

반능동 서스펜션용 MR CDC 댐퍼의 자기회로 설계기법

Magnetic Circuit Design Methodology of MR CDC Dampers for Semi-Active Suspensions

박재우¹, ✉정영대²
Jae Woo Park¹ and ✉Young Dae Jung²

¹ 경남정보대학 기계자동차산업계열 (Subdivision of Mechanical & Automotive Industry, Kyungnam College of Information & Technology)

² 영남대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

✉ Corresponding author: ydjung@ynu.ac.kr, Tel: 010-2583-7234

Manuscript received: 2008.1.24 / Revised: 2008.5.27,7.2 / Accepted: 2008.7.4

MR Fluid, one of functional fluids, is developed for the application to automobile products. MR CDC damper using MR fluid has following principles. When an electric current is applied to the solenoid, apparent viscosity of MR fluid passing through the annular gap which acts as magnetic circuits varies directly as the intensity of the current. These devices have a simple structure and excellent time response characteristics, emerging as the alternatives of the conventional semi-active suspension systems. In this study, a design procedure of the magnetic circuit through the solenoid core and the flux ring functioning as a magnetic path is investigated so as to optimize the design and performance of MR CDC dampers for the vehicles. In addition, an operating point on the B-H curve, the magnetization according to the variation in the annular gap, the pole piece width and the density of MR fluid are studied to design the optimal piston head within the restrained dimension range.

Key Words: Magneto-Rheological Fluid(MR 유체), Magnetic Circuit Design(자기회로설계), Yield Shear Stress(항복 전단응력), Solenoid Core(솔레노이드 코어), Pole Piece Width(PPW: 폴피스 폭), 자화포화(magnetization), Apparent Viscosity(겉보기 점도)

기호설명

Φ = Magnetic flux, W_b
B = Magnetic flux density, Tesla
H = Intensity of magnetic field
M = Magnetization
R_t = Total Reluctance
F = Magneto-motive Force

1. 서론

최근까지 자동차용 충격흡수기(shock absorber)의 개념은 감쇠성능을 조절하기 위하여 적정 오리피스(orifice)를 뚫어놓고 각종 스프링(헬리컬형, 원추형, 디스크형 등)으로 속도에 따라 순간 단면적을 어떻게 조절할까에 모든 초점이 모아졌다. 수동형(passive) 충격흡수기로부터 솔레노이드 밸브에 의해 제어되는 연속 감쇠력 가변형(이하 CDC; Continuous Damping Control)에 이르기까지 사용되는 부품의 조합에 따라 감쇠성능의 범위가 결정되었다. 그러므로 해당 차량에 적합한 감쇠성능을 튜닝 하는데 많은 시간이 소요되었다.

그러나 MR 유체를 이용한 댐퍼는 기존의 개념을 180° 전환시킨다. 즉, 일정 환상 오리피스(annular gap)는 항상 뚫어져 있고, 다만 이 환상 오리피스를 통과하는 유체의 겉보기 점도(apparent viscosity)가 인가되는 전류에 따라 솔레노이드에서 발생하는 자기장의 세기 때문에 순간적으로 변화하여 원하는 감쇠성능을 얻는 것이다. 그 동안 감쇠성능을 조절하기 위해 사용되었던 밸브나 각종 스프링 등의 부가적인 부품은 이제 필요 없게 되었다.

MR 유체를 이용한 댐퍼가 갖는 또 하나의 큰 장점은 10ms 정도의 빠른 응답특성이다. 기존 전자제어 현가시스템에 적용된 유압 솔레노이드 밸브를 이용한 감쇠력 가변형 댐퍼인 경우 응답시간이 20~30ms 였다. 이러한 응답특성은 소비자들의 불만으로 나타났다. 그러나 기능성 유체인 MR 을 이용한 댐퍼는 구조가 간단하고 빠른 응답특성으로 인해 이러한 문제점을 보완할 수 있기 때문에 반능동 서스펜션(semi-active suspension)의 새로운 대안으로 부각되고 있다.¹

MR 유체를 이용한 작동기의 설계방법은 최근 다양한 방법으로 연구되고 있다. 가장 대표적인 방법이 FEM 을 이용한 자기장 해석과 CFD 를 이용한 MR 유체의 유동해석을 수행하여 이에 기초로 한 단순화된 비선형 수학적 모델을 제시하고 이를 클러치, 햅틱(Haptic) 인터페이스 등의 장비에 적용하는 연구가 수행되어 왔다.^{2,5}

하지만 이러한 방안들은 특히 자동차용 댐퍼로서의 성능을 최대화하는 것이 목적이 아닌 제한된 설계변수를 도출하고 그 유용성을 입증하는 한계를 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 최근에 제안되고 있는 방법이 자기회로를 해석적으로 설계하는 것이다. 자로(flux path)의 길이와 플럭스(flux)가 지나는 단면적을 최소화함으로써 MR 유체 작동기의 정특성과 응답특성 및 이력특성을 개선하는 연구가 수행되었다.⁵

본 연구에서는 자기회로를 해석적으로 설계하는 방법 중 하나로서, 자기장을 이용하는 자동차용 MR CDC 댐퍼를 설계하기 위해 자로 역할을 하는 솔레노이드 코어(solenoid core)와 플럭스 링(flux ring)의 설계인자의 선정을 통한 새로운 설계절차를 제시하고자 한다. 또한 그러한 설계절차에 따른 환상 오리피스와 폴피스 폭(이하 PPW: pole piece width)의 치수 변화 그리고 MR 유체의 밀도

변화에 따른 자기 이력곡선 상의 작용점과 자화포화(Magnetization)에 대해 고찰하고 주어진 치수 범위 내에서 최적의 성능을 가지는 피스톤 헤드를 설계하고자 하였다.

2. 반능동 전자제어 현가시스템의 구조

2.1 ECS 시스템

전자제어 서스펜션은 주행 속도와 도로 조건에 따라 스프링 상수, 댐퍼의 감쇠력, 레벨링 시스템(leveling system)의 압력 등을 가변시켜 차량의 높이를 제어하거나 차체의 자세를 제어하여 주행 안정성과 승차감을 동시에 향상시킬 목적으로 사용된다.

Fig. 1 에서는 ECS 시스템을 도식적으로 나타내고 있는데, 이를 입력 부분인 각종 센서와 그 역할에 대해 살펴보면 다음과 같다.

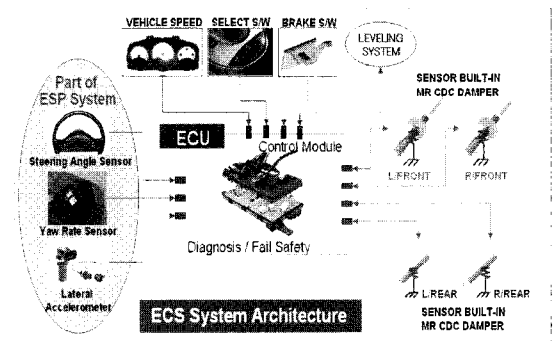


Fig. 1 Electronically controlled suspension system architecture of S&T DAEWOO Co.

차속센서(speed sensor)는 보통 변속기의 주축이나 속도계 구동축에 설치하여 자동차 주행속도를 감지하여 제어기인 ECU 로 전송하면 ECU 는 차고 및 댐퍼의 감쇠력 제어에 이용하게 된다. 레벨링 시스템이 추가되는 경우 주로 공기 스프링이 많이 사용되는데, 자동차의 높이 변화에 따른 차체와 차축의 위치를 감지하여 ECU 에 전송한다. 조향각 센서는 조향 wheel 의 작동 속도를 감지하는 기능이고, 측면 가속도 센서(lateral accelerometer)는 선회시 자동차의 좌우 방향 횡 가속도를 G-센서로 감지하여 ECU 에 전송한다. 그리고 상하 2 개의 수직 가속도 센서나 상대 변위 센서는 차체의 흔들림(bouncing)에 대한 정보를 ECU 에 입력한다.

이 이외에도 브레이크 오일 압력 스위치에서 유압을 검출하여 급제동시 노즈 다운(nose down) 현상을 방지하도록 댐퍼의 감쇠력을 제어한다.

또한 스로틀 위치 센서(TPS: Throttle Positioning Sensor)는 가속 페달의 급가속 혹은 급감속 상태를 감지하여 이를 스프링 상수 및 감쇠력 제어에 이용하게 한다.

이상과 같이 ECU 는 센서들로부터 입력된 정보를 이용하여 제어 알고리즘에 따라 레벨링 시스템이나 댐퍼를 제어하여 조정 안정성 및 승차감 그리고 차량 자세 제어를 하게 된다.

2.2 감쇠력 가변형 MR CDC 댐퍼

MR CDC 댐퍼의 구조는 Fig. 2 와 같다. 외관은 차체와 연결되는 mounting part 와 코일 스프링이 장착되는 spring seat, 그리고 너클(knuckle)과 연결되는 너클 브래킷으로 구성되어 있다. 댐퍼의 내부구조는 밀봉과 마찰을 조절하고 등심도를 유지시켜 주는 rod guide assembly, 어셈블리와 감쇠성을 제어하기 위해 가장 중요한 piston valve assembly, 그리고 고압가스와 오일을 분리시키면서 빠른 체적보상을 위해 미끄러짐을 하는 floating piston 으로 구성되어 있다.

일반적으로 MR CDC 댐퍼는 단일 튜브 형(Mono-tube type)으로 만들어야 점성유동에 따른 체적보상을 빠른 속도로 할 수 있다. 그러나 strut type 일 경우 스프링 시트나 너클 브래킷등과 같은 각종 브래킷을 바깥쪽 튜브의 외벽에 용접을 해야 하는 문제에 직면한다. 단일튜브이기 때문에 용접에 의해 발생된 변형은 피스톤 밸브의 원활한 운동을 저해한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 카트리지 형으로 제작함으로써 해결하였다. 즉, 단일 튜브 형으로 MR CDC 댐퍼를 만든 다음 바깥쪽 튜브 어셈블리에 넣고 밀봉하여 strut-type 의 MR CDC 댐퍼를 완성할 수 있었다.

3. 자기회로설계

3.1 자로부품의 자기적 특성

솔레노이드에 전류가 인가되면 암페어의 오른손 법칙에 따라 자기장이 형성된다. 이때 형성되는 자기장의 폐회로에서 자로(flux path) 역할을 하는 부분은 Fig. 3 에서 솔레노이드 코어와 플럭스 링이다. 그러므로 자로 역할을 하는 부품은 flux

가 잘 흐를 수 있도록 강자성체가 되어야 한다.

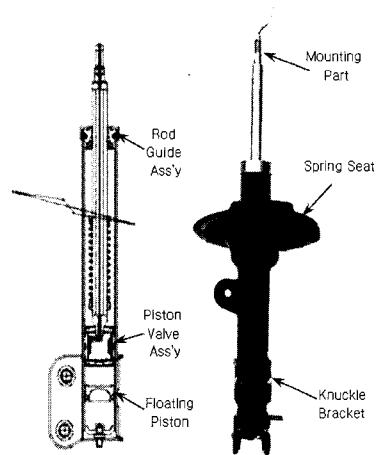


Fig. 2 Strut-type MR CDC damper

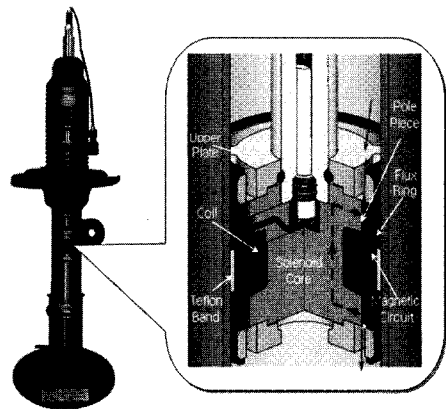


Fig. 3 Piston valve assembly of MR CDC damper & moving path of MR fluid at the annular gap

강자성체는 탄소함량이 적은 low carbon steel 이 바람직한데, 이는 탄소성분이 자로를 방해하는 저항으로 작용하기 때문이다. 그리고 자로 역할을 하는 부품 이외에는 자기 플럭스가 빠져나가지 않도록 비자성체로 구성해야 한다. 본 연구에서 사용된 플럭스 링의 재질은 비자성체로서, SUM24LH 계열이 사용되었다. 체결이나 지지를 위해 어느 정도의 강도가 요구될 경우에는 그에 준하는 비자성체 부품을 선정해야 한다.

자로 역할을 하는 솔리드 부품의 자기특성은 WALKER LDJ Scientific 社의 Hysteresis graph 인

AMH-15 에서 측정하였으며, MR 유체는 진동시료 자력계(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)에서 자기이력곡선을 측정하였다.

Fig. 4 에 나타낸 B-H 곡선을 살펴보면, 솔레노이드 코어는 1.51T 에서 자화포화(magnetization) 되고, 플럭스 링은 자계 강도가 2000(A/m) 정도까지는 인가된 자계강도에 대해 자속밀도(B)가 급격한 선형구간을 형성하지만, 약 1.3T 에서 포화되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 피스톤 밸브의 설계시 이러한 포화범위를 넘지 않고 선형구간에 작용점이 위치하도록 해야 한다.

MR 유체의 B-H 측정은 물질 내에서 자화력에 의한 자기유도 B 는 두 개의 성분으로 나누어진다. 즉 공간에서 유도되는 성분 H 와 물질의 자화에 의한 성분 M 으로 이루어진다.

$$B = H + 4\pi M \tag{1}$$

여기서 M 을 자화강도(Intensity of magnetization)라 하며 B 와 동일한 단위를 가진다. MR 유체의 B-H 곡선을 살펴보면 hysteresis 가 거의 없음을 확인할 수 있다. 이는 MR 유체 속 미립자의 단자구 크기가 작아(3-5 μm) 인가되는 자계의 방향에 따른 자극의 방향전환이 쉽게 이루어지기 때문이다.

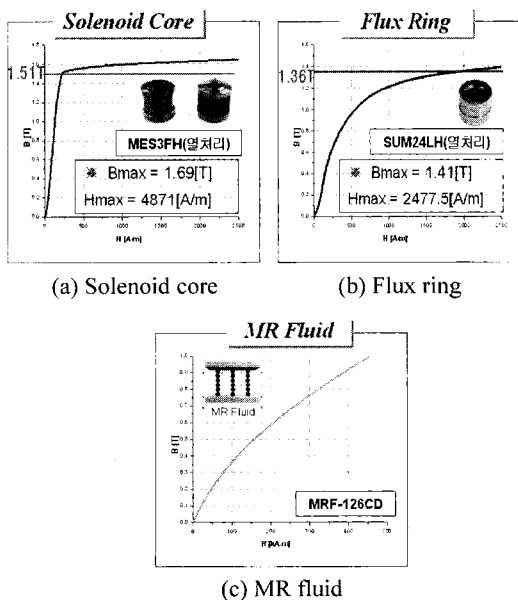


Fig. 4 B-H curve of magnetic circuit components

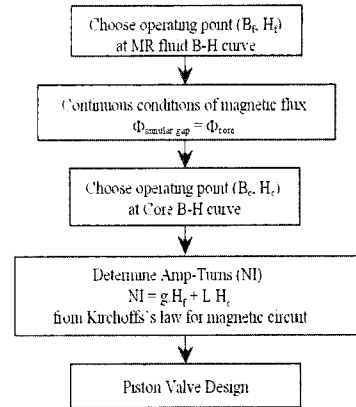


Fig. 5 Magnetic circuit design procedure proposed by L-company

3.2 자기회로 설계절차의 새로운 제안

자기회로를 설계하는 일반적인 절차가 Fig. 5 에 나타나 있다. Fig. 5 는 L 사에 의해 제안된 것⁷⁻⁹으로 그 순서를 살펴보면, 첫째 작동 오일인 MR 유체의 B-H 곡선에서 선형구간에 위치하도록 작용점(B_f, H_f)를 선택한다. 둘째, 자기 플럭스의 연속조건으로부터 자로 역할을 하는 솔레노이드 코어와 플럭스 링에서의 작용점(B_c, H_c)를 선택한다. 마지막으로 자기회로에 대한 Kirchhoff 의 법칙으로부터 필요한 코일 감김수(Ampere-turns, NI)를 결정하여 솔레노이드를 설계할 것을 제안하고 있다. 그러나 자동차용 MR CDC 댐퍼의 개발과정에서는 이러한 자기회로 설계 절차만으로는 다소 부족하며, 더 세부적인 사양의 조정에 대한 피드백과 최적화 과정이 필요하다.

본 논문에서 제안하려는 설계기법은 우선 적용하려는 차량의 하드 포인트(hard point)로부터 MR CDC 댐퍼의 피스톤 헤드 부분의 길이 범위가 결정된다. 다음으로 인가할 최대 전류의 세기와 저항 범위를 선정해야 한다. 그러면 결정된 코일 감김수 범위 내에서 솔레노이드 코어의 횡단면적과 PPW 를 임시적으로 결정할 수 있다.

그 다음은 전자기 해석(E-M analysis)을 통해 솔레노이드 코어와 플럭스 링에서 (B, H)의 작용점을 결정하는 것이다. 여기에는 세 가지가 동시에 만족되어야 한다. 첫째 정해진 치수영역 내에서 낮은 코일저항으로 큰 전력이 형성되도록 솔레노이드를 설계해야 하며, 둘째 원하는 자속밀도의 크

기를 형성할 수 있도록 코어 및 PPW의 횡단면적을 선정해야 한다. 그리고 마지막으로 칫째와 들쪄 조건을 만족시키면서 솔레노이드 코어와 플럭스 링의 B-H 곡선에서 해당 작용점이 각각 선형 구간에 위치하도록 해야 한다.

전력은 코일의 감김수로 결정되므로 감김수가 많으면 좋지만, MR 유체가 높은 열에 영향을 받기 쉬우므로 정해진 치수 범위 내에서 감김수를 줄일 수 있도록 솔레노이드를 구성해야 한다. 또한 인가되는 전류가 잘 흐를 수 있도록 낮은 저항의 코일이 사용되어야 한다.

솔레노이드의 설계가 끝나고 나면 시험용 댐퍼를 만들어서 원하는 감쇠성능의 범위가 나오도록 환상 오리피스스를 결정해야 한다. 오리피스스가 너무 작으면 감쇠성능의 최소값이 높아서 차량의 튜닝시 낮은 감쇠성능을 요구할 경우 불리한 점이 있고, 반대로 오리피스스가 너무 커지면 자기장의 폐회로에서는 저항 역할을 하므로 큰 저항은 솔레노이드의 부하로 걸려서 많은 열이 발생될 우려가 있다.

본 논문에서 제안한 최적설계기법을 Fig. 6에 나타내었다. 이러한 자동차용 반능동 서스펜션을 위한 자기회로 설계의 목표는 적은 전력 공급으로 넓은 감쇠성능 범위를 가질 수 있도록 최적의 조건을 찾는 것이다.

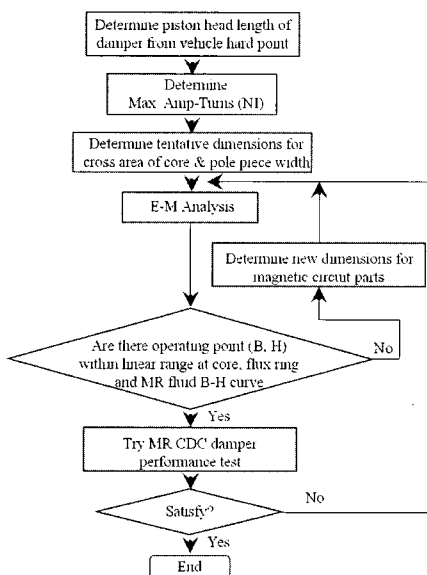


Fig. 6 New proposed magnetic design procedure

4. 결과 및 검토

본 연구에서 제시한 설계절차에 따라 피스톤 헤드 부분의 자로 역할을 하는 솔레노이드 코어와 PPW 그리고 플럭스 링을 설계하고자 한다. 우선 자동차용 MR CDC 댐퍼에서 이용할 수 있는 피스톤 헤드 길이 범위 내에서 최대 전력을 낼 수 있는 코일 감김수 조건을 결정한다. 다음으로 피스톤 헤드의 기본 치수로부터 자기회로를 구성한다.^{10,11}

Fig. 7은 MR CDC 댐퍼의 전자기해석을 위한 기본치수와 자기 회로도를 나타낸 것이다. 전체 릴럭턴스(reluctance)는 코어와 환상 오리피스 그리고 플럭스 링에서의 릴럭턴스의 합이다.

기자력은 식(2)와 같이 코일의 감김 수이며 또한 전체 릴럭턴스에 자기 플럭스를 곱한 값과 같다. 이러한 기본 정의를 이용하여 임시로 결정된 치수범위 내에서 전류세기에 따라 B-H 곡선에서 위치하는 작용점을 구한다.

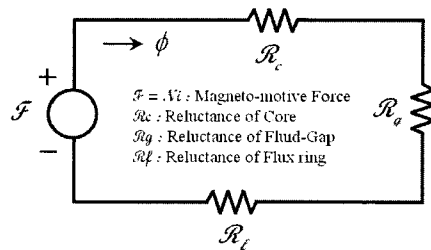
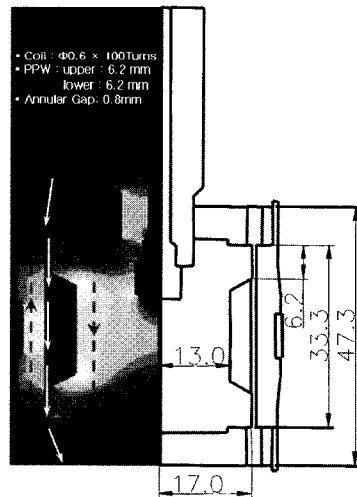


Fig. 7 Electro-magnetic analysis of MR CDC damper

$$F = Ni = R_i \phi \quad (2)$$

$$\phi = F / R_i \quad (3)$$

Fig. 8 은 솔레노이드 코어에서의 작용점을 살펴본 것이다. 코어에서는 포화자화값이 1.61T 정도이지만, 선형구간을 형성하는 구간은 1.51T 정도까지임을 확인할 수 있다. 따라서 최대전류 인가시 1.51T 이내여야 한다. 임시 결정된 코어의 치수에서는 선형구간에 작용점이 위치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 는 플럭스 링에서 작용점을 확인한 것으로 3.0A(1.17T) 까지는 어느 정도 선형구간에 위치하지만, 3.5A(1.29T) 에서는 포화가 됨을 알 수 있다. 이럴 경우 플럭스 링의 소재를 자화포화의 범위가 더 높은 재료로 다시 선정하든가 열처리 조건을 개선하면 더 좋은 효과를 얻을 수 있으나, 본 연구에서는 주어진 재료 범위 내에서 최적설계를 목적으로 하였다.

Fig. 10 은 환상 오리피스에서 PPW 를 통과한 자속밀도가 MR 유체의 B-H 곡선상에 위치하는 작용점을 표시한 것이다. MR 유체의 밀도에 따라 B-H 곡선의 기울기가 달라지므로 작용점도 변화한다. 따라서 주어진 치수 범위 내에서 최대 감쇠력 범위를 확보하기 위해 MR 유체의 밀도 선정도 중요하다.

Fig. 11 은 임시로 정해진 코어와 PPW 그리고 플럭스 링의 치수에서 환상 오리피스의 크기를 변화시켰을 때의 자속밀도를 나타낸 것이다. dlfmf 환상 오리피스의 크기가 커지면 폴피스를 통해 발생하는 자속밀도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 는 오리피스의 크기를 0.8mm 로 고정시키고 PPW 만 변화시켰을 때 자속밀도를 살펴본 것이다. PPW 를 6.8, 7.0, 7.2mm 까지 변화시켰을 때 6.8mm 에서는 3.5A 까지 포화가 일어나지 않지만, 7.0mm 에서는 3.5A 범위에서 플럭스 링의 가장 잘록한 부분에서 포화가 발생하는 것을 Fig. 13 에서 확인할 수 있다. PPW 가 커지면 감쇠력 범위를 다소 넓게 확보할 수 있는 장점은 있지만, 플럭스 링에서 포화가 일어나서는 안 된다. 따라서 솔레노이드 코어의 PPW 는 6.8mm 를 넘지 말아야 한다.

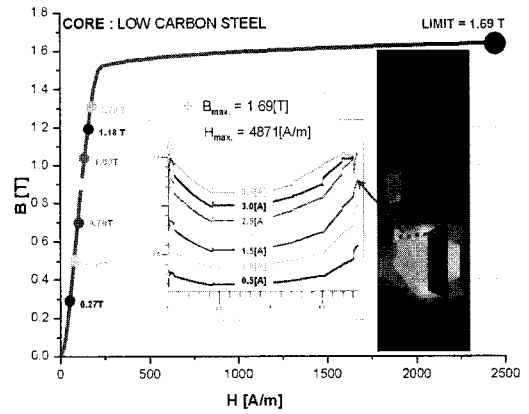


Fig. 8 Operating point at the solenoid core

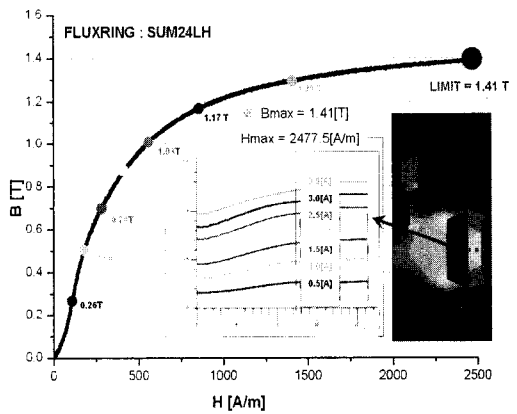


Fig. 9 Operating point at the flux ring

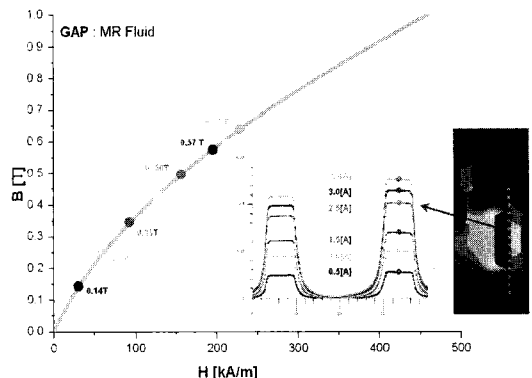


Fig. 10 Operating point in the MR fluid

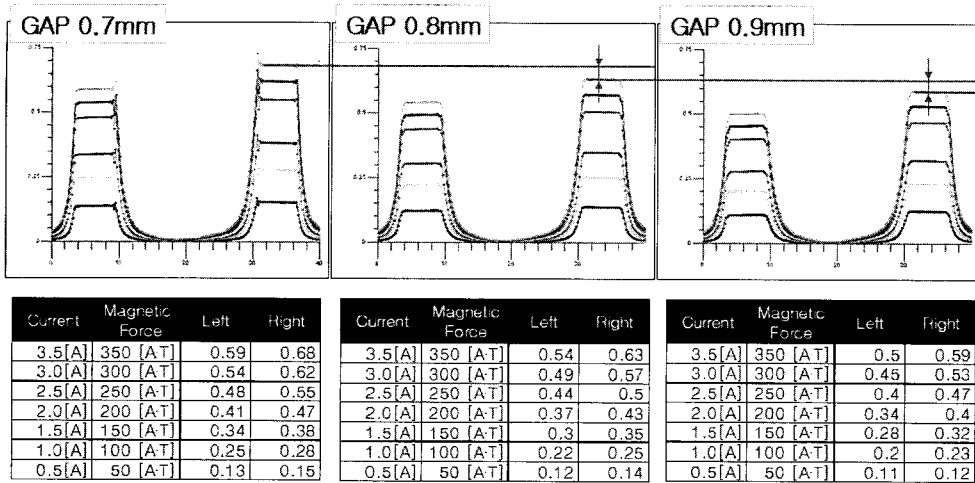


Fig. 11 Magnetic flux density according to annular gap variation

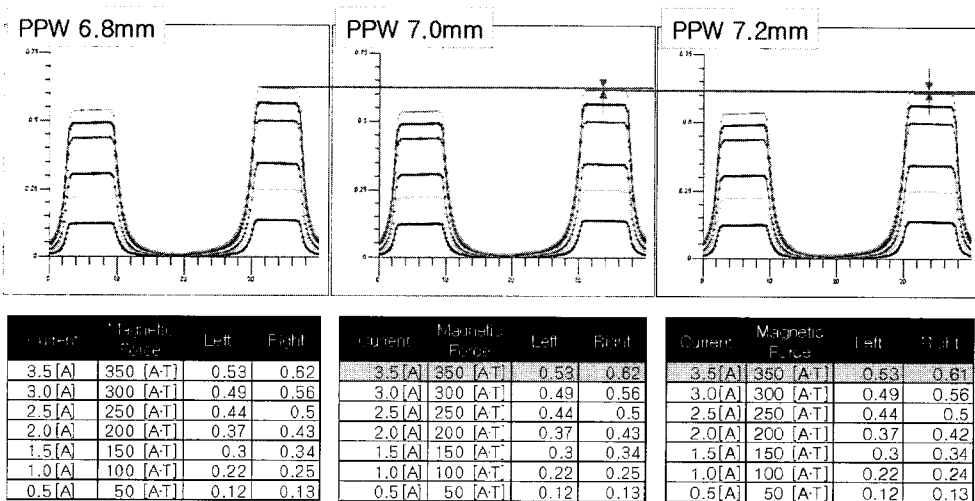


Fig. 12 Magnetic flux density according to PPW variation

Fig. 13 은 PPW 를 변화시켰을 때 솔레노이드 코어에서의 자속밀도를 보여주고 있다. 여기에서 PPW 가 6.9mm 를 제외한 7.0mm, 7.2mm 일 때, 3.5A 에서 솔레노이드 코어와 플럭스 링에서 포화가 일어나는 것을 보여주고 있다. 일반적으로 주어진 치수범위 내에서 오리피스가 바깥쪽으로 위치할수록 감쇠력 범위를 크게 가져갈 수 있다. 하지만 자로 역할을 하는 플럭스 링의 자로 폭이 그만큼 작아져서 포화가 일어날 수 있기 때문에 적절한 범위 내에서 결정되어야만 한다.

Fig. 14 는 MR 유체의 밀도에 따른 폴피스에서

자속밀도를 살펴본 것이다. 밀도가 클수록 자속밀도가 높지만, 밀도가 3.2 인 경우 3.5A 에서 자기회로 중 플럭스 링에서 포화가 발생하기 때문에 높은 밀도를 가지는 MR 유체를 사용할 수는 없다. 따라서 정해진 치수범위 내에서 최대의 감쇠력 영역을 얻기 위해서는 그에 적합한 MR 유체의 밀도를 선정해야만 한다.

Fig. 15 는 앞서 전자기장 해석 결과를 전체적으로 살펴본 그래프이다. 환상 오리피스 크기가 커지면 솔레노이드 코어와 플럭스 링 그리고 폴피스에서 자속밀도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

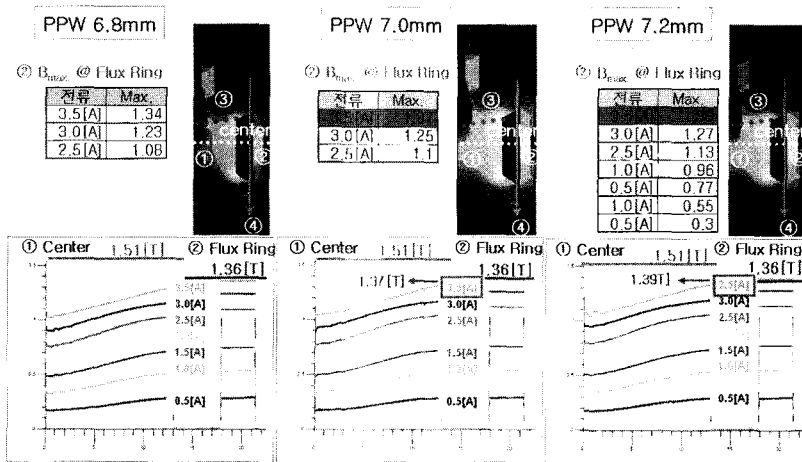


Fig. 13 Magnetic flux density at the solenoid core according to PPW variation

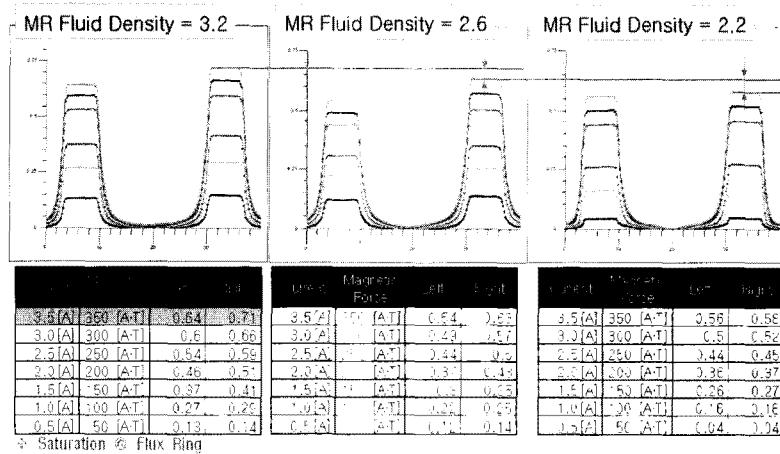


Fig. 14 Magnetic flux density according to MR fluid density

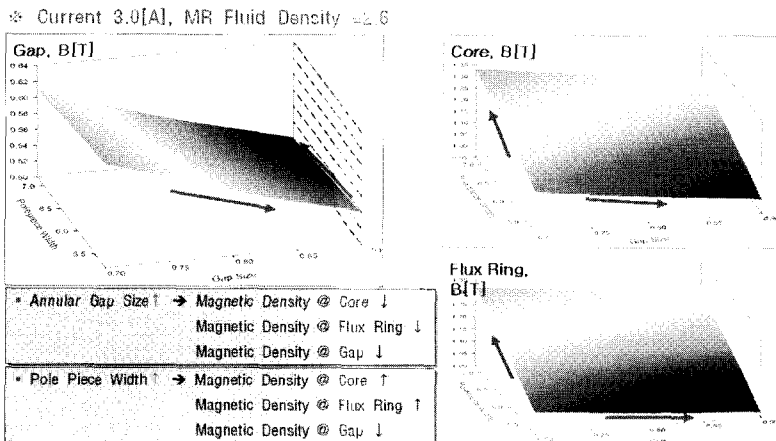


Fig. 15 Electro-magnetic analysis results

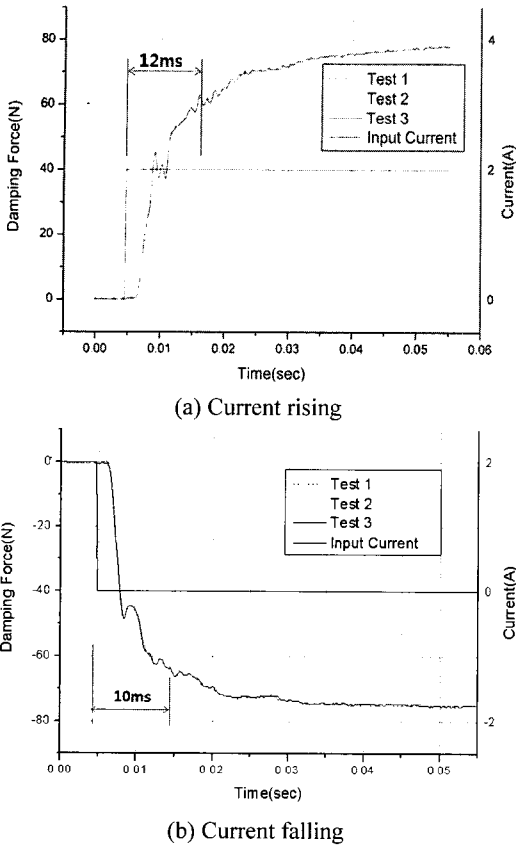


Fig. 16 Test results for time response characteristics

또한 여기서 PPW 가 커지면 솔레노이드 코어와 플럭스 링에서는 자속밀도가 높아지지만, 환상 오리피스에서의 자속밀도는 그만큼 분산되므로 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 16 은 MR CDC 댐퍼의 시간응답특성을 시험한 결과를 나타낸 것이다. 0.2m/s, ±40 mm에서 스텝전류 2A 를 인가하는 동안 최대 레벨의 90%까지 도달하는데 걸리는 시간을 반응시간(response time)으로 정의하였다. Fig. 16 은 3 번의 반응시간 실험결과를 보여주고 있는데, 거의 유사한 반응을 보이고 있다. Fig. 16(a)에서는 전류가 상승(current rising)할 때로 반응시간이 12ms 정도였고, Fig. 16(b)의 전류가 하강(current falling)할 때는 10ms 이내의 빠른 응답특성을 나타내었다.

Fig. 17 은 본 연구에서 제안한 자기회로 설계 절차를 따르면서 파라미터 튜닝(parameter tuning)을 수행하여 결정된 피스톤 밸브부의 최종치수를 나

타낸 것이다. PPW 는 6.8mm 에서 결정되었으며, 환상 오리피스는 요구되는 감쇠력 범위에 따라 0.8 ~ 0.9mm 에서 사용하도록 설계되었다.

Fig. 18 은 제안된 자기회로 설계절차를 따라 제작된 자동차용 MR CDC 댐퍼의 성능을 평가한 결과이다. 가진 조건은 변위 ±40mm 로 속도 0.05, 0.1, 0.3, 0.6, 1.0, 1.2, 1.5m/s 에 대한 감쇠성능을 도 시한 것이다. 0A 부터 3A 까지 전류를 증분시켜 가면서 감쇠력의 상태와 범위를 살펴본 것이다. 전 자기장 해석에서도 어느 정도 예견되었지만, 3A 까지는 포화가 일어나지 않고 감쇠력이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 만약 자기회로에서 포화가 발생한다면 더 높은 전류인가가 이루어 지더라도 감쇠력이 선형적으로 증분을 일으키지 못할 것이다.

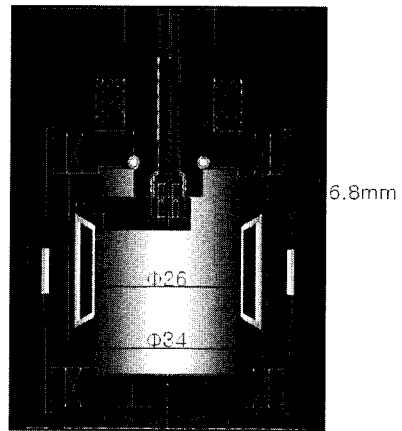


Fig. 17 Final determined piston valve design at MR fluid density 2.6

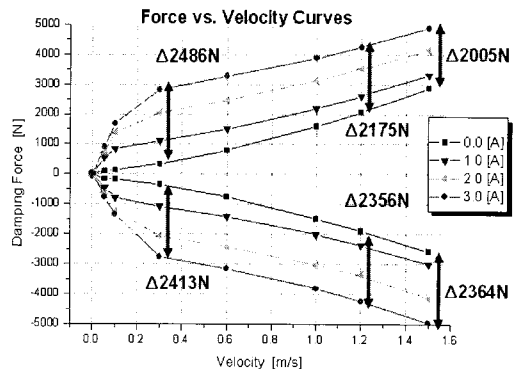


Fig. 18 Performance test result of MR CDC damper

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 전자기장 해석을 통한 수정된 자동차용 MR CDC 댐퍼의 자기회로 설계절차를 제안하였다. 본 연구에서의 자기회로의 설계 목표는 적은 전력공급으로 넓은 감쇠성능 범위를 가질 수 있도록 조건을 찾는 것이다.

2) 자기회로 설계절차에 따라 자료역할을 하는 솔레노이드 코어와 플럭스 링 그리고 MR 유체의 B-H 곡선에서 작용점이 선형구간에 위치하도록 하는 것이 MR CDC 댐퍼에서 자화포화를 막을 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

3) 전자기 회로에서 환상 오리피스 크기가 커지면 솔레노이드 코어와 플럭스 링 그리고 폴피스에서 자속밀도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

4) PPW 가 커지면 솔레노이드 코어와 플럭스 링에서는 자속밀도가 높아지지만, 폴피스에서는 그만큼 분산되므로 환상 오리피스에서 자속밀도가 낮아지는 것을 알 수 있었다.

5) MR 유체는 순철계통의 미립자를 사용하는 데, 단자구의 크기가 작아 B-H 곡선에서 히스테리시스를 거의 형성하지 않는 장점이 있다. 그러나 입자의 크기가 크면 클수록 자계강도는 커지지만 유체를 만들었을 때 침강에 기인한 성능저하를 초래할 우려가 있으므로 넓은 감쇠성능 범위를 얻기 위해서는, 분산 안정성 측면과 MR CDC 댐퍼의 사용용도 등을 고려하여 적합한 MR 유체를 선정해야 한다.

후 기

The authors would like to thank Dr J.D. Carlson and Prof. Norman Wereley for their help in MR Fluid supply through Lord and shear stress measuring of MR fluid.

참고문헌

1. Park. J. and Jung. Y., "Phenomenological Damping Flow Modeling and Performance Evaluation for a Continuous Damping Control Damper Using MR Fluid," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 73-82, 2008.
2. An. J. and Kwon. D., "Modeling of a Magnetorheological Actuator including Magnetic Hysteresis," Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 14, No. 9, pp. 541-550, 2003.
3. Rizzo, R., Sgambelluri, N., Scilingo, E., Raugi, M. and Bicchi, A., "Electromagnetic Modeling and Design of Haptic Interface Prototypes Based on Magnetorheological Fluid," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 9, pp. 3586-3600, 2007.
4. Lee. U., Kim. D., Hur. N. and Jeon. D., "Design Analysis and Experimental Evaluation of an MR Fluid Clutch," Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 10, No. 9, pp. 701-707, 1999.
5. Lee. H. and Choi. S., "Performance Evaluation of a Semi-Active Damper Using MR Fluid," in the proceeding of KSPE Spring Conference, pp. 497-498, 2007.
6. Nam. Y., Moon. Y., Park. M. and Lee. Y., "Electromagnetic Design Methodology for MR Fluid Actuator," Transaction of KSME A, Vol. 30, No. 10, pp. 1305-1313, 2006.
7. Lord Materials Division, "Magnetic Circuit Design," Lord Corporation Tech. Library, Engineering Note, pp. 1-10, 1999.
8. Lord Materials Division, "Magnetorheological Valve Configurations," Lord Corporation Tech. Library, Engineering Note, pp. 9-35, 2001.
9. Lord Materials Division, "Designing with MR Fluids," Lord Corporation Tech. Library, Engineering Note, pp. 9-50, 1999.
10. Cheng, D. K., "Fundamentals of Engineering Electro-magnetics," Addison-Wesley Series In Electrical Engineering, pp. 213-221, 1993.
11. Li, W., Du, H. and Guo, N., "Finite Element Analysis and Simulation Evaluation of a Magnetorheological Valve," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, No. 9, pp. 438-445, 2003.