

# 전동/발전기 코어에 의한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 회전손실 특성 평가

論 文  
56-10-12

## Rotational loss assessment of flywheel energy storage system by Motor/Generator core

李 丁 必\* · 韓 瑩 熙\*\* · 丁 世 庸<sup>§</sup> · 韓 相 哲\*\* · 鄭 年 縉\*\*\* · 成 台 鉉<sup>§§</sup>  
(Jeong-Phil Lee · Young-Hee Han · Se-Yong Jung · Sang-Chul Han · Nyeon-Ho Jeong · Tae-Hyun Sung)

**Abstract** - In this paper, the rotational loss of the superconductor flywheel energy storage system (SFES) by motor/generator stator core was assessed. To do this, the vertical axial type SFES with journal type superconductor bearing was manufactured. To quantitatively assess the rotational loss by the stator core, the rotational losses by superconductor bearing and the degree of a vacuum were measured. In case of variation of the inner radius and outer radius of the stator core, the rotational losses were measured. From the experimental results, It is confirmed that the rotational loss can be reduced by means of the optimal stator core design.

**Key Words** : Flywheel Energy Storage System(SFES), Rotational loss, Superconductor bearing

### 1. 서 론

전기 에너지는 사용의 편리성 때문에 그 수요가 계속적으로 증가하는 추세에 있다. 그러나 그 수요의 특성상 주간과 야간에 따라 수요의 차이가 30% 정도 되며, 냉방설비의 이용이 증가하는 여름철에는 더욱 큰 차이를 나타내게 된다. 전력을 공급하는 전력회사는 그 최대 수요에 맞추어 설비용량을 확보해야 한다. 그러나 에너지 저장기술의 확보를 통하여 심야의 잉여전력을 저장하였다가 부하가 증가하는 주간에 전기에너지를 사용하게 되면 신규 발전설비 건설 투자비 절감은 물론 발전소의 발전량을 급변하지 않아도 되므로 발전설비 자체의 수명도 연장 시킬 수 있으며 에너지 소비 효율도 향상시킬 수 있게 되는 등 막대한 경제적 효과를 얻을 수 있다. 이와 같이 에너지 저장장치는 시시각각 변화하는 전력수요에 유연하게 대처할 수 있으며 전기 품질을 향상시킬 수 있는 효율적인 수단으로써 많은 연구가 진행되어 왔다. 그중에서도 플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Storage System)는 주로 무정전 전원장치(Uninterruptible Power Supply : UPS), 전력품질개선용, 태양광 풍력과 같은 분산전원의 저장 및 부하 평준화용으로 사용가능하다. 그러나 종래의 기계식 플라이휠 및 전자석 플라이휠은 기계적인 마찰이 상당히 크거나 외부에서 전원이 지속적으로 공급되어야 하는 등 저장 효율이 크지 않아

주로 UPS 및 단시간의 전력품질개선용에 주로 사용되는 예가 많았다. 최근 전기 에너지 이용 효율 극대화 측면에서 매우 적은 손실로 장기간 에너지 저장이 가능한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치(Superconductor Flywheel Energy Storage System : SFES)에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다[1]-[4].

기계식 플라이휠, 전자석 플라이휠 외에 SFES를 사용하는 가장 큰 이유는 무접촉으로 휠이 부양되어 회전하기 때문에 저장된 에너지의 손실이 매우 적어 장기간의 전력을 저장가능하기 때문이다. 그러나 일반적으로 SFES에도 제작 방법 및 다양한 원인에 의해서 에너지의 손실은 불가피하게 발생하기 마련이다. SFES는 에너지를 저장하는 부분인 플라이휠, 마찰 없이 휠을 부양시키는 초전도체와 영구자석으로 구성된 초전도 베어링, 그리고 에너지 변환을 담당하는 전동/발전기(Motor/Generator)로써 크게 3부분으로 구성된다. SFES에는 초전도 베어링의 구성 방법, 영구자석을 사용하는 전동/발전기 및 진공조건에 따라서 회전하고 있는 플라이휠의 회전속도 감소 정도가 달라지게 된다. 이와 같이 다양한 원인에 의해서 회전하고 있는 플라이휠의 회전속도 감소량을 회전손실이라 정의한다. 지금까지 여러 문헌에서 초전도 베어링에서 발생하는 회전손실 발생 메커니즘을 규명하고 발생하는 손실을 평가하여 에너지 손실을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다[5]-[8]. 이와 같은 연구 결과를 토대로 보면 초전도 베어링에서 발생하는 손실은 초전도 베어링의 제작 방법에 따라 손실의 량도 많은 차이가 있지만 다양한 방법으로 손실을 최소화 할 수 있다. 또한 진공 조건에 의한 풍손 또한 회전손실에 미치는 영향이 상당하지만 플라이휠 챔버 내부의 진공도가 0.4 [mtorr] 이하에서는 거의 발생하지 않는다고 알려져 있다[9]. 그리고 다양한 원인으로 회전손실이 발생하겠지만 초전도 플라이휠의 에너지 변환을 위해 사용되는 전동/발전기의 형태에 따라서

\* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 研 究 員 · 工 博  
\*\* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員 · 工 博  
\*\*\* 非 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員  
§ 非 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 研 究 員  
§§ 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 首 席 研 究 員 · 工 博  
接受日字 : 2007年 7月 2日  
最終完了 : 2007年 8月 8日

회전손실은 많은 차이가 발생한다. 그 중에서도 구조가 간단하고 전동 및 발전효율이 좋은 영구자석형 전동/발전기를 사용하는 경우에는 전동발전기의 회전자(rotor)로써 사용되는 영구자석에 의해서 전동발전기의 고정자(Stator)에 발생하는 와전류(eddy current) 손실과 히스테리시스(hysteresis) 손실에 의해 플라이휠의 회전이 점차적으로 감소하는 회전손실이 발생하게 되는데 이는 일반적으로 초전도 베어링으로 인하여 발생하는 손실보다 상당히 크다. 따라서 전동/발전기에 의해 발생하는 회전손실을 얼마나 감소시키는데가에 따라서 SFES의 에너지 저장효율이 결정된다. 지금까지 초전도 베어링에서 발생하는 회전손실에 대한 연구와는 달리 전동/발전기에 의해서 발생하는 회전손실에 대한 정량적인 평가와 이를 최소화하기 위한 연구는 거의 진행된 바가 없다.

본 논문에서는 영구자석형 전동/발전기가 SFES 시스템의 회전손실에 미치는 영향을 평가하였으며 고정자 코어의 크기 변화를 통하여 SFES의 회전손실을 현저히 줄일 수 있음을 확인하였다. 이를 위해서 저어널 타입(journal type)의 초전도 베어링을 가지는 수직축형 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하였다. SFES를 구성하고 있는 회전손실을 정량적으로 평가하기 위해서 초전도 베어링에서 발생하는 회전손실, 풍손에 의한 회전손실을 평가하고, 영구 자석형 전동발전기의 회전자(rotor)와 고정자(stator)에 의해서 발생하는 회전손실을 실험적인 방법을 통하여 정량적으로 평가하였다. 전동 발전기의 고정자의 코어 내경과 외경을 변화시키는 경우에 대해서 회전 손실을 평가하였다. 회전손실을 측정된 결과 전동 발전기의 코어 설계방법에 따라 회전손실을 현저하게 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

## 2. 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 회전손실

### 2.1 초전도 플라이휠 에너지 저장 장치의 구성

SFES는 에너지 저장을 담당하는 플라이휠, 마찰없이 휠을 부양시키는 초전도체와 영구자석으로 구성된 초전도 베어링, 전기 에너지와 운동 에너지간의 에너지 변환 역할을 담당하는 전동/발전기로 구성된다. 그림 1은 플라이휠의 회전 손실 특성 평가를 위해 제작된 SFES 시스템의 단면을 나타내고 있다.

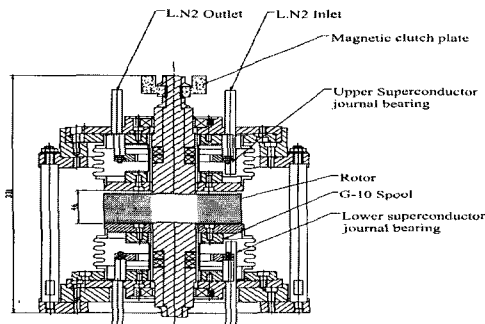


그림 1 제작된 SFES의 단면도

Fig. 1 A cross section view of the manufactured SFES

일반적으로 SFES의 부양을 담당하는 초전도 베어링은 쓰러스트 타입(thrust type)과 저어널 타입(journal type)의 두 가지 형태를 가진다. 기존의 여러 연구에서는 주로 쓰러스트 타입의 베어링을 이용한 SFES 시스템[2][10]을 제작한 경우가 많았지만 이러한 형태는 회전에 의한 원심력에 의해서 시스템이 불안정해 지기 쉬우므로 주로 능동형 전자석 베어링(active magnetic bearing)등을 채용해야 하는 등의 안정성에 문제가 있다. 그러나 본 연구에서는 그림 1과 같이 플라이휠 축을 감싸는 형태의 저어널 타입의 초전도 베어링을 채용한 SFES 시스템을 구성하였다. 이와 같은 형태는 원심력 방향으로 축을 지지함으로써 강력한 부상력과 함께 우수한 안정성을 가진다.

그림 1에서 알 수 있듯이 초전도 베어링은 플라이휠의 상부와 하부 각 1개씩 2개로 구성되어 있고, 수직으로 축을 세워 회전하는 형태인 수직축형 SFES 시스템이다. 초전도 베어링은 초전도체와 영구자석으로 구성되는데 영구자석 부분은 축방향으로 자화된 두개의 자석 사이에 링 모양의 철을 삽입한 구조로 되어 있다. 이때 영구자석은 같은 크기로서 마주보게 배치하여 사이에 링이 끼움으로써 단경방향으로 자속이 분포 되도록 구성하였다. 여기에 사용된 영구자석은 내경 20 [mm], 외경40 [mm], 두께10 [mm]인 것을 사용하였다. 초전도 베어링 하나에 사용된 초전도체는 35×25×10 [mm] 크기의 YBCO 벌크 6개로 모두 12개를 사용하였다. 에너지가 저장되는 부분인 플라이휠은 티타늄으로 구성된 축과 복합재 휠로 구성되었고 휠의 길이는 300 [mm], 휠의 직경은 40 [mm], 휠 전체의 무게는 전부 4kg이다. 그리고 휠의 상부에는 유도전동기를 이용하여 휠을 회전시키기 위하여 알루미늄 플레이트가 구성되어 있다. 현재 제작된 SFES 시스템은 회전자와 고정자 코어에 의한 회전손실평가가 주목적이므로 내부에는 전동/발전기가 설치되어 있지 않고 하부에 전동/발전기의 회전자(rotor)인 자석을 착탈 가능하며 고정자(stator)인 적층 코어 또한 착탈 가능한 구조로 구성하였다. 이와 같이 구성된 SFES 시스템은 회전 중 공기 마찰에 의한 풍손을 제거 하기 위해서 챔버 내부를 진공으로 유지할 수 있는 구조로 구성하였다.

### 2.2 SFES 시스템의 회전 손실

SFES 시스템은 UPS, 전력품질개선용과 같은 단시간 사용 및 부하 평균화와 같은 에너지의 장기간 사용과 같이 사용 목적에 따라 여러 가지 용도로 사용될 수 있다. SFES 시스템이 UPS 및 전력품질개선용으로 사용하는 경우에는 회전 손실에 의한 에너지 손실은 그다지 중요한 문제가 아니다. 그러나 전기 에너지의 효율적인 이용을 목적으로 장기간의 에너지를 저장하는 경우 SFES 시스템의 내, 외부적인 원인으로 인한 회전속도의 자연적인 감소로 인하여 발생하는 에너지 손실은 매우 중요한 문제이다. SFES 시스템의 구성에 있어서 설계 및 제작 방법이 있어서 다양한 회전손실이 발생하게 마련이다. 손실을 발생시키는 원인은 초전도체와 영구자석으로 구성된 초전도 베어링에서 발생하는 손실과 영구자석형 전동/발전기에서 발생하는 손실 등과 같이 자계 분포에 의한 것과 진공에 따른 풍손으로 구분할 수 있다. 일반적으로 풍손은 챔버 내부의 진공도가 0.4 [mtorr] 이하에서는 회전손실이 거의 발생하지 않는다.

영구 자석형 전동/발전기를 SFES 시스템에 적용시키기 위해서는 전동발전기의 회전자(rotor)가 되는 회전자는 휠축에 부착되고 고정자(stator)는 회전자를 둘러싸는 형태로 구성된다. SFES 시스템의 휠을 일정속도로 고속으로 회전시키고 전원을 차단하면 회전자의 자속 의해서 고정자 코어(core)에는 와전류(eddy current)가 발생하여 플라이휠은 점차적으로 속도가 감소하여 에너지 손실이 발생한다. 이때 발생하는 회전 손실은 초전도 베어링에서 발생하는 손실보다 상당히 크며 이를 정확하게 평가하여야 하며 이를 통하여 회전손실을 최소화 시켜야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 플라이휠의 회전 구동은 휠축의 상부에 부착된 유도전동기를 이용하여 그림 1의 클러치 플레이트에 발생하는 와전류에 의하여 회전을 하게 된다. 목표 속도에 도달하면 유도전동기와 플레이트를 분리하여 회전속도를 유지 시킨다. 이때 휠축 아랫부분에 2극으로 영구자석을 부착하고 고정자 코어를 다양하게 변화 시켜가면서 회전손실을 평가하였다.

2.3 실험 방법

제작된 SFES 시스템의 정확한 회전손실을 평가하기 위해서는 SFES 시스템의 각 부분에서 발생하는 회전손실을 정량적으로 평가하여야 한다. 먼저 초전도 베어링에 의해 발생하는 손실을 평가하기 위해서 풍선에 의한 회전손실이 발생하지 않도록 챔버내의 진공을 0.4 [mtorr] 이하로 유지하고, 휠축 아랫부분에 회전자로 되는 영구자석과 고정자 코어를 제거한다. SFES 시스템 내부에 액체 질소를 순환시켜 약 77K 정도로 냉각하여 휠을 부양 시킨다. 상부의 유도전동기를 이용하여 클러치 플레이트에 와전류를 발생시켜 휠을 원하는 속도로 회전시킨 후 유도전동기를 제거하여 회전속도를 유지 시킨다. 이 상태에서 시간에 따라서 감소하는 회전속도를 측정한다. 이때는 진공에 의한 회전손실이 없기 때문에 발생하는 회전손실은 초전도 베어링에서 발생하는 것이라 할 수 있다.

다음으로 진공에 의한 회전 손실을 평가하기 위해서 진공을 2.2E-2 [torr]로 유지시키고 휠을 회전시킨 후 시간에 따라 감소하는 회전속도를 측정하였다.

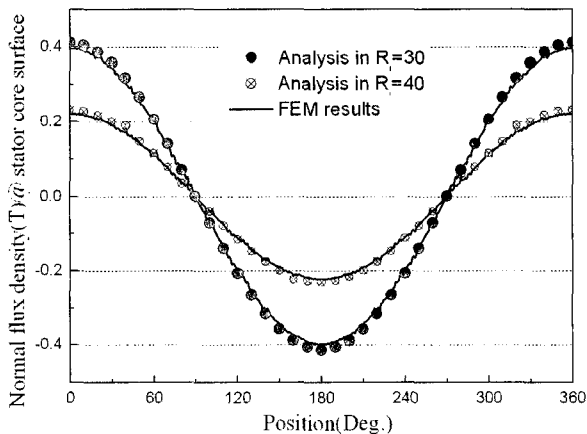
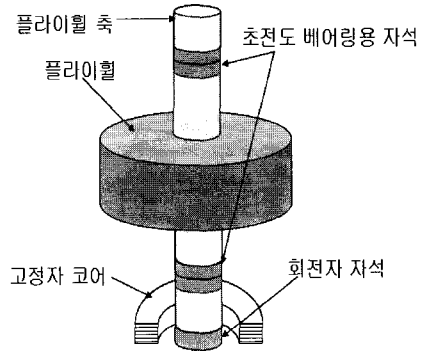


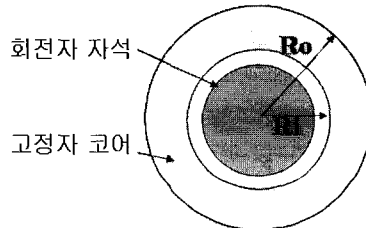
그림 2 고정자 코어 내부 표면 자속밀도  
Fig. 2 Flux density in inner surface part of stator core

전동발전기의 영구자석 회전자와 고정자 코어에서 발생하는 회전손실을 평가하기 위해서 진공을 2.2E-2 [torr]로 유지 시키고 플라이휠 축 아랫부분에 영구자석 회전자(rotor)를 부착하고 그 주위에 고정자 코어를 설치한 후 휠을 회전시킨 후 시간에 따라 감소하는 회전속도를 측정하였다..

설치된 영구자석 회전자는 NdFeB35 계열로서 반경 방향 2극으로 착자되었으며 내반경 10 [mm], 외반경 20 [mm], 두께는 10 [mm]이며 잔류 자속밀도는 1.23 [T]이다. 그림 2는 사용된 영구자석 회전자에 의한 고정자 코어 내부 표면 자속 분포를 나타낸다.



(a) 고정자 코어와 회전자 자석 설치



(b) 고정자 코어와 회전자 자석 배치

그림 3 코어에 의한 회전손실 측정을 위한 설치 방법  
Fig. 3 Experimental Setup for rotational loss measurement by the stator core

그림 3은 고정자 코어의 다양한 크기에 의한 회전손실을 평가하기 위하여 고정자 코어와 회전자 자석 설치 방법을 나타내고 있다. 그림 3(b)와 같이 코어의 내반경  $R_i$ 와 외반경  $R_o$ 를 변경시켜가면서 회전속도 감소를 측정하여 코어의 내반경과 외반경의 크기에 따른 회전손실을 평가하였다. 여기서 사용된 코어는  $R_i = 30$  [mm],  $R_o = 42$  [mm]의 코어 (Type A),  $R_i = 30$  [mm],  $R_o = 52$  [mm]의 코어 (Type B),  $R_i = 40$  [mm],  $R_o = 48$  [mm] 코어 (Type C) 및  $R_i = 40$  [mm],  $R_o = 52$  [mm] 코어 (Type D)를 이용하였다. 각 코어의 두께는 0.15 [mm]의 규소강판으로서 모두 10 [mm]의 두께로 적층하였다. 휠의 회전속도는 홀센서(Hall sensor)를 이용하여 계측하였다.

SFES 시스템에 저장된 에너지  $E$ 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$E = \frac{1}{2} I w(t)^2 \tag{1}$$

여기서  $I$ 는 관성계수,  $w(t)$ 는 휠의 회전 각속도를 나타낸다.

이 식을 이용하여 회전 손실  $P$ 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{\partial E}{\partial t} = I w(t) \frac{\partial w(t)}{\partial t} = 4\pi^2 I f(t) \frac{\partial f(t)}{\partial t} \tag{2}$$

여기서  $f$ 는 회전 주파수이다.

측정된 회전손실을 이용하여 SFES 시스템의 각 손실을 이용하여 코어에서 발생하는 회전손실은 다음과 같은 식 (3)을 이용하여 정량적으로 계산할 수가 있다.

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{SMB} + P_w \\ P_2 &= P_{SMB} + P_w + P_{core} \\ P_{core} &= P_2 - P_1 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $P_{SMB}$ 는 초전도 베어링에서 발생하는 손실,  $P_w$ 는 진공도에 따른 풍손,  $P_{core}$ 는 고정자 코어에 의해 발생하는 회전 손실을 나타낸다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 전자장 해석 프로그램 Maxwell을 이용하여 적층된 규소강판의 각 타입별 코어에 대한 자기분포를 해석한 결과를 나타내고 있다. 코어 Type A, Type B, Type C, Type D의 최대 자속 밀도는 각각 1.1 [T], 0.75[T], 1.2[T], 1.0[T]이다.

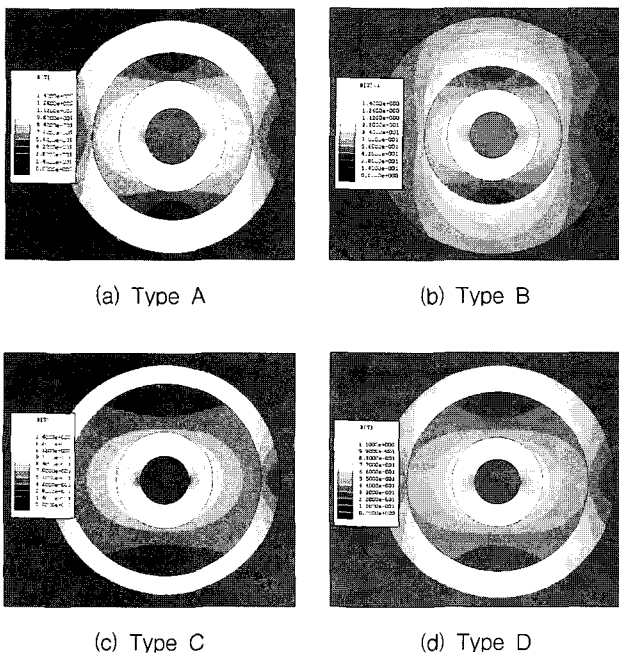


그림 4 각 코어별 자속밀도 분포  
Fig. 4 Distribution of flux density according to each core

그림 5는 플라이휠 축 아랫부분에 영구자석 회전자와 코어가 없는 경우 진공도 4E-4 [torr]인 경우와 2.2 E-2 [torr]일때 6100 [RPM]까지 회전시킨 후 각각의 속도에 따른 회전손실을 측정된 결과를 나타내고 있다. 그림에서 진공도가 4E-4 [torr]인 경우에는 진공도에 의한 풍손을 무시할 수 있으므로 발생하는 손실은 초전도 베어링에 의해서 발생하는 회전 손실을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 6100 [RPM]에서 초전도 베어링에 의해 발생한 손실은 0.025 [W]로서 회전손실이 매우 적음을 알 수 있다. 진공도가 2.2 E-2 [torr]인 경우에는 진공도에 따른 풍손이 발생하게 되는데 그 손실은 6100 [RPM]에서 0.42[W]가 발생하였다. 여기에 비하면 초전도 베어링에 의한 손실은 매우 적기 때문에 무시 가능한 손실이다. 따라서 본 논문에서 사용된 SFES 시스템의 초전도 베어링에서 발생하는 회전 손실이 거의 무시될 만큼 성능이 우수한 것으로 나타났다.

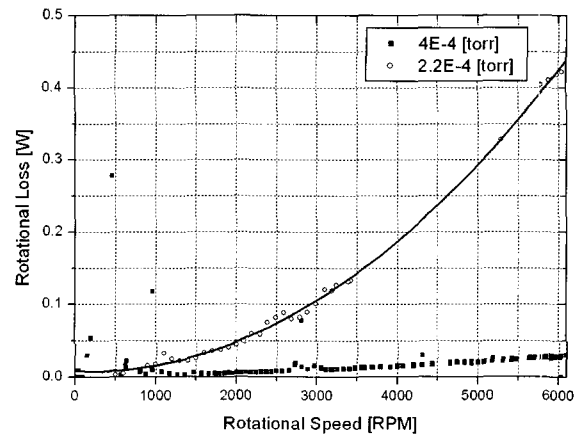


그림 5 초전도 베어링 및 진공에 의한 손실  
Fig. 5 Rotational loss by superconductor bearing and the degree of a vacuum

그림 6은 각각의 타입별 코어와 영구자석 회전자를 삽입하고 유도 전동기를 이용하여 플라이휠을 회전시켰을 경우에 대한 회전속도의 증가와 유도전동기를 제거한 후 자연적인 회전속도 감소특성을 나타내고 있다. 각각의 경우에 대하여 6100 [RPM]에 도달하는데 걸린 시간은 약 8분 정도 소요 되었는데 이것은 실험을 위해 사용한 와전류를 이용한 클러치 플레이트를 회전하는 방식을 사용하는데 기인한다. 플라이휠이 6100 [RPM]에 도달한 후 idling 상태시 휠의 속도는 자연적으로 감소하게 되는데 초전도 베어링에 의한 손실이 거의 없기 때문에 회전속도의 감소에는 진공도에 의한 풍손과 코어의 크기에 따른 와전류손과 히스테리시스손에 의한 것이다. 진공도가 모두 동일하기 때문에 각 코어의 크기에 따른 회전속도 감소 특성을 평가 할 수 있다. 그림에서 보면 Type B의 경우가 회전속도감소가 가장 늦었으며 Type C의 경우에 회전속도감소가 가장 빨랐다. Type B의 경우 회전손실이 50 [%]감소하는데 약 95분이 걸렸고 Type C의 경우 약 75분정도에 50[%]로 감소하였다. 이 결과는 진공도가 2.2E-2 [torr]인 경우이므로 진공도를 향상시키면 이 시간은 매우 길어지게 된다.

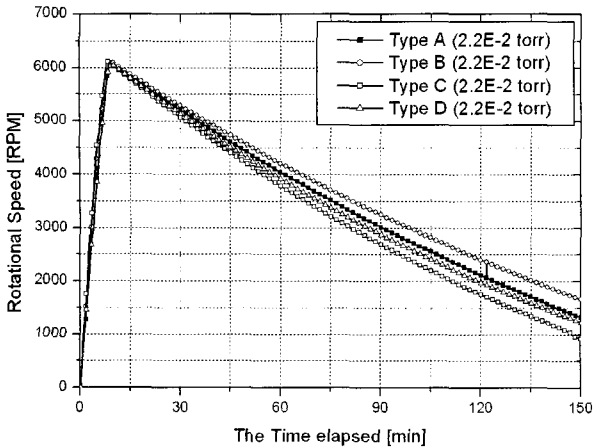


그림 6 플라이휠 속도 증가 및 감소 특성  
 Fig. 6 Characteristics of rotational speed up and down of the flywheel

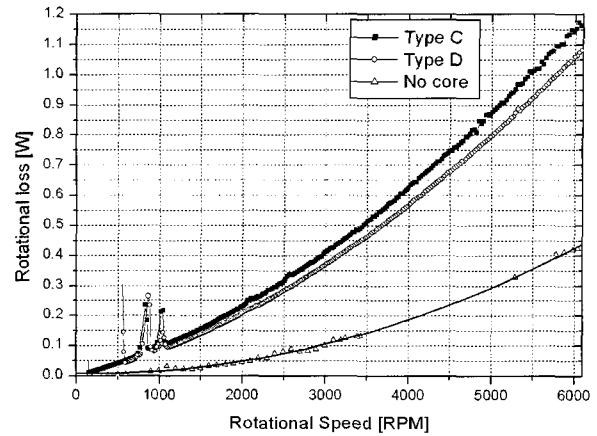


그림 8 Type C( $R_i=40$  [mm],  $R_o=48$ [mm])와 Type D( $R_i=40$  [mm],  $R_o=52$ [mm])에 의한 회전손실  
 Fig. 8 Rotational loss by Type C( $R_i=40$ [mm],  $R_o=48$ [mm])와 Type D( $R_i=40$  [mm],  $R_o=52$ [mm])

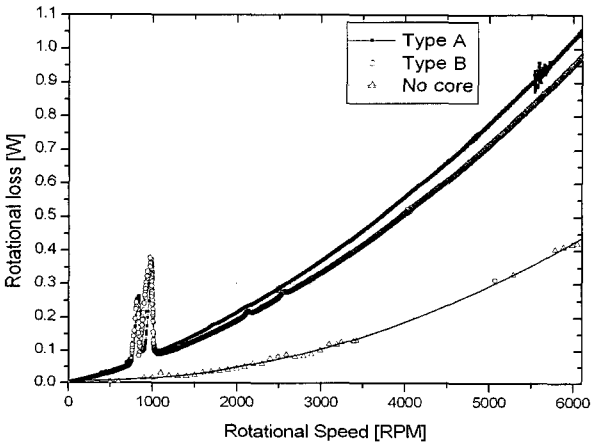


그림 7 Type A( $R_i=30$  [mm],  $R_o=42$ [mm])와 Type B( $R_i=30$  [mm],  $R_o=52$ [mm])에 의한 회전손실  
 Fig. 7 Rotational loss by Type A core( $R_i=30$  [mm],  $R_o=42$ [mm]) and Type B core( $R_i=30$  [mm],  $R_o=52$ [mm])

그림 7은 내반경  $R_i$ 를 30 [mm]로 고정하고 외반경  $R_o$ 를 변화시킨 Type A 코어와 Type B 코어를 설치하고 휠 아래에 영구자석 회전자를 설치한 후 6100 [RPM]까지 속도를 증가 시킨 상태에서 자연 감속되는 회전 손실을 측정된 결과와 코어가 없는 경우 풍손에 의한 손실을 나타내고 있다. 이때 각각의 진공도는  $2.2 \times 10^{-2}$  [torr]로 일정하게 유지시켰다. Type A 코어의 경우 6100 [RPM]에서 회전손실은 약 1.06 [W]이며 Type B코어를 삽입하여 측정된 회전손실은 약 0.97[W]로 나타났지만 초전도 베어링에 의한 손실과 진공에 의한 손실 약 0.42[W]를 빼면 Type A와 Type B의 순수한 코어에 의한 손실은 각각 약 0.64[W]와 0.55[W]이다. Type B에 의한 회전손실이 약 15[%] 정도 감소되었다. 그림에서 약 800 RPM과 1000 RPM에서의 피크는 SFES 시스템의 공진에 의해 발생한 결과이다.

그림 8은 내반경  $R_i$ 를 40 [mm]로 고정하고 외반경  $R_o$ 를 변화시킨 Type C 코어와 Type D 코어를 설치하고 휠 아래에 영구자석 회전자를 설치하고 6100 [RPM]까지 속도를 증가 시킨 후 회전 손실을 측정된 결과와 코어가 없는 경우 풍손에 의한 손실을 나타내고 있다. 이때 각각의 진공도는  $2.2 \times 10^{-2}$  [torr]로 일정하게 유지시켰다. Type C 코어의 경우 6100 [RPM]에서 회전손실은 1.2[W]이며 Type D코어를 삽입하여 측정된 회전손실은 약 1.1[W]로 나타났지만 초전도 베어링에 의한 손실과 진공에 의한 손실 0.42 [W]를 빼면 Type C와 Type D의 순수한 코어에 의한 손실은 각각 0.78[W]와 0.68[W]이다. Type B에 의한 회전손실이 13 [%] 감소되었다. 그림 7과 마찬가지로 약 800 RPM과 1000 RPM에서 시스템 공진에 의한 축진동으로 손실이 증가하였다.

그림 7과 그림 8의 결과로부터 6100 [RPM]에서 회전손실이 가장 큰 경우는 type C의 코어를 삽입했을 경우로 회전손실은 0.78 [W]로 평가되었으며 회전손실이 가장 작은 경우는 Type B의 경우로 회전손실은 0.55 [W]로 평가되었다. 따라서 회전손실이 가장 큰 것과 가장 작은 것과의 차이는 0.23 [W]에 해당하는 것으로 코어의 적절한 선택에 의해서 회전손실은 30 [%]정도 감소의 효과가 나타났다.

결과적으로 볼 때 내반경이 고정되고 외반경이 증가하게 되면 SFES 시스템에서 발생하는 회전손실은 줄어든다. 그러나 내반경의 경우에는 커질수록 회전손실이 줄어들지는 않는다. 따라서 내반경의 경우 회전손실이 최소가 되는 최적의 크기를 선택하여야 효과적인 전동 발전기를 설계할 수가 있다. 그러므로 이와 같은 결과는 SFES 시스템에서 사용되는 영구자석형 전동발전기를 채용할 경우 고정자 코어의 효과적인 선택에 의해서 회전손실이 상당히 많은 차이가 발생할 것으로 생각된다. 이는 SFES 시스템이 장기간 에너지를 저장하는 경우 에너지 사용 효율을 결정짓는 매우 중요한 요인이 되기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 전동/발전기가 SFES 시스템의 회전손실에 미치는 영향을 평가하였으며 고정자 코어의 크기 변화를 통하여 SFES의 회전손실을 현저히 줄일 수 있음을 확인하였다. 이를 위하여 저어널 타입의 초전도 베어링을 이용한 수직축형 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하였으며 초전도 베어링에 의한 손실, 진공도에 따른 풍손에 의한 손실 및 전동발전기용 고정자 코어의 크기를 변화시켜가면서 발생하는 회전손실을 실험을 통하여 정량적으로 평가하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

① 제작된 SFES는 성능이 매우 우수하여 회전자 자석 및 고정자 코어가 없을 때 초전도 베어링에 의한 회전손실이 0.025[W]로 매우 적었다.

② 코어 내반경을 고정하고 외반경을 증가시킬 경우 SFES 시스템의 회전손실이 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

③ 실험결과로부터 코어의 사이즈 변경만으로도 회전손실을 30 [%]정도 감소시킬 수 있었다.

④ 코어 내반경을 적절하게 선택하고 외반경을 크게 한다면 실험 결과보다 회전손실을 훨씬 더 많이 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구결과를 이용하면 SFES 시스템에 사용할 수 있는 손실이 적고 효율이 우수한 영구자석형 전동발전기를 설계하는데 매우 유용할 것으로 생각된다. 향후 본 연구를 기초로 코어의 내반경을 최적으로 선정하는 연구가 진행되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

[1] T. H. Sung, J. S. Lee, Y. H. Han, S. C. Han, S. K. Choi and S. J. Kim, "300 Wh class superconductor flywheel energy storage system with a horizontal axle", Physica C 372-376, pp. 1541-1456, 2002

[2] A. C. Day, J. R. Hull, P. E. Johnson, K. E. McCrary, J. Edwards et al, "Temperature and Frequency effects in a high-performance superconductor bearing", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13. No. 2. pp. 2179-2184, 2003

[3] T. Ichihara, K. Matsunaga, M. Kita, I. Hirabayashi et al, "Application of superconducting magnetic bearings to a 10 kWh-class flywheel energy storage system", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15. No. 2, pp. 2245-2248, 2005

[4] N. Kosizuka "R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems", Physica C 445-448, pp. 1103-1108, 2006

[5] R. Shiraishi, K. Demachi, M. Uesaka, and R. Takahata, "Numerical and experimental analysis of the rotation speed degradation of superconducting magnetic bearing", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, Nol. 2. pp. 2279-2282, 2003

[6] I. Masaie, K. Demachi, T. Ichihara and M. Uesaka, "Numerical evaluation of rotational speed degradation in the superconducting magnetic bearing for various superconducting bulk shape", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 2257-2260, 2005

[7] K. Demachi and K. Matsunaga, "Numerical and experimental evaluation of rotation speed degradation of superconducting magnetic bearing", Physica C 412-414, pp. 789-794, 2004

[8] K. Demachi, I. Masaie, T. Ichihara, and M. Kita, "Rotation speed degradation of superconducting magnetic bearing made of unsymmetrical shaped YBCO bulks", Physica C 426-431, pp.826-833, 2005

[9] Y. H. Han, J. R. Hull, S. C. Han, N. H. Jeong, T. H. Sung, and K. S. No, "Design and characteristics of a superconductor bearing", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 2249-2252, 2005

[10] T. Coombs, A. M. Campbell, R. Storey, and R. Weller, "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 968-971, 1999

#### 저 자 소 개



##### 이 정 필 (李 丁 必)

1971년 8월 19일생. 1997년 동아대 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2005년~현재 한전 전력연구원 연구원

Tel : 042-865-7538

Fax : 042-865-7804

E-mail : jplee@kepri.re.kr



##### 한 영 희 (韓 榮 熙)

1965년 8월 1일생, 1988년 서울대학교 공대 무기재료학과 졸업, 1990년 동 대학원 무기재료학과 졸업(공학석사) 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-7532

Fax : 042-865-7804

E-mail : yhhan@kepri.re.kr



**정 세 용 (丁世庸)**

1978년 10월 17일 생. 2003년 연세대학교 기계공학과 졸업. 2005년 동대학원 기계공학과 졸업(석사). 2005년~현재 한전전력연구원 연구원

Tel : 042-865-7548

Fax : 042-865-7804

E-mail : shammon@kepri.re.kr



**정 년 호 (鄭年縞)**

1962년 11월 26일생, 1990년 고려대학교 화학과 졸업, 1997년 고려대학교 환경공학과(공학석사), 1990년 한국전력공사, 1993년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-7533

Fax : 042-865-7804

E-mail : nhjeong@kepri.re.kr



**한 상 철 (韓相哲)**

1966년 3월 26일생 1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사) 현재 한전전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-7531

Fax : 042-865-7804

E-mail : schan@kepri.re.kr



**성 태 현 (成台鉉)**

1959년 10월 9일생 1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사), 1991-92년 ISTEK 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc. 현재 한전전력연구원 수석연구원

Tel : 042-865-7530

Fax : 042-865-7804

E-mail : sung@kepri.re.kr