

강재 트러스교의 해석에 의한 피로설계기준 비교 및 검토

Comparison and Review of Fatigue Design Criteria by
the Structural Analysis of Steel Truss Bridges

김 상 석*

Kim, Sang-Seog

정 희 영**

Jung, Hie-Young

Abstract

The service life of steel bridges can be assured only when their strength, serviceability and fatigue safety are fulfilled. However, at the present time, the continuous research for fatigue of steel bridges is desperately required since not much research work has been done so far. In this study, a guideline on the fatigue design is suggested for the practical purpose in order to establish the long-term safety of steel bridges against fatigue. The continuous steel truss bridge was analyzed for the cumulative reversals of the actual traffic, stress ranges and fatigue strength. From the results, the domestic fatigue design procedure was found to be fairly overestimated in comparison to the design code of other foreign countries. Therefore, it is necessary to review the current fatigue design specifications and have the new and rationalized design criteria in the future domestic fatigue design guidance.

요 지

강교의 구조적 거동은 강도 및 사용성이 충족되고, 피로안전성이 확보될 때 공용수명을 충분히 확신할 수 있다. 그러나, 현재 교량의 피로에 관한 연구들은 상당히 부족하여 이 분야에 대한 지속적인 연구가 절실히 요구된다. 본 연구는 강교의 장기적인 피로안전성을 확보하기 위해서 실무에 적합한 피로설계지침의 방향을 제시함을 목표로 수행되었다. 연속된 강재 트러스교에 실교통량의 누적빈도수를 적용시켜 분석한 결과, 국내의 피로설계규정은 응력범위와 피로강도가 국외의 주요 설계기준에 비하여 과대평가 되는 것으로 나타난다. 따라서, 향후 국내의 피로설계지침에서는 피로설계조항들이 피로설계에 합리적으로 규정되는 것이 필요하다.

Keywords : fatigue design guidance, fatigue strength, fatigue safety, truss bridge

핵심 용어 : 피로설계지침, 피로강도, 피로안전성, 트러스교

* 정희원, 청석엔지니어링 특수사업부 상무, 구조기술사

** 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : sskim@cse.co.kr 016-205-3867

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 국내에서도 당산철교, 성수대교 등과 같은 강재를 이용한 교량의 용접부 결함이 구조물 피로손상의 주원인으로 지적되어 강재의 접합부 상세 및 피로현상에 대한 기술적인 관심이 고조되고 있으며, 구조물 안전에 대한 대책마련으로 국가적인 연구사업이 시작되고 추진 중이나, 강재의 피로해석은 토목, 기계 및 재료분야의 다중 지식이 요구됨으로 쉽게 많은 결과를 얻기는 힘든 상황이다. 강교의 피로파괴에 대한 연구에서 해결되어야 하는 궁극적인 목적은 기존 교량의 안전성평가, 파괴예방 방안, 잔류수명예측 및 신설교량의 피로설계기준 마련 등이다. 아직 강교의 피로연구 실적이 부족한 국내의 경우에는 계속해서 신설되고 있는 강교의 장기적인 안전성을 확보하기 위해서라도 우선 국외의 연구개발된 자료를 바탕으로 피로하중 재하방법과 빈도수, 충격, 피로강도, 피로한계 등의 피로설계지침을 마련하는 일이 시급하다.

본 연구에서는 이에 대한 목표의 일환으로 용접이음된 강교의 피로설계 시에 필요한 적합한 구체적 지침을 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 강교의 피로설계이론

2.1 일정하중에 대한 S-N 곡선

일정진폭하중의 반복작용에 의해 균열이 발생, 전파하여 결국 부재가 파단되는 현상을 나타내는 곡선이 S-N 선도이다. 어떤 응력비(R)에 대한 탄성한계 내의 피로실험 결과는 Fig. 1과 같이 나타나며, 반복회수 N과 응력범위 $\Delta\sigma$ 의 관계는 식 (1)과 같이 된다.⁽³⁾

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma) \quad (1)$$

2.2 변동하중에 대한 S-N곡선

자동차 또는 열차의 통과에 따라 교량의 각 부재에 발생하는 응력은 변동파형을 나타낸다. 이 변동파형에

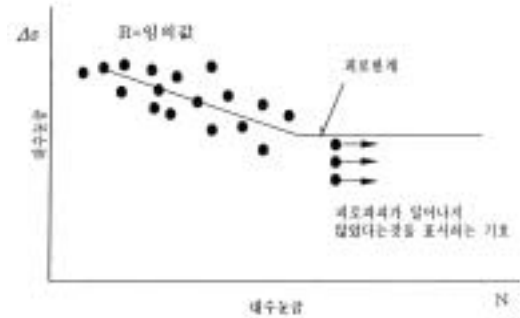


Fig. 1 S-N 선도

레인플로법 등을 적용함에 따라 응력범위의 각 성분과 그것에 대응하는 반복회수가 구해지고, 변동응력범위 스펙트럼이 얻어진다.

Fig. 2는 3개의 변동응력범위 스펙트럼과 1개의 설계 S-N곡선을 나타내며, Fig. 1에서 $\Delta\sigma_{car}$ 는 일정진폭하중에 대한 피로한계이다. 변동응력범위 스펙트럼이 주상도로 주어지는 경우의 등가응력범위는 식(2)를 이용하면 된다.⁽²⁾

$$\Delta\sigma_e = \left\{ \sum_{i=1}^k (\Delta\sigma_i)^3 \frac{n_i}{N} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

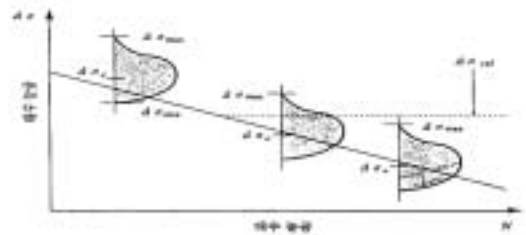


Fig. 2 변동응력범위 스펙트럼

3. 트러스교의 구조특성 및 3D Beam Model 해석

3.1 트러스교의 구조특성

형식 : 상로식 트러스교 (실교량/부재수 : 1562 개)
 구성 : 72+7@120=912m (2차로의 8경간 연속구조)
 하중 : DB 24 , DL 24 교통량 : 500 대/일

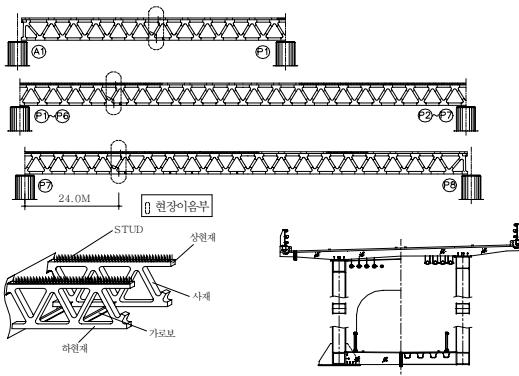


Fig. 3 트러스교의 상세도

Fig. 3의 용접이음된 강재 트러스교에서 응력범위, 허용피로응력 및 피로한계 등을 비교하기 위하여 해석 조건, 피로하중을 동일하게 놓고, 각 나라마다 별도로 연구되어 규정한 제반 피로설계기준을 적용한다.

3.2 도로교설계기준에 의한 3D 해석⁽¹⁾

Table 1 피로해석결과 (DL하중)

구 분	최대응력 ⁽¹⁾ 범위 (kgf/cm ²)	응력반복 회수 (회)	상 세 범 주	허용 피로 응력 (kgf/cm ²)	비 고
상현재	315.5	5.E+05	D ⁽²⁾	910	
하현재	682.8	5.E+05	D ⁽²⁾	910	
사 재	632.7	5.E+05	D ⁽²⁾	910	
수직재	474.7	5.E+05	D ⁽²⁾	910	
가로보	538.2	-	-	-	

Table 2 피로해석결과 (DB하중)

구 .분	최대응력 ⁽¹⁾ 범위 (kgf/cm ²)	응력반복 회수 (회)	상 세 범 주	허용 피로 응력 (kgf/cm ²)	비 고
상현재	159.2	2.E+06	D ⁽²⁾	560	
하현재	291.2	2.E+06	D ⁽²⁾	560	
사 재	237.0	2.E+06	D ⁽²⁾	560	
수직재	243.1	2.E+06	D ⁽²⁾	560	
가로보	324.7	2.E+06 이상	C ⁽³⁾	630	

(1) 각 부재에 발생되는 최대응력과 최소응력의 대수차의 최대값

(2) 범주 D: 합형의 용접된 조립부재

(완전용입 홈용접된 이음부 / 뒷땀판 미제거)

(3) 범주 C: H형의 용접된 조립부재 (완전용입 홈용접된 이음부)

3.3 AASHTO(LRFD)에 의한 3D 해석⁽⁵⁾

Table 3 피로해석결과 (AASHTO/LRFD)

구 분	최대응력 범위 (kgf/cm ²)	응력반복 회수 ⁽⁶⁾ (회)	상 세 범 주	허용 피로응력 (kgf/cm ²)	비 고
상현재	71.1	1.825E+07	C ⁽⁴⁾	438.0	
하현재	124.8	1.825E+07	C ⁽⁴⁾	438.0	
사 재	157.9	1.825E+07	C ⁽⁴⁾	438.0	
수직재	148.5	1.825E+07	C ⁽⁴⁾	438.0	
가로보	234.7	1.825E+07	B ⁽⁵⁾	612.0	

(4) 범주 C: 합형의 조립부재

(연속 완전용입 홈용접 / 뒷땀판 미제거)

(5) 범주 B: H형의 용접된 조립부재 (연속 완전용입 홈용접)

(6) 응력반복회수: 설계수명 동안 피로하중의 반복회수

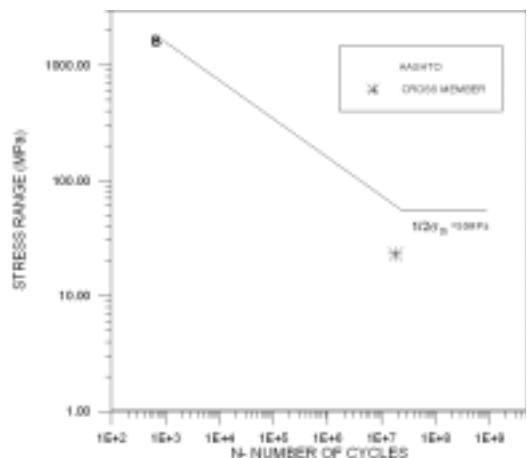
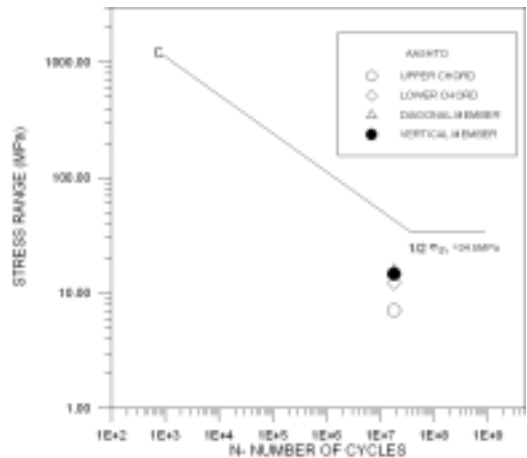


Fig. 4 설계 S-N 곡선 (AASHTO/LRFD)

3.4 EUROCODE(NO. 3)에 의한 3D 해석⁽⁶⁾

Table 4 피로해석결과 (EUROCODE)

구분	최대응력 범위(kgf/cm ²)	응력 반복 회수(회)	상세 범주	피로 강도 (kgf/cm ²)	안전 계수	두께 보정	수정 피로 강도(kgf/cm ²)	피로 한계 (kgf/cm ²)	허용 피로 강도(kgf/cm ²)
상현재	85.9	1.825E+07	71 ⁽⁷⁾	411.0	1.25	0.80	263.0	296.0	296.0
하현재	150.8	1.825E+07	71 ⁽⁷⁾	411.0	1.25	0.76	249.9	296.0	296.0
사재	190.8	1.825E+07	71 ⁽⁷⁾	411.0	1.25	0.84	276.2	296.0	296.0
수직재	179.4	1.825E+07	71 ⁽⁷⁾	411.0	1.25	0.92	302.5	296.0	302.5
가로보	283.5	1.825E+07	90 ⁽⁸⁾	517.0	1.25	1.00	413.6	367.0	413.6

(7) 범주 71 : 함형의 용접된 조립부재 (부재두께 8 mm 이상의 횡방향 맞댐용접)

(8) 범주 90 : H형의 용접된 조립부재 (횡방향 맞댐용접)

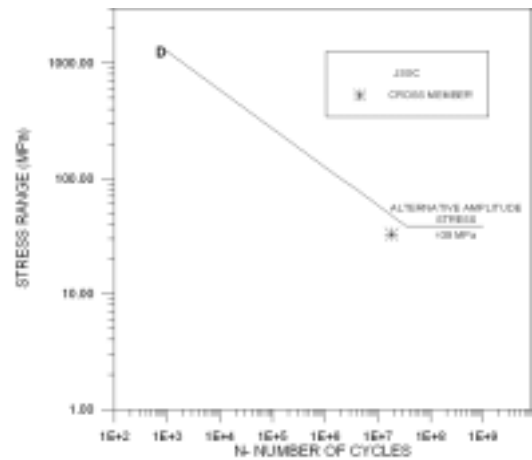
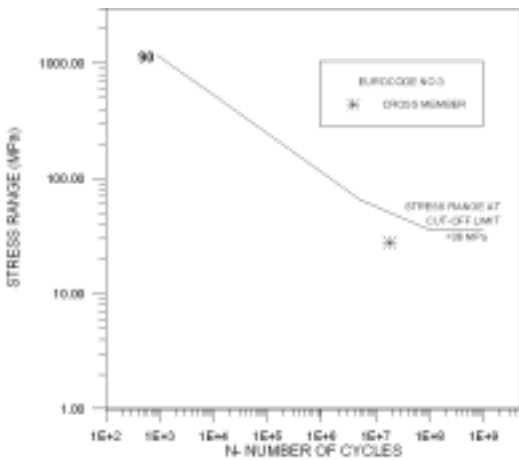
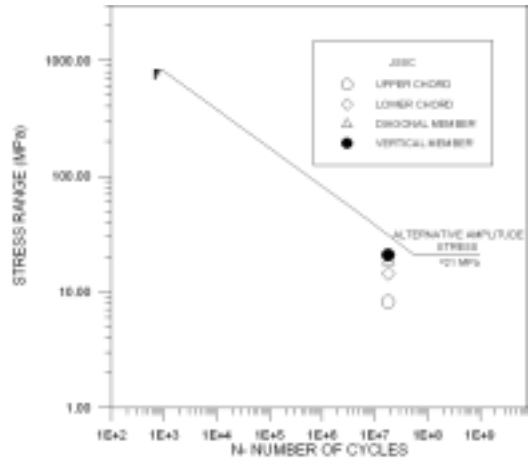
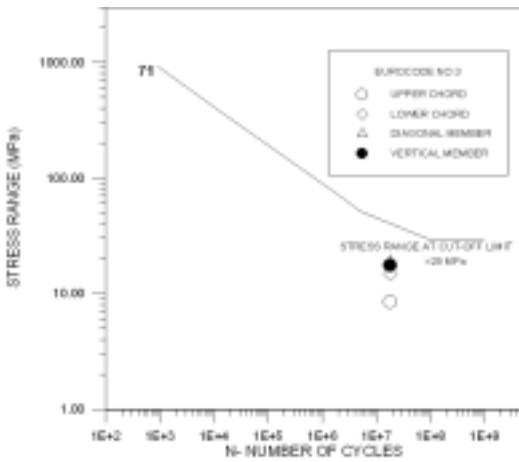


Fig. 5 설계 S-N곡선 (EUROCODE)

Fig. 6 설계 S-N곡선 (JSSC 피로설계지침)

3.5 JSSC 피로설계지침에 의한 3D 해석⁽⁴⁾

Table 5 피로해석결과 (JSSC 피로설계지침)

구 분	최대응력 범위(kgf/cm ²)	응력 반복 회수(회)	상세 범주	피로 강도 (kgf/cm ²)	두께 보정	수정 피로 강도(kgf/cm ²)	피로 한계 (kgf/cm ²)	허용 피로 강도(kgf/cm ²)
상현재	83.6	1.825E+07	F ⁽⁹⁾	317.0	0.80	253.6	214.3	253.6
하현재	146.8	1.825E+07	F ⁽⁹⁾	317.0	0.76	240.9	214.3	240.9
사 재	189.9	1.825E+07	F ⁽⁹⁾	317.0	0.84	266.3	214.3	266.3
수직재	212.1	1.825E+07	F ⁽⁹⁾	317.0	0.92	291.6	214.3	291.6
가로보	334.4	1.825E+07	D ⁽¹⁰⁾	488.0	1.00	488.0	398.0	488.0

(9) 범주 F : 중공형 단면 (편면용접)

(10) 범주 D : H형의 용접된 조립부재 (완전용입 용접)

4. 결과분석 및 고찰

4.1 피로해석을 위한 차량하중

교량의 피로해석을 위한 차량하중, 즉 피로설계 트럭하중은 각 나라마다 별도로 연구하여 규정하고 있으나, 이것은 그 나라의 교통특성과 환경에 따라 변할 수 있으며, 또한, 이를 정확히 조사 및 분석하기 위해서는 많은 비용과 시간이 필요하므로, 피로설계지침을 위한 피로설계하중은 교량설계 시의 표준트럭하중(DB하중)을 대표하중단위로 잠정적으로 설정 및 사용하고, 차선하중(DL하중)은 Table 6의 응력범위 비교결과와 같이 국내 기준에 의한 각 부재에 발생하는 피로하중의 응력범위가 너무 과대 평가 되며, 교량의 실제 피로거동과는 다른 양상을 나타내어 교량 각 부재에

발생되는 응력범위 반복회수 및 교량의 공용수명에 따른 피로하중 누적빈도수의 변동을 반영시킬 수 없으므로 피로설계에 고려하지 않음이 적합할 것이다.

4.2 피로하중 재하방법

교량의 피로거동 분석을 위한 피로하중의 재하방법은 국외의 주요 피로설계기준들이 모두 설계차로수에 관계없이 1대 재하시키고 있으며, 동시에 인접차로에 차량이 재하될 가능성도 있으므로 이를 고려해야 된다고 하고 있다. 미국 NCHRP 보고서에 의하면 완속차로와 그 인접차로에 피로하중이 동시에 재하될 가능성은 10% 정도(전체 피로하중의 크기는 80% 중대)로 보고, 피로해석 대상부재의 응력범위는 14% 증가하는 것으로 평가하였다.⁽¹¹⁾

즉,

$$\Delta\sigma_{re} = [(0.1)(1.8\Delta\sigma)^3 + (0.9)(\Delta\sigma)^3]^{1/3} = 1.14\Delta\sigma \quad (3)$$

여기서, $\Delta\sigma_{re}$: 필요응력범위

$\Delta\sigma$: 공칭응력범위

AASHTO(LRFD)는 NCHRP 보고서에 의거해서 기준교량 평가시는 인접차로의 효과를 15% 고려하고, 설계시는 동시재하계수로 1.2를 적용시켜 인접차로의 효과를 간접적으로 20% 반영하였다.

Table 6 응력범위 비교 (DL하중)

구 분		도로교 설계기준 (kgf/cm ²)	AASHTO (LRFD) (kgf/cm ²)	EURO-CODE (kgf/cm ²)	JSSC 피로설계지침 (kgf/cm ²)
상현재	응력범위	315.5	71.1	85.9	83.6
	비율	1.00	0.23	0.27	0.27
하현재	응력범위	682.8	124.8	150.8	146.8
	비율	1.00	0.18	0.22	0.21
사 재	응력범위	632.7	157.9	190.8	189.9
	비율	1.00	0.25	0.30	0.30
수직재	응력범위	474.7	148.5	179.4	212.1
	비율	1.00	0.31	0.38	0.45
가로보	응력범위	538.2	234.7	283.5	334.4
	비율	1.00	0.44	0.53	0.62
평균비율		1.00	0.28	0.34	0.37

또한, JSSC 피로설계지침에서는 동시에 인접차로에 차량이 재하될 가능성은 적으나 안전측으로 인접차로의 영향을 10% 고려한다고 규정 하였다.⁽⁴⁾ 그러나, 국내 피로설계기준에는 피로하중 재하방법에 대한 별도의 조항이 없어 교량의 부재강도 설계시와 동일하게 차로부분에 차로 당 1대의 DB하중 또는 1차로 분의 DL하중을 재하시키고 있으므로 피로해석시의 유효응력 범위가 과대하게 평가될 수 있다.

실제로 본 연구대상 교량인 강재 트러스교의 피로해석결과를 분석하면 Table 6, Table 7과 같다. Table 6으로부터 차선하중에 의한 평균비율의 응력범위는 도로교설계기준에 비하여 AASHTO(LRFD)에서는 28%, EUROCODE에서는 34%, JSSC 피로설계지침에서는 37% 정도로 모두 저감되는 것으로 나타난다.

또한, Table 7로부터도 평균비율의 응력범위가 도로교 설계기준에 비하여 AASHTO(LRFD)에서는 58%, EUROCODE에서는 70%, JSSC 피로설계지침에서는 75% 정도로 모두 저감되는 것으로 나타나므로 DB하중 적용에 따른 각 부재에 발생하는 응력범위도 과대평가 되고 있다.

따라서, 국내 피로설계지침에서 피로하중의 재하방법은 설계차로수에 관계없이 피로하중을 1대 재하시키고, 동시에 인접차로의 영향을 고려하여 교량의 합리적인 피로 안전성 평가가 이루어지도록 해야 할 것이다.

Table 7 응력범위 비교 (DB하중)

구분	도로교 설계기준 (kgf/cm ²)	AASHTO (LRFD) (kgf/cm ²)	EURO-CODE (kgf/cm ²)	JSSC 피로설계지침 (kgf/cm ²)	
상현재	응력범위	159.2	71.1	85.9	83.6
	비율	1.00	0.45	0.54	0.53
하현재	응력범위	291.2	124.8	150.8	146.8
	비율	1.00	0.43	0.52	0.50
사재	응력범위	237.0	157.9	190.8	189.9
	비율	1.00	0.67	0.81	0.80
수직재	응력범위	243.1	148.5	179.4	212.1
	비율	1.00	0.61	0.74	0.87
가로보	응력범위	324.7	234.7	283.5	334.4
	비율	1.00	0.72	0.87	1.03
평균비율		1.00	0.58	0.70	0.75

4.3 충격하중

교량의 피로에서 충격계수는 교통특성에 따른 안전측의 최대치 보다는 오히려 평균적인 값을 고려하는 것이 타당하므로, 피로하중 조합시의 충격하중은 일반적인 정적상태에 대한 동적증폭(충격)계수(캐나다 Ontario Code는 교량 기본진동수 함수, AASHTO /강도설계는 시간장의 함수로 규정)와는 분명히 다르게 평가되어야 할 것이다.

NCHRP 보고서는 많은 현장 측정결과를 토대로 하여 충격하중의 영향을 분석한 결과는 평탄한 노면조건에서 10%정도, 거친 노면조건에서 최대 30% 정도까지 유효 응력범위 증가가 있는 것으로 분석하였다.⁽¹¹⁾

AASHTO(LRFD)는 NCHRP 보고서에 의거하여 충격하중은 피로와 파괴의 한계상태에 대하여 노면조건과 관계없이 15%를 고려한다고 규정하고 있다.⁽⁵⁾

그러나, 국내 피로설계기준은 피로해석시의 충격하중에 대한 별도의 조항이 없으므로 시간장의 함수로 표현된 충격계수를 적용하여 피로해석결과가 시간장에 따른 많은 영향을 받고 있다.

4.4 피로하중의 빈도수

피로의 해석방법은 피로하중에 의해서 발생하는 교량 부재의 최대응력과 최소응력의 대수차에 의한 응력범위와 피로하중의 작용빈도수 분석에 의하여 교량의 피로안전성을 평가하는 것이므로 피로하중의 빈도수는 피로수명과 직결된다고 할 수 있다.

AASHTO(LRFD)는 교량의 설계수명을 75년으로 제시하여, 피로하중의 빈도수는 일평균트럭교통량(ADTT_{SL})을 교량의 모든 부재에 적용하도록 규정하고 있다.⁽⁵⁾

EUROCODE는 피로강도곡선에서 일정진폭피로한계는 500만 빈도수에 대한 피로강도에 대응하고, 소거한계는 1,000만 빈도수에 대한 피로강도에 대응한다고 설정하여 피로하중의 빈도수는 1,000만회까지 고려하도록 하고 있다.⁽⁶⁾

JSSC 피로설계지침은 응력반복회수는 1일 1차로당 대형차량의 계획교통량을 적용하도록 하고, 피로설계곡선에서 각 구조상세에 따른 일정진폭피로한계는

$2 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ 회 사이에서 설정하고, 변동진폭피로한계는 $2 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 회 사이에서 설정하고 있으므로 피로하중의 빈도수는 1,000만회까지 고려하도록 한 것이다.⁽⁴⁾ 그러나, 국내 피로설계기준에서 응력반복회수는 교통량과 하중조사 및 특별한 고려사항이 없으면 규정에 따라 종방향 주부재의 경우는 최대 200만회(2차로 이상 재하시)의 트럭하중을 반복재하 시키고, 운하중을 받는 횡방향 부재와 상세부는 200만회 이상 반복재하 시키도록 하고 있다.⁽¹⁾

본 연구대상 교량의 경우에도 향후 100년 동안에 피로 하중의 누적빈도수는 1.825×10^7 회 정도로 예상되므로, 현행 국내 피로설계기준에서 규정된 200만회(종방향 주 부재의 경우)를 상회하게 되어 교량의 피로안전성에 문제가 발생될 수 있다. 따라서, 국내 피로설계지침에서는 피로해석시의 피로하중 빈도수를 200만회(200만회의 빈도수는 구조상세 범주를 분류하기 위한 피로강도의 기준값으로 선정)로 제한하지 말고, 피로하중의 빈도수는 1일 1차로 당 대형차량의 계획교통량을 교량의 공용수명 기간 동안에 적용하도록 하고, 누적빈도수는 EUROCODE나 JSSC 피로설계지침에서와 같이 소거한계의 빈도수인 최소 1,000만회 정도까지 고려하여 교량의 피로안전성을 확보시켜야 될 것이다.

4.5 피로강도와 이음분류

교량 각 부재 및 이음부의 피로저항성을 나타내는 피로강도와 이음분류는 많은 피로시험의 축적된 결과로서 평가할 수 있다. 국외의 주요 피로설계기준에서도 피로강도곡선과 구조상세 이음분류는 그 나라의 연구결과에 따라 다양하게 제시되고 있는 실정이다.

본 연구대상 교량의 트러스 부재에서 용접이음된 박스의 조립부재인 경우에는 이에 적합한 이음분류와 피로강도곡선은 EUROCODE 와 JSSC 피로설계지침에서만 제시되고 있을 뿐이다.

각 기준의 이음분류에 의한 피로강도를 비교분석한 결과는 Table 8과 같다. Table 8로부터 평균비율의 피로강도가 도로교설계기준에 비하여 AASHTO(LRFD)에서는 82%, EUROCODE에서는 56%, JSSC 피로

Table 8 피로강도 비교

구분		도로교 설계기준 (kgf/cm ²)	AASHTO (LRFD) (kgf/cm ²)	EURO CODE (No.3) (kgf/cm ²)	JSSC 피로설계 지침 (kgf/cm ²)
상현재	응력범위	560.0	438.0	296.0	253.6
	비율	1.00	0.78	0.53	0.45
하현재	응력범위	560.0	438.0	296.0	240.9
	비율	1.00	0.78	0.53	0.43
사재	응력범위	560.0	438.0	296.0	266.3
	비율	1.00	0.78	0.53	0.48
수직재	응력범위	560.0	438.0	302.5	291.6
	비율	1.00	0.78	0.54	0.52
가로보	응력범위	630.0	612.0	413.6	488.0
	비율	1.00	0.97	0.66	0.77
평균비율		1.00	0.82	0.56	0.53

설계지침에서는 53% 정도로 모두 저감되는 것으로 나타나므로 이음분류에 따른 각 부재에 발생하는 피로강도는 과대평가 되고 있다.

4.6 피로한계

교량의 장수명 영역에서의 변동하중에 의한 피로한계에 대해서는 아직도 명확한 이론이 정립 되지는 않고 있지만, 강제 구조는 피로하중의 성질(일정 또는 변동진폭)에 따른 응력범위를 피로한계 이내로 제한함으로써 무한의 피로수명을 확보할 수 있을 것이다.

AASHTO(LRFD)는 일정진폭하중에 대한 피로한계 값을 설정하여, 구조상세에 발생하는 최대응력범위가 일정진폭피로한계 값의 1/2 보다 작으면 이론적으로 무한 피로수명이 된다고 설명하고 있지만, 변동하중에 대한 피로한계는 제시하지 않고 있다.

EUROCODE는 수직응력범위 피로강도곡선의 경우에 일정진폭피로한계는 500만 빈도수에 대한 피로강도에 대응하고, 소거한계는 1,000만 빈도수에 대한 피로강도에 대응한다고 규정하여 일정 및 변동진폭피로한계를 모두 설정하고 있다.

JSSC 피로설계지침은 각 구조상세에 따른 일정진폭 피로한계($2 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ 회 사이에서 설정)와 변동진폭피로한계($2 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 회 사이에서 설정)를 모두 제시하고 있다.

국내 피로설계기준은 피로한계에 대한 별도의 언급을 하지는 않지만, 피로하중 200만회 이상에서의 허용피로 응력범위가 AASHTO의 일정진폭피로한계 값과 비슷하므로 일정진폭피로한계에 대해서는 간접적으로 인정하는 것으로 볼 수 있다.

본 연구대상인 트러스 교량의 피로하중 누적빈도수도 1.825×10^7 회 정도로 예상되므로 상·하현재의 경우(상세범주 D)에 빈도수 200만회 이상일 때 허용피로응력범위(350 kgf/cm²)가 보다 적합할 것으로 판단되나, 종방향 주부재의 설계응력 반복회수는 200만회로 규정되어 있어 이때의 허용피로응력범위(560 kgf/cm²)를 적용할 수 밖에 없으므로 해당 부재의 피로강도가 과대평가 되는 결과를 초래한다.

4.7 부재두께의 영향

용접이음 피로강도에 미치는 부재두께 효과는 1979년 Gurney에 의해서 최초로 밝혀졌고, 부재두께의 영향을 보다 더 연구하여 적극적으로 반영한 기준이 EUROCODE와 JSSC 피로설계지침이다.

AASHTO와 국내 피로설계기준에서는 부재두께가 피로강도에 미치는 영향을 아직 고려하고 있지 않다.

본 연구대상 교량은 지간이 장대(L=120 m)하여 트러스 부재의 최대 판두께는 75mm 정도 되어야 하는데, 이때의 부재두께 영향을 EUROCODE(Table 4의 피로해석결과 참조)와 JSSC 피로설계지침(Table 5의 피로해석결과 참조)에 따라서 계산하면 피로강도가 최대 24%까지 저감되는 것으로 분석된다.

4.8 부분안전계수

피로응답 해석시는 작용하중의 수준, 응력과 응력범위로 이들 하중을 변환, 설계응력범위 스펙트럼으로부터의 등가일정진폭응력범위 및 구조물의 설계수명과 구조물의 요구된 설계수명 내에서의 피로하중의 진전 등을 평가 하는데 있어서의 불확실량을 포함한다.

피로평가절차에 있어서는 구조상세의 크기, 불연속성의 치수와 모양, 용접 불확실성의 국부응력집중 및 용접과정과 재료적인 영향의 가변성 등의 불확실량을

포함한다. 이러한 부분안전계수는 EUROCODE 와 JSSC 피로설계지침에서는 반영시키고 있으나 AASHTO (강도설계)와 국내 피로설계기준에서는 고려하지 않고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내의 제반 설계기준이 강구조물의 피로설계 조항을 규정하고 있지만, 강교의 피로에 대한 국내 연구결과가 부족한 상태에서 외국의 피로설계 내용을 그대로 인용함으로써 발생하는 피로설계 조항의 불합리성을 규명하고, 특히 신규로 계획, 신설되는 강교량들과 기존 교량들의 장기적인 피로안전성을 확보하기 위해서라도 국내의 실정에 적합하며 실무에서 구체적으로 활용될 수 있는 피로설계지침의 방향을 제시함을 목표로 하여, 본 연구대상 교량인 강재 트러스 교의 피로해석결과와 비교 및 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피로설계를 위한 피로하중은 각 나라마다 별도로 연구하여 규정하고 있으나, 국내에는 아직 그에 대한 연구결과가 없으므로 우선 교량설계시의 표준트럭하중을 대표하중단위로 잠정적으로 설정 및 사용하고, 차선하중은 피로하중의 응력범위가 너무 과대 평가 되고, 교량의 실제 피로거동 양상과는 다르므로 피로설계에 고려하지 않음이 적합할 것이다.
- 2) 교량의 피로설계를 위한 피로하중의 재하를 부재강도 설계시와 같이 설계차로수에 모두 재하시키면 유효응력범위가 과대하게 평가되고 있으므로, 피로하중의 재하방법은 설계차로수에 관계없이 1대 재하시킴을 원칙으로 하며, 동시에 인접차로에 차량이 재하될 가능성은 적으나 안전측으로 인접차로의 영향을 20% 정도 고려함이 적합할 것이다.
- 3) 교량의 피로설계시에 충격하중은 일반적인 정적상태에 대한 동적증폭(충격)계수와는 분명히 다르게 평가되어야 할 것이다. 그러나, 국내 피로설계기준에는 피로해석시의 충격하중에 대한 별도의 조항이 없으므로 강도설계시와 동일하게 적용하여 피로해석결과가 지간장에 따른 영향을 받고 있다.

피로설계시의 충격하중은 현장측정 결과를 토대로 정해야 함이 타당하나, 이에 대한 정확한 자료가 없으므로 NCHRP 보고서의 조사결과를 참조하여 피로와 파괴의 한계상태에 대하여 평탄한 노면조건에서는 10% 정도, 거친 노면조건에서는 최대 30% 정도까지 고려하면 될 것이다.

- 4) 피로해석시는 피로하중의 작용빈도수 분석방법이 적합하게 제시되어 교량의 피로안전성이 평가되어야 할 것이다. 국내 피로설계지침은 피로해석시의 피로하중 빈도수를 200만회(200만회의 빈도수는 구조상세법주를 분류하기 위한 피로강도의 기준값으로 선정)로 제한하지 말고, 피로하중의 빈도수는 1일 1차로 당 대형차량의 계획교통량을 교량의 공용수명기간 동안에 적용하도록 하고, 누적빈도수는 소거한계의 빈도수인 최소 1,000만회 정도까지 고려하여 교량의 피로안전성을 확보시켜야 될 것이다.
- 5) 교량 각 부재 및 이음부의 피로저항성을 나타내는 피로강도는 각 나라의 연구결과에 따라 다양하게 제시되고 있다. 본 연구대상인 연속트러스교에서 사용된 함형(Box) 단면의 부재이음에 따른 피로강도를 비교한 결과는 도로교설계기준이 국외의 주요 피로설계기준에 비하여 과대평가 되고 있으므로, 국내 피로설계지침에서의 허용피로응력범위는 교량의 공용수명과 국내 교통량 특성에 따라서 탄력적으로 적합하게 적용될 수 있는 피로강도곡선으로 대체되어야 할 것이다.
- 6) 강재구조가 무한의 피로수명을 확보하기 위해서는 피로하중의 성질에 따른 응력범위를 피로한계 이내로 제한함으로써 가능하다. 본 연구대상 교량의 트러스 부의 경우에도 피로하중 빈도수가 200만회 이상일 때의 일정진폭피로한계의 허용피로응력범위(350 kgf/cm²)가 보다 적합할 것으로 판단되나, 해당부재(중방향 주부재)의 빈도수를 200만회로 규정하여 허용피로응력범위(560 kgf/cm²)가 과대평가 되는 결과를 초래하고 있다.

- 7) 피로강도에 미치는 부재두께의 효과로 본 연구대상 교량 부재의 경우에는 피로강도가 최대 24%까지 저감되는 것으로 분석된다.
- 8) 부분안전계수는 피로하중과 피로강도 모두에서 검토되어야 한다. 본 연구대상 교량도 EUROCODE에 따른 부분안전계수는 피로강도를 25% 정도 저감시키고 있으므로, 국내 피로설계지침에서는 부분안전계수의 영향을 어느 정도 고려할 것인지 제시해야 될 것이다.

참고 문헌

1. 건설교통부, "도로교설계기준", 한국도로교통협회, 2000.
2. 경갑수 등, "강교의 피로", 건설도서, 1998.
3. 황윤국, "강교량의 피로설계기준에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1997, pp. 16~86.
4. 일본강구조협회, "강구조물의 피로설계지침·동해설", 구미서관, 2000, pp. 268~361.
5. AASHTO, "LRFD Bridge Design Specifications", 2nd Edition, USA, 1998.
6. EUROCODE No. 3, "Chapter 9, Part 1, Design of Steel Structures" Edited draft Issue 5, Commission of the European Communities, 1990.
7. FHWA, "Fatigue Cracking of Steel Bridge Structures", Volume II (A Commentary and Guide for Design, Evaluation, and Investigation of Cracking), 1990, pp. 145~212.
8. Fisher.J.W., "Fatigue and Fracture in Steel Bridges", John Wiley & Sons Inc., 1984.
9. Fisher.J.W., etc.al, "Steel Bridge Members under Variable Amplitude Long Life Fatigue Loading", NCHRP Report 267, Transportation Research Board, National Research Council, USA, 1983.
10. Julie A.B. etc.al., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, 1990, pp. 40~178.
11. Moses.F. etc.al, "Fatigue Evaluation Procedure for Steel Bridges", NCHRP Report 299, Transportation Research Board, National Research Council, USA, 1987.

(접수일자 : 2003년 3월 28일)