한국소음진동공학회 2013년 춘계학술대회논문집, pp. 71~72

하이브리드 기법을 이용한 롤운동 잔류 진동 제어

Minute vibration control of roll motion using hybrid strategy

김효준† · 박영필*
Hyo-Jun Kim and YoungPil Park

1. 서 론

자동차의 종-횡방향 특성과 관련된 설계 변수들은 조종성능뿐 아니라 동적 안정성에도 영향을 주게 되므로, 차량의 실제 설계에 있어서는 자체 성능및 안정성을 고려한 절충이 요구된다.

주행 차량에 조향 입력을 주는 경우, 횡방향 하중 이동(lateral load transfer)이 발생하며, 가혹한 조작조건(extreme operation)에서는 차량의 기하학적 제원 및 현가시스템 특성 등에 따라 롤 안정성을 상실하는 현상이 발생할 수 있다. 롤운동 안정성 문제는 자동차뿐 아니라, 차폭에 비하여 무게중심의 위치가 높게 위치하며 곡선 구간에서의 고속화를 지향하는 철도 차량 부문에서도 고려되고 있으며, 이를 능동적으로 개선하기 위한 연구 결과가 발표되고 있다. 롤 안정바(stabilizer bar) 적용과 같은 수동적 방법은 자동차의 롤 운동 특성을 개선하기 위한 전통적인 방안이나 그 제약점이 존재하며, 그동안 활발히 연구되어온 능동형 현가시스템의 경우는 제어성능 면에서 많은 장점에도 불구하고 고비용, 소모동력 등의 문제로 고성능 군용 차량 등에 제한적으로 적용되고 있다.

본 연구에서는, 이러한 수동형/능동형 현가 시스템에 대한 대안으로서 노면 외란에 대한 진동 제어용으로 적용하는 반능동형(semi-active) 현가계와 더불어 option으로 롤 제어시스템(ARC : Active Roll Control System)를 채용한 현가 시스템을 기반으로, 롤 제어 시스템의 작동기 동특성을 고려한 하이브리드 제어 기법을 적용하였다.

† 교신저자; 정회원, 강원대학교 기계공학과
E-mail : hjkimm@kangwon.ac.kr
Tel : 033-570-6322, Fax : 033-574-2993
* 연세대학교 기계공학과

2. 제어시스템

2.1 제어기 차량 모델

제어기 설계에 있어서 제어 대상 모델이 복잡하면 제어기 차수의 증가 등 제어시스템의 구현에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는, 식(1),(2)와 같이 운전자의 선회 조향 입력에 대하여 횡방향, 요(yaw), 롤 운동을 고려한 3자유도 차량 모델을 적용하여 제어기를 설계하였다.

$$E\dot{x}_p = A_o x_p + B_o M_a + L_o \delta_f \quad (1)$$

$$y = C_p x_p + D_p M_a \quad (2)$$

여기서, $x_p = [v \;\; r \;\; \phi \;\; p]^T$

2.2 제어기 설계

차량의 롤 운동 제어에 있어서는 실제 차량이 가변적인 조건 하에서 운행되므로 이때 발생되는 차량 파라미터의 변동과 이로 인한 시스템 동특성 변화를 고려한 제어 시스템의 설계가 요구된다.

전술한 차량 모델을 기반으로, 조향외란에 의한 롤 운동 제어를 위해 실제 차량과의 모델링 오차에 대해서 강건한 제어 성능을 얻을 수 있도록 식(3), (4), (5)의 일반화된 플랜트에 대한 상태방정식을 기반으로 출력귀환 H_∞제어 기법을 적용하였다.

$$\dot{X} = AX + B_1 w + B_2 u \quad (3)$$

$$z = C_1 X + D_{11} w + D_{12} u \quad (4)$$

$$y = C_2 X + D_{21} w + D_{22} u \quad (5)$$

조향외란-출력 간의 전달함수와 파라미터 변동 등으로 인한 실제 차량과 모델간의 차이를 덧셈형 모델링 오차 $\Delta_a(s)$로 고려한 전달함수에 대하여

식(6),(7)과 같이 제어 성능과 강건 안정성을 만족하도록 혼합감도 문제를 적용한 제어기 설계 과정을 수행하였다.

$$||W_s(s)M(s)||_\infty < 1 \quad (6)$$

$$||W_a(s)N(s)||_\infty < 1 \quad (7)$$

그 결과 식(8), (9)로 나타내는 롤 제어 로직을 구현하였다.

$$\dot{x_K} = A_K x_K + B_K \phi \quad (8)$$

$$M_d = C_K x_K + D_K \phi \quad (9)$$

여기서, $K(s) = C_K(sI - A_K)^{-1}B_K + D_K$

2.3 하이브리드 기법

설계된 롤 제어 시스템을 실차에 적용하는 경우에는, 작동 시스템 모듈의 동적 특성을 고려해야 한다. 작동기 모듈의 대역폭이 넓을수록 유리하지만, 장치 구현 매카니즘/비용을 고려해야 하며, 모듈의 응답성을 개선하기 위해 롤 제어 로직에 다중제어기를 추가로 적용할 수 있지만 제어시스템이 복잡해지는 단점이 있다. 본 논문에서는 이에 대한 대안으로, 상용화되어 실차 적용이 증가하는 반능동형 가변 댐퍼 장착 차량을 기반으로, 과도응답 성능을 향상 시키도록 하이브리드 제어 기법을 적용하였다. 가변 댐퍼를 이용한 롤제어모우멘트 관계식은 식(10),(11)로 나타낼 수 있다.

$$M_d = \sum_{j=1}^{2} M_j \quad (10)$$

$$M_i = F_{li}\frac{t_i}{2} - F_{ri}\frac{t_i}{2} \quad (i=1,2) \quad (11)$$

3. 시뮬레이션

실제 차량에의 적용성을 평가하기 위하여 전술한 롤 제어 시스템을 차량의 요/ 종/ 횡방향 운동과 강체로 고려된 차체의 수직, 롤, 피치 운동, 차륜의 수직 운동 및 비선형 타이어 모델을 포함하는 10자유도 전차량 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

제어기 설계 과정에서의 가중함수는 차량모델 가변 조건, 타이어 특성, 가변 댐퍼특성, 실제 차량에서 모델링되지 않은 고차모드 등을 고려한 강건 안정성과 롤 제어 성능을 만족하도록 전차량 모델의 시뮬레이션을 통해 최종 결정하였으며, 다양한 조건에서의 시뮬레이션을 수행하여 제어 특성을 파악하였다.

Fig.1은 J-turn 입력 조건에서의 결과를 비제어시, 롤 제어만 적용, 하이브리드 기법 적용 시에 대하여 각각 비교하여 나타내는데, 도시한 롤 모드 평면도는 이러한 운전자 조향 조작 조건에서 롤 운동의 응답 특성을 가시적으로 표현하는데 유용하다. 결과에서처럼, 수동 차량 대비 롤 제어를 통한 롤 운동 억제 효과와 하이브리드 기법 적용을 통한 안정적 개선 효과를 확인할 수 있다. 이러한 결과들로부터 추가적인 다중제어로직/고가의 고응답 작동 모듈의 적용없이 하이브리드 기법의 적용이 효율적인 롤 운동 응답 특성으로의 개선에 효과적임을 알 수 있다.

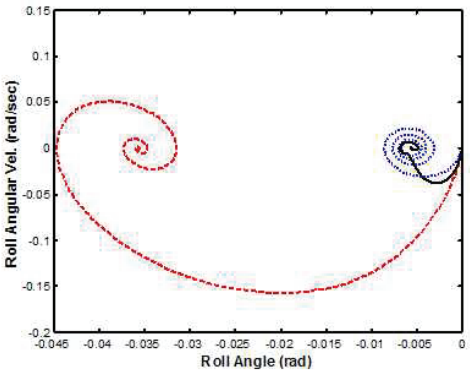

Fig. 1 Comparison of roll mode phase portraits (dashed:uncontrolled, dotted:ARC only, solid:hybrid control)

4. 결 론

본 연구에서는 운전자의 조향 조작으로 인한 차량의 롤 운동을 개선하기 위하여 차량의 가변 조건과 타이어 특성을 고려하여 설계된 제어기를 전차량 모델에 적용하여 제어 효과를 평가하였다. 작동 모듈의 동특성 영향을 고려하여 제안된 하이브리드 제어 기법은 수동 차량 대비 롤 운동의 응답 특성을 개선시키는데 효과적임을 확인할 수 있었다.