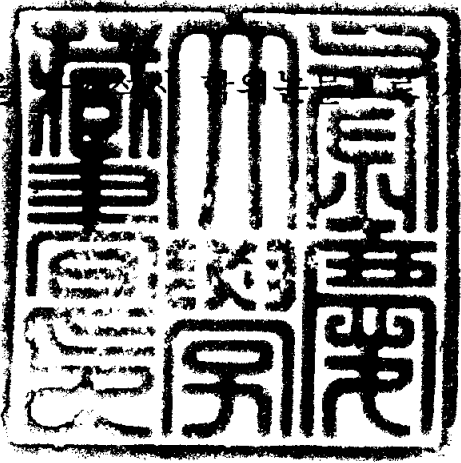


공학석사 학위논문

강상형교 피로수명 평가에
관한 연구

지도교수 이 동 욱

이 논문을 에 출함



2003년 8월

부경대학교 산업대학원

건설공학과

김명환

이 논문을 김명환의 공학석사
학위논문으로 인준함

2003년 6월 21일

주 심 공 학 박 사 장 희 석



위 원 공 학 박 사 김 명 식



위 원 공 학 박 사 이 동 욱



목 차

그림 목차	ii
표 목차	iii
ABSTRACT	iv
1. 서론	1
2. 피로손상사례 분석	3
3. 피로수명해석의 기본이론	5
3.1 응력변동해석	5
3.2 피로설계하중	5
3.3 응력범위의 계산	6
3.4 피로강도	7
3.5 이음의 강도등급 분류	10
3.6 응력계산	15
3.7 피로균열진전속도	17
3.8 등가응력 및 응력확대계수	20
4. 피로안전성 및 피로수명 평가	21
4.1 교량의 구성 및 제원	21
4.2 피로수명평가의 기본 가정 및 흐름도	24
4.3 피로안전성 및 피로수명평가	26
5. 결론	37
참고문헌	38
감사의 글	42

그림 목차

- 그림 2.1 피로손상사례의 원인
- 그림 3.3.1 레인플로우법
- 그림 3.4.1 피로설계곡선
- 그림 3.7.1 강재에서의 피로균열 성장의 개략도
- 그림 4.1.1 교량의 개략도
- 그림 4.1.2 피로수명평가 위치의 종단면도
- 그림 4.2.1 피로안전성 및 피로수명 평가 흐름도
- 그림 4.3.1 교통량조사에서 얻어진 차종별 차량대수
- 그림 4.3.2 영향면 모델링
- 그림 4.3.3. 대상위치 영향면의 표시
- 그림 4.3.4 피로평가위치의 이음상세 및 강도등급
- 그림 4.3.5 레인플로우법
- 그림 4.3.6 점중·점감파
- 그림 4.3.7 응력범위빈도분포
- 그림 4.3.8 피로균열진전수명

표 목차

- 표 3.4.1 기본허용응력범위(도로교시방서 지침)
- 표 3.5 a) 비용접이음의 강도등급 분류
- 표 3.5 b) 횡방향 맞대기 용접이음의 강도등급 분류
- 표 3.5 c) 종방향 용접이음의 강도등급 분류
- 표 3.5 d) +자 용접이음의 강도등급 분류
- 표 3.5 e) 거셋트 용접이음의 강도등급 분류
- 표 3.7.1 C와 m 및 ΔK_{th}
- 표 4.2.1 초기균열모델
- 표 4.3.1 교통량 조사에서 얻어진 차종구성
- 표 4.3.2 통행차량의 구성비 및 혼입률
- 표 4.3.3 피로안전성 평가

Estimation of Fatigue Life for a Steel Box Bridge

Myung-Hwan Kim

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

ABSTRACT

We investigated the origin of fatigue damages on steel girders to estimate the fatigue safety and fatigue life on the welded joint of steel box girder. Practically, we performed stress variation analysis on 9-span continuous steel box girder, and analyzed the magnitude of initial crack which influences the fatigue crack propagation life. Accordingly stress variation analysis obtained the frequency distribution of stress scope applying rain flow method to the stress value which is obtained using the simulation load value assuming actual traffic flow.

In the fatigue safety test, the values at bottom flange butt welded joint, molding wave and transverse stiffener fillet welded joint and bottom flange and diaphragm fillet welded joint were over the design stress limit so that the fatigue safety was satisfactory. In analysis of fatigue crack propagation, the fatigue life was infinite value if the undercut value was below 0.5mm at bottom flange butt welded joint.

Therefore the tested bridges for traffic vehicles satisfied the design lifetime, 100 years, and estimated safe enough at 0.3mm undercut regulated by the highway bridge's specification.

1. 서 론

교량은 안전성과 사용성 및 내구성을 충분히 갖도록 설계하여야 하는데, 이것은 성수대교 낙교와 같은 붕괴사고가 발생할 경우에는 경제적, 사회적 파급효과가 매우 크기 때문이다. 그동안 국내에 건설된 교량을 살펴보면 과거의 단기간 교량에서 80년대와 90년대를 거치면서 점차 장대교의 건설이 두드러지고 있다¹⁾. 장대교의 건설에서는 강교로 설계하는 경우가 많으며, 강교에서는 주로 강상형교(Steel Box Girder)가 많이 채택되고 있다^{2)~5)}. 현재 국내에서 가장 많이 설계·시공되고 있는 이 강상형교는 비틀림 강성과 횡방향 하중분배 효과가 우수하고 가설중의 안전성과 완성후의 내하력이 매우 뛰어난 구조물인 것으로 알려져 있다^{5),6)}.

한편 교량의 설계는 전체적인 구조설계와 상세부 설계로 크게 나누어진 다. 전체적인 구조설계는 구조해석으로 커버할 수 있지만 용접이음부와 같은 상세부 설계는 구조적, 재질적, 형상적 요인이 복합적으로 작용하여 구조해석만으로 커버할 수 없는 부분도 있다. 또한 차량의 대형화, 중량화가 촉진되고 차륜의 재하회수도 증가함에 따라 활하중에 의한 교량부재의 이음부에 피로균열이 발생되고 있는 예가 종종 보고되고 있다^{7)~13)}. 통상 강구조물에서 파괴역학적 개념을 고려하지 않는 기존설계방법은 항복응력에 대한 안전계수를 고려하여 설계하는 것이 일반적이지만, 대부분의 강구조물의 이음부에는 노치나, 용접결함등으로 인한 기하학적인 형상 불연속부가 존재하며, 형상 불연속부에는 응력집중이 일어나게 된다. 따라서 이러한 응력집중이 발생하는 결함부는 반복하중이 작용하는 경우에는 파괴의 기점이 되기도 한다^{14)~23)}.

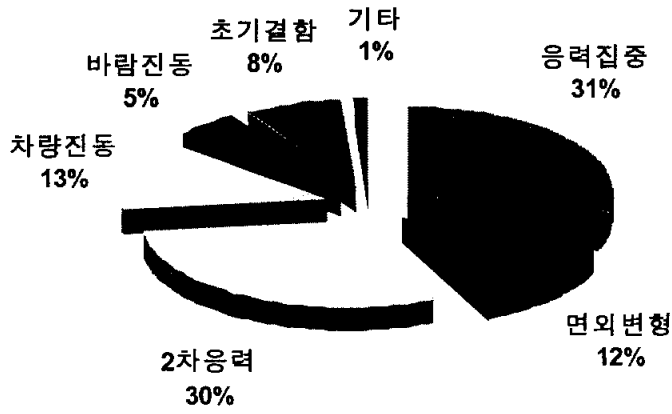
일반적으로 교량 부재의 피로수명은 통행차량하중 및 통행회수에 의한 응력범위의 크기 및 응력반복회수에 의해 지배되므로, 피로수명평가의 기

본은 교량의 부재가 공용기간중에 받는 응력변동에 대해 손상이 생기지 않도록 설계하여야 한다^{24)~26)}. 그리고, 피로수명평가 위치는 교량 전체의 안전성 및 기능상에 영향을 미칠 염려가 있는 부재의 응력범위가 최대로 발생하는 위치에 대해 피로평가를 실시하여야 한다^{27),28)}.

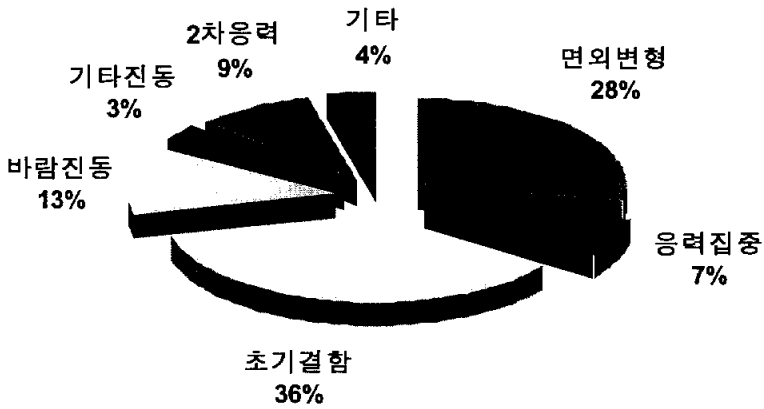
본 연구에서는 강상형교의 용접이음부에 대한 피로안정성 및 피로수명을 평가하기 위해 강교량의 피로손상사례의 원인을 조사하고 강상형교 용접이음부 피로수명해석에 관한 기초적 기본이론을 정리하였다^{20),27)~30)}. 피로수명해석에서 피로균열의 진전에 영향을 미치는 응력확대계수와 초기균열의 크기를 평가하였다^{14),20)}. 또한 도로교 시방서에서 피로설계에 대한 상세가 부족하여 피로설계가 원활히 수행되지 않은 부재가 있으므로 국내외의 시방규정을 이용하여 9경간 연속 강상형교를 대상으로 응력변동해석을 실시하고 피로균열진전수명에 미치는 초기균열의 크기를 해석하였다^{31)~39)}. 응력변동해석은 실제교통흐름을 가정한 시뮬레이션하중을 이용하여 구한 응력값에 라인플로우법을 적용하여 응력범위 빈도분포를 구하였다.

2. 피로손상사례 분석

세계각국에 있어서 피로 및 취성과괴를 원인으로 하는 강교량의 피로손상사례는 다수 보고되고 있는데^{3),13),15)~17),28),30)}, 이와 같이 피로손상은 강교량의 공용년수가 경과함에 따라 부재의 사용성과 내구성을 저하시키는 주요한 인자로서 작용하고 있다¹⁶⁾. 일본 및 기타 외국에서 강교량에서 구조부재의 피로손상에 영향을 미치는 원인별 사례를 그림 2.1과 같이 나타낸다^{15)~17),28),30)}. 그림 2.1에서 알 수 있는 바와 같이 일본이나 기타 외국의 경우 초기결함과 이로 인한 응력집중 및 면외응력으로 인한 2차응력이 피로손상원인의 약 80%를 차지하고 있을 정도로 강구조물에서의 피로손상은 일반적으로 부재의 이음부 또는 접합부에서 주로 발생하고, 특히 가로보(Cross Beam), 세로보(Stringer), 수직브레이싱(Vertical Bracing), 수평브레이싱(Lateral Bracing) 등의 2차부재와 주형 등의 1차 부재와의 이음부에서 발생되어지고 있다^{16),17)}.



(a) 일본의 경우



(b) 기타 외국의 경우

그림 2.1 피로손상사례의 원인

3. 피로수명해석의 기본이론

3.1 응력변동해석

응력변동해석은 대상 구조물을 선택하고 구조물에 대한 피로설계하중을 설정한다. 피로설계하중이 구조물을 이동할 때 부재에 생기는 응력변동해석은 라인플로우법을 이용한다^{30),32),33)}.

3.2 피로설계하중

피로설계하중은 설계수명 중에 구조물에 작용하는 하중의 상태를 충분히 나타낼 수 있는 표준하중 또는 시뮬레이션하중을 이용한다. 표준하중은 국내외의 기준에 기초하여 대표하중단위와 최대하중단위 및 복수의 하중단위 3종류로 분류되고, 최대하중단위는 대표하중단위의 중량에 x 배로 한다. 시뮬레이션하중은 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 실제하중의 크기 및 순서로 설정한다^{30),32)}.

1) 하중단위

하중단위는 구조물의 사용목적 및 예상되는 상황에 따라 설정하며 단위기간 내에 작용하는 하중을 충분히 나타낼 수 있는 하중의 크기와 빈도 및 위치와 이동에 의해 주어진다.

2) 대표하중단위

설계계산을 실시하기 위해 복수의 하중단위를 대표하는 단수의 하중단위 또는 변동하는 하중의 크기를 대표하는 하중단위를 피로설계하중으로 한다.

3) 최대하중단위

최대하중단위는 설계수명 중에 구조부재에 최대응력범위를 발생하게 하는 하중단위이다. 하중단위 혹은 대표하중단위에서 최대의 응력범위를 나타낼 수 없는 경우에는 최대하중단위를 간편 피로조사를 실시할 때에 이용한다.

4) 시뮬레이션하중

실제의 교통류를 가정한 활하중, 즉 교통류를 교통량과 그 차종구성에 대표하는 하중의 배열, 중량 및 차량간격을 확률변량으로 한 활하중이다.

3.3 응력범위의 계산

자동차 하중이 교량의 상부를 통과할 때에 교량의 각 부재에 발생하는 응력은 그림 3.3.1 a)에 나타낸 바와 같은 변동파형을 나타낸다³²⁾. 이 변동파형에 대응하는 공칭응력과 시간과의 관계를 그림 3.3.1 b)에 나타낸다. 그림에서 산과 계곡 차의 절대값을 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{i-1}, r_i, r_{i+1}, \dots$ 로 나타내고, $r_{i-1} \geq r_i < r_{i+1}$ 의 조건이 성립할 때마다 r_i 를 추출한다. 이 작업을 반복하면 그림 3.3.1 c)에 나타낸 바와 같이 점증·점감하는 응력변동파형이 얻어진다. 이때 최대극대값과 최소극소값의 차, 2번째 극대값과 극소값의 차, \dots , 를 응력범위로 계산한다. 이 방법은 응력변동의 극값 수열을 단축시켜 계산기의 기억용량과 계산시간을 절약시키는 효과가 있다. 이와 같이 본 연구에서 응력범위빈도분포의 계산은 레인플로우법을 사용하였다.

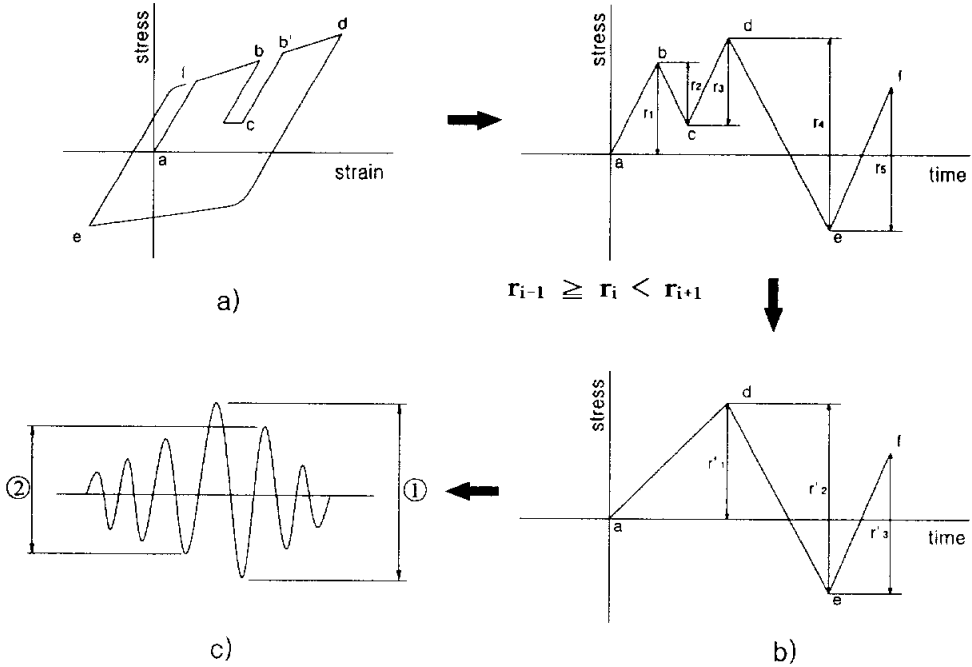


그림 3.3.1 레인플로우법

3.4 피로강도

수직응력을 받는 이음부에 대한 피로설계곡선을 그림 3.4.1에 나타낸다. 피로설계곡선에 대한 강도등급은 표 3.4.1에 나타내며 2×10^6 회의 응력반복수에 대하여 기본허용응력범위 ($\Delta\sigma_f$), 일정진폭응력 및 변동진폭응력에 대한 응력범위의 파단한계 ($\Delta\sigma_{ce}$, $\Delta\sigma_{ve}$)가 정해진다³²⁾. 일정진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계는 변동진폭응력의 응력범위성분이 모두 그 이하가 되면 피로조사가 필요하지 않는 한계값을 나타낸다. 그러나 변동진폭응력의 응력범위성분이 일정진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계를 초과하는 경우에는 피로손

상에 기여하지 않는 응력범위의 한계값으로 변동진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계를 이용한다. 피로설계곡선식은 식 (3.4.1)로 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma^m \cdot N &= C_0 & (\Delta\sigma > \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \\ N &= \infty & (\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.4.1)$$

여기서, $C_0 : 2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m$

$\Delta\sigma_f : 2 \times 10^6$ 회 기본허용응력범위

$m : 3$ (피로설계곡선 기울기)

N : 반복회수

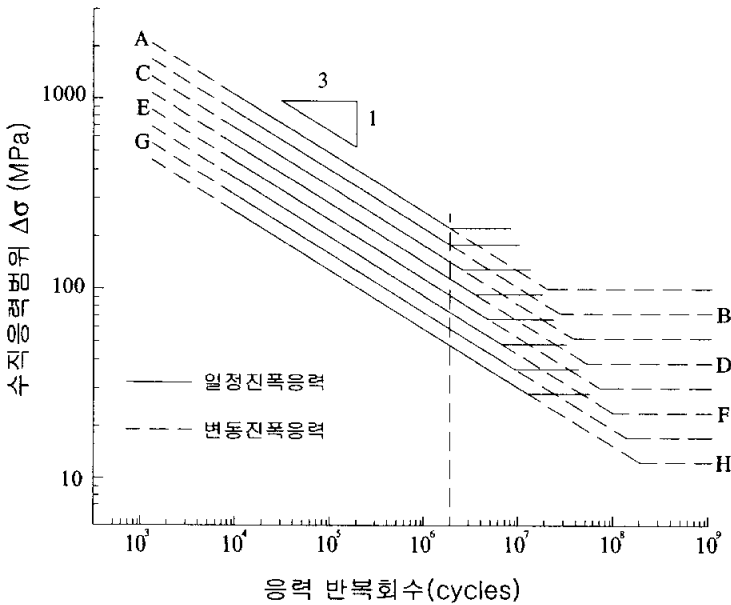


그림 3.4.1 피로설계곡선

표 3.4.1 기본허용응력범위(도로교시방서 지침)

강도 등급		응력범위의 타절한계(MPa)	
등급	2×10^6 에 대한 기본허용응력범위 $\Delta\sigma_f$ (MPa)	일정진폭응력	변동진폭응력
A	190	190(2.0×10^6)	88(2.0×10^7)
B	155	155(2.0×10^6)	72(2.0×10^7)
C	125	115(2.6×10^6)	53(2.6×10^7)
D	100	84(3.4×10^6)	39(3.4×10^7)
E	80	62(4.4×10^6)	29(4.4×10^7)
F	65	46(5.6×10^6)	21(5.6×10^7)
G	50	32(7.7×10^6)	15(7.7×10^7)
H	40	23(1.0×10^7)	11(1.0×10^8)

3.5 이음의 강도등급 분류

용접이음부의 강도등급의 분류는 도로교 시방서의 지침에 의한다^{18),32)}.

표 3.5 a) 비용접이음의 강도등급 분류

이음 종류		강도 등급 ($\Delta\sigma_f$)	비 고
1. 강판 평강	(1) 표면 기계 마감 (조도 50s 이하)	A (190)	
	(2) 흑피, 가스절단 (조도 100s 이하)	B (155)	
	(3) 흑피, 가스절단 (흔적 제거)	C (125)	
2. 형강	(1) 흑 피 부 착	B (155)	
	(2) 흑피, 가스절단 (조도 100s 이하)	B (155)	
	(3) 흑피, 가스절단 (흔적 제거)	C (125)	
3. 이음 없는 관		B (155)	
4. 필렛 용접 모재	(1) $1/5 \leq r/d$, 절단면 조도 50s 이하	B (155)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$, 절 단면조도 50s 이하	C (125)	
	(3) $1/5 \leq r/d$, 절단면 조도 100s 이하	C (125)	
	(4) $1/10 \leq r/d < 1/5$, 절 단면조도 100s 이하	D (100)	

표 3.5 b) 횡방향 맞대기 용접이음의 강도등급 분류

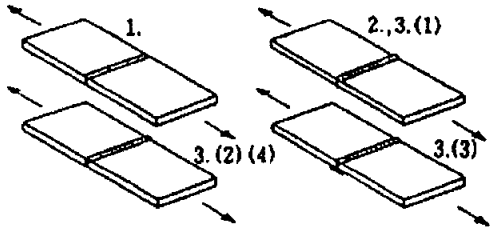
이음 종류		강도등급 ($\Delta\sigma_f$)	비고
1. 덧살 제거이음		B (155)	 <p>※ 완전용입 용접부 건전 ※ 테이퍼 용접부 경사 1/5 이하 ※ 깊이 0.5mm 이상 언더컷 제거 ※ (1., 2.) 마감 : 언더컷 없음. 마감방향 응력방향과 평행.</p>
2. 토우 마감이음		C (125)	
3. 비마감 이음	(1) 양면 용접	D (100)	
	(2) 양호한 편면용접 형상	D (100)	
	(3) 뒷댐보강 편면용접	F (65)	
	(4) 뒷면 형상 확인 불가 편면용접	F (65)	

표 3.5 c) 종방향 용접이음의 강도등급 분류

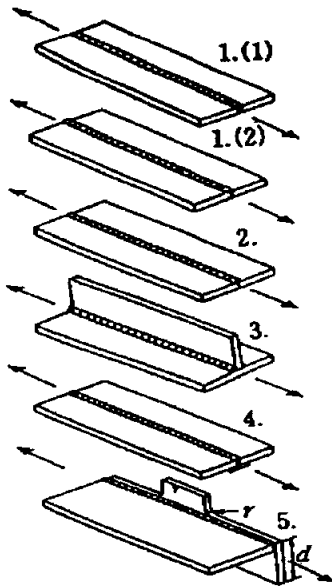
이음 종류		강도등급 ($\Delta\sigma_f$)	비 고
1. 완전용입 용접 (용접부 건전)	(1) 덧살제거	B (155)	
	(2) 비마감	C (125)	
2. 부분용입 용접이음		D (100)	
3. 필렛 용접이음		D (100)	
4. 뒷담보강 용접이음		E (80)	
5. 거섯 필렛 용접 이음	(1) $1/5 \leq r/d$	D (100)	※ (1.(2), 2., 3.) 용접비드 표면 제거 ※ (2., 3.) 내부결함(블로홀 등) 폭 1.5mm, 높이 4mm 미만인 경우 피로등급 C
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$	E (80)	

표 3.5 d) 십자용접이음의 강도등급 분류

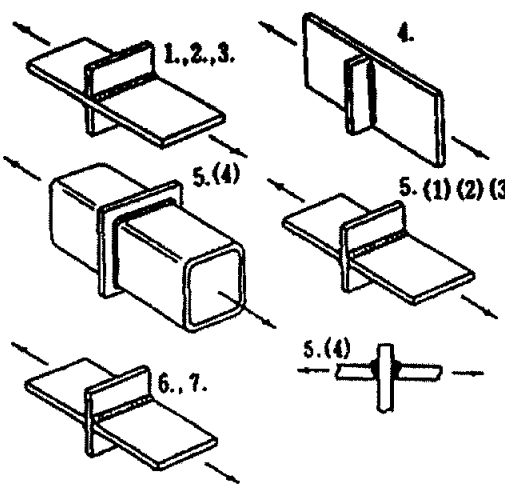
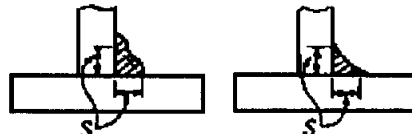
이음 종류		강도 등급 ($\Delta\sigma_f$)	비 고	
하중비전달형	1. 미끄럼 토우 필렛이음	D (100)		
	2. 토우 마감 필렛이음	D (100)		
	3. 비마감 필렛이음	E (80)		
	4. 시·종점 필렛이음	E (80)		
하중전달형	5. 완전용입용접	(1) 미끄럼 토우	D (100)	
		(2) 토우마감	D (100)	
		(3) 비마감	E (80)	
		(4) 중공 단면 (편면용접)	F (65)	
	6. 토우 파괴	(1) 미끄럼 토우	E (80)	<p>※ (2., 5.(2), 6.(2)) 마감 : 언더컷 제거. 그라인더 마감 응력방향과 평행</p> <p>※ (1., 5.(1), 6.(1)) 언더컷 제거</p> <p>※ (3., 4., 5.(3)(4), 6.(3)(4)) 깊이 0.5mm 이상 언더컷 제거</p> <p>※ (7.) 목두께 단면적 : (목두께)×(용접길이)로 구함</p>
		(2) 토우마감	E (80)	
		(3) 비마감	F (65)	
		(4) 시·종점 이음	F (65)	
	7. 루트파괴 (목두께단면)		H (40)	 <p>개선, 부분용입 필렛용접 : 목두께는 $(s + \text{개선깊이})/\sqrt{2}$</p> <p>※ (7.) 용접각장s 판두께 0.4 미만인 경우 적용범위 외로 함</p>

표 3.5 e) 거셋트 용접이음의 강도등급 분류

이음 종류		강도등급 ($\Delta\sigma_p$)	비 고
면 외 거 세 트	1. 거셋트 필렛, 개선용접 ($l \leq 100\text{mm}$)	(1) 토우 마 감 E (80)	
		(2) 비마감 F (65)	
	2. 필렛 거셋트 개선용접 이음 (필렛 마감)	E (80)	
3. 거셋트 필렛용접 이음 ($l > 100\text{mm}$)	G (50)		
4. 거셋트 개선용접 ($l > 100\text{mm}$)	(1) 토우 마감 F (65)		
	(2) 비마감 G (50)		
면 내 거 세 트	5. 필렛 거셋트 개선용 접 (필렛 마감)	(1) $1/3 \leq r/d$ D (100)	※ (1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) : 언더컷 제거. 그라인더 마감 응력방향 평행 ※ (1.(2), 3., 4.(2), 6.(2)) 깊이 0.5mm 이상 언더컷 제거
		(2) $1/5 \leq r/d < 1/3$ E (80)	
		(3) $1/10 \leq r/d < 1/5$ F (65)	
	6. 거셋트 개선용 접	(1) 토우 마감 G (50)	
(2) 비마감 H (40)			

3.6 응력계산

피로평가에 이용하는 응력은 대상위치 단면의 단면평균응력으로 한다³²⁾.

1) 설계계산 응력의 보정

설계에서 계산되는 단면평균응력이 실제응력 보다 높을 경우에는 설계보정계수(α)를 곱하여 설계계산 응력범위를 보정한다.

2) 응력범위빈도분포

피로설계하중을 이용하여 설계수명내의 대상 부재에 생기는 응력의 변동을 계산하고, 그 파형에 대하여 레인플로우법을 이용하여 응력범위빈도분포를 구한다.

3) 설계반복의 회수

설계수명내의 응력의 총반복회수 n_t (설계반복회수)는 식 (3.6.1)로 계산한다.

$$n_t = \sum n_i \times T \quad \dots \dots \dots (3.6.1)$$

여기서, $\sum n_i$: 단위기간내의 총반복회수

T : 설계수명중의 단위기간수

4) 안전계수

다음과 같은 안전계수를 고려하여야 한다.

(1) 부재 계수(r_b)

대상으로 한 이음부 혹은 부재에 피로손상이 생길 때, 구조물 전체의 강도 또는 기능에 미치는 영향을 고려한 계수.

- ① 구조물 전체의 붕괴를 일으키는 경우 → 1.10
- ② 구조물의 강도 및 기능에 영향을 미치는 경우 → 1.00~1.10
- ③ 구조물의 강도 및 기능상에 특별한 문제가 없는 경우 → 0.8

(2) 중요도 계수(r_w)

구조물의 중요도, 즉 구조물이 피로한계상태에 도달할 때의 사회적 영향을 고려한 계수.

구조물의 중요도에 의해 → 0.8~1.10

(3) 검사계수(r_i)

구조물의 공용중 정기조사에 의해 피로한계상태에 도달하기 전에 손상을 발견할 가능성을 고려한 계수.(단, $0.8 \leq r_b \cdot r_w \cdot r_i \leq 1.25$)

- ① 유지관리에 의한 검사를 정기적으로 실시하는 경우 → 0.9~1.00
- ② 유지관리에 의한 검사를 정기적으로 실시하지 않는 경우 → 1.10

3.7 피로균열진전속도

일반적으로 일정하중을 받는 강구조 부재의 피로균열성장 해석방법에서 피로균열성장 데이터는 하중반복회수 당 피로균열진전속도 da/dN 와 응력 확대계수범위 ΔK 의 관계를 대수 그래프에 나타내며 일반적으로 강재의 피로균열 성장거동은 그림 3.7.1과 같이 3개의 영역으로 나눌 수 있다²⁰⁾.

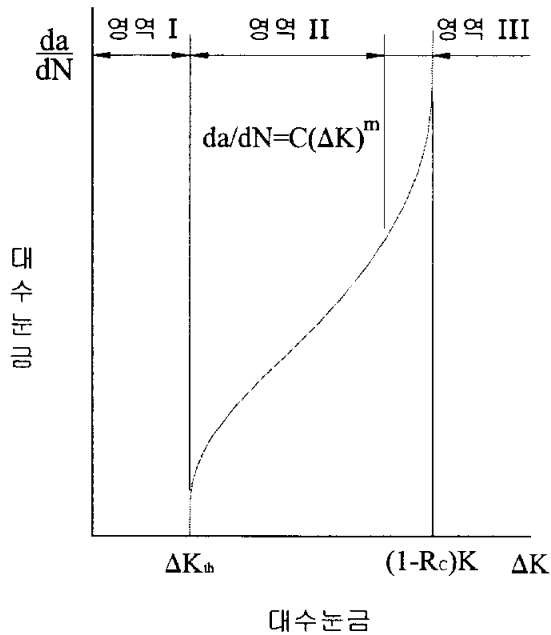


그림 3.7.1 강재에서의 피로균열성장의 개략도

영역 I에서의 거동은 '피로 하한값'을 나타내는 것으로 작용되는 반복응력 범위에 대한 응력확대계수범위가 하한값 ΔK_{th} 이하인 경우, 반복응력하에서는 균열이 성장하지 않는다. 영역 II는 ΔK_{th} 이상의 응력확대계수범위를 받는 경우에 발생하는 피로균열거동을 나타내는 것으로 Paris-Erdogan이 제안한 식 (3.7.1)이 가장 많이 사용된다. 그리고 영역 III에서 단위 반복회수 당 피로균열성장속도는 영역 II에서 예측되는 피로균열성장속도 보다 더 크게 나타난다.

$$\begin{aligned}
 da/dN &= C(\Delta K)^m & (\Delta K > \Delta K_{th}) \\
 da/dN &= 0 & (\Delta K \leq \Delta K_{th})
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (3.7.1)$$

da/dN : 피로균열진전속도

C, m : 재료상수

ΔK : 응력확대계수범위

ΔK_{th} : 하한계 응력확대계수범위

여기서 피로균열진전속도 da/dN 는 상수 C, m 의 값에 따라 달라지며 강재의 특성에 좌우된다. 그리고 하한계 응력확대계수범위인 ΔK_{th} 를 피로균열진전 거동에 포함시킬 경우의 피로균열진전속도는 식 (3.7.2)와 같다.

$$da/dN = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m \dots\dots\dots (3.7.2)$$

위 식을 사용하는 경우에는 일본 JSSC 피로설계지침에서는 표 3.7.1과 같이 C 와 m 및 ΔK_{th} 의 관계를 제시하고 있다³²⁾.

표 3.7.1 C 와 m 및 ΔK_{th}

구 분	C	m	ΔK_{th}
안전설계목적	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계목적	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

또한 일정하중 하에서 균열길이가 초기균열 길이 a_i 에서 한계균열 길이 a_c 까지 성장하는데 필요한 하중반복회수, 즉 피로균열진전수명은 식 (3.7.3)과 같다.

$$N = \int_{a_i}^{a_c} da / C(\Delta K)^m \quad \dots \dots \dots (3.7.3)$$

N : 피로균열진전수명

a_i : 초기균열

a_c : 한계균열

일반적으로 강구조 부재에 작용하는 실하중은 그 진폭과 주기가 일정치 않은 불규칙하중이므로 구조물의 각 부재에는 변동하중이 작용한다. 변동하중하에서의 균열성장 해석방법으로는 식 (3.7.4)의 Miner 선형피해이론이 현재 가장 보편적으로 사용되어지고 있다.

$$D = \sum D_i = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad \dots \dots \dots (3.7.4)$$

D : 피로손상도

n_i : 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 의 반복회수

N_i : 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 에 대한 부재의 피로수명

3.8 등가응력 및 응력확대계수

등가응력범위는 같은 반복수에 대해서 변동하중에 의한 누적피로손상과 같은 양의 누적피로손상을 일으키는 일정진폭하중에서의 응력범위로 정의된다. 설계수명내의 변동진폭응력과 동일한 반복회수로 등가인 피로피해를 주는 등가응력범위($\Delta\sigma_e$)는 (3.8.1)식으로 구한다³²⁾.

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i)}{\sum n_i}} \dots \dots \dots (3.8.1)$$

여기서, 수직응력 : $m = 3$

n_i : $\Delta\sigma_i$ 의 빈도

$\Delta\sigma_i$: 응력범위빈도분포를 구성한 각각의 응력범위

또한, 응력확대계수범위 ΔK 는 식 (3.8.2)와 같다.

$$\Delta K = F \Delta\sigma_e \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (3.8.2)$$

F : 보정계수(= $F_g \cdot F_e \cdot F_s \cdot F_l \cdot F_h$)

F_g : 이음에 생기는 응력집중에 대한 보정계수

F_s : 균열형상에 대한 보정계수

F_e : 표면균열에 대한 보정계수

F_l : 이음의 판두께·판폭이 유한으로 되는 것에 대한 보정계수

F_h : 균열이 편심으로 되는 것에 대한 보정계수

$\Delta\sigma_e$: 등가응력범위

a : 균열치수

4. 피로안전성 및 피로수명 평가

4.1 교량의 구성 및 제원

대형차의 혼입률에 따른 피로균열진전수명 평가를 실시하는 교량은 9경간 연속 도로교이며, 그림 4.1.1에 9경간 연속교의 개략도를 나타내며 그림 4.1.2에 피로수명평가 위치를 나타낸다. 해석위치는 그림4.1.1에서 활하중의 영향을 많이 받아 처짐이 가장 크게 발생하는 5경간 중앙부의 다이어플램 필렛용접이음부에 대해서 피로수명해석을 실시하였다.

- 1) 형 식 : 강합성 상형교(2련, 상·하행선 분리)
- 2) 연 장 : 9경간 연속교($L = 47.5\text{m} + 7@50.0\text{m} + 47.5\text{m} = 445.0\text{m}$)
- 3) 폭 원 : $B = 12.15\text{m}$ (편도)
- 4) 강 종 : 주부재 SM 490B, 부부재 SM 400B
- 5) 평면선형 : 직선
- 6) 스트링거 : $t=12\text{mm}$ (상·하플랜지), $t=12\text{mm}$ (웹)
- 7) 슈 베 치 : 1슈

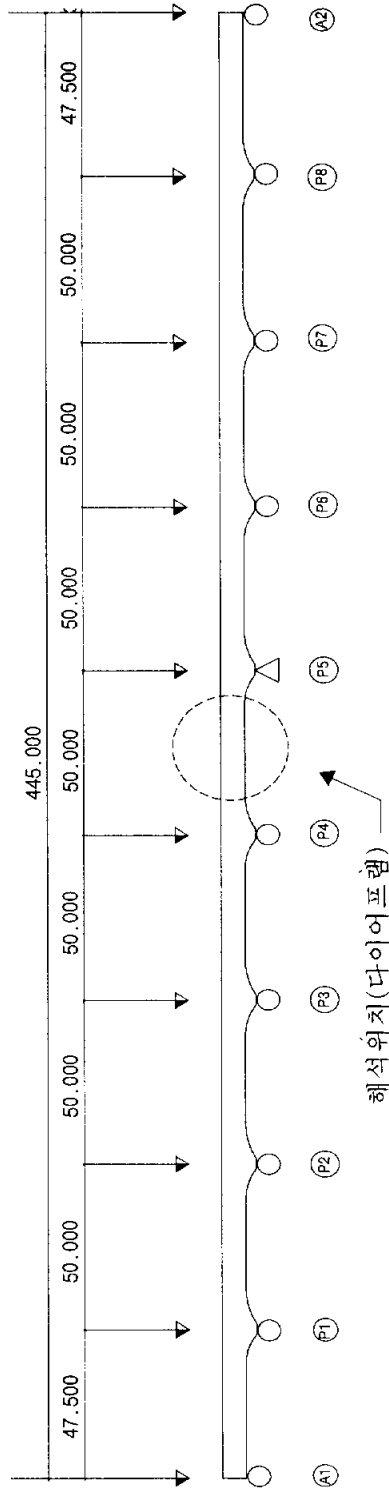


그림 4.1.1 교량의 개략도

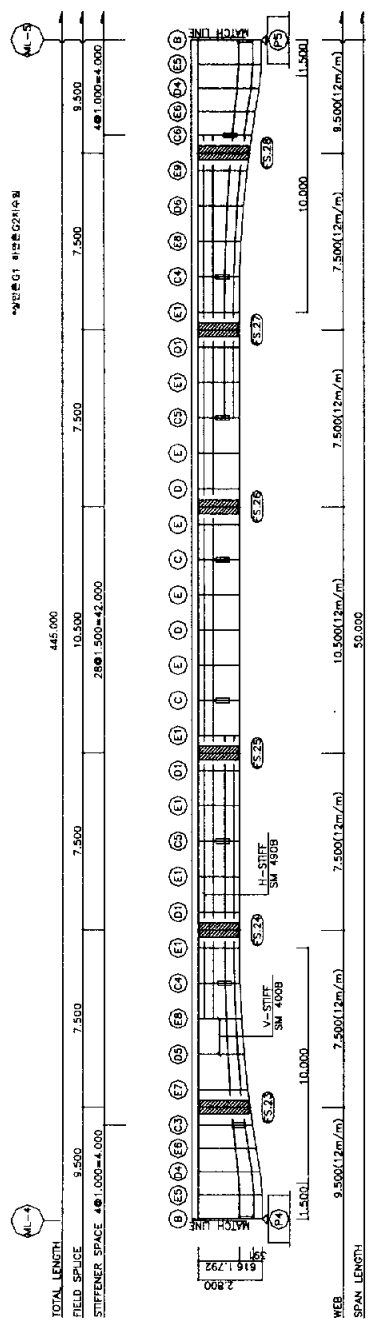
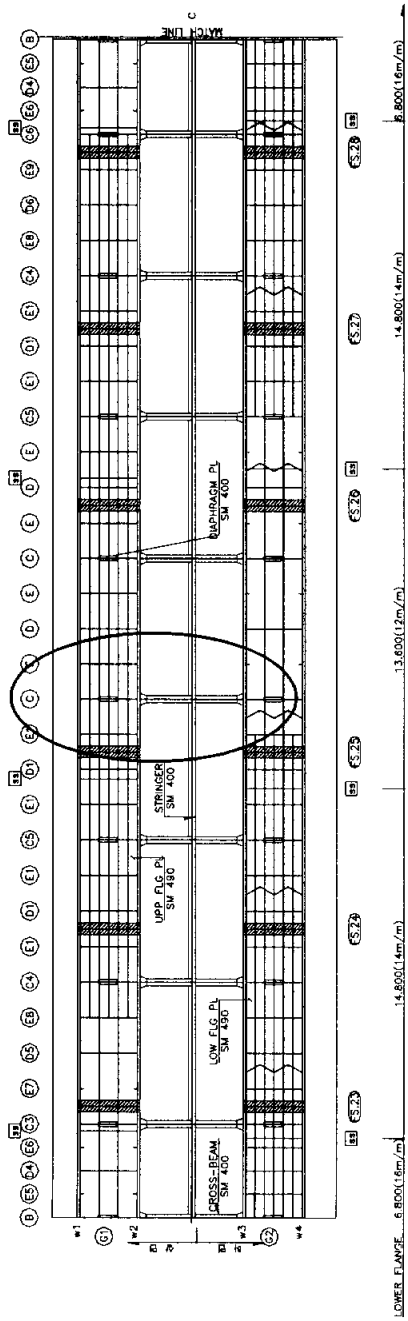
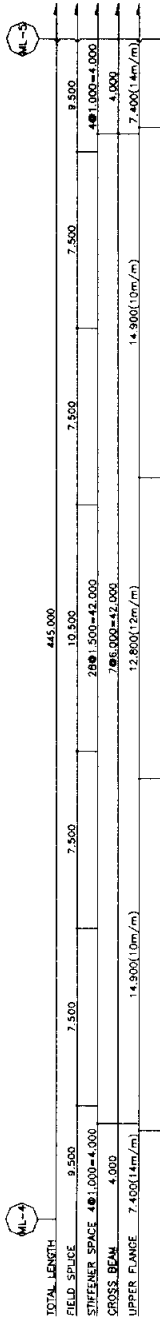


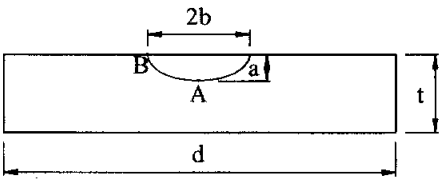
그림 4.1.2 피로수명평가 위치의 종단면도

4.2 피로수명평가의 기본 가정 및 흐름도

1) 기본 가정

- ① 차량은 주행차선을 따라 통행한다.
- ② 통행차량은 교통량 조사에서 얻어진 차종구성으로 표 4.3.1에서 제시된 6종류의 차량의 구성비 및 혼입률을 사용하였다^{18),32)}.
- ③ 교량의 피로설계수명은 도로교 시방서에서는 75년, 일본의 경우 재래선 강철도교는 60년, 신간선은 70년, 本州-四國연락교는 100년, 영국의 BS5400은 120년이나, 본 논문에서는 피로설계수명을 100년으로 가정하였다³²⁾.
- ④ 피로안전성 조사는 하부플랜지 맞대기용접이음부, 주형웨이브+수평보강재 필렛용접이음부, 하부플랜지+다이어플램 필렛용접이음부에 대하여 실시하며, 용접이음부는 건전한 것으로 하였다.
- ⑤ 피로균열진전해석에서는 교량에서 가장 중요한 부재인 하부플랜지 맞대기용접이음부에 대하여 교량의 피로수명에 가장 영향을 많이 미치는 언더컷을 상정하여 반타원형 표면균열로 하였다. 또한 초기균열의 형상비 (a/b)는 0.5로 하였다. 초기균열모델을 표 4.2.1에 나타낸다.

표 4.2.1 초기균열모델

균열	균열 모델
반타원형 표면균열	

2) 피로평가 흐름도

피로수명평가의 흐름도는 그림 4.2.1과 같다^{14),30)}.

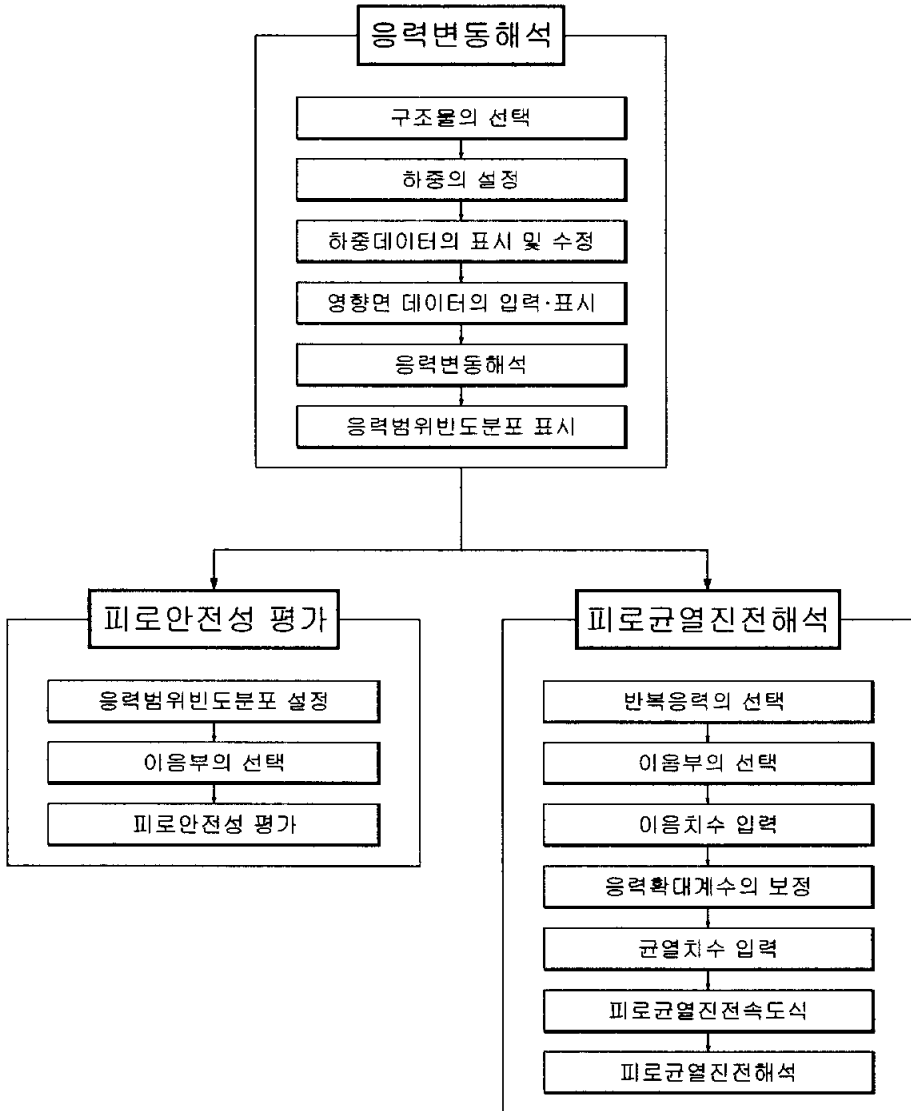


그림 4.2.1 피로안전성 및 피로수명 평가 흐름도

4.3 피로안전성 및 피로수명 평가

1) 설계방향 : 교통영향 평가보고서로부터 일일 통행교통량 중에서 통행 차량이 가장 많고, 또한 중차량의 혼입률이 가장 많은 차종구성비를 기초로 하여 시뮬레이션기법에 의한 강교량의 피로안전성 및 피로수명을 평가하였다^{(6),(34)~39)}.

2) 적용하중 : 교통영향 평가보고서에서 통행교통량 및 중차량의 혼입률이 가장 많은 2024년 26,034대/일을 기준으로 하여, 표 4.3.1 및 그림 4.3.1과 같은 통행차량의 구성비 및 혼입률이 교량상에 통행하는 경우를 상정하였다^{(6),(34)~39)}.

표 4.3.1 교통량 조사에서 얻어진 차종구성

	승용차	소형 화물	중형 화물	대형 화물	특수 화물	버스	합계
통행대수 (대/일)	15,751	1,744	3,150	1,796	495	3,098	26,034
혼입률 (%)	60.5	6.7	12.1	6.9	1.9	11.9	100

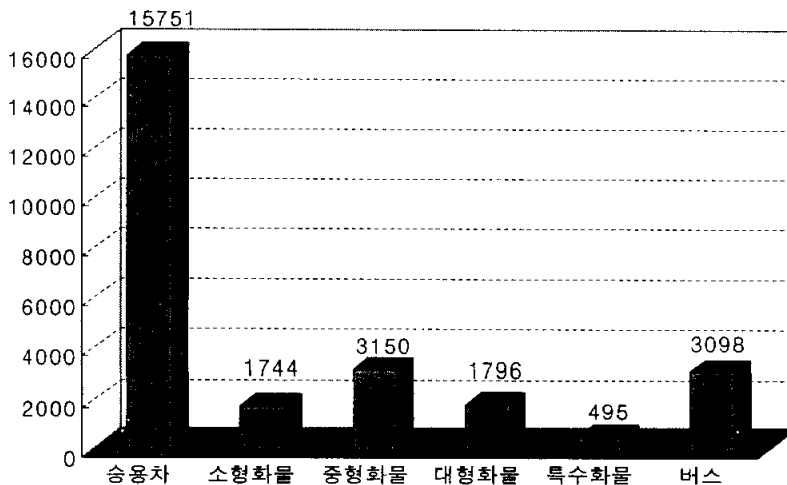


그림 4.3.1 교통량조사에서 얻어진 차종별 차량대수

표 4.3.2 통행차량의 구성비 및 혼입률

차종	축간거리 및 축하중	중량(ton)			혼입률	계
		최대	최소	평균		
승용차		3.10	0.80	1.66	60.5%	67.2%
소형화물 (2축)		9.99	1.32	7.05	6.7%	
중형화물 (2축)		64.00	12.00	15.20	12.1%	32.8% (중차량)
대형화물 (3축)		72.90	22.00	27.58	6.9%	
특수차량 (4축)		59.80	30.00	35.15	1.9%	
버스 (2축)		40.90	12.00	14.10	11.9%	

주) 차량 축하중은 국내 제작되는 차량의 제원을 기초로 하여 작성하였다.

주) 교통영향 평가보고서에서 소형버스는 버스의 혼입률에 포함하였다.

3) 영향면 작성

(1) 영향면 모델링

활하중이 구조물 위를 이동할 때 대상위치에 발생하는 변동응력을 영향선의 집합체인 영향면을 이용하여 계산한다. 영향면을 작성하기 위해서 그림 4.3.2와 같이 교축방향과 교폭방향으로 각각 임의의 수 및 위치로 바닥판을 격자로 분할한다. 다음으로 이들 분할선의 교점에 종거를 입력한다. 이 영향면의 종거는 응력이 휨모멘트나 축력 등의 단면력에 비례하므로 단면력의 영향면으로부터 구할 수 있다. 응력의 영향면 종거의 크기는 1ton 또는 10ton의 집중하중을 재하할 때이며, 단위는 MPa이다.^{30),32),34)~39)}

(2) 영향면 표시

활하중이 영향면 위를 이동할 때 발생하는 변동응력을 계산하기 위해서는 영향면 위의 임의의 점에서 종거를 계산할 필요가 있다. 종거를 계산하기 위해 먼저 분할된 격자에서 긴 쪽의 길이를 추가로 3개의 절점으로 구성된 삼각형으로 분할한다. 그리고 3개의 절점의 좌표, 종거를 연립방정식으로 풀고, 3개의 절점으로 구성된 종거의 평면식을 설정 영향면 상의 임의점에서 종거를 구한다.^{30),32),34)~39)}

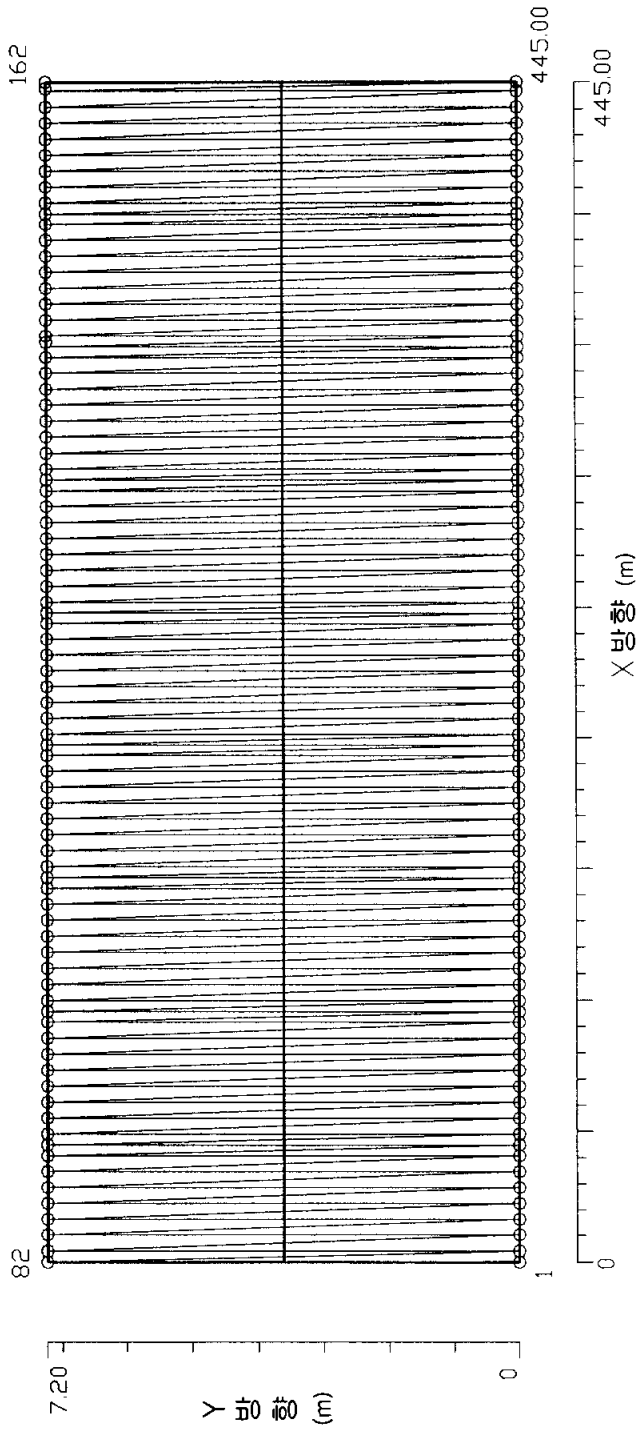


그림 4.3.2 영향면 모델링

표장 445 (m)

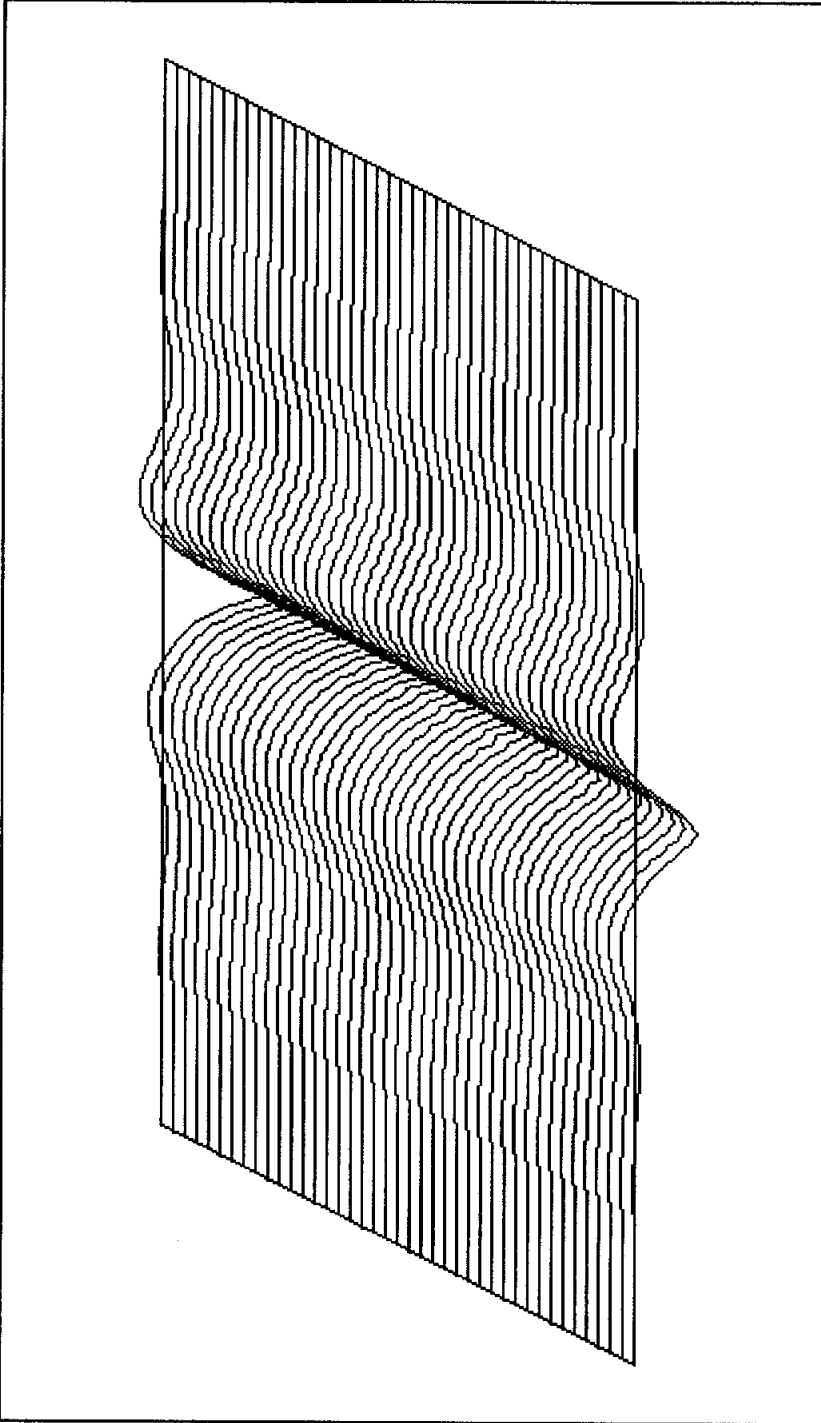
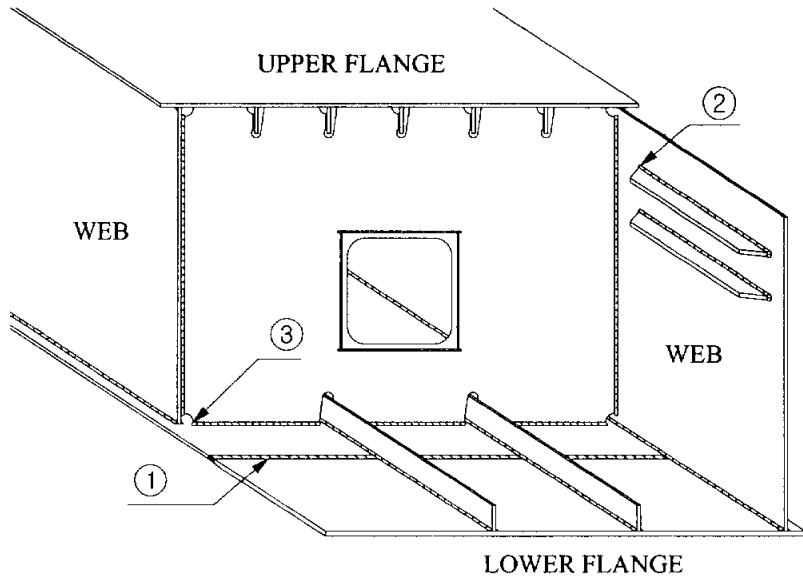


그림 4.3.3 대상위치 영향면의 표시

4) 피로수명평가 위치 이음상세 및 강도등급

그림 4.1.1에 나타난 9경간 연속 강상형교에서 피로손상이 예상되는 용접 이음부의 위치는 그림 4.1.2에 표시한 다섯번째 경간 중앙으로서 활하중의 영향으로 처짐이 가장 많이 발생하는 위치를 대상으로 하였다. 이 위치의 이음상세 및 강도등급을 그림 4.3.4에 나타내며, 그림에서 다이어프램 필렛 용접이음부에서 각종 용접결함에 의해 초기균열이 발생하고, 통행차량의 반복하중으로 피로균열이 진전한다고 가정하였다^{18),30),32)}. 다이어프램 필렛 용접이음부의 해석부위는 하부플랜지 맞대기용접이음부, 주형웨이브와 수평보강재 필렛용접이음부 및 주형하부플랜지와 다이어프램의 필렛용접이음부를 대상으로 하여, 피로균열의 진전수명을 평가하였다^{34)~39)}.



평가위치 이음부	강도등급 (MPa)
① 하부플랜지 맞대기 용접이음부	C(125)
② 주형웨이브+수평보강재 필렛용접이음부	G(50)
③ 하부플랜지+다이아프램 필렛용접이음부	E(80)

그림 4.3.4 피로평가위치의 이음상세 및 강도등급

5) 변동응력 해석 결과

응력범위빈도분포는 3.3에서 설명한 라인플로우법을 이용하였으며, 이 방법은 계속하여 나타나는 3개의 응력변동폭 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 가 그림 4.3.5와 같은 관계인 경우 $\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_4$ 혹은 $\sigma_1 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_4$ 인 조건을 만족할 때에 $|\sigma_2 - \sigma_3|$ 의 응력범위를 응력변동파형으로부터 제외시켜 응력범위를 계산한다. 이러한 처리를 반복하면 그림 4.3.6에 나타내는 바와 같이 점증·점감하는 응력변동파형이 남는데 이 경우 최대의 극대치와 최소의 극소치의 차, 2번째의 극대치와 극소치의 차····를 응력변동으로 계산한다. 이 방법은 응력변동의 극치수열을 단축하게 되고 계산기의 기억용량을 절약시키는 효과를 가지며, 또한 변동진폭응력을 받는 부재의 피로수명을 평가하는데 있어서는 최적의 방법이 된다. 그림 4.3.7에 응력변동해석 결과를 히스토그램으로 나타낸다.

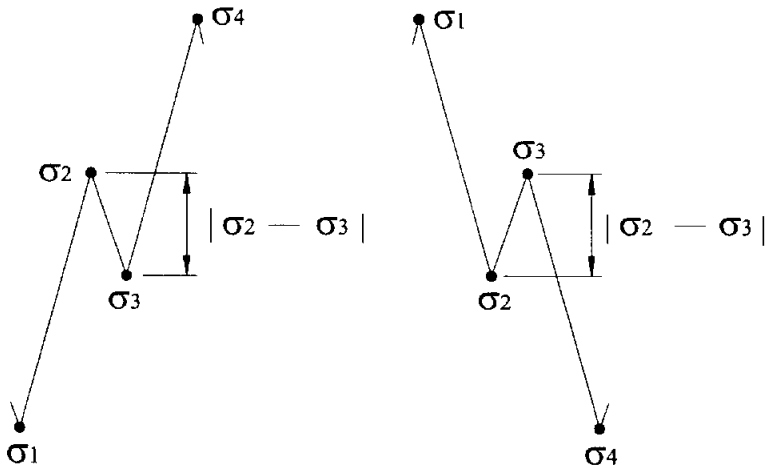


그림 4.3.5 라인플로우법

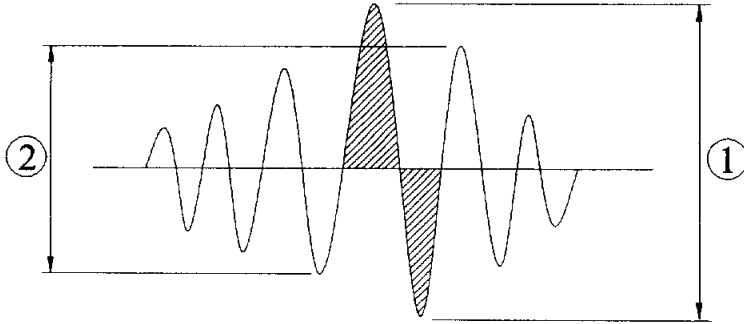


그림 4.3.6 점증·점감파

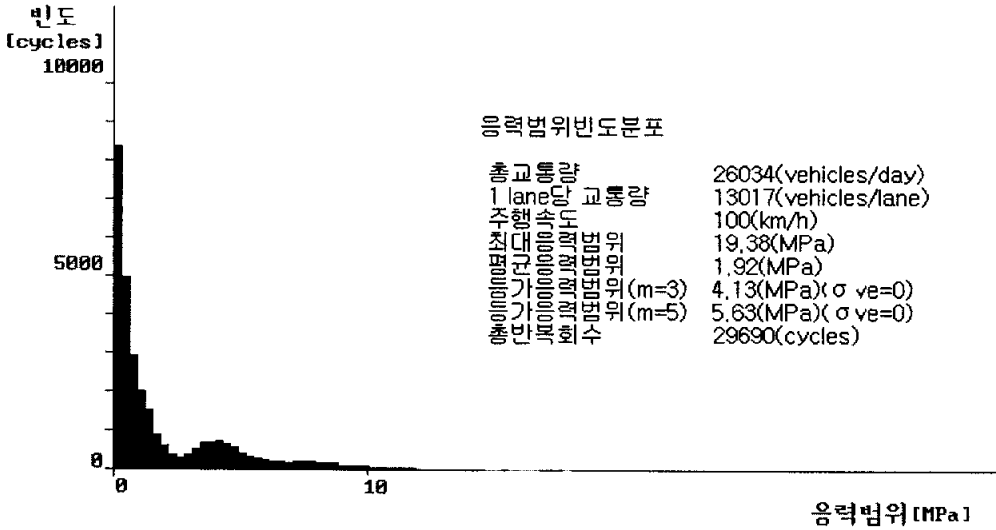


그림 4.3.7 응력범위빈도분포

6) 변동응력을 이용한 피로안전성 평가

변동응력을 이용한 피로안전성 평가의 결과는 표 4.3.3와 같다. 표 4.3.3에서 알 수 있는바와 같이 ① 하부플랜지 맞대기용접이음부, ② 주형웨이브와 수평보강재 필렛용접이음부, ③ 하부플랜지와 다이어프램 필렛용접이음부 3개소 모두 허용응력범위는 설계응력범위를 상회하므로 피로안전성은 충분히 만족하였다.

표4.3.3 피로안전성 평가

Unit : MPa

피로평가위치		①	②	③
피로강도등급		C	G	E
2×10 ⁶ 회 기본허용응력범위 ($\Delta\sigma_f$)		125	50	80
설계반복횟수 (n_s)		1.08×10 ⁹	1.08×10 ⁹	1.08×10 ⁹
안전계수	γ_b	1.0	1.0	1.0
	γ_w	1.0	1.0	1.0
	γ_i	1.0	1.0	1.0
설계응력범위 ($\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_s$)		4.13	2.63	4.09
허용응력범위 ($\Delta\sigma_R$)		15.35	6.13	9.81
피로조사 ($\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i$) $\Delta\sigma_d \leq \Delta\sigma_R$		OK	OK	OK

7) 피로수명해석

하부플랜지 맞대기용접이음부의 피로균열진전수명해석에서 언더컷이 0.5mm 이하인 경우에는 피로수명이 무한대로 해석되었다. 따라서 대상 교량에 통행차량의 구성비 및 혼입률이 표 4.3.2와 같을 경우에는 설계수명 100년을 만족하고 있으며, 언더컷 0.5mm에서 피로수명이 무한대로 해석되었으므로 도로교 시방서에서 규정한 언더컷 0.3mm 이하에서는 충분히 안전측으로 평가되었다¹⁸⁾.

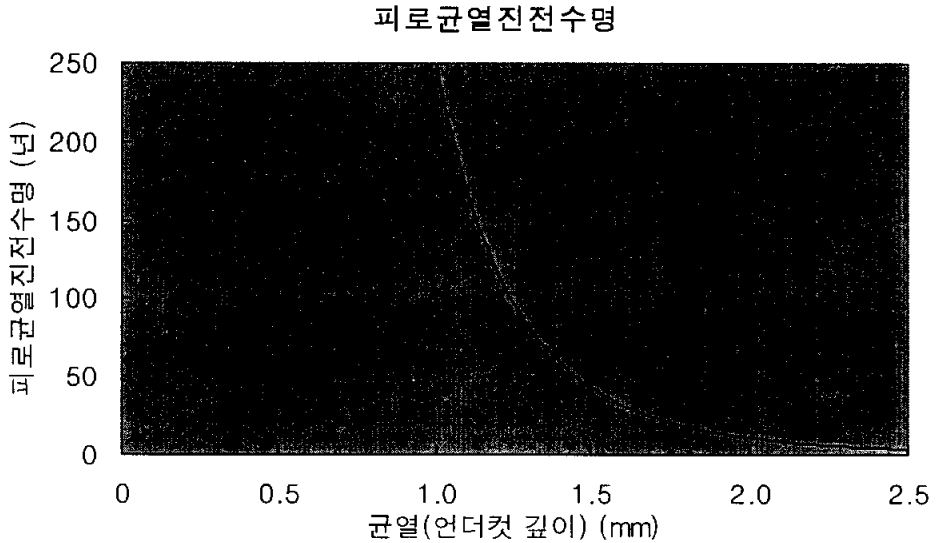


그림 4.3.8 피로균열진전수명

5. 결론

강상형교의 용접이음부에 대한 피로안전성 및 피로수명을 평가하기 위해 9경간 연속 강상형교에서 5경간 중앙부 다이어프램에 대한 응력변동해석을 실시하고, 피로균열진전수명에 미치는 초기균열의 크기를 해석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 피로안전성의 평가에서 하부플랜지 맞대기용접이음부, 주형웨이브와 수평보강재 필렛용접이음부, 하부플랜지와 다이어프램 필렛용접이음부 3개소 모두 설계응력범위를 상회하므로 피로안전성은 충분히 만족하였다.
- 2) 피로균열진전수명해석에서 하부플랜지 맞대기용접이음부에 언더컷이 0.5mm 이하인 경우에는 피로수명이 무한대로 해석되었다. 언더컷 0.5mm에서 피로수명이 무한대로 해석되었으므로 도로교 시방서에서 규정한 언더컷 0.3mm 이하에서는 충분히 안전측으로 평가되었다.

참 고 문 헌

- 1) 한국강구조학회 : 강구조 편람, 第 2卷, 강구조의 집합,
pp. 113~162, 1995.
- 2) 용환선, 정경섭, 이희현 : 실 교통 하중하에서 강교량 용접부의 피로수
명 예측,
韓國鋼構造學會 論文集, 第 7號 1號, pp. 125~134, 1995. 3.
- 3) 장동일 : 강구조물의 피로현상(Ⅰ), 韓國鋼構造學會誌, 第 2卷 第 4號,
pp. 63~71, 1990. 11.
- 4) 장동일, 이종득, 김성훈 : 강철도교의 피로손상 평가,
韓國鋼構造學會誌 論文集, 第 3卷 第 1號, pp. 173~183, 1991. 3.
- 5) 염창희 : 강상형교 용접이음부의 피로균열진전해석에 관한 연구,
釜慶大學校 碩士學位論文, 2001. 2.
- 6) 建設交通部 : 道路交通量統計年報, 2000.
- 7) 장동일, 김기두, 경갑수, 이명구, 홍성욱 : 피로손상이 발생한 강판형교 웨
브거셋부의 응력빈도계측 및 피로수명평가,
韓國鋼構造學會 學術發表大會 論文集, pp. 245~252, 1999. 6.
- 8) 장동일, 박용진 : 2차 인자에 의한 구조용강의 피로균열성장거동,
韓國鋼構造學會 論文集, 第 3卷 第 3號, pp. 197~204, 1991. 9.
- 9) John W. Fisher : Fatigue and Fracture in Steel Bridges,
John Wiley & Sons. Inc, pp. 262~278, 1984.
- 10) 西村俊夫, 三木千壽 : 引張應力に起因する鋼橋梁の變狀,
日本土木學會誌, pp. 54~65, 1975.
- 11) 阿部英彦 : 鐵道橋における疲勞と對策,
日本鋼構造協會誌, 1979.
- 12) 장동일, 김기두, 이명구, 홍성욱 : 15년간 공용한 강철도교 세로보 절

- 취부의 실동응력측정 및 피로수명평가,
 韓國鋼構造學會 學術發表大會 論文集, pp. 65~74, 2000. 6.
- 13) 정경섭 : 일본의 강교량 피로파손사례,
 韓國鋼構造學會誌, 第 9卷 2號, pp. 11~25, 1997. 6.
- 14) 李東郁 : 橋梁鋼床版におけるトラプ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. 12.
- 15) 日本土木學會 編 : 鋼橋における劣化現象と損傷の評價,
 (株)丸善, pp. 10~12, 1996.
- 16) 西川和廣 : 道路橋における疲勞問題と補修・補強,
 橋梁と基礎, 制17卷, 制8号, pp. 19~23, 1983.
- 17) 조재병 : 유럽 강교량의 피로사례,
 韓國鋼構造學會誌, 第 9卷 2號, pp. 34~39, 1997. 6.
- 18) 건설교통부, 도로교표준시방서 : 설계/시공 및 유지관리편,
 pp. 124~139, 1996
- 19) M. A. Miner : Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics,
 Trans. ASME, Vol. 59, A160, 1937.
- 20) 장동일 : 구조공학에서의 파괴와 피로, 동명사, pp. 231~251. 1999. 9.
- 21) 장동일 : 실동하중의 작용을 받는 구조용 강재의 피로강도(I),
 大韓土木學會誌, 第 22卷 第 2號, pp. 65~73, 1974. 6.
- 22) 김성훈 : 일본의 피로설계의 배경 및 방법,
 韓國鋼構造學會誌, 第 9卷 2號, pp. 40~46, 1997. 6.
- 23) 장동일, 용환선, 김동희 : 구조강 용접부의 국부취성분포에 관한 연구,
 大韓土木學會 論文集, 第 4卷 第 3號, pp. 19~25, 1984. 9.
- 24) 우상익, 정경섭 : 하중비전달형 면외 거셋판이 부착된 강교량 부재의

- 피로강도,
 韓國鋼構造學會 論文集, 第 10卷 4號, pp. 779~788, 1998. 12.
- 25) John M. Barsom, Stanley T. Rolfe : Fracture and Fatigue Control in Structures, Butterworth Heinemann, ASTM, pp. 281~330. 1999.
- 26) MiKi C., Mori T., Sasaki T., Sakamoto K. : An Analysis of Blowholes in Longitudinal Fatigue Crack Growth from Welded Joints,
 JSCE, No. 386, pp. 73~81, 1987.
- 27) 최준혁, 경갑수, 최동호, 장동일 : 힘을 받을 받는 바닥강판의 피로균열
 진전해석,
 韓國鋼構造學會 論文集, 第 11卷 4號, pp. 409~416, 1998. 8.
- 28) 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,
 日本土木學會 論文集, No.392, I-9, pp. 403~410, 1988.
- 29) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock :
 Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall,
 pp. 88~123, 1990.
- 30) 梶原 仁 : 鋼構造物の疲勞安全性評價システムの開發とその利用,
 法政大學大學院工學研究科, 修士學位論文, 1996.
- 31) 田島二郎, 阿部英彦, 佐黒隆義, 三木千壽 : 溶接構造と疲勞,
 日本土木學會誌, 1981.
- 32) 日本鋼構造協會 : 鋼構造物の疲勞設計指針・同解説,
 技報堂出版, 1993. 4.
- 33) 韓國鋼構造學會 : 鋼桁橋의 交通量 分析을 통한 設計疲勞荷重算定과 發生應力의 模型化 研究, 最終報告書, 1997. 12.
- 34) 김상효, 이상우, 마호성, 김종학 : 강철도교의 잔존피로수명 평가,

- 韓國鋼構造學會集, 第 11권 4호, pp. 329~338. 1998. 8.
- 35) 하창민 : “강교 용접이음부 피로균열진전수명에 미치는 대형차 영향”, 釜慶大學校 碩士學位論文, 2002. 2.
- 36) 염창희, 이동욱, 국승규 : 강상형교 용접이음부의 피로균열진전해석에 관한 연구,
大韓土木學會論文集, pp. 365~368. 2000. 10.
- 37) 최재원, 이동욱, 서원찬 : A Study on Simultaneous Loading Factors for Highway Bridges,
5th Korea-Japan Joint Seminar on Steel, pp 393~406. 1999. 10.
- 38) 변영표, 이동욱 : Fatigue Life Estimation for Welded Joints of Urban Railway Bridges,
5th Korea-Japan Joint Seminar on Steel, pp 321~332. 1999. 10.
- 39) 하창민, 이동욱, 국승규, 강창입 : Analysis of Fatigue Crack Propagation for Fillet Welded Joints in a Steel Box Girder,
6th Japan-Korea Joint Seminar on Steel, pp 357~368. 2001. 8.

감사의 글

나의 인생에서 소중한 부분으로 기억될 대학원 생활이 아름답고 소중한 삶으로 남을 수 있도록 이끌어 주시고, 본 논문이 완성될 수 있도록 도움을 주신 분들께 미약하나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

본 논문이 시작부터 완성에 이르기까지 바쁘신 일정 속에서도 부족한 제자를 헤아릴 수 없는 사랑과 야량, 그리고 바다와 같은 넓은 마음과 인내, 지도와 격려로 끝까지 이끌어 주신 이동욱 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 저의 미흡한 논문을 심사하여 주시고 격려하여 주신 장희석 교수님, 손인식 교수님께도 감사 드립니다. 물심양면으로 가르쳐 주시고 이끌어 주신 건설공학부 교수님께도 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 격려와 도움을 아끼지 아니한 창민군, 성민군, 용교군, 지훈군 등 강구조 연구실의 모든 친구들에게도 고맙다는 말을 전합니다. 본 논문이 있기까지 항상 힘이 되어주고 도움을 주신 분들께도 감사의 말을 전합니다.

마지막으로 자식의 본분을 다하지 못하고 있는 아들을 위해 투병생활을 하시면서도 기도하고 계시는 어머니, 부족한 남편을 위해 인내하며 힘을 주며 헌신하는 아내 박연자, 근영, 호근 두 아들과 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.