

## 공용중인 교량의 응력이력 계측 및 응력범주를 고려한 피로평가

### Fatigue Evaluation of a Steel Bridge in Service through Stress History Measurement and Consideration of Stress Category

나 성 옥<sup>1)\*</sup>  
Sung-Ok Na

권 민 호<sup>2)</sup>  
Min-Ho Kwon

차 철 준<sup>3)</sup>  
Cheol-Jun Cha

김 인 호<sup>4)</sup>  
In-ho Kim

#### Abstract

The proper stress history measurement should be conducted in order to examine the accurate cause of fatigue cracks or the fatigue safety in the steel bridge. Only one strain gauge is generally installed in the field for the stress history examination because of the field circumstances, economic feasibility, workability, and so on. However, this method may not consider the actual size of the specific structure, the gauge length, and the affect of stress concentration in the welded joint. In addition, it is difficult to apply for the stress analysis. Therefore, this study suggests improvements that are a great number of gauge installations, the gauge location adjustment, and the use of the minimum length gauge. It is derived the correlative equation of strain for the distance between the welding toe and the strain gauge installation, and compare correlative equation with equation of IIW. Also, this study could estimate the remaining life and fatigue damage of bridge in service by selecting the suitable stress category. In conclusion, it is possible to understand the member which is high in the fatigue cracks, and the quantitative relations between the welding toe and the strain gauge installation distances. The proposed approach in this study can make an more accurate fatigue damage and a remaining life prediction so that the improved method should be applied in measuring the strain of bridges from now on.

Keywords : Improved method, Correlative equation, Stress category, Fatigue damage, Remaining life

#### 1. 서 론

일반적으로 강바닥판은 장대교량 시공시 자중감소와 미관 향상을 목적으로 선호하는 구조형식이나, 직교 이방성 구조로 여러 부재가 복잡하게 연결되어 구조세목 및 응력흐름이 매우 복잡하다. 또한 시공시 작업공간 협소로 용접 품질저하 및 결함 발생확률이 높고, 차량하중의 직접적 작용으로 피로 균열이 쉽게 발생하는 단점이 있다 (Kyung et al., 2006).

강교의 경우 피로균열은 공용년수가 경과함에 따라 구조 부재의 안전성과 사용성을 저하시키는 주요 인자로 피로파괴에 대한 검토가 반드시 필요하다.

강교의 피로균열을 지배하는 조건은 기하학적 상태, 초기 시공상태, 재료의 특성, 하중조건들이 있다. 이 중 피로균열

에 가장 큰 영향을 미치는 것은 하중조건으로 이 하중조건은 현장에서 스트레인게이지를 이용하여 측정된 응력이력이다. 그러므로 보다 정확한 피로균열의 발생원인 또는 교량의 피로안전성을 검토하기 위해서는 적합한 응력이력 측정이 요구된다 (Jang et al., 2000). 그러나 실제 현장에서의 응력이력 측정은 현장 여건과 경제성, 작업성 등의 이유로 간단하게 1개소의 스트레인게이지를 설치하여 계측시험을 실시한다. 이는 특정 구조물의 실제 치수와 게이지 길이, 용접부 응력집중 등의 영향을 고려하지 못하고, 구조 모델링을 통한 응력해석에도 많은 어려움이 있다 (KWS, 2005).

그러므로 본 연구에서는 피로균열의 발생이 예상되는 용접단부에 다수의 게이지 설치 및 최소 길이 (2mm) 게이지 사용과 설치 위치, 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에

1) 정희원, 경상대학교 토목공학과 석사과정, 교신저자  
2) 정희원, 경상대학교 토목공학과 공학연구원 교수  
3) 정희원, 한국시설안전공단, 공학박사  
4) 정희원, 한국시설안전공단, 공학박사

\* Corresponding author : nso27@kistec.or.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

따른 변형률 진폭에 대한 상관식을 도출하여 국제용접협회 (IIW)에서 제안한 변형률 진폭식과 비교하였다. 또한 한국과 일본의 피로등급 상세범주 (Stress category) 선정에 따른 피로손상도 및 잔존수명을 평가하였다. 본 연구를 통해 향후 공용중인 교량의 적합한 피로평가 및 유지관리에 중요한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 대상교량 선정

### 2.1 대상교량의 개요

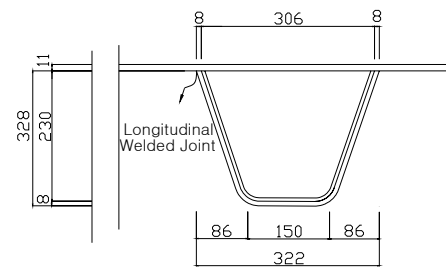
대상교량은 국내 최초 3경간 타정식 현수교로서 연장 660.0m, 교폭12.0m, 설계하중 2등급 (DB-18, DL-18)으로 1973년 (공용기간 40년)에 준공된 교량이다. 대상교량의 주요 제원은 Table 1과 같다.

대상교량의 단면도는 Fig. 1과 같으며, 거더의 가설 순서는 중앙경간의 중앙부에서부터 대칭으로 주탑쪽으로 향하여 가설을 시작하여 완성하고, 양 측경간은 앵커부에서 주탑을 향하여 동시에 가설하였다.

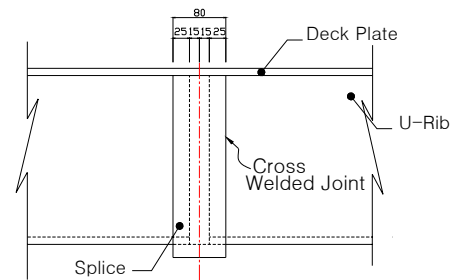
Table 1 Synopsis of this bridge

Bridge Name	00Bridge, Nam-hae, Gyeongnam, South Korea
Type	Suspension Bridge (steel deck)
Service years	Since 1973~2013 (current)
Length and Width	L = 660.0m (128+404+128) B = 12.0m (2.4+7.2+2.4)

U-rib의 생산길이는 625×6×6500mm이고 1개의 보강형 거더 블록의 표준길이는 12.5m로서 1개의 블록내에 1개소의 U-rib 이음이 있다. 시공단위 블록 가설시 발생하게 된 현장 이음부인 Steel deck (바닥판)은 맞대기용접을 실시하고 U-rib 이음은 Fig. 2와 같이 스플라이스 플레이트를 덧댐판으로 하고 덧댐판과 U-rib 연결부는 필렛용접을 실시하였다. 대상 교량에 사용된 강재의 제원은 Table 2와 같다 (Namhae Bridge Final Report, 1973).



(a) Cross section view of U-rib



(b) Longitudinal view of U-rib

Fig. 2 Section view of U-rib

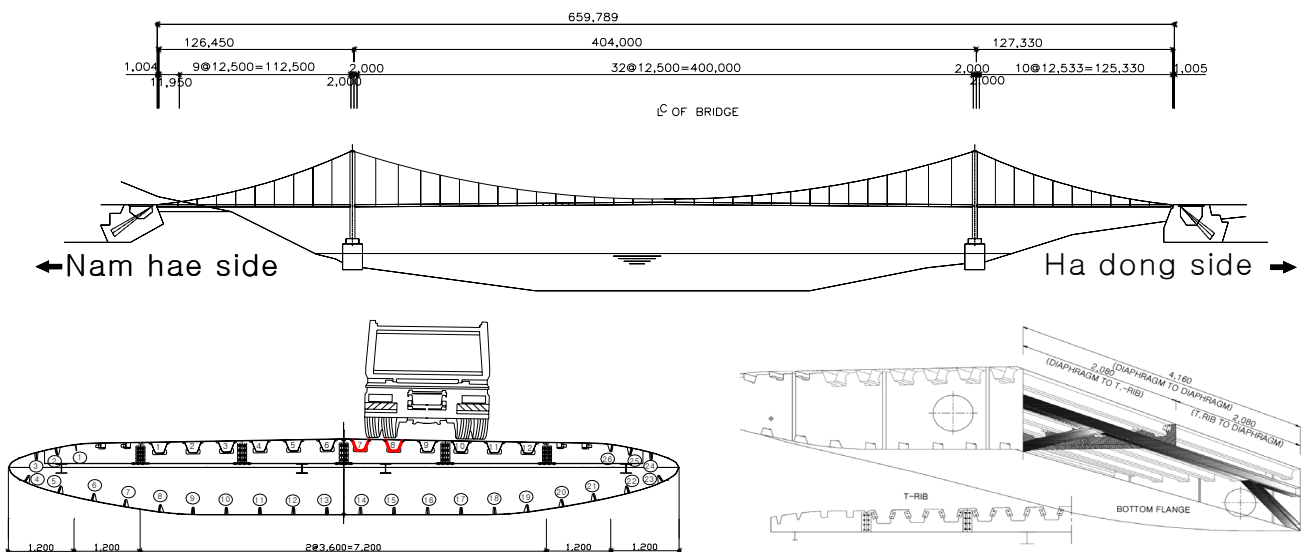


Fig. 1 Configuration of bridge section

Table 2 Synopsis of steel deck plate & U-rib

Type of Steel	SS-400 (Steel deck Block Length 12.5m) (Production Length of U-rib 625×6×6500mm)		
Steel deck (Thickness)	11mm	U-rib (Thickness)	6mm
Diaphragm (Length and Thickness)	Open rib (L = 4.17m, t = 12mm)		

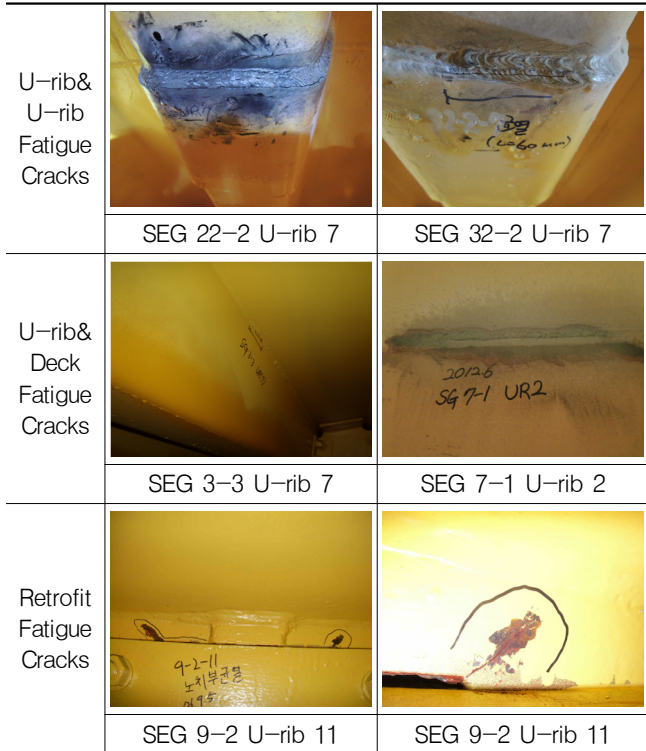


Fig. 3 Types of fatigue crack in U-rib

## 2.2 피로균열 발생 현황

대상교량의 경우 최근 1996년 위탁관리를 시작한 이후 2013년 현재까지 253개의 U-rib 피로균열이 발생되었다. U-rib에 발생한 균열의 종류는 Fig. 3과 같으며, U-rib 필렛 용접이음부 (스플라이스 플레이트 덧댐판)에서 발생한 횡방향 균열, U-rib와 Steel deck (바닥판)의 중방향 필렛 용접부에 발생한 균열, 피로균열 발생부의 강관보강 절취부에서 추가로 발생한 균열 등 세가지 유형으로 구분할 수 있다.

최근 6년간 (2007~2012) U-rib 피로균열 발생위치는 Table 3과 같다. U-rib 1~6 (U)는 상행선 방향, U-rib 7~12 (D)는 하행선 방향으로 특히 하행선 (U-rib 7~8, 10~11번)에서 피로균열의 87% (134개소)가 조사되었다. 상대적으로 하행선의 피로균열이 많이 발생한 원인으로는 2007~2010년 사이

Table 3 Investigated fatigue cracks in the last 6 years

Year	Division of Up & Down Line	Ha-dong Span	Middle Span	Nam-hae Span	total
		SEG 1~10	SEG 11~42	SEG 43~52	
2007	U-rib1~6(U)	2	2	-	51
	U-rib7~12(D)	19	24	4	
2008	U-rib1~6(U)	1	6	1	50
	U-rib7~12(D)	12	25	5	
2009	U-rib1~6(U)	-	3	-	21
	U-rib7~12(D)	3	9	6	
2010	U-rib1~6(U)	-	-	-	10
	U-rib7~12(D)	2	6	2	
2011	U-rib1~6(U)	1	-	-	7
	U-rib7~12(D)	3	2	1	
2012	U-rib1~6(U)	2	2	-	15
	U-rib7~12(D)	2	7	2	

인근지역의 도로확장공사로 인한 차량진입이 많았기 때문인 것으로 조사되었다. 또한 피로균열 발생의 근본적인 원인은 준공당시 (1973년)의 바닥판 두께 (11mm)가 최근 설계상 최소기준 (14mm)을 만족하지 못하며, 과적차량과 설계 당시에 예상하지 못한 교통량 증가의 원인 등으로 판단된다. Steel deck (바닥판)과 U-rib 용접부는 U-rib 복부의 급격한 횡방향 단면적 증가, 용접단부의 존재로 인한 응력집중 역시 피로균열 발생의 원인으로 파악된다.

한편 해당교량의 최근 6년간의 균열 발생빈도가 초기 2~3년간에 비해 대폭 감소되었는데 이는 인근 지역 공사종료와 2007년 정밀안전진단 실시 후 중차량 통행제한 (DB-18) 실시와 과적차량 단속 강화, 피로균열 발생부에 대한 보수를 실시하였기 때문인 것으로 판단된다.

## 3. 응력이력 계측

일반적으로 강교의 안전성 및 사용성을 평가하는데 있어 실교량 측정은 실제로 교량에서 발생하고 있는 거동, 즉 응력이나 변형을 정량적으로 파악하는데 있어서 가장 적절하고 합리적인 자료를 제공한다 (Jang et al., 2000).

### 3.1 기존방법의 응력이력 계측

기존 방법의 현장 응력이력 계측은 피로균열이 발생한 곳이나 현장 용접이음부, 단면변화부, 차량하중이 직접적으로 작용하는 부재 등의 구조적 특성에 영향을 크게 미치는 구간

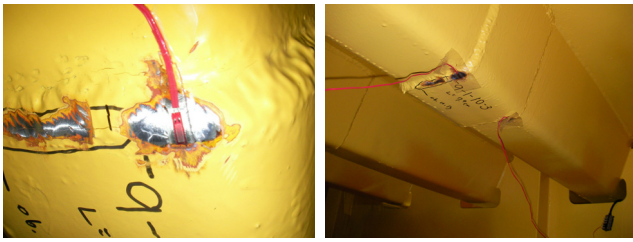


Fig. 4 Generally previous installation of Strain gauge

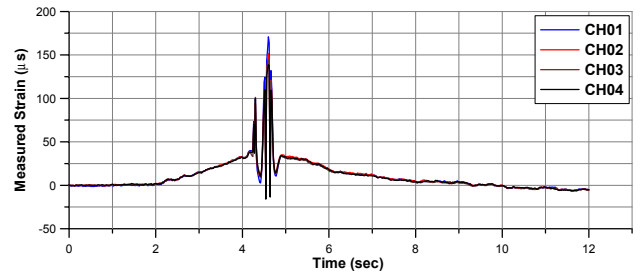


Fig. 6 Dynamic Test of Controlled traffic (50km/hr)

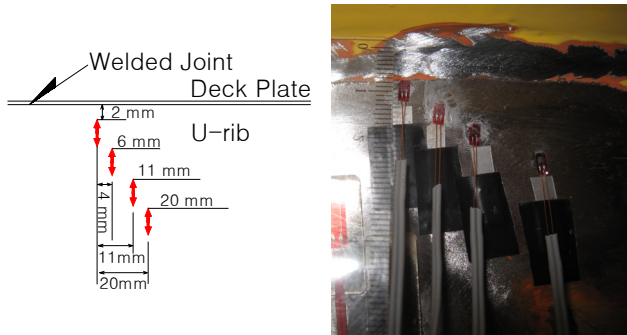


Fig. 5 Improved installation of Strain gauge (1st test)

에서 실시하며, 현장 여건과 경제성, 작업성 등의 이유로 간단하게 1개소의 스트레인게이지를 설치하여 계측을 실시하는 실정이다.

이러한 방법은 특정 구조물의 실제 치수와 게이지 길이, 용접부 응력집중 등의 영향을 고려하지 못하고, 구조 모델링을 통한 응력해석에도 많은 어려움이 있다 (KWS, 2005).

### 3.2 개선된 방법의 응력이력 계측

#### 3.2.1 1차 응력이력 계측

Fig. 5에 1차 응력이력 계측시의 설치도를 나타내었으며, 개선된 방법의 응력이력 계측을 위하여 일반적으로 사용하는 스트레인게이지 (6mm)가 아닌 용접단부의 응력 이력을 더욱 세밀하게 측정할 수 있는 2mm 스트레인게이지를 4개소 설치하였다.

게이지 설치 위치는 피로균열이 가장 많이 발생하고 차량

하중의 직접적 작용, 게이지 부착 및 측정 장비의 설치 용이성, 계측결과와의 비교·분석을 위해 2007년 정밀안전진단 실시한 재하시험 위치 등의 사항을 고려하여 중앙경간 1/8지점 (SEG 13-2, 3)의 U-rib 7, 8을 선정하였다.

개선된 응력이력 측정 방법의 신뢰성 및 정확성 확보를 위해 대상교량의 동적재하시험 시 상시통행차량 전면통제 후 재하차량의 속도를 단계별 (10~50km/h)로 증가시켜 계측을 실시한 결과 Table 4와 같으며, 동적재하 50km/h 일때의 변형률 진폭 그래프는 Fig. 6과 같다.

동적재하 시 Load Case (속도)별 스트레인게이지 길이 2mm에 대한 평균 변형률 진폭은 Table 4와 같다. 용접단부에 가까울수록 변형률의 값이 커지는 경향을 보이며, 이는 곧 실제 피로균열이 예상되는 용접단부에서는 더욱 큰 변동 응력이 발생될 것을 예상할 수 있다. 측정값은 각 Load Case (속도)별로 큰 편차를 보이는데 이는 운전자가 U-rib 직상에 바퀴가 위치하도록 정확히 주행하기가 어렵고, 강바닥판 특성상 휨 변형에 의한 변형이 크기 때문이다.

용접단부의 변형률 진폭을 예상하기 위해 차량하중이 직접적으로 작용하여 변형률 진폭이 가장 큰 Load Case 4 (동적재하 40km/h)를 기준으로 Load Case (속도)별로 데이터를 정리하였으며, Mathematica Program을 이용하여 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에 따른 변형률 진폭에 대한 상관식을 식 (1)과 같이 3차 방정식으로 도출하였다. 용접단부의 예상 변형률 진폭 그래프는 Fig. 7과 같다.

Table 4 Fluctuating result of measured strain (Dynamic test)

Distance from Welded joint	LC 1 (10km/h)	LC 2 (20km/h)	LC 3 (30km/h)	LC 4 (40km/h)	LC 5 (50km/h)	-
CH 01 (3mm)	134.90	174.00	274.40	287.60	167.40	15 ton D/T(kN) Total Weight (260.09) Middle Weight (97.57)
CH 02 (7mm)	112.20	147.60	228.60	244.00	141.90	
CH 03 (12mm)	107.70	142.50	225.80	239.80	132.60	
CH 04 (21mm)	100.80	133.50	218.60	229.60	126.60	

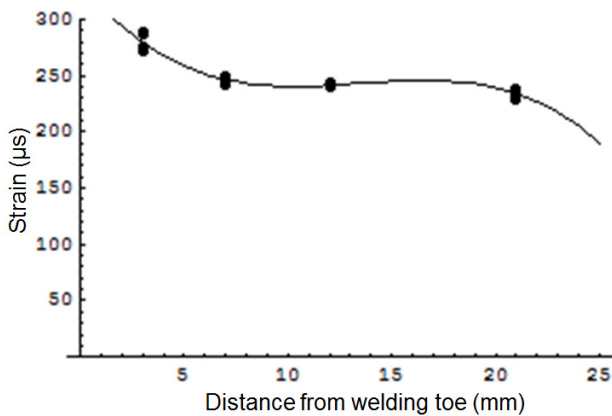


Fig. 7 Cubic equation graph of welding toe strain

$$\epsilon_s(x) = -0.044x^3 + 1.75x^2 - 22.30x + 331.68 \quad (1)$$

반면, 일반적으로 사용하는 6mm의 스트레인게이지를 사용할 경우 용접단부로부터 최소 10mm 이상 떨어진 위치에 게이지가 설치되고 응력이력 데이터가 취득된다. 본 연구의 게이지 설치위치를 비교한다면 세번째 즉 용접단부로부터 11mm 떨어진 곳과 같다고 할 수 있다. 만약 Load Case 4를 기준으로 개선된 측정방법 (CH 01 용접단부로부터 3mm 위치)과 일반적인 측정방법 (CH 03 용접단부로부터 12mm 위치)의 데이터를 비교한다면, 변형률 진폭이 16.6% 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 일반적인 측정방법의 데이터로 피로평가를 실시한다면 안전측의 평가가 될 수 있다. 그러므로 향후 피로평가 시에는 개선된 응력이력 계측방법의 적용이 중요할 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 실시한 개선된 측정방법의 스트레인게이지 설치 위치와 개소, 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에 따른 변형률 진폭에 대한 상관식의 신뢰성과 타당성을 검토하기 위해 IIW에서 제안한 빔 구조의 웹(web)에 부착된 플랜지의 용접단부 응력 (hot spot stress)의 제안식과 비교하였다. 식 (2)는 IIW의 제안식으로 변형률  $\epsilon_A$ ,  $\epsilon_B$ ,  $\epsilon_C$ 는 용접단부로부터 각각 0.4t (2.4mm), 0.9t (5.4mm), 1.4t (8.4mm) 떨어진 곳이며, t는 부재의 두께이다.

$$\epsilon_{hs} = 2.52\epsilon_A - 2.24\epsilon_B + 0.72\epsilon_C \quad (2)$$

대상교량의 U-rib 두께는 t=6mm로서 본 연구에서 제안한 상관식 (1)을 통하여  $\epsilon_A=287.66$ ,  $\epsilon_B=255.55$ ,  $\epsilon_C=242.31$ 로 계산되며, 각각의 값을 IIW의 제안식 (2)에 대입하면 용접단부에서의 최대 변형률은 326.9로 나타난다. 본 논문에서 제

안한 상관식 (1)의 용접단부에서의 최대 변형률은 331.68로 5.78 $\mu\epsilon$ 으로 약 2% 정도의 미소한 차이를 보여주고 있어 본 연구에서 제안한 상관식이 비교적 합리적임을 알 수 있다.

IIW에서는 1축응력에 비해서 2축응력 상태에서는 10%까지 응력이 커질 수 있기 때문에 로우젯게이지 사용 또는 측정 변형률과 직교하는 변형률을 FE해석을 통해 얻은 후 변동응력을 계산하도록 권고하고 있다 (KWS, 2005).

IIW에서 제안한 (2)식은 피로시험편을 통한 일축인장 실험값이지만 제안식 (1)은 실제 현장 측정값으로 U-rib의 뒹 변형 (wrapping strain), 전단지연 (shear lag), 2축응력상태, 구속조건 등 영향인자를 모두 포함한 식이다. 그러므로 대상교량의 적합한 피로평가를 위해서는 본 연구에서 제안한 상관식을 적용하는 것이 신뢰성 측면에서 바람직 할 것으로 판단된다.

### 3.2.2 2차 응력이력 계측

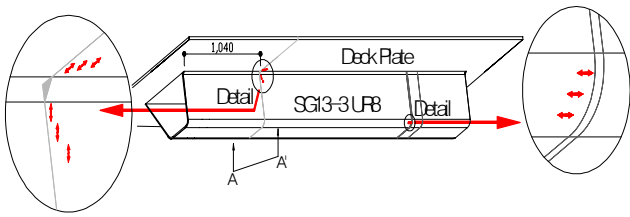
1차 응력이력 계측을 통하여 최소 길이 (2mm) 게이지 사용과 설치위치, 용접단부에서의 설치간격 세밀화 등의 개선된 방법적용 시 용접단부에 가까울수록 변형률 진폭이 크며 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에 따른 변형률 진폭에 대한 상관식 도출 등으로 그 값을 예측할 수 있었다.

설치간격의 세밀화 및 정확한 데이터 획득, 용접단부와 게이지 설치 거리별 피로평가 분석을 위하여 2차 응력이력 계측은 Fig. 8, 9, 10과 같이 IIW에서 제안한 위치별로 스트레인게이지를 설치하였다.

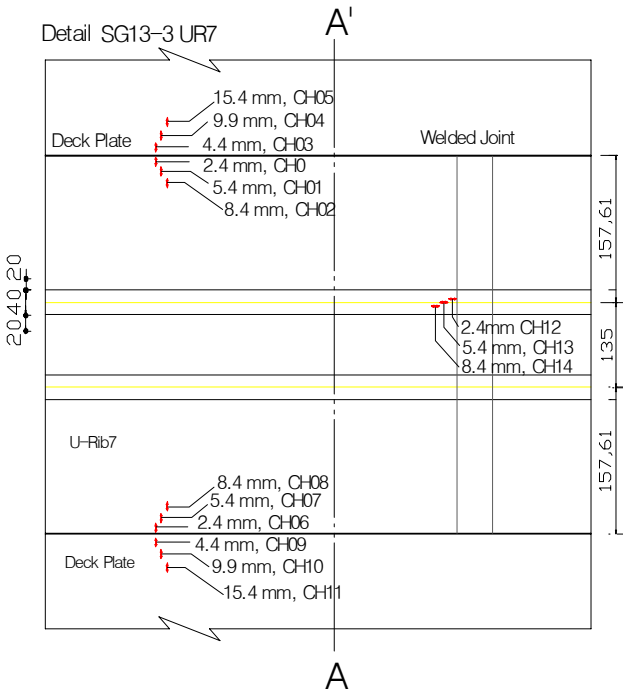
IIW에서 제안한 게이지 설치위치는 용접단부로부터 0.4t, 0.9t, 1.4t 떨어진 곳으로 Steel deck (t=11)의 경우 4.4mm, 9.9mm, 15.4mm에, U-rib (t=6mm)의 경우 2.4mm, 5.4mm, 8.4mm에 각각 게이지를 설치하였다.

하중조건의 경우 상시 통행차량으로 24시간 계측을 실시하였다. 측정장비는 Dra-730을 사용하였으며, 샘플링은 100Hz로 하였다. 24시간 측정 데이터 중 최대 변동값 (Peak)을 일별로 통행차량을 분류하여 추출하였다. 그 중 응력이력에 큰 영향을 미치는 일 교통량은 버스 82대, 대형트럭 114대 (25, 15ton), 레미콘16대, 소형화물 64대로 총 277대이다.

상시 통행차량중 대표적으로 변동값이 큰 25ton 덤프 통행시의 변형률값은 Fig. 11과 Table 5와 같다. 스트레인게이지 중앙에서의 변형률 진폭과 강재의 탄성계수를 곱하여 변동응력으로 환산하였다. 측정된 데이터 값을 분석해 보면 대체적으로 용접단부에 가까울수록 변형률 즉, 변동응력이 커지는 것을 알 수 있다.



(a) Strain gauge attachment location of U-rib & Deck



(b) Strain gauge attachment location

Fig. 8 Detailed drawing of strain gauge attachment location

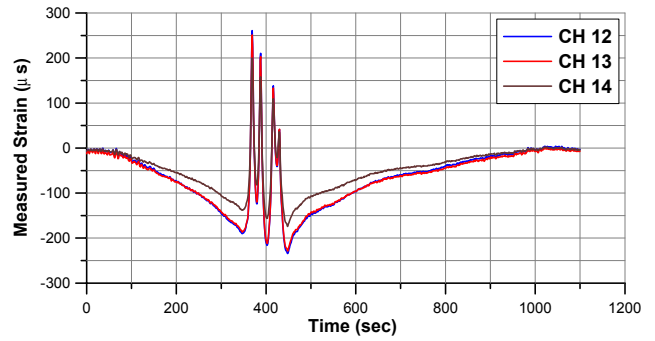


Fig. 11 Ordinary load 2nd test (U-rib & U-rib splice plate)

Table 5 Result of ordinary load strain (2nd test)

U-rib 7 (U-rib & Deck Plate)					
Channel No.	Min	Max	Fluctuating Stress (Mpa)	Applied Equation	
CH 0	-257.12	24.76	57.79	$\sigma = E \cdot \epsilon$	
	281.88				
CH 1	-113.32	5.71	24.40		
	119.03				
CH 2	-136.18	21.90	32.41		
	158.08				
$\epsilon_{hs}$	557.53		114.29		
U-rib 7 (U-rib & U-rib splice plate)					
CH 12	-190.46	260.93	92.30		
	451.39				
CH 13	-186.65	251.41	89.80		
	438.06				
CH 14	-137.13	199.98	69.12		
	337.11				

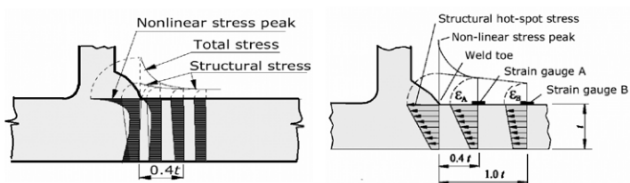


Fig. 9 IIW installation of Strain gauge & Non-linear extrapolation of the measured strain



Fig. 10 IIW installation of Strain gauge (2st test)

#### 4. 공용중인 교량의 계측데이터를 이용한 피로평가

피로는 실효량 측정을 통해서 그 상태를 파악하는 것이 가장 합리적이며, 피로가 누적되는 비율을 산정하는 것을 피로 손상도라고 한다. 또한 피로에 의해서 부재의 기능이 상실될 때까지의 시간을 피로수명이라고 하며, 피로수명에서 현재까지의 공용년수를 제외하면 구조물의 잔존수명을 산정할 수 있다 (JSSC, 2012).

##### 4.1 피로손상도

피로손상도 (선형손상법칙)는 Palmgren-Miner에 의하여 제안된 식을 사용하고 있으며, 손상율 D는 사용된 수명의 비율로 정의되며, 누적손상이론에서 파괴는 손상율의 합이 1 이상 일 때 발생한다고 가정한다. 또한 피로손상도는 응력크기

에서 손상율이 반복비 ( $n_i/N_i$ )와 같다고 표현한다.

$$\sum D_i \geq 1 \quad (3)$$

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

#### 4.2 등가응력범위를 이용한 수명 측정방법

피로손상도를 평가함에 있어서 응력빈도분포에 의해 부재가 받는 손상도와 등가손상도를 주는 등가응력범위 ( $\Delta F_{eq}$ )를 이용할 수 있다.

선형손상법칙에 ( $D_i = \sum (\frac{n_i}{N_i})$ ) 응력범위와 반복횟수와 관계 ( $\sum F_i^m \cdot N_i = A$ )를 대입함으로써 식 (5)가 얻어진다.

$$D = \sum (\Delta F_i^m \cdot n_i) / A \quad (5)$$

일정 크기의 응력범위  $\Delta F_{eq}$ 이  $\sum N_i$ 회 작용한 때의 손상도는,

$$D = \Delta F_{eq}^m \cdot \sum n_i / A \quad (6)$$

로 주어진다. 여기에서, 식 (5)와 식 (6)에서 손상도가 같은 경우에  $\Delta F_{eq}$ 를 등가응력범위라 하고, 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_{eq} = \sqrt[m]{\sum \Delta F_i^m \cdot n_i / \sum n_i} \quad (7)$$

이와 같이 등가응력범위를 구함으로써 S-N선도를 이용하여 직접적으로 피로수명을 구하는 것이 가능하다.

$$Y_{year} = \frac{N}{\sum n_i \times D_{day}} \quad (8)$$

여기서  $\sum n_i$ 은 측정된 응력반복수, N은 S-N선도에서 응력범위에 해당하는 빈도수 (cycles)를 나타낸다.

#### 4.3 피로등급 상세범주

응력이력 계측 지점의 이음부 피로수명을 검토하기 위해 한국과 일본의 피로등급 상세범주를 검토하였다. 계측 위치별로 적용한 피로등급 상세범주는 Table 6과 같다.

#### 4.4 평가결과

본 연구에서 실시한 실험량 응력이력 측정결과 데이터를 한국과 일본의 피로등급 상세범주를 적용하여 피로평가를 실시하였다. 용접단부에서 가장 가까운 게이지 CH 0과 CH 12의 피로등급 상세범주와 잔존수명은 Table 7과 같다. 피로평가 결과 U-rib와 Deck plate의 경우 잔존수명이 100년 정도 차이가 나며, U-rib와 U-rib의 스플라이스 플레이트 경우 3년 정도 차이가 나는 것으로 나타났다. U-rib와 Deck plate의 잔존수명이 100년 정도 차이가 나는 것은 누적손상도를 이용한 계산방법으로 일정한 응력범위의 누적빈도 계산방식에 의한 차이로 판단된다.

한편, 대상교량은 설계당시 일본 설계기준을 기초로 설계되었으며, 용접품질, 현장 교통 특성과 환경, 응력범주의 세

Table 6 Stress category of each country

U-rib and Deck plate stress category		
Class	Situation	Category (Mpa)
KRTA	Fillet-Welded Connections With Welds Normal to the Direction of Stress	C (69)
JSSC	Fillet-Welded Connection With Steel Deck and Longitudinal U-rib	E (80)
U-rib and U-rib splice plate stress category		
KRTA	Fillet-Welded Connections With Welds Normal and/or parallel to the Direction of Stress	E (31)
JSSC	Fillet-Welded Connection With Cover plate	F (65)

Table 7 Result of fatigue life assessment by stress category

Applied KRTA Stress category				
Chnnel No.	Location	Category (Mpa)	Max Stress (Min)	Remaining Life(year)
CH 0	U-rib & Deck plate	C (69)	17.26 (-52.97)	359
CH 12	U-rib & U-rib	E (31)	77.29 (-60.03)	6
Applied JSSC Stress category				
CH 0	U-rib & Deck plate	E (80)	17.26 (-52.97)	258
CH 12	U-rib & U-rib	F (65)	77.29 (-60.03)	9

Table 8 Result of fatigue life assessment (JSSC)

Consider Field Welding Quality & Technique during construction				
CH 0	U-rib & Deck plate	F (65)	17.26 (-52.97)	138
CH 12	U-rib & U-rib	G (50)	77.29 (-60.03)	4

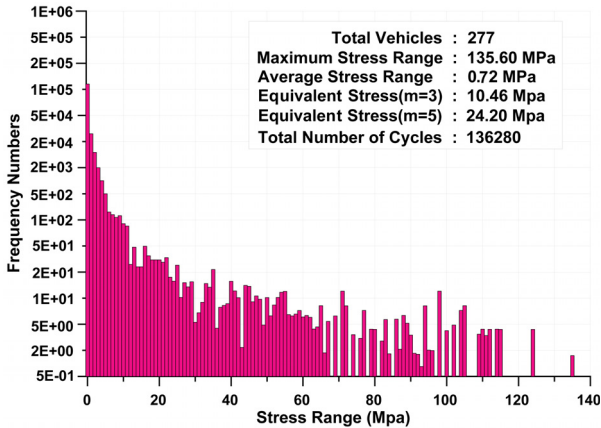


Fig. 12 Stress range histogram of ch 12 (U-rib & U-rib)

분화와 현장 여건 (피로균열 다수 발생) 등을 고려하여 안전측의 평가를 위해 일본 피로설계지침 적용 및 피로등급 상세범주 기준을 하향 조정하여 추가적인 피로평가를 실시하였다.

U-rib와 Deck plate의 경우 기준상 E등급 (십자용접이음 중 다듬질하지 않은 필렛용접)이나 현재 대상교량의 용접 품질상태는 약 40년 전 품질로 현 시점의 용접에 비하여 용접의 품질 (비마무리, 언더컷 등)의 낮음과 시공당시의 용접기술을 고려하여 F등급을 적용하였다.

또한, U-rib와 U-rib의 스플라이스 플레이트의 경우 기준상 F등급 (기타용접 중 덮개판을 필렛 용접한 이음 (l ≤ 300mm))이나, U-rib와 Deck plate와 같은 시기의 용접으로 응력범주는 G등급을 적용하였다. 피로등급 상세범주를 하향 조정하여 피로평가를 실시한 결과 Table 8과 같으며 Fig. 12에 CH 12의 응력빈도 히스토그램을 나타내었다.

CH 0의 경우 잔존수명이 100년 이상으로 나타나고 있지만 시공당시의 용접품질과 용접기술 낙후, 설계시 고려하지 못한 차량하중, 노면의 손상으로 인한 Deck plate에 과한 응력발생 등의 원인으로 균열이 발생되고 있는 실정이다. CH 12의 경우 대상 교량에서 피로균열 발생의 87%를 차지하는 개소로서 매년 피로 균열이 조사되는 부재이다.

2차 응력이력 계측 데이터를 기초로 본 연구의 목적인 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에 따른 피로평가를 실시하였다.

Table 9 Result of fatigue life assessment by location of gauge

U-rib & Deck plate				
Chnnel No.	Distance from Welded joint (mm)	Category (Mpa)	Max Stress (Min)	Remaining Life (year)
CH 0	2.4	F (65)	17.26 (-52.97)	138
CH 2	8.4		12.75 (-28.05)	698
U-rib & U-rib splice plate				
CH 12	2.4	G (50)	77.29 (-60.03)	4
CH 14	8.4		59.24 (-43.55)	10

용접단부에 가까울수록 변형률 진폭과 최대 (최소)응력의 값이 크며 이는 곧 잔존수명에도 큰 영향을 미치는 것을 Table 9를 통해 알 수 있다. 용접단부로부터 게이지 설치거리별 잔존수명은 부재별로 최소 2.5배에서 최대 5배 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 피로균열이 발생하기 쉬운 부재일수록 스트레인게이지의 측정위치에 따른 잔존수명의 차이가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 피로균열 발생 위험이 작은 부재일수록 잔존수명 평가 시 스트레인게이지의 위치 선정이 더욱 중요하다.

본 연구에서 실시한 개선된 방법의 실효량 응력이력 측정과 적합한 피로등급 상세범주를 적용한 피로평가를 통해 실제 교량에서의 피로균열 발생빈도가 높은 부재 파악, 용접단부와 게이지 설치 거리에 따른 변형률의 정량적 파악으로 더욱 정확한 피로평가 및 잔존수명 예측이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 피로균열의 발생이 예상되는 용접단부에 다수의 게이지 설치 및 최소 길이 게이지 사용, 설치 위치, 피로등급 상세범주 선정 등을 통해 공용중인 교량의 피로손상도 평가 및 잔존수명을 예측하고 분석하였다. 본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 용접단부로부터 스트레인게이지 설치 거리에 따른 형률 진폭의 감소를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 실시한 개선된 응력이력 측정방법 (최소 길이 게이지 사용, 용접단부 설치 위치 세밀화)의 현장 적용이 피로평가의 신뢰성 및 정확성을 향상시킬 것으로 판단된다.



- (2) 대상교량의 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에 따른 변형률 진폭에 대한 상관식과 국제용접협회 (IIW)에서 제안한 변형률 진폭식과 비교시 변형률이  $5.78\mu\epsilon$ 으로 약 2% 정도의 미소한 차이를 보여주고 있어 본 연구에서 제안한 상관식이 비교적 합리적임을 알 수 있다.
- (3) 피로평가지 대상교량에 적합한 일본의 피로등급 상세 범주를 적용하였으며, 잔존수명 예측은 CH 0 (U-rib & Deck plate)의 경우 138년, CH 12 (U-rib & U-rib)의 경우 4년으로 나타났다. CH 12 (U-rib & U-rib)는 대상교량에서 피로균열 발생의 87%를 차지하는 부위 (부재)로서 이러한 결과를 통해 유지관리시 중점적인 점검 및 관리가 필요한 부재를 파악할 수 있다.
- (4) 스트레인게이지 설치 거리에 따른 피로평가 결과, 피로균열 발생 위험이 작은 부재 일수록 잔존수명 평가 시 게이지의 위치 선정이 중요한 것을 알 수 있다.
- (5) 본 연구에서 실시한 개선된 방법의 응력이력 측정과 적합한 피로등급 상세범주 적용을 통해 실제 교량에서의 피로균열 발생빈도가 높은 부재파악, 용접단부와 게이지 설치 거리에 따른 변형률의 정량적 파악으로 더욱 정확한 피로평가 및 잔존수명 예측이 가능하였다. 그러므로 향후 일반적인 강교량의 피로평가 시 개선된 방법의 적용이 바람직 할 것으로 판단된다.

- Steel Truss Railway Bridge occurring Fatigue Damages, *Journal of KIIS (Korea Institute of Intelligent Systems)*, 15(1), 132-139 (in Korean).
3. JSSC (Japanese Society of Steel Construction) (2012), Fatigue Design Recommendations for Steel Structures (in Japanese).
4. KISTEC (Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation) (1996, 2001, 2006, 2012), In-depth Inspection Report of Namhae Bridge.
5. Kogi OHTA (2004), Makoto FUKAZAWA, Bridge and Steel.
6. Korea Maritime University (2009), Fatigue User's Manual & Reference Manual.
7. KWS (Korean Welding Society) (2005), General Guide for Hot Spot Stress Analysis, *Journal of KWS (Korean Welding Society)*, 23(6), 514-524 (in Korean).
8. Kyung, K. S., Shin, D. H., Kim, K. H. (2006), Analytical Study on the Development of High-Performance Orthotropic Steel Deck considered the Fatigue Behaviors of Structural Details, *Journal of KSSC (Korean Society of Steel Construction)*, 18(4), 417-426 (in Korean).
9. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012), KRTA Design Specifications.
10. Ryu, D. Y., Jung, H. Y. (2010), An Analysis and Retrofit of U-rib Fatigue Cracks in the Steel Deck Bridge, *Journal of KSMI (Korea institute for Structural Maintenance Inspection)*, 14(2), 176-183 (in Korean).
11. Takeshi MORI (1993), Nobuhiko HAYASHI, Proposal of New Fatigue Life Evaluation Procedure for Steel Structural Details under Variable-Amplitude Stresses, Hosei university.
12. The Ministry of Construction (1973), Namhae Bridge Final Report.

## References

1. J. W. Fisher (1984), Fatigue and Fracture in Steel Bridges.
2. Jang, D. I., Kyung, K. S., Jo, K. H., Hong, S. U. (2000), Fatigue Life Assessment and Stress History Measurement of

Received : 08/27/2013

Revised : 12/09/2013

Accepted : 01/07/2014

## 요 지

강교의 정확한 피로균열의 발생원인 또는 교량의 피로안전성을 검토하기 위해서는 적합한 응력이력 측정이 요구된다. 그러나 실제 현장에서의 응력이력 측정은 현장 여건과 경제성, 작업성 등의 이유로 1개소의 스트레인게이지를 설치하여 계측을 실시한다. 이는 특정 구조물의 실제 치수와 게이지 길이 용접부 응력집중 등의 영향을 고려하지 못하고, 구조 모델링을 통한 응력해석에도 많은 어려움이 있다. 그러므로 본 연구에서는 용접단부에 다수의 게이지 설치, 최소 길이 게이지 사용, 설치 위치 등의 개선된 방법을 적용하여 용접단부와 스트레인게이지 설치 거리에 따른 변형률 진폭에 대한 상관식을 도출하고 국제용접협회 (IIW)의 제안식과 비교하였다. 또한 적합한 피로등급 상세범주 선정을 통해 공용중인 교량의 피로손상도 평가 및 잔존수명을 예측하고 분석하였다. 그 결과 피로균열 발생빈도가 높은 부재파악, 용접단부와 게이지 설치 거리에 따른 변형률의 정량적 파악으로 정확한 피로손상도 평가 및 잔존수명 예측이 가능하므로 향후 교량의 응력이력 계측 시 개선된 방법을 적용해야 할 것이다.

**핵심 용어** : 개선된 방법, 상관식, 피로등급 상세범주, 피로손상도, 잔존수명