

철도차량의 주기적 교환품의 교환주기 결정에 관한 사례 연구

A case study on determining the replacement interval for the component in the rolling stock

김종운*
Kim, Jong-Woon

박준서**
Park, Jun-Seo

신백철***
Shin, Baek-Chul

김재훈***
Kim, Jaehoon

ABSTRACT

This article deals with a case study on determining the replacement interval for the extraction motor in KTX. The reliability is analysed with the field data from 42 months. The effect of the replacement interval on service reliability, availability, safety and lifecycle cost are evaluated through simulation which is done by the commercial tool, Availability Workbench AvSim Module. As the results of the analyses, a new replacement interval is presented to reduce the lifecycle cost while service reliability, safety and availability are satisfactory.

1. 서 론

시간이 경과함에 따라 고장이 증가할 것으로 예상되는 구성품 중 일부분에 대해 제작사는 주기적으로 교환할 것을 권고하고 그 교환주기를 제시한다. 교환은 그림 1과 같이 고장률이 시간이 경과함에 따라 증가할 때 지정된 최대 연령 한계에서 아이টে에 대해 예방정비를 수행하므로 아이테의 고장률을 $\lambda(T^*)$ 이하가 되도록 한다. 그러나 교환은 예방정비비용을 증가시키고, 장치의 가용도에 악 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 요인들을 종합적으로 고려하여 교환주기를 결정하여야 한다. 김종운 등[1]은 교환과 고정시간 업무의 주기를 결정하기 위한 개념적 모형을 제안하였다. 본 연구에서는 김종운 등에 의해 제시된 개념적 모형을 바탕으로 고속철도차량의 공조장치 배기모터의 교환주기 결정 사례를 다룬다.

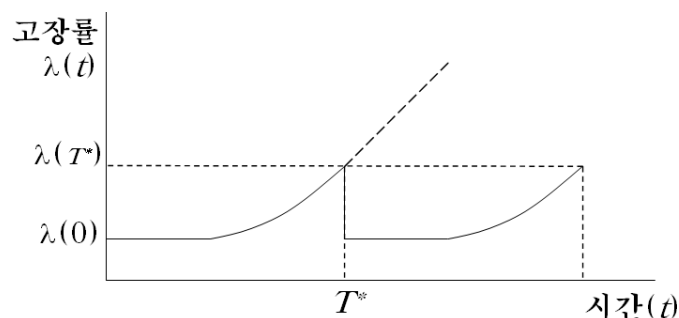


그림 1 교환 후 고장률의 감소 (T^* : 교환주기)

* 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부, 회원

E-mail : jong@krri.re.kr

TEL : (031)460-5222 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원

*** KORAIL, 수도권철도차량관리단

**** 한국철도기술연구원

공조장치의 배기모터는 차량 제작사에 24개월의 주기로 교환할 것을 권고하였다. 본 연구에서는 현재까지 발생한 배기모터의 고장데이터를 바탕으로 배기모터의 신뢰성을 분석하고 교환주기의 조정 가능성을 살펴본다.

2. 본 문

2.1 배기모터의 신뢰성 분석

2004년 4월1일부터 2007년 10월20일까지의 배기모터의 고장이력은 표 1과 같다. 표 1은 운영기관의 정보보호를 위하여 실제 고장 주행일자를 변경하여 제시된 값이다. 본 연구에서는 이 데이터에 의해 배기모터의 신뢰성을 분석한다. KTX 전체 편성에는 해당 타입의 배기모터가 368개가 장착되어 있어서 신뢰성 분석에는 표 1의 고장데이터 외에 관측중단데이터도 함께 사용되었다.

표 2 배기모터의 고장이력

번호	주행시간(일)	고장원인	번호	주행시간(일)	고장원인
1	161	H/W 고유결함	23	620	H/W 고유결함
2	279	H/W 고유결함	24	628	H/W 고유결함
3	337	H/W 고유결함	25	628	H/W 고유결함
4	337	H/W 고유결함	26	631	H/W 고유결함
5	337	H/W 고유결함	27	631	H/W 고유결함
6	352	H/W 고유결함	28	638	H/W 고유결함
7	352	H/W 고유결함	29	674	H/W 고유결함
8	366	H/W 고유결함	30	693	H/W 고유결함
9	370	H/W 고유결함	31	701	H/W 고유결함
10	485	H/W 고유결함	32	746	H/W 고유결함
11	490	H/W 고유결함	33	751	H/W 고유결함
12	491	H/W 고유결함	34	844	H/W 고유결함
13	492	H/W 고유결함	35	871	H/W 고유결함
14	492	H/W 고유결함	36	900	H/W 고유결함
15	520	H/W 고유결함	37	1102	H/W 고유결함
16	536	H/W 고유결함	38	1205	H/W 고유결함
17	540	H/W 고유결함	39	1206	H/W 고유결함
18	540	H/W 고유결함	40	1212	H/W 고유결함
19	546	H/W 고유결함	41	1406	H/W 고유결함
20	597	H/W 고유결함	42	1416	H/W 고유결함
21	597	H/W 고유결함	43	1419	H/W 고유결함
22	597	H/W 고유결함			

2.1.1 적합도 검증

배기모터의 고장 데이터를 바탕으로 와이블분포, 대수정규분포, 지수분포, 대수로지스틱분포 모형을 대상으로 적합도 검증을 수행하였다. 적합도 검증 결과는 그림 2 및 표 2과 같다. 총 데이터 중에 43개의 데이터만이 완전데이터이기 때문에 적합도 검증의 변별력이 높지 않아서 Anderson Darling 통계량은 모든 분포에 대해 동일한 값이 나왔다. 그러나 최소자승법에 의한 상관계수 값을 비교해볼 때 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 판단된다. 이에 의해 본 연구에서는 대수정규분포를 배기모터의 고장을 설명하는 모형으로 선정하였다.

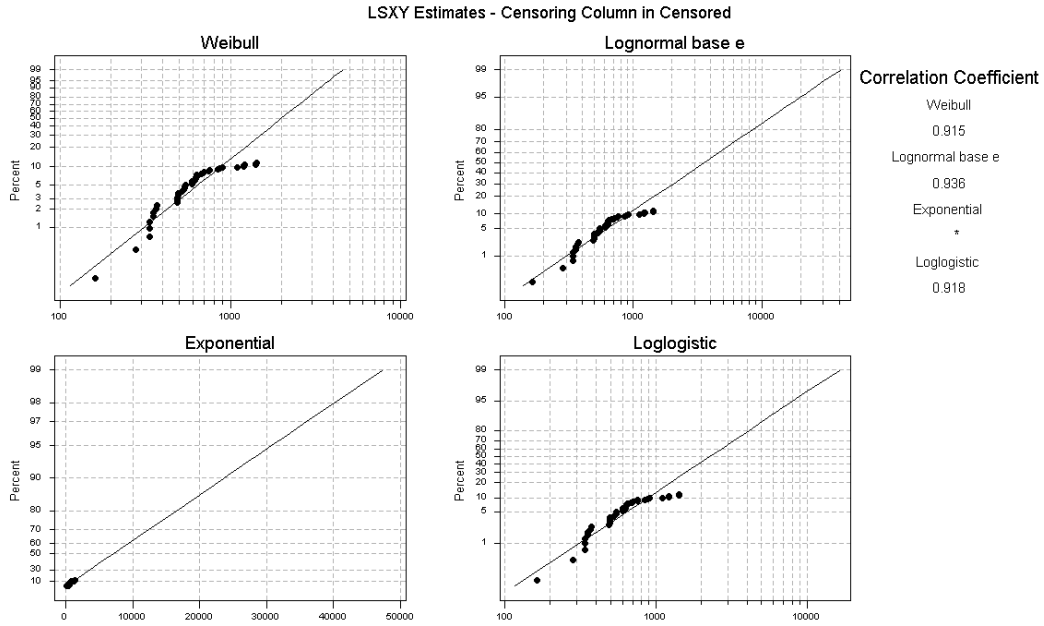


그림 2 배기모터 고장데이터의 적합도 검증 결과

표 3 배기모터 고장데이터의 적합도 검증 결과

분포	Anderson-Darling (adj)	상관계수
와이블	888.7	0.915
대수정규	888.7	0.936
지수	888.7	*
대수로지스틱	888.7	0.918

2.1.1 고장분포의 모수추정 및 분포 특성 분석

적합도 검증을 통해 선택된 대수정규분포에 대해서 최우추정법(The method of maximum likelihood)을 사용하여 모수를 추정하였다. 사용된 대수정규분포의 확률밀도함수는 아래와 같다.

$$f(t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\{(\log_e t) - \mu\}^2}{2\sigma^2}\right], \quad t \geq 0$$

위치모수(β) 및 척도모수(η)에 대한 추정결과는 표 3과 같다.

표 4 배기모터 고장분포 모수 추정 결과

(단위: 일)

모수	추정치	표본오차	95% 신뢰구간	
			하한	상한
위치	9.1847	0.3214	8.5548	9.8147
척도	1.626	0.2188	1.2491	2.1167

추정된 대수정규분포의 신뢰성 특성값은 표 4와 같다. 아래의 표에 의하면 배기모터의 고장은 평균 36,560일에 한 번씩 발생하며, 이에 대한 표본오차는 24,186일이다. 신뢰수준 95%로 보수적으로 해석하면 9,998일에 한 번씩 고장이 발생할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 중앙값은 9,747일로 평균값보다 아주 작게 나타났으며, 표준편차는 132,173일로 아주 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 배기모터는 현재까

지 노후화에 의한 고장 증가 추세는 발견되지 않으며, 완전데이터의 개수가 적기 때문에 판단된다. 따라서 정확한 신뢰성 특성값은 고장의 경향을 좀 더 관측한 후 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

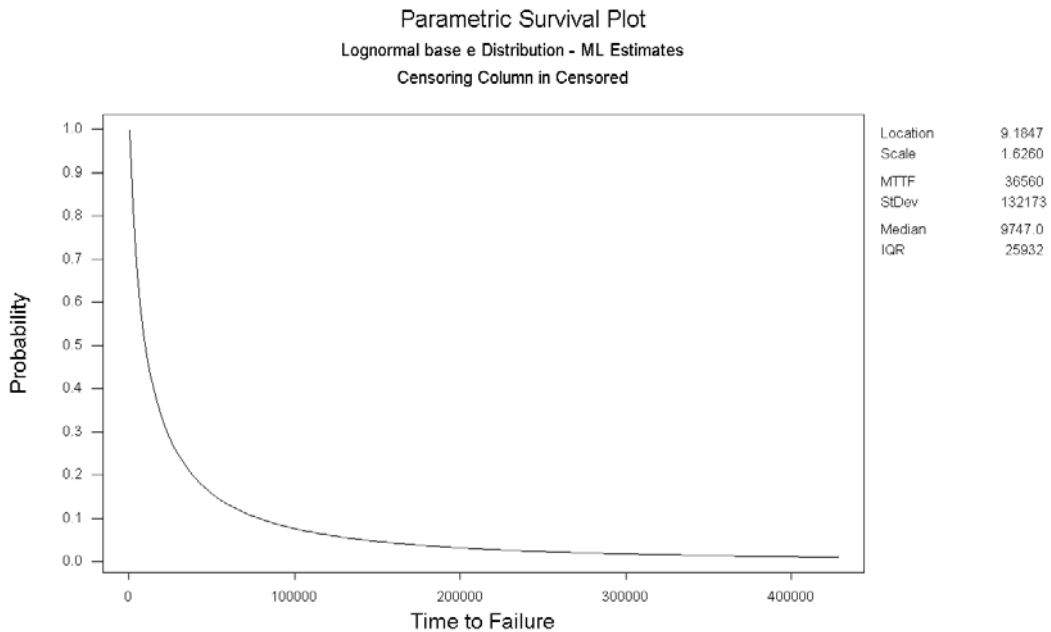
표 5 배기모터의 신뢰성분포 특성값 추정 결과

(단위: 일)

특성값	추정치	표본오차	95% 신뢰구간	
			하한	상한
평균값(MTTF)	36,560	24,186	9,998	133,691
표준편차	132,173	137,384	17,234	1,013,689
중앙값	9,747	3,133	5,191	18,300
제1사분위수	3,255	642	2,211	4,791
제3사분위수	29,187	13,415	11,856	71,849
사분위범위	25,932	12,841	9,825	68,442

그림 3 및 4는 배기모터에 대한 신뢰도 함수 및 고장률 함수이다. 아래 고장률 함수에서 배기모터는 초기에 고장률이 증가하였지만 점차 안정화되면서 고장률이 현재까지 지속적으로 감소하고 있고 향후로도 계속 감소될 것으로 예측되고 있다. 그러나 관측중단 시점이 1,438일이기 때문에 1,438일 이후에도 계속적으로 고장률이 감소할 것으로 판단하는 것은 매우 위험하다. 따라서 관측중단 시점 이후의 배기모터의 신뢰성 분석은 좀 더 많은 고장데이터가 수집된 후 판단되어야 할 것이다

현재까지의 고장 경향이 향후로도 계속될 것으로 가정하면, 표 5에 나와 있는 고장시간에 대한 백분위수를 보면 B1 수명은 222일, B5 수명은 672일, B10 수명은 1,213일을 알 수 있다. 또한 배기모터의 50%는 9,747일 이내에 고장 날 것으로 예측된다.



Parametric Hazard Plot

Lognormal base e Distribution - ML Estimates
Censoring Column in Censored

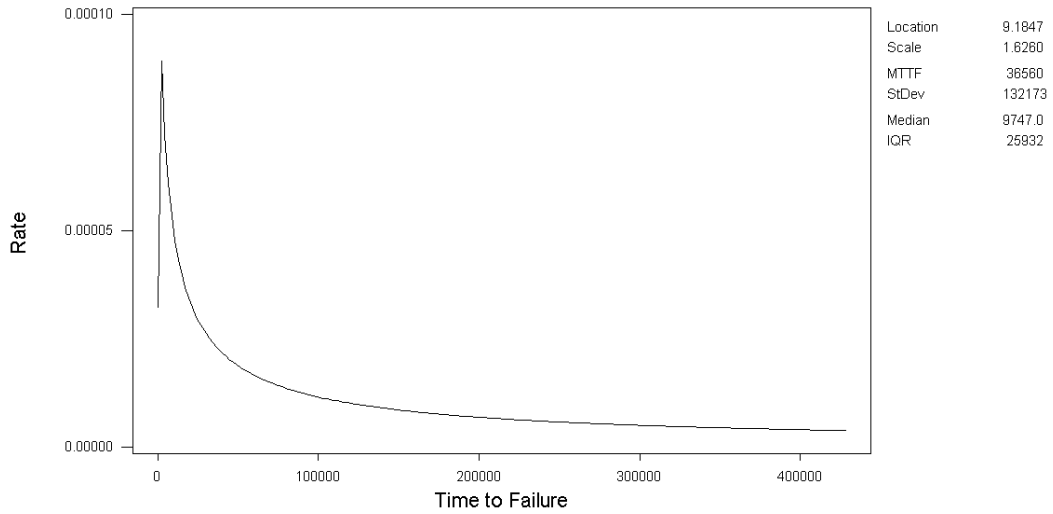


그림 4 배기모터의 고장률 함수

표 6 배기모터 고장시간에 대한 백분위수

(단위: 일)

백분율	백분위수	표본오차	95% 신뢰구간	
			하한	상한
0.1	64	26	29	142
1	222	57	135	366
2	346	72	230	518
3	458	82	322	651
4	566	92	412	778
5	672	101	500	903
6	778	111	588	1,029
7	884	122	675	1,159
8	992	134	761	1,294
9	1,102	148	847	1,434
10	1,213	164	931	1,580
20	2,480	427	1,770	3,477
30	4,155	924	2,687	6,425
40	6,456	1,756	3,788	11,004
50	9,747	3,133	5,191	18,300
60	14,716	5,481	7,091	30,538
70	22,866	9,794	9,876	52,941
80	38,301	18,948	14,525	100,997
90	78,321	46,047	24,742	247,925
91	86,236	51,788	26,577	279,814
92	95,743	58,811	28,724	319,131
93	107,411	67,601	31,284	368,781
94	122,130	78,928	34,413	433,434
95	141,396	94,106	38,363	521,142
96	167,947	115,589	43,585	647,157
97	207,516	148,620	50,984	844,639
98	274,910	207,114	62,792	1,203,580
99	428,247	347,797	87,176	2,103,734

2.2 배기모터의 적정 교환주기

제작사에서 제시한 배기모터의 교환주기는 24개월이다. 본 절에서는 배기모터의 신뢰성 분석 결과를 바탕으로 앞에서 제시한 교환주기에 따른 RAMS 영향 평가를 통해 배기모터의 교환주기를 조정한다. 그 절차는 다음과 같다.

- 1) 신뢰성 분석 결과에 의해 조정할 교환주기를 선정한다.
- 2) 조정된 교환주기에 따른 안전성, 서비스신뢰도, 가용도, 수명주기비용 영향을 평가한다.
- 3) 2)의 RAMS 영향 평가 결과가 만족스러우면 조정된 교환주기를 선정하고, 개선의 필요성이 있으면 1)의 단계로 가서 새로운 교환주기를 선정한다.

최적화된 교환주기의 선정 기법은 본 연구에서는 다루지 않는다. 본 연구에서는 위와 같은 절차에 의해 배기모터의 교환주기를 산정하였다.

2.2.1 적정 교환주기의 선정

NAVAIR 00-25-243 [2] 교환업무에 대해서 안전에 영향을 주는 품목인 경우에는 그림 5와 같이 안전 수명 한계(Safe Life Limit) 내에서 교환주기를 결정하고, 안전에 관련이 없는 품목인 경우에는 그림 6과 같이 경제적 수명 한계(Economic Life Limit)를 교환주기로 결정 할 것을 권고하고 있다.

배기모터의 고장률 함수를 보면 시간이 지날수록 계속적으로 고장률이 낮아지기 때문에, 위에서 평가된 모델에 따르면 적정 교환주기는 무한대가 되어 주기적인 교환은 필요 없음을 알 수 있다. 그러나 위에서 설정한 모델은 1,438일이 관측 중단된 자료를 바탕으로 하였기 때문에 1,438일 이후에도 계속적으로 고장률이 감소할 것으로 판단하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 교환주기의 연장을 현재까지 관측된 시점 이내로 한정하여 42개월을 교환주기의 조정 대안으로 선정하였다.

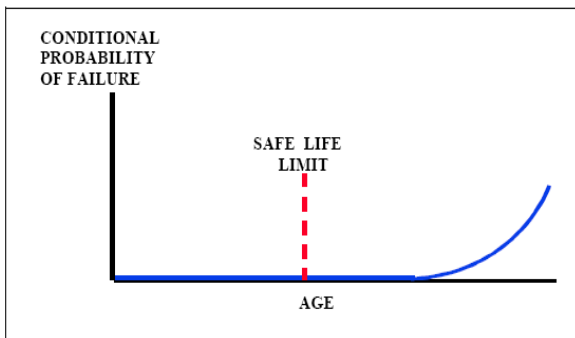


그림 5 안전 수명 한계

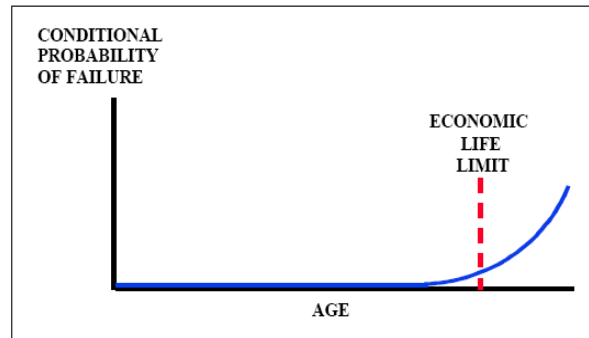


그림 6 경제적 수명 한계

2.2.2 교환주기의 RAMS 영향 평가

김중운 등 [1]은 교환과 같은 고정시간 업무의 주기를 결정하는 방법으로 RAMS 성능 척도인 안전성, 서비스신뢰도, 가용도, 수명주기비용에 대한 영향을 평가하는 절차를 제안하였다. 본 절에서는 배기모터의 교환주기를 24개월에서 42개월로 연장할 경우에 RAMS 성능 척도인 안전성, 서비스신뢰도, 가용도, 수명주기비용에 대한 영향을 평가한다. 그림 4의 배기모터의 고장률 함수 그래프를 보면 초기에 고장률이 증가하다가 특정 시점 이후로 시간이 지날수록 고장률이 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 현재의 교환주기(24개월) 및 조정 대안(42개월)시점 근처에서의 고장률의 변화를 살펴보면 아래의 그림 7 및 표 6과 같다.

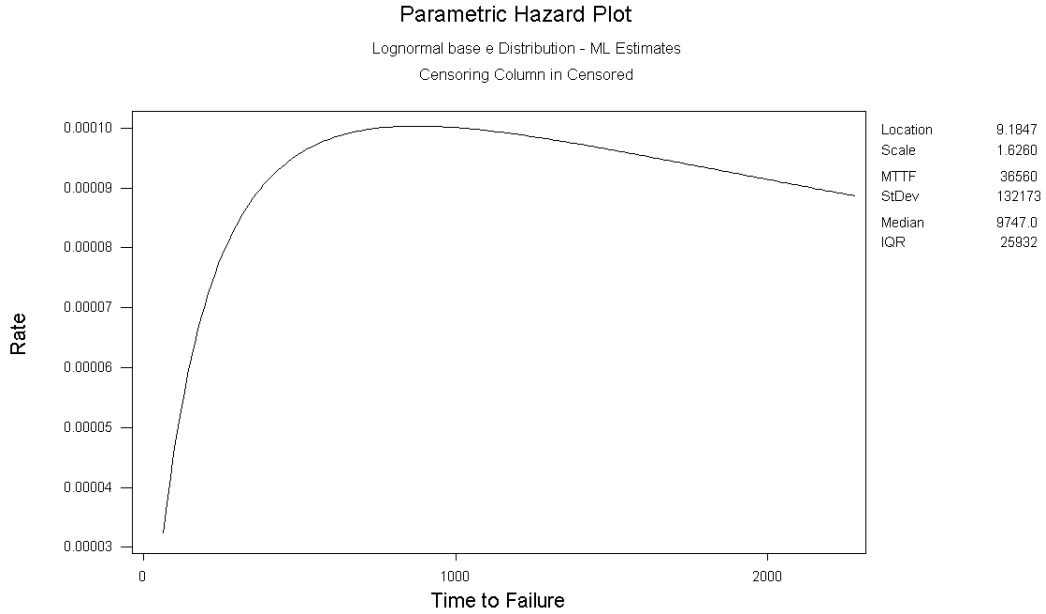


그림 7 배기모터의 고장률 변화

표 7 배기모터 고장일자별 신뢰도 및 고장률

일자	확률밀도	신뢰도	고장률
30	0.0000149	0.99981	0.0000149
91	0.0000434	0.99797	0.0000435
152	0.0000611	0.99475	0.0000614
213	0.0000725	0.99066	0.0000732
274	0.0000802	0.98601	0.0000813
334	0.0000854	0.98096	0.0000871
395	0.0000890	0.97565	0.0000912
456	0.0000913	0.97017	0.0000941
517	0.0000929	0.96456	0.0000963
578	0.0000938	0.95889	0.0000978
638	0.0000943	0.95316	0.0000989
699	0.0000944	0.94743	0.0000997
760	0.0000943	0.94169	0.0001001
821	0.0000939	0.93597	0.0001003
882	0.0000934	0.93027	0.0001004
942	0.0000927	0.92462	0.0001003
1003	0.0000920	0.91900	0.0001001
1064	0.0000912	0.91343	0.0000998
1125	0.0000903	0.90791	0.0000995
1186	0.0000894	0.90245	0.0000991
1246	0.0000885	0.89704	0.0000986
1277	0.0000880	0.89434	0.0000984

그림 7과 표 6에 의하면 배기모터의 고장률은 약 900일까지 증가하다가 약 900일 이후로는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 만약 교환시점을 24개월(730일)에서 900일로 연장한다면 이는 시스템 신뢰도가 낮아지는 것을 추가적인 분석이 없더라도 알 수 있으나, 가용도 및 수명주기비용 측면은 추가적 분석을 통해 그 영향을 평가하여야 한다. 그러나 교환주기를 24개월에서 42개월(약1277일)로 연장하는 것은 약 900일 이후에 고장률이 낮아지기 때문에 가용도 및 수명주기비용 뿐 만 아니라 신뢰도 측면에서도 추가적인 분석을 통해 그 영향을 평가하여야 한다.

배기모터의 교환주기 연장에 따른 RAMS 영향 평가는 김종운 등[1]이 제안한 수리적 모형을 시플레

이선 분석에 의해 계산하였다. 그 이유는 제시된 수리모형은 해당 아이템이 무한히 사용될 경우에 대한 모형으로 실제 현장에서는 철도차량의 정해진 수명이 경과한 경우는 해당 아이템의 유용성 또한 없어지기 때문이다. 또한 시뮬레이션 분석은 여러 가지 상황에 대해 쉽게 확장 가능하기 때문에 본 연구에서는 시뮬레이션에 의해 교환주기 조정에 따른 RAMS 영향을 평가하였다. RAMS 영향 평가를 위하여 다음과 같은 사항을 가정하였다.

- RAMS 영향 평가를 위해 가정된 정보
 - 차량 내용수명: 30년
 - 배기모터 교환시간: 2인 2시간 (예방 및 보수정비 동일)
 - 배기모터 단가: 2,000,000원
 - 시간당 임금: 22,000원

시뮬레이션은 Isograph사가 개발한 상용 소프트웨어인 Availability Workbench AvSim Module을 사용하였으며 그 결과는 표 7과 같다. 이에 따르면 배기모터의 교환주기를 24개월에서 42개월로 연장하면 서비스 신뢰도 측면에서는 약 10% 저하될 것으로 예상되나 여전히 높은 값을 나타낼 것으로 예상된다. 또한 가용도 측면에서는 예방정비시간의 감소로 인하여 가용도가 약간 향상될 것으로 예측되며, 유지보수비용 측면에서는 차량을 30년간 운영하였을 경우에 배기모터 1대당 약 12,800,000원이 절감될 것으로 예측된다.

표 8 배기모터의 교환주기별 RAMS 영향 평가 결과

교환주기	안전성	서비스신뢰도 (MTBSF)	가용도	수명주기비용 (유지보수비용)		
				예방정비	보수정비	합
24개월	영향없음	12,870일	0.999732	28,919,000원	1672,490원	30,591,490원
42개월	영향없음	11,540일	0.999845	15,764,400원	1,958,540원	17,722,940원

3. 결 론

본 연구는 철도차량의 주기적 교환품의 교환주기 결정에 대한 사례로서 KTX 배기모터의 교환주기를 조정하는 문제를 다룬다. 약 42개월간의 배기모터의 고장 및 유지보수 데이터를 바탕으로 배기모터의 신뢰성을 분석하였다. 또한 교환주기의 조정에 따른 '서비스신뢰도', '가용도', '안전성', '수명주기비용' 네 가지 측면에서의 영향을 시뮬레이션에 의해 평가하였다. 시뮬레이션은 상용 소프트웨어인 Availability Workbench AvSim Module을 사용하였다. 분석 결과로서 배기모터는 초기에 고장률이 증가하다가 일정 시점 이후로는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 배기모터의 교환주기의 조정함으로써 서비스신뢰도는 여전히 높은 값을 보이면서, 가용도 및 수명주기비용 측면에서는 향상되는 교환주기를 얻을 수 있었다. 이와 같이 정확한 신뢰성 분석 및 합리적 교환주기의 산정을 통해 철도 서비스의 품질 척도인 RAMS 성능, 즉 서비스 신뢰도, 가용도, 안전성을 향상시키고 철도 서비스의 경제성 척도인 수명주기비용을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김중운, 박준서, 이호용, 김재훈 (2008), 철도시스템의 RAMS 중심의 유지보수 정책 결정을 위한 개념적 절차, 한국철도학회 논문집, 제11권 제1호, pp 19-25.
2. NAVAIR 00-25-403 (2001), Guidelines for the naval aviation reliability-centered maintenance process.