경량전철차량시스템 제동장치의 신뢰도 예측

윤용기, 정락교, 이병송
한국철도기술연구원

A Reliability Prediction for Braking System of the AGT vehicle System

Yong-Ki Yoon, Rag-Gyo Jeong, Byung-Song Lee
The Korea Railroad Research Institute

Abstract - 본 논문은 경량전철차량시스템의 하부장치별로 정의된 목표신뢰도를 바탕으로 제동장치의 구성품에 대한 신뢰도를 예측했다. 신뢰도를 예측하기 위하여 제동장치의 주요 구성품에 대한 모델방법 정의, 국내·외 차량시스템에 사용된 제동장치의 요구신뢰도를 조사·분석 하였다. 신뢰도예측결과는 제동장치의 작동환경에 따라 커다란 차이를 갖고 있다. 본 논문의 신뢰도 예측에 필요한 자료는 신뢰도분석 Tool의 데이터 및 현 차량시스템에 적용된 제품의 데이터를 활용하였다. 향후 차량시스템의 상세설계와 함께 보다 정확한 제동장치의 신뢰성예측이 이루어질 것이다.

1. 서 론

제동장치는 경량전철의 충돌 및 추돌 방지를 목적으로 하는 것으로 열차의 안전한 운행을 보장하는 핵심장치이다. 또한 경량전철의 운행을 무인자동운전을 목표로 하고 있는 상태에서 제동장치의 안전성은 더욱더 중요하게 된다. 현재 운행중인 지하철의 경우 오랜 운행경험을 축적하고 있으나 해마다 제동장치의 고장으로 인한 운행지연이 발생되고 있는 상황으로 이러한 원인은 제동장치에 대한 설계 및 제작과정에의 신뢰성 및 유지보수과정의 소홀로 발생되고 있다.

일반적으로 제동장치는 공기압축기, 압축된 공기를 저장하는 탱크인 Reservoir, 대차에 설치되는 공기스프링 및 Valve(Levelling, Differential), 제동실린더, 디스크 및 제동작용을 제어하는 제동작용장치(Brake Operating Unit,BOU)등으로 구성된다. 특히 BOU에서 출력되는 공기압력은 기초제동을 하는데 충분한 제동력을 제공할 수 없기 때문에 증폭장치인 Chamber & Cylinder를 사용하고 있다.

본 논문에서는 각 구성장치 중 기계적인 부분에 대한 모델링 방법을 기술하고, 기본설계단계에서 선정된 부품 및 데이터를 바탕으로 제동제어장치의 신뢰도를 예측하였다.

2. 본 론

2.1 제동장치 모델링

제동장치는 열차의 움직임을 감소시키는 동시에 발생되는 열을 흡수 또는 방출을 통하여 충분한 제동력을 인가하여 열차의 안전한 운행을 보장해야 한다. 제동장치가 이러한 기능을 충실히 수행하기 위해서는 Actuator, Spring, 제동라이닝, Bearing, Solenoid, Valve, 밀봉 및 틀(Housing)등 제동장치의 주요 구성품에 대한 신뢰도를 모델링하는 것이 필요하다.

제동장치의 전체 고장율은 식(1)과 같이 제동장치 각 구성품의 고장율을 더하여 구해진다.

$$\lambda_{BR} = \lambda_{AC} + \lambda_{SP} + \lambda_{FR} + \lambda_{BE} + \lambda_{SO} + \lambda_{VV} + \lambda_{SE} + \lambda_{HO} \quad (1)$$

λ_{BR}:제동장치, λ_{AC}:Acturator, λ_{SP}:스프링, λ_{FR}:제동라이닝, λ_{BE}:베어링, λ_{SO}:솔레노이드, λ_{VV}:발브, λ_{SE}:밀봉, λ_{HO}:틀(3.0)

2.1.1 마찰재

제동장치의 신뢰성은 마찰재의 마모와 깊은 관련성을 갖는다. 제동 시 생성되는 열과 마찰의 크기는 (1)표면에 인가되는 압력의 양 (2)작동환경 (3)표면 거칠기 (4)표면 재질 (5)제동횟수에 의해서 결정된다.

이러한 제동 마찰재의 고장율을 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda_{FR} = \lambda_{FR.B} \cdot C_{BT} \cdot C_{RD} \cdot C_{SR} \cdot C_T \quad (2)$$

$\lambda_{FR.B}$:기본 고장율, C_{BT}:제동형식, C_{RD}:오염물질 C_{SR}:표면처리, C_T:대기온도

2.1.2 Actuator

Actuator의 고장율에 영향을 미치는 것은 부하환경으로 내적인 것과 외적인 것으로 구분할 수 있다. 외부환경은 저장, 수송 및 사용 장소 및 사용기간동안의 충격부하가 고장율에 영향을 준다. 내부부하는 작동장치의 내부압력변화, 압력차이, 마찰력, 온도에 의한 수축과 팽창으로 내부에서 작용하는 힘 및 외부부하의 충격이 전달되어 발생되는 힘에 의해서 생성된다.

피스톤/실린더 작동장치에 대한 고장율 모델에서 고려할 내용은 오염물질과 온도의 영향으로 고장율 모델은 다음과 같다.

$$\lambda_{AC} = \lambda_{ACB} \cdot C_{CP} \cdot C_T \quad (3)$$

λ_{AC}:고장율, λ_{ACB}:기본고장율 C_{CP}:오염계수 C_T:온도계수

2.1.3 베어링

일반적으로 사용되고 있는 베어링 데이터에 따르면 베어링의 사용수명은 과도한 마모 및 피로에 의해서 결정된다. 과도한 마모의 원인은 베어링의 설치가 적절치 못하거나 가혹한 환경(윤활부족, 오염, 충격, 진동 및 온도)에 노출되는 것이다. 또한 베어링을 구성하는 Load Carrying Balls, Raceway, Rollers 등은 주기적으로 접촉스트레스에 노출되어 있어 베어링은 최종적으로 피로에 의해서 고장이 발생된다.

베어링의 피로예측은 B_{10}수명의 통계학적인 방법을 사용한다.

$$\frac{\lambda_{BE}}{\lambda_{BE.B}} = \left(\frac{C}{P}\right)^y \quad (4)$$

λ_{BE} = 고장율(고장회수/백만회전)
$\lambda_{BE.B}$ = B_{10}수명에서의 기본 고장율
C = 동적부하율, P = 등가 원주부하
y = 3.0(볼베어링), 3.3(구름베어링)

2.1.4 Solenoid

솔레노이드의 신뢰도는 코일조립구조, 스트로크 길이 및 작동환경에 의해서 제한된다. 솔레노이드의 주고장은 열에 의해서 코일이 단락 또는 개방되는 것이다.

솔레노이드의 고장율 모델은 다음과 같다.

$$\lambda_{SO} = \lambda_{SO.B} C_T + \lambda_P + \lambda_C \quad (5)$$

λ_{SO}:고장율, $\lambda_{SO,B}$:기본고장율(2.77), C_T:대기온도
λ_C:접점고장율 λ_P:전기자 고장율

2.1.5 밸브

주로 사용되는 밸드형식은 Poppet형, Sliding-Action 형이 있다.

Poppet형은 유체흐름제어, 압력제어 및 방향을 제어한다. 이 타입은 솔레노이드 및 격판을 사용할 수 있으며 스트로크가 짧은 것이 특징이다. Sliding형의 균일한 압력을 필요로 하는 곳에 주로 사용된다.

1) Poppet형 고장율

$$\lambda_{PO} = \lambda_{PO,B} C_P C_Q C_F C_v C_N C_S C_{DT} C_{SW} C_W \quad (6)$$

$\lambda_{PO,B}$:기본고장율(1.40)

C_P:압력 C_Q:누설허용치 C_F:표면처리
C_V:윤활/온도 C_S:seat스트레스 C_N:오염
C_D:seat직경 C_{SW}:seat land폭 C_W:flow rate

2) Slide형 고장율

$$\lambda_{PO} = \lambda_{PO,B} C_P C_Q C_v C_N C_B C_{DS} C_\mu C_W \quad (7)$$

$\lambda_{PO,B}$:기본고장율(1.25)

C_P:압력 C_Q:누설허용치 C_V:윤활/온도
C_N:오염 C_W:flow rate C_μ:마찰
C_B:spool청결 C_{DS}:spool직경

2.1.5 밀봉

1) 정적밀봉

이 밀봉은 서로 접촉하고 있는 면의 상대적인 움직임 없이 기계적으로 조립되어 접촉하고 있는 표면사이의 내부 압력을 유지하고, 조립된 곳에서 유체 및 가스가 유출 및 오염물질의 내부유입을 차단한다.

이 밀봉의 신뢰성에 영향을 미치는 것은 밀봉대상인 유체 또는 가스, 내부압력, 온도, 외부의 오염물질, 표면 및 결합부분에서 발생되는 플랜지(이음매 태두리) 압력이 있다. 정적인 밀봉의 고장율은 사용조건아래에서 허용가능한 누설과 실제 누설의 함수로서 다음과 같다.

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B}\left(\frac{Q_a}{Q_r}\right) \quad (8)$$

λse.b:현장데이터를 바탕으로 한 기본고장율
Qa:실제 누설율
Qr:사용조건 하에서의 허용할 수 있는 누설율

2) 동적밀봉

동적밀봉은 밀봉면 사이에 움직임이 있는 곳에 발생할 수 있는 누설을 제어하는 것으로 결합하는 면이 서로 다른 재질로 밀봉면사이의 동적운동에 의한 과도한 열이 발생하지 않도록 해야 한다. 과도한 열의 발생은 밀봉면 열경화을 유발하여 누설율을 증가시킬 수 있는 갭을 만드는 원인이 된다. 또한 물질의 특성을 바꿀 수 있어 밀봉의 마모율을 급격하게 증가시킬 수 있다.

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot C_Q \cdot C_H \cdot C_F \cdot C_v \cdot C_T \cdot C_N \cdot C_{PV} \quad (9)$$

$\lambda_{SE.B}$:기본고장율(2.4)/백만시간

C_Q:허용 누설량 C_H:접촉 스트레스/밀봉단단함
C_F:밀봉연함 C_v:유체점성 C_T:온도
C_N:오염 C_{PV}:압력-속도

2.2 제동장치의 목표신뢰도

경량전철시스템에서 정의하는 고장은 5분이상의 운행지연이 발생되는 사건으로 하였다. 열차의 1년 평균가용율은 90%이상으로 1대의 차량이 1년동안 주행하는 거리는 13만km일 때 목표로 하는 고장발생회수는 1회로 제한한다. 이러한 정의에 따른 경량전철 차량시스템의 각 하부장치별 목표신뢰도 및 배분율은 표.1과 같다.

또한 최근에 발주된 해외의 철도차량에 대해서 요구하는 목표신뢰도를 조사한 결과 표.2와 같다.

표.1 경량전철차량시스템의 목표신뢰도 배분

구성품	신뢰도 비율(%)	신뢰도값(MDBF)
차체	2.33	55,793
대차/현가	0.04	3,250,000
조향장치	5.76	22,569
통로/연결기	0.06	2,166,667
추진장치	20.81	6,246
보조전원장치	14.67	8,861
제동장치	19.01	6,838
출입문장치	14.51	8,959
공기압축기	7.60	17,105
열차제어장치	15.21	8,547

MDBF:Mean Distance Between Failurs(km)

표.2 해외 철도차량시스템의 요구신뢰도

시스템	구성품	요구신뢰도	
a	열차제동제어	534,759	MTBF
	차량제동제어	38,670	
	전기제동	100,000	
	주공기 압축기	2,882	
	보조공기 압축기	5,764	
b	제동장치	20	회/백만마일
	마찰제동제어	2.8	
	공기/유압시스템	4	
c	전기/공기제어 공기제동구성품 배관 및 핏팅 Acturator/디스크 주차제동장치 Spin/Slide장치	548	MTBF (최소사양)

MTBF:Mean Time Between Failurs(hr)

2.3 제동장치의 신뢰도 예측

현재 개발을 목표로 하고 있는 경량전철차량시스템은 고무차륜형식으로 2량 1편성을 제작한다. 2량 1편성에 적합한 제동장치의 구성에 의해 신뢰도를 예측하였으며, 결과는 표.3과 같다.

표3. 제동장치의 신뢰도 예측

구성품	수량	고장율
Screw Air Compressor	1	9.51
Compressor Inverter	1	6.71
Compressor Governor(Limit SW)	1	28
Air Dryer(Twin Tower)	1	6.67
Main Reservoir(Tank)	1	0.12

구성품	수량	고장율
Brak Operting Unit	2	80.2
Valve(Pressure Regulator)	2	2.06
Valve(Operator_Pneumatic)	2	1.02
Valve(Solenoid)	2	2.02
Control Unit	2	35
Supply Resevoir	2	0.12
Aux Reservoir	2	0.12
Chamber & Cylinder	4	0.048
Caliper Cylinder	4	1.01
Air spring	8	16.2
Spring	8	9.09
Valve(differential)	8	3.56
Valve(Level)	8	3.54
계		149

100만시간동안 열차를 운행할 경우 제동장치에는 149회의 고장이 발생하는 것으로 나왔다. 이 고장율을 식 (10)에 의해서 MTBF 및 MDBF로 환산하여 구한 결과 MTBF =6,711[hr], MDBF=201,330[km]가 되었다.

경량전철 고무차륜형식 표준사양에서 고시된 표정속도는 30km/h 이상이다. 일반적으로 평균속도는 표정속도보다 높으나 평균속도를 표정속도로하여 MDBF의 최소값을 구하였다.

$$\text{고장율} = \frac{1}{MTBF} = \frac{\text{평균속도}}{MDBF} \qquad (10)$$

MTBF = 1,000,000 / 149 = 6,711(hr)
MDBF = 6,711 * 30km/h = 201,330(km)

예측한 MDBF는 목표신뢰도값 6,838(km)보다 매우 높음을 알 수 있다. 그러나 신뢰도값 예측은 환경조건에 따라 결과에 많은 차이가 있다. 환경조건변경에 따른 예측신뢰도값의 차이는 다음과 같다.

환경조건 / 신뢰도	Ground, fixed	Ground, mobil
고장율	149	892
MTBF	6,711	1,121
MDBF	201,330	33,630

"Ground, mobil"환경에서도 목표신뢰도를 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다. 그러나 기본설계데이타를 사용했기 때문에 실제의 작동환경을 충분히 만족하지 못하고 있는 상황이라 이에 대한 보완이 요구된다.

3. 결 론

본 논문은 경량전철 차량시스템의 제동장치의 신뢰도 예측에 대한 내용으로 신뢰성분석 tool의 데이터 및 철도차량에 사용중인 내용을 활용하였다. 신뢰도예측결과 경량전철차량시스템의 목표신뢰도를 충분히 만족하고 있음을 확인하였다. 본 결과는 기본설계단계의 신뢰도예측으로 상세한 작동조건 등을 고려한 상세설계 및 제작단계에 걸쳐 계속적인 수정·보완을 하여야 한다.

[참 고 문 헌]

[1] 정락교, 윤용기, 목재균, 이병송, "경량전철 차량시스템의 신뢰도 배분", 2001년도 대한전기학회 춘계학술대회, 전기기기 및 에너지변환시스템, 369-371, 2001년도

[2] 한국철도기술연구원, "경량전철시스템기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(종합시스템엔지니어링)", 1999.

[3] 한국철도기술연구원, "경량전철시스템기술개발사업 2차년도 연구결과보고서(차량시스템)", 2000.

[4] Eric Wright, Rick Sinn, Dr Jonathan Paddison, "Transferred Technology Shapes Brake Design", International Railway Journal, 28-31, March, 1999

[3] Naval Surface Warfare Center, "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", 1998.