

철도전력시스템에서의 유지보수를 위한 고장을 분석

신동근                      김형철                      장길수                      김진오  
 고려대학교              한국철도기술연구원      고려대학교              한양대학교

Failure Analysis for Maintenance in Railway Power System

Donggeun Shin      Hyungchul Kim      Gilsu Jang      Jino Kim  
 Korea University      KRRI      Korea University      Hanyang University

**Abstract** - 본 논문에서는 신뢰성을 기반으로 하여 유지보수 비용과 리스크 양쪽을 고려해야 하는 장비의 최적의 유지보수를 정하는 방법을 나타내고 있다. 이러한 방법으로 장비의 고장 과정을 바탕으로 하는 확률론적 모델을 제시한다. 최적점검주기는 유지보수 비용과 고장으로 부터 받은 피해비용의 총 비용을 최소화시킬 때 정해진다. 여기서는 신뢰성을 정량적으로 평가하기 위해 기기가 고장에 도달하는 경로를 나타내는 고장 모델을 작성하여 고장에 의해 발생하는 피해액을 산출하여 시스템 전체에서의 보전비용과 고장에 의한 피해액과의 총 코스트가 최소가 되는 보전주기를 최적의 보전주기로 한다.

비들의 내재적 기능을 유지할 수 있도록 보전계획을 세우는 과정이다. 어떤 설비나 장치들에 내재되어 있는 수많은 고장 유형들은 안전적 측면, 기능적 측면 혹은 그 기능과 연관되지 않은 다른 비용 측면에서 각각 다른 영향을 갖고 있으며 이러한 고장에 대한 영향은 고장발생을 예방하는데 사용할 수 있다. 점검주기결정기법의 기본적인 구성은 아이템정의, 시스템 대상 선정, 기능 및 설비 정보관리로 구성할 수 있다.

<표 1> 점검주기결정기법의 기본적인 구성과 정의

구 성	정 의
아이템정의	1. 신뢰성 자료 2. 설계 자료 3. 운용 자료
시스템 대상선정	1. 기능고장 2. 비용측면에서의 중요 아이템 리스트
기능 및 설비 정보관리	1. FMEA분석 2. 의사결정분석 3. 보전방식 선정 4. 서비스자료 분석

1. 서 론

최근의 생산 라인 장치와 기계류는 점점 대형화, 고속화, 연속화 되고 있다. 또한 기계가공업, 자동차공업, 일렉트로닉스 등의 가공조합공업, 특히 철도산업에 쓰이는 생산설비는 개개의 설비가 고도로 자동화되어 모든 것이 하나의 유기체같이 제어된다.

따라서 장치와 기계류의 이상과 고장이 생산 및 품질에 미치는 영향도 종래와 비교할 수 없을 정도로 커졌고, 종래 단독의 기술 분야로서 발전해온 품질관리와 생산관리도 설비보전을 무시하지 못하게 되었다.

이렇게 중요성을 확대시킨 장치와 기계류를 효율적으로 유지보수 하기 위해서 필요한 것은 그 대상이 되는 설비의 상태를 적절히 파악하는 것이다. 즉, 설비의 고장 원인을 명확히 하여 최소의 비용과 시간으로 회복시키고 다시는 발생하지 않도록 대책을 마련하기 위해서는 설비에 인가되어 그 고장의 원인이 되는 스트레스, 설비의 열화와 고장, 설비의 성능 및 기능의 상태를 정확히 파악해야 된다.

신뢰성 향상에 대한 정의는 시스템 고유의 신뢰성 이외에, 적합한 운영이나 수정조치를 통해 시스템에 요구되는 수명만큼 고장 발생을 감소시키는 의미를 포함한다. 상기 신뢰성 향상 개념에 부합하기 위하여, 철도시스템을 포함한 원자력 분야나 항공기와 같은 인프라 산업에서의 신뢰성 분석 개념이 설계 측면에서 유지보수 측면으로 변화되고 있다. 이러한 유지보수 측면의 신뢰성 분석 개념을 도입한 방법이 신뢰성 기반의 유지보수이다. 현재 유지보수 개념과 더불어, 철도와 같은 국가인프라사업의 정책분야에 시스템의 운영 측면을 고려한 자산관리체계의 개념 반영이 확대되고 있다.

이렇게 신규 설비 투자가 제어되는 속에서 기존 설비를 유효하게 활용하기 위해서는 보수를 포함한 설비 보전 계획의 최적화가 중요한 과제가 되고 있다. 설비 보전 계획을 작성할 때는 신뢰성과 경제성 양쪽을 고려할 필요가 있다.

<표 1>에서 알 수 있듯이 기본개념은 시스템정비가 아니라 기능정비에 중점을 두는 것이다. 주어진 상태에서 정상적인 작동을 보장하기 위해 시스템의 특성을 고려하여 효과적인 정비정책을 선택하기 위한 논리적인 방법론이라 할 수 있다.

이것은 산업현장에서 널리 사용되는 기본적인 설비의 열화와 마모만을 고려한 정비관리 기법과는 차이를 보인다. 일정시간이 지나면 주기에 따라 예방정비를 수행하는 데 반해 점검주기결정기법은 부품의 여러 가지 고장률 형태에 따라 정비방식을 선정하게 되며 시간에 따라 고장률이 크게 변하지 않는 경우 설비의 상태를 기준으로 정비의 중요성을 나눈다. 또한 고장에 따른 결과치가 영향을 미치지 않거나, 적용 가능한 예방 정비 업무를 찾지 못하거나, 자주 사용하지 않는 설비, 경제적으로 무의미한 고장유형 등에 대해서는 예방정비를 하지 않으며, 고장의 결과에 따른 영향이 크거나 긴급정비를 요하는 부품에 대해서는 가능한 점검을 실시하는 유연적인 보수 계획을 수립할 수 있다.

내구성을 측정하는 또 다른 척도로 고장률(failure rate), 순간고장률(instantaneous failure rate) 또는 고장률함수(hazard rate)이라고 불리우는  $\lambda(t)$ 가 있다.  $\lambda(t)$ 는 시간  $t$ 에서 온전한 것이 시간  $t$ 와  $t+dt$ 에서 고장날 확률로 정의된다. 즉

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$$

2. 본 론

2.2 점검주기와 고장률의 정의

점검주기결정기법은 신뢰성을 이용하여 운용조건에서 각 설

이 된다.  $\lambda(t)$ 는 시간  $t$ 의 시점에서 현재 작동하는 것들 중 몇 개가 순간적으로 고장날 것인가 또는 시간당 얼마씩 고장이 발생되느냐를 나타내는 비율이다.  $\lambda(t)$ 는 고장률 함수(failure rate function)라고도 불린다.

내구성이 좋다는 것은 다음과 같이 나누어 설명할 수 있다. 1 오래 간다는 의미에서의 내구성: 임의의 시점  $t$ 에서 신뢰도  $R(t)$ 가 높다. 또는 세이프 라이프 시점이 0보다 훨씬 크다. 2 고장이 적다는 의미에서의 내구성: 고장률  $\lambda$ 가 작다. 또는 MTBF가 크다.

$$\lambda(x) = \frac{-\frac{dR(x)}{dx}}{R(x)} = -\frac{d \ln R(x)}{dx}$$

신뢰도  $R(t)$ 와 고장률  $\lambda(t)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) dx\right]$$

고장률  $\lambda(t)$ 를 시간에 대하여 적분한 누적 해저드함수(cumulative hazard function)  $H(t)$ 가 있고

$$H(t) = \int_0^t \lambda(x) dx$$

이 누적 해저드함수는 신뢰도와 다음과 같은 관계가 있다.

$$R(t) = \exp[-H(t)]$$

MTBF는 수리계(修理系: 내구 소비재에 해당되는 냉장고나 세탁기 등)에서 수리 후 다음 수리까지의 평균시간을 의미한다. 한편, 비수리계(非修理系: 일용소비재에 해당되는 전구나 1차배터리 등)에서는 MTTF (Mean Time To Failure)를 사용한다. 간단한 예로 100개의 전구를 수명실험하여 각각에 대한 수명을 관측했다고 하면, 이들의 MTTF는 관측된 수명들의 산술평균치이다.

고장률은 일반적으로 fit (failure in time)으로 표현된다. 1 fit은  $10^6$  parts×시간에서 하나의 유닛(unit)이 망가질 확률이다. 다른 단위로는 %/KPOH가 있다. 이는 %/1000 power on hours (Kilo Power On Hours: KPOH)로 정의된다. 이들 간에는 다음과 같은 관계가 있다.

- 1 %/KPOH =  $10^4$  fits
- 1 fit = 1 ppm/1000 hours

일반적으로 고장률(failure rate)은 다음과 같이 표현된다.

• Failure Rate (fits)=(Number of defects× $10^9$ )/(Number of good units in use time (hours))

## 2.2 최적점검주기의 산출방법

여기서는 고장 코스트, 수리비용, 점검비용의 합인 총 코스트를 산출하는 방법에 대해 설명하겠다. 본 논문에서 말하는 보전계획입안수법에서는 설비가 고장에 이르는 경과를 나타내는 설비의 상태모델(고장모델)을 그림2와 같이 정의한다.  $S_0, S_1, S_2$ 는 설비의 고장에 관한 상태를 나타내고 있다. 또  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 고장률,  $\mu_1, \mu_2$ 는 수리율이며 상태 간의 천이확률을 나타내고 있다.

고장모델에 있어서 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 점검의 유효성의 평가를 목적으로 하므로 고장에 관해서는 점검 시에 조후를 발견하여, 발견 시에는 즉시 수리를 하는 것만을 대상으로 한다.
2. 경고장상태란 기능을 상실하지는 않았으나 능력이 조금씩 저하하고 있는 고장 수준이며 점검 시에 발견되어 수리로 인해 정상 상태로 돌아가는 것으로 한다.
3. 중고장상태란 기능을 상실해버린 고장 수준이며 고장 발생 시에 즉시 발견되어 수리되어 정상 상태로 돌아가

는 것으로 한다.

본 수법에서는 다음의 입력 데이터와 점검주기 T에서 총 코스트를 산출한다.

고장까지의 평균 시간(정상->경고장)	$T_{f1}$
고장까지의 평균 시간(경고장->중고장)	$T_{f2}$
수리시간(경고장->정상)	$T_{r1}$
수리시간(중고장->정상)	$T_{r2}$
수리비용(경고장->정상)	$C_{r1}$
수리비용(중고장->정상)	$C_{r2}$
1회 당 점검비용	$C_i$
고장 시에 발생하는 반위 시간 당 피해액	$C_0$

고장률  $\lambda_1, \lambda_2$ 와 수리율  $\mu_1, \mu_2$ 는 위의 파라미터와 점검주기 T를 가지고 다음 식으로 정의한다. 통상의 수리를 동반하는 형태로는 고장률, 수리율이 시간에 상관없이 일정하다고 하면, MTBF와 MTTR은 각각 고장률, 수리율의 역수로 구해진다. 점검 시에 경고장이 발견되는 확률을 완전히 random이라 하면, 점검 시에 경고장이 발견될 때까지의 시간의 평균치는 점검주기의 1/2라고 생각되어지므로 식(3)과 같이  $\mu_1$ 은 수리시간  $T_{r1}$ 에 T/2를 더한 시간의 역수로 정의하였다. 또 수리시간  $T_{r1}$ 은 점검주기 T에 비하면 충분히 짧으므로  $\mu_1$ 의 정의에서는  $T_{r1}$ 은 생략할 수 있다. 또한 중고장 상태는 고장 발생 시에 즉시 발견되어 수리되어 정상 상태로 돌아오는 것으로 했으므로 식(4)와 같이  $\mu_2$ 는 통상 MTTR의 정의대로 수리시간  $T_{r2}$ 의 역수로 정의하였다.

수리율  $\mu_1$ 은 점검주기 T가 커지는 것에 따라 작아진다. 따라서 점검주기가 길어지면 그림2의 고장모델에 있어서 경고장과 중고장 상태의 확률이 높아진다.

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_{f1}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_{f2}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{T_{r1} + \frac{T}{2}} \approx \frac{2}{T} \dots\dots\dots(3)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{T_{r2}} \dots\dots\dots(4)$$

고장 모델의 정상 상태에 있어서 그림2의 상태  $S_i$ 에 있는 확률  $P_i$ 는 식(5), (6), 상태  $S_i$ 에서 상태  $S_j$ 로의 천이가 발생하는 확률  $p_{(i,j)}$ 는 식(7), (8)로 표현된다.

$$P_1 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_2 + \mu_1 \mu_2} \dots\dots\dots(5)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_2 + \mu_1 \mu_2} \dots\dots\dots(6)$$

$$p_{(1,0)} = \mu_1 P_1 \dots\dots\dots(7)$$

$$p_{(2,0)} = \mu_2 P_2 \dots\dots\dots(8)$$

고장 코스트, 수리비용, 점검비용은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{고장 코스트} = P_2 C_0 \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{점검비용} = \frac{C_i}{T} = \frac{\mu_1 C_i}{2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{수리비용} = p_{(1,0)} C_{r1} + p_{(2,0)} C_{r2} \dots\dots\dots(11)$$

총 코스트  $C_T$ 는 고장 코스트, 점검비용, 수리비용의 합으로 구해진다.

$$C_T(T) = P_2 C_0 + \frac{C_i}{T} + p_{(1,0)} C_{r1} + p_{(2,0)} C_{r2} \dots\dots\dots(12)$$

그림3의 최적점검주기의 정의를 기반으로 하여 이 총 코스트  $C_T$ 를 최소로 하는 점검주기 T를 최적한 점검주기 T\*이라 한다.

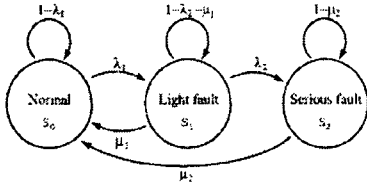


그림2 기기의 고장 모델

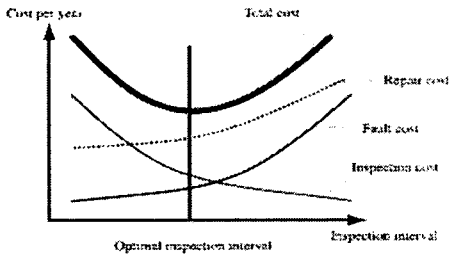


그림3 최적의 점검주기의 정의

### 3. 사례 연구

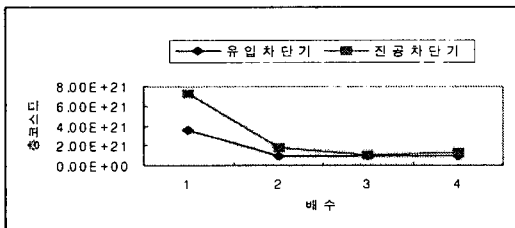
다음은 실험에서 구한 유입차단기와 진공차단기의 MTBF와 고장률의 데이터 값이다. 이 데이터 값을 2.3 절에서 언급한 식(12)에 적용해 보겠다. 유입차단기의 경우 정상 상태에서 경고장 상태로 변화되었으며 진공차단기의 경우 경고장 상태에서 중고장 상태로 변화되었다.

	MTBF(h)	고장률
유입차단기	8640	0.0001157407
진공차단기	367200	0.0000027233

$T_{r2}$ 는 0.5시간,  $C_0$ 는 100,  $C_1$ 는 5,  $C_{r1}$ 는 50,  $C_{r2}$ 는 75로 가정한다.

$\lambda_1$	0.0001157407	0.0002314814	0.0003472221	0.0004629628
$C_i(T)$	$3.6268e^{+021}$	$9.0669e^{+020}$	$9.0669e^{+020}$	$9.0669e^{+020}$

$\lambda_2$	0.0000027233	0.0000054466	0.0000081699	0.0000108932
$C_i(T)$	$3.6268e^{+021}$	$9.0669e^{+020}$	$2.2667e^{+020}$	$4.5335e^{+020}$



### 4. 결 론

현재 한국의 철도는 신뢰성 기반 유지보수를 이용하여 기존의 차량정비 체계를 보완하고 신개념의 시스템을 구

축함으로써 운행의 신뢰성을 극대화하는 데에 주력하고 있다. 차량 각 부품에 대한 신뢰도를 배분하여 적절한 수명예측으로 유지보수 주기의 탄력적인 적용 가능성 및 현장 특성에 맞는 유지보수 방법을 적용할 수 있도록 현장에서 발생하는 고장의 유형과 열화의 진행을 분석하고 시스템의 신뢰도를 측정할 수 있는 전문 시스템인 신뢰도 기반 유지보수를 구축하고자 하는 것이다. 또한 전문 인력의 활용과 운송차량의 과학적인 모니터링을 통하여 분석된 데이터를 바탕으로 안정적인 열차운용은 물론 새로운 정비관련 기술축적을 기할 수 있게 된다. 운영 중에 발생하는 고장 유형과 기능저하를 진단하고 예측기기의 활용, 체계적인 고장 원인의 분석 결과로 얻어진 데이터는 전산정보로 가공되어 체계적인 고장의 발견 및 조치에 유용하게 이용되며 현장에서 접근이 쉬워진다. 이 데이터는 부품의 열화 진행 정도, 수명의 연구, 고장 빈도, 시스템의 개선 등 광범위하게 사용될 수 있는 귀중한 자료이므로 사실대로 기록되어야 하고 통계적으로 분석되어야 한다. 철도의 유지보수 업무를 효율적으로 수행하기 위해서는 기술 인력의 적절한 활용을 통하여 기술의 축적을 도모하고 적절한 수명의 예측과 유지보수 진단 방법의 과학화를 기하여 지속적인 철도의 발전을 가져와야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 山村 昌, "電氣·電子部品の壽命診断", pp.13-22, 1991
- [2] 福田 博, "鐵道における安全性工學入門", pp.50-57
- [3] 赤岡 純, "設備診断技術", pp.12-21, 1996
- [4] 北山 匡史, "經濟性とリスクを考慮した設備保全計畫策定支援", 日本電氣學會, No.9, Vol.124, 2004
- [5] 福田 博, "故障データの解析と利用", pp.46-66
- [6] John Moubray, "Reliability-centered Maintenance", pp.235-260, 2000
- [7] B. S. DHILLON, "reliability book", pp.25-45, 1980