	T_shft [mNm]	T_코깅 [mNm]	출력	T_shft	T_코깅	
기준모델	62.37	132.30	29.41	-----	-----	-----	22.23%
1개,arc 0.1	61.74	130.71	28.70	-1.37%	-1.32%	-2.80%	21.96%
1개,arc 0.2	61.63	130.78	27.34	-1.19%	-1.15%	-7.06%	20.90%
1개,arc 0.3	60.37	128.12	25.78	-3.21%	-3.16%	-12.35%	20.12%
2개,arc 0.2	61.33	130.14	11.40	-1.68%	-1.63%	-61.25%	8.76%
2개,arc 0.3	60.87	129.16	6.08	-2.42%	-2.37%	-79.33%	4.71%
2개,arc 0.4	59.67	126.62	11.07	-4.34%	-4.29%	-62.36%	8.74%
2개,arc 0.5	58.99	125.19	15.61	-5.42%	-5.37%	-46.94%	12.47%
3개,arc 0.5	59.55	126.37	8.89	-4.53%	-4.48%	-69.76%	7.04%

### 3. 실험결과 및 고찰

Square-Type과 Arc-Type의 Sub Slot을 디자인 하여 유한요소 해석을 통해 비교를 해보았다. Square-Type의 적용 결과는 <표1>와 같이 정격토크 대비 18%~28%의 코깅 수준을 나타내었다. 그중 상기한 바와 같이 Sub Slot 2개인 경우가 약 2.4%의 출력 및 토크 손실 선에서, 정격토크 대비 18.03%로 약 21%의 코깅 저감 효과를 보였다.

Arc-Type의 적용 결과는 <표2>과 같이 정격토크 대비 10% 대의 코깅 수준을 나타내었으며, 특히 Arc-Type Sub Slot이 2개이고 0.3mm만입 모델의 경우 약 2.4%의 출력 및 토크 손실 선에서, 정격토크 대비 4.71% 로 약 80%의 코깅 저감 효과를 보였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 영구자석 모터의 Cogging Torque를 줄이기 위한 Core 형상 중의 하나인 기존의 Square-Type sub slot과는 다른 형상으로 Arc-Type Sub Slot을 제안하고, 유한요소 해석을 통해, 이를 PMSM에 적용하여, 2.5% 이내의 출력 감소 범위로, 정격 토크 대비 22.23%(기준모델) 에서 4.71%(적용모델)로 80% 가량 Cogging Torque가 감소함을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 Arc type Sub slot은 sub 슬롯 개수와 sub 슬롯 깊이의 두개의 형상 설계 변수로서 square type 보다 구조가 간단하고 공정이 쉬우면서도 코깅 토크 저감 효과의 향상을 기대할 수 있다. 본 연구를 통해 Cogging 감소를 위한 Sub Slot의 적용에 있어서, 적용 모델에 따라 그 형상이 다양하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었으며, 차후 전동기 요구 성능에 따라 특정할 수 있는 Sub Slot 형상에 대한 연구가 필요하다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Jeon, Y.S.; Mok, H.S.; Choe, G.H.; Kim, D.K.; Ryu, J.S, "A new simulation model of BLDC motor with real back EMF waveform", IEEE Tran. on Power Elec., pp.217-220, 16-18 July 2000
- [2] Ko, J.S., "Asymptotically stable adaptive load torque observer for precision position control of BLDC motor", Electric Power Applications, IEEE Proceedings, vol 145, no. 4, pp. 383-386, 1998
- [3] Bin Zhang; Xiuhe Wang; Ran Zhang; Xiaolei Mou, "Cogging torque reduction by combining teeth notching and rotor magnets skewing in PM BLDC with concentrated windings", Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on 17-20 Oct. 2008 Page(s):3189 - 3192