

Improving Superconductor Levitation for Seismic Isolation Device by Applying Eddy Current Effect

Hyungkwan Jang, Daniel Song, Asif Mahmood, Sebin Kim, Chanhoo Yang, Tae-Hyun Sung*

*Department of Electrical Engineering, Hanyang University,
17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Republic of Korea*

(Received 1 March 2011 revised or reviewed 24 March 2011 accepted 29 March 2011)

와상전류를 응용하여 지진 충격흡수 장치를 위한 초전도 자기부상 안정화 향상

장형관, 송준후, 아시프 마흐무드, 김세빈, 양찬호, 성태현*

Abstract

Pinning force is the mechanism between a superconductor and a permanent magnet and it provides a stable levitation. However, when external force greater than the pinning force such as the earthquake exerts, the levitated object may lose the levitating characteristic. In order to achieve more stabilized levitation, the copper plate was inserted in between a superconductor and permanent magnets. And by applying the eddy current effect caused from the relationship between a copper plate and permanent magnets, more stabilized levitation can be established.

In this study, an optimized design was found based on various configurations of permanent magnet's polarity, thickness and area of copper plate, and the gap distance between copper plate and permanent magnet. As results, higher eddy current value was obtained at where the change of polarity exists in permanent magnet configuration, and the highest eddy current value was observed at the copper plate thickness of 5 mm and the area of 80 mm x 80 mm. From the resulted optimized conditions above, which are 7 mm gap distance between a superconductor and permanent magnets and 80 mm x 80 mm x 5 mm dimension of a copper plate, the stiffness value was 65 % increased comparing to without any copper plate insertion.

Keywords : Superconductor bulk, Permanent magnet, Copper plate, Eddy current, Stabilized levitation.

1. Introduction

최근 전 세계적으로 강한 지진이 발생하여

물적 및 인적 손실을 크게 겪고있다. 특히 값 비싼 문화재, 전기기기 장비들도 지진에 그대로 노출되어 있다. 본 논문에서는 지진 및 외부 충격으로부터 문화재 및 전기기기를 초전도 자기부상을 이용하여 보호하고자 한다.

초전도 벌크 (superconductor bulk)와 영구자석

*Corresponding author. Fax : +82 2 2220 4317

e-mail : sungth@hanyang.ac.kr

을 이용한 초전도 자기부상은 초전도 벌크의 pinning force와 영구자석의 자속밀도 (B), 초전도 벌크와 영구자석 사이의 간격에 의존한다. 초전도 자기부상 상태에서 외부 충격이 가해지면 부상되어 있는 영구자석이 불안정해진다. 강한 외부충격에도 안정적인 초전도 자기부상을 위해서는 초전도 벌크의 pinning 특성을 높이는 방법이 있다. 하지만 본 논문에서는 자기부상 안정화를 위해 기계적 관점으로부터 검토되었다. 실험방법은 영구자석과 구리판 (copper plate)를 이용하여 영구자석이 구리판을 지나갈 때 발생하는 와상전류 (eddy current)를 초전도 자기부상에 적용한다. 댐핑 (damping) 효과 향상을 위해 초전도 자기부상 열차 및 초전도 베어링에 구리판을 적용하여 실험한 사례 [1-3]가 있다. 또한, 지진 및 진동에 의한 초전도 자기부상 안전화를 위한 연구가 진행되고 있다 [4-6]. 일본의 한 대학에서도 초전도 자기부상을 이용한 지진충격흡수 장치를 연구 개발 중에 있으며, 시스템 구조가 3층으로 되어있다 [4]. 본 실험에서는 지진강도 6.5에 해당하는 조건을 묘사하기 위해 가진기를 이용하여 4 Hz, ±16.5 mm로 가진하였다 [4]. 또한, 와상전류 효과를 향상시킬 수 있는 방법으로, 영구자석 배열방법, 구리판의 두께, 넓이, 영구자석과 구리판 사이의 간격을 최적화시킨 후 초전도 자기부상에 직접 적용하였다.

2. Experimental

와상전류 및 stiffness 측정은 Fig. 1에서와 같이 로드셀을 사용하였다. 임계온도가 92 K인 $Y_1B_2C_3O_{7-x}$ bulk (40 mm x 40 mm x 15 mm)를 사용하였다. 영구자석은 0.4 T의 자속밀도를 갖는 원형, 링형 (round type), 사각영구자석 배열 (2가지)로 4가지 형태가 사용되었으며 Fig. 2 (top view of permanent magnet)에 나타내었다. Fig. 2(a)와 (b)는 20 mm x 40 mm x 10 mm의 자석이 배열되었으며, Fig. 2(c)는 직경이 40 mm, Fig. 2(d)는 외경이 40 mm, 내경이 12 mm인 영구자석이다. 균인한 자속분포를 위해 영구자석 윗면에 철판 2 mm를 붙여 실험하였다 [7]. Fig. 2(a)는 가진기가 움직이는 방향으로 자속의 변화가 생

기고, Fig. 2(b)는 가진기가 움직이는 방향의 수직방향으로 자속이 변화한다.

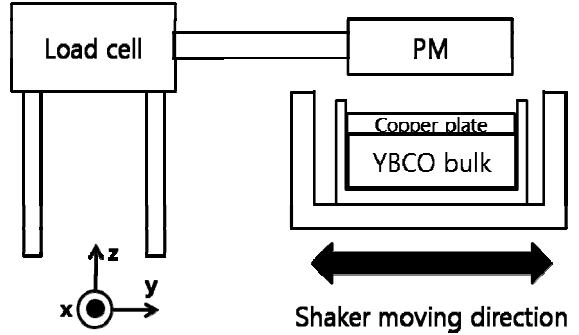


Fig. 1. Schematic diagram of experiments.

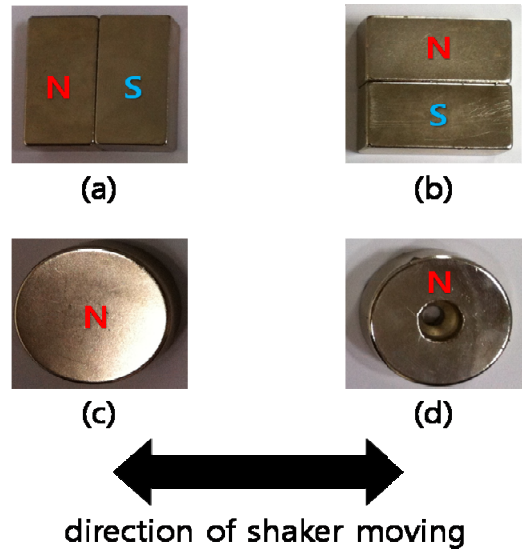


Fig. 2. 영구자석 배열 방법 (a) 가진기가 움직이는 방향으로 자속이 변하는 배열, (b) 가진기가 움직이는 수직 방향으로 자속이 변하는 배열, (c) 원형 영구자석, (d) 링형 (round type) 영구자석.

본 실험에서 사용된 가진기는 주파수 및 변위로 제어가 가능하며, 반드시 주어진 조건에 맞추어 가진이 된다. 지진 6.5강도를 묘사하기 위해 가진기 (shaker, ㈜나노모션테크놀로지)가 y방향으로 4 Hz, ±16.5 mm로 움직인다. 지진 6.5는 Tsuboi 공식을 이용하였다.

$$M = 1.73 \log D + \log A - 0.3 \quad (1)$$

M : 규모로써 단위가 없으며, 소수 1자리까지 계산
 D : 진앙거리 (단위 : km)
 A : $\sqrt{(MN^2 + ME^2)} \times 1000/\text{배율}$, 수평 2성분 진폭의 합성값 (MN : 남북방향 진폭, ME : 동서방향 진폭)
 (단, 지진계 배율은 3~5 Hz의 진동에 대하여 15,000배임)

실험순서는 영구자석의 배열과 구리판의 넓이, 두께를 최적화 하고, 영구자석과 구리판 사이의 간격을 최적화한다.

3. Results and discussion

3.1 와상 전류 (eddy current)

와상전류 측정을 위해 투자율이 진공 (CGS 단위계: 1)과 거의 비슷한 구리판 (CGS 단위계: 0.999991)을 사용하였다. 구리판을 선택한 이유는 가격이 저렴하면서 전도성 (conductivity of copper: $59.6 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$)이 우수하기 때문이다.

와상전류는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$I_{\text{eddy}} = \frac{\pi^2 B^2 d^2 f^2}{6\rho D} \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

B : magnetic flux density,
 d : thickness of copper plate,
 ρ : resistivity,
 σ : electrical conductivity,
 μ : magnetic permeability,
 D : penetration depth or skin depth

위 식에 따르면 와상전류는 자속밀도, 주파수, 구리판의 두께에 비례한다. 식 (2)에서, 주파수 (f)가 빠르면 와상전류는 향상되는 반면 식 (3)에서는 주파수가 클수록 침투깊이 (penetration depth)가 감소되어 와상전류가 향상되는 것을

식 (2)와 (3)을 통해서 알 수 있다. 즉, 자속변화 (f)가 많을수록 침투깊이가 감소되어 와상전류가 향상된다는 것이다.

본 논문에서는 식 (2)와 (3)을 기초로 하여 와상전류를 향상시킨 후 초전도 자기부상에 적용하여 stiffness를 향상시킬 수 있다.

3.2 영구자석 배열에 따른 와상전류 효과

80 mm x 80 mm x 2 mm의 구리판을 사용하여 영구자석 Fig. 2(a) to (d)를 사용하여 와상전류를 실험하였다. Fig. 3에서 보여주듯이 Fig. 2(a)의 와상전류 효과가 최대로 나타났다. Fig. 2(b), (c), (d)는 형태는 다르더라도 각 자석의 자속밀도가 같기 때문에 와상전류가 비슷하게 나오는 것을 확인하였다. 식 (2)와 (3)을 실험결과와 비교했을 때 자속변화가 있는 Fig. 2(a)의 영향이 크다는 것을 확인하였다.

Fig. 2(a)의 영구자석 배열을 가지고 구리판의 두께, 넓이, 영구자석과 구리판 사이의 간격 실험을 하도록 한다.

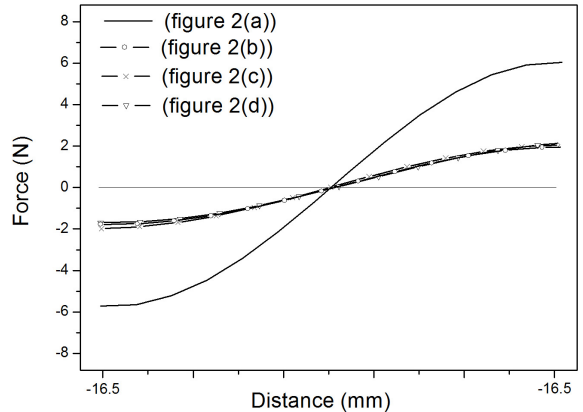


Fig. 3. 영구자석 배열 (Fig. 2의 영구자석 배열)에 따른 와상전류 효과.

3.3 구리판 두께에 따른 와상전류 효과

식 (2)에서 보여 주듯이, 구리판의 두께 (d)가 두꺼울수록 와상전류 효과는 크게 나타난다는 것을 예상할 수 있다. 하지만 무한정 두꺼운 구리판을 사용할 수 없기 때문에 포화 점 (saturation point)을 찾고자 한다.

Fig. 2(a)의 영구자석 배열을 구리판 두께에 따라서 변화하는 와상전류 효과를 측정하였다.

사용된 구리판의 넓이는 80 mm x 80 mm를 사용하였으며, 두께는 1 mm에서 6 mm까지 실험하였다. Fig. 4에서 보여주듯이 구리판 두께 5 mm와 6 mm에서 같은 와상전류가 측정된 것을 확인 할 수 있다. 즉, 지진강도 6.5에 해당하는 4 Hz, ±16.5 mm에서 구리판 두께 5 mm에서 와상전류가 포화되었다는 것을 확인할 수 있다.

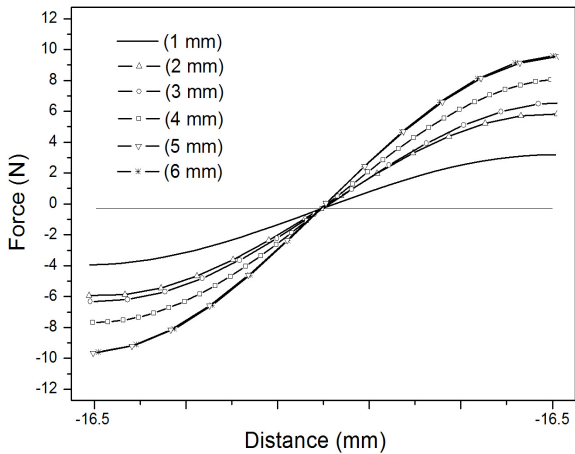


Fig. 4. 구리판 두께에 따른 와상전류 효과 (1 mm ~ 6 mm).

3.4 영구자석과 구리판 사이 간격에 따른 와상전류 효과

실험을 통해 영구자석 배열, 구리판의 두께를 최적화 시켰다. 식 (2)의 d에 따르면, 와상전류는 구리판으로 침투하는 자속량에 비례한다는 것을 알 수 있다. 즉, 영구자석과 구리판 사이의 간격이 멀어지면 구리판으로 침투하는 자속량을 적어질 것이다. 하지만 초전도 자기 부상을 하기 위해서는 gap이 존재하여야 한다. 외부충격에 의해 부상되어있는 영구자석이 흔들려서 초전도 벌크와 충돌 할 수 있는 점을 감안하여 간격은 최소 2 mm 이상 되어야 한다 [3].

Fig. 5에서 보여주듯이 영구자석과 구리판 사이의 간격이 1 mm일 때 가장 큰 와상전류 효과가 나타났으며, 간격이 멀어질수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 위에서 언급하였듯이 간격이 최소 2 mm 이상 되어야 하는 조건으로 간격을 2 mm로 선택하였다.

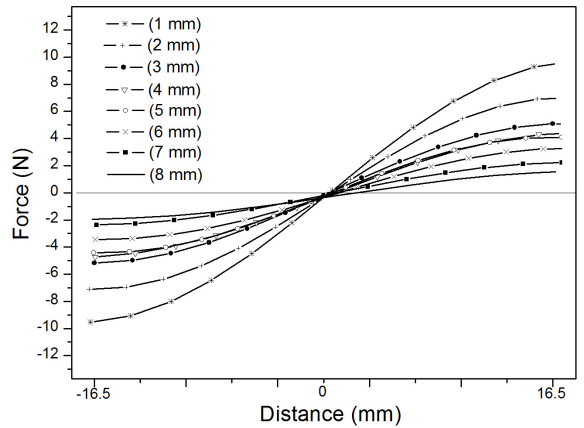


Fig. 5. 영구자석과 구리판 사이 간격에 따른 와상전류 효과.

3.5 구리판 넓이에 따른 와상전류 효과

와상전류는 영구자석과 구리판의 상호작용으로 발생하는 효과이다. 본 실험에서는 4 Hz, ±16.5 mm로 가진기를 움직이는데, 가진기가 움직일 때 구리판의 면적이 영구자석 면적보다 넓어야 영구자석의 자속선을 포함할 수 있다. 즉 56.5 mm의 길이를 갖는 구리판이 최대의 와상전류를 발생 시킬 수 있다고 생각할 수 있다. 하지만 구체적으로 고려해야 하는 부분이 자속선의 면적이 영구자석의 면적보다 넓다는 것이다. 즉, 영구자석의 길이 (40 mm)와 가진기가 움직이는 거리 (±16.5 mm) 보다 커야 한다.

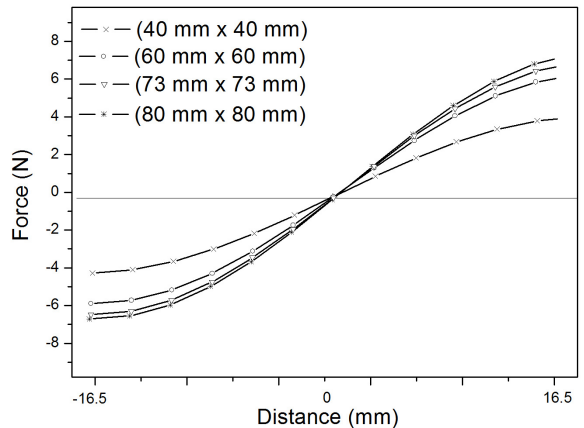


Fig. 6. 구리판 넓이에 따른 와상전류 효과 (구리판 두께는 5 mm).

Fig. 6에서 보여주듯이, 60 mm x 60 mm의 구리판은 최대의 와상전류를 발생시키지 못한다. 73 mm x 73 mm의 구리판에서 거의 포화된다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 구리판의 넓이가 자속선을 포함할 수 있는 넓이가 되어야 최대의 와상전류를 발생시킬 수 있다는 것이다.

3.5 초전도 벌크와 영구자석 사이의 간격에 따른 stiffness

영구자석의 배열방법, 구리판의 조건 (80 mm x 80 mm x 5mm), 영구자석과 구리판의 간격 2 mm가 최적화 되었다. 최적화된 조건을 초전도 자기부상에 적용하여 stiffness를 측정하고자 한다. 구리판을 초전도 벌크위에 강력접착제를 이용하여 접착 시킨 후 field-cooling을 하였다.

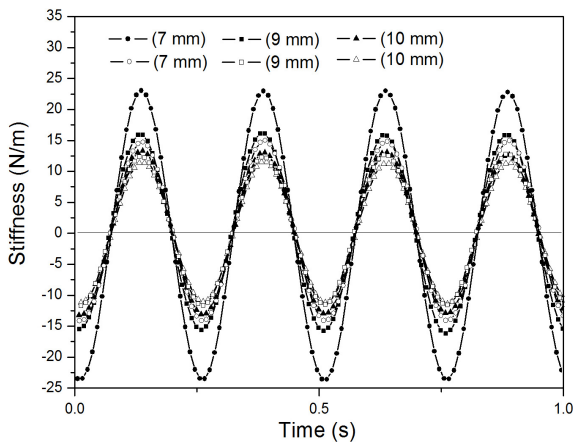


Fig. 7. 초전도 벌크와 영구자석 사이의 간격에 따른 stiffness. Open symbol: 구리판을 적용하여 stiffness 측정, Closed symbol: 구리판 없이 stiffness 측정.

초전도 벌크와 영구자석의 간격은 구리판의 두께 5 mm를 고려하여 7 mm, 9 mm, 10 mm로 조건을 정했다. 초전도 벌크와 영구자석 사이의 간격이 11 mm 이상이 되면 불안정한 자기부상으로 외부 충격이 있을 때 부상된 영구자석이 불안정한 현상을 확인하였다. Fig. 7에서 보여주듯이 구리판이 있을 때와 없을 때 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다. 초전도 벌크와 영구자석 사이의 간격이 9 mm일 때 구리판

이 없을 때는 ± 12.5 N/m, 구리판이 있을 때는 ± 17 N/m로 구리판을 적용하였을 때 36 % 향상되었으며, 초전도 벌크와 영구자석 사이의 간격이 10 mm일 때 구리판이 없을 때는 ± 11.8 N/m, 구리판이 있을 때는 ± 14 N/m로 구리판을 적용하였을 때 18.7 % 향상된 stiffness를 보여준다. 초전도 벌크와 영구자석의 간격이 7 mm일 때 구리판이 없을 때는 ± 14.6 N/m, 구리판이 있을 때는 ± 23 N/m로 약 65 % 향상된 stiffness 값을 측정하였다.

4. Conclusion

와상전류는 식 (2)와 (3)에 의해 자속밀도, 주파수 (자속변화), 구리판의 두께 등으로 결정된다. 본 실험에서는 지진강도 6.5에 해당하는 가진기 조건 4 Hz, 16.5 mm에서 와상전류 향상을 위해 영구자석 배열, 구리판의 두께 및 넓이, 영구자석과 구리판 간격을 최적화하였다. 최적화된 영구자석은 가진기가 움직이는 방향으로 자속변화를 갖는 영구자석 배열 (Fig. 2a)과 80 mm x 80 mm x 5 mm의 구리판에서 최대의 와상전류가 측정되었다. 위 조건을 초전도 자기부상에 적용하여 로드셀 (load cell)로 stiffness 측정결과, 초전도 벌크와 영구자석 사이가 7 mm (구리판 두께 5 mm 포함)에서 stiffness가 65 % 향상된 값을 보였다. 또한 초전도 벌크와 영구자석 사이가 9 mm와 10 mm에서는 각각 36%와 18.7 % 향상된 값을 보였다.

References

- [1] J. Zheng, Z. Deng, Y. Zhang, W. Wang, S. Wang, J. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 2148.
- [2] K. B. Ma, C. K. McMichael, M. A. Lamb, W. K. Chu, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 388.
- [3] W. Yang, Y. Liu, Z. Wen, X. Chen, Y. Duan, Supercond. Sci. Techno. 21 (2008) 1.
- [4] M. Tsuda, T. Kojima, T. Yagai, T. Hamajima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 2059.
- [5] H. Teshima, M. Tanaka, K. Miyamoto, K. Nohguchi, K. Hinata, Physica C 274 (1997) 17.

- [6] S. Sasaki, K. Shimada, T. Yagai, M. Tsuda, T. Hamajima, N. Kawai, K. Yasui, *Physica C* 470 (2010) 1791.
- [7] W. M. Yang, X. X. Chao, X. B. Bian, P. Liu, Y. Feng, P. X. Zhang, L. Zhou, *Supercond. Sci. Technol.* 16 (2003) 789.