

고차 주파수 스펙트럼을 이용한 ER 유체 댐퍼의 비선형 특성 해석 및 모델링 연구

김동현*, 정태휘**, 조중선#

The Nonlinear Analysis and Modeling of the ER Fluid Damper Using Higher Order Spectrum

Dong Hyun Kim*, Tae Whee Joung**, Joongseon Joh#

ABSTRACT

The nonlinear damping force model is made to identify the properties of the ER (electro-rheological) fluid suspension damper. The instrumentation is carried out to measure the damping force of the ER damper. The higher order spectral analysis method is used to investigate the nonlinear frequency coupling phenomena with the damping force signal according to the sinusoidal excitation of the damper. The distinctive higher order nonlinear characteristics are observed. The nonlinear damping force model, which has the higher order velocity terms, is proposed with the result of higher order spectrum analysis. The higher order terms coefficients, which vary according to the strength of the electric field, are calculated using the least square method.

Key Words : Higher order spectrum (다차 주파수 스펙트럼), Electro-rheological fluid(전기변성유체), Semi-active suspension unit (반능동 현가장치), Damper(댐퍼), Nonlinear system(비선형 시스템)

1. 서론

전기변형유체, ER 유체(Electro-rheological),는 전기장을 가하지 않았을 때는 비전도성 용매에 분산된 전도성 입자가 자유롭게 운동하지만, 전기장을 인가했을 때는 전도성 입자들이 대전되어 전기장에 평행인 방향으로 다수의 섬유조직이 형성되어 유체의 유동이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 저항하는 힘이 댐핑력으로 나타난다. ER 유체를

적용한 차량용 댐퍼는 도로 및 주행 요구 조건에 따라 댐핑력을 조정할 수 있는 장점이 있어서, 현재 승용차의 승차감 향상과 굴곡 지형의 고속 주행이 필요한 군사적 목적을 위하여 많이 연구되고 있다. 이러한 ER 댐퍼는 외부 가진력에 의하여 댐퍼에 변위가 발생하면, 댐퍼 내부에 포함된 유체의 흐름이 생성되고, 이때 유체의 유로 즉 닥트 양단에 인가되는 전압차로 인하여 생성되는 전자장의 영향으로 ER유체 입자가 정렬되어 전단 스트레인

접수일: 2005년 7월 8일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

* 국방과학연구소

** 창원대학교 제어계측공학과 대학원

교신저자: 창원대학교 제어계측공학과

E-mail:jsjoh@sarim.changwon.ac.kr Tel:(055) 279-7555

(shear strain)이 발생하여 댐핑력(damping force)이 발생한다. 또한 댐핑력은 전하량의 크기에 따라 조절 되므로 인가되는 전압의 크기를 조정하여 댐핑력을 제어하게 된다. 그러므로 수학적으로 표현된 ER 댐퍼의 동적모델(dynamic model)은 제어장치 구성 및 동적 하중을 고려한 댐퍼 설계에 필요하다. 이러한 ER유체의 동적특성을 미시적인 관점에서 살펴보면, 전단응력의 크기에 따라 항복 전(pre-yield), 항복(yield) 및 항복 후(post-yield)의 과정을 반복하여 댐퍼 내부에서 일정부분 에너지를 소비하게 된다. 이때의 유체 입자의 거동은 항복전의 상태에서는 점성 탄성(visco-elastic) 특성을, 항복이 일어나는 순간에서는 점성 탄성 및 소성(visco-elastic Plastic)을 항복이 진행된 후에는 소성(plastic) 운동을 하게 된다고 할 수 있으며, 이때 발생하는 댐핑력은 전하량의 크기와 진폭에 따라 뚜렷한 비선형 특성을 갖게 된다. ER 유체의 동적 특성은 전하량의 크기와 진폭에 따라 뚜렷한 비선형 특성을 갖는 댐핑력이 발생하고, ER 댐퍼의 모델링도 댐퍼의 진동 변위, 속도, 인가되는 전하량 등에 따라 비선형적으로 변화한다.¹ 이러한 댐핑력의 비선형 현상은 측정신호의 고차 모멘트(higher order moment)의 중복 프리에 변환(multiple fourier transform)으로 정의되는 고차 주파수 스펙트럼(higher order spectrum)을 이용하여 댐핑력의 고차 비선형 성분이 주파수 연동현상을 발생시키는 것을 관찰하는 것으로 해석이 가능하다. 주파수 연동 현상은 비선형 항의 영향으로 2개 이상의 주파수 성분이 서로 연동되어 입력 주파수와 상이한 주파수 성분이 관찰되는 것으로, 고차 주파수 스펙트럼은 입력 주파수 성분과 비선형 특성의 영향으로 생성된 주파수 성분과의 관계를 알려준다.

Stanway는 전하량의 크기에 따라 변하는 ER 댐퍼의 동적 모델을 제안하였다. ER 댐퍼의 수학적 모델은 댐퍼 양단의 상대 속도의 차수로 표현하고, ER 댐퍼에 인가되는 전하량의 크기에 따라 계수와 차수의 값이 변화됨을 보였다.² Nui 등은 쿨롱마찰력, 유체저항 및 유체흐름을 고려한 등가 관성량을 포함한 ER 댐퍼의 동적모델을 제안하였고, 댐핑 모델에 대한 인자 해석 결과로 ER 유체에 인가되는 전하량의 크기뿐만 아니라 가진 주파수의 특성에 따라서도 댐핑력의 특성이 매우 다르게 변화한다는 사실을 관찰 하였다.³ Ganmota는 일정한 전하량이 인가되는 ER 댐퍼를 통해 외력의 크기 변화

에 따라 발생하는 ER 유체의 응력이 비선형적 변화를 나타냄을 확인하였다.⁴ Shulman 등은 ER 댐퍼를 적용한 1자유도 진동 모델을 제시하였고 전하량 크기에 따른 댐퍼의 ER 유체 내부의 입자 정렬 변화를 미시적으로 관찰하여 이론적으로 제안된 1자유도 수학적 모델 특성과 실험적으로 관찰된 진동계의 동적 특성을 비교하였다.⁵

본 논문에서는 ER 댐퍼 실험 장치를 구성하고 단순 주파수(single frequency)와 랜덤(random) 가진 신호로 댐퍼의 변위를 발생시켜 댐핑력을 측정하였다. 단순 주파수 입력에 의하여 측정된 댐핑력 신호를 고차 주파수 스펙트럼 해석을 수행하여 비선형성의 존재를 분석하고, 댐핑력 모델이 댐퍼 속도의 고차 항으로 표현됨을 제안하였다. 제안한 모델링을 최소 자승법(Least Square)에 의하여 인자 값을 계산하고, 실험 장치로부터 측정한 실험치와 비교 하여 산출된 모델링의 정확성을 입증하였다. 본 논문의 2장에서는 ER 댐퍼의 댐핑력을 측정하기 위한 실험장치 구성에 대해서 설명하고, 3장에서는 고차 주파수 함수를 이용한 댐핑력의 비선형 특성 해석을 살펴본다. 댐핑력의 모델링을 4장에서 설명하고, 5장에서는 실험 결과를 제시한다.

2. 시험 장비 구성

본 논문에서 제안한 ER 댐퍼의 구조는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 외부 실린더(outer cylinder), 내부 실린더(inner cylinder) 그리고 피스톤(piston)으로 구성되었다. 내부 및 외부 실린더 사이에는 ER 유체가 유동하도록 전극 간격이 형성되어 있으며, 피스톤의 변위가 발생하면 상부와 하부의 실린더의 ER 유체에 유동이 발생하고 유체는 이 간극 사이를 이동하게 된다. 이때 간극에 인가되는 전하량으로 인하여 ER 유체 입자가 정렬되고 그로인하여 전단 스트레인이 발생하여 댐핑력 생성되며, ER 유체는 실린더와 축압기가 유로로 연결되어있다. Fig. 2는 실제 제작된 ER 댐퍼의 형상을 나타내고, 아래에 제시된 Table 1은 시험에 사용된 ER 댐퍼의 주요 설계 치수를 나타내며, Table 2는 사용된 ER 유체인 Bayer사의 TPAI 3566의 특성표이다.

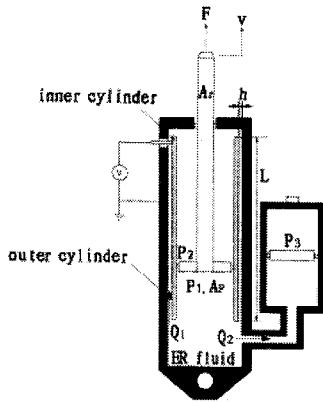


Fig. 1 Schematic diagram of the ER damper

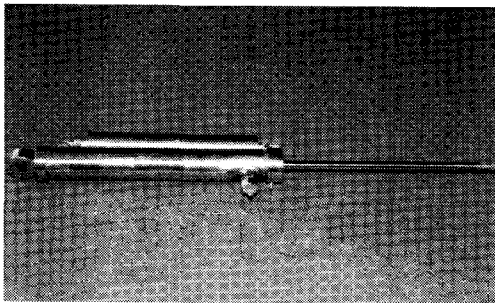


Fig. 2 Photograph of the proposed ER damper

Table 1 Mechanical specifications of ER damper

Design parameter	Value	Unit
Rod diameter	0.013	m
Rod cross sectional area	1.32710^{-4}	m^2
Cylinder length	0.443	m
Outer diameter of inner cylinder	0.030	m
Inner diameter of inner cylinder	0.035	m
Inner diameter of outer cylinder	0.037	m
Cylinder cross sectional area	7.06810^{-4}	m^2
Electrode gap	0.001	m
Electrode length	0.232	m
Gas chamber volume	107.510^{-4}	m^3
Gas chamber pressure	3010^6	N/m^2

Table 2 Characteristics of ER fluids

Temperature	°C	25	60	90	120
Zerofield viscosity	* mPa·s	50	27	23	17
Shear stress at 3kV/mm	Pa	602	1398	1782	1553
Current density at 3kV/mm	A/cm ²	0.6	9.6	48.8	117.3

* mPa·s: milli-Poise · s (1Poise=1g/cm)

댐퍼의 댐핑력을 측정하기 위한 실험 장치는 서보밸브(Moog J072-001)와 위치신호 발생장치인 선형 변환기(LVDT)가 장착된 유압 서보시스템을 이용하여 댐퍼 실린더 변위신호를 케환하여 제어를 수행한다. LVDT는 미국 MTS사의 모델 T-LP형을 사용하였으며, 측정가능범위는 ± 150 mm이다. ER 댐퍼에 전기장을 인가하기 위한 고전압 공급기는 미국 Trek사의 모델 10/10A 증폭기(amplifier)를 사용하였는데, 이 증폭기는 컴퓨터로부터 발생된 0~10V의 전압을 1,000배 증폭하여 ER 댐퍼에 0~10kV의 고전압을 인가할 수 있으며, 출력전류는 10mA까지 가능하다. ER 댐퍼에 전달되는 힘을 측정하기 위한 로드셀(Load Cell)은 인장력과 압축력을 측정할 수 있는 미국 세소텍(Sensotec)사의 모델 45로 측정 범위는 ± 2,000 lbs (± 8896 N)이다. Fig. 3은 구성된 시험장비의 구성도이다.

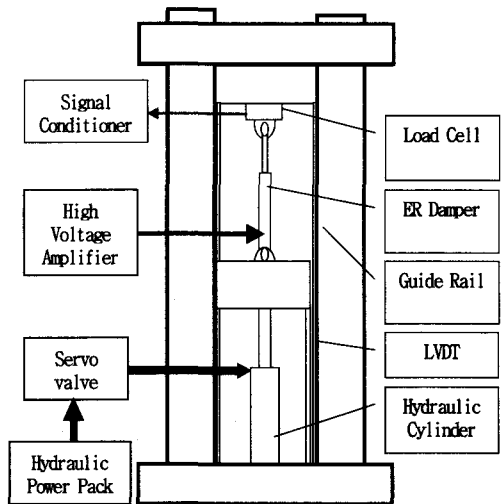


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup for measuring the damping force

3. 고차 주파수 함수를 이용한 댐핑력의 비선형 특성 해석

주파수 연동 현상은 두 개의 조화함수로 구성된 입력신호에 대하여 비선형 시스템의 출력신호가 합 혹은 차이 주파수에서의 변조로써 입력 주파수와 상이한 주파수 성분이 관찰되는 현상으로 나타난다. 이는 입력의 단순주파수에 집중된 신호 에너지가 비선형 특성에 의해 다른 주파수로 분배됨을 의미한다. 이러한 비선형 연동 현상은 주파수 간의 에너지 이동으로 이해할 수 있으며, 모드 간의 상호관계를 감지하고 크기를 분석하여 비선형 특성을 파악하는 유용한 수단으로 활용될 수 있다. 이러한 주파수 연동 현상은 고차 주파수 스펙트럼(higher order spectrum)을 이용하여 관찰할 수 있다.^{6,7} 이러한 고차 주파수 해석 기법은 신호의 1차 모멘트 즉 상관치(correlation)와 주파수 밀도(power spectral density)로는 해석하기 곤란한 비선형 상호작용에 의해 양산된 각 주파수 성분 간의 연관성 및 독립성을 변별하여 상호작용에 의하여 이동된 에너지의 크기를 해석하는 기법이다. 고차 주파수 스펙트럼은 신호 축척치(cumulent)를 중복 푸리에 변환(multiple Fourier transform)하여 표현하며, 축척치는 식 (1)과 같다.

$$C_{k,y}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) = E\{y(t)y(t+\tau_1)y(t+\tau_2)\dots y(t+\tau_k)\} \quad (1)$$

이러한 k차 축척치를 중복 푸리에 변환하여 식 (2)을 고차스펙트럼(higher order spectrum), 이차 주파수 함수로 표현된 식 (3)을 바이스펙트럼(bispectrum), 식 (4)을 트라이스펙트럼(trispectrum)으로 정의하였다.

$$S_{k,y}(f_1, \dots, f_{k-1}) = \iint \dots \int C_{k,y}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) \times \exp\left[j \sum_{i=1}^{k-1} 2\pi f_i \tau_i\right] d\tau_1 \dots d\tau_{k-1} \quad (2)$$

$$S_{2,y}(f_1, f_2) = \iint C_{2,y} \cdot \exp(2\pi f_1 \tau_1 + 2\pi f_2 \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (3)$$

$$S_{3,y}(f_1, f_2, f_3) = \iiint C_{3,y} \cdot \exp(2\pi f_1 \tau_1 + 2\pi f_2 \tau_2 + 2\pi f_3 \tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 \quad (4)$$

바이스펙트럼과 트라이스펙트럼을 주파수 함수로 표현하기 위하여 역 푸리에 변환한 식 (5)와 식 (6)을 각각 식 (7)과 식 (8)으로 표현하였다.

$$C_{2,y}(\tau_1, \tau_2) = \iint E\{Y(f_1)Y(f_2)Y^*(f_1 \pm f_2)\} e^{-j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)} df_1 df_2 \quad (5)$$

$$S_{2,y}(f_1, f_2) = E\left[Y(f_1)Y(f_2)Y^*(f_1 \pm f_2)\right] \quad (6)$$

$$C_{3,y}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \iiint E\{Y(f_1)Y(f_2)Y(f_3)Y^*(f_1 \pm f_2 \pm f_3)\} e^{-j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2 + f_3\tau_3)} df_1 df_2 df_3 \quad (7)$$

$$S_{3,y}(f_1, f_2, f_3) = E\left[Y(f_1)Y(f_2)Y(f_3)Y^*(f_1 \pm f_2 \pm f_3)\right] \quad (8)$$

여기서 Y^* 는 Y 의 켈레 복소수이다. 식 (7)과 식 (8)에서 주파수 성분 $f_1, f_2, f_1 \pm f_2, f_1 \pm f_2 \pm f_3$ 이 서로 독립적이면 각 신호에 대한 3차 혹은 4차 모멘트의 기대치는 영(zero)이 된다. 반대로 이러한 신호들에 비선형 위상 상호 작용(nonlinear phase interaction)에 의한 연동 신호 성분이 포함되어 있어 서로 종속되는 특성이 존재한다면, 바이스펙트럼과 트라이스펙트럼은 위상 상호 작용이 존재하는 주파수 영역에서 부분적으로 영이 아닌 결과로 나타난다. 이와 같은 성질을 이용하여 2차 및 3차 비선형 항에 의한 주파수 상호 연동 현상으로 발생한 $f_1 \pm f_2, f_1 \pm f_2 \pm f_3$ 와 입력 주파수 성분 f_1, f_2 와의 연동 관계를 해석하여 시스템에 포함된 비선형 성질을 감지할 수 있다. 또한, 입력 주파수 신호와 상호 연동작용으로 인하여 발생된 주파수 신호의 파워의 크기에 대한 상관관계를 표시하는 주파수 기여 함수는 식 (9)의 바이코헤런스(bicoherence)와 식 (10)의 트라이코헤런스(tricoherence)로 표현하였다. 이러한 기여함수들은 비선형 연동 관계를 자세히 관찰할 수 있다.^{12,13}

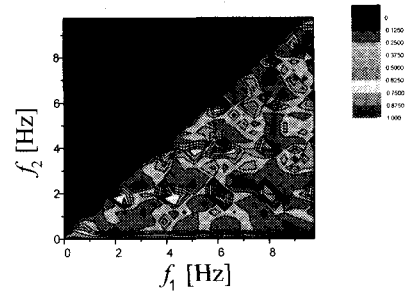
$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|S_{2,y}(f_1, f_2)|^2}{E\left[|Y(f_1)Y(f_2)|^2\right]E\left[|Y(f_1 \pm f_2)|^2\right]} \quad (9)$$

$$t^2(f_1, f_2) = \frac{|S_{3,y}(f_1, f_2, f_3)|^2}{E\left[|Y(f_1)Y(f_2)Y(f_3)|^2\right]E\left[|Y(f_1 \pm f_2 \pm f_3)|^2\right]} \quad (10)$$

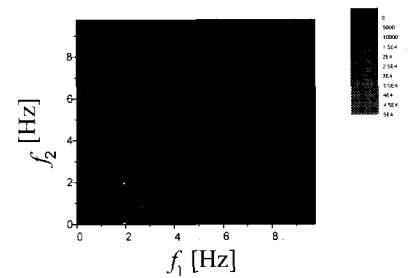
바이코헤런스와 트라이코헤런스는 $0 \leq b^2 \leq 1, 0 \leq t^2 \leq 1$ 의 구간을 만족하며, 각 주파수 성분 간의 상관관계 즉, 원래의 입력 주파수 성분 f_1, f_2 와 비선형 상호작용으로 양산된 주파수 성분 $f_1 \pm f_2$ 혹은 $f_1 \pm f_2 \pm f_3$ 와의 상관관계를 해석하는데 사용하였다. 주파수 성분 $f_1 \pm f_2$ 혹은

$f_1 \pm f_2 \pm f_3$ 에서 바이코헤런스 혹은 트라이코헤런스가 '1'에 가까우면 발생된 주파수 에너지가 입력 주파수 성분 f_1, f_2 의 모드 상호 작용에 의하여 전적으로 산출된 것이며, 바이코헤런스 혹은 트라이코헤런스의 값이 '0'에 가까우면 위상 관계가 없음으로 $f_1, f_2, f_1 \pm f_2, f_1 \pm f_2 \pm f_3$ 의 주파수 성분이 독립되어 시스템에 각각의 모드로 입력된 것으로 판단한다. 이와 같은 원리로 바이코헤런스와 트라이코헤런스는 비선형 시스템의 2차 및 3차 항이 발생시키는 위상 상호작용의 정도를 해석하는데 사용되어진다.^{8,9}

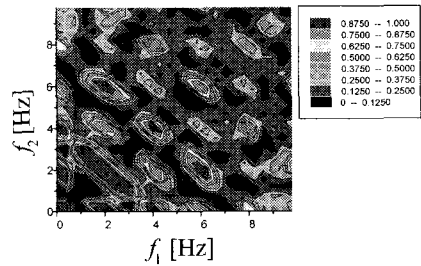
이러한 고차 주파수 스펙트럼을 이용하여 ER 댐핑력의 비선형 특성을 분석하기 위하여 Fig. 3의 실험 장치를 사용하여 2Hz의 단순 주파수로 댐핑의 변위를 발생시키고, 로드셀을 이용하여 댐핑력을 측정하였다. 이때에 ER 댐핑에 인가되는 전하량은 4kV/mm로 하였다. 측정된 댐핑력 신호에 대하여 고차 주파수 스펙트럼 즉, 바이스펙트럼, 바이코헤런스, 트라이스펙트럼과 트라이코헤런스를 구하여 댐핑력 신호에 존재하는 비선형 특성을 분석하였다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 댐핑력 신호의 바이스펙트럼과 바이코헤런스이며 댐핑의 입력 주파수 2Hz 성분에 대한 배수인 4Hz, 6Hz 등의 주파수 성분이 관찰되었다. 이는 2Hz 성분과 댐핑력의 2차(quadratic) 항의 비선형영향으로 발생한 4Hz, 6Hz 성분의 기대치(expectation)가 있으며, 이것은 이들 주파수 성분 사이의 연관 관계가 존재함을 의미한다. 그러므로 댐핑력은 2차 비선형 특성을 갖는 항이 존재함을 알 수 있다. Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 트라이스펙트럼과 트라이코헤런스를 가진 주파수 2Hz에서 절단한 절단면을 그린 그림이다. 이 그림들 또한 입력 주파수 2Hz와 3차(cubic) 항으로 인하여 생성된 비선형 시스템에 의해 생성된 6Hz 등의 주파수 연동을 나타낸다. 이러한 주파수 연동현상 분석을 통하여 ER 댐핑의 댐핑력이 가진 속도에 대한 2차, 3차의 비선형 특질을 가짐을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 에너지 관점에서 설명하면, 시스템의 비선형성의 영향으로 가진 주파수 2Hz에 집중되었던 입력 에너지가 출력 에너지에서는 다른 주파수로 일부분 이동됨을 의미하며 바이스펙트럼과 트라이스펙트럼은 이러한 인과 관계를 보여주었다.^{10,11,12}



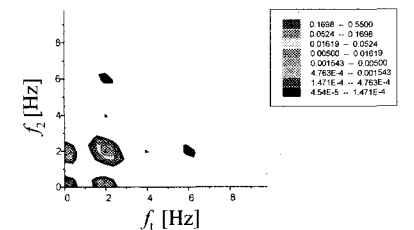
(a) Bispectrum



(b) Bicoherence



(c) Trispectrum



(d) Tricoherence

Fig. 4 Higher Order Spectrum of Damping force signal at E = 4kV/mm, input frequency: 2Hz

4. 댐핑력의 모델링

3장에서 고차 주파수 스펙트럼에 의한 분석 결과를 기초로 하여 댐핑력 모델을 고차 항으로 표현할 수 있음이 확인되었고, 설명된 고차 주파수 스펙트럼의 해석 결과를 근거로 3차 항 까지를 고려한 댐핑력 모델을 제안하였다. 이는 식 (11)과 같다.

$$f_d = c_1 v + c_2 v|v| + c_3 v^3 \quad (11)$$

식 (11)의 c_1, c_2, c_3 계수 값들은 최소 제곱법에 의하여 산출하였으며, 실제의 측정된 댐핑력 값을 F_i 라고 하고 오차 함수 Q 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} Q &= E[(F_i - f_d)^2] \\ &= E[(F_i - c_1 v + c_2 v|v| + c_3 v^3)^2] \\ &= E[F_i^2] - 2c_1 E[F_i v] - 2c_2 E[F_i v|v|] - 2c_3 E[F_i v^3] \\ &\quad + c_1^2 E[v^2] + c_2^2 E[v^4] + c_3^2 E[v^6] \\ &\quad + 2c_1 c_2 E[v^2 |v|] + 2c_2 c_3 E[v^4 |v|] + 2c_1 c_3 E[v^4] \end{aligned} \quad (12)$$

계수들 c_1, c_2, c_3 값들을 구하기 위하여 식 (12)의 오차 함수에 대하여 편미분을 취하면, 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial c_1} &= -2E[F_i v] + 2c_1 E[v^2] + 2c_2 E[v^2 |v|] + 2c_3 E[v^4] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial c_2} &= -2E[F_i v|v|] + 2c_2 E[v^4] + 2c_1 E[v^2 |v|] + 2c_3 E[v^4 |v|] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial c_3} &= -2E[F_i v^3] + 2c_3 E[v^6] + 2c_2 E[v^4 |v|] + 2c_1 E[v^4] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

이 식 (13)을 정리하면 식 (14)이 된다.

$$\begin{bmatrix} E[v^2] & E[v^2 |v|] & E[v^4] \\ E[v^2 |v|] & E[v^4] & E[v^4 |v|] \\ E[v^4] & E[v^4 |v|] & E[v^6] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E[F_i v] \\ E[F_i v|v|] \\ E[F_i v^3] \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)을 간단히 표현하면 식 (15)과 같으며,

$$A\Phi = B \quad (15)$$

계수 c_1, c_2, c_3 을 나타내는 Φ 는 식 (16)과 같다.

$$\Phi = A^{-1} B \quad (16)$$

가우시안(Gaussian) 랜덤 가진 신호에 대한 댐핑력 신호를 이용하여 계산된 c_1, c_2, c_3 을 Fig. 5에 표현하였다. 식(11)의 댐핑 모델의 선형부의 계수 c_1 은 전하량 크기 변화에 따라 선형적으로 증가하고, 2차 비선형부 계수 c_2 는 1kV/mm부터 2kV/mm사이에서 급격히 변화하였다. 3차 비선형부 계수 c_3 는 2kV/mm이상에서는 오히려 감소하였다.

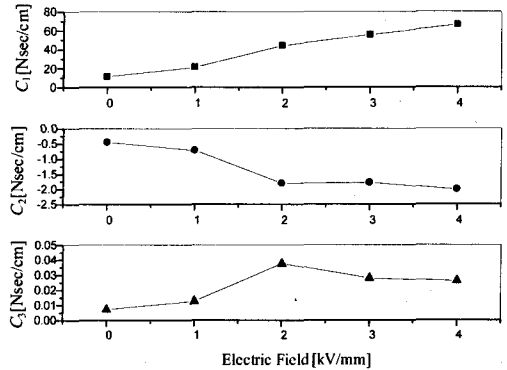


Fig. 5 Coefficients of nonlinear damping model with gaussian input signal

5. 실험 결과

4장에서 계산된 모델링 결과를 실제의 댐퍼의 운용 조건을 고려한 입력 신호를 Fig. 3의 실험 장치에 인가하여 획득된 실험 데이터와 비교하여 분석하였다. Fig. 6에서 ER 댐퍼에 전하량을 2kV, 3kV 공급한 후, 차량의 주행 조건을 고려한 랜덤 가진 신호에 의하여 측정된 실제 실험장치의 댐핑력과 모델링으로 산출한 댐핑력과의 차이를 나타내었으며, 두 신호는 매우 유사한 경향을 가짐을 확인하였다. 이와 같은 결과를 통하여 제안된 모델링이 실제의 댐핑 특성을 잘 모사함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7은 모델링 결과에 ER 댐퍼에 인가되는 전하량의 크기를 1kV/mm, 2kV/mm, 3kV/mm,

4kV/mm로 가변한 후, 댐퍼의 이동 속도를 변화시켜 가면서 댐핑력의 크기를 계산한 결과이다. 계산된 댐핑력은 전하량의 크기와 댐퍼 이동 속도 가 커질수록 커짐을 알 수 있었으며, 이는 댐퍼의 일반적인 특징과도 매우 유사하게 일치함을 확인할 수 있었다.

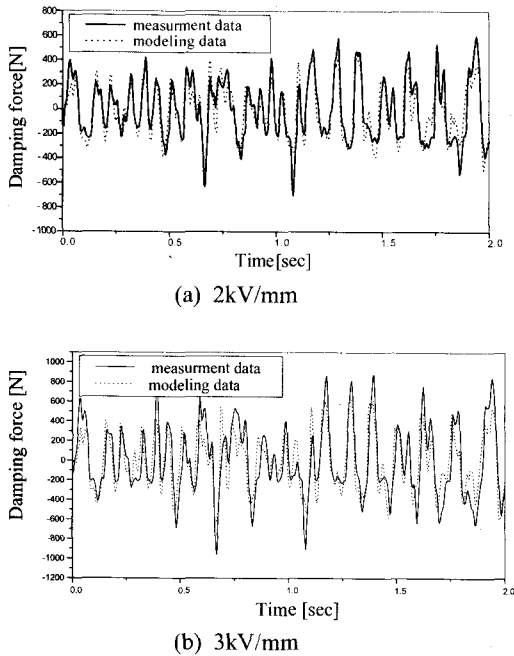


Fig. 6 Measured data and modeling of the damping force with random input signal

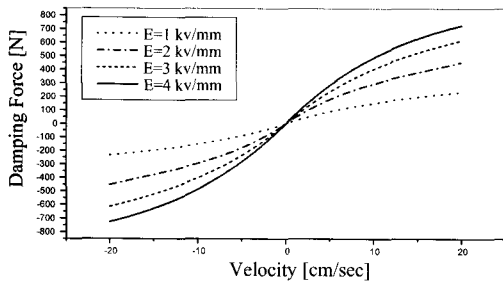


Fig. 7 Damping force w. r. t. damper velocity

6. 결론

본 논문에서는 측정된 ER 유체를 이용한 댐퍼의 댐핑력 신호를 바이스펙트럼과 트라이스펙트럼을 이용한 비선형 주파수 연동 해석을 수행하여 댐핑력 신호에 포함된 2차(quadratic) 및 3차(cubic) 비선형 특징을 분석 하였다. 이러한 해석을 근거로 댐핑력 모델을 댐퍼 속도의 1차, 2차 및 3차 항으로 표현할 수 있음을 제안하였고, ER 댐퍼에 인가되는 전기장의 크기 변화에 따른 댐핑력 모델의 선형 및 비선형 항의 계수 변화를 산출하였다. 제안된 모델링 결과를 실험 장치로부터 측정된 데이터와 비교를 수행하여 매우 유사한 특성을 가짐을 확인하였으며, ER 유체 댐퍼에 인가되는 전하량 및 이동속도 변화에 대한 댐핑력의 크기 변화에 대한 분석을 수행하여 제시한 댐핑력 모델이 제어 장치 구성 및 동적 하중을 고려한 댐퍼 설계에 유용함을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부· 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Bonnecaze, R. T. and Brady, J. F., "Yield Stresses in ElectroRheological Fluid," J. of Rheol. Vol.36, No.1, pp.73-115, January, 1992.
2. Stanway, R., Sproston, J. and Firoozian, R., "Identification of the Damping Law of an Electro-Rheological Fluid," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 111, pp. 91-96, March, 1989.
3. Mui, G., Russel, D. L. and Wong, J. Y., "Non-linear Parameter Identification of an Electro-Rheological Fluid Damper," Proceedings of the 5th International Conference on E-R Fluids, Sheffield, U.K., pp. 690-697, 10-14 July, 1995.
4. Gamota, D. R. and Filisko, F. E., "Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Materials : Moderate Frequencies," J. of Rheol. Vol.35, No.3, pp. 399-425, April 1991.

5. Shulman, Z. P., Khusid, B. M., Korobko, E. V. and Khizhinsky, E. P., "Damping of Mechanical Systems Oscillations by a Non-Newtonian Fluid with Electric-Field Dependent Parameters," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.25, pp. 329-346, 1987.
6. Nikias, C. L. and Raghuvver, M. R., "Bispectrum Estimation," *Proceedings of IEEE*, Vol.75, No. 7, pp. 869-891, July, 1987.
7. Nikias, C. L. and Mendel, J. M., "Signal Processing with High Order Spectra," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 10-37, July, 1993.
8. Kim, K. I. and Powers, E. J., "A Digital Method of Modeling Quadratically Nonlinear Systems with a General Random Input, *IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing*," Vol. 36, No. 11, pp. 1758-1769, November, 1988.
9. Nam, S. W. and Powers, E. J., "Application of High Order Spectral Analysis to Cubically Nonlinear System Identification, *IEEE Transaction on Signal Processing*," Vol. 42, No. 7, pp. 1746-1765, July, 1994.
10. Fackrell, J. W. A. , White, P. R., Hammond, J. K. and Pinnington, R. J., "The Interpretation of the Bispectra of Vibration Signal I. Theory," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.9, No.3, pp. 257-266, 1995.
11. Fackrell, J. W. A., White, P. R., Hammond, J. K. and Pinnington, R. J., "The Interpretation of the Bispectra of Vibration Signal II. Experimental Results and Applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.9, No.3, pp. 267-274, 1995.
12. Collis, W. B., White, P. R. and Hammond, J. C., "High Order Spectra: Bispectrum and Trispectrum," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.12, No.3, pp. 375-394, 1998.