

Al-Diecasting 공법을 적용한 경전철용 AC 견인전동기 개발

이정일*, 박정태, 이종인, 권중록, 우종열, 조봉환
현대중공업(주)

The Development of AC Traction Motor by Al-Diecasting Process for LRV

J.I. Lee*, J.T. Park, J.I. Lee, J.L. Kwon, J.Y. Woo, B.H. Jo
Hyundai Heavy Industries. Co. Ltd

Abstract- In this material, a traction motor for light railway vehicle was developed. Aluminium-Diecasting process was selected in order to reduce the manufacturing cost of making rotor bars and rotor rings of the motor, instead of copper or copper alloy rotor bars and rotor rings. And the results of experiment satisfied the international standard IEC 349-2.

어 취부되며, 전동기에서 발생된 회전력은 커플링과 구동기어를 통해 최종적으로 차륜에 전달되어 차량을 구동시키며, 주어진 공간 내에서 취부가 견고하고 용이하며 안정적인 성능을 발휘해야 한다.

차량시스템과 인터페이스를 고려한 전동기 외관치수는 외경 500 mm, 전동기 길이 800 mm 이내이어야 하며, 차량시스템의 요구조건은 표 2와 같고, 그림 2는 차량이 운전되는 속도에 대한 요구견인력이다.

1. 서 론

경전철은 도시외곽 또는 비교적 빈번하나 많은 교통인구는 아닌 지역을 운행하는 교통수단으로서, 최근 수도권권과 주변도시간의 교통혼잡의 심화로 노선확충이 요구되고 있다. 경전철용 견인전동기는 경전철 구동에 필요한 견인력을 발생하는 장치로서, 차량이 운전되는 광범위한 속도에 대해 제어가 용이하며, 병렬운전시 부하 불평형 및 전원변동에 안정적인 성능을 발휘해야 하고, 소형·경량이면서도 신뢰성이 높아야 한다.

기존의 AC 견인전동기의 회전자는 동바(Copper Bar)형식이 적용되어 왔으나, 회전자 제작시 각각의 동바는 회전자 철심에 삽입되어 엔드링과 용접되는 구조이므로 제작비용 상승, 용접결함 등이 문제시 되어왔다. 따라서, 제작성이 용이하고 차량운행시 열용량 및 원심력 등에 의한 용접부위에서의 문제점이 배제된 Al-Diecasting 공법에 의한 제작공정의 전환이 요구된다.

본 논문에서는 Al-Diecasting 공법을 적용하여 당사에서 개발된 경전철용 AC 견인전동기의 설계, 해석 및 시험결과를 서술한다.

2. 본 론

2.1 추진시스템 사양

견인전동기는 그림 1과 같이 대차 프레임에 장착되

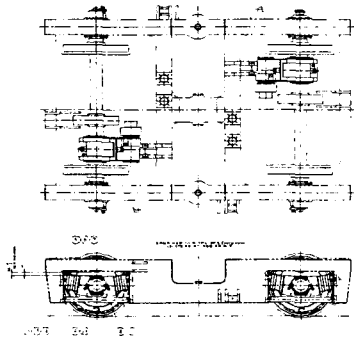


그림 1. 경전철 대차구조

표 1. 차량시스템 요구조건

취부 조건	취부방식	대차취부 방식
	기어비	
인버터	차륜경	660(new), 600(worn)
	형식	IGBT 전압형 인버터
	구성	1C2M 방식 (2대 병렬운전)
차량 성능	출력전압	AC 545 V (DC 700 V)
	가속도	3.0 km/h/s
	기저속도	35 km/h
	최고속도	80 km/h
전동기	기동토크	1,100 N.m
	형식	4극 3상 농형유도 전동기
	전압	130 kW
	허용전류	330 A
	기저속도	2280 rpm
효율	92.0 %	
냉각방식	자기통풍냉각방식	

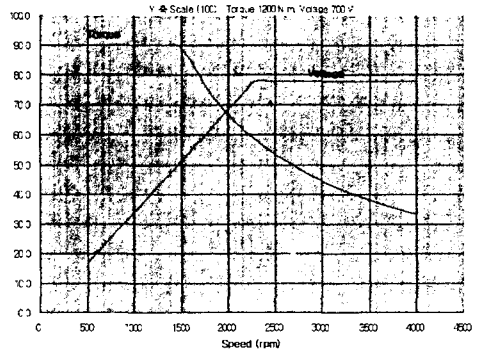


그림 2. 견인전동기 속도-견인력 요구특성

2.2 견인전동기 설계 제작 및 시험

전동기는 추진시스템 사양을 만족하며 인버터 구동특성을 고려하여 구조적으로 견고하고, 유지·보수가 용이한 3상 농형 유도전동기를 채택하였다.

견인전동기 회전자는 Al-Diecasting 공법으로 일체형 구조로 설계하였고, 견인전동기 고신뢰성을 위해 냉각 시스템의 효율과 내열성·내전압성이 우수한 절연 시스템을 설계하였고, 구조해석 및 위험속도 계산을 통해 전동기를 설계하였다.

2.2.1 Al-Diecasting 공법에 의한 회전자 제작

기존의 AC 견인전동기의 회전자는 동바(Copper Bar)형식이 적용되어 왔으나, 회전자 제작시 각각의 동바는 회전자 중심에 삽입되어 엔드링과 용접되는 구조이므로 제작비용 상승, 용접결함 등이 문제시 되어왔다. 따라서, 제작성이 용이하고 차량 운행시 열응력 및 원심력 등에 의한 용접부위에서의 문제점이 배제된 Aluminium Diecasting 공법으로 회전자를 설계·제작하였다.

다이캐스팅 공정에서는 발생하는 기공발생의 최소화를 위해 다양한 조건에서 용탕의 유동해석을 통해 금형설계와 사출조건을 선정하였다. 그림 3은 게이트 갯수가 19개인 경우 용탕 유동양상을 예측한 것이다.

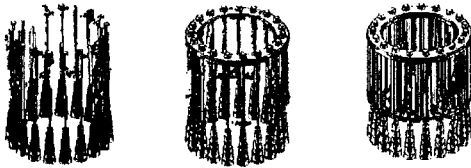


그림 3. 회전자의 용탕 유동 양상 예측

금형은 원형 게이트에 유동 저항을 적게 받는 고속 사출 방식을 적용하여 그림 4와 같이 사출 시험 후 절단 검사를 통해 양산용 견인 전동기 회전자의 다이캐스팅 조건으로는 알루미늄 용탕 온도 750℃, 13 원형 게이트, 사출 속도 280mm/sec, 압력 120bar를 적용하여 회전자를 제작하였다.



a) 게이트 19 개 b) 게이트 13 개

그림 4. 회전자 사출시험 결과

2.2.2 견인전동기 설계

전동기 치수설계는 차량이 운전되는 전체 회전속도영역에 대해 그림 2와 같은 요구조건을 만족하도록 치수 선정하였으며, 슬롯조합은 인버터 구동시 고조파 저감 및 소음·진동의 영향을 고려하여 선정하였고, 설계치수 최적화를 위해 수치해석법에 의한 전동기 포화특성의 분석 및 온도상승 해석을 통해 설계하였다.

전동기 절연시스템은 인버터 구동시 발생하는 스위칭찌지에 대해 내전압성이 우수한 Mica Kapton을 주절연재료로 채택하여 설계하였고, 온도상승에 대한 열안정성을 확보하기 위해 폴리이미드에폭시 함침 바니쉬로 진공함침 (Vacuum Pressure Impregnation, VPI) 처리하였다.

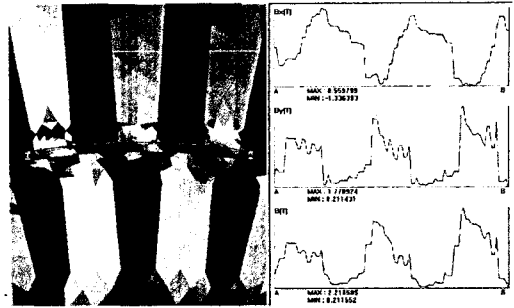


그림 5. 전동기 포화특성 해석

냉각팬은 풍량 증가를 위해 고Head 냉각 팬을 적용하였으며, 팬 Blade는 스류(Skew)진 형태로 하여 팬의 Back Plate로 이동하는 냉각공기에 의한 축방향 모멘트에 대한 보상이 되도록 하였고, 와류제거 및 축방향에서 반경방향으로 풍량 변화가 완만하게 함으로써 팬소음의 감소를 목적으로 반경방향으로 부드러운 곡면이 형성되도록 설계하였다.

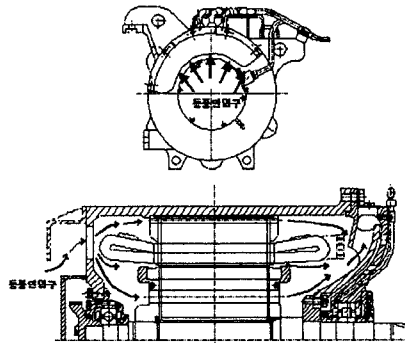


그림 6. 다중 통풍로 냉각구조

냉각공기의 방향이 그림 6과 같이 일정한 경우 통풍 배출구는 인입구에 비해 온도가 높아져 온도상승의 제약을 받게된다. 당사에서는 냉각효율 개선을 위해 통풍 인입구에 유입되는 냉각공기 일부가 통풍 배출부위의 코일로 통과하도록 냉각홀(Hole)을 그림 6과 같이 고정자 철심, 회전자 철심에 설치한 구조이다. 또한 통풍 인입구 구조는 차량 운행시 유입되는 이물질, 특히 차량 제동시 발생하는 쇳가루 침입 등에 의한 절연사고 등에 대한 내환경성 강화를 위해 전동기 내부로의 이물질 침입을 방지하는 구조로서, 그림 6과 같이 냉각공기가 반구동축 축 단부의 하측에서 유입되는 중력식 냉각공기 인입 구조이다. 전동기 내부 먼지침입에 대비해 엔드코일, 철심 표면 등은 내환경에 우수한 외장 절연을 하여 내환경성을 강화 시켰다.

베어링은 축 전류에 의한 손상을 방지하기 위하여 부하측, 반부하측 모두 절연베어링을 사용하였고, 구동측 베어링은 커플링의 반작용과 고속회전으로 인한 부하에 견딜 수 있도록 롤러베어링을 사용하였고, 반구동측은 회전자를 지지하고 구동 커플링으로 인한 축의 추력을 흡수하기 위해 볼베어링을 사용하였다.

2.2.3 위험속도 해석

전동기 횡방향(Lateral)위험속도에 안전을 검토를 위해, 설계된 회전속도에 대해 위험속도를 계산하였다. 위험속도는 국부적으로 최대진폭을 가지는 휠(Whirling)이 일어나는 회전속도를 말한다. 자이로 효과가 중

요하지 않을 경우 위험속도는 계의 고유진동수와 회전속도가 일치할 때 발생한다. 적용된 볼베어링 강성은 $9.5 \times 10^4 \text{N/mm}$ 이고, 롤러베어링 강성은 $7.2 \times 10^5 \text{N/mm}$ 이다. 베어링의 강성을 고려하여 축의 위험속도를 계산 결과 그림 7와 같이 176.8Hz, 275.5Hz, 604.4Hz, 3098.4Hz이며 1차 위험속도는 10,608 rpm이므로 최고 회전속도 4,000 rpm을 고려하면 안전하다고 할 수 있다.

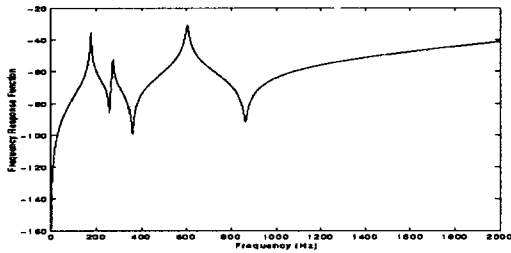


그림 7. 회전자 위험속도 해석

2.2.4 설계결과 및 제작

위와 같이 설계된 경전철용 견인전동기 설계 제원은 표 2와 같은 그림 8은 당사에서 개발된 제품사진이다.

표 2. 견인전동기 설계결과

사 양	형 식	4극 3상 농형유도 전동기
	출 력	130 kW @ 2280 rpm
	정격전압	AC 545 V
	정격전류	177 A
	주 파 수	77 Hz
	성 능	효율 92.0 %, 역률 85 %
	절연등급	H 종 (온도상승한도 180 °C)
	외관치수 및 중량	- 외경432 mm x 내경263 mm - 철심장 198 mm, 중량 490 kg
냉각구조	- 반폐자냉식, 풍량: 9.2(m ³ /min) - 통풍 PATH: 다중통풍로	
프레임 구조	- 압연강판 용접구조형	
회전자 구조	- Al-Diecasting 회전자구조 (AL Ingot 순도 99.0 %)	

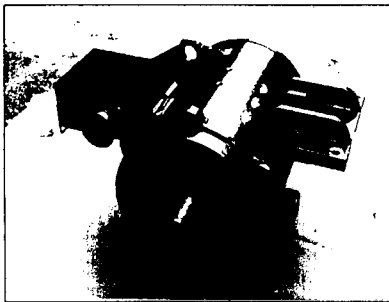


그림 8. 개발품 사진

개발품의 성능을 평가하기 위하여 전동기 특성, 절연 성능 및 기계적 특성을 시험한 결과 표 3과 같이 차량용 전동기 시험기준과 표 1의 차량시스템 요구조건을 만족함을 확인하였다.

표 3. 개발품 성능시험 결과

구 분	단 위	기준치	시험결과
전동기 특성	용 량	kW	130
	속도	rpm	2280
	전 압	V	545
	전 류	A	-
	효 율	%	92.0
	역 율	%	86.0
온도상승	°C	180	149.7
내전압 인가시험	V(1분)	3,700 V	기준만족
권선 절연저항	MΩ	200	1000 이상
베어링절연저항	MΩ	5	7
소 음(최대값)	dB	101.5	96
진 동(최대값)	mm/s	6	5.8
과속도(1분)	rpm	4855	기준만족
시험기준	IEC 349-2, JIS E 6102		

또한, 내진동 시험결과 표 4와 같이 진동 및 충격에 안정적임을 확인하였다.

표 4. 진동·충격 시험결과

항 목	시 험 기 준		시 험 결 과
	진동수 (Hz)	진동의 크기	
공 진	5~30	- 가속도 : 0.5G	공진점 없음.
진동 가능	5~30	- 가속도 : 0.5G	시 험 전 : 소음:96.2 dB 진동:5.3 mm/s
진동 내구	10	- 가속도 : 2 G - 시험시간 : 2분 - 진동방향 : 상하, 좌우, 좌우	시 험 후 : 소음:96.5 dB 진동:5.4 mm/s
충 격	-	- 가속도 : 3 G - 반복회수 : 4회	

3. 결 론

본 논문에서는 당사에서 국내 최초로 개발한 경전철용 AC 견인전동기 특징 및 시험결과를 소개하였다. 개발품은 Al-Diecasting 공법을 적용하여 기존의 동바형식의 전동기에 비해 공정수와 제작비를 대폭 감소시켰고, 차량용 견인전동기 요구특성을 고려하여 개발품을 설계·제작하였고, 차량용 견인전동기 국제규격 기준한 개발품 시험을 통해 효율 92%, 역률 86%의 전동기 특성과 기계적 성능 및 내진동 성능도 시험기준을 만족함을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Alan kaye, Athur Street, *Die Casting Metallurgy*, 1982
- [2] 素形材 センター, *輕金屬鑄物 タイカスト の 生産技術*, 1993
- [3] 현대중공업(주) 유도전동기 Al 다이캐스팅 회전자 제작기술 개발 (완료보고서), 1998
- [4] Koichi Matsuoka, "Recent Technologies on Motors for Transportation System", *電學論D*, 117卷 9号, pp. 1049-1053, 平成 9 年
- [5] IEC 349-2 1993 : Rules for Rotating Electrical Machines for Rail and road Vehicles.