

# 피로손상이 발생한 강트러스철도교의 응력이력계측 및 피로수명평가

장동일 · 경갑수\* · 조광현\*\* · 홍성욱\*\*\*†

한양대학교 도시환경건설공학과 · \*한국도로공사 도로연구소

\*\*한양대학교 토목공학과 · \*\*\*한림정보산업대학 토목과

(1999. 7. 2. 접수 / 2000. 3. 17. 채택)

## Fatigue Life Assessment and Stress History Measurement of Steel Truss Railway Bridge occurring Fatigue Damages

Dong-Il Chang · Kab-Soo Kyung\* · Kwang-Hyun Cho\*\* · Sung-Wook Hong\*\*\*†

Department of Civil Engineering, HanYang University

\*Highway Research Center, Korea Highway Corporation

\*\*Department of Civil Engineering, HanYang University

\*\*\*Department of Civil Engineering, Hallym College of Information & Industry

(Received July 2, 1999 / Accepted March 17, 2000)

**Abstract :** In this study, the fatigue life assessments of steel railway bridge in Japan National Railway were carried out. This railway bridge has been under in service from 1957, and fatigue damages were occurred at bead toe of upper part of vertical stiffeners of stringers, bead toes of scallop in lower part of vertical stiffeners in stringers and crossings of cross beams and stringers. From this study, a series of field tests were carried out by stress history measurement about above mentioned points. And as a results of stress histogram analysis, cumulative fatigue damage rate and fatigue life of these members should be calculate quantitatively. And from this estimation technique, cumulative fatigue damage rate and fatigue life of this railway bridge were strongly affected in passing tonage every year and the histories of live load.

### 1. 서론

#### 1.1. 연구배경 및 목적

본 연구대상 교량은 일본의 JR 동일본에서 관찰하고 있는 와렌트러스 형식의 강철도교량으로서 1957년에 개통해서 현재까지 공용중에 있으며, 1998년에 교량전체에 대한 도장을 실시한 보수이력을 가지고 있다.

또한 1998년 12월부터 실시한 본 대상교량에 대한 외관조사 결과 세로보와 가로보 교차부 상부플랜지 용접부에서 발생해서 복부판을 관통한 균열, 세로보 수직보강재 상단 용접지단부를 따

라서 발생한 균열, 세로보 수직보강재 하단부 스퀘어부의 용접지단부에서 발생하고 복부판으로 성장한 균열 등의 피로손상사례가 관찰되었다.

따라서 본 연구에서는 대상교량의 피로손상부에 대해서 실동하중(實働荷重)하에서 응력이력을 계측하고 피로수명을 산정하였으며, 이 결과를 토대로 피로균열의 발생원인을 정량적으로 규명하였다.

#### 1.2. 대상교량의 개요

본 연구대상 교량은 Table 1에서 나타낸 바와 같이 1957년에 개통되어 현재까지 공용중에 있는 와렌트러스 형식의 단선 강철도교량으로써 대상교량의 종단면도와 횡단면도는 Fig. 1과 같다.

† To whom correspondence should be addressed.  
swhong@sun.hallym-c.ac.kr

Table 1. Synopsis of this bridge

교 량 명	JR 동일본 ○○선 ○○교
교 량 형 식	와렌트러스(Warren Truss)
공 용 기 간	1957년 ~ 현재 (1998년 재도장)
지 간 장	62.4m
폭 원	4.7m (단선)
세 로 보 간 격	1.5m
가 로 보 간 격	7.8m

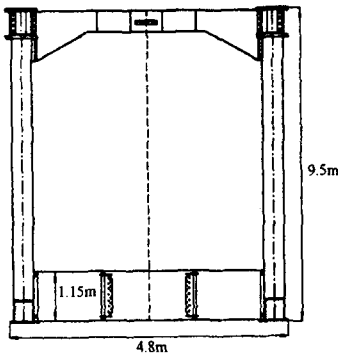
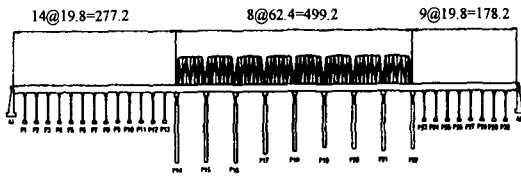


Fig. 1. Dimensions of this bridge

## 2. 손상개요

일반적으로 세계 각국에 있어서 피로 및 취성 파괴를 원인으로 하는 강교량에 있어서의 피로 손상사례는 다수 보고되고 있다<sup>2,5)</sup>.

이와 같이 피로는 강교량의 공용년수가 경과함에 따라서 구조부재의 기능성(안전성)과 사용성을 저하시키는 주요한 인자로써 작용한다.

日本土木學會에서는 구조부재의 피로손상에 가장 영향을 미치는 인자로써 일본 및 기타 외국에서 피로손상의 원인별 사례수를 Fig. 2와 같이 나타내고 있다<sup>3)</sup>.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 일본이나 기타 외국의 경우 초기결함과 이로 인한 응력집중 및 면외응력으로 인해서 발생하는 2차응력(Secondary Stress)이 피로손상원인의 약 80%를 차지하고 있

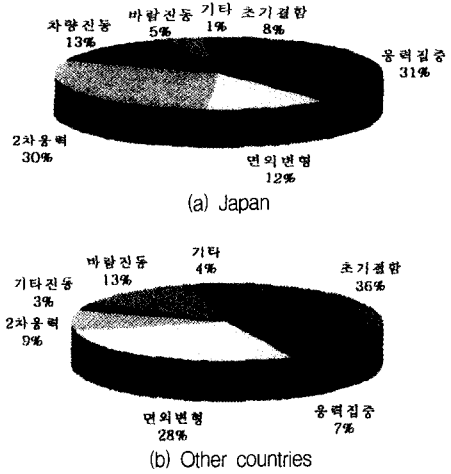


Fig. 2. Causes of fatigue damage

을 정도로 강교량에서의 피로손상은 일반적으로 부재의 연결부 또는 접합부에서 발생한다. 특히 가로보, 세로보, 수직브레이싱, 수평브레이싱 등 2차부재와 주형 등의 1차부재와의 연결부에서 주로 발생한다. 본 연구에서 대상으로 한 피로손상 또한 앞에서 설명한 바와 같이 주로 부재의 연결부나 접합부에서 발생하였는데 본 연구에서 대상으로 한 피로손상의 유형을 다음과 같이 3가지로 구분하였다.

### 2.1. 세로보 수직보강재 하단부

본 피로균열은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 세로보 수직보강재 하단부 돌림용접부의 복부판 측 용접지단부 또는 용접비드에서 발생하고 용접지단부를 따라 복부판을 관통해서 약 60mm 정도 성장한 상태이었다.

이와 같은 형태의 피로균열은 미국 오하이오

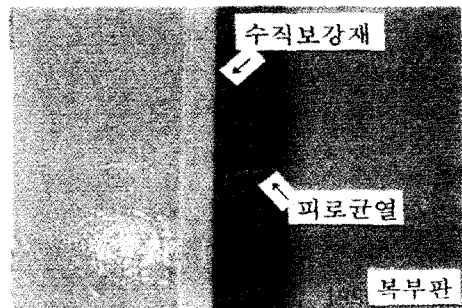


Fig. 3. Fatigue crack in the lower part of vertical stiffener in stringer

(Ohio)주의 Cleveland I-90 Conral 과선교와 I-480 Cuyahoga River Bridge에서도 보고된 바 있다<sup>1,9)</sup>.

### 2.2. 세로보 수직보강재 상단부

본 피로균열은 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 수직보강재 상단부의 외측 용접지단부에서 발생하고 용접선을 따라서 상상해서 최종적으로 전 용접선에 걸쳐서 성장하였다.

Fig. 4와 같은 형태의 피로균열은 수직보강재 외측 돌림용접부의 용접지단부에서 따로 나타나지만 시간중양부에서는 수직보강재 용접부의 전 체폭에 걸쳐서 발생한 경우도 있다.

특히 본 형태의 피로균열은 가로보 또는 수직 브레이싱이 부착되어 있지 않은 중간수직보강재의 상단부에서 자주 발생하는 것이 특징이다.

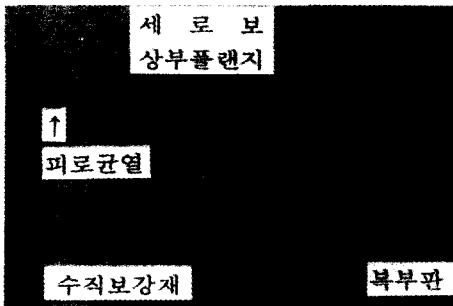


Fig. 4. Fatigue crack in the upper part of vertical stiffener in stringer

### 2.3. 세로보와 가로보 교차부

본 피로균열은 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 세로보 단부에서 상부플랜지와 웨브를 연결하는 필렛용접부의 용접지단부에서 발생하고 세로보 상단의 용접지단부를 따라서 수평방향으로 성장

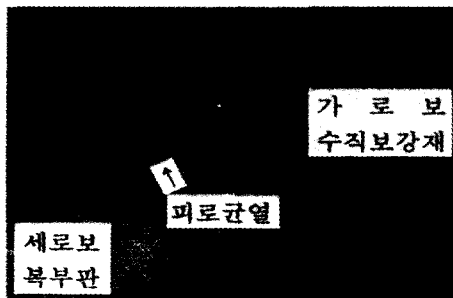


Fig. 5. Fatigue crack in crossings between stringers and cross beam

한 후 성장방향을 바꾸어 복부판을 관통균열의 형태로써 약 45°방향으로 100mm 정도 성장한 상태이었다.

이와 같은 형태의 피로균열은 미국의 위스콘신(Wisconsin)주의 Prairie Du Chien과 아이오와(Iowa)주의 Marquette를 연결하는 Prairie Du Chien Bridge<sup>1)</sup>와 한국의 당산철교<sup>6)</sup> 등에서도 보고된 바 있다.

## 3. 실교량 측정

### 3.1. 측정항목 및 측정위치

교량의 안전성 및 사용성을 평가하는데 있어서 대상교량에 대한 실교량측정은 실제로 교량에서 발생하고 있는 거동, 즉 응력이나 변형을 정량적으로 파악하는데 있어서 가장 적절하고 합리적인 자료를 제공한다<sup>2)</sup>. 따라서 본 연구에서는 강철도교량의 건전성 및 피로안전성을 정량적으로 평가하기 위해서 (財)鐵道總合技術研究所에서 개발한 철도교량 진단시스템인 BMC System을 이용하였다. 본 시스템은 강철도교량에서 실교량 측정시 현장계측 및 해석을 수행하는 장치로써 강철도교의 내하력과 잔존수명 등의 건전성을 정량적으로 평가하는 것으로, 이와 같은 건전성을 정량적으로 평가하기 위해서 필요한 기준은 일본의 鋼鐵道橋保守標準<sup>10,11)</sup>과 鐵道總合技術研究所<sup>13~15)</sup>와 日本鋼構造協會<sup>4)</sup>에서 제시하고 있는 피로평가기준에 근거해서 자동으로 평가한다.

본 연구대상 교량의 실동 응력을 평가하기 위한 게이지 부착위치는 Table 2 및 Fig. 6과 같다.

Table 2. Attachment points of strain gauge

게이지 번호	측정대상부분	게이지방향
LSSW-1X1	세로보, 가로보 교차부 균열선단	균열선단
LSSW-2X1	세로보 단부 상부플랜지	복부판내측
LSSW-2X2	세로보 단부 상부플랜지	복부판외측
LSSW-3X1	수직보강재 하단부	수직방향
LSSW-4X1	수직보강재 하단부	수직방향
LSZW-1X1	수직보강재 상단부	수직방향
NSSL-1X1	세로보 중앙부 하부플랜지	교축방향
LSZW-2X1	수직보강재 상단부 (내측)	수직방향
LSZW-2X2	수직보강재 상단부 (외측)	수직방향

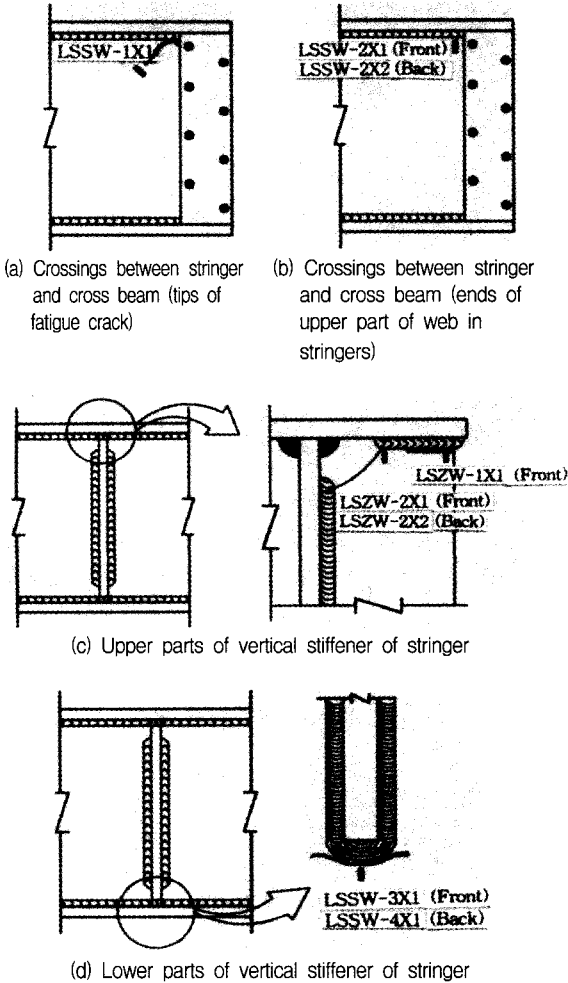


Fig. 6. Attachment points of strain gauge

또한 본 연구에서 이용한 측정기기의 일례를 나타내면 Table 3과 같다.

Table 3. Examples of measuring systems

제품명	제작소	형식
BMC System	BMC	Fatidag System
단축케이블	共和電業	KFW-5-120-CI
BMC Bridge	BMC	-
연장케이블	BMC	-
컴퓨터	NEC	PC-9801

### 3.2. 측정결과

각 게이지 부착위치별 측정결과의 일례를 나타내면 Fig. 7과 같다.

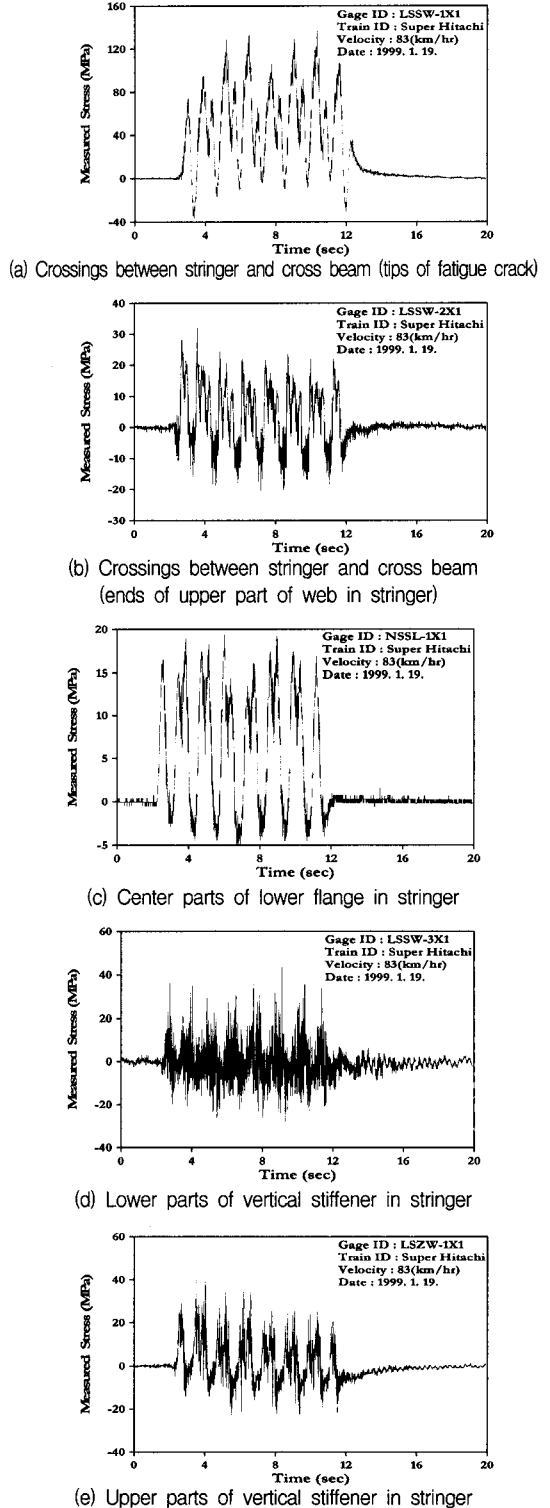


Fig. 7. Examples of stress history measurements

Fig. 7의 실동응력파형에서 알 수 있는 바와 같이 주부재, 즉 세로보 하부플랜지와 복부판의 피로균열 선단부에서는 1차응력이 지배적으로 작용하고 있지만 2차부재, 즉 수직보강재 상단부와 하단부, 세로보 단부의 복부판 상단부에서는 1차응력외에 면외응력에 의한 2차응력이 중첩해서 작용하고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 피로 균열 선단부나 2차부재의 용접지단부에 작용하는 국부응력은 주부재에 작용하는 공칭응력에 비해서 약 8배 정도 크게 작용하고 있었다.

한편 Fig. 7의 결과를 이용해서 산출한 응력빈도 히스토그램의 일례는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 RMC 방법을 이용해서 응력빈도 히스토그램으로부터 산정한 등가응력범위는 2차부재의 경우 응력범위의 하한계보다 크게 나타나고 있으며, 이 결과로부터  $2 \times 10^6$ 회 피로강도에 대한 등가반복회수는 약 2~23 (cycles)임을 알 수 있었다. 그러나 1차부재의 경우 등가응력범위가 응력범위의 하한계보

다 작게 나타나고 있으며,  $2 \times 10^6$ 회 피로강도에 대한 등가반복회수는 0(cycles)임을 알 수 있었다.

### 3.3. 피로평가

#### 3.3.1. 피로평가방법

피로는 미시적인 손상이 부재의 내부에 누적되기 때문에 열화 및 손상정도를 육안으로 확인하는 것은 곤란하므로 열화 및 손상정도가 부재의 표면에 나타나는 경우에 한해서 육안으로 확인할 수 있다<sup>12)</sup>. 이와 같이 피로는 실패량 측정을 통해서 그 상태를 파악하는 것이 가장 합리적인 방법인데<sup>6,7)</sup> 이 방법에 의해서 피로가 누적되는 비율을 산정하고 이것을 “피로손상도”라고 정의한다. 또한 피로에 의해서 부재의 기능이 상실될 때까지의 시간을 “피로수명”이라고 정의하고 피로수명에서 현재까지의 “공용년수”를 제외하면 구조물의 “잔존수명”을 산정할 수 있다<sup>13)</sup>. 이와 같이 구조물의 피로손상도와 피로수명을 산정하는 방법을 일련의 흐름도로 나타내면 Fig. 9와 같다<sup>15)</sup>.

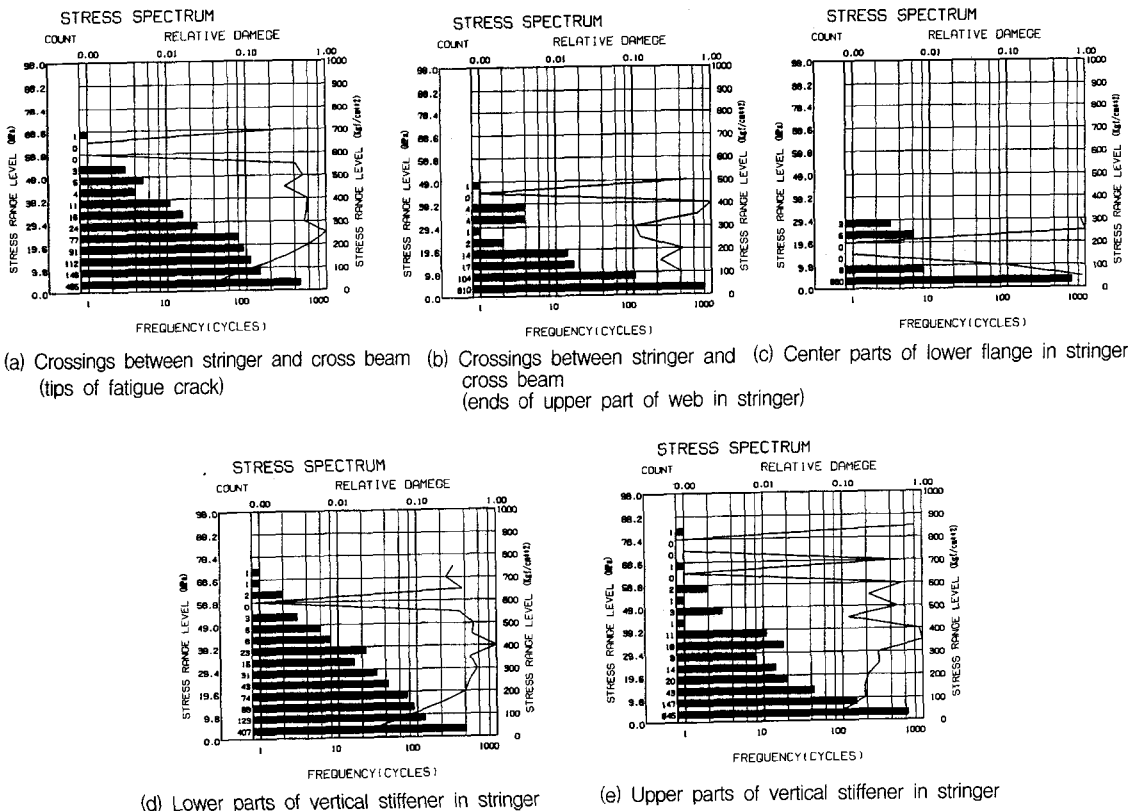


Fig. 8. Examples of stress frequency spectrum

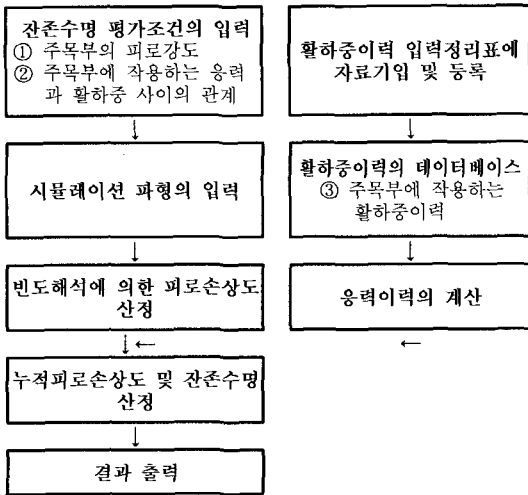


Fig. 9. Flowchart on fatigue-life assessment

### 3.3.2. 평가에 이용하는 자료

일반적으로 강교량에서 건전성, 피로안전성 및 피로수명을 산정하는데 있어서 필요로 하는 자료로써 다음과 같은 3종류가 있다.

#### (1) 주목부에 작용하는 응력

피로를 평가하는 경우에 이용하는 응력은 실동응력을 원칙으로 한다. 따라서 본 연구에서도 본 노선에서 대표적인 열차를 대표열차하중으로 고려해서 현장측정을 실시하였다.

#### (2) 주목하는 이음의 피로강도

철도교에서 주목하는 이음의 피로강도는 현행 설계표준의 피로조항에서는 공칭응력에 대해서 정의하고 있다<sup>8)</sup>. 또한 핫스포트응력(Hot Spot Stress)에 대해서는 日本鋼構造協會<sup>4)</sup>에서 권장하는 값을 이용하는 것을 원칙으로 한다. 본 연구에서는 1차조사이기 때문에 안전측으로 평가되는 실동응력(주목부에서 10mm 떨어진 위치에서의 응력)을 측정해서 이것을 공칭응력으로 간주하여 피로평가를 실시하였다.

#### (3) 주목부에 작용하는 활하중이력

철도교에서는 활하중이력을 산정하는데 있어서 일반적으로 3가지 방법을 이용하는데 본 연구에서는 연간 통과톤수의 이력을 이용하는 표준적 방법을 적용하였으며, 본 교량의 피로수명을 산정하기 위해서 사용한 활하중이력은 Table 4와 같다.

Table 4. Histories of live load

번호	데이터를 알고 있는 해(년)	기본해석	
		통과톤수(만톤/년)	대표열차명
1	1977	2540	-
2	1979	2680	-
3	1984	2700	-
4	1985	2860	-
5	1986	2930	-
6	1987	2880	-
7	1988	3250	-
8	1989	3450	-
9	1994	3460	-
10	1995	3790	-

## 4. 평가결과

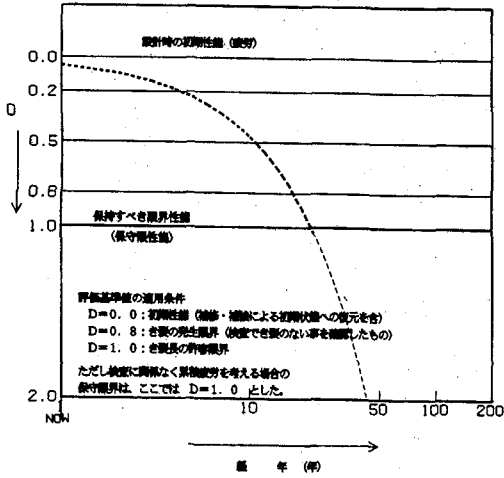
본 연구에서 실시한 실교량 측정결과에 기초해서 각 게이지 부착위치별 피로손상도 및 잔존수명을 정량적으로 산정하였다. 여기에서는 본 측정열차에 의한 작용응력이 지속적으로 작용한다고 가정할 때의 피로수명을 산정한 결과이며, 평가결과는 Table 5 및 Fig. 10과 같다.

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 주부재의 경우에는 잔존수명이 200년 이상으로 나타나고 있으므로 주부재는 피로손상을 받을 가능성이 희박함을 알 수 있었다. 그러나 2차부재의 경우 잔존수명이 3년~21년으로 나타나고 있으므로 이상의 결과로부터 강철도교량의 피로손상은 주부재보다는 2차부재에서 발생할 가능성이 많으며, 강철도 교량의 피로수명은 이를 구성하는 2

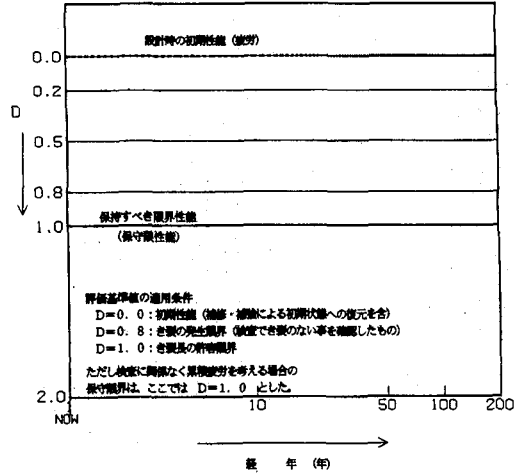
Table 5. Result of fatigue life assessment

게이지 번호	피로강도 등급(MPa)	최대응력 (최소응력)	잔존수명 (년)	피로손상도 (D/년)	A등급까지의 연수
LSSW-1X1	E (80)	172.1(-36.5)	-	1.00	-
LSSW-2X1	E (80)	26.7(-20.0)	21	0.05	16
LSSW-2X2	E (80)	26.7(-20.0)	21	0.05	16
LSSW-3X1	F (65)	37.5(-32.8)	4	0.25	3
LSSW-4X1	F (65)	24.4(-43.0)	9	0.11	7
LSZW-1X1	E (80)	36.4(-44.6)	3	0.33	2
NSSL-1X1	D (100)	22.2(-6.1)	200	0.00	-
LSZW-2X1	E (80)	7.6(-47.1)	9	0.11	7
LSZW-2X2	E (80)	6.3(-11.7)	200	0.00	-

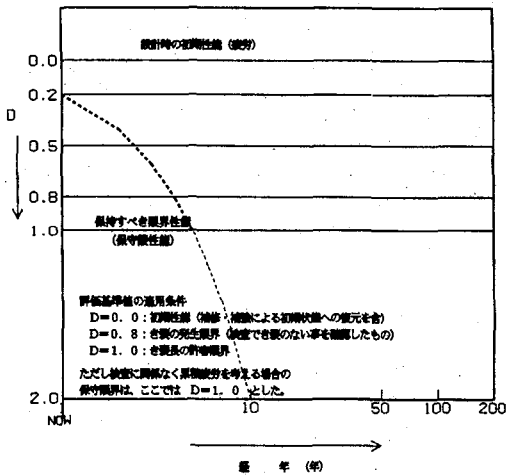
[주] A등급까지의 연수란 Miner의 법칙을 이용해서 산정한 피로손상도가 0.8이 될 때까지의 시간을 의미한다.



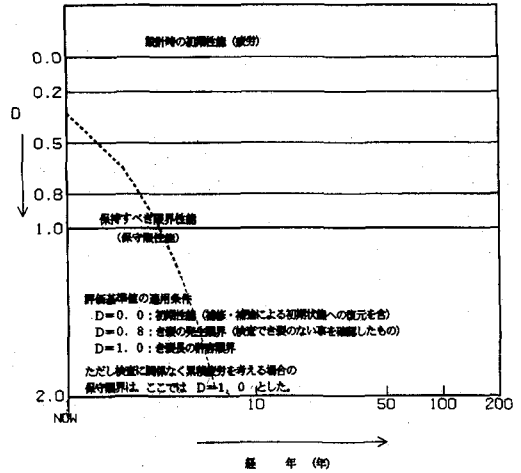
(a) Crossings between stringer and cross beam  
 (end of upper parts of web in stringer)



(b) Center parts of lower flange in stringer



(c) Lower parts of vertical stiffener in stringer



(d) Upper parts of vertical stiffener in stringer

Fig. 10. Examples of deterioration curve in fatigue damage

차부재의 피로수명과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

한편 복부판이 피로균열 선단부에 부착한 변형률게이지로부터 산정한 피로손상도는 1(여기서, 1의 의미는 피로손상정도가 한계상태임을 나타냄)을 나타내고 있으므로 이에 대한 열화손상곡선은 작성할 수 없었다.

따라서 주부재의 경우 통행열차하중에 대한 피로손상도에 여유가 많지만 2차부재의 경우에는 주부재에 비해서 피로손상도에 여유가 없음을 알 수 있었다.

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 실효량 추정을 통해서 강철도 교량에서 발생한 피로균열에 대해서 피로손상이 발생하지 않은 유사한 개소의 응력상태를 실측하여 대상개소의 응력발생특성을 정량적으로 평가함으로써 피로손상 정도를 정략적으로 산정하였으며, 이 결과로부터 피로손상의 원인을 다음과 같이 추정하였다.

(1) 트러스 세로보 수직보강재 하단부에서 발

생한 피로균열은 열차주행중 보강재 단부와 플랜지 사이의 웹웹부에서 플랜지가 좌우로 크게 진동함으로써 발생하는 면외 반복힘응력이 원인인 것으로 생각된다.

(2) 트러스 세로보 수직보강재 상단부에서 발생한 피로균열은 플랜지의 폭이 지나치게 넓고 열차재하에 의해서 작용하는 힘이 비교적 크며, 필렛용접부의 크기가 작고 목두께가 작아서 상단부에서 큰 압축응력이 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

(3) 세로보와 가로보 연결부에서 발생한 피로균열은 수평브레이싱이 완전하게 체결되어 있지 않기 때문에 세로보에 비틀림 변형이 발생하고 이 변형에 의한 면외응력이 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

(4) 주부재는 2차부재에 비해서 피로에 대한 여유가 많으며, 2차부재의 경우 피로손상이 발생하더라도 즉각적인 문제가 발생되지 않기 때문에 유지관리에 만전을 기하면 강철도 교량에서 피로에 대한 안전성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- 1) J. W. Fisher, *Fatigue and Fracture in Steel Bridges*, Prentice Hall, 1994.
- 2) P. D. Freeman, *Recorded Stress Histories in Railroad Bridges*, ASCE ST12, 1968.
- 3) 日本土木學會 編, 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, (株)丸善, pp. 10~12, 1996.
- 4) 日本鋼構造協會 編, 鋼構造物の疲勞設計指針・同解説, 技報堂出版, pp. 5~12, 1993.
- 5) 都市高速道路 技術センター, 鋼構造物の疲勞損傷の補修方法に関する調査報告書, 1993.
- 6) 山田健太郎, 既設トラス橋の實動應力測定と壽命評價, 日本土木學會 第43回 年次學術講演會 I-213, 1988.
- 7) 山田健太郎, 橋梁の實動應力測定と疲勞壽命評價, 日本土木學會論文集, I-15, 1991.
- 8) 杉本一郎, 溶接鋼鐵道橋の疲勞強度と延命化に関する研究, 鐵道總研報告, 1998.
- 9) 名取暢, 深澤誠, 寺田博昌, 寺尾圭史, 面外曲げを受けるすみ肉肉同し溶接部の疲勞強度, 横河橋梁技報, No. 19, pp. 37~45, 1990.
- 10) Japan National Railway, *Design Standard of Welding Steel Railway Bridges*, 1960.
- 11) Japan Society of Civil Engineers, *Japanese National Railway Design Standard for Railway Structure (Steel Railway Bridge)*, 1983.
- 12) T. Nishimura, C. Miki, *The Deformations of Steel Bridges due to Tensile Stresses*, Journal of JSCE, Vol. 60, 1975.
- 13) H. Abe, N. Adachi, *Damage of Steel Railway Bridges*, Structure Design Materials, Vol. 33, 1973.
- 14) H. Abe, N. Taniguchi, M. Abe, *Fatigue Problem, Retrofitting and Reinforcement of Steel Railway Bridges*, Bridge and Foundation Engineering, Vol. 17, No. 8, 1983.
- 15) K. Sakamoto, M. Abe, C. Miki, *Fatigue Damage and Retrofitting of Steel Railway Bridges*, JCOSSAR, Vol. 1, 1987.
- 16) 한국강구조학회, 당산철교 정밀안전 진단 보고서, 1996.