

전동차 출입문제어 계전기의 신뢰도예측을 통한 적정 교체주기 연구

(A Study on Evaluation of Optimal Replacement Period by Reliability Prediction for the Door Control Relay of EMU)

한재현* · 김종운 · 구정서**

(Jaehyun Han · JongWoon Kim · JeongSeo Koo)

Abstract

In this paper, we want to know the optimal replacement cycle(time) for this study was performed. The optimal preventive replacement age can be found by finding the value of time that minimizes the cost function(model of Barlow and Jardine). In addition, The reliability of the relay according to the service environment were studied. The use of the exchange relay period is longer, and maintenance cost rate(per hour) may increase, and also the reliability may cause a decline. In addition, considering the preventive maintenance and purchase order, a representative relay(RAX-L440-A type) life was calculated.

Key Words : Aged Replacement, Minimal Maintenance Cost per Hour, Bayes' Theorem

1. 서 론

1.1 연구의 배경

전동차 전기설비용품인 승객출입문장치의 열림/닫힘용 계전기 동작은 승객 안전과 열차 정시운행에 직

* 주저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정

** 교신저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원장

* Main author : Seoul National University of Science and Technology, Graduate school of Railway doctor's course

** Corresponding author : Seoul National University of Science and Technology, Dean of Graduate school of Railway

Tel : 02-970-6878, Fax : 02-978-6878

E-mail : koojs@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2014년 1월 14일

1차심사 : 2014년 1월 17일

심사완료 : 2014년 2월 20일

접적인 관계가 있다. 운전조건, 열차속도, 지상-차상 신호설비가 갖추어진 지정된 장소, 출입문 감시등의 안전 조건이 모두 만족되어야 개폐가 가능하다. 특히 운행 중에 출입문 시스템에서 고장이 발생하여 짧은 시간 동안이라도 지연되면, 사회적으로 막대한 경제적 손해를 초래하게 된다. 이러한 문제 등으로 운영기관에서는 고장을 최소화하기 위한 노력이 매우 중요하게 여긴다. 전동차의 신뢰도를 최선으로 유지하면서 최소의 정비비용을 투자하는 예방보전(preventive maintenance) 활동은 안전 확보뿐만 아니라, LCC(life cycle cost) 측면에서 매우 중요하다 할 수 있다.

1.2 연구의 방법

사용 환경이 다른 동일 계전기(RAX-L440-A)가 동

작환경 차에 따라 어떤 신뢰도를 나타내는지 분석하고, 시간당 정비비용을 고려한 최적 수명 시점과 물품 조달 등을 위한 대표수명을 산출하고자 하였다.

- 최소비용 도출 : Barlow와 Jardine의 시간당 최소비용 모델 식을 사용한 수명 산출
- 대표수명 도출 : 베イズ 정리(Bayes' theorem)을 사용한 수명 산출

RAX-L440-A type의 출입문제어 계전기는 서울도시철도 5호선에서 5K 계전기로, 7호선에서는 DOR 계전기로 현장 호칭되는데, 본 연구에서는 5호선 계전기, 7호선 계전기로 칭하고, 대표 호칭을 RAX-L440-A로 칭하기로 한다.

2. 출입문제어 계전기 고찰

2.1 구성요소와 동작 메커니즘

출입문제어 계전기는 그림 1과 같고, 구성품은 자력의 힘으로 계전기를 작동시키는 코일부, 전기를 통전시켜 출입문을 동작시키는 접점부, 가동접점의 균형과 간섭을 방지해 주는 가이드 혼, 먼지 유입을 방지하는 보호캡 등으로 구성되어 안전하고 정확한 기능을 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

계전기 동작은 전동차가 정지점 인식 후 0km/hrs 근처에 도달시 동작 되는데, 열차 정지와 출발시 출입문의 상태를 감시(door switch의 변위를 감시)하면서, 전용 컴퓨터(ATC, TC)에 관련 신호를 전달하는 기능을 하게 된다. 출입문제어 계전기의 동작 메커니즘은 그림 2과 같으며, 계전기의 특성과 운영환경은 표 1~2와 같다.

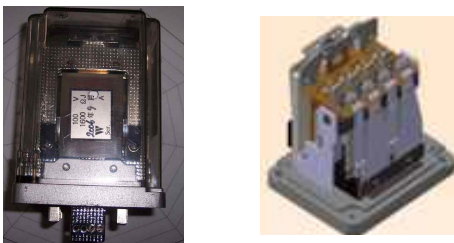


그림 1. RAX-L440-A 계전기 외형
Fig. 1. Relay appearance of RAX-L440-A

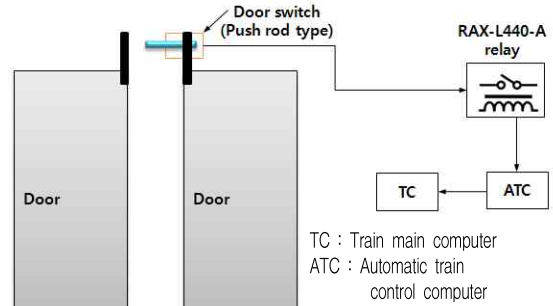


그림 2. 출입문 동작 메커니즘
Fig. 2. Door operation mechanism

표 1. RAX-L440-A 계전기의 사양
Table 1. Specifications of RAX-L440-A relay

Specifications	Operation content
Rated voltage	DC 100(V)
Rated current	5(A)
Contact resistance	1,600Ω±5%

표 2. RAX-L440-A 동작 환경
Table 2. Operating environment of RAX-L440-A relay

Items		Operation environment
Mileage (Daily averages)	Line. 5	285km/hrs
	Line. 7	315km/hrs
Number of operations (Daily averages)	Line. 5	552
	Line. 7	612

2.2 고장발생 특성

승객용 출입문 제어계전기의 고장특성은 그림 3과 같이 통전용 접점부의 아크에 의한 용손, 국부적인 마모로 통전이 안 되는 고장과 계전기를 동작시키는 코일의 저항 값이 증가되어 전압 인가시 자력이 약화되어 계전기를 작동시키지 못하는 2가지 형태의 고장으로 요약된다. 이러한 고장들은 복귀(reset)가 불가능하고 불분명한 출력 특성을 발생시켜 출입문을 정상적으로 동작시키지 못해 열차의 지연운행을 유발시킨다.



그림 3. Rax-L440-A 계전기 고장 형태
Fig. 3. Failure case of Rax-L440-A relay

3. 출입문제어 계전기 신뢰도 분석

3.1 분석조건

고장데이터(field failure data)는 서울도시철도공사 전동차 정보시스템의 자료를 전수 검사하였으며, 그 기간은 그림 4와 같이 최근(2013년 6월 30 기준) 출입창일을 기준으로 최근 4년간 고장데이터를 수집하였다. 즉 정비주기가 도래하는 4년 동안 운행하면서 발생된 고장데이터이다. 여기서 고장은 본선영업운행 중 발생된 고장과 정기 검사이 발생한 고장을 포함하였다.

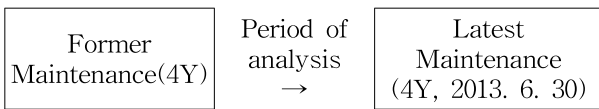


그림 4. 고장데이터 수집 기간
Fig. 4. Period of failure data collection



그림 5. 고장데이터 분석 과정
Fig. 5. Failure data analysis process

고장데이터로 적정수명을 산출하기 위해서는 사용수명 시간으로 고장데이터를 취득하여야 하나, 주행거리로 수명 데이터를 취득하였고, 최소비용 시점을 산출하기 위해 그림 5와 같이 다시 실제 고장발생 시간으로 변환 하였다. 이는 시간으로 수명을 인출할 경우 차량의 운전취급, 본선 유치(주박, 대기), 열차 간격조정을 위한 서행 시간까지도 포함되기 때문이다. 2013년 열차 시간표를 조사한 결과, 전동차는 시간당 약 29.36km를 주행하는 것으로 확인하였다.

3.2 분석방법

필드에서 발생하는 고장데이터의 경우 필연적으로 관측중단 데이터를 포함하게 된다. 계전기의 고장데이터는 4년간이라는 시간을 관측 중단의 종점으로 하고 있으므로, 데이터의 통계 분석시 불완전 데이터인 제 1종 관측중단(Type I Censoring)으로 처리하였다. 그리고 데이터의 신뢰도 분석에는 최소제곱법(LSM, method of least squares)법을 사용하였다. 이는 최대우도방법(MLE, method of maximum likelihood estimation)이 일반적으로 최소제곱법보다 정확한 모수 추정치를 제공할 가능성은 크지만, 소표본 또는 관측중단 비율이 많을 경우에는 최소제곱법이 보다 정확할 수 있으며 특히 신뢰성 분석에서 많이 이용되는 와이블 분포(Weibull distribution)의 경우에는 최대우도 방법이 형상모수를 과대하게 추정하는 경향이 있기 때문이다[1].

3.3 데이터의 적합도 분석

minitab을 사용하여 데이터 분포의 적합도(goodness of fit) 검토를 최소제곱법으로 시행한 결과, 그림 6과 표 3과 같이 계전기의 고장 특성을 대수정규분포(Lognormal), 와이블(Weibull), 로지스틱(Logistic) 분포 모두 0.98 이상으로 잘 표현하는 것으로 나타났으나, 본 연구에서는 신뢰성 분석에 많이 사용되는 와이블 분포를 사용하기로 한다[2].

3.4 신뢰도 분석 결과

계전기의 신뢰도를 분석한 결과를 확인해 보면, 그림 7, 표 4와 같이 동일한 계전기임에도 불구하고 다소 차이 있는 신뢰도 모수 값이 도출되는 것을 확인하였다. 이는 동일 제품의 계전기지만, 동작회수, 진동 등의 사용 환경 차이가 계전기의 수명에 영향을 미친다고 예측할 수 있다. 그림 7에서 시계방향으로 확률밀도 함수, 와이블 분포의 적합도, 신뢰도 함수, 고장률 함수를 각각 나타내는데, 신뢰도 함수와 고

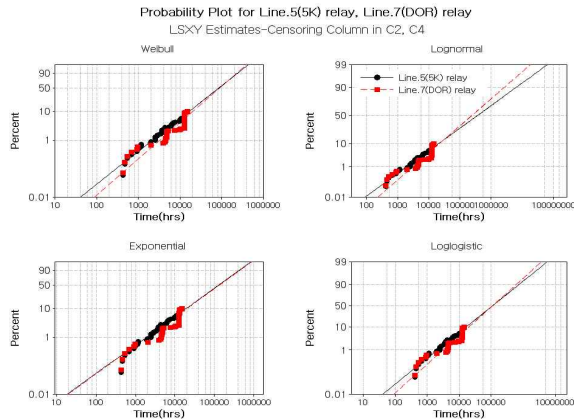


그림 6. 고장데이터의 수명 분포 적합도 검사
Fig. 6. Goodness of fit analysis of failure

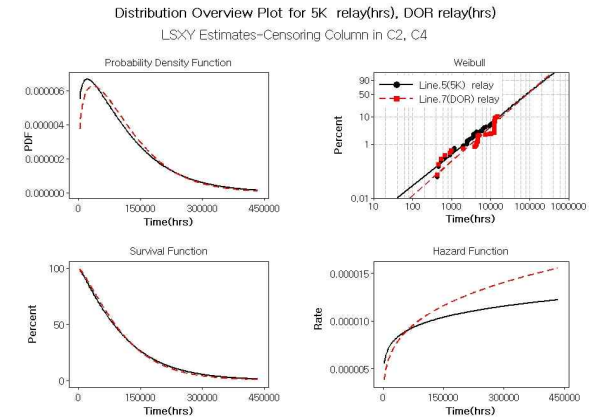


그림 7. 계전기의 신뢰도 함수 특성
Fig. 7. Function of the reliability of the relay

표 3. 최소제곱법에 의한 고장분포의 선형성 평가
Table 3. Coefficient of correlation for LSM

Distribution	Anderson-darling	Coefficient of correlation	
		Line. 5 relay (5K relay)	Line. 7 relay (DOR relay)
Weibull	1791.551	0.985	0.925
Lognormal	1791.549	0.992	0.901
Exponential	1791.549	*	*
Logistic	1791.551	0.985	0.924

표 4. 계전기의 모수 특성
Table 4. Parameter estimates for relay

Division	Line. 5 relay (5K relay)	Line. 7 relay (DOR relay)
Shape	1.153	1.275
Scale	115,666	117,675
Correlation	0.985	0.926
Failure	78	84
Censoring	1,122	892

장울 함수를 보면, 계전기의 사용시간이 증가할 경우 고장의 열화패턴(deterioration) 현상, 즉 사용시간에 비례하여 고장 발생 확률이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

여기서 5호선 전동차 76편성(train) 중 1개 편성, 7호선 전동차 61편성 중 2개 편성은 특별사업 운행으로 분석 대상에서 제외하였다.

4. 계전기 최적 수명 산출

4.1 교체 비용 모형

Barlow와 Jardine이 제시한 소모성 부품의 수명교체(aged replacement) 모델을 고려한 단위시간당 교체 비용 함수의 모형은 다음 식 (1)과 같다[3].

$$C(t_0) = \frac{C_p \times R(t_0) + C_f \times [1 - R(t_0)]}{t_0 \times R(t_0) + \int_0^{t_0} t f(t) dt} \quad (1)$$

식 (1)에서 분자 항은 주기당 총 기대 비용을 나타내며, $R(t)$ 는 t_0 시간까지 고장 없이 예방 교체될 확률이고, $1 - R(t_0)$ 는 t_0 시간 이전에 고장이 발생할 확률이다. 분모 항은 기대시간으로 식 (2)와 같이 표현되며, $f(t)$ 는 확률 밀도함수이다.

$$\int_0^{t_0} x f(x) dx + \int_{t_0}^{\infty} t_0 f(x) dx \quad (2)$$

$$= \int_0^{t_0} x f(x) dx + R(t_0)$$

여기서 C_p : 예방정비 비용, C_f : 고장정비 비용이다.

4.2 정비비용 추정

수치해석을 통한 최적 교체 주기를 산출하기 위해, 식 (1)에 입력될 데이터를 표 5와 같이 산출하였다.

운용 중에 발생하는 고장으로부터 야기되는 비용(간접비용)과 예방정비 비용에 드는 비용을 고려하여 교체 정책을 연구 한다[4]. 열차 지연 등으로 발생하는 간접비용의 경우 서울도시철도공사 수송 현황(2012) 자료를 사용하였다. 나머지 입력 데이터들의 경우 현재 현장에서 사용되는 정비지표를 반영한 값이다.

표 5. 전동차 고장시 정비 비용(단위 : 원)

Table 5. Input cost for train breakdown(Unit : won)

Division	Breakdown maintenance		Preventive Maintenance	
Depreciation cost	44,000		-	
Indirect cost	27,000,000		-	
Subcontractor cost	2,089,000		2,089,000	
Material cost	40,000		40,000	
Labor cost per hrs	21,000	504,000	21,000	42,000
Number of workers	4		2	
Working hrs	6		1	
Cost(won)	$C_f=29,677,000$		$C_p=2,171,000$	

여기서 고장 및 예방정비에서 작업인원, 작업시간의 차이는 고장원인 분석 인원 추가 지원, 본선 영업운영 중 고장이 발생한 차량은 고장 정비시 고장의 완벽 재연으로 원인을 확인해야 되므로 정비시간이 추가로 소요되는 부분이다.

4.3 최적 교체 수명 산출

전동차의 경우 정비주기는 가용도와 신뢰도가 보장된다면, 유지보수 비용이 최소가 되는 시점을 최적의 교체 시간으로 선택되어야 한다. 본 논문에서는 Barlow와 Jardine의 최적 교체 모델(식 (1))을 사용하여 matlab으로 수치해석 하였다.

계전기와 같은 소모성 부품의 수명교체 정책(aged replacement) 하에서는 부품이 고장 나거나, 교체 수명에 이르면 부품을 교체하여 준다. 식 1에서 $C(t_0)$

를 최소화하는 t_0 가 구하고자 시간, 즉 최소의 비용을 소모하는 정비시간으로 본 연구에서 도출하고자 하는 최적 시간이 된다.

최소비용을 고려한 계전기의 수명을 식 (1)을 사용하여 수치 해석한 결과, 그림 8과 같이 5호선(5K relay) 계전기는 70,910시간(2,081,304km)에서 255.45원, 7호선(DOR relay) 계전기는 45,910시간(1,347,520km)에서 230.91원으로 정비 비용이 가장 최소로 소요되는 것으로 나타났다.

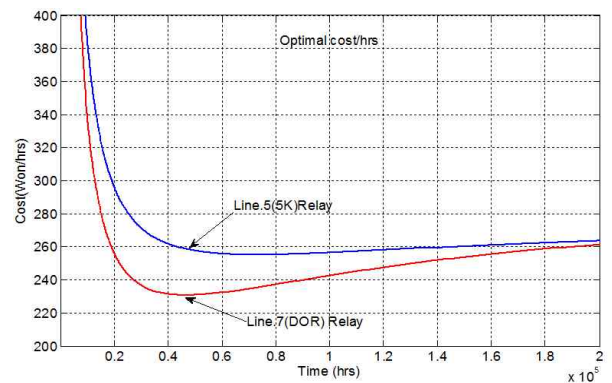


그림 8. 5, 7호선 계전기의 시간당 최소 정비 비용
Fig. 8. Minimum cost per hrs line 5, 7 relay

5. 대표수명 연구

5.1 베이즈 정리(Bayes' theorem)

5·7호선 출입문 제어계전기의 대표수명을 산정하기 위해 표 4에서 도출된 고장분포의 신뢰도 모수값, 식 (1), 베이즈 정리를 활용(식 (2), 식 (3))하였다.

모집단 N내에 m개의 부분 모집단으로 구성되어 있고, 부분 모집단의 사상수가 N_1, N_2, \dots, N_m 이 존재한다. $i=1, 2, \dots, m$ 일 때 i번째 부분모집단에서 A사상이 발생하였다면, 이 사상이 나타날 확률은 $P(A \cap N_i)$ 로 나타낼 수 있으며, 각각 이 부분 집합들에서 A사상이 발생할 확률은 $P(A \cap N_1), P(A \cap N_2), \dots, P(A \cap N_i)$ 이며, 이들이 상호배반(mutually exclusive)이라면, 식 (3)과 같이 조건부 확률로 나타낼 수 있다.

베이즈 정리(Bayes' theorem)[5-6]를 이용하여 m개의 고장 부분 모집단으로 구성된 혼합 모집단으로부터

터 임의로 택한 구성품의 신뢰도는 각각의 고장 부분 모집단 1, 2, ..., m에서 채택될 경우는 각각의 신뢰도 (R_m)를 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(A) &= P(A \cap N_1) + P(A \cap N_2) + \dots, \\
 &+ P(A \cap N_i) \\
 &= P(N_1)P(A|N_1) + P(N_2)P(A|N_2) + \dots, \\
 &+ P(N_i)P(A|N_i)
 \end{aligned} \tag{3}$$

또, $\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{N} = 1$ 이면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$R_{1,2,\dots,m} = \frac{N_1}{N}R_1(t) + \frac{N_2}{N}R_2(t) + \dots + \frac{N_m}{N}R_m(t) \tag{4}$$

위 식을 미분하여 확률 밀도함수를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_{1,2,\dots,m}(t) &= -\frac{d}{dt}[R_{1,2,\dots,m}(t)] \\
 &= \frac{N_1}{N}f_1(t) + \frac{N_2}{N}f_2(t) + \dots + \frac{N_m}{N}f_m(t)
 \end{aligned} \tag{5}$$

5.2 대표수명 산출

표 4와 같이 5호선(5K) 계전기는 1,200개, 7호선(Dor) 계전기는 976개가 신뢰도 해석 대상이 된다. 식 (4)와 (5) 그리고 표 3에 도출된 모수를 이용하여, 환경은 다르지만 계전기의 대표 신뢰도함수(식 (6))와 확률 밀도함수(식 (7))를 도출하였다.

식 (1)을 사용하여, RAX-L440-A type을 시간당 최소비용은 그림 9와 같이 5호선 계전기보다는 적고, 7호선 계전기보다는 크게 평가 되었다. 5·7호선 출입문제어 계전기(RAX-L440-A)의 대표 평균수명(MTTF)은 식 (6)를 적분 $\int_0^\infty R_{RAX-L440-A}(t)dt$ 한 결과, 999,810시간(109,603km)으로 나타났다.

5·7호선 RAX-L440-A 계전기의 구매발주를 기간 산정을 위하여, 베이즈정리(Bayes' theorem)를 사용하여 5K relay와 DOR relay를 대표하는 최소비용 수명을 산출하였다. 비용을 최소화 하는 RAX-L440-A

계전기 수명은 56,910시간(1,670,385km)에서 약 245.24원으로 관측되었다. 표 6은 5, 7호선과 대표 계전기인 RAX-L440-A 계전기의 시간당 최소 정비비용 시점을 정리하였다.

$$\begin{aligned}
 R_{RAX-L440-A} &= \frac{1,200}{2,176} \times e^{-\left(\frac{t}{115,666}\right)^{1.153}} \\
 &+ \frac{976}{2,176} \times e^{-\left(\frac{t}{117,675}\right)^{1.275}}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 f_{RAX-L440-A}(t) &= \frac{1,200}{2,176} \times \frac{1.153}{115,666} \left(\frac{t}{115,666}\right)^{0.153} \\
 &\times e^{-\left(\frac{t}{115,666}\right)^{1.153}} + \frac{976}{2,176} \\
 &\times \frac{1.275}{117,675} \left(\frac{t}{117,675}\right)^{0.275} \\
 &\times e^{-\left(\frac{t}{117,675}\right)^{1.275}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

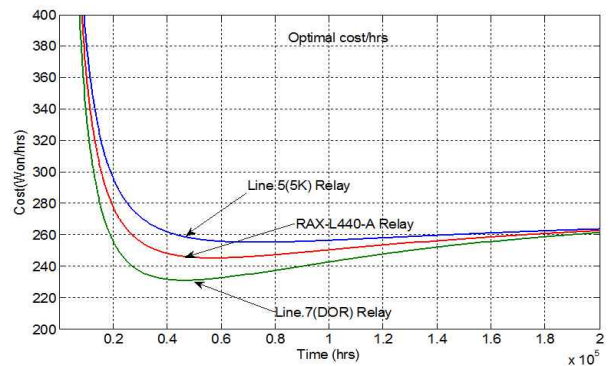


그림 9. RAX-L-440 계전기의 최소비용 비교

Fig. 9. Minimum cost per hour relay for RAX-L-440

표 6. 시간당 최소비용 시점

Table 6. Minimal maintenance cost per hour and exchange point

	Line. 5 relay (5K relay)	Line. 7 relay (DOR relay)	RAX-L440-A
Minimal cost (won/hrs)	255.45	230.91	245.24
Hours	70,910	45,910	56,910

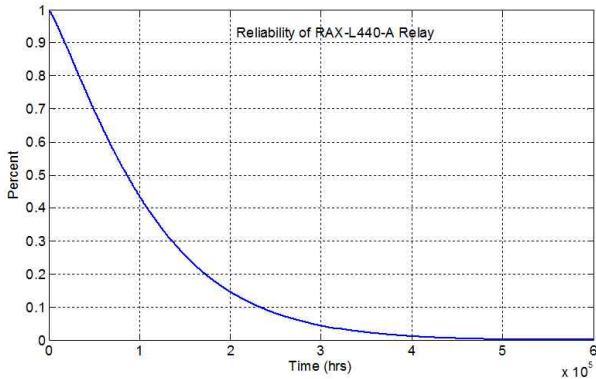


그림 10. RAX-L440-A 신뢰도 변화
Fig. 10. Reliability of RAX-L440-A

6. 결 론

본 연구는 비 수리 부품으로 수명교체(aged replacement)의 대상인 계전기의 최적 정비주기 및 물품 구매 시 활용할 수 있는 정량적인 데이터 산출에 주안점을 두고 연구하였다. 호선별 계전기의 시간당 최소의 정비 비용이 소모되는 최적수명을 정량적으로 도출하고, 대표 수명을 베이지정리(Bayes' theorem)를 사용하여 산출하였다.

연구 결과 현재 서울도시철도 5·7호선에서 사용하고 있는 출입문제어 계전기(RAX-L440-A)가 사용 환경에 따라 신뢰가 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 비용을 최소화하는 최적의 교환주기 검토결과 계전기의 수명주기를 장대화시킬 경우, 그림 9와 같이 시간당 정비 비용이 증가할 수도 있으며, 그림 10과 같이 신뢰도의 하락이 병행되는 것을 확인하였다.

따라서 기존에 사용하던 장치나 부품들이 수명교체(aged replacement) 대상인 경우, 정비주기나 물품 구매 주기를 새롭게 변경하고자 할 때에는 이러한 이론을 적용하여 유지보수 주기를 산출할 수 있으므로 업무에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. h. Kim and W. Jung, "Field Data Collection and Failure Analysis for Durability Improvement", Journal of the Korea Industrial Information System Society, Vol. 16 No. 5, pp. 107-114, 2011.
- [2] W. Jung, "Reliability Estimation of Agricultural Machinery Components Based on OFD and Failure Mechanism Analysis", Journal of society of Korea industrial and systems engineering, Vol. 33, No. 4. pp. 209-217, 2010.
- [3] Sukhdev Singh, "Optimal maintenance policies applicable to repairable system onboard ships", Naval Postgraduate school, pp. 17-20, 1993.
- [4] K. S. Park, "Reliability and Maintenance Engineering", Young-gi Publisher, pp. 325-326.
- [5] C. G. Lee, "A Study on Conditional Probability", Yonsei University Graduate school of Education, pp22-26, 2006.
- [6] C. Y. Kim and J. Goun, "A Study on the Optimal Maintenance time of T-53 Engine", Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society, Vol. 15, No. 2 pp. 143-152, 1998.

◆ 저자소개 ◆



한재현 (韓在玄)

2012년 2월 서울과학기술대학교 철도전문대학원 졸업. 2014년 2월 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정 재학.



김중운 (金鍾運)

2014년 2월 한국철도기술연구원 시스템안전연구단 선임연구원.



구정서 (具正書)

2014년 2월 서울과학기술대학교 철도전문대학원장. 철도차량시스템공학과 교수. 한국철도학회 부회장. 한국철도협회 감사. 한국자동차공학회 철도차량연구회 위원장.