

수동 및 반능동 현가 시스템 모델링과 시뮬레이션을 통한 승차감 비교

신 응 희

한양대학교 미래자동차공학과

Modeling And Simulation of Passive And Semi-Active Suspension Systems for Ride Comfort

Unghee Shin

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea,

Abstract : This paper describes the modeling and simulation of passive suspension, skyhook and other semi active suspension control strategies. The objective of this paper is to compare passive systems with semi-active systems in terms of vertical body acceleration for ride comfort. Two typical front suspension which are macpherson strut and double wishbone suspension are developed in order to simulate the vertical motion of the car when the vehicle passes over a speed bump. The comparative performance of passive suspension along with two semi-active suspension control logics, skyhook and balance has been demonstrated through simulations. The ride comfort is evaluated in terms of maximum acceleration and rms acceleration in vertical direction(Z).

Key words : Semi active suspension(반능동 현가장치), Passive suspension(수동 현가장치), Modeling And Simulation(모델링 및 시뮬레이션), Ride Comfort(승차감)

1. 서 론

최근, 여러 가지 제어를 적용한 능동 및 반능동 현가장치에 의해 차량의 승차감이 획기적으로 개선되어 이 분야의 연구에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 능동 현가장치는 에너지 소모가 크고 고가의 부품을 필요로 하므로 능동 현가장치와 유사한 성능을 보일 수 있는 반능동 현가장치에 대한 연구가 활발하다.

감쇠력을 조정하는 형식의 반능동 현가장치는 주로 고급 차종에 장착되는 첨단 현가장치로서 이 분야의 연구는 1970년경부터, 기존 댐퍼의 한계를 탈피하기 위해 시작되었다. 기존 댐퍼는 감쇠력을 결정하는 유로의 크기가 한가지로 고정되어 있어서 주행상황에 따라 감쇠력을 조절할 수 없는 구조였다. 따라서 차량의 승차감을 높이기 위해서 감쇠력을 차량의 주행상황에 따라 가변시킬

수 있는 현가장치의 개발이 필요하게 되었다.¹⁾ Karnopp가 스카이훅 제어를 제안한 이후, 많은 반능동 현가장치 제어 이론이 제안되어왔다. 하지만 반능동 현가장치의 제어 성능을 비교하는 연구들이 실제 현가장치가 아닌 이론적인 모델링을 통해 이루어지는 경우가 많았다.

따라서 본 연구에서는 두 가지 종류의 실제 수동 현가장치와 함께 반능동 현가 시스템을 설계하고, 실차와 같이 모델링하였다. 본 연구는 실차 시험에 앞서, 모델링과 시뮬레이션으로 비용 및 시간을 절감하고, 반능동 현가 시스템을 통한 성능향상의 경향성을 파악하는데 초점을 맞췄다. 현가 시스템의 성능을 나타내는 특성 중 하나인 승차감의 측면에서 차체의 수직가속도를 비교하는 시뮬레이션 결과를 제시하고 반능동 현가장치가 차량 운동 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

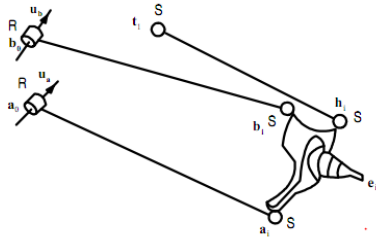


Fig. 2. 1 Macpherson strut suspension model

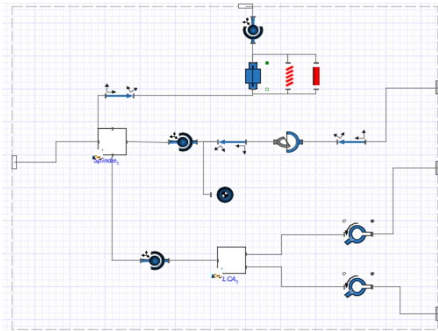


Figure 2.2. Macpherson strut suspension design using MapleSim

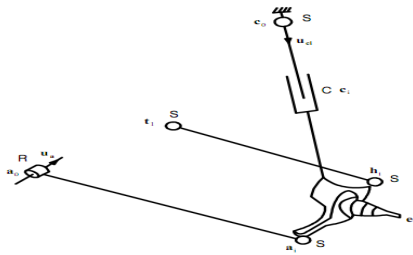


Fig. 2.3 Double wishbone suspension model

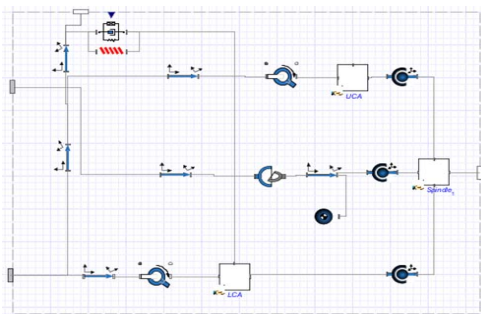


Fig. 2. 4 Double wishbone suspension suspension design using MapleSim

2. 차량현가시스템 모델링

2.1 맥퍼슨 스트럿 타입

맥퍼슨 스트럿 타입 현가장치의 기본적인 구조는 스프링과 함께 속업소버를 기둥으로 하여 상단을 바디에, 하단을 허브 캐리어나 로어 암 끝에 장착한 것이다.⁶⁾

Fig. 2.1은 맥퍼슨 현가장치의 기구학적 모델을 나타낸다. 로워 컨트롤 암은 회전 조인트와 구면 조인트에 의해 차체와 휠 어셈블리에 연결되어 R-S 다이어드를 이루고, 스트럿은 구면 조인트와 원통 조인트에 의해 차체와 휠 어셈블리에 연결되어 S-C 다이어드를 이룬다. 타이 로드는 구면 조인트에 의해 차체와 휠 어셈블리를 연결하는 S-S 다이어드를 이룬다. 따라서 R-S 다이어드, S-C 다이어드, S-S 다이어드로 구성된 RS SS-SC 기구로 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 모델링할 수 있다.⁸⁾

Fig. 2.2는 MapleSim을 통해 모델링한 맥퍼슨 스트럿 현가장치 모델이다.

2.2 더블 위시본 타입

더블위시본 타입의 현가장치는 기본적으로는 A자형의 암을 상하 한 쌍이 되도록 평평하게 세워 두고 A자형의 끝에 허브 캐리어를 설치하고 두 개의 다리를 바디에 설치한 구조로 되어 있다.⁶⁾

Fig. 2.3은 더블 위시본 현가장치의 기구학적 모델을 도시한 것이다. 어퍼 컨트롤 암과 로워 컨트롤 암을 각각 회전 조인트와 구면 조인트로 이루어진 R-S 다이어드로 모델링 하였고 타이 로드는 안쪽 구면 조인트를 차체에 고정시켜 S-S 다이어드로 표현하였다. 따라서 RSSR-SS 기구로 더블 위시본 현가 장치를 모델링 할 수 있다.⁸⁾

Fig. 2.4는 MapleSim을 통해 모델링한 더블 위시본 현가장치 모델이다.

3. 반능동 현가시스템 설계

이 연구에서 반능동 현가장치 제어 방식은 스카이훅 제어와 밸런스 감쇠제어 두 가지로 나누어볼 수 있으며, 각각은 On-off 방식과 Continuous 방식으로 나뉘어서 비교하도록 한다.

3.1 스카이훅 제어 로직

스카이훅 반능동 제어는 Karnopp에 의해 처음 제안되었다. 스카이훅이라는 이름은 가상의 하늘과 연결된 댐퍼와 같은 역할을 해서 붙여졌다.⁷⁾

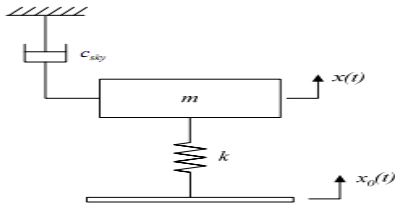


Fig. 3.1 Skyhook system

스카이훅 제어의 개념은 차체질량의 수직방향 속도 \dot{x} 과 스프링의 속도 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 에 따라서 감쇠력을 조절하는 것이다.^{3,4)}

먼저, \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 이 음수일 때는, 차체는 아래로 움직이고 스프링이 수축하는 상황에서, 스카이훅 감쇠력은 양의 방향으로 작용하며 다음과 같이 나타난다.

$$F_{sky} = c_{sky} \dot{x} \quad (1)$$

이와 마찬가지로 \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 이 양수 일 때도 스카이훅 감쇠력은 양의 방향으로 작용한다. 그러므로 \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 양수일 때는 F_{sky} 를 적용시킨다.

또 다른 경우로서, 먼저, \dot{x} 이 양수이고 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 이 음수일 때는, 차체는 위로 움직이고 스프링이 수축하는 상황에서, 스카이훅 감쇠력은 질량에 음의 방향으로 힘을 작용한다. 하지만 이와 같은 경우, 실제로 사용되는 반능동 댐퍼는 이 방향으로 힘을 작용할 수 없기 때문에 감쇠력은 0으로 설정되어야 한다. 이와 마찬가지로 \dot{x} 가 음수이고 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 가 양수일 때를 \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 음수인 한 가지 경우로 간주할 수 있다.

네 가지의 상황을 요약하면, 스카이훅 제어는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{sa} = \begin{cases} -c_{sky} \dot{x} & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) \geq 0 \\ 0 & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

즉 \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 양수일 때, 댐퍼가 on상태가 되고 감쇠력이 발생하고, 음수일 때는, 댐퍼가 off상태가 되어 감쇠력이 발생하지 않는다.

On-off 제어의 경우, \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 양수일 때 감쇠계수의 최댓값을, \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 음수일 때 감쇠계수의 최솟값을 사용한다.

$$c_{sa} = \begin{cases} c_{max} & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) \leq 0 \\ c_{min} & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Continuous 제어의 경우, \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 양수일 때 감쇠계수를 c_{sky} , \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 로 나타내며, \dot{x} 과 $\dot{x}-\dot{x}_0$ 의 곱이 음수일 때 감쇠계수로 0을 사용한다.

$$c_{sa} = \begin{cases} \frac{c_{sky} \dot{x}}{\dot{x}-\dot{x}_0} & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) \geq 0 \\ 0 & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) < 0 \end{cases}$$

(4)

다만, $\dot{x}-\dot{x}_0$ 가 매우 작을 때, 감쇠력이 무한대로 발산하는 경향이 있기 때문에 실제 댐퍼에서는 감쇠 계수의 최댓값과 최솟값을 다음과 같이 제한한다.⁵⁾

$$c_{sa} = \begin{cases} \max \left[c_{min}, \min \left[\frac{c_{sky} \dot{x}}{\dot{x}-\dot{x}_0}, c_{max} \right] \right] & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) \geq 0 \\ c_{min} & \dot{x}(\dot{x}-\dot{x}_0) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

3.2 밸런스 제어 로직

수동 단자유도 시스템에서, 질량의 가속도에 대한 응답은 다음과 같다.

$$\ddot{x} = -\frac{1}{m}(F_k + F_d) \quad (6)$$

여기서 F_k 와 F_d 는 각각 스프링에 의한 힘과 댐퍼에 의한 힘을, k와 d 는 각각 스프링 상수와 감쇠 계수를 의미한다.

$$\begin{aligned} F_k &= k(x-x_0) \\ F_d &= c(\dot{x}-\dot{x}_0) \end{aligned} \quad (7)$$

질량에 가해지는 수직가속도를 줄이기 위해서는 스프링에 의한 힘과 감쇠력의 방향에 따라서 감쇠력을 조절해야만 한다.²⁾ 즉, F_k 와 F_d 가 같은 방향으로 작용할 때 F_d 의 크기를 0으로, F_k 와

F_d 가 다른 방향으로 작용할 때 F_d 를 F_k 와 같은 힘으로 해야 수직가속도를 줄일 수 있다. 일반적인 임의의 진동에서 같은 원리를 적용시킬 수 있다. 스프링과 댐퍼에 의한 힘이 서로 같은 부호를 갖는다면, 감쇠력을 증가시키고, 그렇지 않고 다른 부호를 갖는다면 감쇠력을 0으로 조정한다.

On-off 제어의 경우, 감쇠계수의 최댓값과 최솟값이 정해져 있어서, F_k 와 F_d 가 다른 방향으로 작용할 때 감쇠계수의 최댓값이, F_k 와 F_d 가 같은 방향으로 작용할 때 감쇠계수의 최솟값을 사용한다. 0이 아닌 최솟값을 사용하는 것은 실제 댐퍼의 최소 감쇠계수가 0보다 크기 때문이다.

$$F_{sa} = \begin{cases} -c_{on}(\dot{x}-\dot{x}_0) & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) \leq 0 \\ 0 & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$c_{sa} = \begin{cases} c_{max} & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) \leq 0 \\ c_{min} & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) > 0 \end{cases} \quad (9)$$

Continuous 제어는 On-off 제어 방식의 한계를 보완하기 위해서 개발되었다. On-off 제어의 경우, 순간적인 감쇠력이 최대감쇠력과 정확하게 일치하지 않고, 남아있는 힘이 차체의 수직가속도에 영향을 미치게 된다.⁵⁾ Continuous 제어의 경우, F_k 와 F_d 가 다른 방향으로 작용할 때는 F_d 를 F_k 와 같은 크기로 조정하고, F_k 와 F_d 가 같은 방향으로 작용할 때는 F_d 를 0으로 조정한다.

$$F_{sa} = \begin{cases} -k(x-x_0) & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) \leq 0 \\ 0 & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$c_{sa} = \begin{cases} \max \left[c_{min}, \min \left[\frac{-k(x-x_0)}{\dot{x}-\dot{x}_0}, c_{max} \right] \right] & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) \leq 0 \\ c_{min} & (x-x_0)(\dot{x}-\dot{x}_0) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

감쇠계수의 최댓값이 $\frac{-k(x-x_0)}{\dot{x}-\dot{x}_0}$ 가 아닌 이

유는 감쇠계수를 $\frac{-k(x-x_0)}{\dot{x}-\dot{x}_0}$ 로 설정하면

$\dot{x}-\dot{x}_0=0$ 일 때, 무한대가 되는 경향이 있어 감쇠계수의 상한선과 하한선을 설정하였기 때문이다.⁵⁾

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 시스템 모델링

시뮬레이션은 정해진 규격의 범프를 차속 10m/s 로 지날 때를 기준으로 실시하였다. 이러한 시뮬레이션 파라미터를 Table 1에, 주행조건을 Table 2에 각각 나타내었다.

4.2 평가 항목

현가시스템의 성능을 검증하고 비교 평가하기 위하여 기존 수동 현가장치와 스카이록 제어, 밸런스 제어를 적용시킨 세 가지 경우에 대해 비교 시험을 수행하였다. 시뮬레이션 모델에서 차체에 장착된 가속도 센서를 사용하여 가속도를 측정한다. 가속도를 측정하여 시간영역에서의 수직가속도의 최댓값과 RMS(root mean square) value 를 비교하며, 또한 시간영역에서의 해석값을 FFT(Fast Fourier transform)을 통해 변환해 주파수영역에서는 차체 기본 주파수인 2Hz 근방에서의 피크값을 비교한다.

Table 1 Parameter

Parameter	Description	Value
M	Sprung mass	1500kg
k_f	Front spring stiffness	40kg31400N/m
k_r	Rear spring stiffness	35000N/m
$c_{passive}$	Passive damping coefficient	2000N*s/m
c_{max}	Passive damping coefficient	2000N*s/m
c_{min}	Passive damping coefficient	300N*s/m
k_t	Tire stiffness	180000N/m
c_t	Tire damping coefficient	500N*s/m

Table 2 Conditions of bump test

Front Suspension	Macpherson strut / Double wishbone
Rear Suspension	Semi-trailing arm
Tire	Fiala Tire
Velocity	10m/s
Bump	1.8m/0.1m

4.3 범프 통과시험

범프 통과시 반응동 현가 장치의 제어성능을 확인하기 위해 폭 1.8m 높이 0.1m의 범프를 10m/s의 속도로 통과하는 시험을 수행하였다.

시간 영역에서의 시험결과를 Fig. 4.1, 4.2에 나타내었다. 또한 Table 3에 모든 시험 결과 값을 정리하였다. 그림에서와 같이 맥퍼슨 타입과 더블 위시본 타입 모두 기존 수동방식에 비해 반응동 제어를 적용한 경우 가속도의 최대값이 감소하는 경향을 찾아낼 수 있다. 또한 Table 3을 통해 수동, 스카이훅제어, 밸런스제어 순으로 최대가속도와 RMS값이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 같은 제어방식을 적용할 경우, 맥퍼슨 타입 보다 더블 위시본 타입이 더 낮은 최대가속도와 RMS값을 갖는 사실을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 시간영역에서의 결과를 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform)을 통해 주파수 영역으로 변환시킨 결과이다. 주파수 영역에서의 비교는 시간영역에서의 불규칙한 진동에 대해서 FFT를 통해 기본주파수에서의 피크값만 확인함으로써 더 직관적인 비교를 가능하게 해준다. 샘플링 주파수는 200Hz로 설정하여 주파수 영역 0~100Hz까지의 크기 스펙트럼으로 나타내었다. Figure 4.3, 4.4와 모든 결과값을 정리한 Table4로부터 차체 기본주파수인 2Hz 부근에서 반응동 제어를 적용할 경우, 수동 방식에 비해 피크값이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 기본 주파수 주변 영역에서 수동, 스카이훅 제어, 밸런스 제어 순으로 피크값이 감소하는 경향성을 파악할 수 있었다.

Fig. 4.1 Test results of vertical acceleration of car body with macpherson suspension

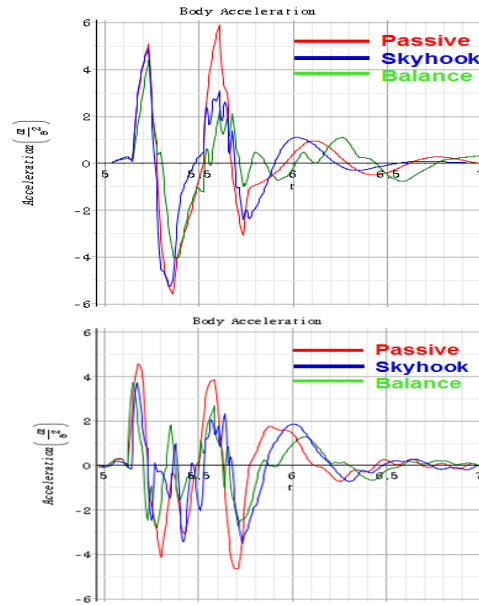


Fig. 4.2 Test results of vertical acceleration of car body with double wishbone suspension

Input	Controller	Maximum				RMS				
		Macpherson		Double wishbone		Macpherson		Double Wishbone		
		Acc. [m/s ²]	Diff. (%)	Acc. [m/s ²]	Diff. (%)	Acc. [m/s ²]	Diff. (%)	Acc. [m/s ²]	Diff. (%)	
Bump	Passive	5.88	0	4.67	0	1.21	0	1.07	0	
	Sky-hook	On-Off	5.48	-8.80	4.35	-8.85	0.93	-23.14	0.74	-30.84
		Continuous	5.25	-10.71	3.77	-19.27	1.01	-16.53	0.77	-28.03
	Balance	On-Off	4.48	-23.81	4.25	-8.99	0.83	-31.41	0.73	-31.77
		Continuous	4.39	-25.34	3.73	-20.12	0.78	-35.53	0.67	-37.38

Table 3 Test results of vertical acceleration

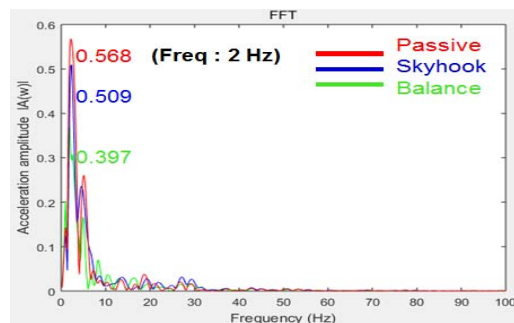
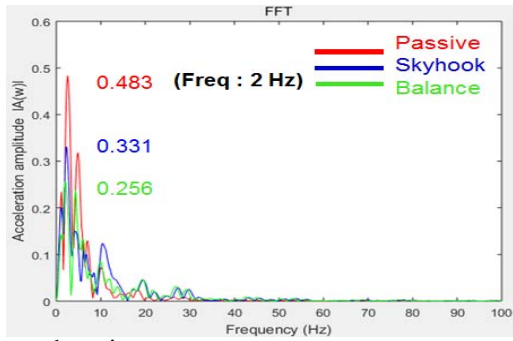


Fig. 4.3 Test results of vertical acceleration of car body with macpherson type suspension

Fig. 4.4 Test results of vertical acceleration of car body with double wishbone suspension

Table 4 Test results of vertical



acceleration

Input	Controller	Peak value (Freq : 2Hz)				
		Macpherson		Double wishbone		
		Acc. Magnitude	Diff. (%)	Acc. Magnitude	Diff. (%)	
Bump	Passive	0.568	0	0.483	0	
	Sky-hook	On-Off	0.349	-38.55	0.270	-44.09
		Continuous	0.509	-10.38	0.331	-31.47
	Balance	On-Off	0.347	-38.9	0.258	-46.58
		Continuous	0.397	-30.1	0.256	-46.99

5. 결론

본 연구에서는 감쇠력이 일정한 수동 현가장치와 반능동 현가 제어를 적용시킨 차량에서의 시뮬레이션 결과에 대해 비교 검토하였다. 시뮬레이션 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 차량의 승차감을 결정하는 차량의 수직가속도 특성은 현가장치의 설계 방식과 제어 방식의 차이에 따라 달라질 수 있다.
2. 동일한 제어방식을 적용할 경우 맥퍼슨 타입보다 더블위시본 타입의 현가장치가 더 좋은 승차감을 가진다.
3. 동일한 현가장치 구조에서 수동보다 스카이훅 제어, 스카이훅 제어보다 밸런스 제어가 더 좋은 승차감을 가진다.
4. 차체의 기본주파수인 2Hz 주변에서 기존 수동 현가장치에 비해 반능동 현가제어가 포함된 경우가 승차감이 더 우수하다.

후 기

주어진 조건과 변수들을 통해 이론적인 부분과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만, 주행 속도나 범프의 규격, 파라미터 등을 다양하게 바꿔가며 더 많은 경우에 대해 실험하고, 또한 같은 상황에서 최적화된 파라미터를 구해낼 수 있다면, 조금 더 뚜렷한 경향성을 이끌어 낼 수 있을 것이다. 이러한 부분들은 차후에 과제로 남겨놓는다.

본 연구를 통해 현가장치와 차량을 모델링하고

시뮬레이션을 해보면서 기계적인 요소와 함께 제어도 함께 다룰 수 있어서 의미 있는 경험이 되었다. 다양한 과목으로부터 얻어낸 지식들을 활용해 볼 수 있는 좋은 기회여서 다시 한 번 폭넓게 아는 것의 중요성을 느낄 수 있었다.

References

- [1] K. H. Lee, C. T. Lee and H. S. Jeong, "A Study on the Field Test Characteristics of Semi-Active Suspension System with Continuous Damping Control Damper," Transactions of KSFC, Vol.7, No.4, pp.32-38, 2010.
- [2] Y. Liu, Semi-active damping control for vibration isolation of base disturbances, Ph. D. Dissertation, University of Southampton, Southampton, 2004.
- [3] A. Agharkakli, G. S. Sabet, A. Barouz, "Simulation and Analysis of Passive and Active Suspension System Using Quarter Car Model for Different Road Profile," International journal of Engineering Trends and Technology, Vol.31, No.5, pp.636-645, 2013.
- [4] T. R. M. Rao, G. V. Rao, K. S. Rao and A. Purushottam "Analysis of Passive and Semi active Controlled Suspension Systems for Ride Comfort in an Omnibus Passing over a Speed Bump," IJRRAS, Vol.5, No.1, pp.7-11, 2010.
- [5] M. Sentil Kumar, S. Vijayarangan "Design of LQR controller for active suspension system," International journal of Engineering and Materials Sciences, Vol.13, No.3, pp.173-179, 2006.
- [6] W. F. Milliken and D. L. Milliken, Chassis Deign Principles and Analysis, 1st Edn., Society of Automotive Engineers, Warrendale, 2002.
- [7] S. M. Savaresi , Semi-Active Suspension

Control Design for Vehicles, 1st Edn.,
Elsevier , Burlington, 2010.

- [8] 정 성훈, 멀티 링크형 현가장치의 기구학적 설계인자를 고려한 최적 설계 , 석사학위 논문, 연세대학교, 서울, 2000.