

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.9.835>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

도시철도차량 제동장치의 솔레노이드 밸브에 대한 전류기반 고장진단기법 개발

서보성* · 이규석* · 조수호* · 오현석* · 윤병동*

* 서울대학교 기계항공공학부

A Fault Detection Method for Solenoid Valves in Urban Railway Braking Systems Using Temperature-Effect-Compensated Electric Signals

Boseong Seo*, Guesuk Lee*, Soo-Ho Jo*, Hyunseok Oh** and Byeng D. Youn*

* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received March 16, 2016 ; Revised June 16, 2016 ; Accepted July 11, 2016)

Key Words: Condition Based Maintenance(상태기반 유지보수), Fault Diagnostics(고장진단), Railway Braking Systems(철도차량 제동시스템), Solenoid Valve(솔레노이드 밸브), Equivalent Circuit Model(등가 회로 모델)

초록: 국내 도시철도차량의 유지보수는 대부분 예방정비에 기초하고 있다. 기존 유지보수 방법의 한계를 극복하기 위해, 상태기반 유지보수기법을 철도차량에 적용하려는 움직임이 최근 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 도시철도차량 제동장치의 핵심 고장부품인 솔레노이드 밸브에 대하여 전류기반 고장진단기법 개발을 시도하였다. 주요 고장부품으로 선정된 솔레노이드 밸브에 대하여, 등가회로모델 및 온도 보상된 전류 감시에 기반한 고장 진단법을 제안하였다. 제안한 고장 진단법의 유효성을 검증하기 위해 실제 도시철도차량에 사용되는 솔레노이드 밸브(상용제동 전자밸브)를 이용하여 사례연구를 진행했다. 본 연구는 철도차량 제동장치의 솔레노이드 밸브 고장진단이 추가 센서의 장착 없이 가능함을 보여주었고, 철도차량의 안전성 및 신뢰성 향상에 도움을 줄 것으로 기대한다.

Abstract: In Korea, urban railway cars are typically maintained using the strategy of predictive maintenance. In an effort to overcome the limitations of the existing strategy, there is increased interest in adopting the condition-based maintenance strategy. In this study, a novel method is proposed to detect faults in the solenoid valves of the braking system in urban railway vehicles. We determined the key component (i.e., solenoid valve) that leads to braking system faults through the analysis of failure modes, effects, and criticality. Then, an equivalent circuit model was developed with the compensation of the temperature effect on solenoid coils. Finally, we presented how to detect faults with the equivalent circuit model and current signal measurements. To demonstrate the performance of the proposed method, we conducted a case study using real solenoid valves taken from urban railway vehicles. In summary, it was shown that the proposed method can be effective to detect faults in solenoid valves. We anticipate the outcome from this study can help secure the safety and reliability of urban railway vehicles.

1. 서 론

철도는 저탄소 배출 및 녹색성장 구현을 위한 최적의 교통수단이다. 하지만, 철도차량 및 시설의

유지, 보수가 적기에 이루어지지 않아서, 단 한 차례의 사고라도 발생하면 막대한 인적, 물적 손실을 유발할 수 있다.^(1,2) 철도차량 제동장치 안전도 및 신뢰성 향상을 위해 다음 두 가지 접근법, 즉 고장회피와 제거(Fault avoidance and removal)와 내 고장성(Fault tolerance) 기법이 널리 사용되어 왔다.⁽³⁾ 고장회피와 제거는 설계 단계에서 시스템의

† Corresponding Author, hyunseok52@gmail.com

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

부품들이 고장에 강하고, 고장 발생을 낮추는 것을 목적으로 한다. 국내의 경우 철도차량 제동장치의 고장회피와 제거에 관한 연구가 지금까지 많이 진행되어 왔다.⁽⁴⁻⁷⁾ 하지만, 현장에서 예상하지 못한 상황이 언제든지 발생할 수 있으므로, 설계 단계에서 시스템의 고장들을 모두 파악, 제거하는 것에는 한계가 있다. 제동장치의 내고장성을 향상시키기 위해 시스템, 서브시스템, 부품들에 대하여 동일한 장치를 추가적으로 설치하는 중복장착(Redundancy) 개념이 적용되고 있다.⁽⁸⁾ 하지만, 시스템의 중복장착이 증가할수록 전체 시스템은 복잡하고 가격이 상승하는 단점이 있기 때문에 가능한 중복장착을 최소화 할 필요가 있다.

최근 기존 접근법의 한계를 극복하기 위해 상태감시(Condition monitoring) 및 고장진단(Fault diagnosis)에 대한 관심이 증대되고 있다. 고장진단은 시스템 혹은 구성품이 고장에 임박하거나 고장 시작 직후의 상황을 감지(Detect), 식별(Isolate), 파악(Identify)하는 기술이다.⁽⁹⁾ Ma⁽¹⁰⁾에 의하면 철도 화물차에 상태기반 유지보수체계(CBM; Condition-based maintenance)를 도입하면 다른 유지보수체계와 비교하여 약 5%에서 12%의 수명비용을 절감할 수 있음을 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 철도차량 제동장치의 고장진단을 위한 기술을 개발하고자 하였다. 도시철도차량을 대상으로 고장모드 및 영향도, 심각도 분석(FMECA; Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis)과 고장이력 분석을 시행하였으며, 이로부터 도시철도차량 제동장치의 주요 고장부품을 선정하였다. 선정된 고장부품을 이용하여 테스트 베드를 구축하고 정상과 고장신호를 획득하였다. 이를 분석하여 고장진단에 효과적인 인자를 추출하고 정상품과 이상품을 진단하였다.

Table 1 Subsystems and Components in Urban Railway Braking System

서브 시스템	기능	하위부품
압축공기 공급장치	공기제동, 전동차 자동문 개폐를 위한 압축공기 생산	공기 압축기 공기 건조기 유분리기 공기필터
제동제어기	전기제동지령을 공기 제동으로 변경하기 위한 제어	전공변환중계밸브 응하중밸브 활주방지밸브 차단록크 제동전자밸브
제동작동기 (마찰제동장치)	압축공기 분배마찰력 인가	제동 디스크 답면 제동장치

2. 도시철도차량 제동장치의 주요 고장 부품 및 고장모드

도시철도차량 제동장치는 Table 1과 같이 서브시스템으로 이루어져 있다. 고장진단기술 적용 시 신뢰성 향상, 안전성 보장 등 많은 장점들을 도모할 수 있지만, 모든 구성 부품에 대하여 고장진단을 적용하기에는 한계가 있다.⁽³⁾ 따라서, 가장 치명적인 고장부품 파악이 중요하다. 이 장에서는 제동장치의 고장원인 및 고장메커니즘, 고장모드를 체계적으로 분석하고, 고장진단기술 개발을 위한 핵심고장부품 파악을 처음으로 시도하였다.

2.1 도시철도차량 제동장치 FMECA

고장부품 치명도(C)는 고장 빈도(O)와 고장 심각도(S)의 함수로 가정하였다. 고장 빈도는 객관적인 데이터 파악이 가능하지만, 고장 심각도는 판단자의 주관이 들어 가기 마련이다. 보다 객관적

Table 2 Classification of Severity

S=F1(T1,T2)		고장영향(T2) ²				
		레벨5	레벨4	레벨3	레벨2	레벨1
고장 발생 위치(T1) ¹	레벨1	영향 없음	보통	심각	매우 심각	매우 심각
	레벨2	영향 없음	영향 없음	보통	심각	매우 심각

Table 3 FMECA Results; Braking Systems of Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation Line 7 (First Fleet)

부품 명	고장 발생 위치; T1 ¹	고장 영향; T2 ²	심각도; S=F1(T1,T2) ³	발생 빈도; O	치명도; C=F2(S,O)
제동 시스템	전공전환 중계밸브	상용/비상 제동 불가	매우 심각	매우 빈번	매우 치명
	강제완해 전자밸브				
	Y절환밸브				
	공기여과기				
	공기통				
	S복식 체크밸브				
	제동통				
	비상전자밸브				
활주방지밸브	충격 및 찰상 발생				

¹ 고장발생위치(T1): 레벨 1(운영), 레벨 2(기지)

² 고장영향(T2): 레벨 1(심각한 영향), 레벨 2(큰 영향), 레벨 3(보통), 레벨 4(약간 영향), 레벨 5(미미)

³ 심각도레벨(S): Table 2

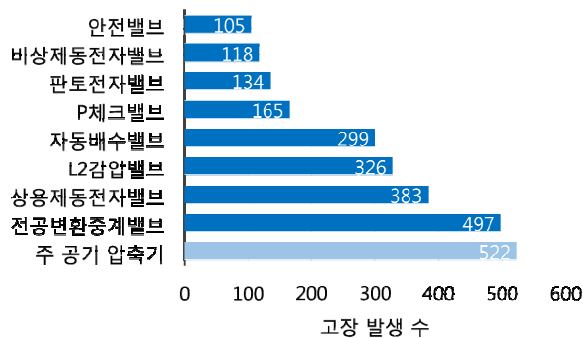


Fig. 1 Number of Faults in Braking Systems of Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation Line 7 (Second Fleet)

으로 고장 심각도를 평가하기 위하여 두 가지의 기준을 마련하였다. 첫째, 제동장치의 하위 부품들에 대하여 고장 발생 위치(T1)에 따라 운행, 기지로 나눌 수 있다. 운행 중 발생하는 고장은 기지에서 발생하는 고장보다 승객의 인명에 더 위험한 피해를 끼치기 때문에 더 높은 심각도를 부여하였다. 둘째, 각 고장모드 발생 시 전체 시스템에 미치는 영향을 고려하여 고장영향(T2)이 적은 순으로 레벨5부터 레벨1까지 부여하였다. 레벨5의 경우 전체 시스템 거동에 영향을 미치지 않는 수준이다. 이와는 반대로, 레벨1의 경우 ‘상용제동불가’와 ‘운행불가’ 등 전체 시스템에 심각한 영향을 주는 수준이다. 각 고장모드의 고장 발생 위치와 고장의 영향에 따른 심각도를 Table 2에 정리하였다.

앞서 제시한 기준을 가지고 서울도시철도공사 7호선 1차분 제동시스템의 FMECA를 실시하였다. 총 9개 부품에서 발생한 12개 고장모드가 매우 치명적이었다(Table 3). 이 중, 전공전환 중계밸브, 비상전자밸브, 활주방지밸브, S복식체크밸브는, 그 이름은 다르지만 작동원리가 유사한 솔레노이드 밸브로 파악되었다. 또한 결과의 신뢰도를 높이기 위해 다른 차량인 서울도시철도공사 7호선 2차분에 대하여 2001년부터 2013년까지 고장이력을 분석하였다. Fig. 1에 고장 발생 수가 가장 높은 부품들을 나열하였고, 이 중 비상제동전자밸브, 판토탄자밸브, 자동배수밸브, L2감압밸브, 상용제동전자밸브는 솔레노이드 밸브로 파악되었다. 솔레노이드 밸브의 고장은 도시철도 제동시스템에서 발생한 총 2027건의 밸브 고장 중 1260건(62.1%)으로 가장 많았다. 여기서 주 공기 압축기의 고장도 빈번하지만, 온도측정을 통한 이상감지장치가 이미 장착되어 있어 상태모니터링이 가능한 상황이었다. 결론적으로, 7호선 1차분 FMECA와 7호선 2차분 고장 이력 분석 결과를 종합해 볼 때, 솔레노이드

밸브의 고장이 제동장치 시스템의 신뢰도에 큰 영향을 미치고, 고장진단기술이 적용이 될 경우 파급 효과가 가장 클 것으로 파악하였다. 이러한 분석 결과에 대해 서울도시철도공사 및 철도기술연구원의 철도 관련 전문가들과 추가 검토를 거쳐 본 장의 분석이 타당하다는 결론을 얻었다.

2.2 솔레노이드 밸브의 고장모드

도시철도차량 제동장치의 솔레노이드 밸브에 대하여, 현장에서 고장이 발생한 실제 부품을 확보하여 분석하였다. 그 결과 세 가지 주요고장모드(이물질 적재, 밸브 변 고무찍힘, 솔레노이드 코일 소손)를 파악하였다.

첫째, 솔레노이드 밸브 내 이물질 적재는 외부로부터 유입되거나 제동장치 내부의 다른 부품에서 발생한 이물질이 공기 통로를 통해 솔레노이드 밸브에 적재되면서 고장을 야기한다. 밸브 변의 상단에 이물질이 적재되면 밸브 봉과 밸브 변 사이에 간극이 발생하여 누기 또는 채터링(Chattering)을 발생시킨다. 이는 공급압력을 기준치보다 떨어뜨려 불충분한 제동력을 초래하게 된다.

둘째, 밸브 변 고무 손상은 밸브 봉과 밸브 변의 반복 접촉으로 발생한다. 밸브 봉은 금속, 밸브 변은 고무로 이루어져 있으며, 밸브 봉의 반복 상하운동에 의해 밸브 변 상단의 고무가 찍히게 된다. 찍힘 현상이 심각할 경우, 밸브 봉이 밸브 변에 순간적으로 끼여서 밸브 봉이 오작동 하게 된다. 그 결과, 압축 공기의 흐름이 원활이 이루어지지 못하여 목표압력으로 도달하지 못하거나 공급압력이 일정하지 않고 일시적으로 변동하는 현상이 나타난다.

마지막으로, 솔레노이드 코일 소손이다. 이는 솔레노이드 코일 자체 저항 및 인덕턴스의 감소를 일으키고 이는 솔레노이드 발생 전자기력을 감소시켜 충분한 제동력을 발생 시키지 못하도록 한다.

3. 솔레노이드 밸브 고장진단

도시철도차량 제동장치 솔레노이드 밸브의 고장진단을 위해 3.1절에서는 등가회로 모델을 개발하였고, 3.2절에서는 솔레노이드 코일 내부 온도 변화에 대한 영향을 고찰, 마지막으로 3.3에서는 고장진단을 위한 건전성 인자 추출을 기술하였다.

3.1 솔레노이드 등가회로 모델

일반적으로 솔레노이드 전압 방정식은 식 (1)과 같다.⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned}
 V_d(t) &= I(t)(R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}) \\
 &+ L(x(t), I(t)) \frac{dI(t)}{dt} \\
 &+ E(x(t), I(t)) \frac{dx(t)}{dt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $V_d(t)$ 는 회로에 인가되는 전압의 크기, $I(t)$ 는 회로에 흐르는 전류, R_{ext} 는 외부저항, R_{int} 는 솔레노이드 내부저항, $L(x(t), I(t))$ 는 솔레노이드의 증분 인덕턴스(Incremental inductance), 그리고 $E(x(t), I(t))$ 은 동기 기전력(Motional electromotive force)을 나타낸다. 즉, 전체 전압은 저항에 의한 전압 강하, 전류 변화에 의한 유도 전압, 솔레노이드 내부의 플런저 운동에 의한 동기 기전력으로 이루어진다. 식 (1)에서 동기 기전력을 포함한 세 번째 항은 전체 전압에 대해 최대 2%로 작으므로 무시할 수 있다. 따라서, 식 (1)은 (2)와 같이 쓸 수 있다.⁽¹²⁾

$$\begin{aligned}
 V_d(t) &= I(t)(R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}) \\
 &+ L(x(t), I(t)) \frac{dI(t)}{dt}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 증분 인덕턴스 $L(x(t), I(t))$ 는 식 (3)과 같이 누설 인덕턴스 L_e 와 전류에 대한 쇄교 자속(Flux linkage) λ 의 변화량의 합이다.

$$L(x(t), I(t)) = L_e + \frac{\partial \lambda(x(t), I(t))}{\partial I(t)} \quad (3)$$

여기서 쇄교 자속 λ 는 식 (4)로 표현된다.

$$\lambda(x(t), I(t)) = \frac{\mu N^2 A}{l - x(t)} I(t) \quad (4)$$

여기서 μ 는 자기 투과율, N 은 코일의 감은 횟수, A 는 코일의 단면적, l 은 코일의 길이, 그리고 x 는 플런저의 솔레노이드 내부에서 변위를 뜻한다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 증분 인덕턴스 $L(x, I)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(x(t), I(t)) = L_e + \frac{\mu N^2 A}{l - x(t)} \quad (5)$$

일정 시간 동안 플런저가 같은 위치를 유지하고 일정한 전압을 인가한다고 가정하면 식 (2)의 좌측 첫번째 항과 식 (5)의 두 번째 항은 일정한 값을 가지게 되므로 증분 인덕턴스도 일정한 상수가 된

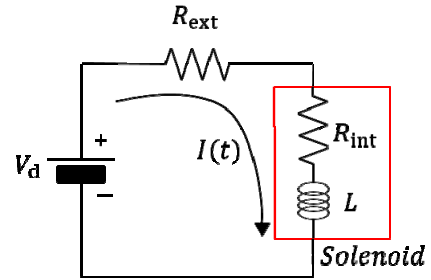


Fig. 2 Solenoid Circuit

다. 이 경우의 증분 인덕턴스를 L 이라고 하면 식 (2)는 식 (6)으로 표현 가능하고, 솔레노이드 회로도 Fig. 2처럼 나타낼 수 있다.

$$V_d = I(t)(R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (6)$$

위의 식을 라플라스 변환을 이용하여 식 (7)로 변환할 수 있다.⁽¹³⁾

$$\frac{V_d}{s} = I(s)(R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}) + LsI(s) \quad (7)$$

이를 $I(s)$ 에 대해 정리하여, 부분 분수로 표현하면 다음과 같다.

$$I(s) = \frac{V_d}{R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}} \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}}{L}} \right] \quad (8)$$

식 (8)에 라플라스 역변환을 취해 다시 시간 영역에서의 전류 모델을 구하면 다음과 같다.

$$I(t) = \frac{V_d}{R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}} \left[1 - e^{-\frac{R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}}{L} t} \right] \quad (9)$$

식 (9)에서 인덕턴스가 포함된 항은 기하급수적으로 감소하는데 보통 저항이 인덕턴스보다 큰 값을 가지기 때문에 짧은 시간 안에 0으로 수렴한다. 따라서 솔레노이드 전류 모델은 최종적으로 식 (10)과 같이 근사할 수 있다.

$$I(t) = \frac{V_d}{R_{\text{ext}} + R_{\text{int}}} \quad (10)$$

3.2 온도 영향 고찰

솔레노이드 내부저항은 온도에 민감하다. 식

(10)에 의해 솔레노이드 내부저항이 변하면 전류도 변하게 된다. $R_{int,0}$ 를 솔레노이드의 초기 내부저항, α 를 온도계수라고 두면 저항변화량(ΔR)과 온도변화량(ΔT)는 식 (11)와 같이 온도계수 α 를 계수로 가지는 1차 선형비례관계를 지닌다.

$$\Delta R_{int} = \alpha R_{int,0} \Delta T \quad (11)$$

전류 변화는 식 (12)처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta I = \frac{V_d}{R_{ext} + R_{int,0} + \Delta R_{int}} - \frac{V_d}{R_{ext} + R_{int,0}} \quad (12)$$

식 (11)를 식 (12)에 대입하여 정리하면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\Delta I = \frac{V_d}{R_{ext} + R_{int,0}(1 + \alpha \Delta T)} - \frac{V_d}{R_{ext} + R_{int,0}} \quad (13)$$

식 (13)에서 온도계수는 항상 양수이므로 ΔT 가 양수면 ΔI 는 음수가 된다. 즉, 온도가 증가하면 전체저항이 증가하여 전류가 감소하게 된다.

3.3 고장진단을 위한 건전성 인자 추출

솔레노이드 코일에 국부적으로 합선이 발생하여 소손이 일어나면, 명시 저항 및 인덕턴스 값이 감소한다. 따라서, 식 (10)에 의해 같은 전압을 인가했을 때 고장 밸브는 정상 밸브보다 더 높은 전류가 흐르게 된다. 이 점을 착안하여 공급전류를 건전성 인자로 선정하였다. 그러나 솔레노이드 코일의 온도가 상승 또는 하강함에 따라, 밸브에 흐르는 전류의 양이 바뀐다. 이는 밸브 고장진단을 위한 건전성 인자로서 전류신호의 신뢰도를 저하시킨다. 따라서, 식 (13)을 이용하여 솔레노이드 밸브 내부온도의 영향을 제거함으로써, 보다 정확한 고장 진단이 가능하다.

4. 사례연구

본 장에서는 앞서 개발된 전류기반 고장 진단법 검증에 실시하였다. 4.1절에서는 도시철도차량 제동장치의 핵심 부품인 “상용제동 전자밸브”를 기본으로, 솔레노이드 밸브 테스트 베드 및 실험철차를 기술하였고, 고장진단 결과를 4.2절에 서술하였다. 본 연구의 대상인 상용제동 전자밸브는 Fig. 3과 같다.



Fig. 3 Solenoid Valve Taken from Braking Systems

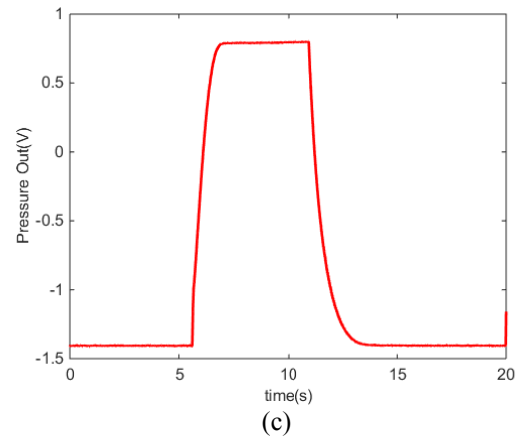
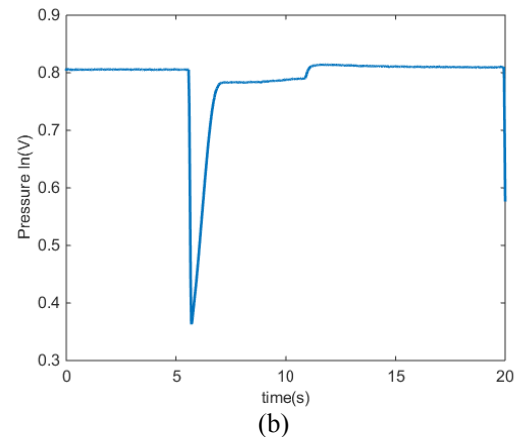
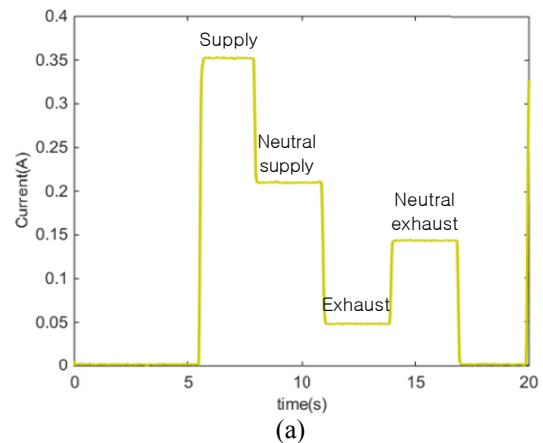


Fig. 4 Measured Signals: (a) Current Signal, (b) Input Pressure and (c) Output Pressure of Solenoid Valve

4.1 테스트 베드 및 실험 절차

LabVIEW를 이용하여 배기밸브 위치 별 전류 (공급(370 mA), 공급중립(220 mA), 배기(50 mA), 배기중립(150 mA), 소자(0 mA))가 흐를 수 있도록 전압 제어 알고리즘을 구성하였고, 전압을 제어함으로써 솔레노이드 밸브의 거동을 제어하였다. 실차 적용이 용이하도록 하기 위해 실제 도시철도차량에 사용되는 Keller사의 압력센서를 이용하여 솔레노이드 밸브의 입력과 출력에서의 압력을 측정하였다. 데이터 취득 샘플링 주파수는 10 kHz로 설정하였으며, 정상부품과 고장부품에 대하여 정상 데이터와 고장 데이터를 각각 획득하였다.

4.2 상용제동전자밸브 고장진단 결과

회로에 흐르는 전류는 Fig. 4의 (a)와 같이 측정되었고, 이에 대한 솔레노이드 밸브의 입력과 출력에서의 압력은 Fig. 4의 (b), (c)와 같았다. 총 5개의 정상품과 1개의 이상품에 대하여 실험을 수행하였으며 획득한 데이터로부터 건전성 인자인 공급전류를 계산하였다.

정상품과 이상품의 시료 수 차이로 인해 통계적 불확실성(Statistical uncertainty)이 존재한다. 이를 해결하기 위해선 근본적으로 이상품 시료 수를 늘려서 더 많은 데이터를 확보하는 것이 가장 좋으나, 많은 이상품을 확보하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 불확실성의 관리가 대안이 될 수 있다. 현재 퍼지이론(Fuzzy set theory), 구간분석법(Interval analysis), 확률범위분석(Probability bounds analysis) 등의 수학적론이 개발되었고 이를 이용하여 불확실성 분석이 가능하다.⁽¹⁴⁾

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 밸브의 출력 압력이 10% 증가했을 때 회로에 흐르는 전류의 크기를 “기준전류값(Nominal current value)”으로 정의하였다. 이는 출력 압력이 10% 증가했을 때 코일 내부 플런저의 운동이 끝나기 때문이다.

Fig. 6에 실험 결과를 나타냈으며 실제로 고장 밸브의 공급전류가 정상 밸브보다 높음을 확인할 수 있었다. 그러나 가동시간이 증가함에 따라 전류의 크기가 감소하는 현상을 보였는데, 이 현상이 지속될 경우, 오랜 시간 가동한 고장밸브를 정상밸브와 구분하지 못하게 된다.

이를 해결하기 위해, Fig. 7과 같이 솔레노이드 코일의 측면 4곳에 온도센서를 부착하여 온도를 측정하였다. 센서의 위치에 따라 온도 편차가 존재하나, 센서의 허용 오차 이하로 무시할 수 있을 만큼 작았다. 센서 부착 위치에 무관하게 유사한 값을 얻었으므로, 어느 지점에 온도 센서를 부착

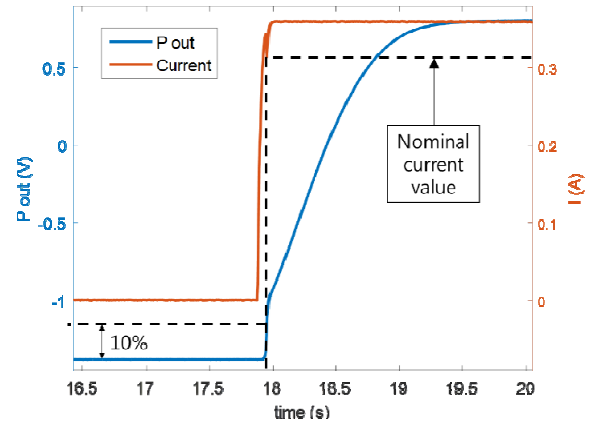
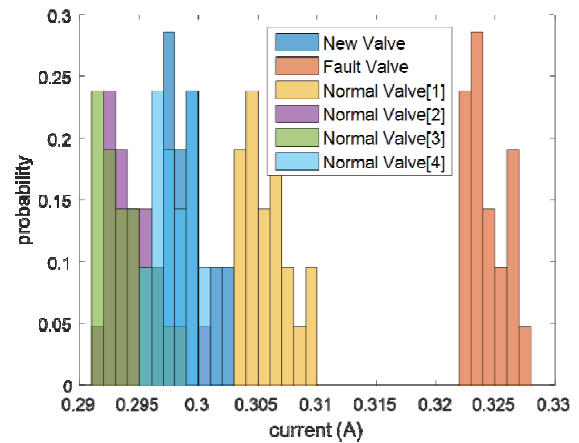
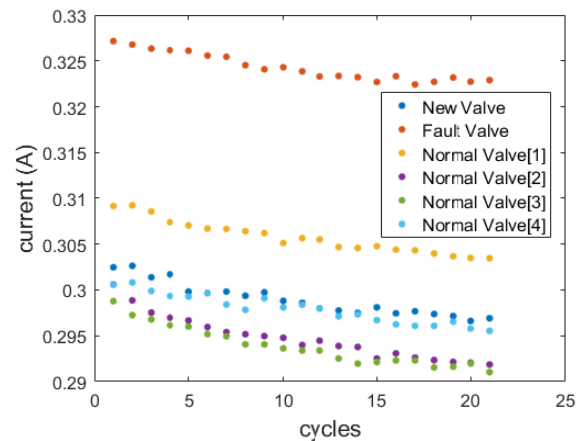


Fig. 5 Health Data: Nominal Current Value



(a)



(b)

Fig. 6 Before Calibration: (a) Histogram of Nominal Current Value from Normal and Fault Valves, (b) Decrease of Nominal Current Value with Respect to Operating Cycles

하더라도 상관이 없다. 밸브의 가동시간이 증가하면 솔레노이드 코일의 온도가 증가하고 이로 인해

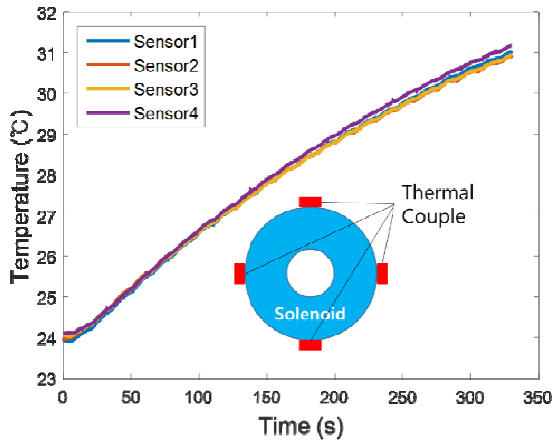


Fig. 7 Temperature of Solenoid Coil with Respect to Operating Time

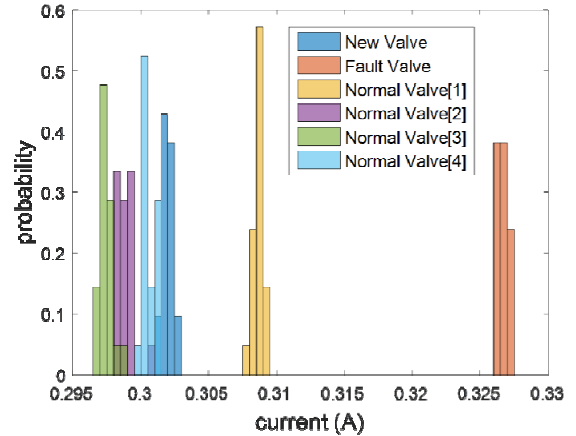
코일 내부의 저항이 점진적으로 증가한다. 본 실험의 경우, 식 (13)의 솔레노이드 내부저항이 외부 저항보다 100배 이상 크기 때문에 외부저항은 무시하였다. 따라서, 보상되는 전류는 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta I = -\frac{V_d}{R_{int,0}} \left(\frac{\alpha \Delta T}{1 + \alpha \Delta T} \right) \quad (14)$$

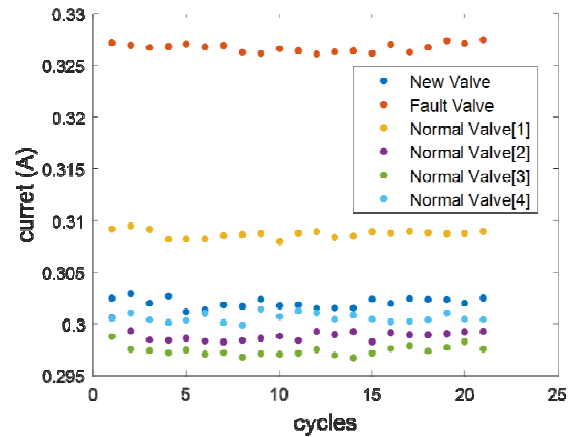
보상되는 전류를 계산하여 실제 측정된 전류에 보상 전류를 더해줌으로써 Fig. 8과 같이 온도의 영향이 제거되었다. 결과적으로, 밸브의 가동시간에 상관없이 고장과 정상밸브의 공급전류의 차이를 확연히 구분할 수 있었다. 이를 통해 솔레노이드 밸브의 고장진단이 가능함을 보였다.

4.3 토의

본 연구에서는 전류 신호를 이용하여 솔레노이드 코일의 소손을 감지하였는데, 전자기력과 관련된 고장모드 외 다른 고장모드에 대해서는 관련성이 적다는 한계점이 있다. 솔레노이드 밸브는 전자기력에 의해 밸브의 동작을 제어하고, 결과적으로 유체의 흐름을 조절한다. 압력인자는 밸브 작동 시, 유체의 반응속도가 느리기 때문에 상태 감시 민감도가 떨어지는 한계점이 있다. 따라서, 상태 감시 성능을 극대화 하기 위해서는, 입력 신호인 전류 신호와 출력 신호인 압력 신호의 상호관계를 잘 분석하고, 두 신호의 장단점을 보완할 필요가 있다. 향후 진행될 연구에서는 다른 고장모드(이물질 적재, 밸브 변 고무 찌힘)에 대한 고장진단기법 개발이 필요하다. 이를 통해 궁극적으로 복합고장을 정확히 진단할 수 있는 고장진단법을 개발되어야 할 것이다.



(a)



(b)

Fig. 8 After Calibration: (a) Histogram of Temperature-Effect-Compensated Nominal Current Value from Normal and Fault Valves, (b) Temperature-Effect-Compensated Nominal Current Value with Respect to Operating Cycles

5. 결론

본 연구에서는 철도차량 제동장치의 주요 고장 부품을 선정하였고, 솔레노이드 밸브에 대한 고장진단기법을 처음으로 제안하였다.

- 솔레노이드 등가 회로 및 온도 보상 모델을 이용하여 솔레노이드 코일의 소손을 진단하는 고장진단법을 개발하였다.
- 제안한 고장진단법이 유효함을 검증하기 위해, 실제 도시철도 현장에서 취득한 솔레노이드 밸브를 이용하여, 솔레노이드 소손을 정확하게 판별 가능함을 보였다.

본 연구는 철도차량 제동장치 주변온도 변화에 관계없이 솔레노이드 코일 소손의 고장진단이 가능하다는 특징이 있다. 또한, 철도차량에 이미 장착된 센서들을 기반으로 하여 추가 센서의 장착이

필요 없다는 점에서, 기존의 발전소, 대형차량, 및 엔진 시스템을 대상으로 수행한 솔레노이드 밸브 고장진단법과는 차별성을 가진다. 제안한 고장진단기법은 철도차량 제동장치의 상태 기반 유지 보수뿐만 아니라 솔레노이드 밸브 제품 생산 시, 불량품 검수 과정에서도 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 상태기반 스마트 유지보수 핵심기술 개발 연구(과제번호 : 13RTRP-C068243-01)의 일환으로 수행되었습니다.

제동장치 솔레노이드 밸브 시편 협조에 대해 서울도시철도공사 담당자 분께 감사 드립니다.

참고문헌

(References)

- (1) Cho, S. J., 1990. 09. 13., 78 People Wounded by Subway Bump Accident in Busan, Seoul, *Dong-A Ilbo*, p. 19.
- (2) Shaffer, D., 2013, Blast in Quebec Exposes Risks of Shipping Crude Oil by Rail, Minneapolis-Saint Paul, MN, *Star-Tribune*, <http://www.startribune.com/blast-in-quebec-exposes-risks-of-shipping-crude-oil-by-rail/214699171/>.
- (3) Isermann, R., 2006, *Fault-Diagnosis Systems*, Springer, Berlin, Germany.
- (4) Goo, B. C. and Lim, C. H., 2008, "Development of Brake Disk Materials with Ni-Cr-Mo," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 2, pp. 188~194.
- (5) Goo, B. C. and Lim, C. H., 2009, "Development of Vermicular Graphite Cast Irons for the Brake Discs of Railway Vehicles and Fatigue Tests," in *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, pp. 377~380.
- (6) Joo, S. M., Kwon, Y. S. and Kim, H. K., 2009, "A Study on the Fatigue Damage of a Railway Disc Brake Surface due to Thermal Stress during Braking Using FEM Analysis," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 2, pp. 212~218.
- (7) Shin, M. J., Kim, C. S., Choi, D. H., Park, M. H. and Kim, J. K., 2009, "TBO and Reliability Evaluation of a Single Brake Display Equipment for Rolling Stock," in *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, pp. 1540~1544.
- (8) Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation, 2000, *Brake System Maintenance Guideline*, Seoul.
- (9) Yang, B. S. and Widodo, A., 2009, *Introduction of Intelligent Machine Fault Diagnosis and Prognosis*, Nova Science Publishers, New York, NY.
- (10) Ma, Q., 1997, *Condition-Based Maintenance Applied to Rail Freight Car Components: the Case of Rail Car Trucks*, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA.
- (11) Rahman, M. F., Cheung, N. C., and Lim, K. W., 1995, "A Sensorless Position Estimator for a Non-linear Solenoid Actuator," in *Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference*, Vol. 2, pp. 1208~1213.
- (12) Kweon, G. T. and Han H. T., 2002, "Dynamic Analysis of Fast-Acting Solenoid Valves Using Finite Element Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 26, No. 7, pp. 959~965.
- (13) Kreyszig, E., 2006, *Advanced Engineering Mathematics*, 9th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, pp. 264~265.
- (14) Oberkampf, W. L. and Roy, C. J., 2010, *Verification and Validation in Scientific Computing*, Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 53~56.