

# 강관 트러스 연결부 Hot Spot 응력에 관한 연구

## A Study on Hot Spot stress in welded joints of steel Tubular truss

장우선†      정지승\*      안영수\*\*      윤식재\*\*\*      양성돈\*\*\*\*      박경준\*\*\*\*\*  
Woo-Sun Jang   Jee-Seung Chung   Young-Soo Ahn   Sik-Jae Yoon   Seong-Don Yang   Gyeong-Jun Park

### ABSTRACT

Tubular member is hollow and is an excellent source of structural member with great buckling resistance and torsional resistance. With its development and simplicity in structure, steel tubular truss has the ability to be structured in long span bridges, without a stiffener. Recently, it has been used in many countries in Europe, Canada, Japan, and the US with the help of international committees such as CIDECT(International Committee for the Development and Study of Tubular Structures and International Institute of Welding). The most important problem when using the tubular member is the fact that it is difficult to test the fatigue stress determined by nominal stress, since geometrical stress concentration occurs due to the welded joint's nod of complexity. The purpose of this study is to compare and examine current theories and widely applied Hot Spot stress determinations through finite element analysis, which is about welded joints of steel tubular truss. We would like to suggest a way of design practice which involves a bridge plan with rarely domestically used steel tubular truss' basic research data as well as considering the future of tubular member.

### 1. 서론

역사적으로 교량은 압축에 강한 콘크리트와 인장에 강한 강재를 조합한 합성형과 혼합형을 주로 사용되어졌다. 최근들어 구조물이 대형화되고 다양화됨에 따라 강과 콘크리트의 이종재료를 여러 가지 형태로 조합시킨 구조시스템이 나타나고 있다. 이러한 철골철근콘크리트(SRC)부재나 충전강관(CFT)부재 등의 복합구조는 단일부재로는 얻을 수 없는 우수한 구조적 특성을 나타내고 있다.

복합교중에서 PSC상자형교의 자중 경감 및 프리스트레스의 도입효율 극대화를 위해 복부판을 강재로 대체한 파형강관웹합성형교 또는 강트러스웹합성형교와 트러스교의 부재들을 강관이나 충전강관으로 대체한 강관트러스교 등이 적용되고 있으며, 특히 강관부재는 중공형으로 좌굴, 비틀림 및 회전 저항성이 우수한 구조 부재이다. 강관 트러스 형식의 경우 개발성과 구조의 단순함으로 보강재 없이 장경간 계획이 가능한 교량 형식으로 근래 CIDECT(International Committee for the Development and Study of Tubular Structures와 International Institute of Welding)과 같은 국제 위원회의 노력으로 유럽, 캐나다, 일본 및 미국등에서 적용이 늘고 있다.

강관트러스교에서 격점부는 완전 용입용접으로 연결되어 있으나 이러한 용접부는 형상의 복잡성으로 기하학적 응력집중현상이 발생하여 공칭응력보다 큰 응력이 발생하여 적정한 피로강도 평가가 어렵다. 본 연구의 목적은 강관트러스교에서 보강이 없는 강관과 보강이 있는 강관 그리고 콘크리트로 일부 충전된 강관트러스교의 연결이음부에 대한 유한요소해석과 현재 이론 및 경험식으로 다양하게 적용되는

† 책임저자 : 비회원 : (주)EDCM 상무이사 E-mail : jws890@hanmail.net TEL : 010-5400-0759  
\* 정회원 동양대학교 철도토목학과 부교수 . 공학박사 E-mail : jschung@dyu.ac.kr  
\*\* 비회원 : (주)하경 전무이사 . 동양대학교 박사과정 E-mail : ysooahn@lycos.co.kr  
\*\*\* 비회원 : (주)EDCM 상무이사 . 공학석사 E-mail : sigchai@naver.com  
\*\*\*\* 비회원 : (주)포스코건설 토목기술팀 부장 . 동양대학교 박사과정 E-mail : ysdon@poscoeng.com  
\*\*\*\*\* 비회원 : 케이블텍(주) 전무이사 . 동양대학교 박사과정 E-mail : kjpark@cabletek.co.kr

Hot Spot 응력산정을 비교 검토하여 국내에서 적용 사례가 적은 강관트러스교의 연구 기초자료와 향후 강관부재를 적용하여 교량계획을 하는 설계실무 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 강관 용접연결부의 피로설계 방법

강관트러스의 용접 접합부는 기하학적으로 응력이 증폭되는 교란영역으로 응력집중에 의한 응력장이 복잡하여 단순한 강관이음 형상에서도 균열이 주관(Chord)측이나 지관(Braces)측에서 발생하는 것인지 판정이 어려우며 또한 균열전파의 상태를 완전하게 예측하는데 어려움이 있다.

용접연결부는 형상의 복잡성으로 피로손상이 생기는 위치에서 국부적으로 큰 응력이 발생하는 것을 Hot Spot 응력이라 하며 강관트러스교에서 용접 접합부의 피로평가 방법으로 “Hot Spot Stress Method”를 이용하고 있다.

Hot Spot 응력은 일반적으로 경험식과 유한요소해석, 모델시험체를 사용한 변형률 측정 등에 의해서 구한다. 경험식을 사용하는 경우에는 그 적용범위에 주의해야하고 유한요소해석으로 구하는 경우에는 요소의 크기와 종류에 따라 산정된 값이 외곡될 우려가 있으며, 모델시험체를 사용한 변형률 측정에 의한 경우는 시간적, 공간적인 제약과 비경제적인 면이 있다.

### 2.1 Hot Spot 응력의 개념

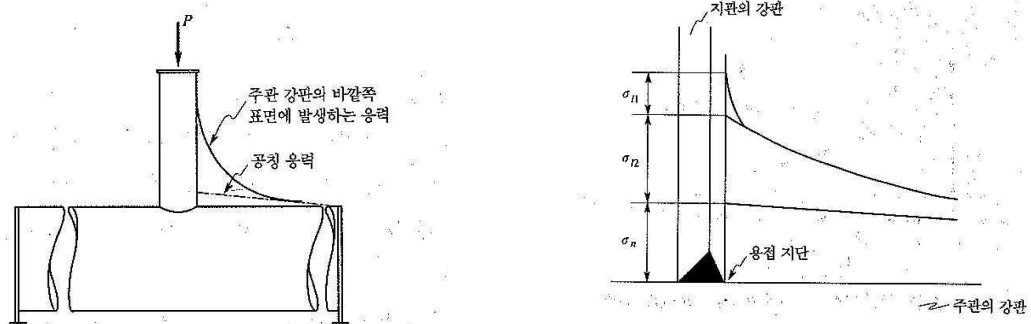
강관이음의 피로강도는 현재 우리나라에서는 기준이 없으며, JSSC 피로설계 지침과 EUROCODE 3에서 피로강도 등급이 주어지지 않는 구조상세에 대해서 Hot Spot 응력을 이용하여 피로강도평가를 인정하고 있다.

지관이 수직하중을 받는 T형 강관이음의 주관강관의 외측표면에 발생하는 응력분포는 그림1 (a)와 같이 나타난다. T형 골조구조에서 산출된 공칭응력에서 지관의 강관에 가까워짐에 따라 주관강관에 발생하는 응력은 공칭응력보다 크게 되며, 이는 주관강관이 지관으로부터 면외하중을 받아 변형을 일으킴에 따라 국부응력이 발생하기 때문이다.

그림1 (b)에서 용접지단 위치에서의 공칭응력을  $\sigma_n$ , 주관강관의 면외 변형에 기인하는 국부응력을  $\sigma_{i2}$ , 용접지단의 응력집중에 기인하는 국부응력을  $\sigma_{i1}$ 이라고 하면 Hot Spot 응력은 식①으로 정의된다.

$$\sigma_{hot} = \sigma_n + \sigma_{i2} \quad \text{---- ①}$$

즉, Hot Spot 응력이란 용접지단 위치에서의 공칭응력과 주관강관의 면외변형에 기인하는 국부응력을 합제한 응력이다. 이 응력은 용접지단의 응력집중에 의한 국부응력은 포함하지 않는다.



(a) 주관강관의 외측표면에 발생하는 응력

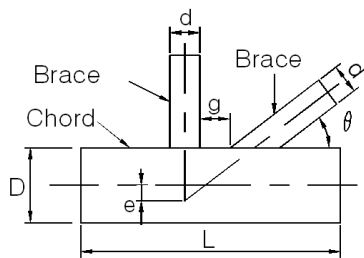
(b) 주관과 지관 공차부에 발생하는 응력

그림1 T형 강관이음에서의 발생응력

## 2.2 경험식

Beale and Toprac이 1967년에 축방향으로 재하된 T형 이음에서 주관과 지관 접합부의 이음계수값과 응력집중계수에 의한 방정식을 제안했다. Marshall과 공동 연구원들은 1976, 1979, 1982년에 걸쳐 응력집중계수에 대하여 확대 개발하여 American Welding Society(AWS) 및 American Petroleum Institute(API)에서 인정 수록되었다.

한편 Kuang, Potvin and Leick은 1977년에 유한요소해석에 의한 T, Y, K, KT이음의 방정식을 제안하였다. 이후 Wordworth and Smedley(1981), Efthmiou and Durkin(1988), Romeijn(1997)는 각각 발전된 강관 접합부의 발전된 방정식을 제안하였으며, 표1은 대표적인 강관 이음부의 Hot Spot 응력을 구하기 위한 경험식이다.



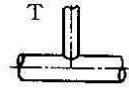
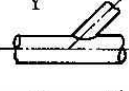
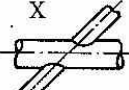
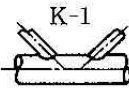
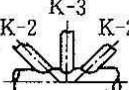
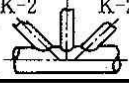
$$\beta = d/D \quad p = g/d$$

$$\gamma = R/T \quad \alpha = L/D \quad \tau = t/T$$

여기서,  $T$  : Chord의 판두께  
 $R$  : Chord의 곡률반경(외측)  
 $t$  : Brace의 판두께  
 $r$  : Brace의 곡률반경(외측)  
 $D$  : Chord의 외경  
 $d$  : Brace의 외경

그림2 Hot Spot 응력산정을 위한 변수

표1 Hot Spot 응력산정을 위한 경험식 예

Hot Spot Stress 산정 경험식 (일본 JSSC "강구조물의 피로설계지침.동해설(1993)")		
단 면	용접형태	축 력
 	$SCF_{chord}$	T & Y $[1.5 - 3.88(\beta - 0.47)^2] \cdot \gamma^{0.87} \cdot \tau^{1.37} \cdot \alpha^{0.06} \cdot \sin^{1.694}\theta$
		X $1.35 \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \beta(2.42 - 2.28 \cdot \beta^{2.2}) \cdot \sin\beta^{2(15 - 14.4\beta)}\theta$
		K-1 $1.51 \cdot \gamma^{0.67} \cdot \beta^{-0.59} \cdot \tau^{1.1} \cdot p^{0.067} \cdot \sin^{1.52}\theta, 30^\circ < \theta < 90^\circ$
		K-2 K-3 $1.83 \cdot \gamma^{0.54} \cdot \beta^{0.12} \cdot \tau^{1.07} \cdot \sin\theta, 0^\circ < \theta < 90^\circ$
   	$SCF_{brace}$	T & Y $[1.09 - 1.93(\beta - 0.5)^2] \cdot \gamma^{0.76} \cdot \tau^{0.57} \cdot \alpha^{0.12} \cdot \sin^{1.94}\theta$
		X $0.794 + 0.63 \cdot SCF_{chord}$
		K-1 $0.92 \cdot \gamma^{0.16} \cdot \beta^{-0.44} \cdot \tau^{0.56} \cdot p^{0.058} \cdot e^{1.45 \cdot \sin\theta}, 30^\circ < \theta < 90^\circ$
		K-2 $6.06 \cdot \gamma^{0.1} \cdot \beta^{-0.36} \cdot \tau^{0.68} \cdot (p_1 + p_2)^{0.13} \cdot \sin^{0.5}\theta, 0^\circ < \theta < 45^\circ$
		K-3 $13.8 \cdot \gamma^{0.1} \cdot \beta^{-0.36} \cdot \tau^{0.68} \cdot (p_1 + p_2)^{0.13} \cdot \sin^{2.9}\theta, 45^\circ < \theta < 90^\circ$
K-2 K-3 K-2	K-3 $4.89 \cdot \gamma^{0.12} \cdot \beta^{-0.4} \cdot \tau^{0.68} \cdot (p_1 + p_2)^{0.16} \cdot \sin^{2.27}\theta$	

$$\therefore \text{Chord의 Hot Spot Stress} = SCF_{chord} \times \frac{P_{chord}}{A_{chord}}$$

$$\therefore \text{Brace의 Hot Spot Stress} = SCF_{brace} \times \frac{P_{brace}}{A_{brace}}$$

Brace의  $SCF$ 는 다음식으로 보정해도 된다. 단, X, Y, T이음은 제외

$$1.0 + Q_R(SCF_{brace} - 1) \quad (\text{단, } 2.5\text{이상}), \quad \text{여기서, } Q_R = \exp\left(-\frac{0.5 \cdot T + t}{\sqrt{r \cdot t}}\right) \quad (\text{단, } 0.7\text{이상})$$

여기서, 응력집중계수( $SCF$ )란 Hot Spot Stress와 접합부에서의 부재 응력과의 비로서 정의되며, 그

식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SCF_{total,i} = \frac{\sigma_{hs,i}}{\sigma_{nom(brace)} + \sigma_{nom(chord)}} \quad \text{--- ②}$$

- $SCF_{total,i}$  :  $i$  위치에서 응력집중 계수
- $\sigma_{hs,i}$  : 균열위치에서의 Hot Spot Stress
- $\sigma_{nom(brace)}$  : 지관에서 공칭응력
- $\sigma_{nom(chord)}$  : 주관에서 공칭응력

### 2.3 유한요소해석에 의한 방법

유한요소해석은 요소의 크기와 종류에 따라 산정된 값이 외곡될 우려가 있으며, 그림3과 같이 용접의 형상을 고려하지 못하게 되며 일반적으로 주관(chord)의 강판과 지관(Brace)의 강판이 교차하는 절점에서의 주관강판측에 발생하는 응력을 Hot Spot 응력으로 간주하고 설계하기 때문에 엄밀한 Hot Spot 응력을 산정이 어려운 편이다.

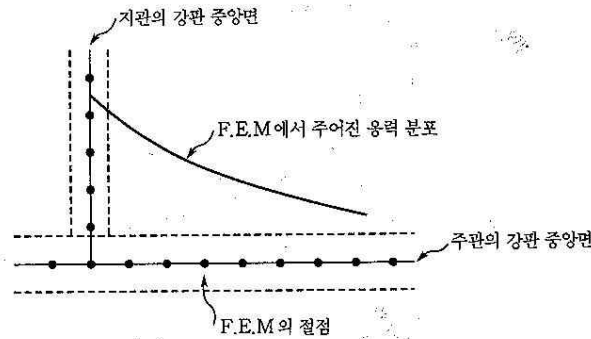


그림3 유한요소해석에서 구해지는 Hot Spot 응력

### 3. 강판 용접연결부의 피로설계 방법별 비교검토

본 논문에서는 강판트러스교 격점부에 대해 보강재가 없는 경우와 보강재를 사용한 경우, 충전강판을 사용한 경우를 경험식에 의한 방법과 유한요소해석에 의한 방법을 대상교량에 대해 Hot Spot 응력에 의한 피로검토를 비교 분석하고자 한다.

#### 3.1 대상교량의 제원

- 교량형식 : 강상형강판트러스교
- 경간장 : 4@60 = 240.0m
- 사용강재 : SM520
- 중앙부 부재제원
  - 사재 :  $\phi=508.0, t=22$
  - 하현재 :  $\phi=914.4, t=40$
  - 가로보 :  $\phi=318.5, t=24$
- 지점부 부재제원
  - 상현재 : Box-1,200×1,200 t=30
  - 사재 :  $\phi=508.0, t=22$

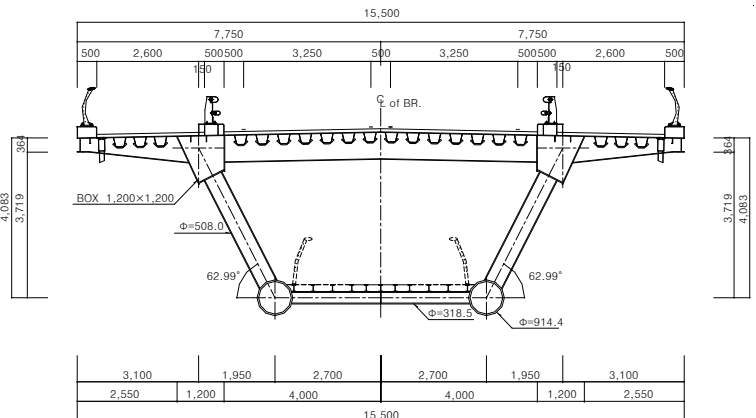


그림4 강판트러스교 계획도

### 3.2 Hot Spot 응력에 의한 피로검토 위치 및 해석결과

#### 3.2.1 피로검토의 위치 및 검토단면

검토위치는 응력의 범위가 최대로 발생하는 중앙부의 하현재와 중앙지점부의 상현재 연결부를 선정하였으며 그 위치는 그림5와 같다.

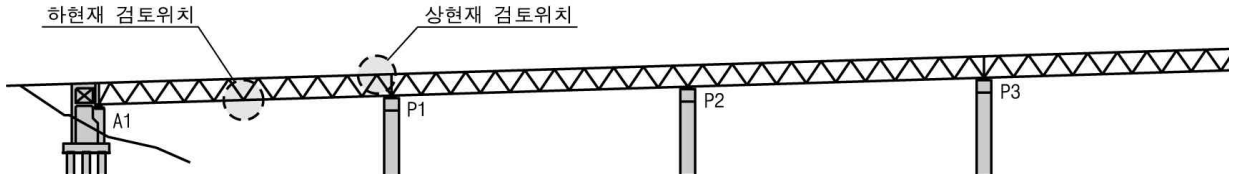
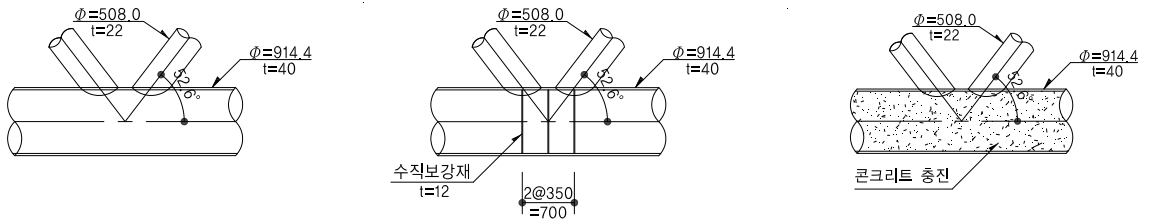


그림5 강관트러스교의 피로검토 위치

검토위치의 대상 단면 이음상세는 단면의 특징을 고려하여 하현재의 검토위치에 대해서만 3가지로 가정하였으며 그림6과 같이 첫 번째는 그림6 (a)의 일반적인 강관이음이고, 두 번째는 (b)의 강관이음부의 주관에 원형보강재를 보강한 단면이며, 세 번째는 (c)와 같이 주관부에 콘크리트로 충전한 단면을 검토하였다. 각각의 이음 단면에 대해 경험식에 의한 방법과 유한요소해석에 의한 방법을 검토하였다.



(a) 보강이 없는 경우

(b) 주관에 원형보강재로 보강한 경우

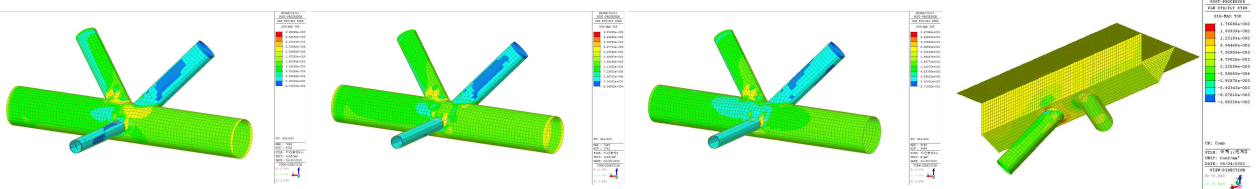
(c) 주관을 콘크리트로 충전한 경우

그림6 강관이음 하현재 단면의 종류

#### 3.2.2 피로검토

검토대상 교량의 폭원은 4차로이며 이때 제일 불리한 조합인 DB-24하중 3차선 편재하를 대상으로 경험식과 유한요소해석으로 비교 검토하였다.

경험식의 경우 주관에 대해 보강효과를 고려할 수 없으므로 그림6 (a)의 보강이 없는 강관이음인 경우에만 응력집중계수(SCF)를 산정하였고, 유한요소해석은 보강재를 보강한 모든 단면에 대해 검토하였다. 유한요소해석에 의한 Hot Spot 응력은 그림7, 그림8과 같이 외삽에 의해 구해 응력집중계수(SCF)를 표3에 정리하였으며 그 결과를 바탕으로 산정한 Hot Spot 응력을 표4에 정리하였다.



(a) 보강이 없는 경우

(b) 주관에 원형보강재 설치

(c) 주관을 콘크리트로 충전

(d) 보강이 없는 경우

그림7 강관이음 단면별 최대응력

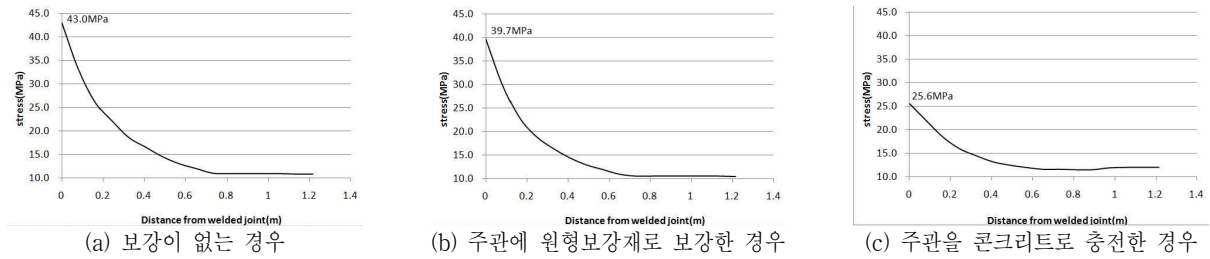


그림8 하현재 강관이음 단면별 Hot Spot 응력 산정

표3 연결단면별 SCF산정

구 분			경험식 SCF 단면 (a)	단면 (a), (d)		단면 (b)		단면 (c)	
				공칭응력	FEM SCF	공칭응력	FEM SCF	공칭응력	FEM SCF
하현재 강관 연결부	최대응력 (MPa)	하현재	4.081	10.8	3.98	10.6	3.75	12.0	2.13
		사 재	5.458	17.0	2.64	15.0	2.73	18.8	1.44
	최소응력 (MPa)	하현재	4.081	-3.6	2.50	-3.7	2.51	-3.8	1.89
		사 재	5.458	-1.6	3.00	-1.7	2.24	-2.7	2.15
상현재 강관 연결부	최대응력 (MPa)	상현재	-	34.52	2.33	-	-	-	-
		사 재	-	19.05	2.36	-	-	-	-
	최소응력 (MPa)	상현재	-	25.09	2.17	-	-	-	-
		사 재	-	-0.6	3.23	-	-	-	-

표4 연결단면별 Hot Spot 응력 산정

구 분			경험식에 의한 Hot Spot S. 단면 (a)	FEM에 의한 Hot Spot S. 단면 (a),(d)	FEM에 의한 Hot Spot S. 단면 (b)	FEM에 의한 Hot Spot S. 단면 (c)
하현재 강관 연결부	최대응력 (MPa)	하현재	44.07	42.98	39.75	25.56
		사 재	92.79	44.88	40.95	27.07
	최소응력 (MPa)	하현재	-14.69	-9.00	-9.29	-7.18
		사 재	-8.73	-4.80	-3.81	-5.81
상현재 강관 연결부	최대응력 (MPa)	상현재	-	80.42	-	-
		사 재	-	44.95	-	-
	최소응력 (MPa)	상현재	-	54.44	-	-
		사 재	-	-2.26	-	-

산출된 Hot Spot 응력으로부터 피로응력범위를 구하면 표5와 같으며 그 응력은 허용 Hot Spot 응력 범위 이내임을 알 수 있으며, 또한 주관(chord)의 보강에 따라 발생하는 피로응력이 단면(a) < 단면(b) < 단면(c)임을 알 수 있다.

표5 연결단면별 Hot Spot 응력 산정

(단위:MPa)

구 분		경험식에 의한 응력범위 단면 (a), (d)	FEM에 의한 응력범위 단면 (a)	FEM에 의한 응력범위 단면 (b)	FEM에 의한 응력범위 단면 (c)	허용 Hot Spot 응력범위	판 정
하현재 강관 연결부	하현재	58.77	51.98	49.04	32.74	102MPa	O.K
	사 재	101.52	49.68	44.76	32.88	102MPa	O.K
상현재 강관 연결부	상현재	-	25.98	-	-	102MPa	O.K
	사 재	-	47.21	-	-	102MPa	O.K

#### 4. 결론

강관트러스교의 용접 접합부는 기하학적으로 응력이 증폭되므로 피로에 의한 균열의 전파 등을 정확하게 예측하는데 어려움이 있으나 Hot Spot 응력에 의한 방법을 이용하면 예측을 할 수 있다.

본 논문에서는 강관연결부의 형상이나 보강여부와 보강방법에 따라 피로응력을 검토하였으며, 그 결과는 경험적인 방법으로 산출된 피로응력이 유한요소해석에 의한 값보다 큰 값을 알 수 있었다. 따라서 일반적으로 설계할 경우에는 경험적인 방법을 사용하여도 무방하나, 적용해야 할 단면의 형태나 간격 등을 고려하여 선택적으로 사용하여야 하며, 강관부재가 보강된 경우에는 경험적인 방법으로 검토가 어려우므로 유한요소해석에 의한 방법으로 검토하여야 한다.

강관부재가 원형보강재나 충전콘크리트로 보강된 경우에는 유한요소해석에 의한 방법으로 검토하였으며, 그 결과를 비교해 보면 보강되지 않는 경우보다 원형보강재로 보강한 경우 산출된 피로응력의 값이 다소 작은 값이 산출되었으나 충전강관의 경우는 상대적으로 매우 작은 값을 나타내고 있어 피로응력에 매우 안정적인 값을 알 수 있었다. 이는 피로응력이 주관의 면외변형에 의한 표면응력이 지배적임을 알 수 있다.

추후에 Hot Spot 응력에 의한 피로설계중 시험체에 의한 방법으로 검토하여 유한요소해석에 의한 값과 비교 검토가 필요하며, 활하중의 변동범위가 매우 큰 철도교에 대한 상세검토가 필요한 시점이다.

#### 참고문헌

1. 장경호, 경장현, 장갑철, 신수옥(2002), 강관트러스 부재 접합부의 응력거동, 대한토목학회 학술발표회 논문집
2. 장경호, 경장현, 장갑철, 신수옥(2002), 반복하중 작용시 T형 강관 접합부의 응력거동, 한국강구조학회 학술발표회 논문집 pp. 309~315
3. 윤식재(2005), 강관 트러스 용접 접합부의 피로거동에 관한 연구, 석사학위논문, 중앙대학교
4. AWS 2000. ANSI/AWS D1.1-2000 Structural Welding Code Steel. American Welding Society
5. 일본강구조협회(1999), 강구조물피로설계지침 동해설, 일본강구조협회
6. 大倉一郎(1998) 강교의 피로 도서출판 건설도서