

공기제동 시스템의 감속도 제어기 설계

Design of Deceleration Controller for Air Braking System

이광국*
K. K. Lee

김원경**
W. K. Kim

김명룡***
M. Y. Kim

윤성철***
S. C. Yoon

백광선***
K. S. Baik

ABSTRACT

Electric vehicle that is manufactured present by development of electric vehicle technology were available automatic driving. Control of air braking system for precision stopping is important at automatic driving. Current Electric vehicle is doing precision stopping using braking force control. Braking force control is difficult to take static deceleration by rail condition or change of friction coefficient. Therefore, Proposed the controller in this study is deceleration controller. Designed controller is a robust controller that take state control characteristic for modelling error.

1. 서론

전동차 기술의 발달로 현재 제작되는 전동차는 자동 및 무인운전이 가능하게 되었다. 자동 또는 무인운전 시 정밀 정차를 위한 공기제동 시스템의 제어가 중요하다. 현재의 제동제어는 제동장치의 제동력을 제어하여 정밀정차를 하고 있다. 제동력 제어는 전동차의 요구 감속도에 대한 요구제동력을 TCMS(Train Control Monitoring System)에 의해 연산하여 요구제동력 지령을 ECU(Electronic Control Unit)에 전달하고 ECU는 제동력 지령 값에 적합한 제동실린더 내의 압력을 계산하여 제동실린더 내의 압력을 일정하게 제어하는 방식이다. 이 같은 제동력 제어의 경우 전동차 선로의 구배 변화나 마찰제의 마찰계수 변화에 의해 일정 감속도 제어가 어렵다. 일반적으로 전동차 운영선로는 여러 가지 구배 조건을 가지고 상구배의 경우 실제 전동차의 감속도는 요구 감속도보다 증가하게 되고, 하구배의 경우 감소하게 된다. 마찰제는 제동시점, 제동속도에 따라 마찰계수가 변화하게 되고, 고정된 평균마찰계수를 이용하여 제동력을 연산할 경우 요구된 제동 감속도를 제어하기가 어렵다.

따라서 본 논문에서는 전동차의 속도 신호에서 연산된 감속도 신호를 이용하여 감속도를 직접 제어하는 감속도 제어기 설계를 고찰하고자 한다. 제안된 제어기는 선로의 구배나 마찰제의 마찰계수 변화에 대해 강인한 감속도 제어 성능을 달성 할 수 있도록 외란보상기를 이용하여 제어기를 설계하고 설계된 제어기의 제어성능을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

* 한국철도기술연구원 위촉연구원, 비회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2. 본문

2.1 디스크제동 시스템 모델링

디스크제동 시스템의 계략도는 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나타낸다.

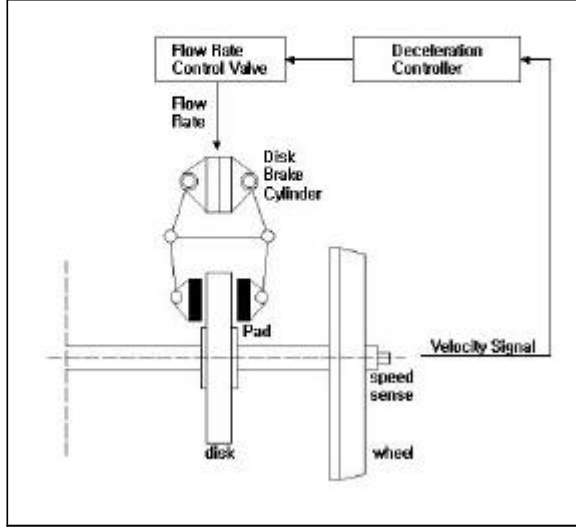


Fig. 1 Structure of Disk Brake System

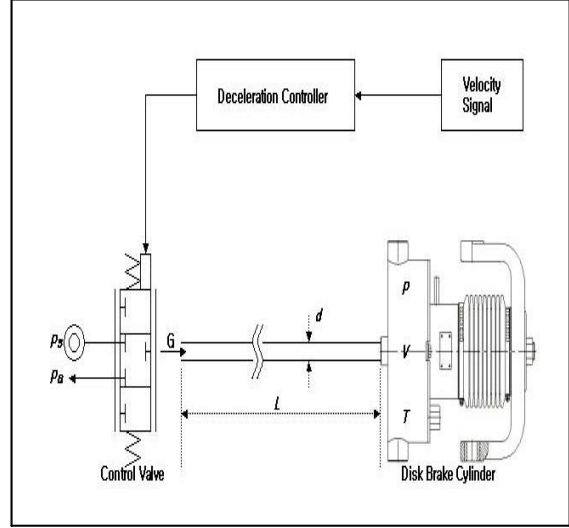


Fig. 2 Structure of Deceleration Control System

Fig. 1,2는 디스크제동 시스템의 구조로 전동차 휠 축에서 받은 속도 신호를 이용하여 감속도치를 계산하고, 계산된 감속도 신호가 감속도 제어기를 통해 제어입력으로 연산되어 제어밸브를 조정하고, 제어밸브를 통해 흐르는 유량이 디스크 실린더의 압력을 변화시켜 전동차의 감속도를 제어하는 구조이다. Fig. 2에서 P_s 는 공급압력, P_a 는 대기압력, $L[m]$ 은 관로의 길이, $d[m]$ 는 관로의 직경, $P[kgf_cm^2]$ 는 디스크 실린더내의 압력, $V[m^3]$ 는 디스크 실린더의 체적, $T[K]$ 는 디스크 실린더내의 온도를 나타낸다. 디스크당 제동력을 $F_{B/D}[N]$, 디스크당 차량의 중량 $m_{B/D}[kg]$, 차량의 감속도 $b[m/s^2]$, 휠 직경 $D_{wheel}[mm]$, 제륜자의 마찰계수 f_{pad} , 마찰반지름 $r_{reib}[mm]$ 라 하면, 디스크당 브레이크력은 다음식으로 정리된다.

$$F_{B/D} = \frac{m_{B/D} \cdot b \cdot D_{wheel}}{2 f_{pad} \cdot r_{reib}} \quad (1)$$

디스크 배율 i_{rig} , 기계효율 e_{rig} , 실린더의 피스톤 면적 $A_{bc}[cm^2]$, 브레이크 반력 $F_c[N]$ 를 이용하여 실린더내의 압력 P 는 다음식으로 정리된다.

$$P = \frac{F_{B/D}}{10 i_{rig} \cdot e_{rig} \cdot A_{bc}} + \frac{F_c}{10 A_{bc}} \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용하여 실린더내의 압력과 차량 감속도 관계를 정리하면 다음식으로 정리된다.

$$P = \frac{m_{B/D} \cdot b \cdot D_{wheel}}{20 i_{rig} \cdot e_{rig} \cdot A_{bc} \cdot f_{pad} \cdot r_{reib}} + \frac{F_c}{10 A_{bc}} \quad (3)$$

비열비 κ , 기체상수 $R[J/kg \cdot K]$, 관로의 단면적 $A[m^2]$, 유량 $G[kg/s]$ 라하고, 공기의 유동상태를 단열변화로 가정하여, 관로의 동특성을 무시하고, 단순한 용량 요소로 취급하여 유입유량과 실린더내의 압력과의 관계를 기술하면 다음식으로 정리된다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\chi \cdot R \cdot T}{98000(V + A \cdot L)} G \quad (4)$$

제어밸브의 유효단면적을 $S_e[m^2]$, 유량이득 $k_q(=dG/dS_e)[kg/s \cdot m^2]$, 제어밸브입력전압 u 와 유효단면적과의 관계 $k_v(=dS_e/dVolt)[m^2/Volt]$ 라 하고, 식 (3)을 미분하여 제어밸브 입력과 차량 감속도와의 관계를 기술하면 다음식으로 정리된다.

$$\frac{db}{dt} = \frac{k_q \cdot k_v \cdot \chi \cdot R \cdot T \cdot i_{rig} \cdot e_{rig} \cdot A_{bc} \cdot f_{pad} \cdot r_{reig}}{4900 m_{B/D} \cdot D_{wheel} \cdot (V + A \cdot L)} u \quad (5)$$

식 (5)를 Laplace 변환하여 제어밸브의 입력 u 와 차량의 감속도 b 와의 관계를 정리하면 다음과 식과 같다.

$$G(s) = \frac{b(s)}{u(s)} = \frac{k_q \cdot k_v \cdot \chi \cdot R \cdot T \cdot i_{rig} \cdot e_{rig} \cdot A_{bc} \cdot f_{pad} \cdot r_{reig}}{4900 m_{B/D} \cdot D_{wheel} \cdot (V + A \cdot L)} \cdot \frac{1}{s} \quad (6)$$

2.2 감속도 제어기의 설계

Table 1은 제어기 설계에 사용된 파라미터를 나타낸다. Table 1을 감속도 제어 모델식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{b(s)}{u(s)} = \frac{0.89054}{s} \quad (7)$$

Table 1 Physical Parameter

k_q	1382	i_{rig}	3.2	$m_{B/D}$	3975
k_v	2.33×10^{-6}	e_{rig}	0.95	D_{wheel}	860
κ	1.4	A_{bc}	323.7	V	1.01977×10^{-3}
R	287	f_{pad}	0.33	A	1.76625×10^{-4}
T	293	r_{reig}	261	L	6.42

Fig. 3은 감속도 제어기의 블록선도를 나타내고, b_{ref} 는 감속도 지령치, d 는 외란, $real_b$ 는 차량의 감속도, $G_0(s)$ 는 비례게인 kp 를 이용한 감속도 제어계, $G_n(s)$ 는 $G_0(s)$ 의 공칭모델, $Q(s)$ 는 안정화 필터로 구성되었다. 비례게인 kp 는 식 (7)의 감속도 제어 모델식이 안정한 시스템이므로 제어특성 및 저주파를 고려하여 1.5로 설정하였고, 공칭모델 $G_n(s)$ 는 비례게인 kd 를 이용하여 식 (8)과 같이 설정하였다.

$$G_n(s) = \frac{1.33581}{s + 1.33581} \quad (8)$$

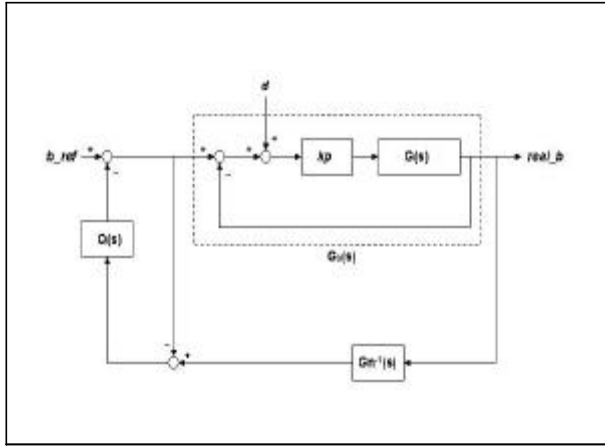


Fig. 3 Deceleration Controller Block Diagram

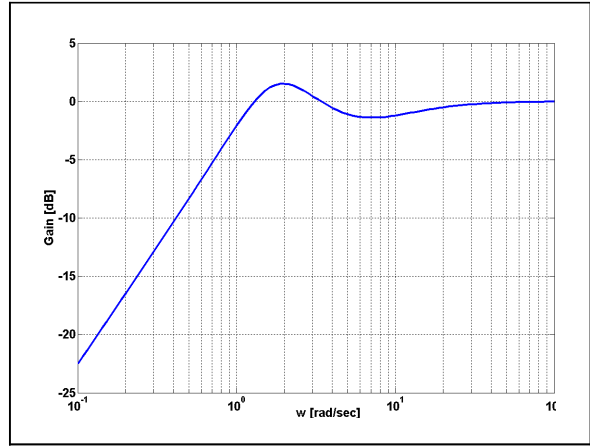


Fig. 4 Sensitivity Characteristics

안정화 필터 $Q(s)$ 는 동일차원 관측기(full-order observer)의 형태로 Fig 4와 같이 감속도 제어 시스템의 감도특성이 저주파수 영역에서 낮게 설정하여 외란 d 에 대한 출력 $real_b$ 가 저감되도록 $5[\text{rad/s}]$ 에 2중근을 가지도록 식 (9)와 같이 구성하였다.

$$Q(s) = \frac{25}{s^2 + 10s + 25} \quad (9)$$

2.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 3과 같이 구성된 제어기를 이용하여 감속도 제어를 한 결과와 제동력 제어 시스템을 이용한 감속도 변화를 시뮬레이션을 통해 고찰해 보았다. Fig. 5는 차량의 속도가 95km/h 에서 3.5km/h/s 의 감속도를 가지도록 제동력 제어 시스템을 통해 시뮬레이션한 결과로 브레이크 라이닝의 마찰계수를 제동초기, 제동중기, 정지직전으로 나누어 제동초기와 정지직전은 마찰계수 증가를 가정하고 시뮬레이션 한 결과이다. 마찰계수의 변화에 따라 제동 초기와 정지직전의 감속도가 증가함을 고찰할 수 있다. 그러므로 제동력 제어를 통해서는 일정한 감속도 유지가 곤란함을 알 수 있다. Fig. 7은 Fig. 3과 같이 설계된 제어기를 이용하여 Fig. 5와 동일한 마찰계수 조건에서 시뮬레이션 한 결과이고, 제동력 제어를 한 결과와 비교하여 일정한 감속도를 유지함을 고찰할 수 있다.

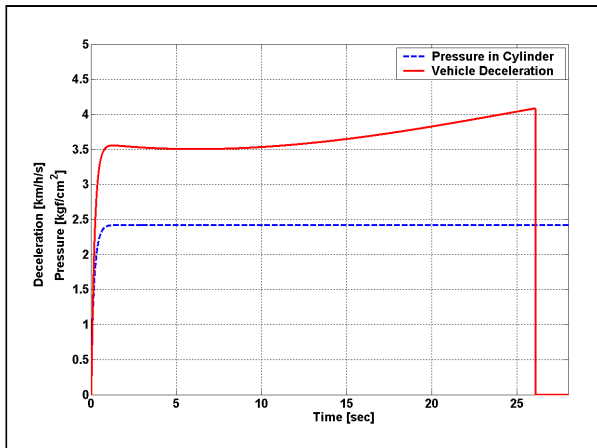


Fig. 5 Vehicle Deceleration with the Braking Force Control (Braking to 95km/h , Request Deceleration 3.5km/h/s)

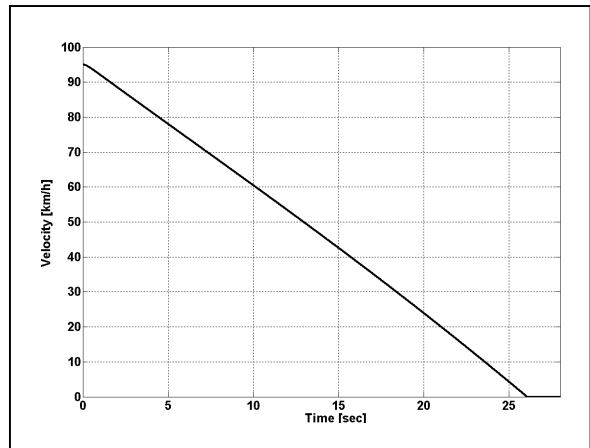


Fig. 6 Vehicle Velocity with the Braking Force Control (Braking to 95km/h , Request Deceleration 3.5km/h/s)

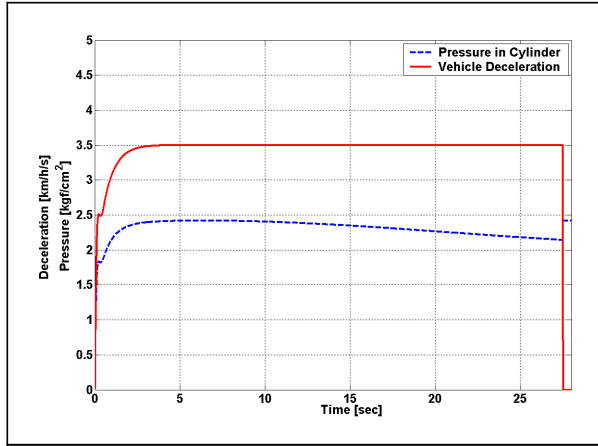


Fig. 7 Vehicle Deceleration with the Designed controller (Braking to 95km/h, Request Deceleration 3.5km/h/s)

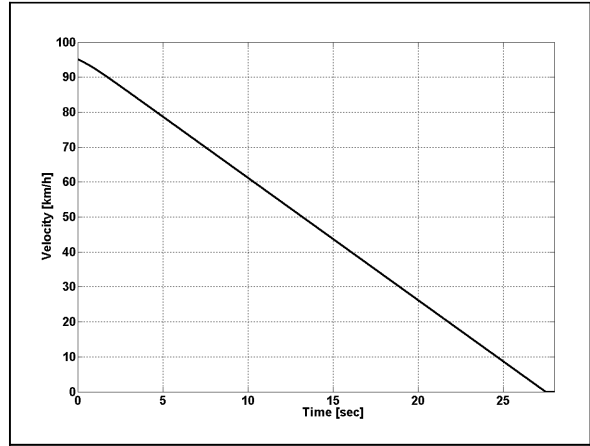


Fig. 8 Vehicle Velocity with the Designed controller (Braking to 95km/h, Request Deceleration 3.5km/h/s)

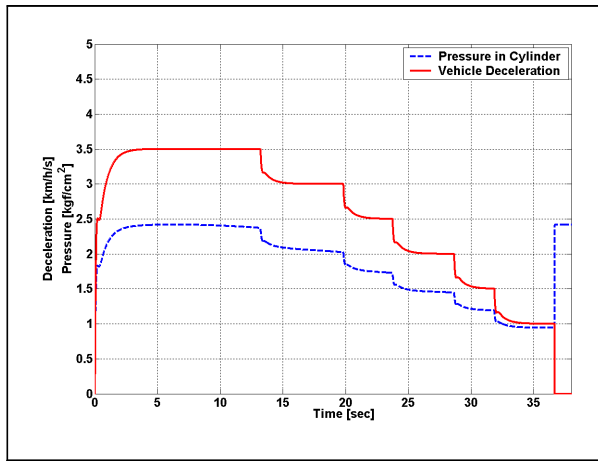


Fig. 9 Vehicle Deceleration with the Designed controller (Braking to 95km/h, Changed Request Deceleration)

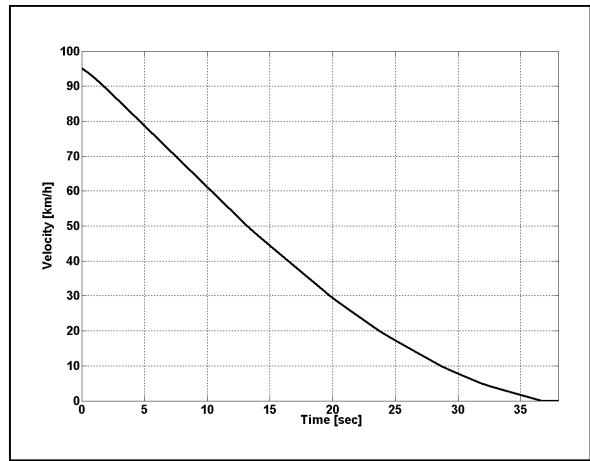


Fig. 10 Vehicle Velocity with the Designed controller (Braking to 95km/h, Changed Request Deceleration)

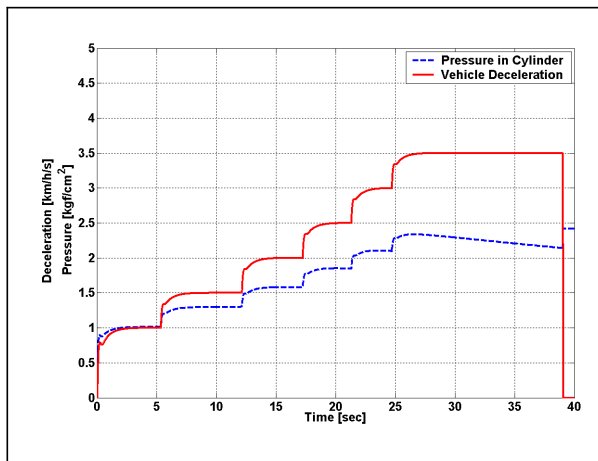


Fig. 11 Vehicle Deceleration with the Designed controller (Braking to 95km/h, Changed Request Deceleration)

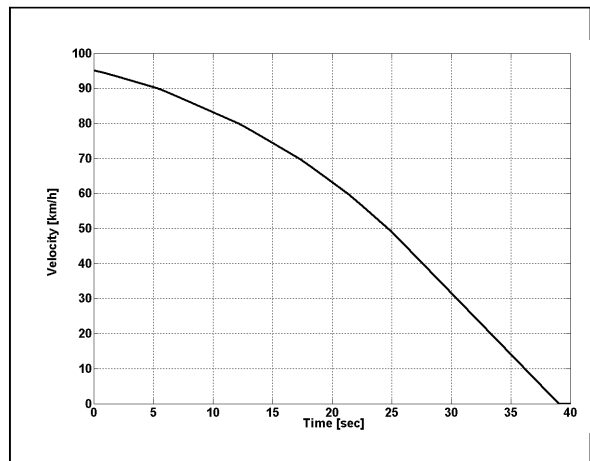


Fig. 12 Vehicle Velocity with the Designed controller (Braking to 95km/h, Changed Request Deceleration)

Fig. 9, 11은 설계된 감속도 제어기를 통하여 제동 중에 감속도 지령치를 변화한 결과로 Fig. 9는 제동초기에는 감속도를 3.5km/h/s, 속도가 50km/h 이하에서는 감속도를 3.0km/h/s, 속도가 30km/h 이하에서는 감속도를 2.5km/h/s, 속도가 20km/h 이하에서는 감속도를 2.0km/h/s, 속도가 10km/h 이

하에서는 감속도를 1.5km/h/s, 속도가 5km/h 이하에서는 감속도를 1.0km/h/s 으로 감속도 지령치를 변화시켜도 제어성능이 양호함을 알 수 있다. Fig. 11은 감속도 지령치를 증가시킨경우로 역시 제어성능이 양호함을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 전동차의 제동특성을 향상하기 위하여 전동차의 감속도 제어를 제안하고, 감속도 제어를 위한 제어기 설계를 고찰하고, 설계된 제어기의 타당성을 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 설계된 제어기는 제어대상의 공칭 모델과 안정화 필터를 이용하여 외란에 강인한 외란 보상기 형태로 제어기를 구성하고, 외란에 의한 제어대상의 모델 변화에도 제어성능이 양호함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 설계된 감속도 제어시스템을 이용하여 전동차의 자동 또는 무인운전을 할 경우 정밀 정차 향상에 도움이 될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1998. 2) □□도시철도차량 표준사양□□
2. Mccloy, D. and Martin, H. R.(1980) □□Control of Fluid Power□□
3. Ogata, K.(1999) □□Modern control engineering□□