

# 고속전철용 견인전동기의 회전자 바와 엔드링의 재질선정 및 특성고찰에 관한 연구

## A Study on The Material Selection and Characteristic Investigation of Rotor Bar and End Ring of Induction Motor for High Speed Train

이상우\*      김근웅\*\*      윤종학\*\*\*      이기호\*\*\*      한성수\*\*\*\*  
Lee, Sang-Woo      Kim, Kun-Woong      Yoon, Jong-Hack      Lee, Ki-Ho      Han, Sung-Soo

### ABSTRACT

An inverter-driven induction motor is used as the traction motor for a high speed drive system that required safty, reliability and performance and so on, rotor bar and end ring of the traction motor are the electrical equipments which form the conductive close loop and then induce current by interaction with the current of stator. the materials selection of rotor bar and end ring are seriously considered in the aspects of electrical and mechanical specification and Motor slip relation to inverter. Particularly motor slip guarantee the safty and reliability of induction motor. this paper show the material selection and the determining of slip in the design of traction motor for high speed train by analyzing the specifications of material being used currently.

### 1. 서 론

최근 늘어나는 인구와 교통체증을 해소하기 위하여 새로운 국가중추 교통수단으로 고속철도가 건설중에 있으며, 이에 맞추어 고속전철의 국산화가 진행중에 있다. 이러한 고속전철에서 추진시스템의 핵심부품인 견인전동기는 높은 에너지 효율과 고속운전에도 견딜수 있는 신뢰성과 안정성이 요구되며, 선진각국에서 운행중인 고속전철의 추진시스템은 이러한 요건을 만족시킬수 있는 인버터구동 3상유도전동기를 채택하고 있다.

이러한 고속전철용 농형유도전동기의 회전자 Bar와 End ring은 회전자축의 폐회로를 형성하여 전류를 흐르게 하므로서 고정자축의 전류와의 상호작용에 의해 전동기특성을 나타내는 중요한 요소이다. 전동기 운전시 적절한 슬립에서 운전이 되어야 고속전철의 신뢰성과 안정성을 보장할 수 있으며, 특히 한 대의 인버터로 여러대의 전동기를 구동할 경우 전동기 서로간의 견인력 불균형을 최소화하기 위한 회전자의 재질 및 사이즈 결정을 해야한다.[1] 또한 Bar와 End ring은 견인전동기에 사용될 경우 요구되는 전기적인 특성뿐만 아니라 열적인 특성, 진동이나 충격에 견딜수 있는 기계적인 특성을 가진 재질선정은 전동기설계에서 중요한 요소중 하

\* : 대우중공업(주) 철차연구소 연구원  
\*\* : 대우중공업(주) 철차연구소 주임연구원  
\*\*\* : 대우중공업(주) 철차연구소 책임연구원  
\*\*\*\* : 대우중공업(주) 철차연구소 수석연구원

나이다.

본 논문에서는 전동기에 사용중인 Bar와 End ring 재질들의 성분과 특성을 분석하고, 재질에 따른 효율, 역률, 토오크 등의 전기적특성과 기계적인 강도, 열적인 특성 및 전력변환장치의 제어성능을 고려한 전동기의 적정슬립을 비교 검토함으로써 한국형 고속전철용 건인전동기의 Bar와 End Ring재질을 선정하는데 연구의 목적이 있다.

## 2. Bar, End ring의 특성비교

표 1은 농형유도전동기에서 압출성형하여 사용되고있는 회전자 Bar의 재질에 대한 화학성분, 인장강도, 연신률을 나타내었다. Oxygen free copper, Electrolytic tough pitch copper, Fire refined tough pitch copper의 경우 구리 함유량이 99.9%이상 이기 때문에 인장강도가 낮으며, 다른 합금제품들은 인장강도가 400(N/mm)이상으로 나타난다. 표 2에서는 표 1의 회전자 Bar 재질에 대한 전기적특성인 밀도, 녹는점, 열팽창계수, 온도전도도, 전기전도도, 전기저항을 나타내었다. 여기서 밀도, 온도전도도, 전기저항은 20℃에서의 재질의 계수이고, 열팽창계수는 20℃에서 300℃까지의 선형계수이다. 표 2의 Bar 재질에 대한 열팽창계수는 전동기운행으로 인한 열이 발생할 때 Bar가 팽창하는 선형계수이며, 특히 회전자 Bar와 End Ring의 재질의 열팽창계수가 다를 경우 수축, 팽창에 의한 용접부위에 손상이 발생하여 안정성에 문제가 있으므로 신중한 선택이 필요하다. 전기전도도의 경우 Oxygen free copper, Electrolytic tough pitch copper, Fire refined tough pitch copper이 98~101.5%이 전기 전도율을 가지고 있으며, 3% 실리콘 합금동의 경우 가장 낮은 7%의 전기전도율을 보인다.

표 1. Bar 재질의 화학성분, 기계적인 특성[2]

재질명	화학성분	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	연신률 (%)
Oxygen free copper	Cu 99.95% (Ag, O) 0.03%	250 이상	12 이상
Electrolytic tough pitch copper	Cu 99.9% (Ag, O) 0.03%	230 이하	45 이상
Fire refined tough pitch copper	Cu 99.9% (Ag, O) 0.04%	230 이상	22 이상
brass	Cu 63%~67% Pb 0.07%이하 Fe 0.05%이하 Zn 나머지	412 이상	10 이상
Copper chromium	Cr 0.7% Mg 0.05% Cu 나머지	410 이상	15 이상
Copper chromium zirconium	Cr 0.75% Zr 0.15% Mg 0.045% Cu 나머지	410 이상	15 이상
Copper 1.5% silicon	1.5% silicon	-	-
Copper 3% silicon	3% silicon	400 이상	20 이상

표 2. Bar 재질의 밀도, 전기적특성, 온도특성, 기타[3]

재질명	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	녹는점 (°C)	열팽창계수 (μm/m·K)	온도전도도 (W/m·K)	전기전도도 (IACS %min)	전기저항 (nΩ·m)
Oxygen free copper	8.94	1083	17.7	391	100	17.1
Electrolytic tough pitch copper	8.89	1083	17.7	388	100~101.5	17~17.24
Fire refined tough pitch copper	8.89	1085	17.7	377	98	17.6
brass	8.50	940	20.2	115	26	66
Copper chromium	8.89	1075	19.6	324	80	21.6
Copper chromium zirconium	8.88	1075	19.3	324	80	21.7
Copper 1.5% silicon	8.75	1060	18	33	20	144
Copper 3% silicon	8.53	1025	18	36	7	246

End Ring재질의 화학성분, 인장강도, 연신률을 표 3에 나타내었다. 특히 End Ring 재질은 Bar를 지지하기 위해 높은 강도가 요구되기 때문에 재질을 단조하여 만들거나, End Ring의 보호물인 Shrink Ring을 체결하여 강도를 높인다.

표 3. End Ring 재질의 화학성분, 기계적인 특성[2]

재질명	화학성분	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	연신률 (%)
Oxygen free copper	Cu 99.95% (Ag, O) 0.03%	250 이상	12 이상
Electrolytic tough pitch copper	Cu 99.9% (Ag, O) 0.03%	230 이하	45 이상
Fire refined tough pitch copper	Cu 99.9% (Ag, O) 0.04%	230 이상	22 이상
Aluminium Bronze	Al 9.75% Fe 4.75% Ni 4.75% Cu 나머지	700 이상	10 이상
brass	Cu 63%~67% Pb 0.07%이하 Fe 0.05%이하 Zn 나머지	412 이상	10 이상
Copper chromium	Cr 0.7% Mg 0.05% Cu 나머지	410 이상	15 이상
Copper chromium zirconium	Cr 0.75% Zr 0.15% Mg 0.045% Cu 나머지	410 이상	15 이상

표 4. End Ring 재질의 밀도, 전기적특성, 온도특성, 기타[3]

재질명	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	녹는점 (°C)	열팽창계수 (1/m·K)	온도전도도 (W/m·K)	전기전도도 (IACS·%min)	전기저항 (nΩ·m)
Oxygen free copper	8.94	1083	17.7	391	100	17.1
Electrolytic tough pitch copper	8.89	1083	17.7	388	100~101.5	17~17.24
Fire refined tough pitch copper	8.89	1085	17.7	377	98	17.6
Aluminium Bronze	7.64	1064	16.2	36	7	246
Brass	8.50	940	20.2	115	26	66
Copper chromium	8.89	1075	19.6	324	80	21.6
Copper chromium zirconium	8.88	1075	19.3	324	80	21.7

4. 고속전철용 견인전동기의 재질선정 및 특성해석

1대의 인버터로 1대의 견인전동기를 운전하는 경우(1C1M)보다 가격과 취부공간의 축소를 위하여 1대의 인버터로 여러대의 견인전동기(1C2M, 1C4M)를 병렬운전하는 경우가 많다. 이때 전동기 각각의 슬립-토크 특성의 차이로 인하여 토크 불평형이 발생하며, 이러한 토크 불균형은 회전자축의 저항변화에 의해 영향을 받는다.

선진국에서 운행중인 고속전철의 유도전동기 특성을 표 6에 나타내었다. 견인전동기의 슬립에서는 병렬운전을 하는 신간선(1C4M)과 TMST(1C2M)의 전동기 정격슬립이 단독운전하는 ICE(1C1M)의 정격슬립보다 크게 나타났으며, 이것은 1대의 인버터로 여러대의 전동기를 운전했을때 발생하는 전동기의 토크 불평형을 고려하여 전동기를 설계한 것이다.

표 5. 고속전철용 견인전동기의 특성

구분	ICE 견인전동기(1C1M)			신간선 (1C4M)	TMST (1C2M)
	정격	연속운전	최고속도	정격	최고속도
전압(V)	1730	2050	2200	1430	1340
전류(A)	493	415	381	155	530
회전수(rpm)	1279	1535	4032	3825	3924
주파수(Hz)	43.4	52	136.1	130	200
역률	0.89	0.88	0.82	-	0.825
용량(kW)	1250	1250	1146	300	1025
슬립(%)	1.78	1.6	1.25	1.92	1.89

특히 인버터와의 인터페이스를 고려한 고속전철용 견인전동기의 설계할 때에 슬립결정은 회전자 재질선정과 End Ring 사이즈로 결정할 수 있다. 다음 표6에서는 한국형 고속전철용 견인전동기의 회전자 Bar, End Ring의 재질에 따른 전동기 특성을 나타내었다. 이때 Bar또는 End Ring재질의 인장강도, 연신률 등의 기계적 성질뿐만 아니라, Bar와 End Ring의 열팽창 및 용접성 등을 고려한 선택을 해야한다.

표 6 회전자(End Ring, Bar)의 재질을 변경한 경우

구분	Bar : 황동 End Ring : 황동	Bar : 크롬동 End Ring : 황동	Bar : 크롬동 End Ring : 크롬지르코늄동
	정격	정격	정격
전압(V)	2183	2183	2183
전류(A)	355	350	346
회전수(rpm)	4141	4210	4235
주파수(Hz)	143	143	143
효율	92.7	94.2	94.9
용량(kW)	1096	1096	1096
슬립(%)	3.47	1.87	1.29

전기적특성면에서 Bar재질을 크롬동, End Ring재질을 크롬지르코늄동으로 설계한 경우 가장 우수한 94.9%의 효율을 보이고, Bar재질을 황동, End Ring재질을 황동으로 설계한 전동기가 92.7%의 효율로 낮은 전기적 특성을 나타내었다. 그러나 인버터와의 인터페이스를 고려한 전동기 슬립결정에서 가장 전기적특성이 우수한 Bar재질이 크롬동, End Ring재질이 크롬지르코늄동의 경우 1.28의 정격슬립으로 표 5의 고속전철용 전동기에서 적용한 정격슬립보다 작은 것을 알 수 있다. 그러나 전동기를 제어할 때 슬립에 따른 토크 불균형으로 인하여 전동기의 제어의 안정성에 문제가 발생할 수 있으므로, Bar재질을 크롬동, End Ring재질을 황동으로 설계한 전동기가 전기적 특성과 정격슬립을 고려한 선택으로 적당하다. (단, Bar와 End Ring을 제외한 부분의 설계는 동일하다고 가정하였다.)

표 7에서는 Bar재질을 크롬동, End Ring재질을 황동으로 설계한 전동기와 같은 경우에서 End Ring 사이즈를 변화시킨 전동기의 특성을 비교하였다. 이때 End Ring 사이즈는 기계적인 강도와 구조물의 지지에 대한 적합성을 고려해야 하기 때문에 사이즈 변경의 한계성을 가지며, 이러한 사이즈 변경은 슬립변경이 미세하게 요구되는 경우에 적합하다.

표 7 회전자(End Ring)의 사이즈를 변경한 경우

구분	End Ring의 사이즈 변경한 경우 (100mm <sup>2</sup> 증가)	Bar : 크롬동 End Ring : 황동	End Ring의 사이즈 변경한 경우 (100mm <sup>2</sup> 감소)
	정격	정격	정격
전압(V)	2183	2183	2183
전류(A)	348	350	349
회전수(rpm)	4214	4210	4205
주파수(Hz)	143	143	143
효율	94.5	94.3	94.1
용량(kW)	1096	1096	1096
슬립(%)	1.77	1.87	1.98

그림 1은 한국형 고속전철용 견인전동기와 회전자 재질 및 End Ring 사이즈가 변경된 전동

기의 슬립-토포크곡선을 나타내었다. 그림에서 Curve-1은 Bar재질을 크롬동, End Ring재질을 황동으로 설계한 전동기이며, Curve-2는 Bar재질을 크롬동, End Ring재질을 크롬지르코늄등으로 설계한 전동기, Curve-3는 Bar재질을 황동, End Ring재질을 황동으로 설계한 전동기, Curve-4는 End Ring의 사이즈를 100mm<sup>2</sup> 증가시킨 전동기, Curve-5는 End Ring의 사이즈를 100mm<sup>2</sup> 감소시킨 전동기의 슬립-토포크특성이다. 여기서 엔드링의 사이즈변경은 기계적인 변경 범위내에서 이루어졌으며 전동기의 특성변화는 적게 나타났지만, End Ring 재질의 변화는 전동기의 특성이 급격하게 이루어지기 때문에 신중한 선택이 필요한 것을 알 수 있다.

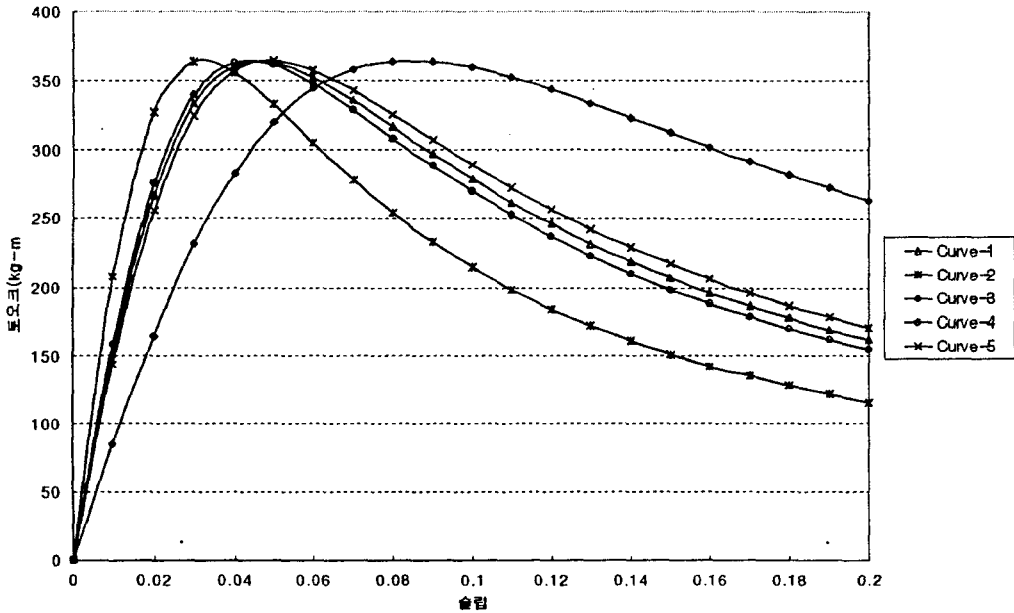


그림 1 재질과 사이즈에 따른 전동기의 슬립-토포크 곡선

한국형 고속전철용 견인전동기의 특성해석에 대하여 표8에 나타내었다.

표 8. 한국형 고속전철용 견인전동기의 특성

구분	V (일정 종단점)	정격(최고속도)
전압(V)	2183	2183
전류(A)	296	349
주파수(Hz)	60	143
효율	95	94
역률	85.6	88.2
용량(kW)	910	1096
슬립(%)	1.46	2.03

한국형 고속전철용 견인전동기의 설계에서는 바와 엔드링에 대한 재질을 선택할 때, 전동기의 신뢰성을 고려하여 기계적 강도가 높은 재질을 선택하였으며, 전동기의 전기적 특성을 고려한 바 재질은 크롬동(전기전도도:80%), 엔드링 재질은 황동(전기전도도:20%)을 선택하였다.

우선 1C2M의 전동기제어를 위해 인버터와의 인터페이스를 고려하여 표 8와 같이 정격슬립은 2.03, 정격효율 94%, 정격역률 88.2%(정현파 전원해석)의 설계를 하였다.  
 한국형 고속전철용 견인전동기의 주행특성곡선을 그림 1에 나타내었다.

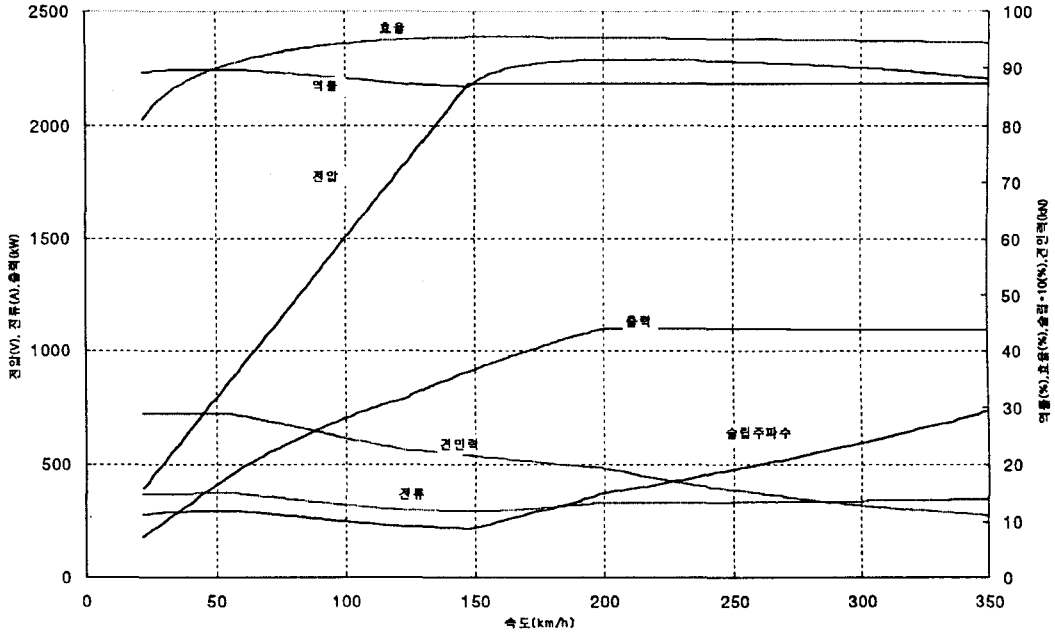


그림 2 한국형 고속전철용 견인전동기의 주행특성곡선

### 5. 결론

본 논문에서는 한국형 고속전철용 견인전동기의 회전자 Bar와 End Ring에 대한 재질검토 및 특성해석을 수행하였다.

검토결과 전기적인 특성면에서 동함유량이 99.9%이상의 재질들이 가장 우수한 전기적 특성이 나타났으며, 기계적인 특성면에서 Copper chromium, Copper chromium zirconium, Brass가 Bar와 End Ring재질로 우수한 특성을 보였다. 또한 한대의 인버터로 여러대의 전동기를 병렬 운전하는 견인전동기에서 슬립 결정이 전동기 설계에 중요한 것을 알 수 있었다. 결론적으로 신뢰성과 안정성이 중요한 고속전철용 견인전동기는 정격에서 슬립조건을 만족시키고, 기계적 특성이 우수한 재질로 Bar재질을 Copper chromium, End Ring재질을 Brass로 결정하였다.

추후 Bar와 End Ring재질의 강도 및 열해석을 통한 재질의 타당성 검토와 설계된 전동기를 제작 및 시험하여 해석자료와 비교분석할 예정이다.

### 참고논문

- [1] "인버터·교류전동기구동전기차의 현황", 일본전기학회보고 제325호.
- [2] British Standard "Copper and copper alloy rods and sections", BS2874, 1986.
- [3] American Material Standard Alloy Handbook, 1996.