고안전 차량의 통합채시 제어를 위한 지능형 현가시스템 변위 센서 개발

윤득선 · 이창석* · 백승환* · 강태호** · 부광석†

Development of a intelligent suspension displacement sensor for unified chassis control of advanced safety vehicle

Duksun Yun, Changseok Lee*, Seonghwan Baek*, Taeho Kang**, and Kwangsuck Boo†

Abstract

This paper describes development of a new displacement sensor for intelligent suspension system in which the damping force has been controlled by MR fluid. Most of the current vehicle height sensors have been installed at external place of the damper and connected to that by mechanical linkages so far. The developed sensor has a new mechanism which detects movement of the sensor rod same as connecting rod in the suspension damper by using a GMR Sensor and converts it to the relative displacement from an initial position.

Key Words : giant magneto-resistive(GMR), displacement sensor, magnetic field, carsim

1. 서 론

최근의 자동차는 시스템 지능화와 고안전화가 진행되고 있으며 현가 시스템 분야도 예외는 아니다. 특히 현가 시스템의 댐퍼는 진동을 흡수하여 승차감의 향상을 높여주는 현가시스템의 성능에 가장 중요한 역할을 하고 있으나 차체와 노면의 진동을 흡수하므로 이 부품에 센서를 장착하여 응용하는 것은 효율성이 없는 것으로 인식되어 왔다. 그러나 자동차의 전장 시스템이 IT 산업의 발달과 더불어 급격하게 성장하게 됨에 따라 센서의 활용분야와 장착가능 부위가 다양해지고 있으며 또한 변위, 각도, 속도와 가속도 등의 관성변화를 감지할 수 있는 다양한 센서들이 개발되고 있으며 검출 데이터를 무선으로 전송할 수 있는 센서들도 많이 개발되고 있다^[1].

그러나 기존 차량에서 변위, 속도, 그리고 가속도 등

의 물리량은 자기유도 방식이나 홀(hall) 효과를 이용하여 측정하는 것이 보편화되어 저속에서 감지성능이 크게 떨어지므로 지능형 현가시스템을 적용하는 고안전 차량의 자세제어 등에 사용하기에는 아직 미흡하다^[2,3].

지능형 현가시스템은 한 가지 성능으로 설정된 기존 차량의 현가 시스템과는 달리 다양한 노면과 주행조건에 따라서 최적의 승차감과 주행안정 성능을 향상시키는 지능형 고안전 차량을 위한 시스템으로서 세계의 우수 업체들이 지향하고 있는 통합 채시 제어를 위한 시스템이다.

지능형 현가시스템은 차량의 동적거동을 능동적으로 제어 할 수 있는 CDC(continuous damping control) 댐퍼와 차량의 자세를 감시하는 센서류, 그리고 댐퍼의 댐핑계수를 제어하는 ECU 등으로 구성된다.

그러나 CDC 댐퍼와 ECU는 산학연의 연구를 통하여 많은 발전이 있었으나 차량의 자세를 제어하는 데 필요한 데이터를 생성하는 센서류는 장착 위치와 잡음에 대하여 검증이 충분히 이루어지지 않아 아직 초보 단계에 머무르고 있다.

본 연구에서는 GMR(giant magneto resistive) 효과를 이용하여 지능형 현가시스템의 핵심 부품인 차량 자세제어에 필요한 데이터를 생성하는 댐퍼 내장형 상대 변위센서를 개발하고자 한다. 이에 개발하고자 하는 변

인제대학교 고안전차량핵심기술연구소(High Safety Vehicle Core Technology Center, Inje University)

*인제대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inje University)

**S&T 대우 주식회사(S&T Daewoo CO., LTD.)

†Corresponding author : mechboo@inje.ac.kr

(Received : July 25, 2009, 2009, Received : September 10, 2009

Accepted : September 16, 2009)

Fig. 1. Configuration of the integrated sensor.

위센서 개념을 확립하고 설계하였으며 CarSim이라는 상용 소프트웨어를 이용하여 센서 성능 특성을 정의하였다. 또한 변위센서의 성능 검증을 위하여 MTS 849 S/A 시스템을 이용하여 시뮬레이션 연구 결과를 평가하였다.

2. 센서의 원리 개념 및 설계

일반적인 차량의 높이변화를 측정하기 위한 방식으로는 회전식 센서를 이용하여 회전각의 변화를 위치데이터로 변환하는 방식을 이용하고 있다. 이러한 종류의 차량 높이장치는 기구적 구조가 복잡하고 측정하는 위치와 댐핑력 작용점들 사이의 오차가 크다. 따라서 현가장치에 직접 장착함으로써 외부에 기구적으로 연결하는 장치가 불필요한 새로운 센서를 설계하였으며 rod guide의 내부에 센서를 통합하여 구성하였다^[4].

Fig. 1에서 GMR센서, 2축 가속센서, 신호처리 보드, 영구 자석, 하우징 케이스와 케이블로 이루어진 PCB를 가지는 상대변위 센서의 배치와 실제 제작된 센서를 나타낸다. GMR센서는 막대의 홈 위에 배치하여야 하기 때문에, 센서기판은 신호처리 기판과 같이 수직으

Fig. 2. Configuration of a relative displacement sensor.

Fig. 3. Typical gradiometer transfer function.

로 조립되어야 한다. 센서 모듈은 앞에서 언급한 바와 같이 공간이 좁은 rod guide에 설치되기 때문에 작은 크기로 제작하였다. 또한 센서하우징은 EMC의 영향을 피하기 위하여 EMC 차단복합재료로 제작하였다. 센서의 내부구조는 Fig. 2에서 보이듯이 일정 간격으로 홈이 파인 막대(grooved rod)와 GMR(giant magneto-resistive) 센서, 그리고 영구자석 등으로 구성되며 홈위를 이동하는 막대의 변위가 발생하면 자장의 변화를 감지하는 원리를 이용한다. 즉, GMR 센서는 홈이 파인 면과 파이지 않은 면을 가진 서로 다른 깊이를 가지는 막대로부터 유도된 자기 유동의 변화를 측정한다.

3. 신호 처리

GMR 센서의 신호는 5V에서 동작이 가능한 GMR과 차폐저항을 각각 한 쌍으로 연결한 휘스톤회로로써 구성하였다.^[5] GMR 저항의 상대적인 위치 변화에 따

Fig. 4. Digital signal processing circuit and the time table.

Fig. 5. GMR sensor output signal.

라 유도된 자기 유동이 변하며 GMR 현상으로 발생하는 출력전압 차의 편차를 유효한 신호로 변환한다.

센서의 출력 전압 차는 Fig. 3의 그래프와 같이 미소 값을 가지므로 OP-AMP로 신호를 증폭하였으며 정현파 형태의 출력전압이 식(1)을 만족하는 경우 식(2)으로써 계산할 수 있다.

여기서 Fig. 4의 그래프에서 보이듯이 Plate 1에 체결된 B1과 plate 2에 체결된 B2의 출력신호 위상차를 이용하여 막대의 이동 방향을 확인할 수 있다. B2의 출력신호가 위상의 지연되며 방향의 전환이 발생하는 순간의 시스템 속도는 0이 되며 방향의 출력신호가 전환됨을 알 수 있다. 또한 디지털 논리 회로는 CPLD (complex programmable logic device)로 GMR센서 출력을 받고 rod의 이동 방향과 속도를 계산하여 만들었으며 센서의 모든 동작은 30ms이하의 속도로 제어됨을 알 수 있다. Fig. 5는 GMR 센서 출력과 변환된 디지털 신호들을 나타내며 raw data가 양의 값을 가지면 1, 음의 값을 가지면 0의 디지털 출력 신호를 가짐을 나타내고 있다^[6].

4. 센서 성능 실험

4.1. 센서 성능 특성

센서의 성능 실험에 앞서 차량의 yaw방향 특성과 pitch rate를 검출하여 본 논문에서 개발하는 센서가 검출

Fig. 6. Road model profile from the CarSim: (a) dry high way; (b) small bumper; (c) big bumper; (d) sinusoidal bumper.

Fig. 7. Braking simulation on dry highway simulation: (a) damping force; (b) damping compression rate; (c), (d) spring force.

Fig. 8. Small bumper road pass simulation: (a) damping force; (b) damping compression rate; (c) spring force.

해야하는 물리적인 영역을 검증하였다. 일반 도로를 주행하는 차량의 거동 데이터를 검출하기 위하여 CarSim에서 제공하는 준중형 상용차량을 기준 모델로 ABS가 적용되지 않은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션에서 노면조건은 Fig. 6과 같이 CarSim에서 제공하는 가상의 도로를 4가지 형태로 구성하여 댐퍼의 성능을 알아보기에 가장 적합한 Fig. 6(a)에서 보이는 건조한 고속도로(dry highway), Fig. 6(b)의 낮고

짧은 과속방지턱(small bumper), Fig. 6(c)의 높고 긴 과속방지턱(big bumper), Fig. 6(d)의 비대칭 정현파형 도로(sinusoidal bumper) 등에서 진행하였다.

또한 차량의 주행속도는 각 도로 상향별로 물리적인 특성을 잘 나타낼 수 있는 운전속도를 기준으로 진행하였다.

Fig. 7은 차량이 건조한 노면의 고속도로를 100 km/h로 주행 중 급제동하여 발생하는 물리량 변화의 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)는 차량이 주행 중 급제동으로 인하여 차량속도가 바퀴속도보다 빠르게 되어 슬립이 발생하므로 앞, 뒤 현가장치에 압축과 인장력이 가해지는 것을 보이고 있다. Fig. 7(b)는 댐핑력에 비례하여 댐퍼의 속도를 보여주고 있으며 Fig. 7(a)와 유사함을 알 수가 있다. Fig. 7(c)와 (d)는 3s에서 급제동함으로 인하여 발생하는 현가장치에 발생하는 압축력과 인장력에 의하여 차량의 상하운동으로 모멘트가 작용하면서 스프링에 가해지는 힘을 보이고 있다. 따라서 건조한 노면의 고속도로에서 급제동 시 댐퍼는 최대속도가 약 0.7 m/s인 범위를 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 차량이 20 km/h의 속도로 small bumper를 통과할 때 전륜과 후륜 현가장치에서 발생하는 물리량 변화의 결과를 나타낸다.

Fig. 8(a)는 차량이 1s에서 과속방지턱으로 진입을 하면서 차량의 상하운동으로 인하여 댐퍼에 가해지는 힘을 나타내고 있으며 Fig. 8(b)은 Fig. 8(a)의 댐핑력에 비례하여 댐퍼의 속도를 보여주고 있다. Fig. 8(c)는 댐퍼에 일어나는 현상과 같이 스프링에 가해지는 힘을 보이고 있다. 따라서 small bumper를 통과할 때 댐퍼는 최대속도가 약 2.2 m/s인 범위를 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 차량이 70 km/h의 속도로 big bumper를 통과할 때 전륜과 후륜 현가장치에서 발생하는 물리량 변화의 결과를 나타낸다.

Fig. 9(a)는 5s에서 범퍼로 진입하면서 차량에 발생하는 진동으로 인하여 댐퍼에 가해지는 힘을 나타내고 있으며 Fig. 9(b)는 동일 시간상의 댐퍼속도를 보여준다. Fig. 9(c)는 댐핑력과 같이 범퍼에 진입하면서 차량에 발생하는 진동으로 인한 스프링에 가해지는 힘을 보이고 있다. 따라서 big bumper를 통과할 때 댐퍼는 최대속도가 약 3.5 m/s인 범위를 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 차량이 60 km/h의 속도로 비대칭 정현파형 도로를 통과할 때 좌, 우 현가장치에서 발생하는 물리량의 변화를 나타낸다.

Fig. 10(a)에서는 도로에 진입하면서 차량에 발생하는 진동으로 인하여 댐퍼에 가해지는 힘을 나타내고

Fig. 9. Big bumper road pass simulation: (a) damping force; (b) damping compression rate; (c) spring force.

있다.

이전의 실험도로와는 달리 긴 시간동안 연속적인 주기로 차량에 진동이 가해지는 것을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 동일 시간상 댐퍼의 속도 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 10(c), (d)는 스프링력에 대한 시뮬레이션 결과이며 댐퍼에 비해서 가해지는 힘의 크기가 크며 진폭이 작음을 알 수 있다. 따라서 정현파형 도로를 통과할 때 댐퍼는 최대속도가 약 0.7 m/s인 범위를 가지는 것으로 판단된다.

위의 4가지 CarSim 시뮬레이션 결과와 제어기의 동

Fig. 10. Sinusoidal bumper road pass simulation (a) damping force; (b) damping compression rate; (c), (d) spring force.

Table 1. Sensor Specification

Sensor specification	
Resolution	0.3 mm(Min)
Response time	under the 10 μ s (up to 3 m/s)
Repeatability	less than 1 %
Operation temp	-45~105 $^{\circ}$ C
ESD	3 kV

Fig. 11. MTS 849 S/A system.

작소요시간, 일반적인 자동차 규격을 고려하면 센서의 최소 식별거리는 0.3 mm, 분해능은 0.15 mm, 응답시간은 10 μ s로 설정하여 Table 1과 같은 센서의 특성을 설정하였다.

4.2. 성능 실험

본 논문에서 개발한 센서의 성능실험은 Fig. 11의 MTS849 S/A 시스템으로 수행하였다. 이 시스템은 원하는 주파수로 -125~125 mm의 변위를 현가 시스템에 입력할 수 있는 내구성능 실험 장비이다. Fig. 12(a)는 10 Hz의 정현파 기준입력을 센서에 주었을 때 센서의 출력을 동시에 보이고 있다. 센서의 출력이 입력에 대비하여 매우 근사하게 출력되고 있으나 약 2.5 %의 편차가 발생함을 알 수 있다. 이 편차는 매우 미소하므로 Fig. 12(b)에서 Fig. 12(e)는 보다 세밀한 성능평가를 위하여 센서의 입력과 출력신호를 확대한 결과를 보이고 있다. Fig. 12(b), (c)의 편차는 균일한 값을 가지면서 기준입력을 추종하고 Fig. 12(d), (e)의 변곡구간에 서도 입력신호를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그러나 현가장치의 압축과 인장이 최대가 되며 방향의 전환이 일어나는 변곡지점에서는 상승, 하강 시와는 달리 미소한 편차오차의 변동을 보이고 있으며 Fig

Fig. 12. Comparison between the reference and the sensor output: (a) sensor output; (b) part A; (c) part B; (d) part C; (e) part D.

13(a), (b)에서 보이듯이 오실레이션이 있는 결과를 나타내고 있다. 그러나 이러한 오차의 오실레이션은 2.5 % 미만으로 한정되고 있음을 알 수 있다. 이러한 오

실레이션의 원인은 변곡지점에서의 GMR 자기장 포화가 이루어질 때 방향 전환 이후에는 이전의 자기장의 흐름을 따라서 복귀하지 못하는 hysteresis 현상에 의한

Fig. 13. Error between the reference and the sensor output: (a) part C; (b) part D.

것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 고안전 차량의 통합새시 제어를 위해 제안된 지능형 현가시스템 변위 센서를 설계하고 성능을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 차량의 거동범위를 Carsim을 통하여 선행검증하고 이를 센서의 검출범위로 선정하였다. 실제 도로와 차량에 대한 시뮬레이션을 통해 개발하고자 하는 센서의 특성과 장착될 댐퍼의 최대속도가 3.5 m/s임을 판단할 수 있었다.

2. 차량의 주행 중 발생하는 운동으로 인하여 댐퍼의 rod가 상하운동이 지속적으로 발생하므로 내구성능 검

증장비를 이용하여 센서의 정밀도(오차율)는 2.5 % 미만이며 응답시간은 1ms이하의 성능을 가짐을 확인하였다.

3. 이 결과를 통해 GMR 센서를 이용한 상대 변위 센서는 기존의 높이 센서를 대신할 수 있으며 차량의 자세제어에 필요한 데이터를 생성할 수 있는 센서로 적합하다고 판단되었다.

4. 향후에는 GMR의 hysteresis를 고려하고 테스트 장비가 아닌 실차에 장착하여 CarSim에서 구현한 노면의 조건에서 실차실험을 함으로써 성능을 실증하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 지식경제부 지역산업기술개발사업 중점기술개발사업의 지원에 의해 연구되었으므로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 최낙권, 이상훈, “자동차 센서 모니터링 시스템 개발”, 한국센서학회지, 제14권, 제3호, pp. 150-155, 2005.
- [2] S.S.P. Parkin, N. More, and K.P. Roche, “Oscillations in exchange coupling and magnetoresistance in of metallic superlattice structures-Co/Ru, Co/Cr and Fe/Cr”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, no. 19, pp. 2304-2308, 1990.
- [3] H. Wakiwaka, L. Shiotani, and Y. Kataoka, “Comparison of three magnetic sensors for a magnetic encoder, Non-linear electro- magnetic systems”, *IOP Press*, pp. 625-628, 2000.
- [4] D.E. Heim, R.E. Fontana, C. Tsang, and V.S. Speriosu, “Design and operation of spin-valve sensors”, *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 30, no. 2, pp. 316-321, 1994.
- [5] H. Wakiwaka, “Directional sensitivity of GMR element and its industrial applications”, *International Journal of Applied Electro-magnetics and Mechanics*, pp. 89-96, 2001/2002.
- [6] J.C. Mallinson, *Magneto-resistive heads fundamentals and applications*, Academic Press, New York, pp. 94-97, 1996.

윤 득 선

- 1996년 국민대학교 공과대학 자동차공학과 학사(공학사)
- 1998년 국민대학교 자동차전문대학원 석사(공학석사)
- 2002년 국민대학교 자동차전문대학원 전자제어 박사(공학박사)
- 2002년~2005년 University of Florida, Mechanical Engineering, Researcher
- 2005년~2007년 경기공업대학 메카트로닉스학과 겸임교수
- 2007년~현재 인제대학교 공과대학 기계자동차공학과 연구교수
- 주관심분야: 차량항법, 전자제어 시스템

이 창 석

- 2009년 인제대학교 전문기계자동차공학과 학사(공학사)
- 2009년~현재 인제대학교 일반대학원 기계공학과 석사
- 주관심분야: 차량새시제어, HILS

백 승 환

- 2006년 인제대학교 기계자동차공학과 학사(공학사)
- 2009년 인제대학교 대학원 기계공학과 석사(공학석사)
- 2009년~현재 인제대학교 대학원 기계공학과 박사과정
- 주관심분야: HILS, Brake System control, Vehicle stability control

강 태 호

- 2001년 부경대학교 자동차공학과 학사(공학사)
- 2003년 부경대학교 대학원 기계설계학과 석사(공학석사)
- 2006년 부경대학교 대학원 지능제어전공 박사과정 수료
- 2005년~현재 대우정밀 주식회사(현, S&T 대우주식회사) 기술연구소 주임연구원

부 광 석

- 1983년 부산대학교 기계공학과 학사(공학사)
- 1985년 KAIST 기계공학과 자동제어 전공(공학석사)
- 1991년 KAIST 기계공학과 자동제어 전공(공학박사)
- 1991년~1992년 삼성전기 생산기술본부 자동화팀장 선임연구원
- 1999년~2009년 인제대학교 현장특화고급인력공동양성센터 센터장
- 1999년~2009년 인제대학교 수송기계부품기술혁신센터 센터장
- 1999년~2009년 인제대학교 고안전차량핵심기술연구소 소장
- 1993년~현재 인제대학교 기계자동차공학부 교수
- 주관심분야: 기계시스템제어, 메카트로닉스