

공학석사 학위논문

강철도교 고장력볼트이음부의
피로수명평가에 관한 연구

지도교수 이 동 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교 산업대학원

건설공학과

김 태 진

이 논문을 김태진의 공학석사 학위논문으로 인준함

2001년 12월 15일

주 심 공학박사 김 명 식



위 원 공학박사 국 승 규



위 원 공학박사 이 동 욱



목 차

그림 목차	iii
표 목차	iv
ABSTRACT	v
1. 서론	1
2. 볼트이음부의 응력 거동	3
2.1 볼트이음	3
2.2 고장력 볼트이음의 응력 거동	4
3. 피로수명 평가	6
3.1 피로손상	7
3.2 허용응력범위 결정	9
3.2.1 피로강도	9
3.2.2 볼트이음부의 피로강도등급	10
3.3 설계응력범위 산정	11
3.3.1 응력변동해석	11
3.4 설계적부의 판단	15
3.4.1 안전계수	15
3.4.2 간편 피로응력평가법	16
3.4.3 상세 피로응력평가법	16
3.4.4 피로응력평가의 흐름도	18

4. 피로수명평가의 응용	19
4.1 교량의 제원	19
4.2 피로수명평가 위치	23
4.3 열차차량의 형식 및 중량분포	24
4.4 피로응력평가의 부위 및 이음상세	25
4.5 응력변동해석	27
4.6 피로응력평가	30
4.6.1 간편 피로응력평가	30
4.6.2 등가응력범위를 이용한 상세 피로응력평가	31
5. 결론	34
참고문헌	35
감사의 글	37

그림목차

그림 2.1 고장력 볼트 이음 방법의 종류

그림 2.2 마찰이음의 응력거동

그림 3.1 피로설계 흐름도

그림 3.2 피로손상사례의 원인별 비율

그림 3.3 S-N곡선

그림 3.4 라인플로우법

그림 3.5 피로응력평가 흐름

그림 4.1 대상교량의 종단면도

그림 4.2 대상교량의 일반도

그림 4.3 대상교량의 단면도

그림 4.4 피로수명평가 위치

그림 4.5 주형의 피로응력평가부위

그림 4.6 가로보의 피로응력평가부위

그림 4.7 평가부위 ①, ②의 영향선

그림 4.8 평가부위 ③, ④의 영향선

그림 4.9 평가부위 ①, ②의 영향면

그림 4.10 평가부위 ③, ④의 영향면

표목차

- 표 3.1 볼트이음부의 피로강도등급
- 표 4.1 열차차량의 축하중 및 혼입률
- 표 4.2 피로응력평가부위의 이음상세
- 표 4.3 응력변동해석의 결과
- 표 4.4 간편 피로응력평가
- 표 4.5 피로응력평가의 등가응력범위
- 표 4.6 등가응력범위를 이용한 상세 피로응력평가
- 표 4.7 피로수명

A Study on the Estimation of Fatigue Life for High Strength Bolted Joints in a Steel Railway Bridge

Tae-Jin Kim

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

ABSTRACT

It has been reported that fatigue damage in steel railway bridges subjected to repeated loading. The influence of repeated loadings and the cycle number of traffic vehicles should be investigated for the design of these members in steel railway bridges. In this paper, stress variation analysis has been performed with the simulation of traffic for railway bridges. A stress variation analysis for a I-plate girder bridge was performed by using the Monte-Carlo simulation based on an actual train load and actual traffic survey. The variable stress for the train loads were analyzed, by performing the rain-flow method on the stress value. Simple and detailed fatigue check have been carried out by applying the fatigue design curve and the strength level to the high strength bolted joint of web of main girder, the high strength bolted joint of bottom flange of main girder, the high strength bolted joint of web of main girder and web of cross beam, and the high

strength bolted joint of bottom flange of main girder and bottom flange of cross beam where fatigue damage is anticipated in steel railway bridges.

Based on the result of study, the fatigue life of high strength bolted joints in steel railway bridges have been evaluated to be safe as 147.6~255.4% of the design life. In future, using more data of fatigue design the life of bridge can be predicted more accurately.

1. 서론

사회생활에서 기반시설의 확충을 위한 교통망의 정비는 무엇보다도 중요하며 특히 철도교의 건설은 교통망 정비의 일환으로서 빠뜨릴 수 없는 위치에 있다. 최근 경제의 저성장과 더불어 교량의 건설에서도 될 수 있는 한 여유를 절약하고 내구연수를 향상시키기 위해 수명을 평가할 시점이 이르렀다. 철도교는 도로교와는 달리 차량의 통제나 통행조정이 가능하므로 극한 하중에 의한 파괴보다는 통상적인 열차의 운행으로 발생하는 피로에 의한 파괴가 지배적이다¹⁾.

한편, 강구조물은 조립식 구조이기 때문에 부재간의 접합방법이 가장 중요한 문제이다. 강구조물에서 일반적으로 많이 쓰이고 있는 접합방법으로는 고장력볼트 체결에 의한 마찰력을 이용하는 방법과 용접에 의한 방법이 있다. 용접에 의한 접합방법은 공장에서 실시하기 때문에 공장의 용접 품질관리규정에 따라 실시하므로 접합의 신뢰성이 있다²⁾. 그러나, 현장이음의 경우에는 비교적 쉬운 고장력볼트 접합을 많이 사용한다.

강구조물의 이음부에 고장력볼트가 이용되기 시작한 것은 1930년대이며, 영국의 C. Batho가 인장강도 60kg/mm²의 고장력볼트를 영구 구조물에 처음으로 사용한 연구결과를 발표하였다³⁾. 그후 고장력볼트에 대한 연구가 미국, 일본, 독일을 중심으로 널리 이루어지기 시작하였으며, 고장력볼트 특성이 점차 명백하게 밝혀지기 시작함에 따라 고장력볼트를 이용한 연결은 점차 강구조물 연결형식의 주류를 이루게 되었다⁴⁾.

고장력볼트 이음의 원리는 인장강도가 대단히 큰 고장력볼트를 사용하여 이음부를 조이고 이때 모재와 이음판에 발생하는 마찰력으로 응력을 전달한다. 고장력볼트 마찰접합에서는 볼트구멍 주위의 비교적 넓은 면적의 마찰면에서 응력을 전달하기 때문에 볼트구멍 주변의 응력집중이 비교적

작다. 이러한 장점 때문에 고장력볼트 마찰접합은 강구조물의 접합부에 많이 사용되고 있다^{5)~8)}.

본 연구에서는 철도교중의 I형 플레이트 거더교에 대한 하부플랜지, 주형복부판, 하부플랜지+크로스빔의 하부 플랜지, 주형복부판+크로스빔의 복부판 등의 볼트접합부에 대해 피로수명을 평가하였다.

2. 볼트이음부의 응력거동

2.1 볼트이음

볼트를 사용한 이음은 힘의 전달방식에 따라 마찰이음, 지압이음, 인장이음 3종류로 분류된다.

마찰이음은 고장력볼트로 연결 부재를 강력하게 체결함으로써 부재 사이의 마찰저항에 의해서 힘을 전달시키는 이음방법이다. 지압이음은 볼트 몸통과 볼트구멍벽 사이의 지압과 볼트몸통의 전단저항에 의해서 힘을 전달시키는 이음방법으로 리벳이음과 같은 방법이다.

인장이음은 힘이 볼트축방향으로 작용하여 이음부 재편 사이의 압력변화에 의해서 응력을 전달시키는 것이다^{5)~8)}.

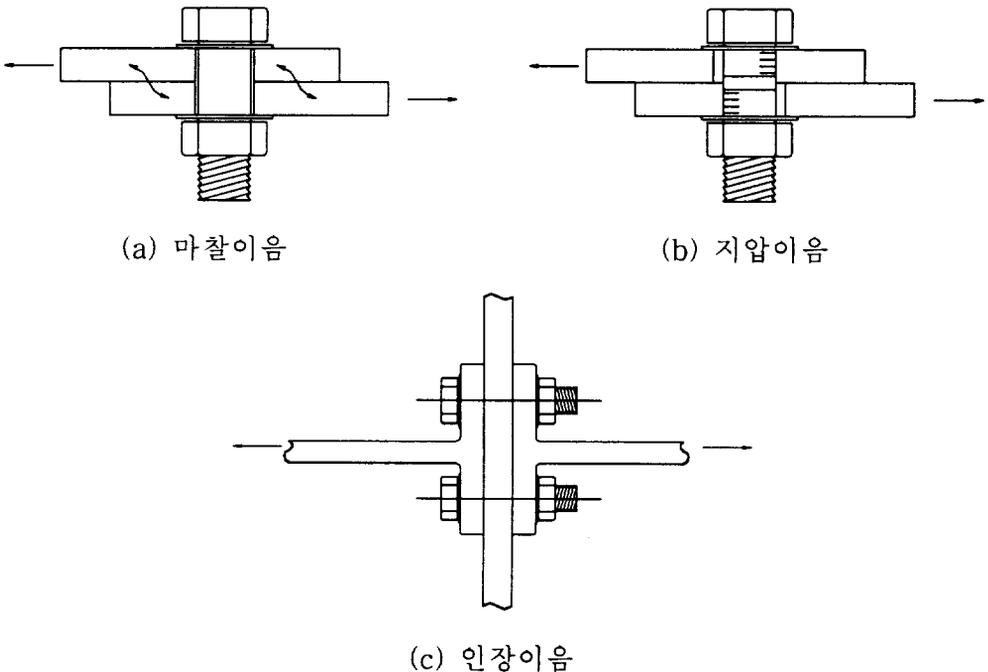


그림 2.1 고장력 볼트 이음 방법의 종류

2.2 고장력볼트이음의 응력거동

고장력볼트는 축방향의 인장력에 대해서도 높은 강도를 가지고 있기 때문에 볼트축방향으로 힘이 작용하는 이음에 사용하여도 좋다. 인장이음에서는 보통 초기장력이 도입되기 때문에 고장력볼트 이음부에 하중이 작용했을 때 초기장력과 같은 크기의 하중 정도까지는 서로 맞물려 강판끼리 밀착해 있다. 또한 강판과 볼트가 함께 작용하는 강성을 갖기 때문에 볼트 축응력의 증가 및 연결부의 늘어남은 작다. 그러나 강판이음이 벌어진 후에는 볼트만의 강성으로 된다. 따라서 설계에서는 최종내하력, 초기장력, 항복내하력 등에 대해서 충분히 고려를 하지 않으면 안된다. 또한 서로 맞물린 강판의 강성에 의해서 합성작용하는 강판의 범위나 틈새가 벌어졌을 때에는 볼트에 작용하는 힘의 영향이 다른점에 주의해야 한다. 또한 부재나 재편의 치수오차 등의 영향을 작게 하고, 한 부재의 볼트를 균등히 작용하게 하기 위해서는 긴 볼트를 사용하는 것이 좋다. 마찰이음은 연결부재의 접촉면에 분포되는 마찰력에 의해 응력이 전달되므로 응력집중이 적고, 피로에도 비교적 우수하다. 물론 연결부의 작용하중이 작을 때는 볼트들에 균일한 응력이 분포되지 않으나 작용하중이 증가함에 따라 응력분포는 균일하게 된다^{3),9)}.

볼트에 도입된 인장력에 의해서 부재와 연결판 사이의 접촉면에 압축력이 작용한다. 힘이 작용할 때 미끄러짐에 대한 저항은 접촉면에 작용하는 압축력과 접촉면의 마찰계수에 의해 결정되며 그림 2.2와 같이 접촉면에서 응력이 전달되고 응력 전달면적이 크기 때문에 커다란 응력집중이 일어나지 않는다. 이러한 응력전달기구를 갖고 있기 때문에 마찰이음은 연결의 강성이 대단히 크고 응력의 흐름이 원활한 점에 큰 특징이 있다^{10),11)}.

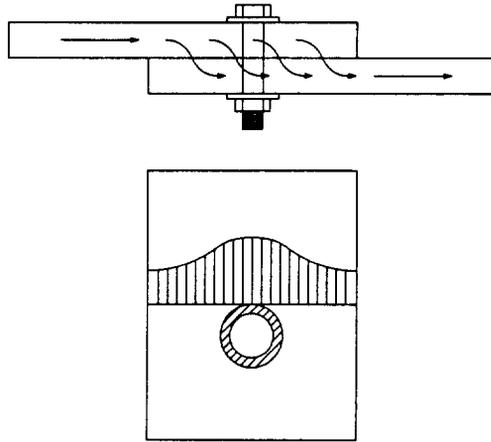


그림 2.2 마찰이음의 응력거동

마찰이음의 허용력을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$N = \alpha \cdot \sigma_y \cdot A_s$$

$$R_{va} = \frac{\mu \cdot N}{\gamma}$$

여기서, N : 설계 볼트축력

A_s : 볼트의 응력 단면적 (나사부의 유효 단면적)

α : 볼트의 항복강도에 대한 비율

F8T에 대하여 0.85

F10T에 대하여 0.75

σ_y : 볼트의 항복강도 (표 참조)

R_{va} : 마찰이음용 볼트 1개당 허용력

μ : 마찰계수 (0.4)

γ : 이음의 미끄러짐에 대한 안전율 (1.7)

3. 피로수명 평가

피로설계의 기본은 교량의 부재가 공용기간중에 받는 응력변동에 대해 손상이 생기지 않도록 설계하여야 한다. 설계시의 응력을 계산하는 부재에 대해 작용응력과 그 반복회수가 구해지면 부재의 피로강도조사를 실시하여야 한다¹²⁾. 피로설계의 흐름을 그림 3.1에 나타낸다.

피로조사의 위치는 교량 전체의 안전성 및 기능성에 영향을 미칠 우려가 있는 부재 또는 이음부를 중심으로 응력범위가 최대로 발생하는 위치에서 피로검토를 실시한다. 피로강도에 어느 정도의 안전도를 예상하여 응력범위의 허용치를 결정하고 설계응력범위가 허용응력범위를 넘지않도록 단면을 결정한다.

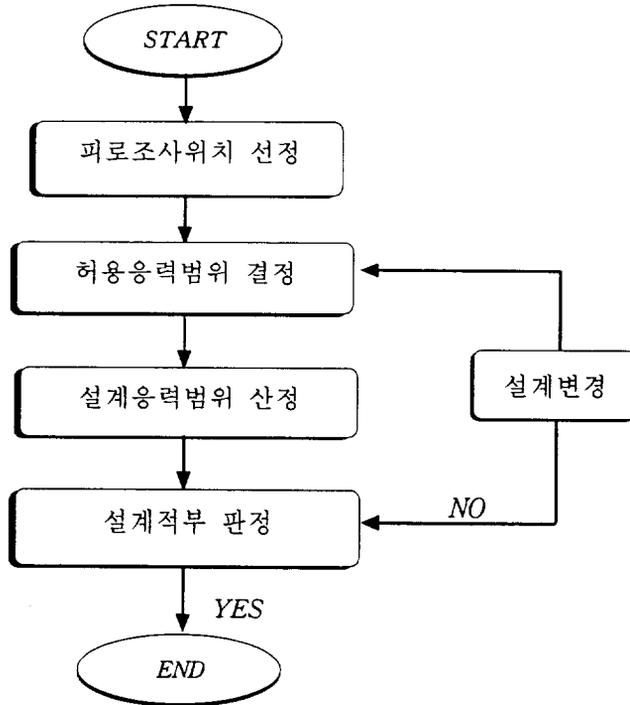
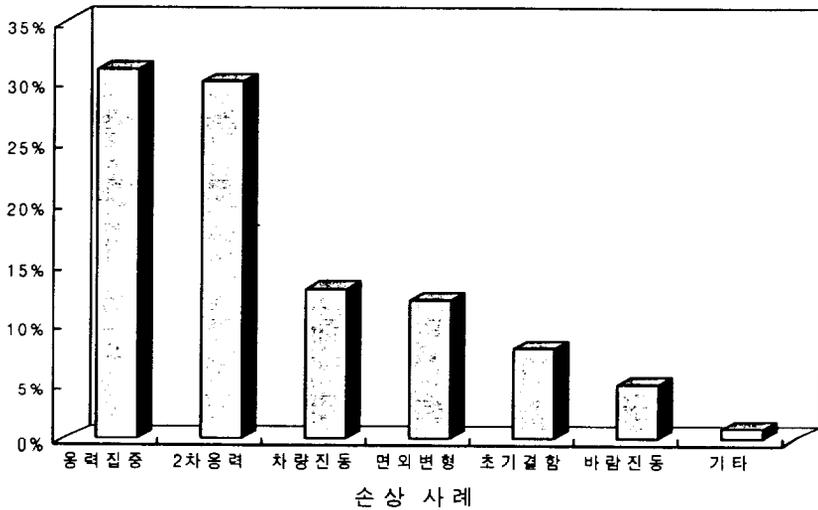


그림 3.1 피로설계 흐름도

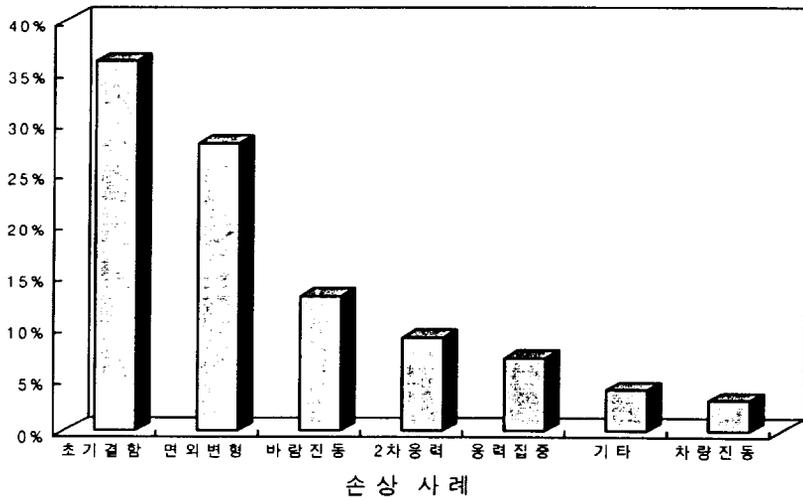
3.1 피로손상

강교량에 하중 또는 변위의 반복작용으로 부재에 손상이나 파괴가 일어나는 현상을 피로라 하며, 이 피로는 강구조물의 공용년수가 경과함에 따라 구조부재의 안전성과 사용성을 저하시키는 주요한 인자이다. 그림 3.2 a) 및 b)는 강교량의 부재에서 피로손상이 발생하는 일본 및 외국의 사례를 나타낸다. 그림 3.2에서 보는 바와 같이 일본 및 기타 외국의 경우 강교량 부재의 피로손상은 볼트 및 용접이음으로 인한 초기결함과 이로 인한 응력집중, 면외응력으로 인한 2차응력이 약 80%를 차지하고 있을 정도로 피로손상은 부재의 볼트 및 용접 이음부에서 주로 발생한다^{14),15)}.



(a)일본의 경우

그림 3.2 피로손상 사례의 원인별 비율(계속)



(b) 기타 외국의 경우
 그림 3.2 피로손상 사례의 원인별 비율

3.2 허용응력범위 결정

강교량의 피로설계에 대한 검토를 수행할 때, 설계자가 가장 주의해야 할 점은 대상 구조물의 상세에 대해 적절한 피로강도등급을 결정하는 것이다. 적절한 피로강도등급의 선택이 피로설계의 기본이 된다.

3.2.1 피로강도

수직응력을 받는 이음부에 대한 피로설계곡선을 그림 3.3에 나타낸다. 피로설계곡선에 대한 강도등급은 표 3.1에 나타내며 2×10^6 회의 응력반복수에 대하여 기본허용응력범위 ($\Delta\sigma_f$), 일정진폭응력 및 변동진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계 ($\Delta\sigma_{ce}$, $\Delta\sigma_{ve}$)가 정해진다. 일정진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계는 변동진폭응력의 응력범위성분이 모두 그 이하가 되면 피로조사가 필요하지 않는 한계값을 나타낸다. 그러나 변동진폭응력의 응력범위성분이 일정진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계를 초과하는 경우에는 피로손상에 기여하지 않는 응력범위의 한계값으로 변동진폭응력에 대한 응력범위의 타절한계를 이용한다. 피로설계곡선은 식 (3.1)로 주어진다¹²⁾.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\sigma^m \cdot N = C_0 \quad (\Delta\sigma > \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \\ N = \infty \quad (\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

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

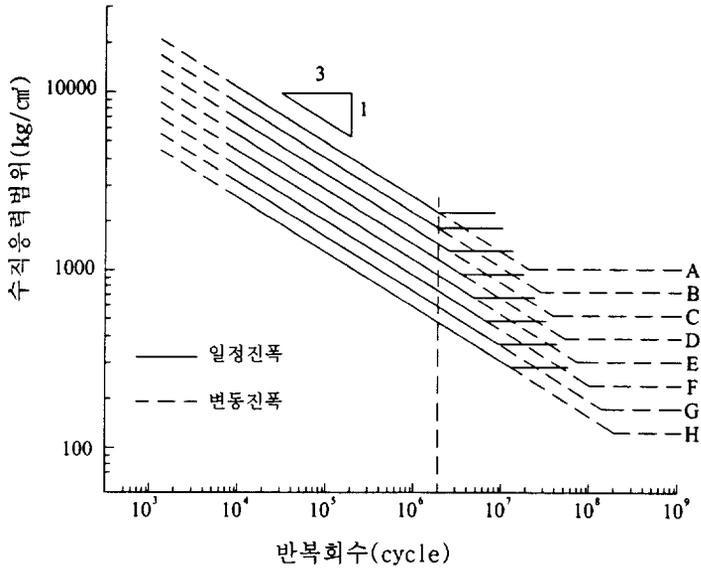


그림 3.3 S-N곡선

3.2.2 볼트이음부의 피로강도등급

철도교의 설계기준에서 이음부형상에 따른 볼트이음부의 피로강도등급이 B등급 뿐이므로 우리나라와 유사한 일본의 자료를 참고하여 C, D등급을 추가적으로 적용하여 피로수명 평가를 실시하였다. 피로강도등급은 표 3.1과 같다^{12),16)}.

표 3.1 볼트이음부의 피로강도등급(단, n_b 는 볼트열 수)

이음의 종류	강도등급 (kg/cm²)	허용응력의 타절한계(kg/cm²)	
	2×10^6 회 기본허용응력범위 ($\Delta\sigma_f$)	일정진폭응력 ($\Delta\sigma_{ce}$)	변동진폭응력 ($\Delta\sigma_{ve}$)
고장력볼트 마찰이음 ($1 \leq n_b \leq 4$)	B(1550)	1550(2.0×10^9)	720(2.0×10^4)
고장력볼트 마찰이음 ($5 \leq n_b \leq 15$)	C(1250)	1150(2.6×10^9)	530(2.6×10^4)
고장력볼트 마찰이음 ($16 \leq n_b$)	D(1000)	840(3.4×10^9)	390(3.4×10^4)

3.3 설계응력범위 산정

피로설계하중을 이용하여 설계수명내의 대상부재에 생기는 응력의 변동을 계산하고, 그 파형에 대해 그림 3.4에 나타낸 레인플로우법을 이용하여 응력 범위 빈도 분포를 구하고 설계응력범위를 산정한다¹⁷⁾.

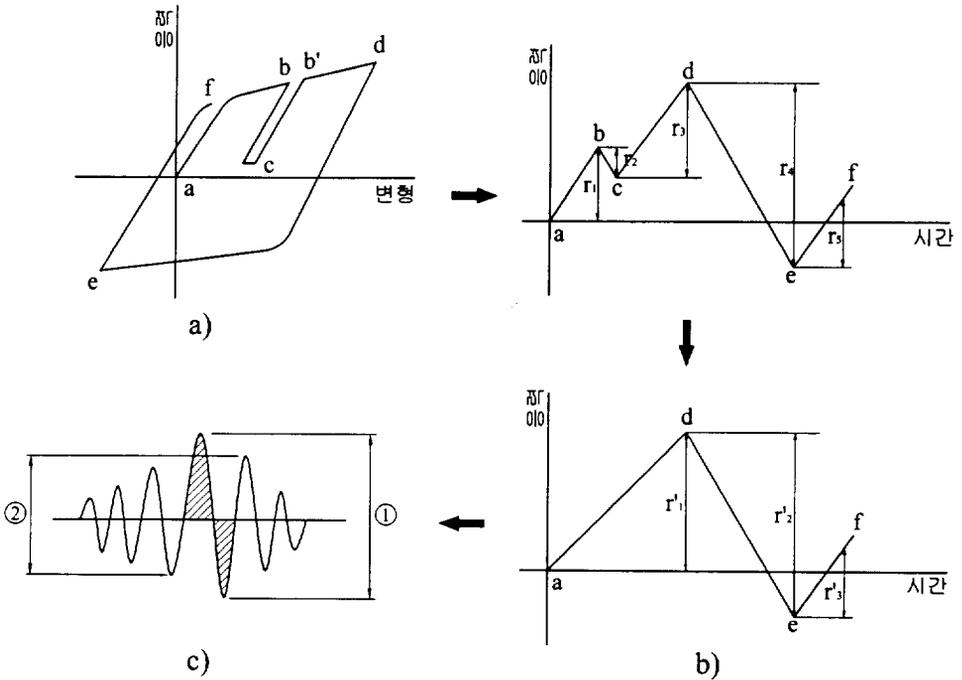


그림 3.4 레인플로우법

3.3.1 응력변동해석

응력변동해석은 대상으로 한 구조물을 선택하고 구조물에 대한 피로조사 하중을 설정한다. 조사하중이 구조물을 이동할 때 부재에 생기는 응력변동해석은 응력의 영향면을 이용한다.

1) 피로설계하중

피로설계하중은 설계수명중에 구조물에 작용하는 하중의 상태를 충분히 나타낼수 있는 표준하중 또는 시뮬레이션하중을 이용한다. 표준하중은 국내외의 기준에 기초로하여 대표하중단위와 최대하중단위 및 복수의 하중단위 3종류로 분류되고, 최대하중단위는 대표하중단위의 중량에 X배로 한다. 시뮬레이션하중은 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 실제의 하중의 크기 및 순서로 설정한다¹²⁾.

① 하중단위

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

② 대표하중단위

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

③ 최대하중단위

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

④ 시뮬레이션하중

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

⑤ 단위기간

피로설계하중으로 하중단위를 이용하는 경우, 설계수명 (L)은 적당한 단위기간 (U)(년, 월, 일 등)을 설정하여 설계수명중 단위기간의 수 (T)

를 곱하여 나타낸다 ($L = T \cdot U$). 단위기간은 구조물의 특성에 따라 시간, 일, 주, 월, 년, 등 임의로 선정한다.

2) 설계계산 응력의 보정

설계에서 계산되는 공칭응력이 실제응력 보다 높을 경우에는 설계보정 계수(α)를 곱하여 설계계산 응력범위를 보정한다.

3) 설계반복의 회수

설계수명내의 응력의 총반복회수 n_t (설계반복회수)는 식 (3.2)로 계산한다.

$$n_t = \sum n_i \times T \dots \dots \dots (3.2)$$

여기서, $\sum n_i$: 단위기간내의 총반복회수

T : 설계수명중의 단위기간수

4) 등가응력범위

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 식 (3.3)으로 구한다⁸⁾.

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i)}{\sum n_i}} \dots \dots \dots (3.3)$$

여기서, 수직응력 : $m = 3$

n_i : $\Delta\sigma_i$ 의 빈도

$\Delta\sigma_i$: 응력범위빈도분포를 구성한 각각의 응력범위

변동진폭응력($\Delta\sigma_{ve}$)이하인 응력범위에 대해서는 $n_i = 0$ 으로 한다. 대표 하중단위를 피로설계하중으로 이용하는 경우에는 $n_i = 0$ 이 아니다. 이것은 대표하중단위는 모든 하중단위를 대표하기 때문이다. 즉 대표하중단위에 의한 응력범위빈도분포는 하중단위에서 구해진 응력범위빈도분포를 대표하기 때문이다. 이 때문에 대표하중단위에서 계산된 응력범위가 하중단위에서 계산 되어진 응력범위보다 작을 수도 있다. 따라서 대표하중단위를 이용해서 구한 응력범위성분이 변동진폭응력($\Delta\sigma_{ve}$) 보다 작을 경우에는 그 영향을 무시하는 것은 하중단위에서 계산된 변동진폭응력($\Delta\sigma_{ve}$) 이상의 응력범위도 피로손상에 기여하지 않는다는 것을 의미한다.

이상과 같은 이유로 하중으로서 대표하중단위를 이용하는 경우에는 변동진폭응력($\Delta\sigma_{ve}$) 이하인 응력범위라도 그 반복회수 $n_i = 0$ 으로 해서는 안된다. 피로설계하중에 의해 계산된 응력의 변동이 일정진폭이면 등가응력범위는 그 일정진폭응력의 범위와 같다.

3.4 설계적부의 판단

3.3절에서 구한 설계응력범위가 허용응력범위를 초과하지 않아야 한다. 설계응력범위가 허용응력범위를 초과할 경우, 단면을 확대하거나 대상 상세를 응력범위가 작게 발생하는 위치로 변경하여 설계응력범위를 낮추어야 한다. 또한 동일한 상세일지라도 볼트배열 등에 따라 피로강도등급이 달라지므로 적절한 볼트배열 등으로 허용응력범위를 증가시켜 설계변경을 하여야 한다.

3.4.1 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 도달한 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.

- ① 유지관리에 의한 검사를 정기적으로 실시하는 경우 → 0.9~1.00
 - ② 유지관리에 의한 검사를 정기적으로 실시하지 않는 경우 → 1.10
- ※ 단, $0.8 \leq r_b \cdot r_w \cdot r_i \leq 1.25$

3.4.2 간편 피로응력평가법

- 1) 피로설계하중으로 최대하중단위를 이용한 경우 실시된다.
- 2) 피로응력평가는 최대응력범위, 일정진폭응력의 타절한계, 안전계수를 이용하여 식 (3.4)로 평가되고 최대응력범위는 설계계산응력보정계수 (α)를 보정하여 평가하게 된다¹²⁾.

$$(r_b \cdot r_w \cdot r_i) \cdot \Delta\sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_{ce} \cdot C_R \cdot C_t \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

여기서, $\Delta\sigma_{ce}$: 일정진폭응력의 허용응력범위

3.4.3 상세 피로응력평가법

상세 피로응력평가는 간편 피로응력평가가 만족되지 않은 경우에 실시한다. 피로응력평가에는 등가응력범위를 이용한 피로응력평가법과 누적손상도를 이용한 피로응력평가법이 있으나, 본 연구에서는 변동하중을 받는 구조물의 피로파괴에 대한 확률계산에 유용하게 이용되는 등가응력범위를 이용하여 피로조사를 실시하였다. 등가응력범위를 이용한 피로응력평가는

설계응력의 범위 ($\Delta\sigma_d$), 허용응력범위 ($\Delta\sigma_R$) 및 안전계수를 이용하여 평가한다.

1) 피로설계하중으로서 대표하중단위 또는 시뮬레이션하중을 선택한 경우에 실시한다.

2) 등가응력범위는 식 (3.3)에 의해 구해진다.

3) 설계응력범위 ($\Delta\sigma_d$)는 식 (3.5)로 구한다. 등가응력범위 ($\Delta\sigma_e$)는 설계 계산응력보정계수 (α)도 고려하여 계산한다^(2),18).

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_e \dots \dots \dots (3.5)$$

4) 허용응력범위 ($\Delta\sigma_R$)는 식 (3.6)으로 구한다.

$$\Delta\sigma_R = \sqrt[m]{\frac{C_0}{n_t}} \cdot C_R \cdot C_t \dots \dots \dots (3.6)$$

5) 피로응력평가는 식 (3.7)로 계산한다.

$$(r_b \cdot r_w \cdot r_i) \cdot \Delta\sigma_e \leq \Delta\sigma_R \dots \dots \dots (3.7)$$

6) 피로수명은 식 (3.8)로 계산한다.

$$\left(\frac{\Delta\sigma_R}{(r_b \cdot r_w \cdot r_i) \cdot \Delta\sigma_e} \right) \cdot L \dots \dots \dots (3.8)$$

여기서, L : 설계수명

3.4.4 피로응력평가의 흐름도

피로응력평가의 흐름도를 그림 3.5에서 나타내고, 간편피로응력평가가 만족되지 않는 경우 상세피로응력평가를 실시한다¹²⁾.

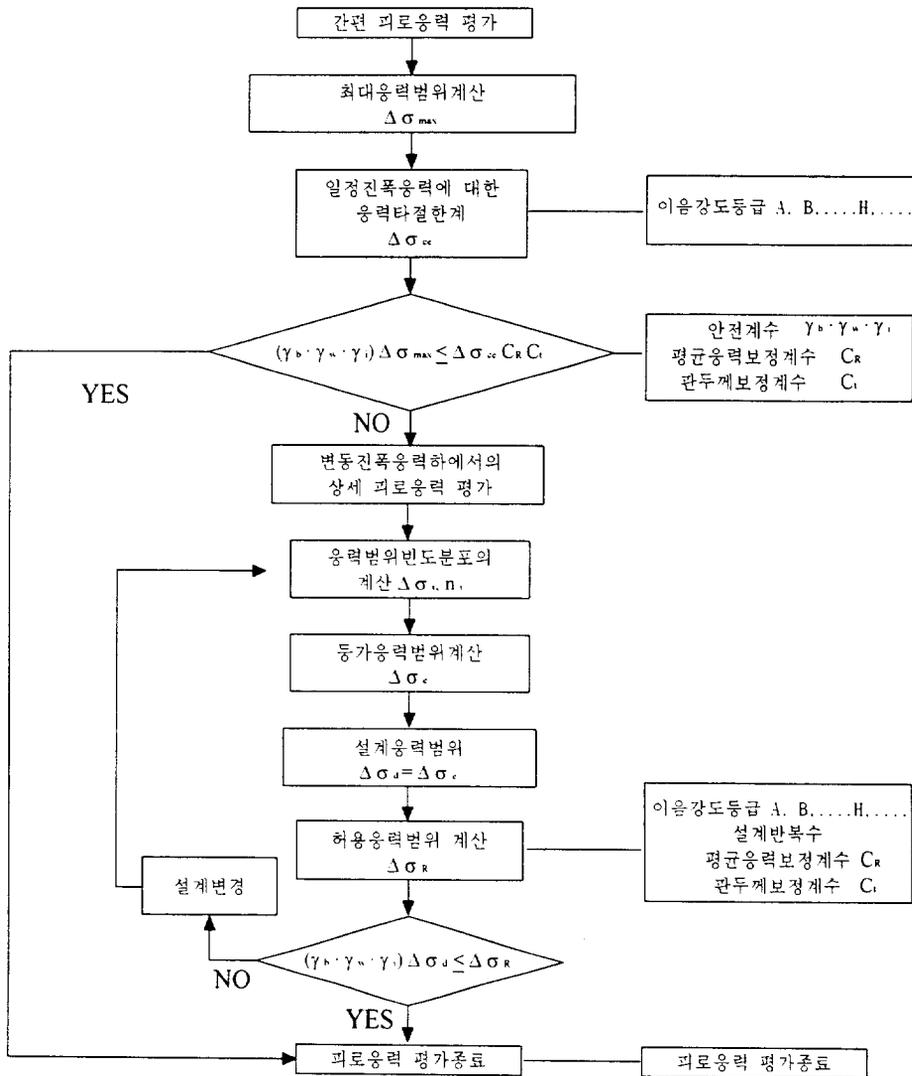


그림 3.5 피로응력평가 흐름

4. 피로수명평가의 응용

4.1 교량의 제원

피로수명평가를 위한 대상교량은 단선(1차선) 단순교(I형 플레이트 거더교)의 철도교로 정하며, 평가부위는 주형의 볼트이음부, 활하중에 의한 영향을 크게 받는 중간지점부의 주형과 크로스빔의 볼트이음부에 대해서 피로수명평가를 수행하였다.

1) 교량의 제원

- (1) 구조형식 : 단선(1차선) 단순교(I형 플레이트 거더교)
- (2) 지간구성 : 1경간(L=32.0m)
- (3) 교 폭 : 6.1m
- (4) 교 통 량 : 1일 220대
- (5) 설계수명 : 70년

2) 대상교량의 일반치수도

피로수명평가에 사용되는 대상교량의 종단면도, 일반도 및 단면도를 그림 4.1, 그림 4.2, 그림 4.3에 각각 나타낸다.

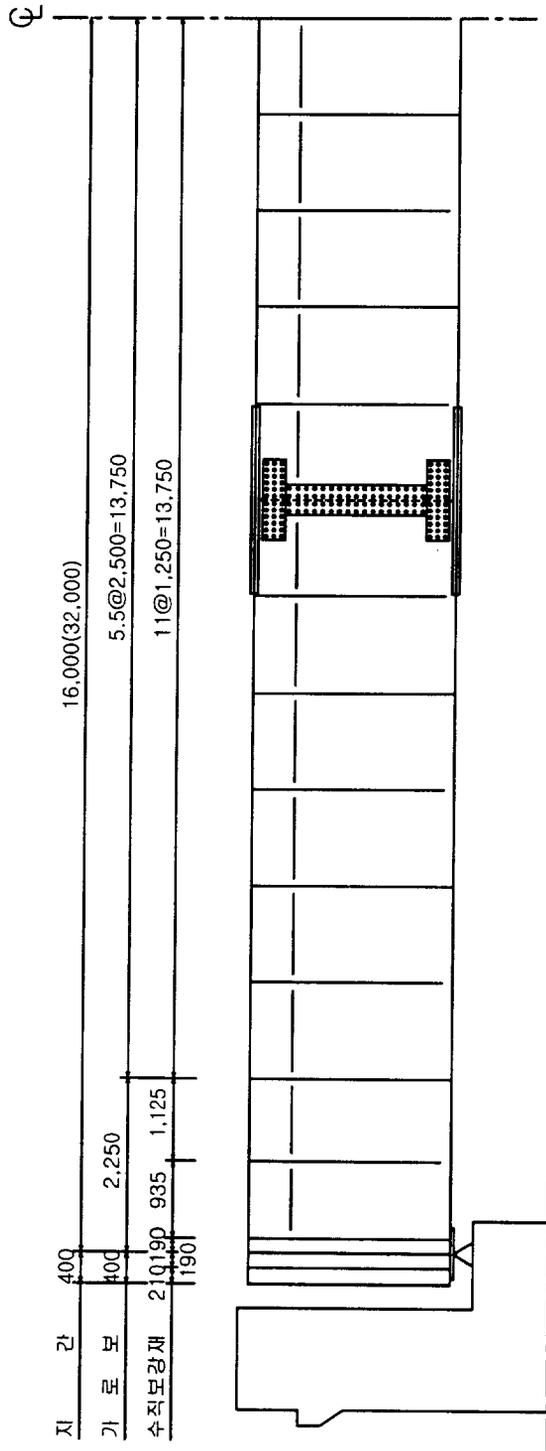


그림 4.1 대상교량의 종단면도

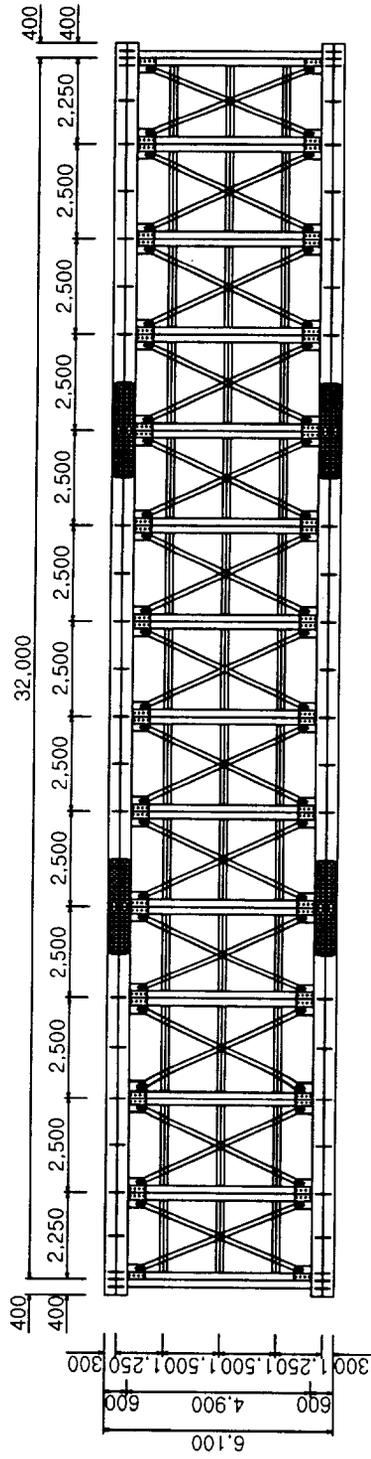


그림 4.2 대상교량의 일반도

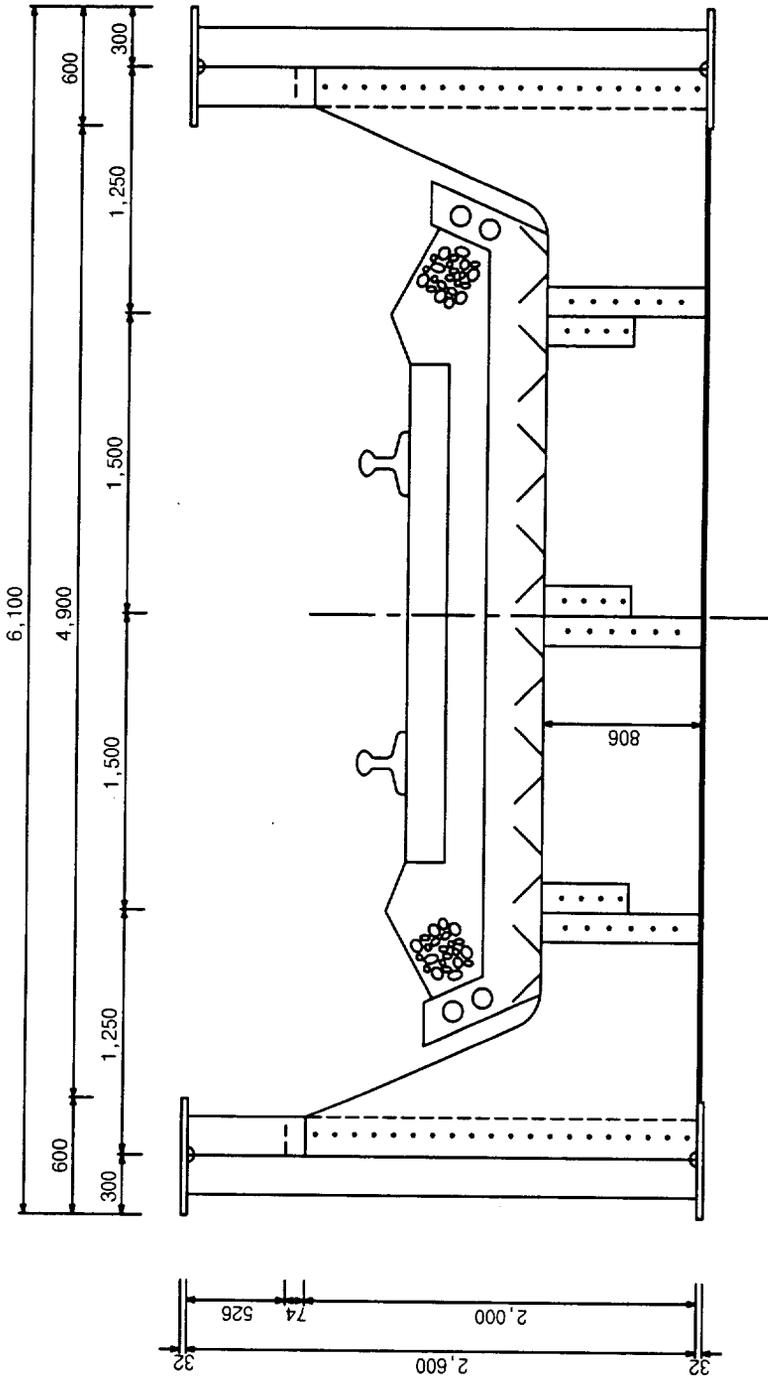


그림 4.3 대성교량의 단면도

4.2 피로수명평가 위치

I형 플레이트 거더교에 있어서 피로수명평가를 실시한 위치는 활하중의 영향으로 인해 처짐 및 응력이 크게 나타나는 위치를 그림 4.4와 같이 선정하였다. 따라서 피로손상이 예상되는 지점은 1지점으로부터 9.75m, 떨어진 주형복부판 및 하부플랜지의 볼트이음부, 그리고 1지점으로부터 17.25m 떨어진 하부플랜지+크로스빔의 하부플랜지 및 주형복부판+크로스빔의 복부판 볼트이음부를 대상으로 평가하였다. 피로수명평가는 각 볼트이음부에 대해서 간편피로응력평가를 실시한 후에 간편피로응력평가를 만족하지 않을 경우에 등가응력범위를 이용하여 상세피로응력평가를 실시하였다.

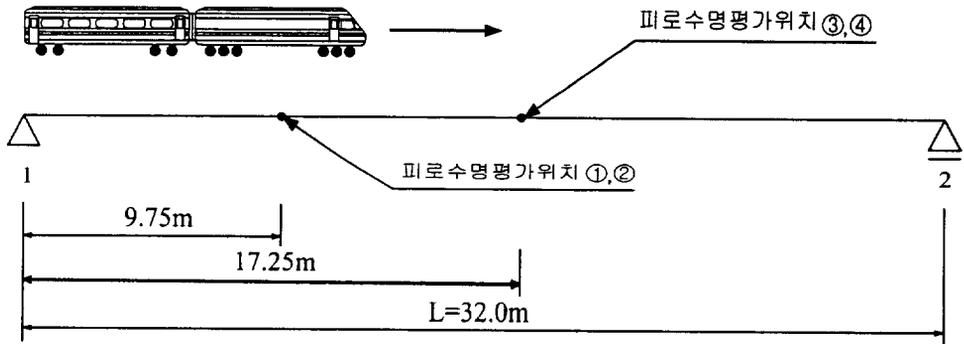


그림 4.4 피로수명평가 위치

4.3 열차차량의 형식 및 중량분포

철도교를 주행하는 열차는 크기와 중량이 다양하다. 이와 같은 다양한 열차의 주행에 의해 발생하는 응력변동을 구하기 위해서는 형식 및 중량에 의해 차량을 일정하게 분류하여야 한다. 그러므로 국내의 열차중에서 대표적인 기관차, 화차, 객차를 중심으로 5개 형식의 열차모델과 각 차량의 차종별 중량특성을 표 4.1에 나타낸다¹⁹⁾.

표 4.1 열차차량의 축하중 및 혼입률

차 종	축간거리 및 축하중	중량(ton)			혼입률	계
		최대	최소	평균		
기관차		132	-	-	10%	10%
화 차		53	22	37.5	25%	25%
객 차		44	40	42.4	25%	65%
		52	41.8	47.92	22%	
		40	32	36.8	18%	

4.4 피로응력평가의 위치 및 이음상세

피로응력평가의 위치는 그림 4.4에서 나타낸 바와 같이 1지점으로부터 9.75m만큼 떨어진 위치의 주형복부판 볼트이음부(①), 하부플랜지 볼트이음부(②)와 17.25m만큼 떨어진 위치의 주형복부판+가로보복부판 볼트이음부(③), 주형하부플랜지+가로보하부플랜지 볼트이음부(④)이다. 각각 피로응력평가위치에 그림 4.5 및 그림 4.6에 각각 나타낸다. 또한, 각각의 피로응력평가위치에 대한 이음상세를 표 4.2에 나타낸다.

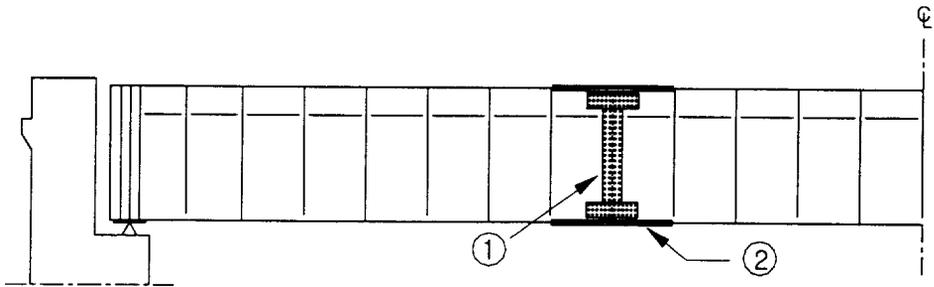


그림 4.5 주형의 피로응력평가부위

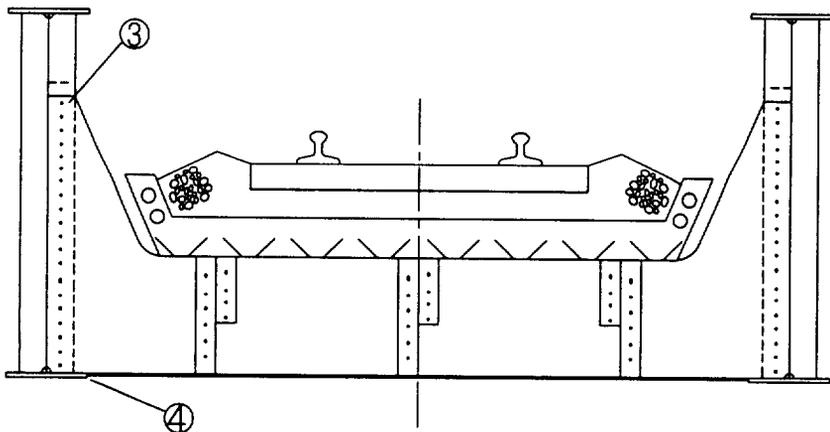


그림 4.6 가로보의 피로응력평가부위

표 4.2 피로응력평가부위의 이음상세

이음의 종류	강도등급 (kg/cm ²)	허용응력의 타절한계(kg/cm ²)	
	2×10 ⁶ 회 기본허용응력범위 ($\Delta\sigma_f$)	일정진폭응력 ($\Delta\sigma_{ce}$)	변동진폭응력 ($\Delta\sigma_{ve}$)
① 복부판 볼트이음부	C(1250)	1150(2.6×10 ⁶)	530(2.6×10 ⁷)
② 하부플랜지 볼트이음부	D(1000)	840(3.4×10 ⁶)	390(3.4×10 ⁷)
③ 주형복부판 +가로보 복부판	B(1550)	1550(2.0×10 ⁶)	720(2.0×10 ⁷)
④ 주형 하부플랜지 +가로보 하부플랜지	C(1250)	1150(2.6×10 ⁶)	530(2.6×10 ⁷)

4.5 응력변동해석

평가부재에 대한 응력값을 추정하기 위해서는 응력변동해석을 실시한다. 우선, 대상교량에 대한 구조해석을 통하여 평가위치의 단위하중에 대한 휨모멘트 영향선을 작성하고, 이에 기초한 응력값들을 구하여 대상교량을 모델링한 영향면의 각 절점의 종거값으로 해당되는 값들을 입력한다. 이렇게 작성된 영향면에 각 열차에 대한 축간거리 및 축하중, 최대중량, 최소중량, 평균중량, 혼입률, 표준편차, 분포형을 이용한 시뮬레이션하중을 사용하여 응력변동해석을 실시한다. 응력변동해석을 실시하여 얻어진 응력범위빈도분포에서 최대응력범위와 등가응력범위를 구하고, 강도등급 및 안전계수를 이용하여 피로응력평가를 실시한다.

그림 4.7과 그림 4.8은 평가부위의 영향선을, 그림 4.9와 그림 4.10은 평가부위의 영향면을 각각 나타낸다. 그리고, 표 4.3은 응력변동해석의 결과를 나타낸다.

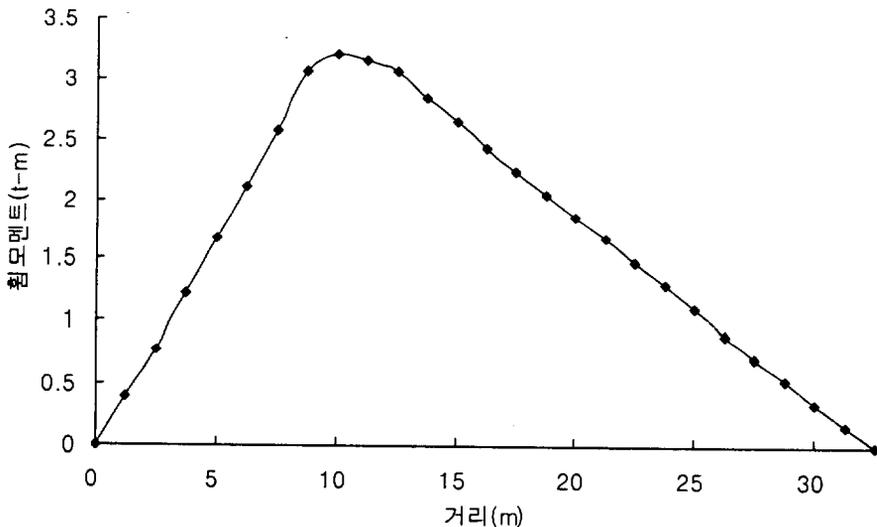


그림 4.7 평가부위 ①, ②의 영향선

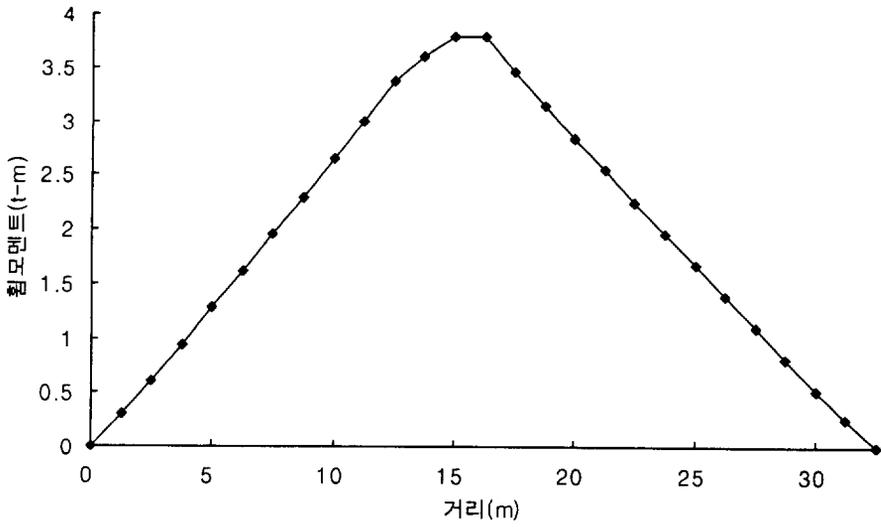


그림 4.8 평가부위 ③, ④의 영향선

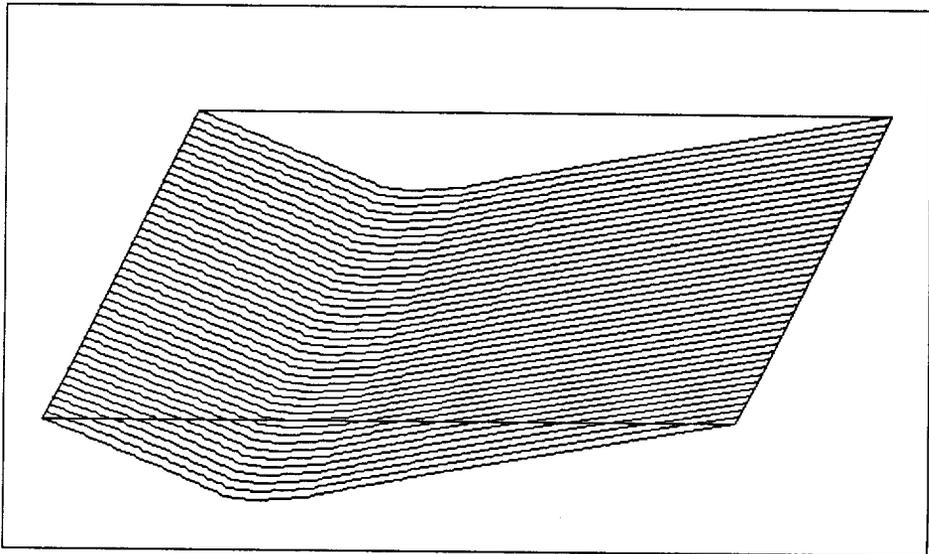


그림 4.9 평가부위 ①, ②의 영향면

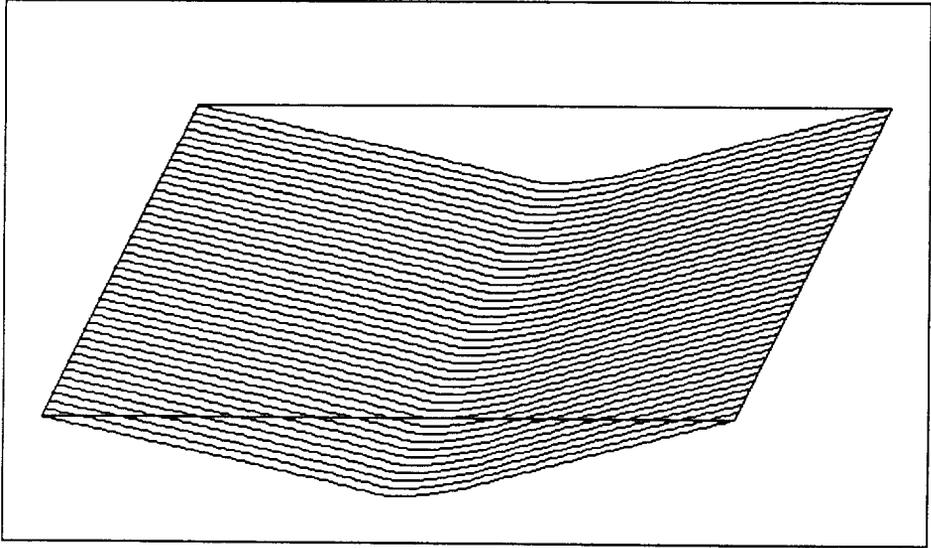


그림 4.10 평가부위 ③, ④의 영향면

표 4.3 응력변동해석의 결과

	평가부위 ①, ②	평가부위 ③, ④
교통량(대/일)	220	220
최대응력범위 (kg/cm ²)	786.2	893.5
등가응력범위(m=3) (kg/cm ²)	200.9	180.1

4.6 피로응력평가

4.6.1 간편 피로응력평가

I형 플레이트 거더의 피로응력평가 위치는 그림 4.5에서 ① 복부판 볼트 이음부, ② 하부플랜지 볼트이음부를 나타내며, 그림 4.6에서는 ③ 주형 복부판+가로보 복부판 볼트이음부 ④주형 하부플랜지+가로보 하부플랜지 볼트이음부에 대한 간편 피로조사의 결과를 표 4.4에 나타내고, 간편 피로응력평가에 만족되지 않는 경우는 상세 피로응력평가를 실시한다.

표 4.4 간편 피로응력평가

피로응력평가위치		①	②	③	④
설계보정계수(α)		1.0	1.0	1.0	1.0
최대응력범위 $\Delta\sigma_{\max}$ (kg/cm ²)		786.2	786.2	893.5	893.5
응력범위의 타절한계 $\Delta\sigma_{ce}$ (kg/cm ²) (일정진폭응력)		1150	840	1550	1150
평균응력보정계수(C_R)		1.0	1.0	1.0	1.0
판두께 보정계수(C_t)		1.0	1.0	1.0	1.0
안전계수	γ_b	1.0	1.0	1.0	1.0
	γ_w	1.0	1.0	1.0	1.0
	γ_i	1.0	1.0	1.0	1.0
상세한 피로응력평가의 여부 ($\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i$) $\alpha \Delta\sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_{ce} C_R C_t$		필요없음	필요없음	필요없음	필요없음

4.6.2 등가응력범위를 이용한 상세 피로응력평가

표 4.4의 간편 피로응력평가 결과에서 피로응력평가를 실시한 모든 볼트 이음부는 일정진폭하에서 허용응력의 타절한계이하의 값을 가지므로 상세 피로응력평가가 필요없는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 연구목적에 피로수명을 산정하기 위함이므로 상세 피로수명평가를 실시하였다. 평가대상의 모든 볼트이음부 ①, ②, ③, ④에 대해서 등가응력범위를 이용한 상세 피로응력평가를 실시하고 피로수명까지 계산하였다. 그림 4.5와 그림 4.6에서 나타난 피로응력평가의 부위 ①, ②, ③, ④ 대한 등가응력범위를 표 4.5에, 상세 피로응력평가의 결과를 표 4.6에 각각 나타낸다. 표 4.6에 나타난 상세 피로응력평가의 결과에서 설계응력범위가 허용응력범위를 넘지 않으므로 피로에 대해 안전한 것으로 나왔다. 한편, 철도교의 수명을 70년으로 하였을 때, 각각의 피로조사위치에 대한 피로수명(년)을 표 4.7에 나타낸다.

표 4.5 피로응력평가의 등가응력범위

Location of fatigue check	①	②	③	④
설계계산 보정계수	1.0	1.0	1.0	1.0
응력범위 $\Delta\sigma_i$ (kg/cm ²)	69.87	69.87	31.212	31.212
반복회수 (n_i)	4.82×10^7	4.82×10^7	4.82×10^7	4.82×10^7
등가응력범위 $\Delta\sigma_e$ (kg/cm ²)	200.9	200.9	180.1	180.1

표 4.6 등가응력범위를 이용한 상세 피로응력평가

피로응력평가위치	①	②	③	④
피로강도등급	C	D	B	C
2×10^6 회 기본허용응력 범위 $\Delta\sigma_f$ (kg/cm ²)	1250	1000	1550	1250
설계반복회수 (n_f)	4.82×10^7	4.82×10^7	4.82×10^7	4.82×10^7
평균응력보정계수 (C_R)	1.0	1.0	1.0	1.0
판두께 보정계수 (C_t)	1.0	1.0	1.0	1.0
설계응력범위 $\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_e$ (kg/cm ²)	200.9	200.9	180.1	180.1
허용응력범위 $\Delta\sigma_R$ (kg/cm ²)	432.8	346.2	536.6	432.8
피로응력평가 ($\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i$) $\Delta\sigma_d \leq \Delta\sigma_R$	만족	만족	만족	만족

표 4.7 피로수명

피로응력평가위치	①	②	③	④
설계수명(년)	70	70	70	70
피로수명(년)	129	103	178	144

5. 결론

피로설계의 기본이론을 정리하고 시뮬레이션 하중에 의한 응력변동 해석을 실시하였다. 단순교의 I형 플레이트 거더교에서 최대 휨모멘트가 작용하는 위치에 대해 실제 차량 하중을 재하하여 주형의 볼트이음부 및 주형과 크로스빔의 볼트이음부에 대해서 간편 피로응력평가 및 상세 피로응력평가를 실시 하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 볼트이음부에 대해 간편 피로응력평가를 실시한 결과, 피로한계보다 낮은 응력범위를 나타내었다. 따라서 상세 피로응력평가는 필요하지 않으나 본 연구에서는 피로 수명을 산정하기 위하여 상세 피로응력 평가를 실시 하였다. 그 결과 허용응력범위를 초과하지 않으므로 안전하다는 결과를 얻었다.
- 2) 철도교의 통행차량에 대해 시뮬레이션 하중으로 응력변동해석을 실시한 결과 대상 교량의 주형복부판 볼트이음부, 주형 하부플랜지 볼트이음부, 주형복부판과 가로보 복부판 볼트이음부, 주형 하부플랜지와 가로보 하부플랜지의 볼트이음부에 대한 피로수명은 설계수명의 147.6% ~ 255.4% 정도로 안전측으로 설계되었다.
- 3) 대상 부재의 실동하중에 대한 부재계수, 중요도계수, 검사계수 등의 안전계수를 정확하게 측정하고, 실교량에서 측정한 응력값과 구조해석을 통한 응력값에 대하여 적절한 보정이 이루어지면 교량의 수명을 더욱 정확하게 예측할 수 있다.
- 4) 철도교는 통행대수나 통과 위치가 일정하므로 적절한 유지관리가 이루어지면 교량의 수명은 더욱 길어질 것으로 예상된다.

참고문헌

- 1) 大倉一郎, “鋼橋의 疲勞,” 建設圖書, 1998
- 2) 韓國鋼構造學會, “鋼構造의 接合,” 鋼構造便覽, 第2券, 1995.
- 3) P.S.A Berridge, “The Use of High Strength Bolts in Railway Girder Bridge,” Preliminary Publication of The Sixth Congress of The LABSE, 1960
- 4) 崔一允, “高張力볼트 摩擦이음의 疲勞舉動에 關한 研究,” 漢陽大學校 大學院 碩士學位論文, 1995.
- 5) 韓國鋼構造學會, “鋼鐵道橋의 設計,” 鋼構造便覽, 第5券, 1995.
- 6) AISC, Manual, of Steel Construction, 8th Edition, Part 4, Connections, 1980.
- 7) AASHTO, Standard Specification for Highway bridges, 13th Edition, 10. 32. 3. 2, “Applied tension, Combined tension and shear,” 1983.
- 8) 日本建築學會, “高力볼트 接合設計施工指針,” 1984.
- 9) 韓國鋼構造學會, “鋼構造의 技術,” 鋼橋梁編, 1999.
- 10) 황학주, “최신 교량 공학,” 동명사, 1999.
- 11) 西脇威夫, 黒田充紀, 増田陳紀, 鈴木康弘, “高力볼트引張接合・長め形式におけるばねモデルによる볼트付加軸力,” 土木學會論文集, No. 416, I-13, 1990.
- 12) 日本鋼構造協會, “鋼構造物疲勞設計指針・同解説,” 技報堂, 1993.
- 13) 변영표, “지하철 교량 용접이음부의 피로설계에 관한 연구,” 부경대학교 석사학위논문, 2000.
- 14) 윤태양, 이종관, “강도로교 피로설계요령(上),” 韓國鋼構造學會誌, 第11

券 1號, 1999.

- 15) 장동일, 김기수, 경갑수, 이명구, 홍성욱, “피로손상이 발생한 강트러스 철도교의 응력빈도계측 및 피로수명평가,” 한국강구조학회 學術發表大會 論文集. 1999. 6.
- 16) 대한토목학회, “철도청 제정 철도설계기준(철도교편),” 1999.
- 17) 金珉水, “鋼箱桁橋 疲勞設計에 關한 基礎的 研究,” 釜慶大學校 碩士學位論文集, 1998.
- 18) 장동일, “구조공학에서의 파괴와 피로,” 동명사, 1999.
- 19) 변근주, 오진우, 김영진, “하중 스펙트럼을 이용한 강철도교의 피로해석에 관한 연구,” 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 제18권, 제1권, 1996.
- 20) 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, 1988.
- 21) Miki, C., Goto, Y., Mori, T. and Yoshoda, H., “Computer Simulation Studies on the Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges,” 日本土木學會 論文集, No. 365, 1985.
- 22) 정경섭, “일본의 강교량 피로파손 사례,” 한국강구조학회지, 제9권 제2호, 1997.
- 23) A. Almar-Naess, “Fatigue Handbook, offshore Steel Structures TAPIR,” 1985.
- 24) 森猛, 林 暢彦, “變動振幅荷重を受ける鋼部材の疲勞壽命評價方法の提案,” 土木學會論文集, No.537, I -35, 1996.

감사의 글

지금까지 지내온 날들과 앞으로 살아갈 저의 일생에서 가장 소중한 기억으로 남을 짚았던 학교 생활에서 지금까지 저에게 아낌없이 사랑과 도움을 아낌없이 주신 분들에게 미약하지만 머리 숙여 감사의 마음을 전하고자 합니다.

논문이 완성되기까지 아낌없는 가르침을 베풀어주신 지도교수 이동욱 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 연구 중에도 저의 미비한 논문에 대해 조언과 격려를 아끼지 않으신 김명식 교수님과 국승규 교수님께 감사드립니다.

또한, 부족한 저에게 항상 아낌없는 배려를 여러 면에서 베풀어주신 김상용 교수님, 김종수 교수님, 손인식 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 정진호 교수님, 이환우 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께 감사드립니다.

아울러 이 논문이 끝나기까지 바쁜 시간을 함께 나누어준 강구조 연구실 후배 김대성, 하창민, 그리고 앞으로 대학원생이 될 성민, 휘종, 동현에게 고마움을 전합니다. 또한 멀리 서울에서 묵묵히 지켜 봐준 정우성, 최재원에게도 고맙게 생각합니다. 그리고 항상 힘들면 함께 고민을 해준 13개모임의 이상명, 윤재범, 장재혁, 전수용, 강중광, 박필보, 이병길에게도 고마움을 전합니다. 또한 늘 옆에서 친형들처럼 든든하게 힘이 되어준 박정철 선배, 김광민선배에게도 고마움을 전합니다.

그리고 힘든 여건 속에서도 회사생활과 학업을 병행하게 도움을 주신 (주) 세우산업 연구명 사장님, 백석조 상무님, 정춘송 이사님, 홍태규 부장님 이하 임직원 여러분께 감사드리며, 또한 현장근무시에 보이지 않게 도움을 주신 강천고 전무님에게도 감사 드립니다.

2년동안 옆에서 많은 기도와 아낌없는 사랑을 주신 아버님, 어머님에게 머리 숙여 이 영광을 바칩니다. 그리고 장인, 장모님, 처남 조봉정과 멀리

일본에서 걱정해준 처제 조민정, 그리고 말없이 형의 생활을 지켜 봐준 동생 현철이, 모두에게 고마움을 전합니다.

끝으로 이제 새롭게 시작하는 인생에 평생 반려자가 되어줄 것을 약속하고 힘들고 어렵고 지칠 때 항상 옆에서 따뜻한 미소와 목소리로 나에게 큰 힘이 되어준 사랑스런 아내 조선영에게 이 영광을 바칩니다.

이 한편의 논문으로 제가 은혜를 입은 모든 분들에게 작은 보답과 기쁨이 될 수 있다면 그지없이 기쁘겠습니다.

2002. 1

김 태 진