

# 마코프 체인을 이용한 고무차륜 AGT 차량 시스템의 신뢰성 평가

## Reliability Evaluation of AGT Vehicle System Using Markov Chains

하천수\*                                  한석윤\*\*  
Ha, Chen-Soo                              Han, Seok-Youn

### ABSTRACT

In this paper, we present reliability modeling and analysis method of the Automated Guideway Transit(AGT) vehicle system using analytical models, based on Markov Chains. The Markov model can express state transition of the AGT vehicle sys. that is considered to be in one of four states, such as basic operating(0), minor delay(1), major delay(2) and non-operating(3) state.

The proposed Markov model is illustrated with a numerical example and cases to find a steady state availability, MTBF(mean time between failures), and MTTR(mean time to repair) under specified failure and repair rate are demonstrated.

### 1. 서론

국내 최초로 한국철도기술연구원에서 개발된 고무차륜 AGT 차량시스템은 매우 복잡한 구조를 가진 대형시스템으로서 기존 철도차량 시스템과는 다른 부인운전과 자동운전에 따른 신뢰성과 안전성의 확보가 중요하며 이를 정량적으로 평가할 수 있는 신뢰성 관리체계의 구축이 필요하다.

차량의 운행시 고객의 입장에서는 목적지까지 정해진 시간내에 안전하게 도착하는 것을 목적으로 하는데, 이를 서비스 품질(service quality)이라고 정의할 수 있다[2]. 이러한 서비스 품질을 최대화하기 위해서는 무엇보다도 개발단계에서 설정된 목표이상의 신뢰도, 보전도, 가용도(이하 RAM) 등의 신뢰성 척도들이 체계적으로 관리되어야만 한다. 본 연구에서는 차량시스템의 서비스 품질을 기준으로 운행상태를 구분하여 이를 적절하게 모형화하여 분석하고자 하며 또한 서비스 품질을 최대화하기 위하여 RAM의 필요성과 중요성을 설명하고자 한다.

먼저 고무차륜 AGT 차량시스템이 4가지 운행상태를 갖는 Markov 모형으로 정의하여 신뢰도와 가용도를 계산하는 방법을 제시하고 다양한 입력자료에 대한 수치예를 통하여 설명하고자 한다.

### 2. 국내외 연구동향

철도시스템과 같이, 복잡하고 동적인 종속(dynamic dependency)관계의 다양한 설비와 하위 시스템으로 이루어진 복합시스템의 경우에는 신뢰성 및 안전성 평가시 기존의 ET(event tree)/FT(fault tree)의 분석방법을 적용하기가 어렵다. 따라서 이런 점을 해결하기 위해서 <표 1>과 같은 네트워크 모형을 이용한 접근법이 연구되고 있다[3].

\* 한국철도기술연구원 정량진공연구원, 공학박사  
\*\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단장, 정회원

표 1. 시스템의 신뢰도 계산을 위해 이용되는 네트워크 모형

네트워크 모형	내 용
The Markov model	전체 시스템의 상태 전이를 표현할 수 있으나 개별 부품단위의 논리적 조합을 명확하게 표현할 수는 없는 모형[특히 신뢰성 평가시, 정의된 상태전이 값(고장률, 수리율 등)을 이용, 정상상태(steady state)의 신뢰도 및 가용도 등 계산에 활용]
The Bayes network	조건부 확률을 이용하여 요소들의 상태 전이와 논리적 조합을 표현. Bayes 이론에 의하여 전체 시스템의 신뢰도를 계산.
Influence diagram	조건부 확률에 의해 요소들의 영향 관계를 표현.
Petri-net	시스템의 동기화된 이동을 표현하는 기능.
Digraph matrix	시스템의 연결관계와 연속적인 구성에 일치해 종결.
GO-FLOW	"신호의 흐름"의 일반적 사고에 기초한, 상태 변화시간을 표현할 수 있음.

### 3. 시험선 차량시스템의 Markov Chain 적용

고장과 수리시간의 밀도함수가 지수분포를 따른다면 즉, 일정한 고장률( $\lambda$ )이나 보전율( $\mu$ )을 갖는다면 Markov 모형을 설정할 수가 있다[1]. 다음 <표 2>에는 고장 및 수리시간이 지수분포일 경우 분석대상 시스템의 신뢰도와 보전도의 관계를 간단하게 정리하였다[1,4].

표 2. 신뢰도와 보전도의 관계(지수분포일 경우)

구 분	신뢰도(reliability)	보전도(maintainability)
누적분포함수	신뢰도 함수 : $R(t) = e^{-\lambda t}$	$1 - M(t)$
	불신뢰도 함수 : $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	보전도함수 : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$
	고장상태에 있는 확률, 고장나기 쉬운 정도	정상상태로 돌아올 확률, 수리하기 쉬운 정도
확률밀도함수	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$	$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \mu e^{-\mu t}$
비율(시간당)	고장률 : $h(t) = f(t)/R(t) (= \lambda)$	수리율 : $\mu(t) = m(t)/(1 - M(t)) (= \mu)$
평균시간	$MTBF(MTTF) = 1/\lambda$	$MTTR = 1/\mu$

#### 3.1 운행고장의 정의와 Markov 모형

다음 <표 3>에는 시험선 차량시스템의 운행시 가능한 운행고장을 간략하게 정의한 예이다.

표 3. 운행고장 구분과 세부 정의

상태정의와 운행고장 구분	운행상의 영향	비고 & 기호
State 3 : Significant	운행할 수 없는	운행정지 or 30분 이상 지연(SF)
State 2 : Major	중대한 지연	10분~30분 이내 지연(MAF)
State 1 : Minor	경미한 지연	2분~10분 이내 지연(MIF)
State 0 : Negligible	정상 운행	정상운행 or 2분 이내 지연(NF)
◎ 상임운진의 경우 10분이상 지연시 구원운진을 시행한다.		

<그림 1>은 [상태 0(정상운행)]시에는 [상태 1, 2, 3]으로 전이가 모두 가능하고, [상태 1(경미한 지연)]에서는 긴급조치로 정상상태인 [상태 0]으로 돌아가거나, 복구가 늦어져서 [상태 2(중대한 지연)]로 전이가 될 수 있다. 또한 [상태 2]에서는 수리가 되면 정상상태로 돌아가거나, 복구가

낮아져서 [상태 3(운행정지)]로 전이가 발생할 수 있다. 마지막으로 [상태 3]에서 수리가 완료되면 정상상태로 전이되거나, 계속해서 운행정지 상태에 머물 수 있다. <그림 1 (b)>는 [상태 1]에서 복구가 늦어져 [상태 3]으로 전이될 수 있는 경우가 추가되어 있다.

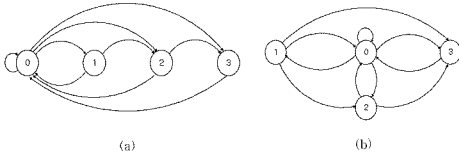


그림 1. 고부차량 AGT 차량시스템의 운행고장 단계에 따른 Markov Chain

### 3.2 Markov 분석을 이용한 신뢰도 계산

본 절에서는 정의된 운행고장을 기준으로 Markov 분석을 실시하여 차량시스템의 신뢰도 및 가용도를 계산하는 절차를 유도한다. 본 연구에서는 상태 0(정상운행)과 상태 1(경미한 지연)의 두 경우에 있어서 차량시스템 성능이 발휘한다고 가정하여 신뢰도 및 가용도를 구한다(즉, 상태 2와 상태 3일 경우를 고장이라고 가정). 또한 도출하고자 하는 해의 계산과정을 설명할 때에는 계산의 편의성을 위해서 3.1절 <그림 1 (a)>의 경우에 대하여 유도하며, 상용 소프트웨어(Relex)를 적용하는 4절에서는 좀 더 복잡한 <그림 1 (b)>의 경우를 모형화하여 분석한다.

#### 기호 및 가정

$\pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3)$ , 정상상태(steady state) 확률벡터(단,  $\pi_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P^{(n)}$ )

$P_i(t)$  : 상태  $i$ 에 있을 확률,  $P'_i(t) = \frac{dP_i(t)}{dt}$  (  $\frac{dP'_i(t)}{dt}$  : 상태  $i$ 의 유입률-유출률 )

$\lambda_j$  : 상태  $i$ 에서 상태  $j$ 로 전이되는 고장률(단,  $10\lambda_{01} = 5\lambda_{02} = \lambda_{03} = \lambda_{12} = \lambda_{23} = \lambda$  가정)

$\mu_j$  : 상태  $i$ 에서 정상상태로 전이되는 수리율(단,  $\mu_1 = 5\mu_2 = 10\mu_3 = \mu$  가정)

단, 고장률, 수리율에 고려한 가중치는 경미한 지연이 중대한 지연보다, 또한 중대한 지연이 운행정지 보다 발생빈도가 크다고 본 연구에서 임의로 가정한 사항이므로 운영시에는 고장 및 수리 자료를 획득하여 각각의 고장률과 수리율을 반영하여 신뢰성 분석을 실시할 것이다.

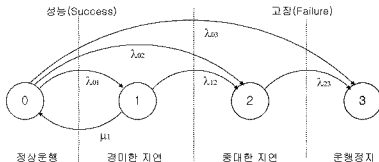


그림 2. 신뢰도 계산을 위한 운행상태의 Markov 모형

<그림 2> Markov 모형의 신뢰도 계산을 위한 Markov 방정식을 구하면 다음 식 (3.1)과 같다. 식 (3.1)의 방정식과 초기조건들을 이용하여 차량시스템의 신뢰도를 다음 식 (3.2)와 같이 구할 수 있으며, 본 연구에서 정의한 것과 같이 상태 0, 1의 경우가 차량시스템의 신뢰도가 된다.

$$\begin{cases} P_0'(t) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})P_0(t) + \mu_1 P_1(t) \\ P_1'(t) = \lambda_{01}P_0(t) - (\lambda_{12} + \mu_1)P_1(t) \\ P_2'(t) = \lambda_{02}P_0(t) + \lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{23}P_2(t) \\ P_3'(t) = \lambda_{03}P_0(t) + \lambda_{23}P_2(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

단,  $\sum P_i(t) = 1$ , 초기조건  $P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = 0$ .

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) \quad (3.2)$$

### 3.3 Markov 분석을 이용한 가용도 계산

신뢰도 분석할 때와 유사하게 가용도 계산을 위한 Markov 모형은 다음 <그림 3>과 같이 표현할 수 있으며, 식 (3.3)은 가용도 계산에 필요한 Markov 방정식이다.

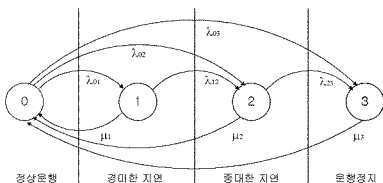


그림 3. 가용도 계산을 위한 운행상태의 Markov 모형

$$\begin{cases} P_0'(t) = -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \mu_3 P_3(t) \\ P_1'(t) = \lambda_{01}P_0(t) - (\lambda_{12} + \mu_1)P_1(t) \\ P_2'(t) = \lambda_{02}P_0(t) + \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{23} + \mu_2)P_2(t) \\ P_3'(t) = \lambda_{03}P_0(t) + \lambda_{23}P_2(t) - \mu_3 P_3(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

단,  $\sum P_i(t) = 1$ , 초기조건  $P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = 0$ .

식 (3.3)의 방정식과 초기조건을 이용하여 차량시스템의 가용도를 다음 식 (3.4)와 같이 구할 수 있으며, 본 연구에서 정의한 것과 같이 상태 0, 1의 경우가 차량시스템의 (순간)가용도가 된다.

$$A(t) = P_0(t) + P_1(t) \quad (3.4)$$

(순간)가용도  $A(t)$ 와 신뢰도  $R(t)$ 의 중요한 차이점은 정상상태(steady state)의 차이에 있다. 즉, 시간  $t$ 가 커짐에 따라  $R(t) \rightarrow 0$ 이 되나  $A(t)$ 는 어떤 일정한 정상치에 수렴하게 된다.

그리고 정상상태의 가용도  $A(\infty)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다. 정상상태에서는 "유입률=유출률"이 없으므로 즉,  $P_i'(t) = 0$ 가 되며 다음 식 (3.5)의 방정식의 해를 구하면 된다. 식 (3.5)의 해를 구한 정상상태의 가용도는 다음 식 (3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})P_0(\infty) + \mu_1P_1(\infty) + \mu_2P_2(\infty) + \mu_3P_3(\infty) \\ 0 = \lambda_{01}P_0(\infty) - (\lambda_{12} + \mu_1)P_1(\infty) \\ 0 = \lambda_{02}P_0(\infty) + \lambda_{12}P_1(\infty) - (\lambda_{23} + \mu_2)P_2(\infty) \\ 0 = \lambda_{03}P_0(\infty) + \lambda_{23}P_2(\infty) - \mu_3P_3(\infty) \end{cases} \quad (3.5)$$

단,  $\sum P_i(\infty) = 1$

$$A(\infty) = P_0(\infty) + P_1(\infty) = \frac{\mu}{\mu + 16\lambda} \left( 1 + \frac{10\lambda}{\lambda + \mu} \right) \quad (3.6)$$

이와 같이 3절에서 제시된 유도과정을 이용하여 Markov 분석을 실시할 수 있으며, 4절에서는 상용 소프트웨어를 활용하여 해를 구하며, 도출된 결과를 이용한 신뢰성 평가를 실시하고자 한다.

#### 4. Relex를 이용한 수치실험

##### 4.1 입력 및 출력 자료

차량시스템은 25년의 내용연수를 갖고 운행정지와 같은 중대한 고장이 150,000km에 한번 발생하도록 목표를 설정하여 개발되었다. 즉, MKBF(mean kilometer between failures)가 150,000km이므로 MTBF(mean time between failures)은 표정속도 30km/h를 고려하여 5,000시간(즉, 150,000km/30 km/h)이 된다. 따라서 고장률은  $\lambda = 0.0002 (= 1/5,000\text{시간})$ 으로 정의할 수 있다. 그리고 현 시험선에는 차량을 정기적으로 검수할 수 있는 전용 검수고를 구축하고 있으며 차량시스템의 부품관리단위는 LRU(line repairable unit)로 관리하고 있으므로 기존 자동차 시스템의 수리시간 보다는 상당히 시간을 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 총 운행시간은 5,000시간으로 하여 목표 신뢰도에 따른 고장률을 3가지, 수리시간에 따른 수리율을 5가지로 구분하여 분석을 실시하였다.

##### 4.2 정상상태의 가용도, MTBF, MTTR 계산

<그림 4>는 Relex 상용 소프트웨어에서 작성한 Markov 모형의 예로서 고장률이 0.0002와 수리시간이 1시간일 경우를 도시하고 있다. 고장률과 수리율의 다양한 입력값에 대하여 Relex 프로그램을 실행하였으며, 이에 대한 정상상태에서의 가용도, MTBF, MTTR 등의 출력결과는 다음 <표 4>에 정리하였다. <그림 5>는 결과 중에서 수리시간에 대한 가용도를 각 목표 신뢰도로 구분하여 나타낸 그림으로써 수리시간이 가용도에 중요한 요인임을 파악할 수 있다.

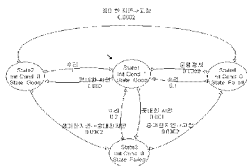


그림 4. 고장률이 0.0002와 수리시간이 1H일 경우의 Markov 모형

표 4. Relex 분석결과

수리 시간 ( $\mu$ )	목표 신뢰도 고장률 ( $\lambda$ )	120,000km	135,000km	150,000km
		MTBF=4,000h $\lambda=0.00025$	MTBF=4,500h $\lambda=0.00022$	MTBF=5,000h $\lambda=0.00020$
1.0H	가용도	0.991330	0.992313	0.993062
	MTBF(h)	679.916372	758.133392	839.58309
	MTTR(h)	5.833833	5.827636	5.833749
1.5H	가용도	0.987053	0.988517	0.989616
	MTBF(h)	676.041000	761.250747	842.707799
	MTTR(h)	8.751198	8.741680	8.730965
2.0H	가용도	0.982819	0.984751	0.986205
	MTBF(h)	679.163463	764.386163	845.832393
	MTTR(h)	11.668742	11.660906	11.668328
2.5H	가용도	0.978821	0.981016	0.982819
	MTBF(h)	682.289835	767.512445	848.936866
	MTTR(h)	14.580673	14.570390	14.585977
3.0H	가용도	0.974461	0.977311	0.979458
	MTBF(h)	685.414069	770.638613	852.081246
	MTTR(h)	17.504651	17.485290	17.503620

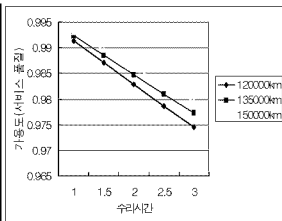


그림 5. 수리시간에 따른 가용도 도서

<표 4>의 결과를 요약하면, 목표 신뢰도가 높을수록( $\lambda$ 가 낮을수록), ① 가용도(서비스 품질)가 증가하고, ② MTBF가 크게 증가하고, ③ MTTR은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그리고 수리 시간이 짧수록( $\mu$ 가 낮을수록), ① 가용도는 감소하고, ② MTBF는 조금 증가하고, ③ MTTR은 크게 증가함을 알 수 있다. 그리고 가용도는 목표 신뢰도도 중요한 요인이지만 고장발생시 수리시간(수리율)에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 시험선에서는 목표 신뢰성을 달성할 수 있도록 지속적인 신뢰성 향상 및 유지보수에 크게 중점을 두고 관리해야함을 알 수 있다.

## 5. 결론

국내 최초로 개발되어 영업선으로의 상용화를 원선로 앞둔 고부차량 AGT 차량시스템의 서비스 품질을 최대화하기 위해서 목표이상의 RAM(신뢰성, 가용성, 보전성)등의 신뢰성 관리가 필요하므로 본 연구에서는 차량시스템의 서비스 품질을 기준으로 4가지 운영상태로 구분하여 이를 적절하게 Markov 모형화하여 신뢰도와 가용도를 계산할 수 있는 절차를 설명하였다. 또한 다양한 고장률과 수리율을 입력하여 차량시스템의 가용도, MTBF, MTTR를 구하여 서비스 품질을 최대화 할 수 있도록 지속적인 신뢰성 향상 및 유지보수 등에 중점을 두고 관리해야 함을 설명하였다.

향후에는 가정한 요인들의 타당성을 확인할 수 있도록 실제 자료를 이용한 추가분석과 목표 서비스 품질을 달성하기 위해 지속적인 신뢰성 향상 및 개선 활동, 그리고 경제성 측면에서 비용을 고려한 최적 예방보전 및 신뢰성 중심의 유지보수 등의 신뢰성 관리제계에 관한 연구가 요망된다.

## 참고문헌

- [1] 박경수(2000), "신뢰도 및 보전공학", 영진문화사.
- [2] P. Dersin, and J. Durand(1995), "Mass-Transit System Service Quality : Tradeoff Analysis On Reliability, Maintainability And Logistics," Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.515~528.
- [3] H. Fukuoka(2002), "Reliability Evaluation Method for the Railway System : A Model for Complicated Dependency," QR of RTRI, Vol. 43, No. 4, pp.192~196.
- [4] S.M. Ross(1993), "Introduction to Probability Models", 5th Edition, Academic Press.