

충격 흡수기의 동적거동 해석 프로그램을 이용한 각 파라미터가 댐핑력에 미치는 영향 조사

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

박재우, 신상윤, 주동우(대우정밀(주), 기술연구소), 이시복(부산대학, 기계설계공학과)
Jae-Woo Park, Sang-Yoon Shin, Dong-Woo Joo(Tech. Center DPI), Shi-Bok Lee(Pusan Univ.)

ABSTRACT

The damping force of shock absorber in an automobile is determined by the components which construct the S/A. In this study we investigate the individual effect of these components on damping force. In addition, opening of important valve during compression and tension cycle due to up-down reciprocation movement is also researched. Thus we are to strictly control the properties and tolerance of components having important effects on the damping force and to produce S/A of better quality.

Key Words : S/A(shock absorber, 속업쇼바), 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 왕복 운동에 의한 에너지를 소리와 열 등의 에너지로 소비시킴으로써 진동을 감소시키는 장치이다.⁽¹⁾ 감쇠력 그 자체는 피스톤의 속도에 따라 변화 한다. 그 때문에 충격흡수기의 특성^(2,3)을 감쇠력만으로는 나타

낼 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 감쇠시키는 가 하는 것이다. 감쇠력이 약하면 차체의 진동은 주기적으로 되풀이 하면서 감쇠하고, 감쇠력이 강하면 주기적인 진동을 하지 않고 감쇠한다. 주기적인 진동이 될지 무주기적인 진동이 될지의 경계에서의 감쇠계수를 임계감쇠계수 C_c 라 한다. 따라서 충격흡수기의 감쇠계수 C를 임계감쇠계수 C_c 의 몇 %로 설

정할까 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, K는 스프링 상수, W는 차체의 무게, g는 중력가속도이다. $\frac{C}{C_c}$ 는 피스톤의 속도에 따라 다르게 된다. 따

라서 문제가 되는 것이 피스톤의 속도 설정이다. 피스톤의 속도는 양로에서는 0.1m/s, 악로에서는 0.3~0.5m/s로 보통하는데, 양로(良路)의 승차감을 고려하면 0.1m/s 부근의 감쇠계수를 작게하고, 악로(惡路)에서의 접지성을 고려하면 0.3m/s 부근의 감쇠계수를 크게하면 좋게지만, 이와같은 감쇠특성은 롤(roll)이 크고 조종안정성이 나쁘다. 그리하여 승차감만을 고려하면 감쇠력은 작은 것이 바람직하고, 조종안정성만을 고려하면 큰 것이 바람직하지만, 이런 특성을 오일 쇼바에서 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.

그리하여 본 연구에서는 상술한 도로의 어떠한 조건에서도 튜닝(tuning)한 감쇠력 사양을 쉽게 조절할 수 있도록 충격흡수기의 동적거동 해석 프로그램을 이용하여 충격흡수기내의 각 부품들이 감쇠력에 미치는 영향과, 그때의 각밸브의 열림량을 조사하여 성능에 중요한 영향을 미치는 부품의 물성치, 수직도, 평면도, 치수및 공차관리를 철저하게 하여 균일한 성능을 내는 양질의 충격흡수기를 생산하고자 한다.

친 도로(rough road)의 주행에서는 공동화현상(cavitation)을 일으키기 쉽고 감쇠력이 불안정하여 성능이 저하되기 쉬운 결점을 가지고 있다. 안쪽 튜브에는 피스톤 로드와 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 설치된다.(Fig. 1)⁽⁴⁾

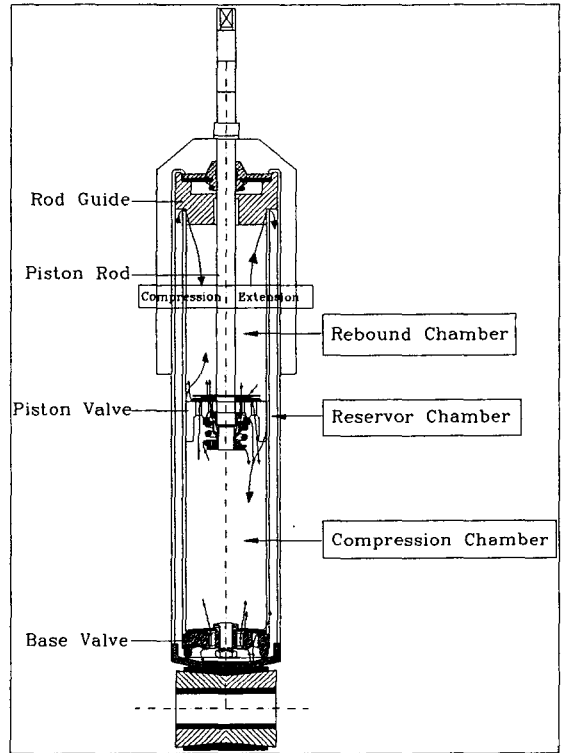


Fig. 1 Fluid flux during compression and extension processes

2. 속업쇼바의 작동 특성

쌍튜브형(twin tube) 충격흡수기가 가장 일반적이고, 가장 오래되었으나, 최근들어 가스단일튜브형이나 가스쌍튜브형으로 점차 바뀌어지고 있다. 오일 속업쇼바는 가스가 들어가지 않아 노면에서의 충격이 적은 반면, 하드 드라이빙(hard driving)이나 거

2.1 압축 행정

압축 행정에서는 압축실에서 압축되는 유체가 상대적으로 낮은 리바운드실과 저장실로 밀려나게 된다. 저장실로는 베이스 밸브 어셈블리의 초기 오리피스(initial orifice) 또는 압축 노치(notch) 만을 통해 유체 흐름이 이루어지나 베이스 밸브 조립부 양단의 압력차가 증가하여 압축 제어 밸브를 열게되면 저장

실로의 유체흐름은 베이스 밸브 일정속도 밸브와 피스톤 리바운드 밸브의 두 통로를 통해 이루어진다. 저장실로 나가는 유량은 유체를 비압축성으로 가정할 때 리바운드실 들어가는 피스톤 로드 부피의 변화 속도만큼이 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 흡입 밸브의 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 흡입 밸브에 걸리는 저항이 커지면 피스톤을 통한 압력 저하가 압축 제어 밸브를 통한 압력저하보다 커질 수 있다. 이때 리바운드실의 압력이 저장실의 압력(보통 대기압)보다 낮아지게 되고, 경우에 따라서는 유체의 기화압(vapor pressure) 이하로 떨어져 리바운드실 기체상(vapor phase)을 발생시킬 수 있다. 이 리바운드실에 발생하는 증기상은 바람직하지 않은 감쇠지연(damping lag)의 원인이 된다.⁽⁵⁾ 압축 행정에서 이 증기상이 발생되어 있으면 다음에 이어지는 압축행정 초기에 이 증기상이 없어질 동안 피스톤 양단에 압력차가 만들어지지 못함으로 피스톤이 일정 거리가 지나서 피스톤에 저항력이 걸리기 시작하게 된다. S/A 제조업체들은 리바운드 흡입 밸브의 저항을 제한하거나 압축 제어 밸브에 저항을 추가하여 이 문제를 줄이고 있다.

2.2 인장 행정

리바운드 행정에서는 리바운드실의 체적 변화율에 해당하는 유량이 압축실로 밀려나가게 되며 반동실을 빠져나가는 피스톤 로드와 의한 압축실과 리바운드실 체적 변화율 차이 만큼의 유량이 저장실로 부터 압축실로 들어온다. 리바운드실에서 압축실로 밀려 나가는 유체는 처음에는 피스톤의 초기 오리피스 또는 리바운드 노치만을 통해 일어나고 피스톤 양단의 압력차가 커져 리바운드 제어밸브를 열게 되면 리바운드 노치와 리바운드 제어밸브의 두 통로로 유체가 흐르게 된다. 저장실에서 압축실로 유체의 흐름

이 일어나려면 보통 대기압을 유지하는 저장실 압력보다 압축실 압력이 낮아야 한다. 행정 속도가 높아지면 압축실의 압력이 증기압보다 낮아져 증기상이 발생할 수 있다. 리바운드 행정에서 발생한 증기상은 이어지는 압축행정 초기에 압축 감쇠지연의 한 원인이 된다. 압축지연은 S/A의 중요한 성능 결합 중의 하나로 이를 해결하기 위한 여러 방안이 사용되어 왔다. 압축지연이 저장실의 유체에 공기가 섞이거나(aeration or foaming) 공동현상(cavitation)이 발생할 때 일어나는 것으로 간주하고 그에 대한 대책이 강구되어 왔다. 많은 S/A에서는 개스와 유체의 혼합을 줄이고 개스-유체 접촉면과 압축실 입구 사이의 거리를 늘리기 위해 스파이럴 배플(spiral baffle)을 저장실에 설치해 놓고 있다. GM의 Delco Products Division에서는 Pliacell이라는 가스충전 쿠션으로 저장실의 가스상으로 사용하던 자유공기를 대체하여 유체와 공기와의 섞임을 제거하였다. Jackson은 Pliacell이 압축지연 문제를 감소시킴을 확인하였다. 이와 같이 압축지연은 저장실의 거품현상과 압축실의 기체상 발생의 두 현상에 그 원인이 있는 것으로 추측되고 있다.

2.3 누설 경로

S/A의 피스톤과 실린더 벽 사이 그리고 로드와 로드 가이드 사이로 누설이 일어난다. 피스톤은 보통 소결금속분(sintered metal powder)으로 만들어지고 실린더는 강관으로 되어 있다. 마모를 줄이기 위해 테프론 밴드를 코팅한 피스톤이 많이 사용되고 있다. 보통 피스톤과 실린더 벽 사이의 틈새는 일천분의 일인치 정도가 된다. 이 틈새를 다른 초기 오리피스 또는 노치와 같은 역할을 한다. 로드 가이드는 대부분 소결금속분으로 만들어지며 크롬도금으로 연마한다. 로드와 로드 가이드 틈새는 0.001-0.002 인치 정도 된다. 정상적으로는 압축, 이장 행정 모두 리바운드실 압력이 저장실 압력보다 높기 때문에 로드와 로드 가이드 사이 틈새를 통한 누설은 리바운드실로 부터 저장실로 한 방향으로만 일어난다. 이 누설은 리바운드실 상부에 모이는 개스상을 저장실로 흘러나가게 한다. 저장실 압력이 리바운드실 압력 아래로 낮아질 경우에도 그 압력차는 리바운드실 유체의 증기압에 이르는 14.7 psi까지는 도달하지 않

을 것이다. 이와 같은 제한적 압력차로는 저장실 상부의 공기 또는 개스상이 현저하게 반동실로 유입되지 않을 것이다.

3. 주요 밸브의 열림량 조사

피스톤의 상·하 왕복운동에 의한 압축, 인장 과정에서 유량의 입, 출입으로 열리는 밸브는 베이스 밸브에서는 압축 행정일 때 베이스 밸브 안쪽 흡을 통한 유량에 압력으로 압축 디스크(compression disk)가 열리고, 인장 행정일 때 베이스 밸브 바깥쪽 흡을 통한 유량에 의해 리바운드 디스크(rebound disk)가 열린다. 그리고 피스톤 밸브에서는 압축 행정일 때 피스톤 밸브 바깥쪽 흡을 통한 유량으로 피스톤 리바운드 디스크(rebound disk)가 열리고, 인장 행정일 때 피스톤 밸브 안쪽 흡을 통한 유량에 의해 포핏 밸브(poppet valve)가 열리게 된다. 그리하여 총 4곳의 밸브가 빠른 속도로 열리고 닫힌다.(Fig.2)

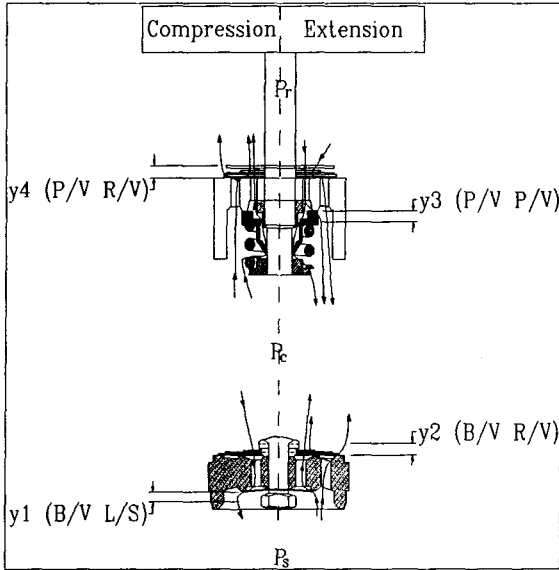


Fig. 2 Opening of each valve during compression and extension processes

물론 피스톤의 저속 운동일 때는 베이스 밸브의 일정한 속도 밸브(constant control valve)와 피스톤 노치(notch)는 항상 그 틈새 만큼 열려 있는 상태가 된다. 이들 밸브의 열리고 닫히는 양을 조절하여 자동차용 충격흡수기가 바라는 전체 감쇠특성을 갖게 되는 것이다.

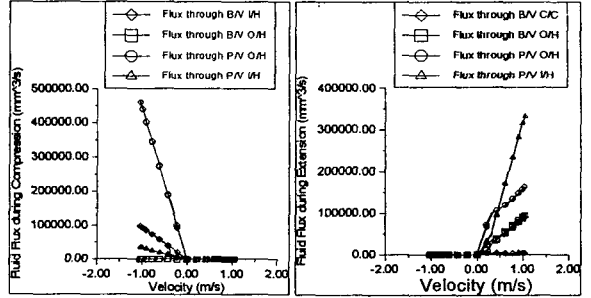


Fig. 3 Fluid Flux through each valve during compression and extension processes

Fig. 3은 피스톤의 상·하 왕복운동에 의한 압축과 인장행정 동안 속도에 따른 피스톤과 베이스 밸브의 안쪽과 바깥쪽 흡을 통한 유량을 나타낸 것이다. 압축일 때는 피스톤 바깥쪽 흡을 통한 유동이 가장 많고, 인장일 때는 안쪽 흡의 경우가 가장 많은 것을 알 수 있다.

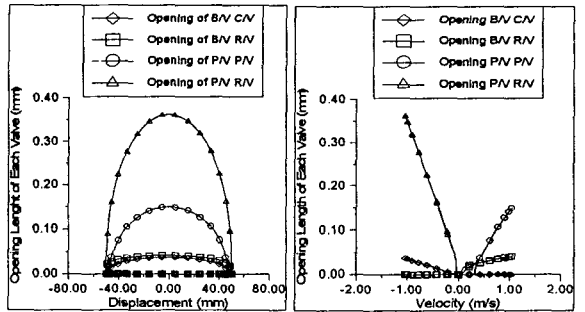


Fig. 4 Opening length of each valve during compression and extension processes

Fig. 4은 각 주요밸브의 열리는 길이를 나타낸 것

이다. 가장 많이 열리는 피스톤의 리바운드 밸브도 0.4mm를 넘지 못하고, 베이스 리바운드 밸브는 0.1mm도 열리지 않으므로 피스톤과 베이스 밸브의 스결품 상태에서 평면도와 치수 정도가 얼마나 좋아야 하는가를 알 수 있다. 또한 피스톤 포핏 밸브가 가장 많이 열리는 양은 0.15mm 정도로 작기 때문에 이 포핏 밸브를 지지하는 헬리컬 스프링의 수직도와 평면도가 얼마나 중요한가를 알 수 있다.

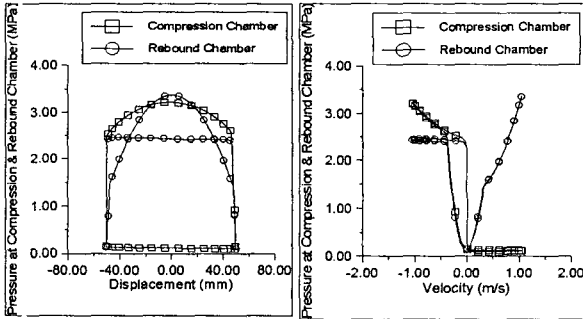
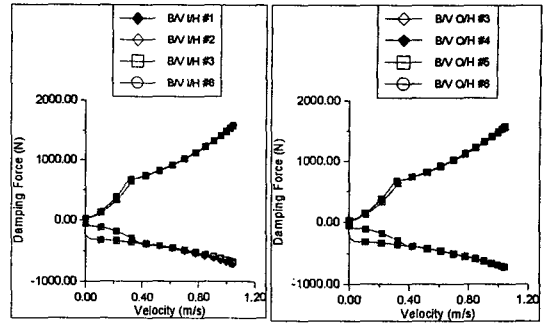


Fig. 5 Pressure distribution at compression & rebound chamber

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

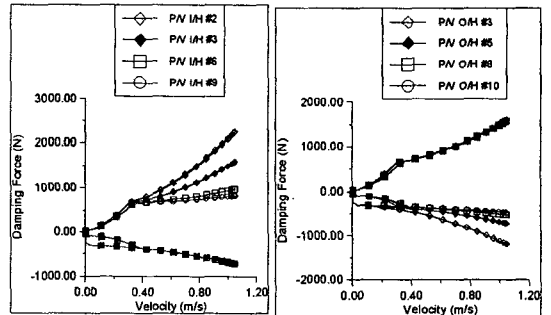
4. 감쇠력 특성의 조정설계 인자

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 발달하건 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.



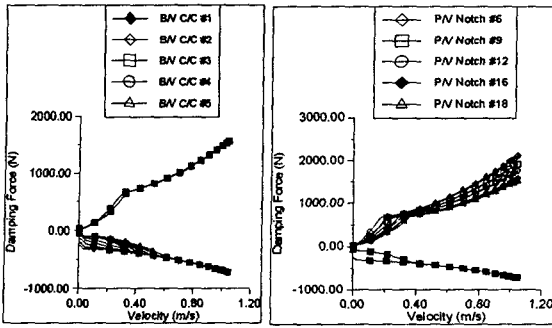
(a) (b)
Fig. 6 Damping forces according to velocities at I/H and O/H of base valve

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



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

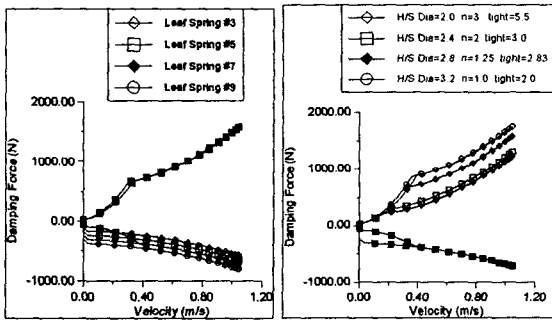
Fig. 7은 피스톤 밸브의 안쪽 홀과 바깥 쪽 홀의 개수를 조절했을 때 감쇠력에 미치는 영향을 조사한 것으로 (a)는 피스톤 밸브의 안쪽 홀은 중속 이상의 인장에 상당한 영향을 미치며, (b)의 바깥 홀은 중속 이상의 압축 감쇠력에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



(a) (b)

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

Fig. 8에서 (a)의 베이스 밸브 일정속도 밸브(constant control valve)는 저속에서 영향을 미치고, (b)의 피스톤 밸브의 노칭(notching)은 인장 전구간의 감쇠력을 증가시키든지, 줄일 때 효율적이라는 것을 알 수 있다.



(a) (b)

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. (b)는 피스톤 헬리컬 스프링의 상수를 증가시켰을 때 인장 감쇠력이 중속 이상에서 영향을 받는 것을 알 수 있다.

5. 결론

충격흡수기를 구성하는 중요 부품들이 성능에 어떻게 영향을 미친다는 것은 경험이 많은 엔지니어들에 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 S/A의 성능에 영향을 미치는 중요 부품은 무엇이고, 이들의 공차가 얼마나 중요한가를 알 수 있었다.

참고문헌

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. 충격흡수기 동적거동 해석 프로그램 개발 및 오일 유동 해석, 연구보고서, 대우정밀(주), 기술연구소, 1995
5. Lang(H.H.), "A Study of the Characteristics of Automotive Hydraulic Dampers at High Stroking Frequencies", Ph. D. Dissertation, University of Michigan, 1977.