

# 고온초전도 농형유도전동기의 속도-토크 특성시험

심정욱, 박명진, 이광연, 차귀수, 이지광\*  
순천향대학교, 우석대학교\*

## Speed-Torque Characteristics of the HTS Squirrel Cage Induction Motor

Jungwook Sim, Myungjin Park, Kwangyeoun Lee, Gueeso Cha, Jikwang Lee\*  
Soonchunhyang University, Woosuk University\*

jungwook@sch.ac.kr, gsoocha@sch.ac.kr

**Abstract** - The speed-torque characteristics of the squirrel cage induction motor is determined by the rotor resistance. This paper presents the fabrication and test results of an HTS induction motor. Conventional end rings and short bars were replaced with HTS tapes in the rotor.

Test result shows that the speeds of the HTS induction motor were the same with synchronous speed up to 10Nm.

### 1. 서 론

최근 개발되고 있는 초전도전동기는 크게 계자코일에 초전도체를 적용한 고온초전도 동기전동기와 비교적 소형의 간단한 구조로 고출력을 얻을 수 있는 고온초전도벌크형 전동기에 대한 연구가 진행 중에 있다[1][2]. 하지만 국내외에서 고온초전도테이프를 사용한 유도 전동기에 대한 연구개발은 아직까지 미비한 상태이다.

농형유도전동기의 회전자 회로에 초전도체를 사용할 경우 회전자의 저항이 매우 작아지게 되어 회전자 회로에 흐르는 전류가 증가하므로 낮은 운전 슬립에도 충분한 토크를 발생시킬 뿐만 아니라 부하변동에 대한 속도의 변화가 적게 되며 회전자에서 발생하는 손실도 작게 된다. 기동 시에는 회전자 단락봉에 많은 전류가 발생하기 때문에 회전자에 켄치가 발생하여 저항이 성장하게 되므로 기동토크가 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 1hp 일반 농형유도전동기의 고정자에 BSCCO-2223 고온초전도테이프를 이용하여 단락봉 및 단락환으로 제작된 농형회전자를 설치하여 특성시험을 하였고, 제작된 초전도유도전동기의 고정자와 동일한 용량을 갖는 일반 농형유도전동기의 특성과 비교하였다.

### 2. 고온초전도 농형유도전동기의 제작

고온초전도 농형유도전동기의 고정자는 3상,

Table 1. Specification of the Conventional Induction Motor.

정격전력	0.75kW	정격전압	220V
정격전류	3.5A	정격속도	1710rpm
고정자의경	140mm	고정자내경	80mm
전부하용량	4.1Nm	극수	4

4극, 220V, 0.75kW 농형유도전동기의 고정자를 사용하였다. 초전도유도기의 고정자로 사용된 전동기의 기존 사양은 표 1과 같다.

기존 농형회전자의 단락봉 및 단락환은 일반적으로 구리나 알루미늄으로 제작되지만 실험에 사용되는 전동기는 초전도체를 적용해야 하므로  $I_c$ 가 115A인 고온초전도테이프를 사용하여 각 슬롯에서 나온 초전도테이프를 또 다른 초전도테이프로 접합하는 방식으로 제작하였다[3][4].

일반적인 소형 전동기에서는 공극이 0.3~0.5mm정도로, 공극이 작을수록 여자전류가 감소하고 효율이 우수하지만 설계된 회전자에는 극저온이라는 극한 조건에서 운전하는 관계로 기계적 뒤틀림 등을 고려하여 1mm정도로 결정하였다. 그림 1(a)는 고온초전도 농형회전자이고 그림 1(b)는 제작된 고온초전도 농형유도전동기이다.

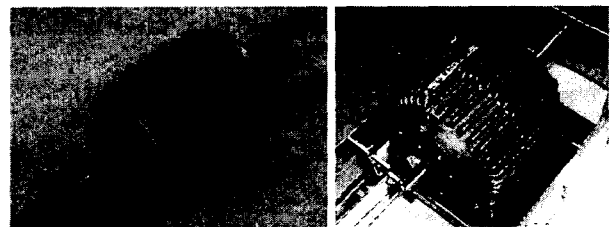


Fig. 1. (a) HTS Squirrel cage rotor (b) Manufactured HTS Squirrel cage induction motor.

### 3. 특성시험 및 분석

고온초전도 농형유도전동기의 특성시험은 무부하시험, 회전자 구속시험, 속도-토크 측정

등 3가지로 나누어서 수행하였고, 초전도유도전동기의 고정자와 동일한 크기와 용량을 가지는 0.75kW 농형유도전동기의 특성시험을 통하여 비교하였다. 실험에서 전동기 자체를 액체 질소 속에 넣는 관계로 기존의 고정자 저항은 상온상태에서 8.1Ω이지만 대략 1/7수준으로 감소하게 되어 한 상당 1.16Ω으로 측정되었다.

### 3.1 무부하 시험 및 회전자 구속시험

무부하 가변실험은 무부하 상태에서 217V의 입력전압을 인가하여 실험하였다. 이 경우 입력전압에 대해 초전도유도전동기의 속도는 1800rpm을 유지하였고, 일반유도전동기는 1799rpm으로 측정되었다.

실험 결과 무부하 상태에서 전전압을 인가할 경우 초전도전동기의 경우 무부하 손실  $P_{NL}$ 은 175W로 측정되었다. 여기서 식(1)을 이용하여 철손은 무시한다고 보고 무부하 회전손실  $P_{rot}$ 를 계산하면 회전손실은 131.65W로 계산되었다.

$$P_{rot} = P_{NL} - 3I^2R \quad (1)$$

여기서  $I$ 와  $R$ 은 1차측 상전류와 고정자의 한 상당 저항이다.

동일한 방법으로 일반유도전동기의 무부하 손실은 133W이고 이 경우 무부하 회전손실은 46.1W이다. 회전손실을 비교하면 초전도유도전동기의 경우가 일반유도전동기에 비해 3배정도 크게 나온다. 이것은 초전도 유도전동기의 회전을 재조립과정에서 베어링과 브라켓 부분에서 맞물려 마찰손이 기존전동기에 비해 크게 발생했기 때문이다. 이러한 부분은 제작된 초전도유도전동기의 효율을 감소시키는 원인이 된다.

회전자 구속시험의 경우 일반적으로 회전을 구속시킨 상태에서 전부하전류에 근사한 전류를 인가해야 한다. 하지만 초전도유도전동기 구속시험의 경우 낮은 크기의 구속전류를 인가하여도 초전도 회전자에 임계치 이상의 전류가 유도되어 저항이 성장하게 된다. 또한 인가된 구속전류의 크기에 따라 회전자측 초전도테이프에 발생하는 저항의 크기가 다르게 되어 정확한 특성을 알아볼 수 없게 된다. 그러므로 회전자측 도봉에 임계전류 이하 값이 흐르도록 입력전압을 최대한 낮은 전압부터 단계별로 증가시키면서 측정하여 각각의 회전자 구속시험의 측정값에 대하여 속도-토크곡선을 구했다.

### 3.2 속도-토크 특성

초전도유도전동기의 회전자구속시험 결과를 보면 구속시험 전류의 크기에 따라 회전자측 전류가 임계전류를 넘게되고 이에 따라 초전도 단락

Table 2. No-load test and blocked rotor test of the HTS Induction motor and conventional induction motor.

	전압 [V]	전류 [A]	P [W]	pf
초전도유도전동기				
무부하	217	4.7	175	0.034
회전자구속	7.4~22.4	0.97~2.79	1.53~18.1	0.12~0.16
일반 유도전동기				
무부하	217	2.43	133	0.146
회전자구속	47.8	3.19	180	0.686

붕과 단락환에 저항이 성장하게 된다. 따라서 정확한 특성을 알아보기가 어렵게 되므로 낮은 전압부터 단계별로 측정된 각 구속시험 결과에 대해 각각의 속도-토크 곡선을 그렸다.

그림 2는 각 구속시험 결과에 따라 계산한 속도-토크 곡선이다. 무부하 시험과 각각의 구속시험의 결과에 따라 회전자저항  $R_2'$ 이 변화한다고 예측했으므로 각 경우에 대한  $R_2'$ 을 구하여 각 경우에 따라 속도-토크 곡선을 그렸다.

결과를 보면  $R_2'$ 이 가장 적은 0.004Ω은 구속시험의 입력이 가장 낮은 7.4V, 0.97A, 1.53W의 경우이고, 5.059Ω은 입력이 가장 큰 22.4V 2.79A, 18.1W이다.  $R_2'$ 이 작을 경우는 회전자 단락봉 역할을 하는 초전도테이프가 초전도상태라고 예측되는 부분으로써 부하에 대하여 슬립이 매우 작음을 알 수 있고,  $R_2'$ 이 클 경우는 회전자측 초전도테이프가 초전도상태를 잃고 상전도상태로 전이된 상태로 된다. 따라서 실제 초전도유도전동기의 운전은 이러한 회전자 저항의 변화에 따른 합성된 형태의 곡선을 가지게 되어 그림 3과 같은 형태로 나타나게 된다.

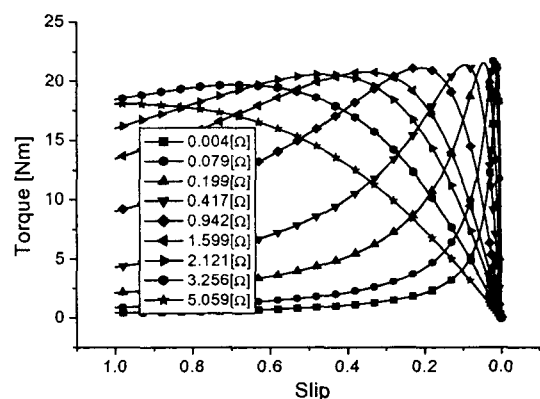


Fig. 2. Calculated speed-torque curve.

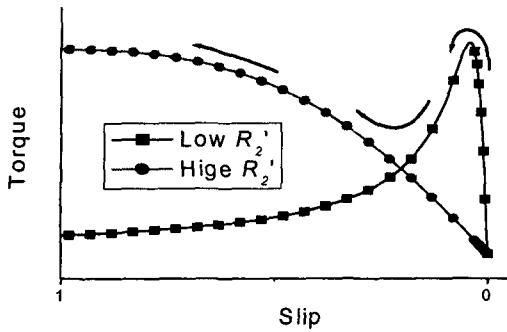


Fig. 3. Speed-torque curve of HTS induction motor with high  $R_2'$  at strating and low  $R_2'$  at full load.

그림 4는 그림 2의 무부하시험과 회전자 구속시험에 의해 각각 계산된 속도-토크 곡선과 측정된 초전도유도전동기의 속도-토크 곡선을 비교한 그림이다. 여기서 보면 슬립이 0 근처에서의 값에서 차이가 발생하는데 이것은 초전도유도전동기에 토크가 증가하면서 회전자축 저항의 값이 슬립의 변화에 따라 증가되기 때문으로 보여진다. 여기서보면 슬립이 1 근처로 갈수록 토크값이 계산값과 근접함을 알 수 있다.

그림 5는 초전도유도전동기와 동일한 고정자를 사용한 750W 농형유도전동기의 토크-속도곡선을 비교하였다. 실험에 사용된 초전도유도전동기의 공극의 크기는 동일한 고정자를 사용하는 기존유도전동기의 공극보다 더 크기 때문에 여자전류의 증가로 말미암아 전체 사용되는 전력소모량이 증가된다. 따라서 동일한 여자전류 및 공극조건을 주기 위해 기존 유도전동기의 회전자를 초전도유도전동기와 같은 1mm의 공극을 가지도록 가공하였다. 물론 기존의 농형회전자의 구조에 따라서 전류분포가 어느 정도 다를 수도 있지만 크게 차이가 나지 않는다는 가정 하에 비교하였다. 그림을 보면 기존전동기와 동일한 전압조건에서 출력이 더 증가함을 알 수 있다.

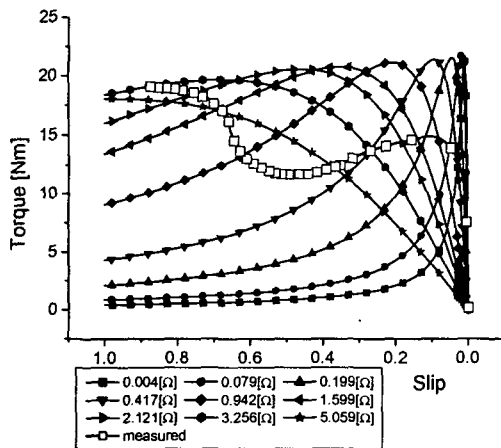


Fig. 4. Comparison of calculated and measured speed-torque curve.

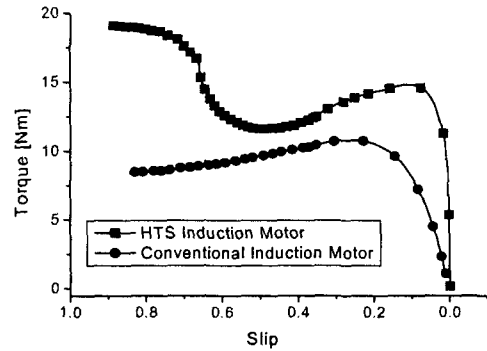


Fig. 5. Comparison of the HTS Induction motor and conventional induction motor.

### 3. 결 론

본 논문에는 0.75kW 농형유도전동기의 회전자를 초전도 농형회전자로 바꾸어 실험을 하였다. 실험결과 단락봉과 단락환을 초전도체로 대체함으로써 속도-토크곡선을 보면 기존의 농형유도기와는 달리 슬립이  $s=0$  근처에서는 토크가 10Nm 정도까지 증가하더라도 속도가 크게 감소하지 않음을 알 수 있었고, 슬립이 1 근처로 갈수록 토크가 감소하였다가 다시 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 슬립의 증가에 따라 회전자축 저항이 증가하기 때문이고, 기존 농형유도기의 경우 기동토크가 작지만 고온초전도 농형유도기의 경우는 권선형 유도기와 마찬가지로 기동시 회전자축 저항이 성장하여 큰 토크를 발생시키게 한다는 것을 알 수 있다.

“이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음”  
(KRF-2001-042-E00021)

### [참 고 문 헌]

- [1] B. Oswald, et al., "Superconducting Reluctance Motors with YBCO Bulk Material," *IEEE Trans. on AS*, Vol.9, No.2, pp.1201-1204, 1999.
- [2] D. Aized, et al., "Status of the 1,000hp HTS Motor Development," *IEEE Trans. on AS*, Vol.9, No.2, pp.1197-1200, 1999.
- [3] 심정욱, 임형우, 차귀수, "고온초전도체를 이용한 농형유도전동기 특성시험," 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회 논문집, pp.68-70, 2001.
- [4] J. Sim et al., "Test of an Induction Motor with HTS wire at end ring and bars," *The Applied Superconductivity Conference*, Huston, Texas, August 6, 2002