

## 승용차량용 속업소버의 열화분석 사례연구\*

송현석<sup>1</sup> · 서영교<sup>1</sup> · 정도현<sup>1</sup> · 장중순<sup>2</sup> · 김은규<sup>3</sup> · 박부희<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>자동차부품연구원, <sup>2</sup>아주대학교, <sup>3</sup>국방과학연구소, <sup>4</sup>램스큐솔루션

### A Case Study of Degradation Analysis for the Passenger Vehicles Shock Absorber\*

Hyun-Seok Song<sup>1</sup> · Young-Kyu Seo<sup>1</sup> · Do-Hyun Jung<sup>1</sup> · Joong-Soon Jang<sup>2</sup>  
Eunkyu Kim<sup>3</sup> · Boo-Hee Park<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Automotive Technology Institute, <sup>2</sup>Ajou University

<sup>3</sup>Agency for Defense Development, <sup>4</sup>RAMS&Q Solution

**Purpose:** The purpose of this study is to estimate the lifetime of commercial passenger vehicles shock absorber using degradation test and data.

**Method:** The degradation factor of shock absorber was determined to be a damping force using FMEA. Degradation test was performed on damping force under real world usage condition and analysed the degradation data.

**Results:** To estimate the lifetime of shock absorber, a degradation model was developed and a numerical example was provided.

**Conclusion:** Evaluation of the lifetime of commercial and military vehicles shock absorber will be possible by using the proposed degradation analysis method.

**Keywords:** Shock-Absorber, Damping Force, Degradation Analysis, Degradation Model

#### 1. 서론

속업소버는 민수용 승용차량과 군수용 차량에 동일하게 적용되고, 주행시 노면에서 입력되는 충격과 진동 그리고 하중을 감쇠하여 차량에 전달하는 기능을 한다. 이러한 속업소버의 감쇠 기능은 차량의 승차감과 조종안정성에 영향을 미친다.

속업소버의 종류에는 튜브방식에 따라 트윈튜브와 모노튜브가 있다. 트윈튜브 속업소버는 저압의 질소 가스를 사용하고, 제작 단가가 저렴한 장점이 있다.

모노튜브 속업소버는 내구성이 높고 소음이 적어 안정된 감쇠력을 확보할 수 있다. 또한 속업소버는 제어 방식에 따라 능동형과 수동형으로 구분할 수 있다. 노면의 상황에 맞게 감쇠력을 조절할 수 있는 전자제어 능동형 속업소버는 주로 고급차에 적용되고, 수동형 속업소버는 강인한 내구성과 가격 경쟁력을 확보하고 있기 때문에 대부분의 차량에 적용된다. 본 연구는 대중적인 트윈튜브 방식의 수동형 속업소버를 대상으로 수행한다.

속업소버의 주 기능인 충격 흡수 성능을 확보하기

\* 본 연구는 방위사업청(UD150042AD)의 연구비 지원으로 수행되었음.

† 교신저자 july-park@daum.net

2017년 4월 27일 접수, 2017년 9월 4일 수정본 접수, 2017년 9월 12일 게재 확정.

위한 감쇠력 모델에 관한 연구는 다수가 있고[1, 2, 3, 4], 하중과 충격 감쇠에 따른 강도 및 피로수명에 대한 연구는 제시되어 있다[5, 6, 7]. 그러나 속업소버 감쇠력 성능의 저하에 따른 수명예측에 대한 연구는 거의 없다.

일반적인 열화 시험 및 분석은 가속열화시험을 실시하여 가속조건별 열화모형 분석, 가속수명 추정 그리고 정상수명 예측 등의 여러 단계별 통계적 추정과 예측을 실시한다. 이러한 가속열화시험은 최소한 3단계의 통계적 추정을 실시하므로 추정의 오차가 발생한다. 그러나 본 연구에서는 열화분석의 추정오차를 최소화하기 위하여, 실제 사용조건에서 민수용 승용차량인 택시를 대상으로 실차시험을 실시하고, 실사용 조건에서 열화데이터를 수집하여 실사용 조건의 열화모형으로부터 수명을 추정한다.

본 논문에서는 민수용 승용차량 트윈튜브 방식의 수동형 속업소버에 대한 수명을 예측할 수 있는 열화 분석 방법을 연구한다. 열화특성을 도출하기 위하여 FMEA를 실시하고, 도출된 열화특성을 분석하기 위한 실차시험을 실시한다. 실차시험으로부터 주행거리별 압축감쇠력과 인장감쇠력 열화데이터를 수집하고, 열화모형을 개발하여 수명을 예측한다. 민수용 승용차량과 군수용 차량에는 동일한 속업소버가 사용되므로, 본 연구의 열화분석 결과는 향후 군수용 차량의 수명을 예측하기 위한 방법으로 적용할 수 있다. 뿐만 아니라, 본 연구의 결과인 인장감쇠력과 압축감쇠력에 대한 열화율 분석방법은 재제조 제품의 수명을 예측하기 위한 방법으로 적용할 수 있다.

## 2. 실차시험과 열화분석

민수용 트윈튜브 방식 수동형 속업소버의 수명을 예측하기 위한 열화 분석을 위하여 4단계의 업무절차를 다음과 같이 수립하고 분석을 실시한다.

- 단계 1: 열화특성을 도출하기 위한 FMEA 실시
- 단계 2: 열화데이터를 수집하기 위한 열화시험 실시
- 단계 3: 열화모형을 개발하기 위한 열화분석
- 단계 4: 수명을 예측하기 위한 수명모형 도출

### 2.1 열화특성 도출을 위한 FMEA

승용차량 트윈튜브 방식의 속업소버 구조는 <Fig. 1>과 같이 내·외측 2중 실린더로 구성된다. 차량 주행시 입력 하중에 의해 피스톤 로드가 압축 및 인장을 하게 되면, 오일이 내측 튜브와 외측 튜브를 밸브를 통해 이동하며 감쇠력을 발생시킨다.

이러한 트윈튜브 방식의 속업소버의 핵심부품은 밸브와 오일씰이고, 속업소버의 고장을 판정하기 위한 열화특성을 결정하기 위하여 FMEA를 <Table 1>과

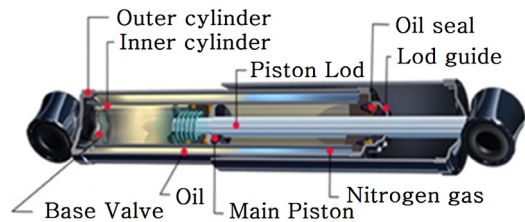


Fig. 1 Shock absorber structure

Table 1 FMEA of shock absorber

Part	Function	Potential failure mode	Failure Effect	S	Potential Cause	O	Preventive/ Detection Action	D	RPN
Valve	Damping force is generated.	Decrease damping force.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The ride feeling reduce as the damping force decreasing</li> <li>• The energy absorption rate of the strut is lowered.</li> <li>• The damping force is uneven.</li> </ul>	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformation</li> <li>• Fatigue.</li> </ul>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Damping force degradation test.</li> <li>• Valve durability test.</li> </ul>	3	90
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• The ride feeling reduce as the damping force decreasing</li> </ul>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wear-out</li> <li>• Aging.</li> </ul>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Damping force degradation test.</li> <li>• Valve durability test.</li> </ul>	4	60
Oil seal	Prevent leakage.	Leakage.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The ride feeling reduce as the damping force decreasing</li> </ul>	6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardening.</li> <li>• Aging.</li> </ul>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Damping force degradation test.</li> <li>• Oil seal durability test.</li> </ul>	2	36

같이 실시한다. FMEA 실시결과 밸브의 잠재고장모드는 감쇠력 저하이고, 오일씰의 잠재고장모드는 누유로 예측된다. 속업소버의 핵심부품인 밸브와 오일씰의 고장을 판정하거나 검출하기 위한 방법은 감쇠력 특성을 시험하는 것이다. 따라서 속업소버의 열화 특성은 압축감쇠력과 인장감쇠력으로 선정한다.

**2.2 열화시험을 위한 실차시험**

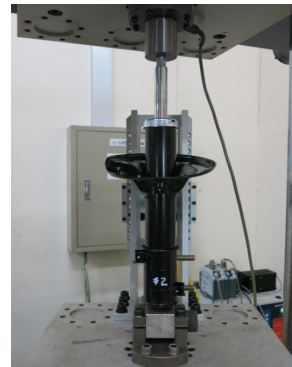
열화데이터를 수집하기 위한 열화시험은 실차시험으로 실시하고, 속업소버의 열화특성은 압축감쇠력과 인장감쇠력으로 측정한다. 열화데이터를 수집하기 위한 측정점은 초기특성 측정점을 포함하여 총7개이고, 각 측정점의 수명인 주행거리는 72,600km, 176,200km, 294,500km, 346,500km, 388,800km, 498,900km이다 (<Table 2> 참조). 실제 운행 중인 택시차량에서 수집된 속업소버 중고품을 수거하여 압축감쇠력과 인장감쇠력을 3회 반복측정하여 열화특성을 분석한다.

승용차량 속업소버의 감쇠력 측정은 속업소버 전용 시험기를 사용한다. 본 논문에서 사용한 속업소버 시험기는 <Fig. 2>와 같은 전용 시험이다. 시험실 조건은 온도 23±3℃, 습도 50%RH~65%RH이고, 시험품 온도 20±2℃, 가진진폭 L(center)=40mm이다.

압축감쇠력과 인장감쇠력은 속업소버의 외부입력 하중을 일정속도에서 흡수할 수 있는 능력을 나타낸다. <Fig. 3>은 속업소버 감쇠력 특성을 나타내고 있다. (a) 그래프는 Force vs Displacement 성능으로서 한 행정을 작동하는 동안 변위에 따른 감쇠력을 도시화한 것이며, 주로 속업소버의 반응성을 판단할 때 사용한다

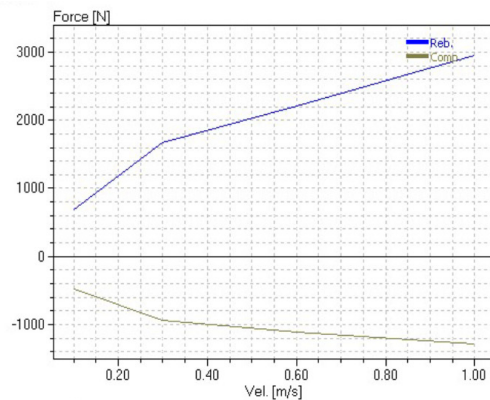
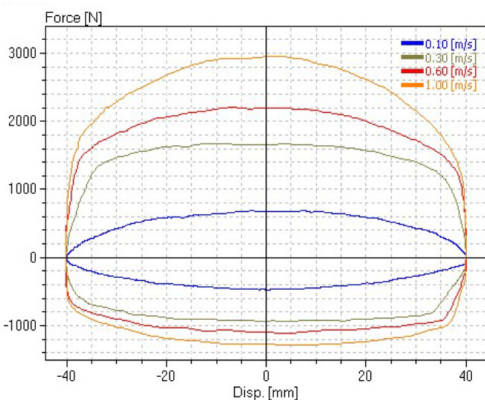
**Table 2** Degradation test plan(under real world usage condition)

Point	Measurement (km)	Damping force degradation condition	
		Compression	Rebound
1	0	6EA, 3times	6EA, 3times
2	72,600	2EA, 3times	2EA, 3times
3	176,200	2EA, 3times	2EA, 3times
4	294,500	2EA, 3times	2EA, 3times
5	346,500	2EA, 3times	2EA, 3times
6	388,800	2EA, 3times	2EA, 3times
7	498,900	2EA, 3times	2EA, 3times



**Fig. 2** Damping force tester

(b) 그래프는 Force vs Velocity 성능으로서 속도에 따른 감쇠력을 나타낸다. 본 연구에서는 F-V 선도 성능에서 속도별(0.1, 0.3, 0.6, 1.0m/s) 감쇠력(압축 및 인장)을 측정한다.



**Fig. 3** Damping force curve of the sample

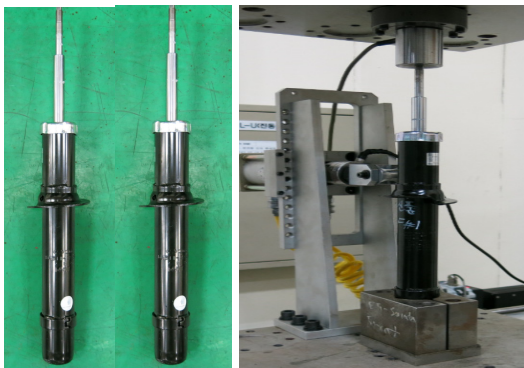
**2.2.1 신품(사용 전) 속업소버 감쇠력 측정**

속업소버의 수명예측을 위하여 신품 속업소버 6개와 실차 주행을 진행한 차량의 속업소버 중고품의 감쇠력을 측정하고, 각 감쇠력은 총 3회 반복시험 후 평균값으로 분석한다. RS 신뢰성평가기준[8]에 따르면 속업소버 수명 고장 기준은 신품 기준의 감쇠력이 30% 이상 저하되면 고장으로 판정한다.

신품 속업소버 실험 결과 감쇠력은 압축감쇠력과 인장감쇠력을 기준으로 <Table 3>과 같이 산출된다. 감쇠력 판정을 위한 속도 기준은 RS 신뢰성평가기준 [8]을 적용하여 0.3m/s 으로 결정한다.

**2.2.2 사용 후 속업소버 감쇠력 측정**

실제 운행 중인 택시차량에서 수집된 전륜 속업소버의 사용 후 압축감쇠력과 인장감쇠력은 각각 샘플 2개씩 각 3회 반복시험 후 평균값으로 분석한다. 사용후 측정횟수는 6회 이고, 주행거리는 72,600km, 176,200km, 294,500km, 346,500km, 388,800km, 498,900km이다.



new samples

**Fig. 4** Damping force test of the new samples

**Table 3** Damping force data of the new samples

Shock absorber		Speed(m/s)	Damping force
New product	Compression	0.1	546
		0.3	881
		0.6	1,024
		1.0	1,204
	Rebound	0.1	716
		0.3	1,717
		0.6	2,264
		1.0	2,686



**Fig. 5** Damping force data of the used samples

**Table 4** Degradation rate data of damping force vs mileage

Mileage (km)	Compression damping force		Rebound damping force	
	Damping force(N)	Degradation rate(%)	Damping force(N)	Degradation rate(%)
0	-881	0.0	1,717	0.0
72,600	-817	7.3	1,648	4.0
176,200	-801	9.1	1,645	4.2
294,500	-800	9.2	1,648	4.0
346,300	-792	10.1	1,617	5.8
388,800	-706	19.9	1,336	22.2
498,900	-608	31.0	1,214	29.3

<Fig. 5>와 같이 사용 후 속업소버의 감쇠력 평가를 수행하고, 사용 후 속업소버의 감쇠력 결과와 신품 대비 감쇠력 열화율을 <Table 4>와 같이 산출한다.

**2.3 열화분석 및 열화모형**

실제 운행 중인 택시차량에서 수집된 전륜 속업소버 압축 및 인장에 대한 감쇠력의 열화율은 350,000km 주행거리까지는 약 10% 이내이지만, 350,000km 이후부터는 급격하게 증가된다. 속업소버의 감쇠력 열화에 대한 고장판정기준은 열화율 30%이고, 본 연구에서 압축감쇠력에 의하여 발생하는 고장이 발생하는 실제 주행거리는 498,900km 이상이다. <Fig. 6>는 주행거리별 압축 및 인장에 대한 감쇠력 열화율을 나타내고 있다.

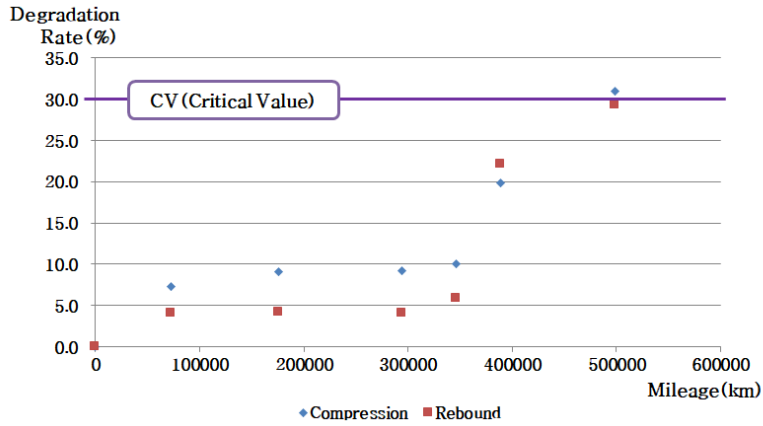


Fig. 6 Degradation rate of damping force vs mileage

2.3.1 압축감쇠력을 이용한 열화모형

실사용 전륜 속업소버의 수명을 예측하기 위하여 압축감쇠력의 열화율을 모형화하고, 도출된 열화모형으로 수명을 예측하기 위한 식을 도출한다. 이를 위하여 열화율을 모형화하기 위하여 오리지널 6.0을 이용하여 <Fig. 7>과 같이 그래프 분석과 모형식을 다음 식 (1)과 같이 추정한다. 지수함수의 열화모형을 분석하기 위하여 열화율은 100%를 기준으로 증가되는 값으로 분석한다. 즉, <Fig. 7>의 주행거리에 따른 열화율 그래프에서 고장판정기준은 130%이다.

$$y_{com} = 100 + 2.357 \cdot \exp\left(\frac{t_{com}}{195941.148}\right) \quad (1)$$

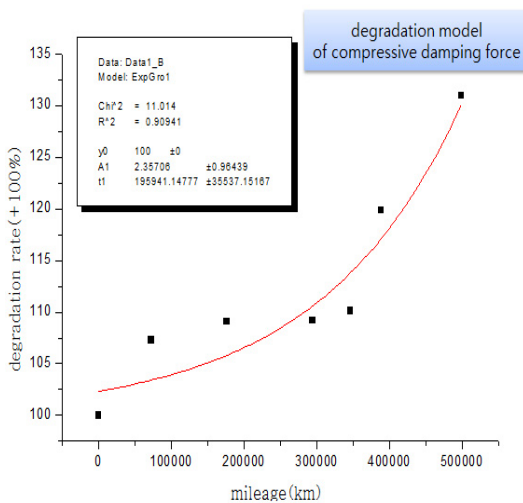


Fig. 7 Degradation model using compressive damping force

2.3.2 인장감쇠력을 이용한 열화모형

전륜 속업소버의 수명을 예측하기 위하여 인장감쇠력의 열화율을 모형화하고, 도출된 열화모형으로 수명을 예측하기 위한 식을 도출한다. 이를 위하여 열화율을 모형화하기 위하여 오리지널 6.0을 이용하여 <Fig. 8>과 같이 그래프 분석과 모형식을 다음 식 (2)과 같이 추정한다. 지수함수의 열화모형을 분석하기 위하여 열화율은 100%를 기준으로 증가되는 값으로 분석한다. 즉, <Fig. 8>의 주행거리에 따른 열화율 그래프에서 고장판정기준은 130%이다.

$$y_{reb} = 100 + 1.838 \cdot \exp\left(\frac{t_{reb}}{180609.326}\right) \quad (2)$$

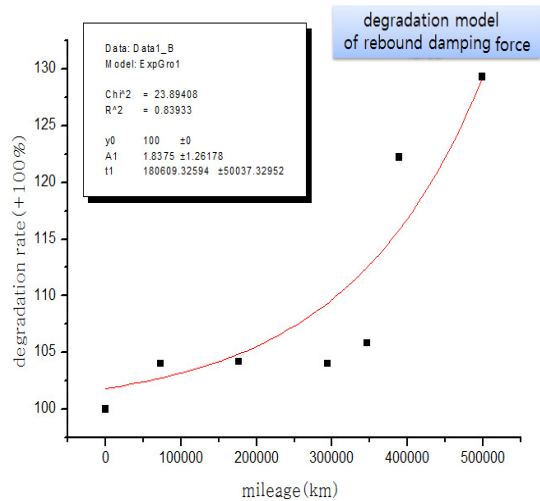


Fig. 8 Degradation model of rebound damping force

### 2.4 열화모형을 이용한 수명예측

실사용 전륜 속업소버의 수명을 예측하기 위하여 감쇠력의 열화모형으로부터 수명을 예측하기 위한 식을 도출한다.

#### 2.4.1 압축감쇠력 열화모형을 이용한 수명예측

압축감쇠력 열화모형 식 (1)로 부터 수명을 예측하기 위한 식 (3)을 다음과 같이 도출한다.

$$t_{com} = 195941.148 \cdot \ln\left(\frac{CV_{com} - 100}{2.357}\right) \quad (3)$$

$$t_{com} = 195941.148 \cdot \ln\left(\frac{130 - 100}{2.357}\right) \quad (4)$$

도출된 수명식 (3)에 고장판정기준 130%를 대입하여 추정되는 수명( $\hat{t}_{\text{압축}}$ )은 약 498,436km이다(식 (4) 참조).

#### 2.4.2 인장감쇠력 열화모형을 이용한 수명예측

인장감쇠력 열화모형 식 (2)로 부터 수명을 예측하기 위한 식 (5)를 다음과 같이 도출한다.

$$t_{reb} = 180609.326 \cdot \ln\left(\frac{CV_{reb} - 100}{1.838}\right) \quad (5)$$

$$t_{reb} = 180609.326 \cdot \ln\left(\frac{130 - 100}{1.838}\right) \quad (6)$$

도출된 수명식 (5)에 고장판정기준 130%를 대입하여 추정되는 수명( $\hat{t}_{\text{인장}}$ )은 약 504,355km이다(식 (6) 참조).

#### 2.4.3 예측 수명의 구간추정

실제 운행 중인 택시차량에서 수집된 전륜 속업소버의 압축 및 인장에 대한 열화모형으로부터 수명을

점추정치로 예측하였다. 그러나 샘플링 오차를 고려해야 하므로 수명에 대한 구간추정을 실시한다. 구간추정은 모집단의 표준편차,  $\sigma$ 를 10,000km, 30,000km, 50,000km로 가정하고 신뢰수준 CL = 95% 양측구간으로 추정한다. 구간추정은 미니탭으로 실시하고, 결과는 다음 <Table 5>와 같이 산출된다. 향후 수명을 예측하기 위하여 주행거리의 산포를 고려하여 구간추정을 실시하고 수명이 망대특성이므로 하한수명으로 대표값을 결정한다. 압축감쇠력 열화모형으로부터 도출된 수명( $\hat{t}_{\text{압축}}$ )은 498,436km과 인장감쇠력 열화모형으로부터 도출된 수명( $\hat{t}_{\text{인장}}$ )은 504,355km은 신뢰수준 CL = 95% 양측구간의 오차범위 내에서 동일하다.

### 3. 결론

민수용 승용차량 속업소버는 에너지를 감쇠하는 감쇠력 성능이 가장 중요한 성능이며 주행거리에 따라서 열화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 차량의 주행거리별 속업소버의 인장과 압축감쇠력 열화율을 이용한 열화분석 방법 및 수명예측 방법을 제시하였다.

열화특성을 도출하기 위하여 FMEA를 실시하였고, 도출된 열화특성을 분석하기 위한 실차시험을 실시하였다. 특히 실차시험은 실제 운행 중인 택시차량으로 실시하고, 수집된 속업소버 중고품을 수거하여 압축감쇠력과 인장감쇠력을 측정하여 열화분석을 실시하였다. 압축감쇠력 열화모형으로부터 도출된 수명( $\hat{t}_{\text{압축}}$ )은 498,436km이고, 인장감쇠력 열화모형으로부터 도출된 수명( $\hat{t}_{\text{인장}}$ )은 504,355km으로, 신뢰수준 CL = 95% 양측구간의 오차범위 내에서 동일하였다.

Table 5 Lifetime interval estimate using standard deviation and confidence level

Point estimate Interval estimate	Compression damping force			Rebound damping force		
	T_lower	T_nominal	T_upper	T_lower	T_nominal	T_upper
		498,436			504,355	
$\sigma = 10,000$ CL = 95%	484,577	498,436	512,295	490,496	504,355	518,214
$\sigma = 30,000$ CL = 95%	456,859	498,436	540,013	462,778	504,355	545,932
$\sigma = 50,000$ CL = 95%	429,141	498,436	567,731	435,060	504,355	573,650

군수용 차량에는 민수용 승용차량과 동일한 속업 소버가 사용되므로, 본 연구의 열화분석 결과는 향후 군수용 차량의 수명을 예측하기 위한 방법으로 적용할 수 있다. 또한 사용 후 속업소버 중고품을 이용하여 신규화 제품을 만드는 재제조의 경우에도 수명을 예측하기 위한 방법이 요구된다. 이러한 재제조 제품의 수명은 본 연구의 결과인 인장감쇠력과 압축감쇠력에 대한 열화율 분석방법을 적용하여 예측할 수 있다.

## References

- [1] Lee, C. T., Kwak, D. H., Jung, B. H. and Lee, J. K. (2003). "A Study on the Nonlinear Dynamic Modeling and Analysis of Damping Force characteristics of Automotive Shock Absorber". Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 1, pp. 104-111.
- [2] Duym, S., Stiens, R., Baron, G. and Reybrouck, K. (1997). "Physical Modeling of the Hysteretic Behaviour of Automotive Shock Absorbers". SAE Technical Paper 970101.
- [3] Duym, S. W. R. (2000). "Simulation Tools, Modelling and Identification, for an Automotive Shock Absorber in the Context of Vehicle Dynamics". International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 33, pp. 261-285.
- [4] Baek, W. K. and Kim, C. M. (2011). "Empirical Design Method for the Damping Force Characteristics of Shock Absorbers". The Korean Society For Power System Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 11-18.
- [5] Kulkarni, S., Magdum, M. and B. R. (2013). "Fatigue Life Calculation of an Automotive Shock Absorber Shim Assembly Using Different Simulation Techniques". SAE Technical Paper 2013-01-1240.
- [6] Hojjati-Talemi, R. and Zahedi, A. and Baets, P. D. (2015). "Fretting fatigue failure mechanism of automotive shock absorber valve". International Journal of Fatigue, Vol. 73, pp. 58-65.
- [7] Cho, J. U. and Han, M. S. (2008). "A study on Fatigue Analysis of Automotive Shock Absorber", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineering, Vol. 17, pp. 93-97.
- [8] Korean Agency for Technology Standard (2006). "Telescopic shock absorber for Automobiles", Reliability Certification standard, RSR0004.