전자밸브 개선품이 출입문 전체에 미치는 신뢰도 지표 특성

Reserch on the overall confidence indicator improved solenoid product characteristics the door

박용문†, 김재훈*, 구정서**

Park Yeoung Mun*, Kim Jae Hun*†, Ku Jung Seu**

In situations other than domestic • high density transportation system at hand, buying measures such as interest continuously for safety issues. In this paper, not a single item (LRU, Line replace unit) for door devices, the risk hardwood major parts model, modeling a combination of serial connection, and thus the reliability indicators for output and, when converted to improve the reliability of the a la carte was to talk about the changes in the confidence indicators door unit.

Keywords : safety issue, risk, reliability, indicators door

고밀도 수송 시스템이 당면한 국내•외의 상황을 보면, 안전관리 현안에 대한 대책 등이 지속적으로 관심을 사고 있다.본 논문에서는 출입문 장치를 단품(LRU, Line replace unit)이 아닌, 주요 부품의 위험경재 모형인 직렬연결의 결합으로 모델링하고, 이에 대한 신뢰도 지표 산출과, 단품의 개조로 신뢰도가 향상될 때 출입문 장치의 신뢰도 지표 변화에 관해 논하고자 하였다.

주요어 : 안전관리, 위험경제, 신뢰도, 출입문장치

1. 서 론

고밀도 수송 시스템에서 비용 효율성이 반드시 필요한 것은 사실이지만, 안전보다 우선일 수 없다는 것은 불변의 진리이다. 철도차량의 특성상, 긴 수명, 고비용, 시스템의 다중 복합성 문제로 인하여 운영기관이 실질적으로 적용하는데는 한계를 갖고 있는 것도 분명하다. 승객과 가장 근접한 장치인 출입문 장치의 신뢰도 지표에 관해 논하고자한다. 출입문 장치의 경우 운행 중 기계적인 결함이 발생하는 경우, 전동차는 속도를 0㎞/h 로 하고, 정지 상태로 유지해야하는 원칙 때문에 충격을 발생시킨다. 이는 승객의 사고로 이어질 수 있으며, 열차의 진행을 막는 병발 고장의 원인이 된다.

본 논문에서는 출입문 장치를 단품(LRU, Line replace unit)이 아닌, 주요 부품의 위험경재 모형인 직렬연결의 결합으로 모델링하고, 이에 대한 신뢰도 지표 산출과, 단품의 개조로 신뢰도가 향상될 때 출입문 장치의 신뢰도 지표 변화의 에 관해 논하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 연구 목적

전동차 주요 장치의 신뢰도를 정량적으로 제시할 수 있다면, 교체 주기의 산정과 정비 방법에 대한 의사결정을 쉽게 할 수 있다. 현행 운영기관에서 사용하고 있는 정비정책 결정 방법과 기존의 연구들은 대부분 단품에 관한 신뢰도 특성 분석이 대부분이다. 본 연구에서는 출입문 시스템의 모델을 주요 고장 부품의 조합으로 모델링하고, 주요부품의 신뢰도를 산출하여 출입문 장치의 정량적 신뢰도 해석 방법을 제시하고자 하였다.

2.2 현장 데이터 수집

연구 대상이 되는 7 호선 출입문 장치는 총 62 편성 3,968 개가 된다. 자료의 분석 기간은 개선 품이 부착되는 시점(2012.05.30)을 기준으로 최근 중정비 기간으로 하였고, 개선품의 경우 부착 일에서 2016.08.31.일을 기준으로 관측 중단하였다. 출입문 장치의 신뢰도를 평가해 교체 시행 전 4 년간의 고장 이력을 전수 검사하였다. 또한 고장 데이터는 중정비간 시간 즉, 4 년이라는 정해진 구간시간 때문에 불완전 데이터의 특성을 갖는 관측중단(Censored type Ⅰ) 형태라 할 수 있다. 이는 일정기간 동안에 고장수를 관측하고 일정시점에서 관측을 종료하는 것을 말한다. 4 종류의 단품 고장 건수는 총 110 개 이고, 나머지 단품(3,858)들은 관측 중단 된 것을 의미한다. 데이터 모집 기간 중, 도어엔진은 38 건, 도어스위치는 31 건, 제어밸브는 개선 전 모델이 28 개, 개선 품이 13 개로 나타났다.

2.3 신뢰성 분석 이론

2.3.1 주요 부품의 수명분포 분석

일반적으로 신뢰성 분석을 위해서는 확률지나 고장률 용지를 사용하여 분포를 확인하고 모수를 추정하는 확률지 이용 방법이 있으나, 최근에는 상용 프로그램이 이러한 번거로움을 피할 수 있게 해주었다. 출입문 주요장치의 신뢰도 분석을 본 논문에서는 수명분포(Life distribution)을 미니탭으로 분석하여 신뢰도 척도를 제시하고자 하였다.

2.3.2 와이블 분포(Weibull distribution)

와이블 분포는 지수분포와 정규분포등 여러 가지 수명분포를 등가 시킬 수 있으므로 신뢰성 모델로서 가장 자주 사용되는 것이 와이블 분포이다. 변수로서 시간 t를 잡고 와이블 분포의 고장 확률밀도함수와 불신뢰도 함수, 신뢰도 함수, 고장률 함수는 (식. 1) ~ (식. 4)과 같다.

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{\beta-1}e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}} \quad \text{(식. 1)}$$

$$F(t)=1-(\frac{t}{\eta})^{\beta} \quad \text{(식. 2)}$$

$$R(t)=e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}} \quad \text{(식. 3)}$$

$$h(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\beta}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{\beta-1} \quad \text{(식. 4)}$$

여기서 β와 η는 와이블(Weibull) 함수의 모수로 형상모수와 척도모수이다.

2.3.3 경쟁위험모형을 사용한 출입문 시스템의 신뢰도 특성

출입문 장치와 같이 여러 개의 부품으로 이루어진 시스템을 경쟁위험모형(Competing Risk Mode)으로 가정할 수 있는데, 이는 여러 고장모드가 제품 내에서 고장을 유발하기 위해 경합한다고 가정하는 것이다. 이는 직렬 시스템의 신뢰도 모델로 생각 할 수 있다. 즉 출입문 장치의 신뢰도 지표는 (식. 5) ~ (식. 7)과 같다. 본 논문에서는 수명분포 분석으로 얻어진 모수 값을 matlab 을 사용하여 출입문 장치를 경재위험 모형으로 분석하였다. 수치적분은 matlab 의 quad function 을 사용한다.

$$R_{System}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) \quad \text{(식. 5)} \qquad h_{System}(t) = \sum_{i=1}^{n} h_i(t) \quad \text{(식. 6)}$$

$$MTBF_{System}(t) = \int_0^{\infty} R_{System}(t)dt \quad \text{(식. 7)}$$

본 논문에서는 3 가지 부품으로 출입문 장치를 모델링 하였으므로, i=1 은 도어엔진, i=3 는 도어스위치를 i=2 는 개선 전·후의 출입문 제어밸브를 나타낸다.

2.3.4 출입문의 고장발생 건수 예측

특정 주기에서 고장이 발생될 예측값은 (식. 8)과 같이 표현 된다,

$$E[N(T)] = \int_0^{t_0^*} h_{system}(x)dt \quad \text{(식. 8)}$$

이는 특정 주기(t_0^*), 즉 $[0, t_0^*]$ 구간에서 고장이 발생될 기댓값(Expected failure number)은 (식. 8)과 같이 표현 된다,.여기서 $E[N(t_0^*)]$ 는 누적고장 함수(Cumulative Hazard function) 이고, $\int_0^{t_0^*} h(t)dt$ 는 고장률을 적분한 것으로 특정 주기 간 발생되는 고장건수의 기대값이 된다,.

2.4 출입문 장치의 신뢰도 지표 분석

2.4.1 주요 부품의 신뢰도 분석

출입문 주요 고장 장치인 도어엔진, 도어스위치, 제어밸브의 고장데이터를 가지고 미니탭으로 타점을 해보면, **Fig. 1 과** 같이 각각의 분포의 추종 특성을 표현해주는 엔더슨-달링(Anderson-Daring) 값이 비슷하고, 모든 분포에 잘 추종하는 것으로 나타났다. 하지만 전절에서 논한 것과 같이 여러 가지 분포를 잘 나타낼 수 있는 와이블 분포를 사용하기로 한다. 최우도방법(Maximum likelihood method) 또는 최소제곱법(Method of least squares)을 이용하여 가정한 분포의 모수 추정값 및 기초통계량 값, 관심 있는 분위수의 추정값 등을 구한다. 여기서는 최우도 방법을 사용하였는데, 관측 중단이 있을 경우, 최소제곱법 보다는 최우도 방법이 모수를 잘 추정하기 때문이다. 고장에 관한 수명자료는 최우도 방법을 사용하여 모수를 추정하였기 때문에 주요 수명 분포를 적합 시켜는 작은 A-D(Anderson-Daring) 검정 값을 고려하여 적정분포를 선택 하면 된다.

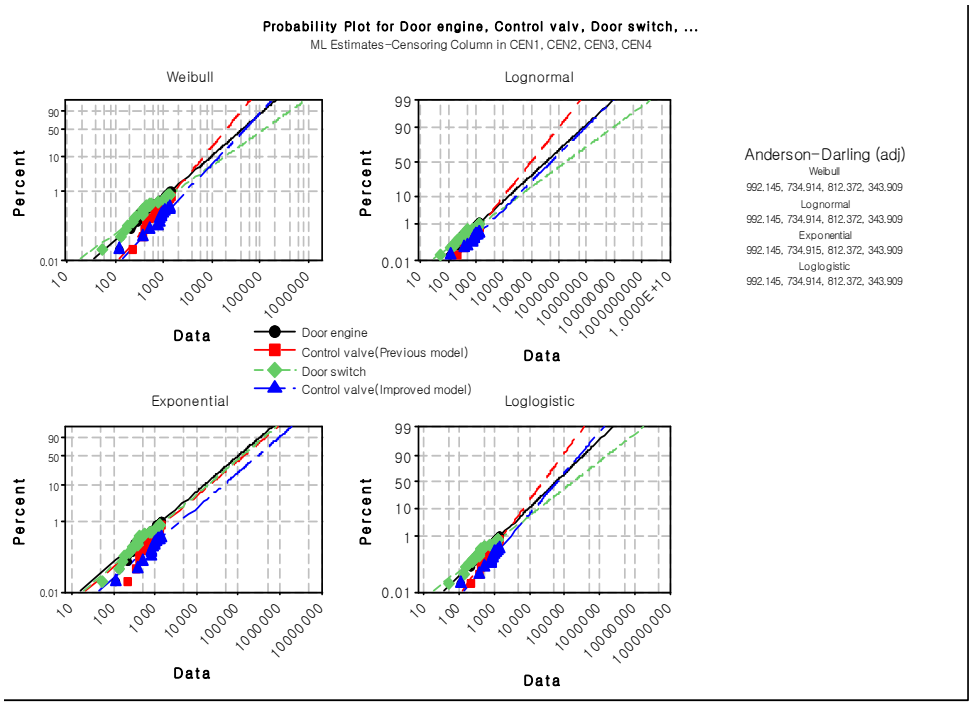

Fig. 1 출입문주요부품의 수명분포의 타점

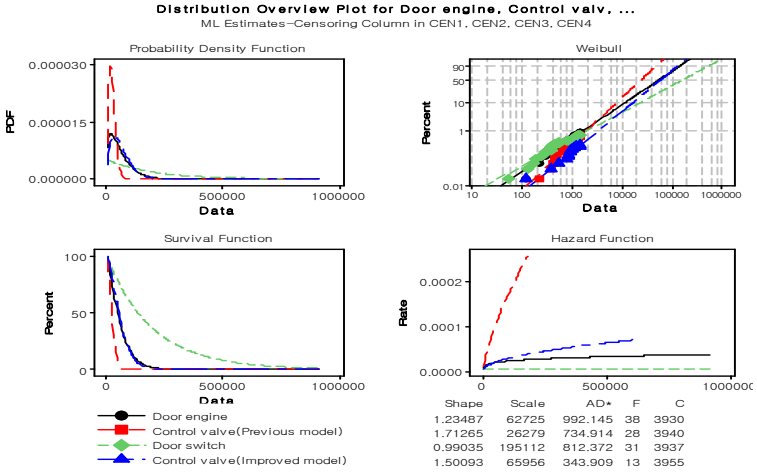

Fig. 2 와이블분포로 해석한 신뢰도함수

Fig. 1은 여러 가지 분포로 고장데이터를 타점한 것을 보여주는데, 타점한 수명분포 모두가 잘 추정함을 나타낸다. Fig. 2는 와이블 분포로 수명분포를 표현한 것으로, 주요 부품의 와이블 모수 도출과 신뢰도 함수 그래프를 보여준다.

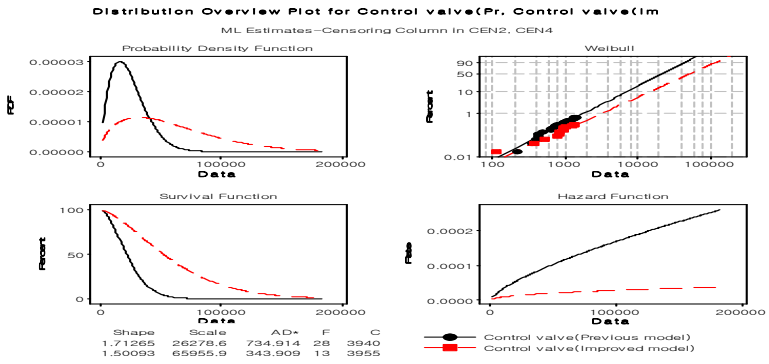

Fig. 3 전자밸브의 개선 전후 신뢰도함수 비교

Fig. 3 은 본 논문의 주요 관심사항인, 개선 전·후 전자밸브의 신뢰도함수를 와이블 분포로 나타낸 것이다. 각종 신뢰도 지표가 향상된 것을 잘 표현해 준다.

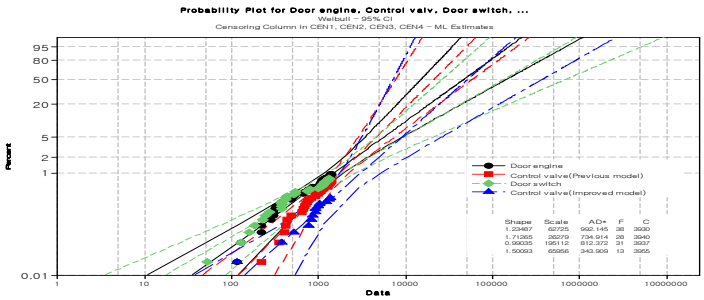

Fig.4 95% 신뢰구간에서 분포의 적정성 검토

Fig. 4 는 와이블 함수로 표현된 4 가지 출입문 부품에 대하여, 95% 신뢰구간에서 분포의 적정성 검토한 것이다. 4 가지 부품 모두 와이블 분포를 사용한 수명 분포가 타당함을 보여준다. **Table 1** 는 와이블 분포로 도출한 분포의 형상(Shape parameter)모수와 63.2%의 고장 시점을 확인할 수 있는 척도(Scale parameter)를 정리하였다. 표 3 은 개선 전·후 제어밸브의 고장간 수명(MTTF)을 비교하였다.

Table 1. 주요부품의 와이블 모수값

	Parameter	Estimate	Lower	Upper
Door engine	Shape	1.23487	0.89891	1.6964
	Scale	62,724.5	18,479.7	212,902
Control valve (Previous model)	Shape	1.71265	1.18294	2.47955
	Scale	26,278.6	8,821.53	78,281.9
Door switch	Shape	0.99035	0.69675	1.40766
	Scale	195,112	33,625.1	1132,147
Control valve (Improved model)	Shape	1.50093	0.87172	2.58432
	Scale	65,955.9	8,058.11	539,852

Table 2. 개선 전후 제어밸브의 고장간 수명(MTTF) 비교

Control valve(Previous model)			Control valve(Improved model)		
Estimate	Lower	Upper	Estimate	Lower	Upper
23,435.3	7,682.38	71,490.3	59,536.9	6,817.95	519,899

Table1 와 같이 도어엔진, 이전 제어밸브와 개선된 제어밸브모드 형상모수(β)가 1 보다 커 열화 특성을 갖는 것으로 나타났으며, 도어스위치의 경우 지수분포에 가까운 특성을 보였다. 63%가 고장 나는 특성 값을 나타내는 척도모수를 개선 전·후의 제어밸브를 분석해 보면 26,278.6 에서 65,955.9 로 대폭 향상된 것으로 나타났다. **Table 2** 의 MTTF 는 개선된 출입문 제어밸브의 수명이 이전 모델에 비하여 얼마나 향상 되었는지를 나타내는데, 2.5 배 이상 고장간 평균 수명이 증가한 것을 보여준다.

3. 장치의 신뢰도 분석

본 연구에 대상이 되는 7 호선 출입문 장치를 3 개의 주요 부품의 고장 경쟁 위험 모델인 직렬시스템으로 모델링하고 **Fig. 5 와** 같이 도어엔진과 도어스위치 는 개선전의 신뢰도 지표를 사용하였고, 출입문 제어밸브는 개선 전·후의 신뢰도 지표를 사용하였다.

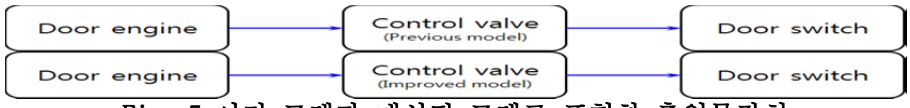

Fig. 5 이전 모델과 개선된 모델로 표현한 출입문장치

Fig. 5 로 모델링한 출입문 장치를 (식. 5) ~ (식. 8)을 이용하여 신뢰도 지표를 도출하였다.

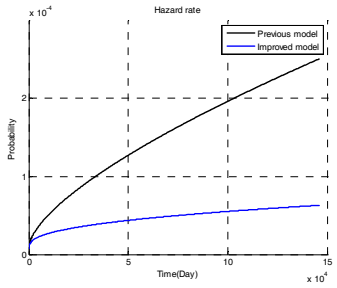

Fig.6 출입문장치의 고장률 비교

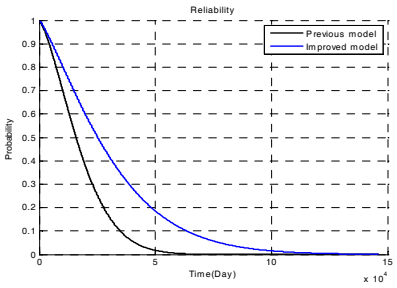

Fig.7 출입문장치의 신뢰도 비교

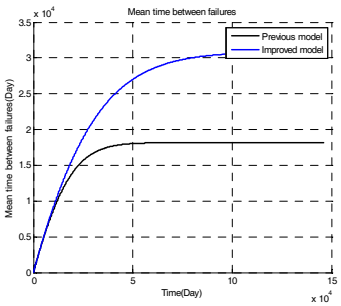

Fig.8 출입문장치 고장간 평균수명 비교

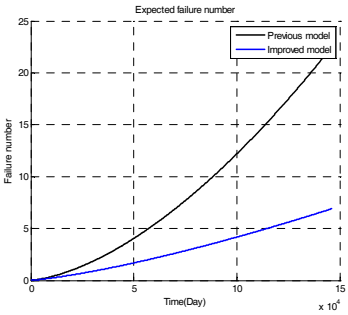

Fig.9 출입문장치의 고장발생 기댓값 비교

Fig. 6 은 (식. 6)을 사용하여 개선 전·후의 고장률을 연산한 것이고, **Fig. 7** 인 (식. 5)를 사용하여 연산한 신뢰도 값을 보여준다. 또한 **Fig. 8** 는 (식. 7)을 사용하여 개선 전·후의 고장간 평균 수명을 나타냈다. 여기서 개선 전·후의 고장간 평균 수명은 18,168.1 일(Day) 에서 30,844.77 일로 향상된 것으로 나타난다. 또한 (식. 8)을 사용하여 연산한 **Fig. 9** 을 보면 사용 시간이 길어질수록 고장 발생의 기댓값은 지속 적으로 차이가 날것으로 예측된다.

3.1 분석 결과

수명 분포 분석에서와 같이 입증된 것처럼 개선된 출입문 전자변의 신뢰도 지표의 많이 향상 되었다. 또한 주요 부품으로 가정한 두 개의 모델 즉, 기존 출입문 장치와 개선된

출입문 장치의 모델링에서도 신뢰도 지표가 향상 되는 것으로 나타났다. 이를 정리하면 표 3과 같은 신뢰도 지표 향상 결과를 얻는다.

Table 3. 개선 전후 출입문의 신뢰도 향상 지표

	신뢰도 지표	개선 전	개선 후
개선 전·후 출입문 전자밸브 신뢰도 지표	형상모수(β)	1.71265	1.50093
	전자밸브의 63% 고장 시점, 척도모수(η)	26,278.6	65,955.9
	평균 고장 시간(MTTF)	23,435.3	59,536.9
개선 전·후 출입문 장치의 신뢰도	평균 고장 시간(MTBF)	18,168	30,845

4. 결 론

본 연구에서는 출입문 시스템의 모델을 주요 부품으로 조합하여 가정하였고, 경쟁위험모형으로 부품의 신뢰도를 산출함으로써 출입문 장치의 정량적 해석 방법을 제시할 수 있었다.이를 위해 개선 전후 주요부품의 신뢰도 지표를 산출하게 되었고, 신뢰도 특성을 정량적으로 확인하였다. 그 결과 출입문 제어밸브의 많은 신뢰도 향상을 확인하였다. 또한 경쟁위험 모형으로 출입문의 신뢰도를 평가한 결과, 제어밸브가 출입문 장치에 미치는 신뢰도 특성을 정량적으로 산출 할 수 있었다.
이는 전동차의 주요 시스템의 신뢰도를 정량적으로 제시할 수 있으면, 교체 주기의 산정과 정비 방법에 대한 의사결정의 기준을 제시할 수 있으므로, 본 연구는 매우 가치가 있을 것으로 본다.

참고문헌

1. Jung, H. S., Park, D. H. and Kim, J. J., 1999, Reliability Analysis and Applications, Youngji Publishers, pp. 80~83
2. 서순근, 신뢰성공학, pp71 ~ 76
3. Crowell, John I., and Pranab Kumar Sen. Estimation of Optimal Block Replacement Policies. Department of Statistics [University of North Carolina at Chapel Hill], 1989.
4. Ahmad, Rosmaini, et al. "The Application Of Preventive Replacement Strategy On Machine Component In Deteriorating Condition-A Case Study In The Processing Industries." (2006).
5. Rinne, Horst. The Weibull distribution: a handbook. CRC Press, 2008..pp49~51
6. http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr123.htm
7. Crowell, John I., and Pranab Kumar Sen. (1989), “Estimation of Optimal Block Replacement Policies. Department of Statistics ”, University of North Carolina at Chapel Hill
8. Ahmad, Rosmaini, et al. (2006). "The Application Of Preventive Replacement Strategy On Machine Component In Deteriorating Condition-A Case Study In The Processing Industries".

9. Rinne and Horst. (2008). “The Weibull distribution: a handbook”. CRC Press, pp. 49~51
10. http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr123.htm
11. 김성일, 박민용, 박정원, 와이블 분포와 정시중단 하에서의 MLE 와 LSE 의 정확도 비교, 한국품질경영학회보 제 38 권 제 4 호 (2010 년 12 월) pp.480-490 1229-1889