

공학석사 학위논문

강교의 손상과 보수 및 보강대책에 관한 연구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2005 년 8 월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

이 현 모

이 논문을 이현모의 공학석사
학위논문으로 인준함

2005년 6월 17일

주 심 공학박사 김 명 식



위 원 공학박사 손 인 식



위 원 공학박사 이 동 욱



목 차

그림 목차	iii
표 목차	vi
ABSTRACT	v
1. 서 론	1
2. 강교량의 수명 및 손상	3
2.1 강교량의 재가설 현황	3
2.2 강교량의 수명	5
2.3 강교량의 피로손상	6
2.3.1 피로파괴	6
2.3.2 고장력볼트의 지연파괴	7
3. 강교의 손상과 보수 및 보강대책	8
3.1 국내 강교의 손상사례와 보수 및 보강대책	8
3.1.1 게르버형교	8
3.1.2 아치교	12
3.1.3 상자형교	17
3.1.4 강바닥판교	21
3.1.5 플레이트 거더교	24
3.2 국외 강교의 손상사례와 보수 및 보강대책	26
3.2.1 플레이트 거더교	26
3.2.2 상자형교	39
3.2.3 아치교	41
3.2.4 강바닥판교	47
3.2.5 기타 강구조물	51
3.3 강교량 손상사례 요약	55
4. 결론	58

참고문헌		60
감사의 글		64

그림 목차

- 그림 2.1.1 도로교 사용년수와 재가설 이유(일본)
- 그림 3.1.1 게르버형교의 구조형식
- 그림 3.1.2 상현재와 수직재 연결부 및 핀연결부 용접이음
- 그림 3.1.3 수직재 연결부에 대한 설계 및 실제의 용접이음 상태
- 그림 3.1.4 아치교에서 아치리브 수직·수평보강재 용접이음부 용접누락
- 그림 3.1.5 중로아치교에서 트리스구조 브레이싱 연결부의 절단노치에 발
생한 피로균열
- 그림 3.1.6 타이거더 부식상태
- 그림 3.1.7 타이거더의 플랜지 연결 앵글의 부식상태
- 그림 3.1.8 타이거더 커버 플레이트 시공 개요도
- 그림 3.1.9 연결 개구부의 차수대책 개요도
- 그림 3.1.10 상자형교에서 수직·수평보강재 용접이음부 용접누락 및 파단
- 그림 3.1.11 받침장치의 Working Line 불일치 및 상·하부 받침장치의 중
심 이격 상태
- 그림 3.1.12 지점부 수직보강재 설치 개요도
- 그림 3.1.13 U형 리브+U형 리브 현장 맞대기용접이음부의 손상
- 그림 3.1.14 단차부 모멘트 발생원리
- 그림 3.1.15 데크플레이트+U형 리브 필렛용접이음부의 손상
- 그림 3.1.16 U형 리브의 용입깊이
- 그림 3.1.17 플랜지 상부 부식 및 균열상태
- 그림 3.1.18 복부판 부식상태
- 그림 3.1.19 부식단면 보강
- 그림 3.2.1 주형 웨브 노치부의 손상

그림 3.2.2 노치부 거더의 표준설계

그림 3.2.3 주형, 횡형 및 대경구 이음부의 손상

그림 3.2.4 균열의 발생 종류

그림 3.2.5 주형, 횡형 및 대경구 이음부의 손상

그림 3.2.6 중간 대경구 하부부재 이음부의 손상

그림 3.2.7 중간 대경구 거셋트플레이트 이음부의 손상

그림 3.2.8 소울플레이트 용접이음부의 손상

그림 3.2.9 상자형교 코너플레이트 용접이음부의 손상

그림 3.2.10 랭거교 현수부재(H형 단면)의 손상

그림 3.2.11 랭거교 현수부재(원형 단면)의 손상

그림 3.2.12 상로아치교의 손상

그림 3.2.13 아치리브 웨브와 횡형 이음부의 손상

그림 3.2.14 강바닥판의 손상

그림 3.2.15 피로균열 발생을 감소시키는 슬롯형상

그림 3.2.16 주형웨브+수직보강재+데크플레이트의 돌림용접부

그림 3.2.17 T형 교각 우각부의 손상

그림 3.2.18 표식기둥 분기점 용접이음부의 손상

그림 3.2.19 수직보강재 연결과 손상 예

표 목차

표 3.3.1 국내 강교량의 손상 사례 및 보수·보강 대책

표 3.3.2 국외 강교량의 손상 사례 및 보수·보강 대책

A Study on Damage of Steel Bridge and It's Maintenance Measures

*Department of Construction Engineering, Graduate School of
Industry, Pukyong National University*

Hyun-Mo Lee

ABSTRACT

The road was essential facility to transport passenger and goods. The steel bridge is continuously increasing since the 1990's. The reasons are the development of the steel industry, manufacture and supply of steel bridge, improvement in welded ability, economical efficiency, reduction of construction period, and the development of design and construction technology. It is expected that the demand of steel bridge will grow larger because the quality of domestic steel come up to high level, and steel is very useful for recycling of resources.

In steel bridge, the fatigue crack is the most danger factor. Especially, the weigh of vehicles and growth of traffic volume cause fatigue damage on the deck and member in steel bridge. Foreign countries are taking step to prevent fatigue damages by analysing causes because fatigue cracks lead to the fracture of member and collapse of bridge.

In this study, examples of damage which occurred at home and abroad was summarized and proposed methods of repairing and

reinforcing. The purpose of this study is to lengthen bridge's span of life by using the methods of repairing and reinforcing.

1. 서 론

국가산업의 동력인 도로는 사회간접자본 시설로서 여객 및 물동량 수송을 위해서는 중요한 역할을 담당하고 있다. 교량은 도로구조물로서 현재(2003년 12월말 기준) 우리나라 교량 현황은 전체 21,117개소 1,764Km로서 강교량은 1,931개소 453Km¹⁾이며 1,990~1,999년 10년동안 준공된 교량 연장은 약 500Km로서 매년 50Km 정도의 교량이 건설되었다.^{1~1)} 이중 강교량 연장은 220Km 매년 22Km정도 건설되어 강교량의 가설율도 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라에 건설된 강교량은 강상자형 교량이 대부분을 차지하고 있으며^{1),2)}, 강상자형 교량(Steel Box Girder)이 많이 건설된 주요 원인은 구조적인 안정성, 시공성, 장경간의 필요성과 미관등을 고려한 것으로 보여지며 또한 설계측면에서 좌굴해석 등 번거로운 구조해석을 요하는 판형교(Steel Plate Girder) 대신 상자형을 선호하는데 그 원인이 있다고 생각된다^{3)~8)}. 또한 강교량의 건설이 증가하는 원인은 철강제조기술 발전, 강교 제작의 양산·공급가능 및 용접기술 향상, 경제성, 공기단축, 미관측면 등 다양한 원인과 강교량 설계·시공기술 발전이 복합되어 이루어지고 있는 것으로 분석된다. 국내 강재의 품질은 세계적인 수준에 이르렀으며, 강재는 재활용이 가능하므로 자원의 재활용 면에서도 매우 유용하여 강교량 수요는 더욱더 증가할 것으로 예상된다^{6),9)}.

도로교 및 철도교에서 통행 차량의 증가 및 차량의 중량화에 의해 교량의 상판 및 부재에 피로손상도 발생하고 있다^{10)~13)}. 국내 뿐만 아니라 국외의 강교량에 있어서도 피로손상이 발생하여 이에 대한 원인을 분석하고 대책을 수립하고 있는 실정이다^{14)~29)}. 이와 같은 피로손상은 부재의 파단 또는 구조물 전체의 붕괴사고 원인이 되어, 사회 및 경제에 큰손실을 가져오게 된다. 이러한 이유로 외국에서는 구조용강재의 피로손상에 관해

많은 피로시험을 실시하여 미국의 AASHTO, 유럽의 ECCS, 일본의 JSSC 등에서는 강교량 부재의 이음구조 상세에 대한 독자적인 피로설계 기준을 설정하고 이를 강교량의 설계에 반영하고 있다^{16), 21), 23), 30)~32)}. 또 공용중에 있는 강교량 부재에 발생한 피로손상 부분도 해석 및 피로시험을 재현하고, 보수·보강을 실시하므로서 교량의 공용수명을 연장하고 있다^{14), 15), 17), 24), 26), 28)}.

본 연구에서는 국내·외에서 발생한 강교의 손상사례 및 보수·보강 대책을 정리하고 분석하여 우리나라에 기 건설된 강교에서도 장래 예상되는 손상부재의 보수·보강대책에 활용하고, 또 앞으로 설계될 강교에 대해서는 정리한 자료를 적용하여 강교의 공용수명 연장하고자 한다.

2. 강교량의 수명 및 손상

2.1 강교량의 재가설 현황

교량은 자연 환경 속에 설치되고, 오래 동안 계속하여 사용되는 것이 특징이다. 또 기계부품과 달리 일품 생산적인 성격을 갖고 있다. 교량의 수명에 영향을 미치는 인자는 다종다양하며, 몇 개의 인자가 서로 부가되어 교량의 수명에 영향을 미치는 경우도 있다. 국내에서는 교량의 공용년수와 재가설에 관한 자료가 매우 미흡한 실정이다. 따라서 그림 2.1.1 a) 및 b)는 우리나라와 실정이 비슷한 일본 강구조협회에서 조사한 보고서에서 도로교의 공용년수와 재가설 이유를 나타낸다^{15), 17)~19), 24), 26), 28)}.

도로교에서 재가설은 도로·하천·도시계획으로 교량자체의 강도와는 관계없이 도로의 개량 및 도시계획의 변경에 의한 것도 많은 비율을 차지하고 있으나, 내하력 부족 및 주요 부재의 파손 등 교량부재의 강도에 관련된 사항이 더 많다^{24), 26), 28)}. 한편 국내에서도 기존 교량의 설계에서 교량의 공용년수를 설정하지 않고 구조의 안정성에만 주안점을 두고 교량을 설계·건설하였다^{2), 3), 6)}. 그러나 최근에 교량에 사용되고 있는 강재의 품질은 비약적으로 향상되었고, 교량의 구조형식 및 제작방법도 크게 개선되어 교량 자체의 강도 문제로 인한 재가설은 점점 감소되고 있다^{6), 33), 34)}.

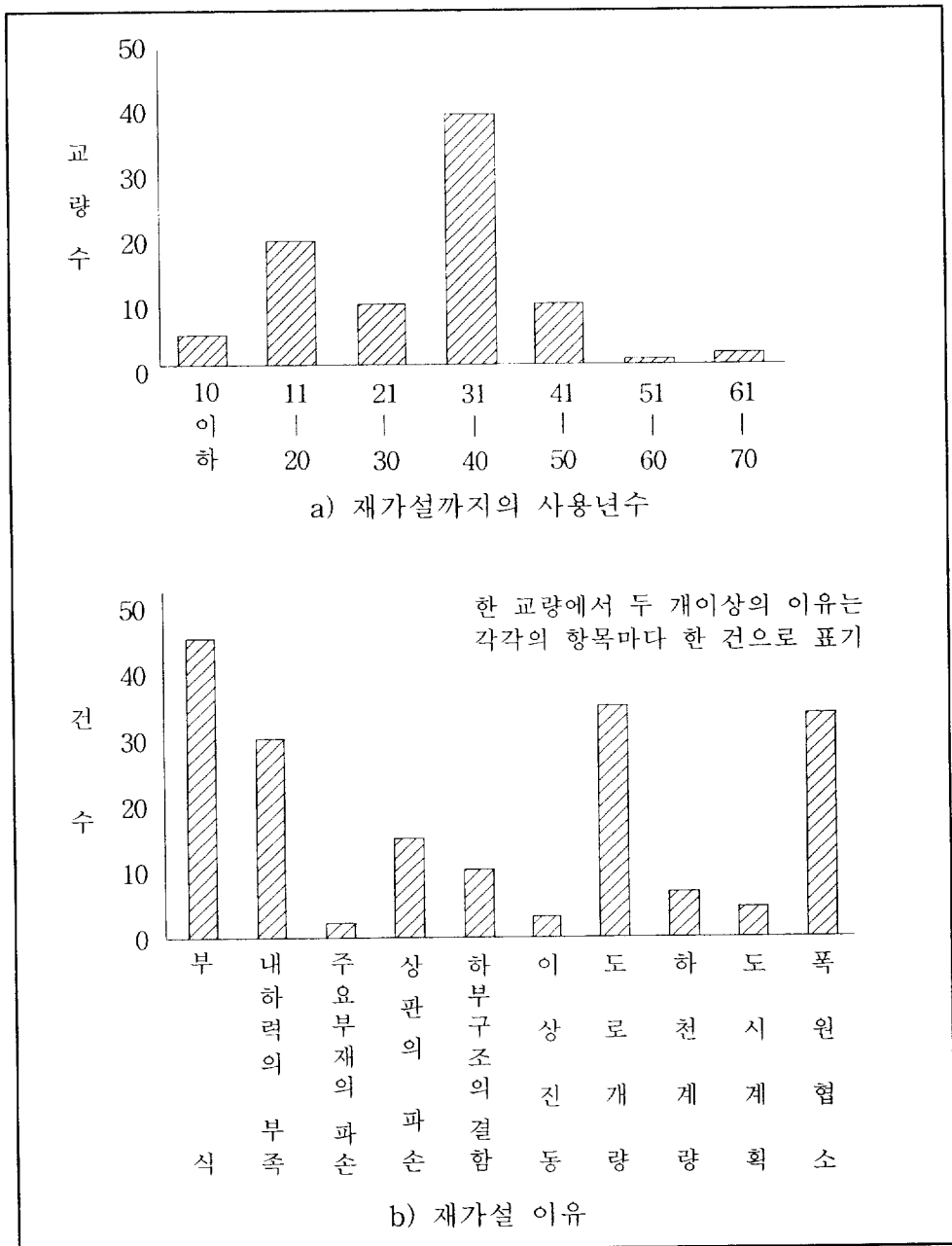


그림 2.1.1 도로교 사용년수와 재가설 이유(일본)

2.2 강교량의 수명

교량의 수명은 몇 년인가라는 것에 대해서는 명확한 정설은 없다. 교량의 수명에 대해서는 피로 또는 부식에 의해 결정되는 물리적 수명과 건설비, 요금계산, 감가상각 등의 재산관리상의 경제적 수명으로 나누어서 생각할 수 있다. 이들 중에서 경제적 수명은 비교적 시간을 간단하게 설정할 수 있다. 한편 교량의 물리적 수명으로 가장 알기 쉬운 것이 피로설계이며, 국내 철도교의 설계기준에서는 75년으로 설정하고 있다³⁵⁾. 유럽의 ECCS에서는 교량의 설계수명을 150년으로 설정하여 그에 따른 하중을 정하고 있으며, 최근 영국의 교량설계 기준인 BS5400에서는 교량의 설계수명을 300년으로 설정하여 설계하는 경우도 있다^{16), 23)}. 또 미국의 AASHTO LRFD에서는 교량의 설계수명을 75년으로 설계하고 있으며, 일본에서는 교량의 교량의 설계수명을 100년으로 설정하여 설계하고 있다^{16), 21), 23), 30)}.

미국 도로교의 피로설계에서는 응력반복회수를 10만회, 50만회, 200만회 및 200만회 이상의 4가지 레벨의 피로허용응력을 설정하고, 도로교의 규격에 따라 선정하도록 되어 있다^{16), 23)}. 단순히 이 응력반복회수가 설계수명을 의미하는 것은 아니며, 사용조건에 따라 피로에 대한 기준을 변경하여 대응하고 있으므로, 이와 같은 설계를 한다면 반영구적으로 사용할 수 있다는 것을 목적으로 한 것이다^{16), 23), 36), 37)}.

2.3 강교량의 피로손상

강재는 콘크리트에 비해 고강도 재료이므로 경량화 및 장대화가 가능하다. 그러나 활하중이 차지하는 비율이 콘크리트 교량에 비해 크므로 피로의 영향을 많이 받고, 도장과 피막이 열화된 경우 부식의 영향을 받기 쉽다^{26), 28), 38), 39)}. 이와 같은 피로와 부식에 의한 손상은 시간경과에 따라 누적되는 성질이 있으므로 강교량의 수명을 지배하는 주요한 인자가 된다.

2.3.1 피로파괴

피로파괴(fatigue failure)란 부재의 정적인 강도보다 낮은 하중이 장기간 동안 반복작용하여 미세한 균열이 발생하고 이것이 성장하는 현상을 말한다^{12), 25), 40), 41)}. 그러나 강교량 부재는 콘크리트에 비해 인성과 연성이 풍부하므로, 미세한 피로 균열이 발생하더라도 이것이 곧바로 부재 또는 구조물의 붕괴로 이어지지는 않으므로 초기단계에 적절한 보수 또는 보강을 실시하면 원래의 기능을 회복할 수 있다^{24), 42), 43)}. 피로에 가장 큰 영향을 주는 인자로는 반복응력의 범위와 횟수이며, 구조물이 놓여진 환경조건도 영향을 미친다. 강교량은 대부분 가설 지점의 조건에 맞추어 단품으로 생산되며, 제작정도 및 품질은 각 교량마다 다르며, 부재의 제작 정도는 이음부의 국부적인 응력에 관계되므로 피로강도에도 커다란 영향을 미친다^{43), 44)}. 또한 용접이음부의 결함 유무 및 정도도 피로강도에 중요한 영향을 미치는 인자이다^{6), 10), 33), 34)}. 또 교량의 환경 및 사용상태에 따라서도 각각 다르다. 이들 강교량이 갖는 다양성, 거기에 대한 불확정한 많은 요인들이 강교에서 피로수명 정도의 예측을 어렵게 하고 있다. 현재까지 강교량에서 확인된 피로파괴의 주원인은 이음부의 형상에 따른 응력집중, 2차응력, 용접결함, 진동 등으로 알려져 있다^{10)~12), 14), 25)}.

2.3.2 고장력볼트의 지연파괴

강교량 부재의 가설현장에서의 이음에는 고장력볼트 마찰이음이 대부분을 차지한다. 고장력볼트의 지연파괴란 정적인 하중이 지속적으로 작용하는 상태에서 일정시간경과 후에 외관상 변형없이 갑자기 취성적으로 파괴되는 현상이다^{2), 3), 5), 33), 34)}. 표면결합이나 부식에 의한 결합부에서 응력집중이 생겨 균열이 발생하고 이것이 시간에 따라 진행하여 결국 급격히 파괴가 일어난다^{28), 38)}. 또한 고장력볼트의 손상으로는 볼트의 풀림 현상을 들 수 있으며, 이 풀림현상은 가설현장에서 너트를 소정의 축력으로 체결하지 않으므로 발생한다.

3. 강교의 손상과 보수 및 보강대책

3.1 국내 강교의 손상사례와 보수 및 보강대책

우리나라에서는 교량의 손상에 대한 사례를 체계적으로 정리한 자료가 그다지 많지 않으나 최근에 약간의 자료가 일부 보고 되고 있다^{11), 45)}.

3.1.1 게르버형교

1) 손상사례

그림 3.1.1, 3.1.2 및 3.1.3에 게르버형교의 구조형식, 상현재와 수직재 연결부, 편연결부의 용접이음 및 수직재 연결부에 대한 설계 및 실제의 용접이음 상태를 각각 나타낸다. 그림 3.1.1, 3.1.2 및 3.1.3에서 알 수 있는 바와 같이 힌지부 수직부재 용접이음부의 용입부족으로 인해 용접이음부에 피로파괴가 발생하였으며, 부재 전체의 절단으로 낙교사고가 발생하여 많은 인명사고를 초래하였다^{6), 33), 34), 45)}.

2) 보수·보강 대책

이러한 부재는 제작시부터 방사선투과시험(RT) 또는 초음파탐상시험(UT)을 실시하면 결함은 바로 검출할 수 있지만 제작시에 비파괴검사를 실시하지 않고 교량을 가설하여 피로파괴가 발생하였으므로 보수·보강대책으로서는 용입부족 부재의 용접이음부를 가우징 후 완전용입 맞대기용접이음을 실시하여 구조계산시 산정한 소정의 응력을 지탱할 수 있도록 하여야 한다.

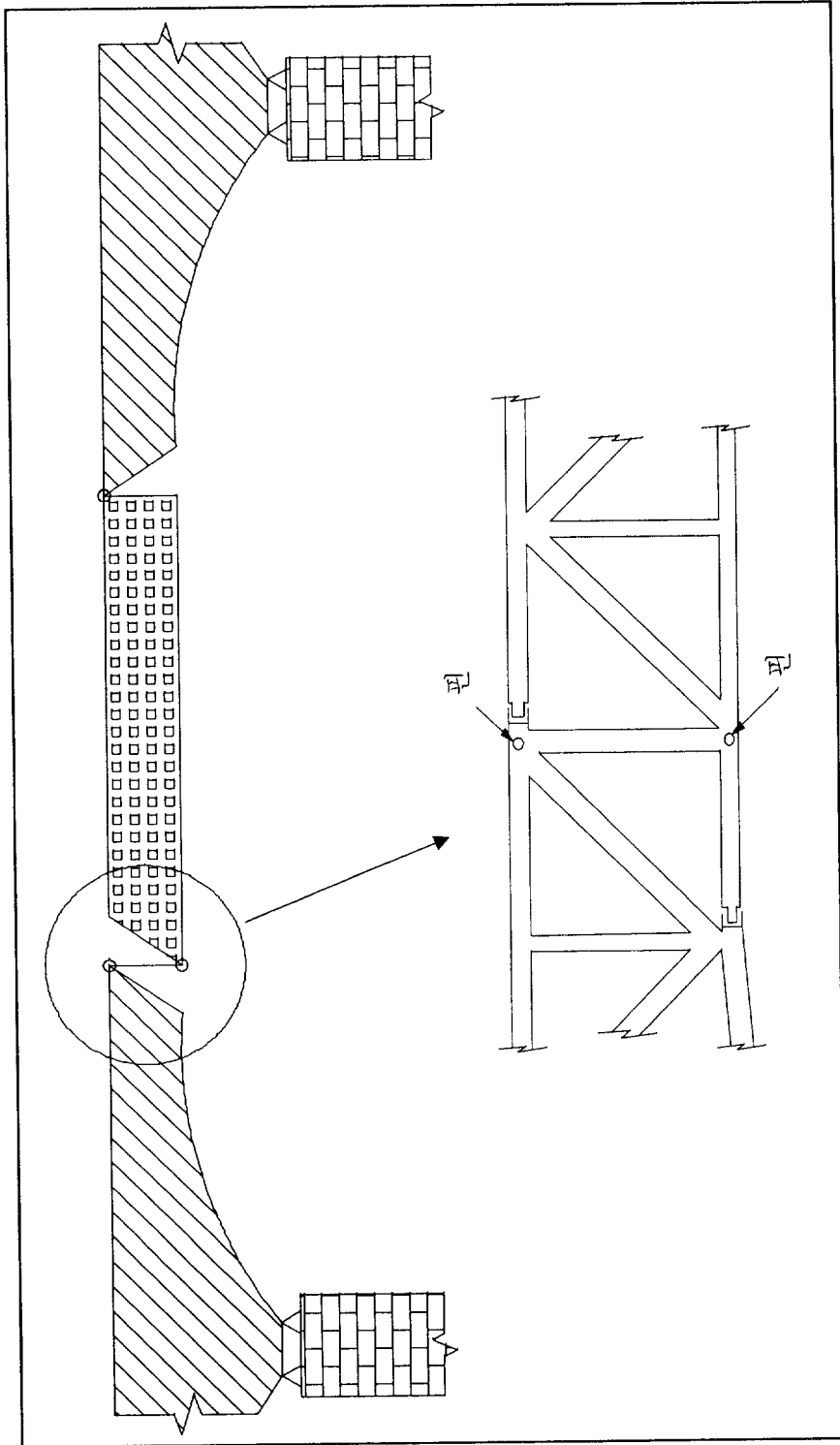


그림 3.1.1 케르버형교의 구조형식

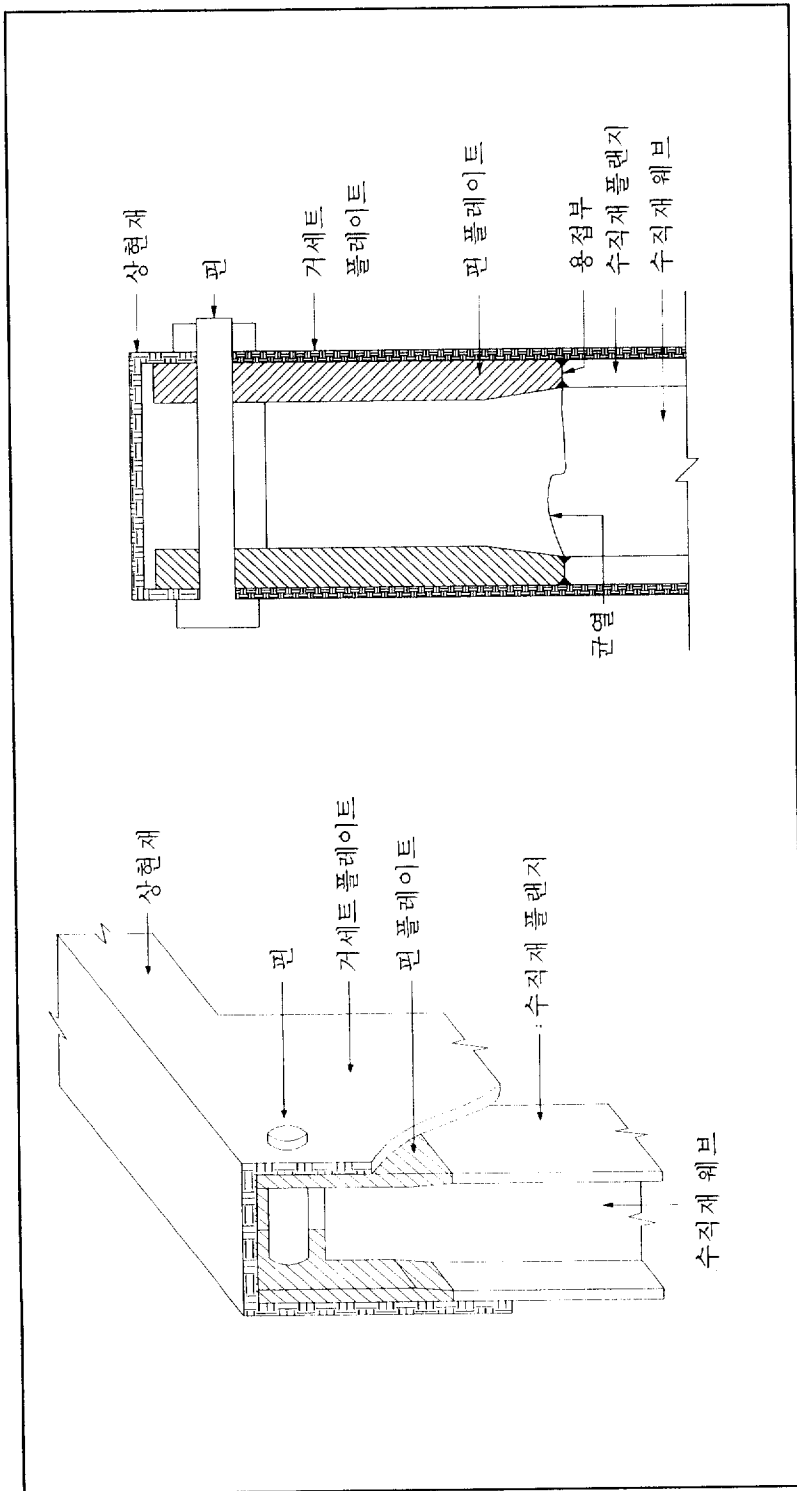


그림 3.1.2 상현재와 수직재 연결부 및 핀 연결부 용접이음

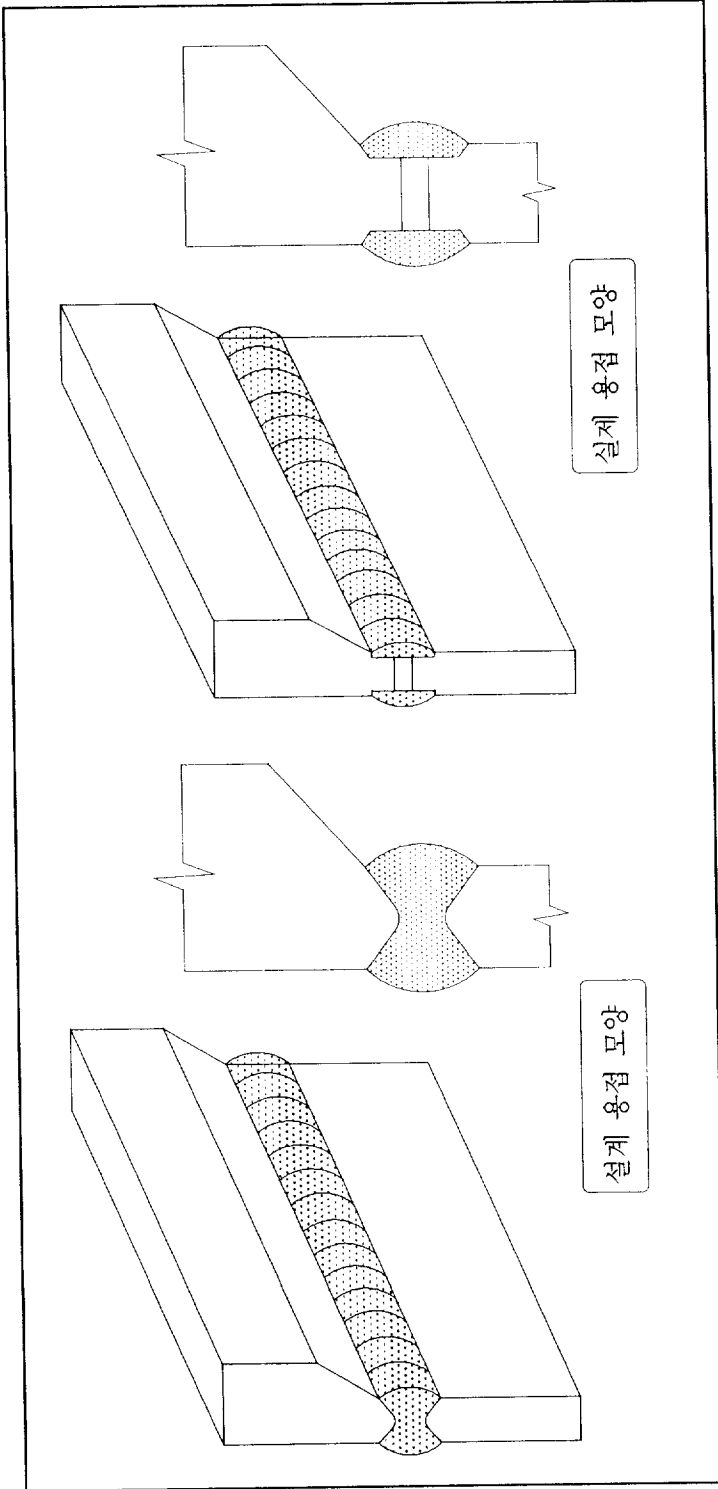


그림 3.1.3 수직재 연결부에 대한 설계 및 실제의 용접이음 상태

3.1.2 아치교

1) 아치리브 수직·수평보강재

(1) 손상사례

그림 3.1.4는 중로아치교에서 아치리브 수직·수평보강재 용접이음부의 용접누락 전경을 나타내며, 이러한 부재의 용접누락은 바로 낙교로 이어지지는 않지만 방치하면 주부재가 파괴될 위험성을 내포하고 있다 (33), 34)

(2) 보수·보강대책

아치리브 수직·수평보강재 용접이음부의 용접누락에 대한 보수·보강대책으로서는 손상부를 용접이음하거나 침접판을 고장력볼트이음으로 연결하는 방법이 있다.

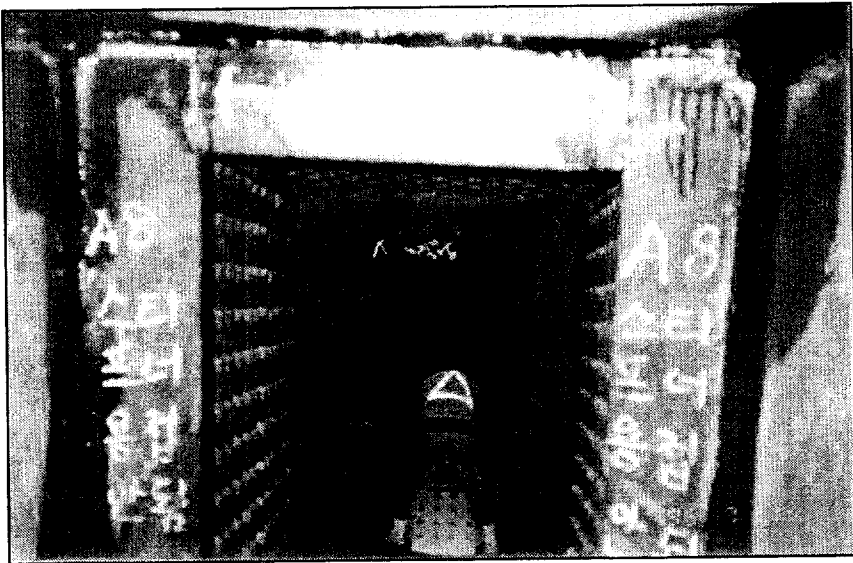


그림 3.1.4 아치교에서 아치리브 수직·수평보강재 용접이음부 용접누락

2) 중로아치교 트러스구조 하부 브레이싱 연결부

(1) 손상사례

그림 3.1.5는 중로아치교에서 트러스구조 하부 브레이싱 연결부의 절단 노치부에 발생한 피로균열 전경을 나타내며, 이러한 피로균열이 진행되면 교량은 심하게 흔들려 통행차량에 탑승한 승객들이 심한 불안감을 느끼고, 다른 부재에도 영향을 미쳐 교량이 파괴될 위험성을 내포하고 있다²⁸⁾.

(2) 보수·보강 대책

중로아치교에서 트러스구조 하부 브레이싱 연결부의 절단 노치부에 발생한 피로균열에 대한 보수·보강대책으로서는 피로균열 발생부를 가우징 후 용접이음을 실시하고, 절단 노치부에 대해서는 그라인더로 마감처리하거나 TIG 용접으로 마감처리하는 방법이 있다²⁴⁾.

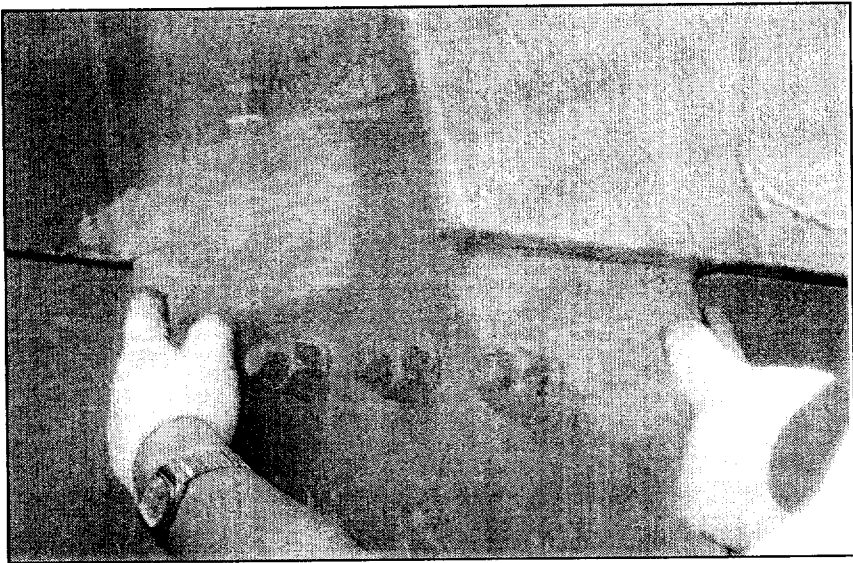


그림 3.1.5 중로아치교에서 트러스구조 브레이싱 연결부의 절단노치에 발생한 피로균열

3) 하로아치고 타이거더의 내부 부식

(1) 손상사례

타이드 아치고에 있어서 타이거더는 인장력을 받고 있는 붕괴유발부재로서 교량 안전상 가장 중요한 구조요소이며 교량 전체의 안전성 확보를 위해서는 충분한 단면을 유지하는 것이 필수적이다. 교량 상부로 부터의 이물질 유입 및 누수로 인하여 그림 3.1.6 및 그림 3.1.7과 같이 주요 부재인 타이거더 내부에 부식이 발생하였고 타이거더의 복부판 뿐만 아니라 좌우 플랜지의 연결앵글에서 부식이 심하게 발생하여 단면의 감소가 초래되었다. 이러한 손상은 타이거더가 보·차도 경계부에 위치하고 있어 보·차도 경계부 및 아치리브가 관통하는 바닥판의 균열부분으로 침투하는 빗물에 의해 발생되었다. 또한 타이거더 상부에 있는 통신선의 유지관리를 위하여 설치된 맨홀로 유입된 이물질이 수분의 증발을 억제하여 강재의 내부가 습한 상태로 방치되어 있어 내부 강재의 부식이 발생하였다.

(2) 보수·보강 대책

부식방지 대책을 수립하고 타이거더 내부의 이물질 및 우수의 침투를 방지하기 위하여 그림 3.1.8과 같이 커버 플레이트를 시공하는 방안이 있다. 바닥판 균열부 누수방지와 타이거더의 이물질 제거 및 채도장 작업을 근본적으로 수행하기 위해서는 상부 보도부 콘크리트 제거가 필요하며 아치리브와 타이거더가 연결되는 부분에서는 타이거더 내부나 아치리브의 연결개구부로 물이 유입되는 것을 방지하기 위하여 그림 3.1.9와 같은 차수장치가 필요할 것으로 사료된다.



그림 3.1.6 타이거더 부식상태

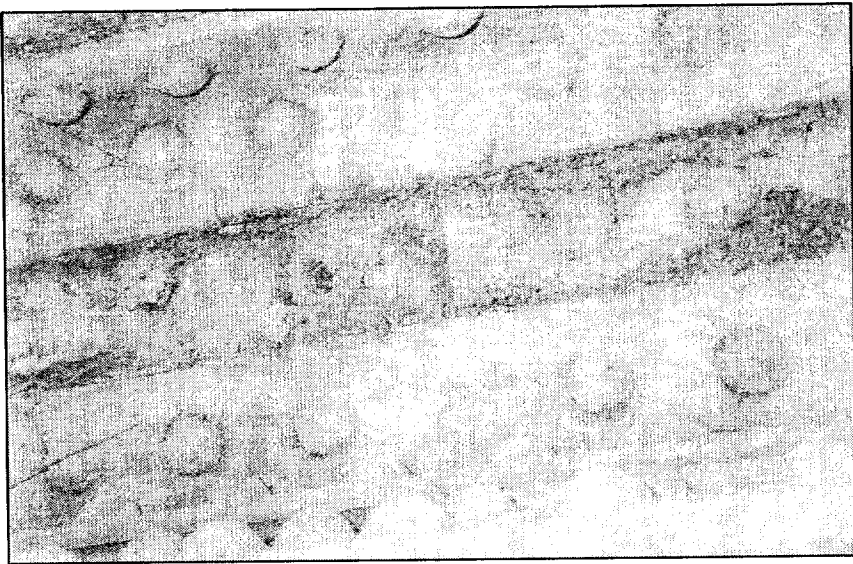


그림 3.1.7 타이거더의 플랜지 연결 앵글의 부식상태

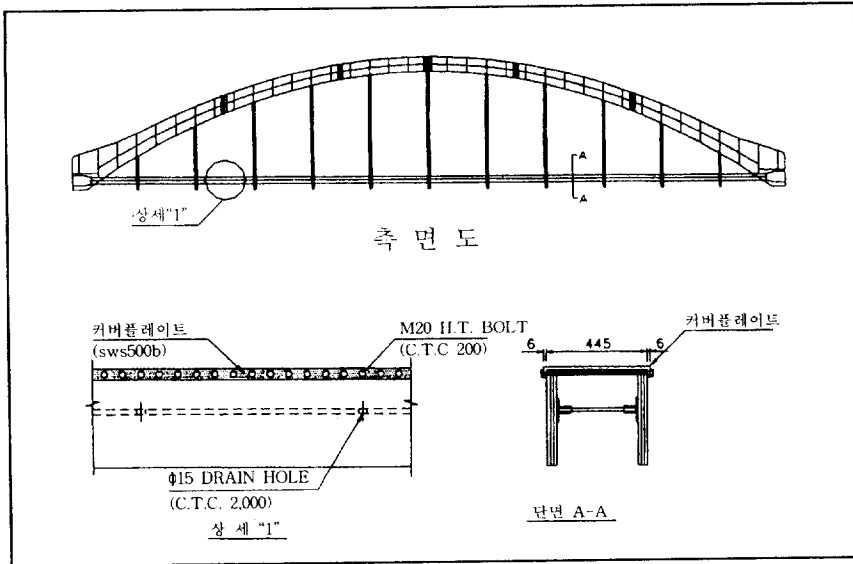


그림 3.1.8 타이거더 커버 플레이트 시공개요도

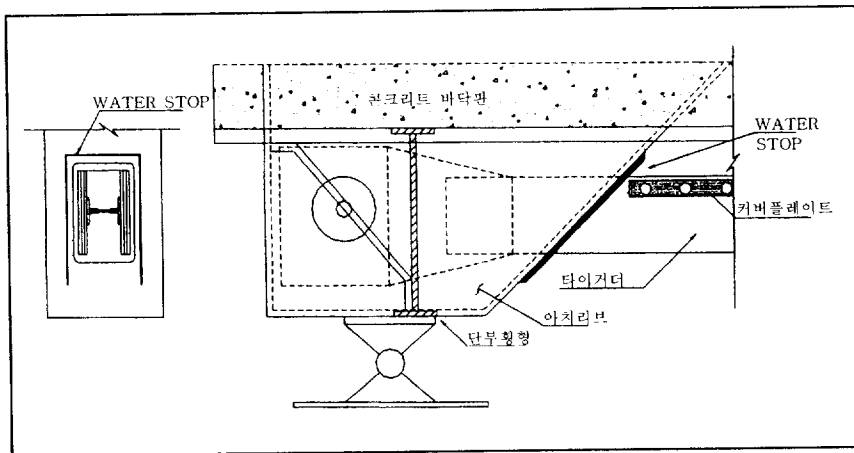


그림 3.1.9 연결개구부의 차수대책 개요도

3.1.3 상자형교

1) 손상사례(I)

그림 3.1.10 a) 및 b)에는 상자형교에서 수직·수평보강재 용접이음부의 용접누락 및 파단 전경을 나타내며, 이러한 부재의 용접이음부 용접누락 및 파단을 방치하면 주부재가 파괴될 위험성을 내포하고 있다³⁴⁾.

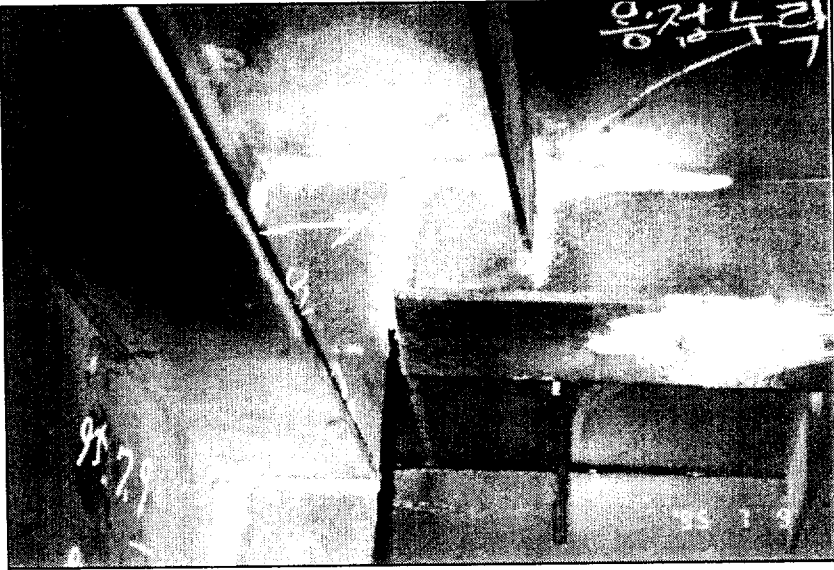
2) 손상사례(II)

하부구조에 상부구조를 설치하는 과정에서 박스거더 내부의 격벽이 받침장치의 Working Line을 크게 벗어나게 됨으로 인하여 받침장치 주변 하부플랜지가 국부적으로 변형되거나 파단되었다. 그림 3.1.11 a) 및 b)에는 받침장치의 Working Line 불일치 및 상·하부 받침장치의 중심이격 상태 전경을 나타낸다.

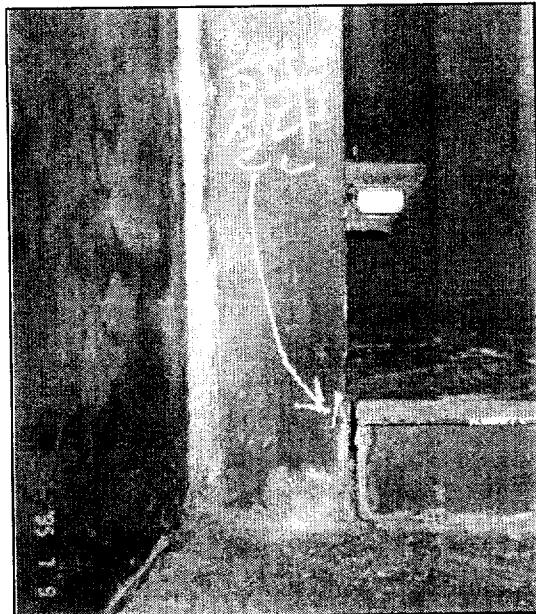
3) 보수·보강대책

손상사례(I)의 수직·수평보강재 용접이음부의 용접누락 및 파단부에 대한 보수·보강대책으로서는 손상부를 가우징 후 재용접을 실시하거나 철판을 고장력볼트이음으로 연결하는 방법이 있다.

손상사례(II)의 받침장치 주변 하부플랜지의 국부적인 변형 및 파단부에 대한 보수·보강대책으로서는 그림 3.1.12와 같이 지점부에 수직보강재를 추가 설치하여 받침의 반력에 저항하게 하는 방법이 있다.

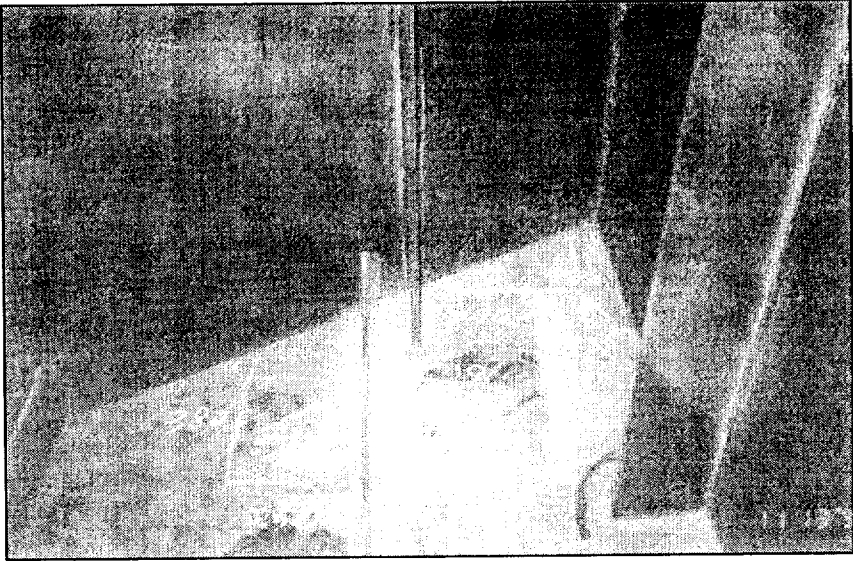


a) 상자형교에서 수직·수평보강재 용접이음부 용접누락

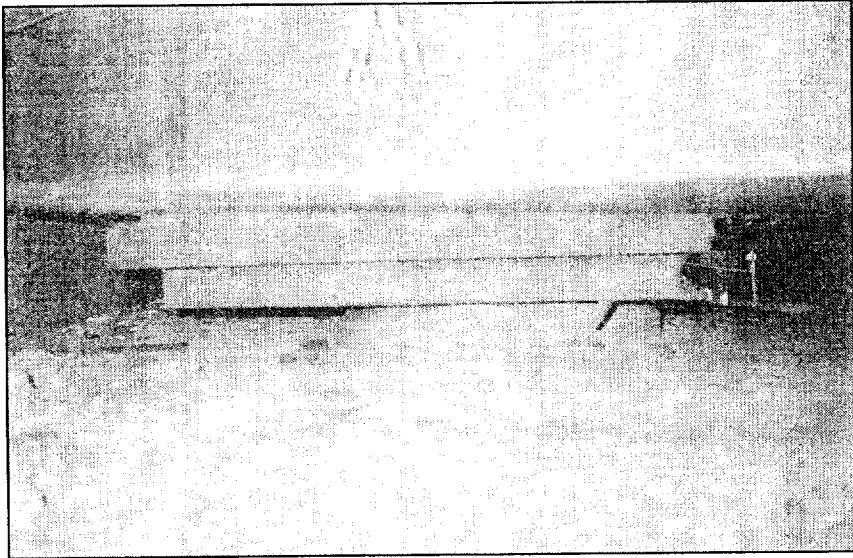


b) 상자형교에서 수직·수평보강재 용접이음부 파단

그림 3.1.10 상자형교에서 수직·수평보강재 용접이음부 용접누락 및 파단



a) 받침장치의 Working Line 불일치



b) 상·하부 받침장치의 중심 이격상태.

그림 3.1.11 받침장치의 Working Line 불일치 및 상·하부
받침장치의 중심 이격 상태

3.1.4 강바닥판교

1) U형 리브 현장 맞대기용접이음부

(1) 손상사례

강바닥판으로 시공한 교량은 그다지 많지 않으나 최근에 강바닥판으로 건설하였거나 건설중인 교량은 많이 있다. 그림 3.1.13에 U형 리브 + U형 리브 현장 맞대기용접이음부에 피로균열이 발생하여 용접이음부분을 그라인딩으로 사상하고 그 위에 버클플레이트를 부착하였으나 이 버클플레이트의 필렛용접이음부에 또다시 피로균열이 발생한 예를 나타낸다^{11), 13)}. U형 리브 + U형 리브를 현장에서 용접이음으로 시공할 경우, 가설 현장에서의 용접자세는 상향용접이 되므로 이면재를 부착하여 용접을 실시하여야 한다. 이 경우 U형 리브가 이면재에 완전히 밀착되지 않으면 단차가 발생하며, 이 단차는 그림 3.1.14와 같이 편심으로 인한 모멘트로 응력집중이 발생하므로 피로균열이 발생하기 쉽다. 또한, U형 리브 + U형 리브 현장 맞대기용접이음은 작업성이 나쁘고, 용접결함도 많이 발생한다. U형 리브의 용접이음과 관련하여 현장이음을 필렛용접으로 겹침이음을 실시하였으나, 이 필렛용접이음부에 또다시 피로균열이 발생한 예가 있다.

(2) 보수·보강대책

U형 리브 현장 맞대기용접이음부에 발생한 피로균열의 보수·보강대책으로서는 부착된 버클플레이트는 제거하고, 최초의 U형 리브 + U형 리브 현장 맞대기용접이음부에 발생한 균열부 부근에 횡형을 부착하여 U형 리브에 작용하는 교축방향 응력을 감소시키고, 최초의 U형 리브 + U형 리브 현장 맞대기용접이음부는 가우징 후 홈용입필렛용접을 실시하는 방법이 있다.

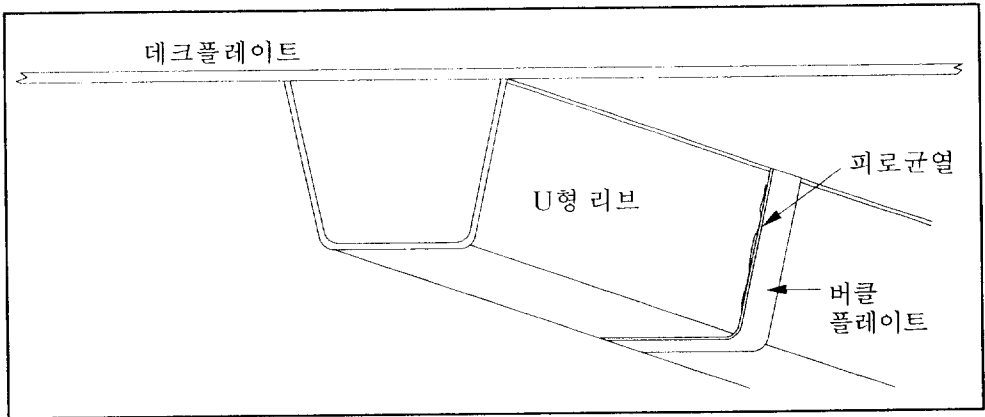


그림 3.1.13 U형 리브 + U형 리브 현장 맞대기용접이음부의 손상

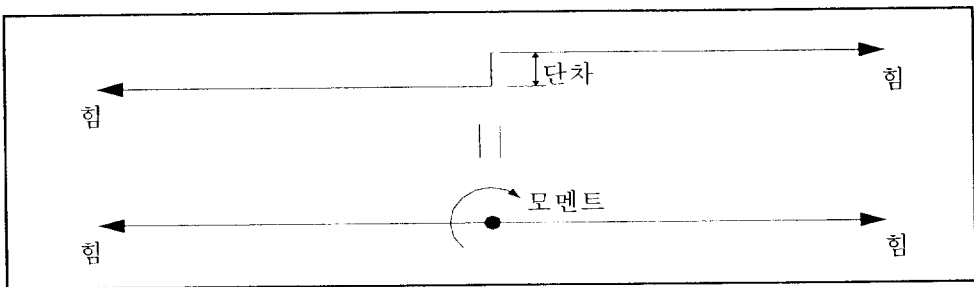


그림 3.1.14 단차부 모멘트 발생원리

2) 데크플레이트 + U형 리브 필렛용접이음부

(1) 손상사례

그림 3.1.15에는 강바닥판 데크플레이트 + U형 리브 필렛용접이음부에 발생한 피로균열을 나타내며, 이러한 피로균열은 데크플레이트와 U형 리브 홈용입필렛용접이음의 용입깊이가 충분히 확보되지 않아 발생하였다. 이러한 피로균열을 그대로 방치하면 피로균열은 데크플레이트로 관통하여 통행차량의 차륜에 의해 함몰할 가능성도 있으므로 시급히 보수를 요한다.

(2) 보수·보강대책

데크플레이트 + U형 리브 필렛용접이음부에 발생한 피로균열의 보수·보강대책으로서는 그림 3.1.16과 같이 용입 깊이를 확인하기 어려우므로 용접시공시 용입깊이를 90%이상 확보하여야 한다.

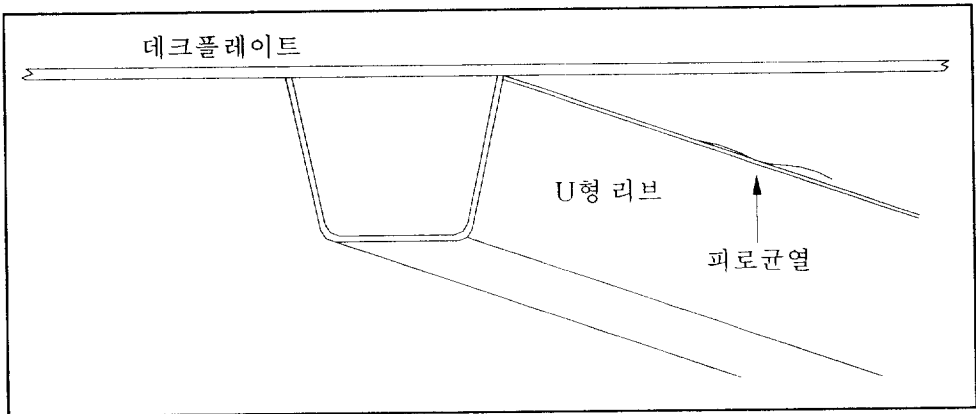


그림 3.1.15 데크플레이트 + U형 리브 필렛용접이음부의 손상

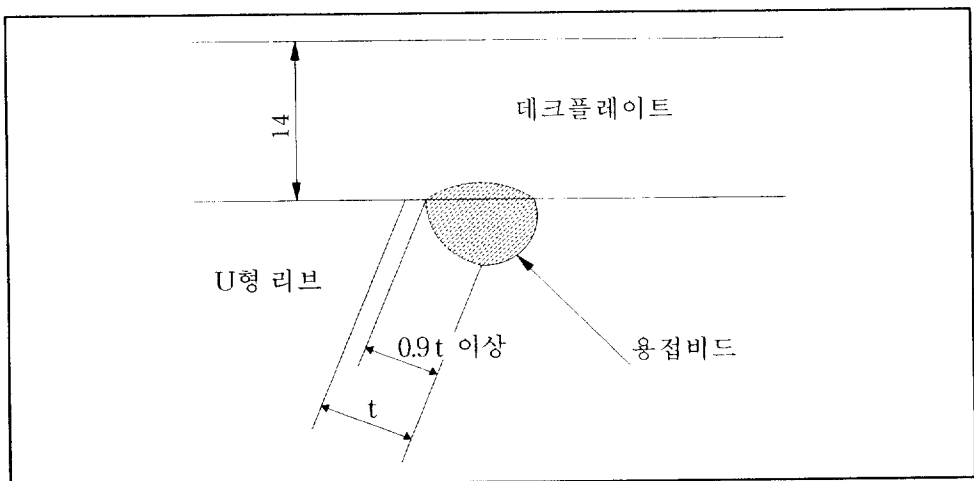


그림 3.1.16 U형 리브의 용입깊이

3.1.5 플레이트 거더교

1) 손상사례

그림 3.1.17 및 그림 3.1.18은 플랜지 상부 부식 및 균열상태 전경과 복부판 부식상태 전경을 각각 나타내고 있다. 이러한 부식은 바닥판으로 침투하여 흘러내린 노면수, 융빙제 등에 의하여 발생하였으며 부식정도가 심한 곳은 복부와 하부플랜지가 분리되어 변형되거나 부식에 의해 복부가 관통될 가능성이 있으므로 시급히 보수를 요한다.

2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서 그림 3.1.19과 같이 부식된 부분의 녹을 제거하고 부재의 양측에 보강판을 고장력 볼트로 연결하는 방법이 있다.

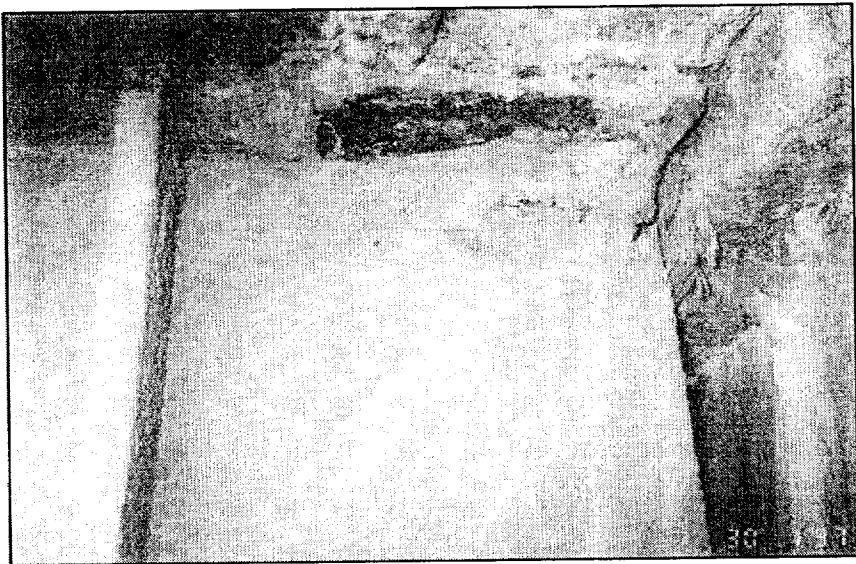


그림 3.1.17 플랜지 상부 부식 및 균열상태

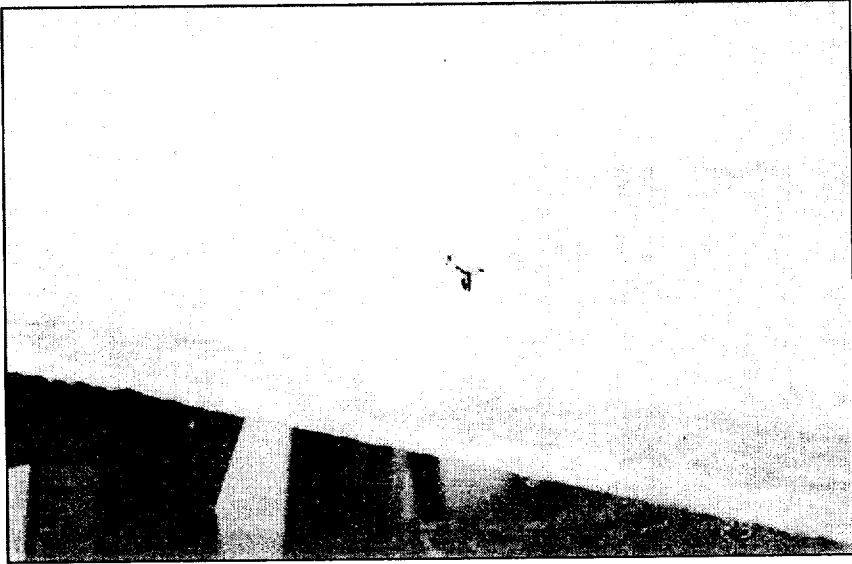


그림 3.1.18 복부판 부식상태

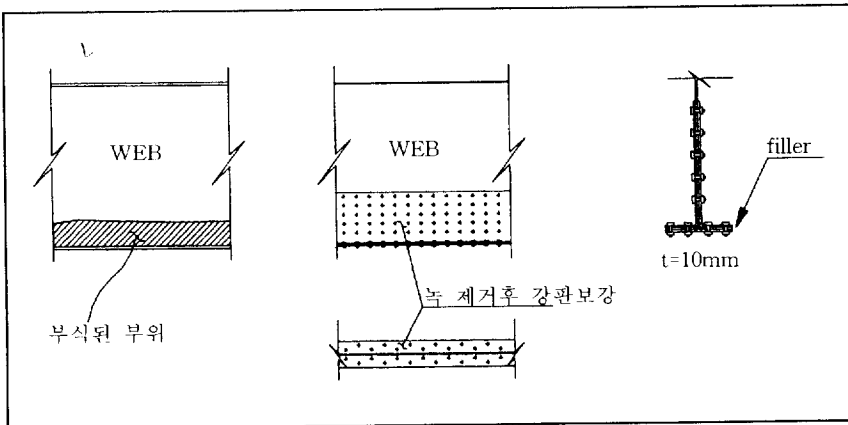


그림 3.1.19 부식단면 보강

3.2 국외 강교의 손상사례와 보수 및 보강대책

각 나라마다 그 나라 교량의 손상을 공개하는 것은 매우 수치스러우며, 강교의 손상사례를 입수하기란 매우 어렵다. 그러나 입수된 플레이트거더교, 상자형교, 아치교, 강바닥판교 및 기타 강구조물에 관련된 자료를 교량의 형식별로 정리하면 다음과 같다^{14), 15), 17)~22), 24), 26), 28)}.

3.2.1 플레이트 거더교

I형 플레이트 거더교는 많이 건설되었으며 피로손상사례도 많이 보고되어 있다.

1) 주형 웨브의 노치부

(1) 손상사례

도로교에서 노면의 높이를 억제한 경우 노치부의 웨브와 하부플랜지와 피릿용접이음부에 피로균열이 발생하였으며, 그림 3.2.1과 같이 노치 코너부의 용접이음부를 횡단하여 웨브까지 진전하였다^{24), 28)}. 이러한 피로피로균열은 노치부의 곡률반경이 작기 때문에 양호한 피릿용접이 실시되지 않아 루트갭과 루트부 토우의 용접결함이 발생하기 쉬운 구조로 설계되었기 때문이다. 또 곡률이 있는 노치부의 법선방향으로 높은 응력(하부플랜지와 웨브를 절단하는 응력)이 활하중 재하시에 발생하는 것 등을 열거할 수 있다.

(2) 보수·보강 대책

보수·보강대책으로서는 홈용입피릿용접에 의한 보수 또는 첩접판에 의한 웨브의 보강 방법을 들 수 있다. 최근에는 이러한 피로균열에 대해 많은 실험과 해석을 실시하여 노치부에 직각으로 끼움판을 설치하는 구조 및 거더에 테이퍼를 붙이는 구조 등으로 변경하고 있다.

한편 새로 건설될 I형 플레이트거더에서 주형웨브의 노치부 설계에 대한 개선방법으로서는 그림 3.2.2와 같이 노치부에 직각으로 보강판을

끼워 넣고 플랜지를 연장하는 구조로 설계하는 방법이 있다.

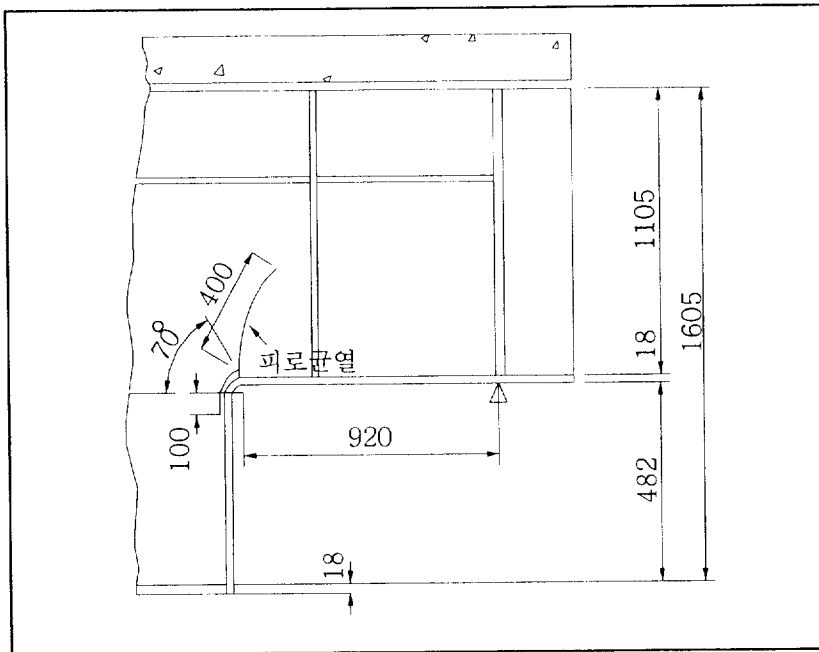


그림 3.2.1 주형 웨브 노치부의 손상

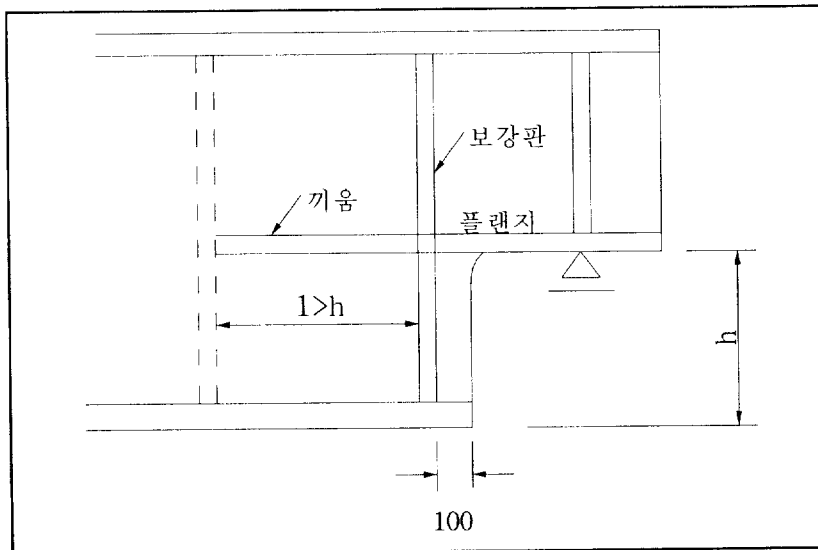


그림 3.2.2 노치부 거더의 표준설계

2) 주형과 횡형 및 대경구의 용접이음부

(1) 손상사례(1)

그림 3.2.3에 주형과 횡형 또는 대경구 이음부 구조를 나타내며, 그림 3.2.4에는 이음부에 발생한 피로균열을 종류별로 나타낸다^{17), 18), 24), 28)}.

그림 3.2.3 a)에서는 주형과 횡형의 상부플랜지의 끝이 일치하고, 내부 주형과의 교차부는 연결판을 끼워서 상부플랜지끼리 연결되어 있다. 한편 외측 주형은 횡형의 플랜지에 노치가 있고, 웨브만이 리벳트에 의해 주형의 수직보강재에 부착되어 있다. 이러한 형식의 이음부에 손상이 발생한 위치는 바깥 주형과 횡형의 이음부이고, 그림 3.2.4에서 A형, D형 및 E형과 같이 균열이 발생하였다^{17), 24)}.

그림 3.2.3 b)의 경우, 횡형의 상단은 주형 상부플랜지보다 150mm정도 아래에 위치하고, 횡형의 플랜지와 웨브는 주형의 웨브에 직접 연결되어 있다. 손상은 주형 상부플랜지와 횡형의 상부플랜지를 연결하는 보강재(사다리꼴의 판)에 집중되어 있고, 균열이 발생한 위치는 그림 3.2.4에서 A형, C형, D형 및 E형과 같다. 균열의 발생형상은 그림 3.2.3 a)의 경우와 아주 유사하지만, 내·외측 주형의 양쪽으로 균열이 발생한 점이 다르다. 한 방향 2차선 중간에 위치한 주형과의 교차부에 손상이 가장 많은데 바깥쪽 거더의 균열진전 빈도는 차선과의 거리가 크게 될수록 적게 된다.

그림 3.2.3 c)의 경우, 대경구는 하중분배를 고려하거나 고려하지 않는 경우가 있는데 피로균열은 양쪽 모두 발생하였다. 대경구의 강도는 하중의 분배를 고려하는 경우가 크게 된다. 이러한 균열의 발생위치는 교량의 주형개수, 간격 및 차선에 따라 내측 주형에서 균열이 발생하기도 하고 내측 주형에서 균열이 발생하기도 한다. 또 지간중앙에 가까운 대경구의 이음부에 손상이 많이 발생하였으며, 이러한 피로균열

은 그림 3.2.4에서 A형이 가장 많으나 B형, C형, D형, E형, F형, G형 및 H형도 있다. 또한 상부플랜지와 수직보강재가 완전히 절단된 경우도 있고, C형 균열이 웹 내로 관통하여 반대측 표면까지 진전된 경우도 있다.

(2) 손상사례(Ⅱ)

구조상세는 약간 다르지만 이음부 주변에 피로균열이 발생한 사례가 많이 있으며, 그림 3.2.5에 균열의 상세를 나타낸다. 이러한 피로균열은 중량차량의 통행으로 인해 교량에 발생하였으며, 균열발생 원인에 대해서는 다음의 2가지를 주 요인으로 열거할 수 있다^{17), 24), 28)}.

1. 윗하중에 의한 상판의 처짐영향

활하중의 작용으로 상판에 처짐이 생기므로 주형의 면외방향 변위 및 회전은 횡형 또는 대경구에 의해 구속되기 때문에 상판의 처짐으로 인한 각변형은 주형의 플랜지와 횡형이 부착된 골조선 사이의 좁은 영역에 집중하여 보강재 혹은 리브 플레이트에 응력이 집중된다.

2. 횡형 또는 대경구의 하중분배 영향

활하중의 작용으로 주형에 처짐이 생기면, 횡형 또는 대경구에 의해 인접한 주형에 하중이 분배되어 2차응력이 발생한다. 이 2차응력이 작용할 때 접합부의 강도가 부족하여 응력집중이 발생한다.

종래 플레이트 거더교는 격자구조로 설계하였기 때문에 구조상세부에 대한 안전성을 비교·검토를 하지 않았다. 즉 손상부에는 응력집중, 제작시의 초기변형, 설계시의 가정과 다른 변형거동을 나타내었다. 그러나 균열이 발생한 구조상세부에 대해 국부적인 변형 및 응력의 실측, 균열의 발생위치 및 진전상황, 하중 이력 등의 데이터를 수집함에 따라 상기 1. 및 2.와 같은 원인을 규명할 수 있었다.

(3) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 보강재 및 리브 플레이트의 판두께를 증가시켜 강성을 높이거나 필렛용접의 토우부(toe)를 TIG 용접으로 마감처리하여 국부적으로 응력을 분산시키는 방법이 있다.

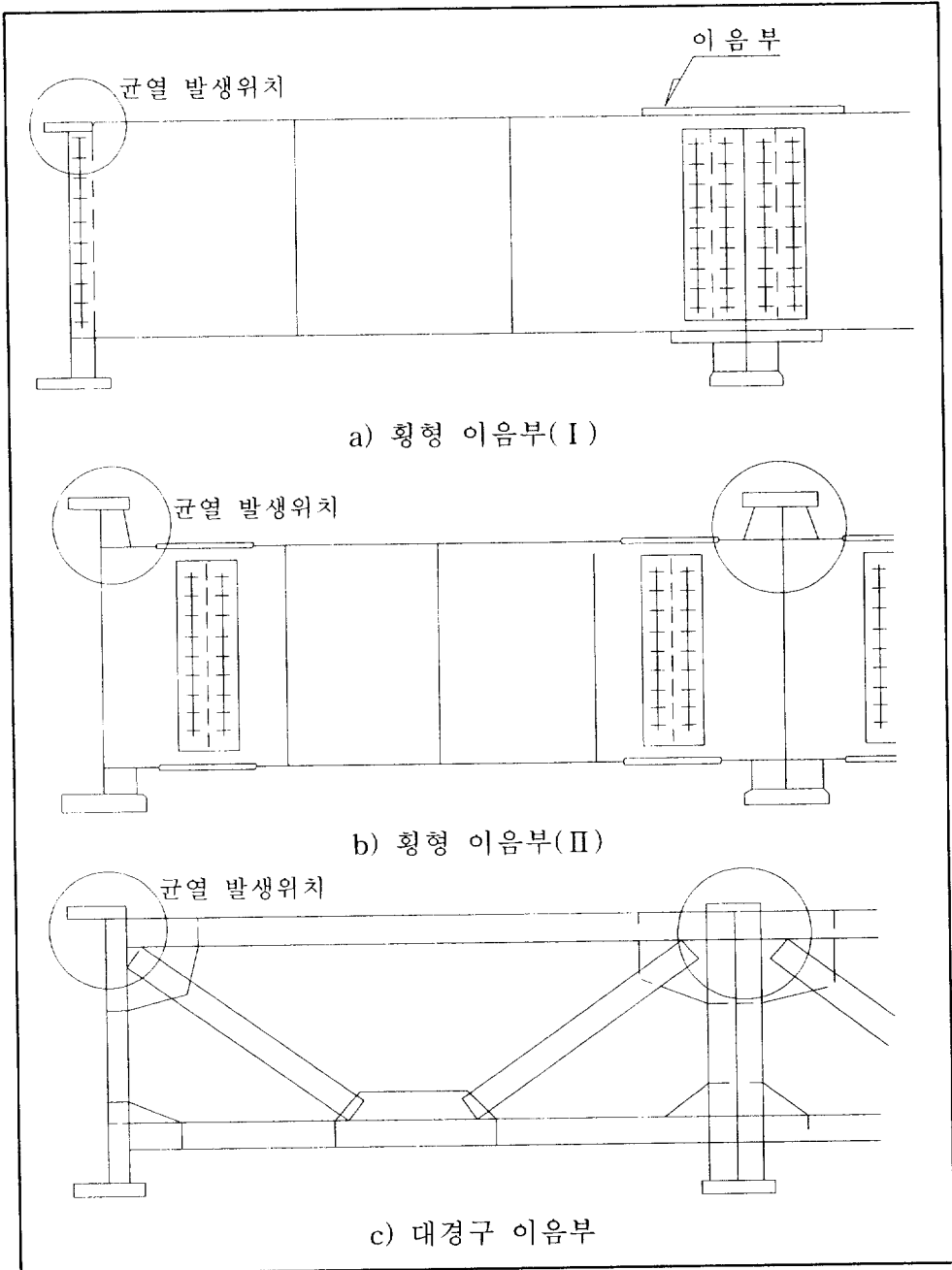


그림 3.2.3 주형, 황형 및 대경구 이음부의 손상

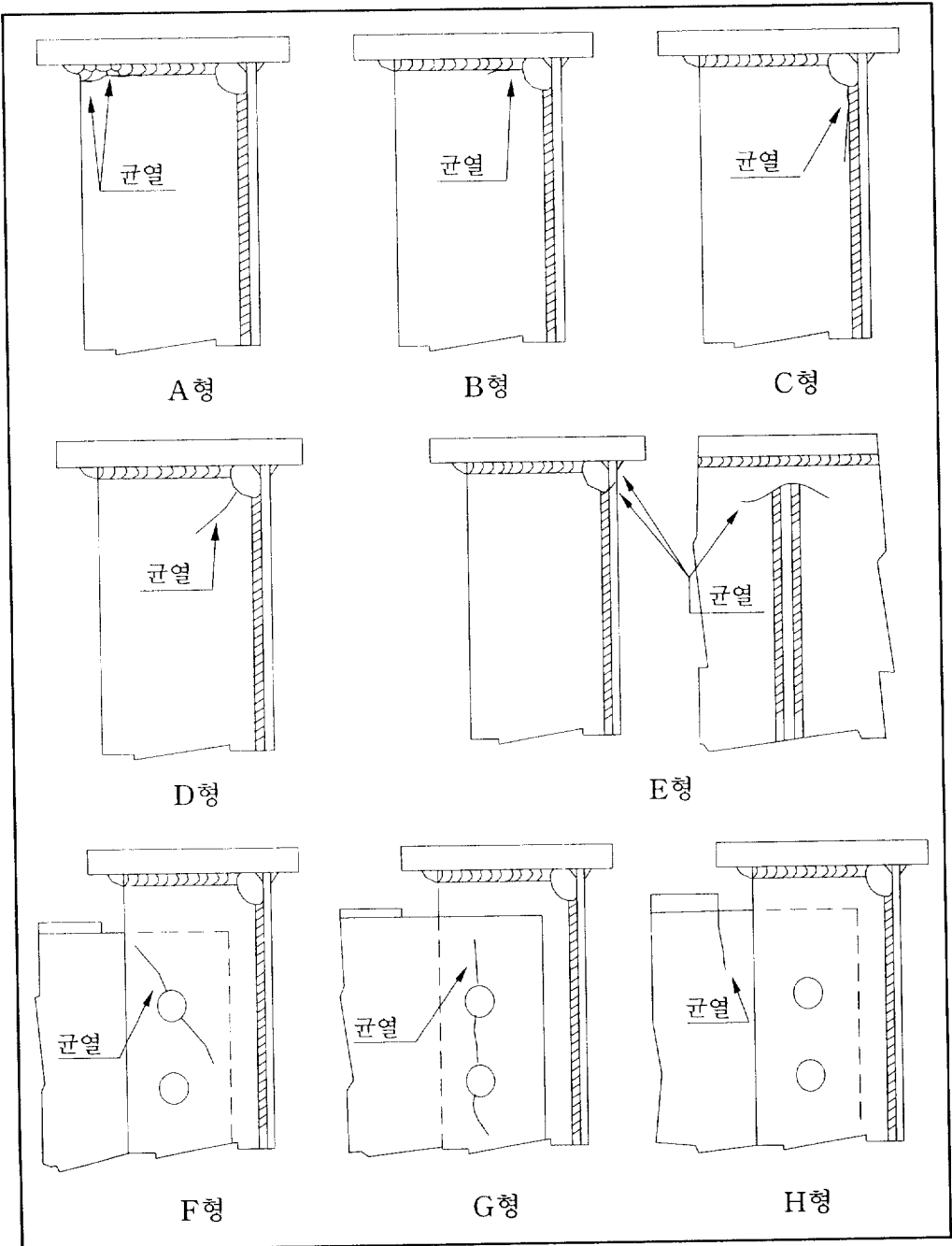


그림 3.2.4 균열의 발생 종류

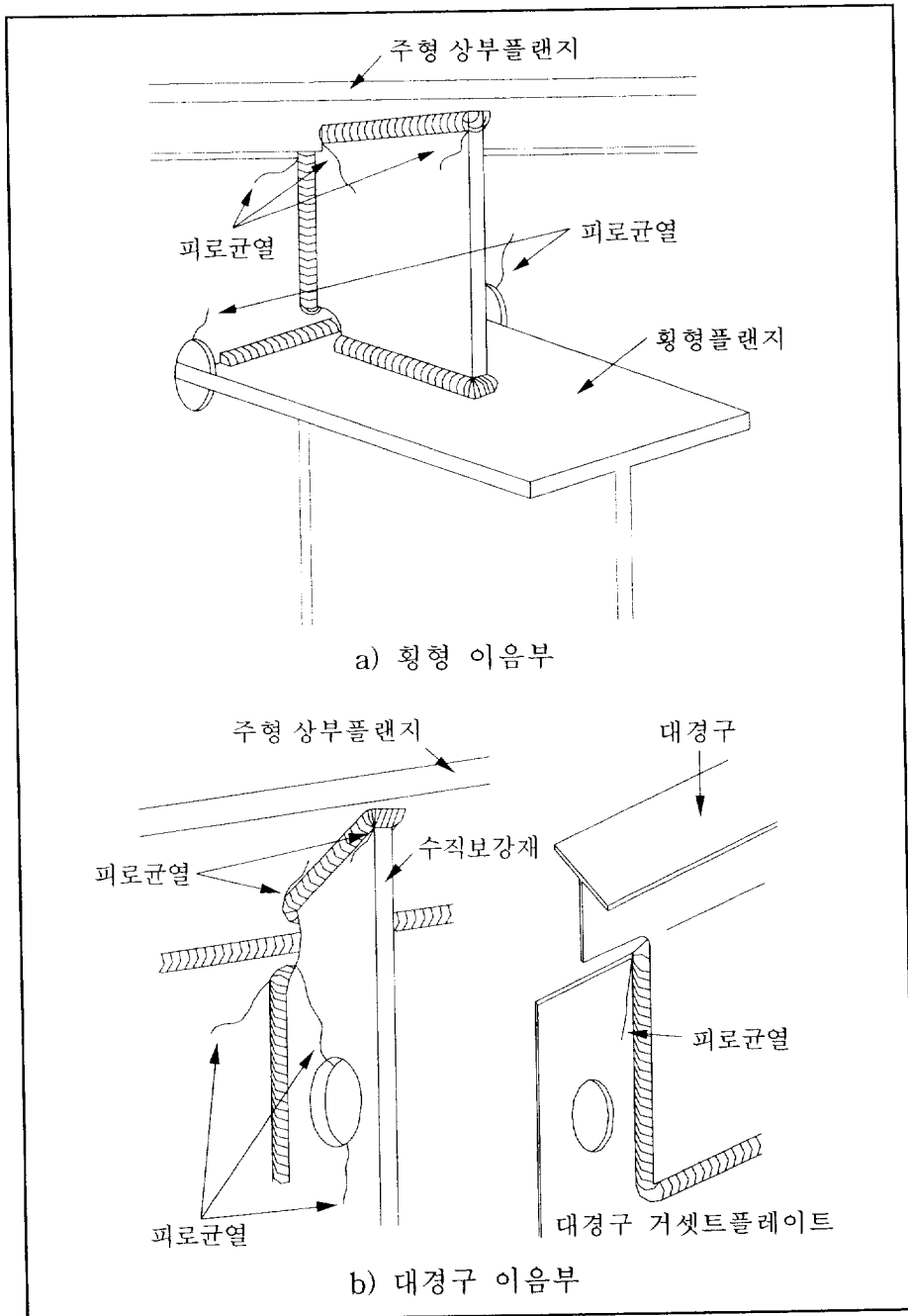


그림 3.2.5 주형, 횡형 및 대경구 이음부의 손상

3) 중간 대경구 하부부재 및 거셋트플레이트 이음부

(1) 중간 대경구 하부부재 이음부

1. 손상사례

중간 대경구 하부부재 이음부의 구조는 그림 3.2.6과 같이 하부부재를 겹쳐서 접합하는 경우와 한면으로 접합하는 경우의 2종류가 있다. 이 중 형식 I의 거셋트플레이트에 균열이 발생하여 수직보강재의 연단으로 진전하였으며, 균열발생 원인은 다음과 같다^{18), 24), 28)}.

대경구에 작용하는 단면력은 활하중의 영향이 지배적이고, 이음부인 거셋트플레이트에는 반복하중의 영향을 받으며, 거셋트플레이트의 이음부는 편심이 작용하는 구조이므로 2차응력의 영향을 받기 때문이다.

2. 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 균열의 발생 및 진전을 방지하기 위해 그림 3.2.6에서 b) 형식 II와 같이 구조를 변경하여 구조적으로 응력집중을 완화하는 방법이 있다.

(2) 중간 대경구 거셋트플레이트 이음부

1. 손상사례

중간 대경구 거셋트플레이트 이음부에 발생한 피로균열을 그림 3.2.7에 나타내며, 이러한 피로균열은 단면이 급변하는 플랜지 단부 맞대기용접이음부 및 거셋트플레이트의 볼트구멍에서 피로균열이 발생하였으며, 균열발생 원인은 주형사이의 처짐의 차가 크기 때문이다^{24), 28)}.

2. 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 균열을 제거하고, 끼움판을 끼워 이음부의 편심을 감소시킴과 동시에 양면에 철판을 부착하여 단면을 보강하는 방법이 있다.

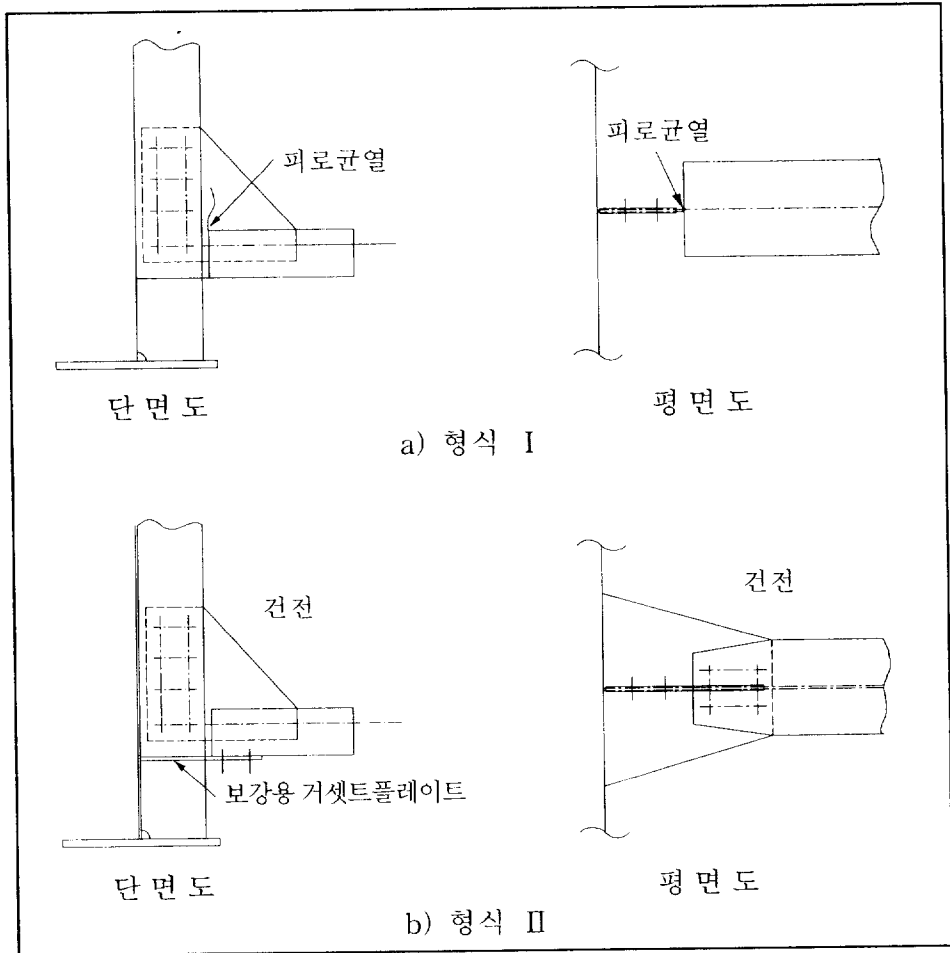
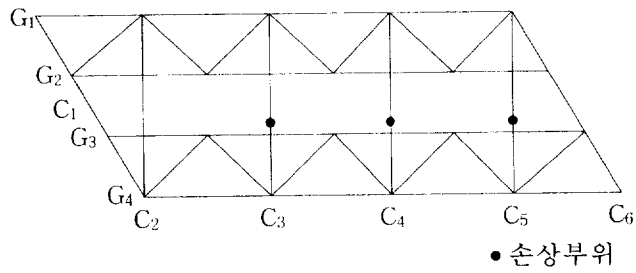
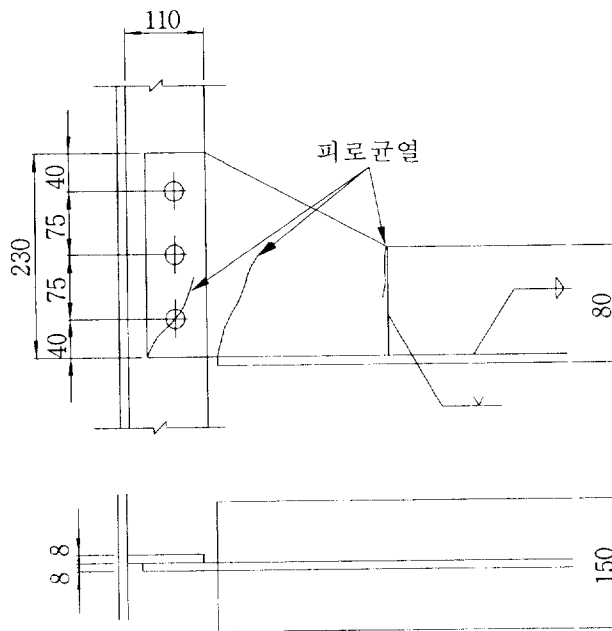


그림 3.2.6 중간 대경구 하부부재 이음부의 손상



a) 평면도



b) 손상부 상세

그림 3.2.7 중간 대경구 거셋트플레이트 이음부의 손상

4) 소울플레이트 용접이음부

(1) 손상사례

그림 3.2.8에 지점부 소울플레이트(Sole plate)의 용접이음부에 발생한 피로균열을 나타낸다. 이러한 피로균열은 특정 노선, 교량의 규모 및 형식, 지점조건(고정·가동)을 불구하고 발생한다^{18), 24), 28)}. 피로균열은 하부플랜지와 소울플레이트 필렛용접이음부의 토우부와 주형웹브 바로 아래에서 발생하였고, 주형의 하부플랜지를 관통하여 웹브에 진전하는 것도 있다^{18), 24), 28)}.

피로균열의 발생 원인은 단면이 급변하기 때문에 용접이음부에 발생하는 응력집중과 용접변형에 의해 하부플랜지와 소울플레이트 사이에 틈이 생겼기 때문이다^{24), 28)}. 또한 가동지점인 경우에는 이동 및 회전 불량으로 인하여 주형과 교각과의 구속에 의해 수평력이 반복하여 작용하기 때문이다.

(2) 보수·보강대책

피로손상을 방지하기 위해서는 소울플레이트 용접이음부의 보강재를 두껍게 하는 등의 구조상세를 변경하는 방법이 있다. 또 보수방법으로서는 균열발생부를 가우징하고 용접으로 보수함과 동시에 웹브에 철판판을 부착하고 하부플랜지의 상면에 보강판을 부착하는 방법과 받침부를 청소하고 기름을 주입하여 활동·회전기능을 회복시키는 방법이 있다.

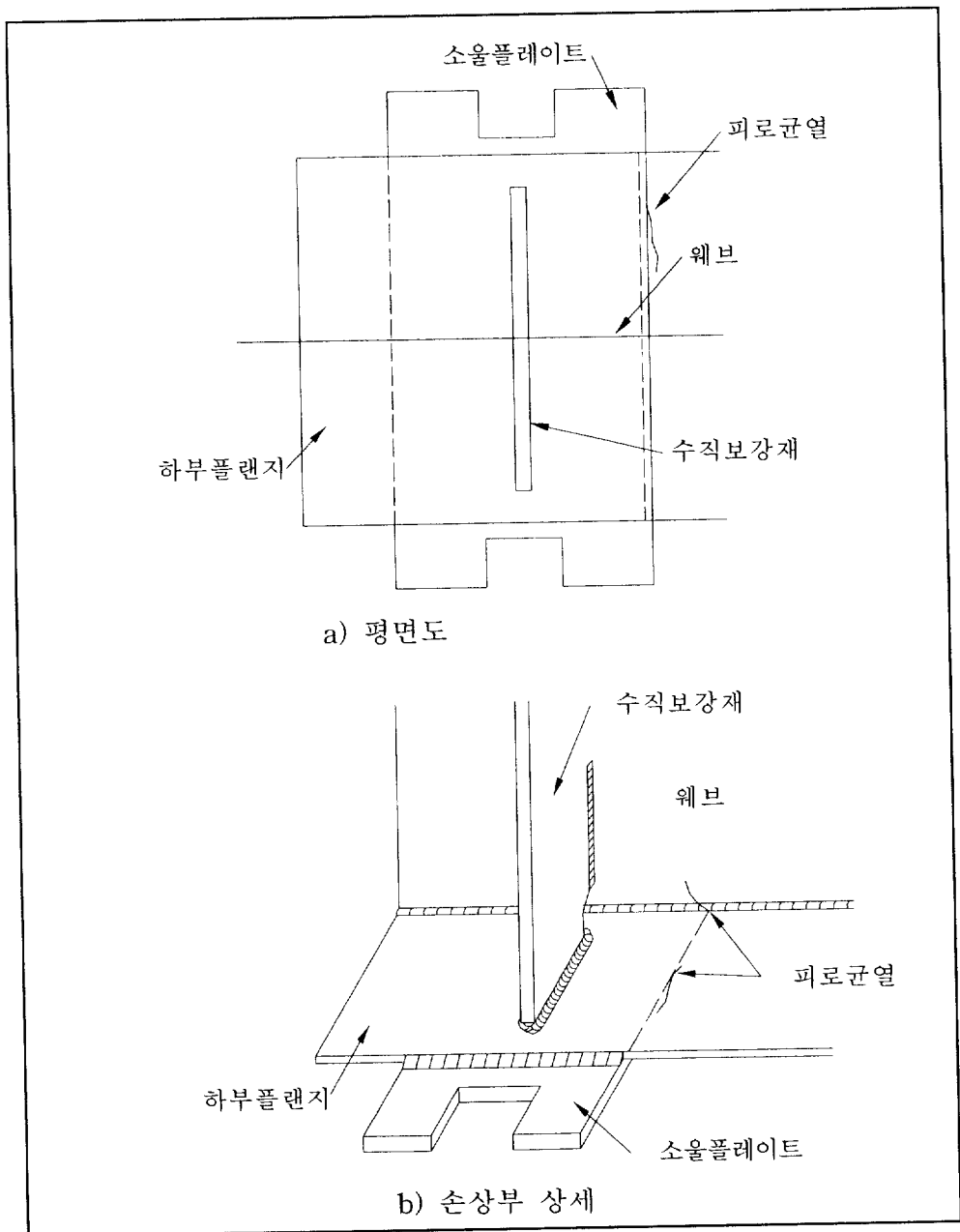


그림 3.2.8 소울플레이트 용접이음부의 손상

3.2.2 상자형교

상자형교는 구조적으로 여유가 많아 구조형식 특유의 손상은 발생하지 않았지만 플레이트 거어더교 및 기타 구조형식과 동일한 종류의 손상사례가 발생하였다^{17)~19), 24), 28)}.

1) 소울플레이트 용접이음부

(1) 손상사례

플레이트 거어더교의 피로손상 사례와 같이 상자형교에서 소울플레이트의 전면 필렛용접이음부의 토우부(toe)로부터 피로균열이 발생한 사례가 있다^{17)~19)}. 손상의 원인은 3.2.1의 4)와 같다.

(2) 보수·보강대책

보수는 주형(主桁)의 하중을 폭넓게 전달하도록 소울플레이트를 크게 하고 볼트로 접합하는 방법이 있다.

2) 상자형교의 코너플레이트 용접이음부

(1) 손상사례

상자형교에서 주형웹브와 하부플랜지 및 횡보강재와 연결된 코너플레이트의 필렛용접이음부에 피로균열이 발생하였으며, 그림 3.2.9에 상세를 나타낸다^{17)~19)}. 코너플레이트는 상자형교의 강성을 유지할 목적으로 부착되었으며, 2차부재로서 판두께 및 용접상세는 고려되지 않았다. 그러나 이음 위치는 하부플랜지와 주형웹브가 부착된 부분으로서 연직응력이 큰 곳이다. 다이어프램과의 용접이음부는 활하중에 의한 휨변형 및 비틀림변형의 구속에 의해 큰 응력이 발생하여 주형에 피로균열이 발생하였다.

(2) 보수·보강대책

일반적으로 보강 및 누수를 방지하기 위해 연결되는 부재는 2차부재로 취급되는 것이 많으나 연결위치 또는 구조에 따라 주부재의 역할을

하므로 주부재와 동일하게 설계를 실시하고 시공시에도 충분히 주의
하여 시공하여야 한다.

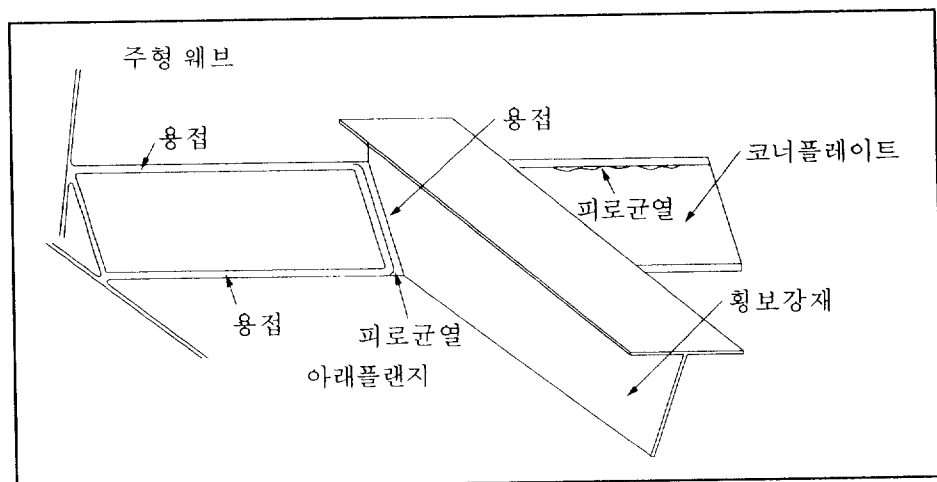


그림 3.2.9 상자형교 코너플레이트 용접이음부의 손상

3.2.3 아치교

아치교는 바람에 의해 현수부재에 진동이 발생하기 쉽고, 진동은 현수부재에 반복응력으로 작용하여 부재의 피로에 영향을 미친다. 아치교의 대표적인 피로손상 사례는 다음과 같다^{17)~19), 24), 28)}.

1) 랭거교의 현수부재

랑거교의 지간 중앙부 부근의 현수부재는 H형 또는 원형단면으로 설계되어 있으며, 단면이 단순한 경우에는 낮은 풍속에서도 진동이 발생하여 상·하 격점부에 피로균열이 발생한 사례가 있다^{17)~19), 24), 28)}.

(1) H형단면의 현수부재

가) 손상사례

그림 3.2.10에는 랭거교에서 현수부재가 H형단면일 때 현수부재에서 발생한 손상을 나타내며, 피로균열은 단면 변화부(현수부재와 상·하 현재의 이음부)의 플랜지와 웨브의 필렛용접이음부에서 토후부(toe)를 따라 웨브를 관통하여 진전하였다^{17)~19)}.

나) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 현수부재 사이를 2개의 와이어로 연결하여 현수부재의 진동을 억제하고, 손상부는 가우징 후 홈용입필렛용접이음으로 보수용접을 실시하는 방법이 있다. 또 다른 방법으로는 현수부재 중간 높이 정도에 횡방향으로 부재를 설치하여 진동을 억제하고 피로균열이 발생한 이음부는 가우징 후 홈용입필렛용접이음으로 보수용접을 실시하는 방법이 있다.

(2) 원형단면의 현수부재

가) 손상사례

그림 3.2.11에는 랭거교에서 현수부재가 원형단면일 때 원형단면에서 발생한 손상을 나타내며, 현수부재의 처짐진동에 의해 상·하 격점부

의 상·하 모서리 부분에 피로균열이 발생하였다.

나) 보수·보강 대책

보수·보강대책으로서는 현수부재 거셋트부의 응력집중을 완화하기 위해 격점부는 보강을 실시하고, 현수부재에 작용하는 공기력, 즉 칼멘와류의 발생을 억제할 목적으로 현수부재에 와이어를 감아서 격점부에 작용하는 힘을 저감함과 동시에 손상부는 가우징 후 돌림용접을 철저히 실시하는 방법이 있다.

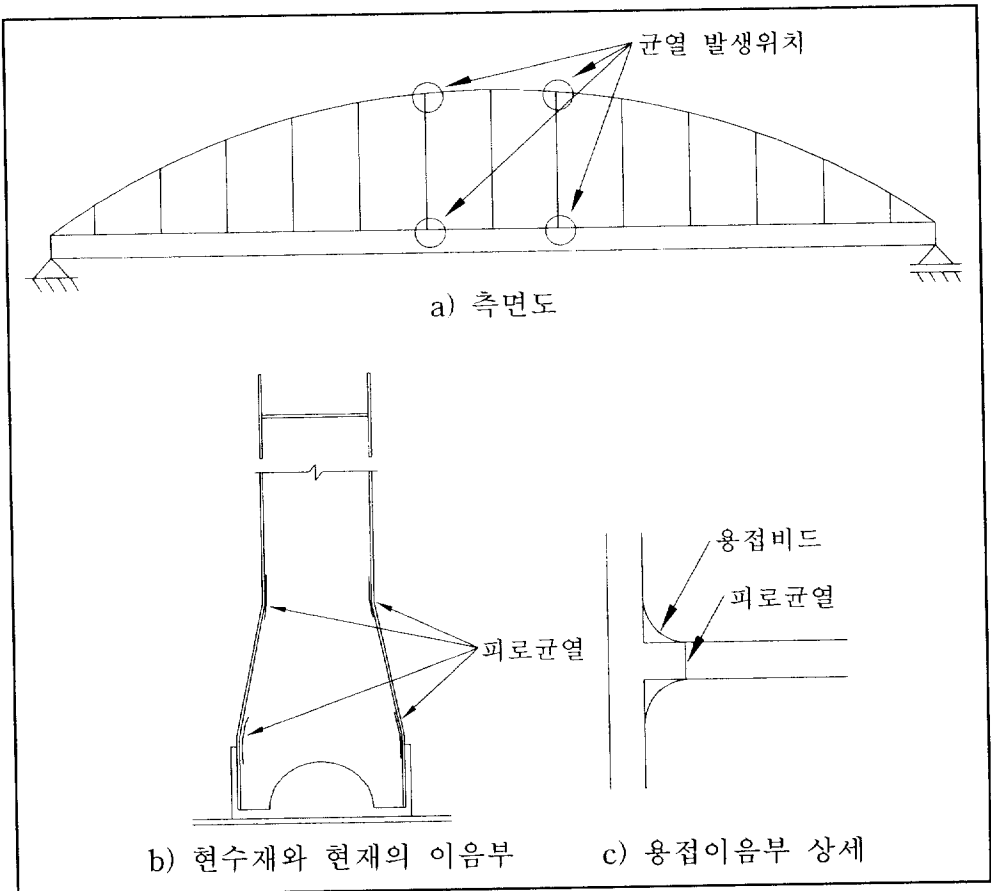


그림 3.2.10 랭거교 현수부재(H형 단면)의 손상

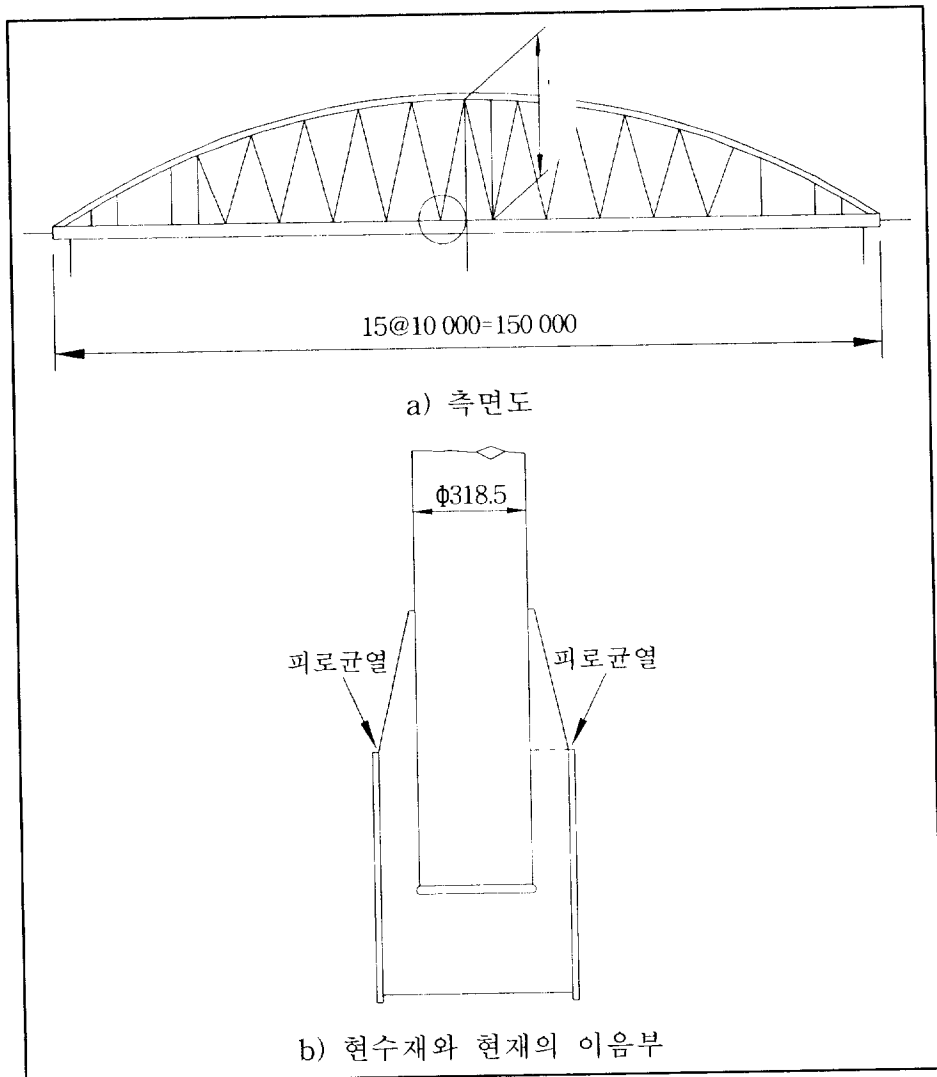


그림 3.2.11 랑거교 현수부재(원형 단면)의 손상

2) 상로아치교 보강형 및 종형의 플랜지 절단부

(1) 손상사례

그림 3.2.12 a)와 같이 단지점부 상의 보강형 웹에 피로균열이 발생하였으며, 이 구조와 유사한 곳에서도 피로균열이 발생하였다. 이와 같은 구조는 단면이 급변하는 플랜지 절단부에서 구속모멘트가 생기고, 노치부 코너에 응력집중이 중첩되어 피로균열이 발생하였다^{17)~19), 24), 28)}.

(2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 이음부를 강결하거나 힌지로 변경하여 손상부에 작용하는 응력을 저감하는 방법이 있다. 또 수직재 이음부에 보강브라켓트를 설치하고 웹에 받침판을 첩첩하는 방법이 있다.

3) 아치플랜지와 수직재 이음부

(1) 손상사례

그림 3.2.12 b)와 같이 상로아치교에서 중간 수직재의 상·하단 이음부에 피로균열이 발생하였다. 이 부분은 설계에서 아치면내의 변형에 대해 힌지로 가정하여 계산하였지만 실제로는 휨강성을 갖는 구조가 되어 있다. 이러한 휨강성으로 인한 2차응력에 의해 이음부에 응력집중이 발생하였다^{17)~19)}.

(2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 교축방향의 지지조건을 변경하여 보강재와 아치리브의 교축방향 변위차를 최소화하고 수직재에 작용하는 휨모멘트를 감소시키며, 2차응력의 발생을 억제하기 위해 수직재 이음부의 힌지화 또는 용접이음부의 응력집중을 완화하기 위해 보강거셋트를 부착하는 방법이 있다.

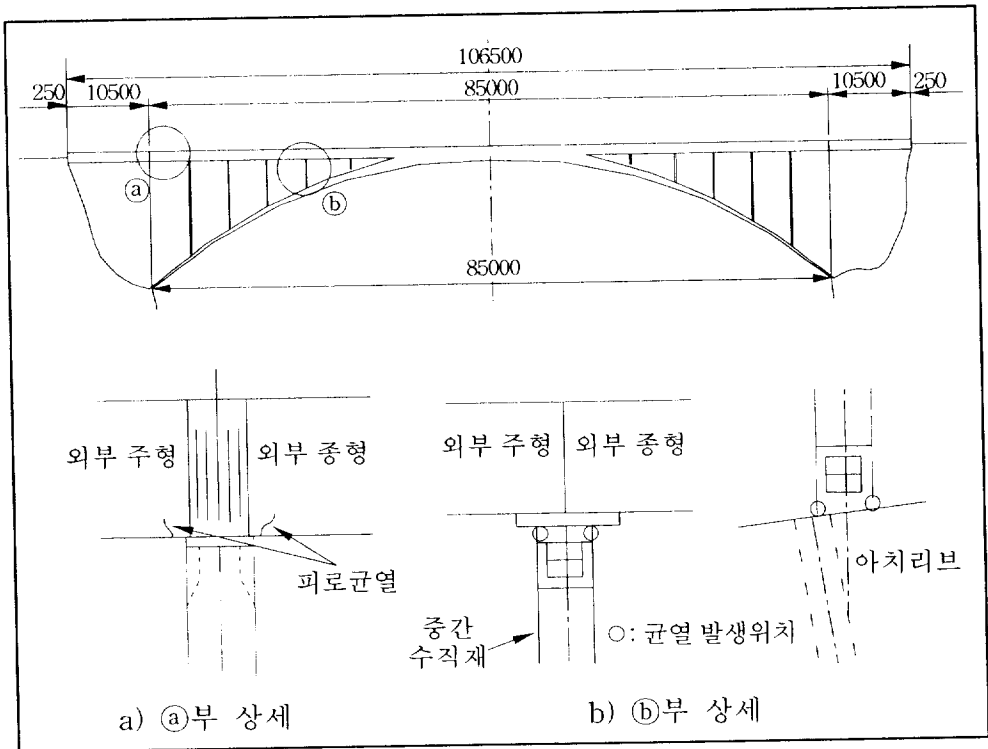


그림 3.2.12 상로아치교의 손상

4) 아치리브 웨브와 횡형 이음부

(1) 손상사례

아치리브와 횡형 단부의 용접비드 및 횡형플랜지에 그림 3.2.13 a)와 같이 피로균열이 발생하였다. 이러한 피로균열은 아치리브와 종형의 교축방향 변위차로부터 해당 용접이음부에 부가응력이 발생하고, 이 부가응력의 반복작용에 의해 발생하였다. 또한 그림 3.2.13 b)와 같이 브레이싱 연결부에서도 동일한 원인으로 피로균열이 발생하였다.

(2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 아치면내에 사재를 설치하여 보강을 실시하고, 교축방향의 상대변위량을 경감하는 방법이 있다.

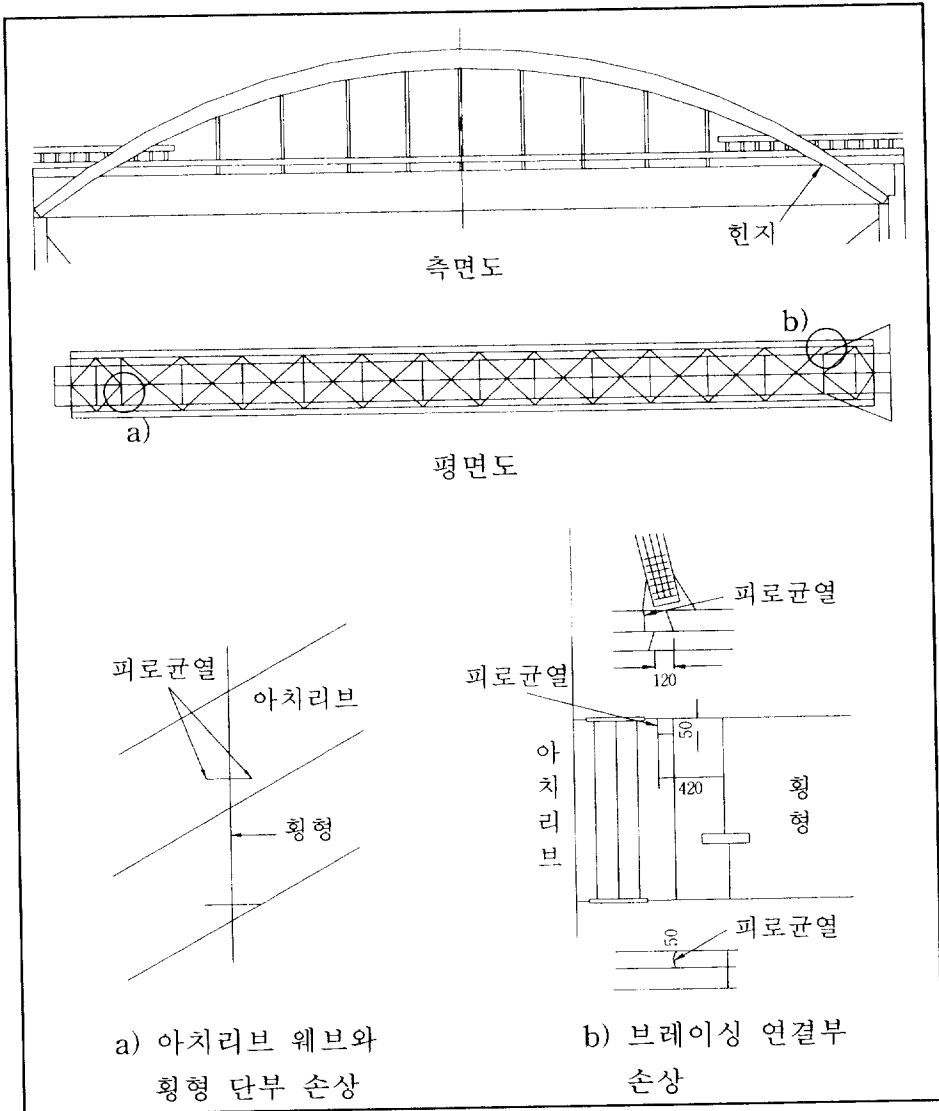


그림 3.2.13 아치리브 웨브와 횡형 이음부의 손상

3.2.4 강바닥판교

1) 손상사례

국외에서도 강바닥판으로 건설한 교량에 피로손상이 발생한 사례가 보고되고 있으며, 피로손상의 일례를 기술하면 다음과 같다^{14), 17)~20), 24), 28), 43)}.

그림 3.2.14에는 강바닥판 상자형교의 피로균열 발생위치를 나타낸다. 이들 손상은 바로 낙교로 연결되는 것은 아니지만 그대로 방치하면 포장의 손상 및 평탄성의 결여 등 도로로서의 기능저하 및 내구성 저하를 초래한다. 강바닥판 상자형교의 피로균열의 발생위치는 다음과 같다.

(1) 데크플레이트 현장 맞대기용접이음부 + 횡리브 스켈럽부(그림 3.2.14 ①)

데크플레이트의 교축방향 용접선 바로 아래(X선 촬영을 위한 스켈럽의 모서리 용접부)에서 피로균열이 발생하였다. 이 부분은 운하중 바로 아래에 위치하기 때문에 높은 응력변동이 빈번히 일어나고 있는 것도 하나의 요인이다.

(2) 데크플레이트 + U형 리브 + 횡리브 용접이음부(그림 3.2.14 ②)

이 부분은 데크플레이트 + U형 리브 + 횡리브가 교차하는 위치의 용접이음부로서 용접선에 연하여 진전하는 피로균열과 스켈럽부에서 웨브로 진전하는 피로균열이 있다. 스켈럽부는 상당히 큰 응력집중이 일어나고, 이것에 의해 피로균열이 발생하였다. 영국의 Sevan교에서는 웨브를 연속시키고 웨브 사이에 종리브를 필렛용접으로 연결하는 구조를 채택하였는데 이러한 용접이음부에 피로균열이 발생하였다.

(3) 횡리브 + U형 리브 교차부(그림 3.2.14 ③)

횡리브 + U형 리브 교차부에 슬롯을 두는 경우 피로균열이 발생한 예가 있다.

(4) 주형웨브 수직보강재 + 데크플레이트 용접이음부(그림 3.2.14 ④)

수직보강재가 윤하중 바로 아래에 있는 경우, 그리고 주형웨브를 중심으로 윤하중이 대칭으로 재하된 경우에 수직보강재측과 데크플레이트의 양쪽 용접토우부에 피로균열이 발생한 예가 있다. 이러한 현상은 윤하중 재하에 의한 데크플레이트의 처짐변형을 수직보강재가 구속하고, 그 선단에 휨모멘트가 작용하기 때문이다.

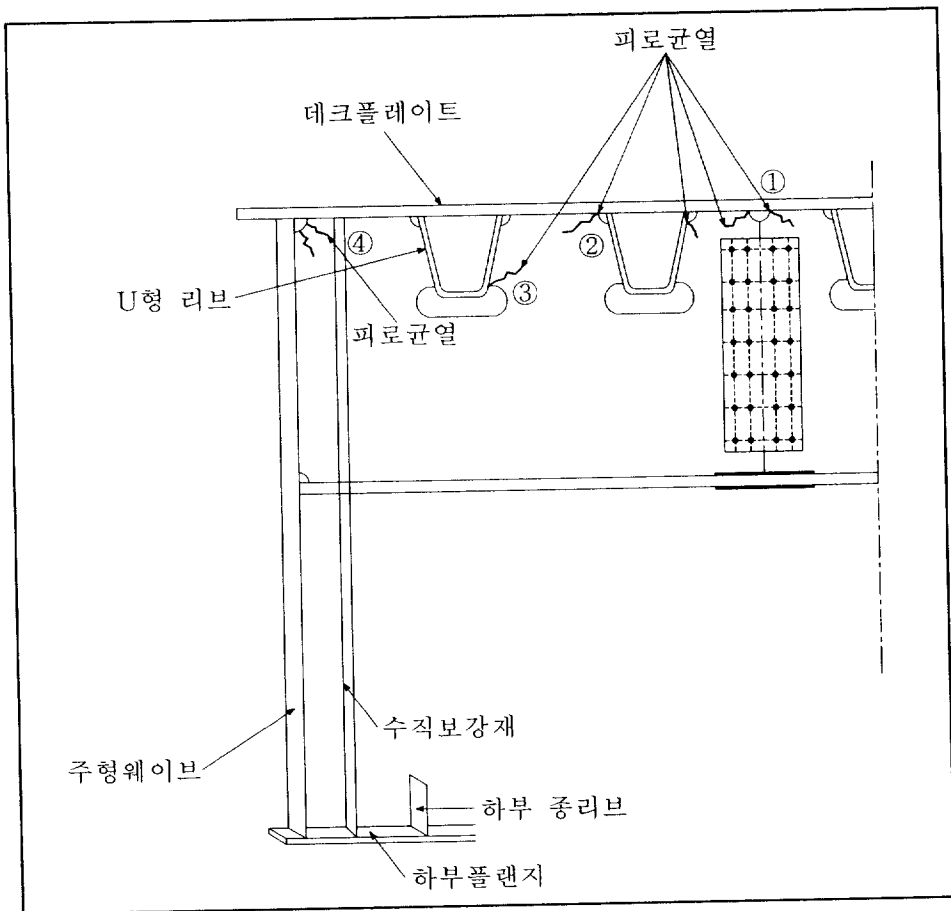


그림 3.2.14 강바닥판의 손상

2) 보수·보강대책

(1) 데크플레이트 현장 맞대기용접이음부 + 횡리브 스킵부

보수·보강대책으로서는 데크플레이트 현장 맞대기용접이음부에는 용접이음을 위해 세라믹 back bar가 들어갈 수 있을 정도의 스킵만을 두어 용접이음을 실시한 후 초음파탐상시험으로 비파괴검사를 실시하여야 한다.

(2) 데크플레이트 + U형 리브 + 횡리브 교차부

보수·보강대책으로서는 데크플레이트 + 종리브 + 횡리브 교차부에 슬롯이 존재할 경우 피로균열이 발생하였으므로 이 부분은 그림 3.2.15와 같이 스킵을 두지 않는 방법이 있다.

(3) 횡리브 + U형 리브 교차부

보수·보강대책으로서는 그림 3.2.15와 같이 횡리브 + U형 리브 교차부 슬롯형상으로 변경하고 용접이음부에는 돌림용접을 철저히 실시함으로써 이러한 용접이음부에 발생하는 균열을 방지할 수 있다.

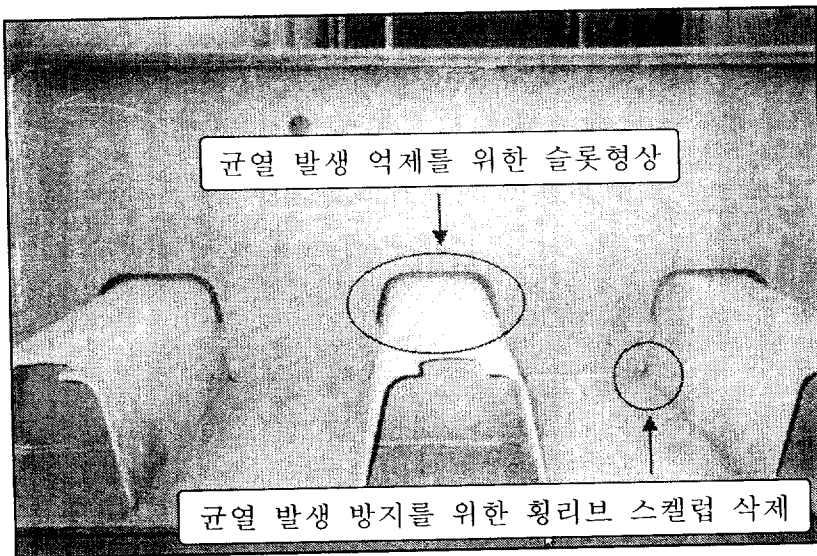


그림 3.2.15 피로균열 발생을 감소시키는 슬롯형상

(4) 주형웨이브+수직보강재+데크플레이트의 용접이음부

보수·보강대책으로서는 수직보강재와 주형웨이브의 스켈럽 주위 우각부에 돌림용접을 철저히 함으로써 피로균열을 방지할 수 있다. 그림 3.2.16는 주형웨이브 + 수직보강재 + 데크플레이트 용접이음부의 돌림용접 상세를 나타낸다.

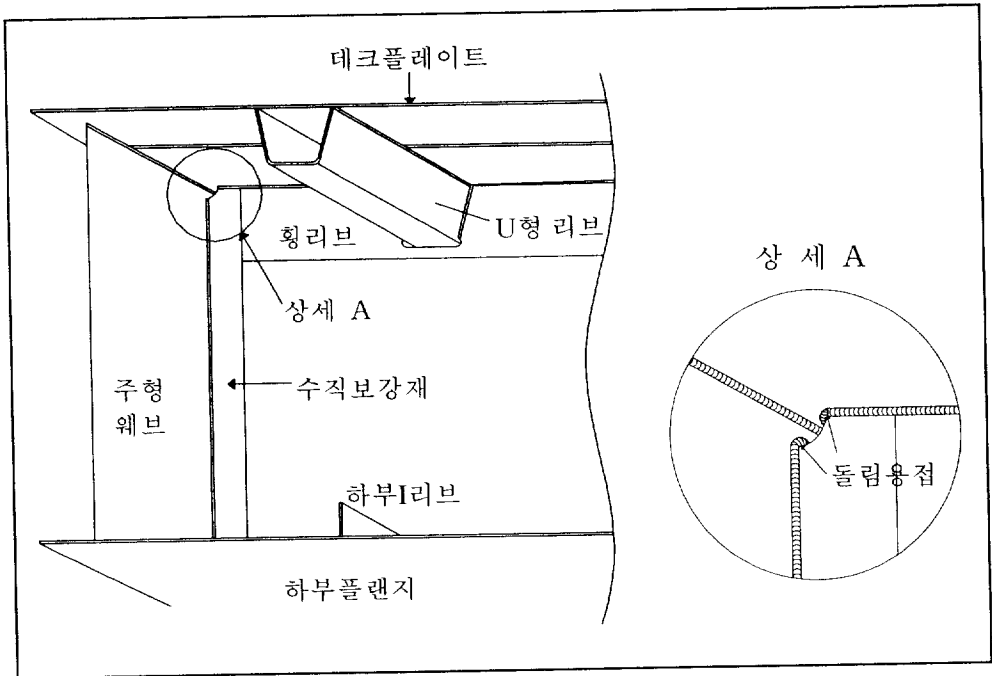


그림 3.2.16 주형웨이브 + 수직보강재 + 데크플레이트의 돌림용접부

3.2.5 기타 강구조물

1) T형 교각의 우각부

(1) 손상사례

돌출이 긴 T형 교각의 우각부에 피로균열이 발생한 예가 있다. 그림 3.2.17과 같이 관통한 보의 하부플랜지와 기둥플랜지 및 웨브의 홈용접필렛용접이음부에 균열이 발생하였으며, 우각부에는 3개의 용접선이 교차하여 기둥에서 보로 형상 변화부에 응력이 집중하여 피로균열이 발생하였다^{17)~19), 24), 28)}.

(2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 균열을 제거함과 동시에 보강판을 연결하는 방법이 있다. 그러나 최근에는 용접이음부의 설계를 변경하거나 초음파탐상시험 등 여러 가지 용접결함의 검출방법이 개발되어 신설 교량에서는 이와 같은 피로균열은 발생하지 않고 있다.

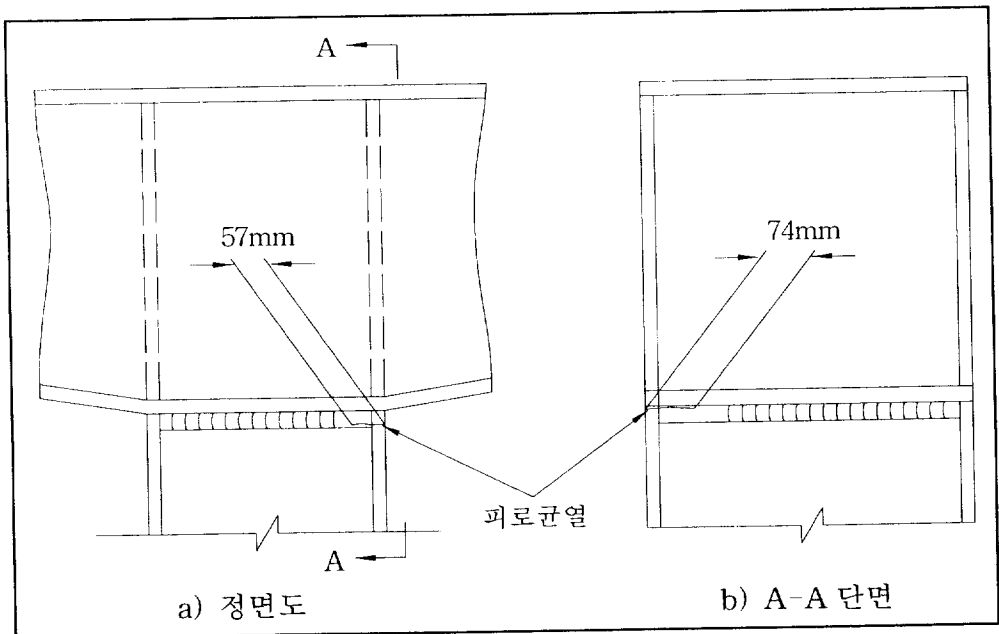


그림 3.2.17 T형 교각 우각부의 손상

2) 표식기둥하단 및 분기점의 용접이음부

(1) 손상사례

상자형교에 브래킷을 넣어서 연결한 표식기둥 하단부에 피로균열이 발생하였다. 그림 3.2.18 a) 및 b)와 같이 표식기둥 하단의 리브플레이트 단부의 용접이음부 및 Y형 표식기둥 분기점의 접속 구속판에 연하여 피로균열이 발생하였다^{17)~19), 24), 28)}. 이러한 피로균열의 발생원인은 활하중 및 풍하중의 진동에 의해 고정점 및 단면 변화점에 생긴 응력 집중이 부재의 피로로 전달되었기 때문이다.

(2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 피로균열이 발생한 표식기둥은 정도에 따라 교체 또는 리브로 보강을 실시하고 있는데 새롭게 설치하는 경우에는 진동을 받지 않는 구조를 채택하든지 진동등급이 낮은 지점부근에 연결하는 방법이 있다.

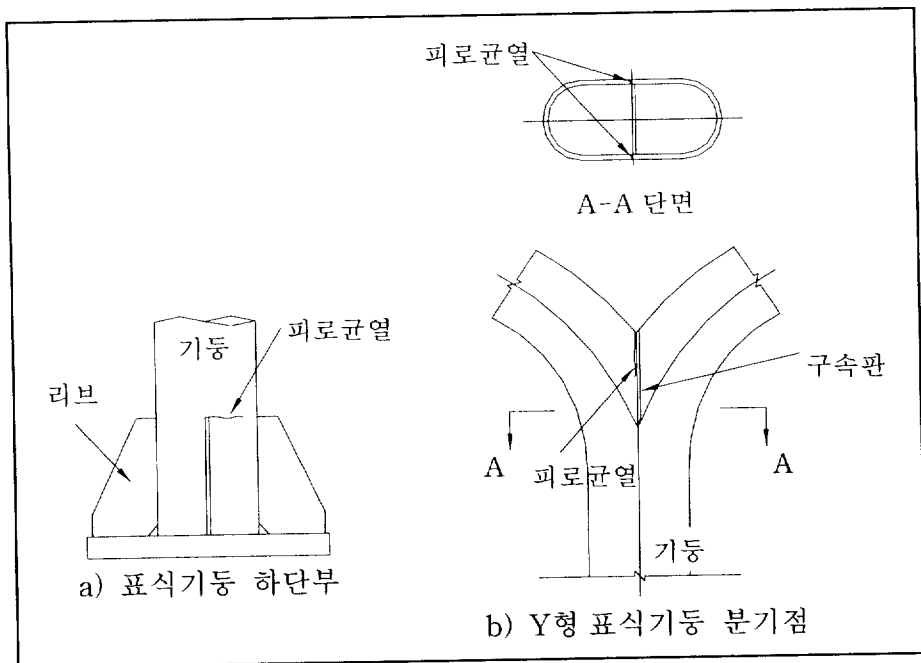


그림 3.2.18 표식기둥 분기점 용접이음부의 손상

3) 표식기둥 설치부 보강재

(1) 손상사례

도시 고속도로의 고가교상에 설치된 도로안내 표식기둥에는 여러 가지의 형태가 있다. 그림 3.2.19와 같이 표식기둥 설치부의 상자형교 내측 수직보강재 하단 용접토우부에 균열이 발생하였다. 표식기둥 설치부 브래킷에 발생하는 휨모멘트에 의해 보강재 하단부에 응력이 집중되어 피로균열이 발생하였다^{17)~19), 24), 28)}. 이와 같은 위치의 균열은 철도교에서 열차의 주행에 의한 웨브의 면외진동 및 침목의 처짐에 의해 생긴 면외 휨변형으로 인해 많이 발생되었다.

(2) 보수·보강대책

보수·보강대책으로서는 피로균열 발생부에 철판판을 부착하여 보강하는 방법 및 상자형교내에 보강부재를 부착하는 방법이 있다.

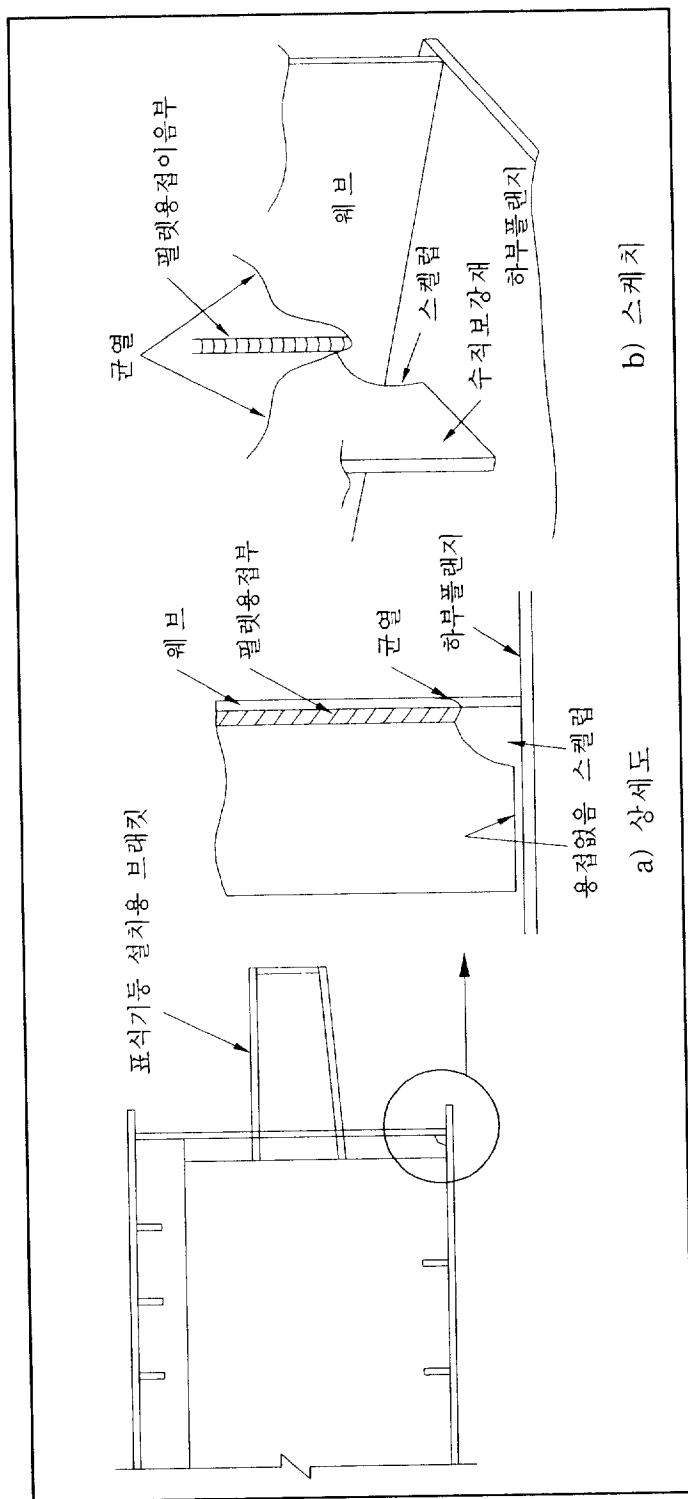


그림 3.2.19 수직보강재 연결과 손상 예

3.3 강교량 손상사례 요약

3.1 및 3.2에 기술한 국내·외 강교량의 손상 사례 및 보수·보강 대책에 대해 요약하면 표 3.3.1과 같다.

표 3.3.1 국내 강교량의 손상 사례 및 보수·보강 대책

교량별	손상사례	보수·보강대책
게르버형교	хин부 수직부재 용접이음부 용입부족	-시공시 비파괴검사 철저 -용입부족 부재의 이음부 가우징 후 완전용입홈용접 실시
아치교	중로아치교 아치리브 수직·수평보강재 이음부 용접누락	-손상부 용접이음 또는 첩접판을 고장력볼트이음으로 연결
	중로아치교 하단 트러스 구조 브레이싱 연결부의 절단 노치부 피로균열 발생	-피로균열 발생부 가우징 후 용접이음 실시하고 절단 노치부는 그라인더나 TIG용접으로 마감처리
	하로아치교 타이거더의 내부 부식	-이물질 및 우수침투 방지를 위한 커버플레이트 시공 -타이거더의 이물질 제거 및 재도장 실시후 차수장치 설치
상자형교	수직·수평보강재 용접이음부 용접누락 및 파단	-손상부를 가우징 후 재용접 실시 또는 첩접판을 고장력볼트이음으로 연결
	받침장치의 Working Line 불일치로 인한 받침장치 주변 하부플랜지 변형 및 파단	-지점부 수직보강재 추가 설치
강바닥판교	U형 리브+U형 리브 맞대기 용접이음부 피로균열 발생	-균열부 부근에 횡형을 부착하고 U형 리브+U형 리브 맞대기용접이음부는 가우징후 홈용입필렛용접 실시
	데크플레이트+U형 리브 필렛용접이음부 피로균열 발생	-시공시 용입깊이 90%이상 확보
플레이트 거더교	플랜지 상부 부식 및 균열	-부식된 부분의 녹 제거 후 부재 양측에 보강판을 고장력 볼트로 연결

표 3.3.2 국외 강교량의 손상 사례 및 보수·보강 대책

교량별	손상사례	보수·보강대책
플레이트 거더교	노치부 웹+하부플랜지 필 렛용접이음부 피로균열 발생	-설계시 노치부에 직각으로 보강판 삼 입후 플랜지 연장 -홈용입필렛용접에 의한 보수나 침접 판에 의한 웹 보강
	주형과 횡형 및 대경구 용접이음부 피로균열 발생	-보강재 및 리브 플레이트의 판두께를 증가시키거나 필렛용접의 토우부(toe) 를 TIG 용접으로 마감처리
	중간 대경구 하부부재 및 거셋트 플레이트 이음부 피로균열 발생	-균열 제거 후 끼움판을 끼우고 양면 에 침접판 부착
	소울플레이트 용접이음부 피로균열 발생	-설계시 소울플레이트 용접이음부의 보강재 두께 두껍게 설계 -균열발생부 가우징 후 용접보수 동시 웹에 침접판 부착
상자형교	소울플레이트 전면의 필렛 용접이음부 토우부(toe) 피로균열 발생	-소울플레이트를 크게하고 볼트로 접합
	코너플레이트의 용접이음부 피로균열 발생	-설계시 주부재와 동일하게 설계실시
아치교	H단면 현수부재 단면변화부 (현수부재+상·하 현재 이음 부) 피로균열 발생	-현수부재 사이를 와이어로 연결하거나 횡방향으로 부재를 설치하여 진동을 억제하고 손상부는 가우징 후 홈용입 필렛용접이음 실시
	원형단면 현수부재 상·하 격점부의 모서리 부분 피로 균열 발생	-격점부 보강후 현수부재에 와이어를 감아 격점부에 작용하는 힘을 저감시 키고 손상부는 가우징 후 돌림용접 실시
	단지점부 보강형 웹 피로균열 발생	-이음부를 강결하거나 힌지로 변경 -수직재 이음부에 보강브래킷 설치하고 웹에 받침판을 침접
	중간 수직재의 상·하단 이음부 피로균열 발생	-교축방향 지지조건 변경 -수직재 이음부의 힌지화 또는 보강거셋 트 부착

표 3.3.2 국외 강교량의 손상 사례 및 보수·보강 대책(계속)

교량별	손상사례	보수·보강대책
아치교	아치리브와 횡형 단부의 용접비드 및 횡형플랜지 피로 균열 발생	-아치면내 사재를 설치
강바닥판교	데크플레이트+횡리브 스킵럽부 피로균열 발생	-세라믹 back bar를 위한 스킵럽만 두 고 용접이음 실시한 후 비파괴검사 실시
	데크플레이트+U형 리브 + 횡리브 스킵럽부 피로 균열 발생	-설계시 스킵럽 삭제
	횡리브+U형 리브 슬롯 끝단 피로균열 발생	-슬롯형상 변경 및 돌림용접 실시
	주형웹브 수직보강재+데크 플레이트 스킵럽부 피로균열 발생	-스킬럽 주위 우각부에 돌림용접 실시
기타 강구조물	T형 교각의 우각부 피로균열 발생	-균열 제거 및 보강판 연결 -시공시 비파괴검사 실시
	표식기둥 하단부 및 분기점 피로균열 발생	-설계시 진동을 받지 않는 구조를 채택 하거나 진동등급 낮은 지점부근에 연결 -피로균열의 정도에 따라 표식기둥 교체 및 리브로 보강
	표식기둥 설치부의 상자형교 내측 수직보강재 하단 피로 균열 발생	-피로균열 발생부에 철판 부착 -상자형교 내에 보강부재 부착

국내·외 강교량에 대한 손상부는 주로 용접이음부의 용접누락 및 용입 부족부분에서 피로균열이 발생하였으며, 부재의 절단부는 절단 노치에 의한 피로균열이 발생하였다. 이들 피로균열 발생부는 설계시 용접이음부에서는 용접기호를 누락시키지 않아야 하며 절단 노치부는 절단부의 거 칠기를 설계도에 정확히 표기하여야 한다.

4. 결 론

국내외의 강교에 발생한 손상사례 및 보수·보강대책을 분석하고 정리하여 기존 강교의 손상부에 대한 보수·보강대책을 제시하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 공용중 교량의 손상 원인 및 보수·보강 대책

- (1) 공용되고 있는 기존 강교의 손상원인은 국부변형, 피로균열, 용접불량, 볼트체결 불량, 부식등이 있으나 부식을 제외한 대부분이 피로균열에 의한 손상으로 나타나고 있으며, 피로균열의 발생원인은 용접누락, 용입부족, 크랙, 공동 등 용접 불량이 대부분을 차지하고 있다.
- (2) 기존교량의 손상에 대한 보수·보강 대책으로서는 보강판을 첩접하여 가능한 한 볼트체결 방법을 택하는 것이 용접에 따른 변형을 최소화 할 수 있다.
- (3) 종전 비파괴검사(RT)를 전수량의 20%만 실시함으로서 부분적으로 내부결함이 사전 검출되지 않아 결함부에 응력집중으로 인한 피로균열이 발생하므로 정밀점검 및 진단시 전수량에 대하여 비파괴검사의 실시 및 구조 상세부는 반드시 해석을 실시하여 안정성을 확보하여야 한다.

2) 신설교량의 대책

- (1) 설계시 구조상세부의 해석을 반드시 실시하여 설계하여야 한다.
- (2) 강교제작시 공종별 용접이음부에 대한 비파괴검사를 실시하고, 경우에 따라서는 전문가에 의한 별도의 제작점검을 실시할 필요가 있다고 여겨진다.
- (3) 강교량의 설계시 상세부 설계에 대한 수명평가도 실시할 필요가 있다고 여겨진다.

강구조물은 제작시 불량부를 수정하는 것은 시간과 비용이 그다지 소요되지 않지만 공용 중에 보수를 실시하는 것은 시간과 비용이 상당히 많이 소요되므로 제작 초기부터 비파괴검사 및 제작점검을 철저히 실시하여 교량의 공용수명을 연장하는 것이 최선의 방안으로 여겨진다. 또한 상기에 기술한 내용은 기존 강교량의 손상부에 대한 보수·보강에 활용할 수 있을 뿐만 아니라 앞으로 건설되는 강교의 설계에도 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) 한국건설기술연구원, “도로공사 연보”, 1996
- 2) 건설교통부, “도로설계편람(Ⅲ)”,
건설정보, 2001. 3
- 3) 대한토목학회, “도로교 설계기준·해설”, 2003
- 4) 日本 關西道路研究會・道路橋調査研究委員會, “コンピュータによる
鋼橋の終局強度解析と座屈設計”,
共立出版(株), 1998. 14
- 5) 한국도로교통협회 “도로교 표준시방서”, 2005
- 6) 장동일, “강구조의 보강설계”, 건설도서, 1997. 1
- 7) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, “Theory of Elasticity”,
McGraw-Hill, 1982. 13
- 8) 韓國鋼構造學會, “鋼構造便覽 第7卷 鋼構造物의 設計 例”, 1995
- 9) 日本道路協會, “鋼道路橋 施工便覽”, 1985. 2
- 10) 박영석, 심낙훈, “실물 모형 강상판 구조상세부의 피로강도에 관한 실험적 연구”,
대한토목학회 논문집 제 22권, pp.913~924, 2002. 7
- 11) 정병욱, “강상판 상형교의 설계에 관한 연구”,
부경대학교 공학석사 학위논문, 2004
- 12) 강창입, “강바닥판 U형 리브 현장용접이음부 피로강도에 관한 연구”,
부경대학교 공학박사 학위논문, 2005
- 13) Dong-Uk Lee, Seung-Kyu Kook, Chang-Ib Kang and Sung-Min Choi, “Analysis of Stress Behavior on Field Welded joints of U-rib in Steel Bridge”,

한국강구조학회 논문집, pp. 387~396, 2004. 6

- 14) 大橋治一, 村瀬佐太美, 藤井裕司, “鋼床版の疲勞を考慮したデイトールの改良”,
橋梁と基礎, 1997. 4
- 15) 西星匡博・岡 隆延・山田健太郎・寺田博昌・杉本正信, “疲勞損傷を受けたアーチ道路橋の對する補強效果について”,
構造工學論文集, Vol.37 A, pp.1097~1106, 1991. 3
- 16) AASHTO, “LRFD Bridge Design Specifications I, II”,
Third edition, 2004
- 17) 三木千壽・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典 “鋼橋の疲勞損傷事例のデータベースの構築とその分析”,
土木學會論文集, NO.392/ I -27, pp.167~176, 1994. 4
- 18) 阿部英彦・谷口紀久・阿部 允 “鋼鐵道橋における疲勞問題と補修・補強”,
橋梁と基礎, Vol.83, No.8, pp.2429, 1983
- 19) 坂野昌弘三上市藏 柴田 洋, “鋼橋の狀事例に關する一考察”,
土木學會第47回年次學術講演會 概要集, I-PS 5, 1992
- 20) 三木千壽, 菅沼久忠, 富澤雄幸, 町田文孝, “鋼床版箱桁橋のデツキプレート近傍に發生した疲勞損傷の原因”,
日本 土木學會 論文集, No.780, I-70, pp.57~69, 2005
- 21) 日本鋼構造協會, “鋼構造物疲勞設計指針・同解説”,
技報堂, 1993
- 22) 長谷川, 近藤, 山田, 石崎, “箱桁橋鋼床版の疲勞照査”,
日本構造工學 論文集, Vol. 35A., pp.929~938, 1989. 3
- 23) J. W. Fisher, “Full-scale Fatigue Test of the Williamsburg Bridge Orthotropic Deck”, ASCE Structures Congress, Chicago, IL,

- Proceedings Vol. 1, pp. 329~336, 1996
- 24) 道路橋 補修・補強編集委員會, “道路橋 補修・補強 事例集”, 2000. 2
- 25) J. W. Fisher, “鋼橋の疲勞と破壊”,
建設圖書, 1987. 9
- 26) 田島二郎, “鋼橋の疲勞損傷と損傷評価システムの開發”, 1989. 3
- 27) Matsumoto, M., Shiraishi, N., Rungthongbaisuree, S. and Kikuta, T.
“Corrosion of Steel Bridge - Its Long-Term Prediction and Effect
on the Safety”,
Proc. of JSCE, N0.410/I-12, October 1989
- 28) 土木學會, “鋼橋における劣化現象と損傷の評価”,
丸善, 1996. 10.
- 29) Jack R. Kayser and Andrzej S. Nowak, “Capacity Loss to
Corrosion in Steel-Girder Bridges”
- 30) 日本道路協會, “道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編”, 2002
- 31) 大倉一郎, “鋼橋の疲勞”,
東洋書店, 1994. 6
- 32) 鐵道總合技術研究所編 “鐵道構造物設計標準(鋼合成構造)”,
丸善, 1992. 10
- 33) 건설교통부, “강도로교 상세부 설계지침”, 1997
- 34) 韓國鋼構造學會, “鋼構造便覽 第2卷 鋼構造의 接合”, 1995
- 35) 대한토목학회, “철도설계기준(철도교편)”,
技文堂, 1999. 8
- 36) J. W. Fisher, “Fatigue and Fracture in Steel Bridges Case Studies”,
John Wiley & Sons, Inc., 1984
- 37) Steel structure, “American Railway Engineering Association”,

Chapter 15, 1981

- 38) Nishikawa, K. and Natori, T. “An Attempt on Evaluation of Corroded Steel Bridge Members”, Review of Progress in QNE, Vol.13, 1994
- 39) Maeda, Y. and Sera, M. “Fatigue Characteristics of Steel Plate Decks for Steel bridges, Fatigue of Steel and Concrete Structures”, Proc. of IABSE Ccloquentium, Lausanne, 1982
- 40) 中井 傳, 北田俊行, “鋼橋設計の基礎”, 共立出版(株), 1992. 9
- 41) Hiroshi Nakai Chai Hong Yoo, “Analysis and Design of Curved Steel Bridges”, McGraw-Hill, 1988
- 42) Okura, I. , Yubisui, M, Hirano, H and Fukumoto, Y. “Local Stress at Cross Beam Connection of Plate Girder Bridges”, Structural Eng. /Earthquake Eng. , Vol. 5 No. 1, 1988. 4
- 43) 李東郁, “橋梁鋼床版におけるトラブリブ溶接継手の疲勞強度向上法に關する基礎的研究”, 日本 大板大學 博士學位論文, 1986
- 44) 本州四國連絡橋公團, “鋼床版設計要領(案)”, 1997. 12
- 45) 대한토목학회, “성수대교 정밀안전진단”, 1995. 5
- 46) 都市高速道路研究會, “都市高速道路 附屬構造物の設計”, 山海堂, 1998

감사의 글

인생의 긴 여정속에 또 한아름의 결실을 맺으면서 한 페이지를 넘기려 합니다.

못골 캠퍼스를 뒤로 한 지 27년의 세월이 흘러 다시 배움의 목 마름에 새로운 충전 기회를 얻어 모교인 용당 캠퍼스를 찾은지도 2년6개월의 세월이 흘렀습니다. 교수님들과 도움을 준 후배들의 은혜를 입고 아쉬움을 뒤로 한 채 이제 또 먼길을 재촉 합니다.

그동안 지도하여 주신 이동욱 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 또한 바쁘신 와중에도 논문 심사과정에서 미흡한 논문을 지도 심사하여 주신 김명식 교수님, 손인식 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

아울러 학과 과목을 지도해 주신 김종수 교수님외 토목공학과 여러 교수님들께도 감사의 말씀을 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 내 일처럼 발 벗고 도와준 최성민, 서용교, 이창승 외 강구조 연구실 가족 여러분께도 감사의 말을 전합니다. 바쁜 업무속에서 여러가지 배려를 아끼지 않은 직장 상사 동료들에게 머리숙여 감사를 드리며

끝으로 격려와 뒷바라지를 아끼지 않은 아내 이선미 여사에게 영광을 돌리면서 사랑스런 딸 소영, 아들 병곤과 함께 이 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

남은 여정 모든 분들께 감사하는 마음으로 배움에 목말라 하면서 매사 정진하고 싶습니다.