

# 전동차 제동장치의 고장데이터와 비용함수를 고려한 유지보수 정책에 관한 연구

한재현 · 김종운\* · 구정서†

서울과학기술대학교 · \*한국철도기술연구원

(2015. 3. 5. 접수 / 2015. 5. 14. 수정 / 2015. 5. 27. 채택)

## A Study on the Maintenance Policy Considering the Failure Data of the EMU Braking System and the Cost Function

Jae-Hyun Han · Jong-Woon Kim\* · Jeong-Seo Koo†

Seoul National University of Science and Technology · \*Korea Railroad Research Institute

(Received March 5, 2015 / Revised May 14, 2015 / Accepted May 27, 2015)

**Abstract :** Railway vehicle equipment goes back again to the state just before when failure by the repair. In repairable system, we are interested in the failure interval. As such, a statistical model of the point process, NHPP power law is often used for the reliability analysis of a repairable system. In order to derive a quantitative reliability value of repairable system, we analyze the failure data of the air brake system of the train line 7. The quantitative value is the failure intensity function that was modified, converted into a cost-rate function. Finally we studied the optimal number and optimal interval in which the costs to a minimum consumption point as cost-rate function. The minimum cost point was 194,613 (won/day) during the total life cycle of the braking system, then the optimal interval were 2,251 days and the number of optimal preventive maintenance were 7 times. Additionally, we were compared to the cost of a currently fixed interval(4Y) and the optimum interval then the optimal interval is 3,853(won/day) consuming smaller. In addition, judging from the total life, “fixed interval” is smaller than 1,157 days as “optimal interval”.

**Key Words :** repairable system, point process, NHPP, power law model, preventive maintenance, cost rate function

### 1. 서론

전동차는 수명주기 중 60% 이상을 보존비용이 차지할 정도로 전체 운영비용에 미치는 영향이 크다고 한다<sup>1)</sup>. 이러한 이유에서 정량화된 기준에 의해 유지보수 정책을 설정하고, 비용을 절감하는 일은 매우 중요하다 할 수 있다. 고장을 막기 위해 예방정비(Preventive maintenance)를 자주 시행하면 비용의 소요가 크게 되어 고장정비(Corrective maintenance)만을 시행할 때 보다 비용이 초과로 발생할 수 있다. 이를 막기 위해서는 예방정비 비용과 고장정비 비용의 합을 최소로 하는 보존 정책이 필요하다.

전동차의 주요장치들은 운용 중 고장이 발생하면 Fig. 1과 같이 고장 부품을 교체하거나 수리하여 고장 이전의 상태로 되돌릴 수 있는 수리계(Repairable system)로 NHPP (Non-homogeneous Poisson process) Power law

(PLP) 모델을 사용하여 장치의 열화정도를 정량적으로 분석할 수 있다. 이 모델은 IEC 표준<sup>2,3)</sup>, 미군의 RAM guide<sup>4)</sup> 그리고 MIL-HDBK-189A<sup>5)</sup>으로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서도 NHPP Power law 모델로 장치의 신뢰도 정도를 분석하는 방법과 이를 사용하여 보존비용이 최소로 소요되는 최적 예방 보전주기 선정에 관한 정책의 연구를 7호선 공기제동장치의 고장 데이터(Field data)를 사용하여 연구하였다.

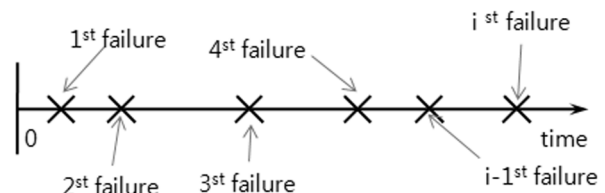


Fig. 1. Repairable system failure process.

† Corresponding Author : Jeong-Seo Koo, Tel. : +82-2-970-6878, E-mail address: koojs@seoultech.ac.kr

Department of Rolling Stock System Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

논문에 구성을 보면, 2장은 수리계 시스템의 신뢰도 분석과 정비정책 이론에 대하여 간략하게 논하고, 3장에서는 공기제동장치의 기능, 데이터 수집 방법과 고장 특성을 정리하였다. 4장은 수리계 시스템의 신뢰도 분석방법을 사용하여 공기제동장치의 신뢰도 특성을 정량적으로 도출하고, 이의 적정성을 통계적으로 검토하는 과정으로 구성하였다. 5장은 4장에서 도출된 신뢰도 특성, 즉 고장강도 함수를 이용하여, 특정 주기에 발생하는 최소수리 횟수의 기댓값과 총 수명주기에 대한 예방정비 회수를 포함하여 비용함수를 모델링하였다. 6장에서는 이 비용함수를 최소로 하는 값(cost rate)을 최적 주기로 산출하였다.

## 2. 수리계(Repairable system)의 신뢰도 이론

시스템 혹은 장치들은 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 첫째는 일회성 혹은 비수리계(Nonrepairable system), 두 번째는 수선 혹은 수리계(Repairable system)로 구분된다. 수리계의 신뢰도 분석은 Fig. 1과 같이 시스템의 고장발생의 시간간격(횟수)에 관심을 갖고, 비 수리계의 경우는 와이블(Weibull) 분포 등과 같이 부품의 수명분포(Life distribution)에 관심을 갖는다<sup>6)</sup>.

### 2.1 점 과정(Point process) 모델

수리계에서는 고장 및 수리과정을 설명하는데 점과정(Point process) 모델을 사용한다<sup>7)</sup>. 이런 점 과정 모델에서 고장 시간간격에 대한 모수적 모형으로는 동질적 포아송과정(HPP)과 비동질적 포아송과정(NHPP) 등으로 신뢰도를 해석하게 된다. 일정한 고장률(Intensity function)의 동질적 포아송과정은 고장 기간과 신뢰성이 악화되는 마모고장 기간을 설명할 수 없으므로 시스템의 전체 수명주기는 비동질적 포아송과정을 이용하는 것이 일반적이다<sup>8)</sup>. 비동질적 포아송과정 중 고장발생의 강도를 모형화 하는데는 식(1)과 같이 Crow (1974)가 제안한 Power law(PLP) 모델이 많이 사용된다<sup>9)</sup>.

$$h(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}, \lambda > 0, \beta > 0 \quad (1)$$

여기서  $h(t)$ 는 고장강도(Failure intensity) 혹은 고장 발생 비율(ROCOF, Rate of occurrences of failures)로 불린다.  $\beta < 1$  이면 신뢰도가 성장 즉, 사용시간 대비 신뢰도의 개선을 나타내며  $\beta > 1$ 이면 열화 되는 특성을 나타낸다. 수리계에서  $\beta > 1$ 인 경우 수명주기 비용(Life cycle cost) 문제와 관련하여 최적의 예방보전(PM) 주기 선정 등의 연구를 많이 시행하고 있다.

## 2.2 보전 정책

수리에 의해 고장 난 장치의 신뢰도가 새것과 같아진다고 가정하면 이를 완전 보전(AGAN, As good as new approach)이라 할 수 있다. 하지만 실제 상황에서는 여러 가지 이유로 기능을 정지시킨 부품만을 수리하거나 교체하므로 고장 나기 전의 상태와 같아진다(As bad as approach)고 가정하는데, 이를 최소수리(Minimal repair)라 한다. 이 두 가지 보전정책의 중간적인 형태가 불완전 보전이다. Fig. 2는 세 가지 보전정책에 대한 고장강도 특성을 보여 준다. 전동차와 같은 시스템의 경우 고장이 발생하면 최소수리만을 시행하고 특정한 주기(Overhaul cycle)에만 예방보전(PM, Preventive maintenance)을 시행하는 보전정책을 사용하고 있다.

## 3. 데이터 모집과 분석

### 3.1 데이터 모집

본 연구에 사용된 데이터는 정확한 발생시점과 원인 그리고 고장발생 결과의 신뢰성을 보장하기 위해 전산에 등록된 고장 자료를 사용하였다. Fig. 3과 같이 영업 운행 중 발생하는 고장과 작업한 정비 실적에 기초한 데이터의 집단(Data set)이다.

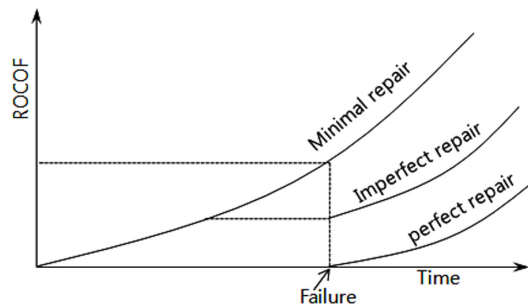


Fig. 2. Type of maintenance policy vs. ROCOF.

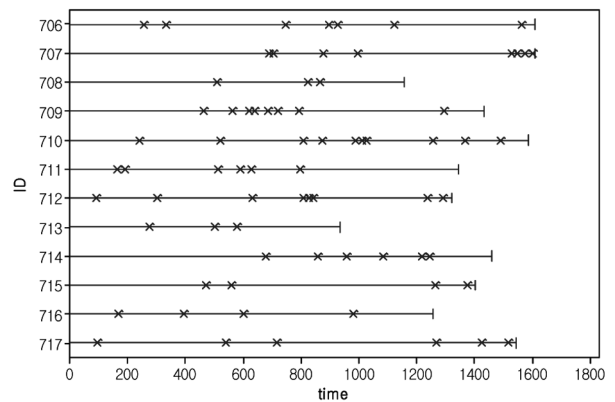


Fig. 3. Event plot for pneumatic brake equipment failures.

총 17개 편성(train) 중 10개 편성만을 선정하여 신뢰도를 분석하였는데, 이는 7개 편성이 특정 기간의 자료가 누락되어 제외하였다. 2013년 12월 30기준으로 중정비간(이전 중정비 출창일과 최근입창일의 시간 간격) 고장기록 데이터를 수집하였다. 또한 중정비의 주기가 4년 이므로, 관측 중단 시간(Time truncated)은 1,460day이다.

### 3.2 공기 제동장치의 기능 블록도

Fig. 4는 본 연구의 대상이 되는 7호선 전동차 제동장치의 기능 블록도(Functional block diagram)로서 마찰제동에 필요한 제동공기의 발생부터 제동 작용에 의한 속도의 감속과 정지 기능에 관해 간략하게 설명해 준다.

### 3.3 고장 데이터 분석

최근 중정비 간 공기제동 장치의 기능을 정지 시킨 단위 부품(LRU, Line replace unit)을 분석해 보면 Fig. 5과 같은 파레토 차트로 표현할 수 있다.

공기제동장치의 기능정지에 기여한 상위 3가지 부품의 FMEA(Failure mode and effect Analysis) 결과는

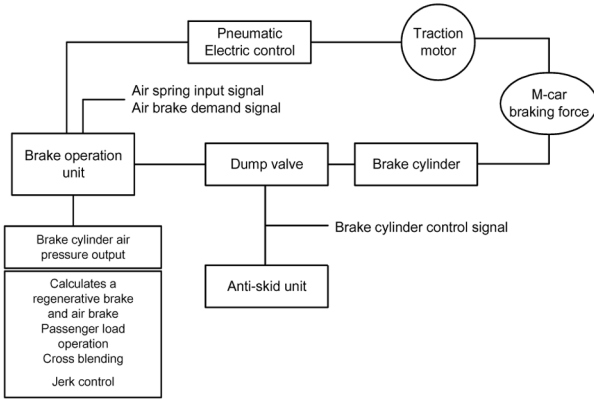


Fig. 4. FBD of the pneumatic brake equipment.

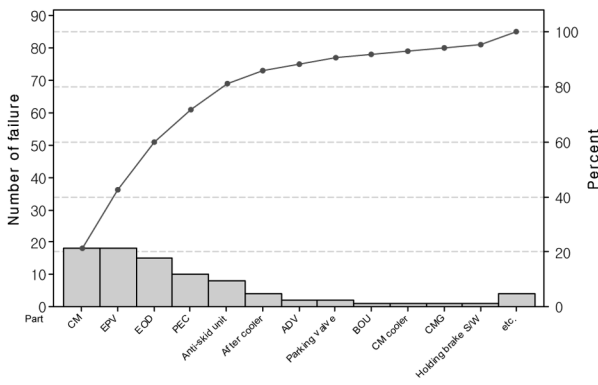


Fig. 5. Pareto chart of the failure part of braking system.

Table 1. Analysis of field failures with FMEA for air compressor (CM)

Cause	Mode	Effect	
		Part	Equipment
Malfunction of thermostatic valves	Overheating	Blocking action	Overload
Overcurrent	CMN blocking	Stop function	Bad start
Aging of packing	Leakage	On function	Malfunction
CMK Coil disconnection	Not operation	Stop function	Bad start

Table 2. Analysis of field failures with FMEA for pneumatic valve

Cause	Mode	Effect	
		Part	Equipment
Spring deformation	Changing pressure setting	Malfunction	Pressure remains
Aging of packing	Leakage	Malfunction	Lack of air pressure

Table 3. Analysis of field failures with FMEA for electric pneumatic valve

Cause	Mode	Effect	
		Part	Equipment
Spring deformation	Changing pressure setting	Malfunction	Pressure remains
Aging of packing	Leakage	Malfunction	Lack of air pressure

Table 1~3과 같다. 여기서 공기압축기(Table 1)는 제동에 필요한 공압원을 생산하는 기능을 하고 전공변화밸브(Table 2)는 제동제어장치에서 발생한 전기적 신호를 공기압으로 변경하는 기능을 하며, EOD(Table 3)는 제동제어 기능을 수행한다.

## 4. 제동장치의 신뢰도 분석

### 4.1 고장강도 함수 추정(Estimation)

최우도(Maximum like hood) 방법에 의한  $\lambda$ (Scale factor)와  $\beta$ (Shape factor)의 모수 추정값(Parameter estimation)은 식(2)과 식(3)으로 표현되는데, 이는 PLP 모델의 모수를 추정하는 방법<sup>10)</sup>으로 많이 사용되고 있다.

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{q=1}^K n_q}{KT^{\hat{\beta}}} \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^K n_q}{\sum_{q=1}^K \sum_{i=1}^{n_q} \ln\left(\frac{T}{X_{iq}}\right)} \quad (3)$$

여기서  $K$ 는 관측장치의 수량,  $n_q$ 는  $q$ 번째 시스템의 고장 발생 수,  $T$ 는 관측 중단 시간,  $X_{iq}$ 는  $q$ 번째 시스템의 고장 발생 시간간격 들을 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)에 의해 도출된  $\hat{\lambda}$ 와  $\hat{\beta}$ 를 사용하여, 식 (1)과 같이 점 추정(Point estimation)한 고장강도 함수를 나타내면 식 (4)가 된다.

$$\hat{h}(t) = 2.79 \times 10^{-4} \times 1.37 \times t^{0.37} \quad (4)$$

#### 4.2 추세 검정(Trend test and hypotheses test)

고장의 발생 패턴이 HPP와 NHPP 중 더욱더 적정한지의 여부를 검토하기 위하여 MIL-HDBK 189 test<sup>11)</sup> 방법을 이용하였다.

귀무가설( $H_0$  : HPP) 고장강도 함수는 일정하다( $\beta = 1$ ).

대립가설( $H_1$  : NHPP) 고장강도 함수는 일정하지 않다( $\beta \neq 1$ ).

만약  $2n/\hat{\beta} > \hat{\chi}_{\alpha/2}$  or  $2n/\hat{\beta} < \hat{\chi}_{1-\alpha/2}$  이면 귀무가설을 기각한다<sup>12)</sup>. 여기서 제동장치의 고장관측 수는 85개  $\hat{\beta}$ 는 1.37이므로  $2n/\hat{\beta}$ 는 123.78이 된다. 또한  $\chi_{critical, 0.05/2}^2$  과  $\chi_{critical, 1-0.05/2}^2$  가 각각 135.8과 208인데,  $2n/\hat{\beta}$ 는 이보다 모두 작으므로 귀무가설을 기각할 수 있다.

즉 대립가설 “NHPP, 고장 강도함수는 일정하지 않다( $\beta \neq 1$ )”를 선택한다.

#### 4.3 적합도 검정(Goodness of fit test)

이제 고장의 분포가 NHPP PLP를 따르는지의 여부를 확인하기 위해 Cramervon-Mises의 적합도 검정을 사용하였다.

귀무가설( $H_0$ ) : PLP는 고장데이터의 분포를 잘 표현한다.

대립가설( $H_1$ ) : PLP는 고장데이터를 표현하지 못한다.

$$C_N^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{X_{iq}}{T_q} \right)^{\hat{\beta}} - \frac{2i-1}{n} \right]^2 \quad (5)$$

여기서  $\tilde{\beta} = \frac{n-1}{n} \hat{\beta}$ 을 나타낸다.  $n$ 는 관측 총 수량,  $T_q$ 는 관측시간 전체를 나타고,  $X_{iq}$ 는 각 시스템에 발생한 고장시간이다.  $C_N^2$ 과 임계값(Critical values for Cramer von Mises goodness of fit test)<sup>3)</sup>을 비교하여  $C_N^2$  값이 임계값 보다 작으면 귀무가설( $H_0$ )을 기각하지 못하게 된다. 유의 수준  $\alpha=0.05$ 에서 임계값은 0.22이고 공기 제동장치의  $C_N^2$ 은 0.13이다. 즉  $C_N^2 < 0.22$ 보다 작기 때문에 귀무가설을 기각할 수가 없으므로, 제동장치의 PLP 모델은 타당하다고 할 수 있다. 즉 표본에 대

한 고장강도 함수 식(4)의  $\hat{h}(t)$ 를 모집단의 고장 강도 함수  $h(t)$ 로 사용할 수 있다.

### 5. 최소비용 주기

장치의 예방정비 비용, 고장정비 비용, 교체 비용을 생각해보면 단위시간당(Cost rate) 발생하는 평균비용은 한주기 동안 발생하는 비용과 한 주기의 길이의 비로 주어지게 된다. 특정한 주기와 횟수에서 평균비용이 최소로 소요되는 시점을 본 논문에서는 최적 주기로 한다.

#### 5.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션의 조건은 서울도시철도공사에서 사용하고 있는 전동차 정비과정 모델에 최대한 유사한 형태를 반영하고자 하였으며 조건은 다음과 같다.

- Fig. 6과 같이 중정비(PM) 간격은 L 범위 내에서 고정된 주기( $t_p$ )로 시행(서울도시철도공사는 4년 주기)되고 예방정비는 ( $N-1$ )회까지 수행하고  $N$ 회에서 장치는 교체된다.

- 중정비(PM) 주기 간에 고장이 발생하면 최소수리(Minimal repair)를 시행한다<sup>13)</sup>.

- PM을 시행하면, 수명주기의 시간  $\tau$ 만큼 젊어(Effective age)진다. 본 연구에서는 수명개선(Age reduction) 모델을 사용하였다. 고장강도가  $h(t)$ 인 장치가 PM이 수행되면 Fig. 7와 같이 특정한 시간만큼 고장강도가 감소하게 된다. 즉, 고장강도함수를 PM 주기를 고려하여 식 (6)과 같이 표현할 수 있다<sup>14)</sup>.

$$h_i(t_p) = h(t_p - \kappa\tau) \quad (6)$$

- 점과정 모델이므로 PM 예방정비의 최소수리에 소요되는 시간은 무시한다<sup>15)</sup>.

#### 5.2 최소수리비용( $E_f$ )

Fig. 6~7과 같이 중 정비 주기 간(이전 중정비 출창 후 최근 중정비 입창까지의 기간) 고장이 발생하면 최소 수리(minimal repair)를 시행하므로, 고장발생 건수는 고장강도 함수를 적분한 형태로 표현된다. 여기에 1 회당 최소수리 비용( $E_f$ )을 고려하면 중 정비(PM) 주기 간 최소수리 비용은 식(7)로 표현된다.

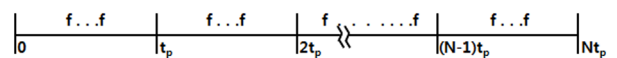


Fig. 6. Maintenance policy with minimal repair model.

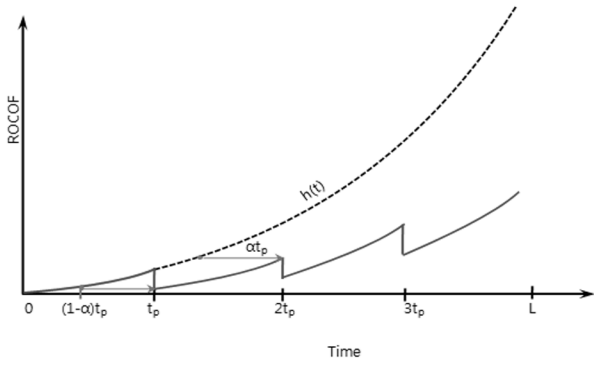


Fig. 7. Failure intensity function of age-reduction PM model.

$$C_f \int_0^{t_p} h(t) dt + c_f \int_{t_p}^{2t_p} h(t-1 \times \tau) dt + \dots + c_f \int_{(N-1)t_p}^{Nt_p} h(t-k\tau) dt \quad (7)$$

장치의 총 수명주기 중 최소 수리로 발생하는 총비용은 식(8)로 일반화 된다.

$$E_f = C_f \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kt_p}^{(k+1)t_p} h(t-k\tau) dt \quad (8)$$

여기서  $\tau$ 는 예방정비(중 정비) 후 수명이 복구되는 정도를 나타내며  $\tau$ 는 다시  $\alpha \times t_p$ 로 표현된다.  $\alpha$ 는 정비도(Quality of maintenance)를 나타내며 그 범위는  $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다.  $\alpha=1$ 이면 완전보전(Perfect maintenance),  $\alpha$ 가 1보다 적으면 불완전보전(Imperfect maintenance)이 된다.  $\alpha$ 는 예방정비 수행으로 인한 신뢰도 개선 정도와 수명 연장 정도(Serviceability of the component)의 비율로 나타내진다<sup>16)</sup>. 본 연구에서는  $\alpha$ 를 0.8로 가정하였다.

### 5.3 예방정비(PM) 비용( $E_{pm}$ )

예방정비를 N-1회 시행하고, N회 도달 시 장치가 교체 되므로 예방정비 비용은 식(9)와 같이 표현된다.

$$E_{pm} = C_{pm}(N-1) \quad (9)$$

수명주기 간 총 기대비용은 식(10)으로 표현된다.

$$E(C) = E_f + E_{pm} + E_{rc} \quad (10)$$

$E_{rc}$ 는 장치의 교체 비용이다.

### 5.4 비용함수

여기서 연구의 대상이 되는 시간당 소요되는 비용함수(Cost rate function)는 식 (11)과 같으며 이 식을 편미분 하면 최소비용이 소요되는 예방정비 주기와 시행

횟수를 구할 수 있게 된다<sup>17,18)</sup>.

$$C(N, t_p) = \frac{C_f \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kt_p}^{(k+1)t_p} h(t-k\tau) dt + C_{pm} \times (N-1) + E_{rc}}{N \times t_p} \quad (11)$$

하지만 비용함수가 볼록함수(Convex function) 이기 때문<sup>19,20)</sup>에 이론적인 최적 값  $N^*$ 과  $t_p^*$ 는 수치적(Numerically searching)으로 얻어 질 수 있다.

## 6. 시뮬레이션 결과

### 6.1 입력 변수

Table 4의 최소수리 비용(Minimal repair cost)의 경우, 재료비와 인건비 그리고 열차가 3분 지연되어 발생하는 승객의 금액으로서 2013년도 7호선의 정기 승차인원 조사 데이터를 사용하였다.

탑승하고 있는 근로자의 평균 월 급여를 3,000,000원으로 가정하였고, 비근로자를 10%로 가정하여 제외한 금액이다. 연산의 반복과 수치적 계산 해결을 위해 Matlab을 사용하였고 시뮬레이션 Time-step은 1일(day)로 하고 10,000일(day)까지 시행하였다.

### 6.2 최소비용 시점

Fig. 8은 식 (11)과 Table 4를 이용하여 결과를 나타내

Table 4. Simulation input value for equation 11

	Input value(won)
Replacement cost	548,800,000
Overhaul cost	46,589,000
Minimal repair cost	21,281,000
$\alpha$ (Quality of maintenance)	0.8
Simulation time step	1hour

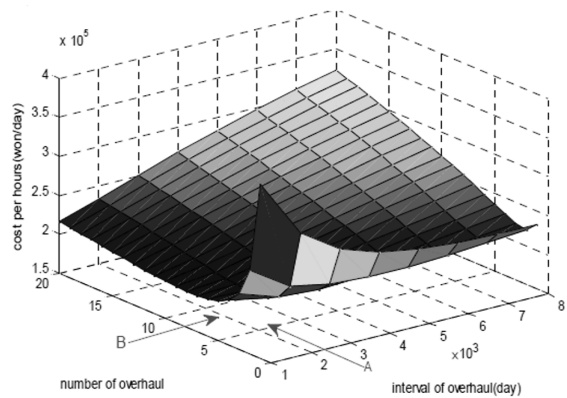


Fig. 8. Plot of cost rate function(equation 11).

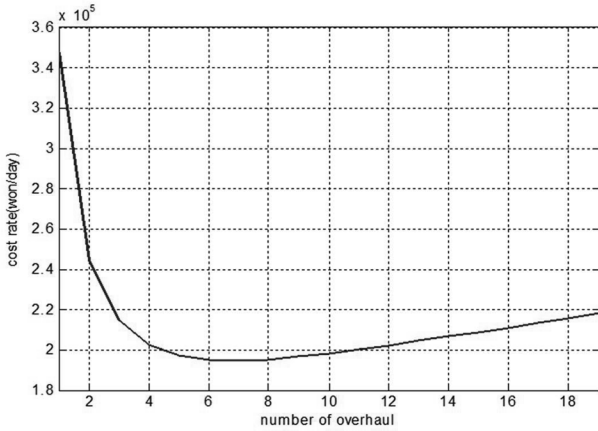


Fig. 9. Plot of cost rate function(view from direction A of Fig. 8).

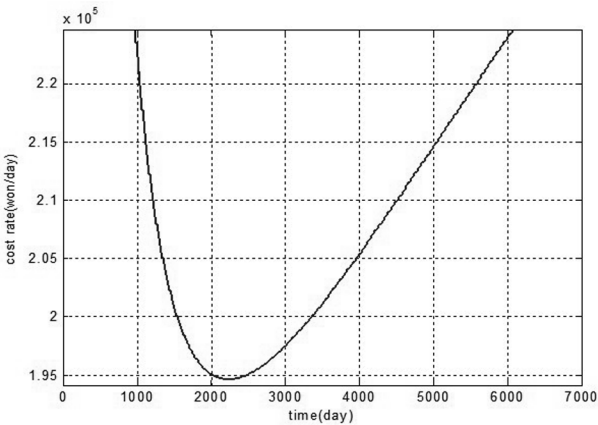


Fig. 10. Plot of cost rate function(view from direction B of Fig. 8).

는 그래프이다. Fig. 8에서 연구의 대상이 되는 예방 정비주기와 시행 횟수는 그래프가 최소 값을 갖는 위치이다. 최소비용이 소요되는 최적주기( $t_p^*$ )와 시점( $N^*$ )은 2,251day와 7회이며, 그때 최소비용은 194,613won/days으로 나타난다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 A방향으로 관측하여 소요 비용의 변화를 나타내는 2차원 그래프이며 Fig. 10은 B방향에서 관측하여 소요 비용의 변화를 나타내는 그래프이다.

### 6.3 현행 주기 VS 최소비용 주기 분석

Fig. 11에서 현행 4Y 주기로 중정비를 시행할 경우 Table 6과 같이 198,466won/days이고, 최소비용 주기 시점은 Table 5와 같이 194,613won/days이다. 현행 4Y 주기와 비교하면 Table 7과 같이 1일 약 3,853(④-③)원의 비용이 더 적게 소요되는 것을 관측 할 수 있다. 또한 수명을 비교해 보면 최소비용이 소요되는 주기가 1,157(①×②-④×⑤)일(day) 정도 제동장치를 더 사용할

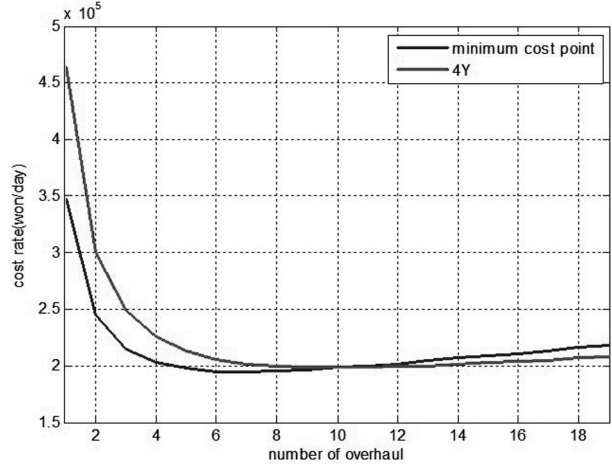


Fig. 11. Comparison of cost rate for each pm interval.

Table 5. Values of minimum cost point with  $t_p, N$

① $N^*$	② $t_p^*$ (minimum interval)	total cost (won)	③ min cost (won/day)
7	2,251	3,066,522,925	194,613

Table 6. 4Y(Current maintenance interval)

④ $N^*$	⑤ 4Y fixed interval	total cost (won)	⑥ min cost(won/day)
10	1,460	2,897,597,840	198,466

Table 7. Difference of values for minimum cost point vs. 4Y

① = ④ - ①	② = ⑥ - ③	③ = ④⑤ - ①②
3	3,853	-1,157

수 있는 것으로 나타났다.

Table 7에서 ①는 최소비용 주기와 고정주기의 중정비 시행횟수 차이이고 ②는 비용의 차이 ③사용수명 차이를 나타낸다.

## 7. 결론

본 논문에서는 7호선 공기제동장치의 고장 데이터를 수리계(Repairable system)의 신뢰도 분석 방법을 사용하여 분석하였다. NHPP PLP 모델로 공기제동장치의 고장발생 강도를 표현하는 것은 통계분석 결과 타당하였다. 또한 공기제동장치는 사용시간 대비 고장발생 간격이 줄어드는 고장 악화 특성( $\beta > 1$ )을 갖는 것으로 나타났다.

4장에서 도출된 고장강도 함수와 고장정비, 예방정비 그리고 시스템의 교체비용 함수를 고려하여 비용합수를 만든 뒤, 일일 평균 소요되는 비용이 최소로 소요

되는 주기와( $t_p^*$ )와 예방정비 횟수( $N^*$ )를 Table 5와 같이 산출하였다.

이번 연구에서 도출된 공기제동 장치의 최소비용의 주기가 현행 예방정비 주기의 일일 소요비용 보다 적고(Table 7), 장치의 수명도 길게 나타나는 것을 관측할 수 있었다.

본 논문에서 사용된 예방정비의 최소비용 시점 결정은 NHPP PLP모형을 사용하여, 신뢰도의 상태를 반영하였으므로 정량화된 기준에 의한 유지보수 정책 설정 제시에 의미가 있을 것으로 본다.

**감사의 글** : 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2015-0740).

### References

- 1) J. H. Park, H. Y. Yi and S. H. Hong, "A Study on the Economical Feasibility Analysis Method for Introducing the Urban Transit System" Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 9, No.1, pp. 23-28, 2006.
- 2) L. H. Crow, "Methods for Reducing the Cost to Maintain a Fleet of Repairable System", The Journal of the Reliability Analysis Center, Second Quarter, pp. 4. 2003.
- 3) IEC-61710, "Power Law Model - Goodness of fit Tests and Estimation Methods", 2013.
- 4) Department of Defense (DOD), "DOD Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability : Systems Engineering for Mission Success Appendix C - Reliability Growth Management", 2005.
- 5) MIL-HDBK-00189A, "Department of Defense Handbook Reliability Growth Management", 1981.
- 6) R. Manzini, A. Regattieri, H. Pham and E. Ferrari "Maintenance for Industrial Systems", Springer, pp. 91, 2000.
- 7) M. Modarres, M. P. Kaminskiy and V. Krivtsov, "Reliability Engineering and Risk Analysis : A Practical Guide", CRC Press, pp. 281-284, 1999.
- 8) L. H. Crow, "Methods for Reducing the Cost to Maintain a Fleet of Repairable Systems", Proceedings of the 2003 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 392-399. 2003.
- 9) D. K. Kim, M. K. Ahn and D. H. Park, "Bootstrap Confidence Interval for Mean Time between Failures of a Repairable System", Korean Journal of Applied Statistics Vol.11, No.1, 1998.
- 10) Mettas, Adamantios and W. Zhao, "Modeling and Analysis of Repairable Systems with General Repair", Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings Annual IEEE, 2005.
- 11) A. Tsang, "A Review on Trend Tests for Failure Data Analysis", The West Indian Journal of Engineering, Vol.35, No.1, pp. 4-9, 2012.
- 12) A.W. Dawotola and P. V. Gelder, "Estimation of Failure Rates of Crude Product Pipelines", Delft University of Technology, Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Faber, Kohler & Nishijima, 2011.
- 13) J. Baik, D. N. P. Murthy, and N. Jack, "Two-Dimensional Failure Modeling with Minimal Repair", Naval Research Logistics, Vol. 51, pp. 345-362, 2004.
- 14) P. Hoang, "Handbook of Reliability Engineering", Springer, pp. 381-385, 2003.
- 15) M. I. Chen, M. Wang and H. C. Horng, "A Modified Imperfect Preventive Maintenance Policy Considering Failure Replacement", Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, Vol. 27, Issue 1, 2010.
- 16) A. Rahman, "Modelling Inground Decay of Wood Poles for Optimal Maintenance Decision", pp76-78, 2003.
- 17) S. Singh, "Optimal Maintenance Policies Applicable to Repairable Systems Onboard Ships", Naval Postgraduate School, pp. 17-19, 1991.
- 18) S. M. Ross, "Introduction to Probability Models(Tenth Edition)", Academic Press is an Imprint of Elsevier, pp. 440, 2010.
- 19) C. Y. Cheng, "The Near-Optimal Preventive Maintenance Policies for a Repairable System with a Finite Life Time by using Simulation Methods", Journal of Computers, Vol. 6. No. 3, 2011.
- 20) K. S. Park, "Reliability and Maintenance Engineering", Young-gi Publisher, pp. 326-328. 2000.