

자기점성유체 댐퍼 코어의 최적화 설계를 위한 전자기장 해석

송준한¹, 손성완², 전종균^{1*}, 권영철¹, 마양수³

Electro-Magnetic Field Analysis for Optimal design of Magneto-Rheological Fluid Damper Core

June-Han Song¹, Sung-Wan Son², Chong-Keun Chun^{1*}, Young-Chul Kwon¹
and Yang-Soo Ma³

요약 외부에서 인가되는 전류의 세기에 따라 결합력의 세기가 달라지는 자기점성유체의 특성을 이용한 자기점성 유체 댐퍼는 유체의 결합력을 통해 전단력을 발생시켜 진동의 제어가 가능하다. 자기점성유체 댐퍼의 성능을 좌우 하는 코일 작동부의 최적화를 위해 유한요소해석을 이용해 코일 형상에 따른 전자기력의 성능비교를 실시하였다. 또한 고효율 댐퍼를 제작하기 위한 방법으로 다단의 코일 작동부를 가지는 댐퍼를 제안하였으며, 기존의 댐퍼와의 전자기 적 성능 비교를 통해 댐퍼의 성능 비교를 수행하고 제한된 조건에서 최대의 효과를 가질 수 있는 방안을 제시하고 그에 따른 전자기장 해석을 수행하였다.

Abstract The magneto-rheological fluid expresses different cohesiveness according to the strength of the external electric current. The magneto-rheological fluid damper, which uses such characteristics of the fluid, generates shear force due to the fluid's cohesiveness. The core can be said to determine the magneto-rheological fluid damper's performance. This study uses the finite element analysis to compare the performance of different electromagnetic forces, which are affected by the shapes of the coil, and thus to find the optimum design for the core. In addition, as a step to construct a high-efficient damper, we suggest a type of damper that can control multiple coils and compares the performance of this damper and that of the standard damper by comparing the performance of their electro-magnetic fields.

Key Words : Magneto-Rheological Fluid, Electro-Magnetic Field, Magnetic Flux Density, Core, Orifice

1. 서론

산업의 발달과 생활수준의 향상으로 소음과 진동에 대한 관심이 증대되고 기계의 고장을 미연에 방지하거나 기계 부품의 질적 향상을 위하여 진동 제어는 기계, 토목, 건축, 국방, 의료 등 다양한 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있다.

진동 제어의 한 방법으로 사용자가 원하는 성능을 발휘할 수 있도록 상황에 따른 제어가 가능한 스마트 유체인 자기점성유체(Magneto-Rheological Fluid)에 대한 연구가 대학 기관이나 연구소를 중심으로 가장 활발히 연구되고 있다[1-4].

본 연구에서는 인가되는 자기장의 세기에 따라 그 결합력을 달리하여 그에 상응하는 전단력을 발생시키는 자

기점성유체 댐퍼의 코일 작동부 설계 시 코일의 형상에 따른 자기장의 세기를 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 비교해보고 고효율의 댐퍼를 제작하기 위한 방안을 찾아보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 Magneto-Rheological Fluid

자기점성유체는 작동 유체와 직경 1~수십 μm 크기의 자기점성(Magneto-Rheological, MR)성질을 가지는 입자들로 이루어진 유체로서 자기장이 인가되지 않을 시에는 그림 1 (a)와 같은 뉴토니안(Newtonian)유체의 특성을 나타내며, 외부로부터 자기장이 인가되게 되면 그림 1

¹선문대학교 기계공학과

³한국폴리텍II 인천대학 컴퓨터응용기계학과

접수일 08년 09월 25일 수정일 08년 11월 28일

²알엠에스 시스템(주)

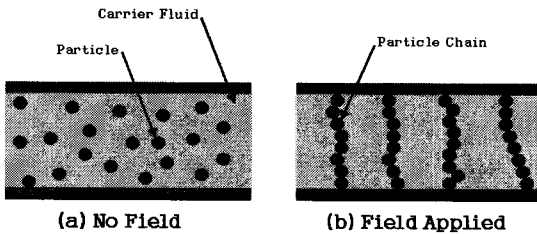
*교신저자 : 전종균(ckchun@sunmoon.ac.kr)

계재확정일 08년 12월 16일

(b)와 같이 자기장의 흐름 방향에 따라 입자들이 체인을 형성하게 되어 그로 인해 전단 응력을 발생시키는 빙햄(Bingham) 유체의 성질을 가진다.

빙햄 유체는 식 (1)과 같이 점성 μ 와 전단변형률 속도인 $\dot{\gamma}$ 에 의해 생기는 응력과 자기장 (H)의 함수형태로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_y(H) + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$



[그림 1] MR 유체의 거동 특성

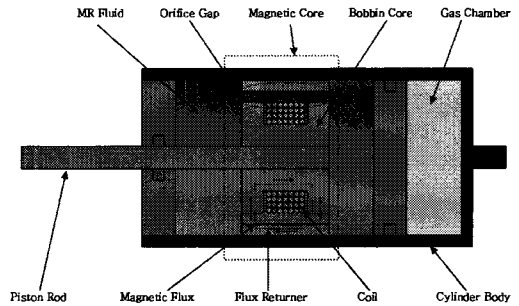
MR 유체는 작용되는 자기장에 대한 반응속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다. 자기장의 변화에 대한 응답시간(Response Time)은 보통 수 msec로 알려져 있다. 그러므로 실시간 제어가 가능하며 생산 및 장치의 동작시에 첨가될 수 있는 불순물의 영향이 적고 독성이 없어 어느 환경에서나 안전하다는 장점이 있다.

MR 유체의 항복 응력이 변화하는 메커니즘은 ER(Electro-Rheological, ER) 유체와 유사하고 자장과 전장이라는 점이 다를 뿐이다. 특히 발생하는 항복 응력의 크기에 관해서는 MR 유체가 20~50배 정도이고 고전압을 이용할 필요가 없는 점에서 MR 유체는 큰 장점을 가진다.

2.2 MR댐퍼의 작동 메커니즘

그림 2는 일반적인 MR 댐퍼의 구조를 나타내고 있다. MR 댐퍼는 크게 Cylinder Body, Magnetic Core 작동부, Piston Rod로 나눌 수 있다. Cylinder Body 내부는 MR 유체가 채워져 있으며 외부에서 힘이 가해질 경우 Piston Rod가 상하 또는 좌우로 운동하게 된다. Piston Rod의 운동이 발생하면 MR 유체는 Magnetic Core 작동부의 Orifice Gap을 통해 이동하게 된다. 댐퍼의 외부에서 자기장이 인가되게 되면 Magnetic Core의 Coil이 자화되고 그로 인해 자기장의 흐름이 형성된다. Coil에서 형성된 자기장은 Bobbin Core를 통해 Orifice Gap을 통과하게 되고 Flux Returner로 흘러가게 된다. 이와 같은 자기장의 흐름으로 Orifice Gap 사이로 이동하는 MR 유체들이 자

기장의 흐름 방향으로 Particle Chain을 형성하게 되고 그로 인해 유체의 점도를 변화시켜 전단력을 발생시킨다.



[그림 2] 일반적인 MR 댐퍼의 구조

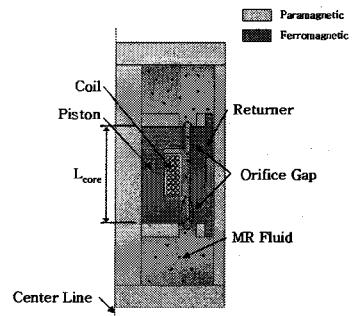
3. 전자기장 해석

3.1 전자기장 해석을 위한 모델링

MR 댐퍼의 형상 설계 시 인가되는 전류에 따른 댐퍼 내부에서의 자기장의 흐름, 자속 밀도 비교를 통한 MR 유체의 전단력 효과를 최대한 발휘 할 수 있는 Bobbin Core의 형상 설계를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS/Emag 2D 를 이용하여 코일로부터 발산되는 전자기장 해석을 수행하였다[5-6]. 전자기장 해석 시 사용한 각 자기회로의 물성특성은 계산의 편의를 위해 각 부분별로 동일한 물성치를 사용하였다.

본 연구에서 고려한 댐퍼는 그림 3과 같이 2차원 축대칭(2-D Axisymmetric) 형태이므로 유한요소해석을 위한 모델링 시 전체의 형상을 모델링하지 않고 단면의 1/2 부분에 대한 모델링을 실시하여 해석을 수행하였다.

MR 댐퍼의 해석을 위해 2차원 8절점을 갖는 전자기장 요소를 사용하였고 자기장의 형성을 위해 Voltage와 Current는 직접 입력하는 해석 방법을 사용하였다.



[그림 3] 일단 코일 작동부를 가지는 댐퍼의 유한요소해석을 위한 모델링

외부로부터 인가되는 전류가 DC 전류인 MR 댐퍼의 경우 전자기장 해석을 위해서 전류밀도(Current Density, JS)의 입력을 필요로 한다. 전자기장 해석 시 입력되는 전류밀도는 식 (2)와 같이 코일의 권선수(Number of turn, N), 전류(Current, I), 코일의 단면적(Coil Area, A)으로 계산되어 진다.

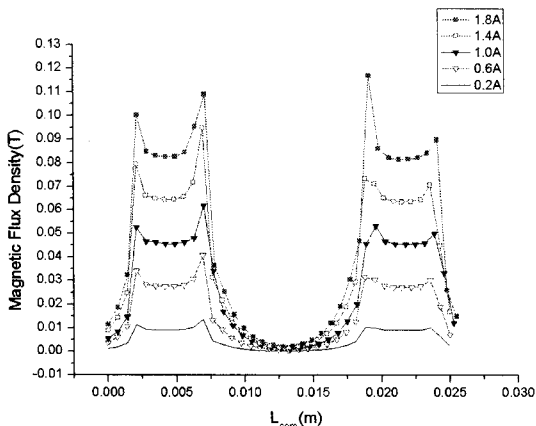
$$JS = \frac{NI}{A} \quad (2)$$

3.2 인가되는 전류의 세기에 따른 전자기장 세기 변화

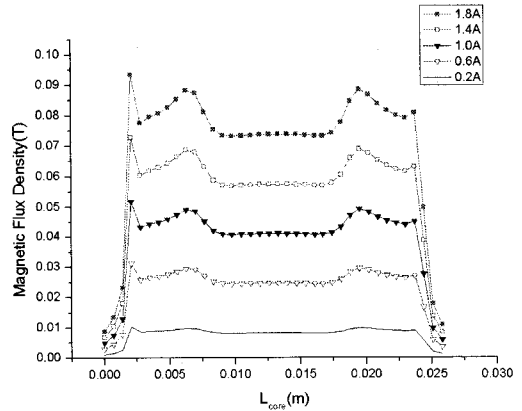
외부에서 인가되는 전류의 세기에 따라 일단 코일 작동부 댐퍼 내부의 Orifice Gap을 통과하는 전자기장의 세기를 알아보기 위해 하나의 코일 작동부를 가지는 댐퍼(그림 3)에 대해 인가되는 전류의 세기를 0.2A~1.8A까지 일정한 세기로 증가시키며 해석을 수행하였다.

전류밀도의 세기를 비교하기 위해 그림 4와 같이 Core에서 발산되는 전류밀도 값을 측정해보고 그림 5와 같이 MR 유체를 통해 Returner로 들어오게 되는 전류밀도의 값을 측정해 보았다.

해석 결과 전류의 세기가 증가할수록 Orifice Gap을 통과하는 전류 밀도의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전류 밀도의 세기가 증가하면 그에 따라 Orifice Gap에서 전자기장의 흐름 방향에 따라 Particle Chain을 형성하는 MR 유체의 결합력이 증가하게 되고 그로 인해 전단력을 강하게 발생시킬 수 있다. 하지만 실제 MR 댐퍼 코일 작동부 설계 시에는 코일의 권선수와 코일을 감는 원통 지름에 따라 발생하는 코일의 저항과 외부 전류의 제약을 고려한 최적설계가 요구된다.



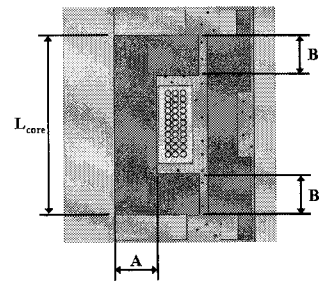
[그림 4] Core에서 발산되는 전류밀도



[그림 5] Returner로 전달되는 전류밀도

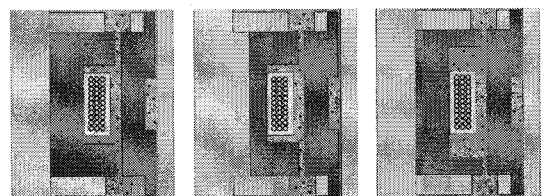
3.3 코어의 형상에 따른 전자기장 세기 변화

코어의 형상에 따라 코일의 자화 시 발생하는 전자기장의 전류밀도 비교를 위하여 그림 6에 표기된 A, B 두 부분의 비율을 달리하여 해석을 수행하였다.



[그림 6] 코어 형상의 해석 변수

첫 번째로 A, B의 치수가 동일한 경우에 대한 해석(Case 1)을 수행하였고 두 번째는 A의 치수가 B 부분 치수의 1/2 인 경우(Case 2)에 대한 해석을 수행하였다. 마지막으로 B의 치수가 A의 치수의 1/2 인 경우(Case 3)에 대한 해석을 수행하였다. 해석을 위한 모델링은 그림 7과 같고 해석 시 인가되는 전류의 세기와 각 물질의 물성치는 동일하게 입력하였다.



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

[그림 7] 자기장 해석을 위한 모델링

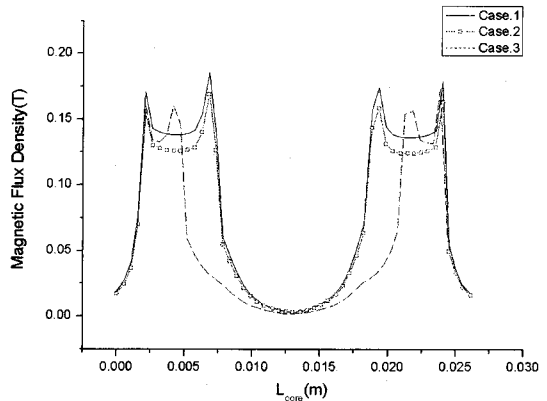
표 1은 세 가지 경우에 대한 자장의 흐름(2-D Flux Line) 과 자속 밀도의 분포(Magnetic Flux Density)를 출력한 결과물이다[7].

【표 1】 Core 형상에 따른 해석 결과

	2D Flux Line	Magnetic Flux Density
Case 1		
Case 2		
Case 3		

Case 1은 코일에서 발생된 전자기장의 전류밀도 양이 A 부분을 통하여 B 부분까지 원활히 전달됨을 확인 할 수 있다. Case 2는 A 부분만을 고려할 경우 코일에서 발생하는 전자기장을 원활히 전달하고 있는 것으로 확인된다. 하지만 다른 경우들과 비교하여 면적이 좁기 때문에 코일에서 발생하는 전자기장을 충분히 전달하지 못한다는 단점이 있고, B 부분이 A 부분에 비하여 상대적으로 큰 단면적을 가지고 있기 때문에 전자기장이 집중 되지 못하고 넓게 퍼져 강한 자기장을 형성하지 못하고 있다. Case 3는 코일에서 발생되는 전자기장이 A 부분까지 무리 없이 전달되지만 B 부분의 단면적이 A 부분에 비하여 상대적으로 작기 때문에 Orifice Gap까지 전달되지 못하고 다른 부분으로 전자기장 손실이 발생함을 확인할 수 있다.

그림 8은 세 가지 경우 Orifice Gap을 통과하는 전류밀도의 수치적인 값들의 비교를 위해 Core 부에서 발산되는 전류밀도의 양을 측정하여 비교한 그래프이다. Case 1의 코어가 Case 2와 Case 3에 비해 전자기장의 집중과 전자기력의 전달 측면에서 우수한 성능을 나타내고 있다.



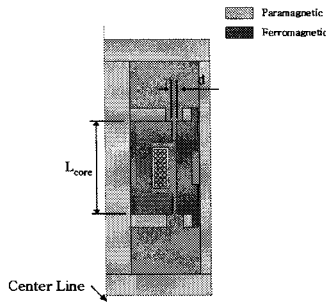
【그림 8】 Orifice Gap을 통과하는 전류 밀도 비교

3.4 Orifice Gap 크기에 따른 효과

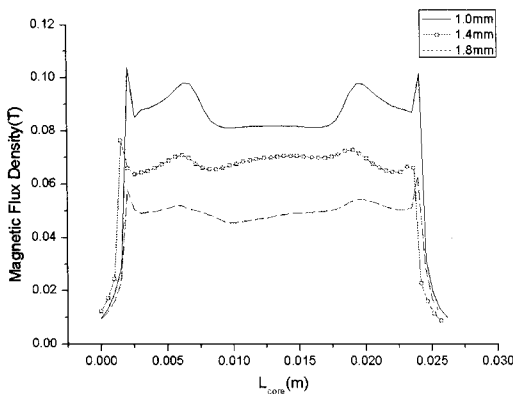
댐퍼 내부의 Orifice Gap의 크기가 전자기장의 흐름에 미치는 영향을 알아보기 위해 Orifice Gap(그림 9의 d)를 1.0 mm ~ 1.8 mm까지 일정한 크기로 증가시키며 해석을 수행하였다.

해석을 위한 치수 사항은 동일하며 각 재료의 물성치도 동일하다. 인가되는 전류의 세기는 2.0 A로 동일하게 인가하였다.

해석 결과의 비교를 위해 그림 10과 같이 Returner로 전달되는 전자기장의 전류밀도를 측정하였다. Orifice Gap의 길이가 늘어날수록 전달되는 전류밀도의 양이 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 전자기장 해석 결과만으로는 Orifice Gap의 길이가 작은 댐퍼가 전달할 수 있는 전류밀도의 세기가 강하기 때문에 효과가 좋다는 결론을 내릴 수 있지만 댐퍼 내부에서 Orifice Gap을 통해 유체가 상하 또는 좌우로 이동하는 MR 댐퍼의 동작 원리를 고려할 때 Orifice Gap의 길이가 작아지면 전류가 인가되지 않을 시의 초기 마찰(Friction)이 증가하게 되어 댐퍼의 초기 댐핑력(Damping Force)이 증가하게 되고 피스톤의 왕복 또한 수월하지 않기 때문에 근본적인 댐퍼의 기능마저 어려울 것이다. Orifice Gap의 길이가 크면 이러한 단점을 보완할 수 있으나 코어에서 발산되는 전자기장을 Returner부로 전달하는데 어려움이 생기게 된다. 그러므로 댐퍼 설계 시 댐퍼의 용도와 용량에 따른 Orifice Gap의 적절한 설계가 요구된다.



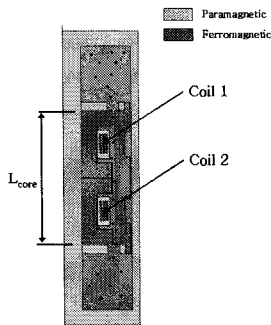
[그림 9] Orifice Gap 의 길이에 따른 해석을 위한 모델링



[그림 10] Orifice Gap 크기 변화에 따라 Returner 로 전달 되는 전류밀도 비교

3.5 이단 코일 작동기의 효과

하나의 코일 작동부를 가지는 댐퍼에 대한 전자기장 해석을 통해 인가되는 전류의 세기가 증가할수록 Orifice Gap을 통과하는 전류밀도의 양이 증가함을 확인하였다. 인가시킬 수 있는 전류의 세기가 한정되어 있는 코일 작동기의 특성을 고려하여 다단의 코일 작동부를 가지는 댐퍼를 설계하면 기존의 방식보다 고효율, 고성능의 대용량 댐퍼 제작이 가능할 것으로 기대된다[8].



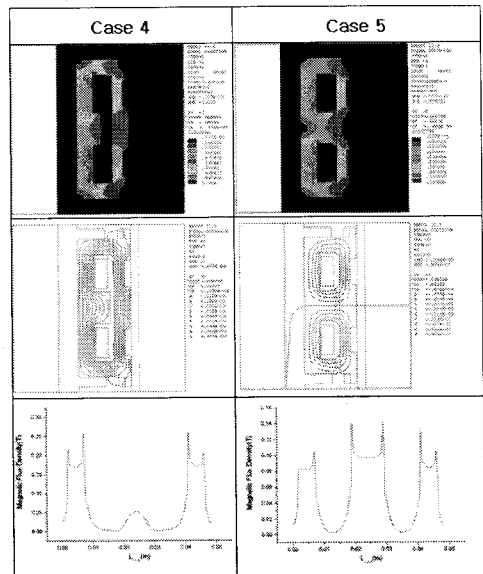
[그림 11] 유한요소해석을 위한 이단 코일 작동부를 가지는 댐퍼 모델링

일단 코일 작동부 댐퍼와 다단 코일 작동부 댐퍼의 성능 비교를 위하여 그림 11과 같은 다단의 코일 작동부 댐퍼에 대한 모델링을 실시하였고 앞서 3.1 절에서 해석을 실시한 일단의 코일 작동부 댐퍼와 동일한 물성치와 치수를 입력하여 해석을 수행하였다.

해석은 두 코일이 같은 방향으로 감긴 경우, 즉 마주하는 코일의 극성이 다른 경우에 대한 해석(Case 4)에 대한 해석과 두 코일이 다른 방향으로 감긴 경우, 즉 마주하는 코일의 극성이 같은 경우에 대한 해석(Case 5)을 수행하였다.

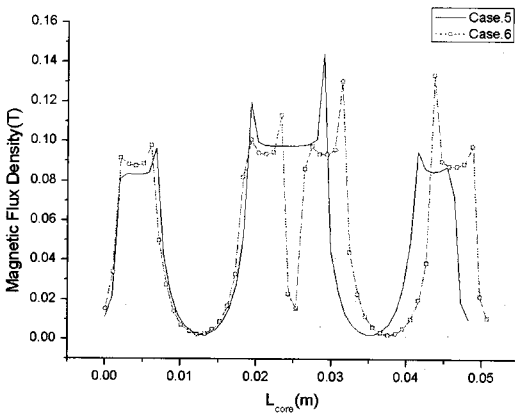
표 2는 두 가지 경우에 대한 자기장의 흐름, 전류밀도 분포, Housing에서 발산되는 전류밀도의 세기를 측정한 그래프를 나타내었다. 두 코일이 같은 방향으로 감긴 경우 Orifice Gap을 통과하는 최대 전류밀도 값이 일단 코어에 비하여 약 2배 증가함을 알 수 있다. 두 코일이 다른 방향으로 감긴 경우는 첫 번째 경우와 달리 한 부분에 전류밀도가 집중되지 않고 4부분의 돌출 부분을 나타내며 고르게 분포됨을 확인할 수 있다. 댐퍼의 제작 시 사용되는 재료는 그 재료 자체의 포화점을 가지게 되는데 Case 4와 같은 코어는 포화점을 지나게 되면 인가되는 전류의 세기가 증가하더라도 같은 세기의 전자기력을 발생시킬 것으로 예상된다. 하지만 Case 5와 같이 두 코일을 다른 방향으로 감은 경우는 전류밀도가 한 부분에 집중되지 않고 여러 부분으로 분산되기 때문에 MR 유체가 Particle Chain을 고르게 여러 부분에서 형성하게 될 것으로 예상된다. 그에 따라 일단의 코일 작동부 댐퍼보다 강한 전단력을 발생시킬 것으로 예상된다.

[표 2] 코일의 극성에 따른 해석 결과



두 개의 코일 작동부를 사용할 경우 댐퍼 내부에서 동일한 극성이 존재하게 됨으로 전자기장의 원치 않는 흐름이 생길 수 있을 것이다. 그러한 현상을 보완하기 위한 대책으로 코일 작동부 사이에 투자율이 낮은 약자성체 소재(Paramagnetic)를 삽입하여 전자기장의 원하지 않는 흐름을 막아 보고자 하였다. 해석 결과의 비교를 위해 두 코일이 다른 방향으로 감긴 경우 투자율이 낮은 소재의 유무에 따른 효과를 비교해 보기로 한다. 이 때 해석을 위해 모델링 되는 치수는 동일하며 인가되는 전류의 세기와 재료의 물성치는 동일하게 입력하였다.

해석 결과, 그림 12와 같이 투자율이 낮은 금속이 추가 되었을 경우(Case 6)가 댐퍼 내부에서 마주하는 코일 작동부 사이로의 원하지 않는 전자기장 흐름이 생기지 않음을 확인할 수 있고 다수의 Particle Chain을 형성할 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 12] 약자성체의 유무에 따른 전류밀도 비교

4. 결론

MR 댐퍼 내부의 코일 작동부 형상에 따른 전자기장의 흐름 변화와 그 효과를 이해하고자 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 전자기장 해석을 실시하였다.

- 1) 일단 코어 댐퍼에 대한 해석에서 Orifice Gap을 통과하는 전자기장은 인가되는 전류의 세기에 비례하였다. 이를 통해 인가되는 전류는 댐퍼 내부에서 발생하는 전단력에 영향을 줄 수 있었다.
- 2) 코어 면적비 해석으로부터 다른 코어 면적비를 가지는 경우(Case 2, Case 3)에 비해 동일한 코어 면적비를 가지는 경우(Case 1)가 코일에서 발산되는 전자기장의 손실이 적음을 확인하였다.

- 3) 댐퍼 작동 시 유체가 이동하게 되는 Orifice 사이즈가 작을수록 Returner로 전달되는 전자기장이 증가하였다. 하지만 Orifice 사이즈가 작으면 유체의 이동이 원활하지 못하므로 댐퍼의 용도에 적합한 Gap 사이즈 선정이 요구된다.
- 4) 이단 코어 댐퍼와 일단 코어 댐퍼의 Orifice Gap을 통과하는 전류밀도의 양은 이단 코어 댐퍼에서 더 크게 나타났다. 그리고 이단 코어 댐퍼 사이에 약자성체를 추가하게 되면 코어 사이의 전자기장 흐름이 차단되어 댐퍼의 전단력 증가를 기대할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson, "Properties and Application of Commercial Magneto-Rheological Fluids," J. of Intell. Master. Syst. Struct., Vol. 10, pp. 5-13, 1999.
- [2] R. W. Phillips, "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress," Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 1969.
- [3] Y. K. Ahn, "A Modeling of a Variable damping Mount Using MR Fluid," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 1338-1343, 2000.
- [4] 김현식, "MR 유체를 이용한 가변 유압 댐퍼 개발에 관한 연구," 선문대학원 석사학위논문, pp. 19-20, 2001.
- [5] W. H. El-Aouar, "Finite Element Analysis Based Modeling of Magneto Rheological Dampers," Master. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [6] 남윤주, 문영진, 박명관, 이육형, "MR 유체 작동기의 전자기적 설계 방법," 대한기계학회, Vol. 10, pp. 1305-1313, 2006.
- [7] 성금길, 최승복, "유한요소법을 이용한 MR 속 업소버의 최적설계," 한국소음진동공학회 추계학술대회, 2007.
- [8] 이규섭, 유원희, 류봉조, "다중 자기 코일 작동기를 사용한 MR damper의 설계해석," 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 2008.

송 준 한(June-Han Song)

[준회원]



- 2007년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (석사 과정)

<관심분야>

유한요소해석, 응용역학, 진동제어

권 영 철(Young-Chul Kwon)

[정회원]



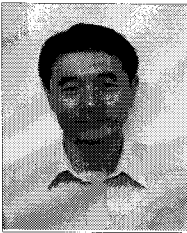
- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 9월 : 포항공과대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포항공과대학교 기계공학과(공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한전 전력연구원 근무
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

냉동공조, 신재생에너지

손 성 완(Sung-Wan Son)

[정회원]



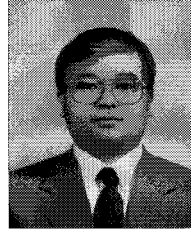
- 1990년 2월 : 부산대학교 조선공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 부산대학교 조선공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 알엠에스 시스템(주) 대표이사

<관심분야>

소음/진동, 구조해석, 조선공학

마 양 수(Yang-Soo Ma)

[정회원]



- 1997년 8월 : 아주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 선문대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍 II 인천대학 컴퓨터응용기계학과 교수

<관심분야>

재료역학, 절삭(CAM/CNC가공), 폴리메카닉

전 중 균(Chong-Keun Chun)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1985년 12월 : University of California, Los Angeles (공학석사)
- 1991년 6월 : University of California, Los Angeles (공학박사)

- 1992년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

응용역학, 진동제어