

# 무가선 트램용 마그네틱 기어 설계 및 경향성 분석을 통한 토크 리플 저감 연구

## A Study on Reduce of Torque Ripple according to Design and Tendency Analysis of Magnetic Gear for Wireless Tram

정거철\*, 김현진\*, 김성열\*\*, 이형우\*\*\*, 이 주\*†

Geochul Jeong\*, Hyun-Jin Kim\*, Sung-Yul Kim\*\*, Hyung-Woo Lee\*\*\*, Ju Lee\*†

**Abstract** This study was conducted to find a way of reducing torque ripple by designing a magnetic gear for a Wireless Tram and analyzing its tendency. A Wireless Tram is driven by torque, which is conveyed to a wheel through a mechanical gear from a traction motor and a mechanical gear has a lot of shortcomings including wear and damage due to mechanical friction. But unlike a mechanical gear, a magnetic gear doesn't have mechanical contact. This creates a very low noise and maintenance isn't required. This can improve efficiency by using a rear-earth permanent magnet with high energy density. Therefore, in this study, a design model of a magnetic gear was extracted by applying the existing gear ratio to the design specification of a traction motor for a Wireless Tram and characteristics of a pole number-based model were analyzed using the electromagnetic finite element method. Moreover, the biggest factor of torque and torque ripple was selected through sensitivity analysis and tendency analysis was carried out to reduce torque ripple.

**Keywords :** Wireless Tram, Magnetic gear, Gear design for Tram

**초 록** 본 논문은 무가선 트램용 마그네틱 기어 설계 및 경향성 분석을 통한 토크 리플 저감에 관해 연구하였다. 무가선 트램은 견인전동기로부터 기계식 기어를 통해 휠에 회전력이 전달되어 기계적인 마찰로 인해 마모, 파손 등 많은 단점이 있다. 하지만 마그네틱 기어는 기계적인 접촉이 없어서 아주 적은 소음, 진동과 유지 보수가 필요 없다. 그리고 에너지 밀도가 높은 희토류계 영구자석을 사용하여 효율을 높일 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 무가선 트램용 견인전동기의 설계 사양에 기존 기어비를 적용하여 마그네틱 기어의 설계 모델을 도출하였고, 극수에 따른 모델을 전자장 유한 요소법을 이용하여 특성 분석을 수행하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 토크 및 토크 리플에 가장 큰 요인이 되는 인자를 선정하였고, 경향성 분석을 통해 토크 리플을 줄이는 연구를 수행하였다.

**주요어 :** 무가선 트램, 마그네틱 기어, 트램용 기어 설계

### 1. 서 론

기계적인 기어는 1차 축과 2차 축이 서로 맞물리면서 기계적인 접촉을 통해 동력을 전달한다. 이것은 마찰로 인해 마모, 기계적인 파손이 발생하고, 예방하기 위해 윤활제를 사용된

† 교신저자: 한양대학교 공과대학 전기공학과(julee@hanyang.ac.kr)

\* 한양대학교 공과대학 전기공학과

\*\* 계명대학교 공과대학 전기에너지공학과

\*\*\* 한국교통대학교 철도대학 철도차량시스템공학과

다[1]. 이러한 단점을 해결할 방안으로 영구자석의 상호작용에 의해 동작하는 마그네틱 기어가 자동차 시스템, 풍력발전기, 저속 및 고속 기기 등과 같은 여러 분야에서 연구를 진행하고 있다. 마그네틱 기어는 물리적 접촉이 없어 마찰에 의한 접촉 경계면의 마모 및 과손이 없고, 윤활유가 필요하지 않으며 유지보수가 필요 없다는 장점을 가진다. 또한 높은 에너지밀도를 갖는 희토류계 영구자석 사용으로 효율이 높다. 아울러 물리적인 접촉이 없는 마그네틱 기어는 매우 적은 소음과 진동의 특징을 가지고 있다[2,3,4]. 본 논문에서는 무가선 트램용 견인전동기의 설계 사양 및 기어비에 따른 마그네틱 기어의 설계 모델을 도출하고, 극수에 따른 모델을 전자장 FEM(Finite Elements Method)을 이용하여 특성 분석을 수행하였다. 또한, 민감도 분석과 경향성 분석을 통해 토크 리플을 줄이는 연구를 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 무가선 트램용 견인전동기

무가선 트램용 구동 장치는 회전력을 발생 시키는 견인전동기와 회전속도를 낮추고 회전력을 높여주는 기계식 기어를 통해 휠로 동력이 전달된다. 이는 기어비를 통해 감속되어 힘이 전달되는 방식이다. 따라서 Table 1에서 볼 수 있듯이 무가선 트램용 견인전동기의 설계 사양을 바탕으로 기어비를 통해 마그네틱 기어를 설계하였다.

Table 1 Design specification of traction motor for Wireless Tram

Rated speed	Rated torque	Max speed	Max torque	Power
1457rpm	295Nm	4100rpm	105Nm	45kW

### 2.2 마그네틱 기어 설계 및 특성 분석

Fig. 1은 마그네틱 기어의 구조를 나타낸다. 내측의 고속 회전자와 철심, 외측의 저속 회전자로 구성되어 있다. 내측과 외측 사이의 철심 양 쪽은 공극으로 구성되어 있으며 비접촉 방식이다. 내측과 외측에 부착된 영구자석은 에너지 밀도가 높은 네오디움 영구자석을 적용하였다. 내측과 외측 사이의 철심의 개수는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$N_s = P_{in} + P_{out} \quad (1)$$

$N_s$ 는 철심의 개수,  $P_{in}$ 과  $P_{out}$ 은 각각 내측과 외측의 영구자석 극쌍수를 나타낸다. 기어비는 내측과 외측 영구자석의 극쌍수에 따라 식 (2)로 계산할 수가 있다. 또한 기어비로부터 내측과 외측 회전자의 회전속도는 식 (3)의 관계를 갖는다[4].

$$G_r = \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (2)$$

$$\omega_{out} = -\frac{P_{in}}{P_{out}} \omega_{in} = -G_r \omega_{in} \quad (3)$$

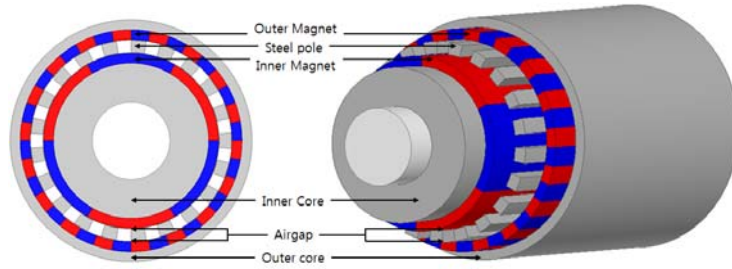


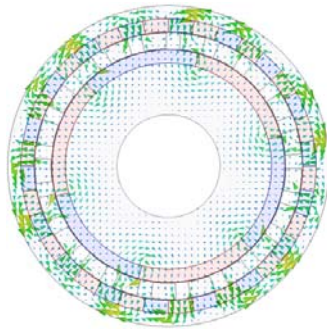
Fig. 1 Magnetic gear for Wireless Tram(6p 36p)

Table 2는 무가선 트램용 마그네틱 기어의 주요 사양을 보여준다. 기어비는 정확한 극수 설계를 위해 기계식 기어비 6.29가 아닌 6으로 설정하였고, 기어비를 적용하여 극수에 따라 3개 모델을 설계하였다. 따라서 기어비를 적용하여 식을 통해 계산한 값이 Table 2에서 보여준다.

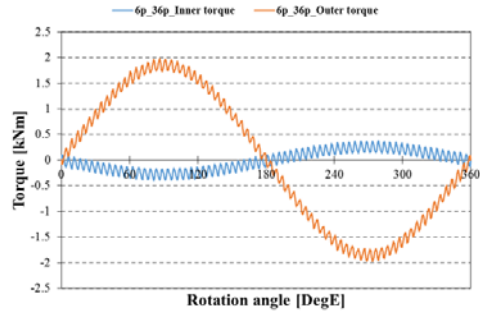
Table 2 Main specification of the magnetic gear for Wireless Tram

	6p 36p	8p 48p	10p 60p
Gear ratio(Mechanical gear ratio)	6(6.29)		
Inner permanent magnet pole pair	3	4	5
Outer permanent magnet pole pair	18	24	30
Steel pole pieces number	21	28	35
Rated speed(Required)	242rpm		
Rated torque(Required)	1855.6Nm		
Max speed(Required)	683rpm		
Max torque(Required)	660.5Nm		
Power(Required)	45kW		
Inner permanent magnet thickness[mm]	10		
Outer permanent magnet thickness[mm]	10		
Yoke thickness[mm]	10		
Inner Airgap length[mm]	0.8		
Outer Airgap length[mm]	0.8		

Fig. 2는 마그네틱 기어의 전자계 특성을 보여준다. (a)는 자속밀도 벡터도를 보여주며, (b)는 토크 파형을 보여준다. 무가선 트램의 휠로 전달되는 Outer torque는 약 1982.2Nm으로 Table 2의 요구 사양에 만족하는 것을 볼 수가 있다. Fig. 3은 극수별 마그네틱 기어의 특성을 알아보기 위해 설계된 모델이다. 내측 극수 기준으로 8극과 10극을 기어비를 적용하여 설계하였으며, 각 모델에 대한 토크 파형은 Fig. 4에서 보여준다. 8극, 10극 또한 Table 2의 요구 사양에 만족하는 결과를 볼 수가 있다.

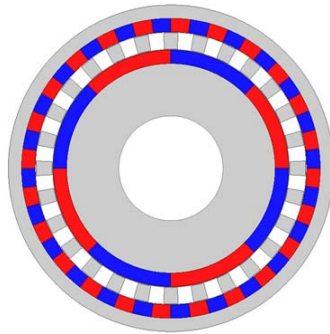


(a) Magnetic flux vector diagram

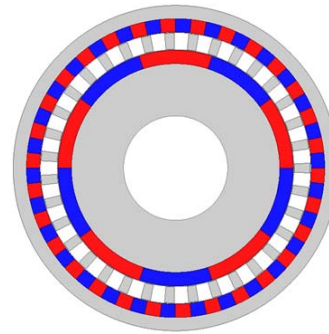


(b) Torque wave

Fig. 2 Electromagnetic characteristics (6p 36p)

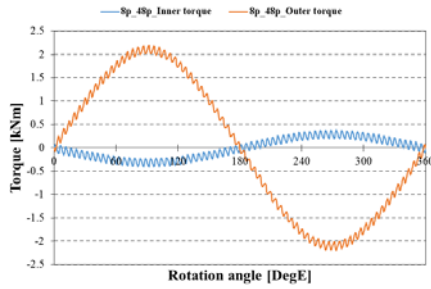


(a) 8pole 48pole

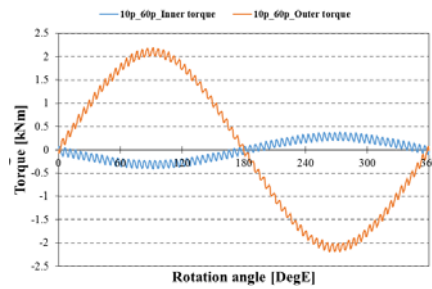


(b) 10pole 60pole

Fig. 3 Each Model of the magnetic gear



(a) 8pole 48pole



(b) 10pole 60pole

Fig. 4 Torque wave of the magnetic gear

### 2.3 민감도 분석

토크 리플을 줄이기 위해서는 마그네틱 기어의 각 설계 변수가 토크 파형에 어떠한 영향을 미치는지 민감도 분석을 통해 알아야 한다. 민감도 분석은 설계 변수의 변화에 따라 어떠한 영향을 미치는가를 분석하는 방법이다. 따라서 마그네틱 기어의 특성변화에 민감한 부분을 예상하여 설계 변수는 Fig. 5와 같이 설정하였다.

FEM을 통한 민감도 분석의 결과는 내측과 외측 영구자석 사이에 있는 철심의 변화에 따라 토크 파형에 가장 큰 민감도를 보였다. 철심의 형상에 비해 다른 설계 변수는 너무 작은 민감도를 보였기 때문에 민감도 분석 결과 값은 생략하였고, 철심에 형상에 대해 자세히 경향성 분석을 통해 토크 리플을 줄이는 연구를 수행하였다.

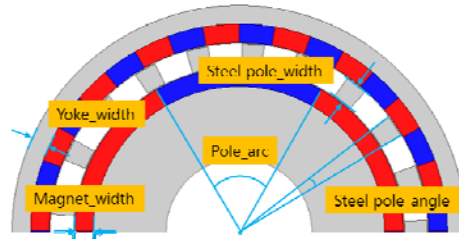


Fig. 5 The main factor for sensitivity analysis

## 2.4 경향성 분석

마그네틱 기어는 내측과 외측 사이에 있는 철심을 통해 자계가 변조되고 토크 리플에 큰 영향을 미치는 것을 민감도 분석을 통해 알 수 있었다. 토크 리플은 진동 및 소음의 원인이 되며, 특히 휠에 직접 토크를 전달하는 마그네틱 기어에는 토크 리플 저감이 크게 중요하다. 따라서 토크 리플을 줄이는 방법으로 주요 인자를 Fig. 6와 같이 철심의 각도와 두께로 설정하였다. Table 3은 마그네틱 기어의 주요 인자 설계 변수 값을 보여준다. 철심 각도는 기어비에 따라 철심의 개수가 다르기 때문에 극수별로 다르며 철심 두께는 동일하게 설정하였다. 따라서 2개의 인자를 이용하여 경향성 분석을 통해 요구 토크는 만족하고 토크 리플을 줄이는 연구를 수행하였다.

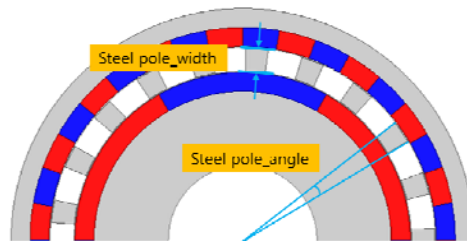
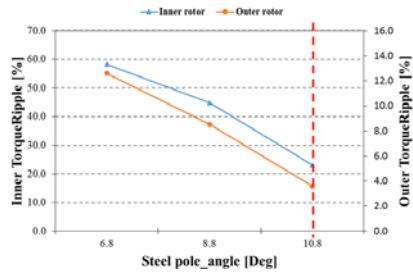


Fig.6 The main factor for tendency analysis

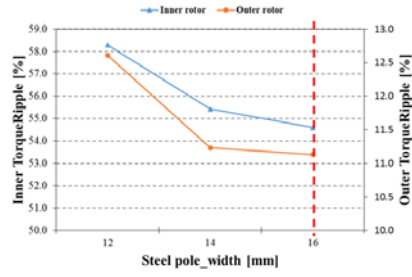
Table 3 Design parameter value of the main factor

	6p 36p	8p 48p	10p 60p	Unit
Steel pole angle	6.8-10.8	6.3-10.3	4.2-8.2	[°]
Steel pole thickness	12-16	12-16	12-16	[mm]

Fig. 7은 6p 36p의 주요 인자에 따른 내측 및 외측의 토크 리플을 보여준다. 철심 각도 10.8°, 두께 16mm에서 토크 리플이 가장 적은 경향성을 보인다. Fig. 8은 8p 48p의 주요 인자에 따른 토크 리플을 보여주며, 철심 각도 8.3°, 두께 14mm에서 토크 리플이 가장 작다. 또한, 10p 60p은 Fig. 9에 보듯이 철심 각도 6.2°, 두께 14mm에서 토크 리플이 가장 적은 경향성을 보이며, 극수별 각 모델마다 토크 리플이 최소가 되는 주요 인자 설계 값은 Table 4에서 볼 수가 있다.

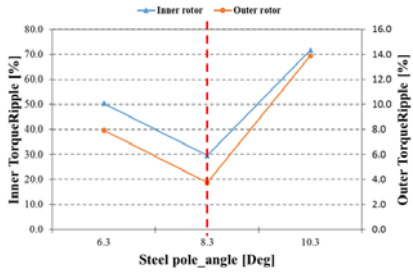


(a) Steel pole angle

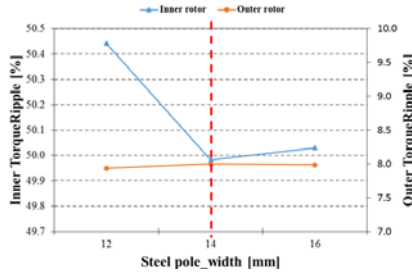


(b) Steel pole thickness

Fig. 7 Torque ripple according to main factor(6p 36p)

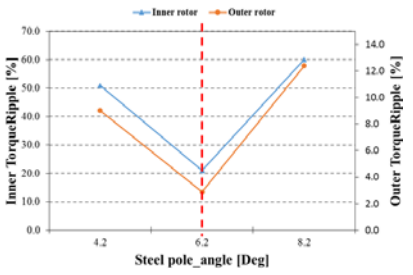


(a) Steel pole angle

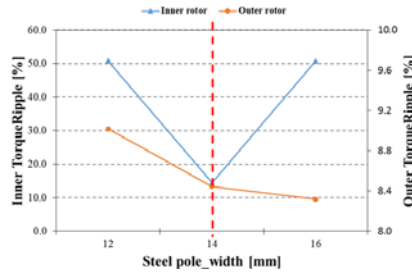


(b) Steel pole thickness

Fig. 8 Torque ripple according to main factor(8p 48p)



(a) Steel pole angle



(b) Steel pole thickness

Fig. 9 Torque ripple according to main factor(10p 60p)

Table 4 Main factor design value of the torque ripple minimum

	6p 36p	8p 48p	10p 60p	Unit
Steel pole angle	10.8	8.3	6.2	[°]
Steel pole thickness	16	14	14	[mm]

Fig. 10는 극수별 토크 리플 저감에 따른 토크 파형을 보여준다. Table 4의 토크 리플 최소 주요 인자 설계 값에 대해 FEM을 통한 해석 결과이며, Fig. 2, Fig. 4와 비교해보면 토크 리플이 현저히 줄어든 토크 파형을 확인할 수가 있다. 또한, 극수별로 6p 36p는 약 1906.9Nm, 8p 48p는 약 1931.5Nm, 10p 60p는 약 1978.4Nm으로 Table 2의 요구 토크에 만족하는 것을 볼 수가 있다. 따라서, 토크파형에 큰 영향을 미치는 주요 인자, 철심 각도, 철심 두께를 주요 인자로 설정하고, 경향성 분석을 수행한 결과로 본 논문의 타당성을 입증하였다.

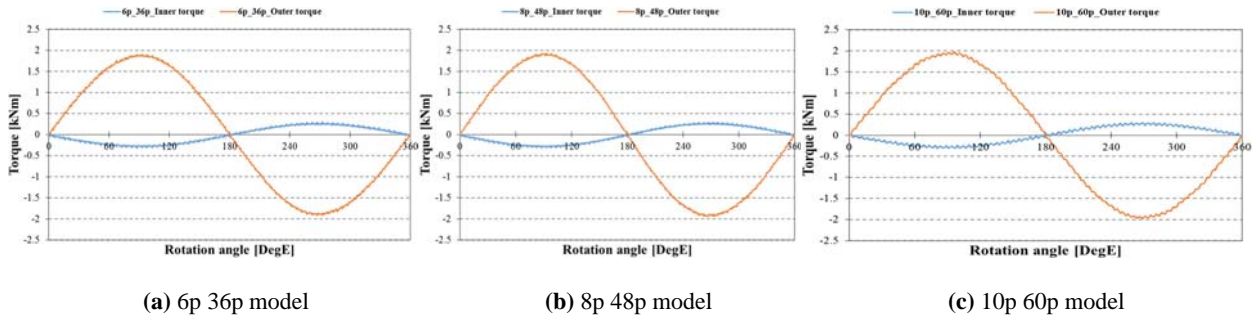


Fig. 10 Model reduced torque ripple

### 3. 결론

본 논문은 무가선 트램용 마그네틱 기어 설계 및 경향성 분석을 통한 토크 리플 저감에 관한 연구 논문이다. 현재 적용되어 있는 무가선 트램용 견인전동기의 설계 사양에 기존 기어비를 적용하여 마그네틱 기어의 요구 사양을 도출하였다. 도출된 요구 사양에 적합한 극수에 따른 모델을 설계하였고, FEM 을 이용하여 전자계 특성 분석을 수행하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 토크 파형에 큰 영향을 미치는 주요 인자를 설정하고, 경향성 분석을 통해 토크 리플을 저감 시키는 연구를 수행하였다. 결론적으로 극수별 모델 모두 토크 리플을 줄일 수 있었고, 주요 인자의 경향성 분석을 통해 본 논문의 타당성을 입증하였다. 향후, 고온에 취약한 네오디움 영구자석의 감자 해석을 통해 불가역 감자를 예측할 것이고, 상세 설계를 통해 출력밀도를 향상시키는 연구를 수행할 것이다.

### 참고문헌

- [1] Chan-Ho kim, Yong-Jae Kim (2015) Power Density Characteristics Analysis and Design of Magnetic Gear according to Speed for Drive Train of 10MW Offshore Wind Turbine, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64, No. 12, pp. 1718-1723.
- [2] L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams (2011) A Variable Speed Magnetic Gear Box Using Contra-Rotating Input Shafts, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 47, no. 2, pp. 431-438.
- [3] K. Atallah and D.howe (2001) A novel high-performance magnetic gear, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, no. 4, pp. 2844-2846, July.
- [4] T. Jubin, S. Mezani, and A. Rezzoug (2010) Analytical Computation of the Magnetic Field Distribution in a Magnetic Gear, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 7, pp. 2611-2621.