

철도차량 제동기의 압력제어에 관한 연구

A Study on Pressure Control Method of Train Brake System

이한민* 김길동** 박성환***

Lee, Han Min Kim, Gil Dong Park, Sung Hwan

ABSTRACT

The brake systems of the rolling stocks are generally consisted of electrical and mechanical brake systems. Because of its inherent structure of the each brake system, the electrical brake system is mainly used at the high speed range while the mechanical brake system is used at the relatively lower speed range. It is desirable for the rolling stocks to apply the entire electrical brake system. However, since the brake force from electric brake system is not enough to stop the rolling stock within the legal stop distance. Therefore, the mechanical brake system is indispensable to rolling stocks. In general, the vast majority of the world trains are equipped with mechanical braking systems which use compressed air as the force to push block on to wheels or pads on to discs. These mechanical systems are known as air brake or pneumatic brakes. For the air brake system, basically huge scale air compressor is equipped and the long pipe line is complexly connected. Since mass of these air brake components, it is difficult to be a light weight equipment and the long pipe line raise the maintenance problem. In order to overcome these problems of air brake system, the hydraulic brake system is proposed in this research. The hydraulic brake system makes the whole weight of brake equipment be light and large braking force can be applied. Therefore, in this research, the validity and advantages of applying the hydraulic brake system are reviewed.

1. 서론

공압제동시스템에 비해 상대적으로 뛰어난 성능향상과 소형/경량화의 이점에도 불구하고, 유압장치 고유의 특성으로 인해 철도시스템의 제동장치로 사용하기에 부적합한 부분이 존재한다. 특히 제동시스템의 신뢰성의 문제는 약 120여년의 역사를 두고 검증된 공기제동시스템의 실험적 안정성을 확보하기는 어렵다. 또한 작동유의 누유와 청정도 문제 및 화재진화 어려움의 문제, 극히 작은 값이지만 제동동작 영역에서 발생하는 작동유의 압축성 문제, 제어 밸브에 존재하는 내부누설 등이 존재하는데 본 연구에서는 유압시스템의 이러한 고유특성을 해결할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 작동유의 누유 문제

최근에는 열차의 성능뿐만 아니라, 선로변 환경문제가 중요시 되면서, 열차의 소음이나 분진, 배출물, 폐기물에 대한 대책이 부각되고 있다. 이러한 상황에서 제동장치에서 발생하는 작동유의 누설은 고성능의 제동력을 보유한 유압제동장치의 가장 큰 단점이라 할 수 있다. 제동자에 장착된 유압실린더와 유압관로에서 주로 발생하는 작동유 누출을 방지하기 위해서, 제동관련 유압관로에 대해 Pipeless 방식의 회로 체결방식 적용하며, 유압컴포넌트는 Dry-set 적용하여 작동유의 유출을 원천적으로 차단할 수 있다.

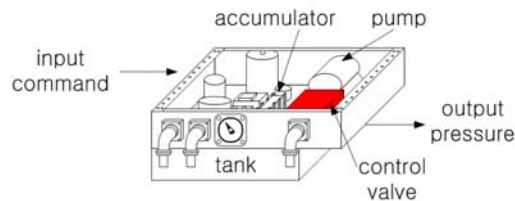


그림1 Unit화 된 Pipeless 방식의 유압컴포넌트

3. 작동유의 청정도 및 작동유로 인한 화재확산 문제

기름을 전달 매개체로 사용하는 유압시스템은 공기압이나 다른 동력전달매체에 비해서 기계의 물리적 마모나 내구성면에서 유리하지만, 작동유에 유입되는 불순물은 밸브나 실린더 등의 수명을 단축시켜 유지보수 및 성능유지 효율

성 면에서 역효과를 유발할 수 있다. 또한, 유성물질을 사용하게 되는 작동유는 화재발생시 화재확산의 매개체가 될 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 이러한 작동유 자체의 물리적 성질에 의해 발생할 수 있는 문제점들을 해결하기 위해서, 화재에 대한 내성을 가진 난연성 작동유를 사용한다. 그리고 작동유의 청정도를 유지하기 위해 유압폐회로 구성하여, 분진 및 불순물의 회로내 유입을 원천적으로 차단하여 기계의 마모나 제동시스템의 성능저하를 방지한다.

4. 제동 시스템의 신뢰성 문제

승객을 대량으로 운송하는 철도 차량은 안전상의 확보가 가장 기본적이고 중요하다. 특히, 최악의 상황에서도 안전을 보장되어야 하는 제동시스템은 전원이나 외부 신호가 차단된 상태에서 제동력을 계속 유지할 수 있도록 시스템이 유지되어야 함은 필수적인 것이다. 기존의 공기압제동장치의 경우, 최종 제동장치인 담면브레이크가 Negative 형태를 취하고 있어, 외부 전원차단시도 스프링력에 의해 제동을 체결하도록 설계되어 있다. 유압제동장치에도 승객의 안전을 위해서 전력의 차단시 이러한 Fail-safe 기능을 가질 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해 2종류의 어큐뮬레이터를 사용하여 제동 장치를 구성, 제1어큐뮬레이터는 상용/비상 제동시에 사용하고, 제2어큐뮬레이터는 긴급제동시에 동작하도록 설계되는데, 이때 전력 차단시 약2~3회에 걸친 제동지령에 대해 동작이 가능하도록 설계하여, 최종 제동장치로서 필요한 안정성 및 신뢰성을 확보할 수 있도록 한다. 또한, 최종제동 및 주차제동에 사용되는 담면제동은 공기압식제동장치와 같은 안전성을 확보하기 위하여, Negative 제동메커니즘을 적용하여 구현하도록 한다.

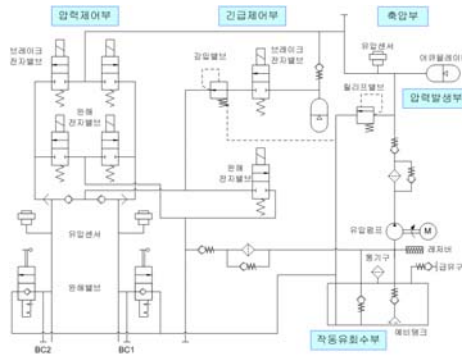


그림2 유압 제동시스템 적용을 위한 유압 회로도

유압제동장치의 경우 유압펌프의 동작은 브레이크 동작시만 작동하게 되는데, 간헐적 동작에도 최대한 안전성을 보장할 수 있도록 응답성능이 뛰어난 피스톤 펌프를 사용하게 된다. 제어밸브에 존재하는 내부누설 또한 제동시스템의 안전성을 저하하는 요소 중의 하나이다. 이러한 원인으로 새로운 형태의 제어밸브가 필요한데, 이 부분에 대해서는 압력제어밸브 및 압력제어방법의 설계 부분에 그 해결책이 있다.

5. 제동시스템의 유지보수 문제

기존의 대차에 설치되어있는 공기압식 제동장치는 일반적으로 공기회로, 공기통, 제동전자제어장치, 전공변환밸브, 중계밸브(Relate Valve), 압력제어/조정밸브, 공기필터, 쇼크밸브와 같은 많은 종류의 단품으로 구성되어 있다. 이러한 공기압제동장치의 부품들은 대기 중의 공기를 에너지 전달매체로 사용하기 때문에, 압축과 증압에 필요한 장치가 큰 공간을 차지하며 소음과 중량상의 이유로 대부분 차량의 하부에 밀집해 있어 차량의 정비 및 유지 보수시 차체를 들어 올려 정비를 수행하여야 한다. 이러한 이유로 제동장치와 관련된 정비만으로도 차량의 상업운행은 차질이 발생하게 되며, 유지보수 과정 또한 결합된 부품을 분해하는 과정에서 많은 시간과 노력이 소요된다. 또한, 제동지령을 위한 긴 공기압 라인은 공기배관 노후화로 인한 공기누설 및 압력 저하를 발생시켜 제동의 효율성을 낮추며, 공기압축과 완해과정에서 발생하는 수증기는 제동장치의 수명을 단축시킨다. 또한 이러한 노후를 방지하기 위해 설치된 제습 및 먼지제거장치는 현장에서 잦은 고장을 유발하여 유지보수 비용의 막대한 지출이 소요되고 있다. 뿐만 아니라, 장비노후로 인한 제동장치의 이상여부를 직접 수리인원이 투입되거나, 사고가 발생하기 전까지는 발견하기가 매우 힘들어, 안전성 및 신뢰성이 저하된다. 표1은 일본 철도시스템의 제동장치 이상으로 발생한 사고 내용이다. 최근 몇 년간의 자료를 분석해 보면, 제동장치와 관련된 열차사고의 대부분은 공기압 관로 및 탱크의 파손 등이 주원인이며, 표1은 최근의 일본철도의 제동장치와 연관된 철도사고를 나타낸 것이다. 이러한 사고사례에 의하면, 제동장치의 파손의 대부분이 제동장치의 고장이 그 원인이 되며, 제동장치 고장은 주로 공기압 관로 및 탱크에서 발생함을 알 수 있다. 그 외 공기압 지령에서의 압력 제어부의 이상작동이 원인이라고 추측된 고장도 많이 발생하였다는 보고도 있다.

표1 제동장치 이상으로 발생한 철도교통사고 상황과 원인

일시 장소	상 황	원인
S22.3.31 화원 역 열차 충돌	나라를 출발해 오사카가 가던 6량 급행 전철 1량의 브레이크가 고장. 화원역에서 보통 전철에 충돌	공기 호스(hose) 노후화 파손.
S22.9.16 阪和線東羽衣駅 열차 충돌, 국철	일반국철(재래선)1량의 브레이크가 고장. 선로종단으로 걸리는 사고	브레이크가 완해되지 않는다는 이유로 브레이크 마감 콕을 닫아놓은 채 발차.
S26 오노다 선 열차 충돌, 국철	전철의 브레이크가 잘 듣지 않아, 역에서 정차중에 반대방향으로 향하던 전철에 정면 충돌.	브레이크가 완해되지 않는다는 이유로 브레이크 마감 콕을 닫아놓은 채 발차.
S46.10.5 사카키바라운천 열차 충돌	오사카발 나고야행 특급전철의 브레이크가 잘 듣지 않아, 그대로 주행하여 스즈야터널 안에서 특급 전철과 정면 충돌	ATS고장이 원인이 되어 정차하고 브레이크 완해를 시도. 완해가 계속적으로 실패하자 공압탱크의 콕을 닫아놓은 채 브레이크 실린더 내 공기를 배기후, 그대로 출발.
S46.3.4 후지요시다 역 열차 전복	가와구치코발 후지요시다행 2량 전철. 건널목에서 트랙에 충돌후 브레이크가 알아 탈선 및 전복	차량 하부의 공기 탱크가 파손.
H2 열차 충돌	6량편성 전철이 상당한 강우중에 정차 위치를 놓여, 차량통행 금지구역에 충돌. 유효한 브레이크가 작용하지 않았다.	브레이크 타이밍의 지연 및 제륜자의 마찰 계수 저하에 의한 브레이크력 감소
H4.6.2 "X시 取手駅 열차 충돌	브레이크 고장으로 인해 取手역 구내의 차량통행 금지구역의 안전대와 격돌.	브레이크가 완해되지 않는다는 이유로 브레이크 마감 콕을 닫아놓은 채 발차.
H13.2.21 조 越美北線富田	단행 기관차가 건널목 사고에 의해 제동 불능으로 상태로 2킬로미터 주행후 자연 정지.	승용차의 측면 충돌로 인하여 비상제동장치가 파손

표1에서도 확인할 수 있듯이, 제동시스템의 이상으로 발생한 사고는 대부분 대형참사로 이어질 만큼, 제동시스템은 안전에 있어서 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서 제안하는 유압제동시스템은 Brake-By-Wire를 근간으로 통합된 제동유니트를 사용한다. 따라서 Wire의 검지점검 만으로도 제동지령전달 이상유무를 판별할 수 있으며, 전기유압장치의 초기상태 점검을 통해, 기관사가 실시간으로 제동장치의 이상유무를 판단할 수 있다. 뿐만아니라, 제안된 유압식 제동 장치는 개별 제동장치가 일체형으로 통합된 제동유니트로 구성될 수 있도록 설계함으로써, 통합된 제동유니트를 보기(bogie)내에 수납할 수 있는 착탈형 프레임으로 구성할 수 있다. 따라서 유지보수시 제동유니트의 착탈만으로 제동장치에 대한 집중적인 점검이 용이하고, 유니트의 교환만으로 정상적인 운영을 보장할 수 있게 되어 경제적 효과도 크다.

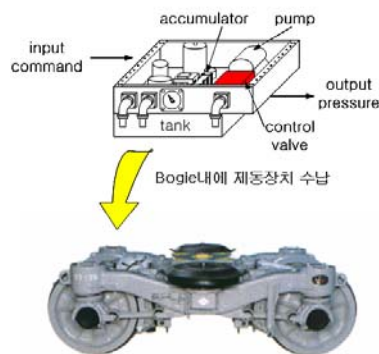


그림3 수납이 가능한 형태의 일체형 제동장치

통합제동유니트는 그림3에서와 같이 구동에 필요한 유압펌프, 밸브, 어큐물레이터 및 제어장치가 통합 구성된 드라이셋으로 구성한다. 또한 제안된 통합식 드라이셋 제동 유니트는 착탈식 수납형으로 설계함으로써 그림4와 같이 제동부품의 고장 및 정비시 새로운 제동셋으로 교환하는 방식을 통하여 유지보수 시간 및 비용 절감할 수 있다.

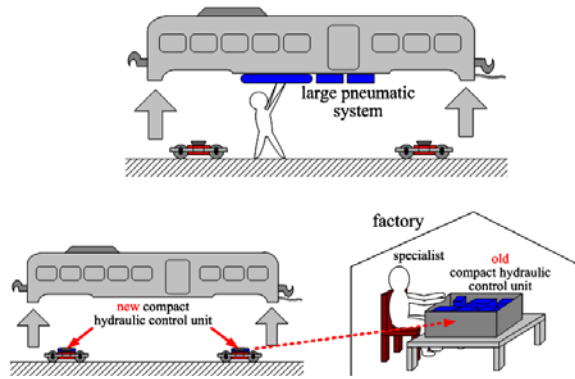


그림4 유지보수의 시간과 비용 절감효과

6. 작동유의 압축성 문제

가. 유압작동유 불확실성 보상연구의 개요

공기압 제동장치는 동력전달 매개체인 공기의 압축성 때문에, 제동력의 부여와 제어하는데 있어서 큰 장애요소가 된다. 유압제동시스템의 경우 공기압제동에 비해 이러한 불확실성이 상대적으로 적으나, 제동력을 부여하는 주동작영역인 1~5[MPa] 영역에서 체적탄성계수의 변화가 미세하게 발생하게 된다. 유압시스템을 이용한 압력제어는 비교적 높은 차수의 비선형 요소를 포함하고 있으며, 안정성을 보장하기 어려운 불확실성 요인을 많이 포함하고 있다. 이러한 비선형 요소 및 불확실성을 극복하기 위해서는 시스템의 비선형 요소를 수학적으로 정확히 분석해야 하며, 불확실성의 요인인 작동환경 변화에 따른 유압작동유의 특성과 그 변화에 대한 정확한 계산이 필요하다. 고전적으로 유압시스템의 불확실성을 보완하기 위해 유압시스템의 작동환경에 따른 유압작동유의 특성을 계산하거나, 정적모델로부터 시스템 자체의 비선형 요소를 계산해왔다. 하지만, 시스템의 불확실성을 정확하게 계산하는 것은 매우 어려우며, 주변 환경이나 기온 등 시스템의 동작상태가 일정하지 않은 경우 이러한 불확실성을 예측하기란 불가능하다. 이러한 불확실성은 유압제동시스템에 있어서 슬립제어나 응하중/저크제어 등 차세대 전동차에 적용될 제동제어에 있어서 응답특성 저하를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 체적탄성에 대한 불확실성을 보완하기 위해 강인제어 알고리즘을 사용하여 작동유의 체적탄성 및 캘리퍼, 제동륜에 존재하는 외란을 보상하도록 하였다. 최근, 유압시스템의 압력제어에 존재하는 불확실성을 강인제어 알고리즘을 통하여 보완하는 연구가 많이 진행되고 있지만, 제어기에 설정된 값이 시스템의 제어에 관련되어 제어장치의 설계에 복잡성을 가중시키게 되는 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 제어적인 복잡성이 적고 액추에이터에 부담을 최소화 할 수 있는 제어 알고리즘을 적용한 모델을 연구하고, 실험을 바탕으로 알고리즘의 타당성을 증명해 보았다.

나. 작동유체의 체적탄성

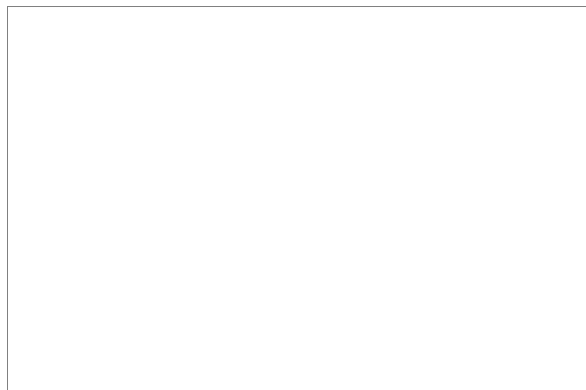


그림5 유압작동유의 체적탄성 변화특성

유압제어 시스템의 설계 과정의 복잡성은 크게 시스템 자체의 비선형 요소와 작동환경과 유압작동유의 특성변화로 분류된다. 유압작동유의 압축율(bulk modulus)은 작동환경에 따른 유압작동유의 대표적인 특성변화로써, 주어진 체적의 팽창 변형량과 이를 일으키는 압력변화량과의 관계를 나타낸다. 이것은 유압작동유 자체의 변형요소 뿐만 아니라, 유체에 포함된 공기방울의 체적변화와 실린더 자체의 체적변화 요소를 포함한다. 또한 동작온도에 따라 그림5와 같이 그 특성이 변화하는 성질이 있으며, 유압시스템이 저압영역에서 동작할 때 파라미터 오차가 증가하게 된다. 이러한 유압작동유의 체적탄성의 불확실성을 보완하기 위해, 공기함유량과 동작온도의 영향을 포함한 유효압축율(effective bulk modulus)을 계산하거나, 정적모델식을 통한 1차 선형화된파라미터를 사용하였으나, 이것은 항상

변화하는 시스템 주변환경에 대해 민감하게 반응하지 못할 뿐만 아니라, 시스템의 상태를 정확하게 계산해 내는 과정 또한 제어기에 복잡한 연산을 부여하게 되었다. 유압시스템의 압력제어에 있어서 존재하는 또다른 불확실성 요소 중의 하나는 부하압력에 따른 부하유량의 출력의 특성이다. 이것은 유압시스템이 고압영역에서 동작할 때 주요 불확실성 요소로서, 주로 무부하상태 혹은 제한된 범위에서 정의된 선형화된 파라미터의 오차가 증가하게 된다. 이러한 불확실성이 존재하는 이유로, 최근에는 강인제어기를 사용하여 파라미터 불확실성을 보완하고 있다.

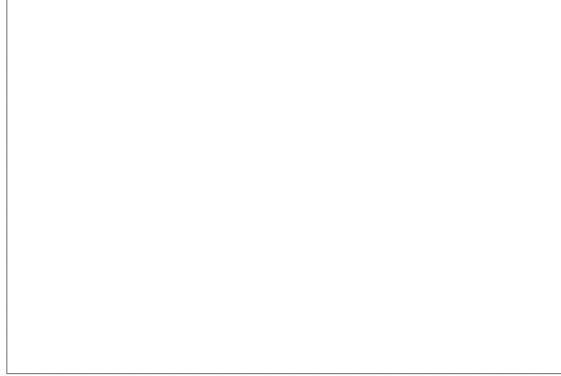


그림6 부하압력에 따른 유량변화에 대한 비선형성

다. 제어기 설계

(1) 섭동추정의 개요

일반적인 비선형 시스템의 상태공간 모델을 표준형으로 나타내면

$$\dot{x} = \mathbf{A}x + \Delta\mathbf{A}x + \mathbf{B}u + \Delta\mathbf{B}u + d(t)$$

여기서, d 는 외란이며, $\Delta\mathbf{A}$ 와 $\Delta\mathbf{B}$ 는 시스템의 섭동이다. 이러한 요소들은 그 수치뿐만 아니라, 상한값 또한에 측하기 어렵다. 모델 불확실성이나 외란을 이러한 섭동으로 간주하면, 섭동요소 Ψ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi_{actual} &= \Delta\mathbf{A}x + \Delta\mathbf{B}u + d(t) \\ &= \dot{x} - \mathbf{A}x - \mathbf{B}u \end{aligned}$$

그러므로, 추정된 섭동은 아래와 같이 표현되며

$$\Psi_{estimated} = \dot{x}_{calculated} - \mathbf{A}x - \mathbf{B}u$$

여기서, $\dot{x}_{calculated}$ 는 관측된 측정된 상태값인 x 로부터 계산되는 값이다.

(2) 슬라이딩 모드 제어기의 설계

슬라이딩 모드제어기의 슬라이딩 평면은 유압실린더의 압력모델식을 이용하여 다음과 같이 선정하였다.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \int \tilde{p}_L dt = \dot{\tilde{p}}_L + \lambda \tilde{p}_L$$

여기서, $\tilde{p}_L = p_{Lref} - p_L$ 이고, $\lambda > 0$ 는 슬라이딩 평면의 설계 파라미터이다. 이때, 강인 제어를 위해 스위칭항을 가지는 연속구조 슬라이딩 모드 제어기를 유도하기 위해서 다음과 같이 슬라이딩 평면을 정의하였다.

$$\dot{s} = \dot{\tilde{p}}_L + \lambda \tilde{p}_L = -Ds - K \operatorname{sgn}(s)$$

그러므로 슬라이딩 평면의 거동식 $\dot{s} = 0$ 는

$$-\mathbf{A} p_L - \mathbf{B}u(t) + \lambda \tilde{p}_L = 0$$

이고, 식 (14)로부터, 등가 제어입력 $u_{eq}(t)$ 는,

$$u_{eq}(t) = \mathbf{B}^{-1}(\lambda \tilde{p}_L - \mathbf{A}p_L)$$

슬라이딩 모드의 강인제어 입력을 스위칭항을 가지는 연속구조인 식은

$$u_i(t) = \mathbf{B}^{-1}[-Ds - K \operatorname{sgn}(s)]$$

그러므로, 슬라이딩 모드 제어입력 $u(t)$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} u(t) &= u_{eq}(t) + u_i(t) \\ &= \mathbf{B}^{-1}[\lambda \tilde{p}_L - \mathbf{A} p_L - Ds - K \operatorname{sgn}(s)] \end{aligned}$$

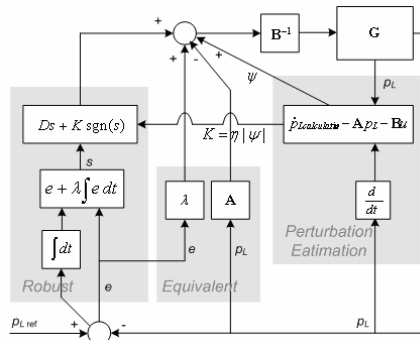


그림7 섭동추정 슬라이딩모드 제어기의 블록선도

(3) 섭동추정기의 설계

위 (1)절의 섭동추정을 위한 제어입력 $u_p(t)$ 를 아래와 같이 제안한다.

$$u_p(t) = \mathbf{B}^{-1}[\Psi(p_L, t)_{estimated}]$$

과 시스템의 제어입력 $u(t)$ 는

$$\begin{aligned} u(t) &= u_{eq}(t) + u_n(t) + u_{per}(t) \\ &= \mathbf{B}^{-1}[\lambda \tilde{p}_L - \mathbf{A} p_L + \\ &\quad - Ds - K \text{sgn}(s) + \Psi(p_L, t)_{estimated}] \end{aligned}$$

여기서, $D > 0$ 이며, K 를 섭동추정 알고리즘을 적용한 유동적 파라미터로서 아래와 같이 제안한다.

$$\begin{aligned} K &= \eta |\Psi(p_L, t)_{estimated}| \\ &\geq |\Psi(p_L, t)_{actual} - \Psi(p_L, t)_{estimated}| \end{aligned}$$

정의된 슬라이딩 모드 제어 시스템의 안정도를 보장하기 위해 리아푸노프 함수식을 아래와 같이 정의하면,

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} s^2 \\ \dot{V} &= s\dot{s} = s(\dot{\tilde{p}}_L + \lambda \tilde{p}_L) \\ &= s(-Ds - K \text{sgn}(s)) \leq 0 \end{aligned}$$

라. 제어기를 적용한 유압시스템의 압력제어 결과

시스템 자체에 포함되어 있는 비선형 요소와 작동환경 변화로 인한 유압작동유 특성변화로부터 기인하는 유압 시스템의 불확실성은, 유압시스템의 압력제어에 있어서 큰 불안정 요소가 된다. 특히, 제어의 구동범위가 주로 저압 영역이고, 외부특성이 수시로 변하며, 시스템의 공기함유량 등 시스템 특성에 큰 영향을 미치는 요소들에 대해 계측이 불가능한 철도차량의 제동시스템의 경우 이러한 비선형 요소를 수학적으로 정확히 계산하는 것이 어렵고, 오히려 복잡성을 가중시키거나 액추에이터의 과도한 입력을 부여하는 요소가 되어 실제 제동시스템에 대해서 적용하기에는 큰 무리가 있었다.

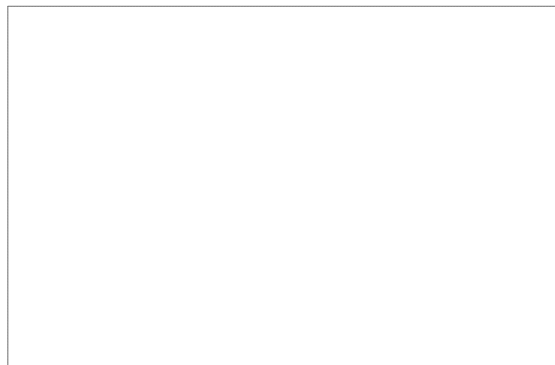
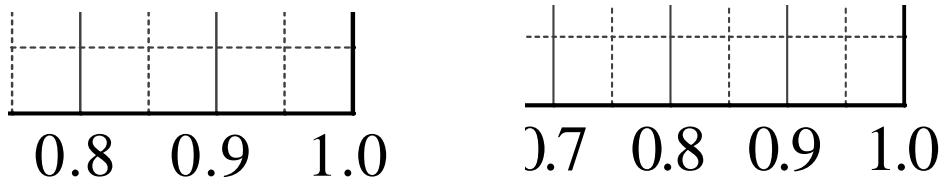


그림8 제안된 섭동추정 슬라이딩모드 제어기의 제어입력

본 연구에서는 유압작동유 및 시스템의 불확실성이 큰 영역에 대한 실험을 통하여, 제안된 섭동추정 슬라이딩 모드 제어장치가 불확실성을 포함하는 비선형 유압 시스템의 압력제어를 수행하는데 있어서, 제어성능이 우수함을 알 수 있다. 특히, 특별한 센서나 관측기 등을 사용하지 않고, 출력되는 압력정보만을 사용하여 추가적인 비용이나,

제어장치의 복잡성을 방지할 수 있었고, 제동장치가 동작하는 저압영역의 불확실성에 대해 강인성과 빠른 응답특성을 보장하였다. 또한 액추에이터에 부담을 주는 제어입력의 채터링 현상을 줄이는데 효과적임을 보여주고 있다. 이러한 제어로직은 차후 기계제동의 제어를 담당하는 BCU에 기본적으로 입력되어, 지령실로부터 들어오는 제동지령에 대해 신속하게 제동실린더를 구동할 수 있도록 독립적으로 구성될 수 있다.



(a) 작동유의 체적탄성을 보상하기전의 응답특성 (b) 작동유의 체적탄성을 보상한 이후의 응답특성
그림9 작동유의 체적탄성을 보상하기전(좌)과 보상후(우)의 응답특성 비교

7. 결론

작동유의 누유와 청정도 문제 및 화재진화 어려움의 문제, 극히 작은 값이지만 제동동작 영역에서 발생하는 작동유의 압축성 문제, 제어밸브에 존재하는 내부누설 등이 존재하는데 본 연구에서는 유압시스템의 이러한 고유특성을 해결할 수 있는 방안을 제시하였다.

본 연구에서는 유압작동유 및 시스템의 불확실성이 큰 영역에 대한 실험을 통하여, 제안된 섭동추정 슬라이딩 모드 제어장치가 불확실성을 포함하는 비선형 유압 시스템의 압력제어를 수행하는데 있어서, 제어성능이 우수함을 알 수 있었다. 특히, 특별한 센서나 관측기 등을 사용하지 않고, 출력되는 압력정보만을 사용하여 추가적인 비용이나, 제어장치의 복잡성을 방지할 수 있었고, 제동장치가 동작하는 저압영역의 불확실성에 대해 강인성과 빠른 응답특성을 보장하였다. 또한 액추에이터에 부담을 주는 제어입력의 채터링 현상을 줄이는데 효과적임을 보여주었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tomoki Watanabe and Michihiro Yamashita, "Basic study of anti-slip control without speed sensor for multiple motor drive of electric railway vehicles," Proceedings of the Power Conversion Conference, Vol. 3, April, 2002, pp. 1026-1032.
- [2] Satoshi, Kadowaki, Kiyoshi, Ohishi, Shinobu Yasukawa, Takashi Sano., "Anti-skid Re-adhesion control Based on Disturbance observer considering Air brake for electric commuter train," Advanced Motion Control, 2004. The 8th IEEE International Workshop Advanced Motion Control, March, 2004, pp. 607 ~ 612.
- [3] Shirai, S., "Adhesion Phenomena at High-Speed Range and Performance of an Improved Slip-dectector," Quarterly Reports, Railway Technical Research Institute, Vol. 18, No. 4, 1977, pp. 189-190.
- [4] Isaev, I. P. and Golubenko, A. L., "Improving Experimental Research into Adhesion of the Locomotive Wheel with the Rail," Rail International, pp. 3-10, August, 1989.
- [5] Ohyama, T., "Some basic studies on the influence of surface contamination on adhesion force between wheel and rail at high speed," Quarterly Report, Railway Technical Research Institute, Vol. 30, No. 3, pp. 127-135, 1989
- [6] Kiyoshi Ohishi, Ken Nakano, Ichiro Miyashita and Shinobu Yasukawa, "Anti-slip control of electric motor coach based on disturbance observer," IEEE International Workshop Advanced Motion Control 1998, pp. 580-585.
- [7] Tomoki Watanabe and Michihiro Yamashita, "A novel anti-slip control without speed sensor for electric railway vehicles" IECON'01 The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1382-1387.
- [8] Ming-chin Wu and Ming-chang Shih, "Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode PWM control," Mechatronics, Vol. 13, 2003, pp. 331-351.
- [9] Hiro-o Yamazaki, Masao Nagai, Takayoshi Kanada, "A study of adhesion force model for wheel slip prevention control," JSME, Series C, Vol. 47, No. 2, 2004. pp.496-501.
- [10] Atsuo Kawamura, Takemasa Furuya, Keiichi Takeuchi, Yoshuke Takaoka, Kantaro Yoshimoto and Meifen Cao, "Maximum adhesion control for Shinkansen using the tractive force tester," Proceedings of the Power Conversion Conference, IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electric Society Vol. 1, 2002, pp. 567-572.