

# 한국형 무인운전 고무차륜 AGT 시스템의 유지보수를 위한 신뢰성 기반의 고장 예방정비 시스템 개발에 관한 연구

## A Study on the Development of Web-based Preventive Maintenance System for the Driverless Rubber-Tired K-AGT

손영탁<sup>1</sup>, 천환규<sup>1</sup>, 엄호영<sup>1</sup>, 이호용<sup>2</sup>, 한석윤<sup>2</sup>, 서명원<sup>1</sup>✉  
 Young-Tak Son<sup>1</sup>, Hwan-Kyu Chun<sup>1</sup>, Ho-Young Uhm<sup>1</sup>, Ho-Yong Lee<sup>2</sup>, Seok-Youn Han<sup>2</sup>  
 and Myung-Won Suh<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> 성균관대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

<sup>2</sup> 한국철도기술연구원 (Korea Railroad Research Institute.)

✉ Corresponding author: suhmw@skku.edu, Tel: 031-290-7447

Manuscript received: 2008.5.14 / Revised: 2008.12.31,2009.11.19 / Accepted: 2010.4.5

*The Korean Railroad Research Institute (KRRRI) has developed the rubber tired AGT system (Model: K-AGT) between 1999 and 2005. The K-AGT is a light rail transit system does not require a driver and generally operates on an elevated railroad for transporting passengers. Accidents caused by driverless vehicles can severely affect social confidence, safety and economy therefore, it is very important to minimize the occurrences of such faults, and to accurately perform detailed maintenance tasks and thoroughly investigate the cause of any repeated failures. This research develops the web-based Preventive Maintenance (PM) system for the K-AGT train system. The framework of the PM system is based on performing a reliability analysis and a failure mode effects analyses (FMEA) procedure on all the sub-systems in the K-AGT system. Out of the devices that have a low reliability, the high failure ranked devices are included high in the list for performing the overall maintenance plans. Through registration of historical failure data, the reliability indexes can be updated. Such a process is repeated continuously and can achieve very accurate predictions for device operational life times and failure rates. Therefore, this research describes the development of the overall PM system consists of a reliability analysis module, a failure mode effect analysis module, and maintenance request module.*

Key Words: RCM (Reliability Centered Maintenance: 신뢰성 중심 유지 보수), Reliability (신뢰도), Maintenance System (유지 보수 시스템), Failure Rate (고장률)

### 1. 서론

신뢰성 공학 분야에서 사용되고 있는 제품과 시스템의 신뢰성에 관한 전통적인 정의로는 “시스템이 주어진 사용조건 아래에서 의도된 임무기간 동안 고유의 기능을 고장 발생없이 성공적으

로 수행할 수 있는 능력 또는 성질 또는 확률”을 의미한다. 일반적으로 품질관리에 있어 제품에 대한 품질이란 일정한 시점에서의 정적인 품질에 대한 판단, 즉 정적 신뢰성을 고려하는 반면에 유지보수 분야에서 신뢰성이란 시간에 따른 제품의 동적인 품질, 즉 동적 신뢰성을 관리하는

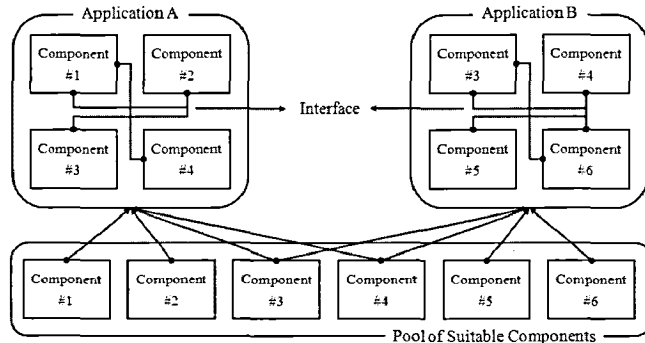


Fig. 1 Component based BOM management

것이다.<sup>2</sup> 이런 동적인 품질평가를 정량적으로 나타내기 위하여 일반적으로 신뢰도라는 용어를 사용한다.

신뢰성에 대한 이론 및 평가 방법은 1967년 Barlow 등에 의해 Mathematical Theory of Reliability로 집대성 되었고, 통계적 방법을 주제로 한 부분은 1974년 Mann 등의 Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data에 자세히 소개되었다. 그러나 1970년도부터 이론과 실제 유지보수에는 차이가 발생하였으며, 적용대상과 환경 등의 상이성으로 인해 적용대상에 대한 신뢰성 체계를 구축함에 있어 수학적 접근보다는 적용방법론 연구를 필요로 하게 되었다. 이러한 변화의 물결에 직면하면서 Moubray<sup>3</sup>에 의해 RCM 기반의 새로운 유지보수 방법에 대한 연구가 시작되었다. 유지보수 신뢰성 공학 중에서 RAMS 지표를 이용한 RCM 기법은 1970년대 민간 항공 산업에서 신뢰도 목표를 설정하고 정비프로그램을 운영하는 개념을 도입한 이후로 익숙한 용어로 통용이 되기 시작하였다. 또한, Darling<sup>4</sup>에 의해 원자력 유지보수 분야 역시 RAMS 지표를 이용한 신뢰성 연구가 진행되었고, 한국원자력연구원에서도 1980년대에 본격적으로 도입하게 되었다.

본 연구에서는 K-AGT 시스템의 고장 예방정비 업무를 위해 신뢰도의 개념을 도입하여 검수/정비 시점, 점검 내용 및 우선권 등을 합리적으로 판단할 수 있는 신뢰도 기반의 고장 예방정비 시스템을 개발하였다. 이를 위해 K-AGT 시스템의 부품 체계(BOM, Bill of Materials)를 구성하였고, 사고/고장 분류체계를 표준화 하여 고장/정비 이력 데이터를 획득할 수 있도록 하였다. 또한 복합시스템의 신뢰도 평가 알고리즘을 소개하고, 이를 검증

하기 위해 직렬과 병렬이 혼합된 가상의 복합시스템을 구성하여 임의의 운영 시나리오를 적용하여 적합성을 판단하였다.

## 2. K-AGT 유지보수체계 표준화

K-AGT 유지보수체계의 표준화는 유지보수를 위한 BOM, 사고/고장코드 및 조치코드에 대한 표준화로 크게 나누어 수행하였으며, 이러한 유지보수체계 표준화 코드를 시스템에 반영하여 각종 고장/정비이력 정보를 데이터베이스화 하였다. 이 때, BOM 코드는 K-AGT 시스템의 장치 및 부품에 대한 분류, 사고/고장코드는 고장에 대한 분류를 나타낸다.

### 2.1 K-AGT BOM 구성

K-AGT의 BOM은 특정 제품이 어떤 부품들로 구성되는가에 대한 계층데이터로 기본적으로 부품 고장이 발생한 경우 혹은 정기적인 유지보수를 수행하는 경우 최소 교체 단위(LRU, Line Replaceable Unit)로 구성된다. 본 연구에서는 기존의 수직적인 구조를 가지는 BOM 데이터 대신, 컴포넌트 개념을 도입<sup>3</sup>하여 시스템의 마스터 BOM 설계를 선행하고, 규칙에 따라 기능별 BOM을 구성하는 컴포넌트 기반의 BOM 관리시스템을 구축하였다. 이를 통해 환경 변화나 데이터 변환 시에는 규칙의 변경만으로 구조가 변화하도록 하여, 설계 시 적용된 내용의 변경이 있어도 통합적으로 관리되어 반영될 수 있도록 하였다. Fig. 1은 마스터 BOM과 기능별 BOM 사이의 관계를 도식화 한 것이며, 구축한 K-AGT 시스템의 마스터 BOM 샘플 리스트는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 A sample of the master BOM for K-AGT system

LAVEL 1		LAVEL 2 ...	
NAME	CODE	NAME	CODE
Rolling-stock System	KRJ-01	Vehicle	KRJ-0101
		Car body and Gangway	KRJ-0102
		Brake System	KRJ-0103
		Propulsion Control System	KRJ-0104
		Supplementary Power	KRJ-0105
		General Control System	KRJ-0106
		High Voltage System	KRJ-0107
		Vehicle Electric System	KRJ-0108
:	:	:	:
Power System	KRJ-02	SCADA	KRJ-0201
		Rectifier	KRJ-0202
		Transformer	KRJ-0203
		AC distributing board	KRJ-0204
		:	:
Signal System	KRJ-03	General Driving Control System	KRJ-0301
		Auto Transit Control System	KRJ-0302
		CBTC Wireless Communication	KRJ-0303
		Wireless Data Forwarding System	KRJ-0304
		:	:
Rail Infrastructure	KRJ-04	Railway Track	KRJ-0401
		Bridge	KRJ-0402
		Incidental Facilities	KRJ-0405
		Railroad Station	KRJ-0407
		:	:
Communication System	KRJ-05	Electronic Switchboard Facilities	KRJ-0501
		UPS Facilities	KRJ-0502
		Transit Wireless Facilities	KRJ-0503
		CCTV Facilities	KRJ-0504
		:	:

2.2 K-AGT 고장 체계 표준화

K-AGT 시스템에서 사용되는 사고/고장 코드체계는 유지보수작업을 위한 필수사항이며, 특히 부품코드 체계의 표준화와 연계하여 각 장치별 대분

류 및 중분류, 고장현상 등을 포함하는 표준코드 체계<sup>6</sup>가 필요하다. 우선 대분류는 작업자들이 K-AGT 시스템을 구분하는 가장 일반적인 방법으로 이를 차량시스템, 전력시스템, 신호시스템, 선로 구축물, 통신시스템의 총 5 가지로 구분하였다.

중분류는 5 개 대분류를 구성하고 있는 하위 부품들로써 앞에서 정의한 부품체계에서 실제 유지보수 작업이 일어나는 레벨의 부품들로 구성된다. 또한 고장현상은 작업자들이 인지하는 고장현상으로써 단어의 반복없이 간략하게 입력하도록 하였다.

정의한 사고/고장 분류체계에 따라 작업자들은 작업 기록을 입력하게 되고, 관리자는 입력 단의 내용을 점검하여 용어를 통일시킨다.

특히 고장현상 부분은 작업자의 입력에 따라 용어의 표준화가 이루어지며, 다른 항목들도 신규 내용의 추가요청이 있을 경우 관리자의 승인과정을 거쳐 등록하게 된다. 이러한 작업이 효과적으로 이루어지면 하나의 고장현상에 대한 고장정보들이 사례로 결정되게 되고, 여기에 코드를 부여하게 된다.

앞선 규칙에 의하여 정의된 고장코드를 Fig. 2 와 같이 디렉터리 형태로 구조화시킴으로써 한번 정의된 고장코드에 대해 사용자는 일일이 재입력 없이 풀다운 방식으로 항목을 선택하게 된다.

3. 복합시스템의 신뢰도 평가

본 연구에서는 유지보수 이력 데이터를 이용한 K-AGT 시스템의 신뢰도 평가를 위해 다음의 4 가지 가정을 하였다.

- 1) K-AGT 시스템을 구성하는 각 장치들은 고장과 관련하여 상호 독립적이다.
- 2) K-AGT 시스템 및 각 부품들은 운영상태 또는 고장상태의 두 가지 상태만을 따른다.
- 3) K-AGT 시스템의 유지보수 단계에서 발생한 수리, 혹은 교환 이력 데이터를 고장이라 정의한다.
- 4) 운영중인 K-AGT 시스템의 모든 장치들은 우발고장을 따른다.

K-AGT 시스템의 신뢰도 평가를 위해 본 연구에서 적용한 복합시스템의 신뢰도 평가 알고리즘은 BOM 상의 수리/교환의 최소 단위인 LRU 를 정의한다.

Fig. 3 에서와 같이 LRU 에 고장으로 인한 수리/

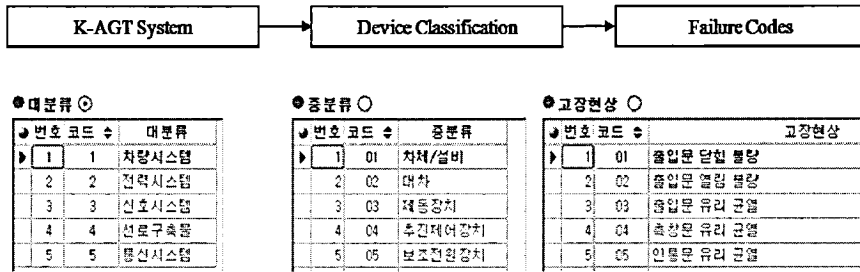


Fig. 2 An example of failure code generation

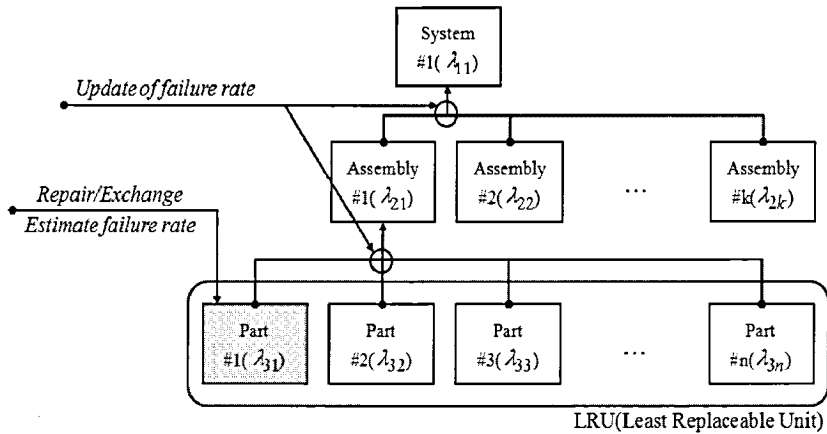


Fig. 3 Reliability analysis framework

교환 작업이 발생하였을 때, 우선 AMSAA (Army Materials System Analysis Activity) 모형<sup>5</sup>을 이용한 부품의 고장률 추정법을 이용하여 해당 장치의 고장률을 계산하고, 또한 이를 기반으로 해당 장치의 신뢰도를 예측한다. 다음으로 추정된 고장률 및 신뢰도를 이용하여 각 부품의 신뢰도 연결 구조(RBD, Reliability Block Diagram) 관계를 기반으로 해당 장치보다 BOM 상의 상위 레벨 부품의 고장률을 업데이트한다. 최종적으로 업데이트된 시스템 고장률을 기반으로 신뢰도 함수를 이용하여 신뢰도를 예측한다.

3.1 신뢰도 평가법

일반적으로 부품의 고장률은 시간의 흐름에 따라서 Fig. 4 와 같이 고장률이 감소하는 초기고장 (DFR, Decreasing Failure Rate), 비교적 낮고 일정한 고장률의 우발고장(CFR, Constant Failure Rate), 고장률이 증가하는 마모고장(IFR, Increasing Failure Rate)의 단계를 거친다. 유지보수 과정에서의 부품 고장은 초기 고장의 원인인 표준 이하의 재료 사용, 불충분한 품질관리, 적절하지 못한 디버깅, 빈약한

가공 및 조립기술, 부적절한 설치 등을 해결한 우발 고장의 단계이다.

이는 Fig. 4 의 CFR 에 해당되는 경우로 이러한 경향을 ‘overall life characteristic curve’라고 한다. 이 경우의 고장은 설명할 수 없는 결점, 오용과 부적절한 사용, 불규칙한 원인에 의해 발생한다. AMSAA 모형을 통한 고장률 추정은 가동 초기단계에서부터 고장률 변화과정을 모사할 수 있으며, 점차적으로 일정한 고장률에 수렴함으로써 우발고장의 특성을 확인할 수 있다.

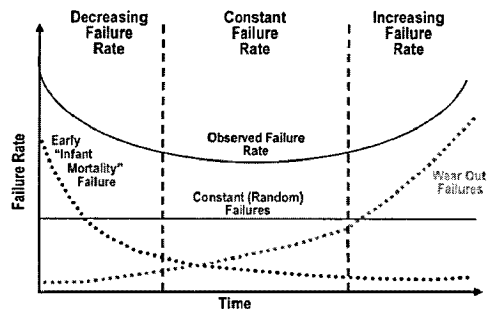


Fig. 4 Bathtub curve for a typical component life cycle

AMSAA 모형은 고장률 함수  $\lambda(t)$  를 와이블 함수로부터 추정하는데, 와이블 분포의 고장 밀도 함수는 식 (1)과 같다.

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

여기서  $\beta$  는 형상 모수(shape parameter; 분포의 모양을 결정),  $\eta$  는 척도모수(scale parameter; 가로 축의 척도를 규정)이다. 일반적으로 2 개의 모수  $\beta$  와  $\eta$  를 가진 와이블 분포가 많이 사용되는데  $\beta$  의 값에 따라서 고장률 함수의 경향이 변하게 된다. 즉  $\beta=1$  이면 와이블 분포는 지수 분포가 되며 상수 고장률을 가지게 된다.  $\beta < 1$  에 대해서는 고장률 함수는 t의 감소함수로서 t가 커짐에 따라 0에 접근하게 된다.  $\beta > 1$  에 대하여는 고장률 함수는 t의 증가함수이다.

고장률 함수는 고장 밀도 함수를 신뢰도 함수로 나눈 것으로써 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

$$= \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right) / \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)$$

여기서 만약  $\tau = 1/\eta^\beta$  라고 하면, 고장률 함수  $\lambda(t)$  는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda(t) = \tau \beta t^{\beta-1} \quad (3)$$

with  $t > 0, \tau > 0, \text{ and } \beta > 0$

AMSAA 모형의 모수  $\tau, \beta$  는 최우추정법(MLE, Maximum Likelihood Estimation)<sup>6,7</sup> 을 이용하여 획득한다. 확률론적 관점에서 최우추정법은 모집단의 확률분포 형태는 알고 있으나 구체적으로 모집단을 나타내는 확률분포 수치를 알지 못하는 경우에 모집단의 확률분포 수치를 추정하기 위해 사용하는 것으로 우도함수를 최대화 하는 분포의 모수를 구해 추정치로 쓰는 방법이다. 여기서 우도함수를 최대화 하는 것은 확률변수인 관측치들이

실제로 발생될 확률을 극대화 시키는 것을 의미한다.

우도함수는 다음 식 (4)와 같다.

$$L = \tau^n \beta^n \exp(-\tau T^\beta) \prod_{i=1}^n T_i^{\beta-1} \quad (4)$$

여기서 n 은 누적 고장 수이며, T 는 최후 고장시간이다. 우도함수를 최대화 하기 위해 식 (4)의 양변에 로그화하고,  $\tau, \beta$  에 관해 편미분한 후, 미분치를 0 으로 설정하여 계산하면 고장률 추정을 위한 모수  $\tau, \beta$  를 획득할 수 있다.

$$\tau = \frac{n}{T^\beta} \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \frac{n}{n \ln T - \sum_{i=1}^n \ln T_i}$$

시스템의 신뢰성 분석을 위해 추정된 부품의 고장률을 이용하여 신뢰도 블록 구조 관계에 따른 복합시스템의 신뢰도 산출이 수행된다. 시스템은 다수 부품의 결합구조로 이루어지며, 결합은 대표적으로 직렬, 병렬 결합의 구조로 이루어진다.

시스템의 신뢰도 분석에서 가장 많이 쓰이는 구조가 직렬구조로서 시스템을 구성하는 요소 중 어느 하나가 고장을 일으키면 시스템에 고장이 발생하는 구조이다. 따라서 직렬 구조 시스템의 고장시간 T 는 시스템을 구성하고 있는 n 개 부품의 각 고장시간 중 가장 작은 값이며, 이를 이용하여 시스템이 t 시간 이상 작동할 확률을 나타내는 신뢰도 함수는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$R_s(t) = p[\min T_i > t] = p[T_1 > t \cap \dots \cap T_n > t]$$

$$= p[T_1 > t] p[T_2 > t] \dots p[T_n > t]$$

$$= \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (6)$$

여기서  $T_i$  는 i 번째 부품의 최후 고장시간을 표시하며,  $T_1, T_2, \dots, T_n$  는 서로 독립이라고 가정한다. 병렬 구조를 가진 시스템은 구성 요소들이 동시에

가동되고 있고 일부 부품들이 고장을 일으켜도, 나머지 중 어느 하나만이라도 작동하면 그 시스템이 가동되는 구조로써 시스템의 고장이 발생하려면 모든 구성 부품에 고장이 발생해야 한다. 따라서 병렬 구조 시스템의 고장시간  $T$  는 시스템을 구성하고 있는  $n$  개 부품의 각 고장시간 중 가장 큰 값이며, 이를 이용하여 시스템이  $t$  시간 이상 작동할 확률을 나타내는 신뢰도 함수는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 R_s(t) &= p[\max T_i > t] = 1 - p[\max T_i \leq t] \\
 &= 1 - p[T_1 \leq t \cap \dots \cap T_n \leq t] \\
 &= 1 - p[T_1 \leq t]p[T_2 \leq t] \dots p[T_n \leq t] \quad (7) \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))
 \end{aligned}$$

여기서  $F_i(t)$  는  $i$  번째 부품의 불신뢰도 함수이다.

### 3.2 고장영향 분석(FMEA)

고장영향 분석(FMEA, Failure Mode Effect Analysis)<sup>8</sup> 은 시스템이나 기기의 잠재적인 고장현상을 찾아내고 가동 중에 이와 같은 고장이 발생하였을 경우 임무 수행에 미치는 영향을 객관적으로 평가하여 고장등급을 결정하는 기법이다. 이를 통해 전체 시스템에 영향이 큰 고장현상에 대하여 적절한 대책을 세우는데 필요한정보를 제시해 준다. 본 연구에서는 고장평점법을 소개한다.

고장평점법<sup>8</sup> 은 고장에 대한 평점 요소  $i$  를 정하여 각 요소에 대한 계수  $C_i$  를 기술적 판단에 의해서 평가하고 고장평점  $C_s$  를 식 (8)과 같이 계산하고, 이에 상응하는 고장등급을 결정하는 방법이다. 다음은 본 연구에서 적용한 고장평점 요소이다.

$$C_s = (C_1 \times C_2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

여기서  $C_s$  는 고장평점,  $C_1$  과  $C_2$  는 기능적 고장의 치명도와 발생빈도를 의미한다. Table 2 와 Table 3 은 MIL-STD-16 29A 에 근거하여 ‘기능적 고장의 치명도’와 ‘고장발생의 빈도’의 평점요소와 계수를 정의한 것이다. 일반적으로 고장 등급은 고장평점

$C_s$  에 따라 4 단계로 나누며 Table 4 와 같이 정의할 수 있다.

Table 2 Severity classification of failures

Level	Severity	Definition	$C_1$
1	Catastrophic	Major system damage/loss - impossibility of attainment of mission	10
2	Critical	Partial system damage - interruption of attainment of mission - attainment of mission by using supplementary means	7
3	Marginal	Minor system damage - interruption of attainment of minor mission - attainment of mission by using supplementary means	4
4	Negligible	Minor failure - have no effect on mission	1

Table 3 Occurrence classification of failures

Level	Occurrence	Definition	$C_2$
1	Frequent	A single failure mode probability is greater than 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time interval.	10
2	Probable	A single failure mode probability is more than 0.10 but less than 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time interval.	7
3	Occasional	A single failure mode probability is more than 0.010 but less than 0.010 of the overall probability of failure during the item operating time interval.	5
4	Remote	A single failure mode probability is more than 0.0010 but less than 0.10 of the overall probability of failure during the item operating time interval.	3
5	Improbable	A single failure mode probability is less than 0.0010 of the overall probability of failure during the item operating time interval.	1

Table 4 The relationship between failure grades and failure ranks

Failure rank	Failure grades ( $C_s$ )	Failure classification
I	7 ~ 10	Critical failure
II	4 ~ 7	Major failure
III	2 ~ 4	Minor failure
IV	Below 2	Negligible failure

3.3 복합시스템 신뢰도 평가의 적용 및 검증

본 연구에서는 복합시스템의 신뢰도 평가 알고리즘을 적용 및 검증하기 위해 Fig. 5 와 같은 가상 복합시스템을 구성하였다. 구성된 가상 복합시스템은 4 개의 부품으로 이루어진 시스템이며 직렬, 병렬 구조가 혼합된 결합을 가지고 있다. 구성된 시스템에 임의의 고장 이력 데이터를 접목함으로써 운영 시나리오를 구성하였다. 가상 복합시스템의 운영 시나리오는 5 년간(43,800 hrs) 각 부품 및 복합시스템의 고장발생에 따른 수리내역이며, 부품코드, 고장발생횟수, 누적운영시간으로 구성된다. 가상 복합시스템의 신뢰도 평가를 위해 본 연구에서 적용한 운영 시나리오의 일부분을 Table 5 에 나타내었다. 각 부품은 5 년간 복합시스템의 운영기간 동안 수리/교환을 통해 유지보수를 하였으며, 수리 시 부품이 제 기능을 발휘할 수 있다고 가정하였다. 이는 부품 고장으로 인한 수리 시, 신뢰도는 100%로 회복된다는 것을 의미한다. AMSAA 모형을 통해 가상 복합시스템에 대한 시간의 흐름에 따른 각 부품의 고장률과 평균고장간격을 추정하였다. 복합시스템 및 각 부품의 5 년간(43,800 hrs)의 고장 발생횟수, 그리고 이를 이용하여 식 (5)를 통해 계산한 AMSAA 모형의 모수  $\beta$ ,  $\tau$  의 값은 Table 6 과 같다.

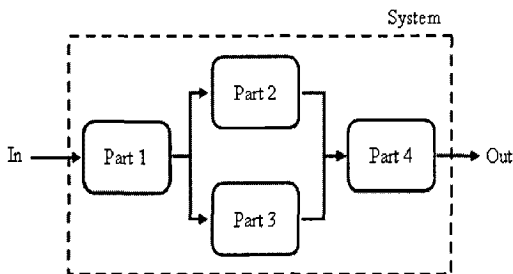


Fig. 5 A sample model Reliability Block Diagram

Table 5 Historical maintenance data of virtual complex system

Part code	Failure number	Operation time (hrs)
2	1	235
3	1	354
1	1	509
5	1	509
4	1	512
5	2	512
1	2	1253
5	3	1253
2	2	2175
:	:	:
:	:	:
:	:	:
5	50	42275
2	19	43754
3	12	43754
5	51	43754
4	15	43776
5	52	43776
1	29	43785
5	53	43785

Table 6 Reliability analysis results for a sample model

Part	Time	ln_t	Failure Number	$\beta$	$\tau$ (x E-3)
	FR (x E-6)	MTBF (hr)	FR (x E-6)	MTBF (hr)	
1	607	1,649	662	1,510	8.43
2	382	2,615	434	2,303	11.93
3	227	4,399	274	3,646	17.11
4	325	3,075	343	2,918	5.11
System	1,159	863	1,279	782	9.39

Table 6 의 형상모수  $\beta$ , 척도모수  $\tau$  의 값을 이용하여 운영시간 동안 고장률 및 평균 고장간격의 변화를 식 (3)을 통해 추정하였고, 결과는 Fig. 6 에 각각 나타내었다.

Fig. 6 에서 가상 복합시스템을 구성하는 각 부품의 고장률은 초기 높은 고장률에서 점차로 감소하는 성장모형을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 6 은 고장률의 육조곡선에서 초기고장단계의 형태를 보이고 있으며, 그래프에서 향후 어느 시점에서 초기고장단계의 값이 수렴하여 일정 고장률을 가지는 우발고장단계의 형태를 보일 수 있음

을 예상할 수 있다. 따라서 현시점(43800 hrs)에서의 각 부품의 추정 고장률 및 평균고장간격은 Fig. 6 의 최우측 값이며 Table 6 에 나타내었다.

또한 동일한 가상 복합시스템의 유지보수 이력 데이터를 현재 신뢰성 예측 상용툴인 Relx9 를 통해 얻은 고장률의 결과와 본 연구에서 구축한 신뢰도 평가 프로그램을 통해 얻은 결과를 비교/검증을 하였다. Table 6 에서 확인할 수 있듯이 각 부품의 고장률에 대한 평균 오차율이 10.6% 로서 신뢰도가 있다고 판단하였다.

복합시스템의 고장률( $\lambda_s$ )과 평균고장간격

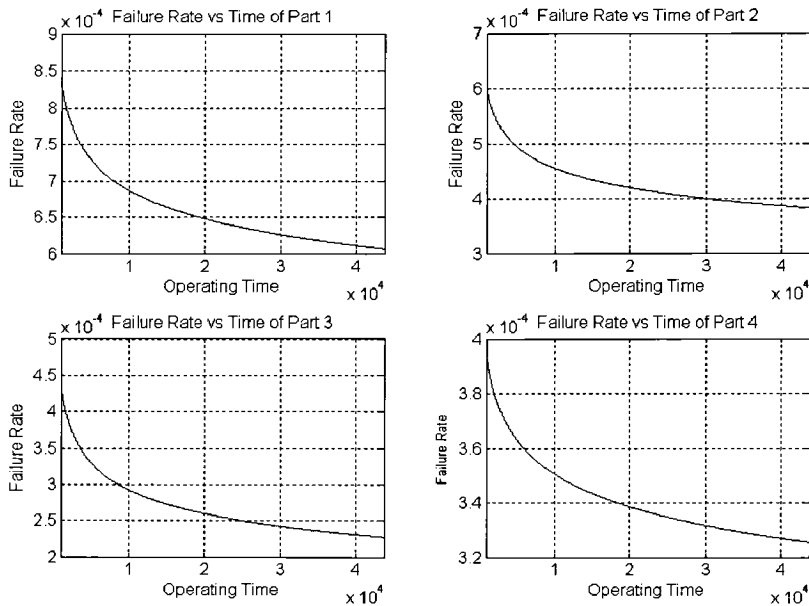


Fig. 6 The historical failure rate of each component in the sample model

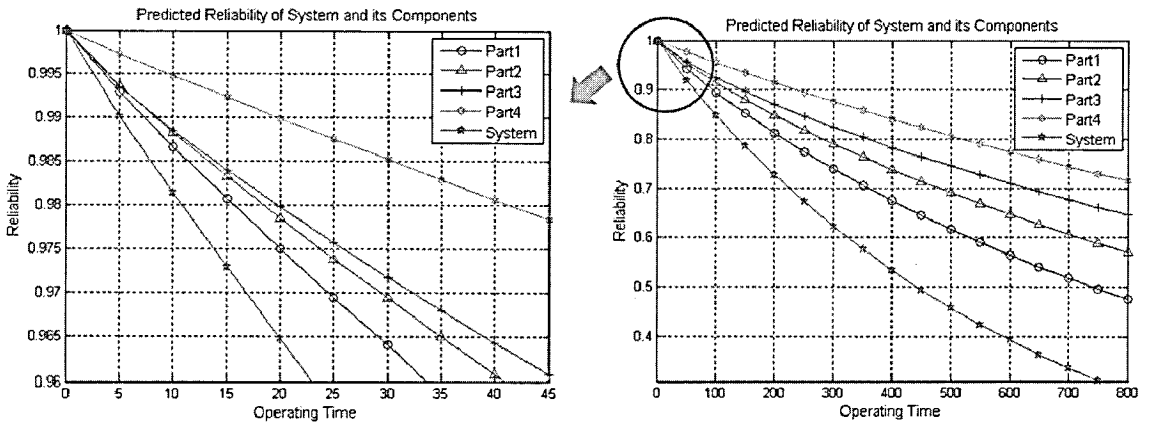


Fig. 7 Predicted reliability change of virtual system and its components



( $MTBF_s$ )은 시스템을 구성하는 4 개 부품의 고장이력 데이터로부터 획득 가능하다. 모델링한 가상 복합시스템은 직렬 구조를 가지고 있는 부품 1 과 4 의 경우, 고장 발생 시 시스템의 고장으로 이어지게 되며, 병렬 구조를 가지고 있는 부품 2 와 3 의 경우는 두 가지 부품이 동시에 고장이 발생하거나, 한 가지 부품의 수리시간 동안 나머지 부품의 고장이 발생할 때 시스템의 고장이 발생하게 된다. 따라서 구축한 가상 복합시스템의 고장률 및 평균고장간격은 부품 고장률에 따른 복합시스템 고장률 산출법에 의해 추정 가능하다. 복합시스템의 고장률과 평균고장시간을 추정한 결과는 Table 6 에 나타내었으며 5 년이 경과한 현 시점 (43800hrs)의 고장률 및 평균 고장간격은  $\lambda_s = 1,159E-6$ ,  $MTBF_s = 863$  hrs 로써 이를 Relex 를 통해 비교한 결과는 9.39%의 오차율을 보였다. Table 6 에 나타낸 현 시점에서 시스템 및 각 부품의 고장률과 평균고장간격을 각 부품의 현재 시간부터 향후 복합시스템의 평균고장간격까지 신뢰도 추이를 예측한 결과는 Fig. 7 과 같다. 수리 후 시간이 흐름에 따라 점차적으로 신뢰도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 부품 2 와 3 의 경우 운영 시나리오에서 고장 수리 후 시간이 가장 지났기 때문에 신뢰도 추이 예측을 시작하는 시점인 현시점에서의 신뢰도가 가장 작다고 판단된다.

각 부품의 신뢰도 추이 예측 결과를 비교해 보면, 고장률이 큰 부품 1 의 경우 시스템 향후 운영 시간에 따른 신뢰도가 큰 폭으로 감소하여 50 시간 이후에는 가장 낮은 신뢰도를 보인다. 이에 반해 고장률이 작고 평균고장시간이 큰 부품 3, 4 는 시스템 향후 운영시간에 따른 신뢰도의 감소폭이 크지 않았다.

각 부품 신뢰도의 추이 예측과 같은 방법을 통해 복합구조물의 향후 평균고장간격까지의 신뢰도 추이 예측을 하였으며, 각 부품 고장률의 영향으로 현 시점에서의 신뢰도 값은 가장 낮고, 신뢰도 감소폭이 부품 신뢰도에 비하여 굉장히 큰 것을 알 수 있다.

#### 4. 웹기반 예방정비 시스템 개발

K-AGT 시스템의 고장 예방정비시스템은 유지보수 이력의 신뢰성 지표 분석을 통해 산출된 평균고장간격이 신뢰도 90% 기준으로 보았을 때 만료된 장치 중에서 고장 등급이 높은 고장을 가진

장치를 우선 정비/검수 계획 수립에 반영하여 잠재 고장이 실제 기능 고장으로 발전하는 것을 예방하고, 정기적인 검수/정비의 빈도를 감소시켜서 K-AGT 시스템의 신뢰도를 향상시키는 사전예방의 측면이 강조되는 시스템이다.

본 연구에서는 실시간으로 유지보수 이력 수집/분석과 작업자들에게 검수/정비가 필요한 부품들의 목록과 유지보수에 필요한 각 장치에 대한 정보를 제시해 줄 수 있도록 웹 기반으로 고장 예방정비시스템을 구축하였다.

#### 4.1 시스템 아키텍처 및 데이터베이스 설계

고장 예방정비시스템은 앞서 기술했듯이 신뢰성 지표 분석을 통해 산출된 평균고장간격이 만료된 장치 중에서 고장등급 높은 고장을 가진 장치를 우선 정비/검수계획 수립에 반영하고, 정비/검수 업무를 수행한 후, 그 유지보수 정보를 시스템 데이터베이스에 등록한다. 고장 예방정비시스템은 다시 신뢰성 지표 분석과 고장영향 분석을 수행하여 그 결과가 수정되고, 다음 정비/검수 업무계획에 반영되도록 설계되었다. 시스템 아키텍처는 Fig. 8 에 나타내었다. 시스템의 개발 환경은 아래와 같이 웹기반이고, 웹터어 개발 환경은 JSP 와 Java 를 사용하였으며, 데이터베이스는 오라클 9i 를 사용하였다. 본 연구에서 구축한 데이터베이스는 빠른 처리속도, 안정성, 유지보수 용이성, 확장성을 고려하여 구축하였다. 이를 위해 데이터 모델링을 통한 정규화, 비정규화로 최적의 데이터베이스 구조로 설계하였고, 업무처리유형 분석을 물리적 데이터베이스로 설계하였다. 또한, 데이터의 네트워크 이동성을 최소화하고 단순화 할 수 있도록 설계단계에 반영하고, 대용량 데이터의 빠른 처리를

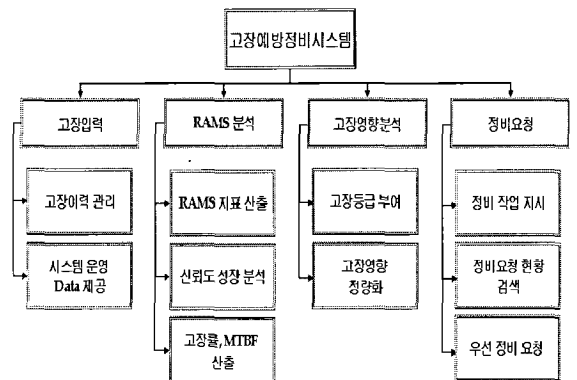


Fig. 8 The architecture of preventive maintenance system

보장하기 위해 DBMS (Data Base Management System) 설정을 최적화 하였다. 이를 기반으로 ERD (Entity Relationship Diagram)에서는 분석단계에서 도출한 객체모형인 개념적 데이터베이스를 근간으로 상세한 논리적 데이터베이스를 설계하였다. 이를 물리적(physical) 데이터베이스와 논리적(logical) 데이터베이스로 구분하여 각 테이블 별 Primary Key 와 Foreign Key 를 설정하고, 각각의 속성을 상세화 하였다. 개념적 데이터베이스로 도출한 분석단계 객체의 각 속성과 화면설계를 참조로 구체적인 논리 데이터 엔티티와 속성을 연결한 ERD 를 설계하였다. 물리적 설계는 점진적 개발 단계에 구체적인 DAO(Data Access Object) 작성에 의한 SQL(Structured Query Language)문을 구체화함으로써 필요한 물리적 모델을 구성하였다.

이와 같이 구성된 ERD 는 각 어플리케이션 컴포넌트 별 추출된 테이블의 개수가 6 개인 고장 예방정비시스템으로 구성하였다. 설계된 ERD 는 자동화 툴인 ER-Win 에 의해 작성되고, 이를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9 의 RAMS 테이블은 현재 시점에서 신뢰성 지표 분석의 결과 데이터를 가지고 있다. RAMSHISTORY 테이블은 신뢰성 지표 분석 결과의 이력 데이터들이 존재하며, 시스템은 신뢰성 이력 데이터를 이용하여 그래프를 생성한다. DOWNREPAIR 테이블은 고장영향 분석의 결과 데

이터를 포함하고, DOWNCD 테이블은 앞서 정의한 고장코드 데이터를 가지고 있다. CAR 테이블은 K-AGT 시스템의 철도차량 BOM 정보를 포함하고 있다. HISTORY 테이블은 유지보수 이력 데이터가 쌓여있으며, TREE 테이블은 유지보수 BOM 정보를 가지고 있다.

### 4.2 예방정비 시스템 모듈

본 연구에서 개발한 K-AGT 시스템 고장 예방정비시스템은 앞서 기술한 복합시스템의 신뢰성 평가 알고리즘을 기반으로 시스템을 구성하였으며, 이 시스템은 신뢰성 지표 분석 모듈, 고장영향 분석 모듈, 정비요청 모듈 등 3 가지 모듈을 포함하고 있다.

#### 4.2.1 신뢰성 지표 분석 모듈

K-AGT 시스템의 서브시스템, 장치별, 부품별 고장률, MTBF, MKBF, 신뢰도(reliability), 가용도(availability), 정비도(maintainability), 안전도(safety) 지표를 열람할 수 있게 하였다. Fig. 10 에서 보는 바와 같이 마스터 BOM 을 통하여 위수관리가 되게 하였다. 즉, 같은 단위 부품이더라도 환경적 요인, 시스템 특성이 다르면 고장이 다르게 발생하여 신뢰성 지표도 다르게 된다. 여기서 산출된 신뢰성 지표는 정비/검수 계획 수립 시에 반영된다.

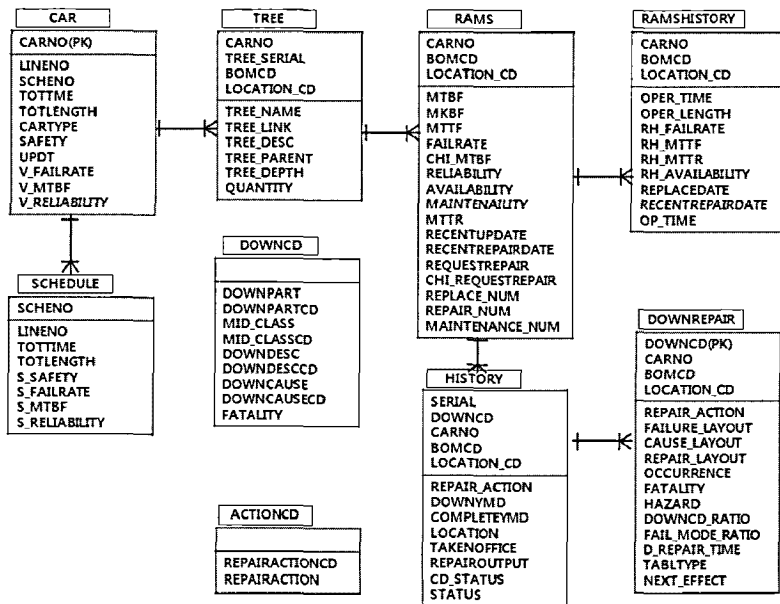


Fig. 9 The preventive maintenance system ERD

### 4.2.2 고장영향 분석 모듈

K-AGT 시스템의 장치 별 고장현상, 고장원인, 조치사항, 위험도 수준 등을 열람할 수 있게 하였다. 즉, 사고/고장발생 시 작업자는 고장현상과 원인을 조회하여 조치를 취할 수 있고, 각 장치가 전체 시스템에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 신뢰성 지표 분석 모듈과 마찬가지로 여기서 산출된 데이터는 정비/검수 계획 수립 시에 반영된다. 고장영향 분석 모듈의 흐름도는 Fig. 11 과 같다.

### 4.2.3 정비요청 모듈

정비요청 모듈은 신뢰성 지표 분석 모듈에서 산정한 결과를 이용하여 경고 메시지를 제공한다. 즉 수명이 만료된 부품목록과 그에 관련된 정보를 제공하도록 구성하였다. 또한, 조회된 부품에 대해서는 고장영향분석을 통해 정비 시 우선권을 부여하여 정비계획을 수립할 수 있도록 구성하였다. Fig. 12 와 같이 수립된 정비계획에 대해서는 고장전문가시스템과의 연계를 통해 해당부품에 대한 정비절차를 제공받을 수 있도록 하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 복합구조물의 신뢰성 평가 방법을 소개하고, 이를 가상의 복합구조물에 적용하였다. 또한 수행한 결과를 대표적 신뢰성 평가 규격서인 NSWC 와 MIL-HDBK-217F 에 근거한 신뢰성 지표 분석결과(Relex)와 비교하여 타당성을 검증하고, 이를 바탕으로 K-AGT 시스템의 웹 기반의 고장 예방정비시스템을 설계, 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성 평가를 통해 수명이 만료된 부품의 정비요청 시, 고장영향 분석을 통한 고장현상, 고장원인, 고장영향 등을 현시하여 정비에 고려할 수 있도록 고장 예방정비시스템을 설계, 개발하였다. 신뢰성 기반의 유지보수 시스템은 1 회용으로 구축하는 것이라기보다는 위와 같은 분석 기법을 이용하여 지속적으로 개정되는 과정이다. 성공적인 유지보수 시스템의 구축은 불필요한 정비/검수 횟수를 줄이고, 향후 일어날 고장에 대한 대비를 할 수 있을 것이다. 향후 연구계획으로 상위 부품의 목표 신뢰도 설정에 따른 하위 부품에 신뢰도 분배 최적화 및 비용함수를 고려한 최적의 예방정비주기를 도출하는 연구를 진행하고자 한다. 이러한 연구 및 결과는 향후 운영기관에 정책수립 등에 반영되어 활용될 예정이다.

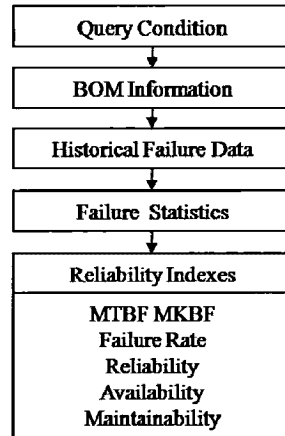


Fig. 10 Flow diagram of Reliability analysis module

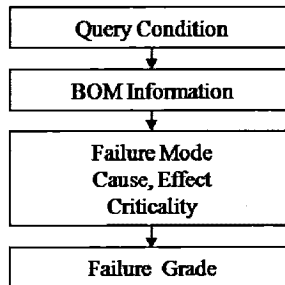


Fig. 11 Flow diagram of FMEA module

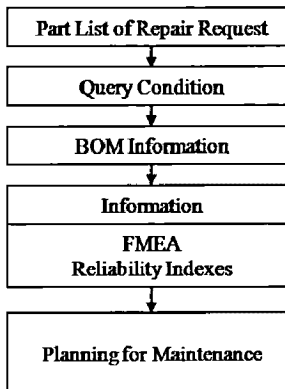


Fig. 12 Flow diagram of Repair request module

## 참고문헌

1. Kim, D. I. and Jeon, G. W., "A Study on Determining the periodic inspection for Anti-Ship Missile by using Reliability Analysis Model," Journal of the Military Operations Research Society of Korea, Vol. 32, No. 2, pp. 92-113, 2006.

2. Jung, H. S., Park, D. H. and Kim, J. J., "Reliability Analysis and Application," Youngchi Press, pp. 1-8, 2000.
3. Moubray, J., "Reliability-centered maintenance," TWI Press, 2000.
4. Darling, S. and Lackey. R., "A Preventive Maintenance Improvement Project at Texas Utilities Comanche Peak," Nuclear Power Plant and Facility Maintenance, pp. 663-671, 1991.
5. Lee, H. Y., Bae, C. H., Kim, K. H. and Suh, M. W., "A Study on Implementation of a BOM Management System Using Component Technique for Maintenance System of Urban Transit," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 29, No. 1, pp. 124-131, 2005.
6. Kim, K. H., Bae, C. H., Lee, H. Y. and Suh, M. W., "A Study on the Standardization of Failure Classification Method for IT Maintenance System of Urban Transit," *Proc. of KSAE Spring Conference*, Vol. 3, pp. 1361-1365, 2004.
7. ReliaSoft Corp., "Reliability Growth & Repairable Systems Data Analysis Reference," ReliaSoft Publishing, pp. 79-100, 2005.
8. Birolini, A., "Reliability Engineering; Theory and Practice," Springer, pp. 160-256, 2003.
9. Kim, J. H., "A Study on the Optimal LCC using AMSAA Model," *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 135-142, 2006.
10. Song, J. Y., Lee, H. S., Jang, J. S., Jung, J. Y. and Ha, S. D., "Failure mode and effects, criticality analysis," Kyowoo Press, pp. 1-62, 2005.
11. Moasoft, "A guide book for reliability prediction," Kyowoo Press, pp. 9-349, 2002