정성분석기법을 이용한 공용중인 강철도교의 잔존피로수명평가에 관한 연구

A Study of Fatigue Life Evaluation for the Servicing Railway Steel Bridge

박용걸* 최정열**
Park, Yong-Gul Choi, Jung-Youl

ABSTRACT

Most design practices have not taken advantage of the advanced theories in the modern fracture mechanics and finite element analysis due to complexity of analysis as well as the large quantity of vaguely defined parameters in actual designs. This paper considers fatigue problems in bridge structures using effective analytical and design tools from the field of qualitative constraint reasoning. A set of software modules was developed for fatigue analysis and evaluation, which is easily applicable in engineering practices of bridge designers. The software modules integrate techniques in the field of knowledge representation and qualitative reasoning, into the conventional fatigue analysis. The techniques enable the use complex analysis formulations to tackle practical problems with uncertainties, and present the design outcome in two-dimensional design space. Appropriate engineering assumptions and judgments in carrying out these procedures, often the most difficult part for practicing engineers, can be partially produced by using qualitative reasoning to define the trends and ranges, interval constraint analysis to derive the controlling parameters, as well as design space to account for practical experience. This paper depicts a way of complex analysis to practical engineering designs with qualitative reasoning.

1. 서 론

강재 피로에 관한 설계 및 해석은 해석 자체의 복잡성 이외에 요구되는 많은 입력 변수들로 인해 설계 단계에서의 불확실성이 발생한다. 따라서 경험과 정확한 설계 데이터가 부족할 때 불확실성을 줄일 수 있고 판단을 도울 수 있는 설계 및 해석도구를 필요로 하게 되었다. 본 논문에서는 이러한 설계에서의 불확실성과 복잡성을 줄일 수 있는 설계 도구를 발전시키려 노력했으며 그것으로 하나의 해법 자체가 단일 치수로 나타나는 것이 아니라 어떤 영역으로 표시되어 선택의 폭을 제시함으로서 판단할 수 있게 되었다. 따라서 본 논문에서는 공용중인 강철도교량의 잔존피로수명을 평가하는 데에 정성분석기법을 도입하여 기존의 평가결과와 비교, 분석하고 각국의 피로설계규준에 대한 검토를 통해 합리적이고 효율적인 피로설계 및 잔존피로수명 산정방법을 제시하고자 한다. 대상구조물의 잔존피로수명 산정을 위해 공용중인 강철도교량에서 활하중 변동응력에 의한 응력이력과형을 레인플로우법을 이용하여 응력빈도히스토그램을 작성하고, 이 자료를 통계 처리하여 RMC 등가응력을 산정한 후 측정 대상부위에 대한 잔존피로수명을 분석하여 각국 규준을 고려한 정성분석기법에 적용하였다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원
** 서울산업대학교 석사과정, 학생회원

2. 본 론

2.1 누적피로손상도 및 잔존피로수명 산정

측정된 응력이력파형은 레인플로우법에 의해 응력빈도히스토그램을 작성하고 피로손상도는 식(2.1)에 의해 구할 수 있다.

$$D_f = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = \frac{N_{eq}}{N_o} \tag{2.1}$$

여기서 N_i는 응력범위 σ_{ri}에 대한 피로수명이다.

$N_o = 2\times10^6$회 피로강도에 해당하는 응력범위의 경우 등가반복횟수 $N_{eq(dec)}$와 피로수명 Y_r은 식(2.2)과 식(2.3)와 같다.

$$N_{eq(dec)} = \sum_{i=1}^{k} n_i \left\{ \frac{\Delta\sigma_{ri}}{\Delta\sigma_{fo}} \right\}^{m} \tag{2.2}$$

$$Y_r = \frac{N_o}{N_{eq(dec)} \times 365} (년) \tag{2.3}$$

본 연구에서는 설계 교량에서의 변동응력하에서 피로한계 이하의 응력범위에 의해서 피로피해가 발생하는 특성을 고려하여 피로한계 이하의 응력범위의 영향을 고려하여 피로수명을 무한대로 간주하지 않고 피로한계 이하까지 동일한 기울기로 연장해서 피로수명을 구하는 방법인 수정 Miner법칙(Modified Miner's Rule)을 피로수명 산출시 적용하였다.

등가응력 범위는 응력변동폭이 일정하지 않은 변동응력이 구조부재의 피로수명에 영향을 미치는 정도를 정량적으로 평가하기 위해서 변동진폭응력을 일정진폭응력으로 치환하여 등가응력산정시 RMC(Root Mean Cubic)응력을 사용하였다.

2.2 정성적 판단기법에 의한 분석

부등제한요소(Inequality constraints)는 공간해(space solution)라 불리는 일련의 해를 정의한다. 현재 공간적 해를 구하기가 어렵고 다루기도 어렵기 때문에 하나의 단일해가 채택되고 있으나 공간해를 이용하는 것은 보다 확실한 판단의 근거를 제시해 준다는 이점이 있다. 정성적 판단은 공간해를 다루는 기법 중의 한가지로 구속 조건으로부터 공간해를 도출한다. 정성 판단 기법의 가장 중요한 조건은 구속만족도(constraint satisfaction)이다. 설계엽무는 구속 만족 문제(constraint satisfaction problem, CSP)로 표현될 수 있다. CSP는 일련의 변수들로 정의되고 각각의 변수들은 일정한 범위를 갖고 있으며 구속조건으로 불리는 관계들이 변수 값을 제한하며, 설계식에서의 상대 변수와 설계 범주를 표현하는 등식과 부등식으로 제한된다. CSP 접근법은 하나의 해법을 제시하고 모든 구속 조건을 만족하는 하나의 단일 변수를 찾고 그 범위를 제시한다.

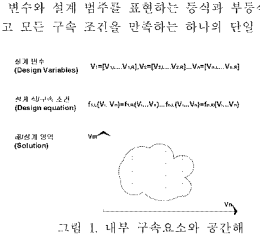


그림 1. 내부 구속요소와 공간해

function NC3(S : constraint set, B : domain) : domain
% Output domain is necessarily included in the input domain
begin
  Queue all constraints from S in Q
  repeat
    Select a constraint c from Q
    $B' \leftarrow$ narrow(B,c) *% Narrow down B with respect to c*
    if $B' = \Theta$ **then return** Θ *% Inconsistency of the constraint system*
    Let $S' = \{c \in S \mid \exists v \in \mathrm{Var}(c), B'_v \subset B_v\}$
    % Queue the constraints whose variables' domains have changed
    $Q \leftarrow (Q \cup S') \setminus \{c\}$ *% Delete c from Q*
    $B \leftarrow B'$
  until Q is empty
  return B
end

그림 2. 영역 함축 알고리즘

변수들(v1...vn)을 포함하는 일련의 제한들(C)과 가능한 수치들을 대표하는 실수형 변수(V1...Vn)들이 주어진 전달요소(interval propagation) 그리고 일련의 영역(R1...Rn)을 분리하기 위한 정성적 과정들이 주요 개념이라 할 수 있다. 그러한 것들을 계산하기 위해서 검색 과정이 초기 변수(V1...Vn)들로부터 시작되고 다음 단계로 진행되어 간다. 속아내는 과정에서는 수식의 관계가 이용된다. 그림 2.는 입력 영역을 함축하여 모든 제한 사항을 만족하도록 하는 전형적인 영역 함축 알고리즘을 설명하고 있다.

2.3 정성분석기법을 이용한 피로수명예측

피로 문제를 고려하여 강철도 교량을 설계하기 위해서는 규준 허용치에서 벗어나는 모든 변수 즉, 응력 레벨과 범위 등부터 체크해야 하지만 입력 변수의 낮은 신뢰성이 그 계산 결과를 더욱 불안정하게 한다. 따라서 본 연구에서 제시하는 정성적 모듈은 입력 변수들을 하나의 수치대신 범위로 표현함으로서 계산 결과를 공간이나 영역의 형태로 나타내며 제한 범위는 단일 수치를 입력하는 것 보다 신뢰성을 갖고 불확실성은 감소하게 될 것이다.

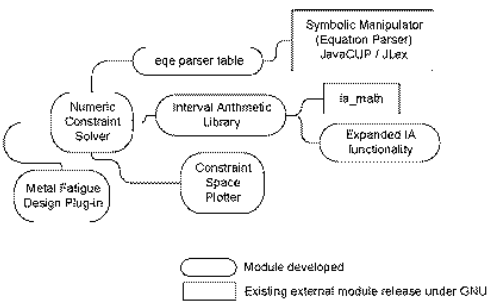


그림 3. 정성적 시스템의 구축

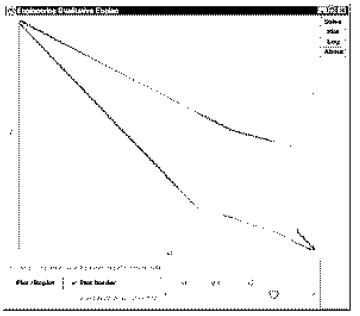


그림 4. 여러 규준을 이용한 공간해의 예

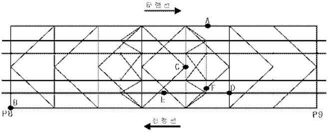
그림 3.은 강철도 교량 피로설계를 위한 정성적 시스템(Qualitative Engineering System, QES)의 구성 요소를 나타낸 것이다. 제한 범위와 평균치는 수치 계산과 판단의 기본이다. 오늘날 주요 설계 규준에서 제시하는 피로 계산들이 응력-수명 곡선(S-N curve)에 기초를 두고 있지만 실제 함축된 설계 변수는 다양하여 입력 요소와 설계 변수 사이에 많은 차이가 있기 때문에 단일 수치로 나타나는 기존의 계산을 가지고 여러 규준을 비교하기는 어렵다. 그러나 정성 판단 기법을 이용함으로서 입력 변수에 존재하는 불확실성뿐 아니라 범위의 다양성을 설계 공간 개념에 의해 간단히 표현할 수 있다. 그림 4.는 다양한 설계규준을 적용하여 표현한 응력 레벨과 수명 곡선의 예이다.

3. 분석대상

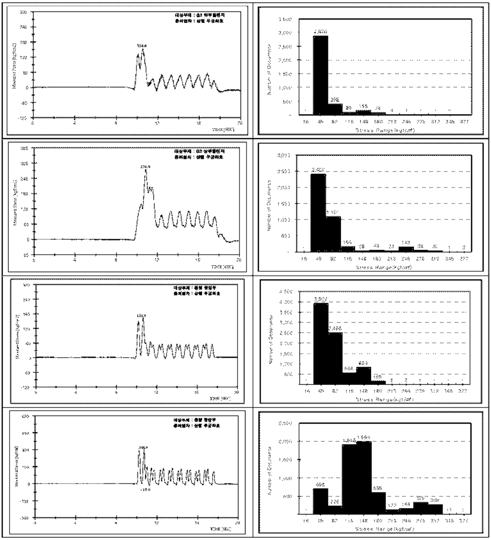
철도교에 있어서 피로손상 발생에 따른 피로수명 산정 및 평가를 하게 되는 경우, 교량을 통과하는 열차의 중량과 그 빈도수가 큰 영향을 주므로 잔존 피로수명평가를 위해 열차에 의하여 반생되는 변동응력을 측정하여 응력범위와 그 발생빈도를 분석하였다.

표 1. 연구대상교량의 현황 및 측정대상 부재

구 분		A 교	측정대상 부재	
준공년도		1944	<주부재>	<부부재>
상부구조	판형교	3경간연속(7련):481.85m	· 주형(플랜지) - 중앙부 : A - 지점부 : B	· 세로보 : E · 가로보 : C · 세로보연결부 : D · 수평브레이싱 : F
총 연 장		1,112.7m (31경간)		
단 복 선		복 선		
설계하중		LS - 25		



4. 분석결과



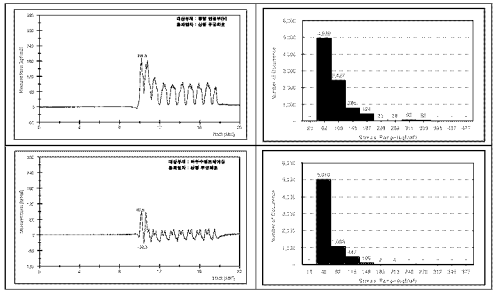


그림 5. 대상부위별 응력빈도 히스토그램

표 3. 대상부위별 응력과형에 따른 응력범위 및 잔존피로수명 분석결과(공용년수 : 56년)

부 재 명	최대응력 (MPa)	최소응력 (MPa)	응력범위 (MPa)	피로 상세	허용응력범위 (MPa)	피로손상도 (Df)	피로 수명 (년)	잔존 피로수명 (년)
주형 중앙부(하부)	15.1	-	15.1	D	55	0.00087332	1,145	1,089
주형 지점부(상부)	26.9	-	26.9	D	55	0.00298682	335	279
가로보(하부)	16.2	-	16.2	D	69	0.00171890	582	526
세로보(하부)	30.3	-1.8	32.1	A	165	0.00045719	2,187	2,131
세로보 연결부	18.8	-	18.8	D	69	0.00402583	248	192
하부 수평브레이싱	8.6	-3.2	11.8	-	-	-	-	-

응력과형에 따른 응력범위분석과 그에 따른 피로손상도를 대상부위별로 국내의 피로설계규준 적용사의 잔존피로수명은 표 4.와 같으며, 본 해석결과는 부식을 고려하지 않은 상태에서의 피로수명이다.

표 5. 각국 피로설계규준별 잔존피로수명 산정 및 비교

부 재 명	허용피로응력범위 (MPa)			누적피로손상도(Di)			피로수명(년)			잔존피로수명(년) [공용기간 : 56년]		
	KOR	UIC	JSSC	KOR	UIC	JSSC	KOR	UIC	JSSC	KOR	UIC	JSSC
주형중앙부	55	57	86	8.73E-4	7.86E-4	2.28E-4	1,145	1,272	4,398	1,089	1,216	4,312
주형지점부	55	57	86	2.99E-3	2.68E-3	7.82E-3	335	372	1,277	279	316	1,221
가로보	69	71	123	1.72E-3	1.57E-3	3.02E-3	582	638	3,313	526	582	3,257
세로보	165	169	177	4.57E-4	4.26E-4	3.71E-4	1,602	2,347	2,690	2,131	2,291	2,634
세로보연결부	69	71	123	4.03E-3	3.13E-3	7.07E-4	248	319	1,414	192	263	1,358

※ KOR : 한국, UIC : 유럽, JSSC : 일본

각국의 피로설계규준에 따라 동일부재에 대한 잔존피로수명평가를 수행한 결과 규준별 편차가 상당히 크게 나타났다. 이에 정성적 판단기법을 이용하여 3가지 규준의 공통된 영역(공간해)을 도출하여 합리적인 피로설계 및 해석을 위한 범위를 구하면 다음과 같다.

정성적 판단기법을 통한 대상교량의 주형지점부에 대한 잔존피로수명평가를 위해 동일한 설계변수가 입력되었고 3가지 각국 규준, 즉, KOR(Korea), JSSC(Japan) 그리고 UIC(Europe)을 적용

하여 적합한 피로설계를 위한 공간해를 보여준다. 그 결과 각국의 설계규준별 응력레벨과 수명곡선으로 표현되었으며, 표 6.과 같은 결과를 도출하였다.

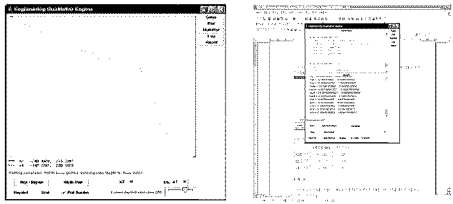


그림 6. 입력데이터 및 출력결과

표 6. 정성분석기법에 의한 주형지점부에 대한 응력레벨-수명 비교

	응력레벨(MPa)	피로수명(년)
KOR 규준	-63~242	313
JSSC 규준	-240~275	1064
UIC 규준	-82~269	351

5. 결 론

이상과 같은 정성분석기법의 강철도교 잔존피로수명 평가에 적용을 위한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 국내 규준은 유럽 규준과는 거의 일치하였으나 일본규정 보다 강철도 부재의 피로수명을 3.4배 안전측으로 평가하고 있다.

2) 면내·외 휨을 받는 강철도교의 주, 부부재의 잔존피로수명을 산정하기 위한 국내 규준의 보완이 필요하다.

3) 정성적 판단기법은 복잡하고 불확실한 점들을 설계변수와 제한 사항의 명확하지 않음에도 불구하고 효과적으로 다룰 수 있게 되었다. 설계 변수와 결과를 공간에 나타냄으로서 설계자들로 하여금 그들의 현재 지식과 경험을 이용할 수 있는 이상적인 방법을 제공한다. 향후 수천의 제한 조건을 갖는 대형 문제를 효과적으로 분석하기 위한 수치·판단 알고리듬의 최적화가 필요하다.

6. 참고문헌

1. 철도청, "강철도교 잔존수명 평가 및 유지관리기법 개발" 2003
2. 이종득, "Simulation에 의한 鋼鐵道橋의 疲勞壽命 評價" 1992 철도대학 논문집, 1992
3. 최준혁, "국내 강철도 교량의 충격계수 및 응력빈도분포의 평가" 1997 한국강구조학회 논문집
4. 김지훈, "실측응력 및 시뮬레이션에 의한 트러스 철도교의 피로피해도 분석" 2001
5. Ye Zhou, "Engineering Qualitative Analysis and Its Application on Fatigue Design Steel Structures," PhD Thesis, University of British Columbia, 2003.
6. J. G. Cleary, "Logical Arithmetic," Future Computing Systems, 1987.