

폴피스 변형을 통한 기어비 변환형 마그네틱 기어의 토크 리플 개선

변범석* · 박의중** · 김용재***

Improved Torque Ripple Through Pole Piece Deformation of Gear Ratio Transformed Magnetic Gear

Beom-Seok Byeon* · Eui-Jong Park** · Yong-Jae Kim***

요 약

기어비 변환을 목적으로 설계한 전자석 마그네틱 기어는 영구자석을 이용한 마그네틱 기어와 비교해 낮은 토크 밀도를 가져 토크 밀도의 개선이 필요하다. 이를 보완하고자 기어비 변환 시 각각의 회전자의 자화 방향이 일정한 치를 확인하여 이에 영구자석을 부착해 부족한 토크 밀도를 높이는 연구를 진행했다. 하지만 영구자석이 고르게 부착되지 않으면서 발생한 자속밀도의 불균일로 인해 토크 리플이 증가하는 현상이 문제점으로 발생 되었다. 따라서 전자석 마그네틱 기어의 토크 리플을 감소시키고자 진행된 선행연구를 토대로 폴피스 브릿지, 필레 방식을 적용하여 기어비 변환을 하더라도 각각의 토크 리플을 개선할 수 있는 최적의 방법을 모색하고자 한다.

ABSTRACT

This paper introduces a study on an electromagnet magnetic gear designed for gear ratio conversion. In comparison to magnetic gears using permanent magnets, this electromagnet magnetic gear exhibits lower torque density, highlighting the need for torque density improvement. To address this, the research focuses on enhancing torque density by examining the consistent orientation of each rotor's magnetization during gear ratio conversion and attaching permanent magnets accordingly. However, an issue arises due to the uneven magnetic flux density caused by the non-uniform attachment of permanent magnets, leading to an increase in torque ripple. Therefore, building upon previous studies aimed at reducing torque ripple in electromagnet magnetic gears, this research explores the optimal methods, such as pole piece bridges and fillet configurations, to mitigate torque ripple even during gear ratio conversion.

키워드

Electro Magnet, Gear Ratio, Magnetic Gear, Pole Piece, Torque Ripple
전자석, 기어비, 마그네틱 기어, 폴피스, 토크 리플

* 조선대학교 전기공학부(gkgkghghwpdn@naver.com, parkej21@chosun.ac.kr)
** 교신저자 : 조선대학교 전기공학과
• 접수 일 : 2023. 12. 12
• 수정완료일 : 2024. 01. 12
• 게재확정일 : 2024. 02. 17

• Received : Dec. 12, 2023, Revised : Jan. 12, 2024, Accepted : Feb. 17, 2024
• Corresponding Author : Yong-Jae Kim
Dept. Electrical Engineering, Chosun University
Email : kimyj21@chosun.ac.kr

1. 서론

마그네틱 기어는 일상에서 흔히 볼 수 있는 톱니바퀴가 맞물려 회전할 때 동력을 전달하는 기어처럼 동력을 전달하게 해주는 기기이다. 기계식 기어와 차이점은 직접적인 접촉을 하지 않으면서 동력을 전달할 수 있어 접촉부에 대한 마찰과 소음 그리고 마찰에 따른 기계적인 손상과 고장에서 벗어날 수 있다[1-3]. 또한 최근 연구에 따르면 기계식 기어와 경쟁할 수 있을 정도로 동력 전달이 가능하게 되었다[4-7].

마그네틱 기어의 구조는 2개의 회전자와 중앙에 존재하는 폴피스로 구성되어 있다, 중앙에 존재하는 폴피스는 각각의 회전자에서 발생하는 자속을 변조시켜 동력 전달에 일조하는 주요 부품이다. 그리고 각각의 회전자에는 영구자석이 사용되어 설계된 기어비대로 동력이 전달되게 된다. 하지만 이는 고정된 기어비율만 사용이 가능하다는 소리며 다양한 기어비를 사용하고자 할 때 단점으로 작용 될 수 있다.

기계식 기어박스처럼 다양한 기어비를 이용하고자 할 때 영구자석이 아닌 전자석을 이용한다면 전원의 여자방식에 따라 회전자의 극수가 변경되어 하나의 마그네틱 기어를 이용해 다양한 기어비를 가지는 기어박스로 사용할 수 있다. 그러나 전자석 마그네틱 기어는 영구자석 마그네틱 기어 대비 낮은 토크 밀도를 가진다. 이에 따라 전자석 마그네틱 기어를 이용하기 위해서 토크 밀도를 높이고자 하는 선행 연구가 진행되었다. 선행연구에서 기어비 변환이 가능한 전자석 마그네틱 기어의 토크 밀도를 향상하고자 기어비 변환 시 자화 방향이 일정한 회전자 치에 영구자석을 부착해 전자석 마그네틱 기어의 토크 밀도를 개선하는 과정을 수행했다. 하지만 개선과정에서 영구자석 적용에 따라 토크 리플의 증가가 확인되었다[8]. 따라서 영구자석이 적용된 전자석 마그네틱 기어의 토크 리플을 개선 시키고자 폴피스를 통한 토크 리플 저감 방법을 적용해 전자석 마그네틱 기어에 적용이 가능한 폴피스 변형 방법들을 확인했다[9].

II. 전자석 마그네틱 기어 토크 리플 개선

2.1 전자석 마그네틱 기어의 영구자석 적용

기어비 변환이 가능한 전자석 마그네틱 기어는 내측 회전자와 외측 회전자를 영구자석이 아닌 계자 권

선형으로 구성되어 있으며 그림 1을 통해 나타내고 있다. 그리고 기어비 변환을 하더라도 치의 자화 방향이 일정한 부분에 토크밀도 개선을 위한 영구자석이 부착되어 있다. 모든 치에 영구자석을 사용하지 않은 이유는 자화 방향이 변경됨에 따라 영구자석과 치의 자화 방향이 상반되어 기어의 평균 토크와 리플을 증가하게 한다[10].

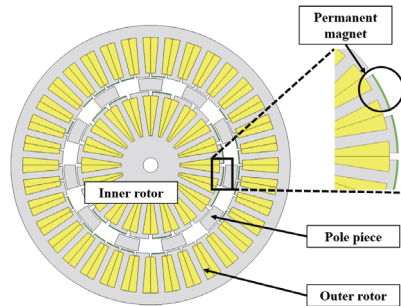


그림 1. 폴피스 필렛 적용 위치
Fig. 1 Pole piece application location

치의 자화 방향 변경에 따라 해당 모델이 갖는 기어비는 4.5 기어비와 1.2 기어비이며 영구자석이 사용되지 않은 모델과 영구자석이 사용된 모델의 평균 토크와 토크 리플은 표 1을 통해 나타났다. 모든 기어비에서 평균 토크가 2배가량 증가했으나 영구자석이 사용됨에 따라 토크 리플이 증가해 이를 감소시키고자 한다. 본 논문에서는 폴피스 구조에 변화를 주어 토크 리플을 개선하고자 폴피스 브릿지와 폴피스의 모서리 부분에 필렛을 적용해 기어비 변환을 고려하더라도 모든 기어비에서 효과적인 방법을 확인했다.

표 1. 기어비별 토크 특성
Table 1. Torque Characteristics by Gear ratio

4.5 Gear ratio	Torque [Nm]		Ripple [%]	
	Inner	Outer	Inner	Outer
Electromagnet	1.61	7.28	36.03	1.93
Electromagnet + PM	3.26	15.63	168.14	35.19
1.2 Gear ratio	Torque [Nm]		Ripple [%]	
	Inner	Outer	Inner	Outer
Electromagnet	4.34	5.23	3.43	8.61
Electromagnet + PM	9.04	11.26	50.26	56.63

2.2 폴피스 브릿지 적용에 따른 토크 리플 변화

폴피스 브릿지는 마그네틱 기어의 토크 리플의 감소에 영향을 주며 폴피스 사이의 간격을 유지하는 데 도움을 준다. 따라서 해당 폴피스 브릿지를 전자석 마그네틱 기어에 적용해 토크와 토크 리플을 확인하기에 앞서 브릿지 적용 구간을 그림 2와 같은 방법으로 3구간으로 나눠 전자석 마그네틱 기어에 적합한 형태를 확인하고자 한다. 해당 기법 또한 기어비 변환을 고려해 두 기어비에서 토크 리플 감소에 가장 효과적인 방법을 모색하였다.

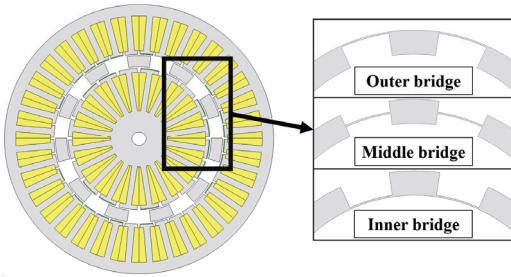
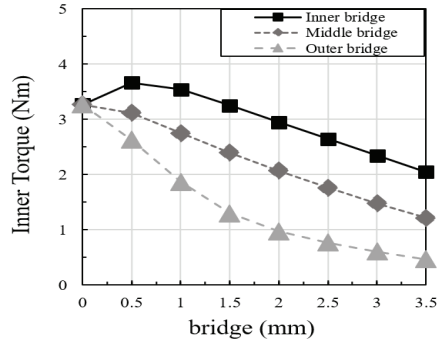


그림 2. 폴피스 브릿지 위치 선정
Fig. 2 Select a place to Pole piece bridge

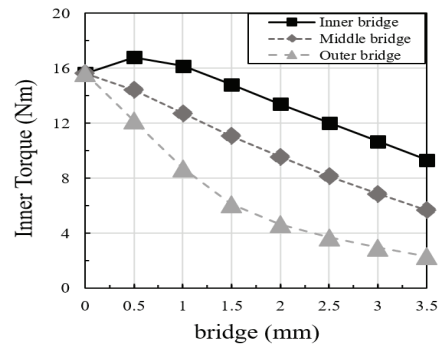
폴피스 브릿지를 내측 회전자를 기준으로 Inner bridge, Middle bridge, Outer bridge로 설정하였으며 폴피스의 두께를 0.5mm 간격으로 두께를 증가시켜 증가에 따른 토크와 토크 리플의 경향을 확인했다.

그림 3과 표 2, 3은 4.5 기어비 기준 전자석 마그네틱 기어일 때 브릿지 적용 두께별 토크 변화와 토크 리플의 변화를 확인할 수 있다. Inner bridge 적용 시 0.5mm 정도의 두께를 갖는 폴피스 브릿지는 평균 토크가 증가하는 것을 확인했으며 해당 위치의 브릿지는 토크 리플의 개선에 도움을 주었다. 하지만 Middle bridge와 Outer bridge는 폴피스 브릿지가 적용됨에 따라 전자석 마그네틱 기어의 평균 토크를 감소시키며 토크 리플까지 증가하게 되는 현상이 확인되었다.

또한 세 가지 브릿지 적용 모델의 공통점으로 확인된 사항은 브릿지의 두께가 두꺼워짐에 따라 평균 토크의 감소가 발생해 토크 리플이 개선되더라도 전자석 마그네틱 기어의 토크 밀도가 낮아 적절한 두께를 선정해 토크 감소를 최소화해야 한다.



(a)



(b)

그림 3. 브릿지 적용 방법에 따른 평균 토크 변화 (a) 4.5 기어비, (b) 1.2 기어비
Fig. 3 Average torque change according to pole piece bridge application method (a) 4.5 gear ratio, (b) 1.2 gear ratio

표 2. 4.5 기어비에서 토크 리플 변화
Table 2. Torque ripple change in 4.5 gear ratio

	Inner	Middle	Outer	Inner	Middle	Outer
	Inner ripple[%]			Outer ripple[%]		
0	168.1			35.2		
0.5	125.1	149.0	200	32.1	39.6	35.6
1	94.8	156.8	263	28.1	40.9	46.4
1.5	93.4	183.4	356.8	27.9	42.8	63.1
2	94.4	220.0	442.1	27.6	45.2	74.5
2.5	101.1	253.5	517.6	27.9	47.2	78.3
3	109.3	291.6	611.0	28.8	50.8	81.1
3.5	115.0	327.6	776.0	29.8	50.1	84.5

표 3. 1.2 기어비에서 토크 리플 변화
Table 3. Torque ripple change in 1.2 gear ratio

	Inner	Middle	Outer	Inner	Middle	Outer
	Inner ripple[%]			Outer ripple[%]		
0	50.3			56.6		
0.5	41.9	51.1	48.8	58.8	63.0	50.4
1	34.9	60.6	51.9	66.0	79.7	44.5
1.5	37.9	76.2	63.2	84.1	100.9	47.8
2	41.4	100.5	78.0	112.5	142.4	49.9
2.5	41.9	146.7	103.6	115.7	189.1	52.3
3	55.3	223.5	148.8	181.7	180.5	57.8
3.5	64.0	343.6	226.6	167.9	163.0	68.8

2.3 기어비 변환을 고려한 브릿지 두께 결정

Inner bridge 적용을 할 때 평균 토크 증가와 토크 리플 감소를 동시에 가져올 수 있음을 확인했다. 따라서 토크가 증가하였던 구간을 0.1mm 간격으로 확인하여 기어비 변환을 고려해도 모두 충족할 수 있는 구간을 선정하였다.

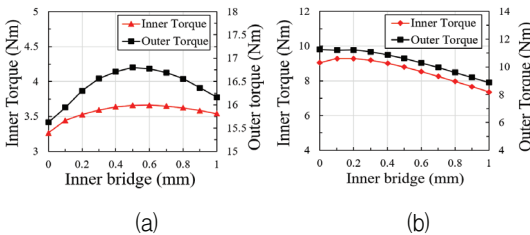


그림 4. Inner bridge 적용 시 토크 변화 (a) 4.5 기어비, (b) 1.2 기어비

Fig. 4 Torque change according to Inner bridge (a) 4.5 gear ratio, (b) 1.2 gear ratio

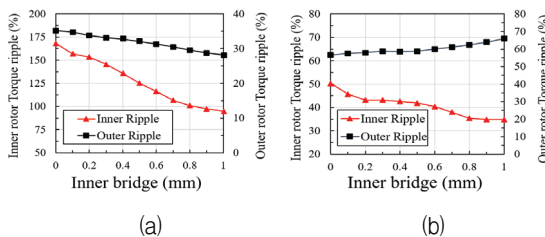


그림 5. Inner bridge 적용 시 토크 리플 변화 (a) 4.5 기어비, (b) 1.2 기어비

Fig. 5 Torque ripple change according to Inner bridge (a) 4.5 gear ratio, (b) 1.2 gear ratio

그림 4, 5를 통해 4.5 기어비에서 Inner bridge를 통해 평균 토크 증가와 토크 리플 감소에 큰 영향을 준 것을 확인할 수 있다. 하지만 1.2 기어비에서는 브릿지의 두께가 두꺼워 짐에 따라 평균 토크의 감소와 토크 리플이 증가함을 확인했다. 따라서 Inner bridge를 적용하기 전과 비교해 적용된 모델의 평균 토크를 최대한 감소하지 않게 하며 토크 리플이 증가하지 않도록 브릿지의 두께를 0.5mm 정도로 선정해야 한다.

2.4 폴피스 필렛 적용에 따른 토크 리플 변화

폴피스의 필렛을 적용하는 방법으로는 모서리의 각진 부분을 완만한 곡선을 가지도록 성형하는 것이다. 폴피스는 4개의 각진 부분이 존재하여 그림 6과 같이 각각의 부분에 필렛을 적용하여 평균 토크와 토크 리플의 변화를 확인하고자 한다. 폴피스 필렛에 관하여 진행된 연구들에 따르면 폴피스 필렛을 적용하면 토크 리플 감소에 영향을 줄 수 있음을 확인했다. 하지만 필렛을 적용하는 해당 전자석 마그네틱 기어는 영구자석만을 이용하는 동축 마그네틱 기어와 비교하면 공극에서 만들어지는 자속밀도의 과형의 차이가 있으므로 해당 기비가 전자석 마그네틱 기어에서도 자속밀도의 개선에 적용할 수 있는지 확인했다[11-12]. 폴피스 필렛 또한 폴피스 브릿지와 같은 방식으로 기어비 변환을 하더라도 변환 전 기어비 모델과 변환 후 기어비 모델에 모두 적용할 수 있도록 확인하였다.

폴피스 필렛의 적용 방법은 한국의 지점에서 0.5mm 간격으로 3.5mm까지 측정했다.

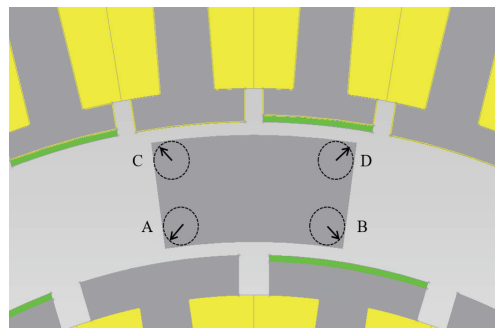


그림 6. 폴피스 필렛 적용 위치
Fig. 6 Select a place to Pole piece fillet

필렛 적용에 따라 확인된 토크 값 변화는 표 4와 5를 통해 확인할 수 있다. 기어비가 4.5일 때 내측 회전자는 3.26 Nm의 평균 토크 값을 나타낸다. 이때 모든 지점의 폴피스 필렛을 3.5mm까지 진행했을 때 3.2~3.3Nm 대의 평균 토크 값을 유지하고 있어 폴피스 필렛 적용에 따른 평균 토크 감소는 거의 없는 것으로 확인되었다. 하지만 1.2 기어비에서는 9.04 Nm의 평균 토크를 갖는 내측 회전자가 3.5mm의 필렛이 적용되었을 때 B 지점과 C 지점의 필렛 적용 시 8 Nm대로 약 10%의 평균 토크가 감소했다.

표 4. 4.5 기어비에서 폴피스 필렛 적용에 따른 평균 토크 변화

Table 4. Average torque change according to pole piece fillet application at 4.5 gear ratio

[mm]	Fillet_A	Fillet_B	Fillet_C	Fillet_D
0	3.26	3.26	3.26	3.26
0.5	3.33	3.33	3.33	3.34
1	3.32	3.31	3.33	3.34
1.5	3.31	3.29	3.32	3.33
2	3.28	3.27	3.3	3.32
2.5	3.26	3.25	3.29	3.31
3	3.23	3.23	3.26	3.3
3.5	3.2	3.2	3.23	3.27

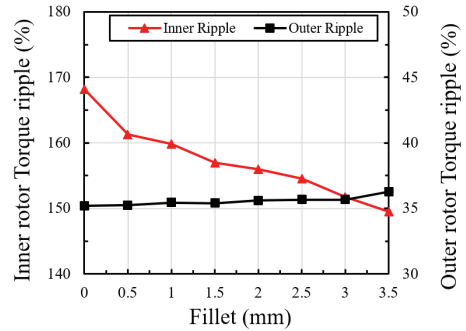
표 5. 1.2 기어비에서 폴피스 필렛 적용에 따른 평균 토크 변화

Table 5. Average torque change according to pole piece fillet application at 1.2 gear ratio

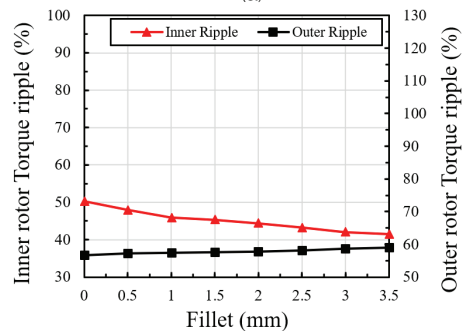
[mm]	Fillet_A	Fillet_B	Fillet_C	Fillet_D
0	9.04	9.04	9.04	9.04
0.5	9.15	8.46	8.28	9.15
1	9.11	8.42	8.25	9.14
1.5	9.06	8.38	8.21	9.11
2	8.99	8.35	8.18	9.1
2.5	8.92	8.31	8.13	9.05
3	8.86	8.26	8.1	9.01
3.5	8.79	8.21	8	8.96

각 지점의 필렛 적용에 따른 토크 리플을 확인한 결과 A 지점에서의 필렛 적용은 내측 회전자의 토크 리플 저감에 효과적이었다. 그림 7을 통해 기어비별 토크 리플 변화를 확인할 수 있으며 4.5 기어비에서 168%의 토크 리플이 149%로 11%의 감소율을 보여

준다. 그러나 외측 회전자의 토크 리플은 증가하는 경향을 보여주었다. 따라서 필렛의 크기를 작게 설정한다면 외측 회전자의 토크 리플이 조금 상승하나 내측 회전자의 토크 리플을 크게 개선할 수 있다.



(a)



(b)

그림 7. A 지점의 필렛 적용에 따른 토크 리플 변화 (a) 4.5 기어비, (b) 1.2 기어비

Fig. 7 Torque ripple change according to fillet A (a) 4.5 gear ratio, (b) 1.2 gear ratio

B 지점의 필렛 적용은 그림 8-(a)를 통해 4.5 기어비의 전자석 마그네틱 기어에서 내측과 외측 회전자 토크 리플이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 하지만 기어비 변환을 진행함에 따라 1.2 기어비에서는 그림 8-(b)를 통해 토크 리플의 변화를 확인할 수 있으며 50%의 리플을 갖는 내측 회전자가 94%로 증가하고 57%의 리플을 갖는 외측 회전자의 리플이 80%로 증가하게 되어 기어비 변환을 고려할 때 적합하지 못하다고 판단되었다.

C 지점의 필렛 적용은 B 지점의 필렛 적용 방법과 비슷하게 4.5 기어비에서 토크 리플이 감소하는 경향

을 보여주었다. 내측 회전자는 5mm까지 필렛을 적용했을 때 토크 리플이 감소했으며 외측 회전자는 꾸준히 토크 리플이 감소하는 경향을 보여준다. 그리고 1.2 기어비로 변환을 진행함에 따라 내측과 외측 회전자의 토크 리플이 크게 상승했다. 내측 회전자는 50%의 리플이 74%로 48%의 증가율을 보여주었으며 외측 회전자는 57%의 리플이 130%로 128%의 증가율을 나타냈다.

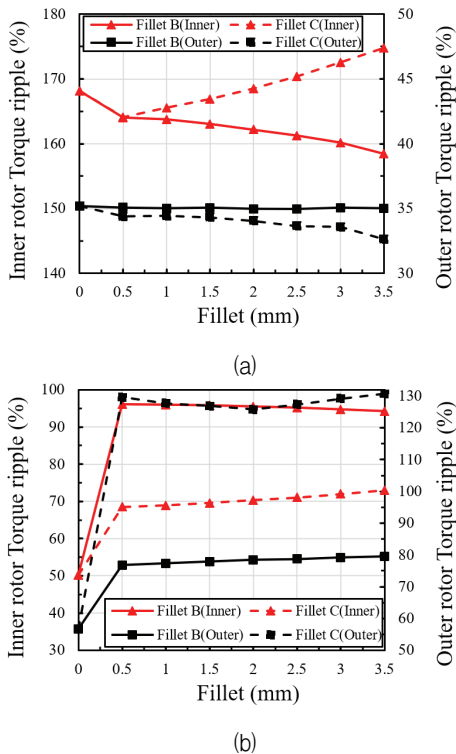


그림 8. B, C 지점의 필렛 적용에 따른 토크 리플 변화 (a) 4.5 기어비, (b) 1.2 기어비
 Fig. 8 Torque ripple change according to fillet B, C (a) 4.5 gear ratio, (b) 1.2 gear ratio

D 지점의 경우 내측 회전자의 토크 리플 감소에 효과적이었다. 하지만 외측 회전자의 토크 리플이 증가하게 되었으나 필렛의 크기를 작게 한다면 기어비 변환을 고려했을 때 A 지점의 필렛과 같은 효과를 얻을 수 있으며 토크 리플의 변화는 그림 9와 같다. 폴퍼스에 필렛 적용 방법을 토크 리플의 변화에 따라

종합한다면 서로 대각선에 해당하는 A와 D 지점, B와 C 지점에서 서로 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인했다. 따라서 A와 D 지점은 기어비 변환 시 사용할 수 있는 토크 리플 저감 방법이라고 판단된다.

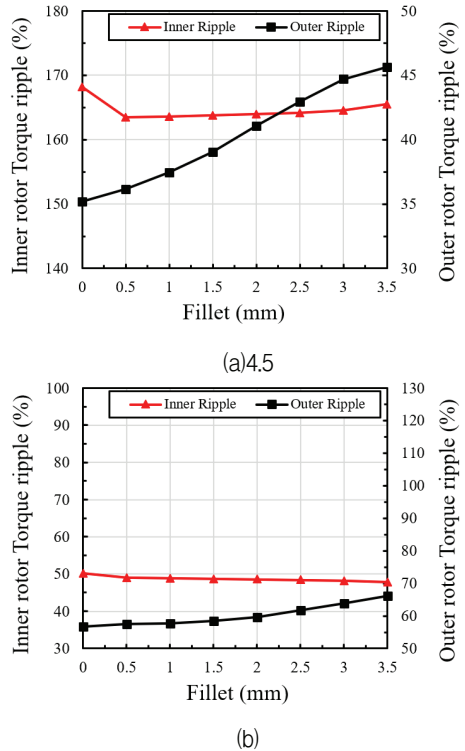


그림 9. D 지점의 필렛 적용에 따른 토크 리플 변화 (a) 4.5 기어비, (b) 1.2 기어비
 Fig. 9 Torque ripple change according to fillet D (a) 4.5 gear ratio, (b) 1.2 gear ratio

V. 결론

본 논문은 기어비 변환이 가능하게 설계한 전자식 마그네틱 기어의 부족한 토크 밀도를 향상하기 위하여 기어비 변환에도 자화 방향이 일정한 치의 tip에 영구자석을 부착하여 토크 밀도를 높이는 데 도움을 받는 선행 연구로부터 시작되었다. 해당 방법을 사용하게 되면 토크 리플이 많이 증가해 토크 리플의 개선이 필요하게 되는데 전자식 마그네틱 기어는 영구자석 마그네틱 기어와 공극 자속밀도가 상이하게 다

른 부분이 존재하여 기존에 알려진 폴피스 브릿지와 폴피스에 필렛을 적용하는 기법을 활용해 어느 기법이 전자석 마그네틱 기어에 적용할 수 있는지 확인해 보고자 진행했다. 폴피스 브릿지를 적용한 경우를 살펴보면 Inner bridge 형태일 때 약 0.5mm 두께로 브릿지를 만들면 평균 토크를 높일 수 있으며 내측 회전자와 외측 회전자의 토크 리플을 감소시킬 수 있다. 하지만 Middle, Outer bridge는 평균 토크의 감소와 토크 리플의 증가로 인해 부적합하다고 판단되었다. 폴피스 필렛의 경우 필렛의 설정을 크게 함에도 평균 토크의 크기를 거의 감소시키지 않으며 토크 리플의 변화를 가져왔다. A 지점과 D 지점에서는 두 기어비에서 내측 회전자의 토크 리플의 개선에 도움을 주었으나 0.5mm의 필렛 적용 시 외측 회전자의 토크 리플이 1 Nm 정도 증가한다. 그리고 B 지점과 C 지점의 경우 기어비 변환 시 내측과 외측 회전자의 토크 리플이 약 100%가량 증가하는 문제점이 발견되었다.

따라서 기어비 변환을 고려한 전자석 마그네틱 기어를 폴피스 변형을 통해 토크 리플을 개선하기 위해서는 폴피스 필렛 적용보다는 Inner bridge 방식이 평균 토크를 증가시키고 토크 리플을 저감 할 수 있어서 가장 최적의 방식이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(2022).

References

- [1] B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya, and K. Kuritani, "Dynamic Simulation Method of a Magnetic Gear Using its Torque Map," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 8, Aug. 2022, pp. 1-5.
- [2] E. Park, S. Kim, S. Jung, and Y. Kim, "Novel pole piece optimal design of cost reduction type magnetic gear by central composite design," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 1922-1927.
- [3] L. Shah, A. Cruden, and W. Williams, "A Variable Speed Magnetic Gear Box Using Contra-Rotating Input Shaft," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 47, no. 2, Feb. 2011, pp. 431-438.
- [4] X. Yin, P.-D. Pfister, and Y. Fang, "Novel Magnetic Gear: Toward a Higher Torque Density," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 4, Nov. 2015, pp. 1-4.
- [5] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, no. 4, July 2001, pp. 2844-2845.
- [6] Y. Hu, L. Li, B. Chen, Y. Xiao, M. Liu, and X. Ma, "Optimized Design of Magnetic Gear with High Torque Density and Permanent Magnet Utilization," *International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS)*, 2021, pp. 1167-1171.
- [7] E. Park and Y. Kim, "Multi-gear Combination Analysis for High Gear Ratio of Coaxial Magnetic Gear," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16 no. 2, 2021, pp. 355-362.
- [8] B. Byeon, E. Park, S. Jung, and Y. Kim, "Analysis of air gap magnetic flux density to improve output of electromagnet magnetic gear with gear ration conversion," *In proc. korean Institute Electrical Engineers, Int. Conf. Communications*, Jeju, Korea, May 2023, pp. 187-188.
- [9] C. Kim, E. Park, S. Kim, and Y. Kim, "An Study on Pole Piece Shape for Improving Torque Ripple of Magnetic Gears," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12 no. 6, 2017, pp. 1065-1070.
- [10] B. Byeon, E. Park, and Y. Kim, "Application of Permanent Magnets with Different Magnetization in Magnetic Gear Considering Gear Ratio Conversion," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, no. 11, Nov 2023, pp. 1366-1371.

- [11] E. Park and Y. Kim, "Torque Ripple Improving and Analysis of Coil-winding Rotor of Magnetic Gear," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 2, 2020, pp. 1065-1070.
- [12] H. Lee, H. Jeong, and S. Cho, "A Study on Design and Manufacture of Slotless Outer Rotor BLDC Motor for a Vehicle Blower," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 18, no. 5, 2023, pp. 827-834.

저자 소개



변범석(Beom-Seok Byeon)

2023년 조선대학교 전기공학과 졸업
2023년~현재 조선대학교 대학원
전기공학과 석사과정

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석



박의중(Eui-Jong Park)

2013년 조선대학교 전기공학과 졸업
2015년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
2020년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2021년~현재 조선대학교 스마트이동체융합시스템 공학부 조교수

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석



김용재(Yong-Jae Kim)

1996년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)
2003년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학석사)

2006년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학박사)

2007년~현재 조선대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석