

# Comparative Investigation on Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor and Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor with 6 pole-9 slot and 6-pole-18 slot Combination

Yu-Seop Park\*

Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

(Received 26 February, 2019, Received in final form 24 April, 2019, Accepted 24 April, 2019)

This paper deals with the comparative investigation on electrical machines which are an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) and a surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) by considering pole and slot combination under identical size conditions. Each of 6 pole machine employs 9 slot and 18 slot stator cores with concentrated winding and distributed winding, and those machines are designed to have identical induced voltage and output torque conditions for their reasonable comparison. Based on the electromagnetic field characteristic analysis results by finite element method (FEM), their torque, power loss and efficiency are addressed. Besides, while their efficiency maps are derived by output power and power losses, the best model with highest efficiency was determined, and the volume of their used materials are comparatively addressed for the application of 30 (kW) machine in milling systems.

**Keywords :** IPMSM, SPMSM, Efficiency

## 6극 9슬롯과 6극 18슬롯의 조합을 갖는 매입형 및 표면부착형 영구자석 동기전동기의 특성 비교 분석

박유섭\*

한국교통대학교 전기공학전공, 충북 충주시 대학로 50, 27469

(2019년 2월 26일 받음, 2019년 4월 24일 최종수정본 받음, 2019년 4월 24일 게재확정)

본 논문에서는 매입형 및 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 특성 비교에 관한 연구를 수행하였다. 6극을 가지는 각 전동기는 9슬롯 및 18슬롯의 고정자 코어와 집중권 및 분포권을 적용하였으며, 합리적인 비교를 위해 동일한 사이즈 조건 하에서 동일한 무부하 역기전력과 토크 특성을 가지도록 설계되었다. 더불어, 유한요소해석법을 기반으로 한 전자기 특성 해석을 통해 토크, 손실, 효율 등이 다루어졌고, 특성해석결과를 통해 밀링머신에 적용되는 30(kW)급 전동기의 기초설계가 이루어졌다. 또한, 효율맵을 통해 가장 높은 효율을 가지는 모델이 선정되었으며, 각각의 사용 재료를 비교하여 모델별 장단점을 분석하였다.

**주제어 :** IPMSM, SPMSM, 효율

### I. 서 론

고출력 및 고효율 특성을 갖는 영구자석 동기전동기는 로봇 및 자동화 시스템, 차량 시스템 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. 영구자석 전동기는 회전자의 타입에 따라 매입형(IPMSM)과 표면부착형(SPMSM)으로 크게 분류될 수 있는데, 표면 부착형은 제어 및 제작성, 매입형은 고속 및 고토

운전에서의 강점을 가지고 있어, 최근 이들의 설계 및 특성해석, 성능평가에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되어 왔다. 먼저, 전동기의 정확한 성능 예측을 위한 특성해석에서 매우 중요한 것으로 알려진 회로정수 도출과 관련하여 [1]에서는 5상 표면부착형 영구자석 전동기의 인덕턴스 도출에 관한 연구를 수행하였고, 전동기의 성능과 직접적인 관계가 있는 손실해석과 관련해서는 [2]에서 10극 12슬롯 표면부착형 전동기의 철손 해석이 수행된 바 있다. 반면, 전동기의 진동 및 소음의 원인이 되는 코깁토크와 토크리플의 저감에 관한 연구도 진행이 되었는데, [3]에서는 50(W)급 로봇관절용 표면부착형의 코깁토

크 저감 설계에 관한 연구를 수행하였고, [4]에서는 비대칭 노치를 사용하여 120(W)급 표면부착형의 코깅토크를 저감시키는 연구를 수행하였다. 더불어, [5]과 [6]에서 16극 24슬롯을 가지는 차량용 인휠 매입형 전동기와 180(W)급 매입형 전동기의 토크리플 저감을 위한 최적화 설계 방법이 보고된 바 있다. 또한, 표면부착형 및 매입형 동기전동기의 비교에 관한 연구도 수행된 바 있으며, [7]에서는 6극 9슬롯 조합을 가지며, 희토류 자석을 적용한 매입형과 비희토류 자석을 적용한 표면부착형 BLDC 전동기에 대한 설계 및 특성분석이 이루어졌다. 더불어, [8]에서는 모터의 시리즈화에 적합하도록 제안된 방법을 통해 매입형의 출력밀도 향상 방법을 제시하기도 하였다.

잘 알려진 바와 같이 고속운전 조건을 가지는 전동기의 경우 매입형이 토크리플의 영향으로 고출력 특성을 가지는 장점이 있어 매우 널리 사용되고 있지만, 비교적 저속 및 저용량의 전동기에서는 큰 차이를 보이지 않아, 대부분의 연구들이 고출력 시스템 응용에서 매우 활발하게 진행되어 왔다. 하지만, 소형 시스템의 고효율화 및 신뢰성 확보를 위해서는 전동기의 타입을 선정이 매우 중요하므로, 이들의 비교 분석도 반드시 수행되어야 한다고 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 매입형과 표면부착형 영구자석 전동기의 전자기 특성 해석을 수행하였으며, 고정자 슬롯수 및 권선법에 따른 전동기의 손실 및 성능을 평가하였다. 6극을 가지는 해석모델은 9슬롯 집중권과 더불어 18슬롯 분포권이 적용되었으며, 표면부착형에는 자석의 비산방지를 위한 슬리브가 사용되었다. 본 연구는 밀링머신에 적용하기 위한 30(kW)급 전동기를 설계하기 위해, 다양한 모델을 축소하여 설계하였다. 이들의 전자기 특성 분석결과와 향후 제작될 모델의 시험결과를 기반으로 최적화를 수행할 계획에 있으며, 본 논문에서는 이들 축소모델의 전자기 특성해석에 대한 분석을 수행하였다.

본 논문은 회전자 타입 및 고정자 슬롯수에 따른 4가지 해석 모델을 기반으로 이들의 무부하 특성과 부하특성에 대한 평가로 크게 구성되어 있다. 해석모델은 각각 매입형 9슬롯, 매입형 18슬롯, 표면부착형 9슬롯, 표면부착형 18슬롯이며, 이들 9슬롯과 18슬롯이 매입형과 표면부착형에 적용될 시 동일한 권선이 사용되었다. 2절에서는 매입형과 표면부착형 전동기의 고정자 슬롯 수와 권선법에 따른 해석모델의 제시 및 공극자속밀도와 역기전력 특성 등을 비교하고 3절에서는 토크특성 및 손실, 효율특성을 비교하여 4절에서 본 연구의 결론을 제시하고자 한다.

## II. 매입형 및 표면부착형 영구자석 동기기의 전자기 특성 해석 모델 및 무부하 특성

### 1. 설계요구사항

본 논문에서 다루어지는 매입형 및 표면부착형 전동기의 설

**Table I.** Design specification of analysis models.

Specification	Unit	Value
Rated power	W	120
Rated speed	rpm	1,500
Maximum speed	rpm	4,500
Rated torque	Nm	0.76
Outer radius of stator core	mm	27.5
Inner radius of rotor core	mm	10.0
Stack length of stator/rotor	mm	55.0
Induced voltage at 1,000 (rpm)	Vrms	12.3

계 사양은 Table I과 같다. 표에서 확인할 수 있는 바와 같이 고정자 외경과 회전자 내경, 축방향 길이는 동일한 조건을 가지도록 설계되었으며, 무부하조건 1,000(rpm)에서 동일한 역기전력 특성을 갖는다. 따라서, 외부 쿨링 자켓 및 하우징과 회전자축을 공유할 수 있다. 회전자에는 N42SH의 NdFeB 자석이 적용되었고, 이는 SmCo 자석과 더불어 희토류로 분류되며 모터 및 발전기에 널리 적용되고 있다[9]. 앞서 언급된 바와 같이, 각각의 매입형과 표면부착형 고정자에는 9슬롯 및 18슬롯의 전기강판이 적용되어 있으며, 기계적 공극길이는 0.5(mm)로 동일하다. 여기서, 기계적 공극은 매입형의 경우 회전자 코어 외반경과 고정자 코어 내반경의 차, 표면부착형의 경우 슬리브 외반경과 고정자 코어 내반경의 차이를 의미한다. 6극 9슬롯 조합은 소형뿐만 아니라 전기자동차의 인휠 모터에 적용된 바 있으며[10], 여기서는 최대속도 12,100(rpm) 및 최대출력 56(Nm)의 매입형에 대한 연구가 수행되기도 하였다.

반면,  $q = Nslot / (Npole * Nphase)$ 에 의해 계산되어지는 매극 매상당 슬롯수는 9슬롯인 집중권의 경우 0.5로 분수슬롯, 18슬롯인 분포권의 경우 1로 정수슬롯이며, 다양한 전동기 설계에 적용되는 극슬롯 조합이다 또한, 잘 알려진 바와 같이 집중권 모델은 분포권 모델과 비교하여 코일엔드부의 길이가 짧으므로 저항값을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서 다루어지는 모델은 전체 코일의 길이가 분포권에 비해 집중권이 79.1%로 예측되었다. 더불어, 본 논문에서 다루어지는 전동기의 입력전원은 3상 220(V)의 전원을 사용하며, 공급전압 220(V)는 [11]에서 제시한 바와 같이 입력전압 강하율을 90(%)로 가정했을 때 약 267(V)가 되고, SVPWM 방식을 적용하는 경우 전동기의 최대 상전압은 약 154(V)가 된다.

### 2. 매입형 영구자석 동기전동기

앞서 언급된 바와 같이 본 논문에서 다루어지는 매입형 영구자석 전동기는 고정자 슬롯 수에 의해 구분된다. Fig. 1에서는 6극 9슬롯 조합에 집중권 권선이 시행된 Model A와 6극 18슬롯 조합에 분포권 권선이 시행된 Model B를 보여주고 있다. 여기서, 집중권은 코일피치가 1, 분포권은 코일피치

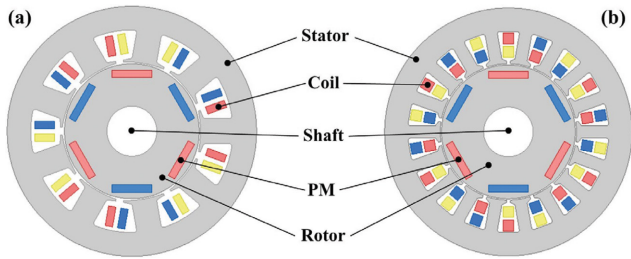


Fig. 1. (Color online) Analysis models of IPMSMs according to number of stator slot: (a) Model A, (b) Model B.

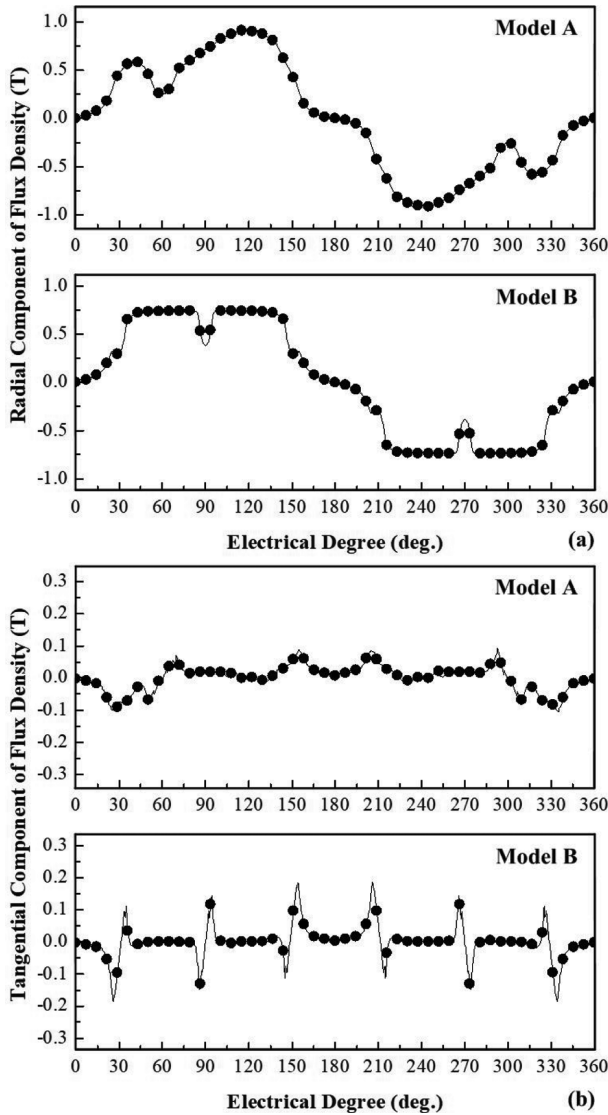


Fig. 2. Flux density of IPMSMs in air-gap: (a) radial component, (b) tangential component.

가 4인 모델이다. 합리적인 비교를 위하여, 각 모델에는 동일한 회전자가 적용되어 있다. 영구자석의 경우 직육면체의 N42SH의 희토류 자석이 적용되어 있으며, 평행방향 착자로

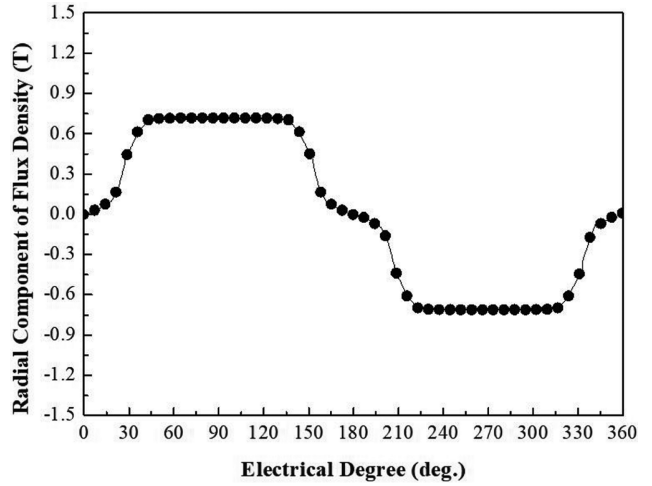


Fig. 3. Radial component of flux density of IPMSMs in air-gap without slots.

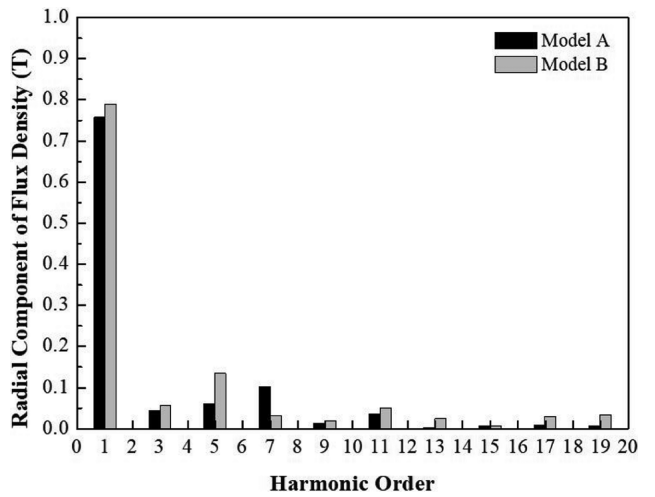


Fig. 4. FFT results of radial component of flux density in air-gap (IPMSMs).

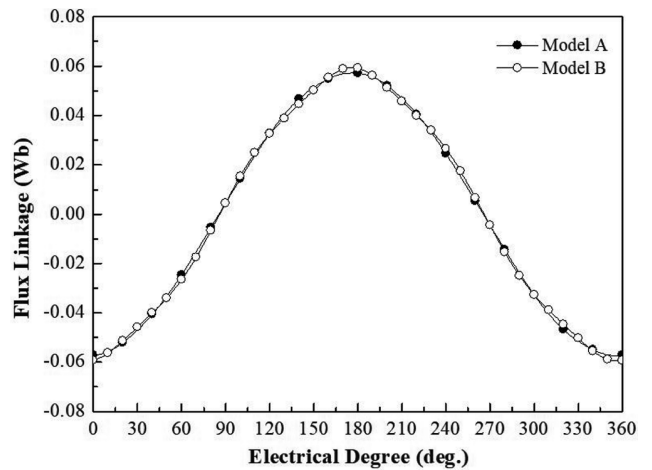


Fig. 5. Flux Linkage of Model A and Model B in no-load condition.

설계되어 있다.

영구자석형 동기전동기에서의 역기전력은 공극자속밀도에 의해 결정된다. 유한요소해석법을 기반으로 하여 공극자속밀도를 계산할 수 있으며, 각 모델의 반경방향 성분과 원주방향 성분을 Fig. 2에 제시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 반경방향 성분이 원주 방향 성분에 비해 매우 크며, 고정자

철심의 포화 및 고정자 슬롯팅 효과에 의한 고조파가 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3에서는 고정자 슬롯이 존재하지 않는 경우를 보이고 있으며, 슬롯유무에 따른 차이를 확인할 수 있다. 6극 18슬롯의 경우 극 당 3슬롯이 존재하는데 3슬롯 중 자석을 기준으로 왼쪽과 오른쪽의 슬롯은 자석의 극호비에 의해 큰 영향을 미치지 않지만, 가운데 슬롯에 의한 공극에서의 공간고조파가 발생한다. 더불어, Model A의 반경방향자속밀도 최대값이 Model B 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 4의 FFT 분석결과를 보면, 기본파 성분은 오히려 Model B가 더 크고 7조파를 제외한 다른 차수의 고조파 성분들이 Model B에 더 많이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다.

반면, Fig. 5와 Fig. 6에서는 각 모델별 쇄교자속과 무부하 역기전력을 비교하고 있다. Model B의 경우 정현적인 역기전력을 위해 1슬롯 피치의 스쿠가 고정자에 적용된 모델과 비교하였다. 전동기 전압의 고조파는 전류의 고조파 성분과의

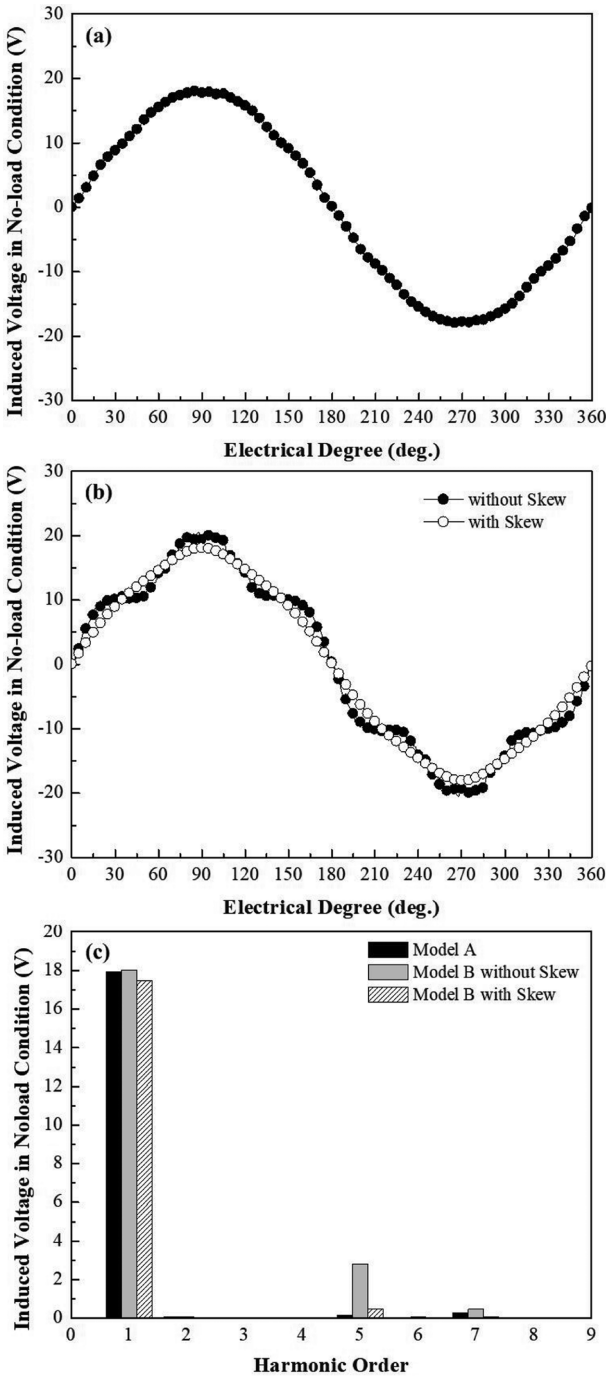


Fig. 6. Comparison of induced voltage of IPMSMs at 1,000 (rpm); (a) Model A, (b) Model B, (c) FFT results.

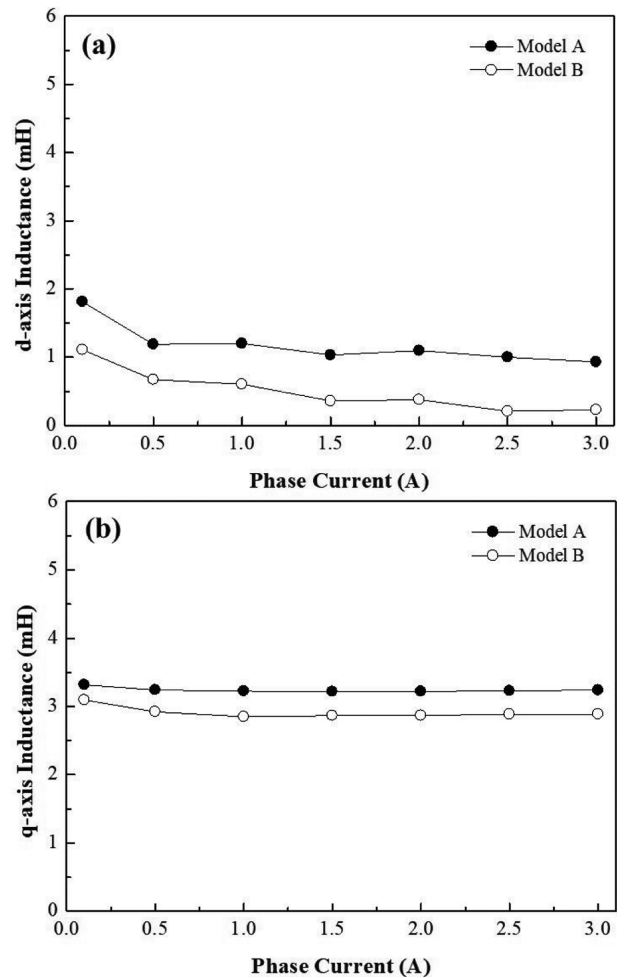


Fig. 7. Comparison of inductance of IPMSMs according to phase current: (a) d-axis inductance, (b) q-axis inductance.

상호작용에 의해 토크리플을 발생시키는 원인이 된다. 전압의 기본파성분과 전류의 5차 고조파, 전압의 3차 고조파 성분과 전류의 3차 고조파, 전압의 5차 고조파와 전류의 기본파 성

분 등을 의미하며 Fig. 6(c)에서 제시된 18슬롯 모델의 5고조파 성분이 스큐에 의해 저감되는 것으로 보아, 토크리플 저감에 효과가 있음을 확인할 수 있다. 9슬롯의 집중권의 경우 스큐 1슬롯 피치를 적용하는 경우 고정자 권선 시행을 위한 슬롯 점적률이 매우 낮아져 제작성에 문제가 생기므로 스큐를 적용하지 않았다.

또한, 영구자석형 동기 전동기의 경우 성능 예측을 위해 회로정수 도출이 매우 필수적이다. 다양한 회로정수 중 인덕턴스는 영구자석 전동기의 토크를 결정하는 매우 중요한 요소가 되므로, 설계 및 특성 해석 단계에서 반드시 도출되어야 한다.

영구자석 전동기의 인덕턴스는 [12]에서 제시된 바에 의해 계산되어질 수 있다. 본 논문에서는 무부하 및 부하시의 쇄교자속과 이들의 위상차를 통해 도출된 인덕턴스를 Fig. 7과 같이 다양한 전류조건에서 비교하였다. 여기서, 전동기는 순수 정현파에 의해 제어된다고 가정하였다. 그림에서 확인할

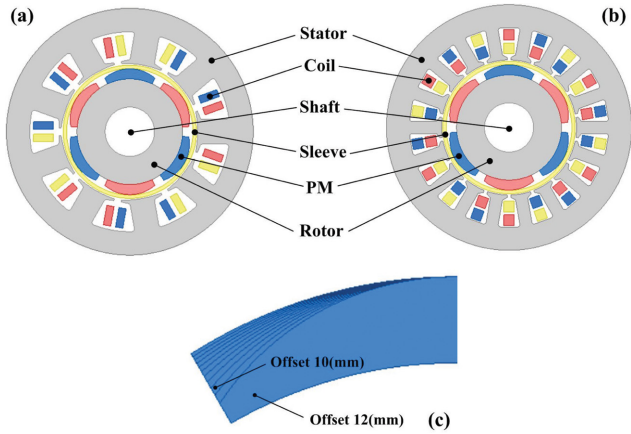


Fig. 8. (Color online) Analysis models of SPMSMs according to number of stator slot: (a) Model C, (b) Model D, (c) PM offset.

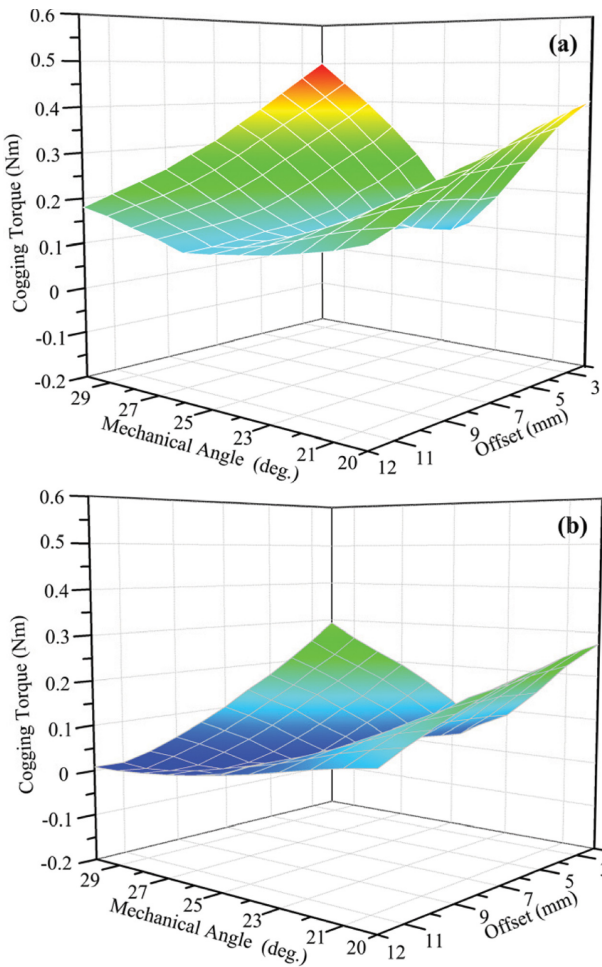


Fig. 9. (Color online) Cogging torque of according to PM shape: (a) Model C, (b) Model D.

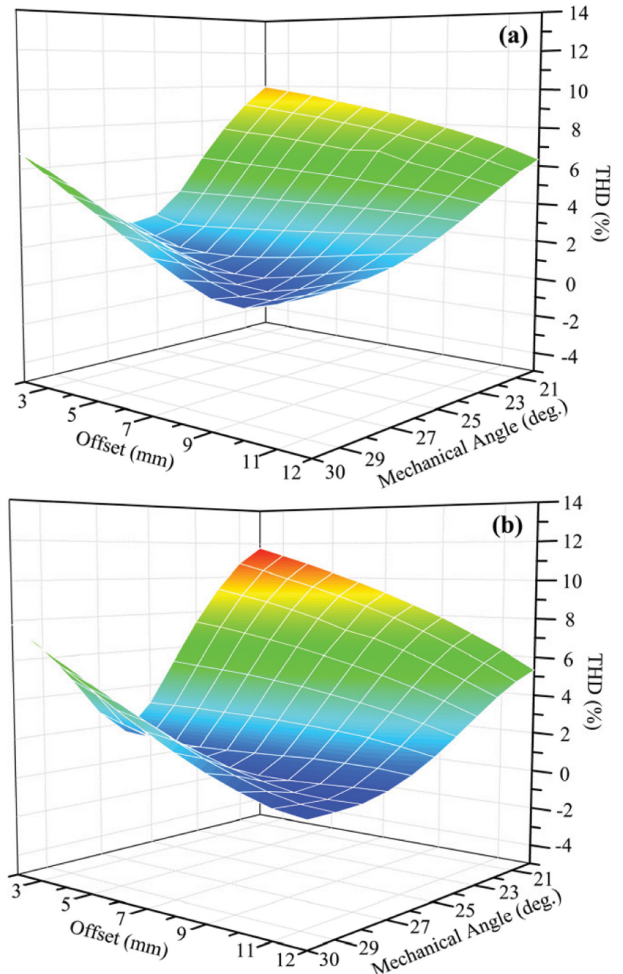


Fig. 10. (Color online) THD of Induced voltage according to PM shape: (a) Model C, (b) Model D.

수 있는 바와 같이 전 구간에서 Model A가 Model B가 더 큰 인덕턴스 값을 보이고 있으며, 두 가지 모델 모두 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 더불어, 전류조건에 따라서 인덕턴스 값이 일정하지 않기 때문에 전동기 제어 시에는 이러한 비선형성이 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다. 향후, 제작 모델의 전동기 제어 시 해석된 인덕턴스 값은 look-up table화 하여 적용될 예정이다.

3. 표면부착형 영구자석 동기전동기

Fig. 8에서는 고정자 슬롯수에 따른 표면부착형 영구자석 동기 전동기를 제시하고 있다. 각 모델은 앞서 매입형 영구자석 동기 전동기에 적용된 9슬롯 및 18슬롯의 동일한 고정자 코어를 채용하고 있으며, 동일한 권선사양을 가지면서,

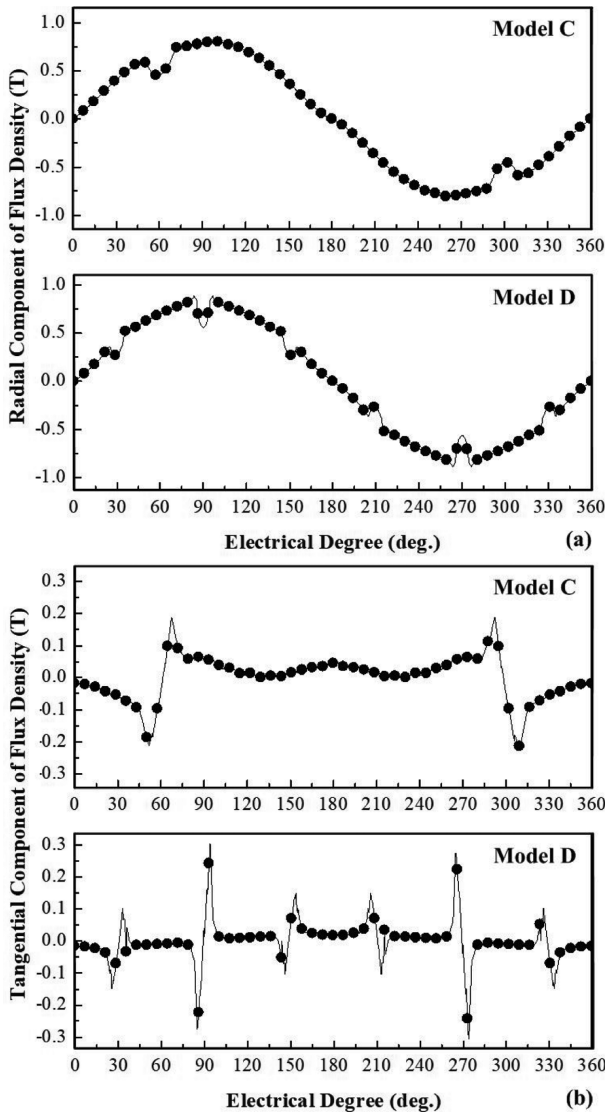


Fig. 11. Flux density of SPMSMs in air-gap: (a) radial component, (b) tangential component.

Table I에서 제시하는 역기전력을 만족하도록 Fig. 8(c)와 같이 회전자영구자석을 설계하였다. 표면부착형의 경우 원심력에 의해 자석이 비산될 수 있으므로 이를 방지하기 위해 비자성채 재질의 슬리브가 적용되어 있다.

표면부착형 영구자석 전동기의 경우 영구자석은 코깁토크 및 역기전력 THD 저감을 위해 극호비 및 회전자 오프셋을 통해 설계 되었고, Fig. 9와 Fig. 10에서 해석결과를 제시하고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 각 설계변수에 따라 코깁토크 및 역기전력 THD가 매우 민감하게 반응하고 있는 것을 알 수 있으며, 최종모델은 이들의 값이 최소값이 가깝고, Table I에 제시되어 있는 역기전력을 만족시키도록 오프셋은 10(mm), 각도는 25(deg.)의 모델이 최종 선정되었다. 여기서 오프셋은 전동기의 원점으로부터의 거리를 의미하고, 오프셋이 된 점에서 그려진 원과 영구자석의 좌변 및 우변이 만나도록 형상이 설계되었다. 더불어, 각도는 영구자석

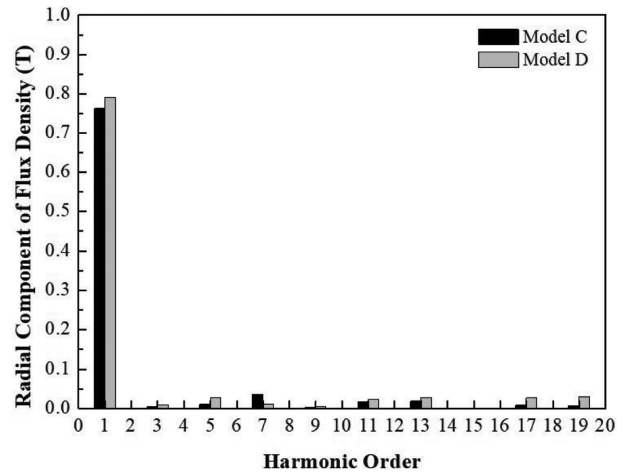


Fig. 12. FFT results of radial component of flux density in air-gap (SPMSMs).

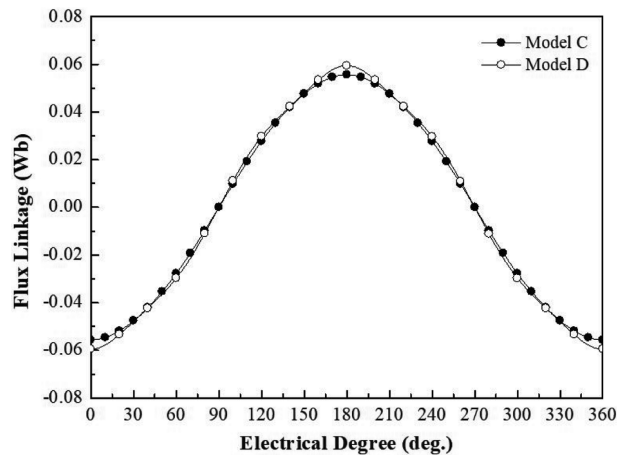


Fig. 13. Flux Linkage of Model A and Model B in no-load condition.

의 전체 각도를 이등분하여 구한 값이다. 예를 들어 각도 30(deg.)는 6극 전동기의 극호비 1을 의미한다.

Fig. 11은 표면부착형 모델의 공극자속밀도를 제시하고 있다. 앞서 매입형과 다르게 표면부착형의 경우에는 반경방향성분의 최대값의 경우 18슬롯 모델인 Model D가 9슬롯 모델인 Model C 보다 큰 것으로 확인되었다. 더불어, 원주방향성

분은 그 값이 매우 작아 공극 자속밀도는 반경방향성분이 지배적으로 매입형과 동일한 특성을 보였다. 더불어, Fig. 4와 Fig. 12의 공극자속밀도 FFT 분석결과를 비교해보면, 고조파를 많이 함유하고 있는 매입형과 달리 표면부착형은 고조파가 상대적으로 적음이 확인 가능하다.

Fig. 13과 Fig. 14는 표면부착형 전동기의 무부하 쇄교자속과 역기전력을 보이고 있으며, 매입형과 동일한 이유로 고정자에 1슬롯 피치의 스쿠가 시행되었다. 그림에서 보이는 바와 같이 5차 고조파 성분이 매우 작아지는 효과를 확인하였다.

### III. 부하특성 및 성능 비교

#### 1. 토크 특성

영구자석형 동기전동기의 토크는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크로 구성되어 있으며, 표면부착형의 경우 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스가 같으므로 마그네틱 토크만 존재하며, 매입형의 경우 d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스보다 작으므로, 릴럭턴스 토크가 존재하여 체적당 더 큰 토크를 낼 수 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 15는 본 논문에서 다루어지는 매입형 및 표면부착형 영구자석 전동기의 토크-속도 특성을 보이고 있다. 여기서, 1,500(rpm)까지는 최대토크제어(Maximum Torque per Ampere, MTPA)를 수행하고, 1,500(rpm) 이상에서는 약제자 전류를 수행한다. 최대속도는 4,500(rpm)이다. 본 논문에서는 Fig. 15의 토크 조건에서 각 모델의 동손, 철손 및 회전자 손을 예측하고, 이에 따른 효율 특성을 비교하였다.

#### 2. 손실 특성

본 논문에서의 동손은 각 모델별 도출된 저항값에 전류의 제곱을 곱하여 도출하였으며, Model A는 3.92(W), Model

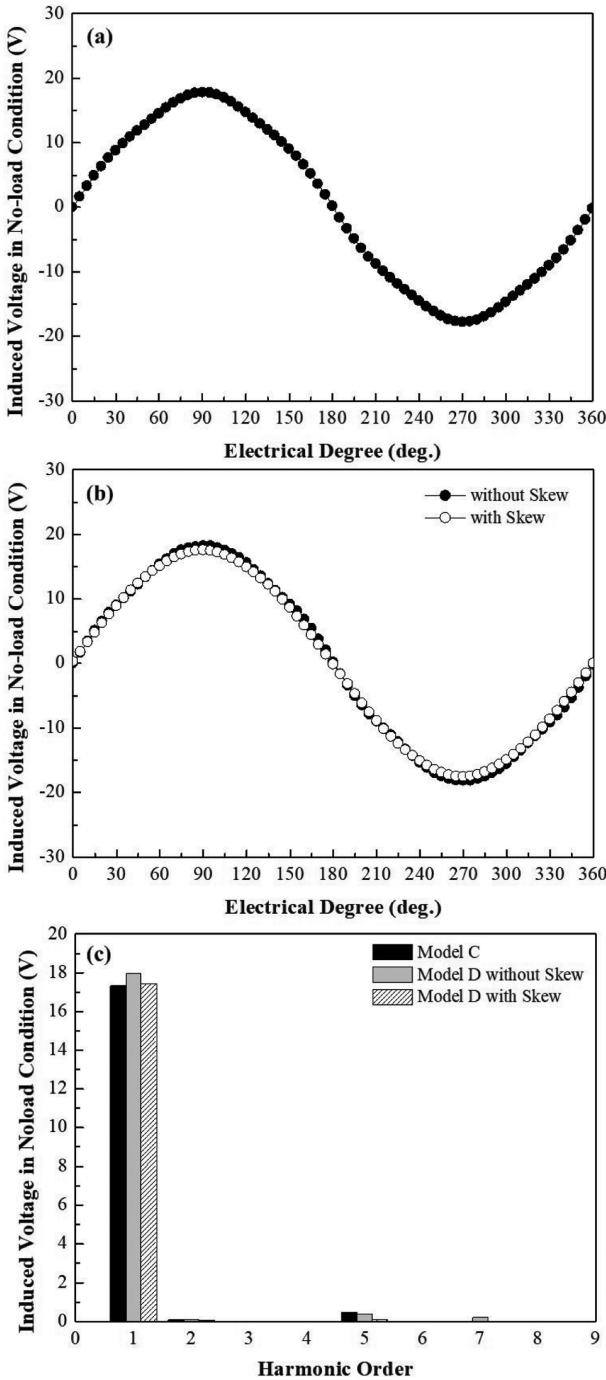


Fig. 14. Comparison of induced voltage of SPMSMs at 1,000 (rpm); (a) Model C, (b) Model D, (c) FFT results.

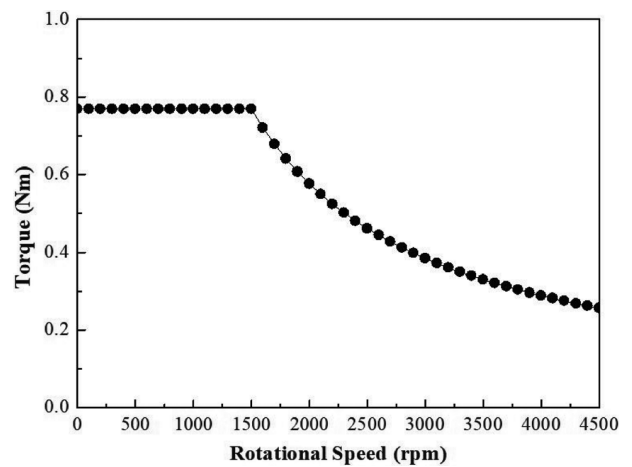


Fig. 15. Torque-speed curve of interior and surface-mounted permanent magnet synchronous motor (3A).

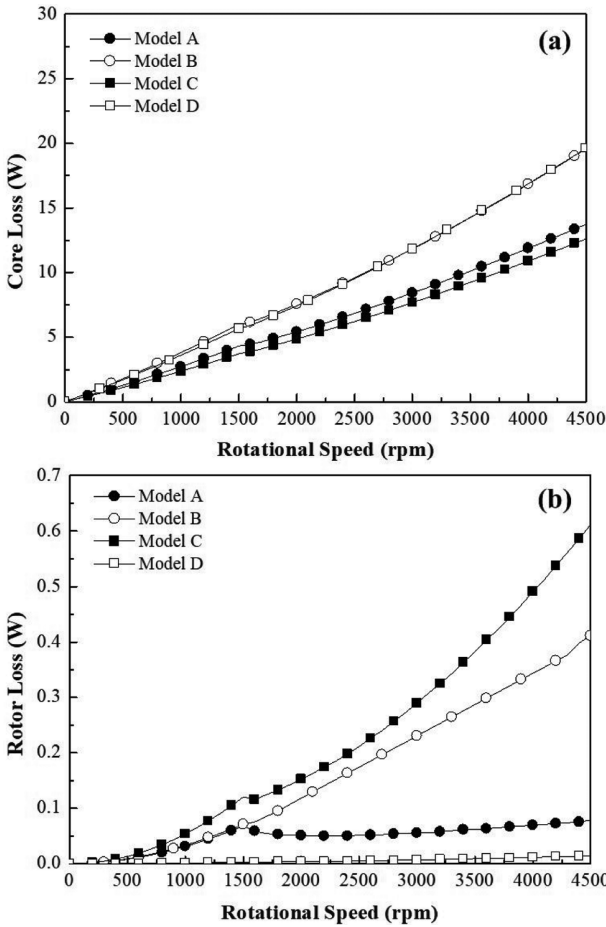


Fig. 16. Electromagnetic power losses: (a) core loss, (b) rotor loss.

B는 3.42(W), Model C는 6.37(W), Model D는 7.14(W)로 계산되었다. 여기서, 각 모델의 저항은 9슬롯 모델은 1.164(ohm), 18슬롯 모델은 1.471(ohm)으로 예측되었다.

Fig. 16에서는 철손 및 회전자손 해석 결과를 제시하고 있다. 잘 알려진 바와 같이 철손 및 회전자손은 주파수와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 그림에서 제시하고 있는 바와 같이 저속구간에서는 각 모델별 철손과 회전자 손이 매우 유사한 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 속도가 증가하면서 각 모델별 손실특성이 매우 달라지게 되는데, 철손의 경우 분포권 모델인 Model B와 Model D가 집중권 모델보다 철손이 큰 것을 확인할 수 있고, 회전자 손실의 경우 매입형 모델이 표면부착형 모델보다 고속구간에서 더 큰 값을 보임을 확인하였다. 이는 매입형과 표면부착형의 기계적인 공극은 같지만 표면부착형의 자기적인 공극이 매입형보다 크기 때문에 전기자 반작용이 작기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 최대 속도 조건에서도 회전자 손실은 매우 작으므로, 본 논문에서 다루어지는 소형 영구자석 기기에서는 성능평가에서 무시될 수 있을 것으로 판단된다.

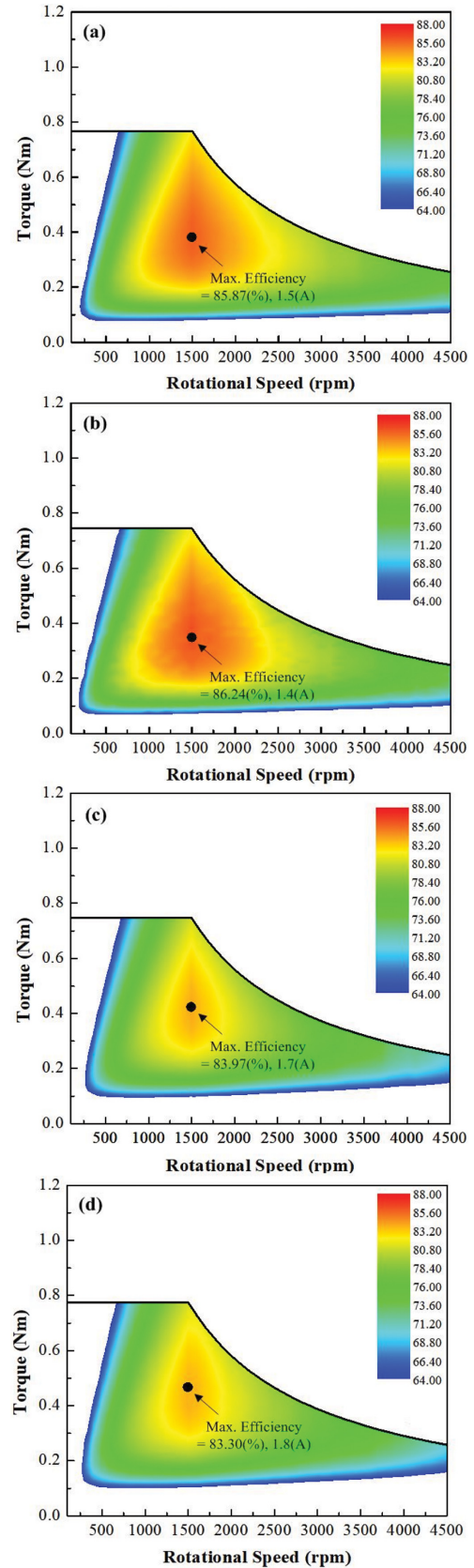


Fig. 17. (Color online) Efficiency map according to rotational speed: (a) Model A, (b) Model B, (c) Model C, (d) Model D.



**Table II.** Comparison of used materials.

Material	Unit	Value			
		A	B	C	D
Coil	mm	14,043	17,746	14,043	17,746
Stator	mm <sup>3</sup>	210,152	217,978	210,152	217,978
Rotor	mm <sup>3</sup>	85,314	85,314	61,850	61,850
PMs	mm <sup>3</sup>	15,305	15,305	23,983	23,983
Sleeve	mm <sup>3</sup>	-	-	4,241	4,241

**Table III.** Design specification of 30 (kW) model.

Specification	Unit	Value
Rated power	kW	32
Rated speed	rpm	1,500
Maximum speed	rpm	4,500
Rated torque	Nm	210
Outer radius of stator core	mm	145
Inner radius of rotor core	mm	29
Stack length of stator/rotor	mm	290
Induced voltage at 1,000 (rpm)	Vrms	134

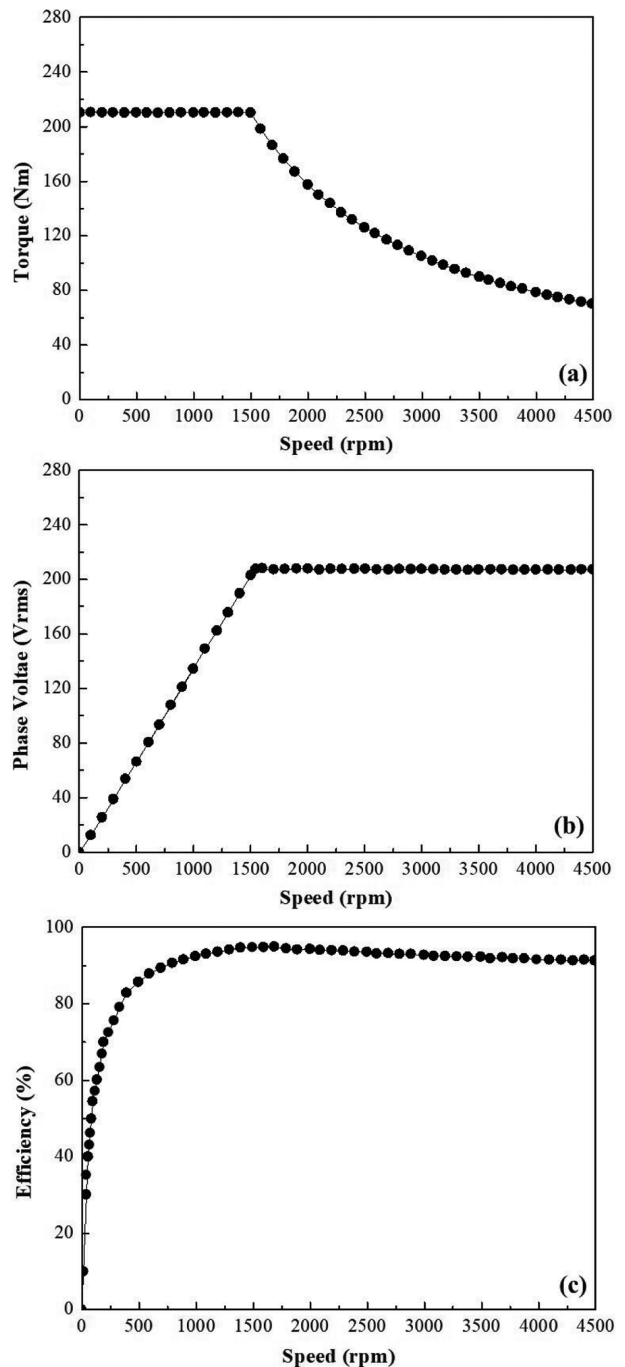
**3. 효율 특성**

앞서 도출된 토크, 동손, 철손, 회전자 손을 기반으로 하여, Fig. 17과 같이 각 모델별 효율맵을 도출하였다. 각 모델은 Fig. 15에서 제시하고 있는 출력력을 보이는 조건에서 해석되었으며, 각 모델에 대한 해석조건은 전류와 부하각을 제외하고 모두 동일하다. 그림에서 보이는 바와 같이 각 모델의 최대 효율은 1,500(rpm) 부근에서 확인되며, Model B가 가장 높은 효율 특성을 보이고 Model A, Model C, Model D의 순으로 최대 효율값이 감소하는 것을 확인하였다. 전동기는 항상 최대 효율 조건에서만 운전될 수 없다고 알려져 있다. [13]에서 제시한 바와 같이 실제 산업용 전동기는 낮은 효율 조건에서 운전되는 비율이 매우 높기 때문에 시스템 운전에 있어서 본 논문에서 제시한 효율맵이 유용한 자료로 활용될 것이라 기대된다.

마지막으로, Table II는 각 전동기 타입별 재료의 사용량을 제시하고 있다. 고정자 권선의 경우 분포권인 Model B와 Model D가 26%, 고정자 코어의 경우 Model B와 Model D가 집중권인 Model A와 Model C보다 3% 높은 것으로 확인되었다. 반면, 회전자 코어는 매입형인 Model A와 Model B가 표면부착형인 Model C와 Model D보다 37% 높고, 영구자석은 표면부착형이 56% 더 많이 사용되었다.

**4. 30(kW)급 모델 해석 결과**

본 논문에서 다루어진 모델 중 Model B는 밀링머신에 적용하기 위한 30(kW)급 모델에 적용되기 위해 동일한 자기적 구조 및 Table III에 제시되어 있는 설계사양으로 동일한 해



**Fig. 18.** Analysis results of 30 (kW) motor with magnetic structure of Model B: (a) torque, (b) phase voltage, (c) efficiency.

석을 진행하였다. Fig. 18에서는 토크특성, 전압특성 및 효율 특성으로 보이고 있으며, 앞서와 동일하게 1,500(rpm)까지는 일정토크영역이며, 1,500(rpm) 이후는 일정출력영역이다. 일정출력영역에서 전압이 일정한 것을 확인할 수 있으며, 이는 공급전압인 3상 380(V)를 기반으로 산정하였다. 본 모델은 코깁토크가 7.23(Nm)로 해석이 되었으며, 정격토크인 210(Nm)의 약 3%정도이고, 향후 연구에서는 대형기의 특

성을 고려한 최적화가 진행될 예정이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 밀링머신에 적용되는 30(kW)급 영구자석 전동기의 설계를 위해 동일한 자기적 구조를 가지는 축소모델들의 전자기 특성해석을 진행하였다. 해석모델은 매입형 및 표면부착형의 회전자를 가지고 9슬롯 및 18슬롯을 가지는 고정자의 조합으로 4가지 모델에 대한 비교를 수행하였으며, 무부하 특성해석에서는 공극자속밀도 및 역기전력에 대한 비교를 수행하였고, 부하 특성해석에서는 동일 토크 조건에서 동손, 철손, 회전자 손실 해석을 수행하였다. 특성해석결과 유사한 성능을 보이는 것을 확인하였으나, Model B의 효율이 다소 높은 것으로 확인되었다. Model B는 매입형 회전자에 18슬롯 고정자 코어를 적용한 모델로서 30(kW)급에 적용하였을 때 전속도 구간에서 요구되는 출력특성을 보이는 것을 확인하였다. 더불어, 표면부착형의 경우 영구자석이 매입형보다 56%가 더 많이 사용된 것을 확인하였다. 본 연구에서는 실제 모델이 제작되지 않았지만, 30(kW)급 전동기의 기초설계를 위한 비교분석이 수행되었고, 향후 연구과제로서 대형기에 적용하기 위한 기계적 특성 및 인버터의 스위칭 주파수에 의한 영향 등이 다루어질 예정이다.

#### 감사의 글

“2018년 한국교통대학교 신입연구자 연구 환경 지원사업의 지원을 받아 수행하였음”. “이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5015907)”.

#### References

- [1] C. Lee, J. Korean Magn. Soc. **27**, 1 (2017).
- [2] T. H. Kim, J. Korean Magn. Soc. **28**, 1 (2018).
- [3] Y. K. Kim, J. Korean Magn. Soc. **25**, 6 (2015).
- [4] Y. U. Park, J. Y. So, K. I. Woo, and D. Y. Kim, The Trans. KIEE **66**, 11 (2017).
- [5] H. J. Kim, C. S. Lee, and J. P. Hong, J. Korean Magn. Soc. **25**, 3 (2015).
- [6] Y. K. Kim, J. Korean Magn. Soc. **27**, 2 (2017).
- [7] H. C. Kim and T. U. Jung, The Trans. KIEE **62**, 4 (2013).
- [8] C. S. Jin, Trans. The Trans. KIEE **64**, 5 (2015).
- [9] S. Kim, H. S. Lee, and W. Lee, J. Korean Magn. Soc. **28**, 6 (2018).
- [10] S. Y. Yun and J. Lee, The Trans. KIEE **62**, 6 (2013).
- [11] K. D. Lee, J. Lee, and H. W. Lee, The Trans. KIEE **63**, 3 (2014).
- [12] S. J. Lee and J. P. Hong, The Trans. KIEE **62**, 10 (2013).
- [13] K. Jang, The Trans. KIEE **67**, 10 (2018).