creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

농용트랙터의 노면 센싱기반 반능동형 유공압식 전방차축 현가장치 제어기술 개발

2019년 2월

서울대학교 대학원

바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공

이 정 환

농용트랙터의 노면 센싱기반 반능동형 유공압식 전방차축 현가장치 제어기술 개발

지도교수 김 학 진

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함
2019년 2월

서울대학교 대학원
바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공
이 정 환

이정환의 석사학위논문을 인준함
2019년 2월

위 원 장 _____ 이 중 용 _____ (인)

부위원장 _____ 김 학 진 _____ (인)

위 원 _____ 박 영 준 _____ (인)

국 문 초 록

본 연구에서는 고성능 트랙터 개발의 일환으로 국내 농용트랙터의 수동형 전방차축 현가장치를 개선하기 위한 제어기술 개발을 진행하였다. 전방차축 현가장치는 노면의 충격을 감쇠시키고 타이어와 노면의 접지력을 향상시켜 조향성능을 개선시키는 역할을 한다. 하지만 기존 연구에서 개발한 고정된 특성치를 갖는 수동형 현가장치는 농용트랙터가 활용되는 다양한 노면 조건에 능동적으로 대응할 수 없으며 승차감과 조향성능을 동시에 만족시킬 수 없다는 단점을 지닌다. 또한, 높은 부하에 견딜 수 있도록 제작된 유공압식 현가장치의 특성상 전자제어 적용 시 느린 반응성 때문에 충격 흡수 효율이 떨어지는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 차량 전방의 노면 상태를 인식할 수 있는 LiDAR 센서를 이용해 반능동형 방식의 현가장치 제어기술을 개발하고자 하였다. 2차원 LiDAR 센서를 이용해 노면 프로파일을 획득하고 RANSAC 알고리즘을 통해 얻은 기준 노면에 대해 통계적인 방법으로 노면의 거칠기를 수치화하였으며, 이를 기반으로 Adaptive 방식의 현가장치 제어기를 설계하였다. 또한 LiDAR 센서로 측정한 노면의 높이 정보의 평균값을 비교해 노면의 장애물을 인식하는 알고리즘을 개발하고 이를 기반으로 장애물을 지나기 전에 현가장치의 감쇠력을 바꿔주는 알고리즘을 고안하였다. 시뮬레이션을 통해 노면 거칠기 기반 제어 알고리즘의 성능 검증을 우선적으로 진행하였으며 이를 기반으로 실차에 적용가능한 제어기를 설계하였다. 실차에 노면 거칠기 기반 제어기술 적용 결과, 수동형 현가장치에 비해 승차감의 지표인 차체 수직가속도가 최대 66.5%, 조향성의 지표인 차축 수직 움직임이 최대 10.1% 감소한 것을 확인하였다. 또한 범프 인식 기반 제어기술의 실차 적용 결과, 범프

를 지날 때 차체 수직가속도가 최대 54%, 차축 수직 움직임이 51% 감소하였음을 확인하였다. 따라서 수동형 현가장치에 전자제어 기술을 적용함으로써, 기존 시스템보다 개선된 현가장치 성능을 확보하였다고 할 수 있다. 추후 연구에서는 양산성을 고려한 저가형 센서 기반 노면 인식 연구와 현가장치 제어 연동에 대한 연구가 요구된다.

주요어 : 전방차축 현가장치, 반능동형, LiDAR 센서, 노면 인식
학 번 : 2017-26681

목 차

국문초록 ····· i
목차 ····· iii
List of Tables ····· v
List of Figures ····· vi

1. 서론
1.1. 연구 배경 ····· 1
1.2. 연구 목적 ····· 4
1.3. 문헌 조사 ····· 5
1.4. 현가장치 제어 시스템 ····· 9
1.4.1. 현가장치 제어 시스템 ····· 9
1.4.2. 프리뷰 제어 ····· 13
1.4.3. Adaptive 제어 ····· 15

2. 재료 및 방법
2.1. 하드웨어 구성 ····· 16
2.1.1. 현가장치 밸브블록 ····· 16
2.1.2. 시뮬레이터(Test-rig) ····· 19
2.1.3. PROTO 차량 ····· 23
2.2. 유압시스템 반응 예비 실험 ····· 30
2.2.1. 밸브 작동 시간 실험 ····· 30
2.2.2. 밸브 트리거 방식에 따른 충격 흡수 예비실험 ··· 32
2.3. LiDAR 기반 노면 센싱 ····· 34
2.3.1. LiDAR 기반 노면 거칠기 수치화 방법 ····· 34

2.3.2. LiDAR 기반 노면 거칠기 검증 실험 ····· 37
2.3.3. LiDAR 기반 범프 인식 알고리즘 ····· 40
2.4. 시뮬레이션 모델 구성 ····· 42
2.4.1. 유압회로 시뮬레이션 모델 ····· 42
2.4.2. Half Car 모델 및 Co-simulation ····· 45
2.5. 현가장치 제어 알고리즘 ····· 51
2.5.1. LiDAR 기반 반능동형 현가장치 제어 알고리즘 ···· 51
2.5.2. 시뮬레이션 기반 제어 성능 평가 ····· 54
2.5.3. 실차 기반 제어 성능 평가 ····· 56

3. 결과 및 고찰
3.1. LiDAR 기반 노면 센싱 실험 결과 ····· 61
3.2.1. LiDAR 기반 노면 거칠기 검증 실험 결과 ····· 61
3.2.2. LiDAR 기반 범프 인식 알고리즘 실험 결과 ····· 62
3.2. 시뮬레이션 모델 검증 ····· 64
3.3. 현가장치 제어 알고리즘 적용 실험 결과 ····· 66
3.3.1. 시뮬레이션 기반 제어 성능 평가 결과 ····· 66
3.3.2. 실차 기반 제어 성능 평가 결과 ····· 75

4. 요약 및 결론 ····· 83

5. 참고 문헌 ····· 84

Abstract ····· 88

List of Tables

Table. 1. Comparison of passive, semi-active, active suspension system (Cho, 2017) ·····13
Table. 2. Specifications of proportional valve (HUSCO International, USA) ·····18
Table. 3. Detailed specification of excitation part in the test rig (Cho, 2017) ·····23
Table. 5. Specifications of hydraulic components ·····27
Table. 4. Specifications of PROTO vehicle ·····26
Table. 6. Specifications of sensors installed on PROTO vehicle ··30
Table. 7. Specifications of controller for LiDAR and suspension solenoid valve ·····31
Table. 8. Results of bump detection evaluation with LiDAR ·····66
Table. 9. Modified parameters of co-simulation model ·····70
Table. 10. RMS body acceleration of passive and preview semi-active control ·····71
Table. 11. RMS tire dynamic force of passive and preview semi-active control ·····75

List of Figures

Figure. 1. Compromise present in suspension design (figure from Sarami, 2009) ·····10
Figure. 2. Types of suspension control ·····12
Figure. 3. Working area of the semi-active and fully active suspensions (figure from Sarami, 2009) ·····12
Figure. 4. Laser sensors scan the road surface profile. An individual distribution function is assigned to each spot (figure from Streiter, 2008) ·····15
Figure. 5. A system of manually adjustable dampers for vehicle suspension (figure from Barak P., 1989) ·····16
Figure. 6. Suspension valve block for front axle of agricultural tractor (HUSCO International, USA) ·····17
Figure. 7. Hydraulic circuit of the front axle suspension(CNH T5 110) ·····18
Figure. 8. Schematic diagram of a hydraulic suspension system (Cho, 2017) ·····20
Figure. 9. Quarter car test-rig simulator guidance designed by CAD ·····21
Figure. 10. Quarter car test-rig simulator with 1DOF ·····21
Figure. 11. Part of excitation system in the test rig ·····22
Figure. 12. Hydraulic pump and motor (Unipack System) ·····22
Figure. 13. PROTO agricultural tractor with front axle suspension (Daedong Industry) ·····26
Figure. 14. Hydraulic cylinder, accumulator and front axle suspension system designed by CAD ·····26
Figure. 15. Sensors attached to PROTO vehicle (Left: LiDAR,

Middle: IMU, Right:: Accelerometer) ·····28
Figure. 16. Comparison of LiDAR data before and after pitch effect correction ·····28
Figure. 17. Comparison of LiDAR data before and after roll effect correction ·····29
Figure. 18. Installation Position of accelerometers (Left: front axle, Right: vehicle body under cabin) ·····29
Figure. 19. Controllers for LiDAR seonsor and hydraulic suspension valve block (Left: Lenovo Thinkpad, Right: EXS-IOXP(STW Technic) ·····30
Figure. 20. LiDAR data acquisition with LABVIEW ·····31
Figure. 21. Concept of suspension valve response test ·····33
Figure. 22. Result of suspension valve response test ·····33
Figure. 23. Concept of preliminary test for comparison of trigger sensor ·····35
Figure. 24. Result of preliminary test for comparison of trigger sensor ·····35
Figure. 25. Road roughness quantification procedures ·····38
Figure. 26. Test fields for roughness index evaluation: (a) pave road, (b) pebble, (c) bush, (d) grass, (e) off-road ·····41
Figure. 27. Average distance value at each sample ·····43
Figure. 28. Speed bump used for detection algorithm evaluation 44
Figure. 29. Hydraulic circuit of suspension block designed by SimulationX (PCV: Proportional Control Valve) ·····46
Figure. 30. Configuration of hydraulic circuit part in the test rig ·····46
Figure. 31. Damping characteristics curve of proportional damper obtained by SimulationX ·····47
Figure. 32. Half car model (figure from O' Donnell, 2012) ·····49

Figure. 33. Flow diagram of the half vehicle model ·····50
Figure. 34. Half car and hydraulic circuit co-simulation model designed by Matlab/Simulink ·····50
Figure. 35. PROTO vehicle experiments by road-simulator ·····51
Figure. 36. Chirp signal input from 0 to 30Hz ·····52
Figure. 37. Installation position of accelerometers on PROTO vehicle ·····52
Figure. 38. Simulation model validation procedures ·····53
Figure. 39. Block diagram of preview adaptive control algorithm ·····55
Figure. 40. Flow chart of preview semi-active control based on bump detection method ·····56
Figure. 41. Overall flow chart of preview semi-active control algorithm ·····57
Figure. 42. Adaptive controller designed by Matlab/Simulink ·····58
Figure. 43. Contact point tire model used for the simulation model (Sarami, 2009) ·····58
Figure. 44. Test fields for road roughness based preview control system for front axle suspension: (a) pave road, (b) pebble, (c) off-road, (d) bush ·····61
Figure. 45. Hardware set-up of PROTO vehicle for bump detection based preview control evaluation ·····63
Figure. 46. Bump detection based vehicle test ·····63
Figure. 47. Boxplot result of road roughness index in evaluation fields ·····65
Figure. 48. Difference of average distance when travelling even road and detecting bump using threshold ·····66
Figure. 49. Data matching result for hydraulic circuit model verification ·····68

Figure. 50. Data matching result for hydraulic circuit model verification ·····69
Figure. 51. Data matching result for co-simulation model verification ·····69
Figure. 52. FFT results of body acceleration according to 5 different road conditions (a) Bush, (b) Grass, (c) Off-road, (d) Pave, (e) Pebble ·····74
Figure. 53. RMS body acceleration ·····74
Figure. 54. FFT results of tire dynamic force according to 5 different road conditions (a) Bush, (b) Grass, (c) Off-road, (d) Pave, (e) Pebble ·····78
Figure. 55. RMS tire dynamic force ·····78
Figure. 56. Boxplot result of road roughness index in vehicle test fields ·····80
Figure. 57. RMS body acceleration results in vehicle test ·····80
Figure. 58. FFT results of body acceleration of vehicle test ·····82
Figure. 59. Axle displacement of vehicle when driving paved road ·····83
Figure. 60. FFT results of body acceleration of passive and preview control when driving 5km/h ·····85
Figure. 61. Axle displacement of passive and preview control when driving 5km/h ·····86
Figure. 62. Axle displacement of passive and preview control when driving 10km/h ·····86

1. 서론

1.1. 연구 배경

최근 국내에서도 대규모 영농이 확대되고 소비자의 선호도 변화 등으로 인해 100마력 이상의 대형 트랙터에 대한 수요가 높아지고 있다. 하지만 중소형 트랙터에 비해 향상된 견인력을 갖는 대형, 고마력, 4륜구동(4WD) 트랙터는 불규칙한 노면 환경에서 큰 부하가 걸리는 작업 시 전륜 타이어와 전방차축 쪽에 진동 문제가 발생한다. 이로 인해 차량이 앞뒤로 기우는 피칭(Pitching) 현상이 나타나고 심할 경우 전방 차륜이 노면과 떨어져 튀어 오르는 파워합(Power hop) 현상이 발생한다. 이는 작업자가 느끼는 승차감에 악영향을 줄 뿐 아니라 견인력의 하락으로 이어져 트랙터의 성능 하락을 초래한다. 또한 국내외 트랙터의 작업 외 도로에서 주행 속도가 점차 고속화되어 가고 있는 추세이다. 트랙터가 빠른 속도로 주행 시 노면 장애물로 인해 순간적인 충격을 받았을 때, 대형 차량의 구조상 일반 승용 차량보다 큰 안전성 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전방차축 현가장치(Front Axle Suspension)가 필요하게 되었으며 100마력 이상의 대형 농용트랙터에서는 그 중요성이 더욱 커지고 있는 추세이다. 전방차축 현가장치는 일차적으로 외부에서 오는 노면 진동을 흡수하여 승차감(Comfort)을 향상시키고 타이어와 지면간의 접지력(Road-holding)을 향상시켜 조향 성능을 개선시켜주는 역할을 한다. 특히, 대부분의 조향 차륜이 전방 차륜 쪽이므로 전방 차륜의 접지력 향상은 조향 성능 뿐 아니라 제동 성능 개선에도 매우 큰 영향을 미친다. (Sarami, 2009), (Gobbi, 2014)

해외 선진국을 중심으로 이미 전방 차축 현가장치에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며 관련 제품이 보급되고 있다. 또한 유량 제어를 통해 실린더의 일정한 높이를 유지시켜주는 제어 방식 또한 제공하고 있으며, 최근에는 독립식 현가장치 개발을 통해 차량이 좌우로 흔들리는 롤

링(Rolling) 현상에도 대응할 수 있도록 기술이 발전하였다. 국내에는 현가장치가 적용된 농용트랙터에 대한 개발이 시작 단계이며 일부 150마력급 이상 대형트랙터에 카라로(carraro)사에서 개발한 현가장치용 차축을 적용하고 있다. 따라서 관련 연구를 통하여 국내 농용트랙터에 적용될 수 있는 독자적인 설계기술과 국내 영농 환경에 부합하는 독창적인 제어기술에 대한 개발이 시급한 실정이다. (Colombo, 2017)

농용트랙터의 전방차축 현가장치는 작업 시 발생하는 큰 부하와 차량의 무게를 견디기 위해 유공압(Hydro-pneumatic) 방식으로 주로 제작한다. 유공압 방식의 현가장치는 어큐뮬레이터와 비례제어밸브가 기계식 스프링과 댐퍼의 역할을 대신하며 유압실린더를 통해 노면의 충격을 흡수하도록 구성되어 있다. 이러한 방식의 현가장치는 기계식에 비해 큰 힘을 낼 수 있는 장점이 있지만, 전자제어를 적용 시 내재적으로 가지고 있는 유압의 이력(Hysteresis) 현상 때문에 액추에이터 반응 속도가 기계식에 비해 느리게 반응하는 문제가 발생한다. 이로 인해 유공압식 현가장치에 전자제어를 적용할 경우 반응속도 문제로 인해 충격 흡수 능력의 효율성이 떨어지는 현상이 나타난다.

한편, 현가장치의 스프링 상수와 댐핑 계수 등의 특성치(Parameter)를 변화시키지 않고 일정하게 유지시키는 형태를 수동형(Passive) 시스템이라고 한다. 수동형 현가장치는 특정 상황에서 다양한 힘의 범위를 제공하지 못하고 노면 상태의 관계없이 한 가지의 감쇠력만을 제공한다. 기존 연구에서 Cho(2017)는 국내 농용트랙터의 사양을 고려하여 전방차축용 수동형 현가장치 유압회로를 개발하였다. 개발된 유압회로 모델은 요인시험기를 통하여 유효성을 검증하고 시뮬레이션 상에서 회로의 최적 특성치를 찾아 충격 감쇠효과를 확인하였다. 하지만 농용트랙터는 승용차량과는 다르게 다양한 노면 조건에서 작업과 주행을 하는 차량이므로 외부환경에 능동적으로 대응할 수 있는 시스템이 요구된다고 할 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 현가장치에 전자제어 시스템을 도입하여 감쇠계수를 변화시키거나 유량제어를 통해 액추에이터의 변위를 변화시키는 등의 현가장치 제어가 필요하다.

본 연구의 목표는 개발 중인 국내 농용트랙터용 전방차축 현가장치의 유공압식 반응속도 문제와 수동형 시스템의 제어 범위 문제를 해결할 수 있는 제어시스템을 구축하고자 하는 것이다. 기존의 차량 현가장치 제어에서는 차량의 동역학 특성만을 이용하여 제어 알고리즘을 구성하는 연구들이 진행되어 왔다. 하지만 이와 같은 방식을 채택한다면 유공압식 현가장치의 반응성 문제 때문에 노면의 충격이 들어온 후에 현가장치가 반응하는 현상이 발생할 수 있다. 이를 개선하기 위해서는 차량 전방의 노면 조건을 미리 인식하는 것이 필요하다. 차량이 주행하는 방향에서 다가올 노면의 상황을 인식할 수 있다면 그에 맞는 현가장치 제어 방식을 결정할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 국내 농용트랙터 전방차축 현가장치의 문제점을 개선하기 위하여 차량의 진행방향 노면을 센서로 인식하고 이를 기반으로 현가장치 감쇠계수를 바꿔주는 프리뷰 제어 알고리즘을 개발하고자 하였다. 이를 위해 LiDAR(Light Detection And Ranging)를 노면인식 센서로 선발하였으며 노면의 거칠기와 장애물(범프)을 인식할 수 있는 알고리즘을 고안하고 그 유효성을 확인하였다. 시뮬레이션 상에서 제어기 설계를 위해 Co-simulation을 통해 농용트랙터 모델을 개발하였으며 노면 거칠기 기반 프리뷰 제어기의 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 상에서 확인한 제어 알고리즘은 임베디드 시스템으로 구축하여 실제 차량에 적용하고 그 성능을 평가하였다. 또한, 노면의 장애물 인식 알고리즘을 기반으로 장애물을 지나기 전에 현가장치의 감쇠계수를 바꿔주는 프리뷰 제어를 통해 차량의 안정성을 확보하였으며 최종적으로는 기존의 수동형 현가장치 시스템의 성능을 개선하고자 하였다.

1.2. 연구 목적

본 연구는 국내 개발 중인 농용트랙터의 수동형 전방차축 현가장치를 개선하기 위한 제어 시스템 개발에 목적을 두고 있다. 노면 인식을 기반으로 하여 감쇠 계수를 변동시켜주는 프리뷰 제어 시스템을 구축하는 것이 목적이며 목적의 달성을 위한 구체적인 연구 방법은 다음과 같다.

1) 예비 실험과 기존 연구를 통해 수동형 유공압식 현가장치의 문제점 파악,

2) 노면 인식을 위한 LiDAR 센서를 통해 노면 거칠기 수치화 알고리즘, 노면 장애물 인식 알고리즘 개발 및 평가,

3) 시뮬레이션을 통해 제어기 설계하여 성능 평가 진행 후 최종적으로 실차에 적용하여 개발된 제어 알고리즘 유효성 평가.

위의 연구 방법을 통해 기존의 수동형 시스템보다 제어 시스템 도입을 통해 승차감(Comfort), 접지력(Road-holding) 측면 모두에서 개선된 현가장치 개발과 노면 환경에 따라 능동적으로 대응할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 최종적인 목적이다.

1.3. 문헌조사

Streiter (2008)는 Laser scanner를 사용하여 차량의 전방 상황을 미리 인식하여 능동형 방식으로 현가장치를 제어하는 PreScan 제어를 개발하였다. Laser scanner를 이용하여 노면을 인식한 결과, 1cm이내의 오차로 노면 형태를 구성할 수 있었으며 수학적으로 모델링한 능동형 현가장치에 결합하여 성능을 평가하였다. 5cm 높이의 범프를 지나가며 실험한 결과, PreScan 제어가 적용되었을 때 40% 정도의 가속도 감소 효과를 보였으며, 100km/h로 도로를 주행했을 때, 전 주파수 대역에서 최대 40%까지 수직 가속도가 줄어든 것으로 나타났다.

Sarami (2009)는 트랙터의 전방, 후방차축에 적용되는 온/오프(On/off) 방식의 스카이 훅(Sky hook) 제어 현가장치를 개발하였다. 현가장치 유압회로의 구성 요소들과 7자유도의 차량을 수학식으로 모델링 하였으며, MATLAB/Simulink 프로그램을 통해 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 시뮬레이션 상에서 제어기를 구성하고 반능동형 제어의 성능을 측정해본 후에, 실제로 트랙터에 제어기를 설치하여 로드 시뮬레이터 상에서 평가하였다. 펄스(Pulse) 형태의 충격을 가진 하였으며, 롤(Roll), 피치(Pitch), 수직방향(Heave)의 결과를 비교하였다. 실험 결과, 평균적으로 좌석의 수직 가속도는 13% 감소하였고 바퀴의 동하중 변화(dynamic force variation)는 6% 감소하는 것으로 나타났다.

C. Fernadez 등(2012)은 Lidar와 Vision 센서를 이용한 도로 인식과 과속방지턱 인식에 관한 알고리즘 연구를 진행하였다. Lidar 센서를 통해 얻어진 3축 점 데이터를 이용해 차량 앞 자유 공간에서 역치값을 설정하여 장애물 인식에 관한 알고리즘을 제시하였으며, 과속방지턱 또한 Lidar 센서의 Z값의 변화를 이용한 인식 방법을 제안하였다. 또한, RGB 이미지 처리를 통해 횡단보도를 인식하였으며, 신호처리시간은 Quad Core CPU 사용 시 최대 4.93ms 이내로 보고되었다.

Ahmed (2014)은 LiDAR 센서로 노면의 정확한 프로파일을 구할 수 있는 상황을 가정하고, 차체 가속도와 타이어 부하 측면으로 나누어 최적

의 감쇠력을 제공할 수 있도록 제어기를 설계하였다. 승용차량을 대상으로 수학적 모델링을 통해 시뮬레이션 모델을 설계하였으며, 차량의 피치(Pitch), 롤(Roll)을 고려하여 노면의 프로파일을 정확하게 계산하였다. 또한, 승차감에 초점을 맞추어 차체의 가속도를 최소로 할 것인지, 접지력에 초점을 맞추어 타이어 부하를 최소로 할 것인지 나누고 매 순간 반능동형 댐퍼가 최적의 감쇠력을 주는 힘을 계산하였다. 그 결과, 15Hz 이하 영역에서 차체 가속도 측면에서는 최적의 프리뷰 제어가 수동형, Skyhook 방식에 비해 개선되는 것을 확인하였고, 타이어 부하 측면에서는 프리뷰 제어를 적용 시 수동형, Groundhook 방식에 비해 개선되는 것을 보고하였다.

Cvetanovic 등(2014)은 고마력 농용트랙터를 대상으로 전방차축과 캐빈 현가장치가 장착된 트랙터, 전방차축과 후방차축 현가장치가 장착된 트랙터의 Whole Body Vibration(WBV)을 비교하는 연구를 진행하였다. 실제 농가 환경에서 트랙터로 Ploughing과 Cultivating 작업 시 시트(Seat)에서 작업자가 느끼는 X,Y,Z 방향의 RMS 가속도를 측정하여 비교하였다. 그 결과, Daily Exposure Level에서 WBV를 비교한 결과, 전방차축과 캐빈 현가장치가 부착된 트랙터가 전후방 차축의 현가장치가 부착된 트랙터에 비해서 진동 감소에 더 효과적인 것으로 나타났다.

Kumar 등(2015)은 차량에 부착된 Mobile Laser Scanner를 이용해 도로 노면의 거칠기를 실시간으로 예측하는 알고리즘을 제안하였다. Laser Scanner로 측정된 노면의 3차원 포인트 데이터를 수집하고 RANSAC 알고리즘을 통해 회귀 평면을 만든 후 각 포인트들의 표준편차를 구해 이를 노면의 거칠기와 연관시켰다. 개발된 알고리즘을 사용하여 서로 다른 4개의 노면환경에서 실험을 진행하여 Boxplot을 그린 결과, 해당 알고리즘으로 노면의 거칠기 구분이 가능한 수준임을 확인할 수 있는 것으로 나타났다.

Zoltán 등(2015)은 트랙터의 전방차축 현가장치가 견인력에 미치는 영향을 연구하였다. 전륜과 후륜의 부하 정도, 전차축 현가장치 작동여부, 주행모드(2WD, 4WD)등에 따라 나누어 실험을 진행하였으며 RMS 충격

가속도와 Drawbar의 슬립 영향을 분석하였다. 실험 결과, 30kN 이상의 힘이 Drawbar에 작용할 때, 액티브 현가장치가 전방차축에 있을 경우 전방과 후방 차륜 모두에서 슬립정도가 감소하였으며 견인 성능이 증가하고 충격 가속도가 감소하였다고 보고하였다.

Cho (2017)은 국내 농용트랙터의 사양을 고려한 전방차축 현가장치 유압 회로를 개발하였다. 현가장치의 이론적 내용을 기반으로 하여 수학적 모델링을 진행하고, 적은 유량으로도 큰 힘을 낼 수 있도록 실린더의 피스톤부와 로드부가 연결된 재생식(Regenerative) 회로를 고안하였다. 실린더, 유압 어큐뮬레이터, 교축 밸브 등의 사양을 선정하고 이를 SimulationX 프로그램을 이용해 모델링 하였다. 또한 요인시험기를 설계하여 실험적으로 획득한 데이터를 시뮬레이션에 대입, 매칭하여 유효한 모델임을 확인하였다. 개발된 시뮬레이션 모델을 통해 성능을 평가한 결과, 4Hz 부근에서 필터링 효과가 큰 것으로 확인되었으며 수동형에 비해 RMS 가속도 역시 80% 이상 개선된 것으로 나타났다.

Sim 등(2017) SimulationX 프로그램을 이용하여 농용트랙터의 캐빈 현가장치의 유압 회로를 모델링하고 실차 실험을 통해 실린더의 피스톤부와 로드부 압력 비교하여 모델의 유효성을 검증하였다. Matlab/Simulink를 이용하여 14자유도를 갖는 농용트랙터를 모델링하였으며, 유압회로 모델과 Co-simulation까지 진행하였음을 보고하였다. 이를 바탕으로 캐빈 현가장치의 반능동형 제어 알고리즘을 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 방법을 사용하여 설계하였으며, 그 효용성을 시뮬레이션 상에서 확인, 검증하였다. ISO-2631을 기준으로 하여 성능평가를 진행한 결과, 반능동형 제어 적용 시 수동형 현가장치에 비해 수직 가속도 값이 줄어들고 승차감이 개선될 수 있음을 보고하였다.

Sucgang 등(2017)은 Vision(camera) 센서와 LiDAR 센서를 이용해 승용차량을 위한 도로 장애물 인식 알고리즘을 고안하였다. LiDAR 센서를 이용해 도로의 과속 방지턱을 Threshold 방법을 이용하여 인식하는 방법을 보고하였으며 과속 방지턱까지의 거리를 달리하여 인식율을 평가하였다. 그 결과, 최대 6m까지 거리가 떨어져있어도 94.68%의 Accuracy를 보

였음을 보고하였다. 또한 카메라로 획득한 RGB 이미지를 프로세싱을 통해 노면의 움푹 파인 공간(Pothole)을 인식하는 알고리즘을 고안하였으며 최대 86.18%의 Accuracy를 갖는다고 확인하였다.

현재까지 보고된 연구 내용들을 종합하면, 전방차축 현가장치는 농용트랙터의 승차감과 조향성을 확보해 줄 수 있는 역할을 하며, 견인력과 제동 성능에도 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 또한 수동형 현가장치는 승차감과 조향성의 상충되는 관계를 갖는 내재적 문제가 있으므로 이를 해결하기 위한 현가장치 제어 알고리즘에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 농용트랙터의 현가장치 제어에 관한 연구는 주로 캐빈을 대상으로 하는 연구가 많이 진행되었으며(Spelta, 2011) 차축 현가장치에 대한 연구는 간단한 방식의 반능동형 제어가 주를 이루었다. 한편, 노면의 거칠기나 장애물을 다양한 센서를 통해 파악하는 연구는 활발하게 진행되어 왔으나 이를 현가장치에 직접 적용시킨 사례는 적은 편이었다. 센서를 통한 노면 인식과 이를 현가장치와 연관시키는 제어 방식은 그마저도 주로 승용차량을 대상으로 연구가 진행되어 왔으며 농용트랙터를 대상으로 한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 75kW 급 이상의 대형 트랙터가 사용되는 국내 영농 조건 등을 고려한 현가장치 제어 알고리즘을 개발하고자 한다.

1.4. 현가장치 제어 시스템

1.4.1. 현가장치 제어 시스템

일반적인 현가장치는 제어 방식에 따라서 수동형, 반능동형, 능동형 현가장치로 나뉜다. 가장 일반적으로 널리 쓰이는 방식인 수동형 현가장치는 스프링과 댐퍼의 강성계수를 일정한 값으로 유지시켜주는 형태를 일컫는다. 결국, 초기 설정 값에 따라서 현가장치의 특성이 달라질 수 있는데, 부드럽게(Soft) 현가장치를 설정할 경우 노면의 충격을 많이 흡수하여 승차감 개선에 도움이 되지만 조향 성능에는 악영향을 미친다. 반면, 딱딱한(Hard) 현가장치로 설정할 경우 차체로 노면의 충격이 다소 전달되지만 운전자가 느끼는 조향 성능이 개선되는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 스프링, 댐핑 계수가 일정한 값을 갖는 수동형 시스템은 현가장치의 중요한 특징인 승차감, 조향감 모두를 동시에 만족시킬 수 없는 상충 관계(Trade-off)를 내재적으로 가지고 있다. 수동형 현가장치의 감쇠비(ζ)는 스프링 상수(k), 감쇠계수(c)와 수식 (1)과 같은 관계에 있다.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \tag{1}$$

where,

c = damping coefficient of the mass [N・S/m]

m = mass [kg]

k = stiffness of the mass [N/m]

Figure. 1 (Sarami, 2009)는 감쇠비에 따른 승차감과 조향성의 상충관계를 나타낸 그림이다. 수동형 현가장치는 Low Damping으로 갈수록 승차감은 좋아지지만 조향성은 떨어지고, High Damping으로 갈수록 조향

성은 좋아지지만 승차감은 떨어지는 특징이 있다. 이와 같은 특성 때문에 결국 수동형 현가장치는 승차감과 조향성 중 한 부분에만 중점을 두어 설계를 할 수밖에 없게 된다. 따라서 이러한 단점을 극복하고 개선하고자 현가장치에 전자제어 시스템을 도입하여 감쇠력의 범위를 넓히는 시도가 지속되어 왔다.

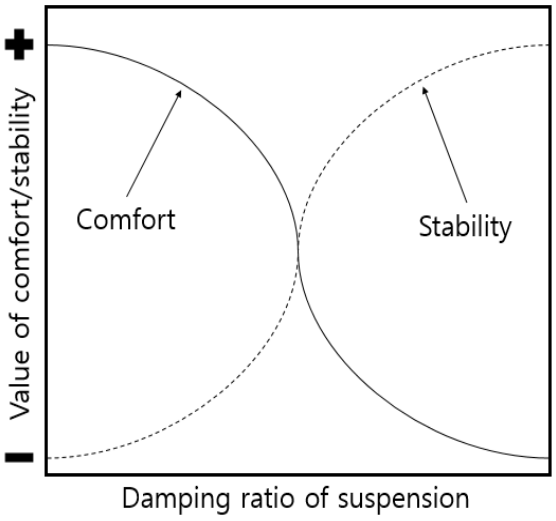


Figure. 1. Compromise present in suspension design (figure from Sarami, 2009)

현가장치의 제어 방법은 크게 반능동형(Semi-active)와 능동형(Active)로 나뉜다. Figure. 2에서 보는 것과 같이 반능동형 현가장치는 댐퍼의 감쇠 계수를 전자제어를 통해 조절할 수 있는 형태이다. 현가장치에서 스프링은 에너지를 저장하는 역할을 하고 댐퍼는 마찰열 등을 통해 에너지를 분산(Dissipate)시키는 역할을 하는데, 반능동형 제어는 스프링 상수를 변화시키는 것이 아니라 댐퍼의 에너지 분산정도를 조절하는 방식을 말한다. 반능동형 제어에 사용되는 댐퍼의 종류는 주로 마찰식(Frictional), ER(Electrorheological) 댐퍼, MR(Magnetorheological) 댐퍼 등이 있다. 마찰식 댐퍼는 작동유가 흐르는 유로의 크기를 조절하여 외부

의 충격에너지가 마찰열에 의해서 분산되도록 하는 방식이며, ER 댐퍼와 MR 댐퍼는 각각 전기장, 자기장을 이용하여 작동유의 점도를 바꿔 에너지를 분산시키는 방식이다. 마찰식 댐퍼는 유로의 열림량을 조절하기 때문에 반응성이 느린 측면이 있지만 비교적 단순한 형태로 제작이 가능하다. 반면 ER, MR 댐퍼는 매우 빠른 속도로 점도를 조절해 줄 수 있는 장점이 있지만 구조가 복잡하다는 단점이 있다. 반능동형 제어는 외부로부터 에너지 투입 없이 감쇠 계수만 변화시키는 방식이므로 능동형 방식에 비해 경제적인 측면에서 이점을 갖지만 Figure. 3 (Sarami, 2009)에서 확인할 수 있는 것과 같이 제어의 범위가 능동형에 비해 한정되어 있다는 단점이 있다.

능동형 제어 방식은 외부의 에너지원을 투입하여 액추에이터를 직접 제어하는 형태를 말한다. 능동형 제어방식은 Figure. 3에서 볼 수 있는 것과 같이 어떠한 속도 영역에서도 원하는 힘을 제공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 외부에서 에너지원을 가져와서 써야하기 때문에 경제적인 효율 측면에서 단점을 갖는다고 할 수 있다. Table. 1 (Cho, 2017)은 현가장치 종류별 제어 가능성과 에너지 소비 효율에 대해 나타내고 있다.

본 연구에서는 경제적인 효율성을 높이고 동시에 수동형 현가장치의 단점을 보완할 수 있는 반능동형 방식을 이용하여 제어 알고리즘을 개발하고자 한다. 개발 중인 트랙터에 적용되는 댐퍼는 마찰식 댐퍼이며, 비례제어밸브를 통해 유량 조절이 가능하도록 설계되었다.

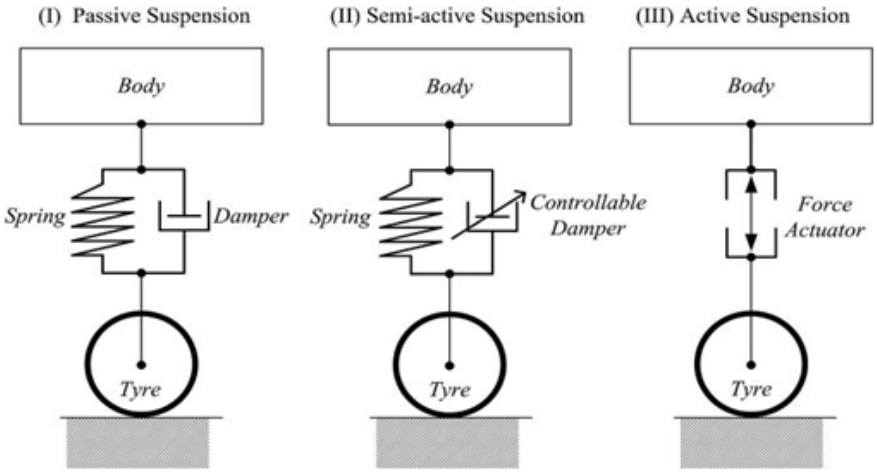


Figure. 2. Types of suspension control

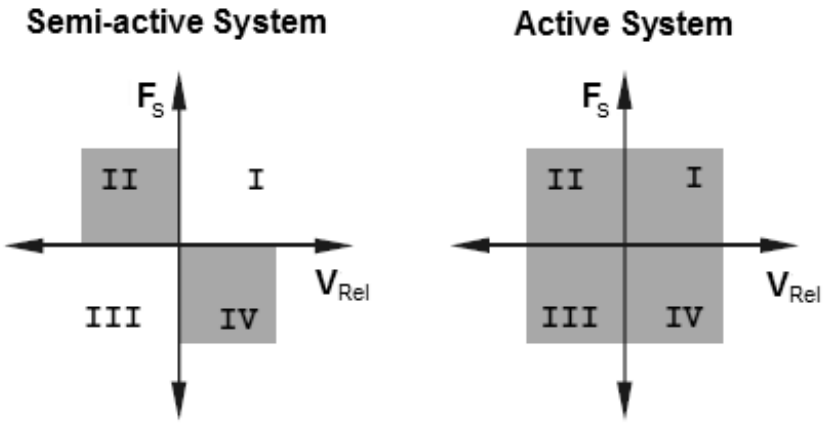


Figure. 3. Working area of the semi-active and fully active suspensions (figure from Sarami, 2009)

Table. 1. Comparison of passive, semi-active, active suspension system (Cho, 2017)

	Passive system	Semi-active system	Active system
Feedback	No feedback loop	Feedback loop concluded	Feedback loop concluded
Energy consumption	No energy consumption	Low	High

1.4.2. 프리뷰 제어

현가장치의 주요 역할은 노면으로부터 들어오는 충격을 흡수하여 승차감을 확보하고 접지력 향상을 통해 조향 성능을 개선시키는 것이다. 불규칙한 노면의 상태에 능동적으로 대응하기 위해 다양한 현가장치 제어 연구가 진행되어 왔지만 아무리 빠르게 반응하는 액추에이터를 사용한다고 하더라도 차체의 신호를 기반으로 하여 제어 시스템을 개발한다면 노면의 충격이 들어오고 난 후에 반응할 수밖에 없는 문제가 발생한다. 특히, 범프(Bump)나 움푹 파인 포트홀(Pothole)과 같은 곳을 지날 때의 처음 충격은 매우 강한 편이므로 이는 차량 안전에 문제를 초래 할 수 있다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 등장한 개념이 프리뷰 제어이다. 만약 차량 진행방향 노면의 상태를 미리 인식할 수 있다면 현가장치가 대응할 수 있는 시간적인 여유를 갖게 되고 상황에 맞게 미리 특성치를 조절할 수 있다면 충격 흡수 효율을 극대화 할 수 있을 것이다.

노면 상태를 인식할 수 있는 방법으로는 크게 Sensor와 Wheel을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. Sensor를 이용한 방법은 차량 앞쪽에 LiDAR, Ultrasonic, Vision 등의 센서를 부착하고 진행방향의 노면 프로파일을 인식하는 방식이다. 이 방식은 차량 앞쪽의 노면을 파악하고 차량

의 전방차축부터 충격에 대비할 수 있도록 하는 장점을 지니지만 실용화를 위해서는 고성능의 센서가 필요하고 차량 현가장치와 연동될 수 있는 복잡한 알고리즘이 필요하다는 단점을 지닌다. Figure. 4 (Streiter, 2008)에서와 같이 Benz와 같은 승용차량에 Laser Scanner를 이용한 Active 현가장치가 탑재되어 보급되고 있으나 농용트랙터에 Sensor 기반 프리뷰 제어가 적용된 연구 사례는 적은 실정이다. (Higgins-Luthman, 2008)

Wheel 기반 프리뷰 시스템은 전방차축에 들어오는 가속도, 속도 등의 신호를 기반으로 하여 노면의 상태를 예측하고 후방차축 쪽에 대응해줄 수 있는 시스템을 말한다. Wheel 기반 프리뷰 제어는 Sensor 기반 시스템에 비해서 고성능의 센서를 필요로 하지 않고 차체의 동역학 신호 계측할 수 있는 센서만을 필요로 한다는 장점이 있다. 하지만 이러한 시스템에서 노면 정보를 미리 인식하고 대응할 수 있는 것은 후방차축 쪽만 가능하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 Sensor 기반 프리뷰 제어 시스템을 구축하고자 한다. LiDAR 센서의 성능 및 해상도가 노면 인식에 사용될 수 있는 수준으로 발전하였으며, 제어 적용 대상이 전방차축이므로 차량 앞쪽의 정보를 획득하기 위해 Sensor 기반 프리뷰 제어를 고안하였다. LiDAR 센서를 이용하여 차량 전방의 노면 거칠기와 장애물을 인식하는 알고리즘을 개발하였으며 Adaptive 기반의 반능동형 시스템을 고안하였다.

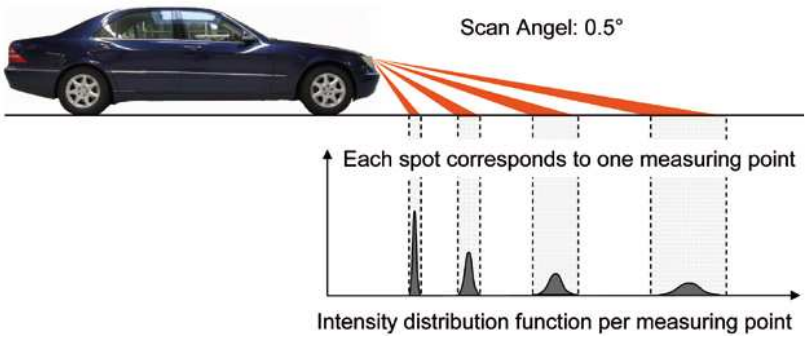


Figure. 4. Laser sensors scan the road surface profile. An individual distribution function is assigned to each spot (figure from Streiter, 2008)

1.4.3. Adaptive 제어

일반적인 수동형 현가장치는 승차감과 조향성이라는 두 가지 주된 목적이 상충되는 문제를 가지고 있다. 승차감과 조향성의 우선순위는 현가장치가 작동되는 환경에 따라서 달라진다고 할 수 있다. 즉, 차량이 매우 거친 노면에서 주행하거나 작업하는 경우에는 주로 승차감이 우선시되고 평평한 도로를 빠르게 주행하거나 코너링이 많은 도로의 경우에는 조향성이 우선시 된다고 볼 수 있다. 이와 같이 주행 환경과 노면 환경에 따라 사용자가 현가장치의 감쇠 모드를 바꿔줄 수 있는 시스템이 Adaptive 시스템이다. 한 가지 모드가 선택되면 마치 수동형 현가장치처럼 특성값이 고정되지만 모드의 변화와 함께 특성값도 함께 변화하게 되는 것이다. Figure. 5 (Barak P, 1989)에서 한 예로 주행자가 거친 노면을 달릴 때는 'soft' 모드를 선택하여 주행하다가 고속도로 진입 후 빠른 속도로 달릴 시에는 'firm' 모드로 현가장치 상태를 바꿔주는 시스템을 확인 해 볼 수 있다.

본 연구에서는 사용자의 임의선택에 의한 것이 아니라 센서를 기반으로 외부 환경을 인식 후 자동적으로 Adaptive 제어의 모드를 바꿔줄 수 있는 제어 시스템을 구축하고자 한다.

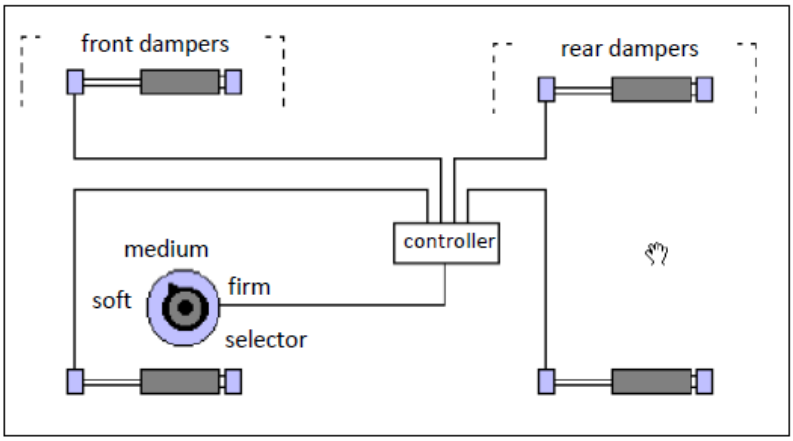


Figure. 5. A system of manually adjustable dampers for vehicle suspension (figure from Barak P., 1989)

2. 재료 및 방법

2.1. 하드웨어 구성

2.1.1. 현가장치 밸브 블록

개발 중인 국내형 농용트랙터의 전방차축 현가장치는 유공압 방식을 이용하기 때문에 작동유가 흐를 수 있는 유압 회로가 필요하다. 본 연구에서는 연구 개발의 경제성을 고려하여 HUSCO 사의 현가장치 밸브 블록을 사용하였다.(Figure. 6) HUSCO 현가장지 밸브 블록의 내부 유압회로는 Figure. 7와 같이 구성되어 있으며 실린더의 상승과 하강을 위한 On/Off 밸브 2개(Figure. 7, ①,③), 유량흐름을 제어할 수 있는 솔레노이드 비례제어밸브 2개(Figure. 7, ⑥,⑩)로 이루어져 있다. 실린더의 상승,

하강 밸브는 12V 입력 시 밸브가 열리는 형태이며 상승 시에는 유압 펌프를 통해 작동유 공급이 필요하고, 하강 시에는 트랙터의 자중에 의해 하강하는 구조로 설계되어 있다. 비례제어밸브는 0~1.5A 까지의 전류제어를 통해 열림량을 조절할 수 있으며 1.5A 입력 시 최대 유량이 흐를 수 있도록 되어 있다. 자세한 비례제어밸브의 사양은 Table. 2와 같다. 유압 회로의 구조는 적은 유량으로도 큰 힘을 낼 수 있도록 실린더의 피스톤부와 로드부가 서로 연결되어 있는 재생식(Regenerative) 구조로 설계되어 있다.

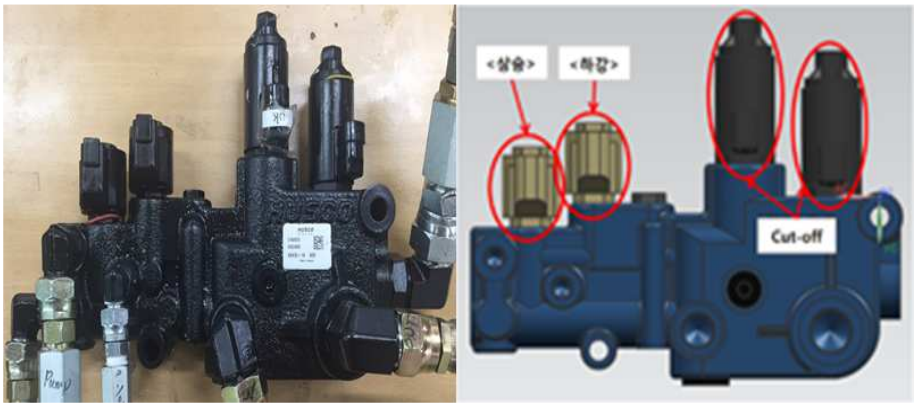


Figure. 6. Suspension valve block for front axle of agricultural tractor (HUSCO International, USA)

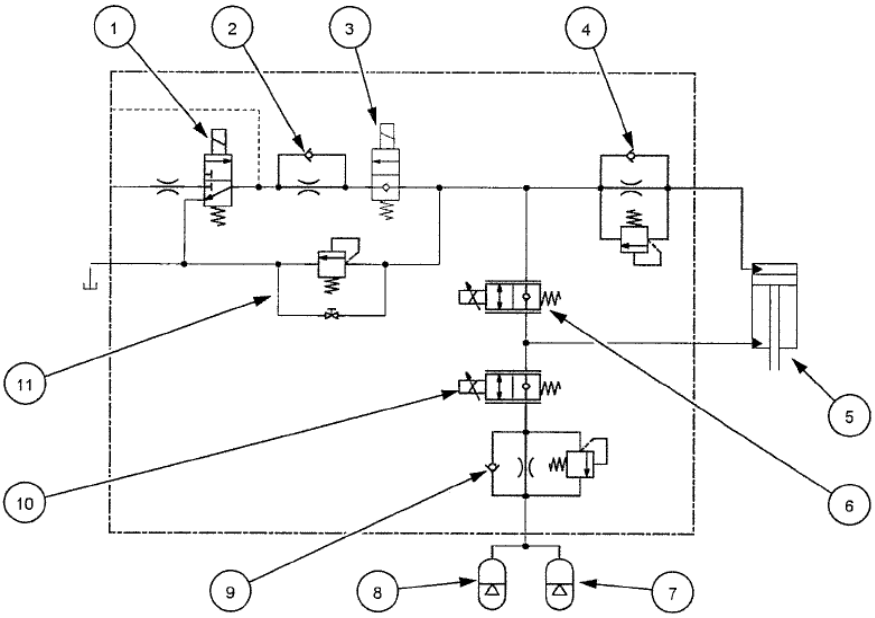


Figure. 7. Hydraulic circuit of the front axle suspension(CNH T5 110)

Table. 2. Specifications of proportional valve (HUSCO International, USA)

Name	Specification
Max Pressure	350bar
Min Differential Pressure	10bar
Flow	75lpm @15bar
Typical Threshold Current	575mA delivers
Max Current	1500mA
PWM Frequency	100Hz
Solenoid	12V or 24V with Deutsch DT connector
Typical Hysteresis	35mA
Step Response to 10%	<100mseconds
Max Internal Leakage	0.50cc @100bar
Fluids	Mineral based or synthetics with lubricating properties

2.1.2. 시뮬레이터(Test-rig)

현가장치 밸브 블록의 성능을 시험하고 상승, 하강, 반능동형 제어 알고리즘 등의 개발을 위해 시뮬레이터(Test-rig)의 형태를 개선하였다. 기존 연구에서 사용된 시뮬레이터는 H-프레임 형태로 실린더의 상부가 고정되어 있는 형태였다. 기존 연구에서의 주목적은 Figure. 8 (Cho, 2017)과 같은 유공압식 현가 시스템에서 어큐뮬레이터, 교축밸브 등의 상태에 따른 실린더의 압력을 확인하고 각 유압 요소의 특성을 파악하기 위한 목적이었다. 유공압 현가장치에서 어큐뮬레이터는 비압축성 기체를 이용해 노면의 충격을 흡수하는 역할을 하며, 교축밸브는 유량의 흐름을 조절해 마찰의 방식으로 에너지를 분산시키는 댐퍼의 역할을 한다. 하지만 현가장치의 제어 알고리즘 개발을 위해서는 1자유도를 갖는 Quarter Car 형태의 시험기로 개선시킬 필요성이 있었기 때문에 Figure. 9, 10과 같은 형태의 시뮬레이터로 개선 작업을 진행하였다. 이는 실린더의 상부에는 Sprung mass에 해당하는 무게추(Weight)가 올라갈 수 있고, 실린더 하부에서는 가진(Excitation) 실린더를 설치하여 충격을 줄 수 있는 형태이다. 실험에 사용된 실린더는 실차에 적용된 실린더의 크기와 동일하며 최대 스트로크 110mm, 피스톤부 직경 50mm, 로드부 직경 32mm의 사양을 갖는다. 현가장치의 고유진동수를 인체의 유해한 진동수인 4~8Hz보다 낮은 2Hz 수준에서 가질 수 있도록 수식 (2) (Bauer, 2010)를 근거로 하여 계산한 결과, 0.16L, 5bar의 어큐뮬레이터 용량일 때 약 60kg의 Sprung mass 무게추로 설정할 수 있다. 가진 실린더와 서보밸브(Figure. 11), 유압 펌프(Figure. 12) 등의 자세한 사항은 Table. 3 (Cho, 2017)과 같다.

$$w = \sqrt{\frac{c}{m_F}}$$

$$w = 2\pi f$$

$$F_{F1} = m_F g$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{nF_{F1}g}{p_0 V_0}} \tag{2}$$

where,

w = Angular velocity equal to natural frequency [rad/s]

c = Spring stiffness of an accumulator [N/m]

m_F = Mass of a sprung material [kg]

f = Natural frequency of a suspension [Hz]

g = Acceleration of gravity [m/s^2]

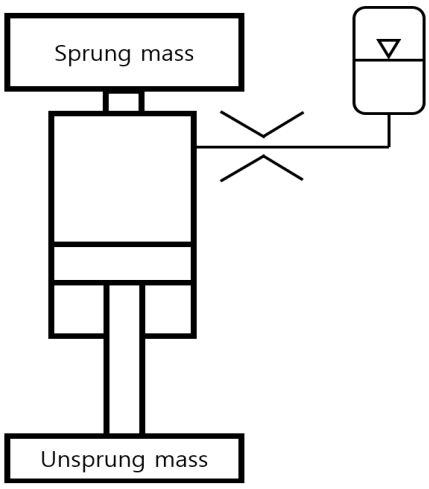


Figure. 8. Schematic diagram of a hydraulic suspension system (Cho, 2017)

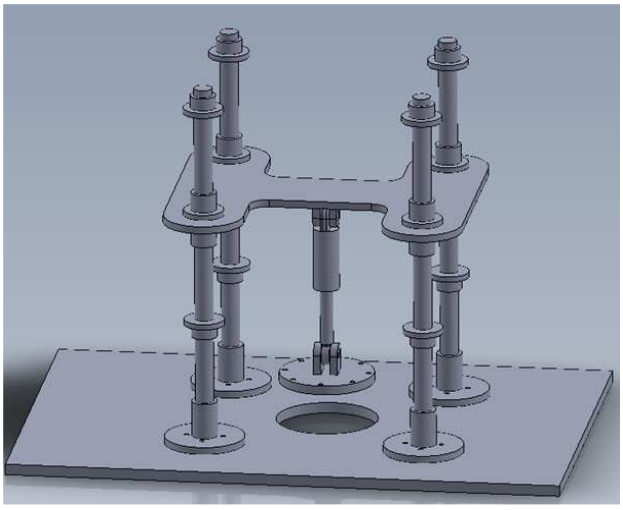


Figure. 9. Quarter car test-rig simulator guidance designed by CAD

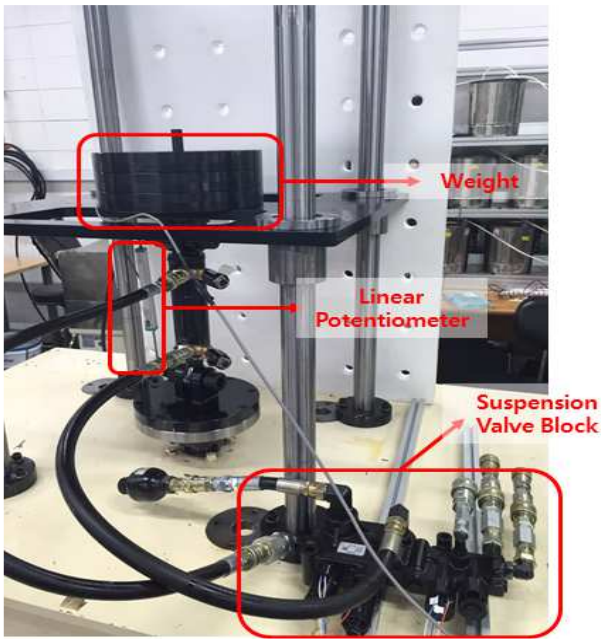


Figure. 10. Quarter car test-rig simulator with 1DOF

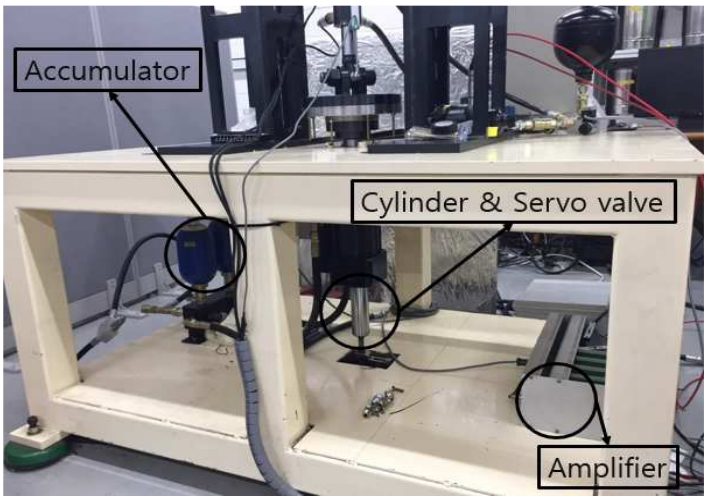


Figure. 11. Part of excitation system in the test rig

Figure. 12. Hydraulic pump and motor (Unipack System)

Table. 3. Detailed specification of excitation part in the test rig (Cho, 2017)

Name	Specification	
Frame	Size(mm)	1500x1020x725(WxDxH)
Hydraulic Cylinder	Effective area(cm^2)	7.07, 19.60
	Stroke(mm)	150
	Mass(kg)	100
Accumulator	Nominal volume(L)	1
	Max. flow rate(LPM)	109.2
Servo Valve	Model No.	403F-90L-30-21.201(Moog)
	Rated flow(LPM)	90
	Rated pressure(MPa)	14
	Rated current(mA)	30
Amplifier	Model No.	WSSA-100(Woosung)
	Input voltage(V)	-10 ~ 10
Hydraulic pump	Model No.	UNI-98(Unipack System)
	Maximum flow rate(LPM)	23
Electrical motor	Model No.	H-15HP-4P(Higen)
	Rated power(kW)	11(60 Hz)
	Rated speed(RPM)	1760

2.1.3. PROTO 차량

Figure. 13에서 보는 것과 같이 국내 농업기계업체 대동공업에서 75kW급 전방차축 현가장치 적용 트랙터를 개발 중이다. 세부 구조는 Figure. 14에서 확인할 수 있는 것과 같이 2개의 유압실린더는 차축에 수직한 형태로 평행하게 배치되어 있으며 어큐뮬레이터 역시 2개가 설치되어 있다. 차축은 차량의 중심을 피봇(Pivot)으로 하여 좌우로 움직일 수 있도록 설계되었으므로 현가장치가 독립적으로 작동할 수 없는 구조이다. 따라서 차량의 좌우 움직임인 롤(Roll)에는 대응하지 못하나 앞뒤로 움직이는 피치(Pitch) 움직임을 줄여줄 수 있는 형태로 제작되었다. 실차 및 유압 요소들의 구체적인 사양은 Table. 4, Table. 5와 같다.

프리뷰 제어를 위해서는 LiDAR 센서(TIM551, SICK)를 사용하였으며, 해당 LiDAR 센서는 매 순간 2차원의 데이터만을 획득한다. 사용된 센서는 중저가형 모델로 농용트랙터 차량의 앞쪽 무게 추 위쪽에 약 20도 노면을 향해 기울어진 형태로 설치되었다. 센서가 설치된 높이는 지상으로부터 0.9m 지점이며 좌우측 차륜으로부터 같은 거리에 떨어진 지점에 설치하였다. LiDAR 센서는 빛을 직접 쏘았을 때 물체에 반사되어 돌아오는 시간을 계산하여 거리를 계측하는 능동형 센서로 외부 환경에 영향을 크게 받지 않는다. 센서의 측정 거리는 최대 8m 이고 1° 의 해상도를 갖는다. 차량의 움직임에 의해 왜곡되는 LiDAR 신호를 보정하기 위해 LiDAR 센서 우측면에 IMU(Inertia Moment Unit)을 설치하였다. 차량이 좌우로 움직이는 롤(Roll)과 앞뒤로 움직이는 피치(Pitch) 효과를 회전변환행렬 수식 (3)를 이용하여 보정하였다. LiDAR와 IMU의 구체적인 사양은 Table. 6과 같다. (Figure. 15)

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \tag{3}$$

Figure. 16, 17 에서는 IMU를 사용하여 LiDAR 센서의 Pitch와 Roll 보정 전 후 모습을 나타낸 것이다. 실제로 LiDAR 센서가 25° 아래 방향으로 기울어진 상태일 때 이를 Pitch 보정하기 전후 데이터를 비교해보면, 보정을 하지 않은 경우에는 보정을 한 경우보다 약 1m 전방을 바라보는 오차가 나타난다. 또한, 좌측 Roll 방향으로 21° 정도 실제로 LiDAR 센서가 기울어진 경우도 보정하기 전에는 실제와 다른 우측 방향으로 데이터가 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 보정 후에는 올바르게 좌측에 데이터가 감지되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 결국 LiDAR 센서 단독으로 사용되는 것보다 IMU 센서를 부착하여 차량의 기하학적 움직임을 보정해주는 것이 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 필수적이라고 할 수 있다.

현가장치 제어 시스템의 성능 평가를 위해 3축 가속도 센서(Dytran Instruments)를 Figure. 18과 같이 차축과 차체에 각각 부착하였다. z축

방향의 수직가속도만을 평가 요소로 사용하였으며 데이터 수집을 위해서 cDAQ(National Instruments)을 사용하였다. 인체에 주로 영향을 미치는 저주파수 대역만을 획득하기 위하여 20Hz의 Cutoff 주파수를 갖는 Lowpass filter를 소프트웨어를 통해 설정하였다.

Figure. 19은 본 연구에서 사용된 제어기의 모습이다. LiDAR 센서의 데이터 수집은 Laptop(Thinkpad, Lenovo)를 이용하였으며 이더넷 통신을 통해 Figure. 20과 같이 LABVIEW(National Instruments)로 프로그래밍하였다. 15Hz의 샘플링으로 데이터를 수집하였으며, 차량 전방 노면정보만을 사용하기 위해 센서를 중심으로 30° 의 데이터만을 사용하였다. 현가장치 밸브블록 제어를 위한 제어기는 ESX-IOXP (STW, Germany) 제품을 사용하였으며 2개의 전류출력, 2개의 12V 디지털 출력 단자를 사용하였다. 또한, LiDAR 제어기 Laptop과 현가장치 제어기 ESX-IOXP 간의 통신을 위해 CAN BUS를 사용하였다. 구체적인 제어기 사양은 Table. 7과 같다.

Figure. 13. PROTO agricultural tractor with front axle suspension (Daedong Industry)

Table. 4. Specifications of PROTO vehicle

Name	Specification
Manufacturer	Daedong
Model Name	TGLSD
Power(kW)	75
Weight(kg)	4170
Properties	1) Mechanical LSD system 2) Hydraulic front axle suspension

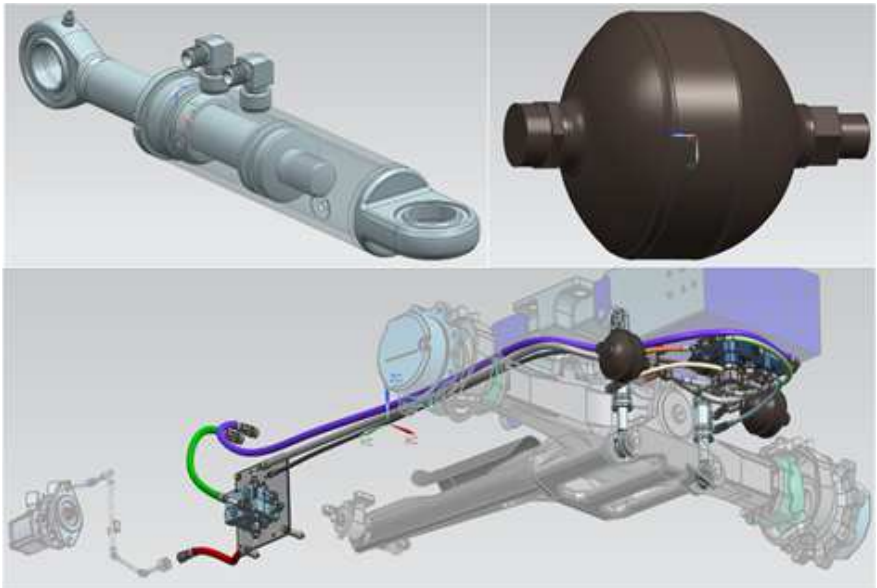


Figure. 14. Hydraulic cylinder, accumulator and front axle suspension system designed by CAD

Table. 5. Specifications of hydraulic components

Name	Specification
Cylinder	2EA(Piston: 50mm, Rod: 32mm, Stroke: 110mm)
Accumulator	2EA(15bar, 50bar)
Suspension Hydraulic Valve	2EA(On/Off), 2EA(Cut-off)
Maximum Load	Max. 7200kgf

Figure. 15. Sensors attached to PROTO vehicle (Left: LiDAR, Middle: IMU, Right:: Accelerometer)

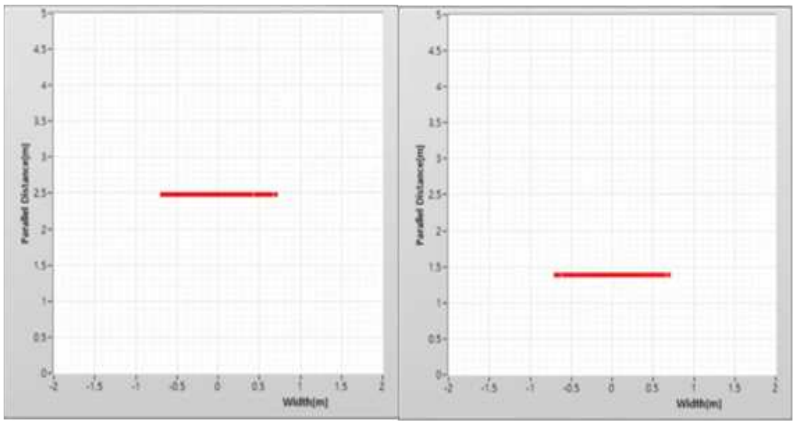


Figure. 16. Comparison of LiDAR data before and after pitch effect correction

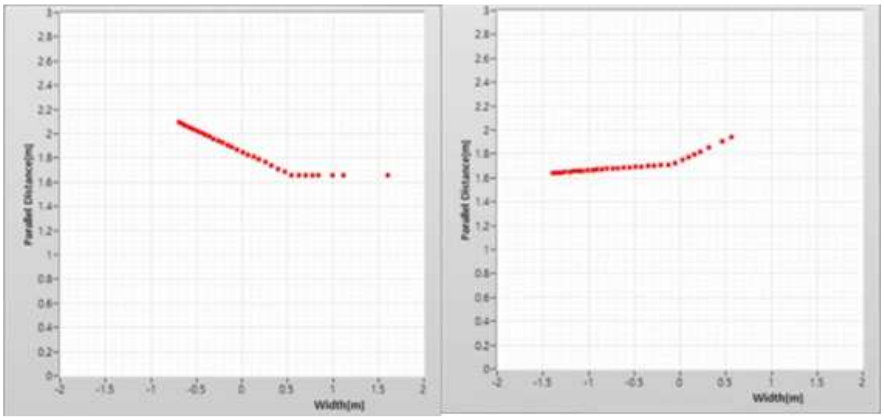


Figure. 17. Comparison of LiDAR data before and after roll effect correction

Figure. 18. Installation Position of accelerometers (Left: front axle, Right: vehicle body under cabin)

Table. 6. Specifications of sensors installed on PROTO vehicle

Name	Specification
LiDAR	-Model: SICK TIM551 -Light Source: infrared ray(850nm) -Angle Range: 270° -Resolution: 1° -Frequency: 15Hz -Distance of Scan: 8m
IMU	-Model: SBG systems Ellipse 2 E -Roll, Pitch: 0.1° -Heading: <0.5°
Accelerometer	-Model: Dytran 3273A1T -Sensitivity: 10mV/G -Range: 500G(peak) -Frequency Range: 3-10,000Hz

Figure. 19. Controllers for LiDAR seonsor and hydraulic suspension valve block (Left: Lenovo Thinkpad, Right: EXS-IOXP(STW Technic)

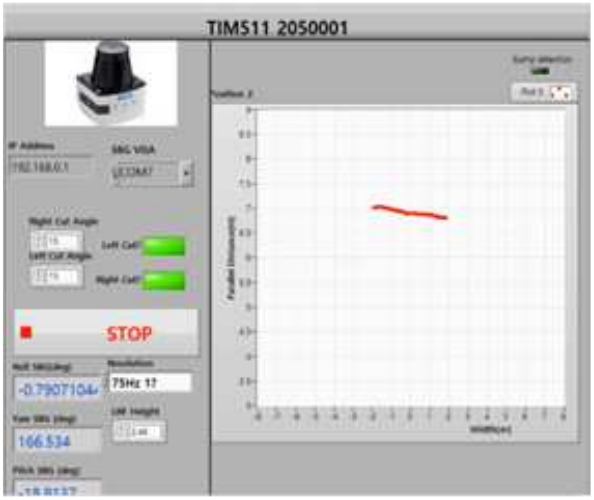


Figure. 20. LiDAR data acquisition with LABVIEW

Table. 7. Specifications of controller for LiDAR and suspension solenoid valve

Name	Specification
LiDAR controller	-Model: Lenovo thinkpad E450 -Processor: Intel Core i7-5500 -Operating System: Window 7 -Programming language: LABVIEW
Suspension valve controller	-Model: ESX-IOXP (STW Technic) -Processor: 16MHz -Interface: CAN 2.0B -Input: Digital inputs(20), RPM inputs(2), Analog inputs(12), -Output: PWM outputs(4x3A), Digital Outputs(8x4A), Stabilized voltage output(10V) -Weight: 0.3kg

2.2. 유압시스템 반응 예비 실험

2.2.1. 밸브 작동 시간 실험

유압을 이용하는 현가장치의 액추에이터는 전자, 기계시스템에 비해 느린 것으로 알려져 있다. 현재 시스템에서 현가장치를 구성하고 있는 유압밸브 및 액추에이터의 반응시간을 직접 파악하기 위한 실험을 진행하였다.

실험은 시뮬레이터(Test-rig)에서 진행하였으며 Figure. 21의 개념도와 같이 밸브블록에 유량을 공급해주는 상태에서 비례제어밸브를 열었을 때 밸브블록을 통과한 후 흐르는 유량을 계측하여 목표 유량에 도달할 때까지의 시간을 측정하였다. 측정 결과, Figure. 22과 같이 밸브를 열어준 시점부터 목표 유량인 2.3l/min까지 도달 할 때까지 걸린 시간은 2초 정도의 시간이 걸렸으며 그 후 0.5l/min 정도의 정상상태오차 범위를 보였다. 비례제어밸브의 작동시간이 100ms 정도임을 고려해도 원하는 목표유량까지 도달하는데 걸리는 시간이 초(second) 단위로 나온다는 것은 순간적으로 들어오는 노면충격을 충분히 흡수하기에는 매우 긴 시간이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 노면의 충격이 들어오기 전에 현가장치 밸브로 하여금 충격에 대비할 수 있도록 해줄 방안이 필요하다고 볼 수 있다.

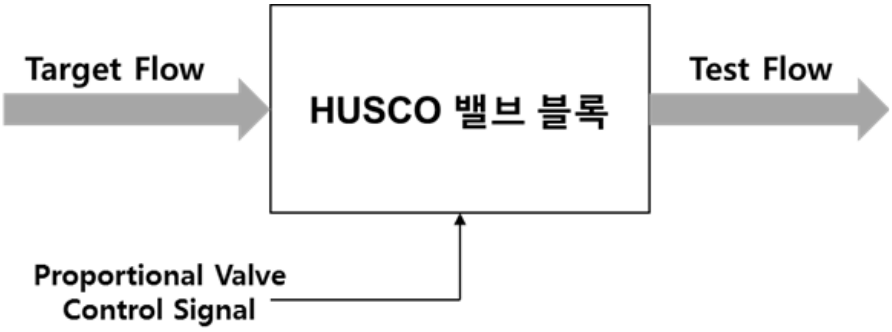


Figure. 21. Concept of suspension valve response test

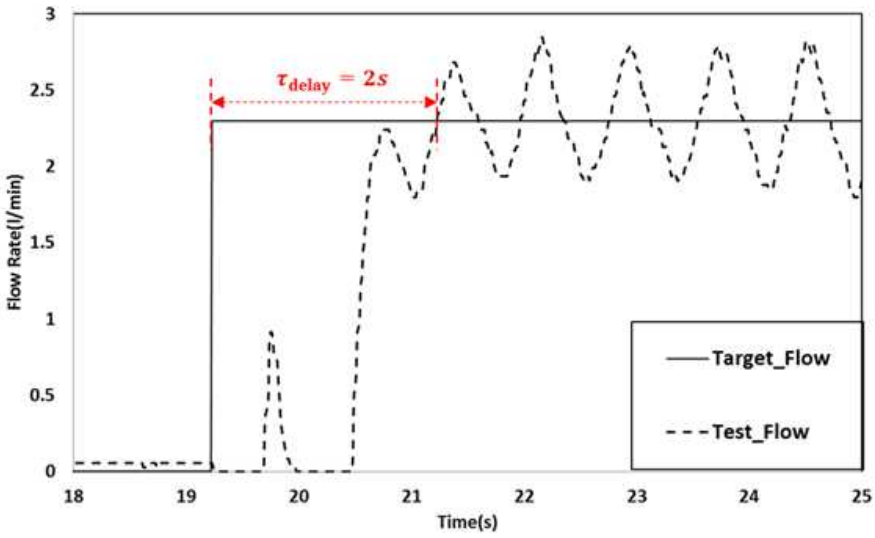


Figure. 22. Result of suspension valve response test

2.2.2. 밸브 트리거 방식에 따른 충격 흡수 예비실험

2.2.1.에서 확인한 목표유량 도달시간 측정 결과로부터 해당 현가장치 밸브를 이용해 차량 동역학 기반 반능동형 제어 시스템을 개발할 경우에는 충분한 충격 흡수 효과를 보지 못할 것이고 따라서 미리 현가장치로 하여금 충격에 대비할 수 있는 방안이 필요하다고 추론할 수 있었다. 위와 같은 추론이 적합하고 유효한 것인지 검증을 위해 현가장치 밸브를 작동시키는 트리거 방식의 종류를 달리하여 시뮬레이터에서 실험을 진행하였다.

Figure. 23은 실험 방법을 개략적으로 보여주고 있다. 실제로 측정한 범프가 있는 노면의 프로파일을 가진 실린더에 입력한 후 범프 신호가 들어가면 가진실린더가 계단(Step) 입력으로 실린더 하부에 충격을 가한다. 이 후 첫 번째 트리거 방식은 LiDAR로 측정한 범프 유무, 범프까지의 거리 정보와 차량 속도를 CAN통신을 통해 현가장치 제어기로 보내 미리 밸브를 열어주는 방식이고, 두 번째 방식은 시뮬레이터에 설치한 Linear Potentiometer가 움직이면 밸브를 열어주는 방식이다. 결국 충격이 들어오기 전에 현가장치 밸브를 열어주느냐 충격이 들어온 후 그것을 감지하여 밸브를 열어주느냐의 차이를 비교한 것이다.

실험 결과, Figure. 24에서 확인할 수 있는 것과 같이 LiDAR 센서 기반 현가장치 제어를 했을 때, Linear Potentiometer 기반 현가장치 제어보다 Sprung mass의 움직임이 적은 것을 확인할 수 있었다. Sprung mass의 움직임이 적다는 것은 그만큼 실린더와 밸브블록에서 충격흡수를 많이 했다는 뜻이므로 LiDAR 기반 프리뷰 제어를 이용하는 것이 차체의 신호를 이용하여 제어하는 것보다 효과적인 충격 흡수 방법이 될 수 있음을 시사하는 바이며, 해당 추론의 가능성을 예비 실험을 통해 확인할 수 있었다.

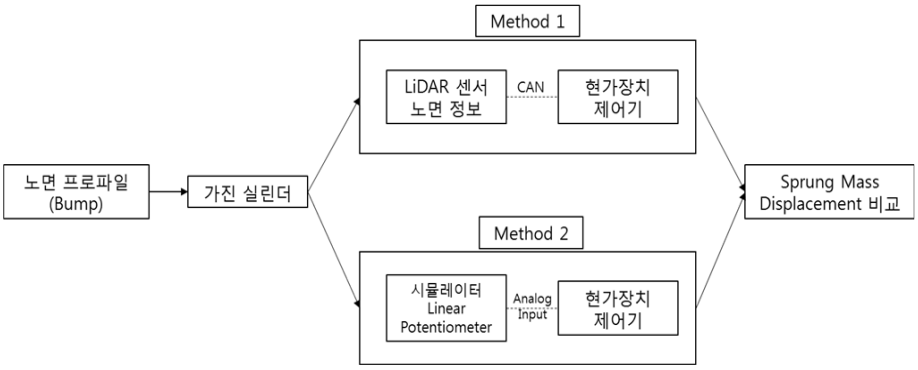


Figure. 23. Concept of preliminary test for comparison of trigger sensor

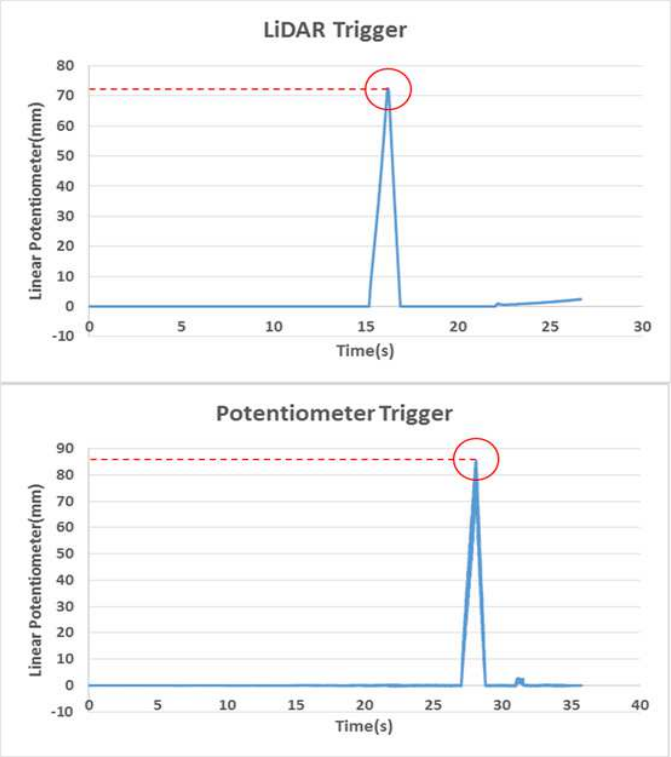


Figure. 24. Result of preliminary test for comparison of trigger sensor

2.3. LiDAR 기반 노면 센싱

2.3.1. LiDAR 기반 노면 거칠기 수치화 방법

LiDAR 센서를 이용하여 노면의 상태를 파악하여 이를 기반으로 현가장치 밸브를 제어하는 것의 효율성과 가능성을 예비 실험을 통해 확인하였다. 하지만 앞서 확인한 바와 같이 밸브 블록의 반응성이 빠르지 않은 편이므로 매순간 노면의 높이 정보에 맞는 감쇠력을 정확하게 제공하는 방식을 실차 시스템에 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 LiDAR 센서를 이용해 노면의 평균적인 거칠기 정도를 파악하고 이를 기반으로 하여 현가장치 밸브를 제어하고자 하였다.

노면의 거칠기 지표(Roughness Index)를 파악하는 것은 다양한 방식으로 연구가 진행되어 왔다. 주로 차량의 현가장치에 센서를 부착해 수직속도 정보를 수집하고 이를 기반으로 거칠기를 파악하는 연구가 많이 진행되어 왔으며, LiDAR, Ultrasonic 센서 등을 이용하여 노면 거칠기를 수치화 하는 방식 역시 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 Kumar(2016) 연구에서 진행된 방식을 인용하여 농용트랙터에 맞게 적용하고자 한다.

첫 번째 단계로, 본 연구에서 사용된 LiDAR 센서는 2차원의 데이터만을 획득하므로 노면의 단면 정보를 수집한다. 이후 차량에 부착된 LiDAR 센서를 이용해 차량이 이동하면서 매순간 획득한 노면 단면 정보를 누적해 나가 3차원의 노면 프로파일을 획득한다. 노면과 노면사이의 거리는 차량의 속도와 LiDAR 센서의 샘플링 시간을 곱해 구할 수 있다. 다음 단계로 약 10m 정도 누적된 노면 프로파일 정보를 차량 진행방향(Longitudinal)에 따른 노면 높이(Height)의 2차원 평면으로 전환한다. 획득한 2차원 평면에서 RANSAC 알고리즘을 사용하여 노면 회귀 직선을 구한다. 이 직선이 노면의 이상적인 상태라고 가정하고 해당 직선으로부터 각 포인트들의 RMS 값을 구한다. 이렇게 구해진 RMS 값을 누적된

10m 노면의 거칠기와 연관지을 수 있으며 이를 노면 거칠기 지표로 정의한다. 이와 같은 방식은 Figure. 25에 자세하게 나타내었다.

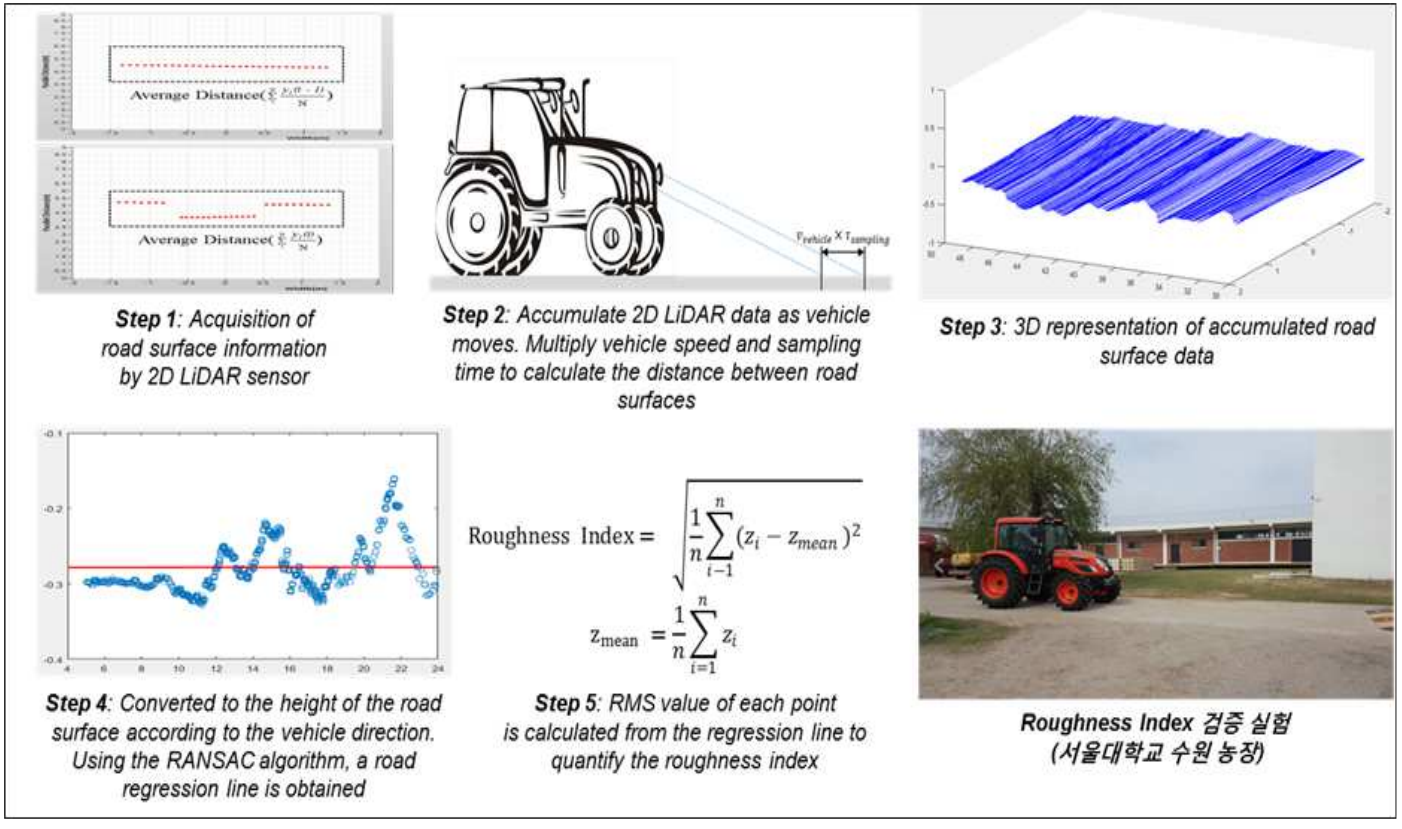


Figure. 25. Road roughness quantification procedures

2.3.2. LiDAR 기반 노면 거칠기 검증 실험

노면 거칠기를 위와 같은 방식으로 수치화 한 후, 실제로 이 수치가 노면의 거친 정도를 반영할 수 있는지에 대한 검증 실험이 필요하다. 따라서 실제 차량에 LiDAR 센서를 부착하여 서로 다른 5가지 노면을 대상으로 거칠기 지표를 획득하는 실험을 진행하였다. 농용트랙터가 작업하는 모든 노면 환경에 대해 거칠기 지표를 획득하는 것의 현실적 한계점 때문에 75kW 급 이상의 대형 트랙터가 주로 사용되는 작업 실태를 고려한 노면을 선정하였다. 한득희 (2011)에 의하면 대형 트랙터를 사용하는 주요 작업은 경운, 로터리, 예취, 베일 등이 있다. 위 문헌의 4가지 작업 시 트랙터가 주행하는 노면 상태와 포장도로 주행상황을 고려하여 5가지 노면 상태를 설정하였다. 실험 장소는 수원 서울대학교 농업생명과학대학 농장에서 진행되었으며 Figure. 26와 같은 포장도로(Pave), 자갈밭(Pebble), 잔디밭(Grass), 풀밭(Bush), 비포장도로(Off-road)를 대상으로 실험을 진행하였다. 각각의 실험 장소에서 약 40m를 주행하여 획득한 노면 거칠기 정보를 Boxplot으로 그린 후 구분 가능한 수준인지를 확인할 수 있을 것이다.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figure. 26. Test fields for roughness index evaluation: (a) pave road, (b) pebble, (c) bush, (d) grass, (e) off-road

2.3.3. LiDAR 기반 범프 인식 알고리즘

농용트랙터의 고속화 추세에 따라 이동 시 평평한 도로를 빠른 속도로 주행하는 경우가 많아지고 있으며 이로 인해 노면의 범프(Bump)나 움푹 파인(Pothole)과 같은 장애물 등이 차량의 안전성에 큰 문제가 되고 있다. 농용트랙터는 승용 차량과는 다르게 차체가 크고 무겁기 때문에 빠른 속도로 주행 시 들어오는 순간적인 충격은 운전자로 하여금 조향 능력을 잃게 하고 안전 문제에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 LiDAR 센서를 기반으로 하여 농용트랙터가 평평한 도로 주행 시 범프 장애물을 자동으로 인식하고 차량의 속도를 고려하여 미리 댐퍼의 특성을 부드럽게 바꿔주는 시스템을 개발하고 실차에 적용하고자 한다.

LiDAR를 기반으로 하여 범프를 인식하는 알고리즘은 Threshold를 이용한 방식을 사용하였다. 이 방식은 C. Fernandez (2012) 의 방식을 참고

하여 국내 환경에 맞게 적용하였으며 과속 방지턱을 대상으로 검증 실험을 진행하였다. 첫 번째로 LiDAR 센서의 노이즈를 제거하기 위해 Median filter를 사용하였다. Median filter는 벡터형태의 데이터를 순서대로 3개씩 묶어 그 중 중간값을 택하는 방식이다. 이와 같은 방법을 이용하면 노면 상태와는 다르게 갑자기 튀어버리는 Outlier를 제거할 수 있다. Threshold 방식은 Figure. 27에서 보는 것과 같이 LiDAR가 일반 평평한 노면을 인식할 때의 모습과 범프와 같은 장애물을 인식했을 때의 포인트 전체의 평균값 차이를 이용하는 방식이다. 시간이 t일 때의 데이터 평균값과 $t-1$ 일 때의 평균값 차이인 Difference를 매순간 계산하여 이 값이 실험적으로 구한 Threshold 보다 크면 범프라고 인식하는 방식이다. Threshold 방식을 수식으로 나타내면 (4)과 같다.

검증실험에서 사용된 과속 방지턱은 Figure. 28와 같은 가로 2500mm, 세로 1000mm, 최대 높이 75mm를 갖는 형태이며 수원 서울대학교 농업생명과학대학 농장의 평평한 도로에서 실험을 진행하였다.

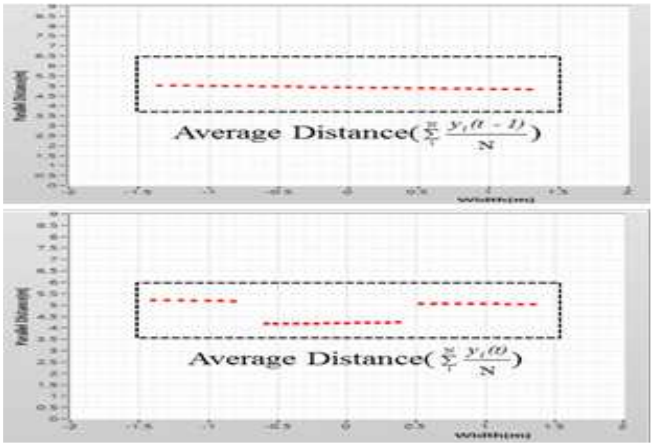


Figure. 27. Average distance value at each sample

$$y_{avg}(t) = \sum_{i}^{N} \frac{y_i(t)}{N}$$

$$\begin{cases} u_{bump} = 1 \text{ if } \; y_{avg}(t) - y_{avg}(t-1) \in [thr_1, thr_2] \\ u_{bump} = 0 \text{ if } \; y_{avg}(t) - y_{avg}(t-1) \notin [thr_1, thr_2] \end{cases} \tag{4}$$

where

$y_i(t)$ = the distance of each sample point to road (m)

$y_{avg}(t)$ = the average distance of each sample to road (m)

N = the number of sample points at time t

u_{bump} = the existence of bump (boolean)

thr_1 and thr_2 = upper and lower threshold values

Figure. 28. Speed bump used for detection algorithm evaluation

2.4. 시뮬레이션 모델 구성

2.4.1. 유압회로 시뮬레이션 모델

본 단락에서는 효과적인 제어기 설계와 성능 확인을 위해 실제 차량에 사용된 유공압식 현가장치와 농용트랙터의 실차 모델을 시뮬레이션으로 구성하고자 한다. PROTO 실차에 사용된 HUSCO 현가장치 밸브 블록의 유압회로도(Figure. 7)를 SimulationX 프로그램을 이용하여 Figure. 29과 같이 표현하였다. 실제 현가장치 밸브를 시뮬레이션 모델로 구현한다면 시간, 비용적으로 효율성을 높여 다양한 알고리즘을 적용해볼 수 있을 것이다. 어큐뮬레이터, 비례제어밸브, 실린더 등의 사양을 시뮬레이션 상에 입력하고 비례제어밸브의 열림량을 닫은 상태와 최대로 열린 상태에서 실험적으로 구한 실린더 작용 힘과 시뮬레이션으로 구한 실린더 힘을 비교하였다. 실험은 기존 수동형 현가장치 연구를 위해 만들어진 H-프레임 형태의 Figure. 30과 같은 시뮬레이터에서 진행되었으며 가진 실린더에서 Step 형태로 입력하였다.

유효성이 검증된 유압회로 시뮬레이션 모델을 바탕으로 댐퍼 특성곡선을 그리면 Figure. 31와 같다. 즉, 비례제어밸브의 열림량을 조절함에 따라 제어할 수 있는 힘의 범위를 알 수 있게 되는 것이다. 하지만 다른 종류의 댐퍼와는 다르게 유공압 마찰식 댐퍼는 저속도 영역에서 감쇠력을 발휘하지 못하는 구간이 존재하며 감쇠력이 발생하는 구간에서도 선형적인 관계를 갖지 않는 특성을 보인다.

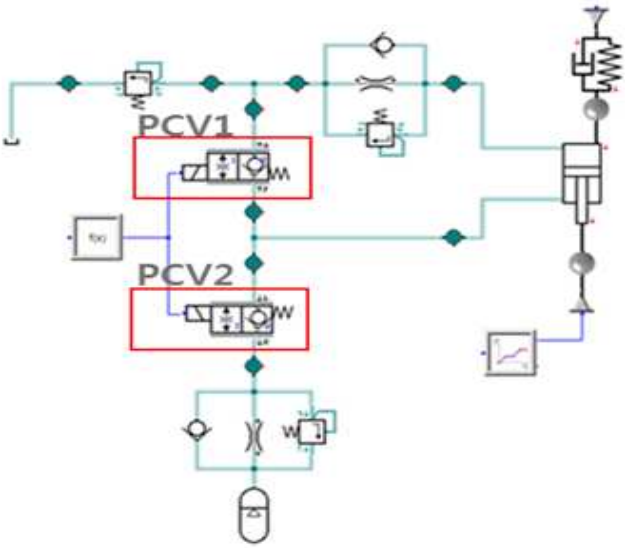


Figure. 29. Hydraulic circuit of suspension block designed by SimulationX (PCV: Proportional Control Valve)

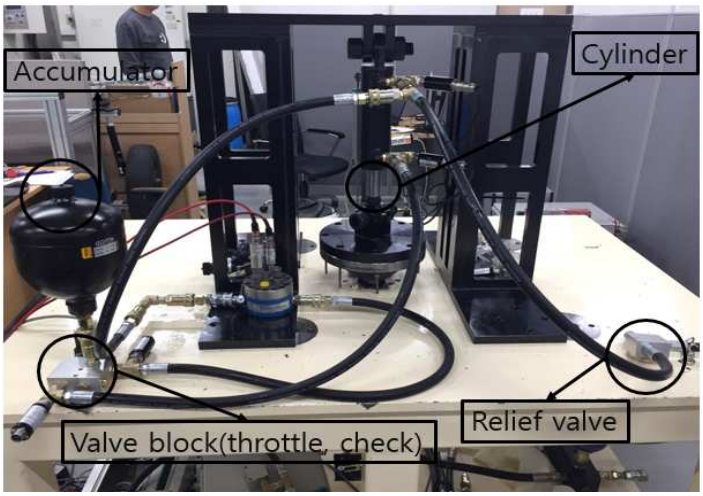


Figure. 30. Configuration of hydraulic circuit part in the test rig

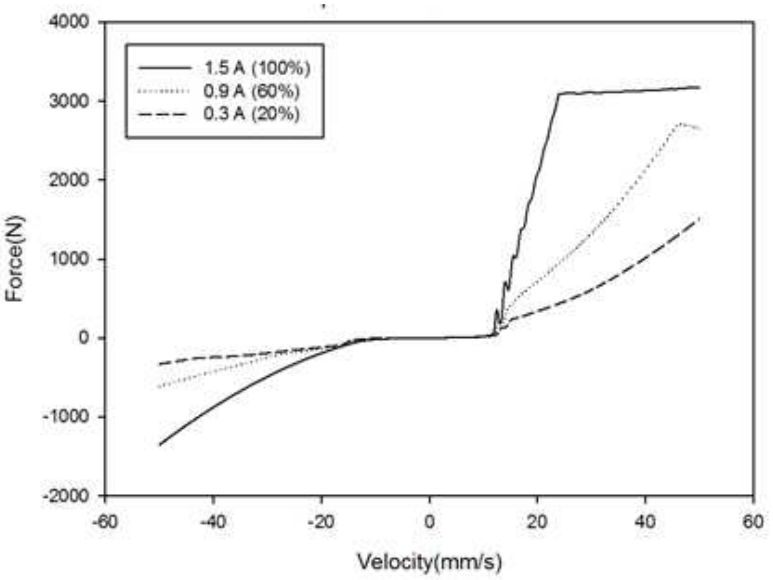


Figure. 31. Damping characteristics curve of proportional damper obtained by SimulationX

2.4.2. Half Car 모델 및 Co-simulation

개발 중인 트랙터의 차축 형태가 롤(Roll)에 대응할 수 없는 피봇 고정 형태이므로 피치(Pitch) 효과만을 확인할 수 있다. 따라서 이를 반영하여 4자유도를 갖는 Half Car 모델을 고안하였으며 구체적인 Half car에 대한 형태와 수식은 Figure. 32과 수식 (5)에서 확인할 수 있다. 수학적으로 모델링한 Half Car를 이용하여 전방차축에 유공압식 현가장치를 갖는 농용트랙터의 물리적 모델을 나타내기 위해 Figure. 33에서와 같이 플로우 다이어그램을 이용해 표현하였으며 노면의 정보를 입력하고 차체의 가속도, Pitch 각도 등을 확인할 수 있도록 하였다. Half car 모델에 대한 수식과 유공압식 현가장치에 대한 시뮬레이션 모델을 Matlab/Simulink를 이용하여 Figure. 34과 같이 나타낼 수 있다. 차량의 속도를 표현하기 위해 Front / Rear Delay를 통해 전방 차륜과 후방 차륜의 노면 프로파일 시

간차를 주었으며 유공압식 현가장치의 응답성을 표현하기 위해 실험적으로 구한 지체시간을 Hydraulic Actuator Delay를 통해 표현하였다.

앞서 2.4.1.에서 모델링 및 검증한 SimulationX 기반 유압회로도를 Half Car에 삽입하기 위해 Co-simulation 작업을 진행하였다. 유압회로 모델을 S-function으로 변환하는 과정을 거쳤으며 수학적으로 모델링하기 어려운 유압시스템과 차량 동역학 특성을 동시에 파악하기 위해 ode23t 솔버를 사용하였다. 유압시스템은 급작스러운 변화가 많은 stiff한 시스템으로 분류되는데 두 종류의 프로그램을 호환하여 시뮬레이션 할 경우 중간 정도의 stiff한 문제를 계산하는 ode23t 솔버가 적합하다고 알려져 있다. (Ro, 2015)

Development Process

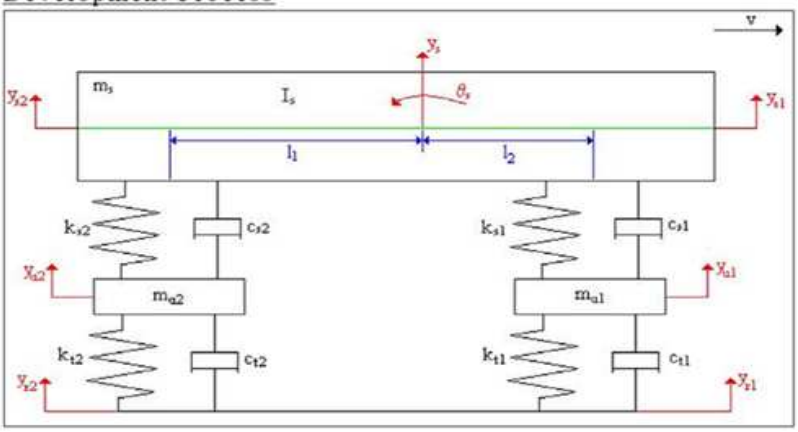


Figure. 32. Half car model (figure from O' Donnell, 2012)

$$m_s\ddot{y} + c_{s1}(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_{u1}) + c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) + k_{s1}(y_{s1} - y_{u1}) + k_{s2}(y_{s2} - y_{u2}) = 0$$

$$I_s\ddot{\theta}_s + l_1(c_{s1}(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_{u1}) + k_{s1}(y_{s1} - y_{u1})) - l_2(c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) + k_{s2}(y_{s2} - y_{u2})) = 0$$

$$\ddot{y}_s = -\left[\frac{c_{s1}(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_{u1}) + c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) + k_{s1}(y_{s1} - y_{u1}) + k_{s2}(y_{s2} - y_{u2})}{m_s}\right] \quad (5)$$

where

m_s = mass of the body of the car

$\ddot{y}_s$ = the center of gravity of car

k_{s1}, k_{s2} = coefficients of the springs

c_{s1}, c_{s2} = coefficients of the dampers

I_s = the moment of inertia of the car

$\ddot{\theta}$ = angular acceleration

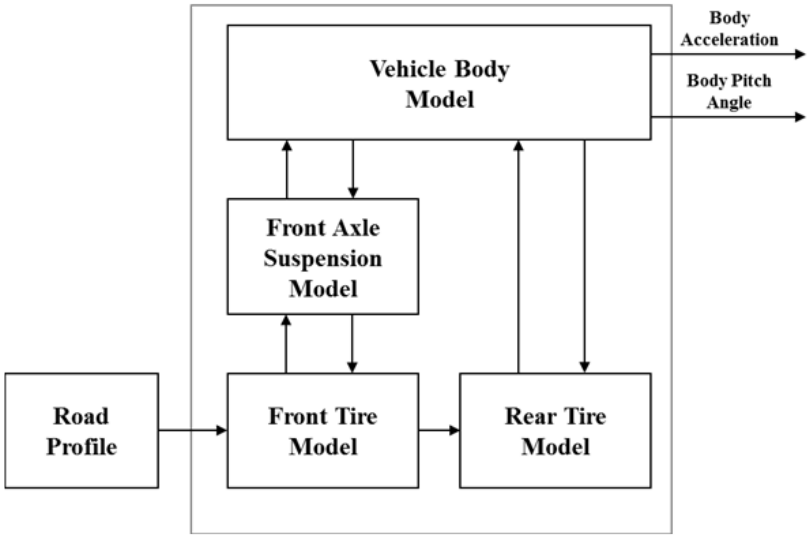


Figure. 33. Flow diagram of the half vehicle model

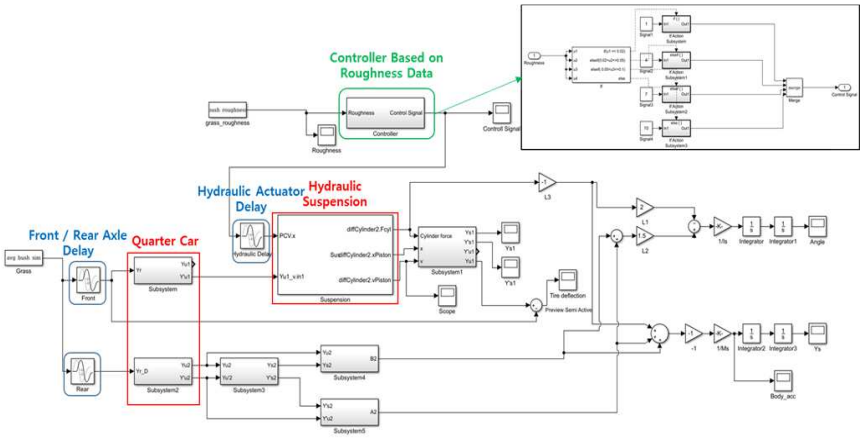


Figure. 34. Half car and hydraulic circuit co-simulation model designed by Matlab/Simulink

Co-simulation 모델의 신뢰성 확보와 유효성을 검증하기 위한 과정을 위해 실험적으로 구한 데이터와 시뮬레이션 상의 데이터를 매칭시키는 작업을 진행하였다. 실차 실험은 생산기술연구원(전라북도 김제)에서 진행되었으며 Figure. 35와 같이 Road Simulator를 이용하여 PROTO 차량에 진동을 가해 가속도 데이터를 확보하였다. 진동은 전방 차륜과 후방 차륜의 위상차를 180도 달리하여 60cm의 진폭을 갖는 Chirp 신호(Figure. 36)를 입력하였다. Chirp 신호는 30초 동안 1초에 1Hz씩 증가시켜 0~30Hz까지 진동수를 증가시켜가며 입력하였으며 총 9개의 위치에서 3축 가속도를 획득하였다. 데이터 매칭에 사용된 가속도 측정 위치는 Figure. 37의 I 지점으로 차체의 가속도 부분을 채택하였다. 데이터 매칭 과정은 Figure. 38에서와 같이 시뮬레이션의 파라미터(Parameter)값을 변화시키며 Trial & Error 방식으로 진행하였다.

Figure. 35. PROTO vehicle experiments by road-simulator

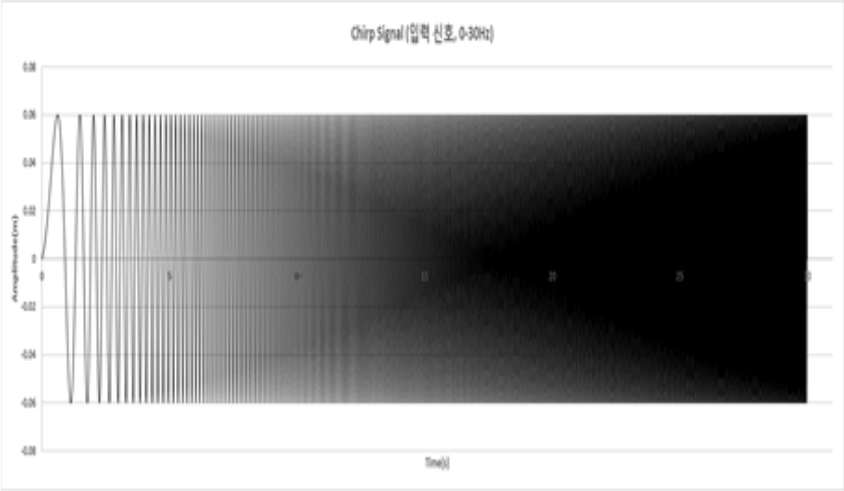


Figure. 36. Chirp signal input from 0 to 30Hz

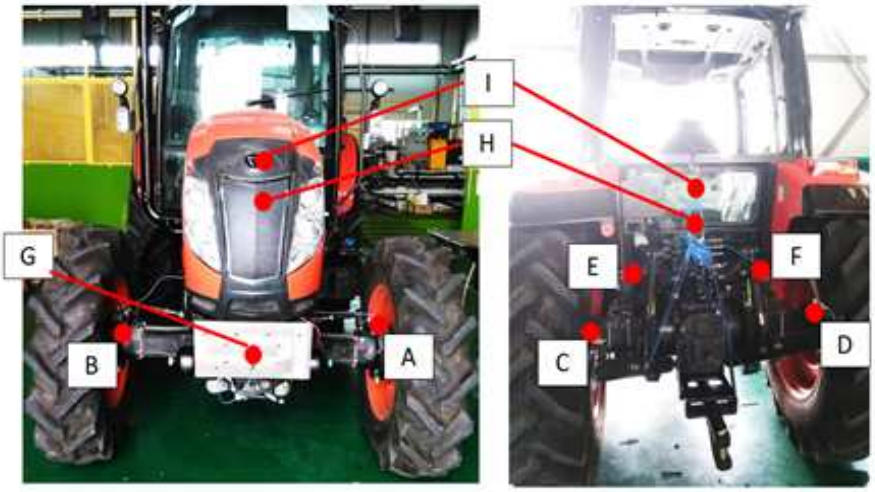


Figure. 37. Installation position of accelerometers on PROTO vehicle

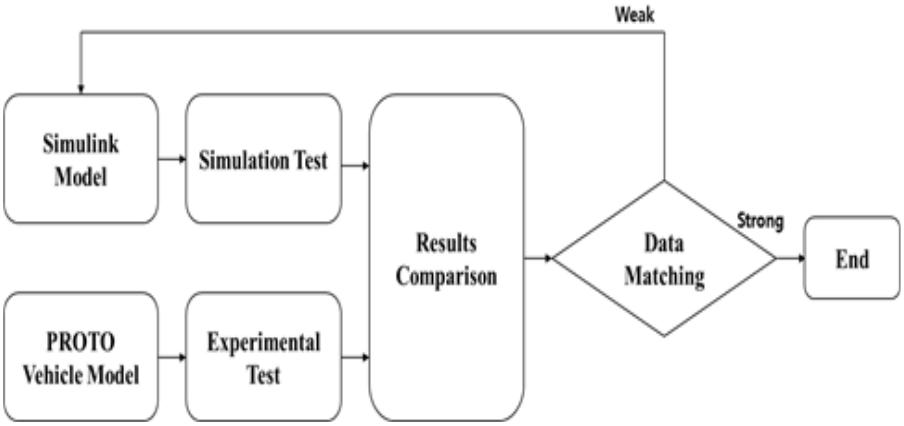


Figure. 38. Simulation model validation procedures

2.5. 현가장치 제어 알고리즘

2.5.1. LiDAR 기반 반능동형 현가장치 제어 알고리즘

LiDAR의 노면 센싱을 기반으로 한 반능동형 현가장치 제어 알고리즘 개발은 크게 노면 거칠기 기반 현가장치 제어와 장애물(범프) 인식 기반 현가장치 제어 두 측면에서 진행하였다. 우선, 노면의 거칠기 정보를 기반으로 하여 현가장치 밸브 블록의 비례제어밸브 열림량을 바꿔주는 제어 알고리즘을 개발하고자 한다. 본 연구에서 고안한 방식은 Adaptive 제어 방식이다. 노면 거칠기의 Class를 4단계로 나누어 거친 정도가 커질수록 비례제어밸브 열림량을 10%, 40%, 70%, 100%의 단계로 나누어 제어하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 각각의 밸브 열림량에 해당하는 감쇠력은 126,504Ns/m, 59,967Ns/m, 29,964Ns/m, 16,849Ns/m이다. 이와 같은 방식을 제안하는 이유는 농용트랙터의 현가장치가 유압시스템을 포함하고 있으므로 정확하게 수학적으로 모델링 할 수 없고, 불확실성이 다양하게 존재하기 때문이다. 결국 평균적으로 구한 노면 거칠기 정보를 이용해 현가장치 특성치를 적절하게 변경하여 원하는 요구 성능을 만족시키고 수동형 현가장치를 개선하고자 하는 것이다. 이와 같은 Adaptive 제어 블록 다이어그램을 Figure. 39와 같이 나타낼 수 있다.

또한, 노면의 거칠기가 증가할수록 차량이 받는 충격 정도가 커진다. 따라서 충격 정도가 클 때 댐퍼의 상태를 부드럽게 만들어야 승차감이 개선된다는 점이 본 아이디어 제안의 근거이다. 기존의 승용차량에도 Comfort / Normal / Sport 모드를 사용자가 정할 수 있게 되어 있으며 Comfort 인 경우에는 부드러운 댐퍼, Sport 모드인 경우에는 상대적으로 딱딱한 댐퍼를 제공한다.(Sarami, 2009) 본 연구에서는 이와 같은 점에서 착안하여 농용트랙터용 Adaptive 반능동형 제어 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서의 비교 대상은 수동형 현가장치이며 비례제어 밸브 50%의 열림량을 유지하는 시스템을 대상으로 하였다.

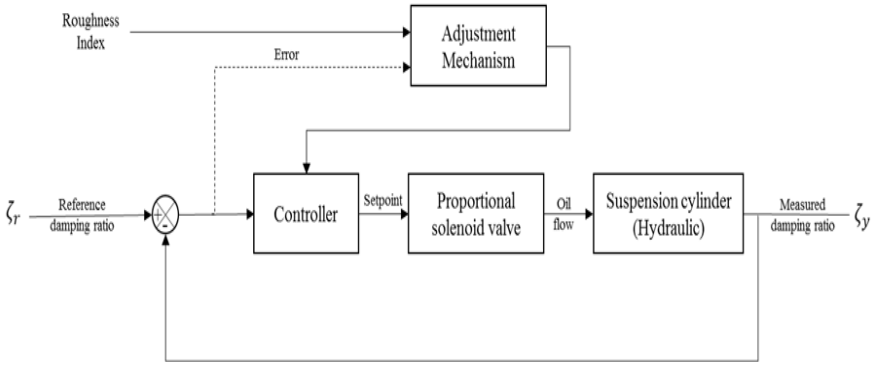


Figure. 39. Block diagram of preview adaptive control algorithm

두 번째로, 노면의 장애물(범프) 인식 기반 현가장치 제어 알고리즘을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 Threshold 방법을 통해 인식한 범프를 현가장치 제어기로 보내 농용트랙터가 범프를 지나기 전에 부드러운 댐퍼 상태로 바꿔주는 프리뷰 제어 시스템을 고안하였다. LiDAR 센서로 인식한 범프의 인식 유무를 0(범프 없음), 1(범프 인식) 형태로 보내고, 범프를 인식한 순간 차량과 범프 사이의 거리 정보, 차량의 속도 정보를 CAN 통신을 통하여 Laptop에서 현가장치 제어기로 보내는 방식으로 구현하였다. Figure. 40의 다이어그램과 같은 형태로 제어기를 구축하였으며 일반 평평한 도로를 달릴 때는 현가장치 밸브블록 열림량을 20%로 유지하다가 범프 도달 시간을 계산하여 도착 1초전에 현가장치의 열림량을 100%로 바꿔주는 방식을 채택하였다. 범프를 지나는 시간 후에는 다시 20%의 열림량으로 회복시켜 평지 도로의 주행성과 안정성을 확보하였다. 이와 같은 방식을 표현한 수식은 (6)와 같다.

노면의 거칠기 인식 기반 제어와 범프 인식 알고리즘을 통합한 제어에 대한 플로우 차트를 Figure. 41에 나타내었다. 노면의 거칠기가 작고, 차량의 속도가 중속 이상이면 범프 인식 알고리즘으로, 그 외 상황에서는 노면 거칠기 기반 알고리즘으로 작동할 수 있도록 설정하였다.

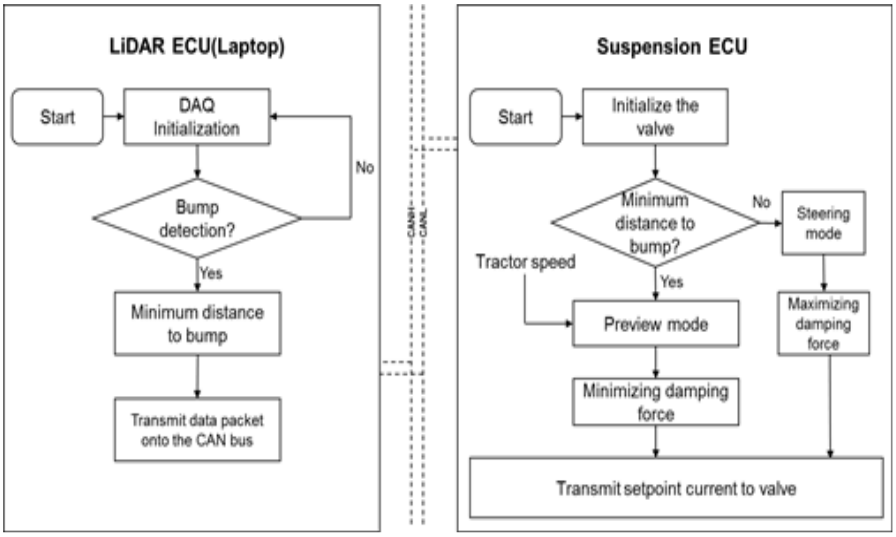


Figure. 40. Flow chart of preview semi-active control based on bump detection method

$$t_{bump} = \frac{d_{bump}(t)}{v_{tractor}} \text{ if } u_{bump} = 1$$

$$\begin{cases} u_{sus} = 1.5 \text{ if } t_{sus}(t) = t_{bump}(t) - 1.0 \\ u_{sus} = 0.3 \text{ if } u_{bump} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

where

$t_{bump}(t)$ = the time to reach the bump (s)

$d_{bump}(t)$ = the minimum distance from vehicle to bump (m)

$v_{tractor}$ = the velocity of tractor (m/s)

u_{sus} = the current input for PCVs of suspension (mA)

t_{sus}= the operation time of PCVs

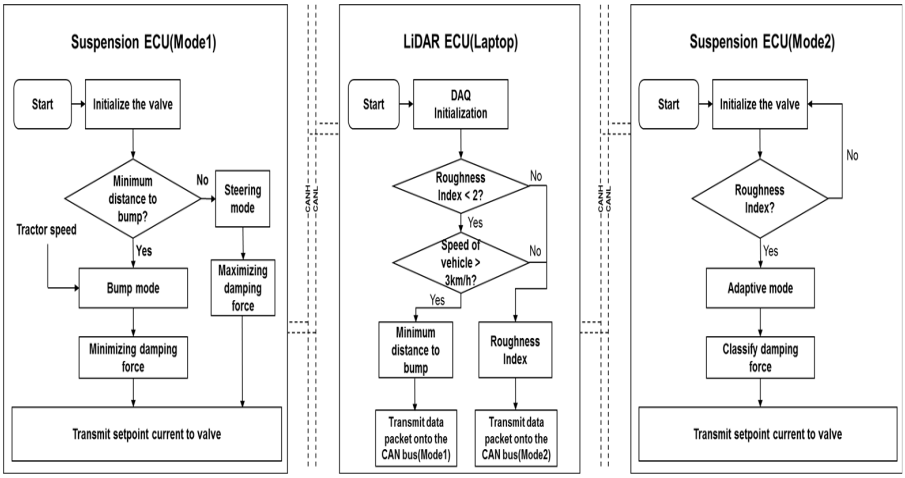


Figure. 41. Overall flow chart of preview semi-active control algorithm

2.5.2. 시뮬레이션 기반 제어 성능 평가

2.5.1에서 고안한 현가장치 반능동형 제어 알고리즘 중 노면 거칠기를 기반으로 한 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 평가하고자 하였다. 개발한 Half Car Co-simulation 모델을 대상으로 제어기를 설계하고 그 성능을 평가하기 위해 서로 다른 5개의 노면 프로파일 정보와 노면 거칠기 정보를 시뮬레이션 상에 입력하였다. 노면 프로파일 정보는 Figure. 23의 Step 4에 해당하는 데이터를 입력하였으며 차량 속도는 Front/Rear Delay를 이용해 시속 2km의 정보를 대입하였다. Adaptive 방식으로 서로 다른 4개의 열림량을 제공하는 제어기를 Figure. 42와 같이 설계하였다.

제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 승차감의 지표인 차체의 가속도 정보를 획득하였으며, Figure. 43를 참조하여 접지력의 지표인 타이어 동적 힘 (Tire dynamic force)을 수식 (7)과 같이 계산하여 획득하였다. 타이어의 강성계수는 일정한 값을 갖는다고 가정하였으며, 실제 차량에서는 매 순간 강성계수가 변하기 때문에 실제 해당 지표를 계측하는 것은 매우 어렵다. 하지만 프리뷰 제어 적용 시 수동형 현가장치에 비해

개선된 정도를 비교하는 것이기 때문에 일정한 강성계수를 갖는다고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 차체 가속도와 타이어 동적 힘은 주파수 분석(Fast Fourier Transform)을 이용해 분석하였으며 인체에 해로운 주파수 대역인 10Hz 이하에서 결과를 분석하였다. 또한, 해당 구간에서 RMS 값을 구해 수동형과 제어 현가장치를 비교하였다.

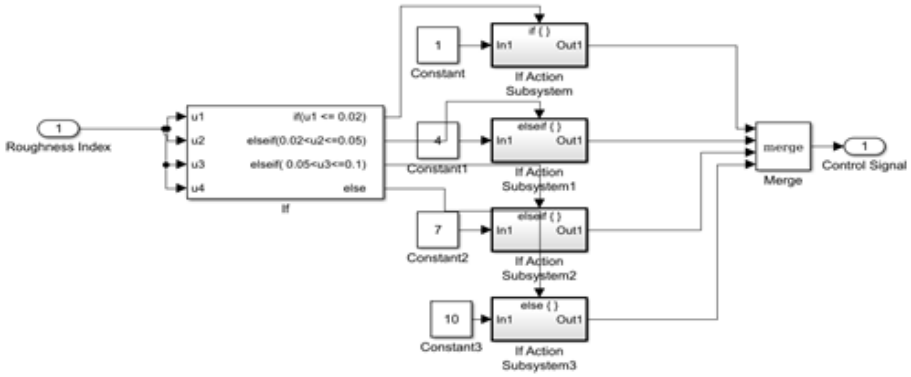


Figure. 42. Adaptive controller designed by Matlab/Simulink

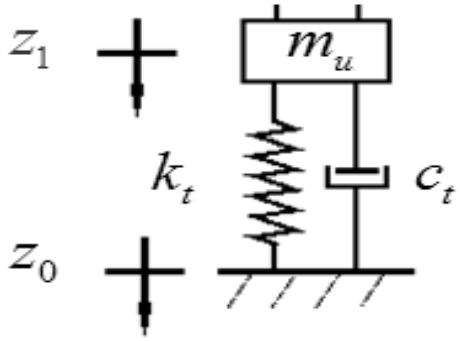


Figure. 43. Contact point tire model used for the simulation model (Sarami, 2009)

$$F_{tire} = k_t(z_1 - z_0) + c_t(z_1 - z_0)' \tag{7}$$

where

F_{tire} = Tire dynamic force

k_t = spring coefficient of tire

c_t = damper coefficient of tire

z_1 = unsprung mass displacement

z_0 = road profile

2.5.3. 실차 기반 제어 성능 평가

시뮬레이션에서 설계 및 성능 평가를 진행한 제어 알고리즘을 실차에 적용하여 평가를 진행하였다. LiDAR를 통해 획득한 노면 거칠기 정보는 CAN BUS를 통해 현가장치 제어기로 전달하고 Adaptive 방식의 열림량 조절 알고리즘을 현가장치 제어기에 CodeSys를 이용해 프로그래밍 하였다. 서로 다른 4개의 노면 조건에서 실험을 진행하였으며 실시간으로 노면 거칠기에 따라 현가장치 밸브 열림량을 다르게 조절하였다. 실차 실험은 대동공업 기술연구소(경상남도 창녕군)에서 진행되었으며 노면 조건은 포장도로(Pave), 자갈밭(Pebble), 풀숲(Bush), 비포장도로(Off-road)에서 진행하였다. (Figure. 44)

실차 실험에서는 조향 성능의 지표인 타이어 동적 힘을 계측하는 것이 매우 어렵다. 따라서 Savaresi (2012)에 의하면 타이어의 동적 힘 대신 타이어의 수직 움직임으로 대체하여 조향 성능을 평가한다. 아래의 수식 (8)에서와 같이 타이어의 수직 움직임은 Unsprung mass의 움직임과 노면 프로파일의 차이를 의미하는데 노면의 프로파일 역시 실차에서는 평평한 도로만을 정확하게 알 수 있다. 따라서 실차의 조향성능 평가는 평평한 포장도로를 달린 경우에만 z_r이 일정한 값을 가지므로 차축의 수직움직임으로 대체하여 조향 성능을 평가 할 수 있다.

$$\min(z_1 - z_0) \tag{8}$$

where

z_1 = unsprung mass displacement

z_0 = road profile

(a)

(b)

(c)

(d)

Figure. 44. Test fields for road roughness based preview control system for front axle suspension: (a) pave road, (b) pebble, (c) off-road, (d) bush

범프 인식 기반 현가장치 제어 알고리즘의 성능 평가는 실차를 기반으로 하여 진행하였다. Threshold 방식을 이용한 범프 인식과 LiDAR 제어기인 Laptop과 현가장치 제어기간 통신 시스템을 구축하고 감쇠력 변화에 대한 알고리즘을 실차에 구축하여 실험을 진행하였다. 실험은 대동공업 기술연구소(경상남도 창녕)에서 진행되었으며 범프로 사용된 대상은 60mm의 높이를 갖는 원형 장애물이었다. 노면 거칠기 실험과 같이 차량 전면에 LiDAR 센서와 IMU 센서를 부착하였으며 가속도 센서를 차축과 차체에 부착하여 충격 흡수 성능을 평가하였다. 차량 속도는 시속 5km, 10km로 달리하여 진행하였으며 밸브 작동시간과 LiDAR의 전방 인식 거리를 고려할 때 최대 시속 40km까지 적용할 수 있는 제어 알고리즘이다. (Figure. 45, Figure. 46)

제어 시스템의 성능 평가는 범프를 지날 때 차체의 수직가속도를 FFT 분석을 통해 충격 흡수 정도를 비교하였으며, 평지 주행 시 차축의 수직 움직임(Vertical Displacement)를 비교하여 차량 안정성을 비교하였다. 범프를 지날 때는 차체의 수직 가속도 크기가 줄어드는 것을 확인하여 승차감 개선을 확인할 수 있으며, 평지에서는 차축 움직임이 줄어드는 것을 통해 조향감, 차량 안정성 등을 확인해 볼 수 있다.

Figure. 45. Hardware set-up of PROTO vehicle for bump detection based preview control evaluation

Figure. 46. Bump detection based vehicle test

3. 결과 및 고찰

3.1. LiDAR 기반 노면 센싱 실험 결과

3.1.1. LiDAR 기반 노면 거칠기 검증 실험 결과

서로 다른 5개의 노면 상황에서 본 연구에서 개발한 노면 거칠기 수치를 획득하여 Boxplot을 그리면 Figure. 47과 같다. Boxplot은 중간값, 1사분위(Q1), 3사분위(Q3)를 이용해 상자그림을 그리고 최대, 최솟값을 이용해 나타내는 것이다. 3사분위와 1사분위의 차이인 Q3 - Q1을 Interquartile Range라고 한다. 해당 범위를 주목하여 Boxplot을 살펴보면, 포장도로는 0.01~0.02, 자갈밭, 풀밭은 0.02~0.04, 잔디밭은 0.04~0.06, 흙길은 0.06 이상으로 나눌 수 있다. 이를 통해 확인할 수 있는 것은 육안으로 구분할 수 있는 노면의 거칠기를 수치화된 값으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다는 점과 해당 지표를 이용해 노면의 거칠기를 분리해 낼 수 있다는 점일 것이다. 본 실험 결과를 바탕으로 Adaptive 제어 알고리즘을 설계하였으며 노면의 거칠기가 커질수록 비례제어 밸브 열림량을 10%, 40%, 70%, 100%로 조절할 수 있게끔 하였다.

본 연구에서 노면 거칠기 지표를 확인하기 위해 사용된 5가지 노면조건에서는 LiDAR 센서의 계측을 방해하는 장애 요소들이 없었다. 하지만 실제 영농 조건에서는 잡초, 동물 등 센서의 탐지를 방해하는 요소들이 존재한다. 따라서 이를 보완하기 위해서는 추후 LiDAR 센서의 부착 위치에 따른 해상도, 장애물 분석에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 노면 거칠기 지표 역시 서로 구분할 수 있는 수준의 차이를 보이기는 하였지만, 해당 알고리즘으로 구한 노면 프로파일이 실제 노면과 얼마나 유사한 정도를 나타내는가에 대한 신뢰성 확보가 필요하다. 따라서 추후 연구를 통해 이를 보완하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

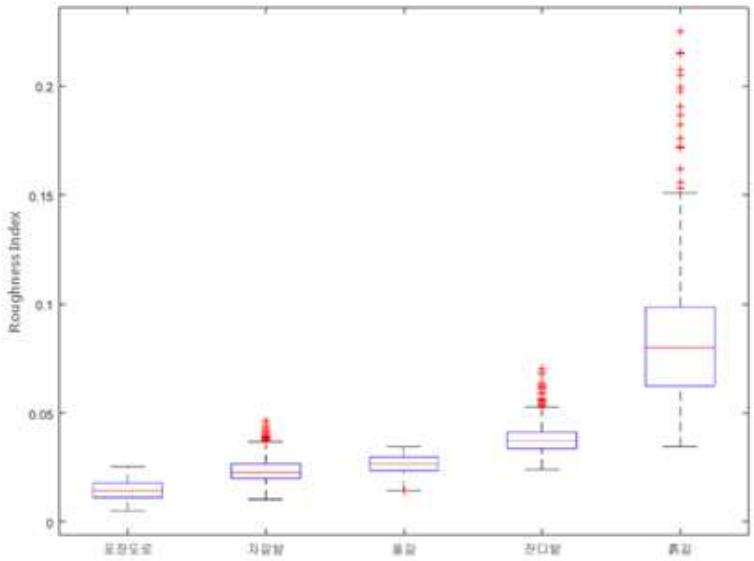


Figure. 47. Boxplot result of road roughness index in evaluation fields

3.1.2. LiDAR 기반 범프 인식 알고리즘 실험 결과

Threshold 방식을 이용한 범프 인식 실험 결과는 Table. 8과 같다. 서로 다른 3개의 속도 조건에서 범프 인식 실험을 진행하였으며, 이진 분류 기법(Binary Classification)을 통해 성능 평가를 진행하였다. True Positive는 실제 범프를 범프라고 인식하는 것을, True Negative는 범프가 없는 상황을 범프가 없다고 인식하는 것을, False Positive는 범프가 실제로는 없는데 있다고 인식하는 것을, False Negative는 범프가 실제로 있지만 없다고 인식하는 경우를 말한다. Accuracy는 전체 경우의 수 중 True Positive와 True Negative의 합으로 나타낸 것이다. 범프 인식 실험 결과, 1종류의 범프를 잘 인식(True Positive)하는 것을 확인할 수 있었으며 대부분의 상황에서 범프가 없는 것을 없다고(True Negative) 인식하였다. 하지만 범프가 없는 상황에서 있다고 인식(False Positive)하는 오

류가 발생하였으므로 추후 해당 알고리즘은 다양한 방법을 통해 정확도를 높일 수 있는 개선의 여지가 필요하다. 그럼에도 불구하고 올바르게 범프를 인식하였기 때문에 본 방식을 통하여 실차 실험을 진행하였다.

Figure. 48는 범프를 인식했을 때 각 샘플 간의 Difference of Average Distance 값을 나타낸 것이다. 실험적으로 구한 Threhold를 0.5로 지정하였으며 실제로 범프를 인식할 때 0.5 이상의 Difference 값이 나온 것을 확인할 수 있다.

Table. 8. Results of bump detection evaluation with LiDAR

	3km/h	5km/h	10km/h
True Positive	1	1	1
True Negative	981	913	488
False Positive	5	4	2
False Negative	0	0	0
Accuracy(%)	99.49	99.56	99.59

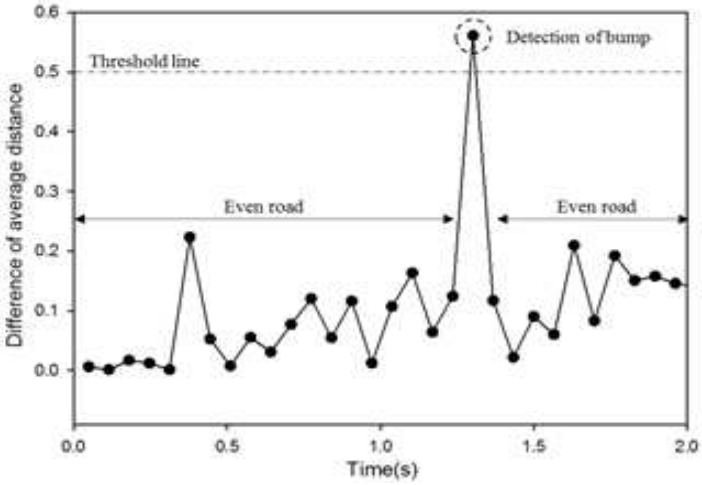


Figure. 48. Difference of average distance when travelling even road and detecting bump using threshold

3.2. 시뮬레이션 모델 검증

2.4.에서 SimulationX로 구성한 유압 회로 시뮬레이션 모델과 Matlab/Simulink로 구성한 Half Car Co-simulation 모델을 기반으로 제어기 설계를 위해서는 시뮬레이션 모델에 대한 신뢰성 확보가 중요하다. 따라서 실험적으로 구한 데이터와 시뮬레이션 상에서 획득한 데이터 간의 매칭을 통해 시뮬레이션에 대한 신뢰성을 확보하고 유효성을 검증하고자하였다.

SimulationX로 모델링 된 유압 회로도 데이터 매칭 결과 비례제어 밸브 최대 열림 상태와 닫힘 상태에서 Figure. 49, Figure. 50와 같은 결과를 얻을 수 있었다. Meng.(2011)에 따르면 수치적으로 시뮬레이션과 실제 실험 결과의 연관성을 알아보기 위하여 NCCP(Normalized Cross Correlation Power) 지표를 사용할 수 있으며 이 값이 0.9를 넘으면 High level의 연관성을 갖는다고 보고하였다. 식 (9)의 유압회로 모델의 Fully open 상태와 Fully closed 상태의 NCCP 값을 계산하였다. 이를 통해 실험적으로 구한 결과와 시뮬레이션 결과의 상관계수가 0.9이상을 갖는 결과를 획득하였으며, 따라서 시뮬레이션 모델의 유효성을 확인할 수 있었다.

Figure. 48의 Half Car Co-simulation 모델의 매칭은 시계열 분석으로 나온 가속도 데이터를 PSD(Power Spectral Density)로 변환하여 매칭을 진행하였다. 매칭 결과 실험적으로 구한 차체 가속도와 시뮬레이션으로 구한 차체 가속도 모두 4Hz에서 최대 Peak 값을 갖는 형태가 된 것을 알 수 있었다. NCCP 값을 구해본 결과, 0.91의 값을 갖는다는 것을 확인하였으며 이로 인해 Half car co-simulation 모델 역시 실차를 반영하기에 유효하다는 것을 검증하였다. 한편, Trial & Error 방식을 통해 획득한 Half car 시뮬레이션 모델의 최종 파라미터들은 Table. 9에서 확인할 수 있다.

$$NCCP = \frac{\max[R_{xy}(\tau)]}{\max[R_{xx}(\tau), R_{yy}(\tau)]} R_{xy}(\tau) \tag{9}$$
$$= \lim_{T \to \infty} 1/T \int_0^T x(t) y(t-\tau) dt$$

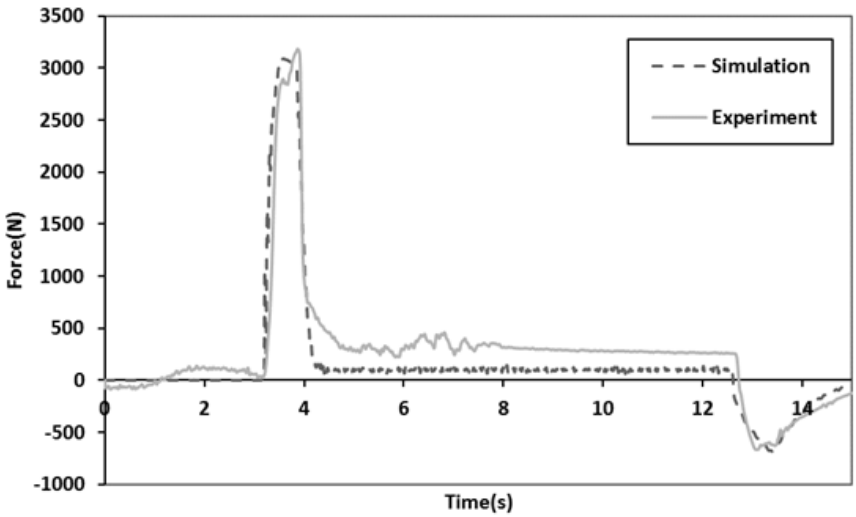


Figure. 49. Data matching result for hydraulic circuit model verification (Fully open)

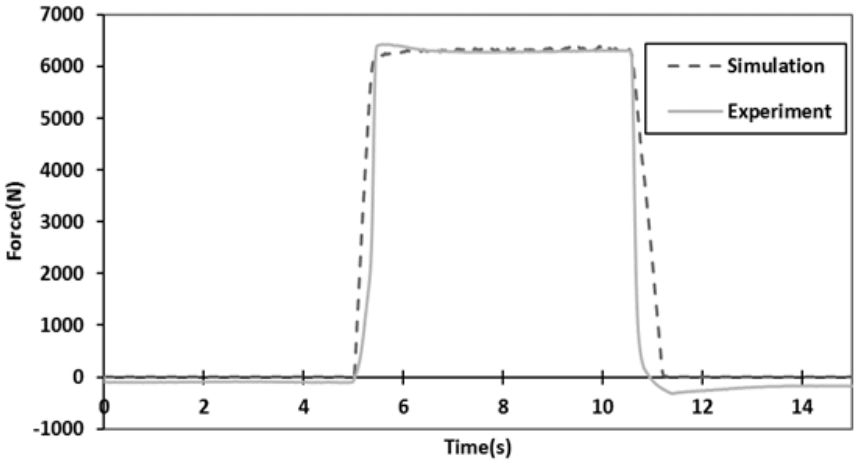


Figure. 50. Data matching result for hydraulic circuit model verification (Fully closed)

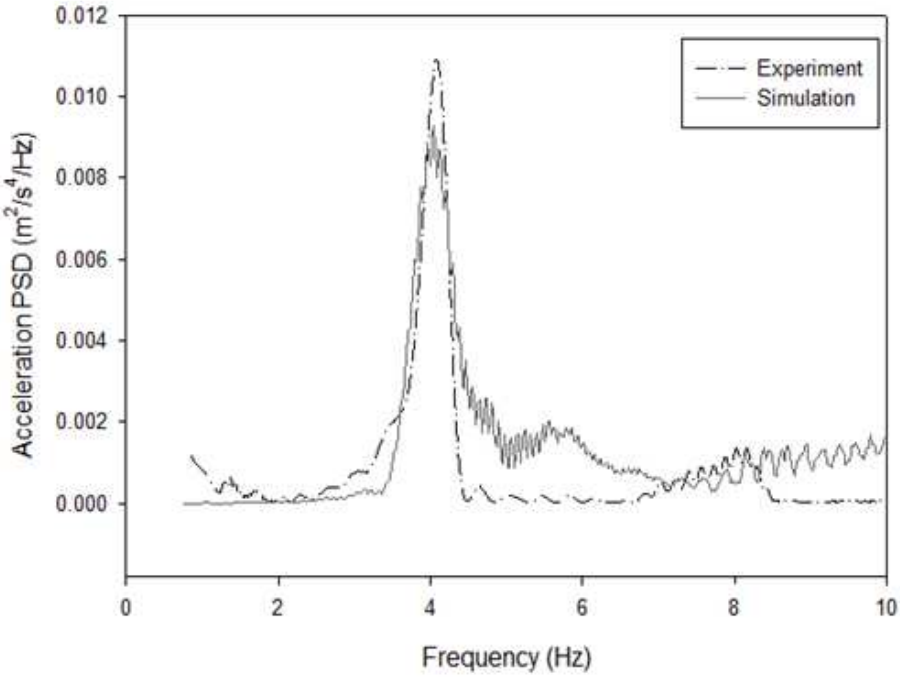


Figure. 51. Data matching result for co-simulation model verification

Table. 9. Modified parameters of co-simulation model

Name	Specification
Main body mass(kg)	3600
Front wheel mass(kg)	400
Rear wheel mass(kg)	900
Front/Rear tire stiffness(N/m)	460000
Front/Rear tire damping coefficient(Nm/s)	5000
Moment of inertia about pitch axis(kgm^2)	8000
Distance from rear to CG(m)	1.5
Distance from front to CG(m)	1.2

3.3. 현가장치 제어 알고리즘 적용 실험 결과

3.3.1. 시뮬레이션 기반 제어 성능 평가 결과

유효성이 검증된 Half Car Co-simulation 모델에 실험적으로 구한 노면 프로파일과 노면 거칠기 정보를 입력하여 프리뷰 제어 알고리즘의 성능을 평가하였다. 승차감의 지표인 차체 수직가속도(Body Acceleration)와 조향성 지표인 타이어 동적 힘(Tire Dynamic Force)에 대해 각각 FFT 분석과 RMS 값을 비교하였다. 가속도 개선율(감소율)에 대한 수식은 (10)와 같다.

Table. 10, Figure. 53의 차체의 수직가속도 비교 결과, RMS 값은 수동형 시스템에 비해 모든 노면에서 줄어든 것을 확인할 수 있었으며, 풀밭에서 9% 감소, 자갈밭에서 최대 16.7%까지 가속도 감소를 확인할 수 있었다. 또한 Figure. 49에서 FFT 분석 결과를 살펴보면 10Hz이하의 저주파수 대역에서 모두 프리뷰 제어 적용 시 가속도 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 이를 통해 제어 시스템의 효과를 알아 볼 수 있었

다. 하지만 비포장도로(Offroad)에서의 개선율은 크지 않았는데, 이는 비포장도로 노면조건이 매우 극단적인 수준이라서 제어의 효과가 크지 않았을 것으로 예측해볼 수 있다. 본 실험에서 획득한 비포장도로 노면 상태가 일반 농용트랙터의 농작업을 위한 논밭의 형태보다 더 극단적인 상황이었다. 이와 같은 원인으로 인해 상대적으로 노면 거칠기가 덜한 자갈밭, 풀밭 등에서 더 큰 가속도 감소 효과를 볼 수 있었던 것으로 예측해 볼 수 있다. (Figure. 52)

$$Improvement(\%) = \frac{a_{passive} - a_{preview}}{a_{passive}} \times 100 \qquad (10)$$

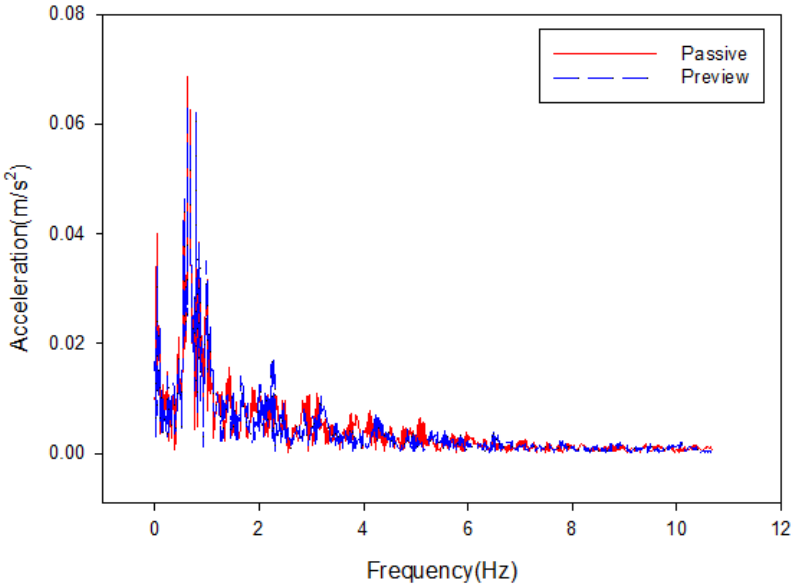
where

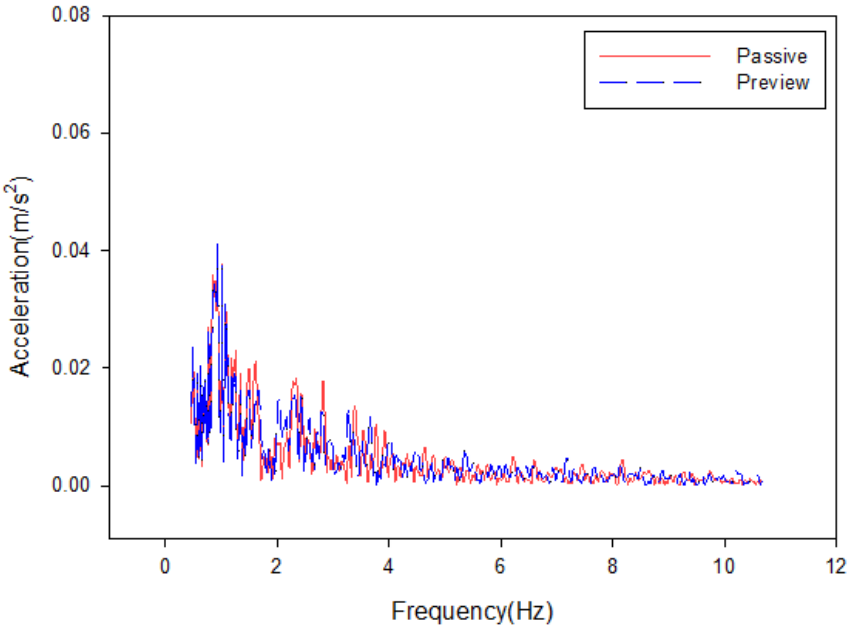
$a_{passive}$ = acceleration of passive system

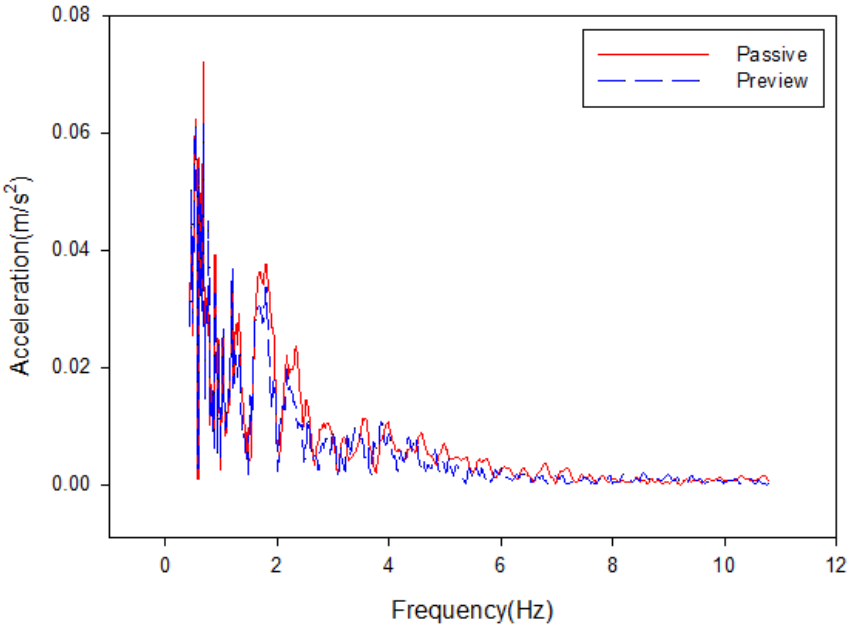
$a_{preview}$ = acceleration of preview system

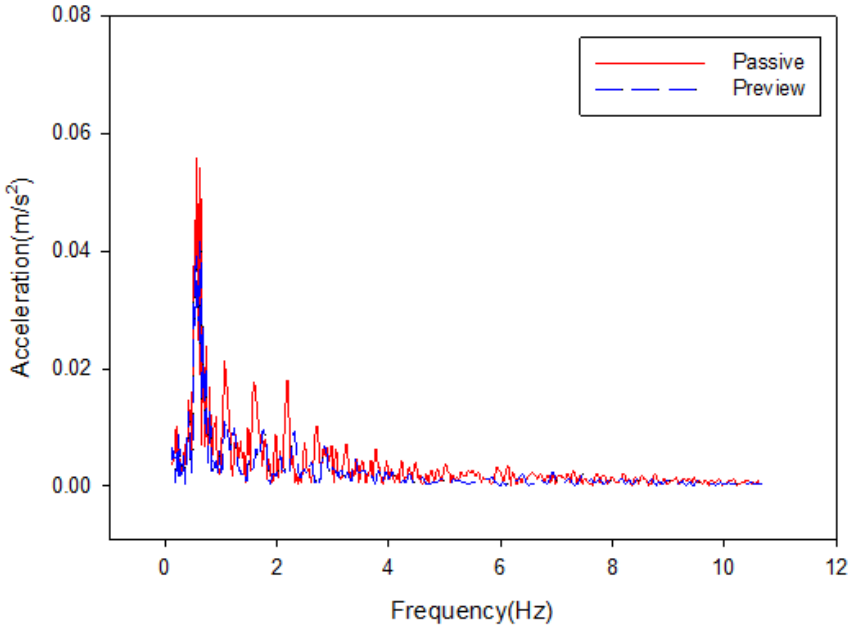
Table. 10. RMS body acceleration of passive and preview semi-active control

	Passive(m/s2)	Preview Semi Active(m/s2)	Improvement(%)
Bush	0.046058142	0.041776139	9.296951285
Grass	0.191480953	0.189461906	1.054437295
Offroad	0.123859833	0.122983224	0.707742662
Pave	0.034150608	0.032860836	3.776717651
Pebble	0.324286675	0.270	16.69711199


0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
Acceleration(m/s2)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview


0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
Acceleration(m/s2)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview


0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
Acceleration(m/s2)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview


0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
Acceleration(m/s2)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview

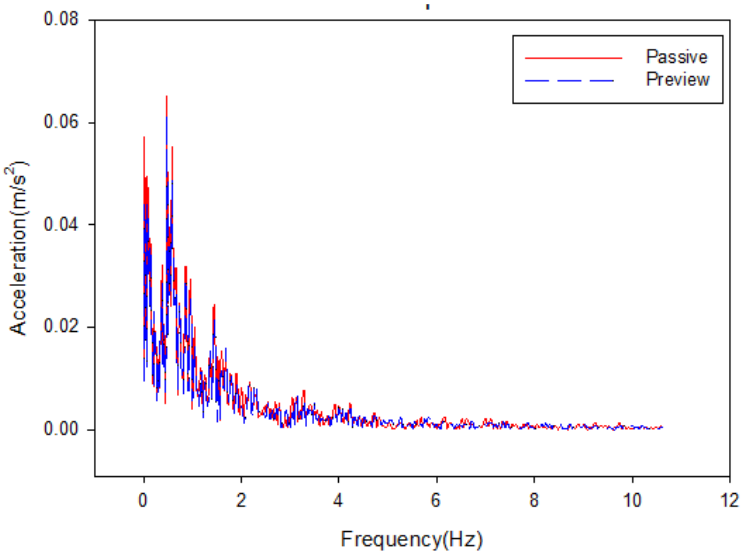


Figure. 52. FFT results of body acceleration according to 5 different road conditions (a) Bush, (b) Grass, (c) Off-road, (d) Pave, (e) Pebble

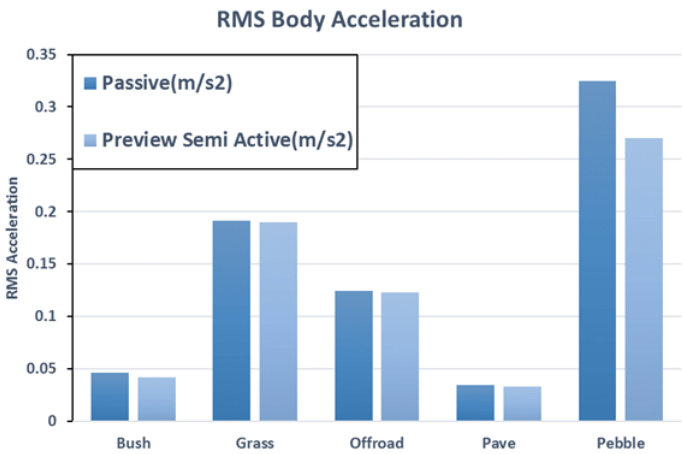
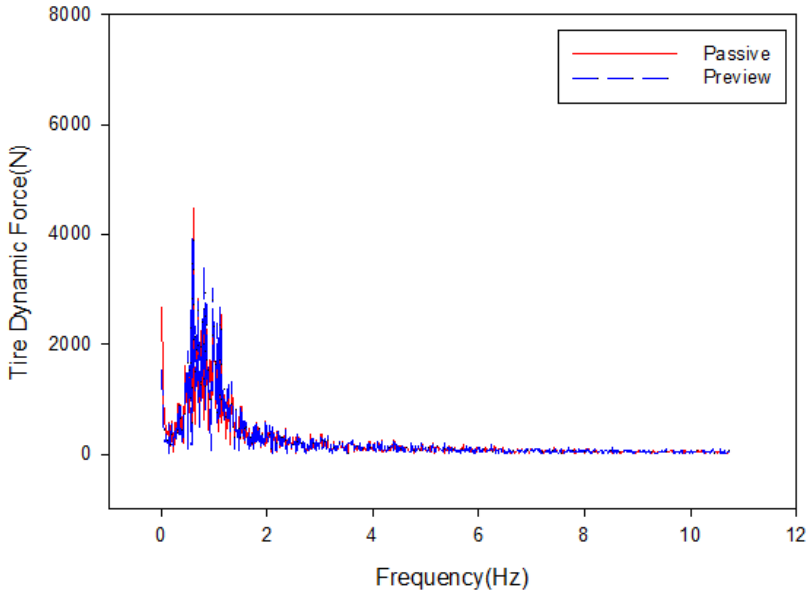


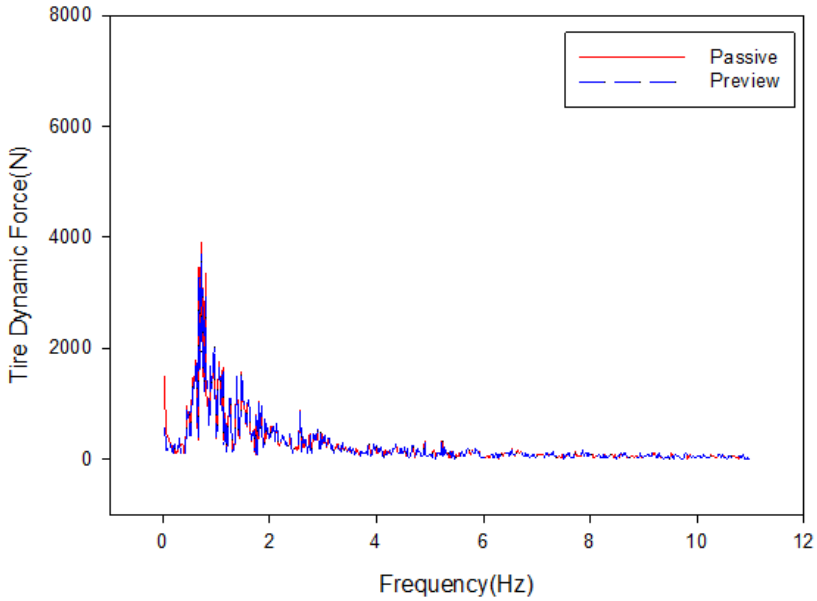
Figure. 53. RMS body acceleration

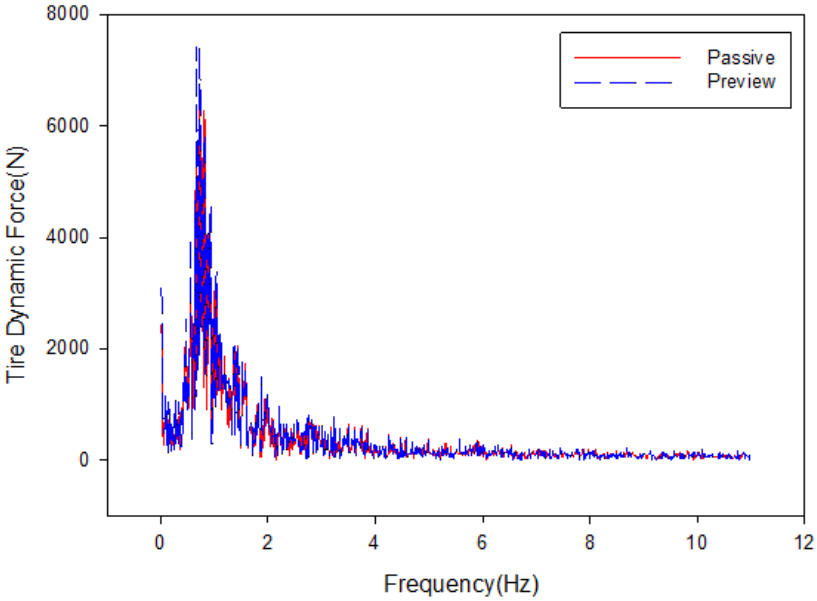
Table. 11, Figure. 55에서 타이어 동적 힘의 결과를 살펴보면 RMS 값이 포장도로에서만 12.8%까지 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 이는 설계한 제어기의 Adaptive 메커니즘이 노면 거칠기가 클수록 승차감 개선에 집중을 했기 때문에 나타날 수밖에 없는 당연한 결과이다. 포장도로에서는 요철이 많지 않기 때문에 승차감 개선보다는 조향성 개선이 더 중요하다. 따라서 본 시뮬레이션 결과를 통해 설계한 프리뷰 제어 알고리즘이 수동형 현가장치에 비해 노면의 거칠기가 일정 수준 범위 안에서 커질수록 승차감을 개선시키고 평평한 도로일수록 조향 성능을 개선시킬 수 있다는 사실을 확인하였다. 결국 본 연구의 목표였던 프리뷰 제어 시스템을 통해 수동형 현가장치를 개선하고자 했던 본래의 목적에 부합하는 결과라고 할 수 있으며 이를 실차에 임베디드 제어기로 적용하여 검증해볼 필요성이 있을 것이다.

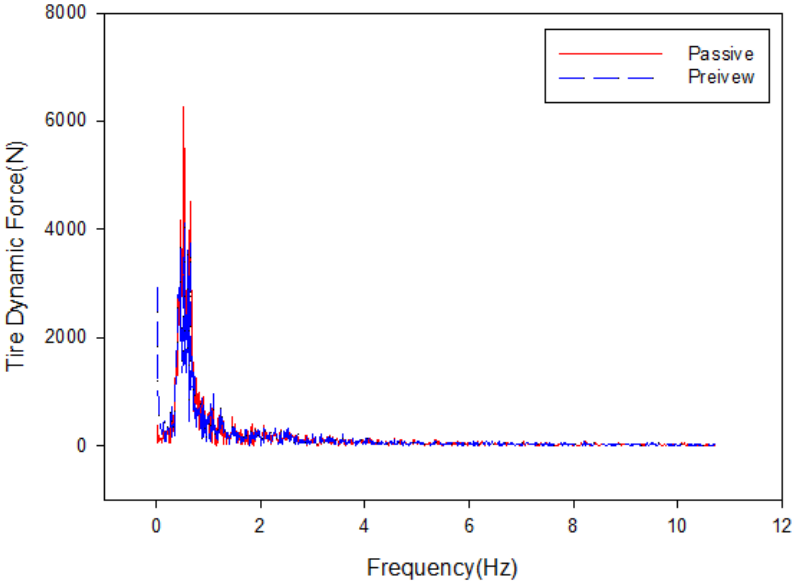
Table. 11. RMS tire dynamic force of passive and preview semi-active control

	Passive(N)	Preview Semi Active(N)	Improvement(%)
Bush	84240.20269	83649.23263	0.701529719
Grass	61757.19291	63783.33023	-3.280811884
Offroad	69282.22505	69004.03381	0.401533347
Pave	65155.71949	56798.6245	12.82634135
Pebble	77402.1473	84323.69825	-8.942324207


8000
6000
4000
2000
0
Tire Dynamic Force(N)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview


8000
6000
4000
2000
0
Tire Dynamic Force(N)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview


8000
6000
4000
2000
0
Tire Dynamic Force(N)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preview


8000
6000
4000
2000
0
Tire Dynamic Force(N)
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)
Passive
Preivew

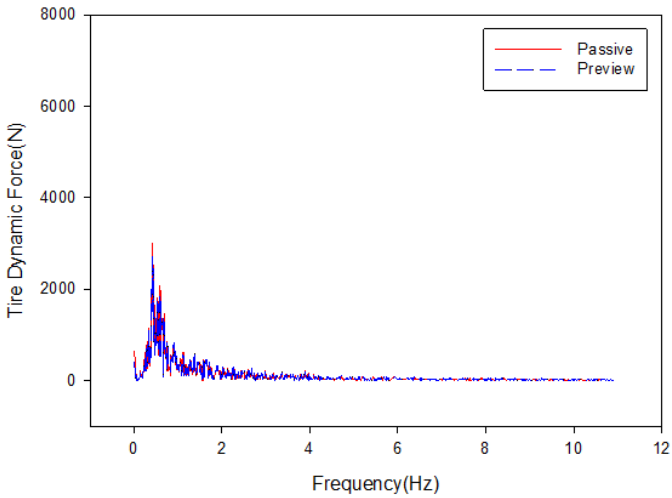


Figure. 54. FFT results of tire dynamic force according to 5 different road conditions (a) Bush, (b) Grass, (c) Off-road, (d) Pave, (e) Pebble

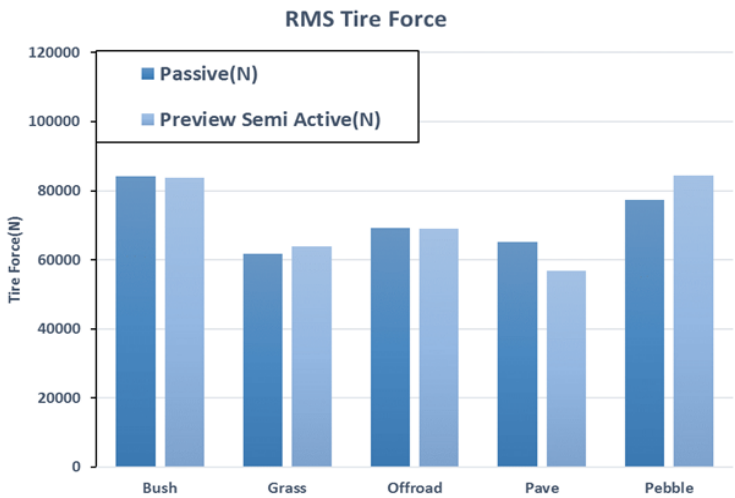


Figure. 55. RMS tire dynamic force

3.3.2. 실차 기반 제어 성능 평가 결과

시뮬레이션에서 수동형 현가장치에 비해 노면의 거칠기를 기반으로 하여 프리뷰 제어를 적용하였을 때 승차감, 조향성능 측면 모두에서 개선될 수 있다는 사실을 확인하였다. 이후 실차 검증을 위해 LiDAR 노면 거칠기 기반 제어기를 임베디드 시스템으로 구현하여 차량에 적용한 후 실시간으로 실험을 진행하였다.

Figure. 56의 그림은 실차 실험을 진행한 서로 다른 4가지 노면에 대한 Boxplot 그래프이다. 노면 거칠기 수치 성능 평가를 위한 노면과는 다른 조건이지만 Boxplot 결과 포장도로와 자갈밭, 풀숲, 비포장의 거칠기가 수치적으로 다르게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 결국 이는 서로 다른 거칠기를 갖는 노면에서 실차 실험을 진행하였음을 보여주는 지표로 사용할 수 있다. 약 20m를 주행한 후 Figure. 57와 같이 차체가속도의 RMS 값을 비교해 본 결과 4가지 노면 모두에서 가속도가 감소한 것을 확인할 수 있었으며 비포장도로에서 최대 66.5%까지 가속도 감소효과를 볼 수 있었다. 또한, 10Hz이하 영역에서 주파수 분석 결과, 가속도의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 시뮬레이션에서 확인한 노면 거칠기 기반 프리뷰 제어 시스템을 실차에 적용하여도 승차감 개선에 실질적인 효과를 볼 수 있다는 것을 증명하였다. (Figure. 58)

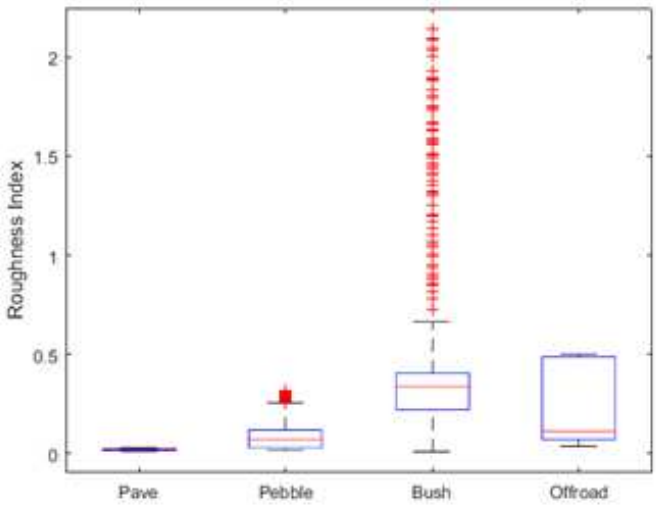


Figure. 56. Boxplot result of road roughness index in vehicle test fields

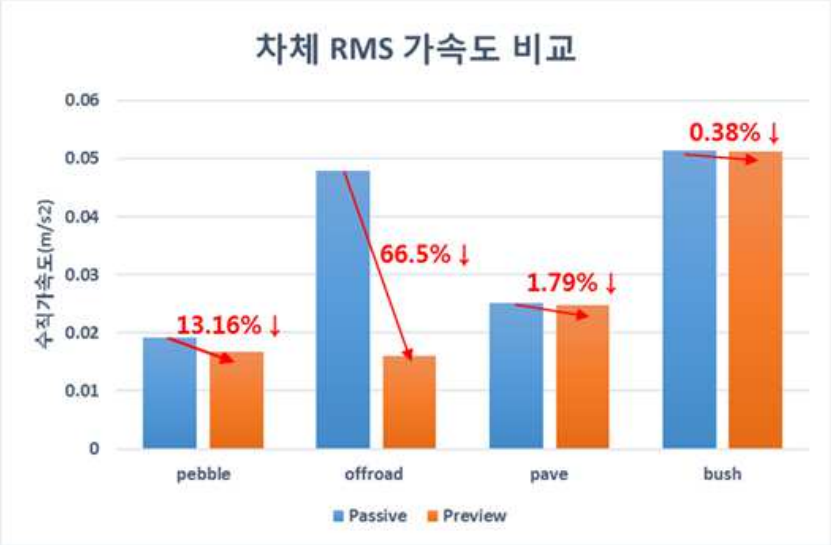
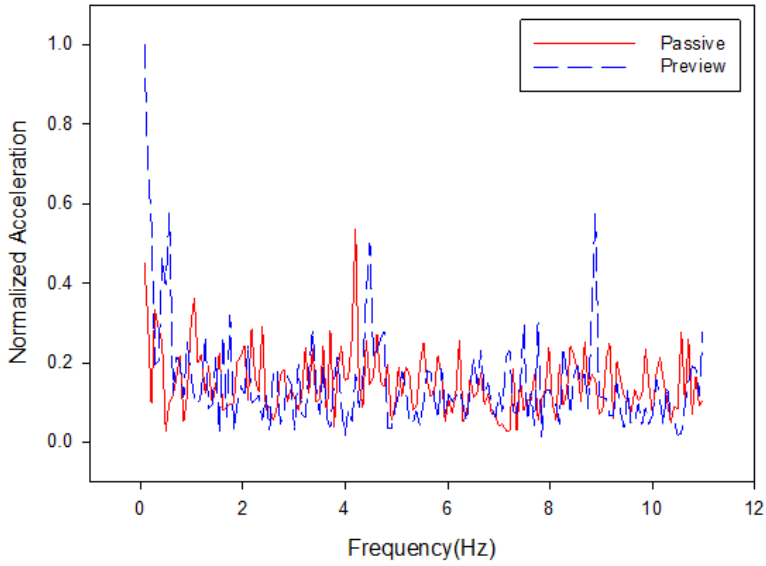
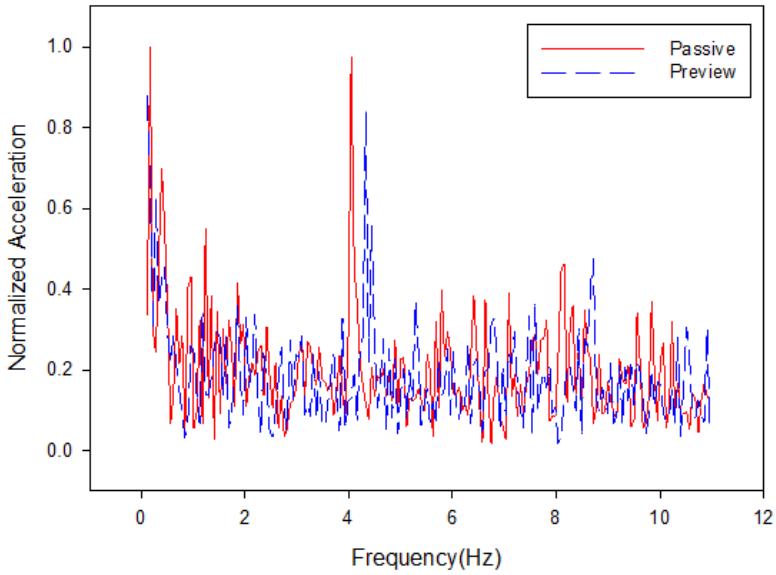
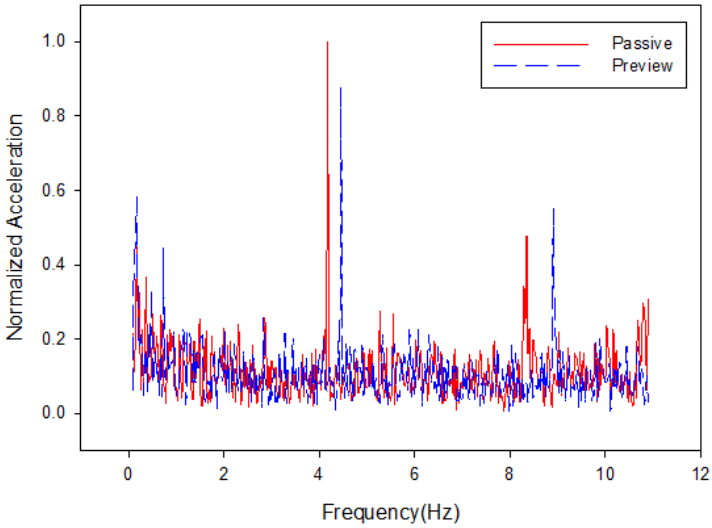


Figure. 57. RMS body acceleration results in vehicle test


Passive
Preview
Normalized Acceleration
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)

(a)


Passive
Preview
Normalized Acceleration
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
2
4
6
8
10
12
Frequency(Hz)



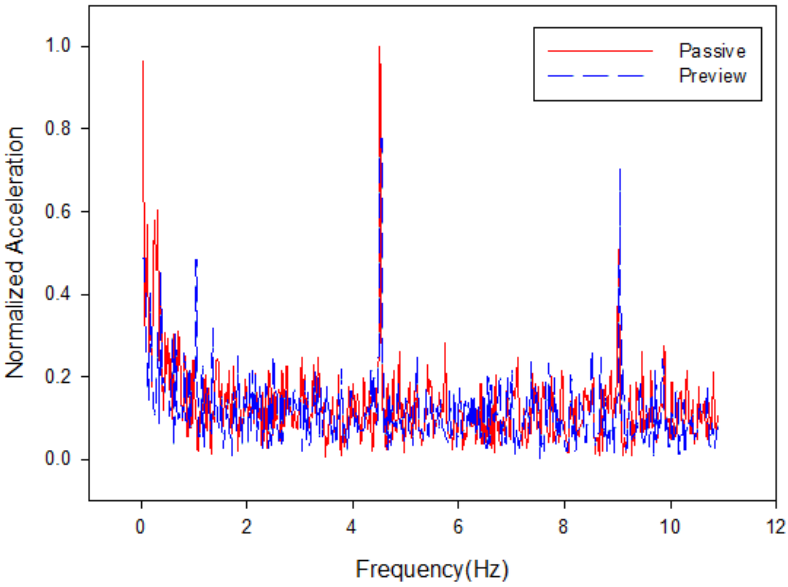


Figure. 58. FFT results of body acceleration of vehicle test
(a) Pebble, (b) Off-road, (c) Pave, (d) Bush

실차에서는 조향성의 지표인 타이어 동적 힘을 계측하거나 계산하는 것이 매우 어렵다. 따라서 타이어의 동적 힘을 대신하여 타이어의 수직 움직임으로 조향 성능을 파악하였으며 노면 프로파일이 일정한 포장도로에서만 차축의 수직움직임으로 대체하여 파악하였다.

아래 Figure. 59은 포장도로를 달리는 농용트랙터에서 프리뷰 제어를 적용하였을 때 차축의 움직임을 나타낸 것이다. 차축의 움직임 폭이 작을수록 조향 안정성이 확보된다고 할 수 있다. 차축의 움직임을 Peak to Peak 값으로 비교한 결과, 수동형에 비해 프리뷰 제어를 적용하였을 때 10.1% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 프리뷰 제어 시스템을 실차에 적용하였을 때 평평한 포장도로에서의 조향 성능이 수동형에 비해 개선된 것을 알 수 있다.

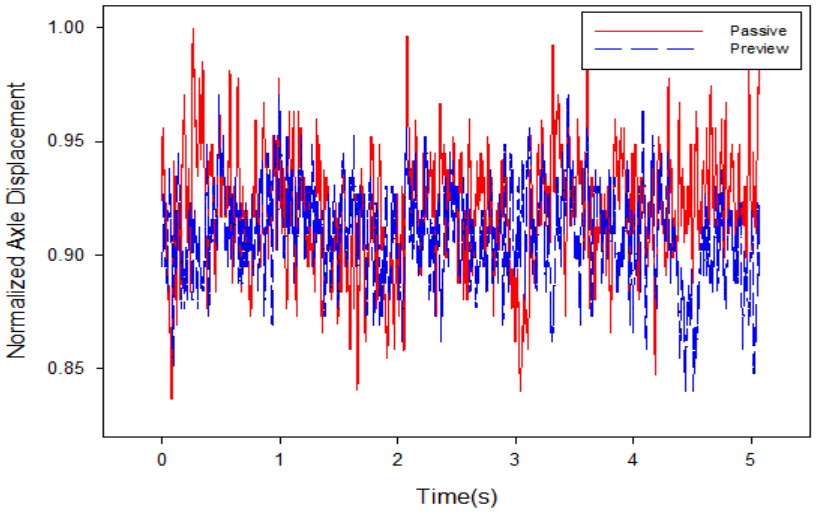


Figure. 59. Axle displacement of vehicle when driving paved road

프리뷰 제어를 적용한 실차 실험 결과 서로 다른 4개의 노면 조건에서 노면의 거칠기가 커질수록 차체의 수직 가속도를 줄여줄 수 있음을 확인하였으며 이는 승차감 개선으로 이어질 것이라고 추론할 수 있다.

또한, 포장도로에서 차축의 수직 움직임 역시 수동형 현가장치에 비해 감소하는 결과로부터 조향 성능 역시 개선될 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 따라서 프리뷰 제어를 적용하였을 때 유공압식 현가장치의 단점과 수동형 현가장치의 한계점을 개선하는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

실차에 LiDAR 기반 범프 인식 제어 시스템을 프리뷰 제어의 성능 평가를 진행하였다. LiDAR가 범프를 인식하면 차량의 속도를 고려해 범프 도달 시간을 계산하고 도달 시간 1초 전에 현가장치의 열림량을 기존 20%에서 100%로 눌려주는 알고리즘을 구축하고 실험을 진행하였다. 평가는 농용트랙터가 범프를 지나는 시점의 차체의 가속도를 계측하고 FFT 주파수 분석을 통해 저주파수 대역에서 수동형에 비해 얼마나 개선되었는지 확인하는 방법과, 평평한 도로를 달릴 때 차축의 움직임을 계측하여 수동형에 비해 얼마나 움직임 폭이 개선되었는지 확인하는 두 가지 방법으로 진행하였다.

Figure. 60은 시속 5km로 주행하여 범프를 지날 때 차체의 수직가속도를 FFT 분석한 결과이다. 수동형(20%)의 열림량에 비해 프리뷰 제어 적용 시 20Hz이하의 주파수 영역에서 가속도의 크기가 줄어든 것을 확인할 수 있으며 RMS 가속도 역시 54%의 감소한 것을 알 수 있었다. 이를 통해 범프 인식 기반 프리뷰 제어의 실차 적용 시 농용트랙터가 장애물을 지날 때 순간적인 충격 흡수 효과를 높일 수 있을 것이라 추론할 수 있다.

Figure. 61과 62은 시속 5km와 10km로 평평한 도로를 달릴 때 차축의 수직 움직임을 비교한 결과이다. 진한 색 그래프가 프리뷰 제어를 적용했을 때이며, 차축의 수직 움직임이 확연히 줄어드는 것을 알 수 있다. Peak to Peak 값 계산 결과 시속 5km에서 51%의 개선 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 평지를 주행할 때에는 100% 열림량을 유지하는 현가장치보다 낮은 열림량(20%)를 유지해야 차량의 안정성이 높아지고 조향 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 프리뷰 제어 적용 시 평지에서의 조향 성능 개선에 도움이 된다는 것을 확인한 실험이다.

결과적으로 LiDAR 센서를 기반으로 하여 범프와 같은 장애물을 인식하고 이를 트랙터의 현가장치 시스템과 연동하는 융합 제어 시스템은 차량의 주행 안정성을 높이고 운전자의 승차감 및 안전을 보장할 수 있을 것이라 기대할 수 있다.

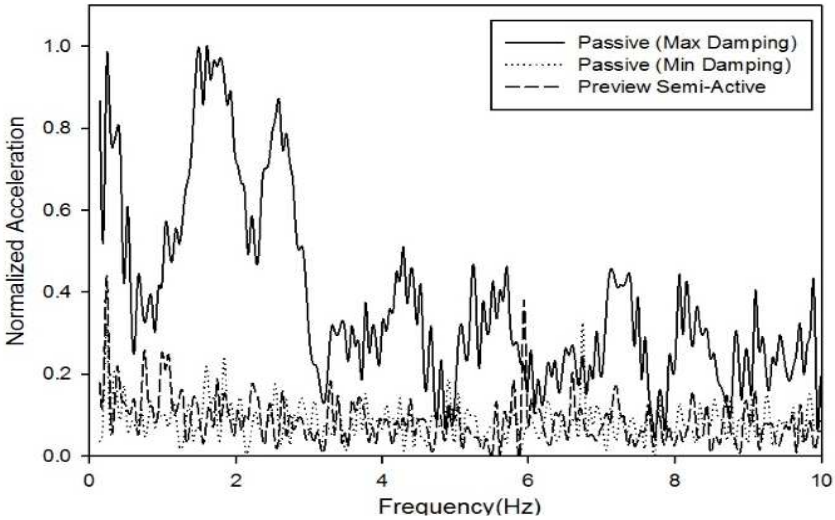


Figure. 60. FFT results of body acceleration of passive and preview control when driving 5km/h

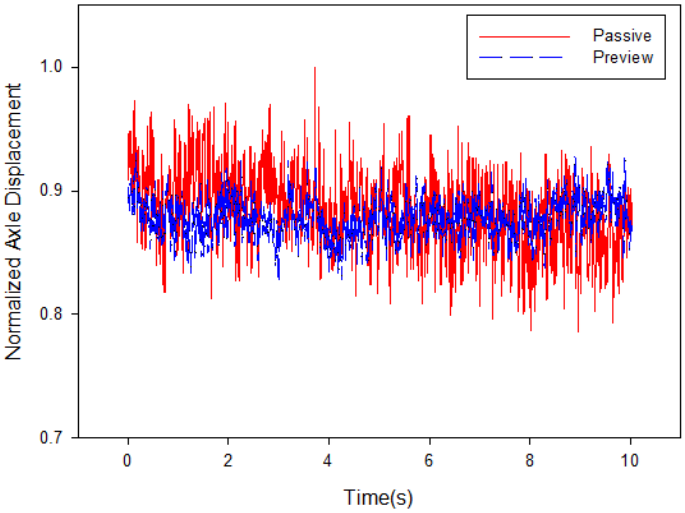


Figure. 61. Axle displacement of passive and preview control when driving 5km/h

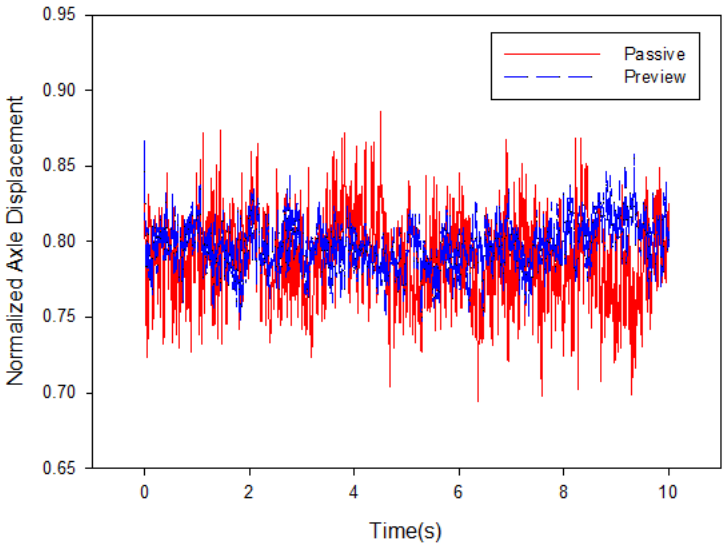


Figure. 62. Axle displacement of passive and preview control when driving 10km/h

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 농용트랙터의 전방차축 현가장치를 위한 제어 알고리즘 개발에 관한 연구를 진행하였다. 전방차축 현가장치는 유공압식으로 설계하여 높은 부하에 견디도록 하였으며, 수동형 시스템의 승차감과 조향성 상충 관계(Trade-off)를 극복하기 위한 마찰식 가변 댐퍼 설치하였다. 이를 통해 솔밸브의 열림량 제어로 감쇠력을 변화시킬 수 있도록 하는 반능동형 제어 알고리즘을 고안하였다. 하지만 예비실험을 통해 유공압식 현가장치의 반응성이 느리다는 것을 확인하였으며, 이로 인해 차체 신호를 기반으로 한 반능동형 제어 적용 시 충격 흡수 효율이 낮아진다는 사실을 확인 할 수 있었다. 따라서 이를 개선하기 위해 차량 전방의 노면 상태를 센싱하고 이를 기반으로 한 프리뷰 현가장치 제어 시스템 구축을 위한 LiDAR 센서를 선정하였다.

LiDAR 센서를 기반으로 한 제어기를 설계하고 그 성능을 평가하기 위해 유공압식 현가장치와 농용트랙터의 시뮬레이션 모델을 제작하였으며 실험 데이터와의 매칭을 통해 그 유효성을 검증하였다. 또한, 2차원 LiDAR 센서를 이용하여 노면의 거칠기를 파악하고 이를 수치화 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이를 바탕으로 노면의 거칠기가 커질수록 부드러운 현가장치로 만들어주는 Adaptive 방식의 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션과 실차에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 시뮬레이션에서 서로 다른 5가지 상황에서 노면 거칠기 기반 프리뷰 제어 알고리즘의 성능을 평가한 결과, 차체의 가속도가 최대 자갈밭에서 16.7% 감소하였으며, 타이어 동적 힘 역시 포장도로에서 12.8% 개선되었다. 또한, 실차 실험 결과, 비포장도로에서 최대 66.5% 차체 가속도 효과가 있었으며, 포장도로에서의 차축 움직임이 10.1% 개선된 것을 확인하였다.

또한, 본 연구에서는 LiDAR 센서를 기반으로 하여 농용트랙터가 도로 주행 시 마주할 수 있는 장애물을 인식하고 현가장치의 감쇠력을 바꿔줄 수 있는 시스템을 개발하였다. Threshold 방식을 이용한 노면의 범프 인식 알고리즘을 개발하였으며 실차에 적용하여 성능평가를 진행한 결

과, 99% 이상의 Accuracy를 보였다. 이를 현가장치 제어에 적용하여 실차에서 충격 실험을 진행한 결과, 범프를 지날 때, 차체의 가속도가 54%, 평평한 도로를 지날 때 차축 움직임이 51% 감소한 것을 확인하였다.

본 연구에서는 LiDAR 센서 기반 노면의 거칠기 및 장애물을 인식 기반 반능동형 프리뷰 제어 시스템을 적용한다면, 기존의 수동형 현가장치에 비해 개선된 승차감, 조향 성능을 갖는 현가장치를 만들 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실차 실험을 통해 검증하였다. 하지만 75kW 급 이상의 대형 트랙터가 주로 사용되는 작업 환경을 고려하여 5가지 노면 상태만을 선정하여 실험을 진행한 점과 LiDAR 센서를 통해 획득한 노면 프로파일이 실제 노면과 얼마나 유사한 정도를 갖는지에 대한 신뢰도 확보가 미흡한 점은 추후 연구를 통해 개선해 나가야 할 사항이다. 또한, 추후 연구로서 범프 인식 제어 알고리즘의 정확성 개선이 필요할 것이며 실제 상용화를 위한 센서 선발, 임베디드 시스템 구축에 관한 연구가 요구된다.

5. 참 고 문 헌

1. Boban Cvetanovi, Miljan Cvetkovi, Dragan Cvetkovi & Miloš Risti. 2014. Effect of the Suspension on Whole Body Vibration: Comparison of High Power Agricultural Tractors. Ⅷ International Conference of Heavy Machinery-HM. June 25-28, 2014.
2. C. Fernández., M. Gavilán., D. F. Llorca., I. Parra., R. Quintero., A. G. Lorente., Lj. Vlacic., & M. A. Sotelo. 2012. Free space and speed humps detection using lidar and vision for urban autonomous navigation. Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE.
3. Cho. B. J. 2017. Simulation of the Hydro-Pneumatic Front Axle Suspension of Agricultural Tractor. Seoul National University. Master of Engineering Thesis.
4. Cristiano. Spelta., Fabio. Previdi., Sergio. M. Savaresi., Diego. Delvecchio., & Simone. Tremolada. 2011. Semi-active control of cab suspension in an agricultural tractor via magneto-rheological actuator. Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on.
5. Mahmoud M. Ahmed & Ferdinand Svaricek. 2014. Preview Optimal Control of Vehicle Semi-active Suspension Based. 2014 European Control Conference (ECC). June 24-27, 2014.
6. Massimiliano, Gobbi., Gianpiero, Mastinu., & Giorgio, Previati., 2014. Farm tractors with suspended front axle: Anti-dive and anti-lift characteristics. Journal of Terramechanics, 56, 157-172.
7. Michael J. Higgins-Luthman., Yuesheng Lu. & Duane W. Gebauer.

2008. Machine vision for predictive suspension. US7872764B2, US patent.

8. Nathalie Joy Sucgang, Manuel Ramos Jr., & Nicolette Ann Arriola. 2017. Road Surface Obstacle Detection using Vision and LIDAR for Autonomous Vehicle. International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists(IMECS).
9. Pankaj KUMAR, Paul LEWIS, Conor P. MCELHINNEY & Alias Abdul RAHMAN. 2015. AN ALGORITHM FOR AUTOMATED ESTIMATION OF ROAD ROUGHNESS FROM MOBILE LASER SCANNING DATA. The Photogrammetric Record 30(149): 30-45.
10. Ralph Streiter. 2008. Active preview suspension system. ATZ worldwide. Volume 110, Issue 5, pp 4-11.
11. Ro. Y. M. 2015. Performance Improvement of a Tractor Horizontal Control System using Sensor Signal from the Front Axle. Seoul National University. Master of Engineering Thesis.
12. Sarami, S. 2009. Development and evaluation of a semi-active suspension system for full suspension tractors. Doctoral dissertation, TU, Fachbereich Konstruktion von Maschinensystemen.
13. Sim, K., Lee, H., Yoon, J. W., Choi, C., & Hwang, S. H. 2017. Effectiveness evaluation of hydro-pneumatic and semi-active cab suspension for the improvement of ride comfort of agricultural tractors. Journal of Terramechanics, 69, 23-32.
14. Tommaso. Colombo., Giulio. Panzani., Jorge de-J. Lozoya Santos., & Sergio M. Savaresi. 2017. Load levelling control for an hydro-pneumatic suspension of a tractor cabin: Modelling,

identification and control. Control Technology and Applications (CCTA), 2017 IEEE Conference on.

15. Zoltán KOVÁCS & Attila SZEGEDI. 2015. Effect of Front Axle Suspension on Traction Parameters of Tractor with Mechanical Front Wheel Drive. SCIENTIFIC BULLETIN, Serie C, Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology ISSN 1224-3264, Volume 2015 No.XXIX.
16. 한득희, 강성일, 유수남, 서상룡, 최영수, 강영선, 박승제. 2011. Analysis of Operation Status for Agricultural Tractors Over 75kW. J. of Biosystems Eng., ISSN 2234-1862, Volume 36, No. 6, pp.397-406

Abstract

Development of semi-active hydraulic front axle suspension control system based on road surface sensing of agricultural tractors

Lee, Junghwan

Department of Biosystems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In this study, as a part of the development of high performance tractor, we developed the control technology to improve the passive front axle suspension of domestic agricultural tractor. The front axle suspension acts to attenuate the impact of the road surface and improve the steering performance of tractor. However, the passive suspension system with the fixed characteristics developed in the previous studies can not actively cope with the various road surface conditions in which the agricultural tractor is used, and has a disadvantage in that it can not satisfy both ride comfort and steering performance at the same time. In addition, due to the characteristics of the hydraulic suspension designed to withstand a high load, there is a problem that the impact absorption efficiency is deteriorated due to the

slow reactivity when the electronic control is applied. In order to solve this problem, the this paper aimed to develop a suspension control technology of semi-active type using LiDAR sensor which can recognize the road condition in front of the vehicle. We have devised a method to quantify the roughness of the road surface using a 2D LiDAR sensor and designed an adaptive suspension controller based on it. We also developed an algorithm for recognizing road surface obstacles by comparing average values of road information measured by LiDAR sensors, and developed an algorithm that changes the damping force of suspension before passing obstacles. Based on the simulation, the performance verification of the control algorithm based on the roughness of the road was conducted, and the controller applicable to the actual vehicle was designed based on this. As a result of applying the roughness based control strategy to the actual vehicle, it was confirmed that the vertical acceleration of the vehicle, which is the index of the ride comfort, is 66.5%, and the vertical movement of the axle, which is the index of the steering, is 10.1% lower than that of the passive suspension. Also, as a result of bump recognition based control strategy, it was confirmed that the vertical acceleration of the body was reduced by 54% and the vertical displacement of the axle by 51%. Therefore, by applying the electronic control technology to the passive suspension system, it was concluded that the controlled suspension system has better performance than the passive system. In future research, it is required to study road recognition algorithm using inexpensive sensor considering mass production.

keywords : Front axle suspension, Semi-active control, LiDAR sensor, Road surface detection
Student Number : 2017-26681