

공학석사 학위논문

강바닥판 U형 리브 용접이음부의 응력해석

이 논문은 공학석사 학위논문으로 제출함.



2005 년 8 월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

노 상 곤

이 논문을 노상곤의 공학석사
학위논문으로 인준함

2005년 6월 17일

주 심 공학박사 국 승 규



위 원 공학박사 김 명 식



위 원 공학박사 이 동 욱



목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
ABSTRACT	vi
1. 서 론	1
2. 강바닥판의 개요	3
2.1 강바닥판의 구조 특성	3
2.2 강바닥판의 설계지침	8
2.2.1 국내의 설계지침	8
2.2.2 국외의 설계지침	12
2.3 강바닥판의 손상사례	14
2.3.1 국내의 손상사례	14
2.3.2 국외의 손상사례	16
3. U형 리브 용접이음부의 응력해석	18
3.1 모델링 및 하중재하	18
3.1.1 모델링	18
3.1.2 하중재하	22
3.2 필렛용접이음부의 응력해석	24
3.2.1 해석모델	24
3.2.2 응력해석 결과	25

3.3	흡입입필렛용접이음부의 응력해석	26
3.3.1	해석모델	26
3.3.2	응력해석 결과	27
3.4	흡의 각도별 응력해석	32
3.4.1	해석모델	32
3.4.2	응력해석 결과	33
3.5	테크플레이트 두께별 응력해석	37
3.5.1	해석모델	37
3.5.2	응력해석 결과	38
4.	결론	42
	참고문헌	44
	감사의 글	48

그림 목차

- 그림 2.1 강바닥판 교량의 구조형식
- 그림 2.2 강바닥판 교량의 하중전달과정
- 그림 2.3 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부의 피로균열
- 그림 2.4 U형 리브 표준단면
- 그림 2.5 강바닥판량의 종리브 간격
- 그림 2.6 폐단면 리브의 필렛용접 및 홈용입필렛용접
- 그림 2.7 판두께 8mm의 홈 가공형상
- 그림 2.8 일본 도로교 시방서 U형 리브 용입깊이
- 그림 2.9 일본 도로교 시방서 교차부 형상 및 용접상세
- 그림 2.10 U형 리브와 U형 리브 현장용접이음부 피로균열 전경
- 그림 2.11 데크플레이트와 U형 리브 종방향 필렛용접이음부 피로균열 전경
- 그림 2.12 강바닥판 교량의 피로손상 예
- 그림 3.1 해석단면의 치수
- 그림 3.2 중간 U형 리브의 중앙부 형상
- 그림 3.3 룬하중 면적 및 재하위치
- 그림 3.4 필렛용접이음 단면 형상
- 그림 3.5 필렛용접이음부의 모델링 형상 및 최대 주응력
- 그림 3.6 홈용입필렛용접이음의 단면 형상
- 그림 3.7 홈용입필렛용접의 모델링 형상
- 그림 3.8 용입깊이별 최대 주응력
- 그림 3.9 해석모델 단면 형상
- 그림 3.10 홈 가공각도별 모델링 형상
- 그림 3.11 홈의 가공각도별 최대 주응력

그림 3.12 해석모델 단면 형상

그림 3.13 데크플레이트 두께별 모델링 형상

그림 3.14 데크플레이 두께별 최대 주응력

표 목차

표 2.1 U형 리브 단면의 표준형태

표 3.1 용입깊이에 따른 최대 주응력

표 3.2 홈의 각도에 따른 최대 주응력

표 3.3 데크플레이트 두께별 최대 주응력

Stress Analysis on Welded Joints of U-rib in Steel Decks

Sang-Gon Noh

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

ABSTRACT

Orthotropic steel decks play a role in deck plate and upper flange of principal web. In particular, the cracks propagated through deck plate in longitudinal rib to deck plate joints occur at welded joint due to stress concentrations caused by the bending stress directly to wheel loading.

Parametric studies are performed to show the influence of the parameters on the stress concentration at the connection between longitudinal rib and deck plate for FEM analysis used full-seated test specimen. The parameters include the influence of the fillet welding and weld penetration depth of full penetration welding and deck plate thickness at the connection between longitudinal rib and deck plate.

This study results show that the fillet welding occurs excessive stress concentrations at the welded joint and the more weld penetration depth and deck plate thickness are increase, the less decreased the stress is. We have obtained the result that at least 80% weld penetration of U-type trough rib thickness and 14mm deck plate thickness are suitable for the joints.

1. 서론

강바닥판 교량은 철근 콘크리트 상판에 비해 단위면적당 약 30~50% 이상의 자중이 감소되고 교량의 장대지간화가 가능하며, 주형의 형고도 낮출 수 있기 때문에 현수교, 사장교와 같은 장대교량, 하부구조 형식에 제약을 받는 고가도로, 연약지반 상에 건설되는 교량에 많이 채택되고 있다^{1), 2)}.

강바닥판 교량은 데크플레이트를 종리브와 횡리브로 보강한 구조이며, 데크플레이트와 종리브는 바닥판인 동시에 주형의 상부플렌지로도 작용하므로 강성이 매우 큰 이점이 있다. 또한 횡리브는 데크플레이트를 보강하는 동시에 횡형으로서의 기능도 갖는 복합적인 구조이다^{3), 4)}.

강바닥판의 종방향 보강재로서는 개단면 리브와 폐단면 리브가 있으며, 비틀림 강성이 큰 관점에서 U형 폐단면 리브가 많이 사용되고 있다. U형 폐단면 리브(이하 U형 리브)는 비틀림 강성이 크고, 교축방향의 하중분배가 균등하여 지간을 길게 할 수 있다^{2), 4)}. 또한 데크플레이트와 U형 리브는 편면만 용접을 실시하므로 용접량이 적어 용접에 의한 변형이 적게 되고, 완전밀폐단면이 되어 단면의 내부가 부식될 염려가 없고 외부만 도장을 실시하므로 도장면적을 경감하는 등의 이점이 있다^{1)~4)}.

한편 강바닥판의 구조상세 중 피로에 취약한 부분으로는 종리브·횡리브 교차부, 종리브·강바닥판 연결부, 종리브 이음부, 강바닥판 홈용접 이음부 등을 들 수 있다^{5)~7)}. 바닥판의 데크플레이트 상에는 포장이 실시되어 있으며, 포장 위에 직접 차륜이 재하되기 때문에 피로손상을 받기 쉬운 구조이다^{8)~12)}. 또한 통행차량의 중량이나 교통량의 증가에 의해 강바닥판 교량에서 피로손상이 발생한 사례도 보고되고 있다^{11), 13), 14)}. 실제로 영국의 Severn교, Wye교 등의 강상판에서 종리브와 강바닥판의 용접연결부에서 용접지단부와 루트부에서 균열이 발생하였다^{15), 16)}. 데크플레이트와 U형 리브의 용접이음부에 피로균열이 발생하면 포장으로 인해 피로균열 발생여

부를 파악하기 어렵고, 직접 룬하중을 받는 강바닥판의 응력거동으로 인해 응력집중부에서 피로균열이 발생하기 쉽다^{8),17)}. 이러한 균열은 U형 리브가 차량의 룬하중에 의한 강바닥판의 변형을 국부적으로 구속하는 것에 의해 발생하는 것과 강바닥판의 용접부가 불완전용입되어 결함이 생기기 쉬운 것이 원인으로 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부의 응력해석에 대한 연구가 필요하다^{6),8)}.

본 연구에서는 강바닥판에서 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부에 대한 응력거동상태를 유한요소법에 의한 응력해석을 실시하여 비교·검토하였으며 응력해석의 인자는 다음과 같다. 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부에 필렛용접이음을 실시하였을 경우의 응력의 영향, 홈용입필렛용접에서 홈의 깊이를 바꾸었을 때의 응력의 영향, 홈용입필렛용접용접에서 홈의 각도를 바꾸었을 때의 응력의 영향, 홈용입필렛용접용접에서 데크플레이트의 두께를 바꾸었을 때의 응력에 미치는 영향을 비교·검토하였다.

2. 강바닥판의 개요

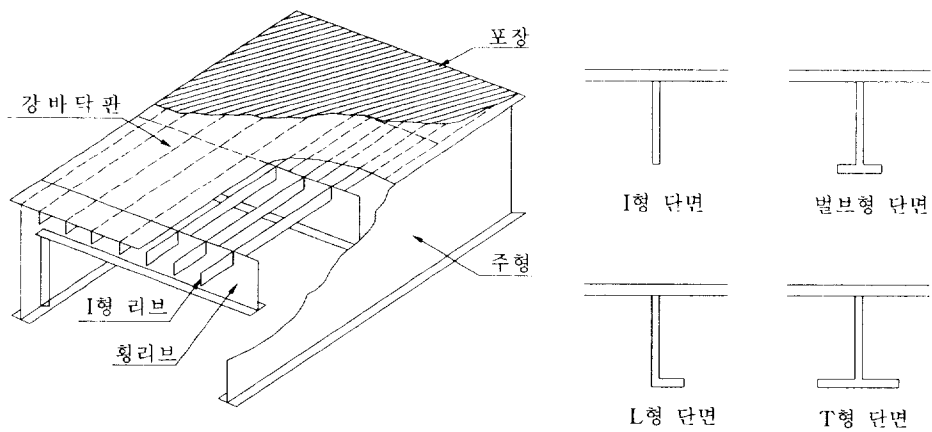
2.1 강바닥판의 구조 특성

강바닥판 교량은 그림 2.1과 같이 종리브와 횡리브를 강판에 용접하여 보강한 구조물로 직각방향에 대해 서로 다른 탄성적 성질을 갖는 직교이방성 판의 성질을 갖게 된다^{2),3)15)}. 강바닥판교에서 룬하중은 직접 데크플레이트를 통해 종리브로 전달되고 종리브에 전달된 하중은 횡리브를 통해 주거더로 전달하는 역할을 하며 종리브 및 횡리브 자체가 상부플랜지로서의 역할도 하게 된다. 이와 같이 주형과 교량의 바닥판이 일체의 판요소로서 작용하기 때문에 보이론으로 설계되는 일반 교량에 비하여 상당한 재료의 절감 효과를 가져올 수 있는 합리적인 구조이다¹⁸⁾.

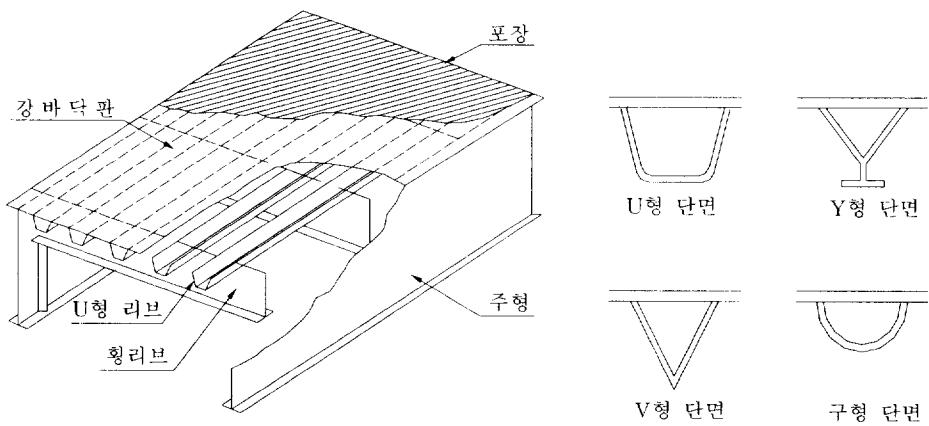
강바닥판 교량에서 U형 리브는 경량구조이면서도 휨과 비틀림에 대한 저항이 크고 하중 분배 효과도 좋은 장점이 있다. 더구나 데크플레이트 자체가 높은 강도를 가지고 있으며, 차량이 통과할 때 생기는 집중하중에 대한 저항 능력도 크다^{19),20)}.

일반적으로 교량에서 종리브는 교량의 종방향으로 배열되어 구조 전체의 최대 휨모멘트에 저항할 수 있게 되고, 종리브는 크게 나누어 비틀림 강성이 있는 것과 없는 것 두가지가 있다^{2),3)}. 비틀림 강성이 거의 없는 개단면 리브로서는 I형 단면, 벌브형 단면, L형 단면, 역T형 단면 등이 사용된다. 이들 리브는 거더의 상부플랜지 역할을 하여 큰 응력을 받게 되므로, 종방향으로 연속이 되게 배열한다.

한편 폐단면 리브로서는 사다리꼴, 반원, 삼각형 등이 사용된다. 폐단면 리브는 휨 및 비틀림 강성과 하중분배능력이 좋아 횡리브 간격을 넓게 할 수 있으므로 바닥판의 중량을 상당히 감소시킬 수 있고, 한쪽 면만 용접을 실시하므로 용접량이 매우 적은 이점 등이 있다.



a) 개단면 리브의 구조형식



b) 폐단면 리브의 구조형식

그림 2.1 강바닥판 교량의 구조형식

강바닥판 교량의 하중전달 과정을 살펴보면 그림 2.2와 같이 집중하중 P 가 상판에 작용하는 경우, 하중 P 는 종리브와 횡리브 사이의 상판에 작용하기 때문에 지렛대의 원리에 의해 우선 종리브와의 교점 E 및 F에 각각 P_1 및 P_2 로 분배된다^{1),2),4)}. 그리고 P_1 은 다시 종리브를 통하여 횡리브와의 교점 A 및 C에 각각 P'_1 및 P''_1 로서 전달되며, P_2 도 마찬가지로 점 B 및 D에 각각 P'_2 및 P''_2 로 전달된다. 이들의 힘은 다시 횡리브에 전달되어 주형과의 교점 G, I, K, M 및 H, J, L, N 등에 전달된다. 이 때 강바닥판의 변형을 폐단면의 U형 리브가 국부적으로 구속함으로써 U형 리브와 강바닥판의 용접이음부에서 면외변형이 발생하여 그림 2.3과 같이 피로균열이 발생할 가능성을 상당히 내포하고 있다. 특히 통행교통량의 증가, 대형화 및 과적차량의 증대 등에 따라 강바닥판 상에 통행하는 가혹한 하중을 고려하면 용접이음부에 발생할 수 있는 피로에 대한 환경은 더욱 열악하고 공용기간이 상당히 경과된 강바닥판에서는 피로손상에 대한 해석 및 점검을 충실히 실시하여야 한다. 강바닥판의 보수·보강이 용이하지 않은 점을 고려할 때 차후 설계되는 강바닥판에 대해서는 용접이음부에 발생하는 응력집중에 대한 피로손상을 고려해야 한다^{21),22)}.

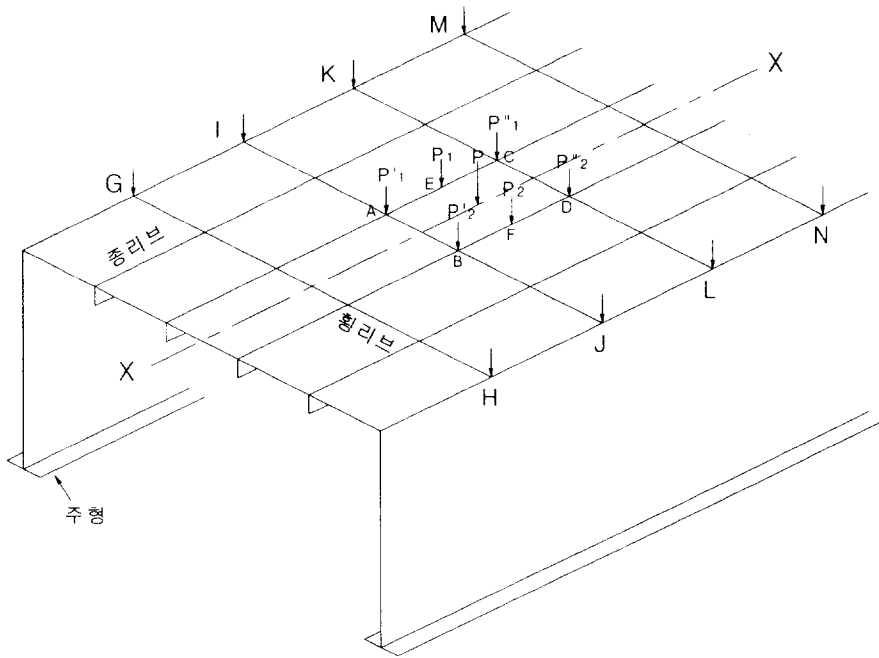
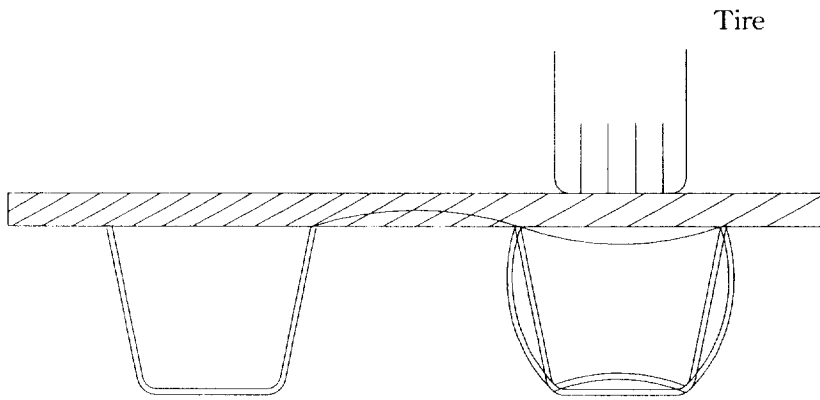
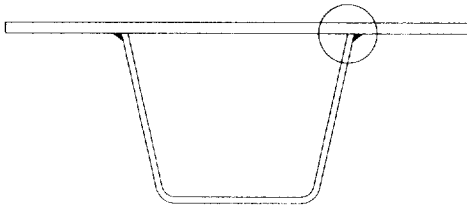


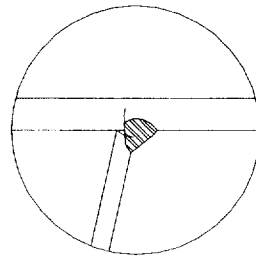
그림 2.2 강바닥판 교량의 하중전달과정



(a) 데크플레이트와 U형 리브 휨거동



(b) 용접이음부 피로균열 발생가능 부분



(c) 피로균열 발생 형상

그림 2.3 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부의 피로균열

2.2 강바닥판의 설계지침

2.2.1 국내의 설계지침

국내에서는 강바닥판교의 설계시 구조적 특성을 고려하여 U형 단면으로 주로 설계하고 있다. 강도로교 상세부 설계지침(1997)에 의하면 U형 리브는 그림 2.4에 나타낸 단면을 표준으로 하고 있다. U형 리브의 내부是完全히 밀폐되어 있으므로 양면이 대기에 노출되어 있는 일반 구조부재에 비해 부식면적이 1/2로 되어 녹 발생에 따른 문제는 발생하지 않는다²³⁾~²⁵⁾. 또한, 비틀림 강성은 폐단면 리브의 단면 형상에 의해 결정되므로 판 두께의 효과는 적으며, 판의 두께를 두껍게 하더라도 이에 비례하여 단면의 특성은 증가하지 않는다. 현재 우리나라에서 사용되는 폐단면 리브의 호칭 및 치수에 대한 제원은 표 2.1과 같다²⁴⁾.

도로교 설계기준(2003)에 의하면 U형 리브의 최소두께를 8mm로 규정하고 있으나 경제성을 고려하여 강도로교 상세부 설계지침(1997)에서는 6~8mm를 사용하도록 규정하고 있으며, 대부분의 설계에서는 8mm를 채택하고 있다²⁵⁾.

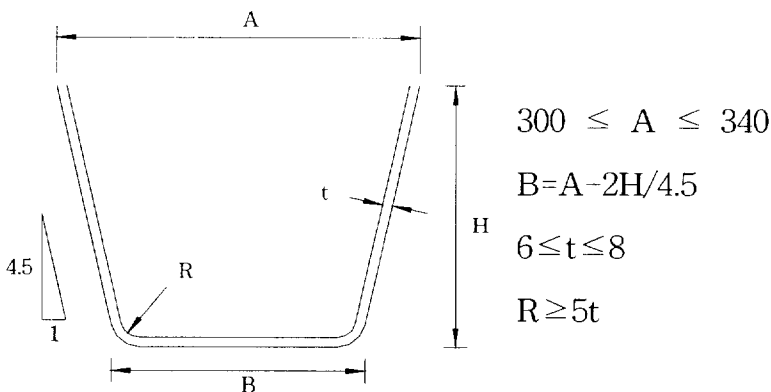


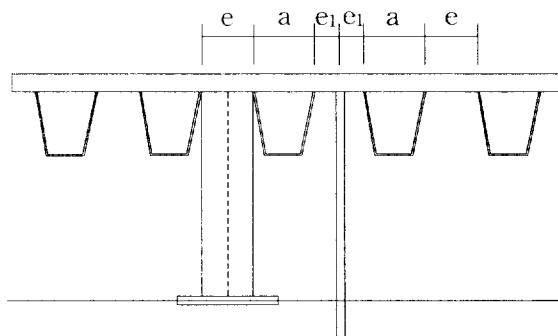
그림 2.4 U형 리브 표준단면

표 2.1 U형 리브 단면의 표준형태

호 칭	치 수 (mm)*					국내 적용교량
	A	B	H	t	R	
320×240×6-40	320	213.3	240	6	40	영흥대교
320×260×6-40	320	204.4	260	6	40	-
320×240×8-40	324.1	216.5	242	8	40	청담대교
320×260×8-40	324.1	207.7	262	8	40	가양대교
340×260×8-40	340	224.4	260	8	40	광안대교
320×200×8-30	304.1	205.4	222	8	40	영종대교

※ 치수는 그림 2.4에서 표시한 A, B, H, t, R의 치수를 나타낸다.

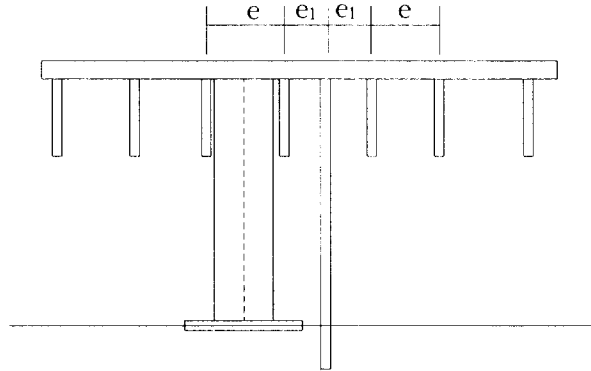
한편 도로교 표준시방서(1996)에 의하면 폐단면 및 개단면 종리브의 배치는 그림 2.5 a) 및 b)에 나타낸 바와 같다²³⁾. 횡리브에 대해서는 도로설계기준(2003)에 의하면 일반적으로 역T형태로 강판을 절단하여 용접을 실시하고, 간격은 폐단면 세로리브를 사용하는 경우에는 2~3m, 개단면 세로리브를 사용하는 경우에는 1.3~2m를 표준으로 한다²⁵⁾.



일반부 — $300\text{mm} \leq e, a \leq 340\text{mm}$, 주형부근 — $70\text{mm} \leq e_1 \leq 250\text{mm}$

(a) 폐단면 종리브

그림 2.5 강바닥판교의 종리브 간격(계속)



일반부 ——— $300\text{mm} \leq e$, 주형부근 — $170\text{mm} \leq e_1 \leq 250\text{mm}$

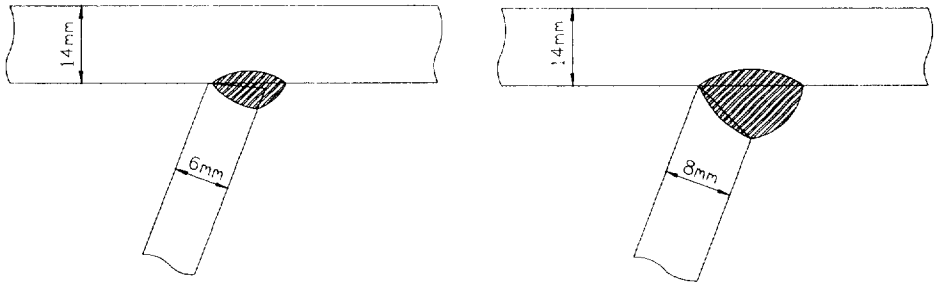
(b) 개단면 종리브

그림 2.5 강바닥판교의 종리브 간격

종리브 현장이음의 경우 개단면 리브는 고장력 볼트로 이음하는 경우가 많고, 폐단면 리브는 고장력 볼트이음과 용접이음의 두 가지 방법이 있으나, 최근에는 고장력 볼트이음이 주로 사용되고 있다²⁵⁾.

데크플레이트와 폐단면 리브 용접이음에는 그림 2.6과 같이 필렛용접이음과 홈용입필렛용접이음이 있으며, 필렛용접이음의 경우 폐단면 리브는 개단면 리브에 비해서 용접량이 1/2로 되어 제작시 작업량과 제작비가 줄어드는 장점이 있다²⁴⁾. 한편, 홈용입필렛용접의 경우 용착량이 많아 용접 변형이 발생하기 쉽고 홈 가공의 작업량도 무시할 수 없다. 따라서 폐단면 리브에서 강판두께가 6mm인 경우는 용접방법 및 조건을 적절하게 선정하면 거의 홈용입필렛용접과 같은 용입면적을 얻을 수 있으므로 필렛용접을 사용토록 한다. 이때 용접치수는 강바닥판의 판두께가 일반적으로 14mm 이상인 것을 고려하여 6mm로 하고 있다. 그러나 폐단면 리브에서는 판두께가 8mm인 경우는 필렛용접을 사용하면 일반적으로 2mm 정도의 용입면적이 부족하므로 그림 2.7과 같이 45°로 홈 가공을 하여 홈용입

필렛용접을 하는 것이 바람직하다²⁴⁾.



(a) 필렛용접 (b) 홈용입필렛용접

그림 2.6 폐단면 리브의 필렛용접 및 홈용입필렛용접

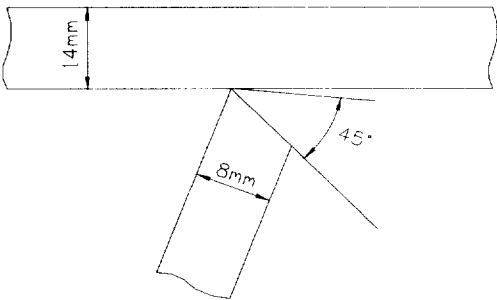


그림 2.7 판두께 8mm의 홈 가공형상

2.2.2 국외의 설계지침

국외 강바닥판의 설계지침 가운데, 일본 도로교 시방서²⁾를 살펴보면 데크플레이트와 폐단면 리브 용접시 일정한 목두께와 용입량을 확보하고, 용입량을 확보하기 위해 U형 리브에 홈 가공을 실시하도록 하고 있다^{9),26),27)}.

데크플레이트와 폐단면 리브 용접이음부의 비파괴검사에서는 폐단면 리브 측 또는 데크플레이트 측에서 비파괴검사를 실시 할 경우 비파괴검사에 상당히 많은 어려움이 있고, 또 필요한 용입량을 얻을수 있을 만큼의 탐상정도를 확보하는 것이 어렵다^{11),26)}. 따라서 사전에 실험에서와 같은 용접조건에서 용입량을 확보하는 것을 원칙으로 하며, 용입량은 그림 2.8에 나타낸 것과 같이 폐단면 리브의 판 두께 방향으로 용입깊이를 75% 이상 확보하도록 규정하고 있다²⁶⁾. AASHTO 시방서에서는 U형 리브의 용입깊이를 80%로 규정하고 있다²⁸⁾.

한편 데크플레이트, 횡리브와 U형 리브의 3방향의 용접선이 교차하는 부분에 대해서는 그림 2.9와 같이 스켈럽을 설치하지 않고, 용접이음이 시작되거나 끊기지 않도록 규정(용접이음의 시단, 종단 금지)하고 있다²⁶⁾.

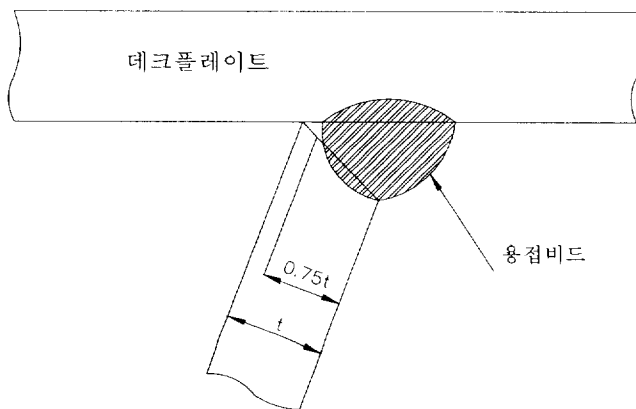


그림 2.8 일본 도로교 시방서 U형 리브 용입깊이

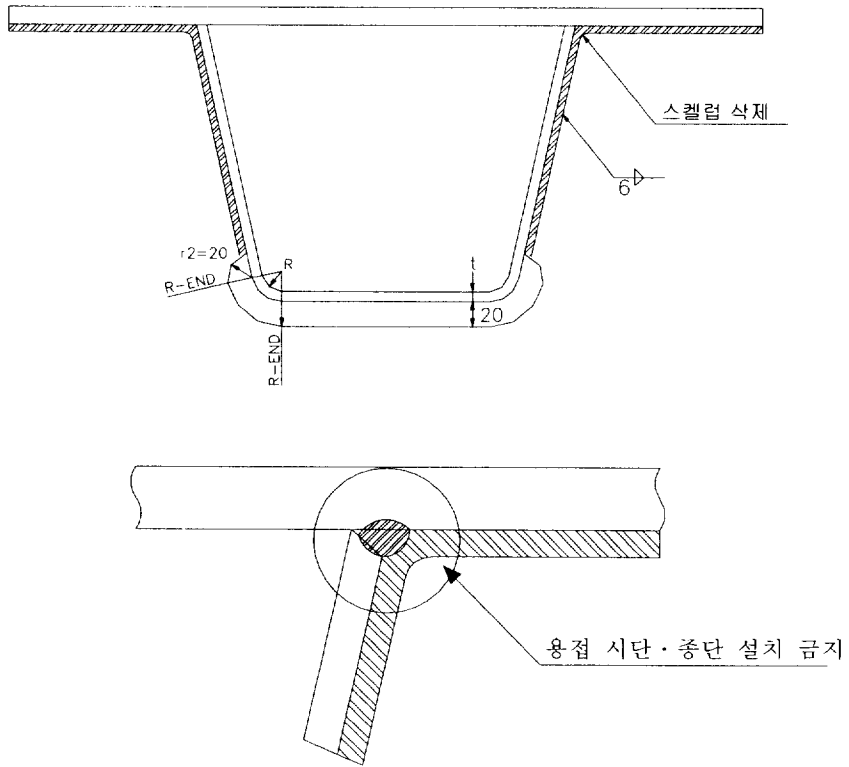


그림 2.9 일본 도로교 시방서 교차부 형상 및 용접상세

2.3 강바닥판의 손상사례

2.3.1 국내의 손상사례

국내에서는 과거에 강바닥판으로 시공한 교량이 그다지 많지 않으며, 최근에 강바닥판으로 건설하였거나 건설중인 교량은 많이 있다. 따라서 이미 건설한 교량에서 강바닥판의 손상에 대한 사례를 정리한 자료는 그다지 많지 않으나 최근에 자료가 약간 있다²⁹⁾. 그림 2.10에 U형 리브와 U형 리브 현장용접이음부에 피로균열이 발생하여 용접 비드부분을 그라인딩으로 마감하고 그 위에 버클플레이트를 부착하여 필렛용접이음을 실시하였으나 버클플레이트의 필렛용접 이음부에 또다시 피로균열이 발생한 전경을 나타낸다. 그림 2.11에는 데크플레이트와 U형 리브의 필렛용접이음부에 피로균열이 발생한 전경을 나타낸다. 이러한 피로균열은 데크플레이트와 U형 리브의 필렛용접이음부에 용입이 충분히 실시되지 않았기 때문이다.

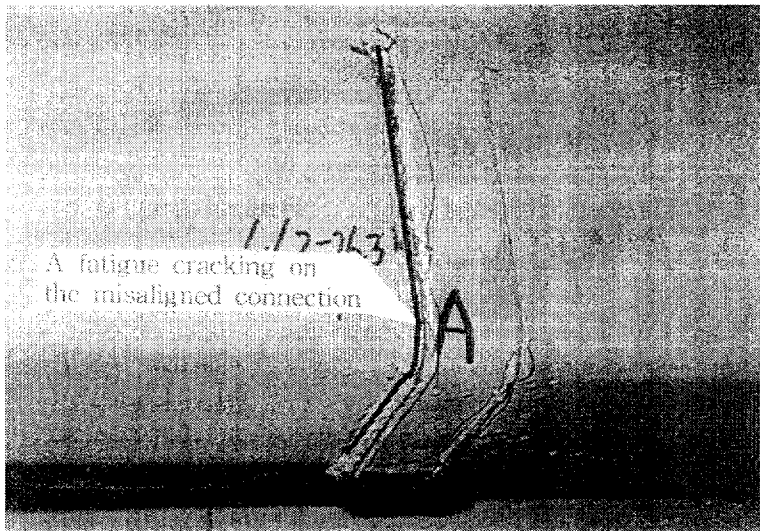


그림 2.10 U형 리브와 U형 리브 현장용접이음부 피로균열 전경

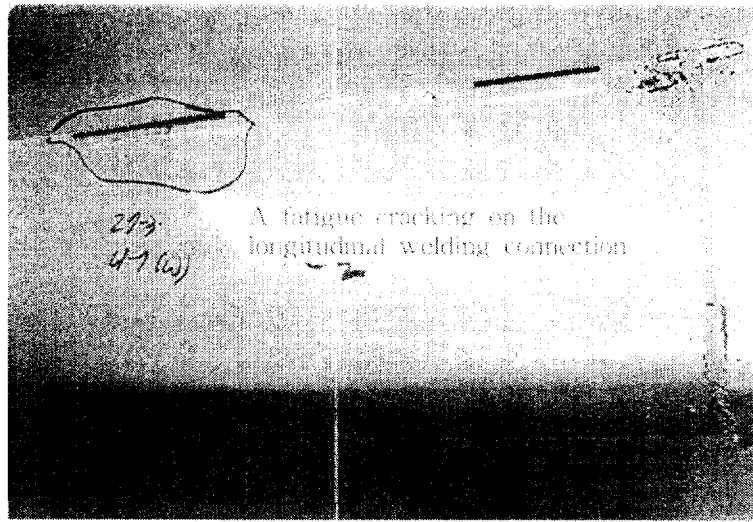


그림 2.11 데크플레이트와 U형 리브 종방향 필렛용접이음부 피로균열 전경

2.3.2 국외의 손상사례

외국에서도 강바닥판으로 건설한 교량에 피로손상이 발생한 사례가 보고되고 있으며, 피로손상의 일례를 기술하면 다음과 같다. 그림 2.12에는 강바닥판 상형교의 피로 균열발생 위치를 나타낸다^{3),20),22)}. 이들 손상은 바로 낙교로 연결되는 것은 아니지만 그대로 방치하면 포장의 손상 및 평탄성의 결여 등 도로로서의 기능저하 및 내구성 저하를 초래한다. 강바닥판 상형교의 피로균열의 발생위치는 다음과 같다²⁰⁾.

- 1) 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부(그림 2.12 ①)
- 2) 데크플레이트, U형 리브와 횡리브의 교차부(그림 2.12 ②)
- 3) U형 리브와 U형 리브 현장용접이음부(그림 2.12 ③)
- 4) 주형웨이브 수직보강재와 데크플레이트의 용접이음부(그림 2.12 ④)
- 5) 횡리브와 주형웨이브 필렛용접이음부(그림 2.12 ⑤)
- 6) 데크플레이트 현장용접이음부와 U형 리브 필렛용접이음부(침점부의 스켈럽부)(그림 2.12 ⑥)
- 7) 주형웨이브 수평보강재와 횡리브 필렛용접이음부(그림 2.12 ⑦)
- 8) 데크플레이트와 횡리브 필렛용접이음부(그림 2.12 ⑧)

상기의 1)항, 3)항, 5)항, 7)항, 8)항에 관해서는 강바닥판 교량의 피로균열이 발생한 사례는 있으나 연구실적은 발표되지 않고 있다. 따라서 각 나라마다 강바닥판에 피로균열이 발생한 사례는 있으나 이를 공개한 사례는 매우 드물다.

2)항에 관해서는 부분은 데크플레이트, U형 리브와 횡리브가 교차하는 위치의 용접이음부로서 용접선에 의하여 진전하는 피로균열과 스켈럽부에서 웨이브로 진전하는 피로균열이 있다. 스켈럽부는 상당히 큰 응력집중이 일어나고, 이것에 의해 손상이 발생한 것이다. 영국의 Sevan교에서는 웨이브를 연속시키고 웨이브 사이에 종리브를 필렛용접으로 연결하는 구

조를 채택하였는데 이러한 용접이음부에 피로손상이 발생한 사례도 보고되고 있다.

4)항에 관해서는 수직보강재가 룬하중 바로 아래에 있는 경우, 그리고 주형웨이브를 중심으로 룬하중이 대칭으로 재하된 경우에 수직보강재측과 데크플레이트의 양쪽 용접토우부에 피로균열이 발생한 사례가 있다. 이러한 현상은 룬하중 재하에 의한 데크플레이트의 처짐변형을 수직보강재가 구속하고, 그 선단에 휨모멘트가 작용하기 때문이다.

6)항에 관해서는 피로균열이 발생한 용접이음부는 데크플레이트의 교축방향 용접선 바로 아래이며, X선 촬영용의 스켈럽 용접이음부에서 피로균열이 발생하였다. 이 부분은 룬하중 바로 아래에 위치하기 때문에 높은 응력변동이 빈번히 일어나고 있는 것도 하나의 요인이다.

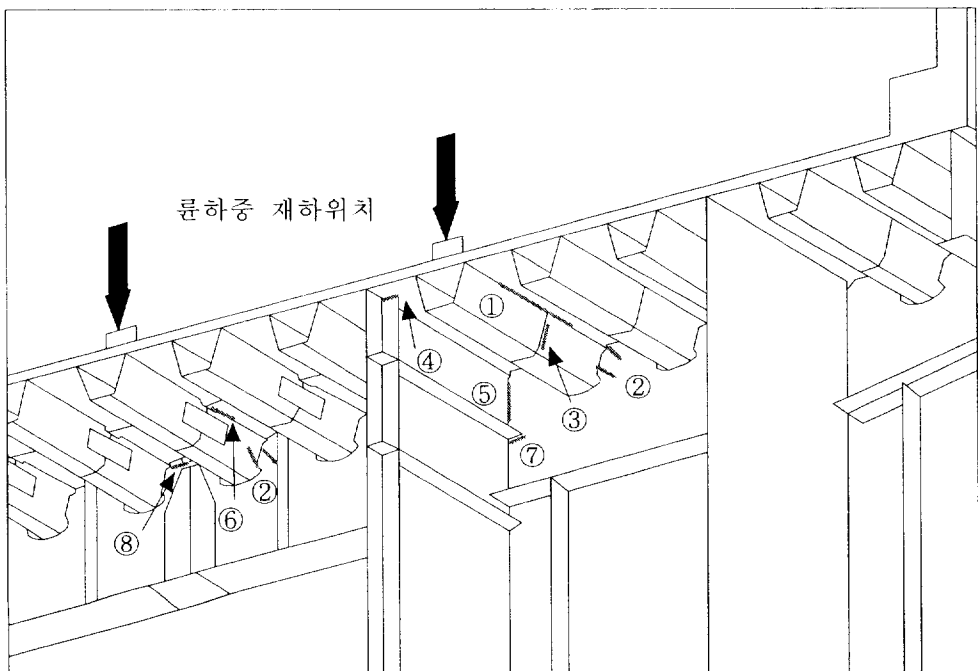


그림 2.12 강바닥판 교량의 피로손상 예

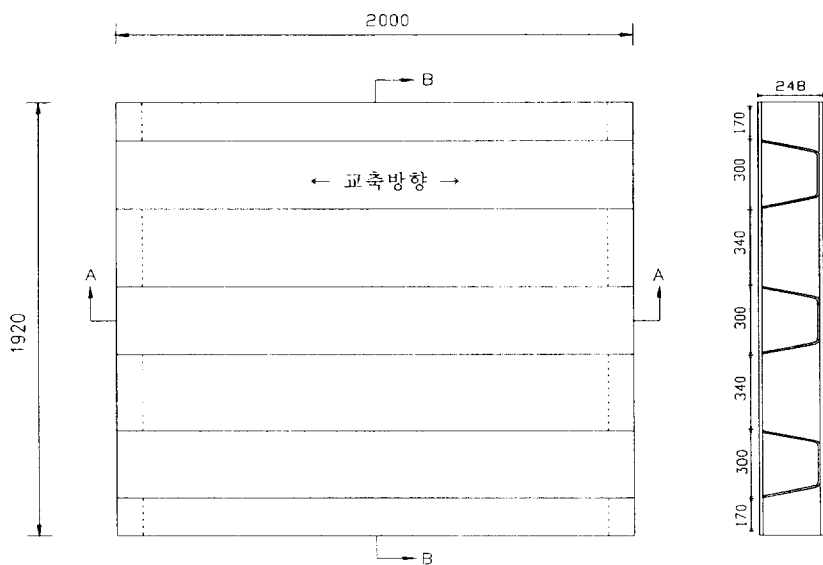
3. U형 리브 용접이음부의 응력해석

3.1 모델링 및 하중재하

3.1.1 모델링

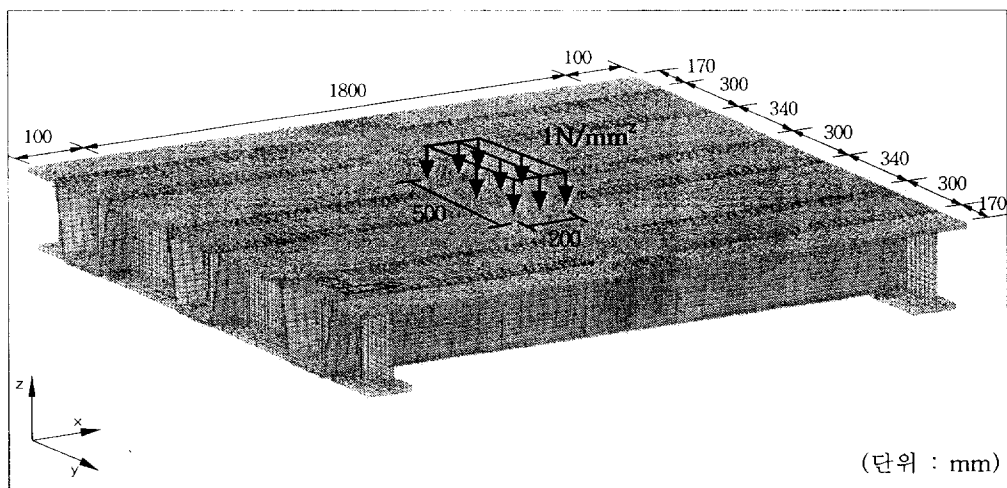
연구의 대상으로 하는 U형 리브 치수는 2.2.1의 표 2.1에 나타난 표준단면으로 $320 \times 200 \times 8-30$ 이며, 해석모델에서는 편심하중이 재하되는 것을 방지하기 위해 U형 리브를 3ea로 병렬시켰다²⁴⁾. 그림 3.1에는 해석단면의 폭×길이의 치수를 나타낸다. 지지점은 일단 힌지, 타단 롤러로 하였으며, 강재의 탄성계수는 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 프아송비는 0.3으로 하여 해석을 수행하였다. 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 MIDAS로, 용접부 상세해석을 위해 8절점 솔리드 요소를 사용하였다. 그림 3.2 a)에 전체 해석 모델링 형상을 나타내며, 그림 3.2 a)의 데크플레이트와 U형 리브의 지간중앙부의 응력거동을 파악하기 위해 그림 3.2 b) 및 c)와 같이 요소를 조밀하게 분할하였다. 그림 3.2 b)에 중간 U형 리브의 중앙부의 데크플레이트 및 단면형상을, 그림 3.2 c)에 U형 리브의 측면 형상을 각각 나타낸다.^{30)~}

33)



(단위 : mm)

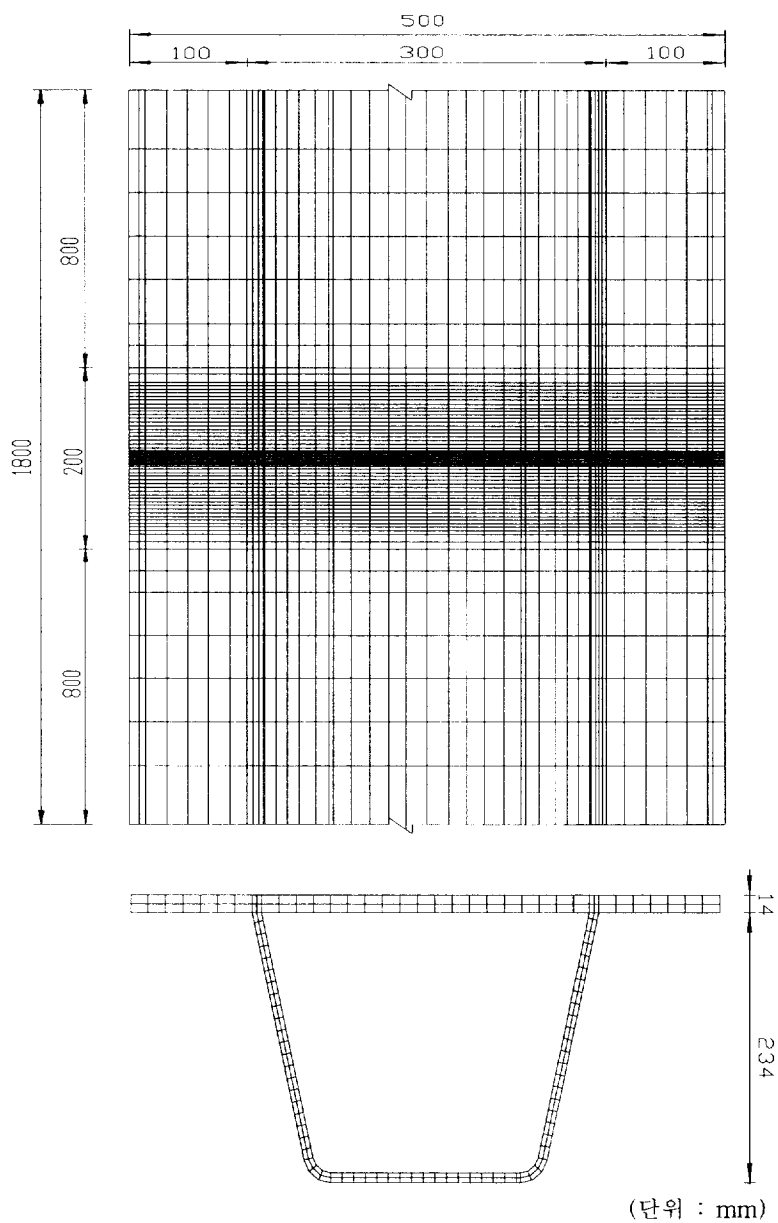
그림 3.1 해석단면의 치수



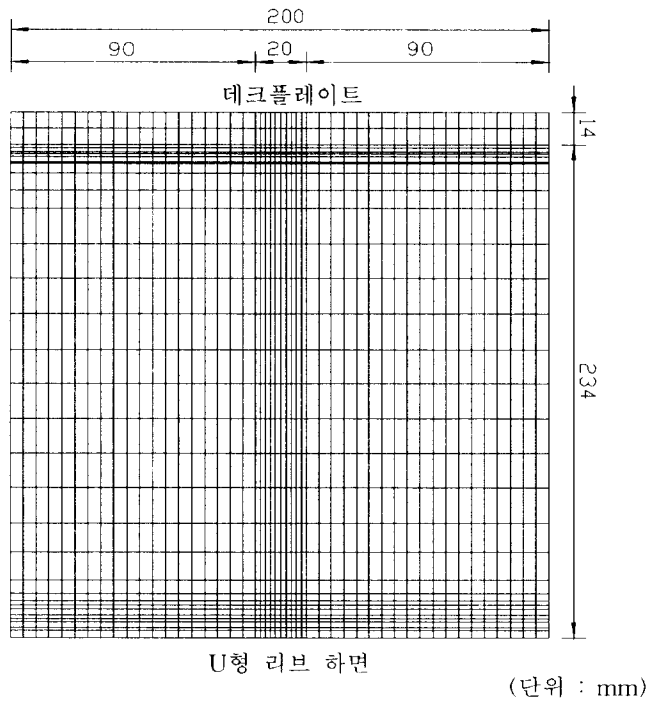
(단위 : mm)

a) 전체 해석 모델링 형상

그림 3.2 중간 U형 리브의 중앙부 형상(계속)



b) 중간 U형 리브의 중앙부 테크플레이트 및 단면 형상
 그림 3.2 중간 U형 리브의 중앙부 형상(계속)

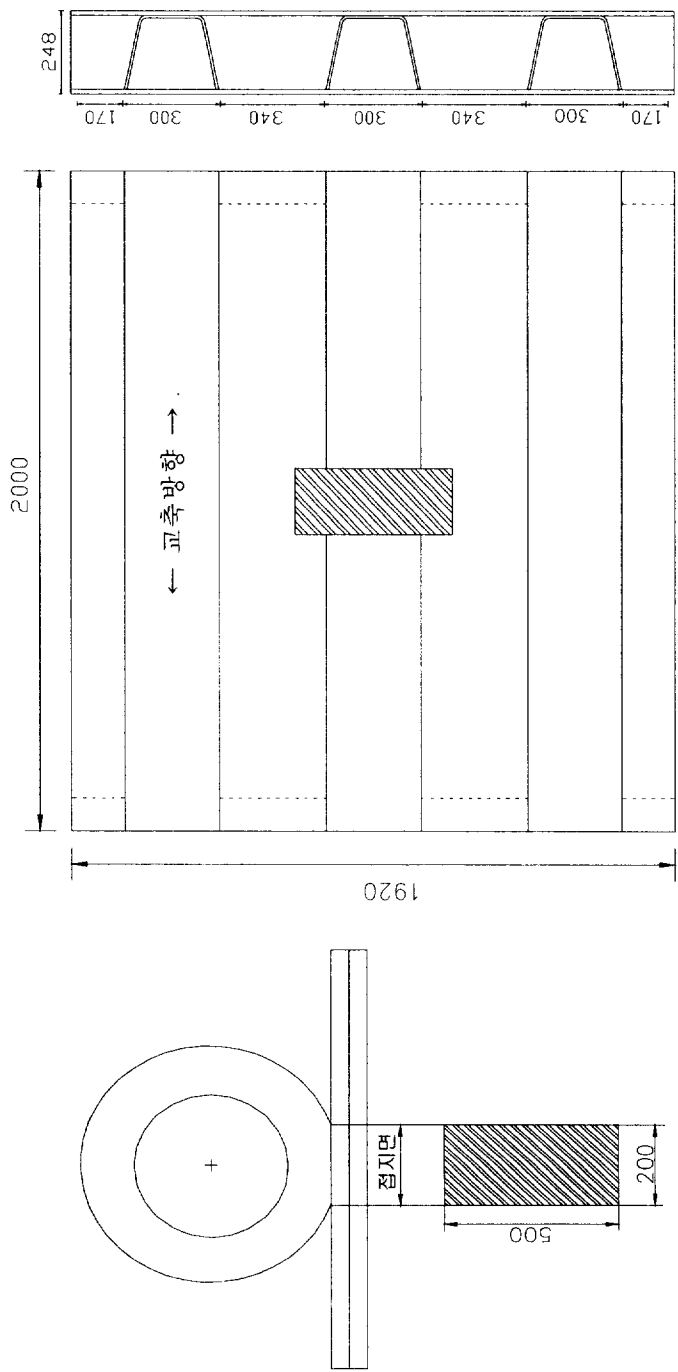


c) U형 리브의 측면 형상

그림 3.2 중간 U형 리브의 중앙부 형상

3.1.2 하중재하

해석에 재하된 하중은 도로교 설계기준(2003)에 규정된 차륜의 접지면으로 폭과 길이의 비가 2.5:1로서 하중재하 면적은 타이어 접지면적($500\text{mm} \times 200\text{mm}$)에 대해 DB-24 트럭 후륜하중($0.981\text{N/mm}^2 \approx 1\text{N/mm}^2$)을 등분포하중으로 하중의 재하위치는 그림 3.3에 나타낸 바와 같이 교축방향으로는 모델링 중앙 지점에 위치시켰으며 교축직각방향으로는 종리브의 중앙에 등분포하중의 중심을 위치시켰다^(25),26).



a) 룬하중 접지면적

b) 룬하중 재하위치

그림 3.3 룬하중 면적 및 재하위치

3.2 필렛용접이음부의 응력해석

3.2.1 해석모델

강도로교 상세부 설계지침(1997)에서 U형 리브의 두께가 6mm인 경우 필렛용접이음을 실시하되 거의 홈용입필렛용접과 같은 용입면적이 되도록 규정하고 있고, 두께 8mm의 경우는 45°로 홈의 가공을 실시한 후 완전홈용입필렛용접을 실시하도록 규정되어 있다²⁴⁾. 그러나 이러한 시방규정이 제정되기 전에 이미 시공된 강바닥판 교량에서는 두께 8mm인 U형 리브에 홈용접을 하지 않고 필렛용접으로 시공된 사례가 있으므로 필렛용접이음부의 응력집중 정도를 파악하기 위해 강바닥판 두께 14mm, 종리브 두께 8mm, 필렛용접 용입깊이를 25%로 하여 해석을 실시하였다. 그림 3.4에는 해석에 사용한 U형 리브 단면 형상을 나타낸다.

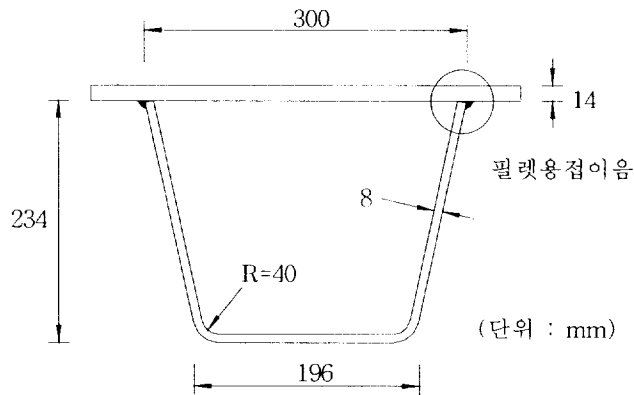


그림 3.4 필렛용접이음 단면 형상

3.2.2 응력해석 결과

그림 3.5에는 그림 3.4의 필렛용접이음부에 대한 데크플레이트와 U형 리브의 모델링 형상 및 최대 주응력을 각각 나타낸다. 그림 3.5에서 알 수 있는 바와 같이 필렛용접이음을 실시하였을 때 최대 주응력은 777.8 kg/cm^2 임을 알 수 있다.

도로교 설계기준(2003)에서 허용피로응력에 관한 규정에 의하면 다재하경로 구조물에서 종방향으로 응력을 받는 필렛용접부착물의 응력의 종류 및 범주는 200만회 이상의 허용응력범위(C등급)에서는 700 kg/cm^2 이므로 그림 3.5에서 나타낸 최대주응력 777.3 kg/cm^2 는 허용응력범위를 상회한다^{25),34)}. 따라서 U형 리브와 데크플레이트 용접시에 필렛용접을 실시할 경우 응력집중에 따른 피로균열이 발생할 가능성이 크므로 U형 리브와 데크플레이트의 용접이음은 홈용입필렛용접을 실시하여야 한다.

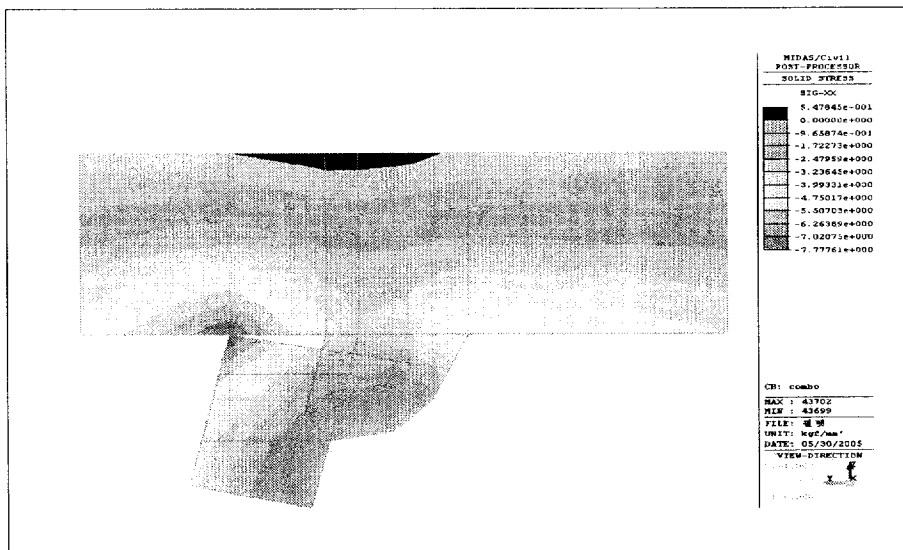


그림 3.5 필렛용접이음부의 모델링 형상 및 최대 주응력

3.3 홈용입필렛용접이음부의 응력해석

3.3.1 해석모델

데크플레이트와 U형 리브에 홈용입필렛용접이음을 실시할 경우 데크플레이트와 U형 리브의 용입깊이는 2.2.2에서 논한바와 같이 75% 또는 80%를 규정하고 있으므로 불완전 홈용입필렛용접이음이 된다. 이러한 불완전용입깊이에 따라 용접이음부에는 응력집중계수가 달라지므로 실제의 용접이음부 깊이에 따라 데크플레이트와 U형 리브의 홈용입필렛용접의 용입깊이를 변화시켜 응력해석을 실시하였다.

데크플레이트와 U형 리브의 강바닥판 용접시 용입깊이가 용접이음부의 응력분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 데크플레이트 두께 14mm, 홈 가공각도 45° 를 기준으로 하여 홈의 용입깊이를 U형 리브 두께의 70%, 80%, 90% 3개의 불완전용입용접과 100%, 110%의 2개의 완전용입용접으로 응력해석을 실시하였다^{26),28)}.

그림 3.6에는 홈용입필렛용접이음의 단면 형상을 나타낸다.

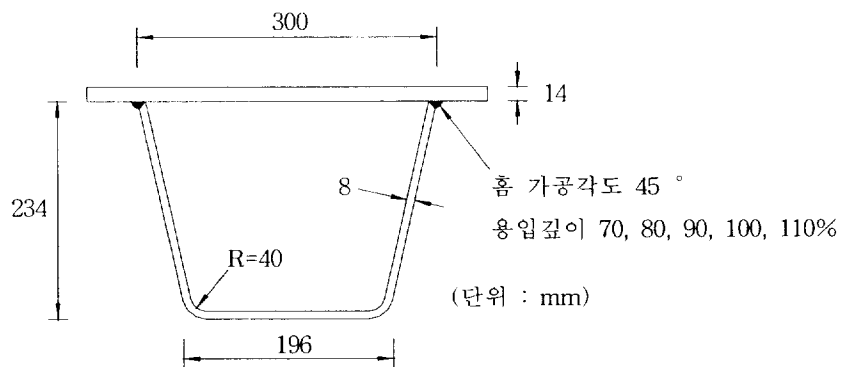
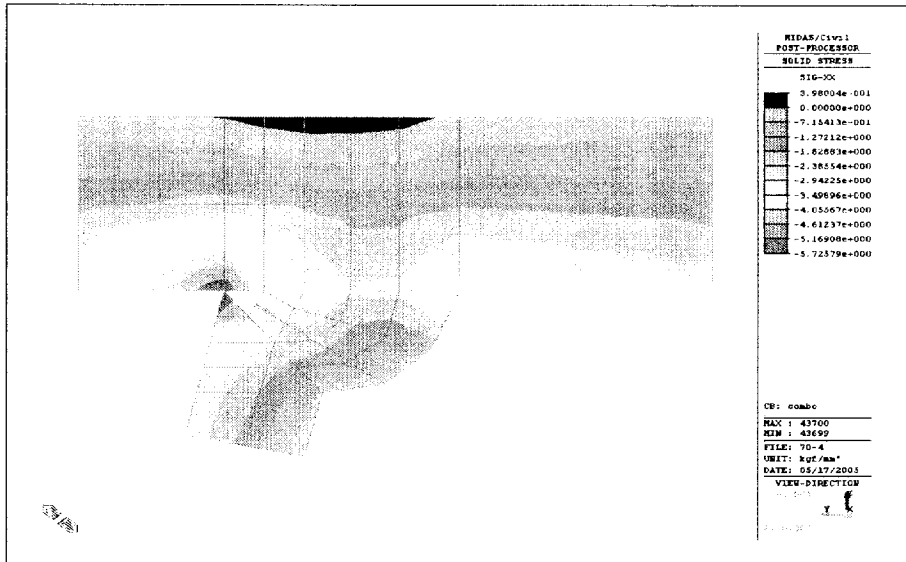


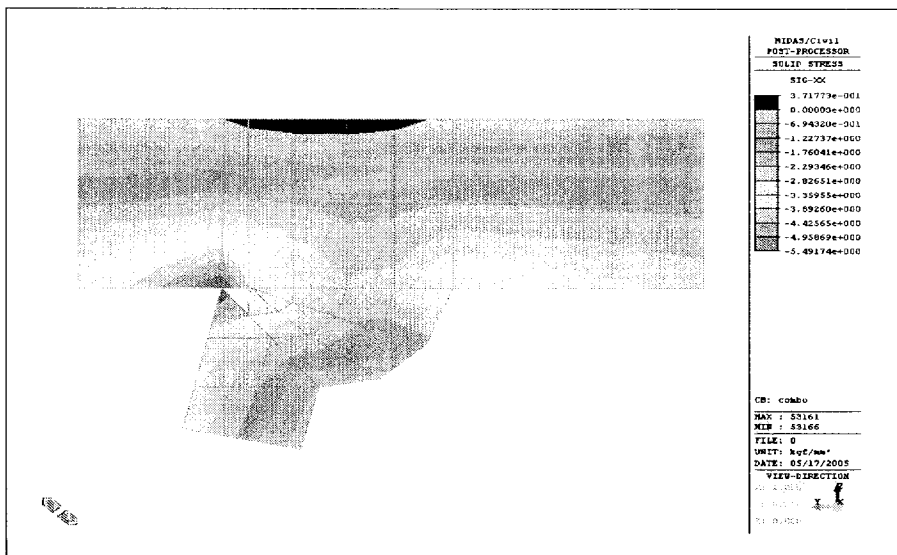
그림 3.6 홈용입필렛용접이음의 단면 형상

3.3.2 응력해석 결과

그림 3.7 a), b), c), d) 및 e)는 홈용입필렛용접에서 용입깊이가 각각 70%, 80%, 90%, 100% 및 110%일 때의 데크플레이트와 U형 리브 모델링 형상을, 그림 3.8에는 각각의 용입깊이에 대한 용접이음부 최대 주응력을 나타낸다. 그림 3.7에서 용입깊이별 최대 주응력 발생위치는 U형 리브와 데크플레이트의 내측 접촉부(U형 리브 내측)에서 발생하였다. 그림 3.8에서 알 수 있는 바와 같이 최대 주응력의 크기의 순서는 용입깊이 70%, 80%, 90%, 100%, 110% 순서로 작아짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 불완전용입 면적이 줄어들면서 응력집중이 점점 작아진 것이라고 여겨진다. 표 3.1에 AASHTO에서 규정한 용입깊이 80%를 기준으로 하였을 때의 각각의 용입깊이에 대한 주응력의 비를 나타낸다. 표 3.1에서 보면 70%인 경우는 응력이 4.3% 증가하고, 90%인 경우에는 3.3% 감소하여 80%의 응력과 비교하여 큰 차이는 없었다. 그러나 100% 완전용입인 경우 10.5% 감소하였고, 완전용입후 이면비드가 형성되는 110%인 경우에는 11.8% 감함을 알 수 있다. 즉, 불완전용입의 경우 용입깊이에 따른 응력의 영향은 크지 않지만 완전용입이음을 실시할 경우 응력이 큰 값으로 감소함을 할 수 있다. 따라서 강바닥판 교량의 시공시 데크플레이트와 U형 리브의 용접이음부는 완전용입을 하는 것이 피로균열발생을 억제할 수 있는 하나의 방안으로 여겨진다.

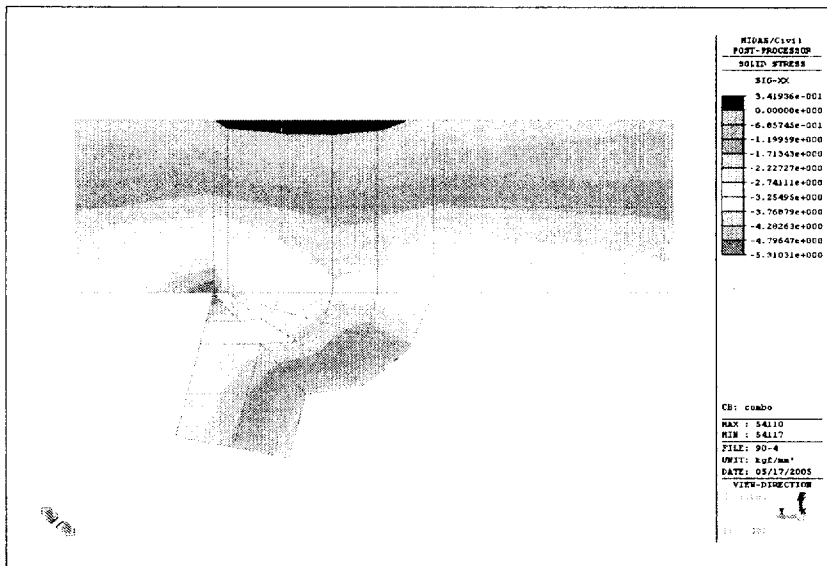


a) 용입깊이 70%

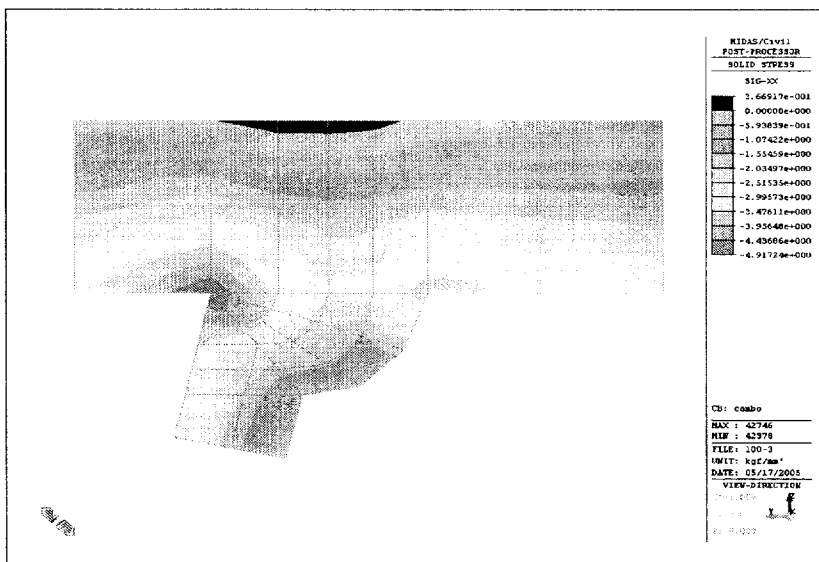


b) 용입깊이 80%

그림 3.7 홈용입필렛용접의 모델링 형상(계속)

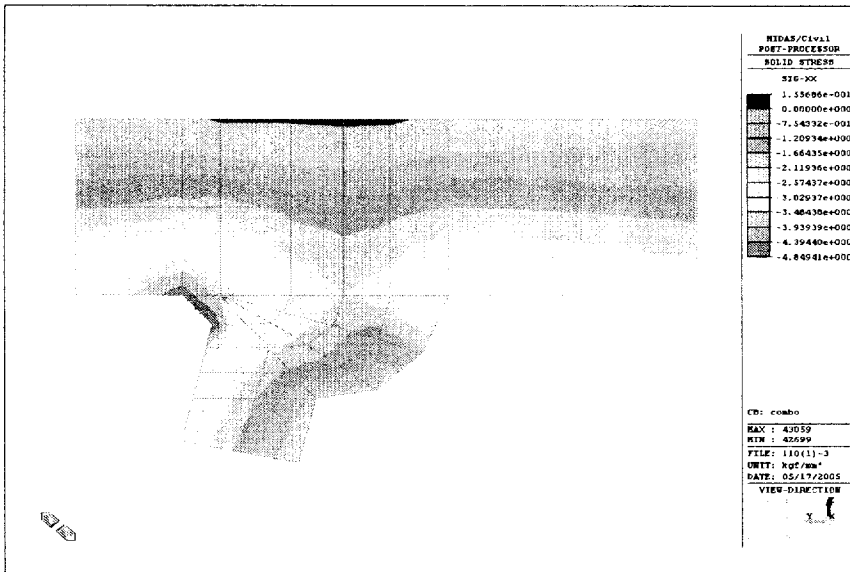


c) 용입깊이 90%



d) 용입깊이 100%

그림 3.7 홈용입필렛용접의 모델링 형상(계속)



e) 용입깊이 110%

그림 3.7 흡용입필렛용접의 모델링 형상

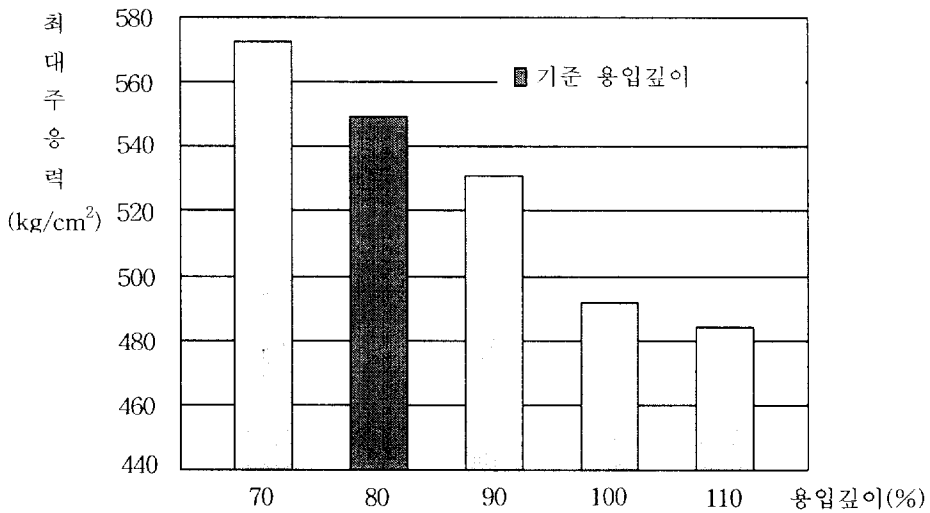


그림 3.8 용입깊이별 최대 주응력

표 3.1 용입깊이에 따른 최대 주응력

용입깊이	최대 주응력	(용입깊이 / 용입깊이 80%) 최대 주응력
70%	572.6 kg/cm ²	1.043
80%	549.2 kg/cm ²	1.000
90%	531.0 kg/cm ²	0.967
100%	491.7 kg/cm ²	0.895
110%	484.9 kg/cm ²	0.882

3.4 홈의 각도별 응력해석

데크플레이트와 U형 리브의 응력해석에서 홈 가공각도의 영향을 조사하기 위해 그림 2.7에 표시한 홈의 각도를 변화시켜 유한요소법에 의한 응력해석을 실시하였다.

3.4.1 해석모델

용접작업의 편이 및 용입깊이를 확보하기 위해 U형 리브의 단부에는 홈 가공을 실시한다. 도로교 상세부 설계지침(1997)에서는 두께 8mm 인 U형 리브의 경우 45°로 홈 가공을 실시하도록 규정하고 있다²⁴⁾. 따라서 홈 가공각도와 용접이음부의 응력집중에 대한 영향을 파악하기 위해 데크 플레이트 두께 14mm, 용입깊이 80%로 일정하게 하고 홈 가공각도를 30°, 45°, 60°로 변경하여 구조해석을 실시하였다. 그림 3.9는 U형 리브의 해석 단면 형상을 나타낸다.

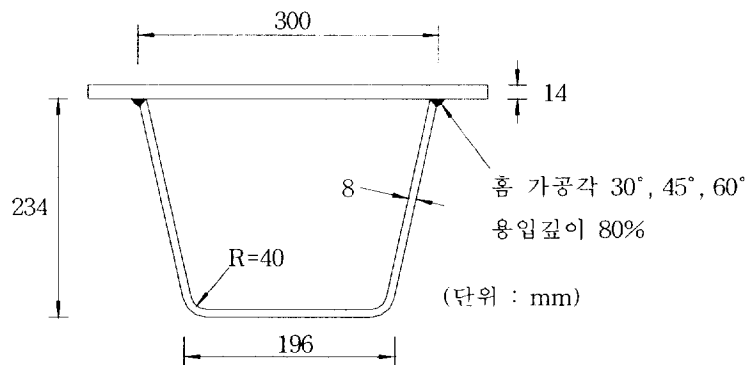
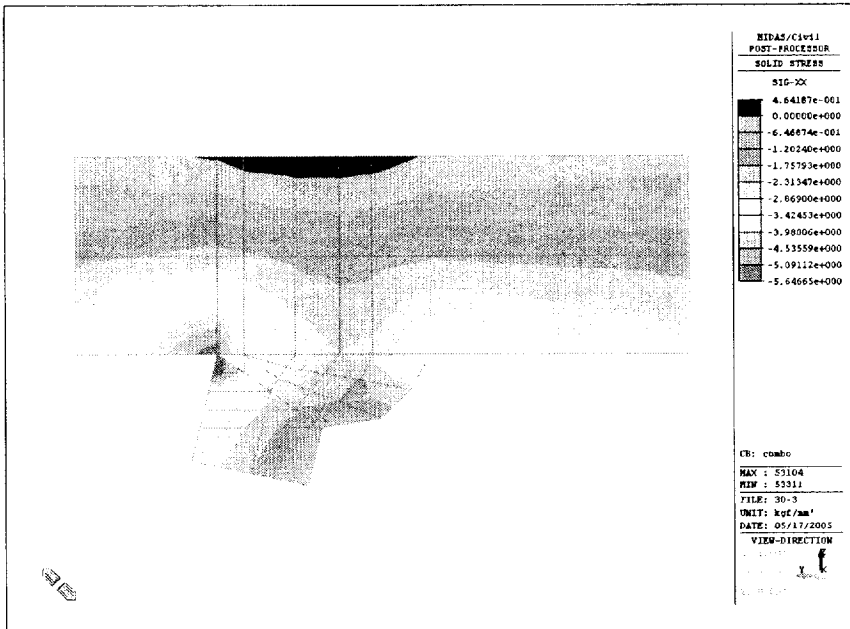


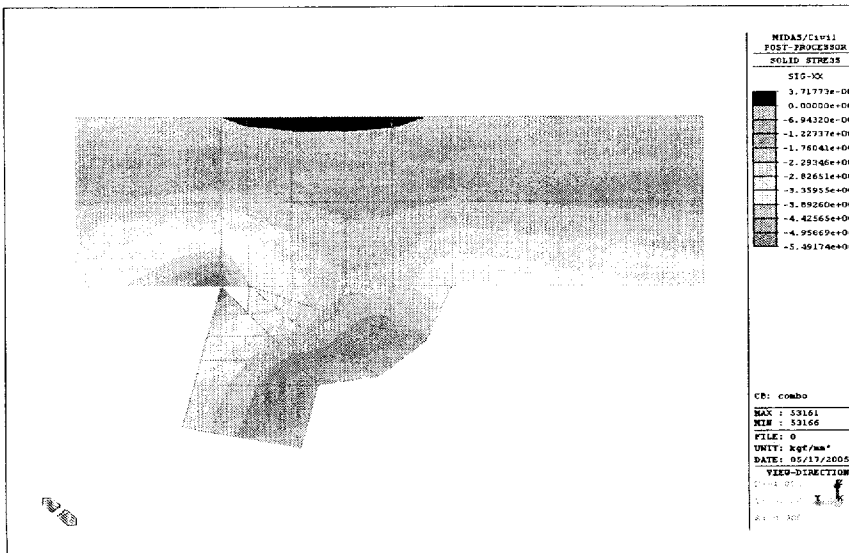
그림 3.9 해석모델 단면 형상

3.4.2 응력해석 결과

그림 3.10 a), b), c)에는 홈 가공각도가 30° , 45° , 60° 일 때의 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부에 대한 모델링 형상을, 그림 3.11에는 홈의 각도별 용접이음부의 최대 주응력을 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 홈의 각도가 30° 일 때 가장 큰 주응력이 발생하였고, 홈의 각도가 커 질수록 응력은 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 표 3.2에는 시방서에서 규정한 45° 의 응력과 비교한 결과를 나타내며, 표에서 알 수 있는 바와 같이 30° 인 경우의 주응력은 2.5% 증가하고, 60° 인 경우에는 1.7% 감소하여 홈의 각도는 용접이음부의 응력에 별다른 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 시방서 규정이 제정되기 이전에 필렛용접이음부로 시공된 교량에 대해서 보수 및 보강을 할 경우에는 U형 리브에 45° 로 홈 가동을 한 뒤 용접이음을 하는 것이 시공성 및 경제성을 고려하여 유리함을 알 수 있다.

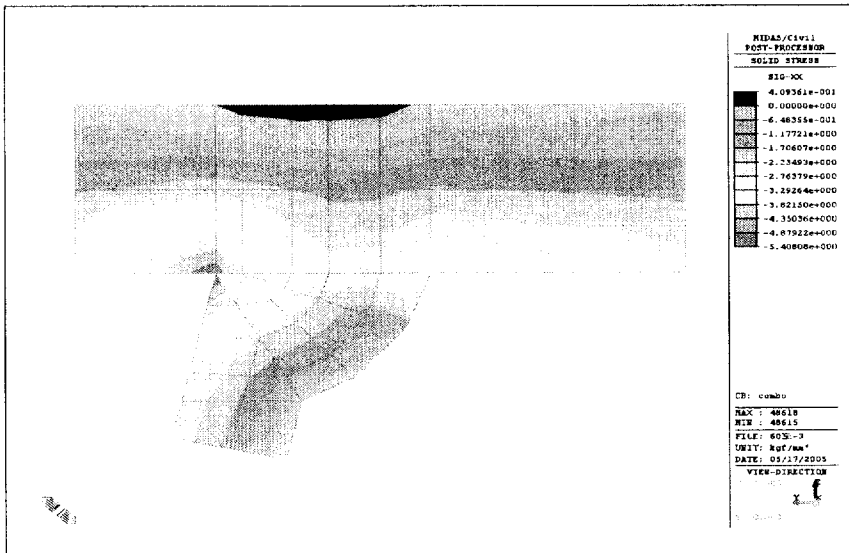


a) 홈 가공각도 30°



b) 홈 가공각도 45°

그림 3.10 홈 가공각도별 모델링 형상(계속)



c) 홈 가공각도 60°

그림 3.10 홈 가공각도별 모델링 형상

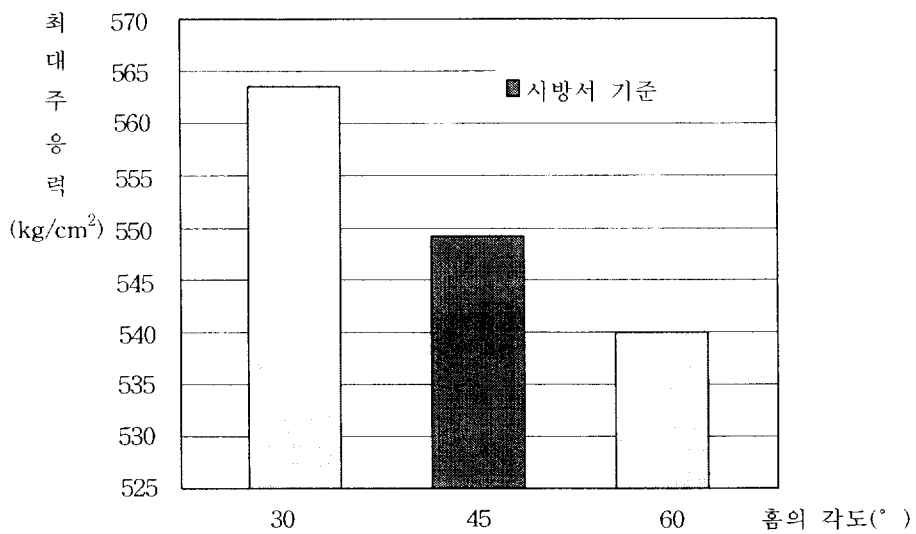


그림 3.11 홈의 가공각도별 최대 주응력

표 3.2 흙의 각도에 따른 최대 주응력

흙의 각도	최대 주응력	(흙의 각도/흙 각도 45°) 최대 주응력
30도	564.7 kg/cm ²	1.025
45도	549.2 kg/cm ²	1.000
60도	540.8 kg/cm ²	0.983

3.5 데크플레이트 두께별 응력해석

3.5.1 해석모델

강바닥판 설계에서 데크플레이트 두께는 1996년 이전 도로교 표준시방서에는 12.0mm 이상으로 규정하였으나, 1996년에 개정된 도로교 표준시방서(1996)에서는 용접이음부의 피로파괴를 방지하기 위해 데크플레이트의 두께를 14.0mm 이상으로 규정하고 있다^{23)~25)}. 그러나, 기건설된 국·내외 강바닥판 교량에서 데크플레이트의 두께 12mm가 존재하므로, 본 연구에서는 U형 리브 홈용입필렛용접의 용입깊이 80%, 홈의 각도 45°도로 일정하게 하고 데크플레이트 두께를 12, 14, 15, 16mm로 변화시켜 해석을 실시하였다. 그림 3.12에는 해석에 사용한 U형 리브 단면 형상을 나타낸다.

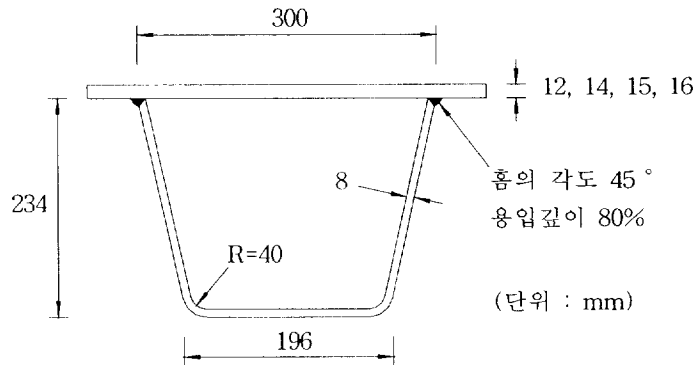


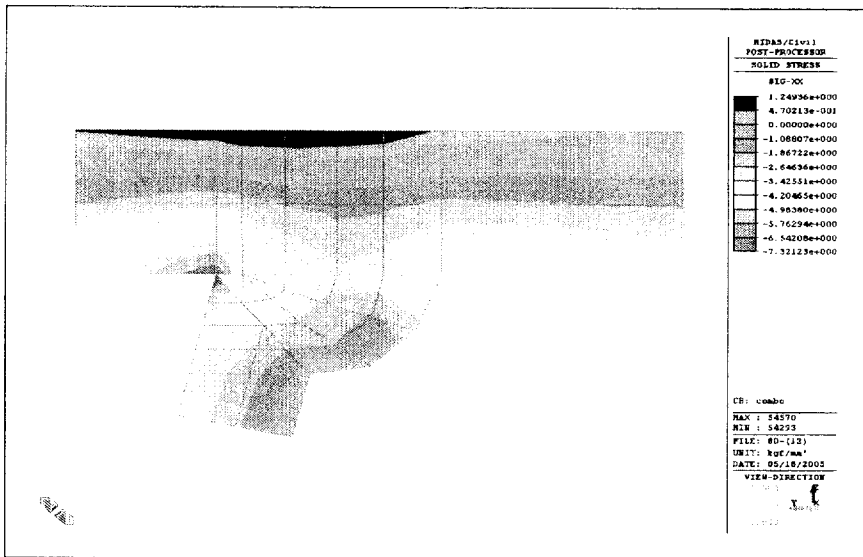
그림 3.12 해석모델 단면 형상

3.5.2 응력해석 결과

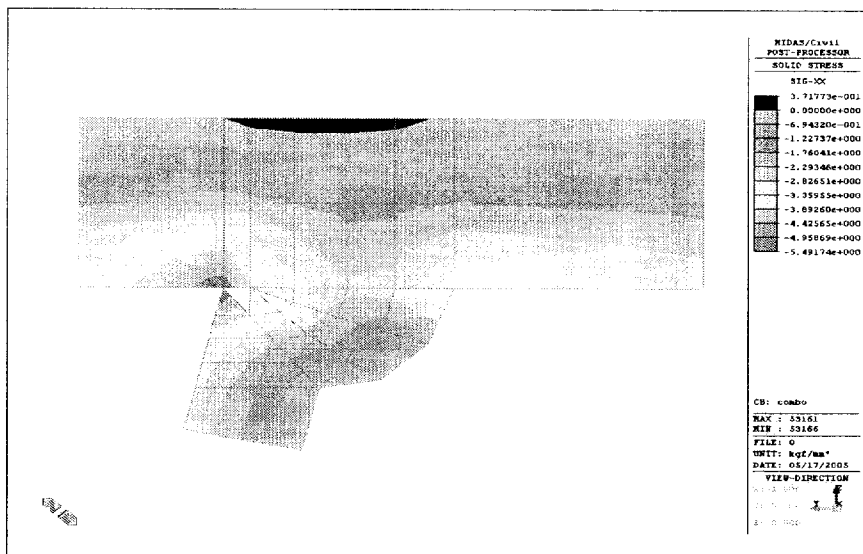
그림 3.13 a), b), c) 및 d)에는 데크플레이트 두께 12mm, 14mm, 15mm, 16mm 일 때 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부의 모델링 형상을, 그림 3.14는 데크플레이트 두께별 최대 주응력을 각각 나타낸다.

그림 3.14에서 알 수 있는 바와 같이 데크플레이트의 두께가 12mm인 경우가 가장 큰 응력이 발생했으며, 데크플레이트 두께 늘어날수록 용접이음부의 최대 주응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 강바닥판의 두께 증가에 따른 강성의 증가로 인해 나타난 결과라고 여겨진다.

표 3.3에는 응력해석 결과들을 현재 도로교 설계기준(2003)의 데크플레이트 최소두께 14mm일 때의 응력과 비교한 값을 나타낸다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 데크플레이트 두께 12mm인 경우 응력이 33.3% 증가하고, 15mm에서는 12.4%, 16mm에서는 22.9% 응력이 감소하는 것으로 나타나 데크플레이트 두께를 증가시킬수록 용접이음부의 응력은 감소함을 알 수 있다. 따라서 장래 강바닥판 교량 설계시 피로손상 및 여유를 고려하여 데크플레이트 두께는 15mm 이상으로 설계하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

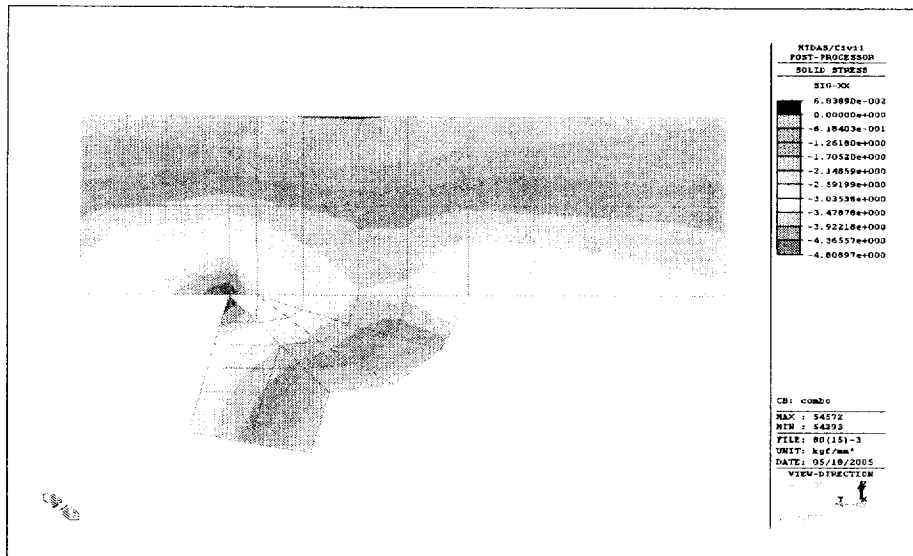


a) 데크플레이트 두께 12mm

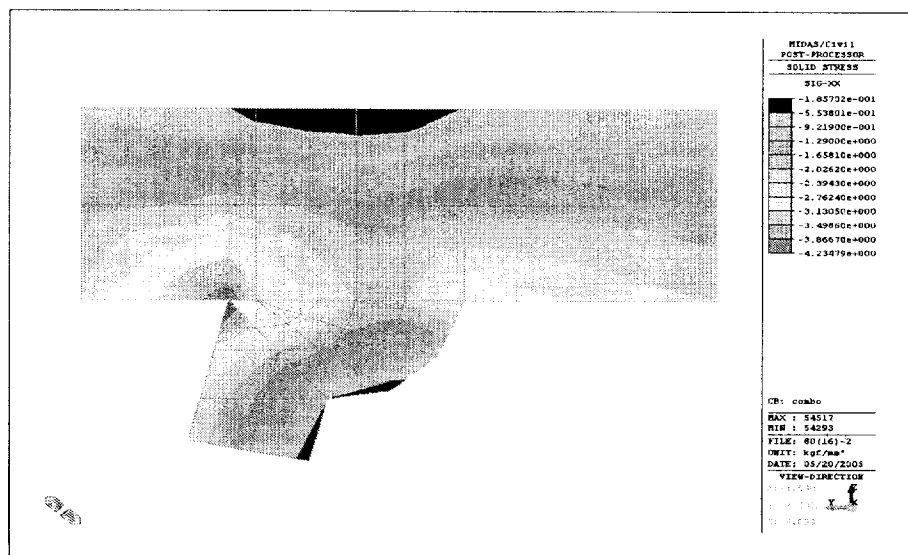


b) 데크플레이트 두께 14mm

그림 3.13 데크플레이트 두께별 모델링 형상(계속)



c) 데크플레이트 두께 15mm



d) 데크플레이트 두께 16mm

그림 3.13 데크플레이트 두께별 모델링 형상

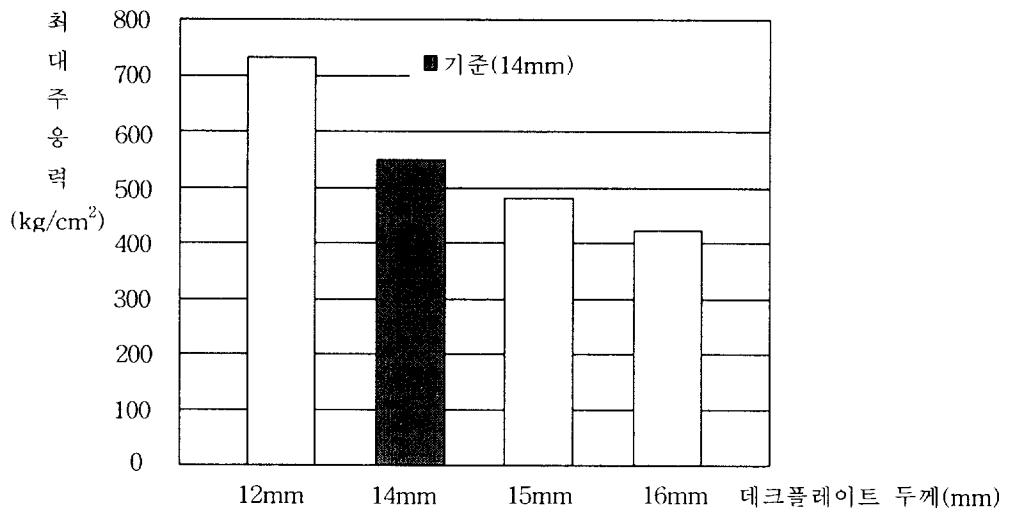


그림 3.14 데크플레이트 두께별 최대 주응력

표 3.3 데크플레이트 두께별 최대 주응력

두께	최대 주응력	(데크 두께/데크 두께 14mm) 최대 주응력
12 mm	732.1 kg/cm ²	1.333
14 mm	549.2 kg/cm ²	1.000
15 mm	480.9 kg/cm ²	0.876
16 mm	423.5 kg/cm ²	0.771

4. 결론

강바닥판교에서 많이 사용하는 데크플레이트와 U형 리브를 용접할 경우 응력집중에 미치는 인자는 많이 있다. 응력집중에 영향을 미치는 인자로서 필렛용접, 홈용입필렛용접에서 홈의 깊이, 홈의 각도, 데크플레이트 두께에 따른 응력해석을 실시하였다. 또한 현재 시방서 규정에서의 응력과 해석응력을 비교하여 최적의 조건을 비교·검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 응력해석에서 데크플레이트와 U형 리브의 용접이음에서 U형 리브의 접촉부(U형 리브 내측)에서 가장 큰 응력이 발생함을 알수 있다.
2. 필렛용접의 응력해석을 실시한 결과, 피로균열 발생을 억제하기 위해 홈용입필렛용접을 실시해야 할 것으로 여겨진다.
3. 홈용입필렛용접의 용입깊이(70, 80, 90, 100, 110%)를 변화시켜 응력해석을 실시한 결과, 70%의 용입깊이에서 가장 큰 응력이 발생하였으며, 용입깊이가 깊어질수록 응력은 적게 발생하였다. 이러한 결과를 종합하면, 불완전용입보다 완전용입을 했을 경우 응력의 감소가 크게 나타나 U형 리브 용접시 완전홈용입용접을 실시해야할 것으로 여겨진다.
4. U형 리브 단부의 홈의 각도(30° , 45° , 60°)를 변화시켜 해석을 실시한 결과, 홈 가공각도에 따른 응력의 차이는 크게 나타나지 않았음을 알 수 있다. 그러나 시방서 규정이 제정되기 이전의 필렛용접이음부에 대해서는 U형 리브를 45° 로 홈 가공하여 보수 및 보강용접이음을 실시하

여야 함을 알 수 있다.

5. 데크플레이트 두께(12.0, 14.0, 15.0, 16.0mm)를 변화시켜 응력해석을 실시한 결과, 데크플레이트 두께가 늘어날수록 응력은 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 도로교 설계기준에서는 데크플레이트의 두께를 14.0mm 이상으로 설계하도록 제시하고 있지만, 용접이음부의 피로손상 및 여유를 고려하여 데크플레이트 두께는 15mm 이상으로 설계되어야 한다고 여겨진다.

이상을 종합하면 장래 강바닥판 교량의 설계시 데크플레이트와 U형 리브 용접이음부에서의 응력은 데크플레이트 두께의 영향이 가장 크므로 데크플레이트의 두께는 15.0mm 이상, 홈용입필렛용접에서 용입깊이는 90% 이상, 홈의 각도는 45°가 가장 적절하다고 여겨진다.

참 고 문 헌

- 1) 韓國鋼構造學會, “鋼道路橋의 設計”, 鋼構造便覽, 第4卷, 1995.
- 2) 방명석 역, “강교 설계의 기초”, 도서출판 건설도서, 1999.
- 3) J. W. Fisher, “Fatigue and Fracture in Steel Bridges Case Studies”
John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- 4) E.C. Hambly, “Bridge Deck Behavior”, E&FN SPON, 1991.
- 5) 大倉 一郎, “鋼橋の疲勞”, 東洋書店, 1994.
- 6) 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ィテイル
の改良”
橋梁と基礎, 1997. 4.
- 7) 佐伯彰一・西川和廣・瀧澤 晃, “鋼床版トラフリブ形縦リブ溶接継手
の波勞試(Ⅰ), 継手形式の選定”
土木研究所資料, No. 2149 号, 11, 1984.
- 8) 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.
- 9) 日本鋼構造協會, “鋼構造物疲勞設計指針・同解説,” 技報堂, 1993.
- 10) 本州四國連絡橋公団, “鋼床版設計要領(案)”, 1997. 12.
- 11) 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.
- 12) 박영석, 심낙훈, “종리브내 비틀에 의한 강상판 용접이음부의 피로강
도에 관한 실험적 연구”
대한토목학회 논문집 제 22권, pp.905~912, 2002. 7

- 13) 大橋治一, 勝井裕司, 三木千壽, 小野秀一, 村越潤, “鋼床版の現場継手
部近傍の局部應力と變形舉動”
日本土木學會論文集, No. 556/I-38, pp. 65~76, 1997.1.
- 14) 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.
- 15) C. P. Heins and C. T. G. Looney, “Bridge Analysis Using
Orthotropic Plate Theory”
Journal of the Structural Division ASCE, Vol.94, No.ST2, Proc.,
Paper 5822, pp.565~592, 1968.
- 16) F. W. Fisher, “Full-scale Fatigue Test of the Williamsburg
Bridge Orthotropic Deck,”
ASCE Structures Congress, Chicago, IL, Proceedings Vol. 1, pp.
329-336, 1996.
- 17) 박영석, 심낙훈, “실물 모형 강상판 구조상세부의 피로강도에 관한 실
험적 연구”
대한토목학회 논문집 제 22권, pp.913~924, 2002. 7
- 18) 조효남, 정지승, 민대홍, “자동화설계를 위한 강상판교의 해석모델,”
한국강구조학회논문집, 제11권, 4호, 1999, pp.93~113.
- 19) 李東郁, 李在五, “橋梁鋼床版의 壽命評價에 關한 研究”
韓國鋼構造學會論文集, 第4卷, 第1號, pp.129~141, 1993.
- 20) Hasegawa, Kondo, Yamada and Ishizaki, “Verification of Fatigue of
Box Girder Bridges's Orthotropic Steel Deck”
Papers of the Structural Engineering, Vol. 35A, 1989.

- 21) Takeshi Mori, Dong-Uk Lee, Chang Ib Kang and Hiroshi Tanaka
 "Influence of weld penetration on fatigue strength of single-sided
 fillet welded joints"
 EASEC-9, SSM-2, 2003. 12. 16
- 22) Miki, C., Mori, T., Sakamoto, K. and Sasaki, T., "An analysis of
 fatigue crack growth from blowholes in longitudinal welded joints"
 Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 4, No. 2, pp.289~297, October
 1987.
 WRC Bulletin, 295, Welding Research council. New York, 1984.
- 23) 대한토목학회, "도로교 표준시방서", 건설교통부, 1996.
- 24) 건설교통부, "강도로교 상세부 설계지침", 1997.
- 25) 대한토목학회, "도로교 설계기준·해설", 기문당, 2003.
- 26) 日本道路協會, "道路橋示方書・同解説", 2002.
- 27) 大橋治一, 三木千壽, 梁取直樹, 小野秀一, "厚肉デツキプレートと大型
 トラフリブで構成された鋼床版の實大モデル載荷試験による構造特性"
 日本土木學會論文集, No. 647/I-51, pp.295~303, 2000. 4.
- 28) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications I, II Third edition,
 2004.
- 29) 정병욱, "강상판 상형교의 설계에 관한 연구"
 부경대학교 공학석사 학위논문, 2004.
- 30) 최성민, "강상판 U리브 현장용접이음부의 응력거동"
 부경대학교 공학석사 학위논문, 2004.
- 31) 강창입, "강바닥판 U형 리브 현장용접이음부 피로강도에 관한 연구"
 부경대학교 공학박사 학위논문, 2005.
- 32) 李東郁・堀川 浩浦, "Fatigue Strength of Oneside-Welded Joint

with Baking Strip.”

日本土木學會論文集, I -4, 352號, pp.231~237, 1985. 10.

- 33) 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. 30

- 34) Dong-Uk Lee, Seung-Kyu, Kook and Chang-Ib Kang, “A Shape Control of Welded Joints to Improve Fatigue Strength”

한국강구조학회 논문집, pp.479~492, 2004. 8. 30

감사의 글

인생의 기나긴 여정속에 중요한 한부분을 차지하는 배움과 지식의 축적은 그 무엇과도 바꿀 수 없는 재산이라 할 수 있습니다.

먼저 이러한 배움의 길을 인도하고 지도하여 주신 이동욱 교수님께 진심으로 감사 드립니다.

또한 바쁘신 와중에도 미흡한 논문을 지도하고 심사하여 주신 국승규 교수님과 김명식 교수님께도 깊은 감사의 마음을 드립니다.

그리고 2년 동안 대학원을 무사히 마칠 수 있도록 항상 격려와 용기를 주신 토목공학과 전 교수님께 충심으로 감사드리며, 본 논문이 완성되기까지 도움을 아끼지 아니한 강구조 연구실 학우 여러분에게도 진심으로 고마움을 전합니다.

끝으로 배움과 지식이라는 재산을 얻을 수 있도록 항상 믿음과 격려로 지켜봐 주신 가족과 여러 직장 동료들과 이 영광을 함께 나누고져 하오며 앞으로도 계속 부경대와의 인연의 정을 맺어 갈 수 있도록 노력하겠습니다.