

강철도교의 지간/강종과 피로강도의 관계

Relationship between Span/Steel Grade and Fatigue Strength of Steel Railway Bridges

권순철*, 경갑수**, 윤철희***, 이준호****

KWON Soon-Cheol, KYUNG Kab-Soo, YOUN Cheol-Hee, LEE Jun-Ho

ABSTRACT

It is important to evaluate the effect in the maintenance of steel bridge because the fatigue of the bridge is affected by the structural characteristic of bridge such as structure type, span and steel grade, etc. In this study, we analyzed the effect of fatigue strength by the changes of span of the bridge and the steel grade in many factors which have influence on the fatigue life of the bridge. For this analysis, we selected the objective bridges and performed the structural analyses for the various parameters such as span and steel grade. The fatigue evaluations were carried out by FAST which is a program for fatigue estimation and the results were compared.

1. 서론

강교량의 피로는 강교량에 적용되는 구조상세, 지간 등의 여러 인자가 복합적으로 영향을 받게 되므로 강교량 형식 등의 구조적 특성은 강교량의 피로평가에 영향을 미치게 된다. 그러므로 강철도교의 효율적인 유지관리를 위해서는 강교량의 구조형식, 지간, 강종 등이 강철도교의 피로에 미치는 영향 정도를 파악하는 것이 강교량 피로평가에 중요한 인자가 될 것으로 생각된다.

본 연구에서는 강철도교의 피로에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 교량의 지간 및 강종의 변화에 따른 피로강도의 영향을 평가하고자 한다. 이것을 위해 기존 자료로부터 대상교량을 선정하고, 지간 및 강종에 따른 대상교량의 단면을 산출하였다. 이와 같이 결정된 대상교량에 대해 격자 구조해석을 실시하여 각 대상교량에 대한 영향면을 산출하고, 피로평가프로그램인 FAST를 이용하여 피로평가를 수행하였다. 이러한 피로평가 결과를 비교분석하여 지간 및 강종의 변화에 따른 피로강도의 관계를 검토하였다.

2. 피로 평가 조건

1) 피로 검토 단면

피로 평가를 위해 선정된 대상교량의 평면도 및 단면도를 그림 1에 나타내었다. 대상교량은 강철도교의 대부분이 단경간인 것을 고려하여 왕복선로의 거더 개수 2개, 가로보 간격 5m를 갖는 단경간 교량을 선정하였다.

대상교량의 단면은 기준 단면을 참고로 하여 강종 SM400, SM490, SM520, SM570의 4종류의 강재에 대하여 지간을 10m~70m로 변화시켜 가면서, 32종류의 대상교량 단면을 산정하였다. 단면 산정은 식 (1)과 같이 고정하중과 이동하중의 합에 의한 응력이 허용응력의 85%가 되도록 산정하였다. 이 식을 기준으로 그림 1의 교량제원을 고려한 대상교량의 고정하중을 결정한 후, 그림 2의 플랜지 폭(W)을 산정하고 나머지 단면의 제원은 그림 3과 같이 플랜지 폭에 비례하여 단면을 산정하였다.

* 한국해양대학교 건설환경공학부 박사과정, almight75@naver.com

** 한국해양대학교 건설환경공학부 부교수, 정희원, kyunks@hhu.ac.kr

*** SK건설 14-3공구 소장, chyoun@skec.co.kr

**** SK건설 14-3공구 기사, junoya@nate.com

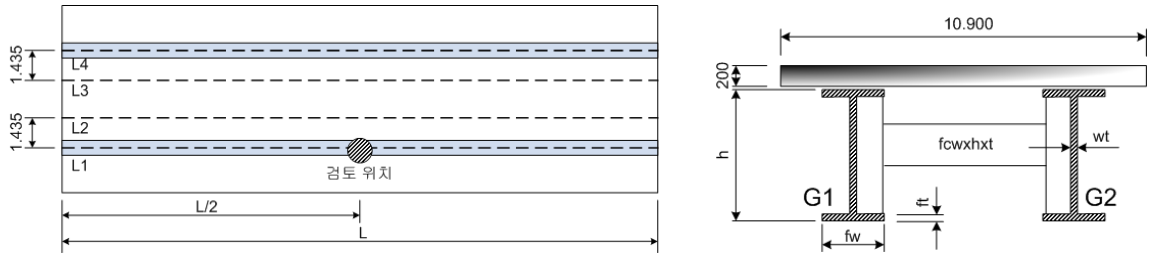


그림 1 대상교량 평면도 및 단면도

$$f_d + f_l = 0.85f_{allow} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

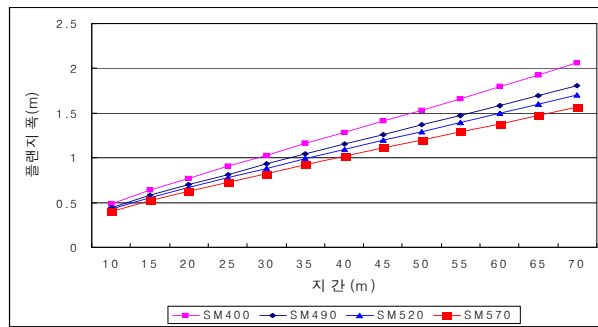


그림 2 시간에 따른 플랜지 폭(W)

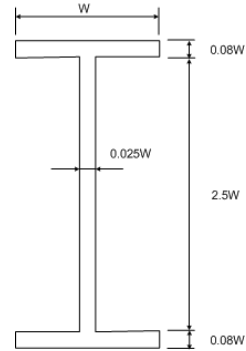


그림 3 단면 형상

2) 작용 하중

피로 평가에서의 철도하중은 설계 표준하중 및 대상교량의 교통흐름을 모형화한 활하중, 즉 교통흐름을 교통량과 차종구성으로 표현하여 하중의 배열, 중량 및 차량간격을 시뮬레이션하여 작용시켰다. 본 해석에서 사용한 KTX, 새마을호, 무궁화호, 화물열차의 중량, 간격 및 구성 등의 분포는 그림 4와 같다.

또한 변동응력을 이용한 피로안전성평가에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 장래 운행하게 될 교통류를 정확히 예측하여 이를 해석에 반영하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존교량의 기존설계도서를 참조하여 2021년의 교통량자료에 기초하여 적용하였다. 그림 5는 교통량자료에 기초한 시뮬레이션 수행시에 적용한 차종 구성비를 나타내었다.

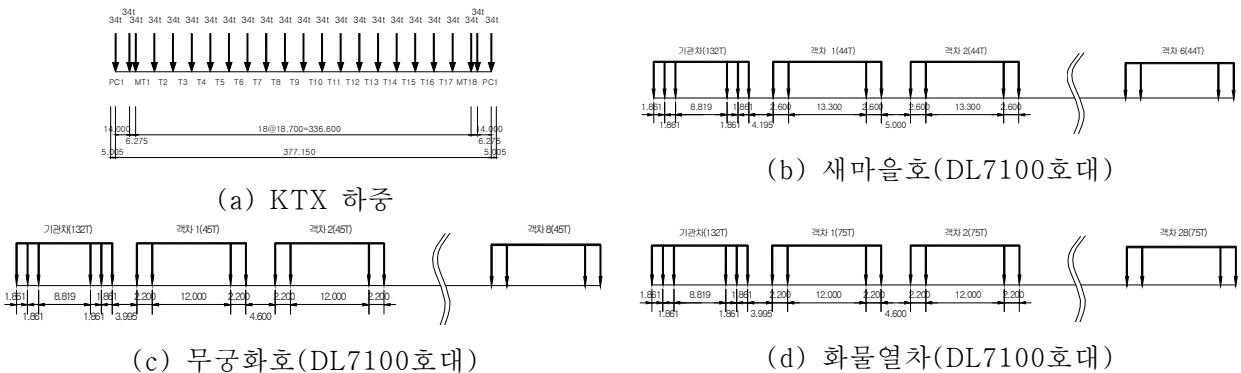


그림 4 열차의 제원 및 설계하중

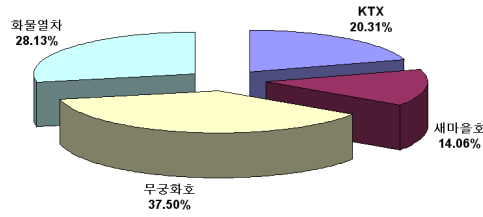
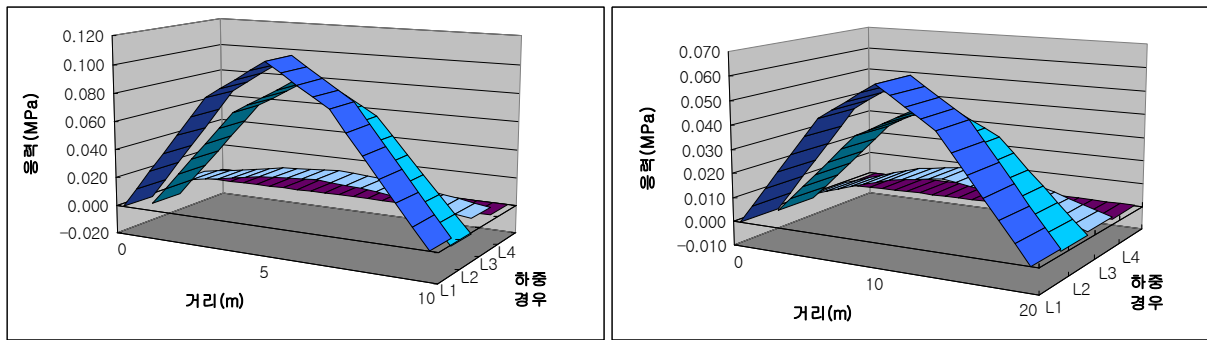


그림 5 시뮬레이션 적용 차종 구성비

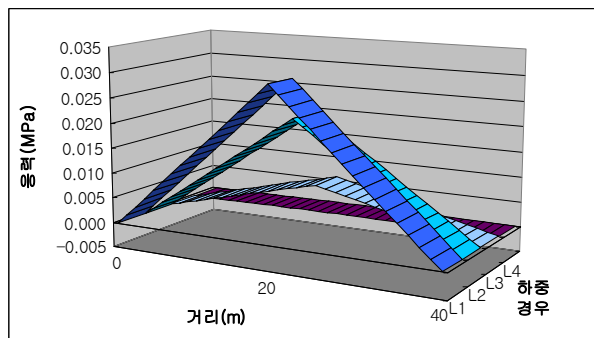
3. 대상교량의 영향면

표준설계하중 및 시뮬레이션 하중에 의한 피로해석시 기본자료로서 사용되는 대상교량의 검토위치에 대한 영향면을 작성하기 위해 격자 해석을 통한 구조해석을 실시하였다. 구조해석은 범용구조해석프로그램인 Midas 2006을 사용하였다. 영향면은 단위하중을 그림 1에 나타낸 복선철로의 L1, L2, L3, L4에 각각 작용시켜서 얻어진 단면력으로부터 계산하여 도출하였다. 구조해석 결과로부터 얻어진 SM520강재에 대한 영향면 그래프의 예를 그림 6에 나타내었다. 시간이 증가함에 따라 영향면의 최대종거는 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이것은 휨응력에 대한 영향면이기 때문에 시간이 증가함에 따라 단면강성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 시간 10m

(b) 시간 20m



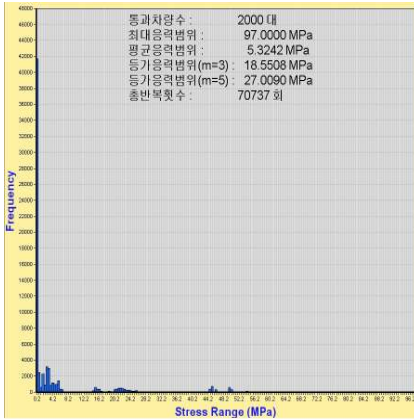
(c) 시간 40m

그림 6 SM 520강재의 영향면

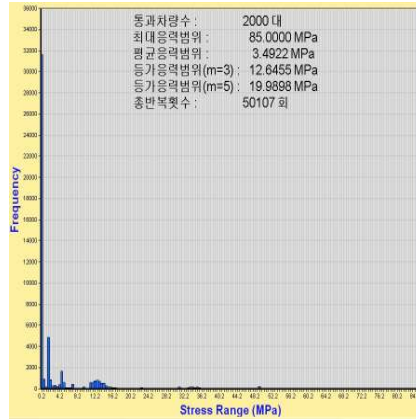
4. 피로 해석 결과

1) 응력빈도 히스토그램

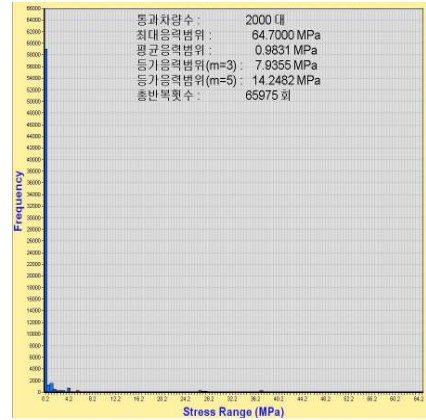
그림 7~그림 10에 피로평가프로그램으로 본 연구진 등에 의해 개발되어 사용되고 있는 FAST에 의해 얻어진 응력빈도 히스토그램을 시간 10m, 20m 및 40m에 대하여 컷-오프 0% 및 20%에 대하여 나타내었다.



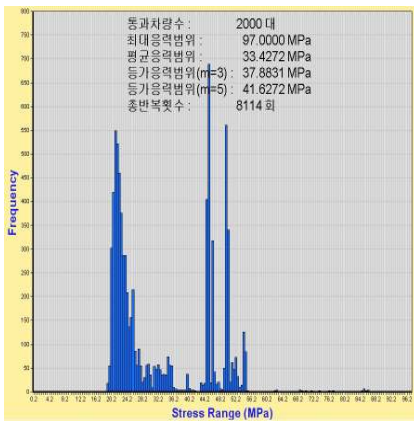
(a) 지간 10m



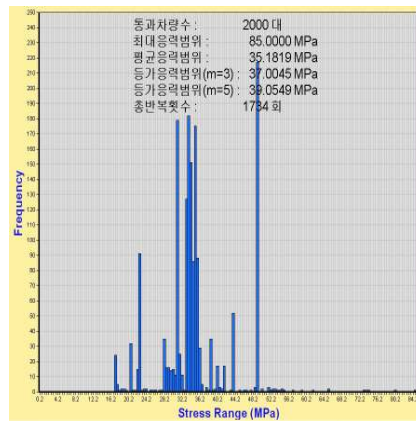
(b) 지간 20m



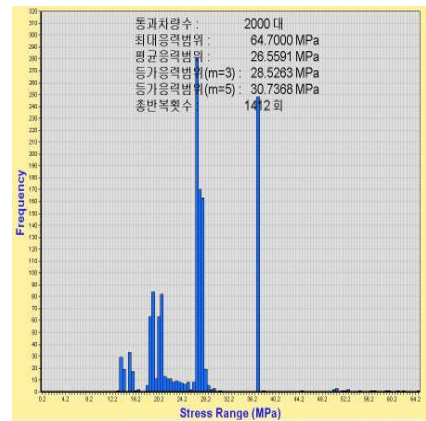
(c) 지간 40m



(d) 지간 10m(컷-오프 20%)



(e) 지간 20m(컷-오프 20%)



(f) 지간 40m(컷-오프 20%)

그림 9 SM 520장재의 지간에 따른 응력빈도 히스토그램

2) 피로 평가 분석

피로평가에서 표준하중 및 시뮬레이션하중에 대해 얻어진 최대응력 결과를 표 1에 나타내었다. 여기서 표준하중은 철도교 설계기준에서의 설계하중, 시뮬레이션 하중은 2장에서 기술한 실제 교통흐름에 의한 하중을 의미한다. 최대응력은 지간이 길어질수록 감소하였으며 강중에 따라서는 고강도강일수록 최대응력범위가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서 지간이 길어질수록 활하중에 의한 최대응력 범위가 감소하는 것은 지간 증가에 따라 단면 강성이 증가하기 때문으로 판단된다.

표 1 피로평가에 의한 최대응력 결과

강종	지간	고정하중 응력 (MPa), (A)	표준하중 최대응력 (MPa), (B)	시뮬레이션하중 최대응력 (MPa), (C)	A+ B (MPa)	A+ C (MPa)	A/B	A/C	허용응력 (MPa)
SM400	10m	16.69	86.87	66	103.56	82.69	0.19	0.25	140
	20m	15.63	75.17	50.7	90.80	66.33	0.21	0.31	
	40m	21.59	62.72	39.5	84.31	61.09	0.34	0.55	
SM490	10m	14.93	112.47	83.9	127.40	98.83	0.13	0.18	190
	20m	19.64	99.19	50.7	118.83	70.34	0.20	0.39	
	40m	26.71	86.27	55.2	112.98	81.91	0.31	0.48	
SM520	10m	16.74	127.53	97	144.27	113.74	0.13	0.17	210
	20m	21.76	112.22	85	133.98	106.76	0.19	0.26	
	40m	29.38	99.21	64.7	128.59	94.08	0.30	0.45	
SM570	10m	19.82	153.53	124.3	173.35	144.12	0.13	0.16	260
	20m	25.82	136.54	88.8	162.36	114.62	0.19	0.29	
	40m	34.10	122.26	80.7	156.36	114.80	0.28	0.42	

그림 12에 강종별 지간에 따른 증가응력범위를 나타내었다. 증가응력범위도 최대응력범위와 동일하게 지간이 증가할수록 응력범위는 감소하는 경향을 나타내었다.

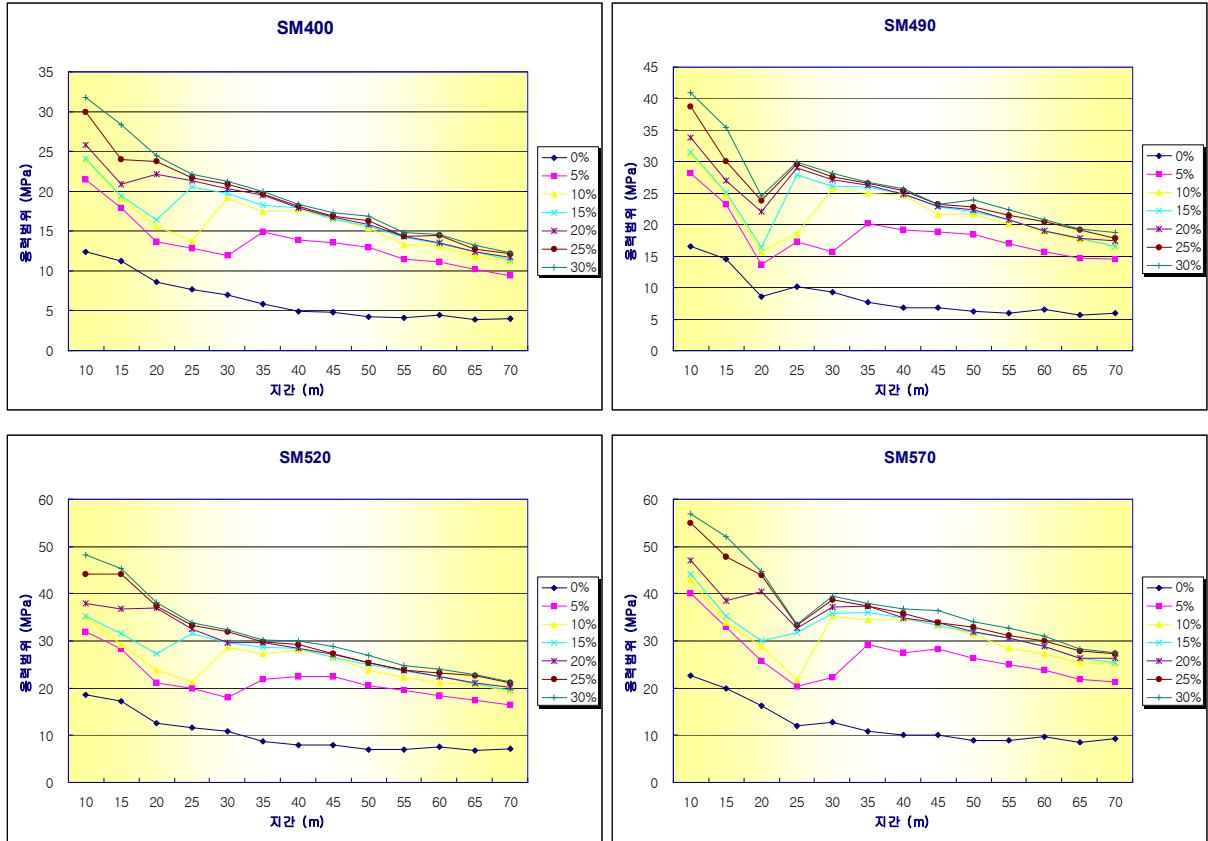


그림 12 강종별 지간과 증가응력범위의 관계

그림 13에 지간별 강종에 따른 증가응력범위의 관계를 나타내었다. 강종이 SM 400강재에서 가장 작은 응력범위, SM 570강재에서 가장 큰 응력범위를 나타내는 것을 알 수 있다.

또한, 컷-오프를 0~30%에 대하여 피로평가를 수행한 결과 컷-오프비율의 증가에 따른 응력범위의 변화는 강재종류에 관계없이 컷-오프비율을 적용하는 것에 의해 증가응력범위가 증가하는 것을 나타내고 있는데 그 증가는 5%일 때 가장 크게 나타나며, 응력증가의 변화정도는 지간에 달라져 단지간일 경우는 15~20%, 장지간일 경우는 10%의 컷-오프 이상이면 증가응력의 변화정도가 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 강철도교량의 컷-오프비율은 약 15%가 타당할 것으로 판단된다.

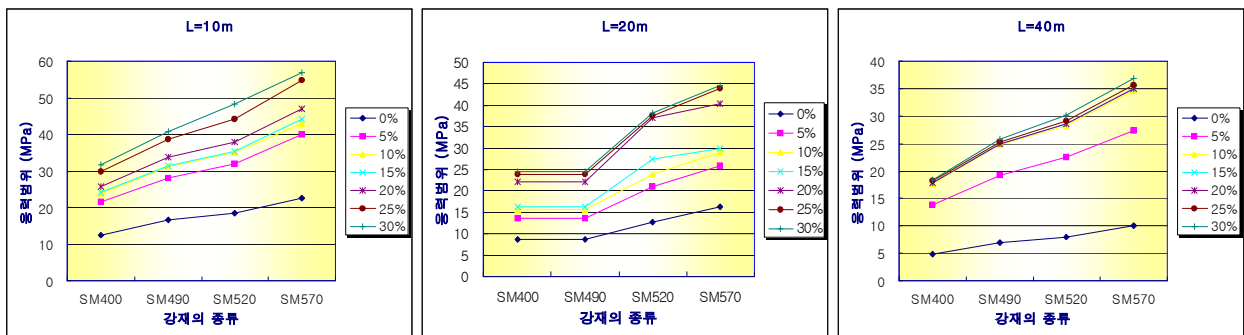


그림 13 지간별 강종과 증가응력범위와의 관계

표 2에 피로평가에 의한 피로수명을 나타내었다. 여기서, 피로강도등급은 플랜지와 복부의 종방향 용접이음을 대상으로 하여 철도교설계기준에 따라 B'등급을 적용하였다. 피로수명 산정 결과 피로수명은 강재의 강도가 높고, 지간이 짧을수록 피로수명이 감소하는 경향을 알 수 있다. 이것은 지간이 짧을수록 축하중에 의한 발생응력의 영향이 커지며, 또 고강도강일수록 허용하중 내에서의 활하중 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

표 2 피로수명

강종	지간	피로강도등급	피로수명	비고
SM400	10	B'	384	O.K
	20		1772	O.K
	40		6696	O.K
SM490	10		165	O.K
	20		666	O.K
	40		2444	O.K
SM520	10		118	O.K
	20		526	O.K
	40		1619	O.K
SM570	10		64	N.G
	20		268	O.K
	40		869	O.K

5. 결론

지간 및 강종의 변화에 따른 피로강도의 영향을 평가하기 위해 설계 표준하중 및 시뮬레이션 하중에 대한 피로평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 피로평가를 위해 구조해석에 의한 영향면 산정 결과 지간이 증가함에 따라 영향면의 최대종거는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 응력에 대한 영향면 산출에 의해 지간이 증가함에 따라 단면강성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 표준하중 및 시뮬레이션 하중에 의한 피로평가에 의한 최대응력범위 및 등가응력범위는 지간이 길어질수록 고강도강일수록 더 크게 나타났다.
- (3) cutoff비를 0~30%의 범위에 대하여 피로평가를 수행한 결과, cutoff비 증가에 따른 등가응력범위의 증가율은 지간에 따라 다르나, 강철도교량의 지간 특성을 고려하면 cutoff비는 15%타당한 것으로 판단된다.
- (4) 피로수명 산정 결과 피로수명은 강재의 강도가 높고, 지간이 짧을수록 피로수명이 감소하는 경향을 알 수 있다. 이것은 지간이 짧을수록 축하중에 의한 발생응력의 영향이 커지며, 또 고강도강일수록 허용하중 내에서의 활하중 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 경갑수, 최일윤, 이준석, 이희현, 이준호, 국내강철도교의 피로특성, 한국철도학회, 2005 춘계학술대회논문집, 2005
2. 森猛, 梶原仁, 長谷川洋介, JSSC指針に基づく鋼構造物の疲勞安全性照査プログラムの開發とその利用, 鋼構造論文集, 第2卷, 第8号, pp 37~45, 1995
3. 철도청, 강철도교 해석 및 평가프로그램 개발(III), 2005
4. 철도청, 철도교설계기준, 대한토목학회, 2004
5. Midas Civil 2006 Online Manual