

후프 에너지 저장장치 개발 및 성능 실험¹⁾

한승호, 이관철, 김근수, 최윤희, 정기형, 문태선*, 조창호*
서울대학교 원자핵공학과, 한국 중공업 기술연구원

Development and Performing Test of Hoop Energy Storage System (HESS)

Seung-Ho Han, Kwan-chul Lee, Keun-su Kim, Yoon-Ho Choi,
Tae-Sun Moon* and Chang-Ho Cho*
Dept. of Nuclear Eng., Seoul National Univ.
RCERT, HANJUNG*

1. 서론

이땅에 근대화, 산업화가 시작되면서 전력 수요량은 계속 증가 일로를 걷고 있다. 최근에 IMF의 영향으로 전력수요의 증가세가 주춤한 것은 사실이나 점차 회복기에 들고 있는 우리 경제 사정을 감안할 때 그 수요가 계속 증가할 것임은 명약관화하다. 또한 전력 수요의 분포가 겨울보다는 여름에, 야간보다는 주간에 집중하는 전력수요의 편중현상도 뚜렷해지고 있다. 따라서 이러한 전력수요의 특성에 맞추어 전력공급계통도 발전용량을 증가시켜 나가야 한다. 항상 최대수요량을 염두에 두고 예비전력까지 고려해야 하므로 설비비 부담이 과중하다. 그리고 현

재 전력생산의 40%를 원자력이 담당하고 있고 현재 10여기 이상을 더 건설할 계획으로 볼 때 원자력이 담당하는 전력 생산 비율은 더욱 더 증가할 것이다. 원자력 발전의 특성상 전력수요의 편중에 따라 비교적 짧은 시간에 발전용량을 증가시키고 감소시키는 것은 원자로의 안전에 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 첨두 부하를 담당하는 화력발전이나 수력 발전이 필요하다. 이런 상황에서 시간에 따른 전력수요의 차를 이용하여 잉여 전기에너지를 다른 에너지로 변환하여 저장한 후 전력 수요가 침투기에 도달할 때 다시 전기에너지를 변환하는 전력 부하의 평준화를 기하는 에너지 저장은 발전소 건설비 절약면에서 잉여 전기에너지의 낭비를 막는 측면에서 이점이 있어 많은 연구가 행해졌다.

1) 이 연구는 (주)한국중공업의 지원으로 이루어졌다.

현재 전력 부하의 평준화를 담당하는 에너지

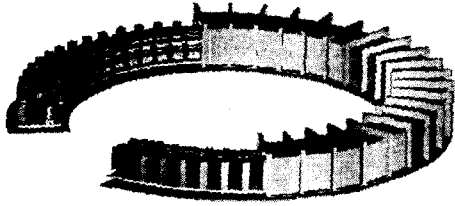


Fig. 1. Schematic Drawing Of HESS

지 저장장치는 양수발전, 플라이휠, 화학전지 등이 있다. 이 중에서 양수발전이 많이 이용되고 있다. 그러나 양수 발전은 에너지 변환 효율이 낮고 댐을 2개를 건설해야 하므로 주변환경에 영향을 미친다는 단점이 있다. 후프에너지저장장치(Hoop Energy Storage System, HESS)는 양수 발전의 이러한 단점을 개선하기 위해 개발한 장치이다. 기본적인 원리는 플라이휠 에너지 저장장치와 유사하여 야간의 전기에너지로 회전체를 돌려 운동에너지 형태로 변환하여 저장한 후 전력 수요가 최대에 도달한 때 발전을 하여 다시 전기에너지로 변환해서 전력을 공급하는 것이다. 에너지 저장밀도와 변환효율이 높아 소형화를 기할 수 있고 인근 환경에 거의 영향을 미치지 않는다.

플라이휠 에너지 저장장치와 본 장치를 비교하면 주야간 전력수요의 차이를 해결하기 위한 것을 목표로 한 대용량 에너지 저장장치이고, 회전체의 회전진폭을 제어하는 지지부가 기계적 접촉의 볼베어링 대신 자기 베어링으로 구성되어 가찰로 인한 에너지 손실을 줄일 수 있고 영구자석이 주지지 베어링이 되고 제어용으로 보조 전자석 자기 베어링이 사용되어 자기 베어링의 구동에 소비되는 에너지 손실도 대폭 줄일 수 있다는 점이다. 또한 에너지 저장밀도에 관련된 파라미터인 형상인자(shape factor)를 최대로 하기 위하여 회전자에 축이 없는 후프 형태라는 것이다.

후프에너지 저장장치의 구성요소는 ① 고속회전, 높은 에너지 저장밀도를 위한 탄소섬유복합재(carbon fiber composite) 회전체, ② 회전체의 지지부 접촉 마찰로 인한 에너지 손실을 줄이기 위한 자기 베어링/능동적 제어부, ③ HESS 구동 및 발전을 위한 모터/발전기, ④ 높은 효율의 에너지 입출력 제어부, ⑤ 공기 마찰로 인한 에너지 손실을 줄이기 위한 진공 펌프 및 진공용기이다.

각 구성요소를 살펴보고 성능 시험을 논하고자 한다. 표 1에 HESS의 기본적인 파라미터를 수록하였다.

Total Stored Energy	600 MJ
Power	70 kW
Weight	3.7 Ton
Energy Density	162 kJ/kg
Radius	3 m
Rotating Speed	1874 RPM

Table 1. Parameters of HESS

2. 회전체

HESS와 같이 전기에너지를 운동에너지로 변환해서 저장하는 장치에서 저장할 수 있는 최대 에너지의 양은 회전체에 달려 있다. 다시 말하면 단위 질량 당 저장할 수 있는 에너지를 나타내는 에너지 밀도 공식은 다음과 같다.

$$E = K \frac{\sigma}{\rho} \quad (1)$$

에너지 저장밀도를 높이기 위해서 형상인자 K와 응력과 밀도의 비 (σ/ρ)를 높여야 한다. 본 연구에서 탄소복합재료를 이용해서 인장강도를 높였을 뿐만 아니라 밀도 또한 낮출 수 있었다. 복합재로 구성된 회전체로서 최대의 형상인자를 얻기 위해 회전체의

Fiber (T700)	Tensile Strength	4700 Mpa
	Tensile Modulus	230 Gpa
	Elongation	2.1 %
	Density	1.8 g/cm ³
Resin (EH84) Low Viscosity High Flow Low Exothermic Good Surface	Tensile Strength	55 Mpa
	Tensile Modulus	9.0 Gpa
	Elongation	2.1 %
	Density	1.2 g/cm ³
Prepreg	Maximum Service Temperature	80-90 C
	Tensile Strength	2646 Mpa
	Tensile Modulus	127 Gpa
	Tensile Strength (perpendicular direction)	68 Mpa
	Tensile Modulus (perpendicular direction)	8.8 Gpa
	Elongation	1.7 %
	Elongation (perpendicular direction)	1.1 %

Table2. Properties of Carbon Prepreg

형태를 후프형태로 만들었다. 재료 측면에서 steel 합금에 비해 σ/ρ 가 10배 이상 우수한 탄소섬유를 채택하였다. 이 중에서 상용화에 적합한 가격과 특성을 지닌 Toray사의 T700등급을 선택하였다. 표 2에 탄소복합프리프레그(carbon composite prepreg)의 섬유와 수지(resin) 그리고 프리프레그의 특성을 도시하였다. 이같이 선택한 재료로 외경 6m 상하 폭 300 mm, 반경방향 두께 240 mm의 복합재 구조를 감은 후 가압 가열 강화하는 방법을 채택하였다. 또한 수지(resin)의 발열에 위한 급속한 온도 상승과 강화도중의 수축에 의한 크래킹을 방지하기 위해 총 두께 240 mm를 3부분으로 나누어 강화하였다.

원심력에 의한 응력의 대부분은 원주 방향으로 작용하지만 일부는 반경방향으로도 작용한다. 원주 방향 응력과 반경방향의 응력의 비는 회전체 외경과 내경의 비와 원주 방향 모듈러스(modulus)의 반경방향 모듈러스

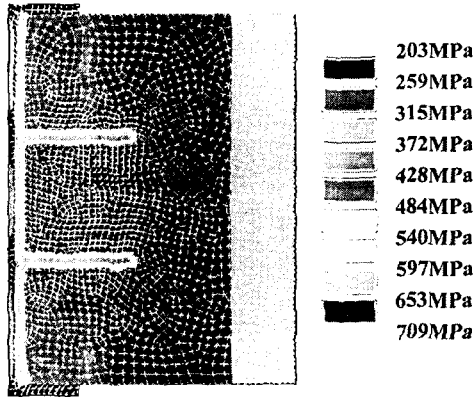


Fig. 2 Tensile Stress Distribution Calculated by ANSYS

(modulus)의 비의 함수이다. HESS의 경우 원주방향과 반경방향의 응력비는 300 대 1로 프리프레그의 한계 비인 39 대 1에 훨씬 못 미치는 수치로서, 반경방향으로 인한 복합재의 손상에 대한 여유도(margin)가 충분함을 알 수 있다. 그림 2는 회전체가 1900 rpm으로 회전할 때의 원주방향의 응력을 code ANSYS를 써서 계산한 것이다. SUS304 고정프레임(fixture frame)과 HEXCEL사의 탄소복합재료에 의한 구조이다.

3. 자기 베어링

HESS에서 회전체를 지지하기 위해 도입한 자기 베어링은 볼베어링에 비해 기계적 접촉으로 인한 마찰력이 없어 에너지 손실이 적을 뿐만 아니라 고속회전이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 회전체 지지를 주로 영구자석 자기 베어링이 담당하고 보조적으로 제어용의 전자자석 자기 베어링을 도입하여 자기 베어링에 소모되는 에너지를 줄였다. 영구자석은 보자력과 잔류자기가 큰 NdFeB 희토류 영구자석(NEOMAX N30H)을 사용한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 회

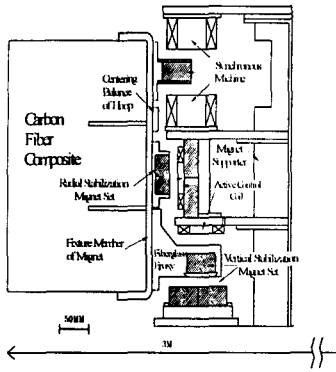


Fig. 3 Schematic Cross-Sectional View of HESS

전자의 부상력 발생을 위해 회전자에 1줄 고정자에 2줄 조를 이루고, 궤도 안정화를 위해 반경방향의 반발력 발생용 자석을 부상용과 마찬가지로 회전자에 1줄 고정자에 2줄씩 조를 이루어 장착하였다.

자기 베어링의 지지강성을 조사하기 위해 영구자석 간의 반발력을 계산한 후 선형화된 지지강성을 계산하면 된다. 영구자석간의 자기력 계산은 다음과 같다. 먼저 두 영구자석 사이에 작용하는 반발력은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{m} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (1)$$

$$\mathbf{m} = \int \mathbf{M} \, dv$$

\mathbf{B} : magnetic field induction

영구자석의 자속밀도를 해석적으로 풀기는 어려우므로 CODE OPERA를 이용해서 각 자석을 시뮬(simulation)하여 각 점에서 자기장을 구한 후 그림 3과 같이 위쪽 자석의 윗면 2와 아랫면 1에 균일한 표면극(surface pole)이 분포한다고 하면 아래 식과 같이 이산화 한 후 계산하였다.

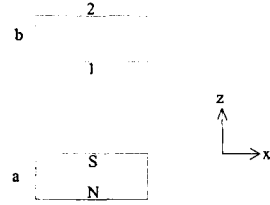


Fig. 4 Surface Pole Approximation

$$\vec{F}_b = M \left[\int_{S2} \vec{B}_b \, ds - \int_{S1} \vec{B}_b \, ds \right] = M \Delta x \Delta y \left[\sum_{S2} \vec{B}_b(x, y, z) - \sum_{S1} \vec{B}_b(x, y, z) \right] \quad (2)$$

M_b - magnetization of magnet b
 s - magnetic surface area

각 자석간의 반발력을 계산하여 HESS의 부상력과 궤도 자석의 반발력을 계산할 수 있다. 이로부터 선형화된 지지강성을 구할 수 있다.

$$k \approx \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{\text{operating point}} \quad (3)$$

여기서 부상자석과 궤도자석의 지지강성을 계산한 결과 부상용 자기 베어링의 지지강성은 298.7 kN/m가 되고, 궤도 자석은 -116.5 kN/m가 된다. 즉 궤도 자석이 음의 지지강성을 갖는 데, 이것은 회전 안정성(rotational stability) 측면에서 반드시 피해야 하므로 부가적으로 제어용의 전자석 자기 베어링을 설치해야 한다. 본 연구에서 이러한 음의 지지강성을 보상하기 위해 고정자에 90° 간격으로 전자석 코일을 배치하였다. 전자석 자기 베어링의 지지강성을 계산하기 위해 전자석에서 발생하는 자속밀도를 벡터 포텐셜을 구한 후 curl을 취해서 구한다.

각 수직 성분과 수평성분의 자속밀도는 다음과 같다.

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{-1/2}^{1/2} x \frac{z-z'}{[(a+x)^2+(z-z')^2]^{1/2}} \left[\frac{a^2+x^2+(z-z')^2}{(a-x)^2+(z-z')^2} E(k) - K(k) \right] dz' \quad (4)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{1}{[(a+x)^2+(z-z')^2]^{1/2}} \left[\frac{a^2-x^2-(z-z')^2}{(a-x)^2+(z-z')^2} E(k) + K(k) \right] dz' \quad (5)$$

I = current per unit length
a = solenoid cross sectional area
K(k), E(k) = Elliptic integral

이를 이용해 앞의 식에 따라 반발력을 계산하고 전류 지지강성을 구하면 130 N/A가 된다. 이렇게 구해진 지지강성으로 영구자석의 음의 지지강성을 상쇄할 수 있는 가를 알아보기 위해 시뮬(simulation)한 결과 초기조건 2 mm의 섭동(perturbation)이 주어졌을 때 0.5초 이내에 병진 진폭(translational amplitude)가 0.3 mm 이내로 제어됨을 알 수 있다. 그림 5에 그 결과를 나타내었다.

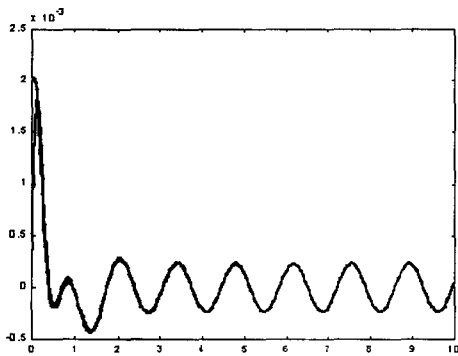


Fig. 5 Translational amplitude of rotor in case of active control

3. 파워 변환 실험

HESS의 에너지 변환장치인 모터/발전기는 희토류 자석(NdFeB)과 고정자 코일로 구성된 브러시없는 직류 기계(Brushless DC Machine)이다. 사용된 coil은 가로, 세로 57mm, 88 mm의 243개가 u, v, w 삼상을 갖고 두쌍으로 배열되어 162극을 형성하고 있다. 그림 6에서 권선방법을 변화시켜 가며 측정된 파워 변환 실험의 결과이다. 여기서 회전속도가 증가함에 따라 마찰이 증가하고 권선배열을 바꿈으로써 모터의 파워 손실을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 7에서는 HESS를 실제 가동에 들어 갔을 때 궤도 방향으로의 회전 진폭을 나타낸 그림이다.

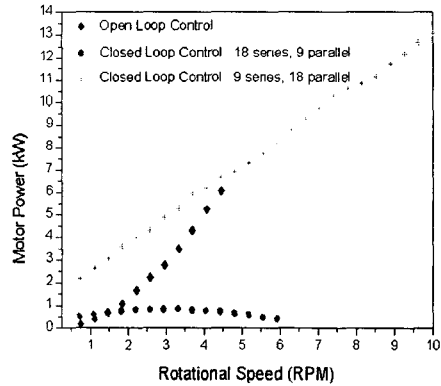


Fig. 6 Result of Power Conversion Experiment

4. 결론

후프 에너지 저장장치 개발사업에 의하여 공학적 실증을 위한 600 MJ급 에너지 저장장치를 설계 제작하였다. OPERA code를 이용하여 NdFeB영구자석의 부상력을 계산하여 3.7 ton의 회전자를 자기부상시키는

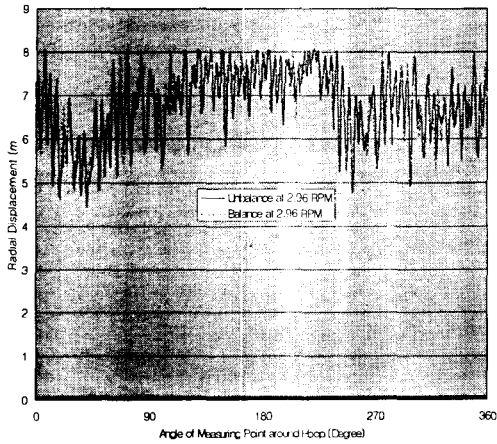


Fig. 7 Oscillation Pattern of Hoop Rotation

NdFeB 영구자석을 조립하였다. 높은 에너지 저장밀도를 갖기 위한 회전자의 구조체로서 직경 6m의 탄소 섬유 프리프레그의 권선 및 경화를 수행하였다. 현재 최고속도 10 rpm 저장에너지 17.1 kJ로써 후프에너지 저장장치 개발의 2단계 상용화를 위해서는 안정화 제어를 더욱 보완해야 한다.

5.참고문헌

1. Kwan-Chul Lee, Kie-Hyung Chung, Dong-Il Kim and Chang-Ho Cho, Conceptual design of a hoop energy storage system, *J. Appl. Phys.* 81 (8), pp 4269-4271, 15 April 1997
2. D. J. Craik, *Magnetism* (Wiley, New York, 1995).
3. G. Genta, *Kinetic energy storage* (Butterworth, London, 1985).

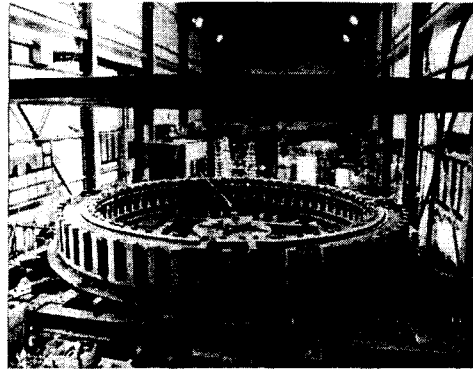


Fig. 8 Photograph of Hoop energy Storage System