

## 충격 흡수기의 동적거동 해석 프로그램을 이용한 각 파라미터가 감쇠력에 미치는 영향 조사

박재우\*, 신상윤\*, 주동우\*, 이시복\*\*

### An Investigation into the Effect of Each Parameter on the Damping Forces Using Dynamic Behaviour Analysis P/G of S/A

Jae-Woo Park\*, Sang-Yoon Shin\*, Dong-Woo Joo\*, Shi-Bok Lee\*\*

#### ABSTRACT

The damping force is determined by four valves and the components which consist of the shock absorber for vehicle. In this study it is investigated the individual effects of four valves and these components on damping forces using dynamic behaviour analysis program of the shock absorber. In addition, opening of main valves are researched during compression and tension cycle due to up-down reciprocation movement of piston. We are to strictly control the properties and tolerance of components having important effects on the damping force. Thus we are intended to produce shock absorber of better quality.

**Key Words** : S/A(shock absorber, 충격흡수기), Damping Force(감쇠력), Compression & Extension Processes (압축,인장행정), Cavitation(공동화 현상), Damping Lag(감쇠 지연), Vapor Pressure(기화압)

#### 1. 서론

서스펜션은 자동차의 조종안정성과 승차감을 결정하는 중요한 시스템이다. 그러므로 서스펜션 시스템의 핵심 부품으로서 자동차용 충격흡수기에 대한 주의 깊은 연구가 수행되어야 한다.

자동차용 충격 흡수기는 노면의 굴곡에 의해 차체가 진동할 때 충격흡수기내의 피스톤의 상·하 왕복운동에 의한 에너지를 소리와 열 등의 에너지로 소비시킴으로써 진동을 감소시키는 장치이다.<sup>(1)</sup> 충격흡수기의 성능은 일반적으로 피스톤 속도에 따른 감쇠특성으로 나타내지만, 감

쇠력 그 자체는 피스톤의 속도에 따라 변화하기 때문에 충격흡수기의 특성<sup>(2,3)</sup>을 감쇠력만으로는 나타낼 수 없는 경우가 많다. 일반적으로 원점과 0.3m/s에서의 감쇠력 곡선의 위치를 잇는 직선의 기울기를 감쇠계수라고 부르고 C로 나타낸다. 감쇠력 특성을 나타내는 그래프가 원점을 지나는 직선이면 감쇠계수 C는 피스톤의 속도에 무관하게 일정하다. 감쇠력의 설정기준은 차체의 진동을 어느 정도 감쇠시키는가 하는 것이다. 감쇠력이 약하면 차체의 진동은 주기적으로 되풀이 하면서 감쇠하고, 감쇠력이 강하면 주기적인 진동을 하지 않고 감쇠한다. 주기적인 진동이 될지 무주기적인 진동이 될지의 경계에서의 감쇠계

\* 대우정밀(주), 기술연구소

\*\* 부산대학교, 기계설계공학과

수를 임계감쇠계수  $C_c$ 라 한다. 따라서 충격흡수기의 감쇠계수  $C$ 를 임계감쇠계수  $C_c$ 의 몇 %로 설정할까 하는 것으로 차체의 진동감쇠 수준을 고려하게 된다. 일반적으로

$$\frac{C}{C_c} \times 100 = 30 \sim 50\%$$

의 범위로 한다. 여기서  $C_c = 2\sqrt{\frac{KW}{g}}$  으로,  $K$ 는 스프링 상수,  $W$ 는 차체의 무게,  $g$ 는 중력가속도이다.

$\frac{C}{C_c}$ 는 피스톤의 속도에 따라 다르게 된다. 따라서 문제가 되는 것이 피스톤의 속도 설정이다. 피스톤의 속도는 일반적으로 양로(良路)에서는 0.1m/s, 악로(惡路)에서는 0.3~0.5m/s으로, 양로의 승차감을 고려하면 0.1m/s 부근의 감쇠계수를 작게하고, 악로에서의 접지성을 고려하면 0.3m/s 부근의 감쇠계수를 크게하는 것이 좋게지만, 이와같은 감쇠특성은 롤(roll)이 크고 조종안정성이 나쁘다. 그리하여 승차감만을 고려하면 감쇠력은 작은 것이 바람직하고, 조종안정성만을 고려하면 큰 것이 바람직하지만, 이런 특성을 오일 충격흡수기에서 모두 구현하는 것은 불가능하다. 다만 0.1m/s 부근에서 감쇠계수를 크게하고, 0.3m/s 부근에서 필요 이상으로 감쇠력이 크게되지 않도록 감쇠계수를 작게하는 것이 최근의 추세이다.

본 연구에서는 상술한 도로의 어떠한 조건에서도 튜닝(tuning)한 감쇠력 사양을 쉽게 조절할 수 있도록 충격흡수기의 동적거동 해석 프로그램<sup>(4)</sup>을 이용하여 충격흡수기내의 각 부품들이 감쇠성능에 미치는 영향과, 그때의 주요 밸브의 열림량을 조사한다. 그리하여 성능에 중요한 영향을 미치는 부품의 물성치, 수직도, 평면도, 치수 및 공차관리를 철저하게 하여 균일한 성능을 내는 양질의 충격흡수기를 생산하고자 한다.

## 2. 충격흡수기의 작동 특성

쌍튜브형(twin tube) 충격흡수기가 가장 일반적이고, 가장 오래되었으나, 최근들어 가스 단일튜브형이나 가스 쌍튜브형으로 점차 바뀌어지고 있다. 오일 충격흡수기는 가스가 들어가지 않아 노면에서의 충격이 적은 반면, 하드 드라이빙(hard driving)이나 거친 도로(rough road)의 주행에서는 공동화현상(cavitation)을 일으키

기 쉽고 감쇠력이 불안정하여 성능이 저하되기 쉬운 결점을 가지고 있다. 안쪽 튜브에는 오일이 채워진 상태에서 피스톤 로드가 위치하고, 바깥 튜브에는 오일과 대기압의 공기가 들어가 있다. 안쪽 튜브와 바깥 튜브 사이를 저장실(reservoir chamber)이라 부른다. 오일의 통로를 제어하는 밸브는 피스톤부와 아래쪽의 베이스 밸브부에 나누어진다.(Fig. 1)<sup>(5)</sup>

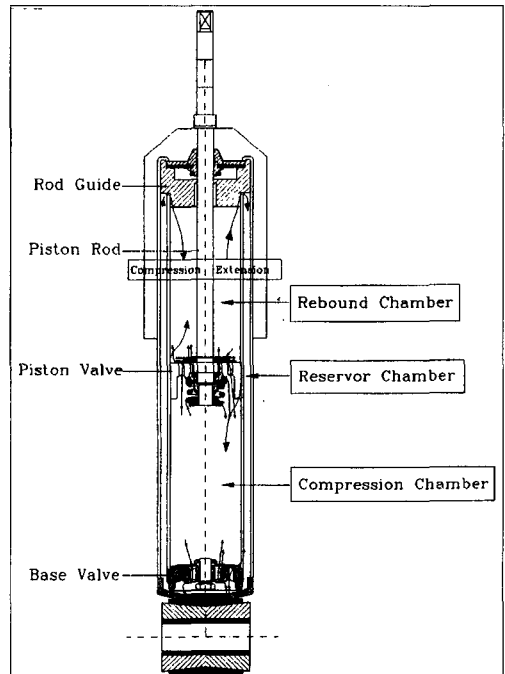


Fig. 1 Fluid flux during compression and extension processes

### 2.1 압축 행정

압축 행정에서는 압축실에서 압축되는 유체가 상대적으로 압력이 낮은 리바운드실과 저장실로 밀려나게 된다. 피스톤의 속도가 저속일 때 저장실로의 유동은 베이스 밸브부에서는 베이스 밸브 일정유량 밸브(base valve constant control valve)만을 통해 유동이 발생하고, 피스톤 밸브부에서 피스톤 노치(notch)에서만 유동이 발생하지만, 피스톤 밸브부와 베이스 밸브 조합부 양단의 압력차가 증가하는 중속 이상 일때는 베이스 밸브부에서는 압축 밸브(compression disc valve)를 열리게되어 저장실로의 유체흐름은 더욱 많아지고, 피스톤 밸브부에서는 피스톤 리바운드 밸브를 밀어올리면서 유동이 일어난다. 저장실로 나가는 유량은 유체를 비압축성으로 가정할 때 리

바운드실로 들어가는 피스톤 로드 부피의 변화 속도 만큼 된다. 따라서 압축실로 부터 저장실로의 유량과 리바운드실의 유량비는 일정한 값을 갖는다.

$$\frac{\text{저장실로의 유량}}{\text{리바운드실로의 유량}} = \frac{A_{rod}}{A_{Piston} - A_{rod}}$$

리바운드 밸브는 저항력이 작기 때문에 압축실과 리바운드실 사이의 압력차, 즉 피스톤 양단의 압력차는 그렇게 커지지 않는다. 그러므로 압축 행정시 피스톤에 걸리는 힘의 대부분은 로드 단면적에 작용하는 압축실 압력으로 부터 만들어진다. 이 밸브에 걸리는 저항이 커지면 피스톤을 통한 압력 강하가 압축 밸브를 통한 압력 강하보다 커질 수 있다. 이때 리바운드실의 압력이 저장실의 압력(보통 대기압)보다 낮아지게 되고, 경우에 따라서는 유체의 기화압(vapor pressure) 이하로 떨어져 리바운드실에서 기체상(vapor phase)을 발생시킬 수 있다. 이 리바운드실에 발생하는 증기상은 바람직하지 않은 감쇠 지연(damping lag)의 원인이 된다.<sup>6)</sup> 자동차용 충격흡수기 제조업체들은 리바운드 밸브의 저항을 제한하거나 압축 밸브에 저항을 추가하여 이 문제를 줄이고 있다.

## 2.2 인장 행정

인장 행정에서는 리바운드실의 체적 변화율에 해당하는 유량이 압축실로 밀려나가게 되며 리바운드실을 빠져나가는 피스톤 로드 에 의한 압축실과 리바운드실 체적 변화율 차이 만큼의 유량이 저장실로 부터 압축실로 들어온다. 리바운드실에서 압축실로 밀려 나가는 유체는 처음에는 피스톤의 노치만을 통해 일어나고 피스톤 양단의 압력차가 커지면 헬리컬 스프링에 의해 제어되는 포핏밸브를 통해 유체가 흐르게 된다. 저장실에서 압축실로 유체의 흐름이 일어나려면 보통 대기압을 유지하는 저장실 압력보다 압축실 압력이 낮아야 한다. 피스톤의 속도가 높아지면 압축실의 압력이 증기압보다 낮아져 기포층이 발생할 수 있다. 리바운드 행정에서 발생한 기포층은 이어지는 압축행정 초기에 압축 감쇠지연의 한 원인이 된다. 감쇠지연은 충격흡수기의 중요한 성능 결함 중의 하나로 이를 해결하기 위한 여러 방안이 사용되어 왔다. GM의 Delco Products Division에서는 Pliacell이라는 가스충전 쿠션으로 저장실에 일정압력의 가스를 주입하여 유체와 공기와의 섞임을 제거하고 있다.

이와 같은 감쇠지연은 저장실의 유체에 공기가 섞이거

나(aeration or foaming) 공동화현상(cavitation)이 발생할 때 일어나는 것으로 추측되어지고 있다.

## 2.3 누설 경로

충격흡수기의 누설경로는 일반적으로 피스톤과 실린더 벽 사이 그리고 로드와 로드 가이드 사이에서 누설이 일어난다. 피스톤은 보통 소결금속분(sintered metal powder)으로 만들어지고 실린더는 강관으로 되어 있다. 마모를 줄이기 위해 테프론 밴드를 코팅한 피스톤이 많이 사용되고 있는 실정이다. 보통 피스톤과 실린더 벽 사이의 틈새는 0.001~0.003mm 정도의 공차를 둔다. 로드 가이드는 대부분 소결금속분으로 만들어지며 로드와 로드 가이드 틈새는 0.001~0.002mm 정도의 공차를 둔다. 정상적인 압축, 인장 행정일 때 리바운드실 압력이 저장실 압력보다 높기 때문에 로드와 로드 가이드 사이 틈새를 통한 누설은 리바운드실로 부터 저장실로 일어난다. 이 누설은 리바운드실 상부에 모이는 가스상을 저장실로 흘러나가게 한다.

## 3. 주요 밸브의 열림량 조사

피스톤의 상·하 왕복운동에 의한 압축, 인장 행정 과정에서 유량의 입, 출입으로 열리는 밸브는 베이스 밸브부에서는 압축 행정일 때 베이스 밸브 안쪽 흡을 통한 유량의 압력으로 압축 밸브(compression disc valve)가 열리고, 인장 행정일 때 베이스 밸브 바깥흡을 통한 유량에 의해 리바운드 밸브(rebound disc valve)가 열린다.

그리고 피스톤 밸브부에서는 압축 행정일 때 피스톤 밸브 바깥 흡을 통한 유량으로 피스톤 리바운드 밸브(rebound disc valve)가 열리고, 인장 행정일 때 피스톤 밸브 안쪽 흡을 통한 유량에 의해 헬리컬 스프링(helical spring)에 의해 지지되어 있는 포핏 밸브(poppet valve)가 열리게 된다. 이렇게 총 네곳의 밸브가 빠른 속도로 열리고 닫힌다.(Fig.2)

물론 충격흡수기가 저속일 때는 베이스 밸브의 일정유량 밸브(constant control valve)와 피스톤 노치(notch)로 항상 그 틈새 만큼 밀려 있는 상태에서 오일의 유동이 일어난다. 그리하여 이들 밸브의 열리고 닫히는 양을 조절하여 자동차용 충격흡수기가 바라는 전체 감쇠 특성을 갖게 되는 것이다.

Fig. 3은 피스톤의 상·하 왕복운동에 의한 압축과 인장행정 동안 속도에 따른 피스톤과 베이스 밸브의 안쪽과

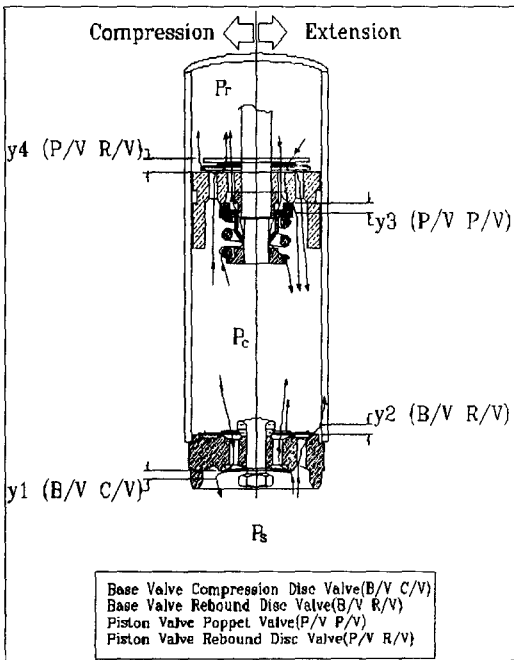


Fig. 2 Opening of each valve during compression and extension processes

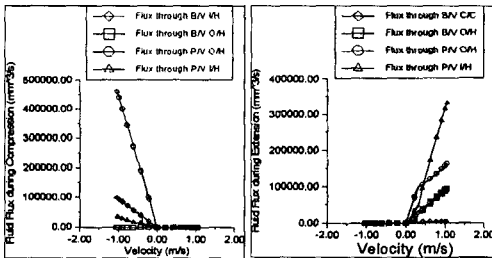


Fig. 3 Fluid Flux through each valve during compression and extension processes

바깥 홀을 통한 유량을 나타낸 것이다. 압축일때는 피스톤 밸브 바깥 홀을 통한 유동이 가장 많고, 인장일때는 안쪽 홀로의 유동이 가장 많은 것을 알 수 있다.

Fig. 4은 각 주요밸브의 열리는 길이를 나타낸 것이다. 가장 많이 열리는 피스톤의 리바운드 밸브도 0.4mm를 넘지 못하고, 베이스 밸브부의 리바운드 밸브는 0.1mm도 열리지 않으므로 피스톤과 베이스 밸브의 소결품 상태에서 평면도와 치수 정도가 얼마나 좋아야 하는가를 알 수 있다. 또한 피스톤 포켓 밸브가 가장 많이 열리는 양은 0.15mm 정도로 작기 때문에 이 포켓 밸브를 지지하는

헬리컬 스프링의 수직도와 평면도도 얼마나 중요한가를 알 수 있다.

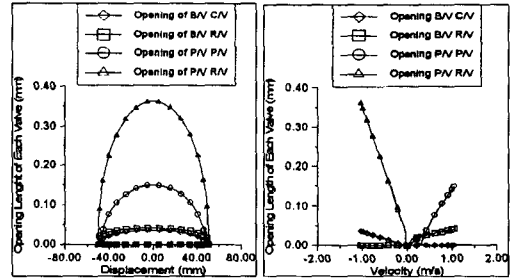


Fig. 4 Opening length of each valve during compression and extension processes

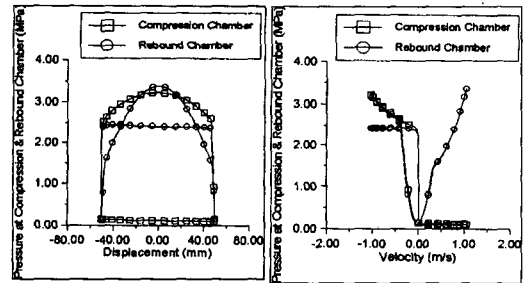


Fig. 5 Pressure distribution at compression & rebound chamber

Fig. 5은 압축실과 반동실(compression & rebound chamber)에서 변위와 피스톤 속도에 따른 압력분포를 나타낸 것이다.

#### 4. 감쇠력 특성의 조정설계 인자

충격흡수기는 코일 스프링과 함께 자동차의 승차감을 결정하는 서스펜션 시스템의 핵심 부품이다. 충격흡수기의 조정으로 인해 자동차의 특성은 변하고 일반 주행에서 스포츠 드라이빙까지 폭넓은 적용도 가능하다. 다시말해 충격흡수기의 특성을 결정하는 것은 어렵다는 것도 된다. 따라서 자동차가 발달하면 발달할수록 충격흡수기의 성능은 더욱더 중요시될 것이다. 충격흡수기를 어떻게 하면 능숙하게 세팅(setting)할수 있을까가 고성능 자동차의 중요 포인트 중의 하나이다. 따라서 충격흡수기를 구성하는 각 부품들이 성능에 미치는 영향을 세밀하게 조사할 필요가 있다.

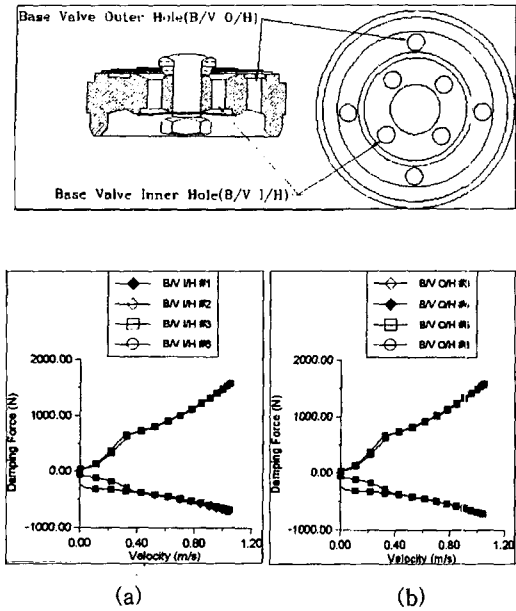


Fig. 6 Damping forces according to velocities at I/H and O/H of base valve

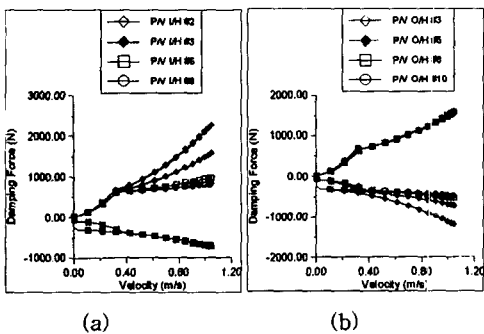
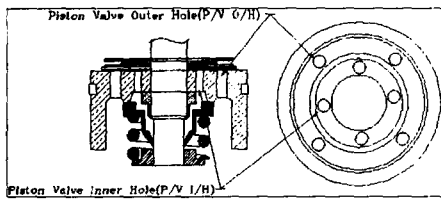


Fig. 7 Damping forces according to velocities at I/H and O/H of piston valve

Fig. 6의 (a)에서 베이스 밸브 안쪽 홀의 개수를 증가시켰을 때 고속 압축에 작은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 상대적으로 (b)의 베이스 밸브 바깥쪽 홀은 전체적으로

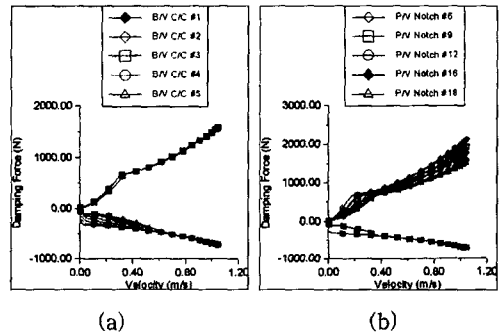
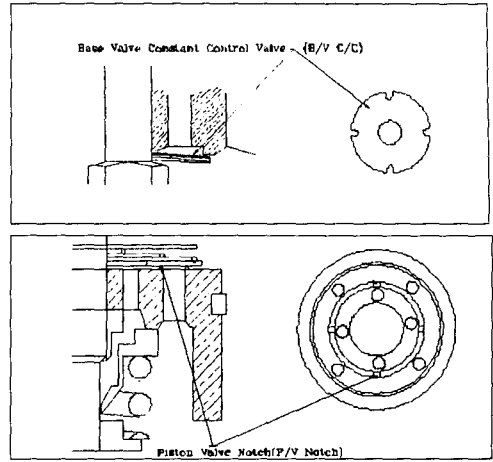


Fig. 8 Damping forces according to velocities at C/C of base valve and Notch of piston valve

감쇠력에 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 감쇠 성능 곡선이 베이스 밸브 안쪽 홀과 바깥쪽 홀의 개수를 변화시켰는데도 하나의 동특성을 나타내는 것처럼 보이는 것은 그래프가 겹쳐진 것으로, 즉 감쇠 성능에 거의 영향을 미치지 못한다는 뜻이다.

Fig. 7은 피스톤 밸브의 안쪽 홀과 바깥쪽 홀의 개수를 조절했을 때 감쇠력에 미치는 영향을 조사한 것으로 (a)는 피스톤 밸브의 안쪽 홀이 중속 이상의 인장에 상당한 영향을 미치며, (b)의 바깥쪽 홀은 중속 이상의 압축 감쇠력에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. (a)의 압축 부분과 (b)의 인장 부분은 그래프가 겹쳐진 것으로, 즉 (a)에서는 피스톤 밸브 안쪽 홀이 압축 감쇠 성능에는 영향을 미치지 못하고, (b)에서는 피스톤 밸브 바깥쪽 홀이 인장 감쇠 성능에 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다.

Fig. 8에서 (a)의 베이스 밸브 일정 유량 밸브는 압축 저속에서만 영향을 미치고, (b)의 피스톤 밸브의 노칭(notching)은 인장 전구간의 감쇠력을 증가시키든지, 줄일 때 효율적이라는 것을 알 수 있다.

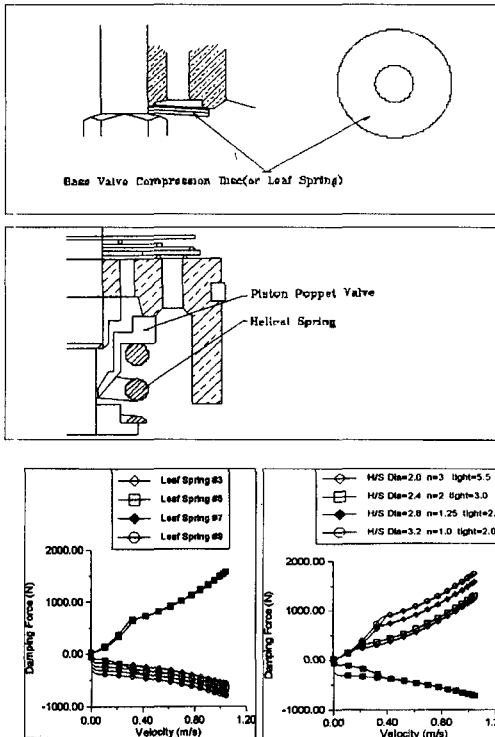


Fig. 9 Damping forces according to velocities for No. of L/S and H/S

Fig. 9의 (a)는 베이스 밸브의 압축 디스크(compression disk or leaf spring)의 개수에 따른 감쇠특성을 조사한 것으로 개수가 증가할수록 스프링 상수가 높아져서 저속에서 부터 고속까지 압축 감쇠력이 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 인장 감쇠 성능에는 영향을 미치지 않는다. (b)는 피스톤 밸브부의 헬리컬 스프링 상수를 증가시켰을 때 인장 감쇠력이 중속 이상에서 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 압축 감쇠 성능에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

충격흡수기를 구성하는 중요 부품들이 성능에 어떻게

영향을 미친다는 것은 경험이 많은 엔지니어들의 경험에 의해 알려져 왔으나, 어느 부품이 어떻게, 어느 속도 구간에서 영향을 미치고, 조절하기 쉬운지는 구체적으로 알기는 어려웠으며, 정량화시키는 것도 힘들었다. 그러나 구축된 본 프로그램을 통해서 보다 더 구체적으로 각 부품들이 감쇠력에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며, 이것을 충격흡수기의 설계에 응용할 경우, 기존의 시행착오에 의한 과정을 대폭 줄일 수 있으며, 경험이 그렇게 많지 않은 엔지니어도 쉽게 요구되는 감쇠력을 세팅할 수 있게 되었다. 또한 충격흡수기의 성능에 영향을 미치는 중요 부품은 무엇인지를 알 수 있었으며, 특히 피스톤 노치나 베이스 밸브부의 일정 유량 밸브는 미세한 치수가 감쇠 성능에 영향을 미치므로 이들의 공차가 얼마나 중요한가를 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. K.Worden & G.R.Tomlinson, "An experimental study of a number of nonlinear SDOF systems using the restoring force surface method", Proceedings of 9th International Modal Analysis Conference, Florence.
2. C.Surace & K.Worden & G.R.Tomlinson, "An Improved Nonlinear Model for an Automotive Shock Absorber", Nonlinear Dynamics.
3. K.Worden & G.R.Tomlinson, "Parametric and Nonparametric Identification of Automotive Shock Absorbers", Proceedings of 10th IMAC, 1992.
4. 박재우, 신상운, 주동우, 이시복, "자동차용 충격흡수기의 동적거동 해석", 한국정밀공학회지, 제14권, 제6호, pp.28-36, 1997.
5. 충격흡수기 동적거동 해석 프로그램 개발 및 오일 유동 해석, 연구보고서, 대우정밀(주), 기술연구소, 1995.
6. Lang(H.H.), "A Study of the Characteristics of Automotive Hydraulic Dampers at High Stroking Frequencies", Ph. D. Dissertation, University of Michigan, 1977.