

Study on the Shape of a 30 kW Fan Motor for Cooling the Hydrogen Fuel Cell Thermal Management System

Su Young Kim

Korea Electronics Technology Institute, Gwangju 61011, South Korea

Sung-In Jeong*

Dept. of Electrical Engineering, Gwangju University, Gwangju 61743, South Korea

(Received 16 April 2025, Received in final form 12 June 2025, Accepted 12 June 2025)

This paper studies ways to optimize the shape of a 30 kW fan motor for cooling in a hydrogen fuel cell thermal management system and reduce permanent magnets. Commercial vehicles using hydrogen fuel cells are attracting attention to reduce greenhouse gas emissions, but thermal management is important because the high heat generated during fuel cell operation negatively affects the system performance and lifespan. Based on the existing fan motor, this study sought to maintain the same performance while reducing the use of rare earth permanent magnets. The magnet thickness was reduced in half by optimizing the main design variables such as the thickness of the permanent magnet, magnet guide, and air gap, and interpreted problems such as increased cogging torque and reduced efficiency in this process. As a result, the reduced model maintained the same output even though the magnet size was reduced by 51% compared to the existing model, and problems such as increased current and current density and decreased efficiency were partially caused. In addition, stability in a high-temperature environment was confirmed through temperature and irreversible demagnetization analysis confirming that it is structurally sufficiently safe.

Keywords : Hydrogen fuel cell, Permanent magnet, Abatement design, Shape, Demagnetization, Stiffness

수소연료전지 열관리시스템 냉각용 30 kW 팬모터 형상 연구

김수용

한국전자기술연구원, 광주광역시 북구 첨단과기로 226, 61011

정성인*

광주대학교 전기공학과, 광주광역시 남구 효덕로 277, 61743

(2025년 4월 16일 받음, 2025년 6월 12일 최종수정본 받음, 2025년 6월 12일 게재확정)

본 논문은 수소연료전지 열관리 시스템의 냉각을 위한 30 kW 팬 모터의 형상을 최적화하고 영구자석 사용량을 줄이는 방안을 연구한다. 수소연료전지를 사용하는 상용차는 온실가스 배출 감축을 위해 주목을 받고 있지만, 연료전지 운전 중에 발생하는 고열은 시스템 성능과 수명에 부정적인 영향을 미치므로 열 관리가 중요하다. 본 연구는 기존 팬 모터를 기반으로 회로류 영구자석의 사용량을 줄이면서도 동일한 성능을 유지하고자 하였다. 영구자석 두께, 자석 가이드, 공극 등 주요 설계 변수를 최적화하여 자석 두께를 절반으로 줄였으며, 이 과정에서 코깅 토크 증가 및 효율 저하와 같은 문제점을 해석하였다. 그 결과, 축소된 모델은 자석 크기를 기존 모델 대비 51% 줄였음에도 동일한 출력을 유지하였으며, 전류 및 전류 밀도 증가, 효율 저하 등의 문제점이 일부 발생하였다. 또한, 온도 및 불가역 감자 해석을 통해 고온 환경에서의 안정성을 확인했다.

주제어 : 수소버스, 연료전지, 냉각팬 모터, 소음저감, 코깅토크, 토크리플, 유한요소 해석법

I. 서 론

최근 전기수소차에 대한 관심이 높아지면서 내연기관을 대체할 수 있는 전기 모터에 대한 연구들이 많아지고 있다. 차량에 적용되는 모터는 한정된 공간 내에서 목표 출력과 효율을 만족해야하기 때문에 높은 출력밀도와 효율이 요구되어진다. 이런 이유에서(Nd, Neodymium) 영구자석을 사용한 내입형 영구자석 동기모터(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)가 구동모터에 많이 적용되고 있는 상황이다.

하지만 Nd 소재는 희토류 금속이라 불릴 정도로 지구에 존재하는 양이 적고 또한 특정 지역에 편중되어 채굴되고 있어서 국제적 상황에 따라 가격적 변동이 매우 크다. 따라서 희토류 금속을 줄여서 혹은 사용하지 않고 유사한 성능을 낼 수 있는 구동모터 연구도 활발히 진행되고 있다[1-3]. 논문[1]에서는 영구자석을 줄여서 마그네틱 토크가 줄어들지만 돌극비를 높이는 설계를 통해 전체 토크를 높이는 높이는 설계를 진행했다. 논문[2]의 경우에는 기존 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor) 타입에서 CP(Consequent-Pole) 구조를 적용하여 영구자석량은 줄이면서 전체 토크는 크게 줄어들지 않는 방식의 연구를 진행했다. 논문[3]의 경우에는 SPMSM, IPMSM, PMASynRM(Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor) 3가지 타입에서 동일 자석량에서 최대 토크를 낼 수 있는 구조에 관한 연구를 진행했다.

수소전기버스에서 라디에이터 냉각용으로 사용되는 팬모터 역시 Nd 영구자석이 사용된 IPMSM이다. 최근 미중경쟁이 갈수록 심화되면서 Nd 소재의 가격이 급등하고 있고 약간의 성능저하가 발생하더라도 Nd 영구자석 양을 감소시켜야 한다[4-6].

따라서 본 논문에서는 기존에 개발된 30kW급 수소연료전지 냉각용 구동모터의 영구자석량을 줄여서 기존과 유사한 성능을 달성하는 연구를 진행하고자 한다. 그 과정에서 영구자석의 두께, 마그넷 가이드, 공극을 주요 변수로 설정하여 최적화를 시도하였다. 또한, 이러한 저감 설계를 통해 발생할 수 있는 감자 및 강성 변화에 대해서도 해석하고 이를 분석했다.

II. 영구자석 저감 설계

Fig. 1은 기존에 설계 및 제작된 30kW 팬모터의 시뮬레이션 형상으로 16극 24슬롯으로 만들어졌다. 16극 24슬롯은 극수 2와 슬롯수 3이 만나는 2대3 구조로 만들어져 전자기력이 매우 안정적으로 분포되어있는 극수 슬롯수 조합이다. 이런 이유에서 전기차 구동모터에서도 많이 채용되고 있는 조합이고 본 팬 구동모터에서도 안정적인 팬구동으로 위해 채용되

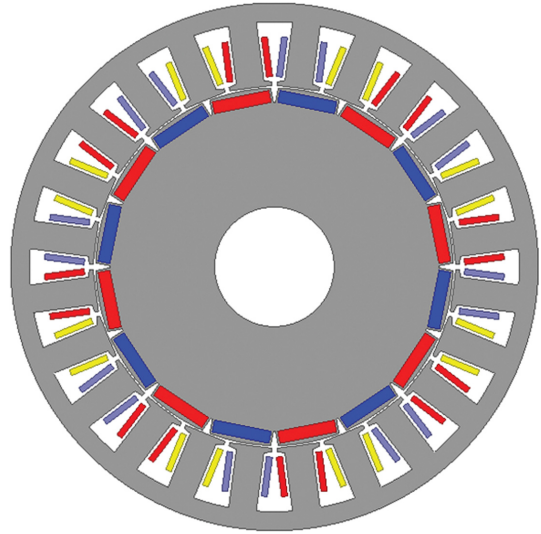


Fig. 1. (Color online) Base model simulation geometry.

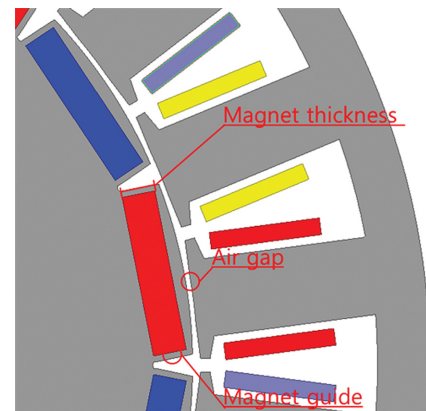


Fig. 2. (Color online) Design variable.

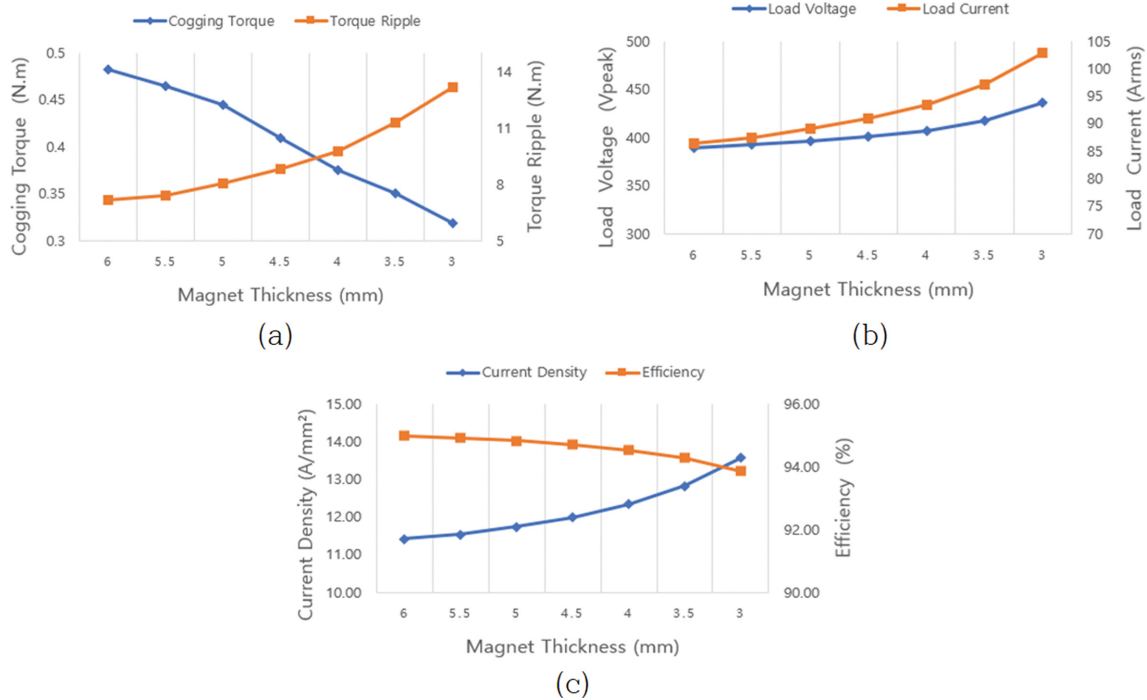
Table I. Design specifications.

Target Specification			
고정자	슬롯수	-	24
	외경	mm	265
	적층길이	mm	57
	재질	-	S18-0.35t
회전자	극수	-	16
	외경/내경	mm	179.4/-
	적층길이	mm	57
	Airgap	mm	0.9
	재질	-	S18-0.35t
영구자석	재질	-	N40UH
모터 냉각방식	수냉식		

었다. Table I은 모터의 설계제원을 나타낸다. 정격 토크 150 Nm에 속도 2,000 rpm의 출력 30 kW 팬모터이다. 해당 모델을 기초 모델로 두고 영구자석량을 감소시키는 방향으로

Table II. Analysis results by permanent magnet thickness.

항목	단위	Target Specification						
		영구자석 두께[mm]						
		6	5.5	5	4.5	4	3.5	3
상저항	Ω				0.034			
역기전력	Vrms_ph	125.1	123.9	122.4	120.4	117.9	114.8	110.7
코깅토크	mNm	482	464	444	409	375	350	319
출력	kW	31.48	31.40	31.44	31.43	31.43	31.45	31.47
상전압	Vrms_ph	146.4	146.6	147.1	147.8	148.8	150.5	153.4
선간전압	Vpeak_L2L	389.4	392.4	396.6	401.3	406.8	417.3	436.7
상전류	Arms	86.5	87.4	89	90.9	93.5	97.2	102.8
전류밀도	Arms/mm ²	11.41	11.53	11.74	11.99	12.34	12.82	13.56
속도	rpm				2,000			
토크	Nm	150.4	150	150.2	150.1	150.1	150.2	150.3
토크 리플	Nm	7.16	7.4	8.03	8.81	9.77	11.26	13.14
동손	W	763.2	779.2	807.9	842.8	891.7	963.7	1078
철손	W	897.6	899.4	905.1	913.5	925.8	946.5	979.2
효율	%	94.99	94.93	94.83	94.71	94.53	94.27	93.86

**Fig. 3.** (Color online) Main result graph by magnet thickness, (a) Cogging torque, torque ripple graph, (b) Load voltage, load current graph, (c) Current density, efficiency graph.

설계를 변경하여 유한요소해석을 진행했다.

Fig. 2는 설계에서 변경한 변수들을 보여주는 그림이다. 먼저 영구자석의 두께를 기존 6 mm에서 3 mm까지 0.5 mm 단위로 변경해가며 설계하고 해석했다. 두께를 감소시킬 때 회전자 코어의 중심부와 가까운 부분부터 줄여서 코어재질로 채워 넣었다. 해석한 결과는 Table II와 같다. Fig. 3은 해석한 결과 중 코깅토크와 토크리플, 부하전압과 부하전류, 전류밀도와 효율을 그래프로 비교한 그림이다.

모터에 입력되는 전압은 아래와 같은 전압방정식을 따른다.

$$V = IR + L \frac{dI}{dt} + e_b \quad (1)$$

$$e_b = k \cdot \Psi \cdot \omega \quad (2)$$

V : 입력전압[V], I : 입력전류[A], R : 고정자 저항[Ω]

L : 고정자 인덕턴스[H], e_b : 역기전력[V],

k : 역기전력 상수, Ψ : 자속[Wb], ω : 회전 속도[rpm]

Fig. 3(a)의 그래프에서 보이듯이 영구자석의 두께가 감소할수록 코깅토크는 줄어들고 토크리플은 증가함을 알 수 있다. 영구자석의 두께가 감소할수록 공극에서의 자속밀도가 줄어들어 자연스럽게 코깅토크가 줄어들고 역기전력이 감소하였으나, 더 적은 자속밀도를 기반으로 동일한 3.0kW 출력의 150 Nm, 2,000 rpm의 성능을 달성하기 위해서는 앞의 전압방정식에서 보이듯이 더 많은 전류를 사용하게 된다[7]. 이에 따라 자기 포화가 증가했고, 자속 분포가 불균일해졌기 때문에 토크리플이 크게 증가했다. 토크리플이 증가하면 모터의 동작 시 소음 및 진동의 원인이 되고 내구성을 저하시키는 원인이 되고 또한 모터를 제어하는 인버터의 제어성을 떨어뜨리는 결과를 초래하게 된다[8]. Fig. 3(b)의 그래프를 보게 되면 영구자석의 두께가 줄어들수록 부하전압, 부하전류가 증가함을 알 수 있다. 공극 자속밀도가 줄어들어 동일 속도에 역기전력이 감소하였다. 이에 따라 동일 출력을 내기 위

해 부하전류는 증가하고 전압방정식에 따라 부하전압도 증가하게 된다. 이는 실제 모터 작동 시 필요한 배터리 전압제한치에 영향을 주게 된다. Fig. 3(c)의 그래프와 같이 동일한 고정자 조건에서 전류가 증가함에 따라 전류밀도는 증가하고 전류가 증가함에 따라 동손이 증가하고 더 큰 전류가 들어감에 따라 코어의 자속포화가 일어나 철손도 증가하여 효율이 감소하게 되었다.

앞서 설계한 모델 중 자석 두께가 가장 작은 3 mm 모델을 기반으로 마그넷 가이드를 1.1 mm에서 0.8 mm까지 0.1 mm 단위로 감소하면서 해석을 진행했다. 마그넷 가이드의 두께를 감소시키면서 감소한 두께만큼 영구자석의 길이를 증가시켰다. 영구자석이 가장 많이 증가한 마그넷 가이드 0.8 mm의 경우에도 기존의 모델 영구자석 넓이 174 mm²에서 88.8 mm²으로 51%가량으로 최종적으로 감소했다.

Table III은 마그넷 가이드를 변경한 해석들의 주요 결과이

Table III. Main analysis results for each magnet guide.

마그넷 가이드	코깅 토크	역기 전력	부하 전압	부하 전류	토크 리플	전류 밀도	효율
mm	mNm	Vrms	Vpeak	Arms	Nm	Arms/mm ²	%
1.1	319	110.7	436.7	102.8	13.14	13.56	93.86
1	108	111.8	431.5	101.8	12.78	13.43	93.92
0.9	457	112.8	429.2	100.9	12.58	13.31	94.01
0.8	863	113.9	426	100	12.33	13.19	94.08

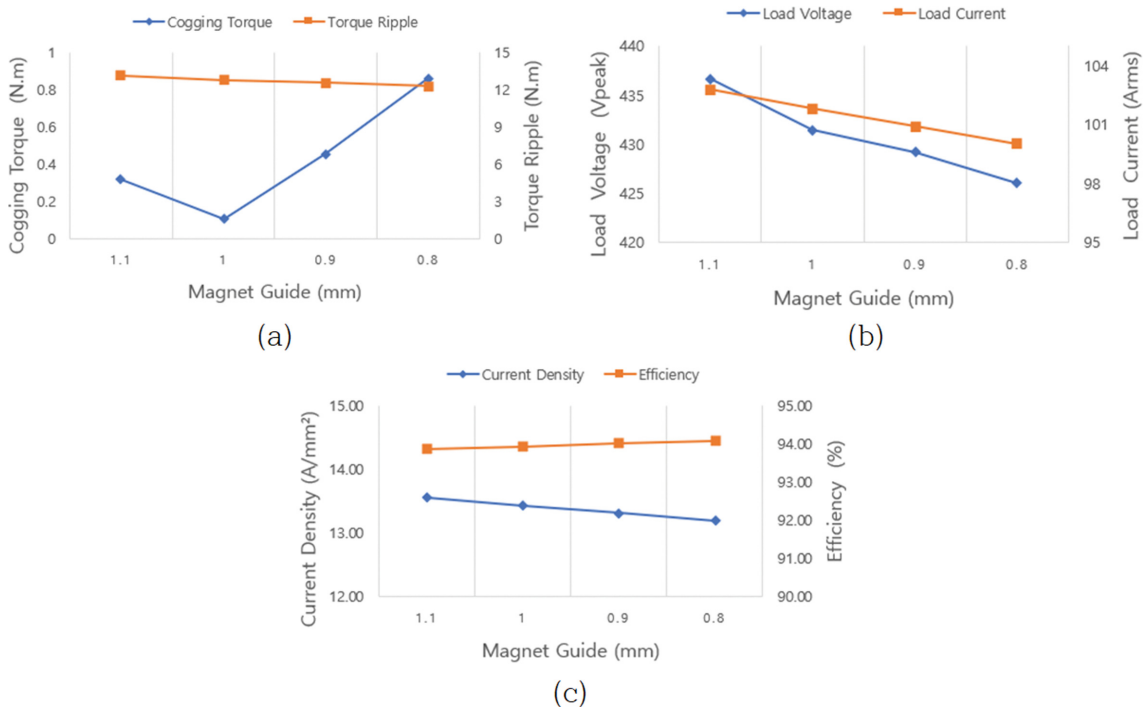
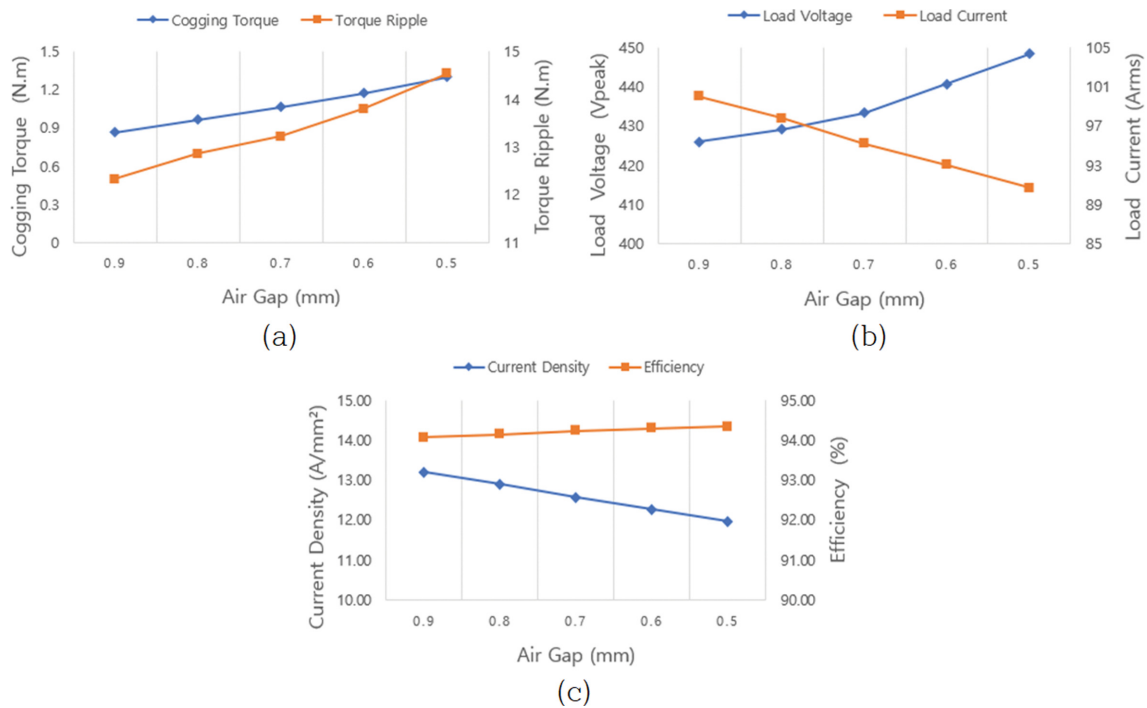


Fig. 4. (Color online) Graph of main results by magnet guide, (a) Cogging torque, torque ripple graph, (b) Load voltage, load current graph, (c) Current density, efficiency graph.

Table IV. Main analysis results by air gap.

공극	코깅 토크	역기 전력	부하 전압	부하 전류	토크 리플	전류 밀도	효율
mm	mNm	Vrms	Vpeak	Arms	Nm	Arms/mm ²	%
0.9	0.863	110.7	426	100	12.33	13.19	94.08
0.8	0.964	111.8	429.1	97.8	12.86	12.90	94.15
0.7	1.064	112.8	433.3	95.2	13.22	12.56	94.23
0.6	1.172	113.9	440.7	93	13.8	12.27	94.30
0.5	1.298	129.5	448.4	90.7	14.54	11.97	94.35

**Fig. 5.** (Color online) Main result graph by air gap, (a) Cogging torque, torque ripple graph, (b) Load voltage, load current graph, (c) Current density, efficiency graph.

다. 해석 결과 Fig. 4(a)의 그래프에서 보이듯이 마그넷 가이드가 감소할수록 코깅토크는 늘어나고 토크리플은 감소하는 경향을 보인다. 마그넷 가이드 1 mm 모델의 경우 코깅토크가 크게 감소했으나 다시 0.9 mm 모델부터 코깅토크가 크게 증가했다. 이는 자석 간의 상호작용의 변화나 자속밀도의 왜곡이 원인으로 작용했을 가능성이 크다. 다만 1 mm 모델의 경우 효율이 기존모델 대비 1%가량 감소했고 토크리플의 경향성에 영향이 없기 때문에 마그넷 가이드 0.8 mm 모델을 기반으로 비교했다. 영구자석의 길이가 증가하고 마그넷 가이드의 두께만큼 거리가 가까워짐에 따라 자속밀도가 증가하여 코깅토크는 증가하고 토크리플은 감소하고 역기전력은 증가하였다. 마찬가지로 자속밀도가 증가함에 따라 동일 출력 대비 부하전류가 감소하고 전압방정식을 통해 알 수 있듯이 부하전압도 감소했다. 이에 따라 전류밀도가 감소하였고 손실

중 철손은 크게 변화가 없었으나 전류가 감소함에 따라 동손이 줄어들어 효율이 증가하게 되었다.

마그넷 가이드 변경 해석 결과 중 0.8 mm로 감소시켜 해석한 결과를 바탕으로 기존의 공극두께 0.9 mm를 0.1 mm 씩 0.5 mm까지 변경하여 해석했다. 해석한 주요 결과는 Table IV와 같다. Fig. 5(a)의 그래프와 같이 공극두께가 줄어들어 따라 회전자와 고정자 간의 거리가 가까워지게 되면서 공극 자속밀도는 상승하게 된다. 자속밀도의 세기는 자속의 소스원이 되는 영구자석과의 거리의 제곱에 반비례하기 때문에 나타난 결과이다. 이에 따라 코깅토크와 토크리플이 증가하고 역기전력이 증가했다[9]. Fig. 5(b)의 그래프와 같이 자속밀도가 증가함에 따라 부하전류가 감소했으나 부하전압은 증가했다. 이는 앞서 보았던 전압방정식의 공식에 역기전력이 포함되어 있어서 역기전력이 전류의 감소치보다 더 증가하여

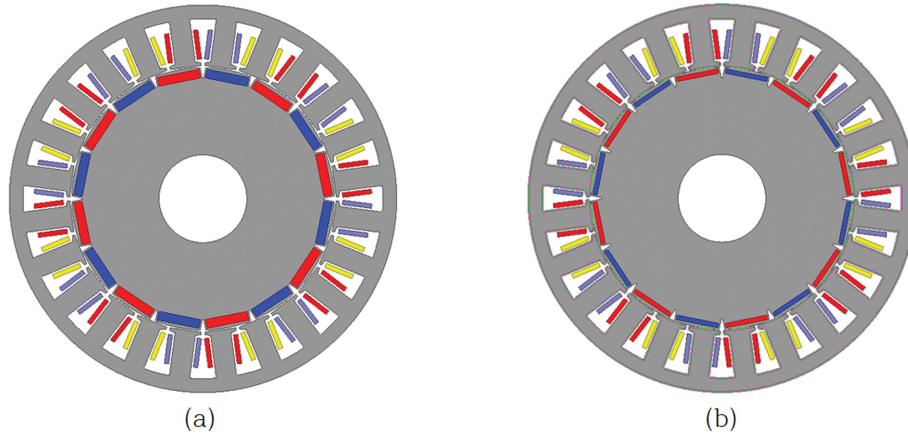


Fig. 6. (Color online) Model geometry comparison.

최종적으로 부하전압이 증가하게 되었다. Fig. 5(c)의 그래프와 같이 전류가 감소하면서 전류밀도가 감소하고 전류에 큰 영향을 받는 동손이 감소했다. 공극이 줄어들면서 자속이 증가하면서 철손이 늘어났다. 그러나 감소된 동손대비 철손 상승분이 많지 않아서 효율은 개선되는 방향으로 나타났다.

최종적으로 기존모델 대비 자석의 두께를 6 mm에서 3 mm까지 줄이고, 마그넷 가이드를 1.1 mm에서 0.8 mm까지 줄이고, 공극을 0.9 mm에서 0.5 mm까지 줄이는 모델을 선정했다. Fig. 6은 기존모델과 영구자석 저감모델을 나타내고 있다. 고정자는 동일하게 사용하였고 회전자 형상만 영구자석의 두께가 얇아지는 방향으로 설계되었음을 볼 수 있다. Table V는 기존모델과 영구자석 저감모델의 해석결과를 비교한 표이다. 비교 결과 코깅토크는 0.482 N.m에서 1.298 N.m로 크게 늘어났고 선간전압 또한 389.4 V에서 448.4 V로 크게 늘어났다. 토크리플 또한 7.16 N.m에서 14.54 N.m로 크게 증가했다. 그

러나 기존 영구자석의 크기 대비 51%가량으로 줄었음에도 동일 출력 대비 전류 및 전류밀도, 효율은 크게 감소하지 않았음을 확인할 수 있다.

III. 감자 해석

일반적인 자석의 감자는 자석의 자속밀도가 감소하는 현상으로, 온도 상승이나 외부의 자기장 등 외부 환경으로 인해 일시적으로 자속이 감소하는 현상을 말한다. 불가역 감자는 자석이 허용하는 온도 상승의 임계치 이상의 온도나 강한 외부 자기장의 영향으로 인해 자석의 성능이 영구적으로 감소하는 현상을 말한다. 영구자석 저감형 모델은 영구자석의 크기가 기존대비 51%가량 감소한 모델로 설계를 완료하였으나, 기존보다 적은 양의 자석을 사용하는 설계이므로 감자에 더 취약할 수 있다. 또한 수소전기버스의 배터리의 온도를 냉각

Table V. Analysis comparison results of existing model and permanent magnet reduction model.

Target Specification			
항목	단위	기존모델	영구자석 저감형 모델
상저항	Ω		0.034
상역기전력	Vrms	125.1	129.5
코깅토크	mNm	0.482	1.298
출력	kW	31.48	31.43
상전압	Vrms	146.4	157.1
선간전압	Vpeak	389.4	448.4
상전류	Arms	86.5	90.7
전류밀도	Arms/mm ²	11.41	11.97
속도	rpm		2,000
토크	Nm	150.4	150.16
토크 리플	Nm	7.16	14.54
동손	W	763.2	839.1
철손	W	897.6	1,043.1
효율	%	94.99	94.35

Table VI. Comparison of final model analysis results and test results.

Target Specification			
항목	단위	기존모델	영구자석 저감모델
상저항	Ω		0.044
역기전력	Vrms	112.3	117.6
코깅토크	mNm	0.326	1.081
출력	kW	31.42	31.42
상전압	Vrms	147.26	160.9
선간전압	Vpeak	469	448.4
전류	Arms	94.6	102
전류밀도	Arms/mm ²	12.48	13.46
속도	rpm		2,000
토크	Nm	150.08	150.1
토크 리플	Nm	11.2	18.67
동손	W	1,181.3	1,373.3
철손	W	912.6	1,089.3
효율	%	93.75	92.73

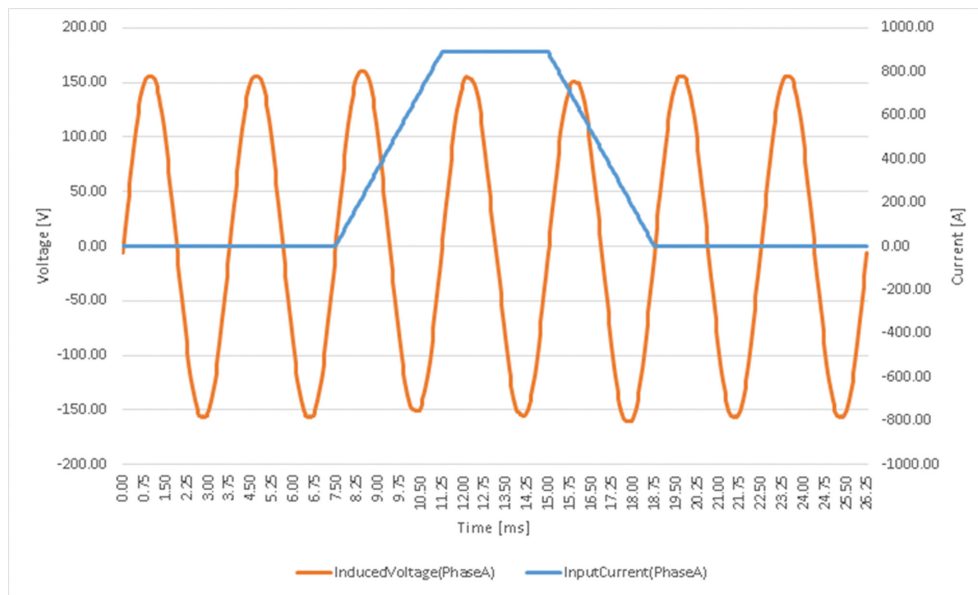
사키기 위한 팬모터의 역할을 지니고 있으므로 상대적으로 고온의 환경에서 지속가능한 동작이 이루어져야 한다. 따라서 온도 및 불가역 감자에 대한 해석이 필요하다.

먼저 온도에 따른 영구자석 감자해석을 진행하였다. 기존모델과 영구자석 저감형 모델은 영구자석 온도가 100°C를 기준으로 해석한 결과를 비교하였다.

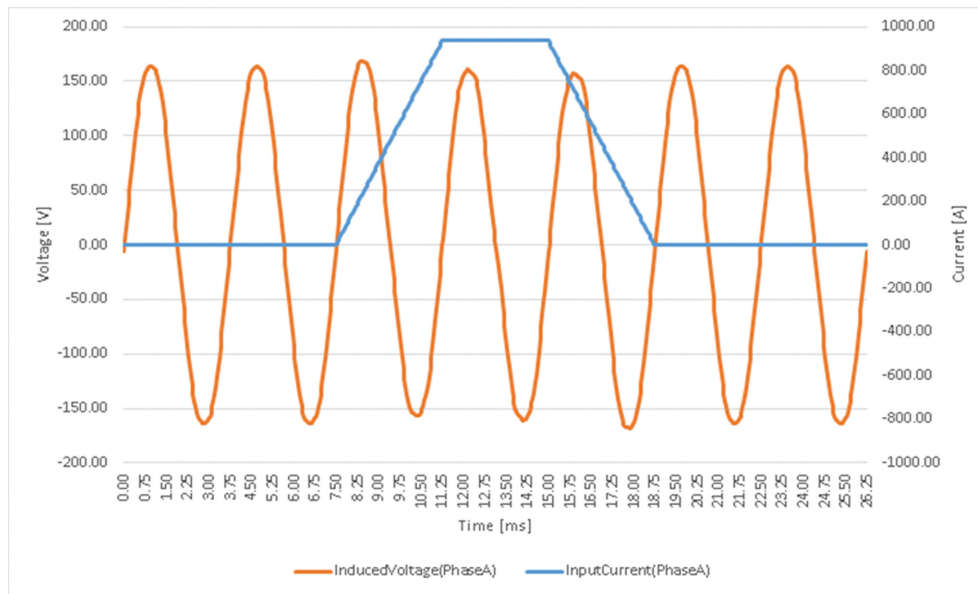
Table VI은 100°C를 기준으로 두 모델을 해석한 결과를 비교한 표이다. 두 모델 모두 온도에 따라 상저항이 증가하고 지속밀도가 줄어들었다. 지속밀도가 줄어듬에 따라 코깅도

크는 조금 감소했지만 동일토크 및 동일출력을 내는데 더 큰 부하전류가 필요하게 되었다. 상저항, 부하전류가 증가함에 따라 동손이 크게 증가하여 효율에 악영향을 주었다. 이전 결과와 비슷하게 기존 모델 대비 저감모델의 코깅토크와 부하전압, 토크리플이 크게 늘어났으나 여전히 동일 출력 대비 전류밀도나 효율이 크게 떨어지지는 않음을 알 수 있다.

다음으로 불가역 감자해석을 위해 각 모델의 정격 30 kW에 해당하는 정격전류의 10배에 해당하는 DC 전류를 아래 Fig. 7의 그래프의 전류와 같은 주기로 인가 시켜주고 불가역



(a)



(b)

Fig. 7. (Color online) Demagnetization analysis voltage current graph, (a) Current voltage graph of existing model, (b) Current voltage graph of reduced model.

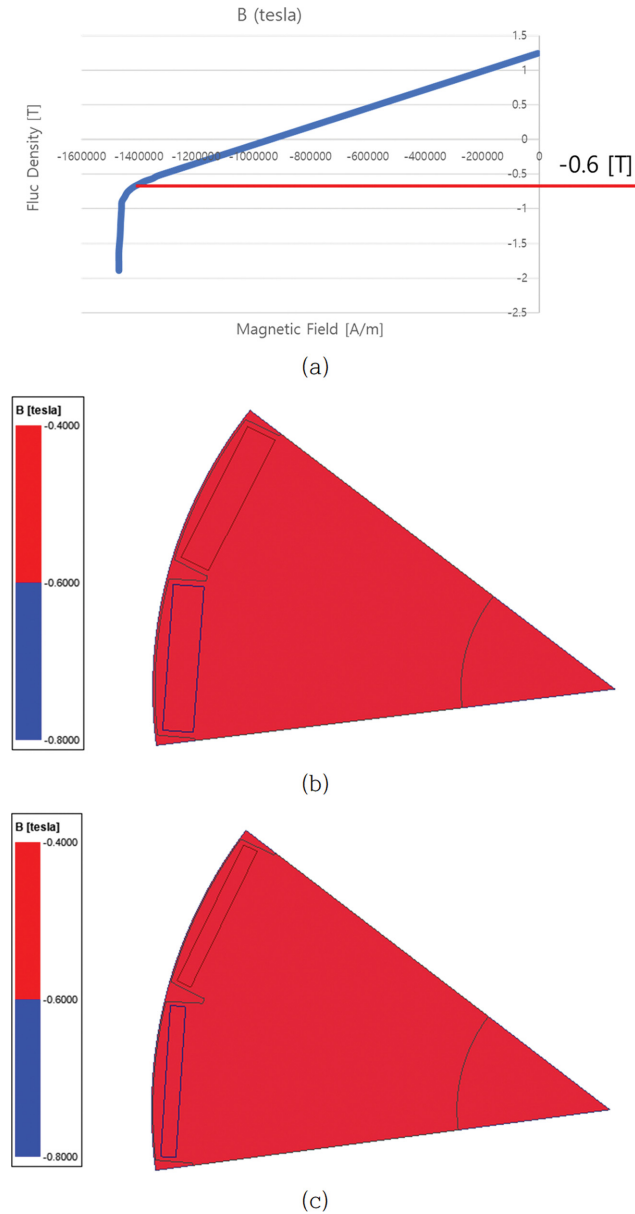


Fig. 8. (Color online) Demagnetization simulation magnetic flux density distribution, (a) B-H Curve, (b) Magnetic flux density distribution of existing model, (c) Magnetic flux density distribution of reduced model.

Table VII. Comparison of back EMF demagnetization analysis.

Target Specification			
초기 역기전력		감자 후 역기전력	
단위	Vrms	Vrms	%
기존모델	112.26	112.27	-0.01
영구자석 저감모델	117.66	117.67	-0.01

감자 전후의 역기전력을 확인했다. Fig. 8은 100°C 영구자석의 자기특성곡선(B-Hcurve)과 최대전류 인가 시 영구자석의

자속밀도분포를 나타내고 있다.

두 모델 모두 불가역 감자 이후에도 역기전력에 변화가 없었다. 통상 불가역 감자를 확인할 경우 정격전류의 2, 3배의 전류를 사용하게 되는데 이보다 가혹한 10배의 조건임에도 두 모델 모두 감자에 관해 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존에 설계된 수소연료전지의 냉각을 위한 30 kW 팬모터를 기반으로 영구자석을 저감하면서 동일 크기에서 동일 출력을 낼 수 있는 팬모터를 설계하고자 했다. 기존모델을 기반으로 영구자석의 두께를 6 mm에서 3 mm까지 저감시켜서 설계한 결과 전류밀도가 크게 증가하고 효율이 떨어짐을 알 수 있었다. 이를 기반으로 마그넷 가이드, 공극을 변경하여 설계하고 해석하고 기존모델과 비교했다. 비교 결과 코깅토크는 0.482 N.m에서 1.298 N.m로 크게 늘어나고 선간 전압 또한 389.4 V에서 448.4 V로 크게 늘어났다. 토크리플 또한 7.16 N.m에서 14.54 N.m로 크게 증가했다. 기존 모델과 저감 모델의 온도에 따른 감자는 유사하게 성능이 감소하였으며, 불가역 감자에 관해서는 정격전류의 10배에 해당하는 DC 전류를 인가했음에도 변화가 없었으며 강성해석의 경우 오히려 안전계수가 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 기존 영구자석의 크기 대비 51%가량으로 줄었음에도 동일 출력 대비 전류 및 전류밀도, 효율은 크게 감소하지 않았음을 확인할 수 있다.

최근 글로벌 무역전쟁의 여파로 희토류 가격이 다시 크게 상승하고 있기에 희토류 영구자석 저감에 관한 본 연구를 통해서 산업계에서의 팬모터의 가격경쟁력 향상에 도움을 줄 수 있을 것이라 기대됩니다. 또한 향후에는 강성에 대한 연구와 함께 시험을 통하여 실질적인 실효성에 대한 검증을 진행할 예정입니다.

감사의 글

이 연구는 2025년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음. 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00445516).

References

- [1] T.-C. Jung, W.-H. Kim, I.-S. Jang, M.-J. Kim, K.-De. Lee, J.-J. Lee, and J. Lee, Proceedings of the 2011 Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers **2011.07a**, 991 (2011).

- [2] Y.-T. Kim, J.-M. Kang, K.-W. Cho, and M.-G. Song, Proceedings of the 2022 Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, 1144 (2022).
- [3] Y.-H. Choi, T.-H. Kim, K.-C. Bang, and K.-W. Kim, 2013 KSAE Annual Conference, 916 (2013).
- [4] H. Zhang, and D. Jiang, 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Xi'an, China, (2023) pp. 2480-2490.
- [5] X. Xu, X. Li, Y. Zhou, K. Li, R. Yang, and L. Jiang, 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Xi'an, China, (2023), pp. 1-5.
- [6] J. Hur, H.-G. Sung, B.-K. Lee, C.-Y. Won, and B.-H. Lee, 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, UK, (2006), pp. 1-5.
- [7] N. Bianchi, Permanent magnet synchronous motors, The Industrial Electronics Handbook, CRC Press, Boca Raton, (2011) pp. 6.1-6.35.
- [8] R. Islam and I. Husain, IEEE Trans. Ind. Appl. **46**, 2346 (2010).
- [9] Z. Azar, Z. Zhu, and G. Ombach, IEEE Trans. Ind. Appl. **48**, 903 (2012).