

화물열차 공기제동 완해불량 방지 밸브의 내구성 평가

이준구¹, 김철수^{2*}

¹한국교통대학교 일반대학원, ²한국교통대학교 철도공학부

Durability Evaluation on the Air-Braking Release Failure Proof Valve of Cargo Train

J. K. Lee¹, C. S. Kim^{2*}

¹Graduate School, Korea National University of Transportation

²School of Railway Engineering, Korea National University of Transportation

요약 화차 제동은 공기 제동관의 압력변화를 이용해 제동 체결과 완해를 반복적으로 작동하여 수행한다. 화차 공기 제동 완해 불량은 기관사의 제동완해 취급 후에 제동 제어밸브의 오작동으로 인해 부분적인 제동체결상태를 의미한다. 이 현상은 화차 주행 동안 차륜 찰상과 열손상을 발생시킴으로서, 차륜파손 또는 열차 탈선사고를 일으킨다. 따라서 화차의 운행 지연 및 사고방지를 위해서는 공기제동 완해불량을 방지하는 체계적인 연구가 중요하다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 철도운영기관의 제작과 기능요구사항을 고려하여 완해불량 방지밸브를 개발하였다. 또한 본 밸브의 내구성 시험은 화차제동성능 시뮬레이터 성능시험기를 이용하였으며, 이의 작동성능은 반복적인 제동과 완해불량 조건하에 공압이력으로부터 평가하였다. 본 밸브의 보증수명은 화차 주행동안 제동횟수를 고려하여 무고장 시험기법에 준하여 12개 시제품에 대하여 총 16만회 성능시험을 수행하였다. 내구성 시험동안 본 밸브의 공압 입력 시간과 출력시간 및 출력속도의 차이는 거의 일정하였다. 본 밸브의 보증수명은 신뢰수준 95%에서 59,860회이며, 화차 대차에 본 밸브를 설치할 경우에 요구조건인 4년간 고장없이 운용될 수 있음을 의미한다.

Abstract Cargo train braking uses the pressure changes in the air braking pipe to operate the braking tightening and releasing service repeatedly. Air-braking release failure means partial braking caused by a failure of the variable load valve after the driver handling the brake release. This phenomenon causes wheel flaws while driving a wagon, resulting in wheel breakage or train derailment. This study developed the air-braking release failure proof valve considering the technical requirements of the railway operation corporations. In addition, a durability test of the valve was carried out using a braking performance simulator, and its operating performance was evaluated from the pneumatic history under cyclic braking conditions. The warranty life of this valve was assessed by performing 160,000 cycles of testing of 12 prototypes in accordance with the zero-failure test method, considering the number of braking cycles while driving the wagon. During the durability test, the pneumatic input time, output time, and release velocity were almost constant. The warranty life of this valve was 59,860 times the 95% confidence level, which means that it can be operated without trouble for four years when the valve is installed in the bogie of the wagon.

Keywords : Air-Braking Release, Cargo Train, Durability, Railway, Warranty Life

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업 「20RTRP-B108830-06」의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Chul-Su Kim(Korea National University of Transportation)

email: chalskim@ut.ac.kr

Received August 14, 2020

Revised August 31, 2020

Accepted September 4, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

유라시아 대륙철도 연결에 따른 글로벌 철도물 류의 패러다임이 전환되면서 각국의 철도운영기관은 화물열차(cargo train, 이하 화차)의 안전한 운행에 많은 관심을 두고 있다. 화차는 기계부품 조립 체인 대차위의 상판(body floor)에 화물을 적재하고, 선두의 기관차로 견인과 제동작용에 따라 궤도위에서 차륜으로 주행한다. 이중 화차 제동은 공기제동관의 압력변화를 이용해 제동 체결과 완해를 반복적으로 작동하여 수행한다. 화차 운행동안 관련 탈선사고(derailment accident)는 공기제동 완해 불량(air-braking release failure)에 따른 차륜파손으로 주로 발생한다[1]. 공기제동 완해불량은 기관사의 제동완해취급 후에 제동제어밸브의 오작동으로 인해 제동실린더의 공기압을 충분히 배기하지 못하여 잔류공기로부터 발생한 불완전한 제동완해현상이다. 이는 부분적인 제동체결상태로서, 화차 주행동안 차륜 찰상과 열 손상을 발생시킴으로써 차륜파손 또는 열차탈선사고를 야기한다. 이러한 현상이 발생하면 철도운영기관은 열차지연의 승객불편과 함께 서비스 고장으로 막대한 영업손실 피해를 입는다. 따라서 화차의 운행 지연 및 사고방지를 위해서는 공기제동 완해불량을 방지하기 위한 체계적인 연구 개발이 요구된다.

화차 제동장치의 이전연구[2,3]는 남성원 등[2]에 의하여 다양한 화차 공기제동장치들 사이의 균등한 공기압을 얻기 위한 신속 완해밸브를 개발하여 시험을 수행하였다. 또한 철도차량 부품의 내구성 평가에 관한 연구[4-6]는 고속철도와 일반 철도차량의 부품을 대상으로 수행되어 왔다. 이에 반해 화차의 주행안정성 확보를 위한 제동장치의 내구성 평가에 관한 체계적인 연구는 아직 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화차의 주행안정성을 확보하기 위하여 공기제동 완해불량 방지밸브를 설계 및 제작하고, 무고장시험기법에 따른 내구성을 평가하고자 한다.

2. 화차 공기제동 완해불량

Fig. 1.은 화차 공기제동 완해불량 현상의 계통도이다. 화차 공기제동(air-braking)은 감압식 자동공기 제동장치로부터 제동관(braking pipe) 압력을 감압하고, 제어밸브(control valve)가 보조공기통(auxiliary reservoir)을 열고, 제동실린더(brake cylinder)의 압력을 증압하여

발생한다. 제동장치 종류에는 K형, P4a형, KRF-3형 등의 제동장치가 있으며, 이들은 완해, 충기, 제동 및 랩작용을 수행한다[7]. 그리고 완해(braking release)는 제동관 압력을 통상 $5\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 으로 충기하고, 제어밸브로부터 제동실린더의 압력을 배기시켜 작동한다. 화차 제동장치는 완해취급 시 제동관을 증압하여 제어밸브와 제동실린더를 연결한다. 정상조건하에 충기상태의 제동실린더 공압은 제어밸브의 배기구를 통해 완전히 배기하면서 차륜과 접촉된 제륜자를 복귀시킨다. 그러나 제동완해 불량은 제어밸브의 오작동으로 인하여 제동실린더 공압을 충분히 배기되지 않고 잔여 공압하에 부분 제동 체결함으로써, 주행동안 차륜과 제륜자사이에 밀착되는 현상이다. 따라서 제동완해 불량을 해결하기 위해서는 제동완해 시 제동실린더의 잔여 공압을 강제적으로 배기시키는 기계장치가 필요하다.

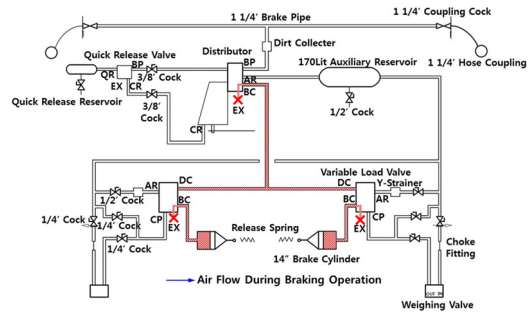


Fig. 1. Schematic diagrams of malfunction of the air brake release

3. 화차 제동완해 불량 방지 밸브

화차 제동장치에는 제동완해시 제동실린더의 잔여 공기압을 강제배기시켜 제동완해 불량을 방지할 수 있는 밸브 개발이 필요하다. Table 1.은 철도운영기관의 제작과 기능 요구사항을 정리한 것이다. 본 방지 밸브는 4년간의 내구수명, 무전원방식의 화차 특성을 고려한 기계적 동작, 그리고 제동밸브의 종류에 상관없이 화차에 적용되어야 한다. Table 1의 기술사양으로부터 본 연구에서는 Fig. 2.와 같이 제동관과 제동실린더관 사이에 설치 가능한 제동완해불량 방지 밸브를 개발하고자 한다.

Fig. 3.은 화차 제동완해 불량 방지 밸브의 개념설계에 대한 동작 모습과 모식도이다. 제동상태는 Fig. 3(a)과 같이 충기된 제동관(BP)의 공기를 감압하면 본 밸브

의 스푼(spool)이 스프링력에 의해 이동하여 제동실린더관(BC)과 본 밸브의 배기구사이 연결을 막는다. 이후에 정상적인 완해작용은 제동관이 증압되어 제어밸브와 BC 사이가 연결되지만 제동실린더의 공기압이 배기되지 않고 완해불량 현상이 발생되면, Fig. 3(b)와 같이 제동관의 증압된 공기압이 본 밸브로 유입되고, 이 힘에 의해 스푼이 밀려 제동실린더관이 본 밸브의 배기구와 연결되어 제동실린더의 잔여 공기압을 배기시켜 완해불량을 해소한다. 즉, 본 밸브는 제동관과 제동실린더관 사이에 연결하여 제동작용 시에는 작동하지 않고, 완해작용 시 제동관의 $5\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 의 공기압으로 본 밸브를 개방하여 연결된 제동실린더의 잔여공기를 배기함으로써 완해불량 현상을 방지하는 것이다.

Table 1. Technical requirements of the air-braking release failure proof valve of cargo train

Production requirements
- Simple to install without major modification of existing equipment
- Minimize weight
- Operate by mechanical mechanism
- Demonstrate a minimum warranty life of 4 years
Functional requirements
- Easy to maintain
- Possible to be installed on vehicles currently in operation
- Minimize poor braking or malfunction of the brake release
- All brake control valves are available regardless of type

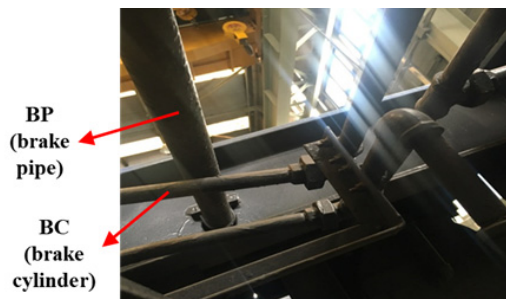


Fig. 2. Installation example of BP and BC in air brake device

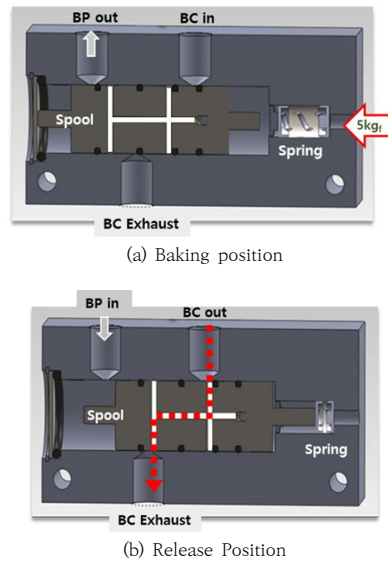


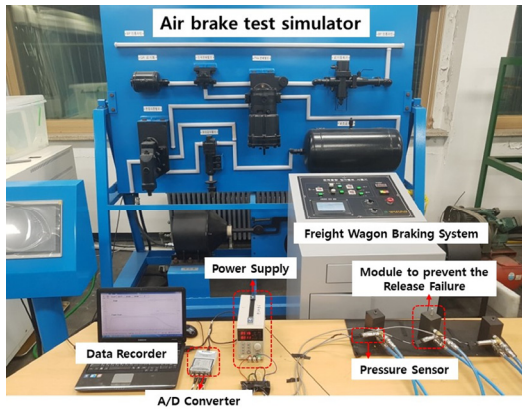
Fig. 3. Operating mechanisms of the prototype valve to troubleshoot the air brake release malfunction of cargo Train

4. 성능 및 내구성 시험

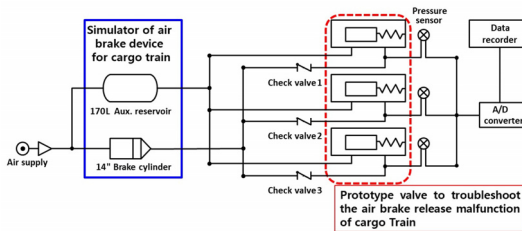
4.1 성능 및 내구성 시험기

Fig. 4.는 본 완해불량 방지 밸브의 내구성 시험기 실제 사진이다. 화차제동 시험시뮬레이터(air brake test simulator)는 Fig. 4.(a)와 같이 화차와 동일한 조건인 14" 제동실린더, 170L 보조공기통과 $5\sim 6\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 공압을 적용한 화차공기제동장치, 데이터 저장장치(Data Recorder), 전원공급기, 아날로그/디지털 변환기(A/D Converter), 제동 완해불량 방지밸브, 압력센서로 구성된다. Fig. 4.(b)는 본 시험에 사용된 시험장치의 구성도를 나타낸다. 본 시험기는 3개의 밸브를 동시에 시험하도록 제작되었다. 본 방지밸브는 시험기의 제동관과 제동실린더관 사이에 직접 연결되어야 하므로 본 시험기도 동일한 조건으로 체결하였다. 또한 본 시험기는 공압제어부를 통해 제동실린더의 공기압을 채워 완해불량 조건을 설정하고, 제동관을 증압함으로써 방지밸브에 의하여 제동실린더의 잔여공기압을 강제 배기한다.

Table 2.는 본 시험기의 구성품에 대한 상세사양을 정리한 것이다. 본 화차 제동완해 불량 방지 밸브의 작동 여부와 성능은 반복적인 제동과 완해불량 조건하에 본 밸브의 공압이력으로부터 평가한다.



(a) Testing machine



(b) Composition diagram

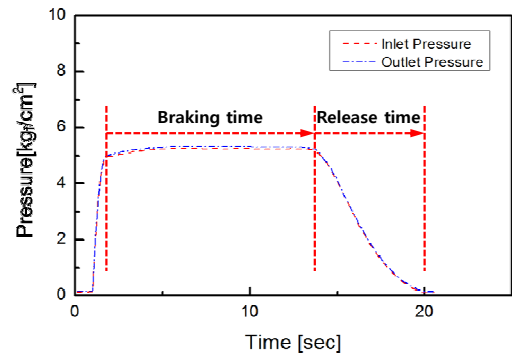
Fig. 4. Durability test equipments of the air-braking release failure proof valve

Table 2. Design specifications of components

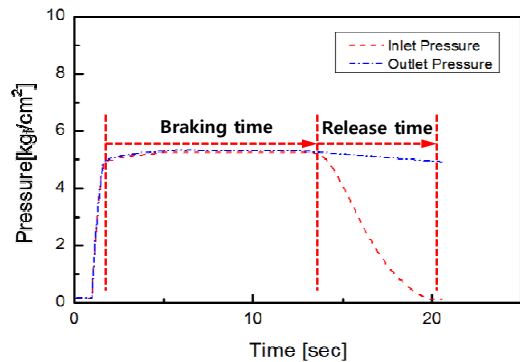
Item	Contents	
Power supply	Voltmeter	M4Y-AV-6, AC220[V]
	Power switch	KG SERIES KGF-NM1R, AC220[V]
	Emergency switch	KG SERIES KGE-N4R1R, AC220[V]
	Timer	FX4S, AC220[V]
	Touch pannel	7[inch]
Pneumatic pressure control	Digital pressure sensor	Type : SPSA Power: 12~24[VDC]±10% Current : < 50[mA]
	Pneumatic valve	AC220[V]
Air brake test simulator	Braking cylinder	Diameter: 14[inch]
	Auxiliary air reservoir	Capacity : 170[L]
	Air filter	TAF4000-04
Air compressor	220[V]/60[Hz], 2.4[kW] Capacity : 90[L], Pressure: 6~8[kg/cm ²]	
Pneumatic sensor	Type : PA-21S, Range : 0~10 [bar] Output : 1~5[V] Power : DC 15[V]	

4.2 내구성 시험방법과 고장기준

본 완해불량방지 밸브의 내구성 시험은 먼저 제동조건과 동일하도록 제동관 공압을 배기하고, 제동실린더관으로부터 제동실린더에 극한조건인 완해불량 상태를 만들기 위해 5~6kg_f/cm²의 공압을 충전시킨다. 그 후 제동실린더관을 막아 제동 완해불량을 설정하고, 제동완해를 취급하여 제동관에 5kg_f/cm² 공압을 충전시킨다. 이 때 본 방지밸브는 Fig. 3.과 같이 제동관의 충전된 공기압에 의해 스프링이 개방되어 제동실린더의 공기압을 본 밸브의 배기구로 배기시킨다. 이 때 설치된 압력센서로부터 제동실린더 공압 배기이력을 체크하여 정상적으로 완해여부를 확인한다.



(a) Normal braking release



(b) Abnormal braking release

Fig. 5. Pneumatic histories of the prototype valve

Fig. 5.는 내구성 시험기에 설치된 본 불량방지 밸브의 제동/완해시에 공압이력을 나타낸 것이다. Fig. 5.(a)는 정상상태이며, Fig. 5.(b)는 제동완해불량상태의 공압이력이다. 정상상태 Fig. 5.(a) 공압이력은 입력력 이력이 일치하지만, 완해불량상태의 공압이력에서 입력과 출력

공압은 차이가 발생한다. 이는 제동실린더의 공압이 완전히 배기되지 않고 잔여공압(residual air pressure)으로 기인한다. 내구성시험기는 제동과 완해를 1사이클(Cycle)을 주기적으로 반복하면서 기록한다. 본 밸브의 내구성 임계점은 입력과 출력 공압의 차이에 해당하는 잔여공압이 0.5 kg_f/cm² 이상이면 고장으로 정의하였다.

4.3 보증수명과 무고장 시험시간

본 연구에서는 화차 공기제동 완해불량 방지밸브의 내구성평가를 위하여 보증수명에 따른 무고장 시험방법 [6,8,9]을 이용하여 평가하고자 한다.

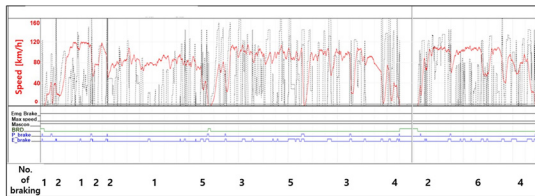


Fig. 6. Analysis results of the operational information recorder for cargo train

Fig. 6.은 국내 화차 운행정보기록장치 분석 결과의 일례이다. 그림에서 기록구간은 화차 운행구간 중 가장 긴 구간인 오봉역에서 부산항역까지이다. 본 화차가 1일 1회를 운행동안 제동취급 횟수는 평균 41회(단, 정차 중 제동취급 제외)이다. 이로부터 본 방지밸브의 제동작용 횟수에 대한 4년간 보증수명(Warranty life)은 식 (1)과 같다.

$$41\text{회}(1\text{일 제동취급}) \times 365\text{일} \times 4\text{년} = 59,860(\text{회}) \quad (1)$$

식(1)로부터 본 방지밸브의 보증수명은 제동취급 횟수 기준으로 59,860회이다.

Table 3은 본 방지밸브의 내구성 검증을 위한 무고장 시험의 요구조건을 정리한 것이다. 여기서 확률변수는 제동취급횟수이며, 신뢰수준(confidence level)은 95%, B₁₀수명(failure probability 10%)을 적용하였다. 본 밸브의 와이블 분포 형상모수(shape parameter in Weibull distribution, β)값은 Weibull 데이터 베이스에 따라 1로 가정하고[10], 시료수는 12개이다. 본 방지밸브의 무고장 시험시간은 Table 3과 같이 계산한 결과, 141,834회이며, 이로부터 내구성 시험시간은 여유값을 적용하여 16만회로 결정하였다.

Table 3. Zero failure test time calculation for durability test of the prototype valve for cargo train

1. Warranty life : 59,860 cycle (B ₁₀ life)	
confidence level	CL= 95%
β(shape parameter in Weibull distribution)	1
No. of sample	n = 12
2. Zero-failure test acceptance cycle	
$t_n = 59,860 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.95)}{n \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{\beta}} = 141,834 \text{ cycle}$	
3. durability test cycle	
zero-failure test cycle : 141,834 → 160,000 cycle	

4.4 내구성 시험결과

Fig. 7.은 내구성 시험동안 본 연구 시제품의 공압 이력을 나타낸 것이며, Figs. 7.(a)~(c)는 각각 1만 cycle, 8만 cycle, 16만 cycle에서 12개 시료로부터 3개 시제품의 공기제동 완해시 입/출력 공압이력 일례이다.

그림에서 보는 바와 같이 시제품들은 모든 이력에서 잔여공압이 0.5 kg_f/cm² 이하로서 정상조건이다.

Table 4는 12개의 시료에 대한 공압이력으로부터 제동과 완해 소요시간 그리고 완해속도를 계산한 평균값이다. 이로부터 최초 1 cycle의 각각의 제동/완해시간과 속도값은 이후 1만, 8만, 16만 cycle에서 측정값과 거의 유사하다. 이는 내구성 시험시간 16만회를 종료한 후에 본 방지밸브의 성능에 이상이 없음을 의미한다. 참고로 Fig. 8은 내구성 시험 종료 후에 시험에 사용된 방지밸브의 주요 구성품을 나타낸 것이다. 각 부품은 표면에서 심각한 마모흔적을 볼 수 없었다. 따라서 본 밸브는 신뢰수준 95%에서 보증수명 59,860회를 보장하며, 화차에 본 밸브를 설치할 경우에 요구조건인 4년간 고장 없이 운용될 수 있음을 의미한다.

Table 4. Operating times and speeds of the prototype valve during the durability test

	1 cycle	10,000 cycle	80,000 cycle	160,000 cycle
Braking Time	11.5[sec]	11.5[sec]	11.6[sec]	11.6[sec]
Release Time	5.5[sec]	5.5[sec]	5.5[sec]	5.6[sec]
Release Velocity	-1.07[m/s]	-1.07[m/s]	-1.07[m/s]	-1.08[m/s]

5. 결론

본 연구에서는 화차의 주행안정성을 확보하기 위하여 공기제동 완해불량 방지밸브를 설계하고 시제품을 제작하였다. 이로부터 무고장시험기법에 따른 내구성을 평가하였고, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 화차 제동완해 불량 현상을 방지하기 위해 화차의 특성에 맞는 기계적 메커니즘 방식의 밸브를 개발하여 기초 설계하였다.
- (2) 본 밸브에 대한 신뢰성 보증의 일환으로 무고장 시험을 시행하기 위해 실제 화차 제동장치와 같은 방식으로 화차제동 시험시뮬레이터를 개발하였다. 이로부터 본 밸브의 작동성능은 반복적인 제동과 완해불량 조건하에 공압입력으로부터 평가하였다.
- (3) 12개의 시제품들은 내구성 시험동안 모든 이력에서 잔여공압이 정상조건인 $0.5\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 이하로 되었다. 내구성 시험동안 본 밸브의 공압 입력 시간과 출력시간 및 출력속도의 차이는 거의 일정하였다. 본 밸브의 보증수명은 신뢰수준 95%에서 59,860회이었으며, 화차 대차에 본 밸브를 설치할 경우에 요구조건인 4년간 무고장으로 운용될 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] S. H. Kim, *A study on improvement of maintenance for freight wagon wheel*, Master's thesis, Korea National University of Transportation, Seoul, Korea, pp.1-20, 2016.
- [2] S. W. Nam, K. H. Moon, D. H. Lee, "Experimental Study on the Improvement of Release Application Characteristics of Pneumatic Brakes for Freight Train", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.25, No.12, pp. 1739-1747, 2011. DOI:<http://dx.doi.org/10.22634/KSME-B.2001.25.12.1739>
- [3] S. W. Nam, "A Study on the Improvement of Release Application Characteristics of Pneumatic Brakes for Freight Train", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.16, No.6, pp. 776-78, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02939337>
- [4] G. H. Kang, "Durability Evaluation of Gangway Ring for the Articulated Bogie of High speed Railway Vehicle", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 20, No. 5, pp. 66-72, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.5.66>
- [5] G. H. Kang, C. S. Woo, C. S. Kim, "Durability Evaluation of Gangway Connections for the High

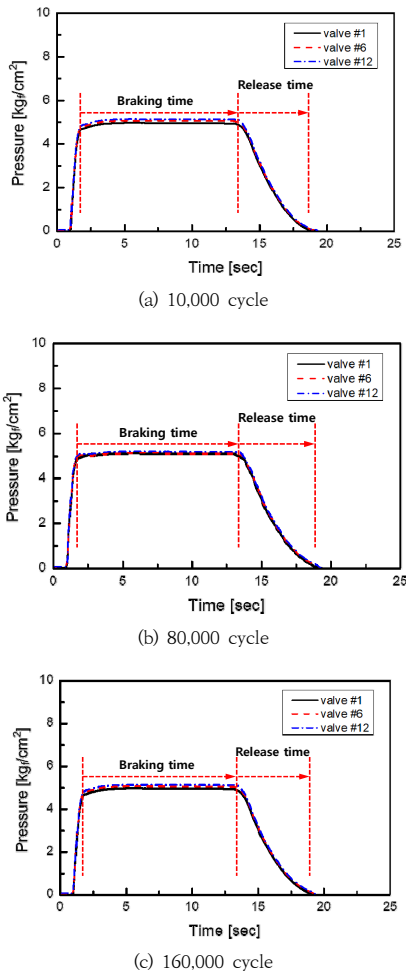


Fig. 7. Pneumatic histories of the prototype valve during the durability test

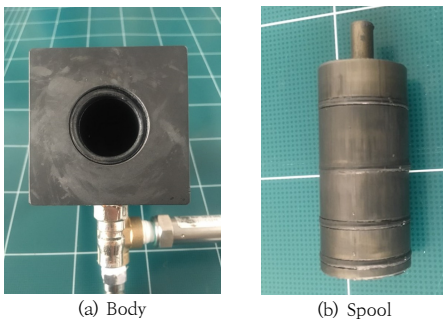


Fig. 8. Major parts status after end of test

- Speed Railway Vehicles”, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 15, No. 8, pp. 4796-4801, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.4796>
- [6] C. S. Kim, M. H. Park, “Durability Evaluation on Doorstep Equipments Used for Low and High Level Platforms at Railway Vehicle”, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 13, No. 9, pp. 3889-3894, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.3889>
- [7] Seoul Railway Vehicle Maintenance Depot, Wagon Maintenance Guide, KORAIL Technical Report, 2000, pp.20-80.
- [8] T. H. Lee, “A Study on the Failure and Life Assessment of High Speed Spindle”, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 1, pp. 67-73, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.1.67>
- [9] S. R. Lee, H. E. Kim, “Determination of No-Failure Test Times for the Life Test of Hydraulic System Components”, *Journal of Drive and Control*, Vol. 3, No. 3, pp. 59-64, 2006.
- [10] https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/mechanical_reliability_data
-

이 준 구(Jun-Ku Lee)

[정회원]



- 2018년 2월 : 한국교통대학교 일반대학원 철도차량운전시스템공학과 졸업(공학석사)
- 2018년 6월 ~ 현재 : 한국철도공사 연구원 주임연구원

<관심분야>

철도차량공학, 철도차량유지보수

김 철 수(Chul-Su Kim)

[종신회원]



- 2002년 8월 : 한양대학교 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한국철도공사, 서울교통공사 자문위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도공학부 교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도CBM