

# 동축 마그네틱 기어의 고 기어비 적용을 위한 다중 기어 조합분석

박의종\* · 김용재\*\*

Multi-gear Combination Analysis for High Gear Ratio of Coaxial Magnetic Gear

Eui-Jong Park\* · Yong-Jae Kim\*\*

## 요약

동축 마그네틱 기어는 비접촉 동력전달을 사용하기 때문에 기존 기계식 기어의 동력전달과정에서 발생하는 마찰, 마모, 소음, 발열을 최소화할 수 있다. 현재 다양한 산업에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 동축 마그네틱 기어가 갖는 특징 중, 높은 기어비에서 토크밀도가 급격히 감소하는 문제가 거론되었다. 본 논문은 높은 토크밀도를 갖는 저 기어비 동축 마그네틱 기어를 이용하여, 이들을 다중으로 결합하는 방향을 제시하였다. 해당 방법의 유효성을 확인하기 위해 단일형태의 고 기어비 모델과 토크밀도를 비교하고 다중 동축 마그네틱 기어의 기어비 조합을 분석함으로써 가장 우수한 조합을 선정하는 설계 방향을 나타내었다.

## ABSTRACT

Since coaxial magnetic gears use non-contact power transmission, friction, wear, noise, and heat generated in the power transmission process of existing mechanical gears can be minimized. Currently, research for application to various industries is being actively conducted, but among the characteristics of coaxial magnetic gears, the problem of rapidly decreasing torque density at a high gear ratio was discussed. This paper proposes a direction for multiple gear combination using low gear ratio coaxial magnetic gears with high torque density. In order to confirm the effectiveness of the method, the torque density was compared with a single high gear ratio model, and the combination and design direction of multiple coaxial magnetic gears were shown.

## 키워드

Coaxial Magnetic Gear, Gear Combination, Multi-Gear, Torque Density  
동축 마그네틱 기어, 기어 결합, 다중 기어, 토크 밀도

## 1. 서론

산업현장의 초기부터 현재에 이르기까지 동력을 전달하거나 변환하기 위한 장치로는 기계식 기어장치가

주로 사용되었다. 기계식 기어는 두 개 이상의 톱니바퀴가 서로 맞물려 동력을 전달하고, 톱니끼리 접촉하여 마찰에 의한 마모, 소음, 발열의 문제를 개선하기 위해 윤활유를 사용한다. 기어를 일정 시간 사용 후에

\* 조선대학교 스마트이동체 융합시스템공학부  
(parkej21@chosun.ac.kr)

\*\* 교신저자 : 조선대학교 전기공학과  
• 접수일 : 2021. 02. 10  
• 수정완료일 : 2021. 03. 15  
• 게재확정일 : 2021. 04. 17

• Received : Feb. 10, 2021, Revised : Mar. 15, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021  
• Corresponding Author : Yong-Jae Kim  
Dept. Electrical Engineering, Chosun University,  
Email : kimyj21@chosun.ac.kr

는 윤활유를 보충하거나 교체하는 유지보수를 진행했으며, 이는 가장 기본적인 정비방법으로 자리 잡았다 [1-3].

최근 산업의 동향은 성능도 중요하지만, 감성적인 부분이 강조되고 있어, 낮은 소음 및 진동, 용이한 유지보수에 대한 수요가 증가하고 있다. 기계식 기어 또한 이러한 흐름에 따라 다양한 연구가 수행되고 있으나 기계식 기어가 갖는 직접 접촉방식에 의한 동력전달은 문제해결을 어렵게 만드는 요인이다. 만약 비접촉 방식을 통해 동력을 전달할 경우 기계식 기어가 갖는 문제는 대부분 해소할 수 있다.

현재 차량용 토크컨버터 등 유체를 이용한 비접촉 동력전달이 사용되고 있으나 동력손실이 크기 때문에 특정 속도에서만 사용하는 등 사용률이 낮다. 따라서 이처럼 유체를 통하는 것이 아닌 자기력을 통한 비접촉 동력전달을 생각해 볼 수 있다. 이와 같은 개념은 이미 1900년대에 제시된 바 있으나 낮은 자력으로 인해 각광받지 못하다가 높은 자력이 활용되기 시작한 2000년대부터 본격적인 연구가 시작되었다[4-5].

자기력을 이용한 동력전달 장치를 마그네틱 기어 (Magnetic Gear)라고 하며, 그중에서도 Atallah가 제안한 동축 마그네틱 기어(Coaxial Magnetic Gear)가 높은 토크 밀도로 인해 가장 활발히 연구되고 있다 [2-3]. 하지만 동축 마그네틱 기어는 기어비가 높을수록 토크밀도가 감소하는 문제점으로 인해 대부분 10:1 내외의 기어비만 연구되고 있다[6-11]. 하지만 기계식 기어의 다중 기어와 같이, 낮은 기어비의 기어를 여러개 결합할 경우 동축 마그네틱 기어 또한 높은 기어비를 달성할 수 있다. 하지만 아직 상세한 연구가 진행되지 않은 분야로, 아직 동축 마그네틱 기어의 다중결합에 대한 이점은 불투명하다.

따라서 본 논문의 2장에서는 단일형태의 동축 마그네틱 기어를 설계하고 기어비에 따른 토크밀도를 분석하여 단일형태가 갖는 고 기어비의 한계를 나타내었다. 3장에서는 기어비 조합별로 각각 특성분석을 수행하여 다중 기어의 합산 토크밀도를 계산하고 최고의 다중 조합을 결정하는 분석 프로세스를 나타내었다. 각 분석은 2D-FEA(Finite Element Analysis)를 사용했다. 또한, 90:1 단일 기어와의 토크밀도 비교를 통해 다중 결합의 이점을 논하였다.

## II. 단일 동축 마그네틱 기어

### 2.1 기어비에 따른 토크밀도

동축 마그네틱 기어의 기어비에 따른 특징을 확인하기 위해 그림 1에 동축 마그네틱 기어의 기본 형상을 나타내고 해당 형상을 기반으로 기어비를 변경하였다. 기어비 변경은 동축 마그네틱 기어의 기어비 공식 (1), (2)에 따라 각 회전자의 영구자석의 극수만을 변경하였으며 이외의 부분에 대한 사이즈 변경은 수행하지 않는다. 영구자석 극수변경에 대한 개념도는 그림 2에 나타낸다.

$$G_r = \frac{P_o}{P_i} \quad (1)$$

$$P_{pp} = \frac{P_o + P_i}{2} \quad (2)$$

$G_r$ 은 기어비,  $P_o$ 는 외축 회전자 극수,  $P_i$ 는 내축 회전자 극수,  $P_{pp}$ 는 폴피스 개수이다. 동축 마그네틱 기어의 기어비와 극수를 변경하여 각 기어비에 따른 토크밀도를 분석했으며 그림 3에 나타낸다. 각각의 극수에 따라 최대토크밀도지점이 존재했으며 해당 기어비 전후로 토크밀도는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 극수가 증가함에 따라 최대 토크밀도를 나타내는 기어비는 감소함을 알 수 있다.

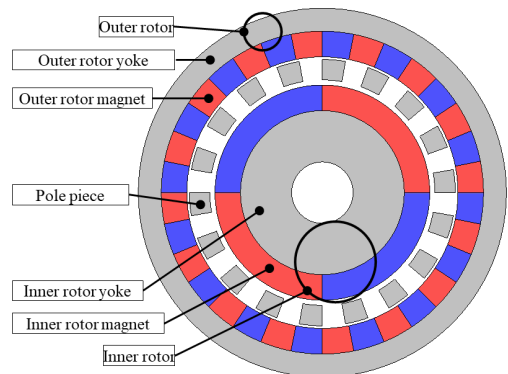


그림 1. 단일 동축 마그네틱 기어  
Fig. 1 Single coaxial magnetic gear

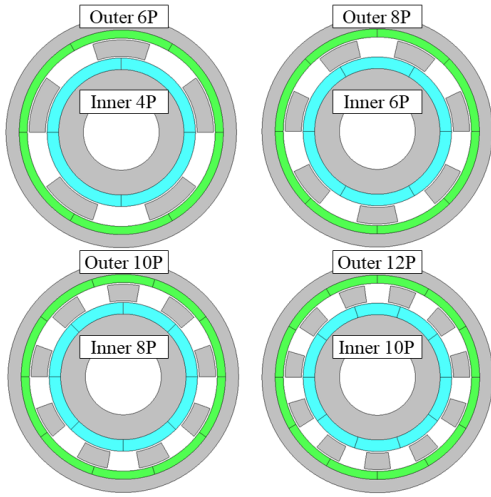


그림 2. 극수변경 개념도  
Fig. 2 A concept of pole change, P: poles

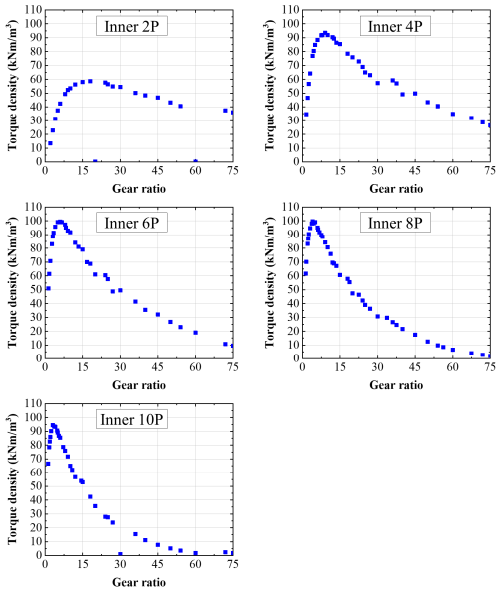


그림 3. 극수변경 개념도  
Fig. 3 Concept of pole change

### 2.2 90:1 기어비 기본모델

다중 동축 마그네틱 기어의 비교군 선정을 위해 90:1의 기어비를 갖는 단일 마그네틱 기어를 설계하였다. 표1과 그림 4는 각각 설계된 90:1 마그네틱 기어의 제원 및 형상을 나타낸다. 주요 특성으로는 내축

회전자 출력(Inner rotor power)이 1.5kw, 철손(Iron loss)이 478.5W, 영구자석 와전류 손실(Eddy current loss)이 56.98W, 효율이 65.6%, 토크밀도가 16.4kNm/m<sup>3</sup> 이다. 특히, 동축 마그네틱 기어의 기대 토크밀도인 100kNm/m<sup>3</sup>의 16% 수준으로 고 기어비 동축 마그네틱 기어의 낮은 토크밀도를 확인할 수 있다[2].

표 1. 90:1 마그네틱 기어의 제원  
Table 1. Specifications of 90:1 magnetic gear

Gear ratio		1:90	
Number of inner pole		4	
Number of outer pole		360	
Number of modulator		182	
Inner rotor speed (RPM)		1080	
Outer rotor speed (RPM)		12	
Torque	Inner (Nm)	13.26	
	Inner Ripple (%)	23.19	
	Outer (Nm)	1183.19	
	Outer Ripple (%)	1.01	
Loss	Iron Loss (W)	Inner Rotor	0.00025
		Outer Rotor	436.32
	Eddy Current Loss [W]	Inner PM	0.41
		Outer PM	56.57
Inner rotor power (W)		1500	
Outer rotor power (W)		1487	
Efficiency (%)		65.60	
Torque density (Nm/m <sup>3</sup> )		16.4	

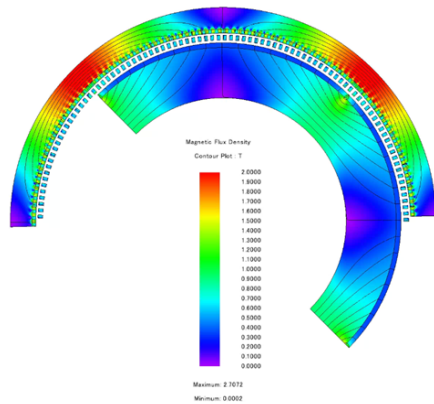


그림 4. 90:1 단일 마그네틱 기어  
Fig. 4 90:1 Single magnetic gear

표 2. 다중 기어의 조합  
Table 2. Combinations of multi gear

1 <sup>st</sup> Gear	2 <sup>nd</sup> Gear	1 <sup>st</sup> Gear	2 <sup>nd</sup> Gear	1 <sup>st</sup> Gear	2 <sup>nd</sup> Gear	1 <sup>st</sup> Gear	2 <sup>nd</sup> Gear
1.2:1	75:1	3.75:1	24:1	10:1	9:1	25:1	3.6:1
1.25:1	72:1	4:1	22.5:1	10.8:1	8.33:1	27:1	3.33:1
1.33:1	67.5:1	4.5:1	20:1	11.25:1	8:1	30:1	3:1
1.5:1	60:1	4.8:1	18.75:1	12:1	7.5:1	33.75:1	2.67:1
1.6:1	56.25:1	5:1	18:1	12.5:1	7.2:1	36:1	2.5:1
1.67:1	54:1	5.4:1	16.67:1	13.33:1	6.75:1	37.5:1	2.4:1
1.8:1	50:1	6:1	15:1	13.5:1	6.67:1	40:1	2.25:1
2:1	45:1	6.25:1	14.4:1	14.4:1	6.25:1	45:1	2:1
2.25:1	40:1	6.67:1	13.5:1	15:1	6:1	50:1	1.8:1
2.4:1	37.5:1	6.75:1	13.33:1	16.67:1	5.4:1	54:1	1.67:1
2.5:1	36:1	7.2:1	12.5:1	18:1	5:1	56.25:1	1.6:1
2.67:1	33.75:1	7.5:1	12:1	18.75:1	4.8:1	60:1	1.5:1
3:1	30:1	8:1	11.25:1	20:1	4.5:1	67.5:1	1.33:1
3.33:1	27:1	8.33:1	10.8:1	22.5:1	4:1	72:1	1.25:1
3.6:1	25:1	9:1	10:1	24:1	3.75:1	75:1	1.2:1

### III. 다중 동축 마그네틱 기어

#### 3.1 다중 동축 마그네틱 기어의 조합

다중 기어의 기어비는 두 개 이상의 기어비 곱으로 정해진다. 90:1을 만족하는 경우의 수는 무수히 많으며 본 논문에서는 두 기어의 결합에 대해서만 분석한다. 두 기어가 결합된 다중 기어의 개념도는 그림 5에, 상세한 경우의 수는 표 2에 나타낸다. 전체 기어비에 대한 경우의 수는 60가지이다.

한편, 각 기어비에 하나의 극수만 사용 가능한 것이 아니라 다양한 극수의 적용이 가능하다. 첫 번째 조합인 1차축: 1.2:1과 2차축 75:1을 예로 설명하면 다음과 같다.

먼저 극의 개수는 홀수로 존재할 수 없으며, 소수로도 구성할 수 없다. 따라서 식(1)에 따라 1.2:1의 기어비를 만족하는 최소  $P_o$ 는 12극이고  $P_i$ 는 10극이다. 그다음은 각각 24, 20극으로 사용 가능한 극수는 최소 극수의 정수배만큼 증가할 수 있다. 다음으로 2차축 75:1의 최소  $P_o$ 는 150극이고  $P_i$ 는 2극이다. 마찬가지로 정수배로 증가할 수 있다. 하지만 검토해야 할 극수 조합이 무한대이기 때문에 본 논문에서는  $P_i$ 를 기준으로 최대 10극까지만을 분석하였다.

앞선 60가지의 기어비 조합중  $P_i$ 가 2극인 경우는

24개, 4극인 경우는 33개, 6극인 경우는 32개, 8극인 경우는 42개, 10극인 경우는 34개로 총 165개의 모델이다.

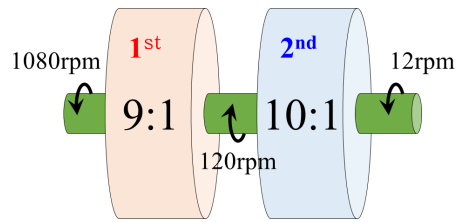


그림 5. 다중 기어의 개념도  
Fig. 5 Concept of multi gear

#### 3.2 다중 마그네틱 기어의 토크밀도

앞선 165개의 모델에 대해 각각 분석을 수행하였으며 1차축의  $P_i$ 를 기준으로 가장 높은 토크밀도를 나타내는 기어비는 다음과 같다.

2극에서는 18:1에서 58.6kNm/m<sup>3</sup>, 4극에서는 9:1에서 93.46 kNm/m<sup>3</sup>, 6극에서는 6:1에서 99.55kNm/m<sup>3</sup>, 8극에서는 4:1에서 99.67kNm/m<sup>3</sup>, 10극에서는 3:1에서 94.57kNm/m<sup>3</sup>를 나타낸다. 또한, 각 1차축에 대응하는 2차축의 기어비 및 토크밀도는 표 3에 나타낸다.

1차축이 2극인 경우 1차축의 토크밀도는 낮으나 2차축의 토크밀도는 2극 모델을 제외하고는 높다. 반면

1차측에서 가장 높은 토크밀도를 나타낸 8극 모델의 2차측 토크밀도는 낮다. 토크밀도는 단순 합산을 통해 알수 없는 만큼 실제 적용하는 용량 및 사이즈를 고려하여 계산이 필요하다. 합산 토크밀도의 계산식을 식(3)에 나타낸다. 이때 2D-FEA에서 Stack length는 비례상수로 사용되며, 외경은 동일하게 고정된 상태에서 1.5kW의 용량에 맞는 적층길이 (Stack length)를 도출하여 계산하였다.

$$D_{T, sum} = \frac{L_{s1}D_{T1}}{L_{s1} + L_{s2}} \quad (3)$$

$D_{T, sum}$ 은 합산 토크밀도,  $L_{s1}$ 은 1차측 1.5kW환산 적층길이,  $L_{s2}$ 는 2차측 1.5kW환산 적층길이,  $D_{T1}$ 은 1차측 토크밀도이다.

식을 통해 계산된 최소 및 최대 합산 토크밀도를 각 극수에 따라 정리하여 표4에 나타낸다. 각 조합별 최소 토크밀도는 실제 사용이 불가능한 수준이나 최대 토크밀도는 65.25kNm/m<sup>3</sup>로 90:1 단일 동축 마그네틱 기어 대비 4배의 향상을 나타내었다.

또한, 토크밀도가 높은 조합을 나열하여 상위 50개 까지를 표 5에 나타냈으며, 1차측이 4극인 모델이 28개로 가장 많았다. 2차측은 2극을 제외하곤 고루 분포하였다.

표 3. 다중 기어의 토크밀도  
Table 3. Torque density of multi gear

1 <sup>st</sup> $P_i$ (Gear ratio)	2 (18:1)	4 (9:1)	6 (6:1)	8 (4:1)	10 (3:1)
Torque density	58.6	93.5	99.6	99.7	94.6

2 <sup>nd</sup> Gear ratio	5:1	10:1	15:1	22.5:1	30:1	
Torque density of corresponding gear ratio (kNm/m <sup>3</sup> )						
2 <sup>nd</sup> $P_i$	2	37.4	53.5	58.0	-	54.4
	4	84.7	91.9	85.4	72.8	57.2
	6	99.1	91.6	79.1	-	49.4
	8	99.1	80.6	60.6	46.5	30.8
	10	89.1	65.0	52.9	-	1.0

표 4. 다중 기어의 합산 토크밀도  
Table 4. Summary of multi gear torque density

$P_i$ (gear ratio)		2 (18:1)	4 (9:1)	6 (6:1)	8 (4:1)	10 (3:1)
Torque density Summary	Max	50.53 kNm/m <sup>3</sup>	63.29 kNm/m <sup>3</sup>	65.25 kNm/m <sup>3</sup>	64.60 kNm/m <sup>3</sup>	63.87 kNm/m <sup>3</sup>
	Min	0.164 kNm/m <sup>3</sup>	0.102 kNm/m <sup>3</sup>	0.140 kNm/m <sup>3</sup>	0.025 kNm/m <sup>3</sup>	0.002 kNm/m <sup>3</sup>

## V. 결 론

본 연구는 동축 마그네틱 기어가 고 기어비에서 낮은 토크밀도를 갖는다는 점을 개선하기 위해 시작되었다. 본 논문에서는 저 기어비 모델이 갖는 높은 토크밀도 특성을 기반으로, 저 기어비 모델들을 결합하여 고 기어비를 나타내는 방향을 제시하였다. 구체적인 분석연구가 없음에 따라, 고 기어비를 만족하는 다중 동축 마그네틱 기어의 모든 조합에 대해 분석하였다. 결과적으로 1차측 4극 15:1, 2차측 6극 6:1로 구성된 합산 기어비 90:1 모델에서 가장높은 65.25 kNm/m<sup>3</sup>의 토크밀도를 나타냈다. 이는 단일 동축 마그네틱 기어로 구성된 90:1 기어비 모델대비 토크밀도가 4배 개선된 것이다.

또한, 본 논문의 분석결과 다중 동축 마그네틱 기어 설계에는  $P_i$  영구자석의 최소 극수를 4극 이상으로 선정하는 것이 유리하였다. 하지만 기어비 결합에 대한 경우의 수가 많고, 동축 마그네틱 기어의 설계 파라미터가 다양하기 때문에 각각의 모델에 대해 최적 설계는 진행되지 않았다. 따라서 본 논문에서 나타낸 토크밀도 보다 개선될 가능성은 열려있다.

본 논문의 내용은 동축 마그네틱 기어를 이용하여 고 기어비에서 높은 토크밀도를 나타냈다는 것에 큰 의미가 있다. 후속연구로는 언급했던 최적설계를 겸한 분석이 진행 중이며, 본 논문의 2단 기어를 넘는 3단 이상의 다중 기어에 대한 분석도 예정하고 있다.

표 5. 다중 기어의 조합에 따른 토크밀도  
Table 5. Torque density according to combinations of multi gear

No.	1 <sup>st</sup> // 2 <sup>nd</sup> (P: poles)	Torque density (kNm/m <sup>3</sup> )	No.	1 <sup>st</sup> // 2 <sup>nd</sup> (P: poles)	Torque density (kNm/m <sup>3</sup> )
1	4P 15 : 1 // 6P 6 : 1	65.3	26	4P 36 : 1 // 8P 2.5 : 1	56.6
2	4P 20 : 1 // 8P 4.5 : 1	64.6	27	6P 13.33 : 1 // 8P 6.75 : 1	56.1
3	4P 15 : 1 // 8P 6 : 1	64.6	28	4P 12 : 1 // 4P 7.5 : 1	55.8
4	4P 22.5 : 1 // 8P 4 : 1	64.2	29	6P 18 : 1 // 4P 5 : 1	55.7
5	4P 18 : 1 // 6P 5 : 1	64.2	30	4P 12 : 1 // 8P 7.5 : 1	55.6
6	4P 18 : 1 // 8P 5 : 1	64.1	31	4P 37.5 : 1 // 10P 2.4 : 1	55.0
7	4P 22.5 : 1 // 6P 4 : 1	64.0	32	6P 24 : 1 // 8P 3.75 : 1	55.0
8	6P 15 : 1 // 6P 6 : 1	64.0	33	4P 36 : 1 // 4P 2.5 : 1	55.0
9	4P 22.5 : 1 // 10P 4 : 1	63.9	34	6P 16.67 : 1 // 10P 5.4 : 1	54.8
10	6P 15 : 1 // 8P 6 : 1	63.5	35	4P 12.5 : 1 // 10P 7.2 : 1	54.1
11	4P 15 : 1 // 4P 6 : 1	63.3	36	4P 30 : 1 // 8P 3 : 1	53.9
12	4P 18 : 1 // 10P 5 : 1	63.0	37	4P 30 : 1 // 10P 3 : 1	53.8
13	4P 15 : 1 // 10P 6 : 1	62.8	38	4P 30 : 1 // 6P 3 : 1	53.6
14	4P 20 : 1 // 4P 4.5 : 1	62.5	39	6P 20 : 1 // 8P 4.5 : 1	53.5
15	6P 15 : 1 // 4P 6 : 1	62.5	40	6P 25 : 1 // 10P 3.6 : 1	53.2
16	6P 15 : 1 // 10P 6 : 1	62.1	41	6P 12 : 1 // 4P 7.5 : 1	53.0
17	4P 24 : 1 // 8P 3.75 : 1	62.1	42	6P 12 : 1 // 8P 7.5 : 1	52.8
18	4P 22.5 : 1 // 4P 4 : 1	62.1	43	2P 24 : 1 // 8P 3.75 : 1	52.7
19	4P 18 : 1 // 4P 5 : 1	61.9	44	4P 30 : 1 // 4P 3 : 1	52.3
20	4P 13.5 : 1 // 6P 6.67 : 1	60.5	45	6P 20 : 1 // 4P 4.5 : 1	52.0
21	4P 25 : 1 // 10P 3.6 : 1	59.0	46	2P 25 : 1 // 10P 3.6 : 1	51.9
22	4P 27 : 1 // 6P 3.33 : 1	58.1	47	2P 30 : 1 // 8P 3 : 1	51.4
23	6P 18 : 1 // 6P 5 : 1	57.6	48	2P 30 : 1 // 10P 3 : 1	51.3
24	6P 18 : 1 // 8P 5 : 1	57.5	49	2P 30 : 1 // 6P 3 : 1	51.1
25	6P 18 : 1 // 10P 5 : 1	56.7	50	2P 27 : 1 // 6P 3.33 : 1	51.1

#### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구  
(개별)에 의해 지원되었음(과제번호:  
R19X001-34)

#### References

- [1] 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. 259-266.
- [2] H. Cho and W. Kim, "Sensorless Control of High-Speed BLDC," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 503-512.
- [3] B. Lee, H. Kwon, E. Son, H. Ko, and Y. Song, "Knee Rehabilitation System through EMG Signal and BLDC Motor Control," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 1009-1018.
- [4] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, no. 4, 2001, pp. 2844-2845.
- [5] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a highperformance magnetic gear," *IEE Proc.-Electr.*

- Power Appl.*, vol. 151, no. 2, 2004, pp. 135-143.
- [6] S. Kim, D. Kim, C. Gim, D. Lee, and Y. Kim, "Analysis of Efficiency and Loss due to Number of Poles in Magnetic Gears," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, 2018, pp. 1023-1028.
- [7] M. Filippini and P. Alotto, "An optimization tool for coaxial magnetic gears," *The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 36, no. 5, 2017, pp. 1526-1539.
- [8] E. Gobl, G. Jungmayr, E. Marth, and W. Amrhein, "Optimization and Comparison of Coaxial Magnetic Gears With and Without Back Iron," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, 2018, pp. 8001604.
- [9] G. Jungmayr, J. Loeffler, B. Winter, F. Jeske, and W. Amrhein, "Magnetic Gear: Radial Force, Cogging Torque, Skewing, and Optimization," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 52, no. 5, 2016, pp. 3822-3830.
- [10] D. Jang and J. Chang, "Effect of Stationary Pole Pieces with Bridges on Electromagnetic and Mechanical Performance of a Coaxial Magnetic Gear," *J. of Magnetics*, vol. 18, no. 2, 2013, pp. 207-211.
- [11] X. Zhang, X. Liu, and Z. Chen, "A Novel Coaxial Magnetic Gear and Its Integration With Permanent-Magnet Brushless Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 7, 2016, pp. 8203304.

## 저자 소개

### 박의종(Eui-Jong Park)



2013년 조선대학교 전기공학과 졸업

2015년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

2020년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2021년-현재 조선대학교 스마트이동체융합시스템공학부 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 부교수

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석

