

< 기술논문 >

무개화차용 엔드빔의 피로수명에 대한 신뢰성 분석과 계획예방정비

백석흠* · 전주현* · 이경영* · 조석수** · 주원식†
(2004년 9월 30일 접수, 2005년 1월 7일 심사완료)

Reliability Analysis and Preventive Maintenance for Fatigue Life of End Beam for Uncovered Freight Car

Seok Heum Baek, Joo Heon Jeon, Kyoung Young Lee, Seok Swoo Cho and Won Sik Joo

Key Words: Reliability Analysis(신뢰성 분석), Preventive Maintenance(예방정비), Weibull Distribution(와이블 분포), Rainflow Counting(레인플로집계), Failure Rate(고장률)

Abstract

Increased cumulative running times of railroad vehicle brings out such degradation as wear and fatigue. It doesn't adapt corrective maintenance which repairs a poor part after a trouble but use preventive maintenance which fixes a bad part before a trouble. There were a few researches for preventive maintenance such as inspect affairs and facilities management. They couldn't estimate the operation reliability on railroad vehicle. Therefore, this study proposes the preventive maintenance procedure that predict repair period of end beam for uncovered freight car using reliability function and instantaneous failure rate on the basis of fatigue test and load history data.

1. 서론

철도차량은 주행시간이 증가함에 따라 마모, 열화, 피로 등의 성능 저하가 발생되어서 고장 및 파손의 원인이 된다. 화물차량은 고속화의 증가와 영업기간이 지속될수록 수명문제가 제기되고 검사, 정비, 교환, 운전조건의 제안이 실질적으로 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 컨테이너 및 무개, 평판차 등의 화차(freight car)는 유지보수가 차량의 총 수명에 매우 중요한 부분을 차지하며 장비의 수명기간동안 소요된 비용이 개발 및 제작비용의 약 3배 정도가 소요되는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾ 따라서 적합한 계획예방정비 체계

와 보수주기를 정확히 확립하는 것이 중요하다.

일반적으로 철도차량의 정비 보수는 자동차 등과 같이 고장이 발생함에 따라 그 불량장소를 고치는 사후정비(corrective maintenance)로는 완전하지 않아 마모, 열화, 피로 등으로 성능과 서비스가 저하하여 사용하는데 지장이 있기 전에 또는, 고장이 일어나기 전에 정비 보수하여 복원하는 예방정비(preventive maintenance) 방식이 채용된다.^(2,3)

종래의 예방정비의 접근에 관한 연구들⁽³⁻⁵⁾은 대부분 검수업무나 차량의 시설관리에 한정되어있어 실질적인 차량의 운용에 관한 연구가 요구되고 있다. 그러나 화차는 사용 연수가 길고 차량 제작사가 전용 시험선을 가지고 성능시험과 내구시험을 자체적으로 수행하는 신뢰성 평가는 어렵다. 그러므로 정비가목의 분석이나 교체시기, 피로손상 발생 등의 기준으로 확률밀도함수(probability density function)나 누적분포함수(cumulative distribution function) 및 고장률 함수(hazard function)에 적용시키면 신뢰도 예측함수(reliability estimation function)

† 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : wsjoo@daunet.donga.ac.kr
TEL : (051)200-7641 FAX : (051)200-7656

* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 삼척대학교 자동차공학과

를 구할 수 있다. 신뢰도 예측을 통해 이들 차량부품에 대해 명확한 수요예측과 예비품목 확보에 참고자료로 활용할 수 있어 예방정비가 가능하다.^(6,7)

본 논문에서는 피로시험과 손상이 발생한 운행구간에 제한된 차량의 하중이력 데이터를 이용하여 정비 보수 방법에 관해 논의하였다. 피로수명은 내구해석(durability analysis) 과정에서 얻어진 수명자료를 이용하여 적합한 분포를 예측하여 추정하였고 신뢰도 함수와 고장률 함수는 비모수적 방법(nonparametric distribution analysis)인 Kaplan-Meier 방법^(8,9)을 이용하여 비교 평가하였다. 적용대상은 무개화차(uncovered freight car)의 제동장치 부품인 엔드빔(end beam)의 균열에 따른 피로 파손 문제이며 적용된 방법을 통해 예방정비 체계의 유용성을 검토하였다.

2. 신뢰성 분석방법

2.1 수명자료의 정의

손상합산법(damage summation method)⁽¹⁰⁾을 이용하여 무개화차 엔드빔에 대한 피로수명을 정의하였다. Fig. 1은 손상합산법을 이용한 내구해석 절차를 나타낸 것이다. 레인플로집계법(rainflow cycle counting)^(10,11)을 이용하여 사이클집계를 수행하고 추출된 응력진폭 σ_a 와 평균응력 σ_m 에 대한 빈도수를 산출하였다. Goodman 식을 이용하여 평균응력 효과를 고려한 응력진폭과 빈도수의 히스토그램(histogram)이 결정되면 아래의 식 (1)과 같은 Miner 법칙⁽¹²⁻¹⁴⁾을 기초로 누적손상 D 와 파단수명 N 을 계산하였다.

$$D = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \frac{n_3}{N_{f3}} + \dots = \sum_i \frac{n_i}{N_{fi}} = 1$$

$$N = \frac{1}{\sum_i \frac{n_i}{N_{fi}}} \quad (1)$$

여기서 n_i 는 응력진폭 S_i 에서 집계된 사이클의 발생빈도수이며 N_{fi} 는 응력진폭 S_i 에서 S-N 선도의 피로수명인데 D 값이 1에 도달할 때 파손이 발생된다고 가정한다.

2.2 체계적 신뢰성 분석

변동하중하에서 재료의 피로수명에 대해서는 확률 통계적 개념을 도입한 신뢰성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 신뢰성 평가를 위해서 Fig. 2

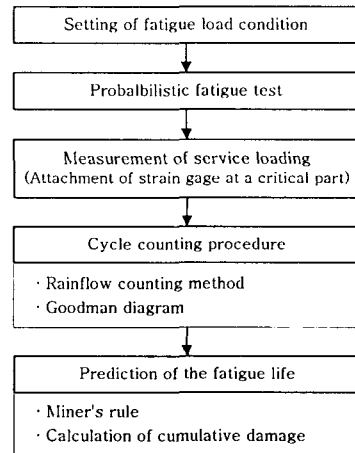


Fig. 1 Process of fatigue damage calculation

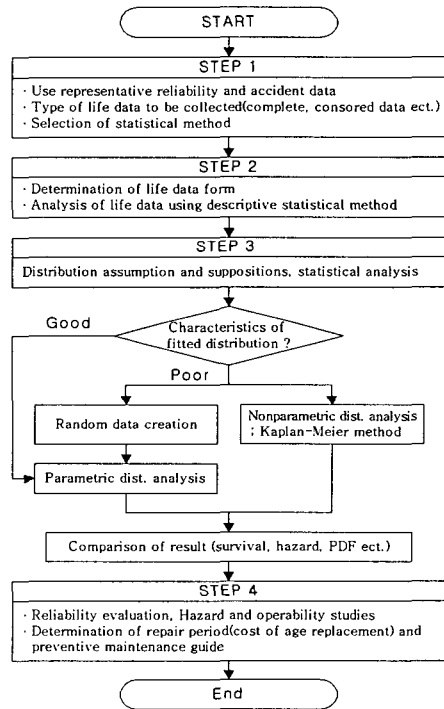


Fig. 2 Process of reliability analysis and preventive maintenance

와 같은 절차를 수행했으며 STEP1 문제 설정, STEP2 자료 입력, 기술통계방법의 적용, STEP3 분포 가정 및 통계적 분석, STEP4 신뢰성평가와 예방정비의 순서로 구성된다. 수명자료를 분석하기 위해 사용되는 모수 추정방법으로는 일반적으로 많이 이용되는 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 사용하였다.^(8,15) 모수를 추정하기 위해

서는 우도함수(likelihood function)가 필요하며 아래의 식 (2)와 같이 대수를 취한 후 그 값을 최대화하는 형상모수 m , 위치모수 η 를 결정한다. 이와 같은 방법을 최우추정법이라고 하며 이 때의 최우추정량은 다음의 식과 같이 추정한다.

$$\frac{\sum_{i=1}^r \ln t_i}{r} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i^m}{\ln t_i \sum_{i=1}^n \ln t_i^{m-1}} \quad (2)$$

$$\eta = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln t_i^m}{r} \right)^{1/m} \quad (3)$$

여기서 r 은 관측 데이터의 수를 나타낸다.

신뢰성 평가를 위해서 신뢰도함수, 누적분포함수, 확률밀도함수를 정의하고 와이블 분포(weibull distribution)의 경우 식 (4)-(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (4)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (5)$$

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (6)$$

또한 신뢰도함수에 대한 확률밀도함수의 비를 순간고장률(instantaneous failure rate)라고 하고 이를 고장률 함수라고도 부르며 식 (7)와 같이 표현한다.

$$h(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (7)$$

한편, 제안된 방법을 평가하기 위해 비모수적 방법(nonparametric distribution analysis)인 Kaplan-Meier 추정법을 이용하여 고장확률이 50% 이상이 되는 시기를 나타내는 중앙값(median)을 비교하였으며 신뢰도함수와 고장률 함수의 Kaplan-Meier 추정량은 식 (8) 및 (9)와 같다.

$$R(t) = \prod_{j \in I_j, t_j < t} (1 - h_j(t)) = \prod_{j \in I_j, t_j < t} \left(1 - \frac{d_j}{n_j}\right) \quad (8)$$

$$h_j(t) = \frac{d_j}{n_j} \quad (9)$$

여기서 n 은 시험단위수, t_j 는 j 번째 고장난 시점, d_j 는 j 번째 t_j 에 고장난 시험단위수, m 은 고장난 시점의 수이며 n_j 는 t_j 까지 고장이 나지 않은 시험단위수를 나타내며 식 (10)과 같다.

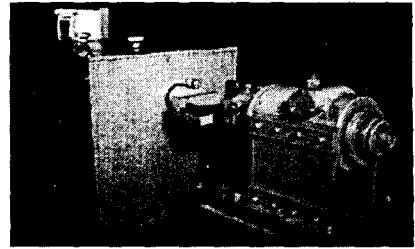


Fig. 3 Apparatus for scenk type fatigue test

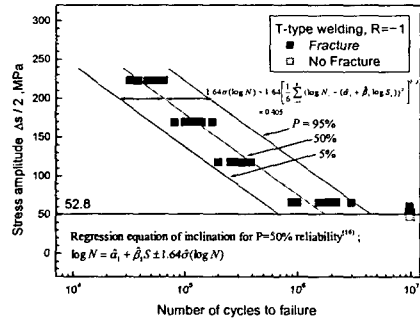


Fig. 4 P-S-N curve for SS400 steel

$$n_j = n - \sum_{i=0}^{j-1} d_{ji}, \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

3. 신뢰성 분석 및 예방정비

3.1 SS400 강의 재질 및 P-S-N 곡선

무개화차용 엔드빔의 재료는 SS400 강이며 Fig. 3과 같이 비틀림 및 굽힘 피로시험기(Scenk type twisting & bending fatigue testing, Mori testing machine)를 이용하여 최대 굽힘모멘트를 4 kgfm, 반복속도 1800 rpm, 응력비 $R=1$ 에서 피로시험을 수행하였다. 필렛용접 시험편의 형상과 치수, 정적강도에 대한 상세한 내용은 참고문헌^(16,17)에 설명되어 있으므로 본 연구에서는 JSME⁽¹⁶⁾에 규정하는 S-N 시험방법을 이용하여 SS400 강의 확률적 응력 수명 곡선(probability stress-life curve)을 Fig. 4와 같이 구하였다. 그림에서 응력진폭과 피로수명의 관계는 식 (11)과 같다.

$$\log N = 6.728 - 0.094 \Delta S / 2 \pm 0.405 \quad (11)$$

이러한 일정진폭하중에 대한 시간강도와 내구한도를 기초로 엔드빔의 예방정비의 설정이나 보증기간을 추정하기 위해 신뢰성 평가를 수행하였다.

3.2 무개화차 엔드빔의 내구해석

현재 파손을 보이고 있는 무개화차의 엔드빔은 대차 프레임 하부에 결합되어 그 형상만을 구조 변경하기가 쉽지 않다. 따라서 손상이 발생한 보강판 주위의 피로 특성을 파악하여 안전성 및 경제성의 양 측면에서 계획적 예방장비에 필요한 사용 가능한 연수를 예측하는 것이 필요하다.

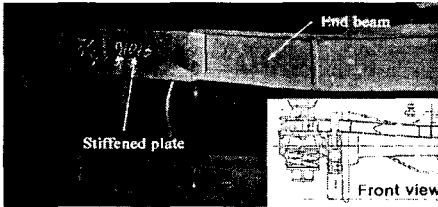


Fig. 5 Photograph of fractured end beam

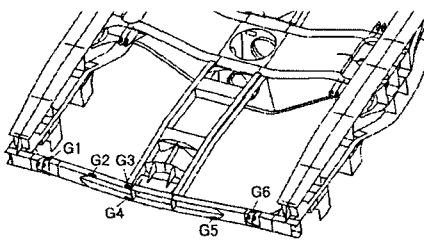


Fig. 6 Attached position of strain gage

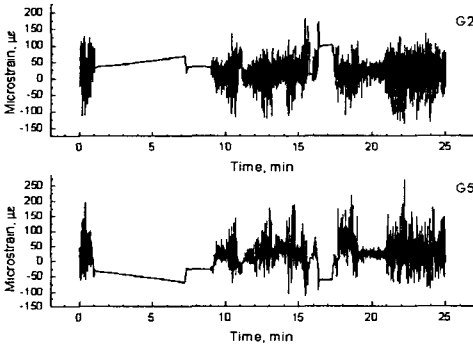


Fig. 7 Relationship between strain and time

Table 1 Result of strain gage position

No.	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Max. (MPa)	7.74	48.26	51.62	94.14	72.02	6.96
Min. (MPa)	-0.51	-36.26	-36.75	-70.65	-31.14	-3.41
Mean (MPa)	3.71	8.47	-8.83	-13.28	0.13	0.4

Fig. 5는 제동장치와 연결된 엔드빔과 균열발생 차량의 대표적인 파손 형태를 나타낸 것이다. 엔드빔의 균열은 대부분 용접된 보강판 끝단을 기점으로 균열이 시작되어 차량의 운행방향의 수직으로 진전되어 파괴되었다.⁽¹⁷⁾ 이러한 화차의 실제 운행에 따른 빈번한 기동과 정지 및 부하변동의 손상을 추정하기 위해 실차 시험을 통한 하중이력을 측정하였다.

측정 선로는 파손이 발생한 강원도 동해-계천 구간으로 전체 운행구간에서 이력을 집계하는 것이 바람직하나 60 km/h의 주행속도로 가속시작부터 제동시까지의 25분 동안 측정하였다. Fig. 6은 손상이 발견된 지점과 파단이 확인된 수직방향으로 6개의 변형률 게이지를 부착한 위치를 나타낸 것이다. Fig. 7은 측정결과의 일례로 파손위치인 G2, G5에서의 변형률 변화를 나타낸 것이고 전 위치에 대한 결과는 Table 1에 정리하였다. 이러한 하중이력을 집계하여 손상과 피로수명을 계산하기 위해 범용 피로해석프로그램인 FE-safe⁽¹⁸⁾를 이용하였다. 적용한 피로손상 법칙으로는 Miner 법칙을 채택하였고 변동하중하에 피로한도 이하의 응력을 고려하기 위해 일반적으로 S-N 곡선의 수정방법⁽¹⁹⁾이라고 불리는 응력 레벨값의 시작점을 P-S-N 곡선의 신뢰구간 범위 내에서 결정하였다.

Fig. 8은 무개화차의 주행중에 발생한 하중이력을 레인플로집계법에 의해 계산한 결과의 일례로서 G4 지점에서의 하중사이클의 평균과 진폭에 대한 발생빈도를 나타낸 것이다. Fig. 9는 이 경우 수정 Miner 법칙을 이용한 피로손상의 결과를 2차원 등고선형태로 나타낸 것으로 Fig. 8과 비교하면 빈도수가 적은 하중이라도 그 진폭이 크면 이에 따른 손상은 상대적으로 매우 커짐을 알 수 있다. 따라서 엔드빔은 제동시에 발생하는 큰 진폭

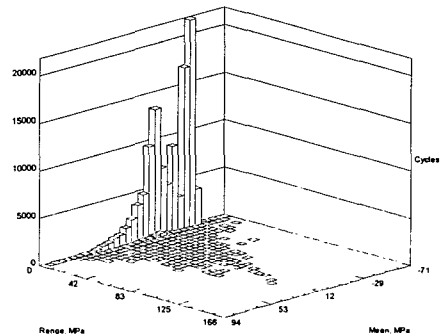


Fig. 8 Result of a rainflow cycle counting histogram

의 하중에 의한 손상이 파손에 많은 영향을 미치는 것으로 생각되며 평균응력을 고려한 결과가 고려하지 않은 결과에 비해 손상이 증가하는데 이는 엔드빔에 압축보다 인장 평균응력이 더 많이 발생하여 손상이 더욱 증가하는 것으로 판단된다.

Table 2는 수명과 손상을 계산하여 정리한 것이며 실제 파손 부위인 G2 지점에서 35350 사이클이고, 이 때의 손상은 2.83E-5 이다. 이에 해당하는 수명을 계산해 보면 하중 이력의 한 사이클이 25 분이므로 14729.2 시간의 수명을 갖는다. 이를 주행거리로 환산하면 시간당 60 km/h의 속도로 주행했으므로 883750 km에 해당하는데 실제 철도

차량의 수명주기가 25 년(300 만km)인 것을 고려하면 예측수명에 따른 연수는 7.36년이 계산된다.

3.3 피로수명에 대한 신뢰성 평가

내구해석을 이용하여 피로수명을 예측한 수명 자료에 대해서 신뢰성 평가를 수행하였으며 통계 해석 소프트웨어인 MINITAB R14⁽²⁰⁾를 이용하였다.

Fig. 10은 예측된 피로수명 자료에 대한 적합도 검정을 나타내며 피로수명 분석에 많이 쓰이는 와이블 분포, 정규분포 및 대수정규분포를 적용

Table 2 Expected fatigue life and cumulative fatigue damage at each measured point

Position number		Modified Miner rule		
Mean stress correction		Life	Damage	Year
G1	None	Unlimited	0	Unlimited
G2		983700	1.02E-6	46.79
G3		360400	2.77E-6	17.14
G4		209800	4.77E-6	7.98
G5		5146000	1.94E-7	244.78
G6		17000000	5.88E-9	8086
G1	Goodman	23200000	4.31E-8	4833
G2		35350	2.83E-5	7.36
G3		36550	2.74E-5	7.61
G4		14010	7.14E-5	2.92
G5		50780	1.97E-5	10.58
G6		11510000	8.69E-8	2397

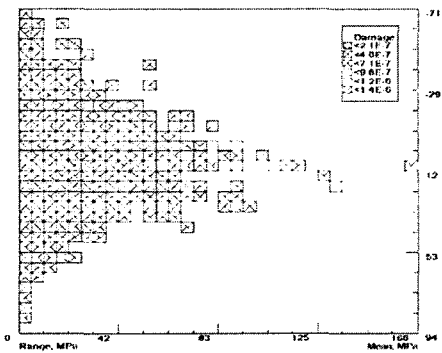


Fig. 9 Result of cumulative fatigue damage histogram

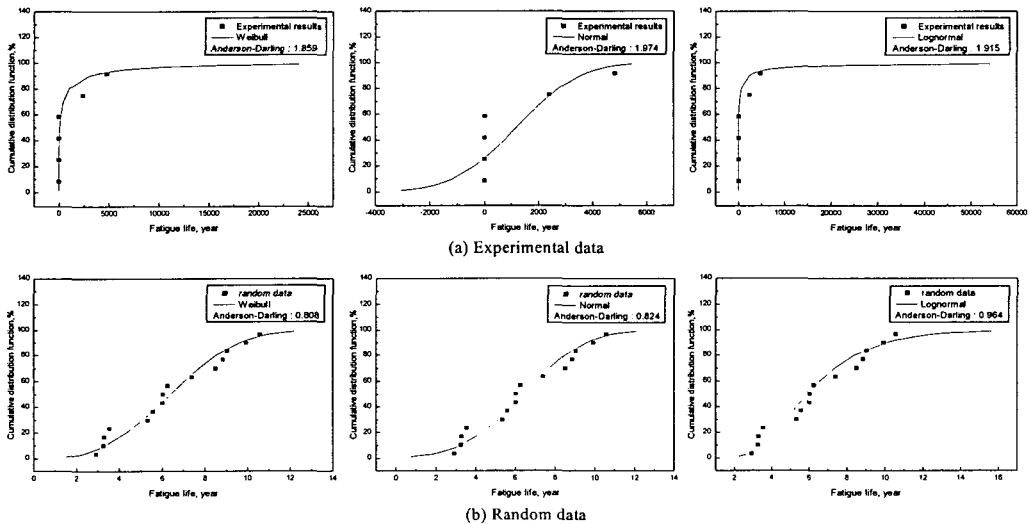


Fig. 10 Result of goodness-of-fit test

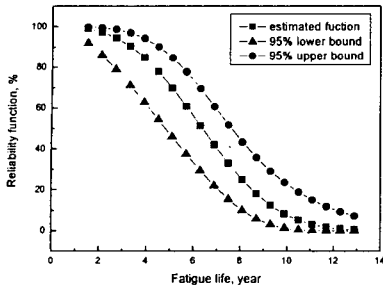


Fig. 11 Reliability function with 95% confidence interval for fatigue life

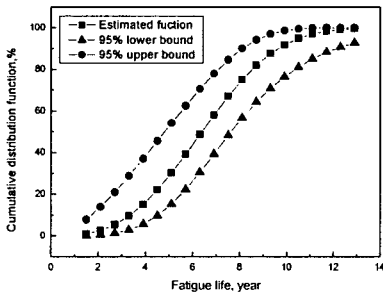


Fig. 12 Cumulative distribution function with 95% confidence interval for fatigue life

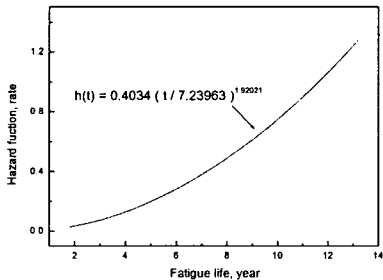


Fig. 13 Relation between hazard function and fatigue life

하여 가장 적합한 분포를 찾아내었다. 검정통계량은 데이터와 적합한 직선의 대응점과의 차이를 측정하는 Anderson-Darling 값을 사용하였다.⁽⁸⁾ 이것은 수명자료를 대상으로 분포적합성 후보 분포 중에서 더 적은 A-D 값을 가지는 분포에 잘 적합된다는 것을 의미한다. (a)는 실제 측정된 실험 데이터를 바탕으로 적합도 검정을 수행한 결과이다. 수명 자료의 수가 적고 G1과 G6의 수명값이 다른 위치와는 다르게 무한 수명에 가까워 기술 통계량이 크게 나타나 특정분포에 적합이 되지 않는

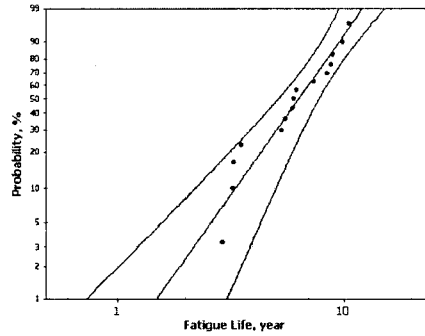


Fig. 14 Probability plot with confidence interval

Table 3 Characteristics of distribution using parametric distribution analysis

Item	Estimate	Standard error	95% Normal CI	
			Lower	Upper
Shape parameter	2.92021	0.606582	1.94359	4.38757
Scale parameter	7.23963	0.675148	6.03026	8.69155
Mean(MTTF)	6.45737	0.622304	5.34594	7.79986
Standard deviation	2.40430	0.414068	1.71552	3.36963
Median	6.38570	0.667379	5.20293	7.83734
First quartile(Q1)	4.72526	0.697779	3.53777	6.31136
Third quartile(Q3)	8.09643	0.717753	6.80509	9.63281
Interquartile range(IQR)	3.37117	0.588058	2.39496	4.74528

것으로 나타났다. 따라서 무한수명에 가까운 G1과 G6은 실제 엔드뷰의 파손수명에 영향이 없다고 판단되므로 이를 제외한 4개의 수명자료의 범위내에서 랜덤하게 샘플수량을 생성시켜 분포에 적합시키고 신뢰도 분석을 수행하였다. (b)는 랜덤하게 생성한 수명자료를 바탕으로 적합도 검정을 수행한 결과로서 검정통계량이 0.808인 와이블 분포가 가장 잘 적합되었다.

Fig. 11 및 12는 적합된 와이블 분포의 신뢰도 함수와 누적분포함수를 95% 신뢰구간과 동시에 나타낸 것이다. Fig. 13은 고장률 함수를 나타낸 것이며 시간에 따라 증가하고 있어 시스템의 마모 및 피로 등으로 인한 증가형 고장률(increasing failure rate, IFR)을 잘 표현하고 있다.

Fig. 14는 누적분포함수를 와이블 분포 확률지에 나타낸 것이며 신뢰구간은 95%의 범위를 나타낸다. 그림에서 모든 점이 95% 신뢰구간 안에 위치하고 있어 수명자료가 와이블 분포에 잘 적합되는 것을 알 수 있다. 적합된 와이블 분포의 형상모수는 2.92이고 척도모수는 7.24이며, 중앙

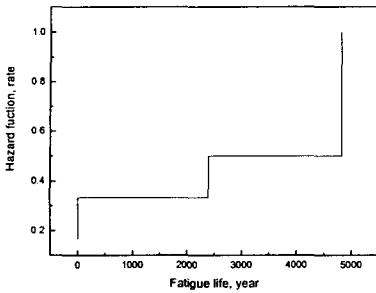


Fig. 15 Hazard function for fatigue life using Kaplan-Meier method

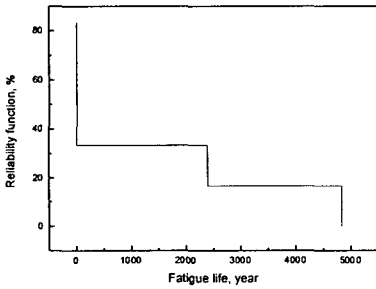


Fig. 16 Reliability function for fatigue life using Kaplan-Meier method

Table 4 Percentile and hazard function for cumulative failure probability

Cumulative failure probability (%)	Percentile (year)	Hazard function
1	1.49824	0.01685
2	1.90291	0.02939
3	2.19018	0.03964
4	2.42119	0.04871
5	2.61811	0.05700
6	2.79179	0.06476
7	2.94845	0.07211
8	3.09205	0.07914
9	3.22525	0.08591
10	3.34997	0.09247

값은 6.386년으로 평가되었으며 평가된 분포의 특징을 Table 3에 정리했다.

수명자료에 대한 모수적 방법의 결과를 비교하기 위해 비모수적 방법인 Kaplan-Meier 추정법을 이용한 신뢰성 해석을 수행하였다. Fig. 15와 16은 고장률 함수와 신뢰도 함수를 나타내는데 고

장률이 증가할수록 신뢰도는 감소함을 알 수 있다. G1과 G6의 영향으로 평균수명은 1×10^3 년 이상으로 매우 크게 나왔지만 중앙값은 7.61년으로 추정되었다. 이 결과에서 모수적 방법의 분포특성과 비교하면 평균에서는 차이가 많이 나지만 중앙값 6.386년과는 비교적 일치함을 알 수 있다.

3.4 엔드빔의 예방정비

일부 무개화차 엔드빔의 고장은 동일한 노선의 다른 열차에도 영향을 주어 간접적 손실이 발생하게 되므로 고장이 일어나기 전에 정비 보수가 예방정비가 중요하다.

기존의 화차에 대한 예방정비 주기는 교번검사 90일, 중간검사 30개월, 전반기사 60개월로 규정되어있으며 이중 엔드빔과 같은 중요부품을 해체 검사하는 것은 중간검사이다.⁽²⁾ Table 4는 적합된 분포에 대해서 시스템의 누적고장확률에 대한 백분위수(percentile)와 고장률 함수값을 나타낸 것이다. 이 때 년수로 표시되는 백분위수는 누적고장확률에 대응하는 관측치의 피로수명값이다. 보증기간의 설정이나 보증비용을 추정하기 위해서 저백분위수 등 수명 초기의 정보가 중요하므로 관심이 있는 고장확률 10% 이하의 값을 나타내었다. 고장확률 5% (순간고장률 5.7%)가 되는 시점이 2.618년이고 고장확률 1% (순간고장률 1.685%)가 되는 시점은 1.498년으로 나타났으며 파손된 엔드빔의 국부적인 수명차이로 인해 우발고장이 발생할 확률이 높다. 따라서 우발고장기간에 고장을 예방하기 위해서는 감률(derating) 설계 등이 필요하고 강건한 계획예방정비를 위한 중요부품을 포함한 중간검사는 1.5년 이내에 시행해야 한다. 이러한 검사주기는 고장확률에 경년열화의 영향 및 교환부품의 고장변동이 고려되어 엔드빔의 고장유형을 체계화하고 분류하는데 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 손상합산법을 이용한 무개화차용 엔드빔의 누적손상에 대한 신뢰성 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 변동하중에 대한 손상합산법을 이용하여 피로수명을 예측하였으며 파손사고가 발생한 엔드빔의 경우 운행시간이 증가할수록 고장률은 증가

하고 따라서 특정 고장률값을 정비에 적용하면 예방정비도 가능하다.

(2) 적합된 와이블 분포의 형상모수는 2.92이고 척도모수는 7.24이며, 중앙값은 6.386년으로 비모수적 방법인 Kaplan-Meier 추정법을 이용한 중앙값과 비교하여 비슷한 결과를 나타낸다.

(3) 파손된 엔드빔의 국부적인 수명차이로 인해 우발고장이 발생할 확률이 높으므로 화차대차의 강건한 계획예방정비 주기는 고장확률 1% (순간 고장률 1.685%) 이내인 1.5년에서 중간검사를 수행해야한다.

참고문헌

- (1) Lee, M. H., Lee, H. J. and Kwon, J. W., 2002, "Establishment of the maintenance system for rolling stock," *Proceeding of the KSR*, pp. 408~413.
- (2) Baek, N. U., Jang, K. S., 1999, *Rolling Stock Handbook*, Gijeon-research Pub.
- (3) Yoo, H. H., Hachiro, K., Tacheshi, H. and Ha, J. S., 1986, "A Study on the Decision of Optimal Maintenance Period of Ship's Machineries using Dynamic Programming," *KOFST*, Vol. 23, No. 6, pp. 785~793.
- (4) Ahn, T. K., Park, K. J., Lee, H. Y. and Han, S. Y., 2002, "A Study on the methodology to develop Information System for Maintenance of Urban Transit," *Proceeding of the KSR*, pp. 574~579.
- (5) Sohn, I. S., Bae, D. H., 1999, "Statistical Investigation on Fatigue Life Prediction of the Spot Welded Lap Joint(I): Application of Weibull Probability Distribution Function," *SAE*, Vol. 7, No. 6, pp. 214~221.
- (6) Jang, D. K., Kim, D. E., 2003, "Friction and Wear Characteristics and Reliability Estimation of Aircraft Brake System," *KSPE*, Vol. 20, No. 11, pp. 127~133.
- (7) Sheikh, A. K., Al-Garni, A. Z. and Badar, B. D., 1996, "Reliability Analysis of Aeroplane Tyres," *Int. J. of Quality & Reliability Management*, Vol. 13, No. 8, pp. 28~38.
- (8) Suh, S. K. 2001, "MINITAB Reliability Analysis," ERETEC Inc.
- (9) Nelson, W., 1982, "Applied Life Data Analysis," John Wiley & Sons.
- (10) Bannantine, J. A., Comer, J. C., Handrock, J. L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall Inc.
- (11) Dowling, S. D., Socie D. F., 1982, "Simplified Rainflow Cycle Counting Algorithms," *Int. J. Fatigue*, Vol. 4, No. 1, pp. 31~40.
- (12) Miner, M. A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," *Journal of Applied Mechanics, Trans of ASME(E)*, Vol. 12, pp. 159~164.
- (13) Kim, J. K., Shim, D. S., 1996, "The Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of GFRP under Random Loading," *Journal of KSME(A)*, Vol. 20, No. 12, pp. 3892~3898.
- (14) Endo T, etal. 1974, "Damage Evaluation of Metals for Random or Varying Loading, Proc 1974 Symposium on Mechanical Behaviour of Materials," *The Society of Materials Science*, Vol. 1, Kyoto, Japan.
- (15) Meeker, W. Q. and Escobar, L. A., 1998, "Statistical Method for Reliability Data," John Wiley & Sons.
- (16) Technical Report, 2003, "A Study on the Fatigue Limit for Haigh Diagram of SM490A Weldment," Rotem Company, Korea.
- (17) Jeon, J. H., Baek, S. H., Lee, K. Y., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2004, "Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of Freight Bogie using Rainflow Counting Method under Service Loading," *Proceeding of the KSME spring annual meeting*, pp. 114~119.
- (18) FE-safeWorks Ver5, 2003, Volume1-User Manual, Safe Technology Limited.
- (19) Park, J. H., Song, J. H., 2001, "Development of Integrated Fatigue Strength Assessment System," *Journal of KSME(A)*, Vol. 25, No. 2, pp. 264~274.
- (20) MINITAB User's Guide #2, 2000, Data Analysis and Quality Tools, Minitab Inc.