

운전하중하의 레인플로집계법을 이용한 화차 대차의 피로누적손상과 수명예측

전주현[†] · 백석흠^{*} · 이경영^{*} · 조석수^{**} · 주원식^{***}

Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of Freight Bogie using Rainflow Counting Method under Service Loading

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

Key Words: Fatigue Cumulative Damage(피로누적손상), Life Prediction(수명예측), Rainflow Counting (레인플로집계), Modified Miner's Rule(수정마이너법칙), Service Load(운전하중)

Abstract

Endbeam is an important structural member of freight bogie for the support of service loading. In general, more than 25 years' durability is necessary. However, endbeam occur fatigue fracture in dynamic stress concentration location because comparatively strength and stiffness are low. Therefore, structure analysis is performed to evaluate structural problem of endbeam and local strain range as durability analysis. The number of cycles is extracted concerning the bogie in operation by measurement dynamic stress time history on critical part which is crack initiation in actual fact. At this time rainflow cycle counting is used to consider change of stress for operating condition. Based on the fatigue life curves and the stress analysis, the fatigue life of the endbeam is predicted and compared with the experimentally determined fatigue life, resulting in a fairly good correlation.

1. 서 론

현재 운행중인 화차대차(freight bogie) 중 일부 구간에서 대차의 엔드빔(end beam) 부근에 균열이 발생하여 2차에 걸쳐 보완작업을 시행하고 있다. 대차 프레임의 한 부분인 엔드빔은 화차의 제동장치와 차축, 바퀴를 연결하는 골조부분으로 균열은 화차제동에 치명적인 영향을 주는 구조적 결함이 될 가능성이 높다. 특히 엔드빔의 형상 중에서 사이드 프레임(side frame)의 하부에 결합

되어 있는 상태에서 파손이 빈번하게 일어나고 있어 엔드빔이 결합되어 있는 구조적 문제와 피로파손과의 관계규명이 요구되고 있다.

실제 철도차량의 대차와 차체의 중요 구조물은 25년 이상 사용이 가능하도록 요구되고 있으나⁽¹⁾ 파손된 운행차량은 피로한도에 기준한 정적 구조 해석 결과로는 운전수명을 보증하지만, 파손을 보이고 있는 국부적인 취약부와 파손양식에 대해서는 원인규명이 되지 않아 운행차량의 임시보수작업에 차질을 보이고 있다. 이러한 지속적인 추가균열은 보강재를 용접하여 수명을 향상시키고 있으나 향후 제작하는 신조 차량의 건전성을 위해서는 변동하중을 받는 부재의 손상평가와 피로수명을 설계과정에 반영시켜 부재의 운행환경에 적합한 내구해석(durability analysis) 과정이 필요하다.

일반적으로 내구해석 방법은 손상합산기술(damage summation technique)과 함께 누적손상이론(cumulative

[†] 회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

E-mail : turtle0914@naver.com

TEL : (051)200-6981 FAX : (051)200-7656

^{*} 회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

^{**} 회원, 삼척대학교 자동차공학과

^{***} 회원, 동아대학교 기계공학과

damage theory)이 널리 적용되고 있는데 Hiyama⁽²⁾와 이상범 등^(3,4)은 단축하중이 작용하는 구조물의 하중이력 표준화 문제에 대해 연구를 수행하였으나 실제적인 변동하중하에서 재료의 피로수명은 하중이력의 평가방법에 따라 매우 다른 수명분포가 나타나므로 내구해석 기술과 적용은 이러한 차이점을 설명할 수 있어야 한다.

실제 운전하중(service load)을 이용하여 내구해석을 평가하는 방법은 운행시 발생하는 변형률과 하중, 가속도 등의 하중이력을 측정함으로써 실제하중의 정보를 얻고 이러한 정보는 신호처리 과정에서 사이클의 빠르고 정확하게 추출하기 위해서 적절한 사이클 집계(cycle counting) 알고리즘을 사용한다. 김영진 등⁽⁵⁾은 자동차 부품의 국부변형률접근법(local strain approach)에 근거한 피로강도 설계를 효율적으로 수행하는 피로수명 평가 시스템을 개발하였다. 또한 김정엽 등⁽⁶⁾은 ABS 작동에 의한 유압의 변동이 미치는 피로손상을 평가하기 위해 레인플로집계법(rainflow counting method)을 활용하거나 Palmgren-Miner의 피로누적손상을 유도하여 피로수명을 예측하는 방법⁽¹⁾을 제안하였다. 한편 철도차량의 피로특성은 국내외의 여러 관련규격에 의해 시험을 거쳐 평가되지만 화차의 경우 수명평가에 관여하는 대부분의 변수들은 정적하중은 물론 제동진동과 구조적으로 발생하는 굽힘응력 등의 복합응력이 가혹하게 발생하므로 현실적으로 설계하중과 운전하중은 반드시 같지 않고 피로수명은 작용하중의 크기와 더불어 사이클 수, 응력집중 정도 및 평균응력(mean stress)의 영향에 지배받는다. 특히 용접된 엔드빔은 평균응력이 존재하여 응력수명 곡선과 피로한도의 정량적인 값이 변하므로, 피로손상을 계산함에 있어서 불확실한 평균응력을 효과적으로 고려하는 방법이 마련되어야 한다.

본 연구에서 엔드빔의 경우 철도차량의 대차에 비하여 강도 및 강성이 비교적 약하기 때문에 주로 동적인 응력 집중 부위에서 피로파괴 현상이 발생하고, 차체 변형 시에 하중이 집중되는 용접부에 균열이 나타나고 있으므로 취약부와 그 영역에 피로수명 해석을 통한 계획적 예방정비의 주기조절이 요구된다. 따라서 내구해석 과정으로 우선 엔드빔의 구조적 문제를 평가하기 위해서 화차대차의 유한요소해석을 수행하고 실제 균열이 발생하고 있는 취약부에 동응력이력을 측정하여

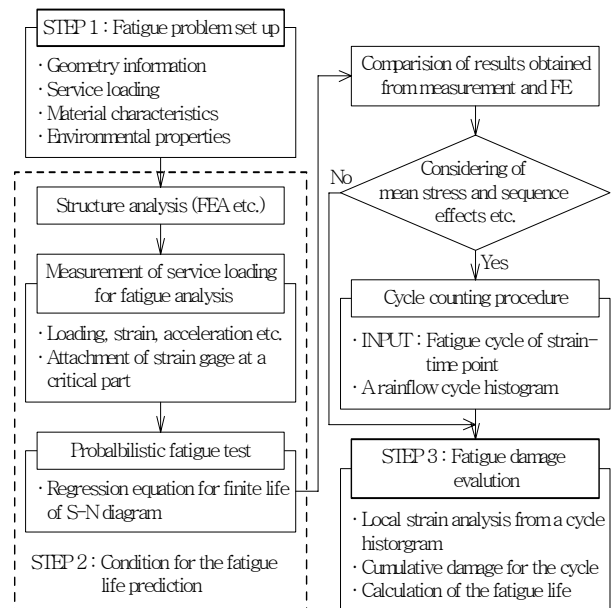


Fig. 1 Process of fatigue damage calculation

운행중의 화차에 대한 국부변형률과 사이클 수를 추출하였다. 이때 운전조건에 따른 응력변화 양상을 고려하기 위해 레인플로집계를 이용하고 손상 계산에 필요한 통계적 응력수명선도를 기초로 철도차량의 파손양식에 대응하는 손상법칙을 적용하여 피로수명을 평가하였다.

2. 해석 방법

철도차량의 내구수명을 예측하는 방법에는 상황에 따라 다양한 방법이 있지만 운행중인 화차의 엔드빔에서 추가균열이 발생함에 따라 주행차량의 운행환경에 적합한 피로해석 방법이 요구된다. Fig. 1은 본 연구에서 제안한 피로 해석 과정으로 실제 운행환경을 고려하기 위하여 실차의 동응력 이력을 레인플로집계를 기초로 STEP 1 피로문제의 설정, STEP 2 피로해석 조건의 구성, STEP 3 피로손상 평가의 순서로 구성된다.

2.1 레인플로집계를 이용한 손상합산법

실제의 구조물에 작용하는 하중은 진폭과 함께 평균응력이 변하는 변동하중을 받는 경우가 많으므로 실제이력에 따른 피로손상거동을 묘사하여 피로수명을 정확히 예측하는 것이 요구된다. 실제하중에서의 일반적인 정보를 얻어 특정 구성요소의 피로수명을 결정하기 위해서는 복합된 변동

하중을 유용한 일정진폭 시험의 S-N선도와 비교할 수 있는 몇 개의 단순화된 하중이력으로 줄이는 손상합산법 필요하다.⁽¹⁾ 이러한 과정을 사이클 집계라 하는데 본 연구에서는 하중의 고저 순서와 측정된 응력파형에서 피로강도를 지배하는 특성을 추출하고 그 빈도분포를 고려하기 위해서 레인플로집계를 이용하였다.

레인플로집계법은 짧은 신호의 길이에 적용이 가능하고 연속적인 범위에서 비교하기 위해 본 과정은 Socie와 Downing^(7,8)에 의해 제안된 사이클 집계법을 기초로 다음과 같이 설명할 수 있으며 Fig. 2는 이 과정을 간략하게 보여준다.

- (1) Fig. 2 (a)를 보면 사이클의 끝단에서 신호의 산과 골이 형성되어 있다. 중간 데이터 점들은 고려하지 않고 연속성만을 고려하여 가장 최근 데이터부터 A, B, C 순서로 표시한다.
- (2) A에서 B까지 범위는 B에서 C까지 범위보다 크기 때문에 사이클은 닫히고 그 크기는 B에서 C까지 범위가 된다. 즉 사이클이 닫히는 조건은 아래와 같다.

$$\text{Range A-B} > \text{Range B-C}$$

- (3) 닫힌 B-C 사이클은 삭제하고 이후 범위에 새로운 사이클을 표시한다.
- (4) Fig. 2 (b)에서 새로 생성된 사이클을 나타낸다. 같은 방법으로 A와 B의 범위가 B와 C의 범위보다 크기 때문에 다시 사이클을 닫힌다.
- (5) (1)~(4)과정에서 더 이상 사이클이 닫히지 않을 때까지 반복한다.

따라서 추출된 각각의 사이클에 대해 응력진폭 σ_a 와 평균응력 σ_m 을 산출한다. 본 논문에서는 Goodman의 평균응력 보정을 이용하였으며 보정된 응력진폭과 빈도수의 히스토그램(histogram)이 결정되면 아래의 식 (1)과 같은 Miner 법칙⁽¹⁾을 기초로 누적손상 D 와 파손수명 N 이 계산된다.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad N = \frac{1}{\sum_i \frac{n_i}{N_i}} \quad (1)$$

여기서 n_i 는 응력수준 S_i 에서 집계된 사이클의 발생빈도수이며 N_i 는 응력수준 S_i 에서 S-N선도의 피로수명인데 D 값이 1에 도달할 때 파손이 일어난다고 가정한다.

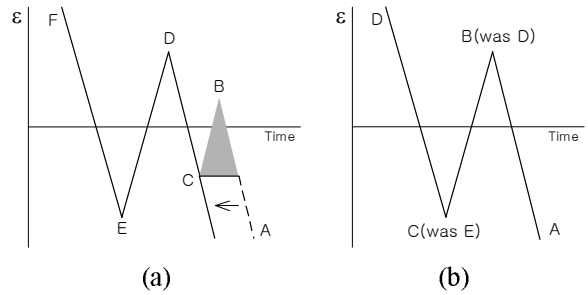


Fig. 2 Rainflow cycle counting

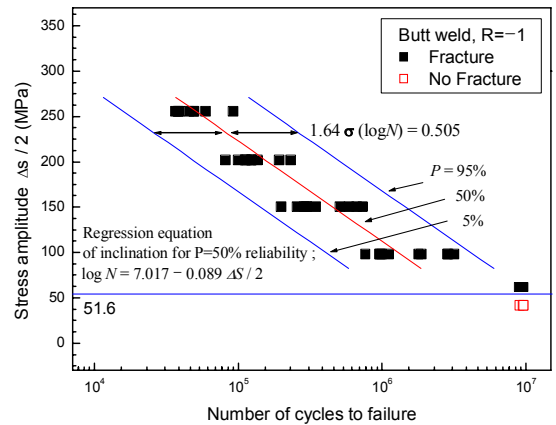


Fig. 3 S-N curve for SS400

2.2 내구한도를 가지는 통계적 S-N선도

Miner 법칙을 이용하여 수명을 평가할 경우 S-N 선도가 입력데이터로 사용되므로 신뢰성 있는 설계곡선이 요구된다. 철도차량의 용접재에 대한 피로한도는 실제로 1×10^5 시간을 넘어서 사용되는 것을 보증하나 각종 경년열화나 보강작업으로 인한 재질 및 강도변화 등으로 실제응력에 의한 피로손상에서는 피로한도 이하의 응력에 의한 손상을 무시할 수 없다. 따라서 피로손상과 관련된 수명 예측은 시간강도에 해당하는 경사부의 파손 확률에 따른 통계적 처리가 필요하다.

본 연구는 JSME S002⁽⁹⁾에 규정하고 있는 방법에 따라 시험하고 피로한도를 결정하였다. 경사부의 시간강도에 대한 통계적 S-N선도는 식 (2)로 나타내고 낼 수 있고 수평부의 피로한도는 계단식(staircase) 시험법으로 결정하였다.

$$\log N = \hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}_1 S \pm 1.64 \hat{\sigma}(\log N) \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}(\log N) = \left[\frac{1}{6} \sum_{i=1}^8 \{ \log N_i - (\hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}_1 \log S_i) \}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Fig. 3은 SS400 용접재의 쉐크형(schenck type)

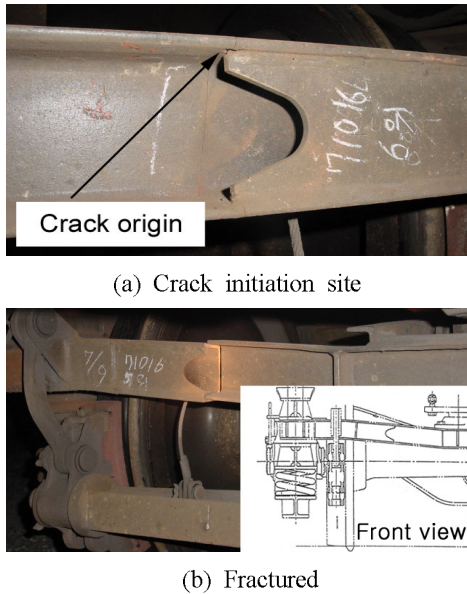


Fig. 4 Photographs of the crack initiation site and fractured end beam

평면굽힘피로시험 자료⁽¹⁾에 관한 통계적 S-N선도의 일례를 나타낸 것이다. 파손확률 P=5 %, P=95 %에 대한 S-N선도는 50 %에 대한 파단부의 표준편차 추정치인 식 (3)에 대하여 S-N곡선을 $\pm 1.64 \hat{\sigma}$ 씩 평행이동하여 구한다.

3. 화차 대차 엔드빔의 피로수명 해석

3.1 엔드빔의 파손양상과 실차 응력측정

엔드빔은 화차의 제동장치 역할을 맡은 부품으로 반복하중으로 인한 피로손상과 자체의 강도 및 강성저하의 구조적 결함일 가능성이 높다.

Fig. 4는 엔드빔의 균열생성과 파괴된 엔드빔의 모습을 보여준다. 사진에서 나타나는 것처럼 균열은 대부분 용접된 보강판의 끝단을 기점으로 발생되고 차량의 운행방향에 수직으로 진전되어 파괴된다. 이러한 이동방향의 수직으로 성장하는 횡방향 균열(transverse fissure)은 화차 제동의 치명적인 영향을 주며 균열을 계속 방치한다면 차량의 탈선과 안전에 커다란 영향을 미치게 된다.

현재 파손을 보이고 있는 화차의 엔드빔은 대차 프레임 하부에 결합되어 그 형상만을 구조변경하기가 쉽지 않아 손상이 발생된 보강판 주위의 피로특성을 파악하여 안전성 및 경제성의 양면에서 계획적 예방정비에 필요한 사용 가능한 연수를 예측하는 것이 필요하다. 그러나 화차는

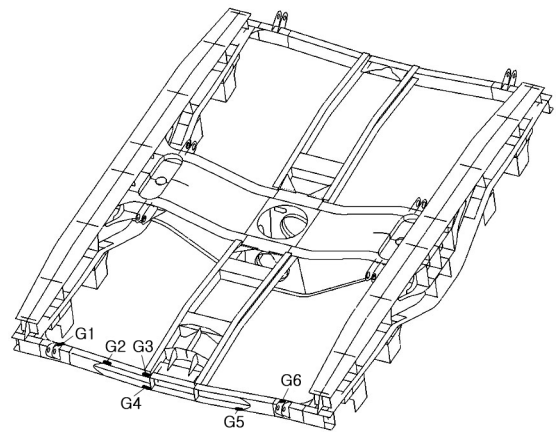


Fig. 5 Locations of strain gages

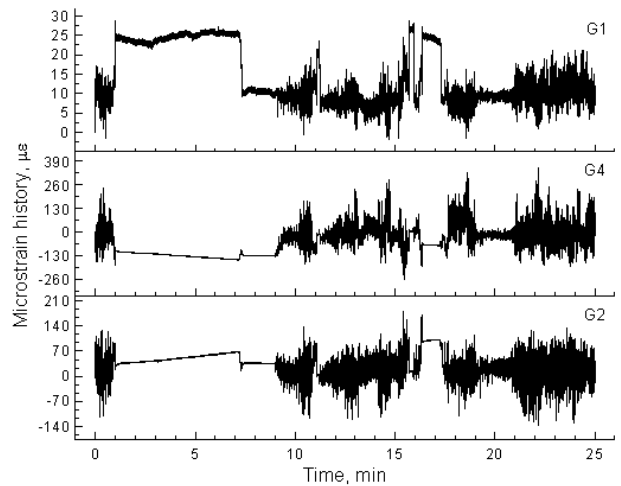


Fig. 6 Time-correlated microstrain history

빈번한 기동과 정지 및 부하변동으로 강성저하의 양을 정확히 측정하기 어려울 뿐만 아니라 피로 누적손상기동의 묘사가 복잡하므로 손상의 척도를 일의적으로 정의하기가 어렵다. 따라서 차량의 실제 운행환경을 고려하여 피로수명을 평가할 수 있는 화차의 내구해석 방법이 필요하다.

Fig. 5는 내구해석을 수행하기 위해 요구되는 하중이력과 주행 중에 엔드빔의 거동상태를 파악하기 위해 손상이 발견된 지점과 파손된 보강판에 부착한 변형률 게이지의 위치를 나타낸다. 시험조건은 실제 주행하는 전체 노선에서의 이력을 집계하는 것이 바람직하나 선형연구⁽¹⁾를 참고하여 초기 가속시작부터 제동시까지의 25분 동안 측정하였다. Fig. 6은 그 결과의 일례로 G1, G2, G5에서 측정된 변형률의 변화를 보여주고 있다. 변형률의 범위는 최소 13.8 $\mu\epsilon$, 최대 351.3 $\mu\epsilon$ 로 나타났으며 파손지점인 G2와 G5를 작용응력으로

환산하면 각각 48.3 MPa과 72 MPa이다. 이 경우 응력비 R은 각각 -0.75와 -0.43이다.

3.2 유한요소해석

화차의 제동에 의한 엔드빔에 발생하는 위험부위의 파악과 응력계산을 위해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 7은 해석대상인 화차 대차의 하중 및 경계조건과 엔드빔의 브라켓 힌지에 하중을 작용하는 방법을 나타낸다. 유한요소해석을 위한 모델은 CATIA Ver9에서 모델링하고, 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Ver7.1에서 요소망을 생성하여 해석을 수행하였다. 사용한 요소는 대차에 사용한 사면체 요소(20-node brick shaped element)와 엔드빔의 브라켓 힌지에 작용하는 하중을 구현하기 위해서 빔요소(2-node beam element in 3-D)를 사용하여 커플링(coupling) 구축을 하였다.

커플링은 두 개 이상의 자유도(degree of freedom)의 값은 모르지만 강제로 같은 값을 갖도록 정의할 때 사용한다. 보통 부분모델에 대칭조건을 부여할 때, 같은 위치에 있는 두 절점 사이에 핀, 힌지, 유니버설의 거동을 정의할 때 일반적으로 이용된다.

엔드빔의 응력해석에 사용된 경계조건은 황원주 등^(10,11)의 연구를 참조하여 대차의 형상과 하중이 센터빔을 기준으로 대칭 경계조건을 사용하고

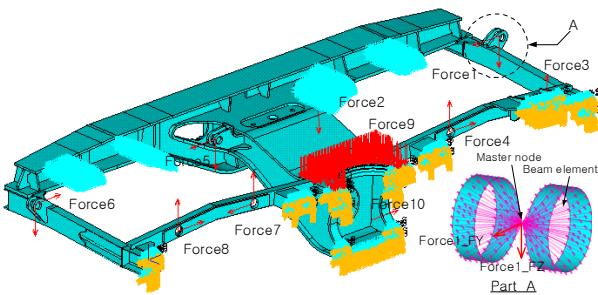


Fig. 7 Elements used for coupled effects and load, boundary condition of the freight bogie

Table 1 Mechanical properties of materials

Materials	SS400 (End beam)	SM490A (Side frame)
Tensile stress (MPa)	245	323
Yield stress (MPa)	402	490
Elastic modulus (MPa)	268×10^3	213×10^3
Poisson's ratio	0.274	0.316
Fatigue limit (MPa)	68.7	

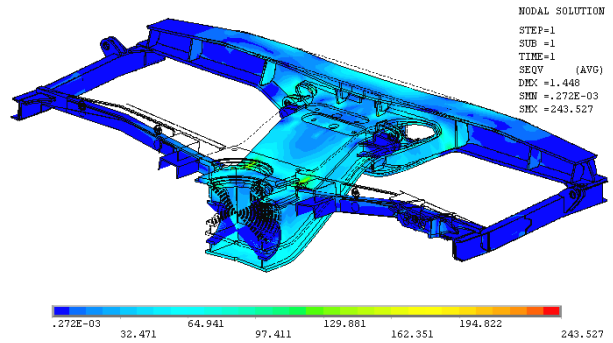


Fig. 8 Stress distribution of the freight bogie

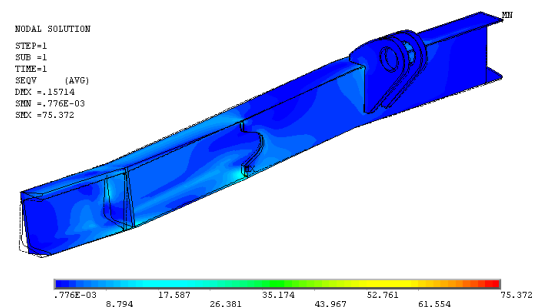


Fig. 9 Stress of end beam for brake reaction

1차 현수장치 위치를 길이방향으로 변위가 있게 하였다. 화차 대차의 작용 하중조건은 제동조건을 고려해서 JIS E4207에 규정하는 설계통칙과 선형연구^(10,11)에 따라 부하하고 갖은 용접으로 인한 엔드빔의 기계적 물성변화를 고려하기 위해 각 재질은 Table 1과 같이 구분하여 적용하였다.

Fig. 8은 용접대차가 차축에 받는 전체 수직중량을 18100 kg으로해서 제동하중을 고려한 해석 결과이고 이때 엔드빔에 발생하는 응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. 엔드빔에 발생하는 최대응력은 파손지점과 일치하는 보강판의 용접 굴곡부에 발생하였으며 이때 동응력 측정결과와 비교해서 4.5 %이내에 비교적 정확한 결과를 나타냈다.

3.3 Miner 법칙에 의한 피로수명 예측

구조물에 변동응력이 작용할 때 수명을 평가하기 위해 레인플로집계와 변동하중하에서 Miner 법칙의 등가응력 평가는 피로수명예측에 유용함이 보고되고 있다.^(1,2)

Fig. 10, 11은 가장 극악한 하중을 받는 G4에서의 레인플로집계 결과로 생성된 히스토그램과 계산된 손상을 나타내며 파손지점인 G2와 G5의 응력비 R이 각각 -0.75와 -0.43인 것을 고려하여 S-N선도는 R=-1의 경우를 이용했다. Fig. 12는

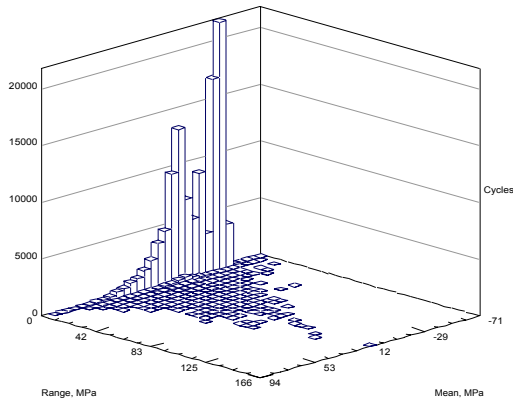


Fig. 10 A Rainflow cycle histogram of G4

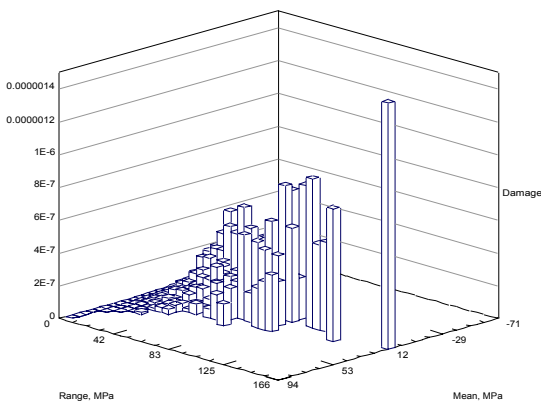


Fig. 11 The damage histogram of G4

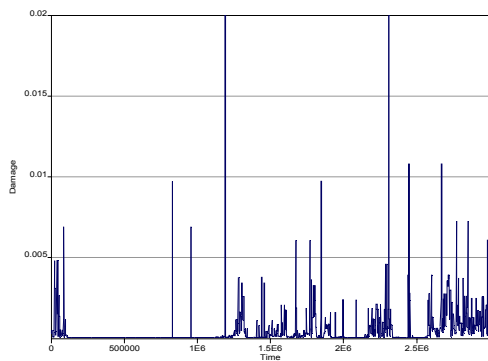


Fig. 12 Time-correlated fatigue damage of G4

Table 2 Calculated Fatigue life and cumulative damage using modified Miner rule

Position	Life	Damage	Year
G1	23.2E+6	4.31E-8	4833
G2	35350	2.83E-5	7.364
G3	36550	2.74E-5	7.614
G4	14010	7.14E-5	2.919
G5	50780	1.97E-5	10.58
G6	11.5E+6	8.69E-8	2398

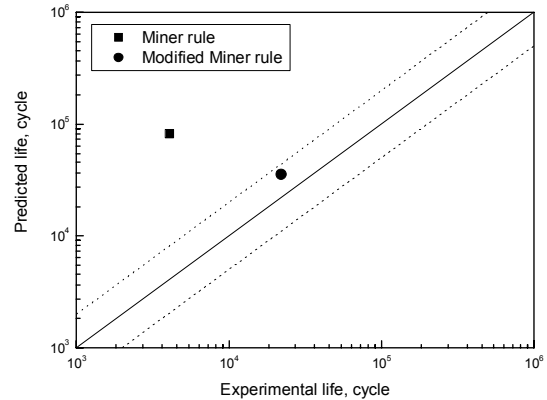


Fig. 13 comparison of predicted fatigue life and experimental fatigue life

시간에 따른 손상을 나타내며, 제동시에 손상이 커짐을 알 수 있다. Table 2는 엔드빔의 각 지점에서 피로수명 예측결과를 나타낸다. 파손부위인 G2에서 누적피로손상은 2.83E-5이고 피로수명은 7.364년이다. Fig. 13은 파손부위인 G2에서 피로수명 예측결과와 일정진폭하중하의 피로수명의 비교를 나타낸다. 수정Miner법칙이 비교적 잘 일치하며 Miner법칙은 피로수명이 과대 평가된다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 운행하중에서 측정된 동응력 데이터를 레인플로집계법을 사용하여 사이클 수와 크기를 계산하고 확률적 S-N 선도를 이용하여 누적손상법칙에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소법을 이용한 응력해석으로부터 엔드빔 보강판의 용접 굴곡부에 발생하는 응력은 75.4 MPa이고 실험으로 측정된 동응력과 4.5 %의 오차범위에서 일치하였다.

(2) 용접부의 통계적 S-N 선도와 평균응력을 고려한 레인플로집계법을 사용하여 수정 Miner 법칙을 적용한 결과 엔드빔의 파단부에서 누적손상값 D는 2.83E-5이고 예측 수명은 7.364년이다.

참고문헌

(1) Goo, B. C. and Seo, J. W., 2003, "Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Rolling Stock Structures," *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 89-94.

-이하 참고문헌 생략-