

工學碩士 學位論文

강교의 피로평가 시스템 개발 및
활용에 관한 연구

A Study on Development and Application of Fatigue
Assessment System for Steel Bridges

指導教授 慶 甲 秀

2006 年 2 月

韓國海洋大學教 大學院

土木環境工學科

朴 晋 佑

本 論文을 朴晋佑의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 金 泰 亨 (印)

委員長 工學博士 金 度 三 (印)

委員長 工學博士 慶 甲 秀 (印)

2006 年 2 月

韓國海洋大學教 大學院

土木環境工學科

朴 晋 佑

A Study on Development and Application of Fatigue Assessment System for Steel Bridges

by

Jin-Woo Park

**Department of Civil & Environment Engineering
Graduate School Korea Maritime University**

ABSTRACT

Achieve survival life of target construction and fatigue investigation through system development that can execute fatigue estimation of steel bridge by link of technology for development of element technology that can achieve quantitative and objective preservation administration techniques construction and efficient preservation administration system construction in this research. Wish to utilize this to basic data to preservation administration precedence decision based on survival life of target construction to foundation and enhance safety and durability, preservation administration's efficiency and economic performance of steel bridge. Official business year's number analyzes domestic data for steel bridge synthesis because old bridge is judged that reasonable repair reinforcement countermeasure establishment need because can know that span effective span is weak on announcement because is short mostly as result that investigate domestic steel bridge fatigue special quality and executed strict data analysis because enforcing spot measure about representative bridge. Enforce by system that conduct fatigue safety estimation of bridge that is using in common actuality and the result analyzing result and comparison with fatigue safety Assessment program(FSAP) that is developed in Japan court university and validity of these system together examine .

강교의 피로평가 시스템 개발 및 활용에 관한 연구

박진우

한국해양대학교 대학원
토목환경공학과

요 약

본 연구에서는 정량적이고 객관적인 유지관리 기법 구축 및 효율적인 유지관리 체계구축을 수행할 수 있는 요소기술의 개발을 위한 기술의 일환으로 강교의 피로평가를 실시할 수 있는 시스템 개발을 통하여 대상 구조물의 잔존수명 및 피로조사를 수행한다. 이것을 기초로 대상구조물의 잔존수명에 기초한 유지관리 우선순위 결정에의 기본적 자료로 활용하도록 하여 강교의 안전성 및 내구성, 유지관리측면에서의 효율성 및 경제성을 향상하고자 한다.

국내 강철도교 피로특성을 조사한 결과 공용년수가 오래된 교량은 지간이 대부분 짧아 피로에 취약함을 알 수 있어 합리적인 보수보강 대책 수립이 필요하다고 판단되어, 강철도교에 대한 국내자료를 종합 분석하고 대표적인 교량에 대해 현장계측을 실시하여 엄밀한 데이터 분석을 실시하였다.

교량의 실측데이터와 본 시스템의 시뮬레이션을 비교 분석하여 시스템의 타당성을 검토하고 각 교량의 영향면을 이용하여 실제 열차하중이 강철도 교량의 피로에 미치는 영향을 평가하였다.

또한, 실제 공용중인 교량의 피로안전성 평가를 본 시스템으로 실시하고 그 결과를 일본 법정대학교에서 개발된 피로안전성평가 프로그램(Fatigue Safety Assessment Program, FSAP)과의 결과와 비교 분석하여 본 시스템의 활용성과 타당성을 함께 검토하였다.

목 차

ABSTRACT	i
목차	iii
표 목차	v
그림 목차	vi
1장 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구 내용 및 범위	2
2장 기초 개념	3
2.1 응력변동해석	3
2.1.1 피로하중	3
2.1.2 영향면	5
2.1.3 하중의 이동경로 설정	6
2.1.4 응력변동 계산방법	6
2.1.5 분할 폭의 설정	7
2.1.6 결과의 출력	8
2.2 피로조사	8
2.2.1 피로강도	8
2.2.2 피로조사에 사용되는 응력	16
2.2.3 피로조사방법	18
2.3 피로균열진전해석	20
2.3.1 기본적인 고려사항	20
2.3.2 응력확대계수의 계산	21
2.3.3 균열의 합체조건	30
2.3.4 피로균열진전속도 표시식	30
2.3.5 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석	31
2.3.6 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석	33
3장 프로그램의 기능	40
3.1 응력변동해석	40
3.1.1 입력	41
3.1.2 실행	50

3.1.3 출력	52
3.2 피로조사	53
3.1.1 기본데이터	53
3.2.2 실행	58
3.2.3 출력	58
4장 프로그램의 적용	59
4.1 봉강천교	59
4.1.1 교량현황	59
4.1.2 측정 하중	59
4.1.3 빈도그래프	60
4.1.4 피로설계곡선	61
4.1.5 피로조사	61
4.2 죽계천교(상행)	62
4.2.1 교량현황	62
4.2.2 측정하중	62
4.2.3 빈도그래프	62
4.2.4 피로설계곡선	63
4.2.5 피로조사	64
5장 프로그램의 활용 및 검증	65
5.1 검토 대상	65
5.2 해석 모형 및 영향면	65
5.3 시뮬레이션 하중	66
5.4 교통량 예측결과	67
5.5 응력변동해석결과	67
5.6 피로등급분류 및 허용피로응력 범위	68
5.7 피로안전성 평가 결과	69
6장 결론 및 향후 연구 방향	71
참고문헌	72

표 목차

표 2.1	JSSC의 기본허용응력범위(직응력을 받는 이음, =3)	8
표 2.2(a)	비용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류	11
표 2.2(b)	횡방향 맞대기 용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류	12
표 2.2(c)	종방향 용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류	12
표 2.2(d)	十자용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류	13
표 2.2(e)	거세트용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류	14
표 2.2(f)	기타 용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류	15
표 2.3	피로균열 진전해석시 사용하는 상수값	31
표 3.1	국가별 표준하중	41
표 3.2	영향면 항목별 변수	44
표 4.2	죽계천 교량 현황	62
표 5.1	피로등급분류	68
표 5.2	허용피로응력범위	68
표 5.3	피로안전성 평가 결과	70

그림 목차

그림 2.1 영향면의 분할	6
그림 2.2 Rainflow counting method	7
그림 2.3 점증점감파형	7
그림 2.4 반타원형 균열	21
그림 2.5 무한판에 길이 2a의 관통균열	21
그림 2.6 해석 가능한 균열형상	23
그림 2.7 중첩의 원리	27
그림 2.8 균열면에 작용하는 상하 대칭인 분포력	28
그림 2.9 균열면에 작용하는 상하좌우 대칭인 분포력	29
그림 2.10 균열의 합체조건	30
그림 2.11 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도	32
그림 2.12 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도	34
그림 2.13 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도	36
그림 3.1 프로그램의 기본 화면	40
그림 3.2 철도교 표준하중	41
그림 3.3 철도교 표준하중의 추가	42
그림 3.4 철도교 시뮬레이션 차량하중	42
그림 3.5 철도교 시뮬레이션 차량하중의 추가	43
그림 3.6 영향면 파일명 입력	44
그림 3.7 구조물 형상의 입력	45
그림 3.8 영향면 구성의 입력	45
그림 3.9 영향면 절점 입력	46
그림 3.10 종거값 입력	46
그림 3.11 하행선 입력	47
그림 3.12 차선구성 입력	47
그림 3.13 차선선형 입력	48
그림 3.14 실측데이터 파일의 입력	48
그림 3.15 빈도그래프 파일의 입력	49
그림 3.16 빈도그래프 사용자 입력	49
그림 3.17 표준하중의 실행	50
그림 3.18 응력변동해석의 실행	50
그림 3.19 시뮬레이션 실행	51

그림 3.20	응력변동해석의 실행	51
그림 3.21	응력변동해석의 간단 실행	52
그림 3.22	영향면 형상	52
그림 3.23	빈도그래프	53
그림 3.24	피로조사 기본데이터	53
그림 3.25	강도 등급의 파일 입력	54
그림 3.26	강도 등급의 대화상자 입력	55
그림 3.27	강도등급의 사용자 입력	56
그림 3.28	응력변동데이터의 파일 입력	56
그림 3.29	빈도그래프의 사용자 입력	57
그림 3.30	한국기준선정시의 피로조사법	57
그림 3.31	일본기준선정시의 피로조사법	57
그림 3.32	피로설계곡선	58
그림 3.33	피로조사결과	58
그림 4.1	무궁화호의 기관차 및 객차 모형	59
그림 4.2	시뮬레이션에 적용한 열차 제원	59
그림 4.3	실측데이터 빈도그래프(봉강천교)	60
그림 4.4	시뮬레이션 빈도그래프(봉강천교)	60
그림 4.5	실측치 피로설계곡선	61
그림 4.6	시뮬레이션 피로설계곡선	61
그림 4.7	실측데이터 피로조사 결과	61
그림 4.8	시뮬레이션 피로조사 결과	61
그림 4.9	실측데이터 빈도그래프	63
그림 4.10	시뮬레이션빈도그래프	63
그림 4.11	실측치 피로설계곡선	64
그림 4.12	시뮬레이션 피로설계곡선	64
그림 4.13	실측데이터 피로조사 결과	64
그림 4.14	시뮬레이션 피로조사 결과	64
그림 5.1	검토 대상 교량	65
그림 5.2	영향면 작성을 위한 해석모형	65
그림 5.3	아치리브 부의 영향면	66
그림 5.4 (a)	새마을호(DL7100호대)	66
그림 5.4 (b)	무궁화호(DL7100호대)	66
그림 5.4 (c)	통일호(DL7100호대)	66
그림 5.4 (d)	화물열차(DL7100호대)	66

그림 5.5 시뮬레이션 적용 차종 구성비	67
그림 5.6 본 프로그램의 빈도그래프	68
그림 5.7 일본 프로그램의 빈도그래프	68

1장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

철도 노반 구조물을 구성하고 있는 구조물의 하나인 강철도교는 공용기간동안 지속적인 열차하중의 반복으로 인하여 피로에 의한 손상을 받기 쉬운 구조물의 하나로 보고되고 있다. 철도교에서의 피로손상은 통과 열차의 하중 크기와 반복회수가 지배적인 인자가 된다. 따라서 공용연수가 오래된 강철도교일수록 피로손상의 정도가 클 가능성이 높다.

한편, 2001년 12월 강철도교 통계자료조사에 의하면 1136개의 강철도교 가운데 공용연수가 50년을 초과하는 강철도교가 751개교의 64%를 차지하고 있어 노후화된 강철도교가 비교적 많은 것으로 조사되었다. 다만, 노후화된 강철도교가 비교적 피로에 대해 높은 저항특성을 가진 리벳형식의 강교량인 것으로 조사되었다. 그러나 1970년 중반이후에는 리벳형식의 강철도교를 대신하여 용접형식의 강철도교가 건설되기 시작하여 현재에 이르고 있다. 따라서 대다수의 용접형 강철도교의 공용연수가 30여년을 초과하고 있으므로 피로손상이 누적되어 2차부재 등에서 피로균열이 발견되고 있다. 이러한 피로균열은 강철도교 전체의 내하력이나 수명에 직접적으로 영향을 미치지 않는 경우나 방치하는 경우는 구조물에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 노후교량이나 피로손상을 받고 있는 교량의 지속적인 사용성 확보 및 기존 선로의 속도향상 등에 대응하기 위해서는 강철도교의 피로손상을 정확하게 판단하고 조치를 취할 수 있는 유지관리 체계를 구축하는 것은 중요한 것으로 판단된다.

현재 강철도교의 유지관리는 한정된 예산과 제한된 인원 등에 의해 제한적이고 부분적으로 관리되는 것이 실상이다. 따라서, 이러한 제한적인 조건, 예를 들면 일반적으로 육안에 의해 실행되는 일상점검, 또는 전체적인 정기점검, 정밀안전진단 등의 결과를 이용하여 강철도교의 구조부재에 대한 피로손상을 정량적으로 파악하거나 또는 피로수명을 추정할 수 있는 시스템이 구축된다면 유지관리의 효율성을 극대화시킬 수 있을 것으로 생각된다.

그러나 유지관리 관련 기술자에게 구조물의 피로 등에 관련된 전문 지식의 습득이나 유지관리에 관련된 상세한 기술을 요구하는 것은 현실적으로 기술자에게는 큰 부담이 될 뿐만 아니라 교육에 막대한 시간이 소요될 가능성이 있으므로 시간적, 경제적인 문제 등을 유발시킬 수 있다. 따라서 현재의 유지관리 체계 내에서 기본적인 내용을 습득하는 것으로도 정성적인 강철도교의 피로손상을 추정할 수 있는 시스템의 개발이 강철도교의 유지관리에서 필요할 것으로 판단된다. 이러한 시스템이 개발된다면 강철도교 유지관리에서 구조부재의 피로성능, 내구성 등에 관한 정보를 파악할 수 있으므로 보다 고품질의 유지관리 서비스를 제

공하게 되어 철도 구조물에 대한 대국민 신뢰도 향상은 물론 효율적인 유지관리 체계 구축으로 경제적인 효과도 클 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 인식하여 강철도교의 보다 효율적인 유지관리를 위하여 현장 기술자가 쉽게 접근할 수 있으며, 또 현장의 자료를 사용하여 강철도교 구조부재의 피로수명을 정성적으로 추정할 수 있는 피로해석 및 이를 평가하는 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다.

1.2 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 피로평가 시스템에서 사용되는 3가지 단위 모듈 프로그램인 응력변동해석, 피로조사, 피로균열진전해석의 기본적인 용어 및 개념에 대해 기술하고 각 단위 모듈 프로그램의 기능적인 부분을 소개하였다.

실제 교량을 측정한 실측 데이터들의 응력변동해석과 본 프로그램의 시뮬레이션을 이용한 응력변동해석의 빈도그래프를 비교 분석하여 본 시스템의 타당성을 검증하였고, 같은 구조상세의 이음 등급으로 간편법과 등가응력범위법, 누적손상도법을 사용한 피로조사의 결과로 본 시스템의 시뮬레이션과 실측 데이터와의 차이를 비교 분석하여 시스템에 적용된 알고리즘의 타당성 및 시스템의 유용성을 확인 하였다.

본 평가시스템의 활용 및 검증을 위해 일본의 피로안전성평가 프로그램을 사용한 응력변동해석의 그래프와 본 프로그램을 사용하여 분석한 응력변동해석의 그래프의 비교를 나타내었다. 또한 평가시스템의 활용성의 연구 결과 본 평가시스템을 이용하여 피로 안전성평가를 실시한 결과와 일본의 피로안전성평가 프로그램을 사용한 결과를 비교 분석하여 안전성 평가의 활용성과 검증을 실시하였다.

2장 기초 개념

본 피로평가 프로그램에서 사용되는 3가지 단위 모듈 프로그램인 응력변동해석, 피로조사, 피로균열진전해석의 기본적인 용어 및 개념에 대해 기술한다.

2.1 응력변동해석

본 단위 모듈 프로그램의 목적은 강철도교 잔존수명 평가의 기본인자인 응력범위를 평가대상의 구조상세부위에 대해 계산하는 것이다. 따라서 여기서 계산되어진 응력변동은 개별 단위 모듈 프로그램인 피로조사 및 피로균열 진전해석에서 기본인자로도 사용될 수 있다.

응력변동해석 단위 모듈 프로그램에서 사용되는 기본적인 용어 및 개념에 대해 기술한다.

2.1.1 피로하중

본 평가시스템에서의 피로하중은 설계수명 중에 구조물에 작용하는 하중 특성을 충분히 나타낼 수 있는 것으로 한다. 1개의 하중단위 또는 복수하중단위의 조합, 또는 대표하중단위를 이용하여 설정한다.

1) 대표하중단위

설계계산을 간편하게 하기 위해 복수의 하중단위를 대표하는 단수의 하중단위, 또는 하중 크기가 변화하는 하중단위를 대표하는 하중크기를 확정값으로 하는 단수의 하중단위를 피로설계하중으로 하는 것을 대표하중단위로 정의하는데 일반적으로 표준설계하중이 적용된다.

그러므로 대표하중단위를 피로조사하중으로서 사용하는 경우는 변동진폭응력하의 하한계를 사용해서는 안 된다.

본 단위 모듈 프로그램에서는 국내의 철도교 설계 기준에 준하여 설계하중으로 고속철도의 고속열차 설계하중과 기존선의 L22, S22 및 L18, S18의 총 5종류의 하중을 대표하중단위의 기본 데이터로 하고 있으며 이외에 일본의 신간선 및 재래선에 대한 대표하중도 제시하고 있다. 또한, 필요에 따라 사용자가 대표하중단위를 임의로 작성하여 입력 데이터로서 활용 할 수 있다.

2) 최대하중단위

설계 수명 중에 구조부재에 발생하는 최대응력범위를 발생시키는 하중단위이다. 하중단위 또는 대표하중단위로 최대응력범위를 나타낼 수 없는 경우에는 최대하중단위를 사용하여 간편한 피로조사를 수행할 수 있다. 본 프로그램에서는

대표하중단위를 X배 하는 것에 의해 최대하중단위를 부여한다.

3) 시뮬레이션 하중

실제 공용되는 철도 하중을 모형화한 활하중, 즉 열차 운행 시간에 기초한 통행량과 차량구성으로 표현하여 하중의 배열, 중량을 시뮬레이션 하여 실제 운행되는 열차하중을 모사한 하중이다. 이 시뮬레이션하중이 철도교 시뮬레이션에 의한 응력변동해석에 사용되는 하중이다. 여기서는 단위 모듈 프로그램에서 사용하는 차량구성, 하중의 중량분포에 대해 설명한다.

(1) 차량 구성

현재 프로그램에서 제시되어 있는 국내의 시뮬레이션 차량으로는 고속철도와 기존선이 있다. 고속철도의 경우 KTX 차량 1종류와 기존선의 경우 새마을, 무궁화, 통일호, 화물차 2종의 총 5종류를 기본으로 하고 있으며 이외에 경전철, 지하철 등의 차량을 추가적으로 구상하고 있다. 또한 선택에 의해 사용자가 언제든지 새로운 차량을 추가할 수 있도록 구성되어 있다.

시뮬레이션 실행에서의 차량결정은 난수 발생에 의해 실시하는데 선택 구간에 있어서 일정난수를 발생시키는 방법에 의해 결정하는 몬테카를로 시뮬레이션 방법에 의해 수행된다.

(2) 하중의 중량분포

차량 하중의 중량분포는 정규분포, 대수정규분포, 이중정규분포, 이중대수정규분포의 4가지 종류 중에서 선택하는 것으로 하였다. 이는 기존의 연구결과 열차 차량의 하중중량 분포는 이들 4가지 분포에 의해 특성 지을 수 있다는 보고에 기초한 것이다. 그리고 각 분포에 대해 분포특성을 규정할 수 있는 분포형의 평균, 표준편차, 최대중량, 최소중량을 입력할 수 있다. 또한, 이중정규분포와 이중대수정규분포는 적재 시 및 공차 시에 각각 중량분포가 최대로 되는 것을 가정한 분포이므로 평균과 표준편차는 적재 시, 공차시의 각각에 대해서 입력하며, 여객 열차인 경우는 승차효율을 고려한 중량분포를 입력할 수 있다.

프로그램에서 축중의 설정은 다음과 같이 실시한다.

- ① 입력된 하중중량 분포에 따라 난수를 발생시켜 중량을 결정한다.
- ② 결정된 중량이 최대중량을 상회하거나 최소중량을 하회하는 경우는 ①의 작업을 반복한다.
- ③ 하중 중량이 결정되면 축중비를 비례적으로 계산하여 각각의 축중을 계산한다. 이 이외의 경우는 축수에 따라서 축중을 균등하게 배분한다.

(3) 차량의 주행위치

프로그램에서의 차량 주행위치는 선택한 차선 궤도 위를 이동하게 하므로 직접 궤도 위에 차량을 재하 하는 것으로 한다.

2.1.2 영향면

강교의 피로안전성 평가 시 대상 구조상세의 응력변동범위 산출의 기본이 되는 영향면에 대해 기술한다.

1) 영향면 설정

이 시스템에서는 활하중이 구조물 위를 이동할 때 조사부위에 발생하는 변동 응력 계산을 영향선의 집합체인 영향면을 이용하여 계산한다.

프로그램에서는 영향면을 설정하기 위해 교축방향과 교폭방향을 각각 임의의 수로 임의의 위치에 바닥판 또는 바닥틀을 바둑판 형상으로 분할하고 이러한 분할선의 교점에 각 영향면의 종거를 입력한다. 이 영향면 종거는 응력이 휨모멘트나 축력 등의 단면력에 비례하므로 단면력의 영향면으로부터 구하는 것이 가능하다. 여기서 측정된 응력의 영향면 종거의 크기는 검사위치에 1tonf 또는 10kN의 집중하중을 재하 할 때의 값이다.

또한, 프로그램에서는 기존 구조물에서 실제 차량 주행 시의 응력 측정 결과값을 이용하여 응력변동범위 산출을 할 수 있도록 구성되어 있다.

2) 종거의 계산방법

하중이 영향면 위를 이동할 때 발생하는 변동응력을 계산하기 위해서는 영향면 위의 임의의 점에서의 종거가 계산되어야 한다. 프로그램에서는 영향면 종거를 계산하기 위해 그림 2.1에 나타낸 바와 같이 먼저 분할된 바닥판 격자의 각 길이방향을 추가적으로 전체 3개의 절점으로 구성된 삼각형으로 분할한다. 그리고 3개의 절점 좌표, 종거를 연립방정식으로 풀고, 3개의 절점으로 구성된 종거의 평면식을 설정하는 것에 의해 영향면상의 임의점에서의 종거를 계산한다.

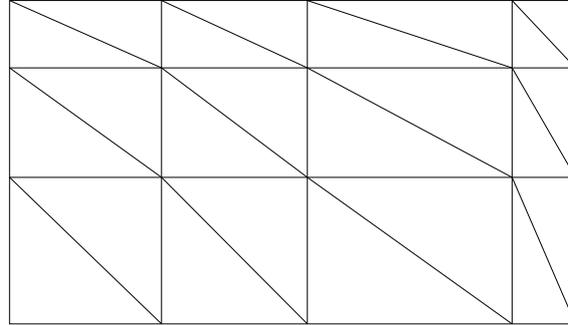


그림 2.1 영향면의 분할

2.1.3 하중의 이동경로 설정

프로그램에서 하중의 이동경로는 정해놓은 차선에서 차량이 궤도 위를 통과하는 것으로 한다.

2.1.4 응력변동 계산방법

(1) 하중이동의 간격

프로그램에서는 하중점이 영향면 폭방향의 영향면 분할선을 넘어갈 때에 응력 계산을 실시하는 것에 의해 응력변동의 피크를 생략하지 않고 응력을 계산한다.

(2) 응력계산

하중점 좌표가 영향면내의 어떤 삼각형 평면에 포함되었는가의 판단을 실시하고, 하중점 좌표를 그 평면의 평면식에 대입하여 영향면 종거를 계산한다. 그 종거와 하중의 곱이 하나의 하중에 의해 발생하는 응력이므로, 이 작업을 영향면상에 있는 모든 하중에 대해서 실시하면 어느 시점에서의 응력계산이 완료된다. 이 발생응력 σ 를 식으로 나타내면 식 (2.1)과 같다.

$$\sigma = \sum W_i Z_i \quad (2-1)$$

여기서, W_i : 하중, Z_i : 종거

이러한 응력계산을 활하중 이동마다 반복하여 응력변동을 발생시키고, 이러한 응력변동으로부터 응력범위빈도분포를 작성한다.

(3) Rainflow counting method에 의한 응력범위 빈도분포 작성

응력범위빈도분포의 계산은 Rainflow counting method를 이용한다. 이 방법은 계속해서 나타나는 4개의 변동응력치 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 가 그림 2.2에 나타낸 것과 같은 관계로 되는 경우, 즉 $\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_4$ 또는 $\sigma_1 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_4$ 라고 하는 조건을 만족하는 경우에 $|\sigma_2 - \sigma_3|$ 을 응력범위로서 계산하는 것이다. 계산 후에 σ_2 와 σ_3 을 변동응력파형에서 제외한다. 이 과정을 반복하면 그림 2.3에 나타낸 것처럼 점증, 점감하는 변동응력파형이 남는 경우가 있으니, 이 경우에는 최대의 극대값과 최소의 극소값의 차, 2번째의 극대값과 극소값의 차,를 응력범위로 하여 계산한다. 이 방법은 변동응력의 극치수열을 단축하고, 계산기의 기억용량과 계산시간을 간략화 시키는 효과가 있고, 동시에 변동진폭응력하에서의 피로수명평가에 가장 적절한 것으로 알려져 있다. 또한, 이 방법은 BS5400, ECCS 등에서 이용되고 있으며, JSSC지침에서도 이 방법을 권장하고 있다.

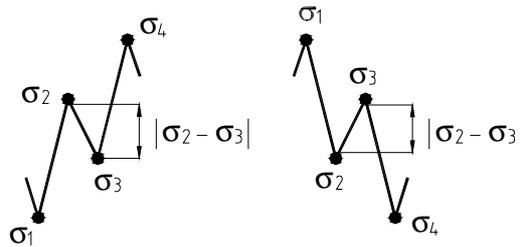


그림 2.2 Rainflow counting method

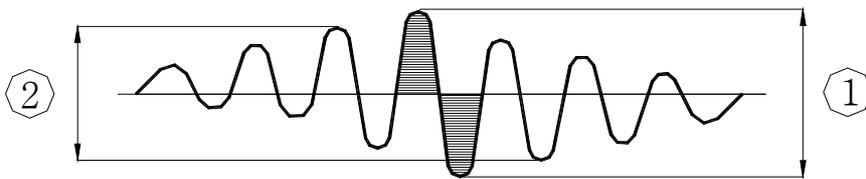


그림 2.3 점증점감파형

2.1.5 분할 폭의 설정

응력범위빈도분포를 작성할 때, 그 응력범위의 분할 폭을 설정할 필요가 있다. JSSC 지침에서는 분할 폭을 최대응력범위의 20등분 이상으로 하는 것을 추천하

고 있다. 본 시스템에서는 철도교의 경우 미리 영향면 위를 최대중량의 차량을 주행시킬 때에 발생하는 최대응력의 1/100을 분할 폭으로 설정하고 있다.

2.1.6 결과의 출력

변동응력해석이 완료되면 결과를 빈도그래프로 산출하는데, 이것은 피로조사의 기본이 되는 중요한 자료가 된다.

2.2 피로조사

2.2.1 피로강도

1) 피로설계곡선

본 프로그램에서의 피로곡선은 국내 및 JSSC의 분류를 사용하도록 하고 있다.

예를 들어, JSSC의 피로설계곡선은 수직응력을 받는 이음, 수직응력을 받는 케이블 및 고장력 볼트, 전단응력을 받는 이음의 3가지로 구분된다. 표 2.1에 나타난 것처럼 수직응력을 받는 이음에 대해서 각각 8개(등급A~H), 5개(등급K1~H5) 등의 피로설계곡선이 설정되어, 각각에 대해서 피로등급이 주어진다.

표 2.1 JSSC의 기본허용응력범위(직응력을 받는 이음, $m=3$)

피로 등급		응력범위의 하한계 (MPa)	
등 급	2×10^6 에 대한 기본허용응력범위 $\Delta\sigma_f$ (MPa)	일정진폭응력 $\Delta\sigma_{ce}$ (N)*	변동진폭응력 $\Delta\sigma_{ve}$ (N)*
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)

※()안의 수치는 응력범위에 대한 응력반복회수

JSSC의 기준에서는 각각의 피로등급에는 2×10^6 회 응력반복회수에서의 기본허용응력범위($\Delta\sigma_f$, $\Delta\tau_f$), 일정진폭응력 및 변동진폭응력에 대한 응력범위의 Cut-off 한계($\Delta\sigma_{ce}$, $\Delta\tau_{ce}$, $\Delta\sigma_{ve}$, $\Delta\tau_{ve}$)가 규정되어 있다. 일정진폭응력에 대한 응력범위의 Cut-off 한계는 변동응력의 응력범위성분 모두가 이 이하이면 피로

조사가 필요 없는 한계치를 나타낸 것으로 일정진폭응력하의 피로한계에 대응한다. 변동진폭응력의 응력범위성분의 하나라도 일정진폭응력에 대한 응력범위의 Cut-off 한계를 초과하는 경우에는, 피로손상에 기여하지 않는 응력범위의 한계 값으로서 변동진폭응력에 대한 응력범위의 Cut-off 한계를 이용하고 있다.

피로설계곡선은 식 (2.2) 및 (2.3)으로 주어진다.

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C_0 \quad (\Delta\sigma > \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve}) \quad (2.2)$$

$$N = \infty \quad (\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_{ce}, \Delta\sigma_{ve})$$

$$\Delta\tau^m \cdot N = D_0 \quad (\Delta\tau > \Delta\tau_{ce}, \Delta\tau_{ve}) \quad (2.3)$$

$$N = \infty \quad (\Delta\tau \leq \Delta\tau_{ce}, \Delta\tau_{ve})$$

$$\text{여기서, } C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m$$

$$D_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta\tau_f^m$$

$$\Delta\sigma_f, \Delta\tau_f: 2 \times 10^6 \text{ 회에 대한 기본허용응력범위}$$

m 은 피로설계곡선의 기울기를 나타내는 지수이고, 각각의 이음에 대해서 아래와 같이 주어진다.

$$m = 3 \text{ (수직응력을 받는 이음)}$$

$$m = 5 \text{ (수직응력을 받는 케이블 및 고장력 볼트)}$$

$$m = 5 \text{ (전단응력을 받는 이음)}$$

또, 선형의 피로설계곡선을 사용하면 안전 측인 피로조사를 실시하는 것이므로 변동진폭응력에 대한 응력범위의 Cut-off 한계를 설정하지 않아도 된다.

2) 이음의 피로등급

이음의 피로등급은 각 이음에 대한 피로시험결과의 하한 또는 그것에 상당하는 비초과 확률 97.7%(평균-2×표준편차)의 피로강도가 표 2.1의 피로설계곡선에서 얻어진 기본허용응력범위보다 높은가의 여부를 확인하는 것에 의해 설정된다.

이음의 피로등급분류는 표 2.1에 나타난 것과 같다. 이 이음 분류에서는 분류된 이음의 용접형상에 따른 국부적인 응력집중, 이음에 포함된 결함, 응력의 방

향, 금속층 조직이나 잔류응력, 용접부의 영향 등이 고려된다.

3) 평균응력(응력비)의 영향에 대한 보정

JSSC 지침의 경우 케이블에 대해서는 보정계수 C_R 를 기본설계응력범위에 곱하여 허용응력범위를 구한다. 보정계수 C_R 은 식 (2.4)로 표현된다.

$$C_R = \frac{1-R}{1-0.9R} \quad (2.4)$$

여기서, $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ (응력비)

일정진폭응력 및 변동진폭응력에 대한 cut-off 한계에 대해서도 C_R 을 곱하고, 평균응력에 대한 보정을 실시한다. 또한, 응력비 R 은 최소응력과 최대응력과의 비로서 피로설계하중 및 사하중으로부터 계산된다. 부록의 JSSC 지침의 고장력볼트에 대해서는 평균응력에 대한 보정은 실시하지 않는다.

표 2.2(a) 비용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류

이음의 종류		피로등급 ($\Delta\sigma_f$)	비고
1. 판	(1) 표면 및 절단면 기계 다듬질(거칠기 50S 이하)	A (190)	
	(2) 흑피 부착, 가스절단면(거칠기 100S 이하)	B (155)	
	(3) 흑피부착, 가스절단면(현저한 흔적은 제거)	C (125)	
2. 형강	(1) 흑피부착	B (155)	
	(2) 흑피부착, 가스절단면(거칠기 100S 이하)	B (155)	
	(3) 흑피부착, 가스절단면(현저한 흔적은 제거)	C (125)	
3. 이음이 없는 판		B (155)	
4. 원형구멍이 있는 모재(순단면응력, 실단면응력)		C (125)	
5. 필렛을 갖는 잘라낸 이음판이 있는 모재	(1) $1/5 \leq r/d$, 절단면의 거칠기 50S 이하	B (155)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$, 절단면의 거칠기 50S 이하	C (125)	
	(3) $1/5 \leq r/d$, 절단면의 거칠기 100S 이하	C (125)	
	(4) $1/10 \leq r/d < 1/5$, 절단면의 거칠기 100S 이하	D (100)	
6. 고장력 볼트 마찰이음 접합의 모재(순단면응력)	(1) $1 \leq n_b \leq 4$	B (155)	
	(2) $5 \leq n_b \leq 15$	C (125)	
	(3) $16 \leq n_b$	D (100)	
7. 고장력 볼트 지압접합이음의 모재 ($n_b \leq 4$, 순단면응력)		B (155)	
8. 검사대상방향의 응력을 전달하지 않는 고장력볼트 체결구멍을 갖는 모재(순단면응력)		B (155)	n_b : 응력방향의 볼트 수 ※(4, 6, 7, 8) 구멍을 전단천공으로 가공하는 경우에는 피로등급을 1등급 낮춘다.

표 2.2(b) 횡방향 맞대기 용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류

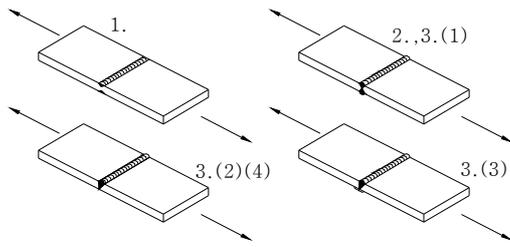
이음의 종류		피로등급 ($\Delta\sigma$)	비고
1. 덧살을 제거한 이음		B (155)	 <p> ※완전용입 용접에서 용접부는 건전하다고 전제한다. ※용접부에 테이퍼가 있는 경우에는 그 구배를 1/5 이하로 한다. ※깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다. ※(1., 2.) 다듬질은 언더컷이 남지 않도록 한다. 다듬질의 방향은 응력방향과 평행하게 한다. </p>
2. 지단을 다듬질한 이음		C (125)	
3. 다듬질하지 않은 이음	(1) 양면 용접	D (100)	
	(2) 양호한 형상의 흑피를 갖는 편면 용접	D (100)	
	(3) 뒷받침판을 부착한 편면용접	F (65)	
(4) 뒷면의 형상을 확인할 수 없는 편면 용접		F (65)	

표 2.2(c) 중방향 용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류

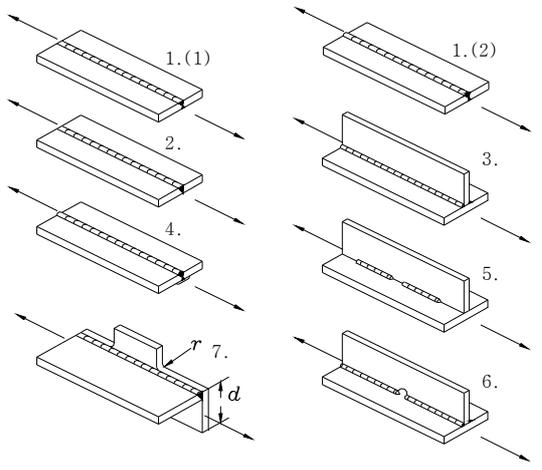
이음의 종류		피로등급 ($\Delta\sigma$)	비고
1. 완전용입 용접이음 (용접부가 건전한 것을 전제로 한다.)	(1) 덧살 제거	B (155)	 <p> ※(1.(2), 2., 3.) 용접과정에서 발생한 비드표면의 현저한 요철은 제거한다. ※(2., 3.) 내재하는 결함이 폭 1.5mm, 높이 4mm를 초과하지 않는 것이 확인되는 경우에는 피로등급을 C로 할 수 있다. </p>
	(2) 다듬질 안함	C (125)	
2. 부분용입 용접이음		D (100)	
3. 필렛용접이음		D (100)	
4. 뒷받침판을 부착한 용접이음		E (80)	
5. 단속 용접이음		E (80)	
6. 스캐립을 포함한 용접이음		G (50)	
7. 잘라낸 이음판의 필렛부에 접하는 용접	(1) $1/5 \leq r/d$	D (100)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$	E (80)	

표 2.2(d) 십자용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류

이음의 종류		피로등급 ($\Delta\sigma$)	비고
하중전달형	1. 매끄러운 지단을 갖는 필렛용접이음	D (100)	
	2. 지단을 다듬질한 필렛용접이음	D (100)	
	3. 다듬질하지 않은 필렛용접이음	E (80)	
	4. 용접의 시, 종점을 포함하는 필렛용접이음	E (80)	
	5. 중공단면부재를 필렛용접한 이음	(1) $d_0 \leq 100\text{mm}$: F (65) (2) $d_0 > 100\text{mm}$: G (50)	
하중전달형	6. 완전용입용접	(1) 매끄러운 지단을 갖는 이음	D (100)
		(2) 지단을 다듬질한 이음	D (100)
		(3) 다듬질하지 않은 이음	E (80)
		(4) 중공단면부재(편면용접)	F (65)
	7. 지단과 피	(1) 매끄러운 지단을 갖는 이음	E (80)
		(2) 지단을 다듬질한 이음	E (80)
		(3) 다듬질하지 않은 이음	F (65)
		(4) 용접의 시, 종점을 포함하는 이음	F (65)
	8. 루트과피(목두께단면)	H (40)	
	9. 중공단면부재(편면용접)	(1) 지단과 피	
(2) 루트과피(목두께단면)		H (40)	

※(2., 6.(2), 7.(2)) 다듬질은 언더컷이 남지 않도록 한다. 그라인더로 면처리를 할 경우에는 다듬질 방향은 응력방향과 평행하게 한다.
 ※(1., 6.(1), 7.(1)) 언더컷은 제거한다.
 ※(3., 4., 5., 6.(3)(4), 7.(3)(4), 9.(1)) 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다.
 ※(8., 9.(2)) 목두께 단면적은 (목두께)×(용접길이)에 의해 구한다.

목두께는 $s/\sqrt{2}$ 에 의해 구한다. 개선하고, 부분용입필렛용접한 경우의 목두께는 (s+개선깊이)/ $\sqrt{2}$ 로 한다.
 ※(8., 9.(2)) 용접의 각장 s가 판두께의 0.4 미만의 이음에 대해서는 적용범위 외로 한다.

표 2.2(e) 거세트용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류

이음의 종류		피로 등급 ($\Delta\sigma$)	비 고
면 외 거세트	1. 거세트를 필렛 용접 또는 개선 용접한 이음 ($l \leq 100\text{mm}$)	(1) 지단 다듬질	E (80)
		(2) 비다듬질	F (65)
	2. 필렛을 갖는 거세트를 개선 용접한 이음(필렛부 다듬질)		E (80)
	3. 거세트를 필렛용접한 이음 ($l > 100\text{mm}$)		G (50)
면 내 거세트	4. 거세트를 개선 용접한 이음 ($l > 100\text{mm}$)	(1) 지단 다듬질	F (65)
		(2) 비다듬질	G (50)
면 내 거세트	5. 필렛을 갖는 거세트를 개선용접한 이음(필렛부 다듬질)	(1) $1/3 \leq r/d$	D (100)
		(2) $1/5 \leq r/d < 1/3$	E (80)
		(3) $1/10 \leq r/d < 1/5$	F (65)
면 내 거세트	6. 거세트를 개선 용접한 이음	(1) 지단 다듬질	G (50)
		(2) 비다듬질	H (40)
7. 겹쳐진 거세트이음의 모재		H (40)	

※(1.(1), 2., 4.(1), 5., 6.(1)) 다듬질은 언더컷이 남지 않도록 한다. 그라인더로 면처리를 할 경우에는 다듬질 방향은 응력방향과 평행하게 한다.
 ※(1.(2), 3., 4.(2), 6.(2), 7.) 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다.

표 2.2(f) 기타 용접이음에 대한 JSSC의 피로등급분류

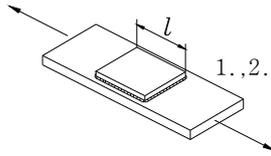
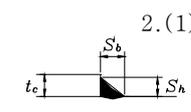
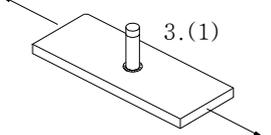
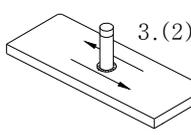
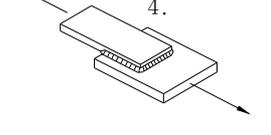
이음의 종류		피로등급 ($\Delta\sigma_f$)	비고
1. 첩접판을 필렛용접한 이음 ($l \leq 300\text{mm}$)	(1) 지단 다듬질	E (80)	 
	(2) 비다듬질	F (65)	
2. 첩접판을 필렛용접한 이음 ($l > 300\text{mm}$)	(1) 지단 다듬질	D (100)	 
	(2) 비다듬질	G (50)	
3. 스티드를 용접한 이음	(1) 주관단면	E (80)	
	(2) 스티드단면	S (80)	
4. 겹치이음	(1) 주관단면	H (40)	<p>※(1.(1), 2.(1)) 다듬질은 언더컷이 남지 않도록 한다. 그라인더로 면처리를 할 경우에는 다듬질 방향은 응력방향과 평행하게 한다. ※(1.(2), 2.(2)) 깊이 0.5mm 이상의 언더컷은 제거한다. ※(2.(1)) 각장 S_h, S_b는 $S_h \geq 0.8t_c, S_b \geq 2.0S_h$로 한다.</p>
	(2) 첩접판단면	H (40)	
	(3) 전면필렛용접 목두께 단면	H (40)	
	(4) 측면필렛용접 목두께 단면	S (80)	

표 2.2 (a)~(b)에 나타난 이음에 대해서는 원칙적으로 평균응력의 영향은 무시한다. 단, 평균응력이 압축영역인 경우, 즉 응력비가 -1.0 이하인 경우에는 보정계수 C_R 을 기본허용응력범위에 곱하여 허용응력범위를 구하는 것이 바람직하다. 이 때의 C_R 은 식 (2.5)로 나타낼 수 있다.

$$C_R = \frac{1.3(1-R)}{1.6-R} \quad (2.5)$$

여기서, $R \leq -1$

또한, 최대 및 최소응력 모두 압축영역에 있는 경우에는 식 (2.6)과 같다.

$$C_R = 1.3 \quad (2.6)$$

일정진폭응력 및 변동진폭응력에 대한 응력범위의 피로한계에 대해서도 C_R 을 곱하고, 평균응력에 대한 보정을 실시하는 것이 좋다.

4) 판 두께의 영향에 대한 보정

이음의 종류에 따라서는 판 두께가 증가함에 따라 피로강도가 저하된다. 판 두께가 25mm를 초과하는 이음에 대해서는 식 (2.7)의 계수를 기본허용응력범위, 일정진폭응력 및 변동진폭응력의 Cut-off 한계에 곱한다.

$$C_t = \sqrt[4]{25/t} \quad (2.7)$$

여기서, t : 판두께

보정이 필요한 이음(표 2.2 참조)

 +자용접이음(표 2.2(d)) 1, 3, 4, 6(1), 7(1), 7(3), 7(4)

 그외의 용접이음(표2.2(f)) 1(2), 2(2)

단, +자용접이음에 있어서 붙임판의 두께가 12mm 이하인 경우에는 보정할 필요가 없다.

2.2.2 피로조사에 사용되는 응력

1) 응력계산

피로조사에 사용되는 응력은 조사하는 단면의 공칭응력으로 한다. 대상 부재의 공칭응력은 표 2.2에 나타난 직각단면을 이용하여 계산한다.

2) 설계계산응력의 보정

공칭응력이 실제응력보다 작지 않은 경우에는 설계계산응력보정계수 α 를 곱하는 것에 의해 설계계산응력범위를 보정한다.

3) 응력범위빈도분포

피로설계하중을 이용해서 설계수명 내에 대상 부위에 발생하는 변동응력을 계산하고, 그 파형에 대해 Rainflow Counting Method 또는 그것과 동등한 결과를 얻을 수 있는 응력범위빈도분포 해석방법을 적용해서 응력범위의 빈도분포를 구한다.

4) 설계반복회수

설계수명내의 응력반복회수 n_f (설계반복회수)는 식 (2.8)에 의해 계산한다.

$$n_f = \sum n_i \times T \quad (2.8)$$

여기서, $\sum n_i$: 단위기간내의 총 반복회수

5) 등가응력범위

설계수명내의 변동진폭응력과 동일한 반복회수에서 등가피로피해를 주는 등가응력범위 $\Delta\sigma_e$, $\Delta\tau_e$ 는 다음과 같은 식에 의해서 구한다.

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^m n_i}{\sum n_i}} \quad (2.9)$$

$$\Delta\tau_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\tau_i^m n_i}{\sum n_i}} \quad (2.10)$$

여기서, $\Delta\sigma_i$, $\Delta\tau_i$: 응력범위빈도분포를 구성하는 각각의 응력범위

n_i : $\Delta\sigma_i$, $\Delta\tau_i$ 의 빈도

m : 재료상수(직응력 $m=3, 5$; 전단응력 $m=5$)

$\Delta\sigma_{ve}$, $\Delta\tau_{ve}$ 이하의 응력범위에 대해서는 $n_i=0$ 으로 하지만, 대표하중단위를 피로설계하중으로 이용하는 경우는 $n_i=0$ 으로 해서는 않된다. 대표하중단위는 전체 하중단위를 대표하므로, 대표하중단위에 의한 응력범위빈도분포는 하중단위에 의해 구해지는 응력범위빈도분포를 대표하기 때문이다. 이 때문에 대표하중단위로부터 계산된 응력범위가 하중단위보다 작게 되는 경우가 있다. 따라서, 대표하중단위를 이용해서 구해진 응력범위성분이 $\Delta\sigma_{ve}$ 이하에 있는 경우에 이 영향을 무시하는 것은 하중단위로부터 계산된 $\Delta\sigma_{ve}$ 이상의 응력범위도 피로손상에 기여하지 않게끔 된다. 위와 같은 이유에 의해 피로설계하중으로서 대표하중단위를 이용하는 경우에는 $\Delta\sigma_{ve}$ 이하의 응력범위라도 그 반복회수 $n_i=0$ 으로 해서는 않된다.

피로설계하중에 의해 계산된 응력 변동이 일정진폭이면 등가응력범위는 그 일정진폭응력의 변동범위와 같다.

2.2.3 피로조사방법

1) 안전계수

안전계수는 아래의 부분안전계수로 이루어져 있다.

(1) 용장도 계수(冗長度係數, γ_b)

대상이 되는 이음 또는 부재에 피로손상이 발생한 경우에 이것이 구조물 전체의 강도 혹은 기능에 미치는 영향을 고려한 계수이다.

·대상으로 하는 이음 또는 부재에 피로균열이 발생한 경우

- 구조물 전체의 붕괴를 일으킬 수 있는 경우 : 1.10
- 구조물의 강도 또는 기능에 영향을 미치는 경우 : 1.00 ~ 1.10
- 구조물의 강도 및 기능에 특정한 문제가 되지 않는 경우 : 0.80

(2) 중요도계수, γ_w

구조물의 중요도, 즉 구조물의 피로손상이 사회에 미치는 영향을 고려한 계수이다.

·구조물의 중요도에 따라 0.80 ~ 1.10의 값을 취한다.

(3) 검사계수, γ_i

구조물의 공용중 정기검사에 의해 피로손상을 발견할 가능성을 고려한 계수이다.

- 유지관리를 위한 검사가 정기적으로 실시되는 경우 : 0.90 ~ 1.00
- 유지관리를 위한 검사를 정기적으로 실시할 수 없는 경우 : 1.10

※단, $0.80 \leq \gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i \leq 1.25$ 로 한다.

2) 간편 피로조사방법

피로안전성의 조사는 다음의 3) 또는 4)에 따라 실시한다. 단, 예상되는 최대 응력범위와 대상으로 하는 이음의 일정진폭응력에 대한 응력범위의 Cut-off 한계가 아래의 관계를 만족하면, 대표하중단위를 피로설계하중으로서 이용하는 경우를 제외하고, 3), 4)의 조사는 불필요하다.

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i) \Delta\sigma_{max} \leq \Delta\sigma_{ce} \quad (2.11)$$

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i) \Delta\tau_{max} \leq \Delta\tau_{ce} \quad (2.12)$$

3) 등가응력범위를 이용한 피로조사방법

설계응력범위($\Delta\sigma_d$, $\Delta\tau_d$)는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_e \quad (2.13)$$

$$\Delta\tau_d = \Delta\tau_e \quad (2.14)$$

등가응력범위 ($\Delta\sigma_e$, $\Delta\tau_e$)는 설계계산응력보정계수 α 도 고려하여 계산한다.

허용응력범위 ($\Delta\sigma_R$, $\Delta\tau_R$)은 다음 식에 의해 구한다.

$$\Delta\sigma_R = m\sqrt{\frac{C_0 C_R C_t}{n_i}} \quad (2.15)$$

$$\Delta\tau_R = m\sqrt{\frac{D_0}{n_i}} \quad (2.16)$$

피로조사에서는 다음 식이 성립하는가를 확인한다.

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_j) \Delta\sigma_d \leq \Delta\sigma_R \quad (2.17)$$

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_j) \Delta\tau_d \leq \Delta\tau_R \quad (2.18)$$

4) 누적손상도를 이용한 피로조사방법

누적손상도 D 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (2.19)$$

여기서, n_i : 응력범위빈도분포를 구성하는 개개의 응력범위에 대한
응력반복회수

N_i : 평균응력 및 판두께에 의한 보정을 실시한 피로설계곡선에
따라 구해진 $\Delta\sigma_i$ 또는 $\Delta\tau_i$ 에 대응하는 피로수명

피로조사에서는 다음 식이 성립하는가를 확인한다.

$$D \leq \frac{1}{(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i)^m} \quad (2.20)$$

2.3 피로균열진전해석

2.3.1 기본적인 고려사항

피로균열진전해석은 용접구조물의 용접결합 또는 표면형상 변화부에서 발생된 피로균열의 진전수명을 예측하는 방법이다. 이 해석에서는 피로균열에 대한 응력 확대계수 ΔK 를 계산하고, 이것을 피로균열진전속도 d_a/d_N 와의 관계에 대입하여 피로균열을 진전시키고 이것을 초기균열로부터 한계균열까지 반복하여 수명을 계산하는 것이다. 피로균열진전속도 d_a/d_N 는 응력확대계수범위의 함수로 나타내어진다.

$$\frac{d_a}{d_N} = c(\Delta K)^m \quad (2.21)$$

여기서, d_a/d_N ($mm/cycle$)

ΔK ($MPa\sqrt{m}$)

식 (2.22)에 따라 잔존수명 N 은 초기균열 a_i 로부터 한계균열 a_c 까지 적분하여 구할 수 있다.

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{d_a}{C(\Delta K)^m} \quad (2.22)$$

그러나 ΔK 는 복잡한 함수형 또는 단순히 값으로 주어지므로 식 (2.22)을 직접 적분할 수 없는 경우가 많아, 대부분 수치적분에 의해서만 계산할 수 있다. 예를 들어 반타원형 또는 타원형의 균열깊이방향의 전면 그림 2.4의 위치점(A) 및 폭 방향의 전면 그림 2.4의 위치점(B)에서의 응력확대계수 ΔK_A 및 ΔK_B 를 구하면 식 (2.21)에 이 값을 대입하여 응력 1사이클마다 양방향의 피로균열진전량을 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 비파괴검사 등에 의해 검출된 초기균열길이로부터 한계균열길이까지 반복하면 피로수명을 계산할 수 있다.

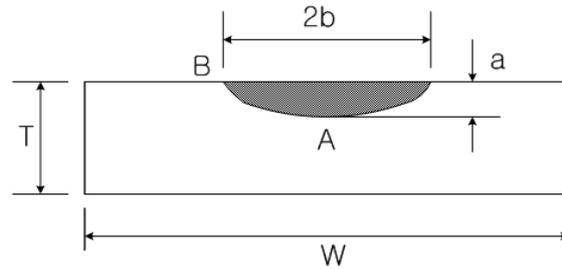


그림 2.4 반타원형 균열

2.3.2 응력확대계수의 계산

1) 무한판내의 길이 2a의 관통균열

그림 2.5에 나타난 무한판내의 길이 2a의 관통균열이 존재하고 균열직각방향으로 균일한 응력범위 $\Delta\sigma_n$ 의 반복응력을 받는 경우의 응력확대계수 ΔK 는 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta K = \Delta\sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.23)$$

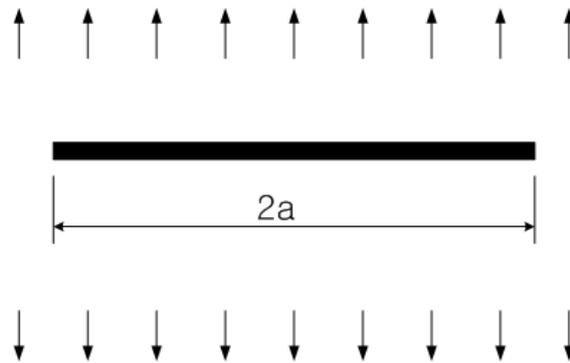


그림 2.5 무한판에 길이 2a의 관통균열

2) 용접이음부에 발생한 균열의 응력확대계수

피로균열이 발생된 용접결함이 있는 용접이음은 일반적으로 응력상태가 복잡한 경우가 많아 식 (2.23)과 같은 간단한 방법으로는 응력확대계수 범위를 계산할 수 없다. 더구나 피로균열 형상도 관통균열만이 아니라 여러 가지 형상으로 나타난다. 그러므로 프로그램에서는 균열형상을 그림 2.6과 같이 여러 형상 및

위치에 대한 균열을 고려하고 있다. 여기서의 균열형상은 관통균열(2차원 균열)과 타원형균열(3차원 균열)로 구분할 수 있다. 2차원 균열에 대해서는 판두께 또는 판폭의 1방향, 3차원 균열에 대해서는 판 두께 및 판 폭의 2방향에 대한 균열 진전해석이 필요하다. 따라서, 2차원 균열에서는 균열전면에 1개소(그림 2.6의 A점), 3차원 균열에는 균열전면에 2개소(그림 2.6의 A점 및 B점)에 대해 응력확대계수범위를 계산하여야 한다. 프로그램에서는 균열형상 및 균열이 존재하는 이음에 대해 각 조건에 대한 보정계수를 조합한 식으로 응력확대계수범위를 산출한다.

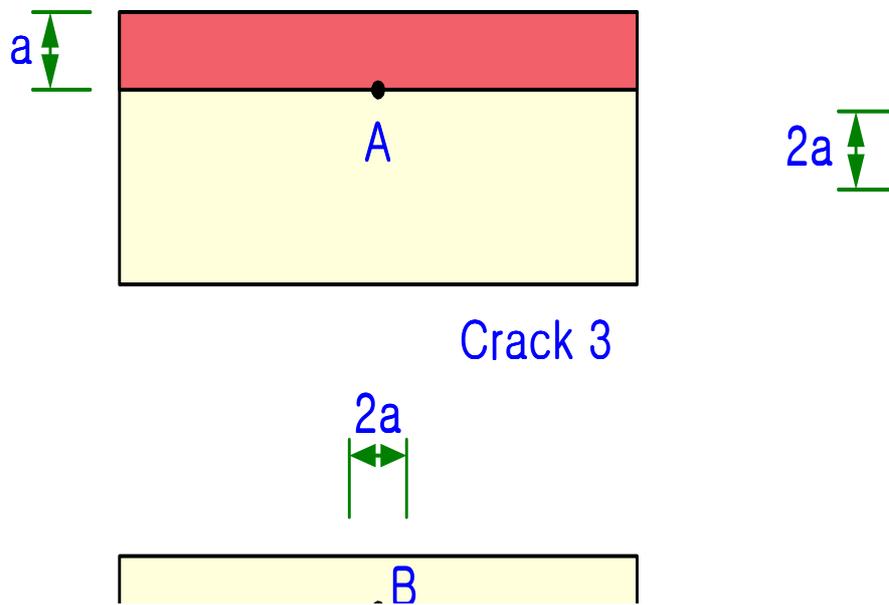
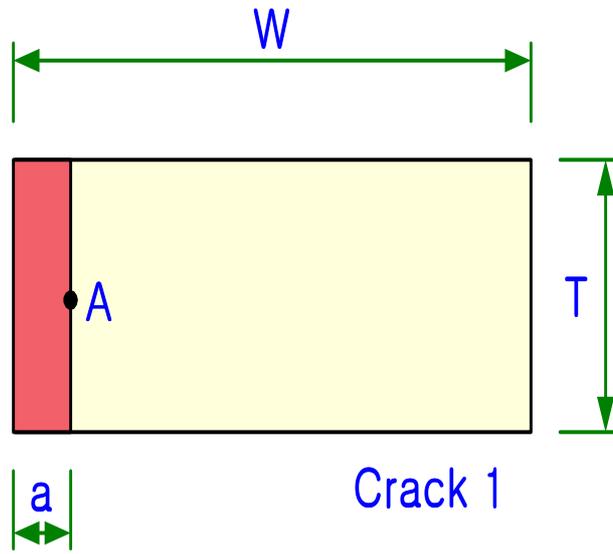


그림 2.6 해석 가능한 균열형상

(2차원 균열)

$$\Delta K_A = F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.24)$$

(3차원 균열)

$$\Delta K_A = F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \cdot \Delta \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.25(a))$$

$$\Delta K_B = F_{eB} \cdot F_{sB} \cdot F_{tB} \cdot F_{gB} \cdot \Delta \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.25(b))$$

여기서, F_{eA}, F_{eB} : 균열형상에 대한 보정계수

F_{sA}, F_{sB} : 표면균열에 대한 보정계수

F_{tA}, F_{tB} : 유한판폭 및 두께에 대한 보정계수

F_{gA}, F_{gB} : 응력집중에 대한 보정계수

$\Delta \sigma_n$: 공칭응력범위

a : 균열치수

보정계수 $F_{eA}, F_{sA}, F_{tA}, F_{gA}, F_{eB}, F_{sB}, F_{tB}, F_{gB}$ 는 기존의 연구성과를 참고하여 다음과 같이 제시하였다.

(1) 균열형상에 대한 보정계수 F_e

무한체 중에 존재하는 단축 2a, 장축 2b의 타원형 균열에 대한 응력확대계수는 식 (2.26)로 나타낸다.

$$K = \frac{1}{E(k)} (1 - k^2 \cos^2 \phi)^{1/4} \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.26)$$

여기서, $E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} d\xi$ (제2종 완전타원적분)

$$k^2 = 1 - \frac{a^2}{b^2} \quad \phi: \text{편심각}$$

따라서,

$$F_e = \frac{1}{E(k)} (1 - k^2 \cos^2 \phi)^{1/4} \quad (2.27)$$

식 (2.27)로부터 $\phi = \pi/2$ 로 깊이방향의 전면에서의 보정계수 F_{eA} 가 구해진다.

$$F_{eA} = \frac{1}{E(k)} \quad (2.28)$$

또한, 폭방향의 전면에서의 보정계수 F_{eB} 는 $\phi = 0$ 으로서 구해진다.

$$\begin{aligned} F_{eB} &= \frac{1}{E(k)} \cdot (1-k^2)^{1/4} \\ &= F_{eA} \cdot \sqrt{\frac{a}{b}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

식 (2.28)의 $E(k)$ 는 다음 식과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464 \left(\frac{a}{b}\right)^{1.65}} \quad (2.30)$$

식 (2.30)를 식 (2.28) 및 식 (2.29)에 대입하면 다음식과 같다

$$\begin{aligned} F_{eA} &= \frac{1}{\sqrt{1 + 1.464 (a/b)^{1.65}}} \quad (\text{균열 } 6 \sim 10) \\ F_{eB} &= \frac{F_{eA}}{\sqrt{a/b}} \end{aligned}$$

또한 관통균열에 대해서는 다음과 같다.

$$F_{eA} = 1 \quad (\text{균열 } 1 \sim 4)$$

(2) 표면균열에 대한 보정계수 F_s

반무한판중의 자유단에 길이 a 의 관통균열이 있는 경우 응력확대계수는 근사적으로 식 (2.31)으로 나타낼 수 있다.

$$K = 1.12 \cdot \sigma_n \sqrt{\pi a} \quad (2.31)$$

따라서, 표면균열에 대한 보정계수는 다음과 같이 된다.

$$F_{sA} = 1.12 \quad (\text{균열1, 3})$$

또, 반타원형 균열의 깊이방향의 전면(그림 2.5의 A점)의 보정계수는 다음 식으로 표현된다.

$$F_{sA} = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{b}\right) \quad (\text{균열 7~10})$$

반타원형 균열의 폭방향의 전면(그림 2.5의 B점)의 보정계수는 식 (2.32)이 된다.

$$F_{eB} = 1 \quad (2.32)$$

또한 부재내부의 타원형 균열에 대한 보정계수는 식 (2.33)이 된다.

$$F_{sA} = F_{sB} = 1 \quad (2.33)$$

(3) 유한판 두께 및 판폭에 대한 보정계수

폭인 W 인 판 중앙에 길이 $2a$ 의 관통균열이 있는 경우의 보정계수는 식 (2.34)으로 나타낸다.

$$F_t = (1 - 0.025 \lambda^2 + 0.06 \lambda^4) \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \lambda}{2}\right)} \quad (2.34)$$

여기서, $\lambda = 2a/W$

또, 반타원형 표면균열은 $\lambda = a/\mathcal{T}$, 타원형의 내부균열은 $\lambda = 2a/\mathcal{T}$ 로 하여

$$F_{IA} = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)} \quad (2.35)$$

로 주어진다. 유한판폭에 대한 보정계수는 $\lambda = 2b/W$ 로 하면 식 (2.36)가 된다.

$$F_{IB} = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)} \quad (2.36)$$

(4) 응력집중에 대한 보정계수 F_g

그림 2.7에 나타낸 중첩의 원리로부터 임의의 응력장에 균열이 있는 경우의 응력확대계수는 균열이 없을 때에 발생하는 응력을 균열에 작용시켰을 때의 응력확대계수와 동일하다.

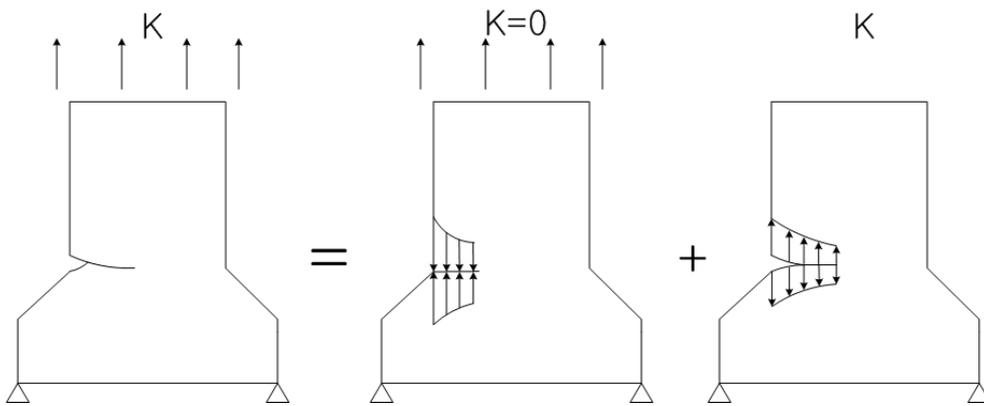


그림 2.7 중첩의 원리

그림 2.8에 나타낸 무한판 중의 균열면에 임의의 분포력 $\sigma(x)$ 가 작용할 때의 응력확대계수는 식 (2.37)(a)로 표현된다.

$$K = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int \sigma(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (2.37)(a)$$

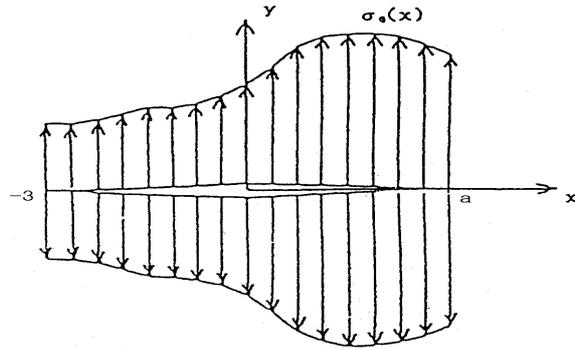


그림 2.8 균열면에 작용하는 상하 대칭인 분포력

그림 2.8에 나타낸 분포력이 상하좌우 대칭인 경우의 응력확대계수는 식 (2.37)(b)가 된다.

$$K = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \int \sigma(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (2.37)(b)$$

균열면에 작용하는 분포력을 그림 2.9과 같이 적당한 간격으로 분할하고 균일한 분포력의 집중으로 간주하면 식 (2.37)은 식 (2.38)과 같이 치환된다.

$$K = \sqrt{\pi a} \frac{2}{\pi} \sum \sigma_i \left\{ \sin^{-1}\left(\frac{C_{i+1}}{a}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{C_i}{a}\right) \right\} \quad (2.38)$$

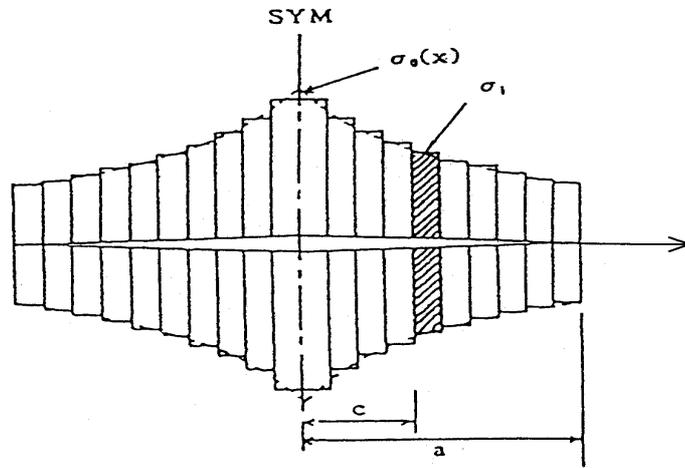


그림 2.9 균열면에 작용하는 상하좌우 대칭인 분포력

여기서 대표응력을 σ_n 으로 하면 식 (2.39)이 된다.

$$K = \sigma_n \sqrt{\pi a} \frac{2}{\pi} \sum \left\{ \frac{\sigma_i}{\sigma_n} \sin^{-1} \left(\frac{C_{i+1}}{a} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{C_i}{a} \right) \right\} \quad (2.39)$$

이것에 의해 F_{gA} 는 식(2.40)로 표현된다.

$$F_{gA} = \frac{2}{\pi} \sum \left\{ \frac{\sigma_i}{\sigma_n} \sin^{-1} \left(\frac{C_{i+1}}{a} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{C_i}{a} \right) \right\} \quad (2.40)$$

또한, 균열폭방향 전면(그림 2.5)의 B점에서의 보정계수 F_{gB} 는 분포력이 용접 단부를 따라서 거의 일정한 경우에는 다음 식으로 주어진다.

$$F_{gB} = K_t (F_t : \text{응력집중계수}) \quad (2.41)$$

또, 균열폭방향 전면의 분포력을 고려하는 경우(예를 들면, 스캘립을 포함한 면외거셋트 용접이음 등) 응력집중에 대한 폭 방향의 보정계수는 다음 식으로 주어진다.

$$F_{gB} = \frac{2}{\pi} \sum \left\{ \frac{\sigma_i}{\sigma_n} \sin^{-1} \left(\frac{C_{i+1}}{b} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{C_i}{b} \right) \right\} \quad (2.42)$$

또한, 이들의 응력분포는 2차원 또는 3차원의 유한요소해석으로부터 구할 수 있다.

2.3.3 균열의 합체조건

강구조물에 발생하는 피로균열은 한 개인 경우는 거의 없으며, 일반적인 경우 복수인 경우가 많다. 프로그램에서는 보다 정확한 피로균열진전해석을 실행하기 위하여 복수의 균열(최대 5개까지)을 동시에 해석할 수 있도록 하고 있다. 복수균열을 해석하기 위해서는 균열 상호간의 간섭효과, 균열의 합체조건, 균열 합체후의 균열형상, 치수의 정의가 필요하다. 여기서는 그림 2.10과 같이 인접한 2개의 균열 (a1,b1), (a2,b2)의 전면이 접촉된 시점에서 합체된 것으로, 합체후의 균열깊이 a3은 a1, a2의 어느 쪽이든지 큰 쪽과 같게 되고, 균열폭 b3은 b1과 b2의 합으로 하였다.

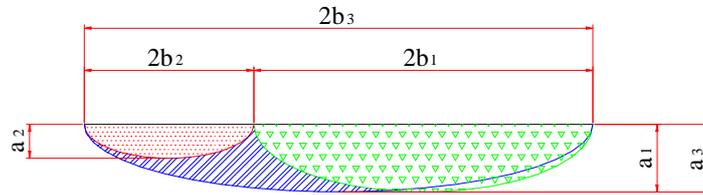


그림 2.10 균열의 합체조건

2.3.4 피로균열진전속도 표시식

피로균열진전 표시식은 다음의 3가지를 사용한다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.43)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2.44)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \Delta K \geq \Delta K_{th} \quad (2.45)$$

$$= 0 \qquad \Delta K < \Delta K_{th}$$

식 (2.44)과 식 (2.50)은 응력확대계수범위가 어떤 한계이하가 되면 피로균열이 진전하지 않는 것을 고려한 식으로, 이 한계값 ΔK_{th} 를 하한계 응력확대계수범위라고 부른다. 식 (2.43)~식 (2.50)를 비교하는 경우, 식 (2.43) 및 식 (2.45)를 사용하여 피로수명평가를 하는 경우는 식 (2.49)에 비해 안전측이 된다. 또 재료정수 C , m 및 하한계응력확대계수범위 ΔK_{th} 는 JSSC피로설계지침의 표 2.3과 같이 주어져 있다. 최안전설계곡선의 $d_a/d_N - \Delta K$ 관계는 피로조사와 같은 정도의 안전성을 보고 계산한 경우에 사용되며, 평균설계곡선의 $d_a/d_N - \Delta K$ 관계는 평균적인 피로수명 또는 피로강도를 계산하는데 사용된다. 프로그램에서는 최안전설계곡선, 평균설계곡선의 d_a/d_N 관계가 준비되어 있으며, 또 임의로 선택할 수 있도록 되어있다. 또 상기 이외의 재료정수를 사용하는 경우도 입력에 의해 이용할 수 있도록 하고 있다.

표 2.3 피로균열 진전해석시 사용하는 상수값

구분	C	m	$\Delta K_{th}(MPa\sqrt{m})$
최안전설계곡선	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계곡선	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

2.3.5 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석

일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석의 흐름도는 그림 2.11과 같다. 이 해석에서는 3)절에 따라 주어진 균열에 대한 응력확대계수범위 ΔK 을 계산하고, 이것을 4) 절에서 표시된 피로균열진전 표시식에 대입하여 응력 1사이클의 진전량을 산출한다. 그리고, 이 계산을 검출한 균열길이로부터 한계균열까지 반복하는 것에 의해 따라 잔존수명을 산출한다. 그러나, 응력 1사이클의 계산부터 수명을 계산하는 것은 수명과 동일한 횟수의 반복계산이 필요하게 되므로 여기서는 Δn 회의 응력반복에 따른 균열증분을 계산하는 것에 의해 잔존수명 N 을 계산하는 것으로 한다. 이 계산에서는 계산정도를 높이기 위하여 아래의 순서에서 1단 계씩의 균열증분을 계산하고 있다.

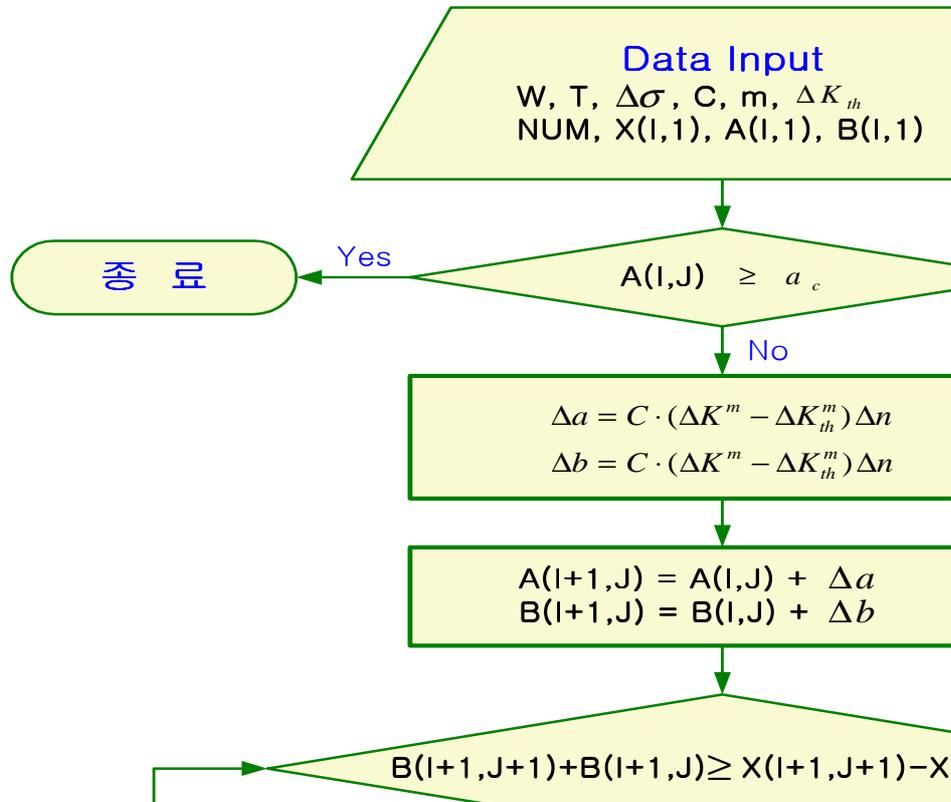


그림 2.11 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도

- 1) 균열(a,b)에 대한 응력확대계수범위 ΔK_{A1} , ΔK_{B1} 를 구한다.
- 2) Δn 의 응력반복에 의해 발생하는 균열증분 $\Delta a'$, $\Delta b'$ 를 산출한다.

$$\Delta a' = C(\Delta K_{A1})^m, \quad \Delta b' = C(\Delta K_{B1})^m$$

- 3) 균열 $(a + \Delta a', b + \Delta b')$ 에 대한 응력확대계수 ΔK_{A2} , ΔK_{B2} 를 구한다.
- 4) 균열이 (a,b)로부터 $(a + \Delta a', b + \Delta b')$ 까지 진전할 때의 평균적인 응력확대계수범위 ΔK_{A2} , ΔK_{B2} 를 계산한다.

$$\Delta K_A = \sqrt[m]{\frac{(\Delta K_{A1}^m + \Delta K_{A2}^m)}{2}}, \quad \Delta K_B = \sqrt[m]{\frac{(\Delta K_{B1}^m + \Delta K_{B2}^m)}{2}}$$

- 5) 이 단계에서의 균열증분 Δa , Δb 를 구한다.

이상의 계산순서에서 수명 N 을 구하면, 1단계에서의 균열증분을 계산하기 위한 응력반복횟수 Δn 을 전체단계의 수가 100이상으로 하면 충분히 정확하다. 프로그램에서는 전체단계의 수가 200정도가 되도록 하고 있다. 즉 검출된 균열 길이, 용접이음부의 각종 조건에 따라 사전에 Δn 을 설정하고, 개략적인 수명을 산출하여 그 수명을 200으로 나눈 것에 의해 Δn 을 정하여 균열진전해석을 실행한다.

2.3.6 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석

변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석은 기본적으로 일정진폭응력하에서의 피로균열진전해석과 동일하나 피로균열진전속도를 어떻게 표현하는가가 문제가 된다. 여기서는 응력범위빈도분포를 구성하는 모든 응력범위에 대한 응력확대계수 범위 ΔK 를 계산하고 각각의 응력범위성분에 대한 균열진전량을 계산하는 것으로 하고 있다. 특히 피로균열진전속도 표시식으로 식 (2.44), 식 (2.45)를 이용하는 경우 ΔK 가 하한응력확대계수범위 $\Delta K_{\#}$ 이하로 되는 응력범위성분에서는 피로균열은 진전하지 않는다.

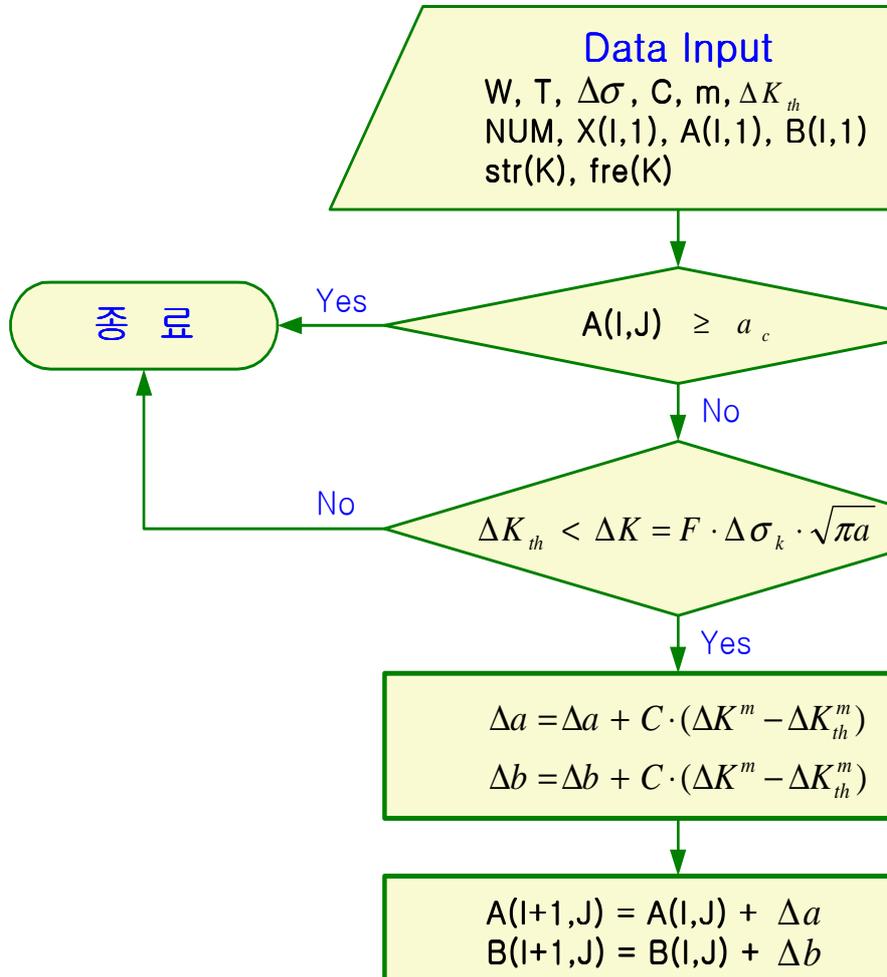


그림 2.12 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도

피로균열진전속도 표시식에 식 (2.44)을 이용하는 경우의 흐름도를 그림 2.12에 나타내었다. 여기는 주어진 균열 및 ΔK_{th} 에 대한 응력범위 $\Delta\sigma_a$ 를 구하고, 이상의 응력범위성분에 대한 균열진전량을 구하는 것에 따라 피로균열의 진전을 계산하는 것으로 하였다. 즉, 피로균열진전량은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta a = \sum_i C (\Delta K_i^m - \Delta K_{th}^m) \cdot \Delta n_i \quad (2.46)$$

여기서,

ΔK_i : 응력범위빈도분포를 구성하는 각 응력범위에 대한 응력확대계수

Δn_i : 응력범위빈도분포를 구성하는 각 응력범위에 대한 응력반복횟수

여기서 ΔK_i 는

$$\Delta K_i = \Delta \sigma_i \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2.47)$$

여기서,

$\Delta \sigma_i$: 응력범위빈도분포를 구성하는 $\Delta \sigma_d$ 이상의 응력범위성분

이 계산을 검출한 균열길이로부터 한계균열길이까지 반복하게 되면 잔존수명이 산출된다. 또한 $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ 에서는 $\Delta a = 0$ 이다.

다음으로 식 (2.44), (2.45)를 피로균열진전속도 표시식으로 사용하는 경우의 흐름도를 그림 2.13에 나타내었다. 여기에서는 효율화를 도모하기 위하여 이미 주어진 균열 및 ΔK_{th} 에 대한 응력범위 $\Delta \sigma_d$ 를 구하여 $\Delta \sigma_d$ 이상의 응력범위빈도분포를 대표하는 등가응력범위를 이용하여 피로균열진전해석을 계산한다. 이때의 등가응력범위를 계산하는 방법, 피로균열진전속도 표시식을 고려하는 방법, 균열진전량을 계산하는 방법은 다음과 같다.

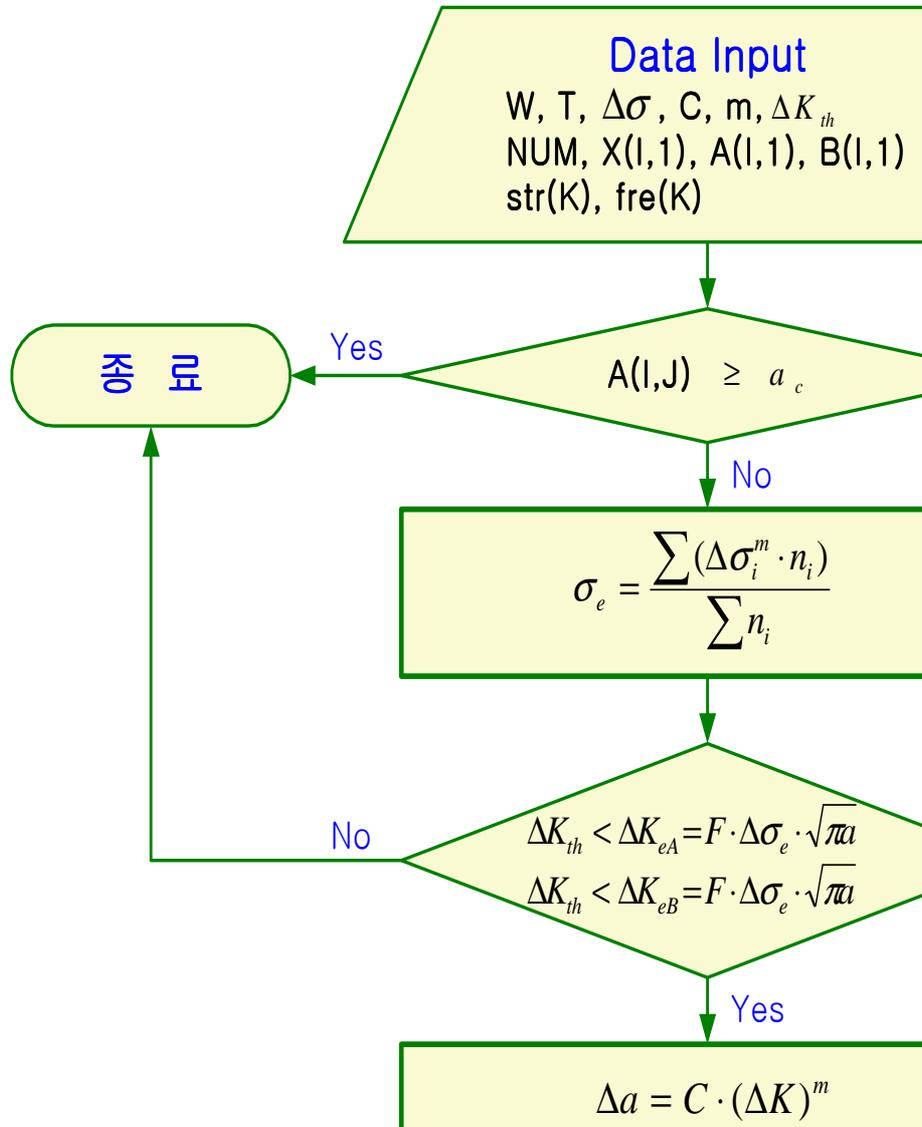


그림 2.13 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석 흐름도

1) 등가응력범위

모든 응력범위레벨에 대하여 응력범위와 피로수명과의 관계가 식 (2.47)과 같다.

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C \quad (C: \text{정수}) \quad (2.48)$$

그러므로, 피로손상도의 합은 식 (2.49)로 주어진다.

$$D = \sum D_i = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (2.49)$$

식 (2.48)을 식 (2.49)에 대입하면 식(2.50)이 된다.

$$D = \sum \frac{\Delta \sigma^m \cdot n_i}{C} \quad (2.50)$$

어떤 응력범위 $\Delta \sigma_e$ 를 고려하여 그것이 $\sum N_i$ 회 작용할 때의 피로손상도는 식 (2.51)이 된다.

$$D = \Delta \sigma_e^m \sum \left(\frac{n_i}{C} \right) \quad (2.51)$$

식 (2.50)과 식 (2.51)이 같을 때 $\Delta \sigma_e$ 를 등가응력범위라 하고, 식 (2.52)로 계산된다.

$$\Delta \sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta \sigma^m \cdot n_i}{\sum n_i}} \quad (2.52)$$

응력범위의 m 승 평균값의 m 승근으로 주어진다.

2) 피로균열진전속도 표시식

변동진폭응력하에서의 피로균열진전량은 식 (2.53)으로 표시된다.

$$\Delta a = \sum C(\Delta K_i) \quad (2.53)$$

여기서, ΔK_i : 각각의 응력범위에 대한 응력확대계수범위
진전속도의 평균은 식 (2.54)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN_{av}} &= C \cdot \left(\sum \frac{\Delta\sigma_i^m}{\sum i} \right) \cdot (\sqrt{\pi a} \cdot F)^m \\ &= C \cdot (\Delta\sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot F)^m\end{aligned}\quad (2.54)$$

여기서, $\Delta\sigma_e$: 등가응력범위

또, ΔK_{eq} 를 식 (2.55)로 놓으면

$$\Delta K_{eq} = \Delta\sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2.55)$$

식 (2.56)와 같이 된다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_{eq})^m \quad (2.56)$$

ΔK_{eq} 를 등가응력확대계수범위라고 하는데 이것에 의해 변동진폭응력하에서의 피로균열진전해석을 높은 정도로 예측할 수 있다. 이상은 모든 ΔK 성분이 ΔK_{th} 이상의 경우에 대한 것이다. ΔK 성분의 범위내에 ΔK_{th} 레벨이 있는 경우는

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= C \cdot (\Delta K)^m & \Delta K &\geq \Delta K_{th} \\ &= 0 & \Delta K &< \Delta K_{th}\end{aligned}\quad (2.57)$$

로 하여 피로균열진전해석을 실시한다. 여기서는 $\Delta\sigma_e$ 이상의 등가범위성분에 대하여 등가응력범위를 구하고, 응력반복회수는 모든 응력범위성분의 응력반복회수를 대상으로 하였다.

3) 균열진전량의 계산

변동진폭응력하에서는 균열이 진전함에 따라 피로균열의 진전에 기여하는 한계응력범위성분이 저하된다. 이 한계응력범위 $\Delta\sigma_e$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta\sigma_d = \frac{K_{th}}{\sqrt{\pi a} \cdot F} \quad (2.58)$$

이 $\Delta\sigma_d$ 이상의 응력범위성분에 대해 등가응력범위를 구한다. 등가응력범위를 이용하여 응력확대계수를 표현하면 식 (2.59)으로 표시한 것과 같이 된다.

$$\Delta K_{eq} = \Delta\sigma_e \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2.59)$$

이 등가응력확대계수범위 ΔK_{eq} 를 이용하여 1회의 응력반복에 대한 평균적인 피로균열진전량을 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta a = C (\Delta K_{eq})^m \cdot \left(\frac{n_d}{n}\right) \quad (2.60)$$

기존프로그램에서는 일정진폭응력과 동일한 응력반복횟수 Δn 과의 피로균열진전량을 계산하고 이것을 한계균열길이까지 반복한다. 이 경우 피로균열진전량은 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta a = C (\Delta K_{eq})^m \cdot \Delta n \cdot \left(\frac{n_d}{n}\right) \quad (2.61)$$

여기에서 n_d 는 $\Delta\sigma_d$ 이상의 응력범위성분에 대한 응력반복회수이다. 한편, n 은 모든 응력범위성분에 대한 응력반복횟수이다. 즉, n_d/n 은 응력범위빈도성분을 구성하는 모든 응력범위성분에 대한 응력반복횟수가 피로균열진전에 얼마만큼의 비율로 기여하고 있는가를 나타내고 있다. 이상과 같이 피로균열진전량을 구하고 이것을 한계균열까지 반복하면 잔존수명을 산출할 수 있다.

3장 프로그램의 기능

이 장에서는 본 시스템의 기본적인 이론을 기초로 강철도교 피로해석 및 잔존 수명평가를 수행하는 프로그램 시스템의 구체적인 내용을 프로그램 수행시의 각 단위 모듈 프로그램의 실행에 따른 입력창을 기초로 설명한다.

프로그램을 실행시키면 윈도우의 기본적인 툴바와 함께 응력변동해석, 피로조사, 피로균열진전해석의 3가지 기본 모듈 프로그램 수행을 위한 기본적인 선택창이 그림 3.1과 같이 표시된다.



그림 3.1 프로그램의 기본 화면

3가지 단위 모듈 프로그램 수행에 관련된 입력, 실행 및 출력은 프로그램의 기본 선택 화면의 입력, 실행 및 출력 메뉴의 선택항목으로 사용자가 시스템 실행에 필요한 항목을 적절하게 선택한다.

기본적인 입력요소들에 대해서는 해당 단위 모듈 프로그램에서 보다 구체적으로 설명하도록 한다.

3.1 응력변동해석

응력변동해석의 단위 모듈 프로그램은 피로조사 및 피로균열진전해석에 관계되는 응력범위를 계산하기 위한 프로그램으로 입력, 실행, 출력의 3가지 범주로 구성되어 있다.

3.1.1 입력

1) 기본데이터(1)

(1) 철도교하중

가) 표준하중

기본데이터(1)에서 구조물종류를 철도교로 하중단위를 최대하중단위 또는 대표하중단위를 선택하고, 하중데이터에서 철도교 표준하중을 선택하면 그림 3.2와 같은 대화상자가 나타난다.

차종은 각국에 대해서 다음과 같이 선택할 수 있다. 국가명과 차종명을 선택하면 그에 따른 제원이 각 항목에 나타나게 된다. 이것은 각국의 규준에 의한 값으로 일부 값을 변경할 수 있게 되어 있다.

표 3.1 에 제시되어 있는 것과 다른 차종제원이 필요할 경우에는 우측하단부의 **차량추가** 버튼을 클릭하면 그림 3.3과 같은 대화상자가 나타난다.



그림 3.2 철도교 표준하중

표 3.1 국가별 표준하중

국가명	하중의 종류	비고
한국	KTX, L18, L22, S18, S22	KTX:고속열차 L, S : 기존선
일본	M10, M11 M12 M13 M14 M15 M16 M17, M18, N16, N18, N19,P16, P17, P18, P19a, P19b	M : 재래선 P, N : 신간선



그림 3.3 철도교 표준하중의 추가

위 대화상자에 사용자가 필요로 하는 값을 입력하고 확인버튼을 클릭하면 도로교 표준하중 대화상자로 되돌아간다. 여기서, 바퀴 수에 어떤 수의 값을 입력하면 중바퀴 간격과 윤하중의 값이 입력될 수 있게 설정된다.

나) 시뮬레이션하중

기본데이터(1)에서 구조물종류를 철도교로 하중단위를 시뮬레이션 하중단위를 선택하고, 철도교하중에서 시뮬레이션 -> 차량하중을 선택하면 그림3.4와 같은 대화상자가 나타난다.



그림 3.4 철도교 시뮬레이션 차량하중

시뮬레이션하중을 어떤 차종으로 할 것인지는 좌측리스트박스에 있는 차종을 선택하고, 더블클릭을 하거나 버튼을 클릭하면 우측리스트박스로 이동하게 된다. 좌측리스트박스에 있는 모든 차종을 선택하고 싶을 때에는 버튼을 클릭하면 모두 우측리스트박스로 이동하게 된다. 또한 선택한 차종을 제거하고 싶을 때에는 우측리스트박스에서 차종을 선택하고, 더블클릭을 하거나 버튼을 클릭하면 좌측리스트박스로 이동하게 된다.

차종에 대한 제원을 변경하고 싶을 때에는 각 값을 변경할 수 있게 되어 있다. 최소중량은 차량중량과 같은 값으로 차량중량이 입력되면 자동적으로 설정된다. 최대중량은 다음과 같은 식으로 자동적으로 설정된다.

최대중량 = 차량중량 + 정원승객중량 x 최대승차율
 선택된 차종들의 차량분포율은 모두 합하여 100%가 되어야 한다.

추가적인 차량이 필요할 경우에는 버튼을 클릭하면 그림3.5와 같은 대화상자가 나타난다.

그림 3.5 철도교 시뮬레이션 차량하중의 추가

이 대화상자에 원하는 값을 입력하고 버튼을 클릭하면 이전 대화상자로 전환되면서 추가 입력된 차량의 제원을 확인할 수 있으며, 선택할 수 있다.

2) 영향면

(1) 파일명 입력

영향면에서 파일명 입력을 클릭하면 그림3.6과 같은 파일 선택의 대화상자가 나타난다.

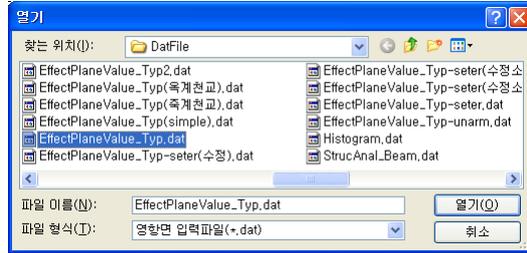


그림 3.6 영향면 파일명 입력

원하는 파일을 선택하고 버튼을 클릭하면 영향면 데이터가 입력된다. 파일명 입력에서의 입력데이터는 영향면의 종거값을 다른 구조해석 프로그램을 사용하여 계산한 것으로 입력파일은 TXT파일 형식으로 각 항목별 변수는 표 3.2와 같다.

표 3.2 영향면 항목별 변수

항 목	변 수
1st Item	제목
2nd Item	영향면의 절점 수, x방향 분할면수, z방향 분할면수, 검사위치의 수, 상행선의 수, 하행선의 수, 교통량 시점수, 단위기간(0~6)
3rd Item	각 절점 번호, 각 절점 좌표(x축, y축, z축)
4th Item	각 절점 번호의 검사위치별 영향면 종거값
5th Item	구조물의 전체길이, 구조물의 설계속도, 궤도(차선)폭, 중앙분리대 폭, 평면선형
6th Item	차선번호, 교통량 시점, 교통량, 주행속도
7th Item	각차선의 상, 하행의 결정(1-상행 (좌->우), 2-하행(우->좌))
8th Item	각 주행 차선의 시점과 종점좌표(시점(x1, y1), 종점(x2, y2))

(2) 사용자 입력

영향면에서 사용자 입력을 클릭하면 그림3.7과 같은 구조물 형상에 관한 대화상자가 나타난다.

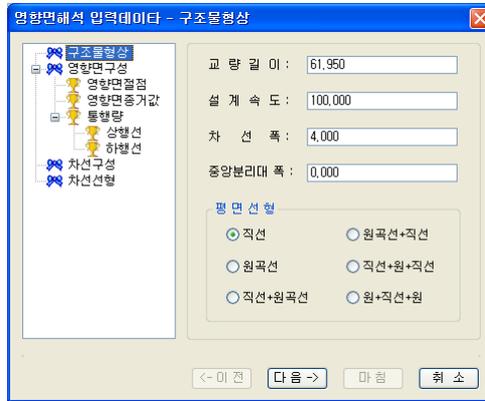


그림 3.7 구조물 형상의 입력

구조물 형상에 관한 입력을 마치고 **다음->** 을 클릭하면 그림3.8과 같은 영향면 구성에 관한 대화상자가 나타난다.

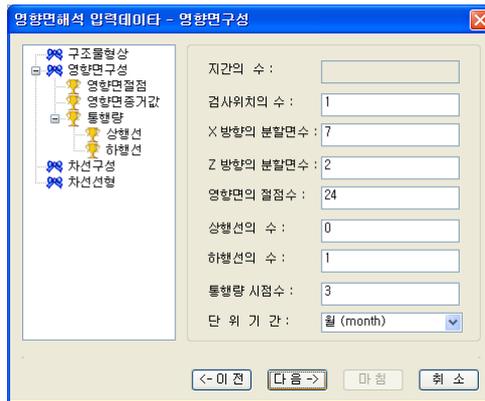


그림 3.8 영향면 구성의 입력

영향면 구성에 관한 대화상자에서는 영향면의 값을 산정하기 위한 기본 구성 값을 입력한다.

여기서 검사위치의 수는 피로조사를 수행하고자 하는 위치의 수를 나타낸다. X방향의 분할수는 영향면을 구성하는 교축방향의 분할갯수를 나타내며, Z방향의 분할수는 교축직각방향의 분할갯수를 나타낸다. 따라서, 영향면의 절점 수는 다음과 같이 된다.

$$\text{영향면의 절점수} = (X\text{방향의 분할수} + 1) \times (Z\text{방향의 분할수} + 1)$$

영향면 구성에 관한 입력을 마치고 **다음->** 을 클릭하면 그림3.9와 같은 영향면 절점에 관한 대화상자가 나타난다



그림 3.9 영향면 절점 입력

절점좌표는 전체좌표로 X, Y, Z좌표값을 입력한다. X방향은 교축방향을 Y방향은 연직상향방향을 Z방향은 교축직각방향으로 입력하여야 한다.

영향면 절점에 관한 입력을 마치고 **[다음->]** 을 클릭하면 그림 3.10과 같은 영향면 증거값에 관한 대화상자가 나타난다.



그림 3.10 증거값 입력

영향면 증거값에 관한 입력을 마치고 **[다음->]** 을 클릭하면 그림3.11과 같은 상, 하행선의 교통량에 관한 대화상자가 나타난다.



그림 3.11 하행선 입력

상, 하행선의 교통량에 관한 입력을 마치고 **다음->** 을 클릭하면 그림3.12와 같은 차선 구성에 관한 대화상자가 나타난다.

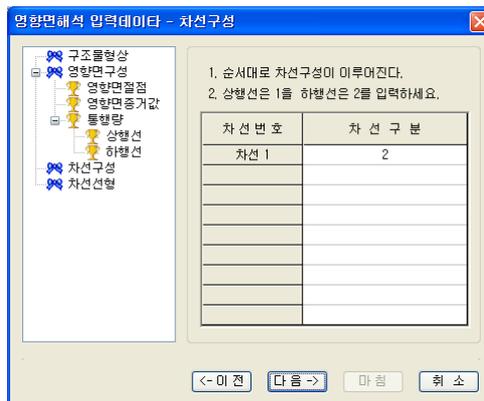


그림 3.12 차선구성 입력

차선구성에 관한 입력을 마치고 **다음->** 을 클릭하면 그림3.13과 같은 차선선형에 관한 대화상자가 나타난다.

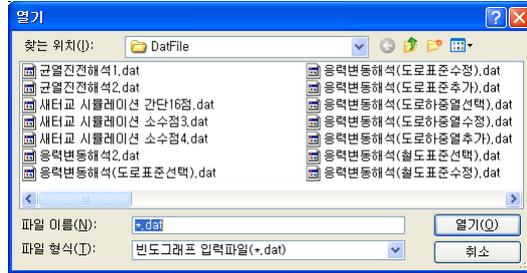


그림 3.15 빈도그래프 파일의 입력

원하는 파일을 선택하고 **열기(O)** 버튼을 클릭하면 저장되었던 빈도그래프가 입력된다.

(3) 사용자 입력

빈도그래프에서 사용자 입력을 클릭하면 그림3.16과 같은 대화상자가 나타난다.

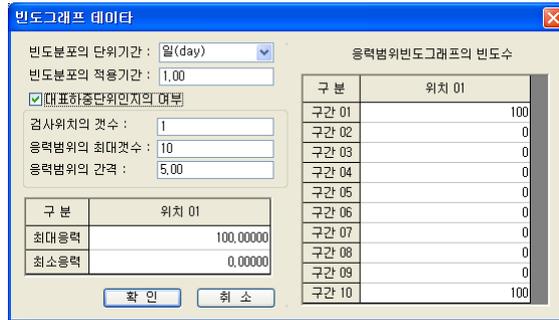


그림 3.16 빈도그래프 사용자 입력

각 항목의 값을 입력후 **확인** 을 클릭하면 빈도그래프의 사용자 입력이 완성된다.

3.1.2 실행

실행에서 응력변동해석을 실행하면 앞서 입력에서 선택한 하중조건에 따라 실행 대화상자가 나타난다.

1) 표준하중

그림3.17은 입력에서 표준하중을 선택하였을 경우 나타나는 실행 화면이다.

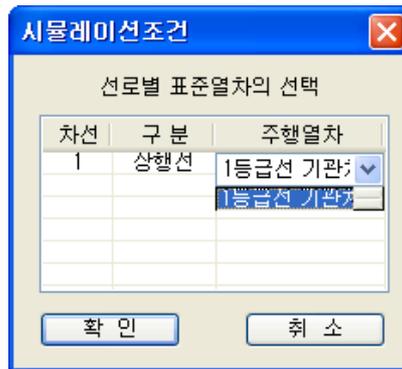


그림 3.17 표준하중의 실행

대화상자의 주행열차의 이름을 클릭하면 앞서 입력조건에서 선택한 하중들을 선택할 수 있다.

원하는 하중을 선택한 후에 을 클릭하면 그림3.18과 같이 응력변동해석이 수행된다.

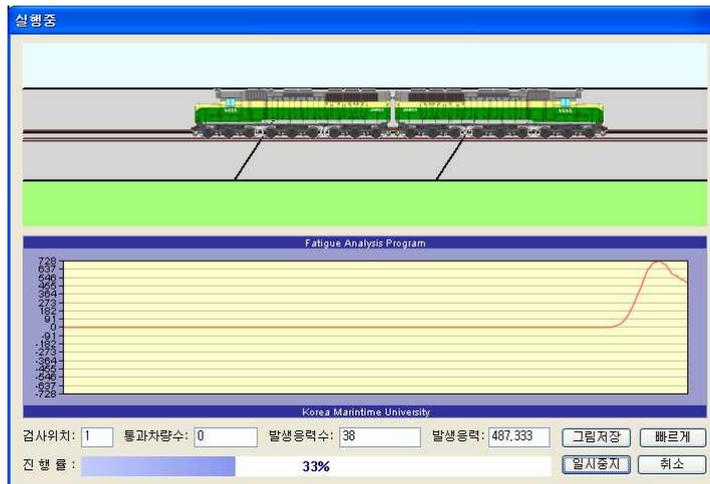


그림 3.18 응력변동해석의 실행

열차와 응력그래프의 진행상황이 보여지고 잠시 진행을 중단할 경우 **일시중지** 를 클릭하여 중지를 시킬 수 있고 다시 **재생** 를 클릭하여 계속하여 진행시킬 수 있다.

빠르게 를 클릭하면 각 진행상황을 보여주지 않고 곧바로 계산을 진행한다.

2) 시뮬레이션 하중

그림3.19는 입력에서 시뮬레이션 하중을 선택하였을 경우 나타나는 실행 화면이다.

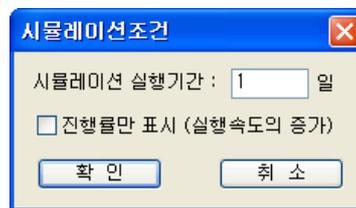


그림 3.19 시뮬레이션 실행

시뮬레이션 실행기간을 입력한 후에 **확인** 을 클릭하면 그림 3.20과 같이 응력변동해석이 수행된다.

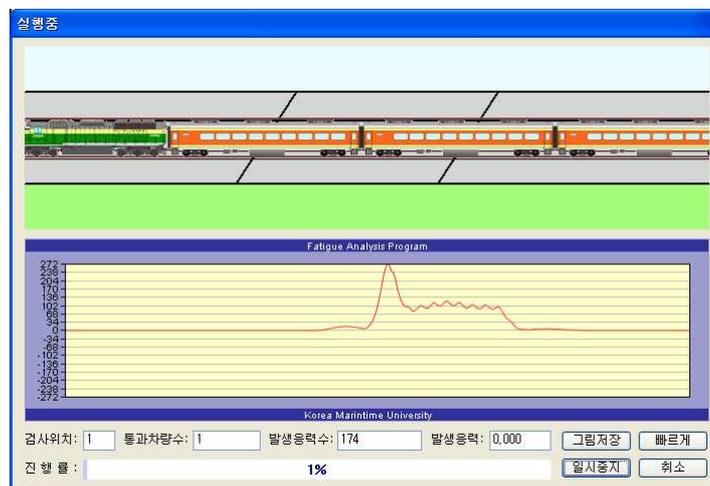


그림 3.20 응력변동해석의 실행

열차와 응력그래프의 진행상황이 보여지고 잠시 진행을 중단할 경우 **일시중지** 를 클릭하여 일시중지를 시킬 수 있고 다시 **재생** 를 클릭하여 계속하여 진행

시킬 수 있다.

빠르게 를 클릭하면 각 진행상황을 보여주지 않고 곧바로 계산을 진행한다.

만약 사용자가 다음과 같이 “진행률만 표시”에 체크를 하고 **확인** 을 클릭하면 그림 3.21과 같이 진행률만 표시되며 보다 빠른 응력변동해석을 하게 된다.

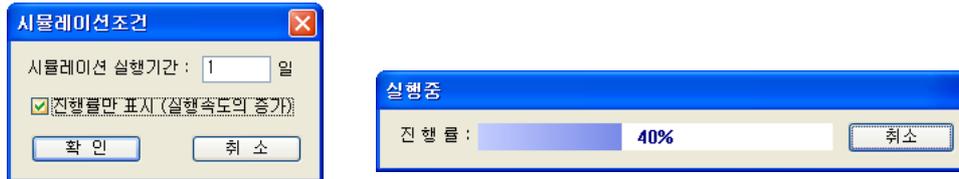


그림 3.21 응력변동해석의 간단 실행

3.1.3 출력

1) 영향면

출력에서 영향면을 클릭하면, 화면 창에 그림 3.22와 같이 입력된 영향면의 형상을 보여준다.

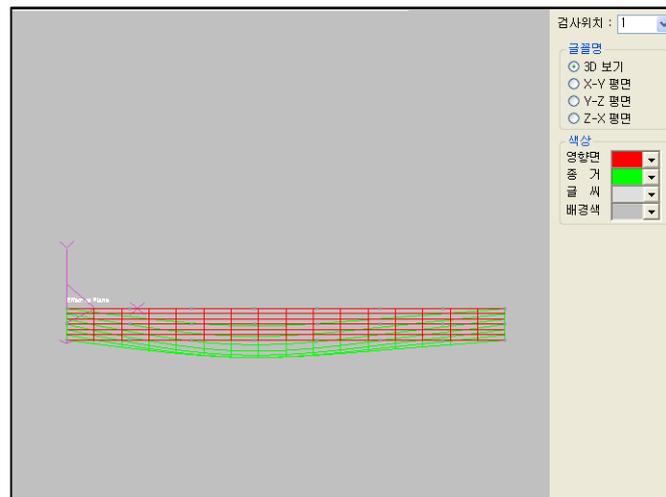


그림 3.22 영향면 형상

그림 3.22의 빨간색의 형상은 교량의 형상이고 초록색의 형상은 각 절점의 중거를 연결한 영향면의 형상이다.

2) 빈도그래프

출력에서 빈도그래프를 클릭하면, 그림 3.23과 같이 빈도그래프가 출력된다.

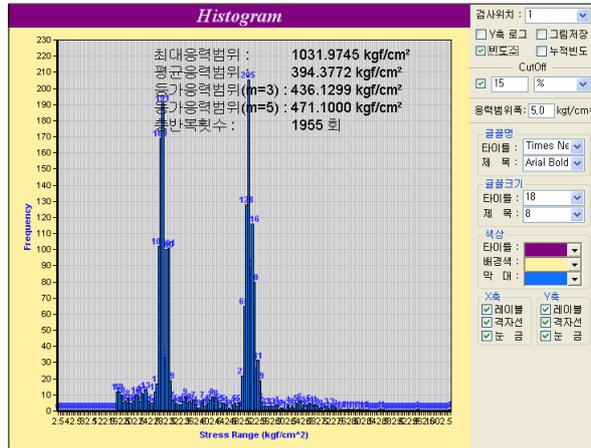


그림 3.23 빈도그래프

출력된 빈도그래프에서는 검사위치, Y축 로그, 그림의 저장, 빈도수, CutOff, 응력범위폭의 산정 등 여러 가지 디스플레이의 조정이 가능하다.

3.2 피로조사

3.1.1 기본데이터

1) 기본데이터2

기본데이터2를 클릭하면 그림 3.24와 같은 대화상자가 나타난다.

피로해석 기준선정 : KNR
 피로해석 조사횟수 : 1

번호	부재	이음의 종류
<input checked="" type="checkbox"/>	I A	단순 조립부재, 기타

이음의 종류
 단순 조립부재, 기타
 용접연결부
 중방향용 중첩부착물
 횡방향용 중첩부착물
 필렛용접연결부
 중방향필렛용접부착물
 횡방향필렛용접부착물

부재의 종류
 A : 봉괴비유발(다재하경로구조물)
 B : 봉괴유발(단재하경로구조물)

응력변동해석 기본데이터 사용

설계수명(년) : 75,00000
 응력보정계수 : 1,00000
 재하경로계수 : 1,00000
 중요도 계수 : 1,00000
 유지관리계수 : 1,00000

그림 3.24 피로조사 기본데이터

피로해석의 기준 선정을 한 후 조사갯수를 입력한다. 이음의 종류와 부재의 종류를 선택한 후 선택한 부재의 번호에 표시를 한 후 **적용** 을 클릭하면 선택한 부재에 적용이 되고 모든 부재의 적용을 마친 후 **마침** 을 클릭하면 피로해석의 기본데이터가 완성된다.

2) 이음의 강도 등급

(1) 파일명 입력

이음의 강도 등급에서 파일명 입력을 클릭하면 그림 3.25와 같은 파일 선택의 대화상자가 나타난다.

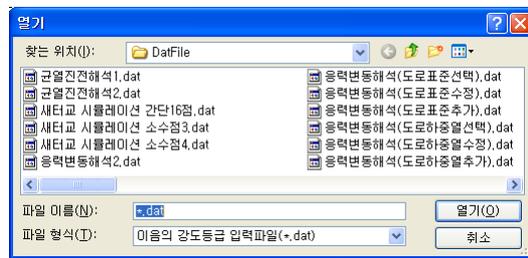


그림 3.25 강도 등급의 파일 입력

원하는 파일을 선택하고 **열기(O)** 버튼을 클릭하면 저장되었던 이음의 강도등급이 입력된다.

(2) 대화상자 입력

이음의 강도 등급에서 대화상자 입력을 클릭하면 그림 3.26과 같은 대화상자가 나타난다.

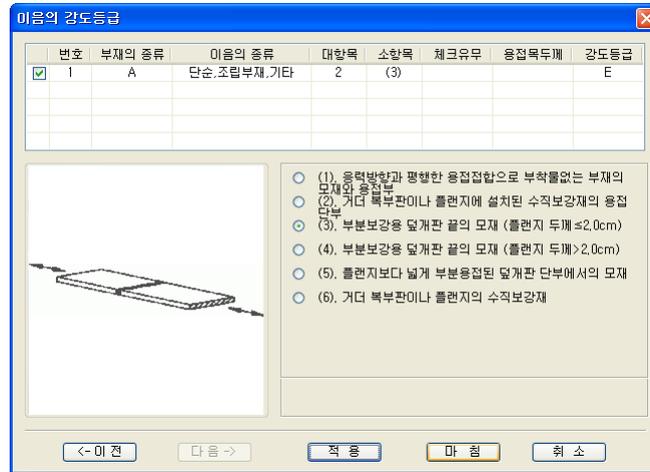


그림 3.26 강도 등급의 대화상자 입력

기본데이터2에서 입력한 부재의 종류와 이음의 종류가 표시된다. 이 부재의 강도등급을 결정하기 위해 부재 번호에 표시를 한 후 부재에 맞는 대항목 번호의 버튼을 클릭한 후 을 클릭하여 소항목의 대화상자로 이동한다.

부재에 맞는 소항목을 결정한 후 을 클릭하면 강도등급이 결정된다. 모든 부재의 강도등급이 결정되면 을 클릭하여 이음의 강도등급을 완성한다.

(3) 사용자 입력

이음의 강도 등급에서 사용자 입력을 클릭하면 다음과 같은 대화상자가 나타나고 각 부재의 강도등급의 결정을 위해 각 항목의 숫자를 클릭하여 원하는 항목의 숫자를 선택한다.

각 항목의 선택을 마치면 자동으로 강도등급이 그림 3.27과 같이 결정되고 모든 부재의 등급이 결정된 후 을 클릭하면 이음의 강도 등급의 사용자 입력이 완성된다.

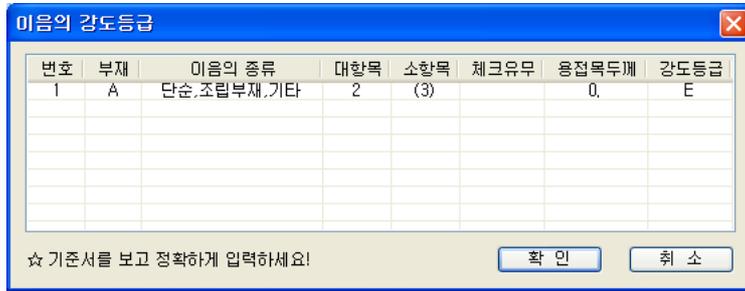


그림 3.27 강도등급의 사용자 입력

3) 응력변동데이터

(1) 파일명 입력

응력변동데이터에서 파일명 입력을 클릭하면 다음과 같은 파일 입력의 대화상자가 나타난다.

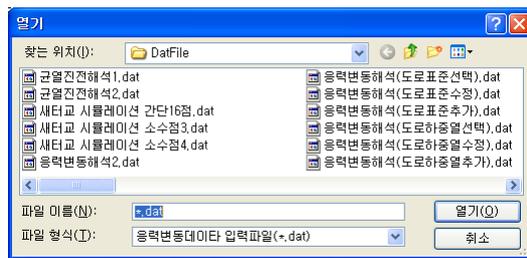


그림 3.28 응력변동데이터의 파일 입력

원하는 파일을 선택하고 버튼을 클릭하면 저장되었던 응력변동데이터가 입력된다.

(2) 사용자 입력

응력변동데이터에서 사용자 입력을 클릭하면 그림 3.29와 같은 대화상자가 나타난다.

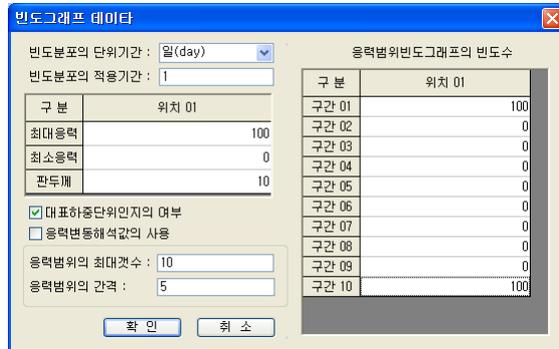


그림 3.29 빈도그래프의 사용자 입력

빈도그래프 데이터의 대화상자의 입력 항을 입력 후 **확인** 을 클릭하면 빈도그래프 데이터의 사용자 입력이 완성된다.

만약 앞서 응력변동해석을 수행하였다면 **응력변동해석값의 사용** 을 선택하여 앞서 계산한 응력변동해석의 결과 값을 자동으로 입력할 수 있다.

4) 피로조사법

피로조사법을 클릭하면 피로해석 기준 선정에 따라 그림 3.30 및 그림 3.31과 같은 대화상자가 나타난다.

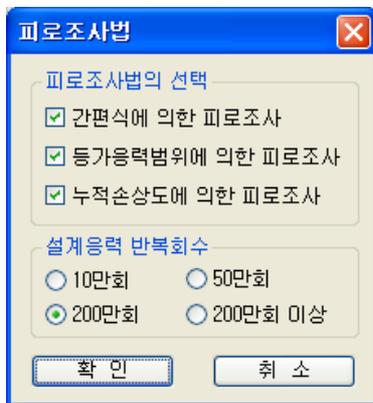


그림 3.30 한국기준선정시의 피로조사법

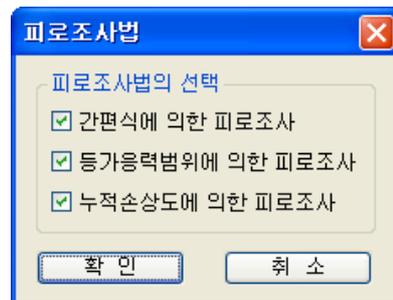


그림 3.31 일본기준선정시의 피로조사법

피로조사법을 선택한 후 **확인** 을 클릭하면 피로조사법의 선택이 완성된다.

3.2.2 실행

실행에서 피로조사를 클릭하면 입력 값들을 사용하여 피로조사를 수행한다.

3.2.3 출력

1) 피로설계곡선

출력에서 피로설계곡선을 클릭하면, 그림 3.32와 같은 피로설계곡선을 보여준다.

2) 피로조사결과

출력에서 피로조사결과를 클릭하면, 그림 3.33과 같은 피로조사의 결과값을 보여준다.

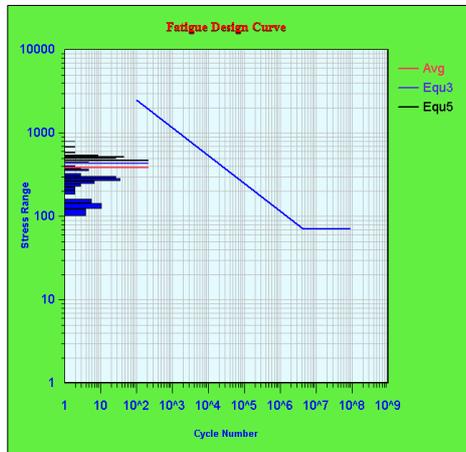


그림 3.32 피로설계곡선

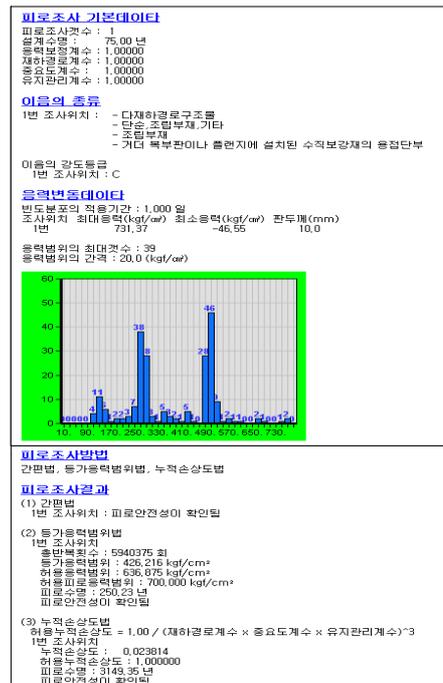


그림 3.33 피로조사결과

4장 프로그램의 적용

본 프로그램의 해석결과의 타당성 검증을 위해 실제 철도교의 현장계측 데이터를 적용하여 피로평가를 수행하고 그 결과를 본 프로그램의 시뮬레이션 해석 결과와 비교 분석하였다.

4.1 봉강천교

4.1.1 교량현황

표 4.1 봉강천 교량 현황

교량명	봉강천 (장항선)	단선
형식	관형교, 리벳이음	
관할사무소	천안보선사무소,	
교량길이	242.77m	측정경간 12.3m
설계하중	LS-22	
준공년도	1931. 1. 1	
소재지	충남 아산시	7k 015, (천안-모산)

현장계측을 수행한 장항선의 봉강천 관형교의 교량은 경간 12.3m에 설계하중 LS-22로 준공년도 1931년의 교량으로 계측 위치는 측정 경간의 중앙의 우측 하부 플랜지 하면이다.

4.1.2 측정 하중

본 연구에서 사용한 열차 하중은 무궁화 6량으로 열차 모형 및 제원은 그림 4.1과 4.2와 같다.



그림 4.1 무궁화호의 기관차 및 객차 모형

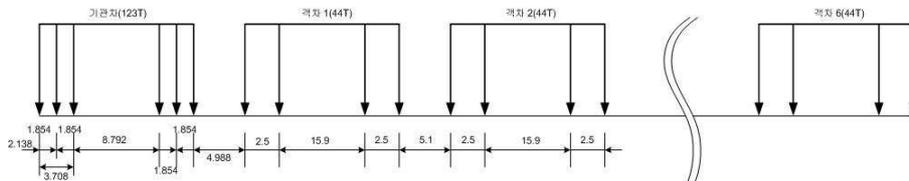


그림 4.2 시뮬레이션에 적용한 열차 제원

4.1.3 빈도그래프

그림 4.3은 봉강천교의 통과 차량들 중의 한 종류인 무궁화6량 1대를 실측한 데이터 9개를 통합하여 응력변동해석을 한 후 나타난 빈도그래프의 결과이고, 그림 4.4는 본 프로그램으로 무궁화의 6량 편성에 대한 9대의 차량을 봉강천교의 경간 중앙의 우측 하부 플렌지 하부의 영향면에 통과 시킨 시뮬레이션 해석을 통하여 나타난 빈도그래프의 결과이다.

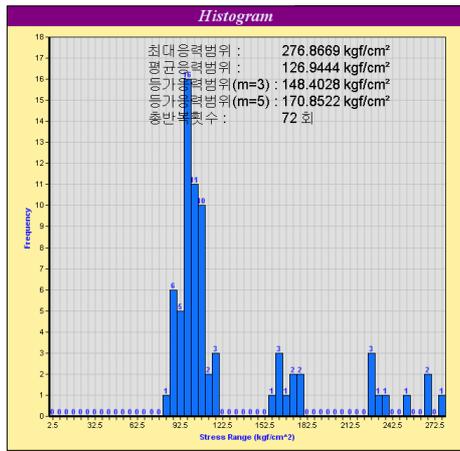


그림 4.3 실측데이터
빈도그래프(봉강천교)

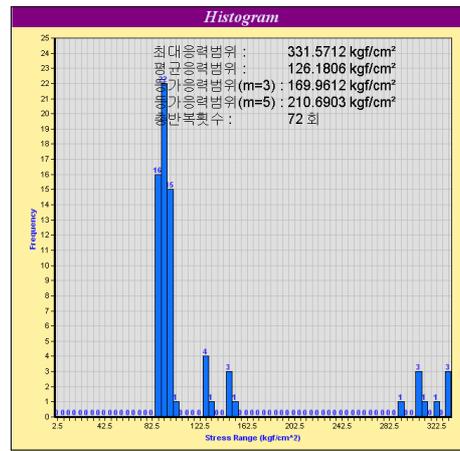


그림 4.4 시뮬레이션
빈도그래프(봉강천교)

그림 4.3의 실측데이터의 빈도그래프에서는 빈도분포가 크게 3개의 응력범위 빈도를 나타내고 있는데 최대응력범위는 약 277kg/cm², 평균응력범위는 약 127kg/cm², 등가응력범위(m=3)는 약 148kg/cm², 등가응력범위(m=5)는 약 170kg/cm²이다.

그림 4.4의 시뮬레이션 빈도그래프에서도 역시 빈도분포가 크게 3개의 응력범위 빈도로 나타나고 있는데 최대응력범위는 약 332kg/cm², 평균응력범위는 약 126kg/cm², 등가응력범위(m=3)는 약 169kg/cm², 등가응력범위(m=5)는 약 211kg/cm² 으로 나타나고 있다.

이들 결과로 부터 두 응력변동해석의 빈도그래프의 분포가 거의 일치하고 최대응력범위, 평균응력범위, 등가응력범위 역시 거의 일치하는 것을 알 수 있으며, 또 해석치가 실측보다 크게 나타나는 일반적인 경향을 나타내는 것을 보이고 있다.

4.1.4 피로설계곡선

응력변동해석으로 작성된 빈도그래프를 피로조사에서 설정된 이음의 등급인 강도등급 B의 부재의 피로설계곡선에 적용한 결과이다. 실측치와 시뮬레이션의 결과 비교를 그림 4.5와 그림 4.6에 각각 나타내었다.

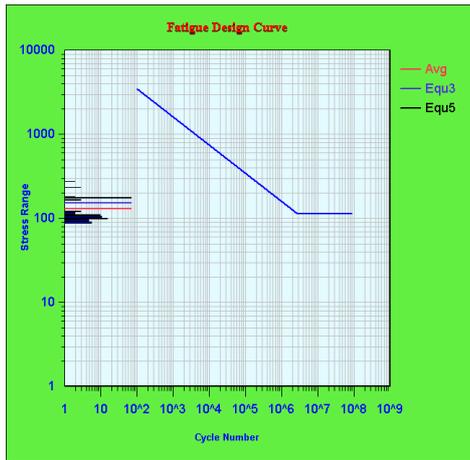


그림 4.5 실측치 피로설계곡선
(봉강천교)

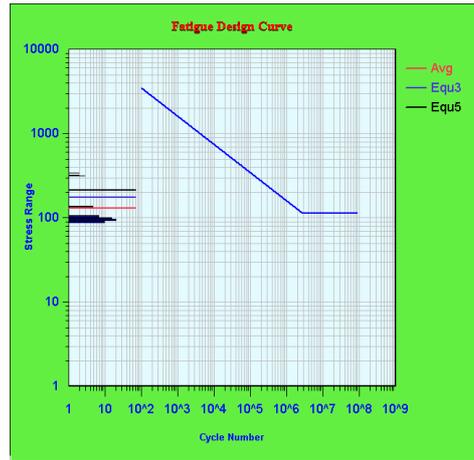


그림 4.6 시뮬레이션 피로설계곡선
(봉강천교)

4.1.5 피로조사

그림 4.7은 실측데이터의 빈도그래프로 강도등급 B의 부재를 피로조사한 결과이고 그림 4.8은 본 프로그램의 시뮬레이션 빈도그래프로 강도등급 B의 부재를 피로조사 한 결과이다.

<p>피로조사방법 간편법, 등가응력범위법, 누적손상도법</p> <p>피로조사결과</p> <p>(1) 간편법 1번 조사위치 : 피로안전성이 확인됨</p> <p>(2) 등가응력범위법 1번 조사위치 출발복횟수 : 1971000 회 등가응력범위 : 148,403 kgf/cm² 허용응력범위 : 1273,006 kgf/cm² 허용피로응력범위 : 1120,000 kgf/cm² 피로수명 : 47339.82 년 피로안전성이 확인됨</p> <p>(3) 누적손상도법 허용누적손상도 = 1.00 / (재하경로계수 × 중요도계수 × 유지관리계수)³ 1번 조사위치 누적손상도 : 0.000000 허용누적손상도 : 1.000000 피로수명 : ∞ 년 피로안전성이 확인됨</p>

그림 4.7 실측데이터 피로조사 결과
(봉강천교)

<p>피로조사방법 간편법, 등가응력범위법, 누적손상도법</p> <p>피로조사결과</p> <p>(1) 간편법 1번 조사위치 : 피로안전성이 확인됨</p> <p>(2) 등가응력범위법 1번 조사위치 출발복횟수 : 1971000 회 등가응력범위 : 170,485 kgf/cm² 허용응력범위 : 1266,150 kgf/cm² 허용피로응력범위 : 1120,000 kgf/cm² 피로수명 : 30722.64 년 피로안전성이 확인됨</p> <p>(3) 누적손상도법 허용누적손상도 = 1.00 / (재하경로계수 × 중요도계수 × 유지관리계수)³ 1번 조사위치 누적손상도 : 0.000000 허용누적손상도 : 1.000000 피로수명 : ∞ 년 피로안전성이 확인됨</p>

그림 4.8 시뮬레이션 피로조사 결과
(봉강천교)

앞서 4.1.3 빈도그래프에서 실측데이터와 시뮬레이션의 결과가 유사하게 나왔으므로 피로조사 역시 비슷한 결과임을 알 수 있다.

그림 4.7의 실측데이터의 피로조사와 그림 4.8의 시뮬레이션 피로조사 결과 간편법과 등가응력범위법, 누적손상도법 모두 피로안전성이 확인되었다.

4.2 죽계천교(상행)

4.2.1 교량현황

표 4.2 죽계천 교량 현황

교량명	죽계천교	복선
형식	판형교, 용접이음(상행), 리벳이음(하행)	
관할사무소	천안보선사무소,	
교량길이	18m	측정경간 6m
설계하중	LS-22	
준공년도	1998.(상행), 1905(하행)	
소재지	충남 연기군	105k 707 (천안-소정리)

현장계측을 수행한 경부선의 죽계천 판형교(상행선)의 교량은 경간 6m에 설계하중 LS-22로 준공년도 1998년의 교량이다. 계측 위치는 경간의 중앙 지점의 우측 하부플렌지 상면이다.

4.2.2 측정하중

본 연구에서 사용한 열차 하중은 무궁화 6량으로 4.1의 봉강천교에서 사용한 하중과 동일한 하중으로 4.1.2의 열차모형 및 제원과 같다.

4.2.3 빈도그래프

그림 4.9는 죽계천교의 통과 차량들 중의 한 종류인 무궁화6량 1대를 실측한 데이터 5개를 통합하여 응력변동해석을 한 후 나타난 빈도그래프의 결과이고 그림 4.10은 본 프로그램으로 무궁화의 6량 편성에 대한 5대의 차량을 죽계천교의 경간 중앙 지점 우측 하부 플렌지 하면의 영향면에 통과 시킨 시뮬레이션 해석을 통하여 나타난 빈도그래프의 결과이다.

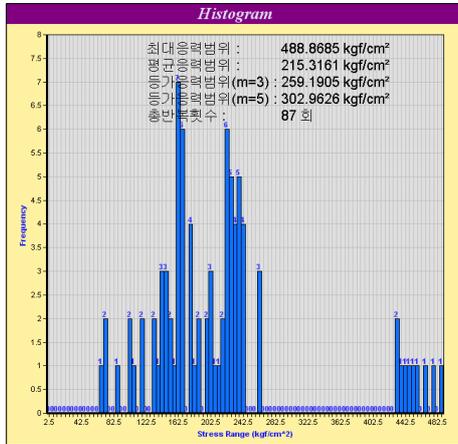


그림 4.9 실측데이터 빈도그래프
(죽계천교)

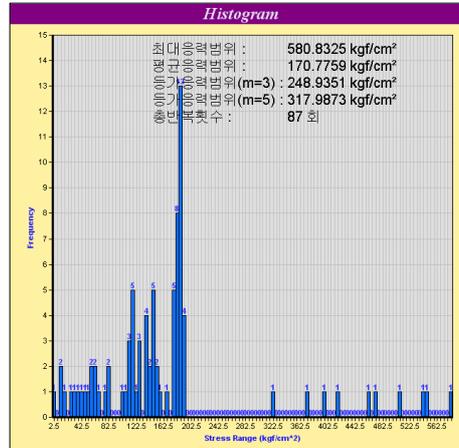


그림 4.10 시뮬레이션빈도그래프
(죽계천교)

그림 4.9의 실측데이터의 빈도그래프에서는 빈도분포가 크게 3개의 응력범위 빈도수로 나타나고 있고 최대응력범위는 약 489kg/cm², 평균응력범위는 약 215kg/cm², 등가응력범위(m=3)는 약 259kg/cm², 등가응력범위(m=5)는 약 303kg/cm² 로 나타나 있다.

그림 4.10의 시뮬레이션 빈도그래프에서 역시 빈도분포가 크게 3개의 응력범위 빈도수로 나타나고 있고 최대응력범위는 약 581kg/cm², 평균응력범위는 약 171kg/cm², 등가응력범위(m=3)는 약 249kg/cm², 등가응력범위(m=5)는 약 317kg/cm² 로 나타나고 있어 두 응력변동해석의 빈도그래프의 분포가 거의 일치하고 최대응력범위, 평균응력범위, 등가응력범위역시 거의 일치하는 것을 알 수 있으며 또 해석치가 실측보다 크게 나타나는 일반적인 경향을 나타내는 것을 보이고 있다.

4.2.4 피로설계곡선

응력변동해석으로 작성된 빈도그래프를 피로조사에서 설정된 이음의 등급인 강도등급 B의 부재의 피로설계곡선에 적용한 결과이다. 실측치와 시뮬레이션의 결과 비교를 그림 4.11과 그림 4.12에 각각 나타내었다.

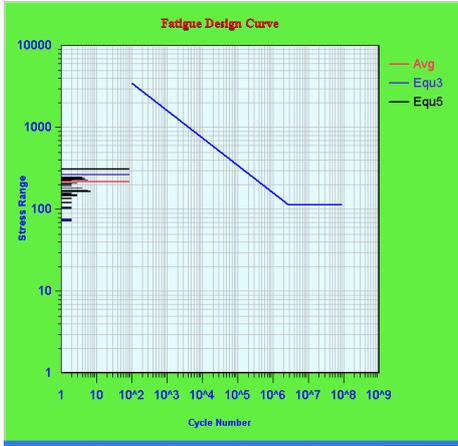


그림 4.11 실측치 피로설계곡선
(축계천교)

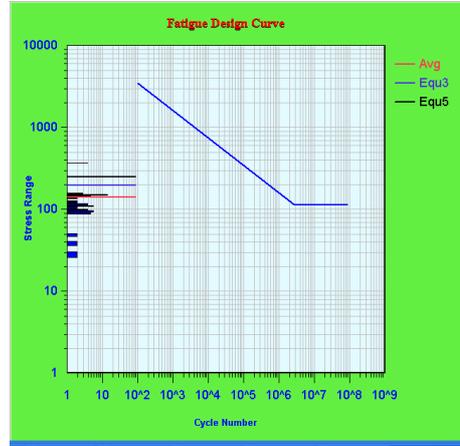


그림 4.12 시뮬레이션 피로설계곡선
(축계천교)

4.2.5 피로조사

그림 4.13은 실측데이터의 빈도그래프로 강도등급 B의 부재를 피로조사한 결과이고 그림 4.14는 본 프로그램의 시뮬레이션 빈도그래프로 강도등급 B의 부재를 피로조사한 결과이다.

<p>피로조사방법 간편법, 등가응력범위법, 누적손상도법</p> <p>피로조사결과</p> <p>(1) 간편법 1번 조사위치 : 피로안전성이 확인됨</p> <p>(2) 등가응력범위법 1번 조사위치 출발복회수 : 2381625 회 등가응력범위 : 259,191 kgf/cm² 허용응력범위 : 1193,497 kgf/cm² 허용피로응력범위 : 1120,000 kgf/cm² 피로수명 : 7322.64 년 피로안전성이 확인됨</p> <p>(3) 누적손상도법 허용누적손상도 = 1.00 / (재하경로계수 × 중요도계수 × 유지관리계수)³ 1번 조사위치 누적손상도 : 0.000000 허용누적손상도 : 1.000000 피로수명 : ∞ 년 피로안전성이 확인됨</p>
--

그림 4.13 실측데이터 피로조사 결과
(축계천교)

<p>피로조사방법 간편법, 등가응력범위법, 누적손상도법</p> <p>피로조사결과</p> <p>(1) 간편법 1번 조사위치 : 피로안전성이 확인됨</p> <p>(2) 등가응력범위법 1번 조사위치 출발복회수 : 2409000 회 등가응력범위 : 191,828 kgf/cm² 허용응력범위 : 1184,227 kgf/cm² 허용피로응력범위 : 1120,000 kgf/cm² 피로수명 : 17645.43 년 피로안전성이 확인됨</p> <p>(3) 누적손상도법 허용누적손상도 = 1.00 / (재하경로계수 × 중요도계수 × 유지관리계수)³ 1번 조사위치 누적손상도 : 0.000000 허용누적손상도 : 1.000000 피로수명 : ∞ 년 피로안전성이 확인됨</p>

그림 4.14 시뮬레이션 피로조사 결과
(축계천교)

앞서 4.2.3 빈도그래프에서 실측데이터와 시뮬레이션의 결과가 유사하게 나왔으므로 피로조사 역시 비슷한 결과임을 알 수 있다.

그림 4.13의 실측데이터의 피로조사와 그림 4.14의 시뮬레이션 피로조사 결과 간편법과 등가응력범위법, 누적손상도법 모두 피로안전성이 확인되었다.

5장 프로그램의 활용 및 검증

본 연구에서는 교통량 예측에 의한 변동응력을 이용한 피로안전성평가를 실시하여 프로그램을 활용하였다.

본 평가의 검증을 위해 일본 법정대학교에서 개발된 피로안전성평가 프로그램 (Fatigue Safety Assessment Program, FSAP)을 사용한 결과와 본 프로그램을 사용하여 분석한 피로안전성 평가의 결과를 비교하였다.

5.1 검토 대상

검토 대상 교량은 그림 5.1과 같이 총 길이 560m인 복선 철도 교량이고 대상 구조물의 주요 구조부재인 아치리브에 대해 피로안전성 평가를 하였다.

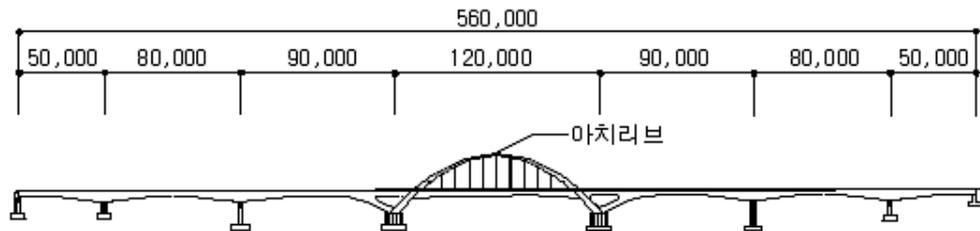


그림 5.1 검토 대상 교량

5.2 해석 모형 및 영향면

검토대상 구조상세에 대한 영향면을 작성하기 위해 그림 5.2와 같은 프레임 해석모형에 대해 구조해석을 실시하였다. 그림에 나타난 해석모형은 상부구조계 산서상의 단면특성 및 재료물성에 기초하여 모델링하였다.

해석된 아치리브의 영향면은 그림 5.3과 같다.

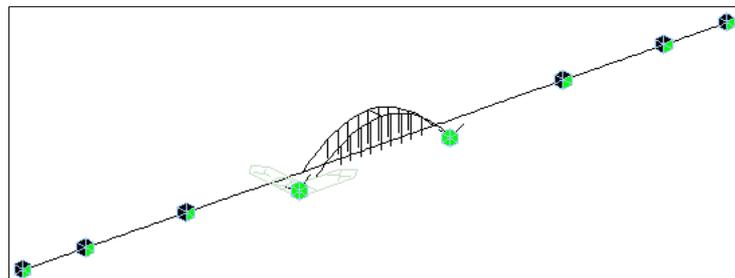


그림 5.2 영향면 작성을 위한 해석모형

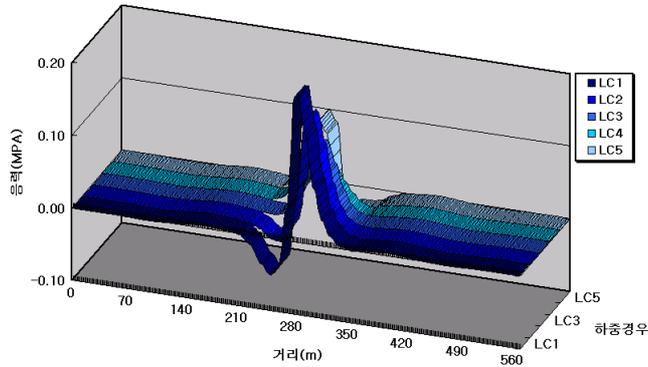


그림 5.3 아치리브 부의 영향면

5.3 시뮬레이션 하중

실제의 교통흐름을 모형화한 활하중, 즉 교통흐름을 교통량과 차종구성으로 표현하여 하중의 배열, 중량 및 차량간격을 시뮬레이션하며, 이 프로그램에서 사용하는 새마을호, 무궁화호, 통일호 및 화물열차의 중량, 간격 및 구성 등의 분포형태는 그림 5.4(a) ~ (d)와 같다.

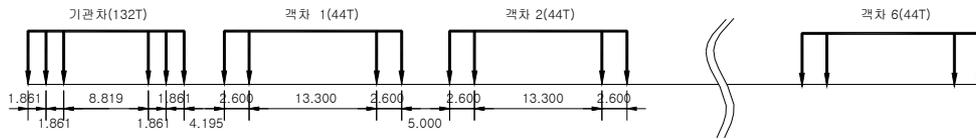


그림 5.4 (a) 새마을호(DL7100호대)

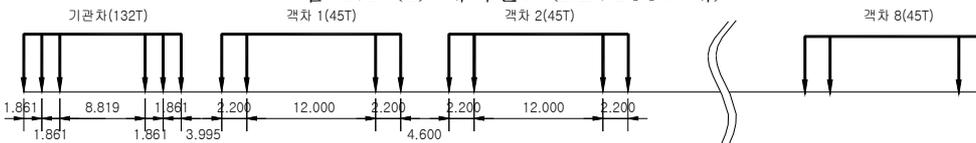


그림 5.4 (b) 무궁화호(DL7100호대)

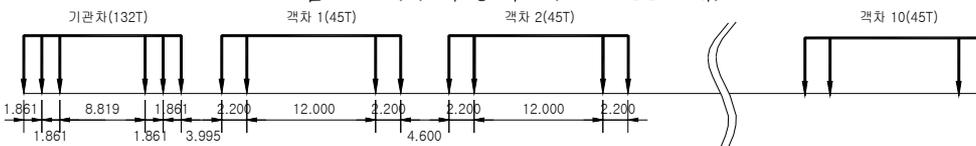


그림 5.4 (c) 통일호(DL7100호대)

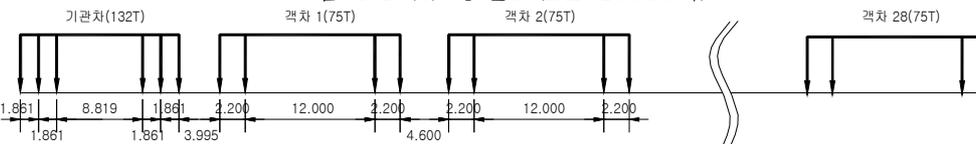


그림 5.4 (d) 화물열차(DL7100호대)

하중의 중량분포는 정규분포, 대수정규분포, 쌍두정규분포, 쌍두대수정규분포의 4가지 종류 중 정규분포를 선택하였고 객차의 평균 승차률, 표준편차, 최대중량, 최소중량이 입력되었다.

측중의 설정은 다음과 같이 실시하였다.

- ① 앞에서 언급한 분포에 따라 난수를 발생시켜 중량을 결정한다.
- ② 결정된 중량이 최대중량을 상회하거나 최소중량을 하회하는 경우는 ①의 작업을 반복한다.
- ③ 하중의 중량이 결정되면 시뮬레이션하중의 경우는 최대하중시 및 최소하중시의 축중비를 기준으로 결정된 중량에 따라서 축중비를 비례계산하여 각각의 축중을 계산한다.

5.4 교통량 예측결과

교통수요예측으로부터 얻어진 목표연도 2025년의 교통량자료에 기초하여 적용하였다. 교통량자료에 기초한 시뮬레이션 적용 차종과 구성비를 그림 5.5에 나타내었다.

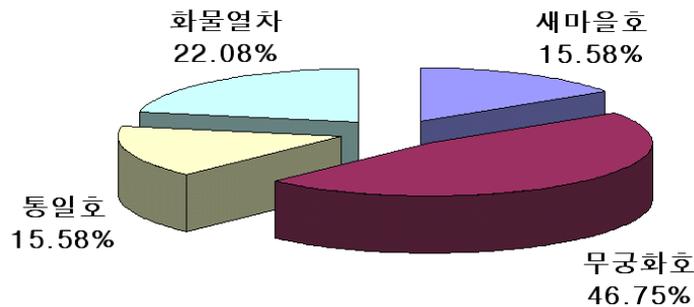


그림 5.5 시뮬레이션 적용 차종 구성비

5.5 응력변동해석결과

그림 5.6은 본 프로그램으로 실시한 시뮬레이션 응력변동해석으로 나타낸 빈도그래프이고 그림 5.7은 일본 프로그램으로 실시한 시뮬레이션 응력변동해석결과와 빈도그래프를 나타낸 것이다.

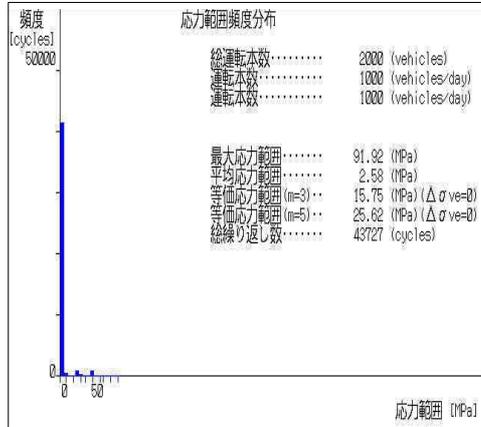
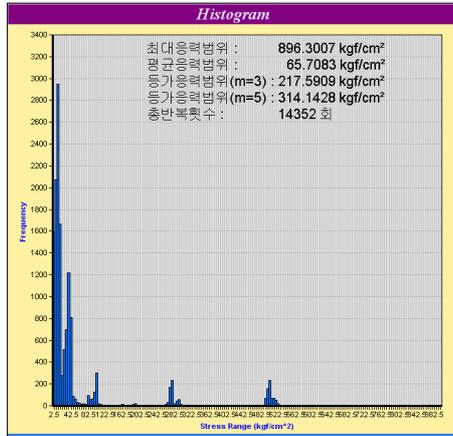


그림 5.6 본 프로그램의 빈도그래프

그림 5.7 일본 프로그램의 빈도그래프

그림 5.6에서와 같이 본 프로그램은 최대응력범위가 약 90 MPa, 등가응력범위(m=3)등이 22MPa 등으로 나타나고 있고 그림 5.7에서와 같이 일본 프로그램의 결과 역시 최대응력범위가 92MPa, 등가응력범위(m=3)등이 16MPa 등으로 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

5.6 피로등급분류 및 허용피로응력 범위

선택한 이음부의 피로등급분류와 허용피로응력범위를 표 5.1과 5.2에 나타내었다.

표 5.1 피로등급분류

구 분		피로 등급
플랜지와 가로보 (다이아프램) 이음부	하중비전달형 십자필렛용접이음 (비마무리)	E

표 5.2 허용피로응력범위

피로등급		2×10^6 회에 대한 기본허용응력범위 Δf_f (MPa)
m=3	E	80

5.7 피로안전성 평가 결과

피로안전성평가는 식 5.1의 조건을 만족하는가를 검토하며, 설계응력범위 및 허용응력범위는 각각 식 5.2 및 식 5.3과 같이 주어지고 표 5.3에 의해 검토 교량은 공용하중에 대해 충분한 피로안전성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 자세한 안전계수에 관해서는 본 논문의 2.2.3절 피로조사방법을 참조하기 바란다.

$$(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i) \Delta f_d \leq \Delta f_R \quad (5.1)$$

여기서, $\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i$: 안전계수

γ_b : 구조영향계수(0.80~1.10)

γ_w : 중요도계수(0.80~1.10)

γ_i : 검사계수(0.90~1.10)

단, $0.80 \leq \gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i \leq 1.25$

Δf_d : 설계응력범위

(변동응력에 의한 피로평가에서는 등가응력범위, Δf_{eq})

Δf_R : 허용응력범위

$$\Delta f_d = \Delta f_{eq} = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta f_i^m n_i}{\sum n_i}} \quad (5.2)$$

여기서, Δf_i : i 번째의 응력범위

n_i : Δf_i 의 빈도

m : 상수

$$\Delta f_R = \sqrt[m]{\frac{2 \times 10^6 \Delta f_f^m}{n_t}} C_R C_t \quad (5.3)$$

여기서, Δf_f : 기본허용응력범위

n_t : 설계응력반복회수

C_R : 응력비 보정계수

C_t : 판두께 보정계수

표 5.3 피로안전성 평가 결과

구 분		일본 프로그램	본 프로그램
허용응력범위 Δf_R $\left(= \sqrt[m]{\frac{2 \times 10^6 \Delta f_f^m}{n_f}} C_R C_t \right)$	피로등급	E	E
	Δf_f (MPa)	80	80
	n_f	2.11×10^6	2.11×10^6
	C_R	1.0	1.0
	C_t	1.0	1.0
	Δf_R (MPa)	79.15	79.15
설계응력범위, Δf_d (MPa)		15.75	21.76
안전계수 ($\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_f$)		1.21	1.21
피로평가결과, $(\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_f) \Delta f_d \leq \Delta f_R$		$19.06 \leq 79.15$ \therefore O.K	$26.33 \leq 79.15$ \therefore O.K

6장 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 강철도교의 보다 효율적인 유지관리를 위하여 현장 기술자가 쉽게 접근할 수 있으며, 또한 현장의 자료를 사용하여 강철도교 구조부재의 피로 수명을 정량적, 정성적으로 평가하는 프로그램인 강교의 피로평가 시스템의 개발 및 활용에 있어 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1) 본 평가시스템의 적용에서 실측데이터와 본 프로그램의 시뮬레이션의 빈도 그래프의 차이는 설계시의 교량 단면과 실측시의 교량 단면과의 차이, 실측에서의 충격계수의 고려 및 시뮬레이션시의 난수 발생의 영향 등으로 발생된 것으로 판단된다. 그러나 실측과 시뮬레이션에 기초한 간편법과 등가응력범위법, 누적손상도법을 사용한 피로조사의 결과가 거의 일치하고 있는 것으로부터 본 프로그램의 해석 결과는 충분한 타당성을 가지고 있으며 그 결과는 허용 오차 범위에 있는 것을 알 수 있다.

2) 본 평가시스템의 활용 및 검증을 위해 일본의 피로안전성평가 프로그램을 사용한 응력변동해석의 그래프와 본 프로그램을 사용하여 분석한 응력변동해석의 그래프의 비교 결과 유사한 빈도의 분포와 응력 범위를 나타내었다. 또한 평가시스템의 활용성의 연구 결과 본 평가시스템을 이용하여 피로 안전성평가를 실시한 결과와 일본의 피로안전성평가 프로그램을 사용한 결과의 유사성으로 충분한 안전성 평가의 활용성과 검증을 할 수 있다.

4) 일본의 피로안전성평가 프로그램은 자체 언어가 Basic 언어를 기본으로 하고 있고 Dos 기반의 프로그램이므로 입력 시간과 출력을 위한 연산 시간이 느리다. 하지만 본 시스템은 최신 언어인 Visual C++를 이용한 Windows 기반의 프로그램이므로 사용자의 사용이 쉽고 입력과 출력의 시간이 빠르고 Visual 화가 가능하다.

5) 본 평가시스템은 한국과 일본, 유럽의 피로해석의 기준 선정을 입력할 수 있어 강도등급의 다양한 피로기준을 정할 수 있어 보다 다양한 해석결과를 나타낼 수 있다.

본 연구에서 프로그램에 적용된 알고리즘의 타당성 및 프로그램의 유용성을 확인 할 수 있었고 향후 유지관리 및 보수 보강 후의 교량의 피로수명평가 등에 본 프로그램의 활용성이 기대될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 철도청, 강철도교의 잔존수명평가 및 유지관리기법 개발(Ⅱ) (2003)
2. 경갑수, 이준석, 최일윤, 이승용, 홍성욱, 현장계측결과에 기초한 강철도교의 응력특성, 2003 한국강구조학회 학술 발표회 (2003. 6)
3. 日本鋼構造協會編, 鋼構造物の疲勞設計指針·同解説, 技報堂出版 (1993)
4. (財)鐵道總合技術研究所, 鐵道構造物 等 設計標準·同解説 - 鋼·合成構造物, (2000)
5. UIC CODE 778-1 R, "Recommendation for the Consideration of Fatigue in the Design of Metal Railway Bridges" (1981)
6. ECCS - Technical Committee 6 - Fatigue, "Good Design Practice - A Guideline for Fatigue Design" (2000)
7. ERRI - DT 176, "Statistical Analysis of Fatigue Tests on Steel Riveted Connections" (1986)
8. K.S. Kyung, S.W. Hong, H.H. Lee and J.C. Jeon, Deterioration and Stress Characteristic of Steel Railway Bridges in Korea, Proceeding of the JSPS-DOST Regional Symposium (2002)
9. 경갑수, 이준석, 최일윤, 김이현, 박진우, 강철도교 피로평가 시스템 개발 및 검증, 철도학회 학술 발표회 (2005)
10. CTC, 실교통류에 의한 변동응력을 이용한 피로안전성평가, (2004)

감사의 글

힘든 시간속에 이 논문이 탈고 되었습니다. 아직은 부족한 점이 많은 논문이지만 너그럽게 봐주시고 더욱 열심히 전진하는 공학도가 되겠습니다.

먼저 저를 이 자리에 있게 만들어 주신 부모님과 힘든 생활 속에 언제나 웃음을 주는 건강한 두 동생 유미와 진성이 에게 감사의 인사 전합니다.

대학생활 동안 항상 저를 이끌어 주시며 충고와 칭찬을 아끼지 않으시는 경갑수 교수님과 항상 걱정 어린 잔소리를 마다하지 않으시는 만물박사 허상구 부장님께 다시 한 번 감사드립니다.

항상 존경하고 언제나 힘이 되어주신 김태곤 교수님, 김도삼 교수님, 이중우 교수님, 김태형 교수님께도 감사드립니다.

연구실 생활을 하면서 항상 지도와 조언을 아끼지 않은 순철이 형과 석기형, 상길이형 그리고 오랜 생활을 같이한 대학원 동기 영직이와 지윤이, 그리고 고생 많은 후배 경진이, 준호, 동호 또한 귀여운(?) 동생들인 창원이, 혜연이, 형식이, 종엽이, 남우에게도 감사의 인사를 전합니다.

오랜 대학생활을 같이 한 승호, 휘태, 성완, 성룡, 상윤 그리고 96동기들, 또한 술친구들인 봉섭이, 태한이, 상현이에게 너무 고맙습니다.

저를 지금껏 지탱해주신 여러 친구, 선배, 동생들에게 심심한 감사의 인사 전합니다.