

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.12.1417

유한요소법을 이용한 Free-Friction Stroke 댐퍼의 동특성 해석

구희춘* · 이재욱* · 유완석†

(2009년 7월 1일 접수, 2009년 11월 2일 수정, 2009년 11월 3일 심사완료)

A Study on the Dynamic Characteristics of Free-Friction Stroke Damper by Finite Element Method

Hi Chun Ku, Jae Wook Lee and Wan Suk Yoo

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Free-Friction Stroke Damper, Optimization Technique(최적화기법), Washing Machine(세탁기)

Abstract

Various types of damper are usually applied to reduce noise and vibration for mechanical systems. Especially, for washing machines, the free-friction stroke damper is installed. The behavior of the free-friction stroke damper has nonlinear characteristics such as hysteresis and viscoelastic properties because of its foam material. First of all, the dynamic experiments were carried out by using a MTS machine to find characteristics of the free-friction stroke damper. And the simulation model of the free-friction stroke damper and characteristics of a foam material were evaluated by using optimization technique. To make a good simulation model which can show the dynamic characteristics, it is important to understand the working mechanism of the damper. The Finite Element Method (FEM) technique can help us instinctively understand the damping phenomenon under operating conditions, because we can observe the condition of damper at every step in the simulation by using it. Also, by changing factors, we can comprehend the variation of characteristics of damper. So, in this paper, a study on the dynamic characteristics of free-friction stroke damper by FEM is focused on. Finally, the possibility which physical experiments can be replaced into simulations is shown.

1. 서론

기호설명

- λ_i : 주신장(Principal stretch)
- J^{th} : 열변형률(Thermal volume ratio)
- J^{el} : 탄성변형률(Elastic volume ratio)
- β_i : 압축성 정도(Compressibility)
- ν_i : 푸아송 비(Poisson's ratio)

오늘날 세탁기는 거의 모든 가정에서 사용되고 있다. 이렇게 생활의 필수 가전제품 중의 하나가 되어버린 세탁기에 있어 진동과 소음 절감은 중요한 성능 평가 항목 중 하나가 되었다.

세탁기의 진동과 소음의 주된 원인은 과도 및 정상상태 탈수 과정에서 발생하게 되는데 이는 고속으로 회전하는 드럼내의 질량 불균형 때문에 나타난다. 지금까지 이러한 문제점을 보완하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.^(1~12) 기존의 세탁기는 이런 진동과 소음을 줄이기 위하여 단가가 낮은 마찰댐퍼를 사용하였다. 하지만 오늘날 더 높은 진동, 소음 저감 성능이 요구되는 추

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 부산지부 춘계학술대회(2009. 5. 8., 동명대) 발표논문임]

* 부산대학교 대학원 기계공학부

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : wsyoo@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1457 FAX : (051)581-8514

Table 1 Part of Free-friction stroke damper

| 번호 | 명칭 |
|----|-------------------------|
| 1 | 스토퍼(Stopper) |
| 2 | 로드(Rod) |
| 3 | 커버(Cover) |
| 4 | 폼(Foam) |
| 5 | Free-friction stroke 구간 |

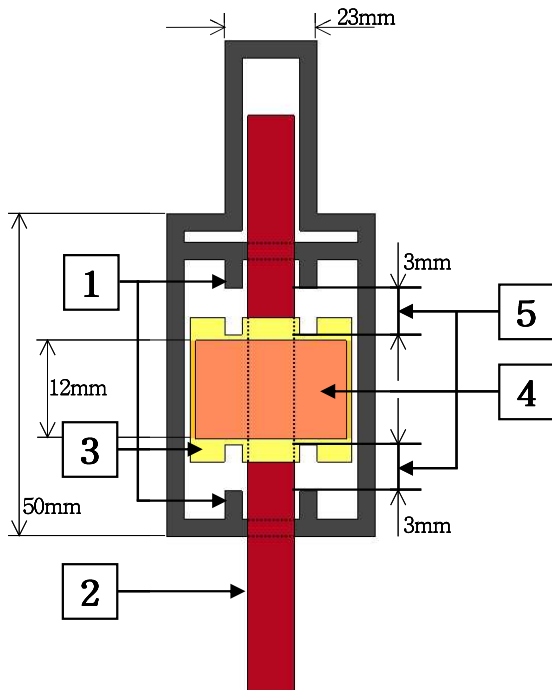


Fig. 1 Free-friction stroke damper

세에 맞추어 Free-friction stroke 댐퍼가 개발되었다.

Free-friction stroke 댐퍼의 특징은 Fig. 5와 같이 약 6mm의 Free-friction stroke구간에 있다. 기존의 마찰댐퍼는 전 구간에서 감쇠력이 발생하는 데 반해 Free-friction stroke 댐퍼는 이 구간에서 감쇠력을 발생 시키지 않는다. 이로 인해 정상상태 탈수 과정(진폭 6mm 이하)에서는 드럼으로부터 바닥으로 힘의 전달 경로를 제거 할 수 있어, 정상상태의 진동과 소음 저감에 탁월한 효과를 가져다준다.⁽¹³⁾

본 논문에서는 Free-friction stroke 댐퍼의 특성 및 작동 메커니즘을 유한요소기법을 이용하여 해

석상에서 구현하였다. 개발된 모델이 실제 모델과 동일한 특성을 보이도록 폼의 물성치 변수를 최적화 기법을 이용하여 구하였고, 메카니즘에 영향을 주는 인자인 상호간 일어나는 접촉이나 상대운동 대하여 정의하였으며 개발된 모델의 성능을 평가하여 실제 모델과 비교하였다.

또한 모델의 여러 가지 설계 변수를 변경하였을 때 나타나는 댐퍼의 특성 변화를 분석하여 기존의 실제 모델을 생산하여 실험을 하는 방법을 해석 모델을 이용하여 결과를 예측할 수 있는 방법으로 대체할 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. Free-friction stroke 댐퍼의 형상 및 특성

본 연구에서 사용된 Free-friction stroke 댐퍼의 단면도와 각 부분에 대한 명칭을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 로드와 스토퍼는 동일한 중심축을 가지며 상하방향으로 상대운동을 하게 된다. 이때 로드의 외경에는 폼이 삽입되어져 있는 커버가 장착되어 있다. 폼은 로드와 맞닿아 축(Shrinkage) 되어있는 형태로 커버내부에 고정되어있다. 이 부분에 의한 마찰력과 폼의 변형이 Free-friction stroke 댐퍼의 역할을 수행하게 된다.

Free-friction stroke 댐퍼의 경우 로드와 스토퍼의 상하방향 상대운동 시에 마찰력이 발생하지 않는 Free-friction stroke구간이 존재하게 되며 이 구간을 지난 이후에는 폼과 스토퍼의 접촉에 의해 멈추게 되고 로드만 운동하게 되어 마찰력이 발생 한다. 이후에 반대방향으로 운동이 진행될 경우, 마찬가지로 Free-friction stroke구간 이후 로드만의 운동이 생긴다.

Free-friction stroke 댐퍼는 기존의 마찰댐퍼와는 달리 약 6mm의 Free-friction stroke구간을 가진다. 주파수 3Hz, 진폭 8mm의 시험조건으로 힘과 변위 선도와 힘과 속도 선도를 나타내면 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

Fig. 1에서 폼과 스토퍼사이의 공간을 Free-friction stroke 라고 하며 로드가 전진하여 폼이 커버와 함께 이 공간을 진행하는 동안 둘 사이의 상대운동은 없다. 이는 Fig. 2와 Fig. 3에서 ①-② 구간에 해당하는 상태이며 상대운동이 발생하지 않기 때문에 변위에 따라 힘이 변하지 않는 그래프 형태가 나타난다.

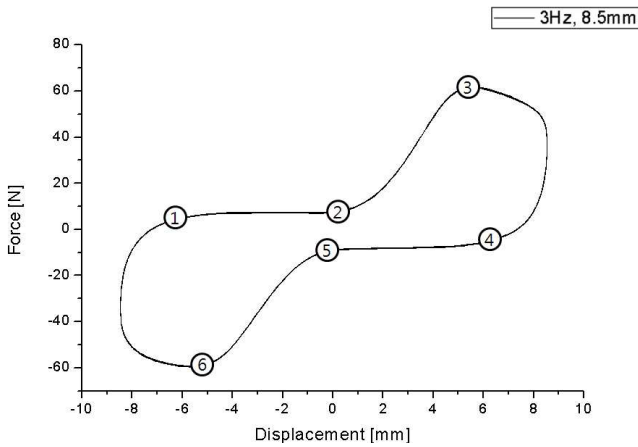


Fig. 2 Force vs. Displacement curve of Free-friction stroke damper(3Hz, 8.5mm)

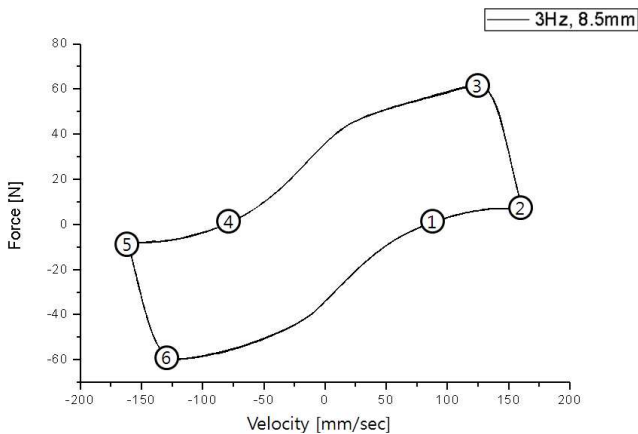


Fig. 3 Force vs. Velocity curve of Free-friction stroke damper(3Hz, 8.5mm)

Free-friction stroke 구간이 끝나는 지점은 로드가 계속 진행하여 폼과 스톱퍼사이의 공간이 없어지는 순간이다. 스톱퍼가 폼과 접촉이 일어나는 ②-③구간은 로드가 전진할수록 폼이 변형이 점점 크게 일어나게 된다. 따라서 약 6mm 정도 변위가 진행되는 동안 힘이 약 60N 정도까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 3의 힘과 속도 그래프에서 이 구간을 살펴보면 속도가 점점 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 스톱퍼와의 접촉으로 인해 폼의 변형이 심해지면서 진행의 반대방향으로 반력이 커지기 때문에 나타나는 현상이다. 로드가 계속 진행함에 따라 점차 증가한 반력은 ③지점에서 최대에 이르게 된다. 이후의 반력은 폼과 로드사이 에 작용하는 최대 정지마찰력 한계를 초과하게 되는데 이때 폼이 스톱퍼에 의해 멈춘 상태로 로드만 미끄러져 움직이는

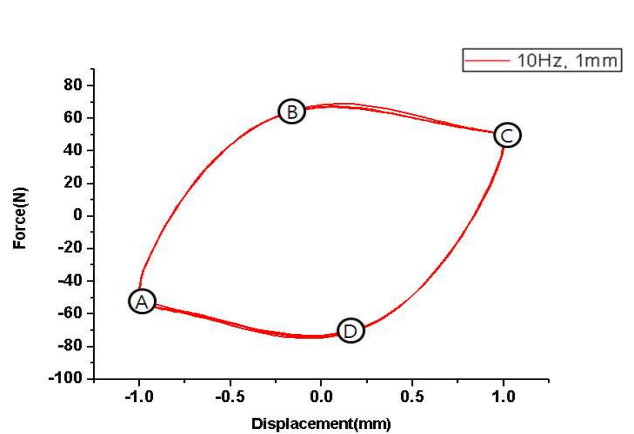


Fig. 4 Force vs. Displacement curve of friction damper(10Hz, 1mm)

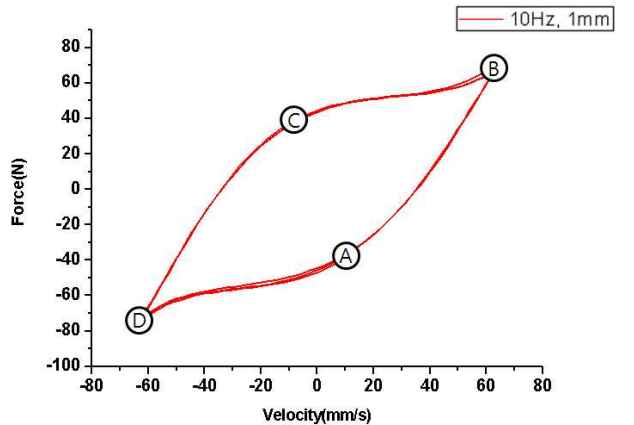


Fig. 5 Force vs. Velocity curve of friction damper(10Hz, 1mm)

현상이 나타나게 된다. 이후 로드는 한방향의 운동을 종료하고 반대방향으로 ①-②구간과 동일한 운동을 시작한다. ④-⑤구간은 ①-②구간과 마찬가지로 스톱퍼와의 상호작용이 없는 상태로 로드와 폼이 움직이게 되므로 힘이 발생하지 않는다. ⑥-①구간은 ③-④구간의 반대방향으로 동일한 메카니즘을 가진다. Free-friction stroke 댐퍼가 기존의 마찰댐퍼와 다른 특징은 바로 ①-②구간과 ④-⑤구간이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 기존의 마찰댐퍼의 힘 대 변위 선도 및 힘 대 속도 선도이다. 마찰댐퍼의 A-③구간은 Free-friction stroke 댐퍼의 ②-③구간에 해당한다. 그리고 ③-④구간은 ③-④구간에 C-D구간은 ⑤-⑥구간에 해당한다.

Free-friction stroke 구간을 제외하면 두 댐퍼는 동일한 특성을 가진다. 마찰댐퍼는 로드가 진행

하면 운행의 전 구간에서 항상 반력이 발생하지만 Free-friction stroke 댐퍼는 Fig. 2에 보는 바와 같이 변위가 증가해도 반력이 증가하지 않는 구간이 존재한다. 이것은 정상상태에 도달한 세탁기 드럼이 Free-friction stroke 구간 이내의 허용 진동은 세탁기 케이스로의 진동 전달 경로를 절연시켜 불필요한 진동을 케이스로 전달시키지 않는다는 것을 의미한다.

3. Free-friction stroke 댐퍼의 모델링

3.1 FEM기법을 이용한 Free-friction stroke 댐퍼 모델

Free-friction stroke 댐퍼의 해석적 모델을 구현하기 위해서는 정확한 치수와 부품사이의 관계를 규명해야한다. 이를 통해 부품간의 접촉문제를 정확하게 모사하여야만 올바른 해석을 할 수 있다.

Fig. 6은 해석에 사용된 댐퍼의 유한요소 모델이다. 본 모델에서는 해석에 필요하지 않은 스톱퍼의 외형은 제거하고 폼과의 접촉이 일어나는 부분만을 모델링 하였다. 변형이 없는 강체로 가정한 로드와 스톱퍼, 커버는 해석시간을 줄이기 위하여 큰 요소로 모델링하였고, 큰 변형이 일어나는 폼재질은 세밀하게 요소를 나누어 정밀성을 높였다. 각각의 부품 사이에 접촉이 발생하는 부위를 해석상에서 Contact surface를 정의함으로써 상호작용 할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 전체 모델에 29008개의 노드와 27352개의 요소를 사용하였으며, 각 부품사이에 전달되는 힘을 정확히 구하기 위해 Table 2와 같은 접촉 조건을 정의하여 해석하였다.⁽¹⁴⁾ 로드와 폼사이에는 억지 끼워 맞춤 해석을 위하여 Contact shrink조건을 정의하였다. 이것은 Master surface에 Slave surface가 침투되어 있는 양만큼 정의 된 반력 방향으로 밀어내는 과정을 말한다. 커버와 폼의 접촉은 스톱퍼와 로드에 의해 반지름 방향으로 늘어나는 폼을 잡아주는 역할을 하며 이 과정을 통해 폼과 로드사이의 수직반력이 계산된다. 스톱퍼와 폼 사이의 접촉은 Free-friction stroke구간이 끝나고 폼이 스톱퍼에 의해 운동에 방해를 받으며 변형이 일어나게 하는 역할을 하며 이때 감쇠력이 계산된다.

해석은 아래의 두 가지 과정으로 나누어 진행

Table 2 The definition of contact surfaces

| Condition | Master surface | Slave surface |
|----------------|----------------|---------------|
| Contact shrink | 로드 | 폼 |
| Contact | 커버 | 폼 |
| Contact | 스톱퍼 | 폼 |

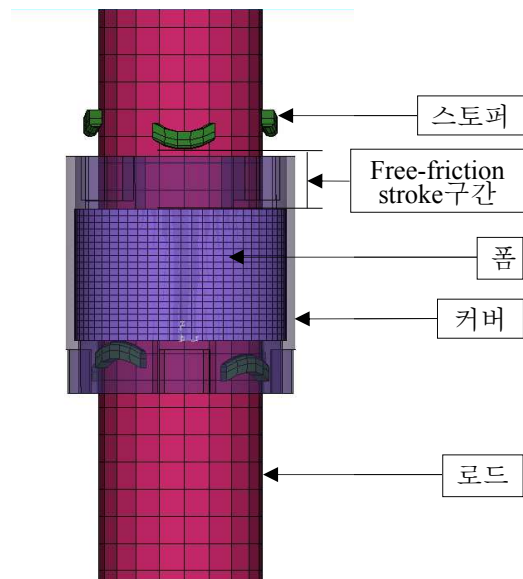


Fig. 6 Model of free-friction stroke damper

되었다.

3.1.1 로드, 커버와 폼의 억지 끼워 맞춤(Shrinkage) 과정

폼은 로드와 커버사이에 존재하는데 단순히 접촉만을 이루고 있는 것이 아니라 로드에 의해 억지로 끼워 맞춰져 있고 이때 이완된 폼을 커버가 외부에서 구속하고 있는 형태이다. 로드와 커버가 폼을 억지로 압입하는 양이 많아질수록 수직 반력이 증가하게 되므로 Free-friction stroke구간 이후 로드와 폼사이의 마찰력이 증가하게 되고 결과적으로 댐퍼의 감쇠력이 커지게 된다. 따라서 해석하려고 하는 모델에는 이러한 강제 압입력이 선행 해석되어 고려되어야 한다.

첫 번째 해석과정에서 폼을 억지로 로드와 끼워 맞추는 과정을 수행하게 된다. 우선 폼이 강제로 절입되기 전의 형태로 모델링하여 로드와의 접촉면 사이의 관계를 정의하는데 이때 사용되는 명령어는 Contact shrink이다. 이 명령어는 정의된

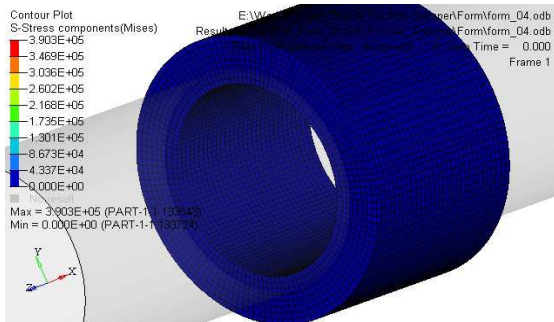


Fig. 7 Foam shape before shrinkage process

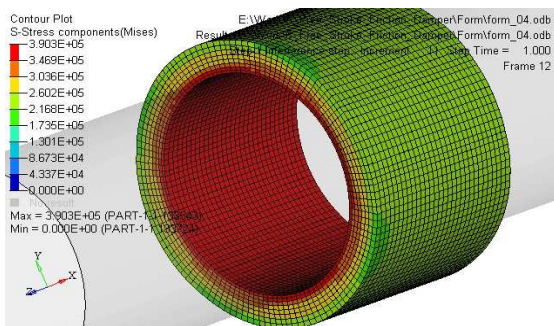


Fig. 8 Foam shape after shrinkage process

두 접촉면 사이의 경계면까지 Slave로 정의된 접촉면을 밀어내고 이때의 반력을 산출하게 된다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 로드에서 폼이 억지 끼워 맞춤이 되기 전과 후의 응력분포를 나타내는 그림이다. Fig. 7에서 폼이 로드내부로 침투해 있는 양을 외부로 강제로 밀어내는 과정을 통해 폼이 압축되고 수직응력을 발생시키며 이러한 강제 압입력이 마찰 계수와 곱해져 로드의 반력을 나타내게 된다.

3.1.2 로드의 상하 병진 운동 및 스톱퍼와 폼의 접촉 과정

첫 번째 과정의 해석이 종료되면 이어서 로드가 상하로 움직일 때의 운동을 해석하게 된다. 이때 Free-friction stroke 구간을 지나는 동안 폼은 억지 끼워 맞춤으로 인해 얻은 압입력 외에 로드가 움직이는 방향으로 힘을 받아 같이 움직이게 된다. 이때 폼에는 관성력이 작용하지만 폼의 질량이 미소하여 압입력과 비교하면 충분히 작은 값으로 운동에 영향을 미치지 않는다. 이후 스톱퍼와 접촉이 일어나게 되면 폼의 변형이 로드의 진행거리와 비례하여 커지게 된다. 이때 폼의 변형을 통하여 감쇠력이 나타나게 된다. 이 과정은 Fig. 2의 ②-③구간에 해당하는 것으로

Free-friction stroke 구간을 지나 로드의 운동에 반력이 작용하는 구간이다. 이 감쇠력은 세탁기가 탈수과정에서 정상상태 회전에 들어가기 전 진동을 잡아주는 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 Abaqus standard의 Implicit scheme과 Explicit scheme을 전환하는 Hybrid scheme을 사용하였다. 위에서 언급한 두 가지 과정 중 첫 번째 억지 끼워 맞춤과정은 폼의 변형이 축에 반경방향으로 일정하게 일어나 해석상의 아무런 문제가 발생하지 않았으나 두 번째 과정의 경우 스톱퍼와 폼 사이의 접촉이 발생할 때 폼에서 국소적으로 큰 변형이 일어나게 된다. Implicit을 통한 방법으로는 이러한 요소의 심한 변형을 해석하는데 어려움이 있으며, 수렴을 하지 못해 해석이 발산하는 경우가 생긴다. 이러한 경우를 방지하기 위하여 본 연구에서는 첫 번째 과정인 Implicit을 통해 얻어진 결과를 Import하여 두 번째 과정에서 Explicit scheme으로 전환 후 해석하는 Hybrid 방법을 제안하였다.

Explicit scheme은 충돌과 같은 아주 짧은 시간에 일어나는 큰 모델의 해석에 효율적인 방법으로 큰 변형이 일어나는 기하학적 비선형 문제의 해석에 적합한 방법이다. 폼은 외부의 외력에 의한 변형이 심한 재료로 해석의 수행에 이 방법이 적합할 것으로 판단하였다. 하지만 Explicit scheme은 아주 짧은 시간 간격을 적분간격으로 잡기 때문에 해석에 상당한 시간이 걸리는 단점이 있다.⁽¹⁵⁾

향후 폼과 같은 대변형이 일어나는 물성의 동적 거동 해석을 연구하는 경우에는 Implicit scheme과 Explicit scheme을 혼합한 Hybrid 방법을 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

3.2 Hyperfoam의 재료 물성

본 연구에서는 폼의 거동을 표현하기 위해 Hyperfoam 재료 물성을 사용하였다.⁽¹⁶⁾

Hyperfoam의 거동은 다음과 같은 Ogden strain energy function을 사용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} [\hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1)] \quad (1)$$

여기서, μ_i , α_i 와 β_i 는 재료상수 값으로 시험을 통해 측정 되는 값이다. $\hat{\lambda}_i$ 는 주신장 λ_i 와 열변형 계수 J^{th} 의 관계식으로 정의되며 식 (2)와 같다.

$$\hat{\lambda}_i = (J^{th})^{-\frac{1}{3}} \lambda_i \quad (2)$$

식 (1)의 J^{el} 은 탄성계수로 $\hat{\lambda}_i$ 에 의해 결정되며 식 (3)과 같다.

$$J^{el} = \hat{\lambda}_1 \hat{\lambda}_2 \hat{\lambda}_3 \quad (3)$$

각각의 에너지 함수에서 β_i 는 압축성의 정도를 결정하는 인자이며, 이는 뿌아송 비 v_i 의 관계식으로 결정되며 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\beta_i = \frac{v_i}{1 - 2v_i} \quad (4)$$

4. 해석결과와 검증

실제 폼의 특성과 일치하는 폼의 물성치를 구하고 이를 이용하여 세탁기 탈수 시 과도작동 구간에 해당하는 두 가지 경우에 대하여 실험결과와 비교하여 보았다.

4.1 정적하중 시험

폼의 물성치를 결정하기 위하여 정적하중을 가하는 실험과 해석상에서 동일하게 정적하중 조건을 주고 각각 힘 대 변위 선도를 구하였다. 실제 실험을 통하여 재료상수 값 μ_i , α_i 와 β_i 를 구하는 것이 최선의 방법이나, Free-friction stroke 댐퍼에 사용된 폼의 경우 시편의 형태로 구할 수 없으므로, 댐퍼의 압축실험을 선행하고 동일한 시험 조건을 구현함으로써 시험 결과와 동일한 결과를 가지는 재료물성을 해석상에서 얻는 방법을 사용하였다. 따라서 위의 변형을 에너지 함수(N=3)에서 설계변수 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 를 조절하여 시험의 정적 힘 대 변위 선도와 RMS값이 최소가 되는 변수를 식 (5)와 같이 구하였다.

$$Min R(\mu_j, \alpha_j) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (F_{exp} - F_{anal})^2}, j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

여기서, F_{exp} 는 시험을 통해 얻은 힘, F_{anal} 은 해석을 통해 얻은 힘이며 m은 데이터의 개수이다.

반복된 해석을 통해 힘 대 변위 자료의 RMS값이 최소가 되는 변수를 찾는 방법에는 Visual DOC를 이용하였다. Visual DOC는 계산이 복잡한 문제의 해를 구할 수 있도록 다양한 최적설계 알고리즘을 제공하는 프로그램이다. 프로그램 인터페이스를 제공하여 외부프로그램 및 데이터와 상

Table 3 Optimized parameters of material property

| Design variables | Optimized parameters |
|------------------|----------------------|
| μ_1 | 0.6 |
| μ_2 | 0.25 |
| μ_3 | 0.05 |
| α_1 | 0.03 |
| α_2 | 0.01 |
| α_3 | 0.04 |

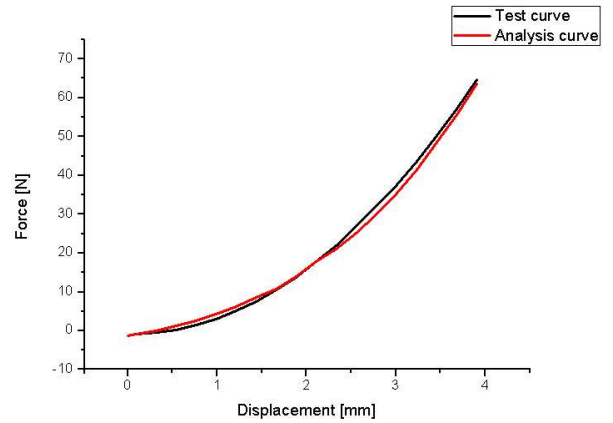


Fig. 9 Static Force vs. Displacement curve of the foam

호작용을 할 수 있어 사용자가 해석하고자 하는 프로그램을 연결하여 GUI 환경에서 편리하게 입력과 수정이 가능하다. Visual DOC는 내부에 Visual Script라는 인터페이스 프로그램을 삽입함으로써 해석 프로그램에 상관없이 사용가능하고 응답(response)으로 설정할 수 있는 결과 파일의 개수도 구속받지 않는다. 그리고 해석 프로그램의 입력 파일이 ASCII코드로 작성되어 있으면 어떤 프로그램과도 연결이 가능하다는 장점이 있다.⁽¹⁷⁾

Table 3는 물성 인자로 고려된 6개의 값이 최적화 되어 얻어진 결과이다. Fig. 9는 실제 테스트와 최적화를 통해 얻어진 변수를 입력한 해석 모델의 힘 대 변위 곡선을 비교한 것이며, 두 결과가 상당히 잘 일치하는 것으로 보아 최적화된 설계변수들이 폼의 실제 물성치를 잘 표현할 수 있다고 판단하였다.

4.2 장비 구성 및 동적하중 시험

Fig. 10에 MTS 장비를 이용한 Free-friction stroke damper의 특성 시험 모습을 나타내었다. 가진 시험기는 MTS사의 831.10모델이 사용되었으며 제원은 Table 4와 같다. 시험기 하부에 위치한 액추에이터(actuator)의 운동에 의해 댐퍼가 가진되며 이때 발생하는 힘은 시험기의 상부에 위치한 로드셀(load cell)에서 측정이 된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 탈수구간인 170rpm(약 3Hz), Fig. 13과 Fig. 14는 400rpm(약 6.67Hz)의 가진 조건에 대한 실험과 해석의 힘 대 변위 선도 및 힘 대 시간 선도이다.

4.2.1 3Hz, 6.5mm 가진의 경우

Fig. 11은 3Hz, 6.5mm의 가진 조건하에 실제 댐퍼와 해석모델의 힘 대 변위 곡선을 비교한 것이다. 전반적으로 경향이 일치하지만 ②-③구간에서 약간의 기울기 차이가 존재하는데 이것은 폼의 탄성률이 정적해석을 통해 얻은 값보다 동적해석일 경우 더 큰 값을 가지는 것으로 판단된다. Fig. 12는 힘 대 시간 선도로 전반적으로 해석이 시험의 결과를 잘 표현하는 것으로 판단된다.

Table 4 Specification of MTS dynamic system

| Model number | Optimized parameters |
|-----------------|----------------------|
| Width | 831.10 |
| Hight | 533 [mm] |
| Frequency range | 2400 [mm] |
| Displacement | ±0.01~200 [Hz] |
| Max Force | ±15 [kN] |

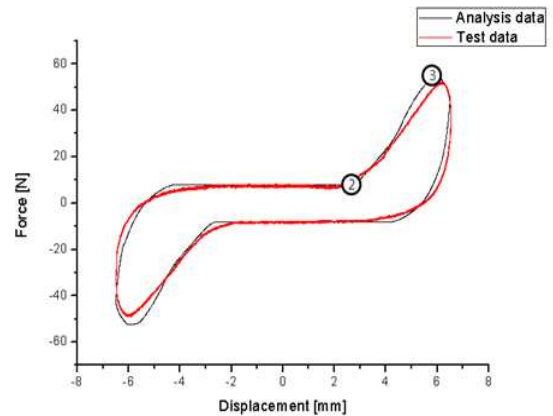


Fig. 11 Force vs. Displacement curve at 3Hz, 6.5mm

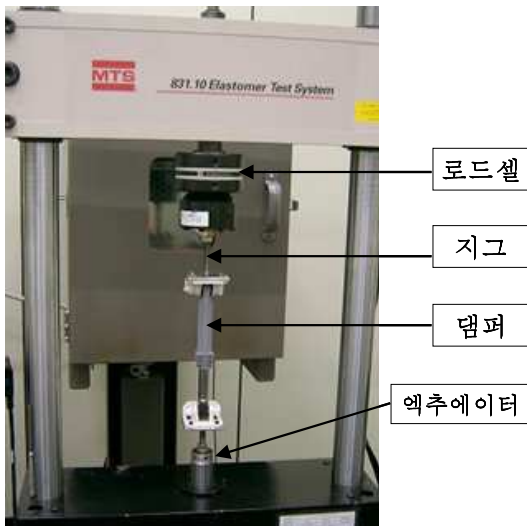


Fig. 10 Physical Experiment of free-friction stroke damper : static & dynamic tests

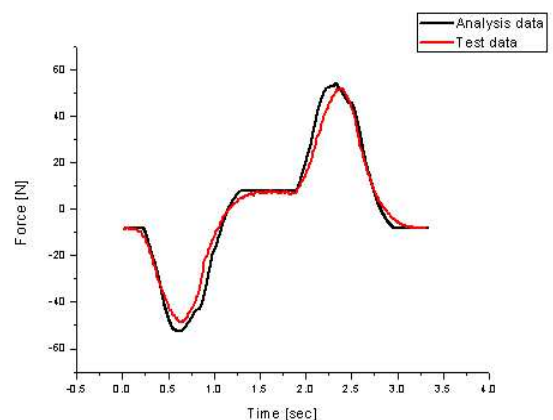


Fig. 12 Force vs. Time curve at 3Hz, 6.5mm

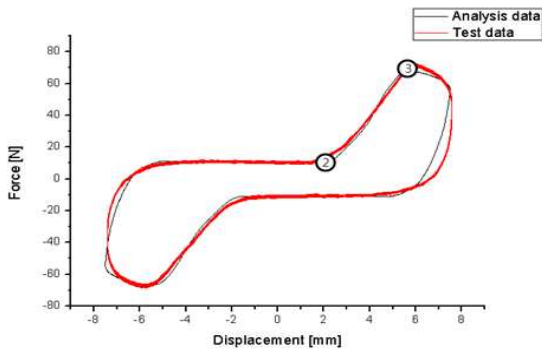


Fig. 13 Test and analysis data(6.67Hz, 7.5mm)

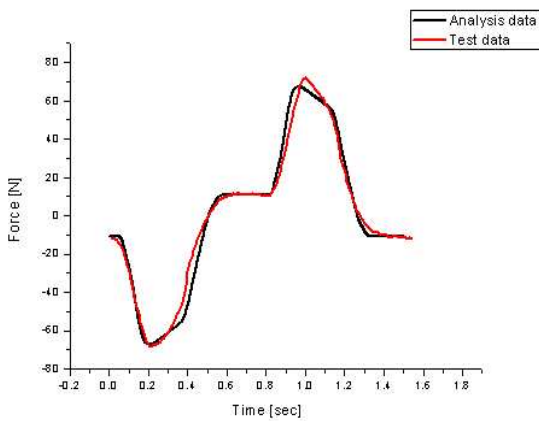


Fig. 14 Force vs. Time curve at 6.67Hz, 7.5mm

4.2.2 6.67Hz, 7.5mm 가진의 경우

Fig. 13은 6.67Hz, 7.5mm의 가진 조건하에 실제 댐퍼와 해석모델의 힘 대 변위 곡선을 비교한 것이고 Fig. 14는 이때의 힘 대 시간 곡선을 비교한 것이다. 시험 결과와 해석 결과를 비교하여 보면 전반적으로 일치하는 경향을 보인다. 다만 앞에서 정의한 ②-③구간에서는 약간의 기울기의 차이를 보이는데 이는 정적 해석을 통해 얻어진 폼의 탄성률보다 동적 상태에서의 폼의 탄성률이 더 강하기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 속도에 따라 다른 경향을 보이는 폼의 점탄성 성능이 해석 모델에 추가되어야 할 것으로 판단된다.

5. 설계변경에 따른 특성평가

이상으로 시험 결과와의 비교를 통해 해석결과의 타당성을 확보하였다. 이를 통해 댐퍼의 인자를 변경하여 특성을 바꾸어 보다 나은 성능을 가

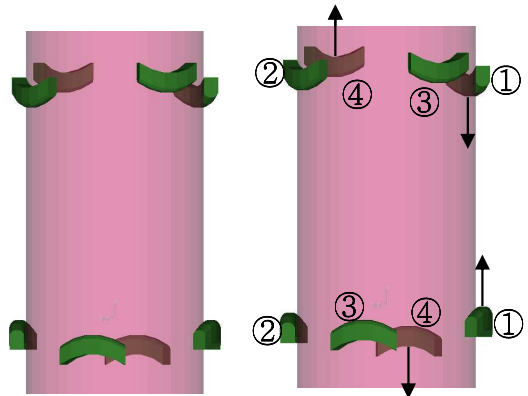


Fig. 15 Stopper shifting : before(left), after(right)

지는 댐퍼의 모델을 개발할 수 있는 방법을 연구하였다. 앞서 개발된 Free-friction stroke 댐퍼의 FEM모델을 바탕으로 구조적인 설계변경을 통하여 댐퍼의 성능변화를 평가 해보고자 한다.

댐퍼의 성능을 결정하는 요인에는 폼과 접촉이 일어나는 스토퍼의 위치와 자세, 폼의 재질, Free-friction stroke 구간 및 강제 압입량 등이 있다. 본 연구에서는 스토퍼의 위치와 자세의 변경이 댐퍼의 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

5.1 스토퍼의 자세변경

기존의 스토퍼는 전방과 후방에 각 4개씩 총 8개로 이루어져 있으며 그 중 4개는 다시 1.5mm의 전후 방향 이격을 가지는 2쌍으로 되어있다. 스토퍼는 폼과의 접촉이 전방의 1쌍이 접촉 한 후에 일정 간격을 두고 후방의 다른 1쌍이 접촉하는 방식이다. 이러한 방식을 스토퍼 각각이 점진적으로 폼에 접촉하는 방식으로 변경하기 위하여 거리에 차등을 두어 위치를 변경하였다. Fig. 15는 스토퍼의 이동을 나타낸 것이다. 4개의 스토퍼는 모두 0.1mm씩 화살표 방향으로 이동하게 되고 이후 폼과의 접촉은 붙여진 번호의 순으로 일어나게 된다.

Fig. 16은 변경된 스토퍼를 바탕으로 Static 해석을 한 결과이다. 이전의 그래프 보다 초기변형 구간에서는 힘이 덜 작용하는 반면에 약 1.8mm 부분부터 그래프가 역전되어 더 많은 반력이 작용하게 된다. 그러므로 스토퍼에 폼이 접촉을 하는 초기의 충격에 의한 진동을 줄일 수 있고 이후에 작용하는 감쇠력은 기존의 댐퍼보다 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

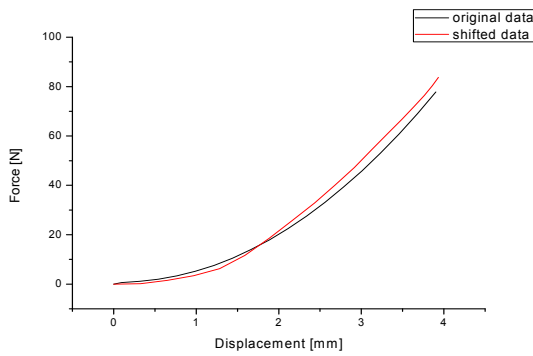


Fig. 16 The static Force vs. displacement curve of Hyperfoam

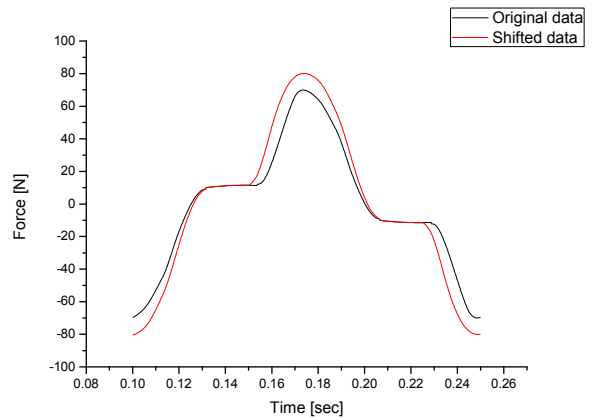


Fig. 19 Characteristics of free-friction stroke damper

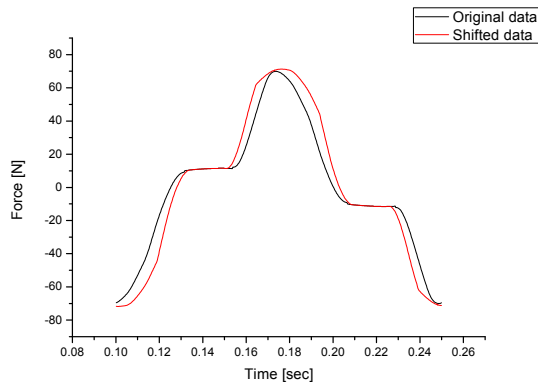


Fig. 17 Change range of Free-friction stroke

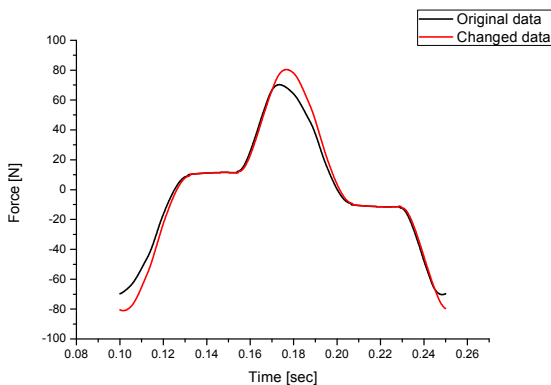


Fig. 18 Change amount of pressurized foam

5.2 Free-friction stroke 구간 변경

기존의 모델에서 설정된 Free-friction stroke구간은 정상상태 가진 조건의 허용 한계보다 약간의 여유가 있는데 이를 제거하기 위해 구간을 0.2mm 축소하였다. 본 논문의 댐퍼의 이상적 모델은 세탁기의 정상상태 구간에서 Free-friction stroke상태로 작동하고 그 외의 과도상태 구간에

서는 감쇠력을 작용하는 것이다. 그러나 기존의 Free-friction stroke댐퍼는 정상상태의 진폭크기보다 더 큰 값을 Free-friction stroke구간을 설정해 놓아 댐퍼의 성능이 감소하는 단점이 있다. 그러므로 이를 제거함으로써 Fig. 17과 같이 감쇠력이 발생하는 범위가 넓어지는 Free-friction stroke댐퍼를 제안할 수 있다.

5.3 폼 압입량 변경

로드에 억지 끼워 맞춤 형태로 맞물려 있는 폼은 그 정도에 따라 더 큰 마찰력을 가지게 된다. 이는 폼과 스톱퍼의 접촉에 의해 폼이 변형할 때 마찰력에 영향을 미치는 인자로 이를 변경하여 댐퍼의 특성을 변경하였다.

본 연구에서는 압입량을 0.3mm 증가 시켰다. Fig. 18은 이때의 힘 대 시간 곡선이며 반력이 증가하였음을 확인 할 수 있다. 이를 통해 폼 변형시 발생하는 감쇠력을 기존의 댐퍼보다 증가시킬 수 있으며 이는 과도 탈수 시 진동 저감에 큰 효과를 줄 수 있다.

5.4 변경된 모델의 특성 평가

기존의 모델과 변경된 모델과의 최종적인 특성 차이를 Fig. 19에 나타내었다. 스톱퍼의 위치에 의하여 초기의 변위에 의한 힘의 커브는 완만한 형태를 보이며, 변위가 약 1.8mm 되는 시점부터 기존의 모델 커브와 역전이 일어나며 더 큰 감쇠력을 가지게 된다. 이를 통해 폼과 스톱퍼의 최초 접촉 시 충격을 완화하고, 이후의 감쇠력 증가를 가져올 것으로 판단된다. 또한 감쇠가 필요 없는 정상상태 구간의 여유 공간을 제거하여 감

쇠력 작용이 필요한 구간을 늘릴 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 세탁기의 정상상태 탈수구간의 해석에 적합한 Free-friction stroke 댐퍼의 해석모형을 구현하였다. 우선 시험 모델과 동일한 특성을 보이도록 Ogden Hyper-elastic 재료의 물성인자를 최적화 기법을 이용하여 구하였고 실제 모델과의 특성 비교를 통한 검증을 수행하였으며, 설계변수 변경에 따른 댐퍼의 특성 변화를 관찰하였다.

본 연구에서 연구된 결론은 다음과 같다.

(1) 최적화 기법을 통해 추출된 Ogden Hyperelastic 재료의 물성인자들을 통해 댐퍼 모델의 성능을 평가하여 실제 시험 결과와 비교하였고 제안된 댐퍼 모델은 실험 결과와 유사한 경향을 보임을 확인 하였다.

(2) 댐퍼의 3가지 설계 변수들 즉, 스톱퍼의 자세, Free-friction stroke 구간, 폼의 압입량을 해석모델 상에서 변경하여 이때 나타나는 특성들을 보였으며 이를 통해 변경된 댐퍼의 특성을 관찰 할 수 있다. 향후 세탁기 모델에 댐퍼를 장착하여 변경된 특성들이 세탁기의 진동 저감에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 성능 검증 연구를 진행할 계획이다.

(3) 제품의 성능을 향상시키기 위한 일련의 작업과정 중 실제품을 생산하여 Test로 모델의 성능을 검증하는 방법을 해석을 통한 방법으로 대체하였다. 스톱퍼의 위치나 외형변경 등의 여러 가지 설계변수를 임의로 바꾸어가며 성능검증 시험이 가능하므로 시간 및 소요비용을 절약할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술 연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) Park, B. C. and LG Electronics Inc., 2005.02.28, *Korean Intellectual Property*, 1020050016475

- (2) Park, J. W., and LG Electronics Inc., 2003.05.13, *Korean Intellectual Property*, 1020030030298
- (3) Shim, C. S., and LG Electronics Inc., 2004.02.23, *Korean Intellectual Property*, 1020040011826
- (4) Haw, Y. N., and LG Electronics Inc., 2003.10.06, *Korean Intellectual Property*, 1020030069206
- (5) Haw Y. N., and LG Electronics Inc., 2003.10.06, *Korean Intellectual Property*, 1020030069197
- (6) Shim, C. S., and LG Electronics Inc., 2004.07.13, *Korean Intellectual Property*, 1020040054426
- (7) Shim, C. S., and LG Electronics Inc., 2004.07.13, *Korean Intellectual Property*, 1020040054423
- (8) Oh, H., and Lee, U., 2004, "Dynamic Modeling and Analysis of the Washing Machine System with an Automatic Balancer," *Trans. of KSME*, Vol. 28, pp. 1212-1220.
- (9) Lyu, J. C., Nho, G. H., Chung, B. S., Lee, J. H., Jung, S. W. and Yoo, W. S., 2008, "Suggestion of MSTV (Modified-Stick-Transition-Velocity) model for hysteretic damping mechanism," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 1305~1312.
- (10) Yang, B., Lee, J., Ha, J. and Ahn, B., 1994, "Optimal Design of Air Dampers Applied on Wash Machines," *Trans. of KSME*, Vol. 18, pp. 2477-2485
- (11) Lee, J., Jo, S., Kim, T. and Park, Y., 1998, "Modeling and Dynamic Analysis of a Front Loaded Washing Machine with Ball Type Automatic Balancer," *Trans. of KSNVE*, pp. 670-682.
- (12) Bae, S., et al, 2002, "Dynamic analysis of an automatic washing machine with a hydraulic Balancer," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 257, pp. 3-18.
- (13) Jung, S. W., 2009, "Dynamic analysis of a free-friction stroke damper", *Pusan National University Master's Thesis*
- (14) HyperWorks User Manual, Altair. R.
- (15) Abaqus Documentation, SIMULIA Cop., 2008
- (16) Kim, W. D., 1999, "Design and Analysis of the Hyperelastic Rubber Mechanical Components"
- (17) VisualDOC User Manual, VR&D Cop., 2004