

전동차 승객용도어시스템의 유지보수 효과를 고려한 유지보수 주기 산정에 관한 연구

A study on Determining Maintenance Intervals Considering the Maintenance Effect for the PDS in Metro EMU

이덕규¹ · 손영진² · 이희성[†]

Duk Gyu Lee · Young Jin Son · Hi Sung Lee

Abstract An important problem in reliability analysis for repairable systems is to model the maintenance effect. The most of researches have assumed two extreme cases; one is perfect maintenance and the other is minimal maintenance. However, many of maintenances performed by domestic subway operators are imperfect maintenances which have the effect between both of two extreme cases. This article deals with the problem determining the imperfect preventive maintenance intervals based on failure data in units of the PDS(passenger door system) in Metro EMU. This paper deals with a case study on determining imperfect maintenance interval by using the level of maintenance effect through reliability analysis of PDS.

Keywords : PDS, Maintenance Effect, Perfect Maintenance, Minimal Maintenance, Imperfect Maintenance

초 록 수리 가능한 시스템의 신뢰성 분석에 중요한 문제 중의 하나는 유지보수 효과를 모델링하는 것이다. 현재까지 많은 연구들은 유지보수 후 시스템의 상태가 새것과 같이 된다는 완전유지보수 또는 유지보수 바로 직전의 상태로 된다는 최소유지보수 모형을 사용하였다. 그러나 국내운영기관에서 시행하는 유지보수 형태는 완전유지보수와 최소유지보수의 사이의 효과를 가지는 불완전유지보수 형태로 시행하는 경우가 많다. 본 연구에서는 이와 같이 불완전 유지보수가 수행되는 전동차의 장치들 중에서 승객용 도어시스템(PDS:passenger door system)의 고장데이터를 분석하고 유지보수 효과 수준을 적용하여 불완전유지보수 주기를 결정하는 문제를 다루었다.

주요어 : 승객용도어시스템, 유지보수 효과, 완전유지보수, 최소유지보수, 불완전유지보수

1. 서 론

지하철에서 전동차량은 이용객과 직접적으로 맞닿는 시스템으로서 최우선으로 안전이 확보되어야 한다. 따라서 전동차량의 안전은 지속적이고 체계화된 유지보수를 통하여 운행안전을 확보할 수 있으며, 지하철 운영기관들은 Table 1과 같이 자체적인 유지보수 기준을 설정하여 운영하고 있다. 일반적으로 지하철 전동차의 유지보수는 주로 경정비와 중정비로 구분하여 시행하는데 이렇게 시행하는 경정비와 중정비의 정도에 따라 유지보수 효과는 발생하는 고장률로 확인할 수 있는데 실제 운행한 기간동안 발생한 고장데이터를 분석해보면 중정비 후에도 고장이 완전히 없어지는 것이 아니라 계속된다는 것이다. 따라서 유지보수의 경제성을 높이기 위해서 경정비/중정비 업무의 주기를 변경하여 시행할 때 나타나는 유지보수의 효과를 고려한 유지보수 주기를 산정하

는 문제를 다루었다[1].

2. 불완전유지보수 모형

2.1 개요

유지보수는 유지보수 후 시스템의 상태에 따라 “완전유지보수, 불완전유지보수, 최소유지보수” 세가지로 분류한다. “완전유지보수($\rho=1$)”는 해당 장치가 유지보수 주기 도달 시 모든 부품을 신제품으로 교환함으로써 유지보수 후 시스템의 상태가 신제품과 같이되는 것이고, “불완전유지보수[2]”는 구성품 중 일부분만 교환 또는 수리되어 유지보수 후 상태가 완전유지보수와 최소 유지보수 사이 성능수준에 해당하며, “최소 유지보수($\rho=0$)”는 고장난 부품만 교체 또는 수리되는 것으로 수리 후 시스템의 상태가 유지보수하기 바로 직전 상태와 같아지는 것에 해당하는 것으로 정의한다. 수리 가능한 시스템의 신뢰성 분석에 중요한 문제 중의 하나는 유지보수 효과를 모델링하는 것인데 불완전 유지보수는 Kijima[3]가 제안한 2가지 실질 노후상태(Virtual Age) 모형으로 설명할 수 있다.

[†]교신저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과 한국도시철도연구소

E-mail : hslee@seoultech.ac.kr

¹서울특별시도시철도공사

²서울과학기술대학교 자동차공학과

Table 1 EMU Maintenance intervals by subway operators

Name of Institution	Light Maintenance(Inspection)		Heavy Maintenance(Overhaul)	
	Daily Inspection	Monthly Inspection	Yearly Inspection	
Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp.	3	3	3	6
Seoul Metro	3	2	2	4
Busan Transportation Corp.	2 or 3	2 or 3	2 or 3	4 or 6
Daegu Metropolitan Transit Corp.	3	3	3	6
Incheon Metro	7	3	3	6
Gwangju Metropolitan Rapid Transit Corp.	3	3	3	6
Daejeon Metropolitan Express Transit Corp.	2000km	30000km	3	6
Korea Railroad Corp.	2 or 3	1, 3, 6 or 3	1.5 or 3	3 or 6

2.2 Kijima 모형 1

A_k 는 $[0,1]$ 사이의 일항분포를 따르는 독립인 확률변수라고 하자. 모든 k 에 대하여 A_k 는 T_k 와 독립이라 가정한다. 이때 $V(T_n)=V(T_{n-1})+A_nX_n$, $X_n=T_n-T_{n-1}$, $T_n=0$, $A_n=0$ 이다. $T_n \leq t < T_{n+1}$ 에서의 고장강도 함수는 다음과 같다.

$$\lambda_{n+1}(t) = \lambda(t - T_n + A_nX_n + \dots + A_1X_1) \quad (1)$$

- A_k : 유지보수시점에서의 유지보수효과
- T_k : 유지보수시점
- $V(T_n)$: n번째 유지보수시점에서의 실질노후상태
- λ_n : Failure Intensity

만약 A_k 가 일정하다면 Malik[4]의 제안 모형과 같다.

2.3 Kijima 모형 2

Kijima의 두 번째 모형은 $V(T_n) = A_n[V(T_{n-1}) + X_n]$ 이라 가정한다. 이 때 $T_n \leq t < T_{n+1}$ 에서의 고장강도함수는 다음과 같다.

$$\lambda_{n+1}(t) = \lambda(t - T_n + A_nX_n + A_nA_{n-1}X_{n-1} + \dots + A_nA_{n-1}\dots A_1X_1) \quad (2)$$

만약 A_k 가 일정하다면 Brown, Mahoney & Sivazlian [5]이 제안한 모형과 같다.

위의 Kijima 모형 1중 A_k 가 ρ 로 일정한 모델인 Malik 모형의 정의는 다음과 같다. T_1 을 시스템이 첫 번째 유지보수 되는 시점이라 하자. T_1 시점에서 시스템은 유지보수효과 ρ 에 비례하여 유지보수 된다. 유지보수효과 ρ 는 0과 1사이이며, 0은 최소유지보수 1은 완전유지보수에 해당한다. 아이템의 노후(Age)상태는 $(1-\rho)T_1$ 으로 감소하며 이것을 T_1 에서의 실질 노후상태(Virtual Age)라고 하고 V_1 으로 표시한다. 다음 번째 유지보수까지의 고장강도는 $\lambda_2(t) = \lambda(t - T_1 + V_1)$ 을 따른다. T_n 을 시스템이 n번째 유지보수 되는 시점이라 하자. 이때 n번째 유지보수 이후부터 n + 1번째 유지보수까지의 고장강도는 다음과 같다.

$$\lambda_{n+1}(t) = \lambda(t - T_n + V), \quad T_n \leq t < T_{n+1}, \quad n \geq 0 \quad (3)$$

$$V_n = (1-\rho)(V_{n-1} + T_n - T_{n-1}), \quad V_0 = 0, \quad T_0 = 0 \quad (4)$$

3 PDS고장 사례[6]

3.1 PDS 구성요소 및 BOM

전동차 PDS는 크게 도어엔진, 출입문, 전자변, 도어스위치, 푸시로드로 구성된다. 각각의 기능 차이는 있으나 운전자 입장에서 볼 때 객실 출입문이 열리고 닫히는 것은 5개 장치가 유기적인 동작으로 완성되는데 도어엔진은 5kg/cm²의 제어공기에 의하여 동작되는 것으로 도어엔진 피스톤 및 로드엔 출입문을 매달아 출입문이 열리고 닫히게 하는 기능을 수행한다.

전자변은 DC100V전원으로 밸브를 동작시켜 도어엔진에 5kg/cm²의 제어공기를 공급 또는 배출하는 기능을 수행하고, 도어스위치는 on접점과 off접점으로 이루어져 있으며 출입문이 열리면 스프링의 힘에 의하여 off접점이 붙어 출입문이 열렸다는 차측 등을 점등시키고, 출입문이 닫히면 on접점이 붙어 운전실에 설치된 도어램프를 점등하여 기관사 에

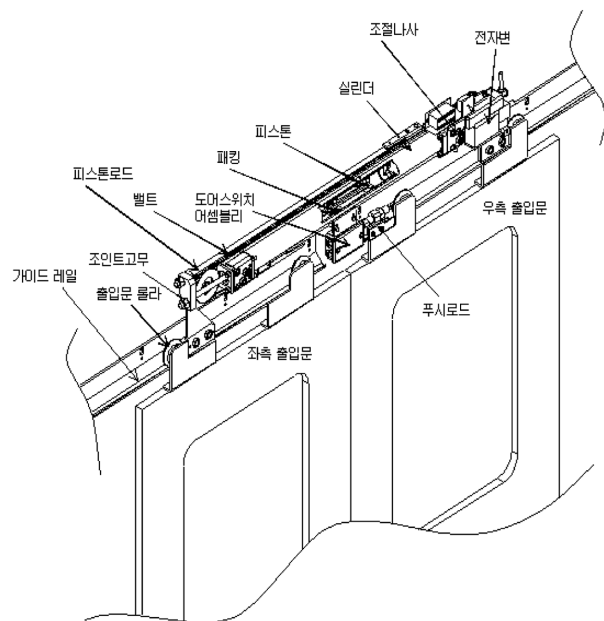


Fig. 1 Component of PDS

Table 2 BOM of PDS

Broad Classification	Detailed classification
Door engine	Main head cylinder, Cylinder, Piston, Piston rod, Rod open, Adjust screw, Belt, Belt pulley, Packing, Special washer, C-type special washer, Joint rubber, Space pipe, Belt bracket, Interlock switch bracket, Belt guide, etc.
Door	Inside-Outside panel, Frame, Glass fixture, Glazing rubber, Roller, Liner, Weather strip molding, Weather strip rubber, Door cushion, Guide rail, Door glass, Door roller assembly, etc.
Magnetic valve	Magnetic, Sub plate, Filter, O-ring, Fixed valve, Silencer, Gasket, etc.
Door Switch	Interlock switch box, Limit switch, Toggle switch, Receptacle connector, Connector plug, Terminal plug, etc.
Push rod	Special bolt, Spring, Shaft, Lock nut, Spring pin, etc.

게 출입문이 완전히 닫혔다 는 전기적인 신호를 전달하는 기능을 수행하며, 푸시로 드는 출입문이 열리고 닫힘에 따라 도어스위치를 on/off 하는 기능을 갖고 있으며 Fig. 1은 PDS 구성을 나타내고, Table 2는 PDS의 5개 소분류 BOM을 나타낸 것이다.

3.2 PDS 고장 분석

Table 3은 한 개 노선에서 개통 초기부터 2007년도말 까지 전체 전동차를 대상으로 중정비를 시행한 시점을 기준으로 1,2,3구간(1구간: 개통부터 첫 번째 중정비까지, 2구간: 첫 번째 중정비부터 두 번째 중정비까지, 3구간: 두 번째 중정비부터 세 번째 중정비까지(기간중))으로 구분하였고, 각 구간에서 시행된 유지보수과정에서 수리가 필요하여 조치한 것과 운행중 발생한 고장을 모두 조사하였다. 고장내용 중 각 구간별 고장 건수가 현저한 차이를 보이는 도어엔진 조인트 고무, 도어엔진 패킹, 도어엔진 벨트, 푸시로드 어셈블리, 전자변에 대하여 원인과 조치내용을 확인하였다.

(1) 도어엔진 조인트고무 고장은 제1구간에서 많이 발생하였다가 제2,3구간에서 감소한 것으로 확인하였다. 조인트고무는 도어엔진의 피스톤로드에 출입문을 매다는 부분에 완충용으로 사용하는 고무로써 스페이스파이프내에서 헥스너트로 고정된다. 조인트고무에 고장이 발생하면 출입문과 도어엔진 피스톤로드가 견고하게 결합되지 않아 출입문 작동이 원활 하지 않다. 이것은 개통 초기에 발생한 현상으로서 조인트 고무의 경도가 낮고 치수가 작게 제작된 문제가 확인하고 조치한 것이다.

(2) 도어엔진 패킹은 실린더와 피스톤 사이에서 작동공기 및 그리스의 기밀을 유지하기 위하여 사용되는 것으로 고장이 발생하면 작용공기가 누기되는 현상이 발생한다. 도어엔

Table 3. Fault analysis of PDS

Fault Classification	Number of fault corrective actions		
	Section1	Section2	Section3
Door engine - Assembly	85	175	66
Door engine - Piston Rod	6	16	6
Door engine - Joint Rubber	106	20	2
Door engine - Adjusting screw	24	42	4
Door engine - Packing	125	50	5
Door engine - Belt	240	735	170
Door - Guide rail	17	67	16
Magnetic valve - Assembly	148	1,613	258
Door switch - Assembly	32	31	9
Door switch - Limit switch	20	14	5
Door switch - Interlock switch box	11	14	2
Door switch - Toggle switch	17	40	23
Push rod - Assembly	263	1,315	342
Others	36	81	14
The total of the number of fault corrective actions	1,130	4,213	922
Number of fault corrective actions per unit distance	1.03	2.87	2.22

진 패킹 고장은 고무(패킹)와 금속(피스톤)간의 습동부에 사용한 그리스가 원인으로 고무와 플라스틱 성분의 습동부에 사용되는 그리스를 잘못 적용한 것이며 확인된 즉시 그리스와 패킹을 모두 교체 하였다.

(3) 도어엔진 벨트는 도어엔진 패킹 등의 고장에 의하여 그리스가 누유되고, 도어엔진 벨트가 오염되어 3일 검수 또는 3월 검수 과정에서 청소를 실시한 것으로 확인하였다.

(4) 푸시로드 어셈블리는 출입문이 열리고 닫힐 때 도어스위치를 작동시키는 역할을 한다. 출입문이 닫힐 때 출입문에 의해서 압축되었던 샤프트가 출입문이 열리면 압축이 풀리면서 스프링에 의해 원상 복구되어 다음 동작에 대비하여야 하나 샤프트 외경과 스페셜볼트 내경간의 치수공차가 일률적이지 않고 매끈하게 가공되지 않아 이물질이 유입되거나 윤활작용이 원활치 않을 경우 스프링 복원력보다 마찰력이 커지는 현상으로 샤프트가 작동하지 않는 것이다. 3일 검수 또는 3월 검수 시에 정밀하게 가공된 제품으로 교환 하였다.

(5) 전자변은 오링(O-Ring)과 가스켓의 결함(마모, 탄성 등)으로 인해 공기가 누기되는 현상이다. 특히 기온이 낮아지는 9월부터 다음해 5월까지 많이 발생하는 것으로 확인하였다. 이것은 3년 검수시에 오링과 가스켓을 교체하지 않아 발생한 것이다. 고무, 가스켓류는 중정비시에 신품으로 모두 교환하는 것이 필요하고, 낮은 온도에서도 고무의 특성이 변하지 않는 양질의 제품을 사용해야 한다.

4. 결함 및 유지보수 모형

4.1 모형 및 가정

수리 가능한 시스템의 신뢰성은 식 (5)의 고장강도(Failure Intensity)의 정의에 의해 설명된다.

$$\lambda(t|H_t) = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \delta^{-1} \Pr[N(t+\delta|H_t) - N(t|H_t) > 0] \quad (5)$$

H_t 는 t 연령까지의 고장 및 유지보수 프로세스로 나타 내 고 $N(t|H_t)$ 는 H_t 의 조건하에서의 t 연령까지의 고장 갯수를 나타낸다.

수리 가능한 시스템의 고장강도 함수로 가장 일반적으로 사용되는 것이 아래의 Power-law 및 Log-linear 고장강도 함수이다.

Power-law 고장강도 함수

$$\lambda(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta}, \beta, \eta > 0, t \geq 0 \quad (6)$$

Log-linear 고장강도 함수

$$\lambda(t) = \beta \exp\left(\frac{t}{\eta}\right), \beta, \eta > 0, t \geq 0 \quad (7)$$

Log-linear 고장강도 함수는 고장강도가 매우 빨리 증가 하는 상황을 나타내는 반면에 Power-law 고장강도 함수는 고장강도가 매우 빨리 증가하는 경우를 제외한 넓은 범위의 고장 프로세스에 적용 될 수 있다[Shin, Lim & Lie,[7]]. PDS는 단품이 아니기 때문에 특정 시점 이후로 고장강도가 급격히 증가하지는 않는다. 따라서 본 연구에서는 도어장치 고장강도는 Power-law 함수를 따른다고 가정한다. 도어장치의 신뢰성 분석을 위해서는 각 유지보수 시점에서의 식(1)의 고장강도가 어떻게 변하는지를 정의하여야 한다. 본 연구에서는 PDS의 고장조치 및 일상검수, 월간검수는 고장강도에 영향을 주지 않고, 중정비는 방법 및 정비항목이 동일하게 진행되므로 불완전유지보수 형태를 가진다고 가정한다.

Table 3의 각 구간당 단위거리당 결함조치개수를 보면 구간 1보다 구간 2에서 증가하고 구간 3에서는 운행거리가 짧은 부분에서는 다시 감소하는 현상으로 보아 중정비의 효과는 최소유지보수와 완전 유지보수의 사이에 해당하는 것으로 Fig. 2을 통하여 판단해 볼 수 있다.

본 연구에서는 PDS의 유지보수 효과를 모형화하기 위해

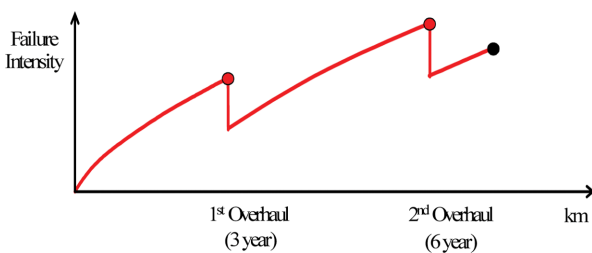


Fig. 2 Predicted failure rate

Kijima 모형 1에서 유지보수가 일정한 Malik이 제안한 모형을 사용하였다.

4.2 모수 추정

power-law함수의 모수 β, η 와 유지보수 효과 ρ 를 최우추정법에 의해 추정한다.

Shin, Lim & Lie는 Malik 모형의 모수를 추정하기 위한 방법을 제안하였다. Shin, Lim & Lie에서 제시된 Log-likelihood function과 동일한 결과를 나타내는 Likelihood-function과 Log-likelihood Function은 각각 다음과 같다.

$$L(\eta, \beta, \rho) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i+1} \prod_{k=1}^{r_{ij}} \frac{\beta}{\eta^\beta} (t_{ijk} - \rho \tau_{i(j-1)})^{\beta-1} \times \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i+1} \exp[A_{ij}] \quad (8)$$

$$\ln L(\eta, \beta, \rho) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i+1} \prod_{k=1}^{r_{ij}} [\ln \beta - \beta \ln \eta + (\beta-1) \times \ln(t_{ijk} - \rho \tau_{i(j-1)})] + \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i+1} A_{ij} \quad (9)$$

$$A_{ij} = \left(\frac{\tau_{i(j-1)} - \rho \tau_{i(j-1)}}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{\tau_{ij} - \rho \tau_{i(j-1)}}{\eta} \right)^\beta \quad (10)$$

$$\tau_{i0} = 0, \tau_{i(m_i+1)} = t_i^* \quad (11)$$

데이터 형태 및 기호 다음과 같다.

n : 관측 아이템의 개수

m_i : i 번째 아이템의 유지보수 횟수

η_j : i 번째 아이템의 j 번째 구간에서의 고장 횟수

t_{ijk} : i 번째 아이템의 j 번째 구간의 k 번째 고장 시점에서의 운영시간 (또는 거리)

τ_{ij} : i 번째 아이템의 j 번째 유지보수 시점에서의 운영 시간 (또는 거리)

t_i : i 번째 아이템의 관측 시점에서의 운영시간 (또는 거리)

본 연구에서는 위의 Likelihood function 또는 Log-likelihood function을 최대화 하는 모수값들을 구하기 위해 각 모수의 영역을 이산화하여 전체 가능 영역의 조합에 대해 Log-likelihood function을 계산하였다.

5장에서 사용 할 고장 및 유지보수 모형을 선정하기 위해 Table 3의 고장내용 중 일부 편성의 데이터를 선택하였다. 또한 조사기간 중 고장건수가 1건 이하로서 데이터 크기가 아주 작은 것은 버리고 선택한 고장데이터만으로 모수를 추정하였다. 이와 같은 방법에 의해 모수 β, η 와 유지보수 효과 ρ 를 Minitab 프로그램으로 추정한 결과는 Table 4와 같다.

Fig. 3은 Table 4의 유지보수 효과(ρ)를 기준으로 $\rho=0$ (최소유지보수)일 때의 고장률이 시간이 지남에 따라 증가하는

Table 4 Parameter estimation result

Parameter	η	β	ρ
Estimation	39,500	1.7	0.49

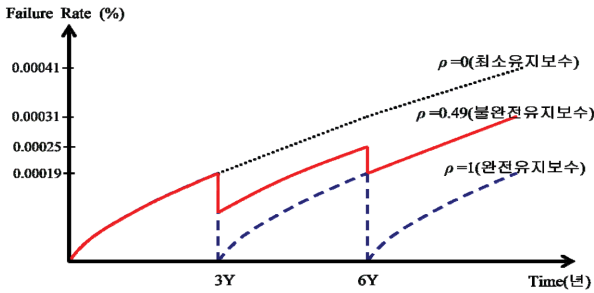


Fig. 3 Progress based on maintenance effect parameter

형태이고, $\rho=0.49$ (불완전유지보수)일 때의 고장률은 정비 후 (3Y, 6Y시점)에는 고장률이 일정부분 감소했다가 다시 증가하는 형태이며, $\rho=1$ (완전유지보수)일 때는 정비 후 신품과 같은 위치로 고장률이 감소 후 증가하는 형태를 보여주고 있다.

5. 유지보수 효과에 따른 주기 분석

본 장에서는 유지보수 효과에 따라 주기가 어떻게 변하는지에 대하여 분석하였다. 고장 및 유지보수 모형은 Table 4의 모수 추정결과를 사용하였고, 상용 시뮬레이션 프로그램인 AvSim을 사용하여 신뢰성을 분석하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 필요한 전동차량의 운용 프로파일은 아래와 같이 적용하였다.

- 내용수명: 25년(도시철도법에 의한 사용내구연한)
- 일일 운행시간: 10시간(편성당 1일 평균운행시간)
- 표정속도: 30km/hr(6호선 운행기준)

Table 4와 같은 고장 및 유지보수 모형 하에서 ρ 를 0.49로 하여 PDS의 중정비 주기 3년을 적용하면 현재의 PDS 신뢰성은 25년간 총 고장 횟수는 1편성당 407.5건 평균 고장 거리는 6,718km 임을 확인 할 수 있고, PDS의 신뢰성을 향상시키기 위해 유지보수 주기를 3년에서 2년으로 줄이면 고

Table 5 Reliability prediction by imperfect maintenance intervals ($\rho=0.49$)

Imperfect maintenance intervals	1year	2year	3year (now)	4year	5year	6year
The no. of faults	190	310.3	407.5	494.3	571	634
Average fault distance (km)	14,400	8,823	6,718	5,538	4,794	4,316

Table 6 Reliability Prediction by Maintenance Development Effect (3-Year Maintenance Interval)

Maintenance development effect (ρ)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
The no. of faults	407.4	387.6	367.7	347.4	326.6	297
Average fault distance (km)	6,720	7,063	7,446	7,881	8,381	9,217

Table 7. Reliability Prediction by Perfect Maintenance Intervals ($\rho=1$)

Perfect maintenance intervals	1year	2year	3year	4year	5year	6year
The no. of faults	141.1	226	297	362.2	439.3	477.7
Average fault distance (km)	19,400	12,110	9,217	7,558	6,232	5,731

장 횟수는 310.3건으로 감소하고 평균 고장 거리는 8,823km로 증가하게 됨을 Table 5에서 알 수 있다. 만약 유지보수 효과를 높여 ρ 를 1로 하면 Table 7과 같이 유지보수 주기를 4년으로 하면 고장횟수는 287건, 평균 고장 거리는 9,217km로 늘어나 3년 유지보수 주기보다 높은 신뢰성을 달성 할 수 있게 된다.

6. 결 론

본 연구에서는 서울시 지하철 6호선에서 운행하고 있는 전동차의 개통 초기부터 2007년도 말까지 운행하면서 발생한 고장을 모두 조사 분석하였다. 조사된 고장 분석 결과 현재 실시하고 있는 유지보수 형태는 전동차 PDS의 고장을 완전히 해결할 수 있는 완전유지보수의 효과를 가지지 못하는 불완전유지보수 수준으로 확인되었다. 이와 같이 불완전유지보수가 수행되는 전동차 PDS의 유지보수 효과(ρ)를 '0.49'로 할 때보다 '1'을 적용할 때 고장이 적게 발생하고, 유지보수 주기까지 도달하는 주행거리는 늘어나는 것으로 확인하였다. 그리고 유지보수 효과(ρ)가 동일한 조건에서는 유지보수 주기를 단축하는 경우가 고장발생이 감소하는 것을 알 수 있었다.

따라서 각 지하철 운영기관에서는 기존에 사용하던 정비 주기를 새롭게 변경하고자 할 때에는 이러한 기법을 활용하면 효율적으로 유지보수 주기를 산출하여 적용할 수 있으며, 또한 동일한 방법으로 전동차의 각 장치별 특성에 맞는 유지보수 주기도 산출할 수 있다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] J.W. Kim, J.S. Park, H.Y. Lee, J.H. Kim (2008) A Conceptual Procedure of RAMS Centered Maintenance for Railway System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(1), pp. 19-25.
- [2] V. Jayabalan, Dipak Chaudhuri (1992) Optimal maintenance-replacement policy under imperfect maintenance, *Reliability Engineering and System Safety*, 36, pp.165-169.
- [3] M. Kijima (1989) Some results for repairable systems with general repair, *Journal of Applied Probability*, 26, pp.89-102.
- [4] M.A.K. Malik (1979) Reliable preventive maintenance scheduling, *AIEE Transactions*, 11, pp. 221-228.
- [5] J.F., Brown, J.F., Mahoney, B.D. Sivazlian (1983) Hysteresis repair in discounted replacement problems *IIE Transactions*,

Vol. 15, pp. 156-165.

- [6] D.G. Lee, J.W. Kim, H.S. Lee (2008) A Case Study on Determining Doors Maintenance Intervals through Running Fault Data Analysis for Metro EMU, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(3), pp. 240-247.

- [7] I., Shin, T.J., Lim, C.H., Lie (1996), Estimating parameters of intensity function and maintenance effect for repairable unit, *Reliability Engineering & System Safety*, 54, pp.1-10.

접수일(2011년 3월 17일), 수정일(2011년 4월 11일),
게재확정일(2011년 4월 21일)