

강교량의 용접불량에 따른 안전도 분석

A Safety Assessment of Weld Defective Steel Bridges

박승범¹⁾
Park, Seung-Bum

방명석²⁾
Bang, Myeung-Sug

김도겸³⁾
Kim, Do-Gyeum

Abstract

Nondesructive test and structural analysis have been conducted to assess the safety of weld defective steel bridges in service. In the nondestructive test, using the radioactive ray and ultrasonic, the defective welding patterns in the steel bridges are identified. A major defective welding pattern is identified as the lack of welding area due to the insufficient welding penetration. By considering the welding defect in the above, structural analysis is conducted to evaluate the influence of welding defect on the safety of steel bridges. The results indicate that, due to the insufficient welding penetration, the stress obtained in the analysis is over the allowable fatigue stress level, and its influence on safety of the bridges is significant.

Keywords : Nondesructive test, Structural analysis, Safety of steel bridges

Key words : Nondesructive Test, Structural Analysis, Safety of Steel Bridges

1. 서 론

강교량은 그 특성상 수많은 부재로 구성되어 있고 각 부재에는 많은 연결부가 존재하게 되며, 연결부의 손상은 연결부의 응력집중을 초래하므로 구조물에 치명적인 손상 및 파괴를 유발할 수 있다. 도로교표준시방서¹⁾에서는 부재의 연결방법

으로 고장력볼트 연결과 용접연결을 제시하고 있으며, 최근에는 부재의 사하중을 줄이고 미관을 고려하여 용접연결이 많이 사용되고 있다.

특히 대형교량부재의 경우에는 압연보의 사용이 불가능하므로 현장에서 강관을 가공하여 제작·사용하는 경우가 대부분이며, 이러한 경우에 부재내 용접부가 크게 증가하게 된다.

1) 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

2) 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원

3) 정희원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 12월 31일까지 학회로 보내주시면 1998년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

따라서, 본 논문에서는 용접 연결부의 손상이 강교량의 안전성에 미치는 영향이 매우 큰 점을 고려하여, 방사선투과시험 및 초음파시험 등을 사용한 비파괴 검사의 결과를 바탕으로 용접연결부의 용입부족을 고려한 유한요소해석을 실시하되, 트러스 교량의 부재에 존재하는 용접결함의 교량의 안전성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 비파괴시험

2.1 개요

비파괴시험은 인장시험이나 충격시험과 같은 파괴시험과는 달리 시험하고자 하는 제품을 파괴하지 않고 시험할 수 있는 물리적인 시험방법으로써, 물질고유의 물리적 성질이 재료내 조직상의 이상, 기하학적 불연속 등의 결함에 의해 변화하는 현상을 이용하여 건전한 부위와 결함부위의 물리적 성질을 비교하고 그 차이로부터 결함의 양상을 추정하는 기술이다. 이러한 비파괴검사기술은 용접부에서 발생하는 균열(crack), 용입불량(incomplete penetration), 융합불량(lack of fusion) 등의 평면상 결함, 슬래그 내재(slag inclusion), 기공(porosity) 등에 의한 부피상 결함 등 용접결함에 대한 파괴역학적 평가를 적용하기 위한 필수적이고 기본적인 작업이 되며, 수명예측외에 용접기술 자체에 대한 평가로도 사용될 수 있다.²⁾ 특히 건설분야에 있어서는 구조물의 공용기간중에 발생할 수 있는 위험결함의 발생여부를 정기적으로 점검하되 불의의 사고에 의한 재난을 미연에 방지하는 수단으로 유용하게 사용되고 있다. 이러한 비파괴검사기술은 교량의 안전성 검사에 있어서도 중요한 위치를 차지하고 있으며 그 활용도가 급속히 증가하고 있다.

본 논문에서는 트러스교량내의 수직부재에 있는 맞대기 용접이음에 대하여 비파괴시험방법중 방사선투과시험 및 초음파시험을 실시하고, 이를 통하여 조사된 용접결함의 종류와 용접결함의 종류별 발생빈도 및 물리적인 용접시공 조건 등을

고찰하여 안전성 평가를 위한 기본자료로 삼고자 한다.

2.2 시험방법 및 내용

2.2.1 조사대상

시험대상교량은 국내의 트러스교량으로 Fig. 1과 같은 위치에서 수직재에 의하여 연결되는 게르버형식이다. 이 연결부는 수직재와 상·하현재가 Fig. 2와 같은 핀 연결구조를 갖게 된다. 이러한 연결구조에서 핀 주변 수직재의 단부 두께는 응력집중효과 때문에 중앙부보다 두껍게 된다. 따라서 수직재는 전체적으로 중앙부보다 단부가 두꺼운 변단면이 되며, 이렇게 두께가 다른 플레이트를 연결하기 위하여 두꺼운 강판을 테이퍼 가공한 후 맞대기 용접을 하게 된다. Fig. 2는 핀 주변의 핀 플레이트와 수직재 플랜지 사이의 용접부를 나타낸 것이다.

2.2.2 시험방법

1) 방사선투과시험

방사선투과시험³⁾은 접근 가능한 전체 수직재 맞대기용접이음에 대하여 KS B 0845에 따라 실시하였으며, 용접결함의 확인에 주안점을 두었다. 또한 본 시험재가 인장을 받는 부분이므로 판정 기준은 KS B 0845의 2급을 기준으로 하였다.

탐상부위 즉, 검사개소는 Fig. 1과 같으며, 총 111검사개소에 대하여 방사선투과시험을 실시하였다. 필름의 부착 및 방사선 조사방향은 다음 Fig. 2와 같으며, 시험조건의 상세는 Table 1과 같다.

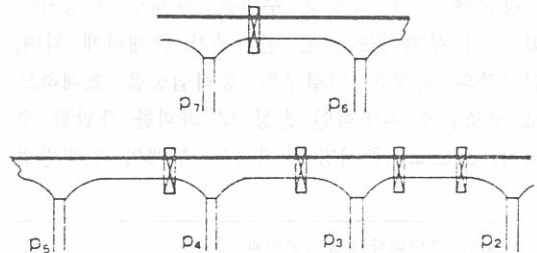


Fig. 1. 교량형식 및 방사선투과시험 개소

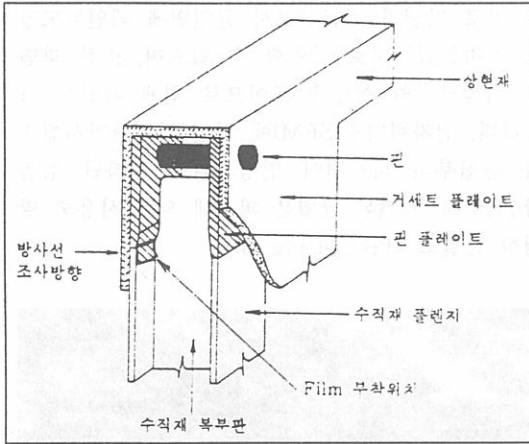


Fig. 2. 연결구조 및 방사선조사 방향

Table 1. 방사선 투과시험조건외 상세

구 분	시험조건	비 고
사용장비	방사성 동위원소 Ir-192, 40Ci	초점크기 : 2.0x3.0mm
사용 투과도계	F08	스크린: 연박0.127mm
필름타입	AGFA D7	
선원-필름간 거리	500mm	
촬영방법	Single Wall Single View	
노출시간	15분 30초	
현상조건	20℃, 5분	
표면상태	As Welded	

2) 초음파시험

초음파시험⁴⁾은 접근 가능한 전체 수직재의 맞대기용접이음부에 대하여 KS B 0896에 따라 실시하였으며, 결함의 크기 및 용입깊이의 확인에 주안점을 두었다. 또한 본 시험체가 인장을 받는 부분이므로 판정기준은 KS B 0896의 2급을 기준으로 하였다. 탐상부위 즉 검사개소는 방사선투과 시험 개소와 동일하며, 총 111검사개소에 대하여 초음파시험을 실시하였다. 시험조건외 상세는 다음 Table 2와 같다.

Table 2. 초음파 탐상시험조건외 상세

구 분	시험조건	비 고
사용장비	EPOCH-II	S/N 94154806
탐 측 자	5Z10x10A70	교정각도 : 69.3°
시험방법	Contact	
교정블록	STB-A1	
접촉매질	Glycerin	

2.3 시험결과 분석

2.3.1 용접결함의 종류 및 빈도

방사선투과시험결과 확인된 결함의 종류별로 빈도수를 조사한 결과는 다음 Table 3과 같다.

표에서 보듯이 확인된 용접결함은 용접에서 가장 엄격히 관리되고 있는 용입부족, 융합불량 및 균열이 대부분이며, 확인된 용접결함중 수직재의 맞대기 용접이음에서 가장 빈도수가 높게 나타난 결함은 용입부족으로서 전체 검사개소 111개소중 102개소에 걸쳐 나타났다.

Table 3. 용접결함 종류별 빈도수

용접결함의 종류	결함 빈도수	비율(%)
합 계	111	100.0
용입부족	90	81.1
융합불량	5	4.5
용입부족 및 융합불량	4	3.6
용입부족 및 기공	6	5.4
융합불량 및 기공	2	1.8
용입부족 및 균열	2	1.8
균 열	1	0.9
무 결 함	1	0.9

특히 균열발생 2개소가 용입부족과 함께 나타난 점으로 미뤄볼 때 균열발생에 있어서 용입부족에 의한 용접결함이 가장 큰 원인이 된 것으로 생각된다. 또한 파단된 수직재에서 일부 육안으로 확인된 바와 같이 융합불량이 균열의 촉진에 영향을 미쳤을 개연성은 있으나, 다른 균열부위에 융합불량의 결함이 없는 점을 감안할 때 그 영향은 미미한 것으로 판단된다.

2.3.2 용접결합의 원인

본 비파괴시험에서 확인된 여러 가지 용접결합의 발생원인은 다음과 같다.

1) 용입부족 : 이 결합은 모재와 모재사이에 용착금속이 뿌리(root)부까지 용입되지 않을 때 발생하며, 이러한 결합의 발생을 방지하기 위해서는 이면개선작업(back gouging)을 실시하여야 한다. 그러나 본 수직재의 경우에는 이면개선작업을 하지 않고 표면에서만 용접을 실시하였기 때문에 일반적인 용입불량의 경우에 비하여 그 범위가 광범위하게 나타나고 있을 뿐만 아니라 용입의 깊이가 얇은 현상을 나타내고 있다. 즉 용접의 잘못에 의해 우연히 발생된 것이 아니라 근본적으로 용입불량이 발생할 수밖에 없는 현장상황이 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

2) 용입불량 : 이 결합은 용접입열이 충분하지 못할 때, 모재와 용접부 사이에 주로 발생하는 것으로 다층용접에 있어서의 국부적인 개선형상의 변화에 의해 접근성이 불량할 때 용접아크(Arc) 길이의 증가에 따른 입열부족 때문에 발생하였다. 뿐만 아니라 용접전류, 전압, 용접속도등 용접조건을 잘못 선택함에 따른 불충분한 입열과 모재 자체가 지나치게 냉각되어 있는 경우에도 이 결합을 유발하는 요인이 될 수 있다.

3) 기공 : 발생원인은 용접재료의 불완전한 건조, 부적절한 탈산제가 함유된 용접재료의 사용 또는 액체상태에서와 고체상태에서의 가스 용해도 차이에 의해 발생하며, 빠른 용접속도하에서 개스와 수축효과가 조합하여 발생한다. 이러한 결합은 물리화학적인 반응에 의하여 통상 구형으로 발생한다.

4) 균열 : 균열의 종류는 크게 저온균열과 고온균열의 두가지로 대별할 수 있다. 이중 용접부에서 발생한 결합은 대개 고온균열로 취급된다. 본 수직재의 경우, 일반적으로 용접성에 문제가 없는 연강에서는 저온균열이 잘 발생하지 않는 현상과 발생된 균열의 위치가 용접부임을 감안할 때, 용접부에 발생된 균열은 고온균열 또는 피로에 의해 발생된 피로균열로 판단된다. 고온균열은 용접

후 바로 발생하는 균열로서 균열면에 페인트도장이 스며들었는지로 확인할 수 있으며, 또한 파면은 취성파괴의 형상을 보이므로 쉽게 확인이 가능하다. 전자현미경(SEM)에 의한 파면관찰시험결과 용접부의 파단면이 연성파괴로 나타난 점을 감안할 때, 발견된 균열은 피로에 의해 사용중 발생한 균열로 판단된다(Fig. 3).

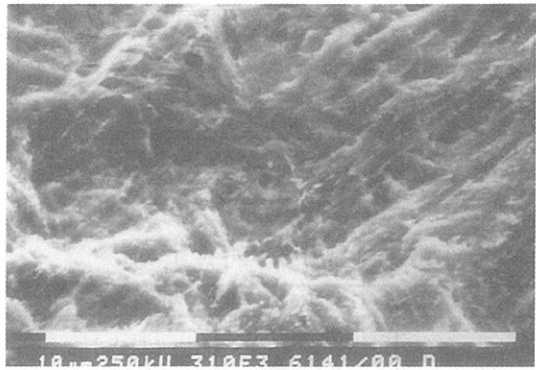


Fig. 3. SEM촬영 결과($\times 3000$)

2.3.3 용입깊이

용접결합중 용입불량이 가장 크게 문제가 되고 있으므로 여기서는 용입깊이에 대하여 좀더 상세히 분석을 수행할 필요가 있으며, 또한 용입깊이를 검토함에 있어서는 양면의 용입깊이를 별도로 검토할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 거셋판과 접촉되어 용접여성이 제거된 면을 이면으로 하고 용접비이드가 그대로 존재하고 있는 면을 표면으로 하여 각각의 용입깊이와 전체 용입깊이를 검토하였다. Table 4는 표면측의 용입깊이를, Table 5는 이면측의 용입깊이를 각각 나타내었으며, Table 6은 전체 용입깊이를 나타내었다. 각각의 표에서 보듯이 표면측의 평균 용입깊이는 약 5.2mm, 이면측의 평균용입깊이는 약 2.8mm, 전체 평균용입깊이는 약 8.0mm로 나타났다. 평균용입깊이 8.0mm는 모재두께 18mm의 약 44.5% 정도 만이 용입되었음을 의미한다.

Table 4. 표면측의 용입깊이

용입깊이(mm)	빈 도 수	비 율(%)
합 계	111	100.0
1	1	0.9
2	24	21.6
3	16	14.5
4	9	8.1
5	10	9.0
6	13	11.7
7	10	9.0
8	6	5.4
9	1	0.9
10	6	5.4
11	1	0.9
완전용입	11	9.9
측정불가	3	2.7

Table 5. 이면측의 용입깊이

용입깊이(mm)	빈 도 수	비 율(%)
합 계	111	100.0
1	35	31.5
2	34	30.6
3	11	9.9
4	12	10.9
5	4	3.6
6	1	0.9
완전용입	11	9.9
측정불가	3	2.7

Table 6. 전체 용입깊이

용입깊이(mm)	빈 도 수	비 율(%)
합 계	111	100.0
2	1	0.9
3	11	9.9
4	20	18.0
5	9	8.1
6	6	5.4
7	12	10.8
8	7	6.3
9	9	8.1
10	8	7.2
11	5	4.5
12	5	4.5
13	2	1.8
14	1	0.9
15	1	0.9
완전용입	11	10.0
측정불가	3	2.7

3. 구조해석

3.1 해석모델

본 논문에서는 대상교량을 5경간 연속트러스 중에서 독립적으로 모델링이 가능한 3차원 연속트러스 구조로 모델링하였다(Fig. 4). 바닥판은 평판요소를 모델링하였으며 반합성거동을 하는 것으로 가정하였다. 또한, 사하중은 트러스부재가 부담하고 활하중은 바닥판과 트러스가 동시에 부담하는 것으로 모델링하였으며, 바닥판의 탄성계수를 아주 작게 고려하여 실제 구조계에 가까운 거동을 할 수 있도록 하였다. 가로보와 세로보는 3차원으로 모델링하여 바닥판에 작용하는 윤택하중이 3개의 주트러스에 하중 분배되는 현상을 정확히 모델링할 수 있도록 하였다. 해석에 있어서는 전체 3차원 연속트러스 구조해석을 통하여 수직재의 축력을 결정하고 다음 단계에서는 이 축력

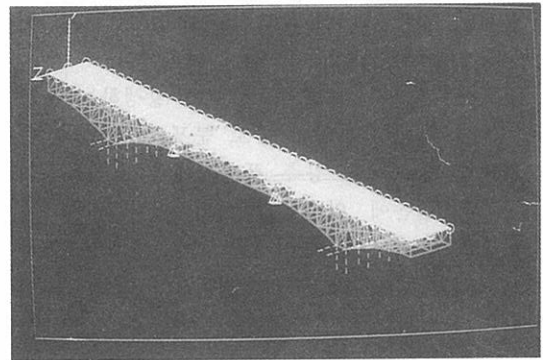


Fig. 4. 연속트러스의 3차원 모델

을 외력으로 사용하여 수직재에 대한 구조해석을 실시하였다. 수직재의 해석 모델은 Fig. 5와 같다. 이 수직재의 유한요소해석에서 강판부는 평판요소를 사용하였으며, 핀 연결부는 도로교시방서¹⁾에 있는 핀 접촉면의 응력분포를 고려한 경계조건을 적용하였다.

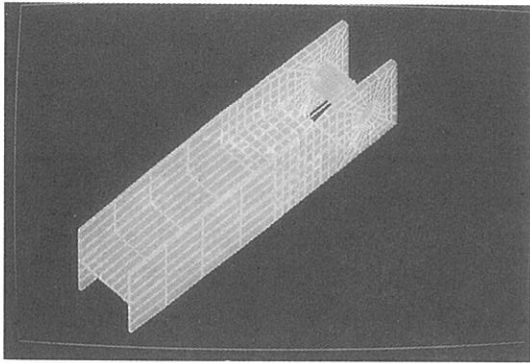


Fig. 5. 수직재의 해석 모델

3.2 해석결과

구조해석에 따른 수직재 및 수직재 용접부의 횡단면에 대한 응력분포는 Fig. 6 및 Fig 7과 같다. 해석결과, 수직재에는 사하중에 의해 166.3ton, 활하중(DL-18)에 의해서 58.55ton 총 224.9ton의 축력이 발생하였으며, 용입불량이 없는 경우에는 수직재의 최대 인장응력이 1242.3kg/cm²으로 허용응력 1680kg/cm²보다는 작게 나타났다.

구조해석결과를 보면 큰 응력이 발생하는 부분은 용접부의 용입불량이 주로 분포되어있는 양측 플렌지에 있으므로 양측 플렌지에서 용입불량에 의한 단면결손에 의하여 응력의 전이가 불가피하였음을 알 수 있다. 이러한 경우, 응력은 복부에서 크게 발생하게 되며 플렌지의 용입불량에 의하여 응력집중도가 크게 증가한다. Fig 7에 보

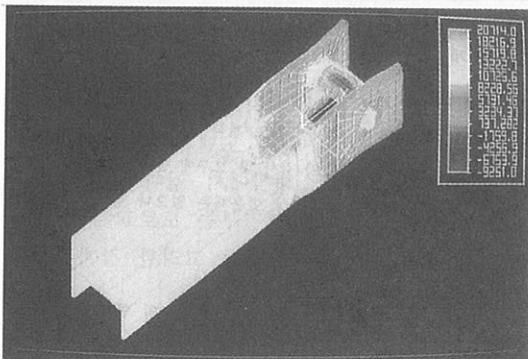


Fig. 6. 수직재의 응력도

이는 것처럼 수직재의 용접부 응력분포는 부위마다 큰 응력차이를 보여주고 있다. 일반적으로 플렌지 부위의 응력이 복부보다 크며, 플렌지 단부에서 최대응력이 발생함을 알 수 있다.

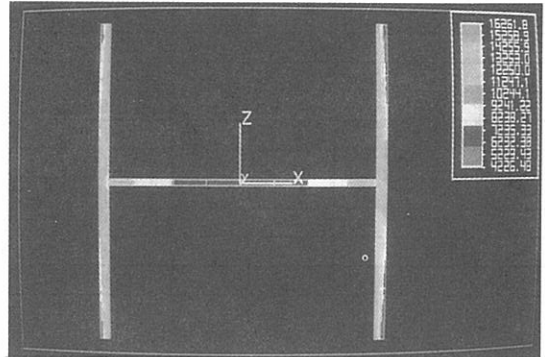


Fig. 7. 수직재 용접부의 응력도

3.3 분석 및 고찰

Table 6에서 보면 전체 용입깊이에 대하여 최대용입불량률이 18%로 나타나 있으며 이러한 경우에 최대발생인장력은 이론적으로는 1515.0kg/cm²이나 Fig. 7에서 보는바와 같이 플렌지의외측에 발생한 고응력의 영향을 고려해 본다면, 응력집중도가 더욱 심할 것임을 알 수 있다. 또한 현재의 일일교통량 10만대와 DB24(1등교)에 해당하는 차량이 통행하고 있는 점을 고려할 때 설계하중의 재하시보다 약 33%의 응력이 증가하게 되므로 최대응력부(플렌지 외측)에서는 허용인장응력을 크게 상회하는 것을 알 수 있고, 피로허용응력도 초과하고 있다. 이러한 고응력과 플렌지의 용입부족에 의한 단면결손을 고려하면 용접부에 발생한 균열은 허용응력초과와 피로강도부족에 의한 피로균열로 판단되며, 용접결함이 안전성 저하에 치명적인 원인이 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 강교량에 대한 비파괴시험 및

구조해석을 실시하므로써 안전성 분석을 시도하였으며, 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 대상교량에 대한 용접부의 비파괴시험결과 강구조물의 안전성에 가장 중요한 영향을 미치는 것은 용접부의 용입상태임을 알 수 있다.

2) 대형 플레이트거더에서의 단면응력분포는 모멘트의 영향 및 전단뒤집현상 등의 요인으로 불균일한 분포를 가지며 부분적으로 큰 응력집중을 유발한다. 또한, 용접부의 용입부족에 의해 형성된 용입결함은 구조부재의 단면부족으로 큰 응력집중을 발생시킴을 알 수 있다. 여기에 과적하중 등에 의한 응력증가를 고려하고, 응력집중부위에 용접불량등이 존재하는 경우에 이러한 응력집중은 허용인장강도와 허용피로응력을 초과하게 되며 균열발생의 원인이 된다.

3) 강교량의 안전성 평가에 있어서는 연결부의 손상이 구조안전성에 미치는 영향이 매우 큰 점을 고려하여 비파괴 검사의 결과를 바탕으로 용접결함을 평가한 후, 응력의 집중을 고려한 구조해석을 실시하는 것이 타당하다고 하겠다.

감사의 말씀

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단과 일본 문부성간의 대학간 국제협력 연구지원에 의한 내 용중의 일부로 본 연구에 협력하여 준 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설부, "도로교 표준시방서," 1996
2. 이강용, 김준섭, UT신호형상 인식을 위한 Intelligence Package 개발과 Austenitic Stainless Steel Welding부 결함 분류에 관한 적용 연구, 비파괴학회지 Vol.15, No.4, 1995
3. 한국공업진흥청, KS B 0845, 강용접부 방사선투과탐상시험방법 및 등급분류, (사)한국공업표준협회, 1977
4. 한국공업진흥청, KS B 0896, 강용접부 초음파탐상시험방법 및 시험결과의 등급분류방법, (사)한국공업표준협회, 1977
5. ALGOR Interactive Systems Inc., "ALGOR (SUPERSAP)," 1989
6. 서울시, "한강상교량 안전진단보고서," 1984

(접수일자 : 1997. 8. 25)