

# 한국형 고속전철용 견인전동기의 포화현상에 따른 특성연구

## A Study on The characteristics based on the stauration effects of traction motor for korea High Speed Train

이상우<sup>\*</sup> 김근웅<sup>\*\*</sup> 윤종학<sup>\*\*\*</sup> 한성수<sup>\*\*\*\*</sup>  
Lee, Sang-Woo Kim, Kun-Woong Yoon, jong-Hack Han, Sung-Soo

### ABSTRACT

An inverter-driven induction motor is used as the traction motor for a high speed drive system that required safety, reliability, performance, compact size owing to the space and weight allotted for attaching to train, etc. particularly it is possible to happen the saturation effects of flux density at constant voltage-frequency region and then increase very higher than the allowed capacity of no-load current and temperature in any case. therefore the optimum design of core, optimum voltage-frequency ratio, adoption of high grade magnetic core have been developed and researched for preventing these problems. this paper show the saturation effects of traction motor by measuring the induced voltage of search coil at stator teeth and presents optimum voltage-frequency ratio as well as optimum core design through the comparison with efficiency, power factor, load current and no-load current for korea high speed train.

### 1. 서론

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 견인전동기에 요구되는 운전속도별 특성이 있으며, 이를 충분히 만족시킬 수 있어야 한다. 그러나 한국형 고속전철용 견인전동기의 경우 차량 및 대차와의 인터페이스를 고려하여 제한된 부피 및 무게, 반도체 소자의 용량한계로 인한 입력전류의 한계, 전동기의 발열량, 병렬운전을 위한 적정슬립 등을 만족시키면서, 고속에서의 신뢰성과 안정성을 확보하는 것은 더욱더 어렵다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 전동기의 소형화는 필수적이라고 할 수 있으며, 설계된 전동기의 고정자 및 회전자 코어부분에서의 자속포화현상은 당연한 결과로 받아들여진다. 특히 자속포화로 인하여 무부하 전류가 크게 증가하고, 동손증가로 인한 전동기 온도상승 및 인버터 전류의 허용한계치를 초과하는 현상도 발생할 수 있다. 따라서 코어의 최적설계, 최적의 V/f비 선택, 전동기 출력제한, 고투자율의 코어강판 등에 대

- \* : 한국철도차량(주) 중앙연구소 연구원
- \*\* : 한국철도차량(주) 중앙연구소 선임연구원
- \*\*\* : 한국철도차량(주) 중앙연구소 책임연구원
- \*\*\*\* : 한국철도차량(주) 중앙연구소 수석연구원

한 연구가 이루어지고 있다. [1]

본 논문에서는 한국형 고속전철용 견인전동기를 제작하여 초기 기동운전시 고정자 치부분의 자속밀도포화에 대하여 Search Coil의 유기전압 측정실험을 통하여 확인하고, 기동시 자속밀도의 포화와 입력전류치를 낮추기 위하여 V/f비의 변경과 전동기 설계치수 변경을 통한 효율, 역률, 부하전류, 무부하전류 등을 비교 검토함으로써 적절한 V/f비와 설계치수를 선정하는데 연구 목적이 있다.

## 2. 한국형 고속전철 견인전동기

아래 표 1과 그림 1에서 한국형 고속전철용 견인전동기로 설계된 1100kW 급의 3상 농형 유도전동기의 사양 및 단면도를 나타내었다. 경부고속전철용 견인전동기인 동기전동기 타입보다 구조가 간단하고, 가격이 싸고, 유지보수 및 신뢰성 측면에서 우수한 유도전동기로 설계하였다. [2]

표 1 견인전동기 사양

극 수	4극	상 수	3상
출 력	1100 kW	주 파 수	143 Hz
고정자 슬롯수	60개	회전자 슬롯수	74개
공 극	2.2 mm	적층길이	430 mm
고정자 외경	670 mm	고정자 내경	400 mm
엔드링 재질	Brass	BAR 재질	CU-CR

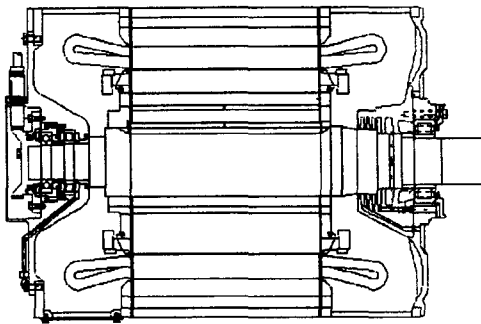


그림 1 한국형 고속전철용 견인전동기 단면도

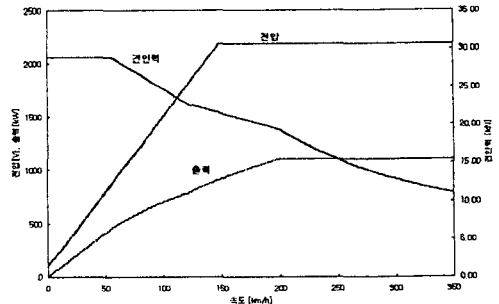


그림 2 한국형 고속전철용 견인전동기에 요구되는 운전특성

그림 2와 같이 열차의 주행시간 및 성능을 고려하여 제시된 견인력 곡선을 만족하는 전동기를 설계하고, 인버터와의 인터페이스를 고려한 V/f비의 전압패턴을 설정하게 된다. 이때 전동기의 극당 상호 쇄교자속량은 식(1)와 같이 V/f비에 의하여 결정이 된다. [3]

$$\Phi_P = \frac{V \times 10^8}{4.443 K_p K_d N_s f} \quad [\text{Maxwell}] \quad (1)$$

$$T = \Phi_m \times I_2 \quad (2)$$

여기서  $\phi_p$ 는 극당 쇠교자속,  $K_p$ 는 Coil-Pitch 계수,  $K_d$ 는 권선분포계수,  $f$ 는 입력전원의 주파수,  $V$ 는 상전압,  $T$ 는 전동기 토오크,  $\phi_m$ 는 쇠교자속,  $I_2$ 는 회전자전류를 나타낸다.

식(1)와 같이 V/f 비의 설정으로 전동기의 자속밀도를 결정할 수 있다. 예를 들어 V/f비를 낮게 설정한 경우 자속밀도가 낮아지고, V/f비를 높였을 경우 자속밀도는 높아지게 된다. 그러나 동일한 출력을 요구할 때, 자속밀도가 낮을 경우 식(2)와 같이 회전자전류가 높아지며, 자속밀도가 높은 경우 포화에 따른 무부하전류가 높아지기 때문에 최소의 입력전류를 얻을 수 있도록 적절한 V/f비를 선택해야 한다.

한국형 고속전철용 견인전동기에 대해 표 2와 같이 Base Speed(V/f 일정 종단점)를 60Hz로 V/f비를 설정하였을 때, 각 운전구간별 전동기의 특성을 나타내었다. 초기 기동시 정토크 종단점에서 가장 높은 입력전류가 나타나는 것을 알 수 있다.

표 2 운전구간별 전동기특성

구분	정토크 종단점	V/F일정 종단점	정격
출력[kW]	467	910	1100
주파수[Hz]	24	60	143
전압[V]	873	2183	2183
전류[A]	415	333.3	349
효율[%]	89.7	94.8	94.1
역률[%]	83	76.2	88.5
슬립[%]	4.94	1.41	1.9
토크[kg·m]	664.3	499.2	254.5

### 3. 전동기의 자속밀도

그림 3과 같이 전동기의 치부분에 Search Coil을 이용하여 유기전압을 측정하였다. 이때 측정된 전압으로 식(4)를 이용하여 치부분의 자속밀도를 계산하며, 전동기 자속포화현상을 확인하고자 한다. Search Coil의 설치시 식(3)에서와 같이 예상되는 치부분의 자속에 대하여 발생하는 전압의 크기는 Data Acquisition System에 따라 적절한 Coil의 Turn수에 따라 결정하였다.

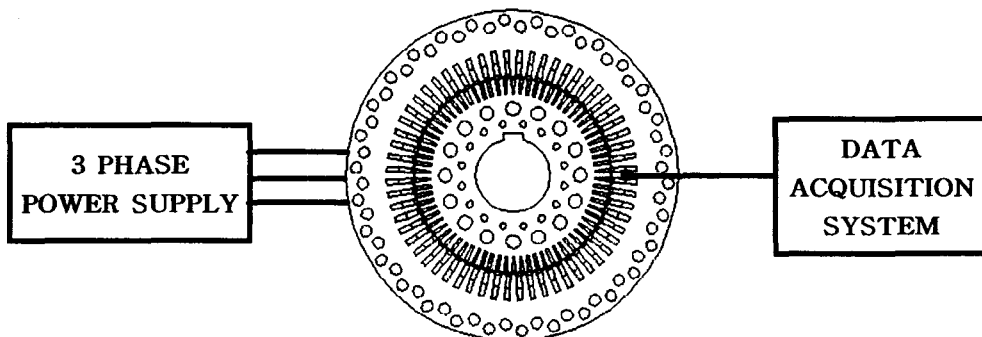


그림 3 견인전동기의 Search Coil을 이용한 자속검출

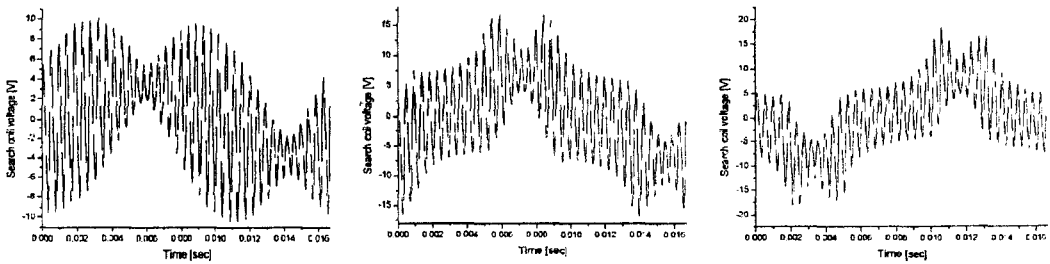
$$e(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\Phi(t) = AB(t) = -\frac{1}{N} \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

여기서  $e(t)$ 는 유기전압,  $\Phi(t)$ 는 자속,  $B(t)$ 는 자속밀도,  $A$ 는 치의 단면적,  $N$ 는 Search Coil의 턴수를 나타낸다.

전동기의 고정자 치부분에 설치된 Search Coil의 양끝단에 Probe로 Data Acquisition system와 연결하여 출력전압을 그림 4와 같이 측정하였다. 측정된 세가지 파형은 입력전원의 주파수는 상용전원인 주파수 60Hz으로 고정을 하고 전압을 가변시켜서 V/f비에 변화에 따른 고정자 치부분에서의 전압파형을 측정한 것이다. 그림4에서 1000V/60Hz의 전원입력시 치부분의 자기포화현상(Magnetic Saturation Effects)가 발생하지 않기 때문에 Search Coil에 유기되는 전압의 파형에 왜곡이 발생하지 않으나, (b)와 (c)의 경우에는 자기포화현상이 발생하여 전압파형이 왜곡되는 현상을 알 수 있다. 또한 V/f비 증가함에 따라 자속이 증가하고 이에 따라 (c)에서 유기전압이 최대가 됨을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4에서 Search Coil에 측정된 전압에 대하여 식(4)를 이용하여 치에 발생된 자속밀도를 계산한 것이다.

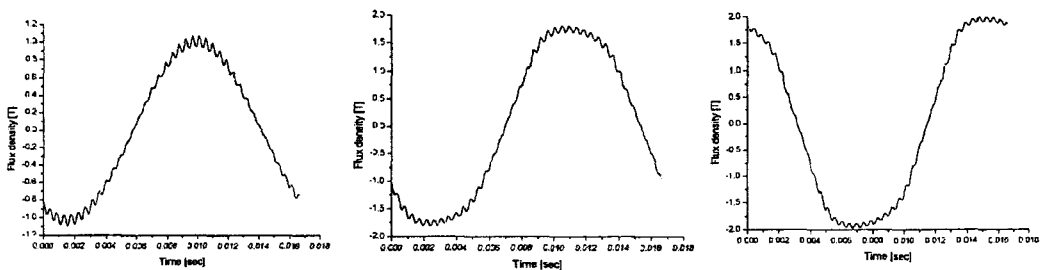


(a) 1000V/60Hz

(b) 1900V/60Hz

(c) 2183V/60Hz

그림 4 V/f비에 따른 Search Coil에 측정된 전압



(a) 1000V/60Hz

(b) 1900V/60Hz

(c) 2183V/60Hz

그림 5 V/f비에 따른 자속밀도

실제 전동기의 고정자 치에서 측정된 전압으로 계산된 치의 자속밀도와 등가회로법에 의해 계산된 자속밀도를 표 3에서 비교하였다. 측정된 자속밀도의 경우 2183V/60Hz에서 최대치 1.98[T]를 나타내며, 이 영역에서는 포화에 따른 투자율의 감소로 인하여 무부하전류가 상당히 높게 흐르게 되며, 이로 인한 동손의 증가로 견인전동기의 발열과 인버터의 허용전류량에 부담을 주게 된다.

표 3 자속밀도의 실측치와 해석치 비교

구분	측정치[T] (최대치)	해석치[T] (최대치)
1000V/60Hz	0.9	0.87
1900V/60Hz	1.73	1.75
2183V/60Hz	1.98	2.01

### 5. V/f비에 따른 전동기 특성변화

그림 6는 60Hz에서 전동기의 전압을 가변하며 무부하 시험하여 측정된 전류치이며, 프로그램해석에 의해 계산된 전류치를 비교하였다. 앞에서 설명한 고정자 치의 최대 자속밀도는 1900V/60Hz이상에서 1.73[T]로 포화현상이 발생하기 때문에 그림 6과 같이 무부하전류 변화치가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 비교한 프로그램해석에 의한 무부하 전류계산에서는 자속포화에 따른 비선형을 고려하여 실시하였으며, 그 결과는 시험치와 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 7은 60Hz와 24Hz에서 전압변동, 즉 V/f비의 변화에 따른 견인전동기의 부하전류 값을 나타내었다. 24Hz까지는 토오크 일정영역으로 운전구간 전영역에서 가장 전류치가 높은 곳이며, 따라서 이 부분의 인버터 전류 한계치에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다. 그림에서 알 수 있듯이 24Hz에서는 부하전류치가 V/f비 32.5(=780V/24Hz)에서 440A로 가장 높게 나타나며, V/f비가 증가함에 따라 전류치가 낮아지고 36이상에서는 전류치 변동이 거의 없는 것을 보여준다. 그러나 60Hz에서는 V/f비가 낮아 33(1980V/60Hz)과 34(2040V/60Hz)사이에서 가장 낮은 전류가 흐른다. 따라서 출력에 따른 최적의 V/f비는 변화하기 때문에 전구간의 운전패턴 및 전류한계치를 고려하여 최적의 V/f비를 선택해야 할 것으로 사료된다. 특히 한국형 고속전철용 인버터의 경우 허용 최대 전류치가 낮게 설계 되어있으며, 전동기의 V/f일정 종단점(60Hz)에서 V/f비 변동에 따른 전류치와 전류변동치보다 정토크 영역에서의 전류치와 전류변동치가 크기 때문에 정토크 종단점의 전류치와 전류변동이 적은 V/f비 35.5에서 36.5가 가장 적절한 것으로 사료된다.

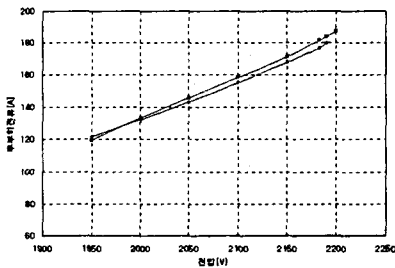


그림 6 전동기의 무부하전류에 대한 실험치와 계산치 비교

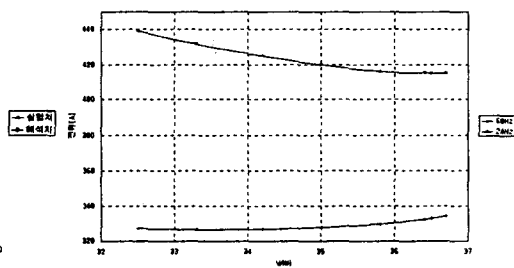


그림 7 V/f비 변화에 따른 한국형 견인전동기의 전류 변화

### 6. 최전자 설계변경에 따른 특성변화

앞 절에서 제시한 전동기의 V/f비 일정영역에서의 자속밀도 포화현상과 전동기 운전에 가장 적절한 V/f비의 선정에 대하여 검토하였다. 그러나 V/f비 변경으로는 전동기의 자속밀도 포화 및 전류치 감소의 한계로 인하여 전동기 설계변경과 V/f비의 변경을 동시에 실시하여 해석함

으로써 능동적인 대처를 할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8은 기존의 한국형 고속전철용 견인전동기의 단면을 나타낸다. 그림 9는 자속밀도, 전동기 사이즈, 온도상승을 고려한 통풍량, 원심력과 전자력에 대한 기계적인 강도 등을 고려하여 회전자 통풍홀과 슬롯치수 변경하고, 엔드링 부위의 강도보강을 위하여 재질을 Cu-Cr-Zr로 변경하여 재설계한 것이다. 회전자의 통풍홀의 경우, 기존의 전동기는 2열구조로 통풍량은 큰 반면에 자속의 왜곡과 유효철심 단면적이 줄어드는 단점이 있기 때문에 재설계를 통해 통풍구를 1열구조 및 통풍홀 위치를 축중심으로 이동시켜 자속의 왜곡을 줄이고과 유효철심의 단면적을 크게 설계하였다. 회전자 슬롯사이즈의 경우, 전동기 재설계에서 회전자 슬롯폭을 2mm정도 줄여서 회전자 치폭이 늘어나고 자속밀도가 감소하도록 설계하였다.

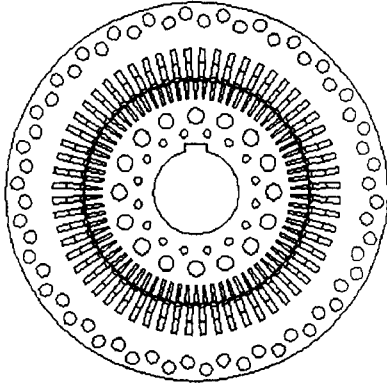


그림 8 기존 견인전동기 단면

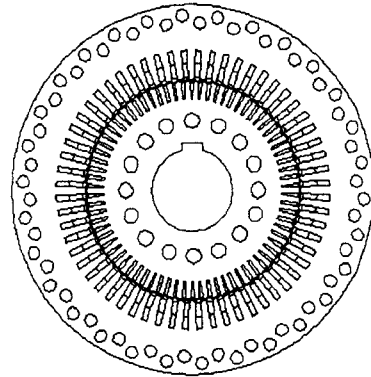


그림 9 재설계한 견인전동기 단면

그림 10은 주파수 60Hz인 입력전원의 전압변동을 시켜 기존 전동기의 무부하 전류와 재설계한 전동기의 무부하 전류를 나타내었다. 회전자의 통풍홀 이동 및 사이즈 감소, 회전자 치폭의 증가로 인하여 자속밀도가 감소하여 전압변동에 따라 평균 10[A] 정도의 무부하 전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 11에서는 재설계한 전동기의 입력전원 60Hz와 24Hz에서 전압의 변화에 따른 입력전류의 변화를 나타내었다. 이 때 재설계한 전동기의 입력전류는 그림 7의 V/f비의 변화에 따른 기존 전동기의 전류량보다 평균 10[A]가 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 자속밀도의 감소로 인한 무부하전류의 감소로 사료된다. 따라서 통풍구 개수의 변동으로 인한 회전자 통풍량의 감소로 인하여 발생하는 회전자의 온도상승은 입력전류의 감소에 의한 온도 감소로 전체온도의 절대치는 동일할 것으로 사료된다.

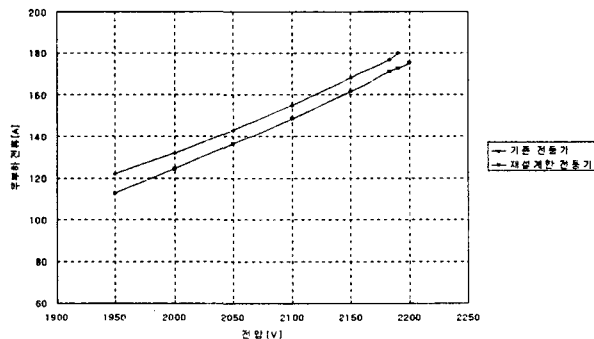


그림 10 설계변화에 따른 전동기 무부하 전류치 비교

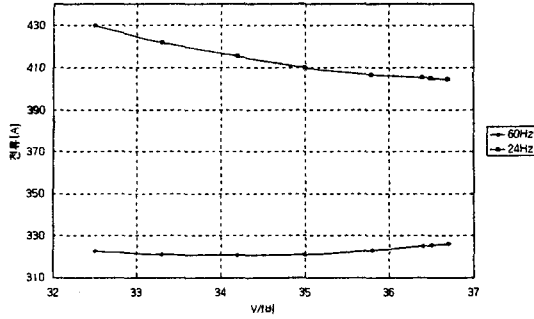


그림 11 재설계한 전동기의 V/f비에 따른 전류 변화

### 7. V/f비 및 설계변경에 대한 전동기 특성비교

표 4에서는 앞에서 검토한 기존의 전동기와 설계변경한 전동기에 대하여 V/f비에 따라 4가지 안으로 나누어 각각의 운전구간별 특성에 대해 비교한 것이다. 1안은 기존의 전동기와 V/f비(2183V/60Hz)에 대한 특성, 2안은 기존의 전동기에 변경된 V/f비(2183V/64.3Hz)를 적용한 특성, 3안은 전동기의 회전자 설계변경하고 기존의 V/f비를 적용한 특성, 4안은 전동기의 회전자 설계변경 및 변경된 V/f비(2183V/64.3Hz)를 적용한 특성에 대하여 비교하였다. 정격에서 4가지 안의 해석결과, 포화의 영향이 없는 정격에서는 역률의 차이 없으며 전류량이 동일하며 효율의 차이는 회전자의 엔드링 재질변경으로 발생한 것이다. 정토크중단점(24Hz)에서 V/f비의 변경으로 자속밀도를 낮게 설계한 2안과 4안의 역률이 낮지만 이 지점에서 요구되는 출력을 얻기위하여 부하전류는 상당히 크게 증가하였으며, 회전자를 설계변경한 3안과 4안이 기존의 1안과 2안보다 자속밀도의 감소로 부하전류가 감소한 것을 알 수 있다. 또한 기존의 V/f 중단점(60Hz)에서는 설계변경 및 V/f비 변경한 것이 가장 역률과 전류값이 적은 것으로 나타났다. 치수 설계변경 및 V/f비의 변경으로 4가지 모델의 전류에 대한 최대 변동폭은 12[A] 미만으로 작은 것으로 나타났다. 따라서 인버터와의 인터페이스관련하여 전동기의 입력전류치가 제한을 받는 상황에서 정토크 중단점의 전류량이 우선 고려하고, 회전자의 설계변경으로 역률 및 전류치 개선된 것으로 볼 때 3안이 가장 타당한 설계인 것으로 사료된다.

표 4 전동기 특성비교

구분		1안	2안	3안	4안
467kW 24Hz	전압[V]	873	816	873	816
	효율[%]	89.7	88.8	90.8	90.2
	역률[%]	83	87.3	83.9	88
	전류[A]	415	467	405.4	416.5
910kW 60Hz	전압[V]	2183	2040	2183	2040
	효율[%]	94.8	94.8	95.2	95.2
	역률[%]	76.2	82.9	77.7	84.1
	전류[A]	333.3	327.7	326	321.9
1100kW 143Hz	전압[V]	2183	2183	2183	2183
	효율[%]	94.1	94.1	94.5	94.5
	역률[%]	88.5	88.5	88.4	88.4
	전류[A]	349.1	349.1	348.2	348.2

## 8. 결론

본 논문에서는 한국형 고속전철용 견인전동기의 초기 기동시의 포화현상이 발생하는 것을 시험으로 확인하였으며, 이에 대한 개선책으로 V/f비와 설계변경에 대해 특성해석을 수행하였다.

검토결과 기존의 전동기에 대해 회전자 치와 통풍구 등을 변경으로 포화영역인 기동시 자속 밀도를 감소시켜 무부하 전류치를 10[A]정도 감소되는 것을 확인하였다. 또한 전동기의 V/f비 변동에 따른 부하전류의 변동은 각 운전영역의 출력에 따라 변동되는 것을 보았다. 한국형 고속전철에서는 정출력영역에서 V/f비에 따른 전류변화가 심하였으며, 이때 인버터와의 인터페이스를 고려하여 기존의 V/f비(2183V/60Hz)가 가장 적절한 사료되었다. 그러나 자속포화가 심할 경우 인버터전원과 정현파전원에 대한 부하전류 차이가 자속이 포화가 심하지 않을때보다 크기 때문에 V/f비 결정시 인버터가 발생하는 고조파성분의 영향에 대한 연구과 실험에 대한 충분한 검토가 있어야 할 것으로 사료된다.

추후 특성해석을 통해 타당성을 검토한 설계변경된 전동기를 제작 및 시험하여 기존 전동기와 비교분석하고, 자속포화와 인버터 영향에 특성변화에 대해서도 확인할 예정이다.

## 후기

본 논문의 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되어 고속전철기술개발사업에 의해 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

## 참고논문

- [1] "인버터·교류전동기구동전기차의 현황", 일본전기학회보고 제325호.
- [2] "G7 견인전동기개발 2차년도 보고서", 1998.
- [3] "Polypase Induction Motors", Paul.L Cochran, 1989.