

Shock Absorber 양방향 FSI해석 사례

정종현* · 하민수* · 이동락**

1. 서론

차량의 현가장치(suspension system)는 차체의 중량을 지지하고, 노면에 의한 차륜의 상하 진동을 완화하고 흡수하여 차체에 전달되는 진동을 억제하는 역할을 한다. 현가장치를 구성하는 부품 중에서 충격흡수기(shock absorber)는 노면에서 전달되는 에너지를 감쇠 및 소산시킴으로써, 차량의 운동을 제어하는 부품이다.

충격흡수기의 작동원리는 충격흡수기 내의 유체가 매우 좁은 통로인 오리피스스를 통해 흐를 때 발생하는 유동 손실로 인해 압력강하가 발생하여 감쇠력(damping force)이 얻어지며, 가진속도에 따른 비선형 특성을 가진다.¹⁾

충격흡수기에 대한 연구는 Lang²⁾에 의해 최초로 수학적 모델이 제시된 후 성능해석을 위한 다양한 연구^{3~7)}가 진행되었다. 감쇠특성 해석을 위한 기존의 연구들은 대부분 제한된 범위에서 의 시험측정이나 단순한 유동저항(flow resistance) 관계를 이용한 수치해석에 의존함으로써 감쇠성능을 정확하고 상세하게 규명하는데 있어 한계가 있다. 이와 같은 해석적 한계를 극복하기 위하여 충격흡수기의 기술개발에 컴퓨터 시뮬레이션을 이용함으로써 충격흡수기 내의 유체유동 현상을 밝히고 감쇠특성을 예측하며 이를 토대로 성능향상을 위한 감쇠밸브의 구조개선을 시도하고 있다.^{8,9)}

기존 연구들은 복잡한 구조로 이루어져 있는 충격흡수기 내의 부품들을 임의의 조건, 즉 밸브의 열림과 피스톤 조립부의 위치 등을 가정하여 접근하기 때문에, 작동 오일의 영향으로 인하여 발생하는 각 부품들의 이동과 변형 그리고 변화된 구조물로 인한 오일의 속도와 압력 변화를 동시에 고려하는 것이 거의 진행되지 않았다. 그러나 구조해석과 유동해석을 동시에 적용할 수 있는 FSI(fluid structure interaction, 유체구조연성)해석이 꾸준히 개발되어 왔으며, 그 중 단방향(unidirectional) FSI 해석이 주로 이루어졌다.^{10,11)} 그러나 최근에는 두 해석분

야 및 여러 해석분야가 동시에 계산되는 양방향 FSI 해석이 활발하게 진행되고 있다.^{12,13)}

본 연구에서는 충격흡수기의 구조 및 유동해석을 동시에 적용하는 양방향 FSI 해석을 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS-11.0¹⁴⁾ 및 상용 열유동해석 프로그램인 CFX-11.0¹⁵⁾ 사이의 양방향 연성기법인 MFX 기법을 이용하여 충격흡수기 내의 압력분포와 속도분포를 상세히 구하였고, 이로부터 피스톤 부품에서 발생하는 감쇠력-행정 및 감쇠력-속도 선도를 나타내어 충격흡수기의 유동저항 특성을 나타내었다.

2. 충격흡수기의 구조 및 원리

Fig. 1은 본 연구 대상인 충격흡수기의 일반적 형태에 대한 조립된 구조와 오른쪽에 피스톤 부품을 나타낸 것이다. Fig. 2는 피스톤 이동에 따른 내부 오일의 흐름을 설명하기 위하여 피스톤 및 바디 부품 모델을 분리하여 나타낸 것이다. 반동밸브와 압축밸브는 각각 일정한 면적의 오리피스스를 가지면서 코일스프링 또는 판 스프링의 조합으로 구성되어 있다.

충격흡수기 내의 피스톤은 왕복운동을 하면서 압축행정(compression stroke)과 반동행정(rebound stroke)이 반복적으로 이루어진다. Fig. 2에서 충격흡수기 내의 오일 유로를 개략적으로 나타내었다. 먼저 압축행정에서의 오일 흐름은 피스톤 오리피스스와 밸브를 통하여 압축실(compression chamber)로부터 반동실(rebound chamber)로 흐르는 유동과 바디 오리피스와 밸브를 통하여 압축실에서 저장실(reservoir chamber)로 흐르는 유동으로 구분할 수 있다. 이와는 다른 방향으로 반동행정에서의 오일 유동은 피스톤 밸브를 통하여 반동실에서 압축실로 흐르는 유동과 바디밸브를 통하여 저장실에서 압축실로 흐르는 유동으로 구분할 수 있다.

저장실에는 작동유체인 오일만이 존재하는 것이 아니라 일정 압력을 가지는 가스가 함께 존재한다. 제품에 따라 다소 차이가 있지만 가스는 질소로 충전되어 있으며, 체적은 약 15% 정도 차지하고 있다.

* (주)디엔디이

** S&T대우(주)

E-mail : jhjeong@dnde.co.kr

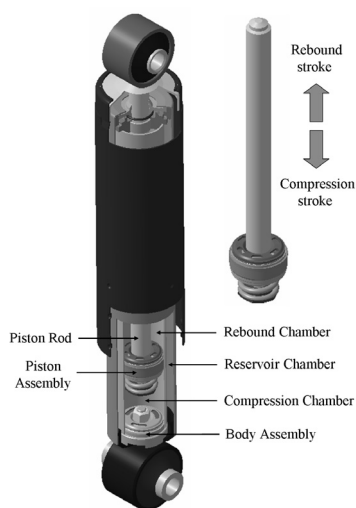


Fig. 1 Schematic diagram of automotive shock absorber

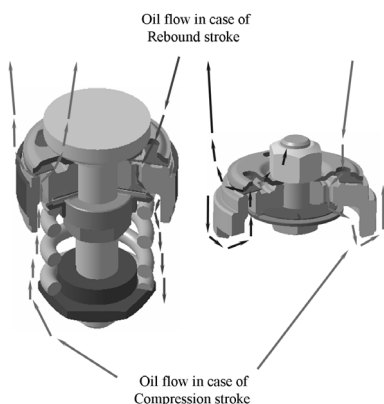
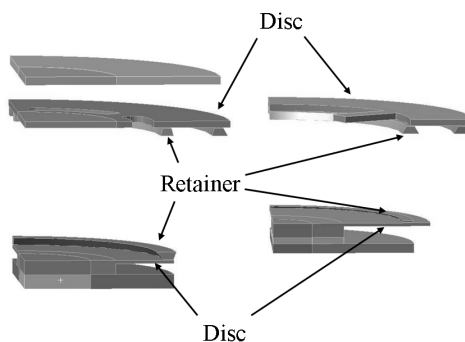
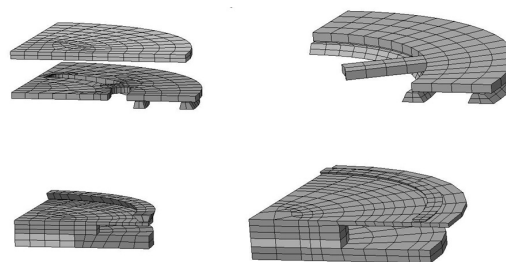


Fig. 2 Schematic diagram for operating principles of automotive shock absorber



a. Disc of piston part b. Disc of body part

Fig. 3 Reduction of geometry model for FEA



a. Disc of piston part b. Disc of body part

Fig. 4 Finite element mesh used for structural analysis of disc

Table 1 Material properties for structural analysis of disc and retainer

Property	Unit	At normal temperature
Young's modulus	MPa	200,000
Poisson's Ratio		0.3
Density	Kg/m ³	7,850

3. 구조 및 유동해석 방법

3.1 구조해석 방법

Fig. 3은 구조해석을 위한 충격흡수기 모델을 나타낸 것이다. 해석 비용을 고려하여 해석 관심 모델인 디스크(disc) 및 이를 지지하는 리테이너(retainer) 모델을 생성하였다.

유한요소모델의 요소 수는 약 1,500 개이고 절점 수는 약 3,000 개이다. 해석시간을 줄이기 위하여 격자수를 조절하였고 중간절점이 없는 요소로 생성하였다. Table 1은 구조해석에 필요한 물성을 나타낸 것이다.

디스크 부품에 하중을 전달하는 방법은 디스크가 오일과 접촉이 되는 면을 FSI 면이라 지정하여 ANSYS 구조해석 결과에서 변위를 CFX 유동해석의 형상 변형으로 전달한다. 또한, 유동해석 결과의 압력분포 즉, 하중을 ANSYS 구조해석에 적용되어 데이터가 전달될 수 있도록 하였다.

Fig. 5에서는 FSI 해석의 간략한 개념도를 나타내었다. 해석과정은 첫째로, ANSYS 해석한다. 이는 충격흡수기의 피스톤 조립부의 이동에 의하여 오일의 유동이 발생하기 때문이다.

구조해석 모델을 전체 모델의 1/4 영역만을 고려하여 해석하므로 대칭면에는 대칭 경계조건을 각각 적용하였다. 피스톤 조립부 이동으로 인하여 발생하는 디스크의 변형이 무한하게 변형되는 것을 방지하기 위해 설치된 리테이너(retainer) 면에

구속조건을 주었다. 또한 바디 조립부의 리테이너는 고정되어 있으므로 수직방향에 대한 자유도는 고정시켰다. 하중조건은 Fig. 6과 같이 피스톤 조립부 및 리테이너에 수직방향으로 주기적으로 반복운동을 적용하였다.

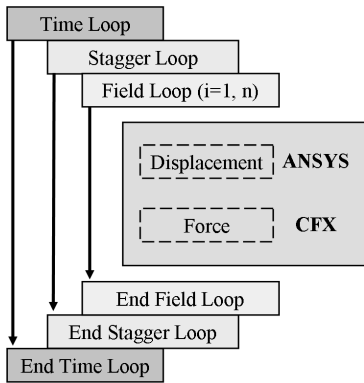


Fig. 5 Scheme for bidirectional FSI

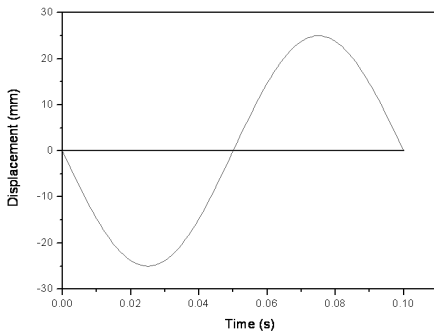


Fig. 6 Displacement of piston assembly used for FEA analysis

Table 2 Material properties used for CFD analysis

Property	Unit	At normal temperature
Density	kg/m ³	850
Dynamic Viscosity	kg/(m·s)	0.00119

디스크가 최대 변형 및 다시 원위치로 복귀될 때 리테이너와 접촉이 발생하게 되므로 두 접촉하는 면에는 접촉요소를 생성하였다.

3.2 유동해석 방법

충격흡수기 내의 오일 유동을 비정상상태, 비압축성 및 난류로 해석하였다. Table 2는 작동유체인 오일에 대한 물성을 나타낸 것이다.

충격흡수기의 실제 작동에서는 연속적으로 피스톤의 왕복운동에 의한 마찰열로 오일의 온도는 매우 높아지지만 등온상태로 설정하여 온도는 고려하지 않고 해석하였다.

Fig. 7은 유동해석을 위한 계산영역의 형상 및 내부의 표면격자 형태를 나타낸 것이고, Fig. 8은 피스톤 및 바디 부분의 격자형태를 확대하여 나타낸 것이다.

본 연구에서는 앞선 구조해석 모델과 동일하게 충격흡수기의 전체 모델중 1/4 모델을 고려하여 유동장을 계산영역으로 하였다. 또한 유로면적이 급격히 축소되는 오리피스 부근에 상대적으로 조밀하게 분포시킨 격자계를 구성하였고 계산에 사용된 전체 격자의 요소 수는 약 85,000 개이고 절점 수는 약 105,000 개이다.

충격흡수기 내부가 복잡한 형상을 갖는 유동장이지만 유동해석을 원활히 계산될 수 있도록, 이동격자(moving mesh) 방법을 적용하였다. 격자의 형태는 육면체 형태의 정형격자(structured grid)를 이용하였다. 그리고 유동장이 복잡하므로 전체를 5부분으로 나누어서 격자를 생성하였으며, 나누어진 부분들의 경계면에는 격자형태 및 밀도가 다른 유동장 사이에 원활하게 데이터가 전달되는 인터페이스 방법을 적용하였다.

Fig. 8은 피스톤 조립부와 접하는 벽면의 표면은 모두 벽으로 접촉조건(no-slip condition)을 주었다. 그리고 오일이 가스와의 접하는 표면에는 저장실로의 오일 유입량에 따라 오일의 자유표면이 왕복운동 할 수 있도록 설정하였다.

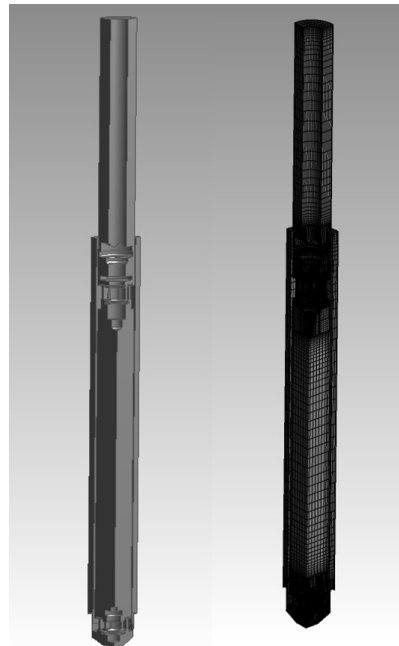


Fig. 7 Fluid field model and domain mesh is hexahedral

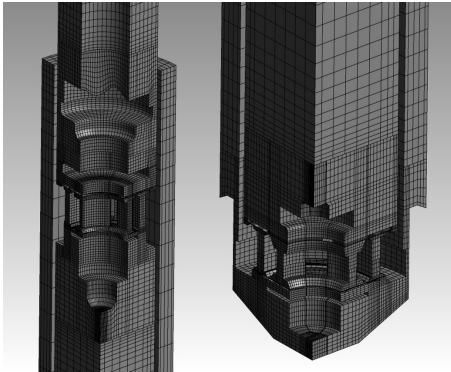


Fig. 8 Surface grid system of piston and body part

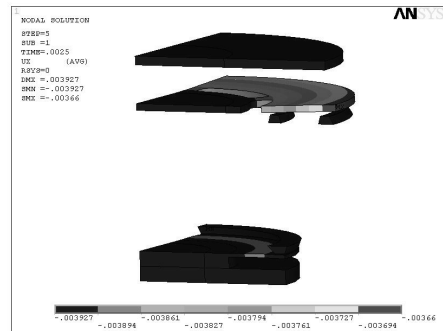


Fig. 9 Displacement of piston part for compression stroke

유동해석을 위해 상용 열유동 해석코드인 CFX-11.0을 이용하였고 수렴판정 기준은 상대 잔차량을 10^{-4} 이하로 하였다.

4. 결과 및 정리

Fig. 9, 10은 FSI 해석의 결과 중 변위 및 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 9는 압축행정시 피스톤 조립부의 밸브 디스크에서 발생하는 변위를 나타낸 것이다. 최대변위는 오리피스 부근에서 발생한다.

Fig. 10은 압축행정시 피스톤 조립부의 밸브 디스크에서 발생하는 응력분포를 나타낸 것이며, 밸브 디스크를 지지하는 부근에서 가장 높은 응력이 발생하였다.

Fig. 11~13은 유동해석의 결과 중 충격흡수기 내부 유동장에 압력분포와 속도벡터를 나타낸 것이다. Fig. 11은 압축 및 반동행정의 흐름에 따른 내부 유동장 압력분포를 순서대로 나타낸 것이며, 압축행정의 경우에는 압축실이 반동실 및 저장실보다 높은 압력을 유지하고 있으므로 오일이 압력이 높은 압축실로부터 낮은 반동실 및 저장실로 흐르는 것을 알 수 있다.

이와 반대로, 반동행정의 경우에는 압축행정과는 반대로 반동실이 높은 압력을 유지하고 있으며, 오일 흐름은 압축행정과 반대방향으로 예측할 수 있다. 또한 압력강하의 대부분은 각 밸브 부근의 오리피스 전후에서 발생하고 있다.

Fig. 12, 13은 각각 압축행정과 반동행정시 유동장에서 발생하는 속도 벡터를 나타낸 것이다. 피스톤 및 바디 조립부의 오리피스에서 상대적으로 빠른 속도 벡터를 확인할 수 있다.

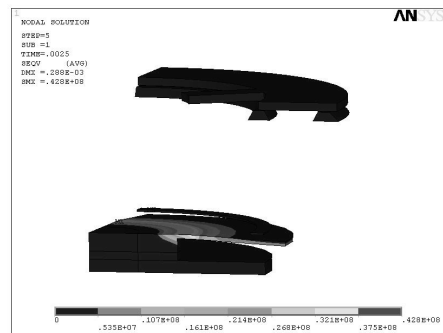


Fig. 10 Stress distribution of piston part for compression stroke

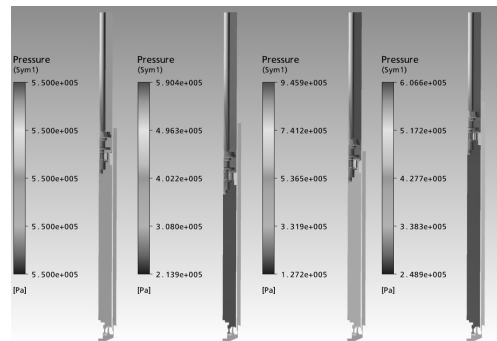


Fig. 11 Pressure distribution for compression and rebound stroke

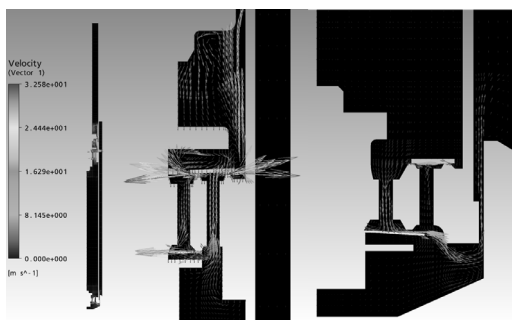


Fig. 12 Velocity vector for compression stroke

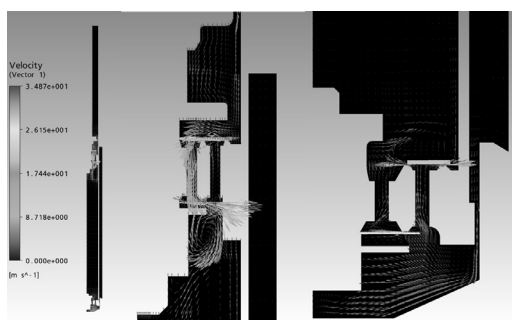


Fig. 13 Velocity vector for rebound stroke

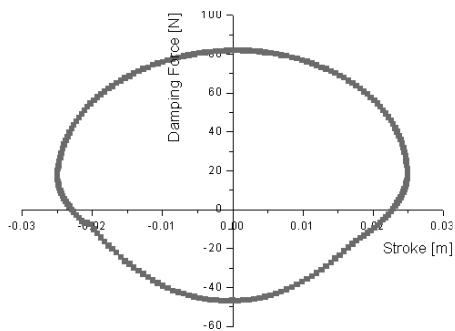


Fig. 14 Damping force-stroke curve

Fig. 14는 피스톤 조립부가 압축 및 반동행정을 반복하면서 받는 피스톤 감쇠력-행정 선도를 나타낸 것이다. 일반적으로 감쇠력-행정 선도는 원모양으로 나타나며 감쇠력이 양의 구간이 약 60% 정도 면적을 차지하는 형태를 가진다. 그러나 감쇠력이 양의 구간에서는 거의 유사하나 음의 구간에서는 다소 차이가 발생함을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차용 충격흡수기의 감쇠특성을 고찰하며 밸브의 유동저항특성을 밝히기 위하여 양방향 FSI 해석을 이용하여 밸브를 구성하는 디스크의 변위 및 응력분포 그리고 충격흡수기 내의 압력 및 속도분포를 평가하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 충격흡수기의 감쇠특성에 대한 구조 및 유동해석의 결과는 일반적인 문헌 결과와 잘 일치함으로 양방향 FSI 해석을 통해 밸브의 안정성 평가 및 감쇠특성을 합리적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

2) 충격흡수기 압력강하는 피스톤 및 바디 조립부의 밸브의 오리피스 전후에서 대부분 발생한다. 피스톤 조립부의 위치에 따라 다양한 압력분포가 형성되고 이에 따른 감쇠특성을 확인하였다.

3) 유동해석시 디스크와 리테이너 사이의 매우 작은 간격을 생성함으로써 밸브 개폐 따라 내부 유동장 격자 왜곡 현상을 방지할 수 있다. 이것은 유동해석이 안정적으로 계산할 수는 있으나 작은 간격에서 유동이 발생하게 되어 구하고자 하는 감쇠특성의 정확도가 다소 떨어지는 결과를 얻을 수 있다.

4) 향후 연구에서 ANSYS와 CFX를 이용한 충격흡수기의 양방향 FSI 해석에는 저장실의 가스를 고려하고, 밸브 개폐시 발생하는 미소 간격에서의 유동 흐름을 막을 수 있는 기법이 필요하다.

참고문헌

- (1) SAE, Shock Absorber handbook, 1999
- (2) Lang. Harold Harvey, 1977, "A study of the characteristics of automotive hydraulic dampers at high stroking frequencies," Ph. D. Dissertation, University of Michigan
- (3) Herr, F., Malin, T., Lane, J. and Roth, S., "A shock absorber model using CFD analysis and Easy5," SAE International Congress and Exposition, 1999-01-1322
- (4) Koenradd Reybrouck, "A nonlinear parametric model of an automotive shock absorber," SAE 940869.
- (5) Stefaan W. Duym, Randy Stiens, Gino V. Baron, Koenraad G. Reybrouck, "Physical modeling of the hysteretic behaviour of automotive shock absorbers," SAE 970101.
- (6) Joris Van Haver, "Structure-borne shock absorber noise : non-linear noise sourc characterization in a laboratory environment," SAE 951255.
- (7) Cho Kyungil, So Sanggyun, 1999, "A Study of the New

- Typed Stroke Dependent Damper,” J of the KSAE, Vol. 7, No. 3, pp. 294-300
- (8) Choon Tae Lee, Jin Kul Lee, 2003, “A Study on the Influence of Design Parameters on the Automotive Shock Absorber Performance,” Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 6, pp. 167~175
- (9) J. W. Yun, 2004, “CFD Analysis on the Continuous and Variable Damping Characteristics of a Semi-Active Shock Absorber,” Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 2, pp.101-108
- (10) Wolfgang Bauer, 1977, “Simulation of Exhaust Systems,” NAFEMS Seminar
- (11) Michel Arnal, Christian Precht, Thomas Sprunk, Tobias Danninger, John Stokes, 2006, “Analysis of a Virtual Prototype First-Stage Rotor Blade Using Integrated Computer-Based Design Tools,” 8th Biennial ASME Conference on ESDA, ESDA2006-95257
- (12) M. Kuntz, F.R. Menter, 2004, “Simulation OF Fluid-Structure Interactions in Aeronautical Applications,” ECCOMAS
- (13) Florian Menter, M. Kuntz, Patrick Sharkey, Sergey Yakubov, 2006, “Overview of Fluid-Structure Coupling in ANSYS CFX,” 25th International Conference on OMAE, OMAE2006-92145
- (14) Release 11.0 Documentation for ANSYS. 2007.
- (15) ANSYS CFX Release Notes for 11.0, 2007.