

**한국형경량전철(K-AGT)시스템의 신뢰성 DB
프로그램 개발과 활용**
- Development and Application of Reliability
DB Program for K-AGT system -

한 석 윤 *

Han Seok Youn

하 천 수 *

Ha Chen Soo

이 호 용 *

Lee Ho Yong

홍 순 기 **

Hong Soon Ki

이 우 준***

Yi Woo June

Abstract

Korea Railroad Research Institute developed the driverless rubber-tired Korean-AGT system from 1999 to 2005 and has done its performance and reliability tests on the test line at Gyeongsan-city. We made the reliability management program to control required the RAMS(reliability, availability, maintainability & safety) of the K-AGT system. Therefore, we demonstrated the development and application of Reliability DB program. The main functions of K-AGT Reliability DB program manages failures and maintenance data systematically from the test line through test period and provides various analysis results based on the inputted data.

Keywords : K-AGT(Korean-Automated Guideway Transit), reliability growth analysis, RAMS(reliability, availability, maintainability & safety)

* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단

** 성균관대학교 시스템 경영공학부

*** (주)한국신뢰성기술서비스

2006년 2월 접수 2006년 3월 수정본 접수 2006년 4월 게재 확정

1. 서론

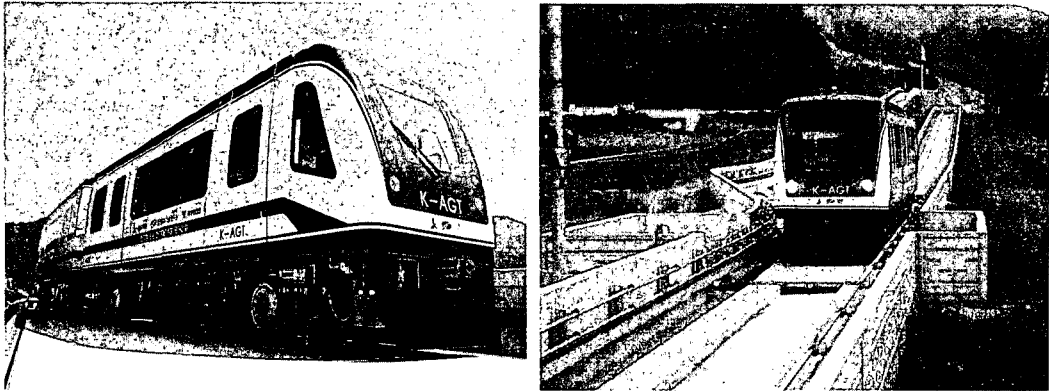
한국철도기술연구원(Korea Railroad Research Institute, 이하 KRRI)은 1999년부터 경량전철시스템기술개발에 착수하였다. 2004년 8월에는 경북 경산시에 국내 최초로 무인운전고무차륜AGT시스템(Korean-Automated Guideway Transit, 이하 K-AGT) 시험선을 건설하였으며 2005년 12월말까지 누적주행거리 30,000km의 신뢰성시험을 수행하였다. 본 시험선은 차량시스템, 전력공급시스템, 신호통신시스템, 선로구축물 등의 하위 시스템들이 유기적으로 결합된 것으로서 종합성능 및 안전성, 신뢰성 시험이 가능하도록 설계되어 있다[1,2].

KRRI에서는 K-AGT 시스템의 RAMS(reliability, availability, maintainability & safety) 관리의 기본이 되는 고장정보를 체계적으로 관리하기 위해 신뢰성 DB 프로그램을 개발하여 활용하고 있다[1,2]. K-AGT의 고장정보체계는 RAMS 관리를 위해 기본적으로 필요한 기능을 중심으로 시스템을 구축하고 ① 시스템 자료 입출력 모듈, ② 고장 및 유지보수자료 입력 모듈, ③ 신뢰성 분석 모듈, ④ 안전성 분석 모듈, ⑤ 보고서 출력 등이 가능하도록 하였다. 따라서 본 논문에서는 개발 시스템의 목표 신뢰성 확보를 위한 개발 프로그램의 구축과정과 이의 활용에 관한 사례를 제시하고자 한다.

2. 고무차륜 K-AGT 시스템

2.1 개요

AGT 시스템은 경량전철의 일종으로서 일반적으로 고가궤도를 전용노선으로 사용하며, 기존 철도와는 달리 고무타이어를 주행륜으로 사용하고 별도의 안내장치 및 분기장치를 가지며, 무인운전으로 운행되는 시스템이다. 고무타이어를 사용하므로 저소음·저진동의 환경친화적인 주행특성을 가지며 급구배·급곡선에 대한 대응성이 우수하여 도심지 노선 또는 신도시 개발지역에 적합하다. 또한 우수한 점착특성으로 가감속도를 향상시킬 수 있지만, 적설과 결빙에 대한 대책이 필요하며, 분기방식이 기존의 철도보다 복잡한 특성이 있다. KRRI에서는 2004년에 경북 경산시에 고무차륜 AGT 시험선을 건설하여 개발시스템에 대한 종합시험평가, 국제 안전인증 평가를 수행하였으며, 기술개발사업의 최종연도인 2005년에는 시스템 신뢰도 및 내구도 평가를 수행하였다. 시험선(test line)은 경북 경산시에 소재한 경부선 폐선구간(삼성역~남성역 부근)에 약 2.4km가 건설되었으며, 정거장은 4개소(검수시설 포함 1개소, 시험용 임시정거장 3개소), 교량은 2개소(본선 30m, 측선 160m), 대피선은 1개소(120m)이다.



<그림 1> 경산 시험선에서 운행 중인 차량시스템

2.2 시험선 고장정보 관리체계

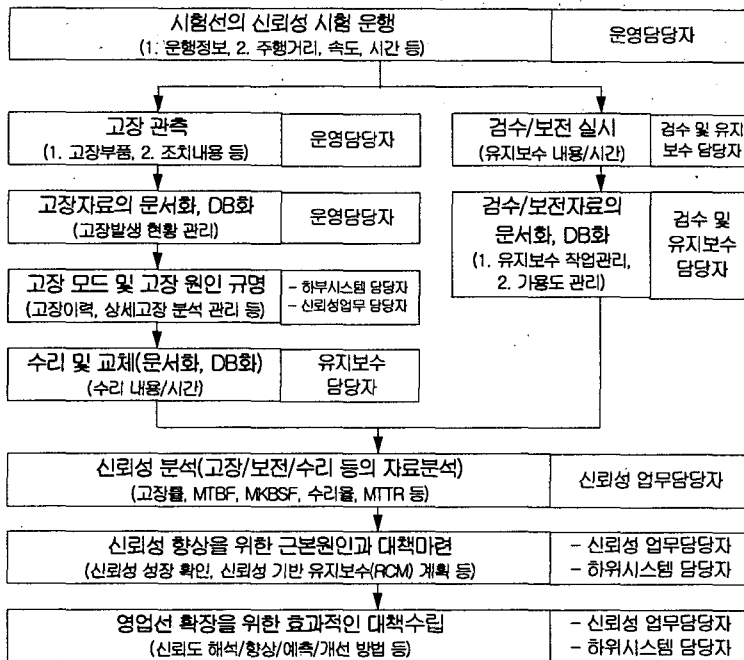
고장정보체계는 시험선의 신뢰성평가 시험 단계에서 고장정보, 원인 분석 대책 수립 및 조치를 취하고 이를 신뢰성 향상 및 보전계획에 반영함으로써 개발된 철도시스템의 신뢰성을 높이고 효과적인 RAM 계획을 수립할 수 있게 한다. 그리고 시험선의 고장정보는 영업선에서 적용이 가능하다.

고장정보체계 실행절차는 다음과 같다.

- (1) 운영담당자는 시험선의 신뢰성 시험을 통해 고장을 관측한다.
- (2) 운영담당자는 관련 고장 및 운행지연 고장자료의 문서화 및 DB화 한다. 이때 신뢰성 업무 담당자에게 고장발생을 통보하고 문서화와 DB화를 실시한다.
- (3) 신뢰성 업무 담당자는 하위 시스템의 담당자와 함께 고장모드와 고장원인을 규명한다.
- (4) 예방검수 담당자는 수리 및 교체, 유지보수 자료의 문서화와 DB화를 담당한다.
- (5) 신뢰성 업무 담당자는 FMEA(failure mode & effect analysis) 등 신뢰성 분석 및 평가 실시 후, 하부시스템 책임자와 함께 고장의 대책을 마련한다.
- (6) 신뢰성 업무 담당자는 영업선에서도 적용이 가능하도록 효과적인 방안을 수립한다.

<그림 2>는 기술개발자 입장에서 고장정보관리를 수행하는 흐름과 담당자를 제시하였다. 시스템 및 제품을 사용하는 도시철도 운영기관의 입장과 시스템 및 제품을 공급하는 기업의 입장에서는 본 연구에서 제시한 신뢰성 관리체계를 참고하여 적용하면 될 것이다. 예를 들면 운영기관의 경우에는 신뢰성을 근원적으로 향상시키기 위해서 기술연구소에 신뢰성관리팀을 구성하고 제품의 발주에서 폐기에 이르는 전 수명주기를 관리하도록 하는 것이 바람직하다. 이때 신뢰성관리팀은 도시철도시스템에 많은 경

힘을 갖고 있는 신뢰성전문가를 책임자로 하고 차량, 전력, 신호통신, 선로 등의 전문가로 구성하되 전체시스템을 통합하여 관리할 수 있도록 하여야 한다. 시스템 및 제품을 공급하는 기업의 경우에는 기존의 품질관리팀과는 별도로 신뢰성보증팀을 구성하여 제품의 설계, 제작, 시험평가, 납품, 사후관리에 이르기까지 신뢰성을 관리하여 목표로 한 신뢰성이 달성될 수 있도록 관리해야 할 것이다.



<그림 2> 고장정보관리를 수행하는 흐름도

3. 신뢰성 DB 프로그램

차량, 전력, 신호, 통신, 선로구축물 등으로 이루어진 대형복합시스템의 신뢰성 관리를 위해서는 운영시에 발생하는 다양한 정보의 문서화 및 DB화 등 이의 관리가 중요하다. 특히 고장정보체계의 기본이 되는 신뢰성 자료의 DB관리를 효율적이면서 체계적으로 관리하기 위해서 신뢰성 DB 프로그램을 개발하였으며 개발한 개별 모듈에 관한 내용은 각 절에 약술하였다. 고무차륜 AGT 시스템의 신뢰성 DB 및 분석 프로그램은 VBA(visual basic application)를 기반으로 4가지 모듈로 나뉘어 개발하였으며 현재 시험선에서 획득되는 고장 및 유지보수 자료를 가지고 신뢰성 분석을 실시하고 있다. 신뢰성 업무 담당자는 정기적으로 분석 프로그램을 가지고, 발생한 고장 및 유지보수 자료를 활용하여 신뢰성 평가를 실시하여, 이를 각 하위 시스템 담당자, 시스템 엔지니어링 관리 책임자에게 보고해야 한다. 또한 신뢰성 관리 책임자는 신뢰성 분석자료, 목표 대비 신뢰성 척도 비교, 이에 따른 보고서 내용을 토대로 적절한 대책을 마련한다.

<표 1> 신뢰성 분석 개발 프로그램 모듈

모듈 구분	개발 내용
경량전철시스템 자료 입·출력 모듈	신뢰성 평가를 위한 가장 기초적이며 중요한 부분이므로 작성시 각 하위시스템의 구성품에 대한 상세한 정보를 기록하여 관리하는 모듈
고장 및 유지보수 자료입력 모듈	시험선 실제 운행 및 유지보수를 실시할 경우에 고장 및 유지보수 보고서의 내용인 고장자료, 검수를 비롯한 유지보수 자료를 입력하고 관리하는 모듈
신뢰성 분석 모듈	고장률, 신뢰도, MTBF, MKBF, 가동거리 및 가동시간, 수리율, MTR, 가용도, 그래프화 등 각 분석대상에 대하여 열거된 신뢰성 척도들을 계산, 보고서 양식으로 출력할 수 있도록 프로그램을 개발하여 적절한 신뢰성 분석이 가능하도록 관리하는 모듈
안전성 분석 모듈	입력된 시스템 구성자료를 토대로 대상항목의 안전성을 정성적, 또는 정량적으로 분석할 수 있도록 관리하는 모듈

본 DB프로그램을 개발하기 위해 전체 시스템 형상 구축은 KRRI의 경량전철기술개발사업 연구결과보고서[2]를 활용하였으며, 신뢰성 및 안전성 분석 모듈의 기초자료분석 지표는 IEC 62278[6]에서 예시하는 척도들을 사용하였다.

3.1 경량전철시스템 자료입력 모듈

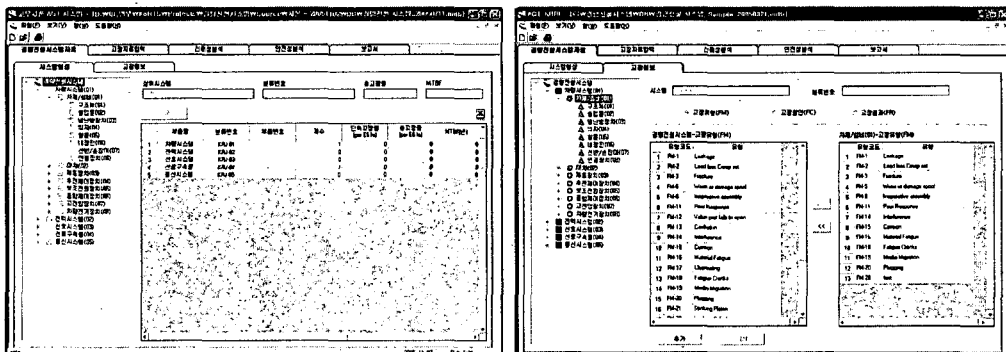
경량전철시스템 자료 모듈은 시스템 형상 탭(Tab)과 고장정보 탭으로 구성되어 있다. 이 탭에서는 고장정보를 입력하기 전에 좌측 부품분류도에서 설정한 품목을 기본으로 하여 해당 부품에 정보를 입력한다.

(1) 시스템 형상 탭

상위시스템, 분류번호, 개수, 총 고장률, MTBF, 자료 서식(spreadsheet) 등의 기초자료를 입력할 수 있도록 구성되어 있다.

(2) 고장정보 탭

경량전철을 운영함에 있어 발생할 수 있는 모든 고장정보를 포함하는 탭으로 시스템 및 LRU(line replaceable unit) 단위까지 각 고장유형, 고장원인, 고장결과 등을 정의하여 개별 고장발생시 이를 입력할 수 있도록 구성되어 있다.



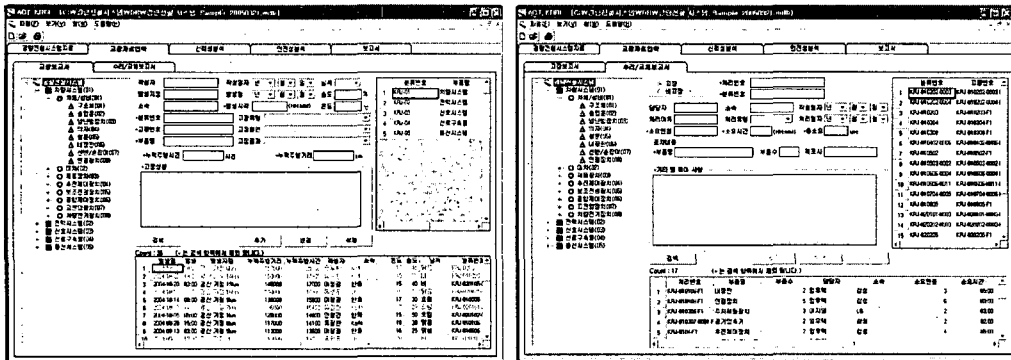
(a) 시스템형상 예

(b) 고장정보 예

<그림 3> 경량전철시스템 자료 모듈 화면 예

3.2 고장자료입력 모듈

발생한 고장 및 수리·교체에 관한 자료를 입력하는 모듈이다. 실제로 고장이 일어난 시스템이나 설비, 부품의 고장내역과 유지보수 내역 등을 상세하게 기록하는 부분이다. 고장자료입력 모듈은 고장보고서와 수리/교체 보고서로 구성되어 있다.

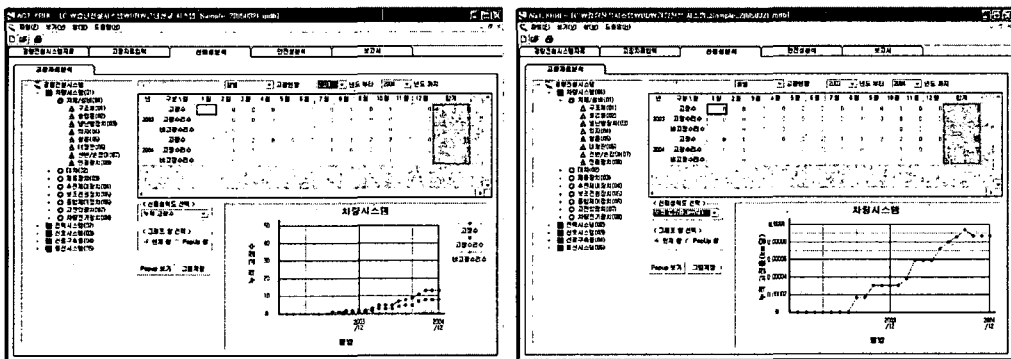


(a) 고장보고서 탭의 구성 (b) 수리/교체 보고서 탭의 구성

<그림 4> 고장자료입력 모듈 화면 예

3.3 신뢰성분석 모듈

<표 2>와 같이 열거된 항목에 대한 결과가 그래프로 도시되도록 구성되어 있다.



(a) 월별 누적고장수에 따른 그래프 예 (b) 월별 누적고장률에 따른 그래프 예

<그림 5> 신뢰성분석 모듈 화면 예

신뢰성 분석기준에 따라 분석할 수 있는 신뢰성 척도의 종류가 조금씩 다른데 그 내용을 다음 <표 2>에 간략하게 나타내었다.

또한 모든 그래프는 월별, 분기별, 연도별, 운행시간별, 운행거리별 등으로 도시할 수 있도록 구성되어 있다.

<표 2> 신뢰성 분석 DB 프로그램에 도시되는 그래프의 종류

구 분	설 명
누적 고장 수	일정기간 동안 경량전철의 설비나 부품의 고장이 일어난 횟수
누적 고장률 (Km 당)	일정기간 동안 경량전철이 운행한 거리에 대한 설비나 부품의 고장횟수 비율
누적 고장률 (시간 당)	일정기간 동안 경량전철이 운행한 시간에 대한 설비나 부품의 고장횟수 비율
누적 신뢰도 (Km 당)	일정기간 동안 경량전철의 운행거리에 대해 고장이 일어나지 않은 비율(신뢰할 만한 정도)
누적 신뢰도 (시간 당)	일정기간 동안 경량전철의 운행시간에 대해 고장이 일어나지 않은 비율(신뢰할 만한 정도)
MTBF (mean time between failures)	일정기간 동안 경량전철 설비나 부품의 고장횟수에 대한 운행시간과의 비율(누적 고장률의 역수)
MKBF(mean kilometers between failures)	일정기간 동안 경량전철 설비나 부품의 고장횟수에 대한 운행거리와의 비율(누적 고장률의 역수)
누적 수리율 (고장시)	일정기간동안 누적 수리시간에 대한 경량전철의 설비나 부품이 고장이 일어난 상태에서 수리가 완료된 시설이나 부품의 비
누적 수리율 (비고장시)	일정기간동안 누적 수리시간에 대한 경량전철의 설비나 부품이 고장이 나지 않은 상태에서 수리가 완료된 시설이나 부품의 비
MTTR (mean time to repair)	일정기간동안 경량전철의 설비나 부품이 수리가 되어 운행할 수 있는 시점에서 그 부품이 다시 수리를 받게 될 때까지의 평균시간
이용률	일정기간동안 경량전철의 설비나 부품이 고장이 일어나 그 설비나 부품이 수리가 되어 다시 작동을 할 수 있게 되는 비율(또는 정도)
고장유형	일정기간 동안 경량전철의 설비나 부품의 고장이 일어난 유형
고장원인	일정기간 동안 경량전철의 설비나 부품의 고장이 일어난 원인
고장결과	일정기간 동안 경량전철의 설비나 부품의 고장이 일어난 결과

3.4 안전성분석 모듈과 보고서 출력 모듈

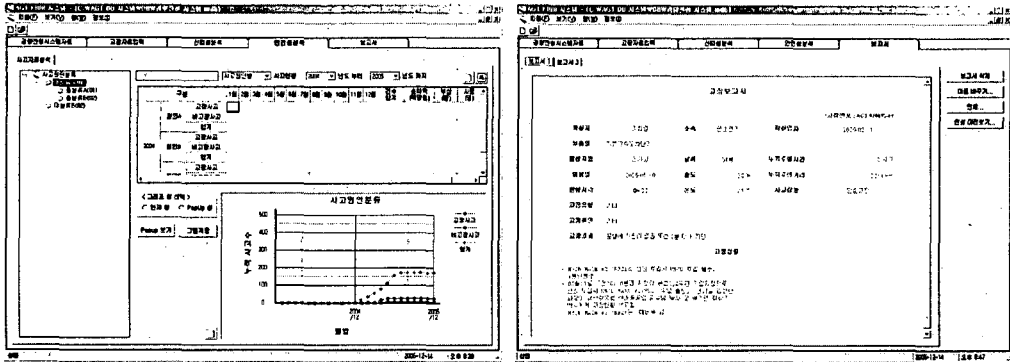
(1) 안전성분석 모듈

사고원인별, 사고결과별 분석을 선택할 수 있다. 사고원인별을 선택하면 사고원인 분류별 분석이 실행되며, 사고결과별을 선택하면 사고결과 분류별 분석이 실행된다.

빈도분석표는 화면 좌측의 시스템 구조에서 선택한 분류의 사고원인 또는 사고결과 코드별 고장사고, 비고장사고, 합계 등의 월별 건수와 손해액, 부상수, 사망수를 분석한 표가 서식(spreadsheet)에 나타난다. 그래프는 선택한 분류의 사고원인 또는 사고결과 코드별 고장사고, 비고장사고, 합계 등의 월별 누적건수가 그래프로 도시된다.

(2) 보고서출력 모듈

보고서출력은 고장자료입력 및 신뢰성분석, 안전성분석 모듈에서 생성한 내용을 보고서에 출력하는 양식으로 구성되어 있으며, 그 예는 다음 <그림 6>과 같다.



(a) 안전성분석 화면 예 (b) 보고서 출력 화면 예
 <그림 6> 안전성분석 모듈과 보고서 출력 모듈 화면 예

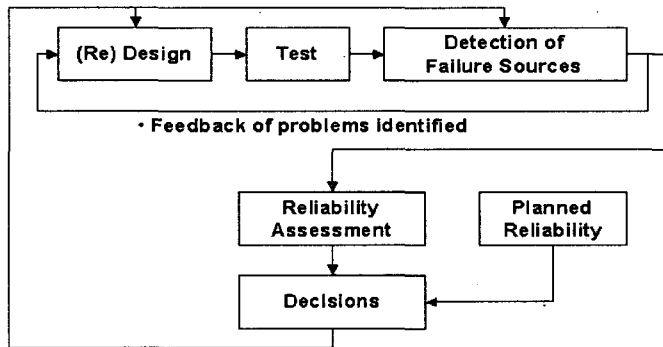
4. 신뢰성 DB 프로그램 적용

4.1 개요

3장에서 설명한 신뢰성 DB 프로그램은 신뢰성분석을 위한 기초자료의 체계적인 정리와 도시가 가능하여 시험선 운영자 및 관리자에게 기본적인 정보를 알 수 있게 한다. 따라서 이러한 기초자료를 활용하여 K-AGT시스템의 신뢰성 향상정도를 파악하고 개선하기 위해 신뢰성 성장 분석을 실시한다.

신뢰성 성장 분석은 신뢰성 DB 프로그램에 입력된 고장정보를 ReliaSoft RGA 프로그램을 활용하여 분석하였다.

먼저 2005년 12월까지 신뢰성 DB 프로그램 내의 고장보고서 탭에 입력된 고장자료를 정리한 후, 이를 RGA 프로그램을 이용하여 단순하면서 활용도가 높은 두 가지 성장모형인 Duane 모형과 AMSAA 모형에 적합여부를 검정한 후, 신뢰성 성장분석을 실시하였다[3,9,10]. <그림 7>은 신뢰성 성장 관리를 위한 기본 절차이다[4,5,6,7,8].



<그림 7> 신뢰성 성장 관리 기본 절차

4.2 K-AGT 신뢰성 성장 해석

차량, 전력, 신호, 통신, 선로구축물 등으로 구성된 대형복합시스템인 K-AGT 시스템의 초기 MKBF를 설정하기 위해 5,000km를 운행을 하여 설정하였다. 시험운행 한 결과 초기 MKBF는 217.39km이었다.

시스템의 MKBF 향상 또는 고장률 감소를 위해서 보고되는 모든 고장에 대하여 FMEA를 실시하여 발견된 문제점을 해결하여 신뢰성 개선 및 향상 활동을 지속적으로 수행하였다.

<그림 8>에는 발생된 고장 문제의 개선을 위한 FMEA 작성 예를 나타내고 있다.

경량전철시스템 시험선 FMEA

시스템명	연호 구축명	FMEA No.	20040616							
도심차(GEM, 공교차 포함)	Posco 2호 태우 구간	Page	1 of 5							
FMEA 관리 점	김승현(주) 김 정규	제시/작성 일자	2004. 6. 15. / 2005. 5. 5							
목적 / 기준	고장모드	고장영향	추정원인	고장방지방법	평가			대책	소재	
					중요도	발생도	감소도			
기대치(AS)에 충당할 정도로 교차 구조화/구간 유지 관리한다	· 결이탈된 공기열스택과 신호추진장치 전도케이스상 유지불량	· 동력 및 공기 관절의 불량으로 진동, 충격 발생함	· 설계상 소용 외관에 불량이 발생하여 유공정 불량이다. 공조로에기 부적절한 구조로로 원인의 발생함.	1. 설계 원인 대응 2. 발생 원인 대응 3. 발생 원인 대응 4. 발생 원인 대응 5. 발생 원인 대응 6. 발생 원인 대응	10	1	5	50	1. 결이탈된 동력 장치 2. 결이탈 Insulator 3. 결이탈 동력 장치 4. 결이탈 동력 장치 5. 결이탈 동력 장치	10

<그림 8> 경량전철시스템 시험선 FMEA 예

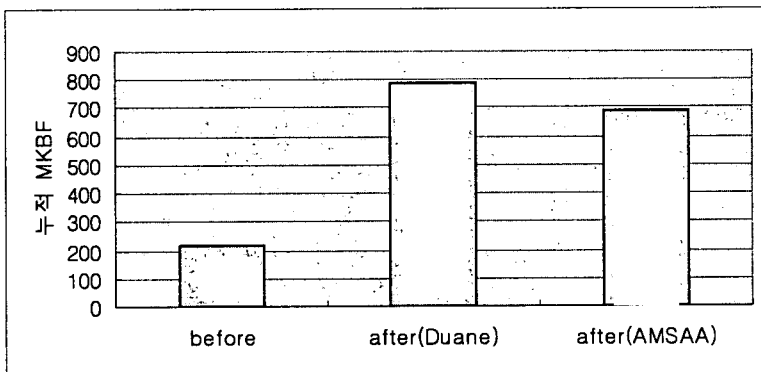
초기 MKBF를 도출하기 위한 5,000km 주행운행 추가하여 20,000km를 시험하여 Duane과 AMSAA 모형을 적합시켜 신뢰성 성장 분석을 실시하였다. 여기서, 초기 누적 MKBF가 분석시점에서 얼마나 성장이 이루어졌는지를 나타내는 지표로서 RIE(reliability improvement effectiveness)를 식 (1)과 같이 정의하여 계산하였다. 여기서 $RIE \leq 1$ 이면 성장이 없고, $RIE > 1$ 이면 신뢰성 성장이 있다.

$$RIE = \frac{MKBF_{c(\text{분석시점})} - MKBF_{c(\text{초기})}}{MKBF_{c(\text{초기})}} \quad (1)$$

<표 3> Duane 및 NHPP 모형 추정 결과

구 분	Duane 모형	NHPP(AMSAA) 모형
추정식	$\widehat{MKBF}_c = 7.3891 T^{0.47151}$	$\widehat{MKBF}_c = \frac{1}{0.0362} T^{1-0.6750}$
성장률	0.47151	0.3250
20,000km에서의 순간 및 누적 MKBF	$MKBF_{c(20000)} = 788.08km$ $MKBF_{i(20000)} = 1,491.19km$	$MKBF_{c(20000)} = 690.44km$ $MKBF_{i(20000)} = 1,022.87km$
RIE(20,000km)	2.62	2.18

고장에 대해 FMEA업무를 통하여 고장원인을 파악하고 개선 활동 후, 20,000km 시험 결과 <그림 9>과 같이 시스템 누적 MKBF가 217.39km에서 Duane 모형에서는 788.08km로 3.6배정도 증가하였고, AMSAA모형에서는 690.44km로 3.18배정도 증가하였다.



<그림 9> 누적 MKBF 비교

5. 결 론

K-AGT의 고장정보 분석, 관리를 위해 신뢰성 분석 DB 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 경산 시험선에서 K-AGT의 고장정보를 관리하고 분석하였다. 발생한 고장에 대해서는 FMEA 분석을 실시하고, 문제점을 개선하였으며 신뢰성 향상의 정도를 파악하기 위해 신뢰성 성장분석을 실시하였다.

예비주행 5,000km 후에 신뢰성 성장 활동을 실시한 결과 전체시스템의 신뢰성이 성장하고 있음을 확인할 수 있었다.

KRRI에서는 K-AGT의 신뢰성과 안전성을 향상하기 위해 지속적으로 종합시험을 수행할 예정이다. 시험선에서 확보된 각 종 시험자료는 K-AGT가 영업선에서 운행될 때 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] 한석윤, 김종걸, 홍순기, 하천수, “고무차륜 AGT 차량시스템의 신뢰성관리체계 개발”, *안전경영과학회지*, Vol. 6, No. 4, (2004) : 139~153.
- [2] 한국철도기술연구원, *경량전철기술개발사업 1차년도~7차년도 종합시스템 엔지니어링 결과보고서*, (1999~2005)
- [3] 이호용, 한석윤, 이안호, 하천수, “한국형경량전철시스템(K-AGT) 신뢰성 성장 평가에 관한 연구”, *한국철도학회지*, Vol. 8, No. 6, (2005) : 597~601.
- [4] 이현우, 김재주, 박성현, “와이블과정을 응용한 신뢰성 성장 모형에서의 MTBF 추정”, *품질경영학회지*, Vol. 26, No. 3, (1998) : 71~81.
- [5] 정원, 김준홍, 유왕진, “A Classification and Selection of Reliability Growth Models”, *품질경영학회지*, Vol. 31, No. 1, (2003) : 11~20.
- [6] IEC, *IEC 62278 : Railway application - Specification and demonstration of RAMS*, (2002)
- [7] KS A IEC 61014, *신뢰성 성장 프로그램*, 산업표준협회, (2004)
- [8] MIL-HDBK-189, *Reliability Growth Management*, (1981)
- [9] ReliaSoft, *ReliaSoft's RGA 6 : Reliability Growth & Repairable Systems Data Analysis Reference*, (2004) : 21~160.
- [10] ReliaSoft, *ReliaSoft's RGA 6 : User's Guide*, (2004) : 13~23, 139~170.

저 자 소 개

한 석 윤 : 현재 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단장으로 재직 중이며, 성균관대학교에서 산업공학박사 학위를 취득하였으며, 주요 관심분야는 철도 신뢰성 및 기술경영 등이다.

하 천 수 : 현재 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 Post-Doc.로 재직 중이며 동아대학교에서 산업공학박사 학위를 취득하였으며, 주요 관심분야는 신뢰성 공학, 철도 RAMS 등이다.

이 호 용 : 현재 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원으로 재직 중이며 성균관대학교에서 기계공학박사 학위를 취득하였으며, 주요 관심분야는 철도 신뢰성 등이다.

홍 순 기 : 현재 성균관대학교 시스템경영공학부 교수로 재직 중이며 Univ. Col. of Swansea(영국)에서 박사학위를 취득하였으며, 주요 관심분야는 기술경영, 기술예측, 기술경제 등이다.

이 우 준 : 현재 (주)한국신뢰성기술서비스 대표로 재직 중이며 Univ. of Wisconsin-Madison에서 박사학위를 취득하였으며, 주요 관심분야는 신뢰성, 품질관리, 리스크분석 등이다.