

강철도교의 잔존피로수명 평가

Remaining Fatigue Life Evaluation of Steel Railroad Bridge

김 상 효¹⁾ · 이 상 우²⁾ · 마 호 성³⁾ · 김 종 학²⁾

Kim, Sang Hyo Lee, Sang Woo Mha, Ho Seong Kim, Jong Hak

요 약 : 본 연구에서는 공용중인 강철도교의 피로에 대한 안전성을 확보하기 위해 기존의 피로손상예측이론을 바탕으로 강철도교의 피로손상 및 피로균열발생까지의 피로수명을 평가하였으며, 또한 신뢰성이론에 근거하여 사용수명에 따른 신뢰도를 평가하였다. 그리고 이러한 평가를 바탕으로 다양한 통행조건에 대해 등가열차하중을 이용한 간편한 분석기법을 제안하였다. 피로손상평가를 위하여 적용한 실동응력은 대상교량이 경험하는 다양한 하중조건에 대해 구조해석을 통해서 구해진 응력이력에 보정계수를 적용하여 구하였다. 본 연구의 결과로부터 운행특성, 즉 교행조건에 따른 유·무에 따른 잔존수명은 교행특성을 고려하지 않은 경우가 고려한 경우보다 약간 긴 것으로 평가되었다. 또한 본 연구에서 제안한 간편한 분석기법인 등가열차하중모형에 의한 잔존수명평가 결과는 상세잔존수명평가 결과와 비교하여 볼 때 그 차이가 근소한 것으로 평가되었다.

ABSTRACT : A systematic procedure to evaluate fatigue damages and to predict remaining fatigue lives is introduced for a steel railway bridge. Fatigue damages are evaluated by using the currently available fatigue damage theory. Fatigue lives with the condition of fatigue crack initiation are estimated by the probabilistic approach based on the reliability theory as well as the simplified procedure. A equivalent deterministic procedure is also suggested to assess the remaining fatigue life under various traffic conditions. Numerical simulations are used to assess dynamic stress histories with correction factors. Loading models are obtained from the passenger volume data. Train coincidences are also considered. Based on the results, the fatigue life is found to be underestimated by without considering the coincidence of trains on the bridge. The simplified method proposed in this study are found to yield approximately the same results as the systematic procedure.

핵심단어 : 신뢰도, 피로수명, 보정계수, 응력이력, 피로손상계수, 누적피로손상

KEYWORDS : Reliability, Fatigue life, Correction factor, Stress history, Fatigue damage coefficient, Cumulative fatigue damage

1) 정회원, 연세대학교 사회환경건축공학부 교수
2) 연세대학교 토목공학과 박사과정
3) 연세대학교 토목공학과 박사후과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 들어 성수대교의 붕괴 등에서 볼 수 있듯이 강교량의 취약부에서 피로균열의 발생 및 성장으로 인하여 부재가 파단에 이르는 붕괴사태가 발생하고 있다. 따라서 기존에 연구·정립되어온 피로손상 예측이론^(1~4)에 입각한 피로수명의 추정과 강교량의 유지보수 및 보강대책 수립에 대한 필요성이 대두되고 있다

철도교는 도로교와 달리 활하중의 크기와 작용하는 위치가 비교적 명확하여 설계응력에 가까운 과대응력이 작용할 가능성이 커지게 되고, 전체하중에서 활하중이 차지하는 비율도 높게 된다. 따라서 철도교에서는 변동하중에 의한 피로손상이 매우 중요한 구조설계 한계상태가 되며⁽⁵⁾, 강철도교량에서의 피로파괴에 대한 안전성을 확보하기 위해서 체계적인 피로수명 예측절차의 확립이 필요하다.

과거에 수행되어 온 구조물의 피로에 대한 손상평가는 주로 결정론적인 접근방법을 이용하였으나 최근 들어 이러한 결정론적인 접근방법에 의해 평가된 피로수명의 안전성을 확보하기 위하여 신뢰성이론에 근거한 확률론적인 접근방법을 이용한 피로수명평가가 수행되고 있다^(6,7). 1977년 Ang은 구조물의 피로에 대한 기존의 규정을 이용하여, 피로에 대한 신뢰도평가와 피로저항곡선에서의 신뢰성에 기초한 기준 개발을 위해 확률적인 기초를 공식화하였으며⁽⁸⁾, 1980년대 초반에는 피로에 대한 파괴역학적인 접근 또는 S-N 피로해석에 대하여 다양한 결정론적, 확률론적 접근방법이 제안되었다^(9,10).

본 연구에서는 강철도교량에 대한 잔존피로수명을 추정하기 위해서 기존에 제시되어 있는 피로손상예측이론을 바탕으로 다양한 하중모형에 대해 구조물의 피로손상 및 피로균열 발생까지의 수명을 평가하였으며, 그 결과를 신뢰성이론에 근거한 확률론적 접근방법을 이용하여 구한 피로수명과 비교·분석하였다.

2. 피로수명 평가기법

피로수명의 예측은 일반적으로 피로수명 N 과 일정진폭하중에 의한 응력범위 $\Delta\sigma$ 의 관계를 나타내는 S-N 곡선에 기초하며, 이러한 S-N 곡선은 양대수지상에서 일반적으로 선형 또는 구간선형으로 모형화된다⁽⁷⁾. 특히, 선형인 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C \quad (1)$$

여기서, C 는 주어진 부재의 상세범주에 따른 실험상수이며, m 도 역시 실험상수로 2~4의 범위를 가진다. 그러나 일반적으로 구조물에 작용하는 응력은 변동응력이므로 이러한 변동응력에 의한 피로손상을 평가하기 위해서 선형 누적피로손상 모형인 Miner의 법칙이 널리 이용되고 있다⁽¹¹⁾.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2)$$

여기서, n_i 는 특정응력범위 $\Delta\sigma_i$ 의 반복회수이며, N_i 는 $\Delta\sigma_i$ 에 대한 피로수명이다. 즉 각 응력범위에 의한 피로손상은 그 응력범위의 피로수명에 대한 반복회수의 비율에 비례하고, 피로손상은 선형으로 누적된다.

Miner의 법칙에 의해 나타나는 피로균열 발생까지의 한계상태는 각 변동응력범위 $\Delta\sigma_i$ 의 n_i 번 반복에 의한 피로손상계수 C_i 가 누적되어 대상 부재상세의 피로손상계수 C 와 같게 되는 상태로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum (\Delta\sigma_i)^m \cdot n_i = \sum C_i = C \quad (3)$$

따라서 대상교량이 공용중에 경험할 수 있는 변동응력범위와 그에 따른 반복회수를 알 수 있다면 대상교량의 피로수명을 평가할 수 있다.

일반적으로 열차가 1회 통과할 때 구조물의 특정부위에는 변동응력범위가 1회 이상 발생할 수 있으며 이 때 발생하는 변동응력범위들을 $\Delta\sigma_i$, 그에 해당하는 반복회수를 n_i 라 하면 열차가 1

회 통과함에 따라 발생하는 피로손상계수 C^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹²⁾.

$$C^* = \sum (\Delta\sigma_i)^m \cdot n_i \quad (4)$$

따라서 열차의 1회 통과에 따른 피로손상과 같은 수준의 피로손상을 주는 1회 반복에 의한 등가응력범위 $\Delta\sigma_e^*$ 는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma_e^* = [C^*]^{1/m} \quad (5)$$

교량의 공용기간에 K ($k = 1, 2, 3, \dots, K$) 종류의 열차가 통과한다고 가정하고, 각 K 종류의 열차가 1년간 통과하는 회수를 n_k 라 하면, 교량의 피로균열 발생까지의 수명 Y_r (yr)은 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Y_r = \frac{C}{\sum_{k=1}^K C_k^*} = \frac{C}{\sum_{k=1}^K (\Delta\sigma_{ek}^*)^m \cdot n_k} \quad (6)$$

여기서, $(\Delta\sigma_{ek}^*)$ 는 k 종류 열차의 1회 통과에 대한 등가응력범위이다.

3. 대상교량

본 연구에서 강교량의 중요부재에 대한 잔존피로수명을 평가하기 위하여 고려한 대상교량은 평가현재 12년 동안 공용중에 있는 교량으로 연장이 810 m인 중로교 형식이며, 3경간 연속 트러스교 3개(지간장 각 90 m)가 연결된 강트러스교이다. 대상교량의 일반도는 그림 1과 같으며, 대상교량을 운행하는 열차는 초파차량으로 열차의 편성 및 각 열차의 중량은 표 1, 표 2와 같다.

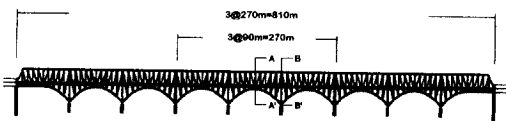


그림 1. 대상교량의 일반도

표 1. 열차편성

열차 편성	열차의 배열
10량 편성	$T_c - M_1 - M_2 - M_1 - M_2 - T - T - M_1 - M_2 - T_c$

표 2. 차량중량 (단위 : ton)

구 분	T_c	M_1	M_2	T
공차중량	33.0	42.2	41.8	31.7
만차중량	54.3	65.2	64.8	54.7

4. 하중모형에 따른 이력분석

피로수명을 평가하기 위해서는 기본적으로 대상부재가 경험하는 하중형태와 크기를 분석하고, 그에 따른 대상부재의 응답이력을 구하여야 한다. 그러나 가능한 모든 통행조건에 대해 현장실측을 통하여 응답이력을 얻는 것은 현실적으로 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 통행열차의 하중 특성 및 운행특성을 분석하여 다양한 통행조건에 대한 응답이력을 수치해석을 통하여 구하고 현장 계측자료를 바탕으로 보정하여 사용하였다.

4.1 열차하중모형

열차의 하중모형은 통행열차의 특성상 열차의 중량과 승객하중의 합으로 고려하였다. 통행하는 열차, 즉 지하철의 형식은 거의 동일하기 때문에 열차편성에 따른 열차의 중량은 변동성이 없는 고정된 값으로 가정할 수 있으나, 열차하중에 영향을 주는 또 다른 인자인 승객하중은 열차의 운행기간 별, 시간별 변화가 다양하고 이용승객의 증가, 차량운행의 개정 등에 밀접한 관계를 가지므로 어떤 특정한 값으로 모형화하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 승객하중의 모형에 따라 하중모형을 세 가지로 분류하여 적용하였으며 승객하중을 모형화하는데 있어서 계산의 편리성을 위해 혼잡률이라는 지표를 사용하였다. 혼잡률이란 하나의 차량에 승차할 수 있는 정원승객을 160명으로 산정, 이에 대한 시간대별 차량에 탑승한 인원의 정원승객에 대한 비(%)를 말한다. 여기서, 승객 1인당 평균중량은 60 kg이며, 하나의 차량에 승차 가능

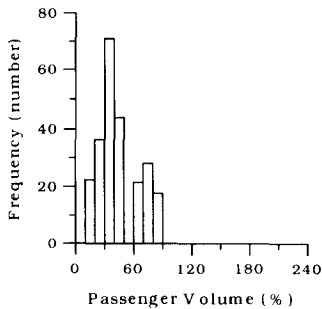
한 최대혼잡률은 240%로 가정하였다.

승객하중에 대해 적용한 세 가지 하중모형은 대상교량의 인접역에서 조사된 혼잡률분포에 대한 히스토그램을 이용한 경우(방법 1), 혼잡률분포에 대한 히스토그램에 기초한 확률분포를 이용한 경우(방법 2), 가정한 혼잡률의 확률분포로부터 운행기간을 대표할 수 있는 대표등가혼잡률을 구하여 이용한 경우(방법 3)이다.

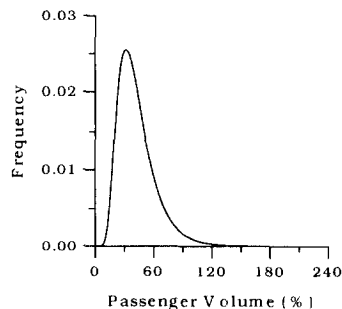
그림 2(a)는 방법 1에서 사용한 혼잡률분포에 대한 히스토그램의 한 예로서 기존의 조사자료를 바탕으로 결정되었다. 그림 2(b)는 그림 2(a)의 혼잡률분포에 대한 히스토그램을 확률분포로 모형화한 예로서 방법 2에서는 이러한 확률분포를 대수정규분포로 가정하여 이용하였으며, 혼잡률에 대한 확률분포의 통계특성값은 표 3과 같다. 방법 3에서 적용한 열차하중모형은 1일 동안 운행되는 다양한 열차하중에 의해 발생하는 총 누적손상과 같은 정도의 누적손상을 발생시키는 같은 반복수를 가지는 등가의 열차하중이다. 등가 열차하중을 결정하기 위하여 적용한 대표혼잡률은 다양한 혼잡률분포에 대하여 객관성을 가지도록 확률분포의 통계특성값을 이용하여 결정하였다. 대표혼잡률은 평균혼잡률에 표준편차를 더한 값이 적합한 것으로 결정되었다.

표 3. 혼잡률분포의 확률특성값

운행특성	주행방향	대수정규분포	
		λ	ξ
단독주행	내 선	4.0341	0.5877
	외 선	4.0012	0.4884



(a) 히스토그램



(b) 대수정규분포

그림 2. 혼잡률분포

4.2 열차의 교행특성분석

피로수명을 평가하는데 필요한 등가응력범위의 산정에 있어서 단독주행과 양방향으로의 교행이 다른 수준의 응력범위를 줌으로, 공용기간에 대상교량이 받는 응력범위를 보다 실질적으로 고려하기 위하여 운행특성을 단독주행과 양방향으로의 교행으로 구분하여 열차하중을 고려하였다. 단, 방법 3에서는 교행특성을 반영하지 않고 전체적인 운행특성이 단독주행으로만 이루어지는 것으로 고려하였다.

교행발생위치는 교행 전구간을 5개의 구간으로 구분하여 모형화하였으며, 교행 전구간은 평가현재 대상교량을 통행중인 열차가 10량편성(200 m)이므로 열차의 길이와 3경간 연속교의 특성을 고려하여 그림 3과 같이 대상교량의 중앙 3경간 연속교부분 및 그 양측으로 100 m씩을 포함하였다. 교행발생시각은 현행 열차에 대해 기존의 운행시간표를 중심으로 전후 30초씩의 시간폭을 가지는 임의의 변수를 발생시켜 인접역에서의 출발시간을 결정하고 일정속도로 운행하는 것으로 보아 대상구간에서의 교행여부를 결정하였다. 무작위로 발생시킨 변수에 대한 오차를 최소화하기 위하여 일정기간(100일) 동안의 교행특성을 분석하여 그 평균값을 사용하여 교행빈도를 모형화하였다(표 4). 이와 같은 결과를 바탕으로 방법 1과 2에서는 대상교량을 통행하는 열차의 운행회수를 1일 평균 550회로, 이 중 단독주행은 각 방향 평균 241회, 교행은 평균 34회로 모형화

하였으며, 방법 3에서는 각 방향 단독주행만 275회 운행하는 것으로 모형화 하였다.

교행에 대한 혼잡률의 적용은 각각의 교행에 대한 발생위치와 발생시각을 파악한 후, 해당 발생시간에서의 각 단독주행(내선과 외선)에 대한 혼잡률의 평균을 해당 교행발생위치의 혼잡률로 선택하였다. 즉 대상교량을 그림 3과 같이 5개의 구간으로 구분하고, 각 구간에서 발생하는 교행에 대한 각 혼잡률의 3승근평균을 대상구간의 평균 혼잡률로 이용하였다(표 5). 일반적으로 교행발생시간이 운행량이 많은 시간대에 편중되어 있어 교행 발생위치에 따른 혼잡률이 거의 유사하게 평가되었다.

표 4. 1일 평균 교행발생빈도

구 간	I	II	III	IV	V
발생 빈도	6.55	7.23	5.47	5.99	8.94
발생확률(%)	2.38	2.63	1.99	2.18	3.25

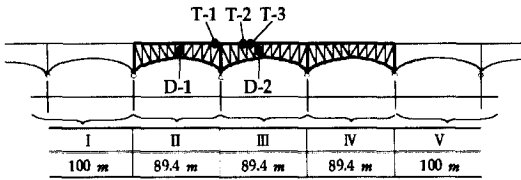
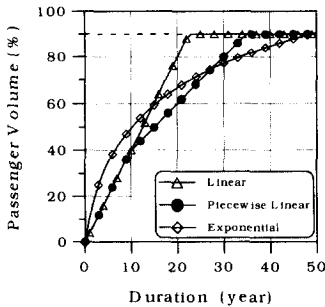


그림 3. 교행구간의 설정

표 5. 교행구간에 따른 평균혼잡률 (1일 기준)

구 간	I	II	III	IV	V
평균혼잡률(%)	68.4	64.5	66.9	65.8	63.5



(a) 혼잡률 증가량

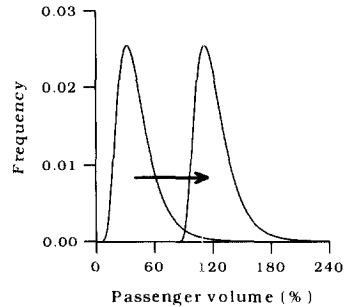
4.3 향후의 교통특성을 고려한 하중모형

향후 교통특성을 고려하는데 있어서 열차의 안전운행 특성상 열차운행빈도는 더 이상 증가하지 않는다고 가정하고, 향후의 증가하는 하중조건을 혼잡률의 증가로만 고려하였다. 과거의 조사자료에 의하면 혼잡률은 매년 약 4%씩 증가하는 경향을 보이고 있으나, 대체운송수단의 등장과 승객포화상태 등을 고려하여 향후의 혼잡률 증가는 둔화되는 추세를 보일 것으로 판단된다. 적합한 혼잡률 증가모형을 고려하기 위하여 선형모형, 구간선형모형, 지수형모형을 가정하여 각 증가모형에 따른 피로수명의 변화를 분석하였다(그림 4a). 또한 혼잡률의 증가는 최종적으로 평균 90%까지 증가하는 것으로 모형화하였으며, 향후 증가되는 혼잡률은 기존의 혼잡률분포를 일률적으로 증가시킨 분포를 바탕으로 결정하였다(그림 4b).

5. 적용사례 및 결과분석

5.1 현장계측 및 자료획득

본 연구에서는 열차의 통행조건에 따라 대상부재가 경험하는 실제 응력상태를 반영하기 위하여 현장계측을 수행하였다. 현장계측은 일반주행시험과 정속주행시험을 통해 다양한 부재에 대하여 실시하였으며, 이 중 본 연구에서 고려한 대상부재는 그림 3에 나타난 바와 같이 상현재인 T-1, T-2, T-3와 사재인 D-1, D-2이다.



(b) 혼잡률 증가분포

그림 4. 혼잡률 증가모형

일반주행시험은 하중효과를 극대화하기 위하여 혼잡률이 최대가 되는 시간대에 실시하였으며, 정속주행시험은 주행속도에 따른 동적효과를 고려하기 위하여 열차운행이 중단되는 시간동안에 공차를 이용하여 실시하였다. 또한 구조해석을 통하여 같은 하중조건에 대한 대상부재의 응답곡선을 구하였다. 그림 5는 사재에 대해 현장계측과 구조해석을 이용하여 얻어진 응답이력의 한 예로 응답의 형태가 상당히 잘 일치하고 있다.

다양한 하중조건에 대해 현장계측을 통하여 응답이력을 얻는 것은 불가능하므로 필요한 조건의 응답이력은 구조해석응답에 현장계측자료를 이용하여 결정된 보정계수(표 6)를 적용하여 구하였다. 이 때 적용된 보정계수는 주행차량에 의한 동적효과 및 해석결과와 실측결과사이의 각 부재별 변동성을 고려하여 결정되었다. 보정관계의 결정을 위해 사용한 매개변수는 최대응력범위 ($\Delta\sigma$)로 이는 1회 누적피로손상계수 (C^*)에 비해 좀더 일관성있는 결과를 주는 것으로 분석되었다.

각 하중조건별 보정된 응력이력에 대한 응력범위별 빈도해석은 구조물의 피로분석을 위한 응력범위를 산출하는데 가장 합리적으로 사용되고 있는 Rainflow 빈도추정법을 이용하였으며^[13], cut-off 비율은 피로저동에 미치는 영향이 거의 없으며, 빈도그래프상의 확률밀도함수를 왜곡시킬 수 있는 낮은 응력범위의 값들을 무시하기 위하여 최대응력범위의 25%를 사용하였다. 또한 bar width의 크기는 10 kg/cm^2 을 사용하였다.

표 6. 대상 부재별 보정계수

부재명	내선	외선	교행
상현재	T-2	0.914	0.902
	T-1	1.108	1.377
	T-3	0.856	0.876
사재	D-2	1.367	1.238
	D-1	1.091	0.965

5.2 평가절차

본 연구에서 잔존피로수명 평가를 위하여 고려한 대상부재는 교량이 경험할 수 있는 최대하중조건(혼잡률 240%의 열차에 의한 교행조건)에 의한 최대응력범위가 각 부재의 구조상세별 피로응력단절범위(Endurance level, 200만회 이상의 반복회수에 대한 허용응력범위)를 상회하는 부재이며, 사하중의 영향을 고려하여 인장응력을 경험하는 부재로 선정하였다^[14]. 선정된 부재의 피로등급은 각 인장부재에서 가장 등급이 낮은 피로등급으로 사재(D-1, D-2)의 경우는 C등급, 상현재(T-1, T-2, T-3)의 경우는 E등급이 결정되었으며, 이러한 각 부재별 피로등급은 현장 외관조사를 통하여 이루어졌다. 또한 대상부재의 파단에 따른 구조시스템의 붕괴위험도를 평가한 결과를 바탕으로 T-2, T-3는 다재하경로부재로, T-1, D-1, D-2는 단재하경로부재로 적용하였다^[14].

선정된 부재의 피로수명평가를 위한 응력이력은 혼잡률분포의 확률모형과 운행특성을 고려하여 다양한 하중조건에 대해 구조해석을 실시한

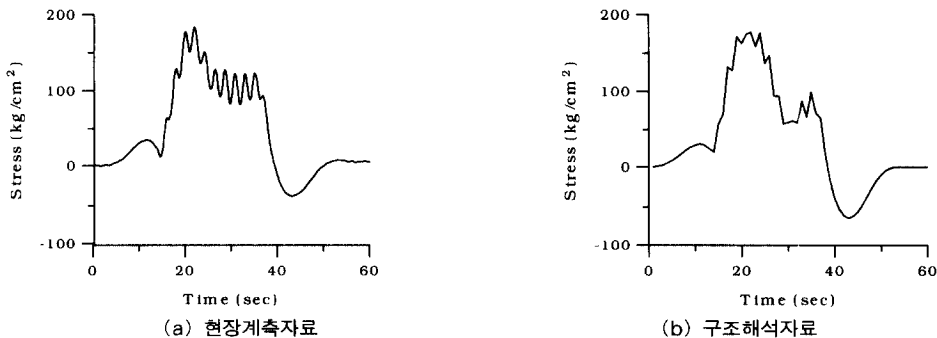


그림 5. 응답이력(사재의 경우)

후, 표 6의 부재별 보정계수를 이용하여 보정한 응력이력을 사용하였다. 빈도분석을 통하여 구한 응력범위와 운행빈도를 이용하여 제2장에서 서술한 방법에 따라 대상부재에 대한 잔존피로수명을 평가하였다. 방법 1과 3에 의해 대상부재의 잔존 피로수명을 평가하기 위해서 식 (6)에서의 피로손상계수 C 대신에 현행 관련시방서에 제시되어 있는 S-N의 관계를 이용하여 구한 허용누적피로손상계수 C_a 를 적용하였다⁽¹⁵⁾.

$$C_a = \Delta\sigma_a^m \cdot N \quad (7)$$

여기서, $\Delta\sigma_a$ 는 $N = 200$ 만회에 대해 주어져 있는 허용피로응력범위이며, $m = 3$ 이다. 표 7은 각 상세범주별로 적용된 허용누적피로손상이다.

방법 2에서는 신뢰성이론에 근거한 확률론적 접근방법에 의하여 대상부재의 잔존피로수명을 평가하였다. 상세범주별 피로손상계수 C 의 확률적인 특성은 S-N 자료의 통계적인 분석결과인 Albrecht의 확률모형(표 8)을 이용하여 분석하였다. 즉 식 (1)의 관계식에 표 8의 확률모형을 적용하여 모의분석기법을 통해 피로손상계수 C 의 확률특성을 분석하였다. 그림 6은 피로손상계수 C 의 분포를 대수정규확률지에 나타낸 결과이다. 이러한 결과를 바탕으로 강재의 피로손상계수 C 를 대수정규분포로 모형화하였다(표 9).

작용하중에 의한 누적피로손상 Q 의 확률분포는 열차하중의 확률모형과 열차의 운행특성분석을 바탕으로 다양한 하중조건에 따른 열차통행에 따른 1일

표 7. 허용누적피로손상 (단위:회 · $(kg/cm^2)^3$)

상세범주	다재하경로구조	단재하경로구조
C	1.5255×10^{15}	6.9435×10^{14}
E	3.5551×10^{14}	1.4998×10^{14}

표 8. Albrecht의 확률모형 변수

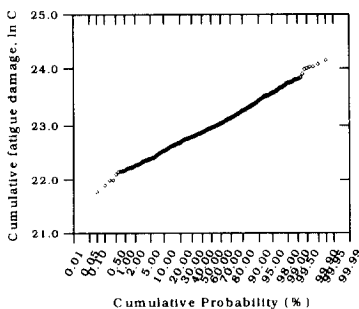
상세범주	a회귀곡선의 계수		표준편차	
	b절편(b)	기울기(m)	log N	log Δσ
A	11.121	3.178	0.2210	0.0695
B	10.870	3.372	0.1470	0.0436
C	10.085	3.097	0.1580	0.0510
D	9.6030	3.071	0.1080	0.0352
E	9.2916	3.095	0.1006	0.0325

- a. 평균회귀곡선 : $\log N = b - m \log \Delta\sigma$
 b. Δσ의 단위 : ksi

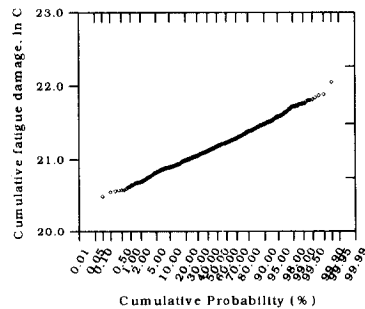
표 9. 피로손상계수 C 의 통계특성값

상세범주	대수정규분포의 특성값	
	λ	ξ
C	22.97	0.3533
E	21.19	0.2371

누적피로손상의 확률분포특성으로부터 대수정규분포로 모형화하였다. 그림 7은 1일 누적피로손상에 대한 모의분석결과와 확률분포를 대수정규확률지에 나타낸 것이다. 또한 방법 1과 방법 2에 의한 결과를 비교하기 위하여 Albrecht의 확률모형 변수를 바탕으로 상세범주에 따른 응력범위의 확률특성값과 확률분포(대수정규분포)특성을 이용하여 허용피로응력범위의 신뢰수준을 분석하였으며, 그 결과는 표 10에 나타내었다.



(a) 상세범주 C



(b) 상세범주 E

그림 6. 강재의 피로손상계수 C 의 확률적인 특성

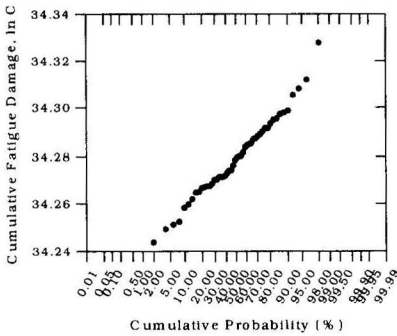


그림 7. 1일 총 누적손상 C의 확률적인 특성

표 10. 허용피로응력범위의 신뢰수준

상세 범주	다재하경로구조		단재하경로구조	
	β	비초과확률	β	비초과확률
C	2.20	98.6%	4.78	99.99%이상
E	2.00	97.7%	6.42	99.99%이상

4.3 결과분석

본 절에서는 4.2절의 평가절차에 따라 하중모형에 따른 세 가지 접근방법을 통하여 대상교량의 취약부재에 대한 잔존피로수명을 평가하였다. 여기서, 잔존피로수명은 평가현재까지 운행된 통행열차에 의한 피로손상을 제외한 피로수명이다. 표 11은 방법 1에 의한 결과를 바탕으로 운행특성에 따른 잔존피로수명의 변화를 분석한 결과이다. 여기서, 혼잡률 증가모형은 구간선형모형을 적용하였다. 표 11의 결과로부터 교행특성을 고려한 경우의 피로수명이 교행특성을 고려하지 않은 경우에 비해 부재에 따라 최대 8%정도 짧게 평가되는 것으로 나타났다. 1회 교행에 따른 누적손상은 교행의 위치에 따라 다르지만 일반적으로 단독주행에 의한 누적손상(내선과 외선의 1회 운행에 의한 누적손상의 합)에 비해 평균적으로 10~50% 정도 크게 평가되었다. 하지만 총 운행빈도 중에서 교행빈도가 차지하는 비율이 12% 정도로 작으므로, 전체적인 누적손상에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 전체적인 운행빈도에 대한 교행빈도가 큰 경우에 있어서 교행을 고려하지 않는다면 피로수명이 상대적으로 크게 과대평가될 것이므로 피로수명평가시

교행빈도에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 표 12에는 방법 2에 의해 혼잡률 증가모형별 사용수명에 대한 피로신뢰도를 평가한 결과를 나타내었다. 혼잡률 증가모형에 따른 사용수명은 각 모형별로 크게 차이가 없는 것으로 분석되었으나 각 모형 중 구간선형모형이 상대적으로 가장 길게 나타나는 것으로 평가되었다. 또한 표 12의 평가자료를 바탕으로 각 대상부재의 허용피로응력범위의 신뢰수준과 동일한 신뢰수준을 가지는 피로수명을 평가하였으며, 그 결과는 표 13과 같다. 여기서 적용한 혼잡률 증가모형은 구간선형모형이다. 방법 1의 평가결과와 비교하여 볼 때 방법 2에 의한 평가결과는 단재하경로구조(부재 T-1, D-2 등)의 경우는 약 10~20% 정도 과소평가 되며, 다재하경로구조(부재 T-2, T-3 등)의 경우는 거의 동일하게 평가되는 것으로 분석되었다. 피로수명을 평가하는데 있어서 구조부재의 거동특성에 따라 차이를 보이는 것은 구조부재의 신뢰수준에 따른 비초과확률의 차이에 의한 것으로 판단된다.

표 14는 방법 3, 즉 대표혼잡률을 가지는 등가의 열차하중모형에 의한 잔존수명평가 결과이다. 여기서도 구간선형의 혼잡률 증가모형을 적용하였다. 표 14의 결과를 살펴보면, 상대적으로 상세한 평가를 수행한 방법 1의 결과와 비교하여 그 차이가 5% 이내로 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 작용하중의 특성이 혼잡률의 변화에 의해서만 영향을 받는 경우라면, 본 연구결과와 같이 간편한 방법(방법 3)에 의해 피로수명을 간략하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

표 11. 운행특성에 따른 잔존수명 (단위:년)

부재명	상세범주	교행		
		고려시	비고려시	
상현재	T-2	E등급	54	55
	T-1		92	98
	T-3		132	137
사재	D-2	C등급	82	83
	D-1		318	344

표 12. 사용수명에 대한 피로 신뢰도평가 결과 (방법 2)

(a) D-2의 경우(허용피로응력범위의 $\beta=4.78$)

혼잡률 증가모형	향후 사용수명(년)				
	60	70	80	90	100
선형	5.20	4.79	4.43	4.11	3.82
구간선형	5.27	4.85	4.48	4.15	3.86
지수형	5.25	4.83	4.46	4.14	3.85

(b) D-1의 경우(허용피로응력범위의 $\beta=4.78$)

혼잡률 증가모형	향후 사용수명(년)				
	280	290	300	310	320
선형	4.79	4.69	4.60	4.51	4.42
구간선형	4.81	4.71	4.61	4.52	4.43
지수형	4.80	4.70	4.61	4.52	4.34

(c) T-1의 경우(허용피로응력범위의 $\beta=6.42$)

혼잡률 증가모형	향후 사용수명(년)				
	70	80	90	100	110
선형	6.72	6.18	5.70	5.27	4.88
구간선형	6.80	6.26	5.77	5.33	4.94
지수형	6.77	6.23	5.75	5.31	4.92

(d) T-2의 경우(허용피로응력범위의 $\beta=2.00$)

혼잡률 증가모형	향후 사용수명(년)				
	40	50	60	70	90
선형	—	2.12	1.39	0.77	—
구간선형	—	2.24	1.50	0.86	—
지수형	—	2.20	1.46	0.83	—

(e) T-3의 경우(허용피로응력범위의 $\beta=2.00$)

혼잡률 증가모형	향후 사용수명(년)				
	110	120	130	140	150
선형	2.68	2.32	1.99	1.69	1.40
구간선형	2.74	2.37	2.04	1.73	1.44
지수형	2.71	2.36	2.02	1.72	1.43

표 13. 확률론적 접근방법에 의한 잔존수명 (단위:년)

부재명		상세범주	방법 1	방법 2
상현재	T-2	B등급	54	53
	T-1		92	77
	T-3		132	131
사재	D-2	C등급	82	71
	D-1		318	282

표 14. 등가 열차하중모형에 의한 잔존수명 (단위:년)

부재명		상세범주	방법 1	방법 3
상현재	T-2	B등급	54	52
	T-1		92	93
	T-3		132	130
사재	D-2	C등급	82	79
	D-1		318	330

5. 결론

본 연구에서는 강철도교량에 있어서 기존에 제시되어 있는 피로손상 평가기법을 이용하여 대상교량의 피로손상 및 피로균열 발생까지의 피로수명을 평가하는 체계적인 방법론을 제시하고 실제교량에 적용하여 타당성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 대상교량의 신뢰도 분석에 있어서 강재의 피로손상계수의 확실적인 특성은 대수정규분포를 따르며, 열차의 통행에 의한 누적피로손상은 대상교량의 1일 총 누적손상에 대한 분포를 분석한 결과 대수정규분포로 모형화할 수 있었다.
2. 피로신뢰성 이론에 근거해서 피로수명의 신뢰수준을 분석한 결과, 동일한 신뢰도 수준에서 방법 1에 의해 평가된 수명이 방법 2에 의해 평가된 수명보다 약 10~20% 정도 과대평가되었다. 또한 향후의 혼잡률 증가모형에 따른 사용수명의 변화를 살펴본 결과 각 모형간의 차이는 미미하지만 사용수명은 선형모형, 지수형모형, 구간선형모형 순으로 길게 나타났다.
3. 본 연구에서는 다양한 통행조건에 대해 등가열차하중을 이용한 간편한 분석기법을 제안하였다(방법 3). 대상교량을 통행하는 열차의 하중특성이 본 연구에서와 같이 혼잡률이라는 지표에 의해서만 영향을 받는 경우라면, 피로수명은 대표혼잡률(평균혼잡률에 표준편차를 더한 값)에 대한 양방향 단독주행에 의한 응력범위와 운행빈도에 의해 간략하게 평가될 수 있을 것으로 판단되며, 평가결과는 상세잔존수명 평가 결과에 비해 그 차이가 5% 이내인 것으로 분석되었다.
4. 대상교량의 피로수명 평가시 교행의 특성을 고려하는 것이 정확한 평가결과를 주며, 교행특성을 고려하지 않은 경우에는 피로수명이 최대 8%까지 과대평가될 수 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) Schilling, C. G., Klippstein, K. H., Barsom, J. M., and Blake, G. T., "Fatigue of Welded Steel Bridge Members under Variable Amplitude Loading", NCHRP Report 188, 1979.
- (2) Mertz, D. R., Fisher, J. W., Barthelemy, D. R., and Edinger, J. A., "Fatigue Behavior of Full-Scale Welded Bridge Attachments", NCHRP Report 227, 1980.
- (3) Garg, V. K., Chu, Kuang-Han, and Wiriyachai, A., "Fatigue Life of Critical Members in a Railway Truss Bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, 1982, pp. 779~795.
- (4) Fisher, J. W., Fatigue and Fracture in Steel Bridges, A Willey-Interscience Publication, 1984.
- (5) 日本 土木學會, 國鐵建造物設計標準解說(鋼鐵道橋), 1983.
- (6) Weiwen, L., and Mohammadi, J., "Assessment of Remaining Fatigue Life of Existing Railway Riveted Bridges", ASCE, 1996, pp. 42~45.
- (7) Byers, W. G., Marley, M. J., Mohammadi, J., Nielsen, R. J., and Sarkani, S., "Fatigue Reliability Reassessment Procedures & Applications : State-of-the-Art Paper", ASCE, J. of Structural Engineering, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 271~285.
- (8) Ang, A. H. - S., "Bases for Reliability Approach to Structural Fatigue", 2nd International Conference on Structural Safety and Reliability, Munich, 1977.
- (9) Nolan, C. S. and Albrecht, P., Load and Resistance Factor Design of Steel Structures for Fatigue, Research Report, Univ. of Maryland, 1983.
- (10) Albrecht, P., "S - N Fatigue Reliability Analysis of Highway Bridges", ASTM STP 798, 1983, pp. 184~204.
- (11) Miner, M. A., "Cumulative Damage in Fatigue", Trans. ASME, J. of Applied Mechanics, Vol. 67 A, 1945, pp 159~164.
- (12) Barsom, J. M., "Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading in ASTM A514 - B Steel", ASTM STP 536, 1973, pp. 147~167.
- (13) Frýba, L., Dynamics of Railway Bridges, Thomas Telford Services Ltd., 1996.
- (14) 대한토목학회, 시설안전관리공단, 당산철교 증거보전사건 감정연구 보고서, 1997.
- (15) 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.

(접수일자 : 1999년 6월 8일)