

# 고속철도차량의 인보드대차 적용을 위한 견인전동기의 설계 및 성능해석

백승구\*, 최성훈  
한국철도기술연구원 차세대고속차량분부

## Traction Motor Design and Performance Analysis for Application to an Inboard Bogie of High Speed Train

Seung-Koo Baek\*, Sung-Hoon Choi  
Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 논문은 고속철도용 인보드 대차에 적용하기 위한 견인전동기 시스템의 설계 프레임워크를 다룬다. 최근 유럽에서는 새로 제작되는 철도차량에 인보드 대차 시스템을 적용하는 사례가 늘어나고 있으나, 국내에서는 개발 및 적용 사례가 없다. 인보드 대차는 아웃보드 대차에 비해 차량 중량과 주행 저항을 줄일 수 있는 기술이다. 이러한 장점에도 불구하고, 차축에 설치되는 베어링이 차륜의 안쪽에 위치하기 때문에 대차의 내부 공간의 효율적 활용, 견인전동기와 감속기 간의 최적화 설계 및 개선된 인터페이스가 요구된다. 본 논문에서는 최고운영속도 400km/h를 위한 고속철도차량의 동적특성곡선 설계를 통한 견인전동기의 설계목표를 선정하고 동일 설계목표에 대한 기존 감속기(driving gear)를 통한 동력전달 구조와 직접구동모터의 두가지 설계를 제안하였다. 또한, 아웃보드 대차가 설치된 국내 차세대고속철도차량(HEMU-430X)의 유도전동기의 출력대비 40% 이상 출력 증가를 위해 매입형 영구자석 동기전동기 구조의 적용, 극수 증가 및 수냉식시스템 적용을 통한 설계 및 해석결과를 제시하였다. 설계된 견인전동기는 유한요소분석(FEA)을 통한 전기자계해석 상용 소프트웨어인 JMAG(Ver. 22.1, JSOL)을 활용한 해석결과로 설계 타당성을 보였다.

**Abstract** This paper deals with a design framework for a traction motor system for inboard bogies for high-speed rail. Recently, there have been increasing cases of applying an inboard bogie system to newly manufactured trains in Europe, but there have been no cases of development and application in South Korea. Inboard bogies are a technology that can reduce vehicle weight and running resistance compared to outboard bogies. Despite these advantages, the bearings installed on the axle are located inside the wheel, so efficient use of the internal space of the bogie, optimized design, and improved interface between the traction motor and driving gear are required. In this study, a design goal was selected for the traction motor through dynamic characteristic curve design of a high-speed train (HST) for a maximum service speed of 400 km/h. A combined structure of a traction motor and driving gear, which are mainly used in the traction system for an HST, and a direct drive motor (DDM) are suggested for the same design goal. In addition, design and analysis results were obtained by applying an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) structure, increasing the number of poles, and applying a water cooling system. The output was increased by more than 40% compared to the output of the induction motor of a domestic next-generation HST (HEMU-430X) with an outboard bogie. The designed traction motor showed design feasibility through analysis results using JMAG (Ver. 22.1, JSOL), which is commercial electromagnetic field analysis software that uses finite element analysis (FEA).

**Keywords** : Inboard-bogie, Direct-Drive-Motor(DDM), Outboard-bogie, Interior-Permanent-Magnet-Synchronous-Motor(IPMSM), Traction-Motor, Finite-Element-Analysis(FEA), Driving-gear

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 RS-2022-0014-3396)

\*Corresponding Author : Seung-Koo Baek(Korea Railroad Research Institute)

email: skbaek@krrri.re.kr

Received September 1, 2023

Revised October 5, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

## 1. 서론

2010년도 까지 고속철도 분야는 각 제작사의 기술을 선전하기 위해 속도경쟁에 집중하였지만, 최근 철제차륜 방식의 고속철도차량의 속도한계 및 속도를 증가하여 상업운행을 할 때의 문제점 등으로 인하여 에너지 소비효율을 향상하기 위한 방향으로 많은 연구개발을 수행 중이다.

2023년 3월 UIC의 High Speed Congress가 모로코에서 개최되었다. 모로코는 최근 ERTMS LEVEL2 신호기반의 고속철도노선(카사블랑카~텐지어)의 건설을 끝마치고 300 km/h 이상의 속도로 상업운영 중이며, 일부 운행구간(캐니트라~텐지어)에서는 최고운영속도 320 km/h로 상업운영 중이다. UIC의 화두로 고속철도차량의 운영속도한계와 에너지 소비 저감, 상태기반 모니터링 시스템(CBM)과 인공지능 기반의 유지보수 시스템을 위한 차량 제작사의 개발노력이 주요 의제로 다루어 졌다. 특히, 에너지효율향상과 같은 환경을 고려한 최적의 운영속도에 대한 참석자의 설문결과 300 ~ 349km/h 속도의 운영이 41 %로 가장 많은 선택을 받았다. 350km/h 이상 속도의 운영은 18 % 수준의 선택을 받았으며, 이러한 선택의 이유는 속도 증가로 에너지 소비가 증가하지만 차량 및 항공과 같은 다른 교통수단 대비 탄소배출량과 교통혼잡을 줄일 수 있고 높은 수준의 수송능력의 장점을 최대한 활용하기 위해 현재 보다 더 빠른 운영속도가 필요하며 이를 통하여 철도교통으로의 모드전환(modal shift)을 전략으로 하는 것이었다.

유럽을 중심으로한 철도차량 선진 제작사들은 에너지 저감 및 운영효율을 고려한 철도차량의 개발에 집중하고 있다. 철도차량 분야에서 에너지 저감을 위한 대표적인 사례가 인보드대차 시스템의 개발이다. 국내에서 아직 개발되어 운영된 사례가 없지만 유럽 철도제작사를 중심으로 개발이 완료되어 운영 중이며, 고유모델도 활발히 출시되고 있다[1,2]. 또한, 철도차량의 하부 대차시스템의 중량과 크기가 줄어들에 따라 에너지손실 저감에 대한 연구가 소개되고 있으며, 예로 고속운행에서의 주행저항 및 에너지손실 완화전략 연구[3], 대차시스템을 감싸는 수준에 따른 주행저항 저감 해석결과[4], 차량 하부 시스템의 스커트 구조개선에 따른 주행저항 저감 해석[5] 등이 있다. 앞선 연구결과와 같이 인보드 대차를 적용할 경우, 대차 프레임의 크기 감소는 대차를 감싸는 스커트 제작이 가능하게 하여 차량의 주행저항저감을 통한 에너지 소비저감에도 유리하다. 하지만, 대차 내부공간이 축

소되어 추진을 위한 견인전동기와 동력전달장치 등 높은 수준의 소형화 및 고효율화 설계가 필요하며 이러한 문제점 및 개선방향에 대해 추진시스템과 연관되어 발표된 연구사례가 없고 아웃보드 대차시스템에 대한 견인전동기 설계 및 제작[6]과 관련한 연구결과가 대부분을 차지한다.

본 논문에서는 고속철도의 에너지 소비저감을 위한 방안으로 기존 아웃보드대차의 형태에서 인보드대차 형태의 개발에 필요한 견인전동기의 설계 프레임워크에 대해 다룬다. 고속철도차량의 4M4T 형태의 상용화 편성을 기반으로 국내에 적용 중인 유도전동기에서 소형화 및 고효율화를 위한 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM) 구조의 견인전동기로 설계목표를 도출하였으며, 기존 감속기 연결구조와 직접구동모터(DDM : Direct Drive Motor, 이하 DDM) 형태의 두 가지 경우에 대하여 전기기계해석 상용 소프트웨어인 JMAG(Ver. 22.1, JSOL)를 활용한 해석결과로 설계 타당성을 보였다.

## 2. 본론

### 2.1 철도차량 대차의 구조

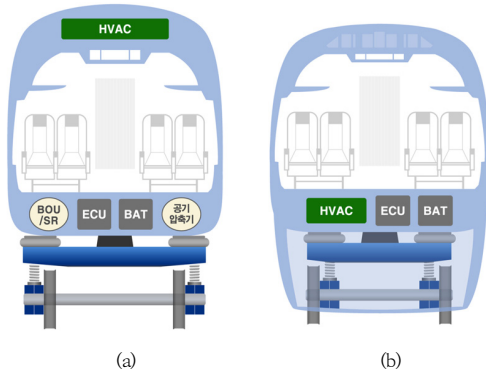


Fig. 1. Comparison of bogie systems for railway vehicles  
(a) Outboard bogie system (b) Inboard bogie system

Fig. 1 은 대차의 형태에 따른 철도차량의 단면적을 비교한 그림이다. Fig. 1 (a)는 차륜의 바깥쪽에 윤축의 베어링이 설치된 아웃보드 대차이며, Fig. 1 (b)는 윤축의 베어링의 위치가 안쪽에 설치된 인보드 대차이다. 두 대차의 형태 모두 윤축의 거리는 동일하지만 베어링의 위치에 따라 아웃보드 대차가 인보드 대차보다 대차 안쪽 공간이 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나, 전체 차량의

단면적에서 보듯이 인보드 대차의 단면적 크기가 작게 설계될 수 있어 대차를 감싸는 스킵트 설치가 용이하여 차량이 주행 중 발생할 수 있는 주행저항을 줄일 수 있으며, 대차 뿐만 아니라 차량 전체의 중량을 줄일 수 있어 소비전력을 저감할 수 있는 장점을 갖는다.

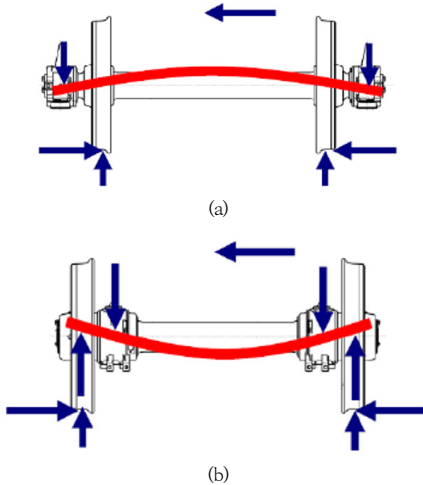


Fig. 2. Bending moment according to the position of the axle  
(a) Outboard bogie (b) Inboard bogie

Fig. 2는 대차의 형태에 따른 축상 베어링의 위치에 따른 윤축의 하중특성을 나타내며[7] 아웃보드대차와 인보드 대차는 굽힘 모멘트의 방향이 반대임을 확인할 수 있다. 인보드 대차의 굽힘 모멘트는 중력 굽힘 모멘트와 구심력 굽힘 모멘트가 서로 삭제되어 고속 코너링(cornering)에 유리하며 차축의 변형 및 피로도를 줄여 주며, 스프링 하 질량을 효과적으로 줄일 수 있다. 그러나 모터의 설치 공간이 줄어들어 따라 동력대차의 설계와 베어링의 수리교체가 어려워 신뢰성 높은 베어링이 요구되며, 프레임의 폭이 작아져 롤링(rolling)을 억제하기 위한 추가적인 설계가 필요하다.

## 2.2 인보드대차의 동력전달 구조

Fig. 3은 인보드대차에 적용 가능한 동력전달 구조를 나타낸다. Fig. 3 (a)는 기존의 아웃보드 대차에 대부분 적용되고 있는 견인전동기의 출력단에 커플러를 이용한 감속기와 결합구조를 갖는 구조이다. 대차프레임을 지탱하기 위한 윤축베어링의 위치가 차륜의 안쪽에 위치하고 있어 견인전동기와 감속기의 소형화/고효율화 설계 뿐만 아니라 동력 연결을 위한 커플러도 소형화 설계를 통해 대차의 내부공간을 효율화 할 필요가 있다. Fig. 3 (b)는

감속기를 사용하지 않고 윤축을 견인전동기의 출력 샤프트로 활용하는 방식의 DDM 형태를 나타낸다. 이러한 방법은 감속기 사용에 따른 에너지 효율이 약 3% 상승하며, 기계부품 수 감소 및 유지보수 간격을 연장하여 유지보수비가 약 5% 수준으로 절감이 가능하다고 발표되고 있다[8]. 그러나, 기존의 감속기 결합구조와 비교하여 초기 구동시 차량 가속도를 만족시키기 위해 높은 구동토크가 요구되고 전동기의 부피와 중량이 증가하는 단점이 있으며, 현재까지 고속철도차량에 적용된 사례가 없다.

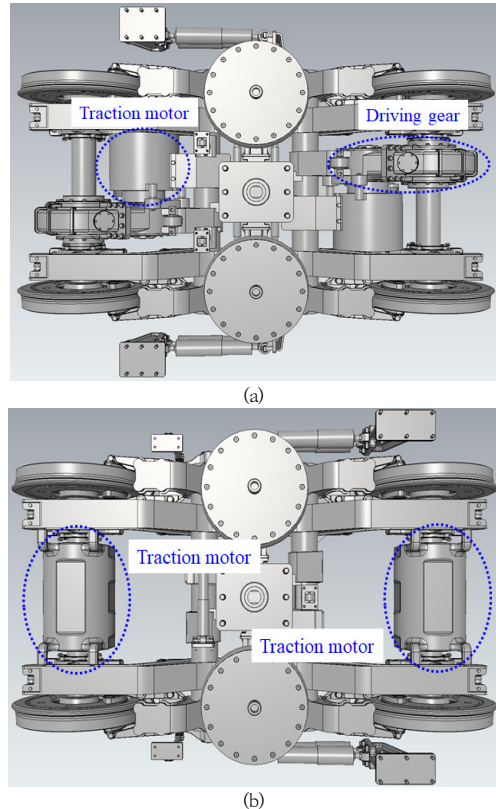


Fig. 3. Inboard bogie with traction motor  
(a) Traction motor with gear  
(b) Traction motor without gear(DDM)

## 2.3 견인전동기 설계 프레임 워크

### 2.3.1 차량의 설계요구사항 선정

Table 1은 최대운행속도 400km/h을 위한 고속철도 차량의 설계요구사항이다. 고속철도차량에 인보드대차를 적용할 경우 중량은 기존 4M4T의 예상 중량 대비 20%, 주행저항은 30%를 저감목표로 설계요구사항을 설정하였다. 차량의 편성은 4M4T로 동력차량 4대와 부수차량 4대로 구성하였으며 동력차량 1량에 4대의 견인전동기가

설치될 경우 총 16대의 견인전동기가 필요하다. 최대설계속도는 일반적으로 최대운영속도의 10% 수준으로 설계하며, 정토크 영역의 가속도는 2.2km/h/s 이상으로 견인전동기 정토크 영역의 종단면 까지의 속도 대역에서 결정된다. 동일한 속도구간에서 차량의 추진력은 220kN으로 초기 구동시 0.6m/s<sup>2</sup> 이상의 가속여력을 갖도록 하였다. 일반적으로 차량의 추진력은 초기 구동시 발생할 수 있는 슬립현상에 따른 점착력 및 감속기의 입력가능한 최대 토크값에 따라 결정된다. 차량의 직경은 마모가 진행되기 전인 850mm에서 반마모 상태를 적용하여 820mm로 선정되었다.

Table 1. Specification of the one high-speed trainset

Item	Specification	Remark
Organization	4M4T	
Design Speed	440 km/h	Maximum
Acceration	2.2 km/h/s	0.6 m/s <sup>2</sup>
Weight	342 ton	20% ↓
Running Resistance	70 % of HEMU-430X	TBD
Wheel Dia.	820 mm	
Traction Force	220 kN	Maximum

### 2.3.2 견인전동기 동적특성곡선 설계

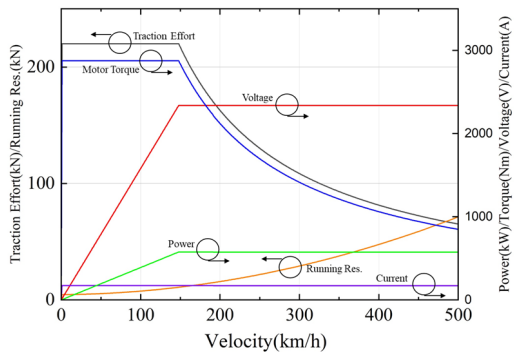


Fig. 4. Dynamic characteristics of traction motor

Fig. 4는 Table 1의 차량 설계요구사항을 바탕으로 설계된 견인전동기의 동적특성곡선을 나타낸다. 차량의 견인력 곡선에 따라 견인전동기의 출력, 전류, 속도(rpm) 및 토크가 계산된다. Fig. 4의 주황색 곡선은 차량의 주행저항 곡선이며, HEMU-430X의 70% 수준으로 설계기준을 선정하였다. 견인력과 주행저항이 같아지는 지점을 균형속도라 정의한다. 유럽의 TSI(Technical Specifications for Interoperability)에 따르면 차량의 최고운영속도는 견인력과 주행저항의 차이에 따라 결정되며 가속도 기준

은 최고운영속도에서 0.05 m/s<sup>2</sup> 이상이다.

본 논문에서는 최고운영속도 목표를 400km/h로 설정하고, 국내 고속철도 기술기준에 따라 10% 수준의 여유율을 갖도록하여 440km/h를 최고설계속도로 결정하였으며, 가속여력은 0.05m/s<sup>2</sup> 이상이 되도록 목표값을 설정하였다. 견인력 곡선에 따라 견인전동기의 최대 출력은 577kW로 계산되며, 견인전동기 구동을 위한 인버터의 출력 전압에 따라 전류값이 계산된다. 차량의 속도에 따라 견인전동기의 속도가 결정되므로 감속기에 전달되는 견인전동기의 최종 출력 토크값은 Eq. (1)에 따라 계산된다.

$$T = \frac{P}{\frac{2\pi}{60} \times V} \quad (1)$$

Where,  $T$  denotes motor torque(Nm),  $P$  denotes output power of motor(W),  $V$  denote motor rotate speed(rpm).

### 2.3.3 견인전동기 설계

Table 2. Specification of the one traction motor

Item	Specification	Remark
Motor Type	IPMSM	
Rated Power	577 kW	
Motor Speed	5,693 rpm	Maximum
Rated Voltage	2,339 Vdc	
Rated Current	172 A	
Motor Torque	2,875 Nm	Gear ratio 2:1
Weight	600 kg	TBD
Cooling System	Water cooling	

Table 2는 Fig. 4의 특성곡선에 따라 결정된 견인전동기의 설계사양이다. 견인전동기는 인보드대차의 내부 공간 효율화를 위해 출력밀도 향상에 유리한 IPMSM을 적용하였으며, 전력변환장치의 DC Link 전압이 3,000Vdc가 사용될 경우, 인버터의 최대 출력전압은 원펄스제어(one pulse) 시 2,339Vdc가 된다. 견인전동기의 출력토크는 감속비가 2대1일 경우 정토크 구간에서 2,875Nm이며, 정출력 구간의 최대속도인 440km/h (5693 rpm)에서 987Nm 이상이 요구된다. 최근 고속철도차량에 사용되는 감속기의 경우 허용되는 최대 입력토크가 약 3,200Nm 이하 이므로 견인전동기의 출력토크 설계기준에 만족한다.

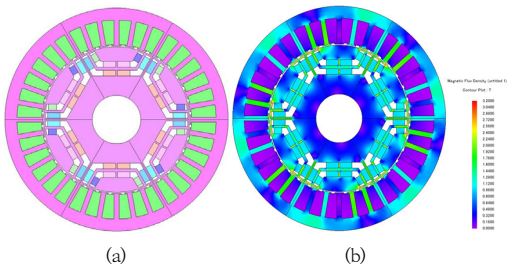


Fig. 5. Design concept of the traction motor with gear  
(a) 2D Structure (b) Magnetic flux density

Fig. 5는 Fig. 3 (a)의 대차구조에 적용하기 위한 모터 형상이며, 회전자는 이중층(double layered) 구조의 매입형영구자석 배열이다. 국내의 기존 고속철도차량의 편성인 6M2T(8량 편성) 구조와 비교하여 약 1.5 배의 모터 출력이 필요하므로 기존 4극에서 6극 이상으로 극수를 증가시켜 고속영역에서의 출력과 토크가 증가하는 방향으로 설계가 필요하다[9]. Fig. 5 (b)는 자속밀도분포를 나타내며, 자석의 리브(rib) 부분의 값을 제외하고 전반적으로 낮은 수준의 값을 보이고 있다.

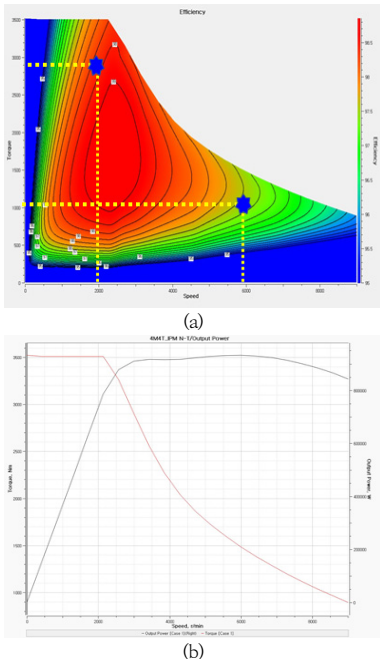


Fig. 6. Simulation results  
(a) Efficiency map (b) T-N curve

Fig. 6은 Fig. 3 의 형상에 의한 효율맵과 N-T 곡선을 나타낸다. Fig. 6 (a)에서 정토크 중단의 운전영역인 148km/h(1,915 rpm)에서의 효율은 약 98% 수준이며, 최대 속도 지점인 440km/h(5,693 rpm)에서의 효율은

약 97% 이다. Fig. 6 (b)의 N-T 곡선이며 효율맵에 표시된 운전영역에서 800kW 이상의 출력을 보이고 있으며, 목표 정격출력인 577kW를 만족하고 있다.

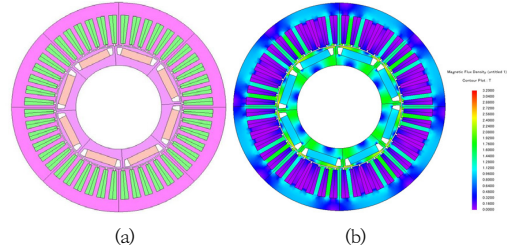


Fig. 7. Design concept of the traction motor without gear  
(a) 2D Structure (b) Magnetic flux density

Fig. 7은 Fig. 3 (b)의 대차구조에 적용하기 위한 DDM 방식의 모터형상이다. Fig. 7 (a) 와 같이 대차의 차축이 모터의 샤프트를 대신하는 구조이므로 샤프트의 직경이 증가하여 회전자의 면적이 감소하게 되므로 고속기동에 유리한 이중층 구조의 영구자석 배열의 적용이 불가능하여 막대형의 영구자석 배열을 적용하였다. DDM의 경우, 감속기를 적용하지 않으므로 최대속도 3,000rpm(440km/h) 수준의 견인전동기 설계가 필요하지만 차량시스템의 초기 가속력 위해 기동토크가 커지는 단점이 있다. Fig. 7 (b)는 자속밀도분포를 나타내며, 앞서 설명한 Fig. 5 의 자속밀도와 유사한 결과값을 보였다.

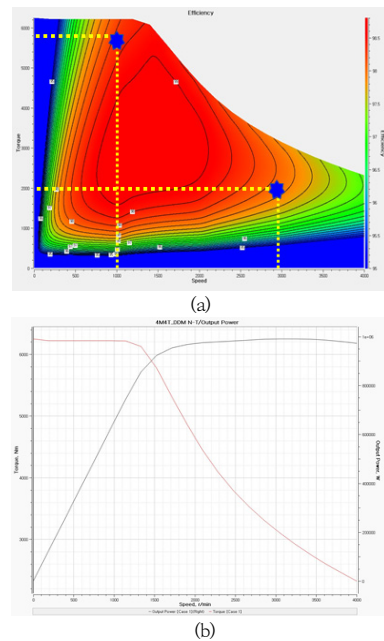


Fig. 8. Simulation results  
(a) Efficiency map (b) T-N curve



Fig. 8은 Fig. 7의 형상에 의한 효율맵과 N-T 곡선을 나타낸다. Fig. 8 (a)에서 정토크 중단의 운전영역인 148km/h(958 rpm)에서의 효율은 약 98% 수준이며, 최대 속도 지점인 440km/h(2,847 rpm)에서의 효율도 약 98% 이다. Fig. 8 (b)는 N-T 곡선이며 설계결과 견인전동기의 운전영역에서 850kW 이상의 출력을 보이고 있으며, 목표 정격출력인 577kW를 만족하고 있다.

### 2.3.4 열해석

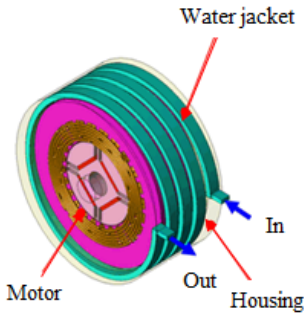


Fig. 9. Cooling structure of water jacket

Fig. 9는 설계된 견인전동기의 열해석을 위한 냉각시스템의 형상을 나타낸다. IPMSM은 일반적으로 전폐형으로 제작이되어 팬(fan)을 이용한 강제공냉식을 적용할 경우 냉각효율이 낮아진다. 따라서 Fig. 9와 같이 전동기의 외부표면에 냉각튜브 형태의 수로를 설계하여 내부코일 및 코어에서 발생하는 열을 냉각할 수 있도록 워터재킷(water jacket)을 적용한다. 각 튜브의 턴별 열저항 값은 Eq. (2)다음과 같은 식으로 계산된다.

$$R = C_F \times \frac{1}{h \times A} \quad (2)$$

Where,  $R$  denotes Thermal resistance value (deg C/W),  $C_F$  denotes correction factor,  $h$  denote Heat transfer coefficient,  $A$  denote area of the cooling target per single thermal resistor component( $mm^2$ ).

Eq. (2)에서  $A$ 는 워터재킷 튜브의 면적을 나타내며 Eq. (3)와 같이 계산된다.

$$A = 2\pi r W N \quad (3)$$

Where,  $W$  denotes rectangular tube width,  $N$  denotes number of turns of rectangular tube,  $r$  denotes distance from the center of the rotating machine to the tube.

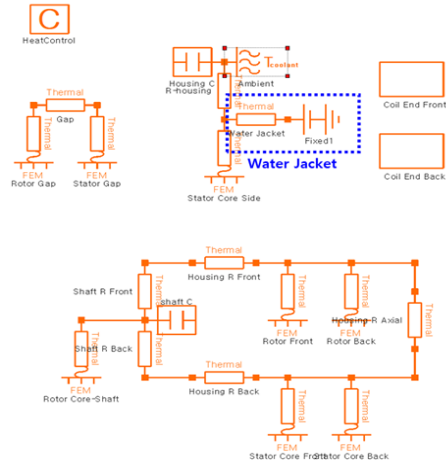


Fig. 10. Thermal analysis model

Fig. 10은 Fig. 9의 워터재킷 냉각구조를 갖는 견인전동기의 열해석 모델이다. 그림에서 보듯이 회전자와 고정자, 하우징 및 에어갭을 Eq. (1)의 수식에 따라 열저항값으로 변환하여 모델로 표현하였으며 초기 온도조건, 냉각방식 및 튜브의 턴 수 등을 모델화 하였다.

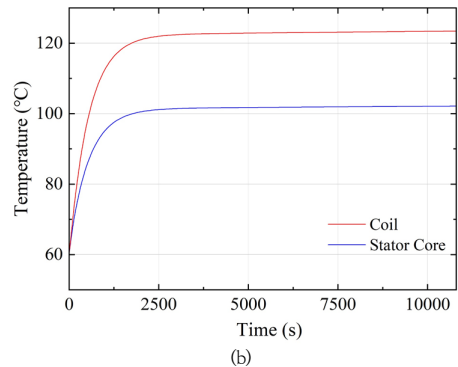
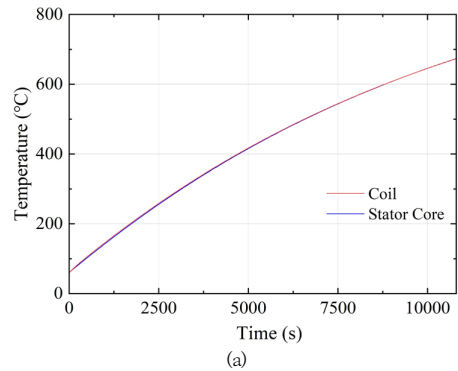


Fig. 11. Thermal analysis results  
(a) Without water jacket (b) With water jacket

Fig. 11은 Fig. 10에 표시된 워터재킷 모델의 유-무에 따른 열해석 결과이다. 모터에서 발생하는 열원은 권선의 전류에 의한 열원과 고정자 코어의 손실이 대부분을 차지하며, 회전자 코어와 영구자석의 손실은 상대적으로 작다. 따라서, 권선과 고정자 코어의 열해석 결과만을 그래프로 나타내었다. Fig. 11 (a)와 같이 워터재킷을 적용하지 않은 경우 권선과 고정자 코어가 3시간 이후 약 650K 이상 온도가 상승하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 권선이 견딜 수 있는 온도 수준인 약 200°C를 초과하는 결과로 냉각시스템이 반드시 필요함을 확인 할 수 있다. Fig. 11 (b)은 워터재킷을 적용한 경우의 결과이며, 1시간 이후 온도가 포화상태에 도달하여 이후 2시간 동안  $\pm 2K$  이내의 안정적인 온도를 유지하고 있다. 또한, 권선의 최대온도가 125°C 이하로 고속철도차량의 견인전동기 고정자 권선의 온도상승 기준인 200K를 만족하는 결과이다.

### 3. 결론

본 연구는 고속철도차량의 인보드대차 적용을 위해 차량의 동적특성 결정, 견인전동기의 설계 요구사항 선정 및 해석결과를 통한 설계프레임워크를 다루었다.

기존의 HEMU-430X의 410kW 출력보다 약 40% 출력을 증가시키면서 축소된 설치공간에 장착하기위해 다음과 같은 설계방향을 제시하였다.

- 농형유도전동기 구조를 고효율의 IPMSM으로 변경
- 고속영역에서 출력 및 토크 증가를 위해 극수는 4극에서 6극으로 변경
- 강제공냉식에서 수냉식시스템 적용
- 감속기를 통한 동력전달 구조와 DDM 방식의 직접 동력전달구조의 해석결과 제시

고속철도차량의 요구조건분석을 통해 견인전동기 설계목표를 도출하였으며, 동일 설계목표에 대한 감속기를 통한 동력전달 구조와 DDM 방식의 직접 동력전달구조 형태의 견인전동기 설계를 수행하였다. 설계된 견인전동기는 해석결과 설계목표를 모두 만족시킬 수 있었으며 열해석 결과 고속철도차량의 견인전동기 온도상승 기준에 적합함을 보였다.

본 연구는 고속철도차량용 인보드 대차 개발을 위한 구조설계 및 시제품 개발의 기초자료로 활용될 예정이며, 향후 견인전동기 외관의 상세설계를 통하여 감속기와의 연결구조 개선방안 및 공간 효율화 연구가 수행될 계획이다.

### References

- [1] A. Bracciali, G. Megna, "Inside Frame Bogies & AIR Wheelset: A Winning Marriage", *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Railway bogies and Running Gears*, Budapest, pp.12-15, Sep. 12, 2016.
- [2] SIEMENS, Velaro Novo, Available From: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/high-speed-and-intercity-trains/velaro-novo.html> (accessed Oct. 4, 2022)
- [3] R. S. Raghunathan, H. D. Kim, and T. Setoguchi, "Aerodynamics of high-speed railway train", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, pp. 469-514, Aug.-Oct., 2002. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00029-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00029-5)
- [4] J. Wang, G. Minelli, T. Dong, K. He, S. Krajnovic, "Impact of the bogies and cavities on the aerodynamic behaviour of a high-speed train. An IDDES study", *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 207, 20pages, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104406>
- [5] W. Liu et al. "Effects of bottom deflectors on aerodynamic drag reduction of a high-speed train", *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 38, 15pages, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10409-021-09058-x>
- [6] A. Binder, Th. Koch, "Permanent magnet gearless traction drive for German high speed train ICE3", *Proceedings of the ICPE Conference*, pp.756-760, Oct. 01, 2001.
- [7] Overview of practical technology of railway vehicle engineering. Introduction to Frontier Technologies in Vehicle Engineering - Brief comparison of three new internalbearing bogies and future technology prospects. Available From: <https://zhihu.com/column/railway-engine> (accessed Sep. 19, 2023)
- [8] G. Eduardo, "Development of a New Traction System for Independent Rotating Wheel Bogie", *11<sup>th</sup> World Congress of High-speed Rail*, marrakech, March 7-10, 2023.
- [9] K. Y. Hwang, S. B. Rhee, Y. Yang, and B. I. Kwon, "Rotor pole design in spoke-type brushless DC motor by response surface method", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 3, 1833-1836, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.892616>

백 승 구(Seung-Koo Baek)

[정회원]



- 2003년 2월 : 충북대학교 대학원 전자공학과 (전자공학 석사)
- 2017년 2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과 (전자공학 박사)
- 2003년 1월 ~ 2005년 7월 : SIEMENS automotive 연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉

고속철도차량 추진시스템, 전력전자, 자동제어

---

최 성 훈(Sunghoon CHOI)

[정회원]



- 1990년 2월 : KAIST 기계공학과 (기계공학 학사)
- 1992년 6월 : Northwestern University (응용역학 석사)
- 1995년 6월 : Northwestern University (응용역학 박사)
- 1995년 3월 ~ 2000년 6월 : 삼성 종합기술원 CSE 센터

- 2000년 9월 ~ 2002년 10월 : KAIST 기계공학과
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

〈관심분야〉

소음/진동, 철도차량 시스템엔지니어링