

# 제한 대역폭을 가진 능동 현가 장치에 대한 Look-ahead 예견 제어 - 궤도 차량에의 응용

## Look-ahead Preview Control with Limited Bandwidth Active Suspension - Application to Tracked Vehicle Systems

유성필† · 박영진\* · 박윤식\*\*

Seongpil Ryu, Youngjin Park and Yoonsik Park

**Key Words** : Preview control(예견 제어), Tracked Vehicle Systems(궤도 차량), limited bandwidth suspension(제한 대역폭 현가장치)

### ABSTRACT

The look-ahead preview control with the use of limited bandwidth active suspensions is presented. Both a linearized tracked vehicle model and a complex nonlinear model based on a commercial multibody dynamic program are used to verify the performance of preview control. The performance of the preview control system is evaluated on the ride quality which is estimated from the acceleration of the driver position. Due to the practical advantages associated with the use of limited bandwidth active control in comparison with full bandwidth systems, the results are considered important to the future development of active tracked vehicle suspensions.

### 기호설명

- $x(t)$  : 선형화된 궤도차량 모델의 상태 변수
- $x_{act}(t)$  : 구동기 모델의 상태 변수
- $u(t)$  : 구동기 출력
- $r(t)$  : 예견 정보
- $f(t)$  : 예견 제어기 입력

## 1. 서 론

궤도 차량의 경우 주로 험지를 주행하므로, 주행 시의 적절한 수준의 승차감 보장, 사격 시 차체의 안정성 제공 그리고 정밀 유도 무기 탑재 시 진동 절연 기능 등을 고려하여 현가 장치를 설계하여야 한다. 하지만 기존의 수동형 현가 장치로는 성능 향상에 한계가 존재하므로, 최근에는 차체 및 현가 장치의 상대 속도를 이용하여 스프링 및 댐퍼특성을 제어하는 반능동형 현가 장치와 능동형 현가 장치를 장착하여 궤도 차량의 진동을 제어하려는 연구가 진행되고 있다<sup>(1-2)</sup>.

능동형 현가 장치는 수동형과 반능동형 현가장치보다 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 일반적인

현가 장치 시스템에서는 궤환 제어만을 사용하고 있어, 보다 나은 성능을 보장하기 위해서는 현재의 시스템 및 노면정보를 사용할 수 있다. 이와 같이 미래의 노면 정보를 이용하는 능동형 현가 장치를 예견 현가 장치라 하며, 기존의 피드백 제어 방식의 능동형 현가 장치와 달리 노면 정보를 미리 알고 대처하기 때문에 훨씬 큰 제어 성능의 향상을 기대할 수 있다<sup>(3-9)</sup>.

차량 전방에 설치된 예견 센서를 통해 노면 정보를 측정하여 각 바퀴의 현가 장치를 제어하는 Look-ahead 예견 제어기 설계에 관한 연구는 주로 선형 시스템에 대하여 진행되어왔으며, 비선형 시스템인 궤도 차량에 대한 예견 제어기 설계에 관한 연구는 김윤선과 박영진이 유일하다<sup>(11)</sup>. 제안된 기준 모델 추종 Look-ahead 예견 제어기는 선형 최적 예견 제어기<sup>(8)</sup>와 시간 지연 제어기<sup>(10)</sup>를 혼합하여 설계되었다. 그러나 이상적인 구동기를 가정함으로써 제어기 성능과 대역폭에 한계가 존재하는 실제 구동기와와의 관계를 규명하지 못하여, 제어 시스템을 구현하는 경우 구동기 설계에 어려움이 따르게 된다. 제한된 대역폭을 가지는 구동기를 포함하는 시스템의 예견 제어기 설계에 대한 연구는 Pilbeam과 Sharp<sup>(12)</sup>, Prokop과 Sharp<sup>(13)</sup>, Soliman 과 Crolla<sup>(14)</sup>에 의해 이루어졌으나, 차륜 차량에 한정되어 연구되었다.

. 이에 본 연구에서는 궤도 차량에 대한 기준 모델 추종 Look-ahead 예견 제어기법에 다양한

† 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : spryu@kaist.ac.kr  
Tel : (042) 869-3076, Fax : (042) 869-8220

\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과

대역폭을 가지는 구동기 동역학을 고려함으로써, 구동기의 대역폭과 예견 제어 성능을 비교하고, 이를 통해 예견 제어 시스템 구현에 필요한 구동기의 대역폭에 대하여 알아보고자 한다.

각 장의 내용은 다음과 같다. 2 장에서는 제어기 설계에 사용된 선형화된 궤도 차량 모델과 실제 궤도 차량으로 고려되는 상용 프로그램인 Recurdyn™을 이용한 비선형 모델에 대하여 설명한다. 3 장에서는 1 차로 모델링된 구동기 동역학을 이용한 예견 제어기 설계를, 그리고 4 장에서는 설계된 예견 제어기를 적용한 모의 실험 결과를 나타낸다. 마지막으로 5 장에서는 연구 결과를 요약한다.

## 2. 궤도 차량 모델링

일반적인 차륜 차량의 현가장치는 지면과 거의 수직하게 장착되어 있으므로, 선형으로 모델링이 가능하다. 하지만 궤도 차량에 장착된 trailing arm 형식의 현가 장치는 로드 암이 회전하는 기구학적 조건으로 인해 비선형으로 모델링 될 수밖에 없다. 만약 일반 차륜 차량과 같이 수직하게 장착된 현가 장치로 가정하여 예견 제어를 하는 경우는 제어 성능을 떨어뜨리거나 시스템을 불안정하게 만들 수 있다<sup>(15)</sup>. 따라서 제어기 설계를 위한 선형 모델은 궤도 차량의 비선형 모델로부터 선형화한 모델을 사용하고자 한다. 라그랑지안 방정식을 이용하며, 궤도는 정확한 모델링이 불가능하고 현가상 질량의 운동에 미치는 영향이 크지 않으므로 모델링에서 제외하였다<sup>(11)</sup>. 또한 설계된 예견 제어기를 실제 궤도 차량에 적용하여 성능을 분석하기 위해, 본 연구에서는 상용 프로그램인 Recurdyn™을 이용하며 선형 모델에서 생략되었던 궤도를 고려하였다.

## 3. 구동기 모델링 및 예견 제어기 설계

본 연구에서는 구동기의 대역폭 크기에 따른 예견 제어기의 성능 변화를 살펴보고자한다. 이를 위해 구동기는 가장 간단한 형태인 1 차의 시간 지연요소로 모델링하여 제어기 설계에 사용한다 (Fig.1 참조).

다음의 선형화된 궤도 차량 모델에 대하여

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Er(t) \quad (1)$$

아래 식으로 표현되는 구동기 동역학을 고려할 때,

$$\begin{aligned} \dot{x}_{act}(t) &= A_{act}x_{act}(t) + B_{act}f(t) \\ u(t) &= C_{act}x_{act}(t) + D_{act}f(t) \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)-(2)를 하나의 상태 변수로 부가한 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a r(t) \quad (3)$$

여기서

$x_a(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x_{act}(t) \end{bmatrix}$ ,  $A_a = \begin{bmatrix} A & BC_a \\ \mathbf{0} & A_{act} \end{bmatrix}$ ,  $B_a = \begin{bmatrix} BD_{act} \\ B_{act} \end{bmatrix}$ ,  $E_a = \begin{bmatrix} E \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ ,  $A, B, E$ 는 선형 궤도 차량의 공칭 모델을 나타내는 알고 있는 행렬이고,  $A_{act}, B_{act}, C_{act}$ 와  $D_{act}$ 는 각 차단 주파수에 따른 행렬을 나타낸다.

식(3)을 바탕으로 선형 예견 제어기를 설계하여 기준 모델을 생성하며, 기준 모델의 Heave 변위와 속도, Pitch 각과 각속도를 추종하도록 시간 지연 제어기가 설계되어 예견 제어기를 이루게 된다. Fig. 2는 구동기 동역학을 포함한 기준 모델 추종 Look-ahead 예견 제어기를 나타낸다.

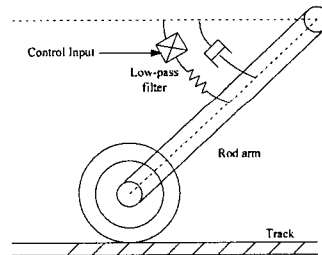


Fig. 1 Tracked Vehicle Suspension Model

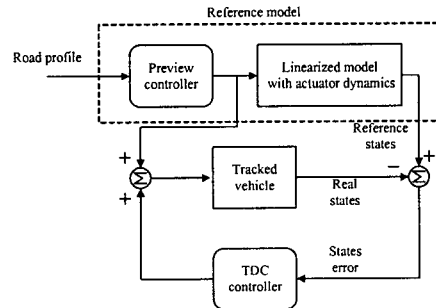


Fig. 2 Reference Model Tracking Look-ahead Preview Control Scheme

**Table 1** Weighted RMS Acceleration

	Linear Model		
	10Km/hr	20Km/hr	30 Km/hr
Passive	1.11 (100%)	1.14 (100%)	1.14 (100%)
3Hz	0.25 (23%)	0.38 (33%)	0.52 (45%)
6Hz	0.17 (15%)	0.25 (22%)	0.33 (29%)
15Hz	0.12 (11%)	0.17 (15%)	0.21 (20%)
30Hz	0.10 (9%)	0.15 (13%)	0.19 (16%)
100Hz	0.10 (9%)	0.14 (12%)	0.17 (15%)
Preview	0.10 (9%)	0.14 (12%)	0.17 (15%)

	Nonlinear Model (Recurdyn™)		
	10Km/hr	20Km/hr	30 Km/hr
Passive	0.58 (100%)	0.98 (100%)	0.89 (100%)
3Hz	0.34 (58%)	0.76 (78%)	0.78 (88%)
6Hz	0.27 (46%)	0.52 (53%)	0.50 (56%)
15Hz	0.16 (28%)	0.31 (32%)	0.32 (36%)
30Hz	0.09 (16%)	0.18 (19%)	0.29 (32%)
100Hz	0.07 (12%)	0.15 (16%)	0.27 (30%)
Preview	0.07 (12%)	0.15 (16%)	0.26 (29%)

## 후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 지정 가상입체음향연구소 (National Research Laboratory)와 2005 년 두뇌 한국 21 (Brain Korea 21)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

(1) Park, D. W., 1999, "Vibration Control of a Tracked Vehicle with ER suspension units (II)," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 23, No. 11, pp. 1960~1969.

(2) Kim, J. S., "Function and Design Characteristics of the Tracked Vehicle Suspension," *J. of the KSME*, Vol. 39, No. 11, pp. 57~61.

(3) Bender, E. K., 1968, "Optimum Linear Preview Control with Application to Vehicle Suspension," *ASME J. of Basic Engineering*, Ser. D, Vol. 90, No. 2, pp. 213~221.

(4) Tomizuka, A. G., 1976, "Optimum Linear Preview Control with Application to Vehicle Suspension-revisited," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 98, No. 3, pp. 309~315.

(5) Thomson, A. G., Davis, B. R. and Pearce, C. E. M., 1980, "An Optimal Linear Active Suspension with Finite Road Preview," *SAE Technical Paper*, No. 800520.

(6) Hrovat, D., Margolis, D. L. and Hubbard, M., 1988, "An Approach toward the Optimal Semi-Active Suspension," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 110, No. 3, pp. 288~296.

(7) Yoshimura, T. and Edokoro, K., 1993, "An Active Suspension Model for Rail/Vehicle Systems with Preview and Stochastic Optimal Control," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 166, No. 3, pp. 507~519.

(8) Hac, A. and Youn, I., 1993, "Optimum Design of Active and Semi-Active Suspensions including Time Delays and Preview," *ASME J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 115, pp. 498~508.

(9) Huisman, R. G. M., 1994, "A Controller and Observer for Active Suspensions with Preview," Ph.D. Dissertation, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering.

(10) Youcef, T. K., Bobbett, J., 1991, "Stability of Uncertain Linear System with Time Delay", *ASME J. of Dynamic Systems Measurement Control*, Vol. 113, pp.558-567.

(11) Kim, Y. S. and Park, Y. J., 2002, "Preview Control of High Mobility Tracked Vehicle Suspension," *Asian Conference on Multibody Dynamics*.

(12) Pilbeam, C. and Sharp, R. S., 1993, "On the Preview Control of Limited Bandwidth Vehicle Suspensions," *Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol.207, pp. 185~193.

(13) Prokop, G., Sharp, R. S., 1995, "Performance Enhancement of Limited-Bandwidth Active Suspensions by Road Preview," *IEEE Proc.-Control Theory Appl.*, Vol.142, No. 2, pp. 140~148.

(14) Soliman, A. M. A., and Crolla, D. A., 2001, "Limited Bandwidth Active Suspension Employing Wheelbase Preview," *SAE Technical Paper*, No. 2001-01-1063.

(15) Hoogterp, F. B., 1996, "Active Suspension in the Automotive Industry and the Military," *SAE Technical paper*, No. 961037.

(16) Kim, H., 1995, "A Study for the Control of Passenger Car Suspension for ride Comfort," Ph.D. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering.

(17) Gillespie, T. D., 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," *SAE Inc*.

(18) Ryu S., Kim, Y., and Park, Y., 2003, "Preview Control of High Mobility Tracked Vehicle Suspensions Based on a Ride Quality," *Asia-Pacific Vibration Conference*.

#### 4. 모의 실험

본 장에서는 기준 모델에 해당하는 선형 궤도 차량 모델과 Recurdyn™ 을 이용한 비선형 궤도 차량 모델에 대하여 구동기 대역폭 변화에 따른 운전석에서의 승차감 변화를 분석한다. 이를 위해 국제 규격인 ISO2631 의 수직 방향 진동에 관한 가중치 함수를 적용하여 구한 RMS 가속도를 사용한다.<sup>(18)</sup>

성능 검증에 사용된 환경은 다음과 같다. 예견 거리는 2m 를 사용하였으며, 30km/hr 의 정속 주행 시 0.25m 의 반원형 범프 노면을 고려하였다. Fig.3 과 Fig.4 는 선형 궤도 차량 모델과 실제 시스템인 비선형 궤도 차량 모델에 대하여 구동기의 차단 주파수 크기에 따른 가중 RMS 가속도를 나타낸 그림이다. 제어하지 않는 경우를 제외하고 구동기 동역학을 고려한 경우와 이상적인 구동기를 가정한 경우의 결과가 동일함을 알 수 있다. 이는 기준 모델을 추종하는 시간 지연 제어가 잘 작동함을 의미한다. 또한 제어하지 않는 경우, 비선형 궤도 차량은 궤도의 필터링 효과에 의해 선형 궤도 차량 모델에 비해 성능이 좋은 것을 알 수 있다. Fig.5 와 Fig.6 은 각각에 대하여 제어하지 않은 경우를 기준으로 가중 RMS 가속도를 백분율로 나타낸 그림이다. 마지막으로 Table 1 은 운행 속도가 10km/hr, 20km/hr, 그리고 30km/hr 일때의 결과를 숫자로 표시한 것이다. 요컨대, 실제 궤도 차량에 예견 제어를 구현한 결과는 비선형 모델을 사용한 경우의 결과를 참조하면 되며, 구동기의 차단 주파수가 약 100Hz 이상이면 이상적인 구동기를 사용하는 경우의 성능과 거의 유사한 것을 확인 할 수 있다.

#### 5. 결론

궤도 차량의 주행 성능 향상을 위해 제안된 예견 제어기법을 실제 시스템에 적용하기 위해 요구되는 구동기의 동특성을 살펴보기 위하여, 본 연구에서는 다양한 구동기의 차단 주파수에 따른 예견 제어 성능을 운전석에서의 승차감 관점에서 살펴보았다. 기준 모델인 선형 궤도 차량 모델과 비선형 궤도 차량 모델에 대하여 모의 실험을 수행하였으며, 각 차단 주파수에 따른 가중 RMS 가속도 값을 나타내었다.

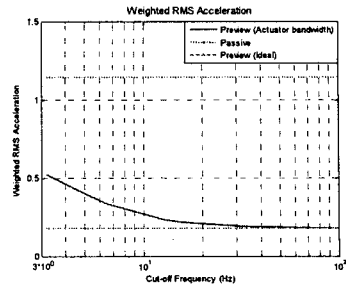


Fig. 3 Weighted RMS Acceleration with Actuator Dynamics (Linear Model)

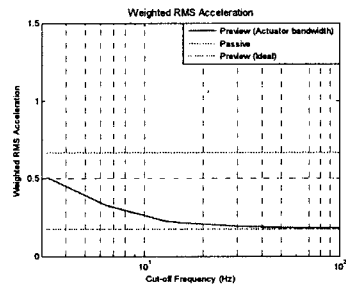


Fig. 4 Weighted RMS Acceleration with Actuator Dynamics (Nonlinear Model)

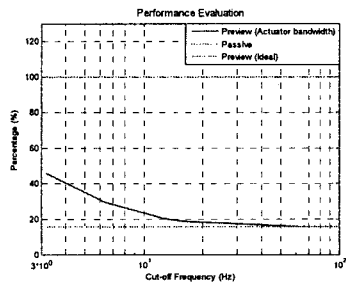


Fig. 5 Performance Evaluation with Actuator Bandwidth (Linear Model)

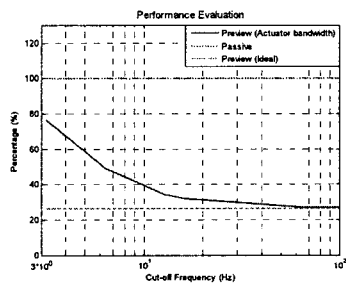


Fig. 6 Performance Evaluation with Actuator Bandwidth (Nonlinear Model)