

용접결합이 강철도교 트러스재의 응력특성에 미치는 영향

홍성욱

한림성심대학 토목과

1. 서론

최근 강교량의 경량화 추세에 따라 사용강재가 고강도화되고 용접접합형식이 주로 채택됨에 따라서 피로손상이 강교량에 있어서 주요한 열화현상으로 대두되고 있다. 특히 용접접합시 용접부 내부에 내재할 개연성이 있는 용접결합의 종류와 크기에 따라서 반복하중을 받는 강철도교에서 심각한 피로손상을 야기시킬 수 있다. 특히 용접결합의 대부분이 부재내부에 내재되어 있으므로 육안점검을 통해서서는 적절한 시기에 손상정도를 파악하는 것은 불가능하다.

이에 본 연구에서는 강트러스 철도교의 트러스 부재를 대상으로 실동하중에 따른 시간이력해석을 실시하고 용접결합 중 가장 빈번하게 발생하는 것으로 보고되고 있는 용입부족과 블로우홀 결함이 내재한 경우 용접결합의 크기에 따라 일련의 파괴역학적 해석을 실시해서 용접결합의 크기와 종류에 따른 강철도교 트러스재의 응력특성을 정량적으로 평가하였다.

2. 현장계측

2.1 대상교량 및 측정위치

본 연구대상교량은 1979년 9월에 준공되어 1995년 2월까지 약 16년간 공용한 교량으로, 그림 1에서 나타낸 바와 같이 양측의 접속구간은 연장이 550m인 하로판형교(단순구조)이며, 중앙부는 연장이 810m인 3경간 연속트러스교로 총연장이 1,360m인 강철도교이다.

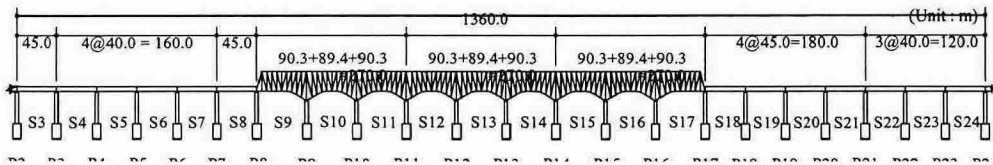


그림 1. 대상교량의 일반도

또한 그림 1에서 나타낸 대상교량 트러스구간에 대해서 정밀안전진단으로부터 트러스부재에 용접결합 여부를 비파괴시험을 통해서 실시하고 비파괴시험결과 비교적 크기가 큰 용접결합을 내재하고 있는 부재가 포함된 경간을 선정하였으며, 본 연구대상 경간 및 부재의 위치를 나타내면 그림 2와 같다.

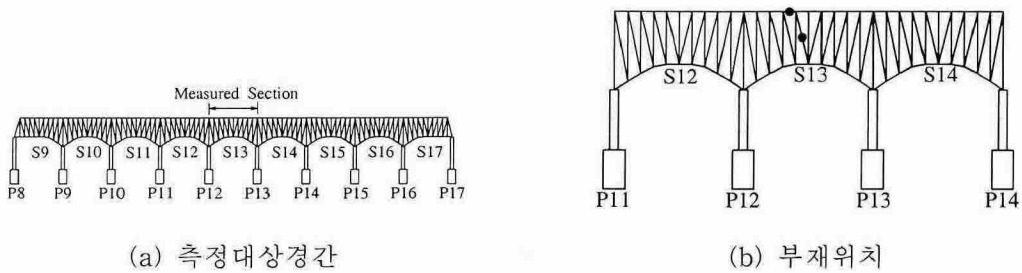


그림 2. 측정대상경간 및 부재위치

3. 시간이력해석

3.1 해석모델

본 연구대상 교량의 트러스 부재 중에서 용접결함을 내재한 상현재와 사재에 대한 피로해석과 파괴역학적 평가를 실시하기 위해서 필요로 하는 등가응력을 산정하기 위해서 본 대상교량 전제구조물에 대한 시간이력해석을 실시하였다.

본 대상 트러스 구간에 대한 시간이력해석모델의 일례를 나타내면 그림 3과 같으며, 시간이력해석시 최악의 하중조건을 가정함으로써 안전측 평가를 위하여 실동하중이 양방향 교차주행하는 하중조건과 일방향으로 편측주행하는 하중조건의 총 2가지 하중조건으로 시간이력해석을 실시하였다.

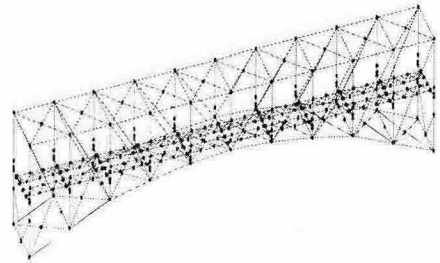


그림 3. 대상교량의 시간이력해석모델

3.2 하중조건

본 대상교량에 대한 시간이력해석시 이용한 활하중과 활하중에 따른 충격계수는 본 대상교량이 지하철교량인 관계로 지하철 2호선 설계기준에서 규정하고 있는 규정치를 적용하였다. 이에 본 해석에서 적용한 설계활하중에 대한 모식도를 나타내면 그림 4와 같다.

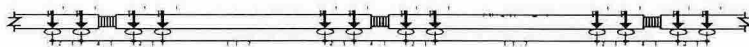


그림 4. 열차하중 모식도

또한 기존의 통행량 분석자료를 참고해서 표 1에서 나타낸 바와 같이 혼입율 100%인 경우, 혼입율이 240%인 경우에 대한 축하중을 고려해서 시간이력해석을 실시하였다.

표 1. 열차의 축하중

(단위 : tonf)

구분	공차하중	혼입률 100%	혼입률 240%	설계하중
축하중	10.6	13.0	16.3	21.0
총중량	42.4	52.0	65.2	84.0

3.3 시간이력해석결과

시간이력해석에서는 하중경우를 설계하중이 주행하는 경우와 실제교통상태를 나타내기 위하여 혼입률 100% 및 혼입률 240%의 실동하중이 주행하는 경우 및 공차하중이 주행하는 경우의 4가지의 경우를 대상으로 실시하였다. 시간이력해석결과 대상교량에 설계하중이 작용하는 경우의 응력이력파형의 일례를 나타내면 그림 5와 같다.

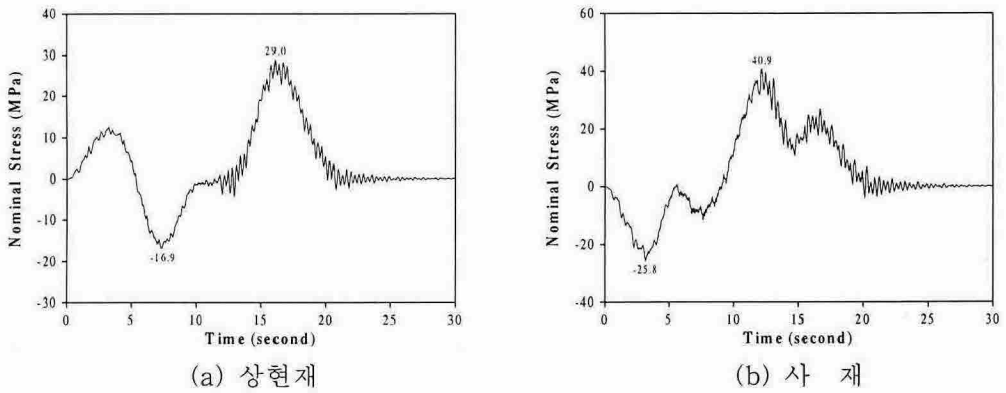


그림 5. 응력이력파형의 일례

또한 그림 5에서 나타난 응력이력파형에 기초해서 레인플로우법을 이용해서 응력빈도히스토그램을 작성하면 그림 6과 같으며, 응력빈도히스토그램에 기초해서 RMC 등가 응력을 산정한 결과를 정리해서 나타내면 표 2와 같다. 그림 6에서 나타난 응력빈도히스토그램은 기존 연구결과에 기초해서 일반적으로 부재의 피로평가지 피로손상에 영향을 미치지 않는 응력범위인 최대응력의 10% 이하의 응력범위에 대해서 컷오프를 실시한 후의 응력빈도분포를 나타낸 것이다.

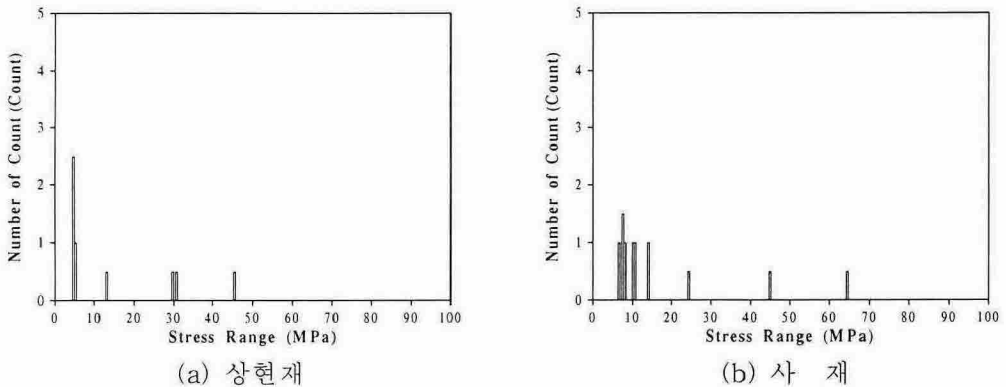


그림 6. 응력빈도히스토그램의 일례

그림 6에서와 같이 열차주행시 상현재와 사재에서 발생하는 응력의 분포특성은 컷오프를 실시하는 경우 진동 등에 따른 2차응력의 영향은 대부분 삭제되는 것을 알 수 있으며, 기관차하중과 객차하중의 열차축하중의 영향만이 나타나는 것을 알 수 있었다.

표 2. 등가응력 산정결과 (단위 : MPa)

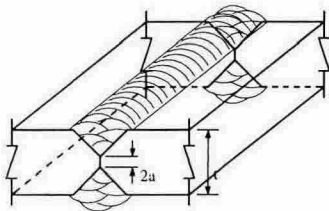
부재	공차하중	혼입률 100%	혼입률 240%	설계하중
사재	15.0	17.9	22.4	28.9
상현재	6.5	15.9	18.5	23.9

4. 파괴역학적 해석

4.1 균열보정계수 산정

표 2에서 나타낸 등가응력 산정결과에 기초해서 트러스재의 상현재와 사재의 용입부족 결함과 블로우홀 결함에 대해서 파괴역학적 해석을 실시하였다.

트러스 부재의 맞대기 이음 용접부의 미용착부나 용입부족 선단 등에서 발생하는 균열에 대한 피로균열성장해석은 그림 7과 같이 용접선 전체에 걸쳐 용입부족이 존재한다는 가정하에 이음부 단면의 2차원적 모형을 설정해서 식 (1)에서 나타낸 바와 같은 균열보정계수를 산정하였다.

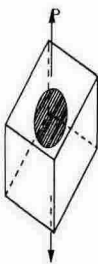


$$F(a) = (1 - 0.5\xi + 0.37\xi^2 - 0.044\xi^3) \times \sqrt{1 - \xi}$$

$$\xi = 2a/t \quad (1)$$

여기서, $2a$ 는 초기결함의 크기, t 는 맞대기이음 부재의 두께이며, $\xi \leq 0.7$ 인 경우 위의 식이 유효하다.

그림 7. 용입부족 모식도



또한 그림 8에서 나타낸 바와 같이 트러스재 용접부의 블로우홀에서 발생하는 피로균열에 대해서는 기존 연구결과를 고려해서 식 (2)를 이용해서 산정하였다.

$$F(a) = \frac{2}{\pi} \quad (2)$$

그림 8. 블로우홀 모식도

4.2 피로수명 산정

식 (1) 및 식 (2)를 이용해서 트러스재인 상현재와 사재에 대해서 초기결함크기에 따른 용입부족과 블로우홀 결함에 따른 피로수명을 산정하였다.

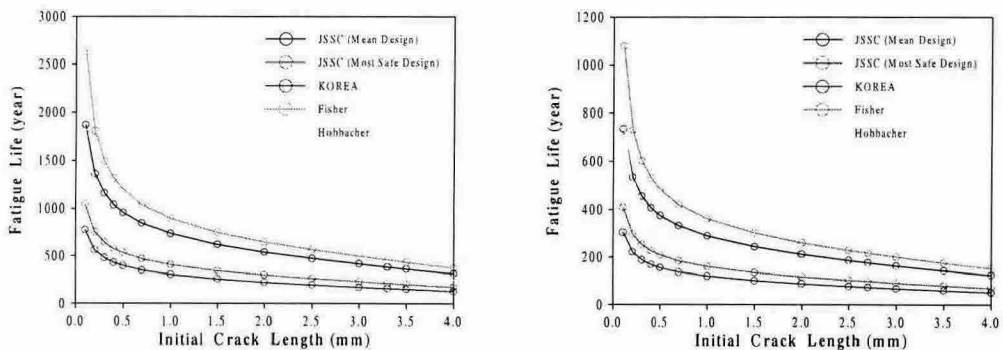
과괴역학적 방법을 이용해서 피로수명을 산정할 때 이용한 재료상수를 정리해서 나타내면 표 3과 같으며, 초기결함크기에 따른 용입부족과 블로우홀 결함을 내재한 트러스재의 피로수명 산정결과를 정리해서 나타내면 그림 9 및 그림 10과 같다.

표 3. 피로균열성장속도 산정시 적용한 재료상수

JSSC(최안전)		JSSC(평균)		Fisher		Hobbacher		국내	
C	m	C	m	C	m	C	m	C	m
1.50×10^{-11}	2.75	2.70×10^{-11}	2.75	1.20×10^{-11}	3.0	1.80×10^{-11}	3.0	3.62×10^{-11}	3.0

피로수명 산정시 이용한 재료상수는 표 3에서 나타낸 바와 같이 일본의 강구조물 피로설계지침에서 제안하고 있는 평균설계곡선을 적용하는 경우 가장 안전측의 평가를 하고 있으므로 독일의 Hobbacher나 미국의 Fisher가 제안한 재료상수를 적용해서 피로수명을 산정하는 경우에는 당연히 피로수명이 상당히 연장될 것이 분명해지게 된다.

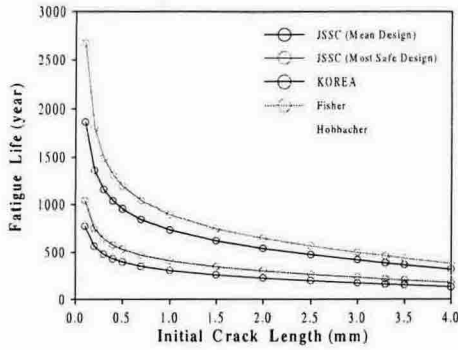
용입부족결함에 대한 초기균열길이는 0.1mm, 한계균열길이는 각각의 판두께(상현재의 경우 11mm, 사재의 경우 10mm)의 70%로 가정하였으며, 블로우홀 결함에 대한 초기균열길이는 0.1mm, 한계균열길이는 각 부재의 판두께로 가정하였다.



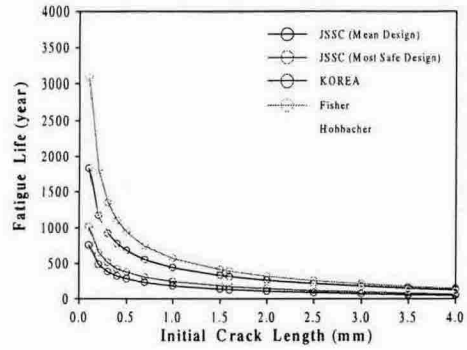
(a) 상현재

(b) 사재

그림 9. 용입부족 결함에 따른 피로수명 산정결과



(a) 상현재



(b) 사재

그림 10. 블로우홀 결함에 따른 피로수명 산정결과

그림 9 및 그림 10에서 나타낸 바와 같이 피로수명은 대상부재에서의 초기결함의 크기에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 피로수명 산정시에는 이에 대한 정확한 정보를 얻는 것이 중요할 것으로 생각된다.

그러나 용접결함으로 인한 피로수명 산정결과 강철도교 트러스재의 피로안전성에는 큰 문제가 없을 것으로 생각되나, 용입부족 결함의 경우 피로균열 성장특성이 내부에서 피로균열이 성장하기 때문에 지속적인 유지관리를 실시하지 않는 경우 피로안전성이 확보되지 않을 가능성이 있으므로 이에 대한 사전예방적 유지관리가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

강철도교 트러스부재에 용접결함이 내재한 경우 용입부족과 블로우홀 결함에 따른 트러스재의 피로특성을 정량적으로 평가한 결과 용접결함으로 인한 강철도교 트러스재의 피로안전성에는 큰 문제가 없을 것으로 생각되나, 용입부족 결함의 경우 피로균열 성장특성이 내부에서 피로균열이 성장하기 때문에 지속적인 유지관리를 실시하지 않는 경우 피로안전성이 확보되지 않을 가능성이 있으므로 이에 대한 사전예방적 유지관리가 필요할 것으로 생각된다. 또한 피로수명의 증가정도는 초기균열의 크기에 따라 큰 폭으로 달라지므로 피로수명 산정시에는 이들에 대한 정확한 정보를 얻는 것이 중요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) 홍성욱, "횡방향 맞대기 용접부의 피로특성", 한양대학교 박사학위논문, 1999.
- (2) 장동일, 경갑수, 홍성욱, "용입부족을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로강도에 관한 연구", 한국강구조학회논문집, 제10권 제3호, pp.497-508, 1998.
- (3) 장동일, 경갑수, 조광현, 홍성욱, "블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로특

- 성에 관한 연구”, 한국강구조학회논문집, 제11권, 제4호, pp.339-350, 1999.
- (4) 대한토목학회, “당산철교 증거보전사건 감정연구 보고서”, 1997.
 - (5) 한국강구조학회, “당산철교 감정의뢰연구 보고서”, 2003.
 - (6) 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.
 - (7) 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, pp. 240-260, 1993.
 - (8) C. Miki, F. Nishino, Y. Hirabayashi and H. Ohga, “*Fatigue Strength of Longitudinal Welded Joints containing Blowhole*”, Proc. of JSCE, pp.155-165, 1982.
 - (9) AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials), “*Standard Specification for Highway Bridges*”, pp. 144-147, 1996.