

## HESS(Hoop Energy Storage System)에서의 안정화 조건(stabilization condition) 과 공심코일실험을 통한 가능한 유효 출력의 계산

오범환, 조수범, 김동일  
인하대학교 전자재료공학과

이관철, 정기형  
서울 대학교 원자핵공학과

### 요 약

관성 에너지 저장 장치인 HESS (Hoop Energy Storage System)의 안정적인 운용을 위해 가장 중요한 자기 반발력하에서의 안정화 조건을 dipole approximation 을 이용하여 계산하였다. 또한 고주파 입출력을 고려하여 공심코일을 이용한 자기유도 실험을 통하여 HESS 에 있어서 가능한 출력을 예측하여 보았다.

### HESS (Hoop Energy Storage System)

HESS 는 전기적인 에너지를 Hoop 의 기계적인 회전 에너지로 전환하여 저장하였다가 필요시에 전기에너지로 다시 변환하여 사용하는 것을 목적으로 하는 에너지 저장 장치이다.[1] HESS 는 영구자석 사이의 강한 반발력을 이용하여 회전체를 자기 부상시키며 이는 기존에 연구되었던 자기 부상 방식과는 다른 방식을 취하고 있으며[2-4], 부상을 유지하기 위한 별도의 에너지 공급이 필요하지 않다는 장점을 지닌다. HESS 는 플라이휠 에너지 저장 장치에 비해 베어링을 사용하지 않고 영구자석에 의한 자기 부상력을 이용하므로 기계적 마찰에 의한 손실을 줄일 수 있다는 장점도 있다. 반면 HESS 는 회전을 위한 고정된 회전축이 없으므로 자기 반발력하에서 안정적인 회전 궤도를 위한 Hoop 의 안정화 조건과 이와 관련된 제반 기술의 확립이 본 장치의 효과적인 운용을 위해서 해결해야 할 과제이다. 특히 HESS 의 운용중 예상되는 물리적 제반 문제 가운데 고속으로 회전하는 hoop 의 표면 공기마찰은 1 ton 가량의 중량을 지닌 HESS 의 경우에는 수 Wh 정도의 손실로서 무시 가능한 크기였고 실제로는  $10^3$  torr 이하의 압력에서 운영되므로 극히 미미한 영향을 줄 것이라고 계산되었다. 또한 영구자석의 배열에 따른 비균일성에 의해 야기되는 섭동(perturbation)은 한계 회전수(약 57 rpm) 이하에서

불안정하고 그 이상의 회전을 하는 경우 안정된 회전상태를 유지할 것으로 계산되었는데 HESS 에서 hoop 는 400~2000 rpm 의 회전수 범위에서 운용할 예정이므로 이는 문제되지 않는다. 따라서 HESS 에서 가장 중요한 문제는 base 자석과 hoop 자석 사이에서의 자기반발력하에서 안정화 조건을 찾는 것인데, 본 연구에서는 dipole approximation 으로 hoop 의 안정화 조건을 계산하였다. 이로부터 base 의 이중 hoop 배열된 영구자석들로부터는 수직방향의 안정적인 복원력을 얻고 측면의 이중 hoop 배열된 영구자석들로부터는 수평방향의 안정성을 얻어내는 모델을 Fig.1 과 같이 제시하였다. 이와 더불어 고주파 입출력 조건을 고려하여 공심코일을 이용한 자기유도 실험을 통하여 HESS 에 있어서 가능한 출력을 예측하여 보았다.

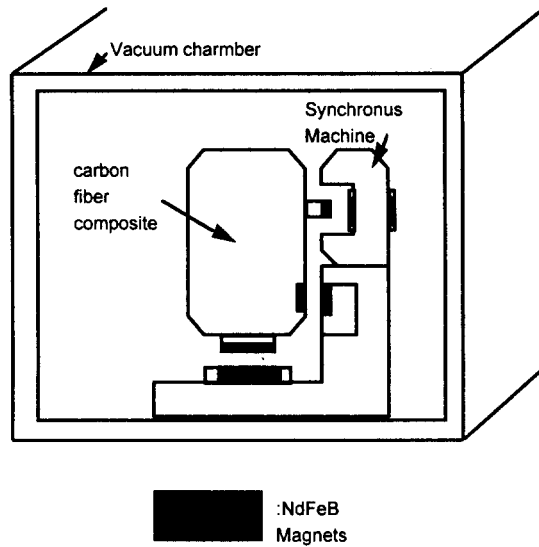


Fig.1 Hess 의 기본 layout

### 안정화 조건의 계산과 Simulation 결과

HESS 에서 사용되는 실제 영구자석은 dipole approximation 을 이용하여 simple dipole 로 근사 시킬 수 있으며, 반발력을 Fig.2 와 같이 단순화하여 도식하였다. 그때의 계산된 magnetic potential energy ( $U_m$ ),  $F_x$ ,  $F_y$  는 식(1~3)와 같고 이를 Fig.3 에 graph 로 나타내었다.  $x=0$  에서  $z$  를 줄여 나감에 따라 의외로  $z \sim 1.1$  의 근방에서  $F_z$  가 척력에서 인력으로 바뀌는 것도 확인할 수 있고,  $Z$  방향으로의 안정적인 복원력을 얻기 위해서는 부상높이  $Z$  는 1.5 보다 커야 하며,  $F_z$  는 중력  $-mg$  의 크기보다 커야 한다.

$$U_m = \frac{\mu_0 V^2 M^2}{4\pi} \left\{ \left( \frac{3z^2}{((x-1)^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1}{((x-1)^2 + z^2)^{3/2}} \right) + \left( \frac{3z^2}{((x+1)^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1}{((x+1)^2 + z^2)^{3/2}} \right) \right\} \quad (1)$$

$$F_x = \frac{3\mu_0 V^2 M^2}{4\pi} \left\{ \frac{4z^2 - (x-1)^2}{((x-1)^2 + z^2)^{7/2}} \cdot (x-1) + \frac{4z^2 - (x+1)^2}{((x+1)^2 + z^2)^{7/2}} \cdot (x+1) \right\} \quad (2)$$

$$F_z = \frac{3\mu_0 V^2 M^2}{4\pi} \left\{ \frac{2z^2 - 3(x-1)^2}{((x-1)^2 + z^2)^{7/2}} \cdot z + \frac{2z^2 - 3(x+1)^2}{((x+1)^2 + z^2)^{7/2}} \cdot z \right\} \quad (3)$$

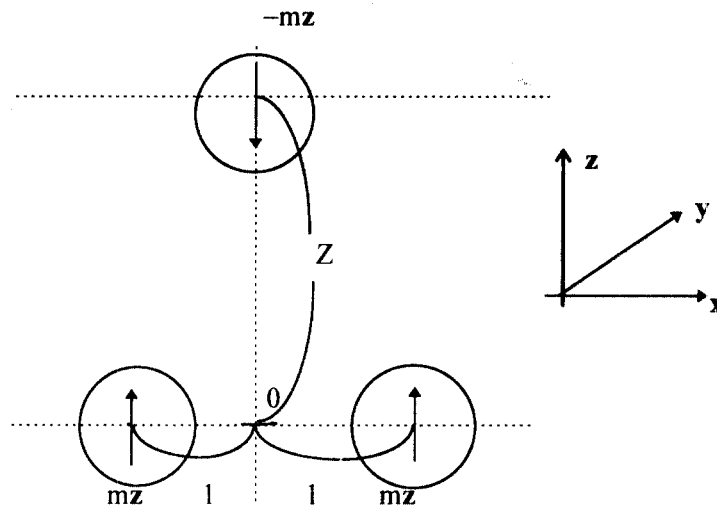


Fig.2 magnetic dipole 로 단순화 시킨 hoop magnet 과 base magnet

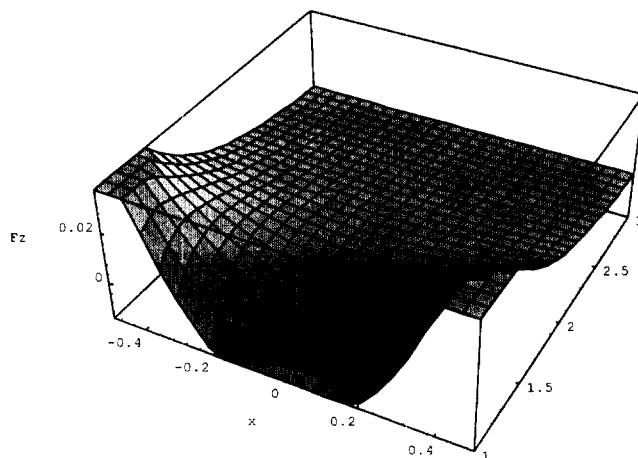


Fig.3.  $F_z$  의 Graph

공심코일을 사용하여 예상한 HESS의 출력

영구자석이 고정되어 있는 반경 12cm 인 원판을 여러가지 속도로 회전시키고 자석과 공심코일의 간격을 변화시켜 가면서 코일에 유도되는 전압의 크기를 측정하였다.

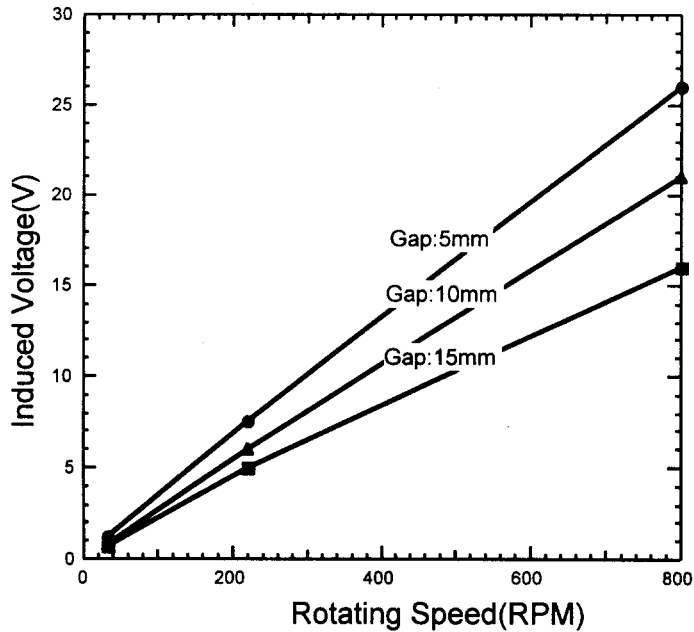


Fig.4. 공심코일을 사용한 실험 결과

Fig.4 에 보이듯이 사용된 공심코일의 규격이 5x5x5 (cm<sup>3</sup>) 임을 고려할 때, Gap의 변화에 따른 유효 자기장의 변화는 유도 전압의 변화를 잘 설명해 주었고, Rotating Speed가 증가할수록 유도되는 전압의 크기는 정비례하여 증가함을 알 수 있었다. Gap이 5 mm 이고 유효 자장의 세기가 0.1 T 이며 800 rpm 로 회전하는 경우 electromagnetic induction law ( $\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = NB\omega$ ) 에 따라 예상되는 유도기전력은  $\epsilon = 25.1V$  로 계산되는데 실제 측정되었던 26V 와 거의 일치하였다. 위의 실험에서는 반경이 12cm 인 원판을 사용하였으나 실제 HESS의 경우 반경이 2.8m 인 것을 감안하면 2000 rpm 에서 1205 V, 400 rpm 에서 241 V가 예상된다. 약간 상승된 고전압출력 조건을 위하여 700 turn 으로 늘리는 경우의 예상되는 출력은 아래와 같다.

회전수 (rpm)	주파수 (kHz)	임피던스 ( $\Omega$ )	전압 (V)	전류 (A)	출력 (W)
2000	10	730	1600	2.2	3520
400	2	146	320	2.2	704

HESS 는 전체에 168 x 2 개의 코일이 설치되므로 회전수 2000 rpm 의 최대 저장상태에서부터 에너지를 방출하여 96%의 에너지가 방출된 400 rpm 에서도  $704 \times 168 \times 2 = 236 \text{ kW}$  의 출력이 보장된다.

### 결 론

수직 방향의 안정적인 복원력을 획득 할 수 있고 측면 방향의 안정성이 가미된 Fig.1 과 같은 구조가 현재 선택된 안정화된 모델이며, HESS 의 제작에 있어 hoop 의 부상 높이는 안정적인 복원력을 얻기 위한 가장 중요한 변수이며 이는 곧바로 hoop 의 무게와 부상 간격 또는 높이를 결정하는 제한 조건이 된다. 공심코일을 이용한 유도 전압 실험을 통하여 실제 HESS 의 운용시에 가능한 발생전압의 크기를 추정하였고, 계산 결과 HESS 는 400 rpm 의 낮은 회전 수에서도 약 240 kW 의 출력을 낼 수 있을 것으로 예상되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Kwang Hyun Paek and Kie Hyung Chung, "Hoop Energy Storage System(HESS) for Electric Power Utility," IEEE Trans. Magn., submitted, 1996.
- [2] Ing-Yann Albert Wang and Ilene Busch-Vishniac, "A New Repulsive Magnetic Levitation Approach Using Permanent Magnets and Air-Core Electromagnets," IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 4, pp. 1422-1432, 1994.
- [3] J.L. He and D.M. Rote, "Double-row loop-coil configuration for EDS Maglev suspension, guidance, and electromagnetic guideway directional switching," IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 6, pp. 2956-2958, 1993.
- [4] O. Tsukamoto, K. Yasuda, J.Z. Chen, "A new magnetic levitation system with AC magnets," IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 2, pp.1497-1500, 1988.