강철도교 열화현상에 관한 보수/보강 연구 -강철도교의 플랜지 용접이음부의 거동 특성 및 피로균열 보수보강-

경 갑 수^{1)*} · 이 성 진²⁾ · 박 진 은³⁾ · 차 철 준⁴⁾

¹⁾ 교수, 한국해양대학교, 건설공학과 ²⁾ 박사과정, 한국해양대학교, 건설공학과
³⁾ 박사과정, 나고야대학 사회기반공학과 ⁴⁾ 팀장, 공학박사, 한국시설안전공단 고속도로팀

A Study on Repair/ Retrofit for Deteriorations of Steel Bridge -Behavior Characteristics of Welded Joint Part of Flange and Repair/Retrofit of Fatigue Crack in Railway Steel Bridge-

Kyung, Kab Soo^{1)*} Lee, Sung Jin²⁾ Park, Jin Eun³⁾ Cha, Cheol Jun⁴⁾

¹⁾ Professor, Dep. of Civil Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

²⁾ Doctoral Student, Dep. of Civil Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

³⁾ Doctoral Student, Dep. of Civil Engineering, Nagoya University, 464-8603, Japan

⁴⁾ Team Manager, Dr., Highway Inspection Section, KISTEC, Goyang, 411-758, Korea

ABSTRACT : Since railway bridge frequently have a chance of passing train load close to design load, it is necessary to reflect sufficiently fatigue property in early design phase for many structural details. Nevertheless fatigue cracks are reported partly in deck plate girder of railway steel bridge because of the weight and arrangement of axial load acting on railway bridge, the application of improper structural details for fatigue problem etc.. One of main cause for fatigue crack at the welded part of upper flange and web is caused by the eccentricity action of train load due to the difference of center to center spacing between the main girder supporting sleeper and the rail acting train load. For the existing deck plate girder of railway steel bridge, in this study, field survey, field measurement and a series of structural analysis were performed. In addition, the characteristics of structural behavior, the causes and repair/ retrofit of fatigue crack were examined in the target bridge

KEYWORDS : railway steel bridge, welded joint part of upper flange and web, vertical stiffener, eccentric action, rotational deformation, fatigue damage, repair and retrofit

1. 서 론

철도교는 일반적으로 설계하중에 근접한 열차하중이 빈번하게 통과할 가능성이 있으므로 설계시 여러 구조상세에 대해 피로특성을 충분히 반영하는 것이 필요하다. 이것을 고

려하여 철도교의 경우, 설계기준에서 설계초기단계부터 피로설계를 적용하도록 하고 있다. 그럼에도 불구하고 철도교에 작용하는 축하중의 크기 및 배치 특성, 피로에 대한 부적절한 구조상세의 적용 등으로 인하여 강철도 플레이트거더교 일부에서 피로균열이 보고되고 있다^[1].

또한 2012년 통계자료에 의하면 3,013개의 교량이 있으며, 2007년 통계자료에 의하면 국내의 2,700여개의 철도교 가운데 강철도교량은 전체 철도교량의 약 43%를 차지하며, 그 중 플레이트 거더교가 90% 이상의 높은 비율을 차지하고 있다. 또한 플레이트거더교의 약 90% 이상이 30년 이상의 공용년수를 가지고 있어, 이들 교량에 대해서는 주기적인 점검과 유지관리가 필요할 것으로 판단된다^{[2],[3],[4]}.

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 31, 2012; revised November 30, 2012; approved on November 30, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-51-410-4464 Fax. +82-51-403-3762
E-mail: kyungks@hhu.ac.kr

국내에서 보고된 대표적인 피로균열 사례로는 하로플레이트거더교의 경우는 당산철교 철거 원인의 하나인 가로보와 세로보 연결부의 세로보 절취부에서의 피로균열이 보고되어 있다^[5]. 또한 상로플레이트거더교 경우는 플랜지 회전변형에 의한 상부플랜지와 복부의 필렛용접이음부에서의 피로균열(이하 “플랜지 피로균열”로 표기)이 보고되고 있다^[1]. 이들 피로균열가운데 세로보 절취부에서 발생한 피로균열에 대해서는 당산철교 철거를 계기로 피로균열의 발생원인 및 보수보강 방안 등을 포함한 다양한 연구가 실시되었다^{[6],[7],[8],[9]}. 그러나 상부플랜지와 복부의 필렛용접이음부에서 발생한 피로균열에 대해서는 피로균열 발생원인 및 보수보강 등에 대해 충분한 검토가 이루어지지 않은 상태에서 재용접에 의해 피로균열 보수가 실시되고 있다^{[10],[11]}.

(a) Example of Typical Cross Section of Deck Plate Girder

(b) Deformation of Deck Plate Girder due to Loading

Fig. 1 Main Development Mechanism of Fatigue Crack at Upper Flange of Railway Steel Bridge

플랜지 피로균열의 주요 발생 메카니즘의 하나는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 침목을 지지하는 거더와 열차하중이 작용하는 레일과의 중심간격 차이에 따른 열차하중의 편심작용에 의한 것이다. 이러한 편심작용에 의해 거더 상부플랜지 내측

방향으로 회전변형이 발생되고, 이것에 의해 플랜지와 복부의 필렛용접이음부에 인장응력이 작용하여 피로균열이 발생하게 된다. 이 피로균열은 균열 발생 후에 피로균열이 필렛용접부의 교축방향으로 진전하는 형태를 나타내므로 플랜지를 절단하는 피로균열에 비하여 균열 그 자체의 위험성은 적은 것으로 판단된다. 그러나 방치하는 경우, 거더의 전단력 전달에 문제가 발생되어 거더의 전체 거동에 문제가 발생할 수 있는 피로균열이다. 이 피로균열은 일반적으로 플랜지와 복부의 필렛용접 상세부의 슬릿부인 용접부 루트에서 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 2에 이러한 플랜지 피로균열의 대표적인 사례를 나타내었다. Fig.2에는 플랜지 피로균열과 함께 상부플랜지와 수직보강재 상단의 필렛용접부 지단(이하 “수직보강재 피로균열”로 표기)에서 발생한 피로균열 사례도 나타내었다. 이 수직보강재 피로균열은 플랜지 피로균열에서의 전체적인 회전변형보다는 수직보강재 필렛용접부 지단부에서의 플랜지의 국부회전변형 및 필렛용접부 지단에서의 국부응력 등에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

(a) Welded Joint Part of Upper Flange and Web

(b) Welded Joint Part of Upper Flange and Vertical Stiffener (S2 Span)

Fig. 2 Examples of Fatigue Crack in Railway Steel Bridge

이 연구에서는 공용중인 강철도 상로플레이트거더교를 대상으로 현장조사 및 현장계측, 일련의 구조해석을 실시하고, 대상교량의 구조거동 특성 및 피로균열의 발생 원인의 규명, 보수보강(안)에 대하여 검토하였다. 연구에서는 대상교량에 대한 외관조사 및 현장계측을 기초로 구조모델링을 검증하였다. 그리고 검증된 구조모델링을 사용하여 열차하중하에서의 상부플랜지와 복부의 용접부, 상부플랜지와 수직보강재 용접이음부에서의 상세 구조해석을 통하여 피로균열 발생위치의 확인, 발생원인 및 피로균열 보강방안에 대한 일련의 구조해석을 실시하였다. 이것을 기초로 피로균열 발생구조상세부에 대해 적절한 보수보강(안)을 제시하여 강철도 상로플레이트거더교의 향후 유지관리 방안 구축에의 자료를 제공하고자 한다.

2. 대상교량의 제원 및 피로균열 발생현황

2.1 대상교량의 제원

이 연구의 대상교량은 1903년(하행선) 및 1945년(상행선)에 준공된 총 연장 592.59m, 총 32경간의 상·하행선 분리의 강철도 상로플레이트거더교이다. 이 교량의 하행선의 지간은 각각 용접형식의 13.45m(S1~S7) 및 19.74m(S8~S31), 그리고 리벳형식의 19.8m(SS32)로 구성되어 있다. 또한 이 교량은 개축을 1975년(상행선: S1~S32, 하행선: S8~S32) 및 1999년(하행선: S1~S7)에 실시하였다. 그리고 각 개축 시점에 따라 단면형식이 다르게 적용된 특징을 갖고 있다. 그러므로 각각의 단면 특성은 대상교량의 용접형식 교량에서의 피로균열 발생 특성과도 연계가 되어 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서의 피로균열 발생과 관련이 있는 단면특성으로는 하행선의 S1~S7에서 U.F. 폭(UFw)이 360mm, 복부 높이가 1,180mm, 거더간격이 1.8m이고, S9~S31에서 U.F. 폭이 460mm, 복부 높이가 1,600mm, 거더 간격이 2.0m이다. 수직보강재의 폭(VSw)은 전 교량에서 110mm로 동일하게 적용되었다. 따라서 피로균열 발생에 영향을 주는 플랜지 수직보강재 단부에서의 국부적인 면외 휨은 수직보강재의 폭/상부플랜지의 폭(VSw/UFw)의 비가 작은 S9~S31에서 더 크게 발생될 것으로 판단된다.

설계활하중은 철도설계기준인 LS-22이며, 강종은 SWS41(현재의 SM 400강재)을 사용하고 있다. Table 1에 대상교량의 일반제원, Table 2에 대상교량의 S7 경간의 단면제원을 나타내었다. Fig. 3에 대상교량의 전경 및 S7 경간의 단면제원, Fig. 4에 대상교량의 S7 경간의 단면 특성을 나타내었다.

Table 1. General Specification of Target Bridge

Length	$L=7@13.70(\text{W Type}) + 24@19.90(\text{W Type}) + 19.09(\text{R Type}) = 592.59\text{m}$
Width	1.8m(S1~S7), 2.0m(S8~S32)
Design Load	L-22
Superstructure	Steel Plate Girder : Welded(W) Type / Rivet(R) Type
Material	Main Girder and Secondary Member : SWS41 (Current SM 400)

Table 2. Sectional Specification for S7 Span of Target Bridge

	Position	Width	Thickness	Height	Remark
	Unit : mm				
Girder	Upper Flange	360	22	–	A-Type
			29	–	B-Type
			38	–	C-Type
	Lower Flange	320	19	–	A-Type
		360	24	–	B-Type
			35	–	C-Type
	Web	–	12	1180	–
Vertical Stiffener		110	9	1180	–

(a) Overview of Target Bridge

(b) Plan View (unit: mm)

(c) Side View (unit: mm)

Fig. 3 Overview and Specification for S7 Span of Target Bridge

Fig. 4 Characteristic of Cross Section for S7 Span of Target Bridge

Fig. 5 Occurrence State of Fatigue Crack and Corrosion Damage

2.2 대상교량의 손상 현황

대상교량의 피로균열 발생현황의 일례를 Fig. 2 및 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 2(a)에 상부플랜지와 복부의 용접부에서 피로균열(하행선 1개소)이 발생되어 피로균열이 진행된 상태를 나타내었다. 또한 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 주 거더 상부플랜지와 수직보강재의 용접이음부에서 피로균열이 상당수 발생하였다(상행선: 550개소, 하행선: 316개소). 여기서 상행선에서의 피로균열 발생개소가 많은 것은 앞에서 기술한 개축연도에 따라 적용된 구조상세가 다른 것과 연관

이 있을 것으로 판단된다. 또한 일부 보수용접 부위에서는 피로균열이 재발생된 것이 조사되었다.

한편 Fig. 5의 (a) 및 (b)에 나타난 것과 같이 하부수평브레이싱 및 거셋플레이트의 연결부와 같은 2차 부재에서도 열차통과에 따른 진동 등에 의해 피로균열이 발생한 상태이다.

이 이외에 Fig. 5의 (c) 및 (d)에 나타난 것과 같이 대상교량의 침목과 접촉되어 있는 상부 플랜지에 국부적인 부식이 발생한 곳이 다수 발견되었다. 이러한 부식은 국부적인 손상이기는 하나 전체적으로는 거더강성을 저하시키는 하나의 요인으로 작용될 것으로 판단된다.

3. 대상교량의 현장계측 및 분석

3.1 재하시험 개요

재하시험은 대상교량의 열차 활하중에 대한 구조물의 실제적인 거동 파악 및 응답특성을 조사하고, 구조해석상의 이론적인 해석결과와의 비교를 통하여 구조해석의 타당성 검토 및 상세구조해석에의 적용을 위하여 실시하였다. 재하시험에서는 7,000계열의 디젤기관차 2대를 연결하여 사용하였다. Table 3 및 Fig. 6에 시험열차의 개요 및 제원을 나타내었다.

현장계측은 대상교량 가운데 외관조사 결과 및 구조형식, 현장에서의 작업여건을 종합적으로 고려하여 하행선 S7경간을 선정하여 실시하였으며, 정모멘트가 가장 크게 발생하는 경간 중앙부에 센서를 부착하였다. Fig. 7에 대상교량에서의 센서 종류 및 부착사례를 나타내었다.

3.2 정적재하시험

정적재하시험은 Fig. 6의 시험열차를 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 하행선 S7 경간에 최대정모멘트가 발생되도록 재하하였다. Fig. 8에 정적재하시험시의 재하위치를 나타내었다.

Table 4에 정적재하시험의 측정결과를 나타내었다. 재하시험 결과, 거더 중앙부에서의 처짐 및 응력은 거더 G1에서의 값이 약간 크게 나타났으나, 그 차이가 미미하므로 2개의 거더는 거의 대칭적으로 거동하는 것으로 판단되었다. Table 4에서의 계산중립축은 Fig. 4의 C단면에 대해 이론적으로 계산한 값이며, 실측중립축은 실측에서 얻어진 응력값을 사용하여 산정한 값이다. 실측중립축이 계산중립축보다 아래에 위치하는 것은 현재의 단면이 부식 손상 등에 의해 일부 결손이 발생하였을 가능성을 시사하고 있는 것으로 판단된다.

Table 3. Outline of Test Train

Item	No.	No. of Axle	Dis. of Axle (m)	Total Weight (kN)	Axle Weight (kN)	Length (m)	Width (m)	Height (m)
Diesel Locomotive	7434 7435	6	12.54	1320	220	20.787	3.27	4.25

Fig. 6 Specification of Test Train

G1 (D1) G2 (D2)

(a) Type and Attaching Position of Sensor

(b) Example of Attached Sensor

Fig. 7 Sensor Type and Example of Attached Sensor in S7 Span of Target Bridge

Fig. 8 Loading Position of Static Loading Test

3.3 동적재하시험

고정하중에 비해 활하중의 비가 큰 철도교의 경우, 열차 통과 후 발생하는 진동성분이 응력범위를 증가시키며, 특히 대 상 교량과 같이 공용연수가 오래된 노후화가 진행된 교량에서는 구조계의 강성저하에 따른 영향 등에 의해 충격계수 (I.F. : Impact Factor)가 증가하기도 한다. 따라서 보수

보강 방안의 적정성 검토시 적절한 충격계수를 고려하기 위해 동적재하시험을 실시하여, 실제 교량에서의 충격계수를 산정하였다.

동적재하시험에서는 속도 10km/h부터 110km/h까지 매 10km/h를 증가시켜 계측을 실시하였다. Fig. 9에 동적변위 측정결과와 일례를 나타내었으며, Table 5에 충격계수 산정 결과를 나타내었다.

충격계수 산정결과 최대충격계수는 이론충격계수^[12]에 비해 약 40%정도로 나타났다. 따라서 피로안전성 평가에서 충격계수를 고려하는 경우, 설계시의 이론충격계수를 그대로 적용하는 것은 일상조건하에서 발생하는 피로현상에 대해 과대 안전 측의 결과를 초래할 수 있다.

그러므로 국내 연구에서도 철도교의 피로안전성 평가시, 현행의 충격계수는 과다하므로 이를 저감시켜 사용하여야 하는 것으로 보고되고 있다^{[13],[14]}. 또한, 미국^[15], 일본^[16]의 도로교에 관한 피로설계지침에서도 설계에서 규정된 이론충격계수의 50%를 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 것을 고려하여 대상구조상세에서 발생한 피로균열에 대한 보수·보강방안 제안시의 응력평가에서의 충격계수를 이론충격계수의 50%인 0.235를 적용하는 것으로 하였다.

4. 대상교량의 구조해석 및 거동 특성

4.1 구조해석 모델 및 해석조건

구조해석은 대상교량의 전체적인 거동 특성을 조사하기 위하여 실시하였다. 해석프로그램은 범용구조 해석프로그램인 MIDAS Civil Version 7.2^[17]를 사용하였다.

Fig. 10에 대상교량의 하행선 S7경간에 대한 구조해석 모델을 나타내었다. Fig. 10(a)에 shell 요소를 사용한 모델링(이하 해석모델 I), Fig. 10(c)에 shell요소와 solid요소를 결합하여 모델링(이하 해석모델 II)을 나타내었다. Fig. 10(b) 및 (d)에는 각각 해석모델 I 및 해석모델 II의 대상구조상세에 대한 상세모델을 나타내었다. Fig. 10의 (a) 및 (c)에서 표

(a) Analysis Model I

(b) Fine Model for Target Structural Detail

(c) Analysis Model II

(d) Fine Model for Target Structural Detail

Fig. 10 Structural Analysis Model

(a) Analysis Model I

(b) Analysis Model II

Fig. 11 Loading Position of S7 Span in Static Structural Analysis

시한 대상구조상세(Target Detail I)는 5장 구조해석에서의 대상구조상세를 나타낸 것이다.

Fig. 10에 나타난 것과 같이 해석모델 I에서는 구조모델의 편의성을 고려하여 침목 및 레일을 모델링하지 않았으며, 해석모델 II에서는 대상교량을 보다 정확하게 평가하기 위하여 침목 및 레일을 모델링하였다. 또한 해석모델 II에서는 거더와 침목, 레일이 강결로 체결되어 있는 것을 고려하여 모두 rigid link를 사용하여 요소를 연결하였다.

해석모델의 용접부형상 모델링에서 요소 크기를 용접부 각장의 1/2정도의 요소로 분할하면 용접부 기하형상을 충분히 반영할 수 있다^[18]는 것을 고려하여 플랜지와 수직보강재 용접연결부 주위의 요소크기를 해석모델 I에서는 3mm로 분할하였으며, 해석모델 II에서는 용접부 각장의 요소크기를 2.5mm로 분할하여 구조해석을 실시하였다.

대상교량의 하중은 Fig. 8에 나타난 재하시험에서 사용한 7,000계열 2대를 연결한 디젤기관차의 하중을 사용하였다. Fig. 11에 재하시험시의 차량재하 위치에 해당하는 상세해석에서의 재하위치를 나타내었다. 구조해석 경계조건은 실제교량이 면받침과 선받침인 것을 고려하여, 대상교량의 좌측은 x, y, z방향을 모두 구속하였고 우측은 y, z방향을 구속하였다.

4.2 구조해석 결과

대상교량의 전체적인 구조거동을 조사하기 위하여 3장의 대상교량의 거더 중앙하단부에서의 정적시험 계측결과와 구조해석 결과를 비교하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6의 변위에 대한 비교결과를 보면, 해석모델 I의 구조해석 변위가 실측 변위보다 약 10%정도 큰 것으로 나타났다. 이것은 해석모델 I에서는 침목 및 레일의 강성이 모델링에서 고려되지 않아 전체적으로 구조계의 강성이 작게 고려되었기 때문인 것으로 판단된다.

Table 6. Comparison of Result for Field Measurement and Structural

Item			Displacement (mm)		Stress (MPa)	
			G1	G2	G1	G2
Measurement			5.84(1.00)	5.43(1.00)	36.2(1.00)	35.4(1.00)
Model	I	LF.	6.45(1.10)	6.45(1.10)	35.2(0.97)	32.3(0.91)
	II		4.53(0.78)	4.51(0.83)	32.3(0.89)	32.0(0.90)

where, LF. : Lower Flange

the value of parenthesis is the ratio of measurement and analysis

그러나 레일과 침목의 강성이 고려된 해석모델 II에서의 변위는 해석결과가 실측결과보다 약 20%정도 작게 나타났다. 이것은 레일 및 침목의 강성을 고려하지 않은 해석모델 I에서의 증가값 10%에 비하여 변위에 대한 감소가 크게 나타나고 있다. 즉, 실제교량의 구조계와 유사한 해석모델 II에 비하여 측정치에서의 변위가 크게 발생하고 있다. 이것은 대상교량의 공용연수가 약 70년에 달하여 2.2절에서 기술한 것과 같이 침목과 접촉하는 상부플랜지 상부면에서의 부식에 의한 두께 감소 및 플랜지와 수직보강재 용접부에서의 피로균열 발생 등으로 인한 전체적인 강성저하가 측정값에 영향을 미친 것에 의한 것으로 판단된다.

Table 6의 응력에 대한 비교결과를 보면, 해석모델 I, II에서의 구조해석 응력이 실측응력보다 각각 약 5% 및 10% 정도 작은 것으로 나타나고 있다. Table 6에서의 변위 해석결과를 보면 해석모델 I에서의 해석응력은 실측응력보다 크게 발생되어야 하나, 구조해석 결과는 약간 다르게 나타나고 있다. 이것은 변위해석 결과에서의 레일 및 침목에 대한 강성유무에 따른 변위값이 정확하게 비례하고 있지 않는 것을 고려한다면, 앞에서 기술한 레일 및 침목에 의한 강성유무의 차이, 그리고 거더와 레일 및 침목과의 합성작용에 의한 중립축 이동에 의한 영향 등으로 판단된다.

이상의 해석결과 및 측정결과로부터 대상교량은 공용연수의 경과에 따른 열화현상에 따른 영향을 어느 정도 받고 있는 것으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 현장측정과 구조해석 결과의 비교로부터 본 연구의 구조해석 결과는 충분히 대상교량의 구조거동을 반영하고 있는 것으로 판단된다. 그러므로 다음 장에서의 대상교량에서의 피로균열에 대한 보수·보강방안에서는 Fig. 10의 해석모델 I 및 II를 사용하여 구조해석을 실시하였다. 그러나 2장에서 기술한 것과 같이 동일한 수직보강재 상세에 플랜지 폭 및 거더 간격이 더 넓은 구조상세를 갖는 S8~S31에서의 피로균열 특성을 규명하기 위해서는 이들 경간에 대한 현장계측 및 이에 대한 구조해석이 추가적으로 수행되는 것이 필요할 것으로 판단된다.

5. 용접이음부 피로균열에 대한 보수·보강방안 및 적정성 검토

5.1 구조해석에 의한 피로균열 발생원인의 평가

상로플레이트 강철도교에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 열차하중의 통과에 따라 상부플랜지와 복부의 용접부 근방 및 상부플랜지 아래의 수직보강재 끝단에서는 휨변형이 국부적으로 크게 발생한다. 이것은 레일에 작용하는 차량하중이

거더간격과 레일간격의 차이 때문에 거더에 편심으로 작용하여 발생된다. 이들 영향이 Fig. 2에 나타난 피로균열 발생의 주요 원인이 된다.

Fig. 12에 Abe 등의 논문^[19]에서 제시된 계측사례를 나타내었다. Fig. 12에 나타난 세로보는 Fig. 1에 나타난 국내의 상로플레이트 강철도교와 유사한 구조형식을 갖고 있다. 이 논문에서 현장계측은 신간선이 통과하는 트러스교의 단부 세로보에서 실시되었다. 측정응력은 Fig. 12에 나타난 것과 같이 침목 아래의 상부플랜지에서 15mm 아래에 위치한 복부에서 계측되었다. 그러므로 이 측정위치는 플랜지와 복부의 필렛용접에 의한 응력집중의 영향이 거의 없는 위치이다.

(Plus Value of Stress in Figure shows Compression Component)

Fig. 12 Example of Stress Measured at Web of Stringer for Truss Bridge

Fig. 12에 나타난 것과 같이 신간선 16량의 열차하중 통과 및 세로보의 연속지지에 따른 응력특성을 나타내고 있다. 특히 Fig. 12에서의 계측위치인 복부 ① 및 ②에서의 응력은 열차 하중 통과에 따른 재하특성이 잘 나타나 있다. 내측인 ① 위치에서는 압축이 주로 발생하여 약 21MPa의 압축응력이 발생하며, 열차 통과 중에는 인장응력도 발생한다. 외측인 ② 위치에서는 인장이 주로 발생하여 약 9MPa의 인장응력이 발생하며, 열차 통과 중에는 압축응력도 발생한다. 이상의 계측결과를 보면 상부플랜지 아래의 복부응력은 열차하중의 축중 통과에 따라 세로보의 연속지지의 특성이 나타나 압축과 인장이 반복하는 교번응력의 특성을 나타내고 있다.

그러나 아베 등의 연구에서는 본 연구에서의 대상구조상세의 하나인 상부플랜지 하단부의 수직보강재 끝단에서 발생된 피로균열, 특히 (VSw/UFW)의 비가 이들 피로균열에 미치는 영향에 대해서는 연구가 실시되지 않았다.

이 절에서는 상로플레이트거더 강철도교에서 피로균열이 발생된 구조상세를 대상으로 피로균열의 발생 원인을 정량적으로 조사하기 위하여 상세 구조해석의 실시 및 평가를 수행

하였다.

Fig. 13에 상세구조해석에서의 피로균열 발생원인 규명을 위한 평가위치를 나타내었다. Fig. 13(a)에 구조해석에서의 대상구조상세의 위치, Fig. 13(b)에 대상구조상세 I인 상부 플랜지와 수직보강재의 용접이음부, Fig. 13(c)에 대상구조상세 II인 상부플랜지와 복부의 필렛용접부를 나타내었다. 여기서의 구조해석모델은 대상구조상세에 대한 해석모델링의 편의성을 고려하여 Fig. 10의 해석모델 I을 사용하였다. 그러므로 대상구조상세 I에서의 플랜지와 수직보강재 용접연결부 주위의 요소크기는 3mm이다. 그리고 대상구조상세 II에서의 플랜지와 복부의 용접연결부 주위의 요소크기는 5mm로 분할하여 구조해석을 실시하였다. 여기서 (VSw/UFW)의 비는 0.632이다

(a) Location of Target Detail for Structural Analysis

(b) Welded Part of Vertical Stiffness

(c) Fillet Welded Part of Upper Flange and Web

Fig. 13 Location of Evaluation for the Cause of Fatigue Crack

Fig. 13(b)에서의 응력평가는 플랜지의 휨 변형에 의한 거동을 조사하기 위하여 수직보강재 끝단의 상부플랜지(Fig. 13(b) ①)의 상부 및 하부에서 검토되었다. Fig. 13(c)에서의 응력평가는 플랜지 및 복부의 휨 변형에 의한 거동을 조사하기 위하여 복부의 필렛용접부를 포함한 복부의 내측 및 외측에서의 응력(Fig. 13(c)의 ②) 및 상부플랜지의 상부 및 하부에서의 응력(Fig. 13(c) ③)을 검토하였다.

상세구조해석에서의 재하하중은 정적재하시험에서 사용한 동일한 하중을 사용하였다. 이 하중을 사용하여 대상구조상세에서의 영향선 이론에 기초하여 하중을 재하하고, 이에 따른 응력을 산정하였다.

Fig. 14에 피로균열의 발생원인을 조사하기 위한 구조해

석에서의 하중의 재하경우를 나타내었다. 대상구조상세 I 및 II의 바로 위에 축하중이 재하되는 경우를 Load Case I(L.C. I), 대상구조상세에서 축하중이 우측으로 +1.2m 이동하여 재하되는 경우를 Load Case II(L.C. II), 좌측으로 -1.2m 이동하여 재하되는 경우를 Load Case III(L.C. III)로 정의하였다. 이들 재하위치는 영향선 해석으로부터 대상구조상세에서 최대 및 최소응력이 발생될 것으로 예상된 위치이다. 여기서의 하중재하는 레일과 침목이 거더에 고정되어 있는 것으로 간주하여 Table 3의 열차 차륜하중이 레일을 통하여 거더 위의 침목 위에 등분포로 재하되는 것으로 가정하여 재하하였다.

이로부터 피로균열 발생부의 변동응력범위를 산정하고, 이를 허용피로응력범위와 비교하여 피로균열 발생 가능성을 평가하였다. 여기서의 허용피로응력범위는 국내의 철도설계기준^[7]에 제시된 값을 사용하였다.

(a) Load Case I

(b) Load Case II

Fig. 14 Load Case in Structural Analysis for the Cause of Fatigue Crack

Table 7에 대상구조상세에 대해 구조해석 결과에 기초한 피로균열발생 가능성을 평가한 결과를 나타내었다. Fig. 15에 대상구조상세에 대한 구조해석 결과의 일례를 나타내었다.

열차 축하중 이동에 따른 대상구조상세에 대한 구조해석 결과, Table 7에 나타난 것과 같이 축하중이 대상구조상세의 바로 위(L.C. I)에 작용 할 때에 최대응력, 전·후(L.C. II 및 III)에 작용할 때에 최소응력을 나타내고 있다. 그러므로 구조해석결과는 단경간 교량에서의 축하중 이동에 따른 대상구조상세의 응답특성을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 또한 Table 7에서 Fig. 12에 나타난 일본의 현장 계측결과 사례에 대응하는 Fig. 13(c)의 ②에서의 수직응력 특성은 Fig. 12의 결과와도 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 구조해석

결과는 충분히 타당성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

Table 7 및 Fig. 15(a)에 나타난 것과 같이 수직보강재 끝단(No.1)에서의 발생응력은 축하중 이동에 따른 응력특성을 나타내고 있으며, 휨에 의한 면외응력성분이 85.7MPa [면외응력= $(85 - (-86.3))/2$]로 크게 나타나고 있다. 그리고 수직보강재 끝단에서의 응력범위는 90.1MPa(충격포함시: $90.1 \times 1.235 = 111.3$ MPa)로 압축응력 성분에 의한 응력범위의 감소(최대 30%)를 고려하여도 대상구조상세에 대한 허용피로응력인 77MPa를 초과하고 있다. 그러므로 대상구조상세 I에서는 피로균열이 발생할 수 있을 것으로 평가되었다. 그러나 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 추가적으로 용접에 의한 잔류응력 및 실제 용접시의 기하형상 등이 충분히 반영한 보다 정밀한 해석, 그리고 (VS_w/UF_w)의 비를 반영한 변수해석이 필요할 것으로 판단된다.

Table 7 및 Fig. 15(b)에 나타난 것과 같이 대상구조상세 II에서의 응력범위는 복부측인 No. ②에서 52.1 MPa, 플랜지 측인 No. ③에서 93.9MPa를 나타내고 있다. 또한 휨에 의한 면외응력성분은 복부측인 No. ②에서 47.9MPa [면외응력= $(-32.7 - (63.2))/2$], 플랜지 측인 No. ③에서 75.2 MPa [면외응력= $(87.3 - (-63.2))/2$]로 평가되었다. 이상의 평가결과와 대상구조상세 II에서 응력범위도 피로허용응력범위인 81MPa를 초과하고 있어 피로균열이 발생할 수 있는 것으로 평가되었다. 그러나 구조해석에서의 최대응력범위 값을 나타내고 있는 위치가 상부플랜지의 상부이므로 구조상세를 고려하면 피로균열이 발생되기 어려운 위치이다. 따라서 이 위치에 대한 보다 정확한 피로균열 발생에 대한 평가를 위해서는 보다 상세한 면외거동 및 판 두께방향의 응력평가 등을 고려할 수 있는 솔리드요소를 사용한 구조해석에 의한 평가 등이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

Table 7. Evaluation of Possibility of Fatigue Crack based on Structural Analysis for Target Details

Target Detail		Location	Stress(MPa)			Allowable Fatigue Stress Range
Detail	No.		L.C. II	L.C. I	L.C. III	
I	①	Upper	2.6	85.0	2.8	77 MPa
		Lower	3.7	-86.3	3.8	
II	②	Front	1.6 (-0.9)	-32.7 (-62.7)	1.5 (-0.8)	81 MPa
		Back	1.1 (0.6)	63.2 (63.2)	1.1 (0.5)	
	③	Upper	-6.3	87.3	-1.3	
		Lower	0.6	-63.1	0.8	

where : stress shows principle stress
the value of parenthesis is stress of vertical direction at No.②

(a) Welded Part of Vertical Stiffness
(b) Fillet Welded Part of Upper Flange and Web
Fig. 15 Result of Structural Analysis for Target Details (Stress contour)

이상의 대상구조상세에 대해 구조해석 결과에 기초한 피로 균열발생 가능성을 평가한 결과, 구조상세 I의 상부플랜지와 수직보강재의 용접이음부 끝단, 그리고 대상구조상세 II의 상부플랜지와 복부의 필렛용접부에서 피로균열의 발생 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

5.2 용접이음부 피로균열에 대한 보수·보강방안

이 절에서는 대상교량에서 발생된 2개의 피로균열 가운데 상부플랜지와 수직보강재의 용접이음부인 대상구조상세 I에서의 피로균열에 대한 보수·보강방안에 대해 검토하였다. 이것은 2장에서 기술한 것과 같이 대상교량에서의 피로균열이 대상구조상세 I에서 발생된 것이 대부분인 것을 반영한 것이다.

대상구조상세에서의 피로균열 발생원인은 4장에 나타난 결과 및 기존 연구^[14]에 의하면 축하중 작용시의 편심작용에 의한 상부플랜지 용접이음부에서의 면외 휨변형 및 수직보강재 용접이음부 끝단에서의 국부응력에 의한 것으로 조사되었다.

그러므로 대상구조상세 가운데 수직보강재 용접부 끝단에서 발생된 피로균열에 대해서는 편심하중에 의해 플랜지의 내측 끝 쪽에서 발생하는 면외휨변형을 저감시키기 위한 방안을 제안하고, 이에 따른 효과를 검토하였다. 따라서 연구에서는 수직보강재 바깥 측에 두께 10mm의 강재를 추가적으로 부착하여 보강시키는 방안을 제시하고 이에 대한 보수·보강의 효과를 조사하였다. S7경간에서의 (VS_w/UF_w)의 비는 0.632이며, 보수·보강 방안에서의 (VS_w/UF_w)의 비는 1.0이 된다. 이것으로부터 플랜지 쪽에 대한 수직보강재 폭의 크기가

균열발생에 미치는 영향을 고려할 수 있을 것이다.

Fig. 16에 대상구조상세 I 및 대상구조상세 I에 대한 보수·보강 구조상세를 나타내었다. 보수·보강방안으로는 수직보강재에 용접으로 강재를 덧붙여 보강하는 방안인 Fig. 16 (a), (b)에 나타난 용접에 의한 보강판 용접, Fig. 16 (c)에 나타난 고장력볼트에 의한 보강판 부착의 3가지 경우를 제시하고 이에 따른 구조해석을 실시하였다. Fig. 16의 (a), (b)는 수직보강재에 보강판을 용접에 의해 붙이는 형태이므로 Fig. 10(a) 및 (b)에서의 해석모델 I을 사용하여 해석을 실시하였으며, Fig. 16의 (c)는 볼트에 의해 보강판을 연결시키는 형태를 취하고 있으므로 Fig. 10(c) 및 (d)에서의 해석모델 II를 사용하여 구조해석을 실시하였다.

Fig. 17 및 Table 8(a) 및 (b)에 각각 구조해석에 기초한 대상구조상세 I의 보수·보강방안에 대한 구조해석결과 및 피로응력 검토결과를 나타내었다. 피로응력 평가위치는 실제 대상교량에서 피로균열이 발생한 보수·보강 전의 상부플랜지와 수직보강재 용접부 끝단을 대상으로 하였다. 이것은 보수·보강 이후의 수직보강재 끝단은 플랜지와 일치하는 면이 되므로 면외응력이 거의 발생하지 않는다는 것, 또한 용접에 의한 보수보강인 것을 고려하여 용접부에서의 균열 재발생의 가능성을 보고자 한 것이다.

Fig. 16 Analysis model by retrofit method

해석결과로부터, 보수·보강을 실시하기 전의 대상교량의 평가위치인 대상구조상세 I에서의 응력범위는 90.1MPa(충격계수 미반영)로 철도설계기준의 허용피로응력범위인 77MPa를 초과하는 응력범위가 나타났다. 그러나 대상구조상세 I에 대한 보수·보강방안인 Case 1 및 Case 2에 의한 응력범위 감소율은 Case1에서 82.1%, Case2에서 79.4%로 나타나 모두 허용피로응력범위이하인 것을 알 수 있다.

그러므로 이들 2가지 경우의 보강방안에 대한 응력범위의 저감 차이가 약 3%정도인 것과 보강에 필요한 사용 강재량을 고려하면, Case 2의 보강방안이 Case 1에 비하여 효율적일 것으로 판단된다. 그러나 이들 보강 방안은 용접에 의한 보강방안이므로 용접시에 철저한 품질관리가 필요하며, 또한 향후 열차하중이 작용하게 되면 용접에 의한 잔류응력 및 국부적인 응력집중 등의 영향에 의해 피로균열이 재차 발생할 수 있을 가능성을 고려하는 것이 필요하다.

Fig. 17 Structural Analysis Result for Method of Repair/ Retrofit

Table 8. Structural Analysis Result and Fatigue Evaluation for Method of Repair/ Retrofit (Impact Factor : Applying 50% of Design Impact Factor)

Item	Stress Range (MPa)			④ (%)	⑤ (MPa)
	①	②	③		
Case 1	90.1	13.2	16.3	82.1	77
Case 2		15.8	19.5	79.4	
Case 3	89.9	11.0	13.6	84.9	

where, ① : Before Repair/ Retrofit

② : After Repair/ Retrofit

③ : Including Impact Factor

④ : Reduction Ratio of Stress Range

⑤ : Allowable Fatigue Stress Range (MPa)

대상교량의 평가위치인 대상구조상세 I에서의 볼트침접에 의한 보강방안인 Case 3에 대한 구조해석 결과, 보수·보강을 실시하기 전의 응력범위는 89.9MPa(충격계수 미반영), 보수·보강 후에 11.0MPa로 나타났다. Case 3에 의한 보수·보강방안은 응력범위 감소율이 87.1%로 나타났다. 이로부터 고장력볼트를 사용한 침접판에 의한 보강효과가 3가지 보수·보강방안 중에서 가장 좋은 것으로 나타났다.

6. 결 론

공용중인 강철도 상로플레이트거더교에서의 피로균열발생 부를 대상으로 현장조사 및 현장계측, 일련의 구조해석을 실시하고, 대상교량의 구조거동 특성 및 피로균열의 발생 원인의 규명, 보수·보강(안)에 대하여 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 강철도 상로플레이트거더교의 상부플랜지와 복부의 용접부 및 상부플랜지와 수직보강재의 용접이음부에서의 피로균열은 레일과 거더사이의 간격 차이에 의한 편심의 영향 및 이에 따른 휨변형에 의해 발생되었다. 특히 플랜지 폭에 대한 수직보강재 폭의 비(VSw/UFW)의 크기가 균열발생에 미치는 영향이 큰 것으로 평가되었다.
- (2) 피로균열의 보수·보강방안으로 3가지 방안을 제시하고, 이에 대한 상세구조해석을 실시하여, 보수·보강방안의 효율성을 검토하였다. 그 결과 고장력볼트를 사용하는 침접판에 의한 보수·보강방안이 가장 효율성이 좋은 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국해양대학교 학술진흥재단 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 경갑수, 이준석, 최일윤, 홍성욱(2002) 국내 강철도교의 열화손상 사례분석, 2002년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.32-40.
Kyung, K.S., Lee, J.S., Chou, I.Y. and Hong, S.W. (2002) A Case Study on the deteriorations of Steel Railway Bridges in Domestics, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.32-40 (in Korean).
- [2] 한국철도시설공단(2012) [Http://www.kr.or.kr/info/board/PropertyV.do](http://www.kr.or.kr/info/board/PropertyV.do).
Korea Railway Network Authority(2012) [Http://www.kr.or.kr/info/board/PropertyV.do](http://www.kr.or.kr/info/board/PropertyV.do).
- [3] 경갑수, 최일윤, 이준석, 이희현, 이준호(2005) 국내 강철도교의 피로특성, 2005년도 학술발표대회논문집, 한국철도학회, pp.89-96.
Kyung, K.S., Choi, I.Y., Lee, J.S., Lee, H.H., and Lee, J.H. (2005) Fatigue Characteristics of Steel Railway Bridges, *Proceedings of Annual Conference Korean Society for Railway*, KSR, pp.89-96 (in Korean).
- [4] 김주우, 정희영(2012) Full-scale 실험 모드해석을 이용한 노후화된 철도판형고의 진동특성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, Vol. 24, No. 1, pp.119-128.
Kim, J.W. and Jung, H.Y. (2005) Vibrational Characteristics of the Deteriorated Railway Plate Girder Bridge by Full-scale Experimental Modal Analysis, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 1, pp.119-128 (in Korean).
- [5] 장석운 외 8인(1995) 당산철교 현안에 관한 좌담회, 강구조학회지, 한국강구조학회, Vol. 7, No. 4, pp.5-14.
Chang, S.T. et al. (1995) Discussion of Current Issu of Dandsan Bridge, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 7 No. 4, pp.5-14 (in Korean).
- [6] 박용천, 용환선, 김석태(1997) 강철도교 바닥틀구조에서 Coped beam의 피로거동, 1997년도 학술대회 발표집, 대한토목학회, pp.121-124.
Park, Y.C., Yong, H.W., and Kim, S.T. (1997), Fatigue Behavior of Coped Beam in the Floor System of Steel Railway Bridge, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.121-124 (in Korean).
- [7] 조재병, 경갑수, 홍성욱, 국순승, 홍준형(2003) 구 당산철교 판형교 세로보의 피로균열에 대한 시뮬레이션, 2003년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.74-80.
Jo, J.B., Kyung, K.S., Lee, Hong, S.W., Kook, S.S., and Hong, J.H. (2002) Simulation of Fatigue Crack Propagation at the Coped Stringers of the Old Dangsans Subway Bridge, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.74-84 (in Korean).
- [8] 이광일, 심낙훈, 정시운, 박영석(2006) 강철도교 연결부의 세로보 절취부 형상에 따른 정적거동에 관한 실험적 연구, 2006년도 정기학술대회논문집, 대한토목학회, pp.2307-2310.
Li, G.R., Shim, N.H., Chung, S.Y., and Park, Y.S. (2006) An Experimental Study on the Static Behavior of Type of Coped Stringer in Steel Railway Bridge, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.2307-2310 (in Korean).
- [9] 황윤국, 장동일(1997) 절취부를 갖는 세로보의 피로거동과 보수·보강에 관한 연구(I)-정적거동 및 피로거동의 실험적 고찰-, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, Vol. 9, No. 3, pp.363-375.
Hwang, Y.K. and Chang, D.I. (1997) Study on Fatigue Behavior and Rehabilitation of Stringer with Coped Section(I)-Experimental Study on Static and Fatigue Behavior-, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 9, No. 3, pp.363-375 (in Korean).
- [10] 이성진, 경갑수, 박진은, 이준호(2009) 강철도 플레이트 거더교 용접구조상세의 피로균열 평가 및 보수보강, 2009년 추계학술대회논문집, 한국철도학회, pp.379-384
Kyung, K.S., Lee, S.J., Kyung, K.S., Park, J.E., and Lee, J.H. (2009) Evaluation and Repair/Retrofit of Fatigue Crack for Welded Details of Plate Girder of Railway Steel Bridge, *Proceedings of Autumn Annual Conference Korean Society for Railway*, KSR, pp.379-384 (in Korean).
- [11] 이성진, 경갑수, 박진은, 이상학(2011) 강철도교에서 상부플랜지와 수직보강재 용접연결부의 피로균열에 대한 보강방안의 타당성 평가, 2011년도 학술발표대회논문집, 한국강구조학회, pp.257-258.
Lee, S.J., Kyung, K.S., Park, J.E., and Lee, S.H. (2011) Feasibility Evaluation of Retrofitting Method by Fatigue Crack of Welded Joint of Upper Flange and Vertical Stiffener at Steel Railway Bridge, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.257-258 (in Korean).
- [12] 건설교통부, 대한토목학회(2004) 철도설계기준(철도교편) Ministry of Construction and Transportation, Korean Society of Civil Engineers (2004),

- Railway Bridge design Criteria (in Korean).
- [13] 이희현, 전준창, 경갑수(2007) 강합성 거더교의 피로설계 용 충격계수의 제안, *대한토목학회논문집* 대한토목학회, Vol. 27, No. 6A, pp.777-788.
- Lee, H.H., Jeon, J.C., and Kyung, K.S. (2009) Suggestion of Impact Factor for Fatigue Design of Steel Girder Bridge, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 6A, pp.777-788 (in Korean).
- [14] Lee, H.H., Jeon, J.C., and Kyung, K.S. (2012) Determination of a reasonable impact factor for fatigue investigation of simple steel plate girder railway bridges, *Engineering structure*, Vol. 36, pp.316-324.
- [15] AASHTO (2007) LRFD Bridge design specifications, Si Units, 4th edition.
- [16] Japan Road Association (2002) *Fatigue design guide of steel highway bridges*, Maruzen (in Japanese).
- [17] MIDAS Civil Version 7.2 (2011)
- [18] IIW (1993) *Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components*, Wiley-Interscience.
- [19] Abe, H., Wada, T., Ishiguro, K., and Iwashita, N. (1993) Twist Fatigue of Neck-weld of Railway Girders, *Journal of Structural Engineering A*, Vol. 39, No. 3, pp.959-970 (in Japanese).

요 약 : 철도교는 일반적으로 설계하중에 근접한 열차하중이 빈번하게 통과할 가능성이 있으므로, 초기설계단계부터 여러 구조상세에 대해 피로특성을 충분한 반영하는 것이 필요하다. 그럼에도 불구하고 철도교에 작용하는 축하중의 크기 및 배치 특성, 피로에 대한 부적절한 구조상세의 적용 등으로 인하여 강철도 플레이트거더교에서 부분적으로 피로균열이 보고되고 있다. 상부플랜지와 복부의 용접이음부에서의 피로균열의 주요 발생 원인의 하나는 침목을 지지하는 주거더와 열차하중이 작용되는 레일과의 중심간격 차이에 따른 열차하중의 편심작용에 의한 것이다. 이 연구에서는 공용중인 강철도 상로플레이트거더교를 대상으로 현장조사 및 현장계측, 일련의 구조해석을 실시하고, 대상교량의 구조거동 특성 및 피로균열의 발생 원인의 규명, 보수·보강(안)에 대하여 검토하였다.

핵심용어 : 강철도교, 상부플랜지와 복부의 용접부, 수직보강재, 편심작용, 회전변형, 피로손상, 보수보강