

입력 지연과 이득 섭동을 고려한 능동 현가장치 제어

최 수 환¹⁾, 김 동 건²⁾, 서 수 경²⁾, 김 태 형^{*1)}

중앙대학교 기계공학과¹⁾, 중앙대학교 기계공학부²⁾

Control of Active Suspension Considering Input Delay and Gain Perturbation

Suhwan Choi¹⁾ · Donggeon Kim²⁾ · Sukyung Seo²⁾ · Tae-Hyoung Kim^{*1)}

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University¹⁾, School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University²⁾

Key words : Active suspension system(능동 현가장치 시스템), In-wheel-motor(인휠 모터), Input delay(입력 지연), Gain perturbation(이득 섭동), Multi-objective metaheuristic algorithm(다목적 메타휴리스틱 알고리즘)

교신저자, E-mail: kimth@cau.ac.kr

전기차는 기존 내연기관 차량에 비해 에너지 효율성과 환경 친화적 측면에서 많은 이점을 제공한다. 그 중에서 도 각 바퀴에 모터가 내장된 인휠 모터 구동 시스템은 개별 바퀴 제어를 통해 차량의 주행 성능을 향상시킬 수 있는 가능성으로 주목받고 있다. 그러나 이 시스템은 비현가 질량을 증가시켜 승차감과 접지력을 저하시킬 위험이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 능동 현가장치의 도입이 필요하다.

능동 현가장치는 차체를 불규칙한 도로의 진동으로부터 분리함으로써 승차감을 향상시킨다. ISO-2631에 따르면 사람은 4~8Hz 범위의 수직 방향 진동에 특히 민감하므로, 이 주파수 대역에서 차체의 수직 가속도를 줄임으로써 승차감을 개선할 수 있다. 또한 사람의 신체는 횡 방향으로 0.5~2Hz의 진동에 민감하므로, 차체의 수직 및 횡 방향 움직임을 모두 고려한 유한 주파수 제어를 위해 전차량 능동 현가장치 시스템이 필요하다.

능동 현가장치는 접지력, 현가 변위 한계, 구동기 포화, 모터의 하중 제한 등 차량의 주행 안정성과 관련된 제약 조건을 충족하도록 설계되어야 한다. 이때 차량의 승차감과 주행 안정성은 서로 상충하는 관계에 있다. 이러한 두 성능 요소 간의 균형을 효율적으로 고려하기 위해 다목적 최적 제어 방법이 사용될 수 있다.

실제 능동 현가장치 시스템에서는 타이어 변형과 같은 상태 변수를 정확하게 측정하기 어렵다. 실용적인 관점에서 볼 때, 적은 수의 측정 가능한 신호만을 요구하는 정적 출력 피드백 제어 방법을 사용하는 것이 더 적합하다. 그러나 상태 피드백 제어 문제는 선형 행렬 부등식(LMI)을 통해 쉽게 해결할 수 있지만, 출력 피드백 제어는 합성 조건으로 인한 쌍행렬 부등식(BMI)을 해결해야 하므로 실행 가능한 해를 찾는 데 어려움을 겪는다.

능동 현가장치 시스템의 제어 하드웨어는 계산 시간, 응답 시간, 긴 신호 전송 라인 등으로 인해 필연적으로 입력 시간 지연이 발생한다. 연구에 따르면 이러한 입력 시간 지연의 존재는 폐쇄 루프 시스템의 성능을 저하시키고, 심지어 시스템의 불안정성으로 이어질 수 있다. 또한 제어를 구현하는 과정에서 정확도 문제, 장치의 노후화 등으로 인해 제어 이득에 변화가 생길 수 있다. 따라서 일정 수준의 입력 지연과 제어 이득 섭동을 허용할 수 있는 제어가 필수적이다.

본 논문에서는 전차량 인휠 모터 구동 전기차 능동 현가장치에 대해 입력 지연과 이득 섭동을 고려한 다목적 유한 주파수 H_{∞}/GH_2 정적 출력 피드백 제어를 제안하고자 한다. 전차량 능동 현가장치 모델을 사용함으로써 수직 방향의 heave/pitch 움직임과 횡 방향의 roll 움직임 각각에 대한 승차감과 주행 안정성을 고려했다. 입력 지연과 이득 섭동을 고려한 유한 주파수 H_{∞} norm을 승차감과 관련된 성능 지표로 사용했으며, 주행 안정성과 관련된 지표로는 GH_2 norm을 사용했다. 두 성능 지표의 상충하는 문제를 해결함과 동시에 출력 피드백 합성 조건에서 발생하는 쌍행렬 부등식 문제를 해결하기 위해 다목적 입자 군집 최적화(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 알고리즘을 적용했다. 마지막으로 MATLAB/Simulink 기반의 불규칙한 도로 주행 시뮬레이션을 통해 설계한 제어기의 성능을 검증했다.