

부재의 강성변화에 따른 강철도 트러스 교량의 발생응력 예측에 관한 연구

A Study on the Expectation of the Stress to the Stiffness Variation of
Members on Truss Railway Bridge

조 선 규¹⁾

Cho, Sun Kyu

요약 : 공용중에 있는 철도 교량의 거동 상태를 평가하는 데 있어서는 각 부재에 대한 현장 실측을 통하여 하중의 분배와 발생응력 등을 파악하는 것이 가장 정확하나 이는 매우 어렵다. 그래서, 현장 실측을 거치지 않고 자료조사 및 현지 외관조사 등으로 획득이 가능한 교량의 형식, 각 부재의 손상 정도 및 위치, 열차 교통 특성 등의 간접자료를 사용하여 대상교량의 발생응력을 추정하는 것에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 교량에서 발생하는 부재의 응력변화 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 여러 가지 손상 중에서도 부식에 의한 단면의 감소와 강성의 변화를 고려하여 시뮬레이션에 의한 부재의 발생응력을 구하였다. 이로부터 각 부재의 발생응력의 정도와 변화를 조사하였으며 각 부재간의 상호관계를 고찰하였다. 그 결과 단면의 감소에 따라 트러스 주부재에 발생하는 응력은 대체적으로 선형적으로 증가하고 하현재가 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 부재에 발생하는 응력의 증가량은 각각의 부재에 발생하는 응력의 증가량을 더하므로서 큰 오차없이 계산될 수 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT : It is proper that the load distribution and the actual stress of members is analyzed by field measurement in estimating to the behavior of truss railway bridges, but those procedures are very difficult. So, the studies for the deduction of the stress, using the indirect data which are able to get from the research and investigation without field measurement, are needed. In this study, to investigate quantitatively the variation of the stress of members, the stresses are obtained from the simulation which is considered the reduction of the section area and the stiffness due to the corrosion and the degree of the stress ratio and the distribution is calculated. As the

1) 정회원, 서영기술단 전무이사

본 논문에 대한 토의를 1998년 5월 31일까지 학회로 보내
주시면 토의회답율을 게재하겠습니다.

results, the stress of truss members is almost linearly increased to the decreasing of the area and the lower chord is greatly affected. And the increasing of the stress is predicted by the superposition to the results of the amount of that in each members.

핵심용어 : 철도교, 응력변화, 응력분배, 강성변화, 시뮬레이션, 시간이력해석

KEYWORDS : Railway Bridges, Stress Variation, Stress distribution, Stiffness Variation, Simulation, Time History Analysis

1. 서 론

공용중에 있는 교량에 발생하는 응력을 예측하는 데 있어서 중요한 인자는 통과하중의 크기 이외에도 교량의 형식, 손상정도, 통과하중의 종류, 부재간의 강성차이 및 분배 등을 고려할 수 있다. 이러한 인자들로 부터 교량의 거동 상태를 평가하는 데 있어서는 각 부재에 대한 현장 실측을 통하여 하중의 분배와 발생응력을 추정하는 것이 가장 정확하나 이는 현실적으로 불가능하다. 특히, 철도교는 가설위치가 험한 산악지역이나 하천 등에 위치한 경우가 많기 때문에 실측이 매우 어려운 경우가 많다. 따라서, 현장 실측을 거치지 않고 자료조사 및 현지 외관조사 등으로 획득이 가능한 교량의 형식, 각 부재의 손상 정도 및 위치, 열차 교통 특성 등의 간접자료를 사용하여 대상교량의 발생응력의 변화와 예측 방법에 대한 연구가 축적된다면 교량의 공용기간이 증가함에 따라 발생하는 각 부재의 손상정도에 따른 구조물 전체 또는 국부적인 응력특성을 예측할 수 있다. 기존의 연구자료를 보면 각 교량의 형식, 교통 특성 등에 대한 국부적인 발생응력의 예측에 관한 연구결과는 많이 보고되고 있다. 그러나 각 부재 또는 교량 전체에 발생된 손상, 예를들면, 부식이나 부재의 연결상태의 변화 등에 대한 교량의 응력 특성의 변화에 대해서는 자료가 충분하지 않다.^{1),2),3)}

따라서, 본 연구에서는 교량에서 발생하는 여러 가지 손상에 따른 부재의 응력변화 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 국내외 피로 및 열화손

상에 대한 손상사례 등을 조사하고, 이로부터 손상의 정도를 가정하므로 대상교량에 대한 손상별 시간-응력 이력곡선을 Time Histroy Analysis를 통하여 구하였다. 이때, 손상은 부식으로 인한 단면 두께의 감소, 즉 강성의 저하, 가로보와 세로보의 손상, 연결부의 기능 상실 등 여러 가지로 구분할 수 있지만 여기서는 부식에 의한 단면의 감소 및 강성의 변화를 대상으로 하여 각 부재의 발생응력의 정도와 변화를 조사하였으며 각 부재간의 상호관계를 고찰하였다.

2. 해석 모델

2.1 구조해석 모델링

구조해석에 있어서 대상교량은 국내 트러스교의 형식이 대부분 와렌 트러스나 이의 변형된 형식을 채택하고 있어 이중에서 대표적으로 한강 철도교 C선 교량을 선택하여 해석을 실시하였다.

또한, 해석의 목적은 트러스교의 각 부재의 손상에 대한 응력특성의 변화를 살펴보기 위한 것으로 대상교량을 그림 1과 같이 3차원으로 모델링하였으며, 해석시에는 범용 구조해석 프로그램인 SAP 90을 이용하여 Time Histroy 해석을 실시하였다.

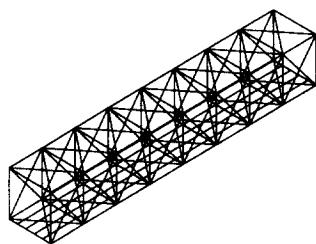


그림 1. 구조해석 모델링

2.2 차량 모델링

구조해석시 사용된 열차하중은 많은 자유도를 갖고 있고, 선형, 비선형 스프링과 여러 가지 형태의 감쇠장치를 갖고 있기 때문에 복잡한 역학계를 구성한다. 열차가 통과하는 동안 교량에는 수직하중(축하중), 종방향 하중(시동과 제동하중) 그리고 횡방향 하중(원심력과 횡방향 충격) 등이 발생한다. 열차의 이러한 특성 때문에 차량의 이동에 따른 철도교량의 응력을 얻는 것은 매우 어려운 문제가 되므로 해석의 목적에 따라 단순화시킨 모델이 일반적으로 사용된다.

따라서, 이동하는 열차의 하중에 대해서 열차의 관성하중이 차량의 중량효과에 비하여 상당히 작다면 그 관성효과는 무시할 수 있다. 이러한 경우는 교량자중이 차량하중에 비하여 비교적 큰 중간 또는 장경간(대체로 30m이상) 교량에 대해서 적용이 가능하다⁴⁾. 따라서, 차량 모델은 그림 2와 같이 일정한 하중 F 를 가지는 이동하중으로 모델링하였으며, 그 크기는 정적 차량 축하중과 동일한 것으로 가정하였다.

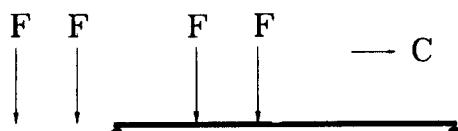


그림 2. 차량의 모델링

한편, 통과차량의 종류는 현재 우리나라에서 운행되고 있는 철도차량을 이용하였으며, 해석시에 사용된 동력차와 객차 및 화차의 대표적인 축중과 축거를 표 1과 2 그리고 그림 3과 4에 각각 나타내었다.

표 1. 동력차의 축중과 축거

동력차 종류	전중량 (ton)	축중 (ton)	축 수	축 거(m)			
				a	b	c	d
6200호대	132	22	6	2.07	2.07	6.528	1.846
7100호대	132	22	6	1.86	1.86	8.820	1.695

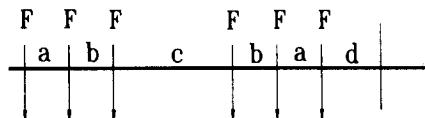


그림 3. 동력차의 축거

표 2. 객차 및 화차 축중과 축거

객·화차 종류	전중량 (ton)	축중 (ton)	정원, 적재중량	축 거(m)		
				a	b	c
보통, 우등 객차	35	8.75	72명	2.100	12.100	2.350
화차(50ton)	22	5.50	50ton	1.676	8.174	1.212

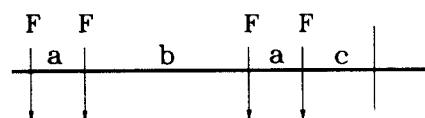
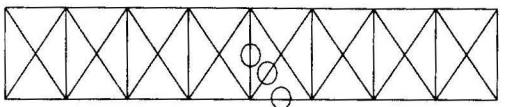


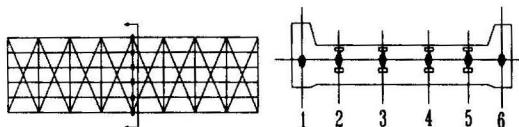
그림 4. 객·화차의 축거

한편, 부재에 발생하는 응력변화를 평가하는데 있어서 사용된 절점과 절점번호를 도식적으로 나타내면 그림 5(a)~(c)와 같다.



Vertical Member, Diagonal Member, Lower Chord

(a) 트러스 주부재(하현재, 수직재 및 사재)



Cross Beam Section

Element ID

(b) 가로보(휨응력)

그림 5. 부재별 절점번호

2.3 손상 모델

일반적으로 트러스교의 손상은 공용기간이 긴 철도교의 경우 주부재에 있어서는 부식 그리고 리벳 또는 고장력 볼트의 이완이나 파단 이외에는 아직까지 뚜렷한 보고가 없는 실정이며, 가로보의 하부 플랜지 또는 세로보의 거시트판(gusset plate) 등의 부식, 균열의 발생 등이 일부 보고되고 있다. 따라서, 이러한 기존 손상사례를 종합하여 본 연구에서는 장기적으로 교량의 응력변화에 문제가 될 수 있는 부식에 의한 손상을 대상으로 하여 단면의 감소에 따른 부재의 강성변화를 고려하였다. 이때, 부식에 의한 손상을 적용한 부재와 그 정도를 표 3와 같이 가정하였으며, 이로부터 각각의 응력특성의 변화를 고찰하였다.

표 3. 가정된 손상의 위치와 정도

구 분	손상위치	손상 정도
Model 1	하현재	0, 1, 2, 3, 4mm
Model 2	가로보	0, 1, 2, 3, 4mm
Model 3	하현재와 가로보	0, 1, 2, 3, 4mm

3. 결과 고찰 및 분석

부식에 의한 손상은 트러스 주부재의 경우 단면의 감소를 가져오고 바닥판 구조의 경우에는 단면의 감소이외에도 휨강성의 변화를 가져오므로 이들이 부재의 일부 또는 전체에 적용되었을 때 각 부재에 미치는 영향을 고찰하였으며 그 결과를 아래에 나타내었다.

3.1 시간이력곡선

각 손상 모델에 대한 Time History 해석 결과 얻어진 하현재의 시간 이력곡선의 일례(무손상의 경우)를 나타내면 그림 6과 같다. 이때, 구조물의 감쇠비는 2%로 각 모드에 대해서 일정하게 하였으며, 8차 모드까지 고려하였다.

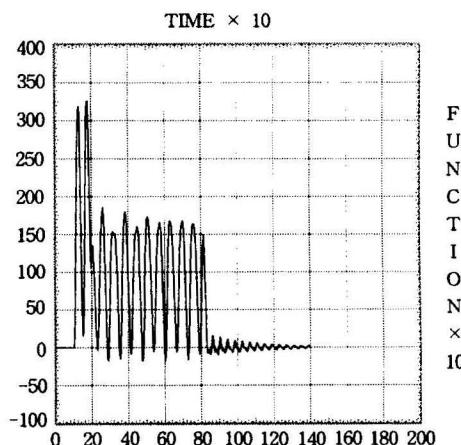


그림 6. 하현재의 시간 이력 곡선의 일례

3.2 Model 1

하현재의 부식 두께의 증가에 따른 트러스 주부재와 가로보의 응력의 변화를 그림 7~8에 각각 나타내었다. 이때, 응력 계산에 사용된 단면력은 Time History 해석결과 얻어진 단면력의 최대값을 사용하여 산정하였으며, 응력의 증감량은

무손상에 대한 손상, 즉 부식되지 않은 상태에 대한 부식 상태에서의 부재 용력의 비율을 나타낸다.

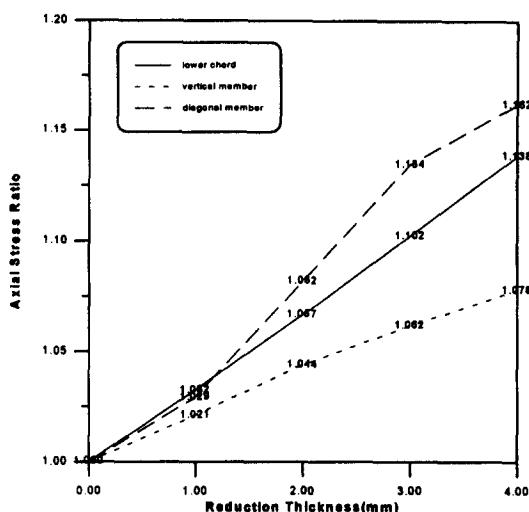


그림 7. 트러스 주부재의 축용력변화율

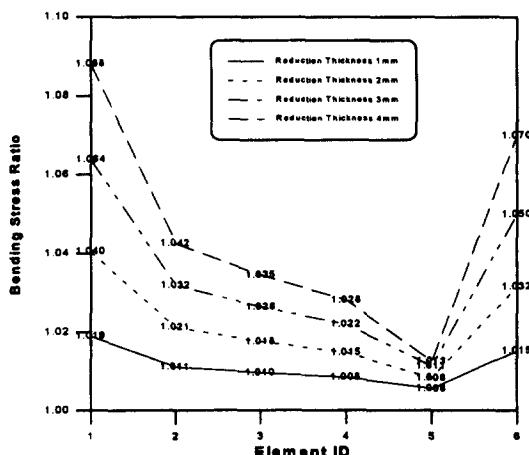


그림 8. 가로보의 휨용력변화율

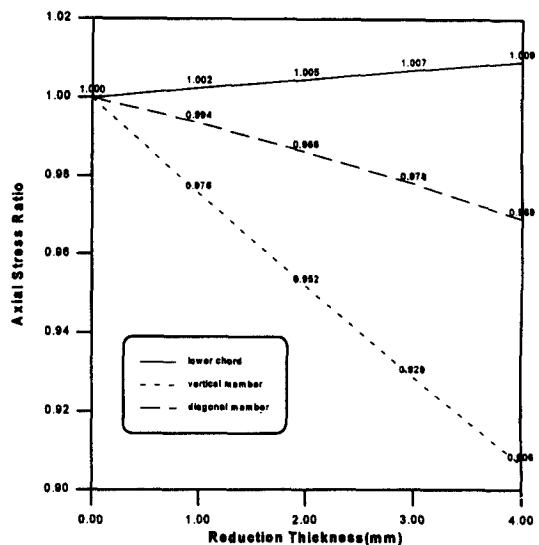


그림 9. 트러스부재의 축용력변화율

그림 7을 보면 부식 두께의 증가에 따라 용력의 증가는 대체적으로 선형적으로 증가하고 하현재와 사재가 수직재보다 큰 증가량을 보이고 있다. 또한, 부식 두께가 약 2.5mm에 이르면 하현재와 사재는 약 10%의 용력 증가를 나타내었으며, 하현재의 단면 감소율 3.9%(1mm), 7.9% (2mm), 11.8%(3mm), 15.8%(4mm)와 용력 증가량이 비교적 유사한 것으로 나타났다. 한편, 사재의 용력 변화가 비교적 큰 비율을 차지하는 것은 단면이 다른 부재에 비해 비교적 작아 용력이 상대적으로 크게 발생하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

가로보의 용력변화율을 나타낸 그림 8을 보면 가로보 단면의 부식두께가 약 2~3mm에 이르면 가로보의 단부에는 약 5%의 용력 증가가 발생하고 가로보의 내부 구간에서는 약 3%정도의 용력 변화를 가져오는 것으로 나타났다. 또한, 세로보가 연결되는 요소번호 2~4번보다 트러스 주부재와 연결되는 요소번호 1번과 6번의 용력증가량이 거의 2배가 됨을 알 수 있는 데 이는 가로보의 양 끝단이 트러스 주부재의 용력변화의 영향을 직접 받기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 Model 2

가로보의 부식 두께의 증가에 따른 트러스 주부재와 가로보의 용력의 변화를 그림 9~10에 각각 나타내었다.

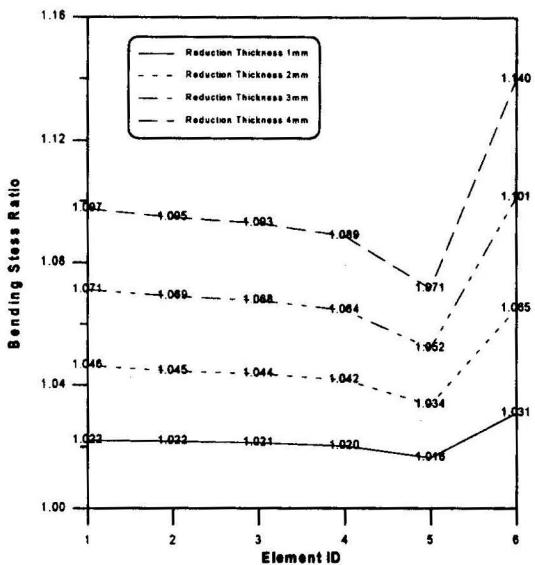


그림 10. 가로보의 휨용력변화율

트러스 주부재의 용력변화율을 나타낸 그림 9를 보면, 용력의 증감에 관계없이 가장 민감한 부재는 수직재, 사재, 하현재의 순서로 나타나는고 있는 데 이는 트러스 부재의 배치 상태 즉 가로보의 연직·변위 방향과 수직재의 변위방향이 일치하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 하현재의 경우는 다른 부재와는 달리 용력이 증가하는 경향을 나타내지만 그 크기는 4mm까지 단면이 감소하여도 용력의 증가량은 1%에 미치지 못하는 것으로 나타났으며 수직재와 사재는 오히려 용력의 감소를 가져오는 결과를 나타내었다. 따라서, 가로보만의 강성 변화는 트러스 주부재의 용력증가에 영향을 주지 않거나 경미한 것을 알 수 있다.

한편, 그림 10의 가로보의 용력변화를 살펴보면 용력증가폭은 거의 균일하게 증가하며 4mm까

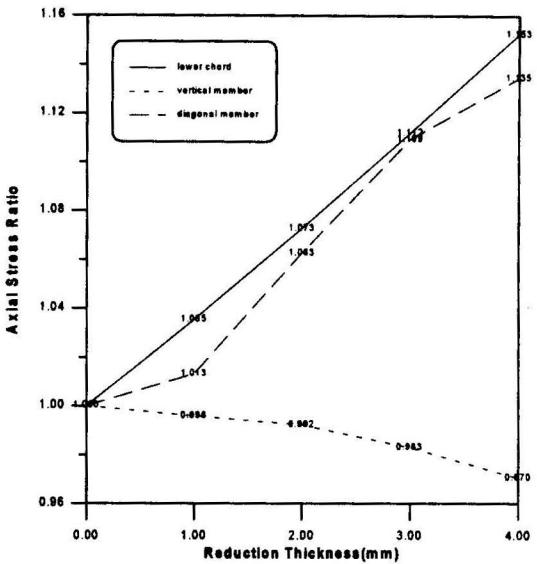


그림 11. 트러스 주부재의 축용력변화율

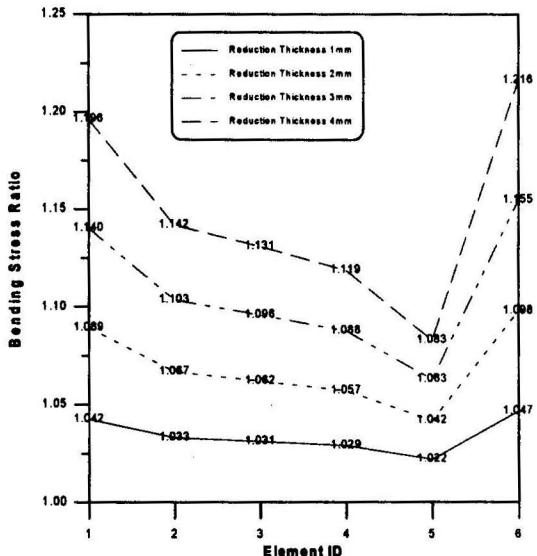


그림 12. 가로보의 휨용력변화율

지 단면이 감소할 경우 용력증가폭이 약 10%에 이르고 있음을 알 수 있다. 이때, 단면 두께의 감소에 따른 단면 휨강성의 변화율은 2.9% (1mm), 5.9% (2mm), 8.8% (3mm), 11.8% (4mm)로

가로보의 휨응력 증가율은 단면 강성 변화율에 대하여 약 80%정도를 차지하고 있음을 알 수 있다.

3.4 Model 3

하현재와 가로보의 부식 두께의 증가에 따른 단면 및 강성의 감소가 동시에 작용할 때 트러스 주부재와 가로보에 발생하는 응력의 변화를 그림 11~12에 각각 나타내었다.

그림 11을 보면 두께의 감소에 따른 각 부재의 응력증가량은 하현재가 가장 크게 변화하는 것으로 나타났으며, 두께의 감소가 약 3mm정도가 될 때 응력의 증가량은 약 10%정도가 발생하며 하현재와 사재에 거의 동일하게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 하현재만의 부식에 따른 응력변화량과 가로보만의 부식에 따른 응력변화량을 함께 고려하면 각각의 응력변화량을 더한 것과 비교적 유사한 것으로 나타났다.

한편, 가로보의 응력변화율을 나타낸 그림 12를 살펴보면, 가로보의 단부가 가로보의 내부구간 보다 약 1.5배 정도를 차지하는 것을 알 수 있으며 두께의 감소 4mm를 기준했을 때 단부에서는 약 20%, 내부에서는 약 13%로 나타났으며, 트러스 주부재와 마찬가지로 하현재와 가로보 각각의 응력변화율을 더한 값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이로부터 여러 가지 손상에 의하여 발생하는 부재의 응력변화량은 각각의 손상에 의하여 발생하는 응력변화량을 중첩하므로 큰 오차없이 계산될 수 있고 동일한 절점을 공유하는 경우 연성에 의한 응력증가량은 계산된 응력증가량의 약 10%정도를 넘지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

강철도 교량에 있어서 부재의 강성변화에 따른 발생응력의 해석결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 단면의 감소에 따라 트러스 주부재에 발생하는 응력은 대체적으로 선형적으로 증가하며 하현재와 사재가 가장 큰 변화를 일으키는 것으로 나타났다. 또한, 하현재와 가로보의 단면두께의 감소가 약 2~3mm정도가 될 경우 트러스 주부재에는 약 10%, 가로보에는 최대 약 15%정도까지 응력이 증가하는 것을 알 수 있었다.

(2) 여러 가지 손상에 의하여 발생하는 부재의 응력변화량은 각각의 손상에 의하여 발생하는 부재의 응력변화량을 중첩하므로 큰 오차없이 계산될 수 있고 동일한 절점을 공유하는 경우 연성에 의한 응력증가량은 계산된 응력증가량의 약 10%정도에 이름을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 山田健太郎 外, “既設トラス橋の實働応力測定と壽命評價”, 土木學會第43回年次學術講演會, I-213, 昭和63年10月
- (2) 土木學會, ‘鋼橋における劣化現象と損傷の評價’, 平成 8年 3月
- (3) 西村 昭 外, “既存橋梁の耐荷力評價とその検証に關する研究”, 橋梁と基礎, 1987年2月.
- (4) L. Fraýba, ‘Dynamics of Railway Bridges’, 1996. Thomas Telford.

(접수일자 : 1997. 11. 19)