

2006年 2月
碩士學位論文

용접결함을 가진 강교량의
피로수명 평가

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

姜在完

용접결함을 가진 강교량의
피로수명 평가

*Fatigue Life Valuation of Steel Bridge
with Welding Defects*

2006年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

姜在完

용접결함을 가진 강교량의
피로수명 평가

指導教授 朴正雄

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2005年 12月 日

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

姜在完

姜在完의 碩士學位論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 _____ 印

委 員 朝鮮大學校 教授 _____ 印

委 員 朝鮮大學校 教授 _____ 印

2005年 12月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

| | |
|----------------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 1.1 연구배경 | 1 |
| 1.2 연구동향 | 2 |
| 1.3 연구내용 | 4 |
| 제 2 장 도로교 피로설계 | 5 |
| 2.1 피로설계 기본 | 5 |
| 2.2 피로설계 순서 | 5 |
| 2.3 피로위치 조사 | 7 |
| 2.3.1 판형교(I형) | 7 |
| 2.3.1 상자형교 | 9 |
| 2.4 허용피로응력 범위결정 f_{sr} | 11 |
| 2.4.1 구조 상세에 따른 피로강도 등급결정 | 11 |
| 2.4.2 응력반복횟수 및 허용피로 응력범위 | 15 |
| 2.5 실제피로응력 범위결정 $f_{sr,d}$ | 19 |
| 2.6 설계변경 | 20 |
| 제 3 장 피로균열 진전 해석 | 21 |
| 3.1 용접이음부의 피로균열의 발생 및 성장 | 21 |
| 3.1.1 용접이음부의 피로균열 발생 | 21 |
| 3.1.2 피로균열의 성장 | 22 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 3.2 초기균열길이와 한계균열길이 | 24 |
| 3.3 응력변동 해석 | 26 |
| 3.3.1 레인플로법에 의한 응력범위 빈도해석 | 26 |
| 3.3.2 피로손상의 누적 | 31 |
| 3.3.3 등가응력 범위 | 32 |
| 3.4 응력확대 계수범위 | 36 |
| 3.5 피로균열 진전속도 | 41 |
| 3.6 피로균열 진전수명 | 42 |
| | |
| 제 4 장 용접결함부 피로수명 평가 | 46 |
| 4.1 대상구조물의 제원 | 46 |
| 4.2 응력범위 빈도측정 및 평가 | 48 |
| 4.2.1 응력범위 빈도측정방법 | 48 |
| 4.2.2 응력범위 빈도측정결과 | 48 |
| 4.3 피로수명평가 | 50 |
| | |
| 제 5 장 결 론 | 56 |
| | |
| 참 고 문 헌 | 57 |

표 목 차

| | |
|---|----|
| 표 2.1 단순부재 상세개요 | 12 |
| 표 2.2 연속용접부의 모재와 금속 상세개요 | 14 |
| 표 2.3 맞대기(홈용접) 이음부 | 14 |
| 표 2.4 수직보강재의 용접끝 | 15 |
| 표 2.5 주형플랜지에 용접된 덮개관 끝 | 15 |
| 표 2.6 응력 반복 회수 | 16 |
| 표 2.7 다재하경로 허용피로 응력범위 | 17 |
| 표 2.8 단재하경로 허용피로 응력범위 | 18 |
| 표 2.9 피로조사 부재에 따른 재하하중 | 19 |
| 표 3.1 균열의 모델화 | 25 |
| 표 3.2 균열위치에 따른 수정 계수 | 40 |
| 표 3.3 $da/dN-\Delta K$ 곡선에서의 상수 값 | 41 |
| 표 4.1 내부용접 결함진전에 따른 결과 | 52 |
| 표 4.2 외부용접 결함진전에 따른 결과 | 54 |

그 립 목 차

| | |
|--|----|
| 그림 2.1 피로설계 순서 | 6 |
| 그림 2.2 판형교 주형의 피로조사 위치 예 | 7 |
| 그림 2.3 가로보의 피로조사 위치 예 | 8 |
| 그림 2.4 브레이싱의 피로조사 위치 예 | 8 |
| 그림 2.5 상자형교 주형의 피로조사 위치 예 | 9 |
| 그림 2.6 가로보의 피로조사 위치 예 | 10 |
| 그림 2.7 종형의 피로조사 위치 예 | 10 |
| 그림 2.8 평판부재 또는 압연부재 - 범주 A | 12 |
| 그림 2.9 용접결합 | 13 |
| 그림 3.1 용접이음부의 결함 종류 | 22 |
| 그림 3.2 피로균열의 성장곡선 | 23 |
| 그림 3.3 라인플로우 집계(Original) | 26 |
| 그림 3.4 라인플로우 집계(ASTM) | 29 |
| 그림 3.5 Miner의 선형피로손상 법칙 | 31 |
| 그림 3.6 등가응력범위의 분포 | 32 |
| 그림 3.7 균열이 없을 때의 피로수명 평가순서 | 34 |
| 그림 3.8 균열이 있을 때의 피로수명 평가순서 | 35 |
| 그림 3.9 하중 비 전달형 십자이음 | 38 |
| 그림 3.10 반타원형의 표면균열 형상과 응력확대 계수범위의 계산 | 43 |
| 그림 3.11 피로균열 진전수명 계산의 흐름도 | 44 |
| 그림 4.1 대상교량의 횡단면도 | 45 |
| 그림 4.2 평가대상 부위 (플렌지, 웹) | 46 |
| 그림 4.3 응력범위 빈도분포 | 48 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 그림 4.4 실제 측정 응력 빈도 분포 | 48 |
| 그림 4.5 실제 측정 응력 히스토리 그래프 | 49 |
| 그림 4.6 실제 측정 응력 빈도 | 49 |
| 그림 4.7 복부판 맞대기 용접부 내부 결함 형상 | 50 |
| 그림 4.8 용접 내부 균열 진전 해석에 의한 결과 | 51 |
| 그림 4.9 복부판 맞대기 용접부 표면 결함 형상 | 52 |
| 그림 4.10 용접 외부 균열 진전 해석에 의한 결과 | 53 |

ABSTRACT

Fatigue Life Valuation of Steel Bridge with Welding Defects

Kang, jae-wan

Advisor : Prof. Park, Jung-ung, Ph.D.

Department of Civil Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, it has been reported that fatigue damage of steel bridge are occurred due to vehicles and traffic volumes. There may be attributed to the defets at the welded joints. In general, the fatigue crack in welded joints initiates from welded defects. In order to prevent fatigue damage, the estimation of fatigue life for the welded joints should be performed.

The objective of this study is to investigate the effect of proportion vehicles on the fatigue crack propagation life according to vehicle speed. The basic theory for fatigue crack propagation based on the fracture mechanics is described and the estimation of fatigue crack propagation life is performed on welded defects occurred at the butt welded joints of diaphragm in a three span continuous steel box girder bridge. The stress variation analysis has been performed based on the Monte-Carlo simulation load. Equivalence stress range were determined to calculate a stress intensity factor range Δk , then the fatigue crack propagation analysis has been carried out by applying the strength level to fillet welded joint of bottom flange . The edge cracks, though thickness crack and semi-elliptical surface crack were

used for fatigue crack types.

Based on the result, the fatigue crack propagation life depends on the proportion of vehicle and the vehicle speed. It is shown that fatigue crack propagation life decreased as the proportion of heavy vehicle increase and the vehicle speed in reduced. In case of a semi-elliptical surface crack occurred on the base metal,

제1장 서론

1.1 연구배경

1938년 7월경 벨기에의 Hasselt교가 완성 후 14개월만에 현장 용접시 발생한 균열부에서 기온 강하시 취성파괴로 인해 전체 구조가 붕괴하였고, 1967년 12월 15일 미국 West Virginia주 Ohio강의 Point Pleasant교가 현수 Cable의 아이바가 취성파괴 되어 교량 전체가 붕괴하는 등 강교량에 존재하는 피로 균열이나 내재된 용접결함을 근원으로 해서 강교의 붕괴 또는 낙교를 일으킨 사고가 있다. 1960년대까지는 붕괴 및 낙교 사고가 다른 여러 나라에서도 일어났다. 그 후 교량의 피로 파괴에 대한 연구발전과 유지 관리에서 이들 파괴에 대한 관심 고조로 인하여 피로가 원인이 된 강교량의 붕괴와 낙교 사고는 없었다. 불행하게도 1994년 10월 21일 성수대교의 낙교로 인하여 외국에서 강교 붕괴의 경험이 타산지석이 되지 못하고 우리가 재현하는 우를 범하게 되었다.

최근 강교량은 차량의 교통량의 증대로 인하여 극한하중에 의한 부재의 파괴보다는 허용응력 이하의 반복하중에 의한 피로손상이 많이 발생되고 있다. 국내의 강교량에 있어서 대표적인 사고였던 성수대교의 붕괴사고는 수직부재의 맞대기 용접이음부에 완전 용입이 실시되지 않아 차량하중에 대한 수직부재의 용접단면 부족으로 초기결함이 발생하였다. 이 수직부재의 용입 부족으로 인한 초기 결함이 피로균열을 야기하여 교량의 붕괴로 이어졌다.

최근 강교량의 정밀안전진단 결과에 따르면 많은 수의 교량에서 다양한 용접결함이 상당수 발견되었고 그 중에서도 특히 인장 하부플랜지 맞대기 용접부에서 용입 부족이 확인되었다. 이러한 기존 교량에 존재하는 불완전 용입 결함은 비파괴시험 기준에 따라 불합격 결함으로 분류되어 보수 또는 보강을 해야 한다. 하지만 정기적인 안전진단 과정에서 검출된 용접결함을 강교량 제작에 적용한 기준에 따라 보수여부를 결정하는

것은 경제적, 기술적 측면에서 바람직하지 못하다.

따라서 맞대기 용접부의 용접 결함 크기 및 사용응력 조건을 고려한 피로해석평가를 통하여 보수여부를 판단할 필요가 있다.

도로교에서 피로손상을 일으키는 하중은 활하중으로 교량을 통과하는 대형차나 과적 차량에 의한 교량부재의 피로손상이 큰 것으로 보고되고 있다. 그러므로 강교량의 용접이음부에 피로균열의 발생 및 진전에 미치는 교통하중에 대한 영향을 미리 파악한다면 강교의 수명평가, 유지 및 보수 계획을 수립하는데 상당한 도움이 될 것이다.

1.2 연구동향

강교량 부재에서는 통행 차량하중의 작용으로 구조적 특성에 의해 국부응력, 면외 응력 및 2차 응력 등이 발생하고, 이런 구조적 거동의 반복으로 강교량의 피로손상은 용접이음부에서 주로 발생한다. 여기에 추가로 강교량 부재의 용접이음부에 결함이 존재하면 결함부에는 응력이 집중되고 하중의 반복 작용에 의해 이 응력집중부에는 피로균열이 발생하고 진전하여 부재는 파단하게 된다.

이러한 관점에서 외국에서는 구조용 강재의 피로특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 미국에서는 NCHRP에 의한 피로시험이 수행되었고, 그 결과에 따라 AASHTO 및 AISC에 피로설계 기준을 마련하였다. 또한, 일본의 JSSC, 유럽의 ECCS에서도 강교량 부재의 이음구조 상세에 대한 독자적인 피로설계 기준을 설정하여 이를 강구조물의 설계에 최대한 반영하고 있다. 구체적으로 언급하자면

AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", 15th ED., 1992.

AASHTO, "LRFD Bridge Design Specification", 1st Ed., 1994.

AASHTO, "Guide Specifications for Fatigue Design of Steel Bridge", 1989

일본 JSSC, "강구조물의 피로설계지침 동해설", 1993.

유럽 CEN, "Eurocode 3 - Design of Steel Structures", 1993.

영국 BSI, "BS 5400 Part 10 - Code of Practice for Fatigue", 1980. 등이 있다.

국내에서는 94년 성수대교 붕괴 후 강교량 용접부의 피로에 대해서 많은 연구가 시작

되었다. 95년 부산공업대학 조상명에 의해서 일본토목학회와 강구조학회 자료를 이용한 “용접결함을 가진 강교량 피로수명평가 시뮬레이션”이 제안되어 일본의 고장력강 용접부재에 대한 피로시험과 피로균열 전파수명평가에 대해 검토하였다. 98년엔 “강도로교의 피로설계요령”이 한국강구조학회에 의해 편찬되었으나 이는 일본의 자료를 그대로 옮겨오거나 외국자료를 인용한 사례가 대부분이다. 98년 심낙훈, 양준열, 박영석, “우리나라 도로교의 피로하중 모형에 관한 연구”와 99년 산업기술시험원과 경희대 백영남, 장영권에 의해 “강교량 맞대기용접 결함부의 피로수명 평가”란 논문이 대한 용접학회지를 통하여 발표되면서 국내 강교량의 용접결함을 다루기 시작하였으며 이후에 2001년과 2005년 부경대학교 염창희의 석사학위 논문 “강상형교의 용접이음부의 피로균열 진전해석”와 하창민의 석사학위논문 “강교 용접이음부의 피로균열 진전수명에 미치는 대형차의 영향”이 발표되었다.

최근 이 지방에서는 2005년 전남대학교 한석열의 박사학위 논문 “몬테카를로 시뮬레이션에 의한 교량 강부재의 피로신뢰성 해석모델”이 발표되어 강교량의 피로해석 분야의 높아진 관심을 보여주고 있다. 하지만 성수대교 붕괴 후 10여년이 넘는 세월이 흘렀지만 그 연구 성과물이 부족하고 대부분의 용접결함에 대한 연구는 선박이나 항공기계분야에서 연구가 이루어지고 있으며 토목에서는 아직도 용접결함에 크게 관심을 가지지 않고 있는게 현실이다. 또 대부분의 지금까지의 연구도 외국의 설계규정을 거의 그대로 인용하여 사용하고 있는 실정이다. 또한 현재 국내에서는 용접부에 대한 피로 강도 연구는 용접부의 형상 및 재료에 따른 피로강도 곡선을 얻어 균열전파 특성에 대한 연구결과를 사용하지만 사용용력이 다양한 교량에 위의 정밀 안전진단결과 확인된 결함부의 피로수명 평가에 직접 적용함은 적합하지 않다.

1.3 연구내용

강도로교에 나타나는 손상으로 부식열화나 하중작용에 의한 파손, 좌굴, 피로 등을 들 수 있다. 이 중에 피로손상의 원인은 직접적으로 응력집중과 반복회수이나, 그 밖에 손상을 발생시키는 요인으로는 여러 가지가 있다. 특히 하중조건으로 대형차량의 증대, 과적재 차량에 의해 현저하게 부재의 피로수명을 단축시킨다. 이 하중조건은 피로하중을 받는 부재에서 측정된 응력이력이다. 이 응력이력은 피로해석의 응력-수명 접근방법이나 선형탄성 파괴역학적인 방법에서 부재의 수명을 지배하는 랜덤변수이다. 이 응력이력을 가지고 응력범위 빈도해석에서 구한 응력범위 빈도분포에 확률적인 방법을 적용할 수 있다.

이를 위해 먼저, 우리나라를 비롯한 외국의 피로설계 기준을 소개하고 강구조물 피로설계를 위한 피로조사 위치선정 방법, 허용피로응력 범위의 결정, 설계피로응력 범위의 산정 및 설계 적부 판정 예를 제시하였다. 또한, 용접이음부의 피로균열 발생과 성장 및 한계균열길이 규정에 대한 이론적 고찰을 실시하였다. 탄성파괴역학을 기본으로 하는 응력확대계수의 산정, 피로진전속도 그리고 피로진전수명에 대한 이론적 고찰도 실시하였다. 이를 이용하여 맞대기 용접이음부에 발생하는 각종용접 결함 중 표면 균열과 내부균열을 부재의 초기균열로 가정하고, 응력변동해석에서 얻어진 등가응력범위를 사용하여 피로균열진전 수명을 해석하였다. 응력변동해석은 일반화된 교통량 산정식 및 값을 근거로 하여 실측차량하중으로 응력 값을 구하였다.

또 레인 플로우법을 적용하여 응력범위 빈도분포와 등가응력 범위를 구하였다. 최종적으로 이를 강도로교에 적용하여 피로수명을 평가하였다.

제 2 장 도로교 피로설계

2.1 피로설계 기본

강도로교 부재에 대한 피로해석의 확률적인 방법은 최근에 고려되어지고 있는데, 현장에서 측정된 응력데이터, 시뮬레이션에 얻은 응력범위 빈도분포 계산 구조 상세에 대한 S-N(피로수명)관계에 따라 피로손상의 선형누적 손상법칙의 사용과 피로수명에 대응하는 부재의 신뢰성을 기술하는 확률함수를 들 수 있다.

피로설계는 인장응력과 교번응력이 발생하는 부위에 대해 피로검토를 실시하며 압축응력이 발생하는 부위는 피로검토를 실시하지 않는다. 주형, 상자형과 같이 동종의 용접부가 연속하는 경우 또는 동일한 상세가 여러 곳 존재하는 경우 응력범위가 최대로 발생한 위치에 대해서만 피로검토를 실시한다. 피로손상이 발생하는 경우, 교량전체의 안정성 및 가능성에 영향을 미칠 우려가 있는 부재 또는 이음부를 중심으로 피로검토를 실시한다.

2.2 피로설계 순서

피로설계의 순서는 그림 2.1과 같이 시작, 피로조사 위치 선정, 응력범주 결정, 응력반복횟수 추정, 허용피로응력 범위결정, 재하하중 선정, 구조계산, 설계피로응력 적부판정 과정을 따른다.

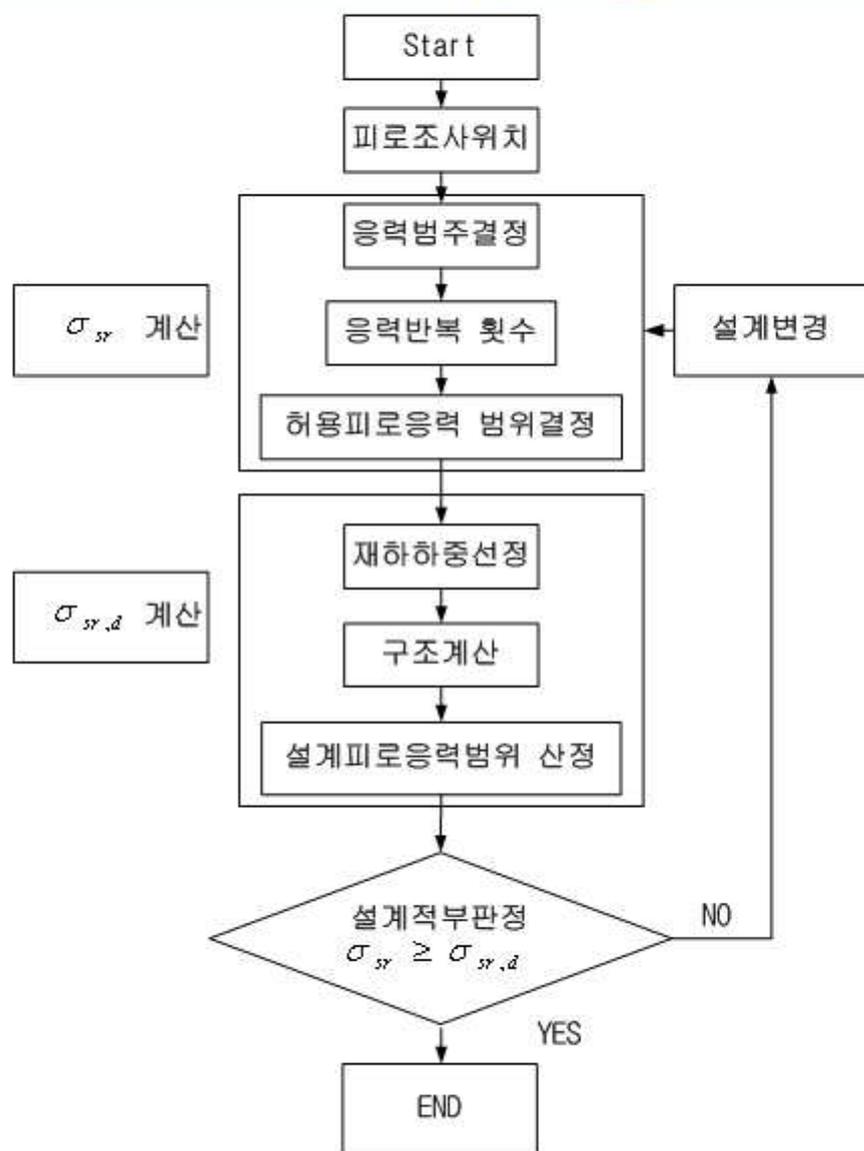


그림 2.1 피로설계 순서

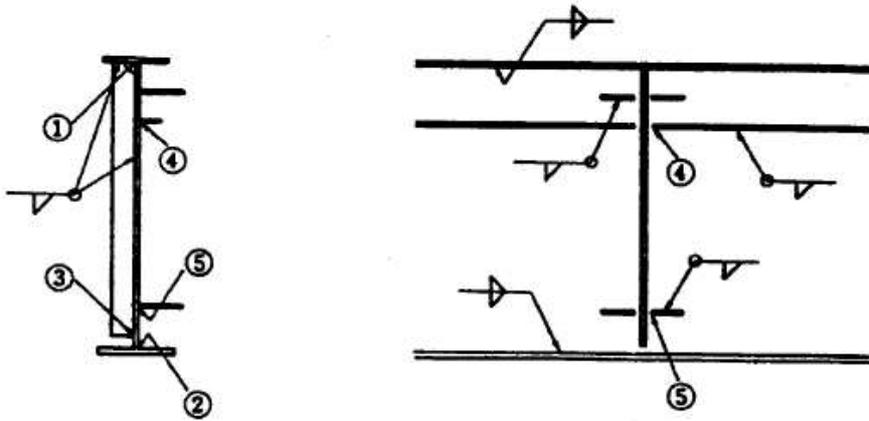
2.3 피로위치 조사

2.3.1 판형교(I형)

하중 주 전달부재(주형의 맞대기 용접부, 수직보강재 용접부)에 대해서는 피로설계규정을 적용하기가 쉬우므로 대부분 피로설계를 하고 있다.

하지만 2차 부재나 기타 이음부에 대해서는 피로설계가 생소하여 증가하고 있는 피로 문제의 한 원인이 되고 있다. 따라서 주 부재 뿐 아니라 위험단면으로 판단되는 곳의 2차 부재나 이음부 등에 대해서도 적절한 피로설계를 실시해야 한다.

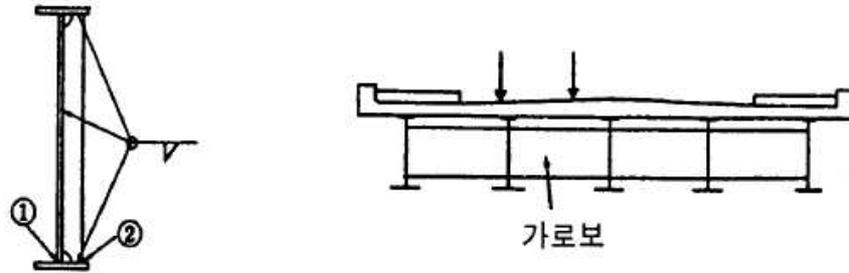
1) 주형



- ①,② Flange-to-Web 용접 이음부
- ③ 수직보강재(Transverse Stiffener) 용접끝부분
- ④ 수평보강재 용접끝부분
- ⑤ 거셋판 용접끝부분

그림 2.2 주형의 피로조사 위치 예

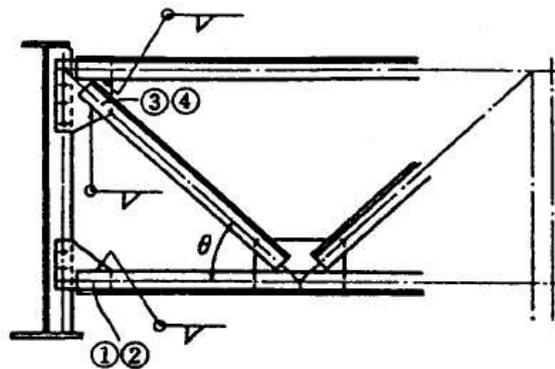
2) 가로보



- ① Flange-to-Web 용접 이음부
- ② 수직보강재 용접끝부분

그림 2.3 가로보의 피로조사 위치 예

3) 브레이싱



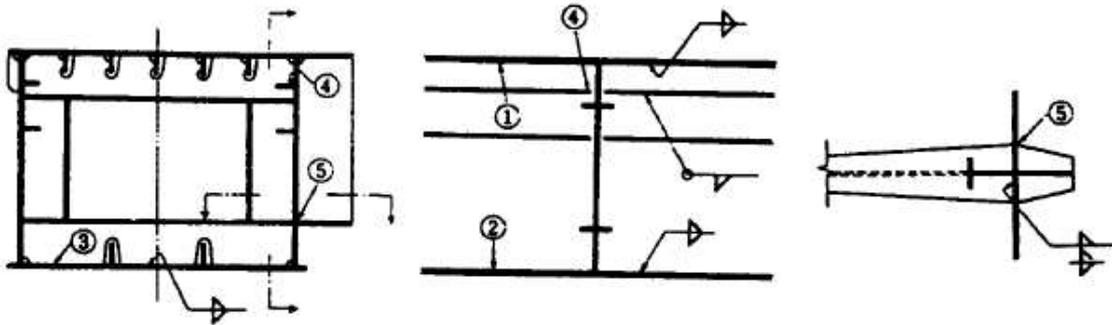
- ① 현재(Chord) 모재단면
- ② 현재 용접단면
- ③ 사재(Diagonal) 모재단면
- ④ 사재 용접단면

그림 2.4 브레이싱의 피로조사 위치 예

그 외에 주형의 맞대기이음부와 주형의 덮개판 끝부분(Cover-plate Ends), 전단 연결재(Stud)가 용접되어 있는 주형의 상부플랜지, 주형의 지점부보강재 (Bearing Stiffener), 용접끝부분, 연결판(Splice plate) : 복부 연결판, 상하부 플랜지 연결판, 전단 연결재(Stud)가 있다.

2.3.2 상자형교

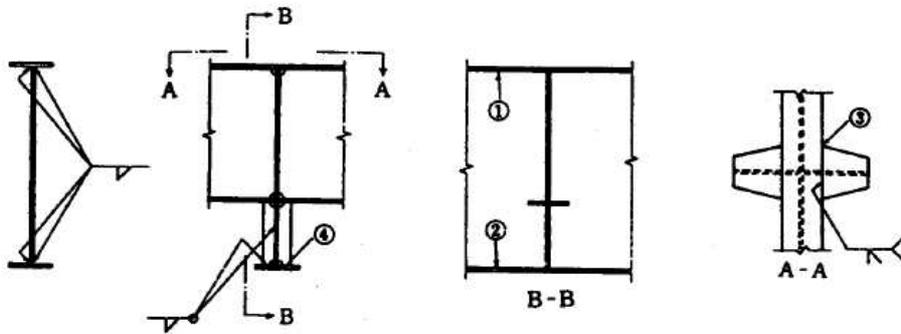
1) 주형



- ①,② Flange-to-Web 용접이음부
- ③ 다이어프램과 인장축 플랜지의 용접이음부
- ④ 수평보강재 용접끝부분
- ⑤ 가로보 연결 거셋판 용접끝부분

그림 2.5 주형의 피로조사 위치 예

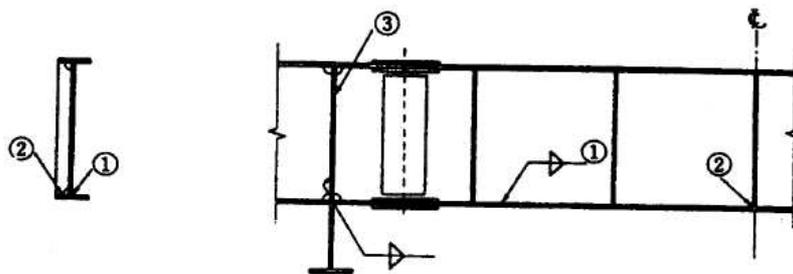
2) 가로보



- ①,② Flange-to-Web 용접이음부
- ③ 중형 연결용 거셋판 용접끝부분
- ④ 수직보강재 용접끝부분

그림 2.6 가로보의 피로조사 위치 예

3) 중형



- ①,② Flange-to-Web 용접이음부
- ③ 수직보강재 용접끝부분
- ④ 가로보 연결 용접부의 목단면

그림 2.7 중형의 피로조사 위치 예

이 외로 주형의 맞대기 이음부, 전단연결재(Stud)가 용접되어 있는 주형의 상부플랜지, 주형의 지점부보강재(Bearing Stiffener)용접 끝부분, 연결판(Slice plate) : 복부판 연결판, 상하부 플랜지 연결판, 전단 연결재(Stud)가 있다.

2.4 허용피로응력범위 f_{sr} 결정

2.4.1 구조상세에 따른 피로강도 등급결정

강교량의 피로검토를 수행할 때, 설계자가 가장 주의해야 할 일은 대상 구조상세의 적절한 응력범위(피로강도등급)를 결정하는 것이다. 이 일은 보기에 따라 사소한 일이 될 수도 있으나, 적절한 응력범주의 선택이 피로설계의 기본이 되기 때문에 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

피로강도는 A, B, B', C, D, E, E', F(전단응력) 8가지로 분류되며 응력범주의 구분기준은 부재형태(단순부재, 조립부재), 이음종류(용접, 볼트), 용접이음종류(부분용입 홈용접, 완전용입 홈용접, 연속 필렛용접, 단순 필렛용접), 응력 작용방향(용접방향, 용접 수직방향), 응력 종류(인장응력 또는 교번응력, 전단응력), 피로균열 발생 위치(모재, 부착물, 용접금속), 상세기하 형상(용접 길이, 판 두께, 변화부 반경, 변화부 경사, 덮개판의 폭, 받침봉 유무) 등으로 구분할 수 있다.

1) 단순부재

표 2.1 단순부재 상세개요

| 상세 개요 | 적용 예 | 응력범주 |
|---|--------|------|
| 이음부로부터 멀리 떨어진 곳에 위치한 압연부재 또는 매끈한 표면을 갖는 평판 부재 | 그림 2.7 | A |

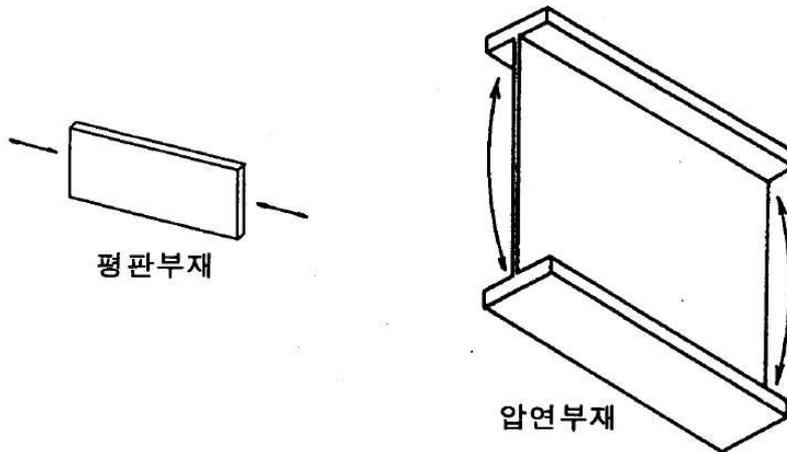


그림 2.8 평판부재 또는 압연부재 - 범주 A

2) 조립부재 - 용접결합과 응력 집중부

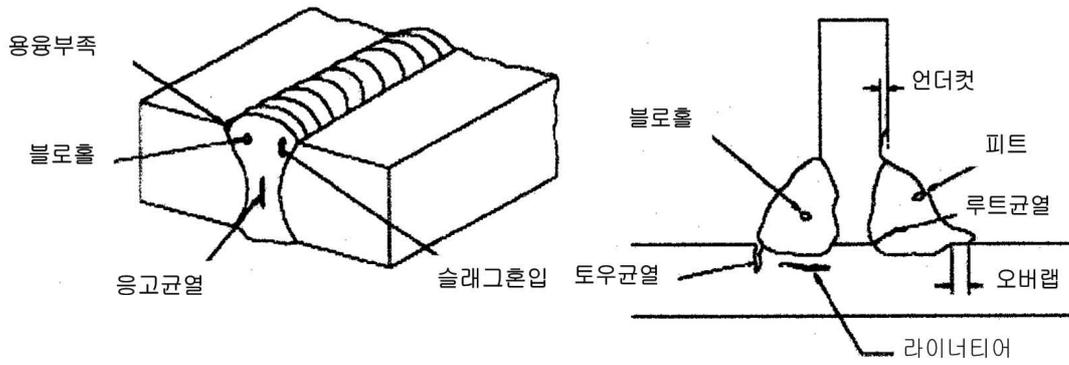


그림 2.9 용접결합

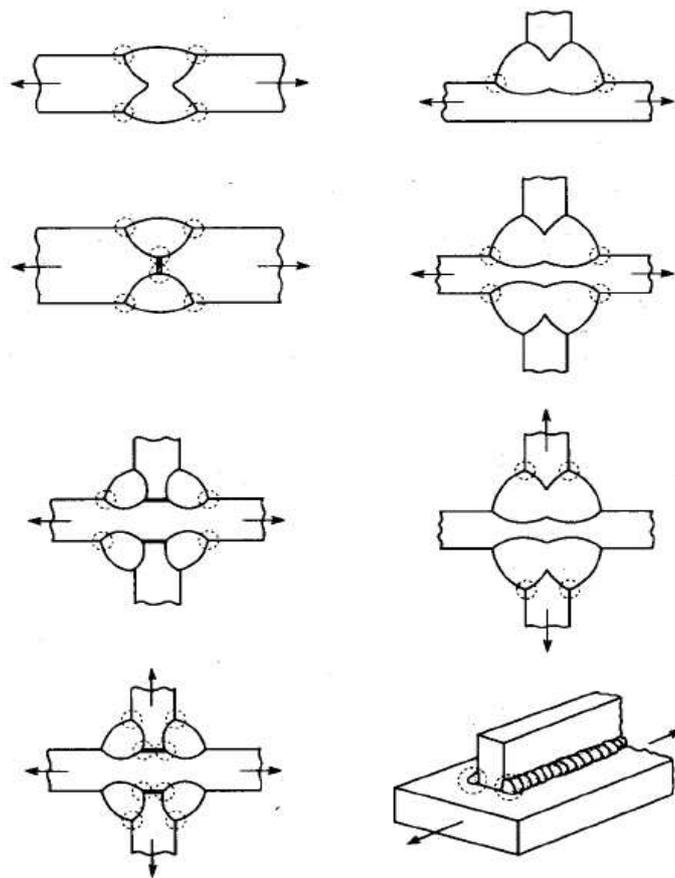


그림 2.10 용접형상의 기하학적인 불연속

표 2.2 연속용접부의 모재와 용접금속 상세개요

| 연속용접부의 모재와 용접금속 | | | 응력범주 |
|-----------------|---------------------------------|---------|------|
| 응력작용 방향 | 용접이음 종류 | 상세기하 형상 | |
| 종방향 | 연속 완전용입 흡용접 또는 연속 필릿용접 | 받침봉 제거 | B |
| | | 받침봉 미제거 | B' |
| | 연속 부분용입 맞대기 용접부 | | B' |

표 2.3 맞대기 흡용접 이음부

| 맞대기 이음부 | | | | 응력범주 |
|-------------|------------------|-------|---------------------------------|------|
| 용접종류 | 용접부 연마 (응력방향) | 비파괴시험 | 변화부경사 또는 변화부 반경 | |
| 완전용입 흡용접 | 연마 | 실시 | - | B |
| 완전용입 흡용접 | 연마 | 실시 | 폭방향 변화부반경 60cm 이상 | B |
| 완전용입 흡용접 | 연마 | 실시 | 변화부경사(폭 또는 두께방향) 1:2.5 이하 | B |
| 완전용입 흡용접 | 미연마 | 실시 | 변화부 경사와 관계없음 | B |

표 2.4 수직보강재의 용접 끝

| 수직 보강재의 용접 끝 | 응력범주 |
|-----------------------------|------|
| 주형의 복부 판이나 플랜지의 수직 보강재 용접 끝 | C |

표 2.5 주형플랜지에 용접된 덮개판 끝

| 주형플랜지에 용접된 덮개판 끝 | | | 응력범주 |
|------------------|-------------|------------------|------|
| 덮개판의 폭 | 끝부분 돌림용접 여부 | 플랜지 두께 t_f | |
| 플랜지 폭보다 좁은 경우 | 관계없음 | $t_f \leq 2.0cm$ | E |
| | | $t_f > 2.0cm$ | E' |
| 플랜지 폭보다 넓은 경우 | 용접 | $t_f \leq 2.0cm$ | E |
| | | $t_f > 2.0cm$ | E' |
| | 미용접 | 관계없음 | E' |

2.4.2 응력반복 횟수 및 허용피로 응력범위

최대 응력범위의 반복횟수는 교통량과 하중조사 및 특별한 고려사항이 없으면 표 2.2에 따른다. 허용응력 피로범위는 활하중이나 풍하중을 포함하는 하중조합에 대해 적용한다. 사하중과 풍하중의 하중조합에 대한 응력반복횟수는 특수한 경우를 제외하고는 10만회로 한다.

표 2.6 응력 반복 횟수

| 주 하중 전달 부재 (종방향 부재) | | |
|----------------------|--------------|--------------|
| 도로의 종류 | 트럭하중 (DB 하중) | 차선하중 (DL 하중) |
| 고속도로, 국도 및 주 간선도로 | 200만회 | 50만회 |
| 기타도로 | 10만회 | 10만회 |

| 윤하중을 받는 횡 방향 부재와 상세 | |
|----------------------|--------------|
| 도로의 종류 | 트럭하중 (DB 하중) |
| 고속도로, 국도 및 주 간선도로 | 200만회 이상 |
| 기타도로 | 50만회 |

주) 종방향 부재는 트럭하중에 대해서도 검토해야 한다.

여기서 실제교량의 설계수명시간(50년~70년)동안 보통 피로하중은 2000만회에서 1억 회 정도이다. 실제차량에 의한 응력은 DB 하중에 의한 설계응력보다 매우 낮다. 그러나 설계의 간편성을 고려하여 피로하중 반복횟수만을 낮추어서 적용한다.

표 2.7 다재하 경로 허용피로응력범위

| 다재하 경로구조 | | | | |
|----------------|--------|------|-------|----------|
| 상세범주 (응력범주) | 허용응력범위 | | | |
| | 10만회 | 50만회 | 200만회 | 200만회 이상 |
| A | 44.2 | 26.0 | 16.8 | 16.8 |
| B | 34.4 | 20.3 | 12.6 | 11.2 |
| B' | 27.4 | 16.1 | 10.1 | 8.4 |
| C | 25.0 | 14.7 | 9.1 | 7.0 |
| | | | | 8.4 |
| D | 19.6 | 11.2 | 7.0 | 4.9 |
| E | 15.4 | 9.1 | 5.6 | 3.1 |
| E' | 11.2 | 6.4 | 4.0 | 1.8 |
| F | 10.5 | 8.4 | 6.3 | 5.6 |

표 2.8 단재하 경로 허용피로응력범위

| 단재하 경로구조 | | | | |
|----------------|--------|------|-------|----------|
| 상세범주 (응력범주) | 허용응력범위 | | | |
| | 10만회 | 50만회 | 200만회 | 200만회 이상 |
| A | 35.1 | 20.3 | 16.8 | 16.8 |
| B | 27.4 | 16.1 | 11.2 | 11.2 |
| B' | 21.8 | 12.6 | 7.7 | 7.7 |
| C | 19.6 | 11.2 | 7.7 | 7.7 |
| | | | | 7.7 |
| D | 15.4 | 9.1 | 5.6 | 3.5 |
| E | 11.9 | 7.0 | 4.2 | 1.6 |
| E' | 8.4 | 4.9 | 2.8 | 0.9 |
| F | 8.4 | 6.3 | 4.9 | 4.2 |

2.5 실제 피로응력 범위 결정 $f_{sr,d}$

1) 재하하중선정

재하 하중은 도시 공통편 제 2장 하중편을 따른다. 하중은 사하중과 활하중을 고려하고, 활하중으로는 DB 하중과 DL 하중을 사용한다. 활하중은 충격을 고려해야 하며, 재하위치는 정적 단면 설계시와 동일하다.

피로조사위치가 횡 방향 부재일 경우 DB 하중을, 종방향 부재일 경우 DB와 DL 하중을 각각 재하 하여 불리한 하중을 따른다.

표 2.9 피로조사부재에 따른 재하하중

| 피로조사부재 | 재하하중 | 비고 |
|------------------------|-------------|------|
| 횡방향 부재 (가로보, 바닥보 등) | 사하중 | |
| | 사하중 + DB 하중 | 충격고려 |
| 종방향 부재 (주형, 세로보 등) | 사하중 | |
| | 사하중 + DB 하중 | 충격고려 |
| | 사하중 + DL 하중 | 충격고려 |

2) 구조계산 (단면력 산정)

피로설계 단면력 산정방법은 정적 단면 설계 시와 동일하게 수행한다. 설계피로응력 범위는 단면 설계 시 사용한 응력과 동일한 공칭응력을 사용한다. 용접부 형상에 대한 국부적 응력집중현상은 허용 피로응력 범위에 포함되어 있으므로 고려하지 않는다.

$$\begin{aligned}
 f_{\max} &= f_D + f_{Lmax} \\
 f_{\min} &= f_D + f_{Lmin} \\
 f_{sr,d} &= f_{\max} - f_{\min}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

3) 설계 적부 판정

$$f_{sr} \geq f_{sr,d} \tag{2.2}$$

여기서 f_{sr} : 허용 피로응력범위.

$f_{sr,d}$: 설계 피로응력범위.

2.6 설계 변경

설계 피로응력 범위가 허용 피로응력 범위를 초과하는 경우 다음과 같은 2가지 방법으로 설계변경을 실시한다. 첫 번째 방법으로는 설계 피로응력 범위를 낮추는 방법이 있다. 이는 단면을 확대하거나 대상 상세를 응력범위가 작게 발생하는 위치로 변경하는 것이다.

두 번째 방법으로는 피로허용 응력범위를 증가시키는 방법이다. 이는 용접이음을 볼트 이음으로 변경, 동일한 상세라도 용접종류, 응력작용방향, 용접후처리 등을 변경하여 피로강도 등급을 상향시킨다.

제 3 장 피로균열 진전 해석

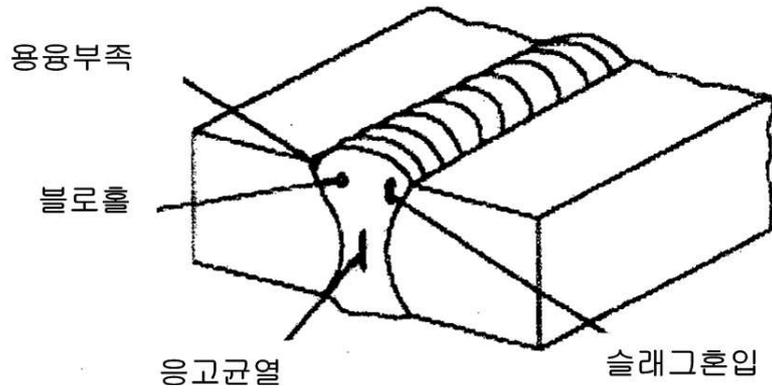
3.1 용접이음부의 피로균열의 발생 및 성장

3.1.1 용접이음부의 피로균열 발생

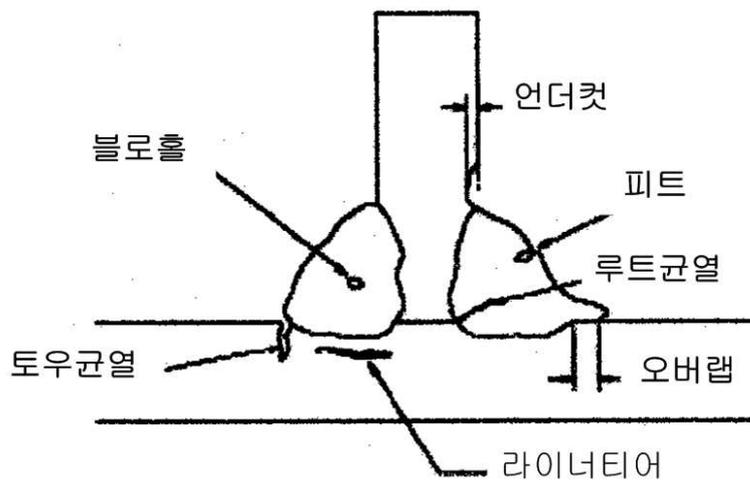
강구조물에서 용접이음부의 성능을 지배하는 역학적인 요인은 복잡하게 중첩되고, 때로는 구조물에 있어서 파괴를 초래하기도 한다. 최근에는 제강기술 및 용접시공 기술의 발전으로 강재의 파괴인성은 향상되고 있어서 예기치 않은 취성파괴의 위험성은 감소되고 있다. 그러나 강구조 부재의 용접이음부에 블로홀, 용입 불량, 슬래그 혼입, 용접균열 등과 같은 결함을 완전히 없애는 것은 불가능한 일이다.

강구조물에서 용접이음부의 파괴강도는 몇몇의 원인으로 인해 반드시 부재와 동등한 성능을 나타내는 것은 아니다. 이것은 주로 용접이음부가 받는 열 이력에 기인하며, 역학적 요인과 재질적 요인으로 대별된다. 용접이음부가 성능을 지배하는 역학적 요인으로는 용접결함, 이음의 형상적 불연속, 용접잔류응력 및 용접변형 등이 있다. 용접균열, 용입 불량, 슬래그혼입, 블로홀(Blowhole) 등의 용접결함, 특히 용접균열에 의한 평면상 결함은 종종 용접이음의 파괴기점이 되기도 한다. 한편 재질적 요인으로는 용접 열 영향에 의한 조직변화, 열 변형이력의 영향 및 변형을 일으키는 열가공의 포화 등이 있다. 일반적으로 용접이음부에 자주 발생하는 결함 가공의 포화 등이 있다.

일반적으로 용접이음부에 자주 발생하는 결함은 언더컷(Undercut), 슬래그혼입, 블로홀등과 같은 타원형 균열, 그리고 응고균열, 라미너 티어(Laminar tear) 등과 같은 관통균열로 대별된다.



a) 맞대기 용접이음부의 균열



b) 필렛용접 이음부의 균열

그림 3.1 용접이음부의 결함 종류

3.1.2 피로균열의 성장

반복적으로 작용하는 일정하중 하에서의 피로균열 성장은 하중반복 횟수에 의한 피로균열 성장속도 da/dN 와 응력확대 계수범위 ΔK 의 관계로 나타내며, 재료 및 하중조건

에 따라 다른 피로균열 성장곡선을 나타낸다. 보통, 재료의 피로균열 성장거동은 그림 3.2에 나타낸바와 같이 크게 3영역으로 구분되어 나타난다.

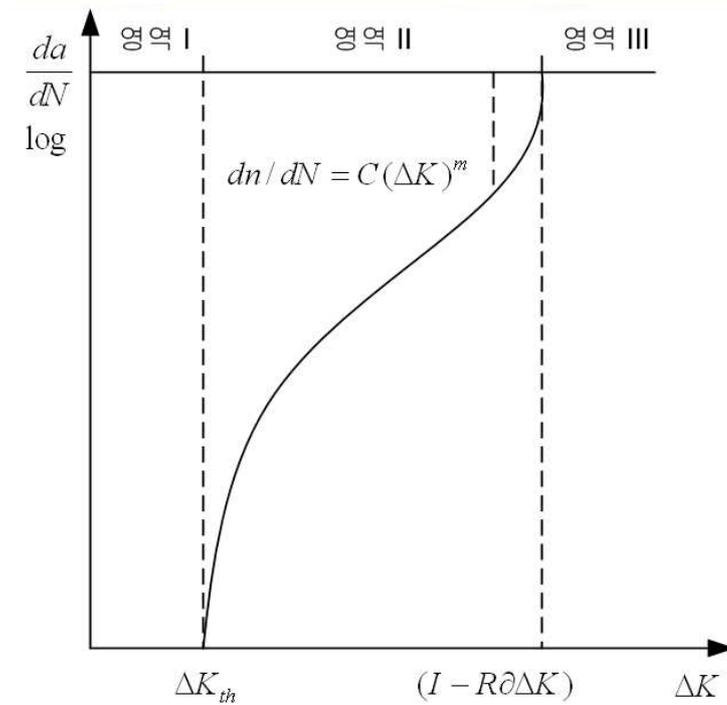


그림 3.2 피로균열의 성장곡선

영역 I은 피로균열 성장의 이전단계로서 반복하중에 대한 피로균열 성장속도는 매우 느리다. 이 영역에서는 구조물에 있어서 대부분의 수명을 차지한다.

영역 II는 ΔK_h 이상의 응력확대 계수범위를 받는 경우에 발생하는 피로균열 거동을 나타내는 것으로 식 (3.1)에 따른 성장거동을 나타낸다. 이 식을 Paris-Eedogan식이라고 한다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{3.1}$$

식 (3.1)에서 m은 금속재료의 경우 보통 2~4의 값을 갖는다. 이 영역에서는 피로균

열성장속도의 예측 및 계산이 용이하며, 피로균열성장에 대한 연구의 상당량이 이 구간에서 행해지고 있다.

영역 III은 최종적인 파괴에 도달할 때까지 급격히 피로균열 성장속도가 증가하는 구간으로, 불안전 균열성장이 일어난다. 실제 구조물에서는 피로균열 성장단계가 이 영역에 도달하게 되면 구조물의 파괴는 순식간에 일어나므로 이 단계 전에 보수나 보강을 실시해야 한다.

3.2 초기 균열길이와 한계 균열길이

피로균열의 성장은 균열길이의 증가와 지수적인 관련이 있기 때문에 대부분의 피로수명은 균열이 작을 때 늘어난다. 따라서 초기결함의 특성, 특히 크기와 모양의 정확한 예측은 용접부재의 피로수명을 정확하게 평가하기 위해 필수적이다.

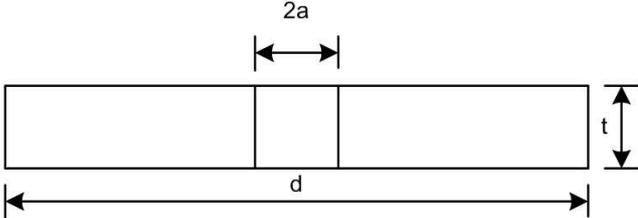
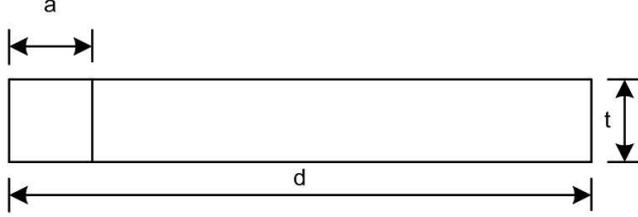
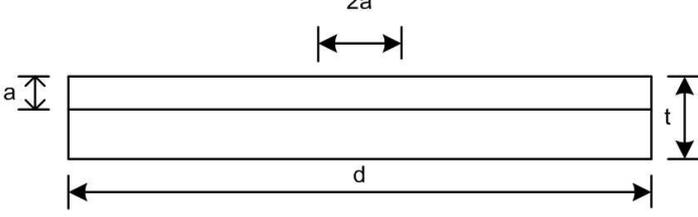
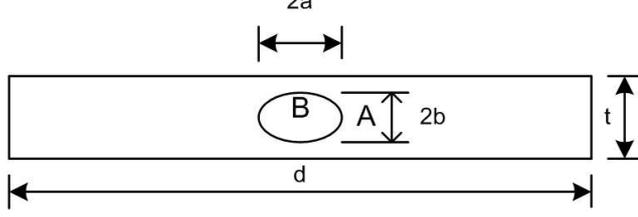
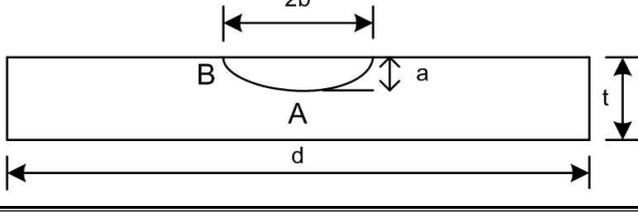
초기균열길이 a_i 는 육안이나 비파괴검사에서 검출된 형상을 기초로 하여 원, 반원, 타원, 반타원, 등의 계산 가능한 균열모델로 치환하여 결정한다. 표면결함에 대해서는 이 결함을 직사각형 주위에 내접하는 반타원형 표면균열로 보며, 내부결함에 대해서는 결함을 둘러싼 직사각형에 내접하는 타원형 균열로 본다.

한계균열길이 a_c 는 반복하중에 의해 균열이 진전하여 파괴모드를 취성파괴나 연성파괴 또는 부재의 전면 항복, 균열의 판 두께 관통 등으로 규정할 때의 균열 치수로 규정한다. 예를 들면, 용접이음부에 내부결함이나 표면결함으로부터 발생하는 피로균열은 판 두께의 관통까지 소요되는 하중반복회수가 부재 전수명의 대부분을 차지한다. 관통수에는 균열의 진전속도가 빨라지는 것으로부터 판 두께 관통시의 균열길이를 한계균열 길이로 이용하는 경우가 많다.

따라서 용접이음부에 있어서의 초기균열은 내부균열과 외부균열로 대별되고, 균열의 형상에 따라 표 3.1과 같이 균열길이 a 및 폭 b 로 나타낸다. 균열의 형상은 용접이음단부의 돌림 용접 미실시를 가정한 측면 관통균열, 용접누락을 가정한 내부 관통균열, 용입 불량이나 블로홀을 가정한 타원형 내부균열, 언더컷을 가정한 반타원형 표면균열,

맞대기 용접이음부의 용융부족이나 필렛용접 이음부의 토우를 따라 발생한 연속언더컷인 표면 관통균열로 분류하여 모델화 한다.

표 3.1 균열의 모델화

| 균열의 분류 | 균열모델 |
|-----------|--|
| 내부 관통균열 |  |
| 측면 관통균열 |  |
| 표면 관통균열 |  |
| 타원형 내부균열 |  |
| 반타원형 표면균열 |  |

3.3 응력변동해석

3.3.1 레인플로법에 의한 응력범위빈도해석

변동하중이력을 받는 부재의 수명을 예측하기 위하여 하중이력을 유용한 일정진폭시 험데이터와 비교할 수 있는 단순화된 하중이력을 줄이는 것이 필요하다. 하중이력을 몇 개의 일정진폭과정으로 줄이는 것을 사이클 집계(Cycle Counting)라 한다. 사이클 집계는 변형률 이력에 적용되며 일반적으로 이러한 집계는 응력, 토크, 모멘트, 하중 등에 적용될 수 있다. 하중이력을 단순화시키기 위한 많은 사이클 집계 과정이 있는데 그 중에서 가장 일반적인 것으로 Level Crossing Counting, Peak Counting, Simple Range Counting, Rainflow Counting 등이 있다.

여기서는 본 연구에서 사용한 Rainflow Counting 방법을 언급하기로 하겠다.

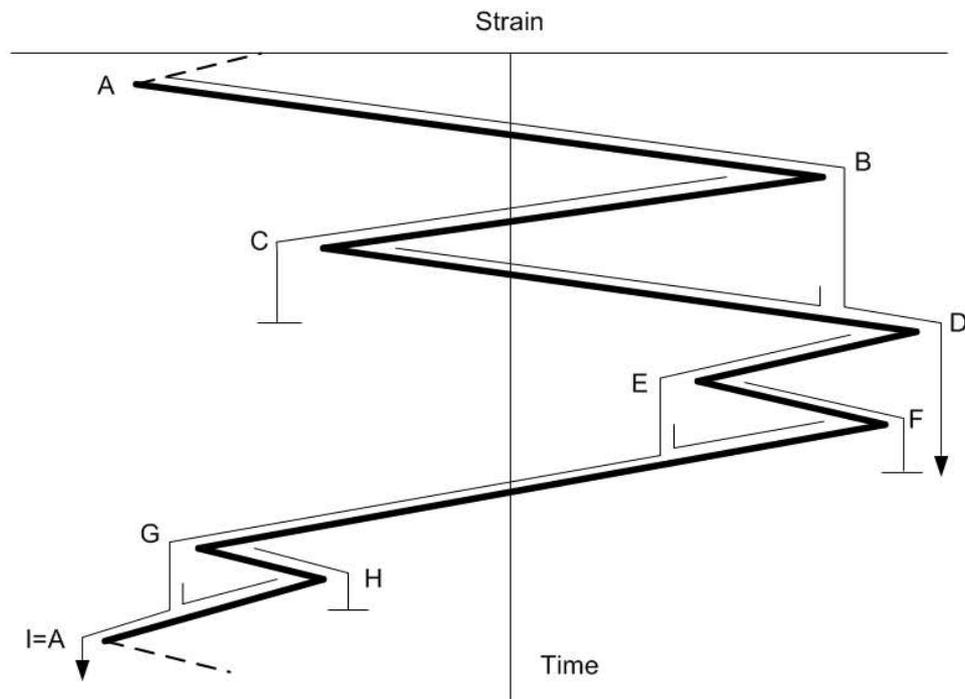


그림 3.3 레인플로 집계

RainFlow Counting 산출과정의 첫 단계는 아래쪽으로 시간이 증가하도록 시간 축을 수직으로 향하게 하며 변형률-시간 이력을 그리는 것이다. 변형률이란 여러 개의 탑의 지붕모양(Pagodarooft)을 형성한다고 상상할 수 있다. 사이클은 빗물이 지붕을 타고 떨어지는 모습으로 정의된다. 폐쇄 히스테리시스 루프를 알아보기 위해서 떨어지는 빗물에 대해 몇 가지 법칙들이 이용된다. 빗물이 떨어지는 방법을 구체화 하는 법칙은 다음과 같다.

1. 반 사이클을 제외하기 위해서 변형률-시간 이력은 제일 큰 변형률 값으로 시작하고 끝나도록 그려진다.
2. 빗물의 흐름은 이력에서 각 변형률의 반전에서 시작되고 다음과 같지 않은 경우에는 계속 흐른다.
 - a. 빗물은 국부적 최대점(Peak)에서 시작해서 지나온 곳보다 더 큰 국부적 최대점인 반대쪽으로 흐른다.
 - b. 빗물은 국부적 최소점(valley)에서 시작해서 그것이 지나온 곳보다(크기에서) 더 큰 국부적 최소점인 반대쪽으로 흐른다.
 - c. 흘러내린 빗물은 이전의 빗물흐름과 만난다.

그림 3.3은 변형률이력의 한 예와 빗물흐름의 결과를 보여준다. 다음은 각 빗물흐름을 결정하는 방법에 대하여 자세하게 설명한다.

그림 3.3에서 보여주는 것처럼 주어진 변형률-시간 이력은 가장 큰 변형률 값(Point A)에서 시작되고 끝난다. 레인플로는 변형률 이력에서 각 반전 점에서 시작된다.

- A. 빗물은 점 A로부터 흘러 점 B와 점 D를 지나고 빗물이 멈출 수 있는 조건이 없으므로 이력의 끝점까지 계속된다.
- B. 빗물은 점 B로부터 점 C를 지나고 반대쪽(점 D)에 멈춘다. 점 B와 점 D모두 국부

- 적 최대점이고 점 D의 크기는 점 B보다 더 크다.(앞의 2a 법칙.)
- C. 빗물은 점 C로부터 흐르고 점 A로부터 흐른 빗물과 만나자마자 멈춘다.(앞의 2c 법칙)
- D. 빗물은 점 D로부터 점 E와 점 G를 지나고 빗물이 멈출 수 있는 조건이 없으므로 이력의 끝까지 계속된다.
- E. 빗물은 점 E로부터 점 F를 지나서 반대쪽 점 G에서 멈춘다. 왜냐하면 점 E와 점 G 모두 국부적 최소점이고 점 G의 크기는 점 E보다 더 크기 때문이다.(앞의 2b 법칙)
- G. 빗물은 점 G로부터 점 H를 지나서 반대쪽 (점A)에서 멈춘다. 왜냐하면 점 G와 점 A는 모두 국부적 최소점이고 점 A의 크기는 점 G보다 더 크기 때문이다.(앞의 2b 법칙)
- H. 빗물은 점 H로부터 흐르고 점 D로부터 흐른 빗물과 만나자 마자 멈춘다.(2c 법칙)

위 과정이 완성되면 이제 완성된 사이클의 형태로 결합할 수 있다. 이 예에서 A-D와 D-A는 한 개의 완전한 사이클로 결합된다. B-C는 C-B(C-D 범위 중 일부)와 결합하여 부가적인 사이클을 형성한다. 마찬가지로 E-F와 G-H에서 각각 사이클이 형성된다.

레인플로집계는 비교적 단순한 하중이력에 대하여 손으로 계산하여 완성할 수 있지만 더 많은 복잡한 하중이력에 대해서는 컴퓨터를 사용해서 수행하는 것이 효과적이다.

최근에는 레인플로 사이클 집계를 위한 많은 알고리즘이 개발되었다. 컴퓨터 프로그램에 쉽게 적용할 수 있는 레인플로집계 알고리즘이 ASTM Standard의 연감에서 제공되고 있다. 다음에 나오는 알고리즘은 Dowling에 의해 개발된 것이다. 이 알고리즘은 하중이력에서 폐쇄 히스테리시스 루프에 대한 하중 사이클을 결정한다. 첫 단계로 응력이력을 최대점이나 최소점 으로부터 시작하도록 정렬시킨다. X는 고려하고 있는 폭이고 Y는 X에 인접한 바로 앞의 폭이다.

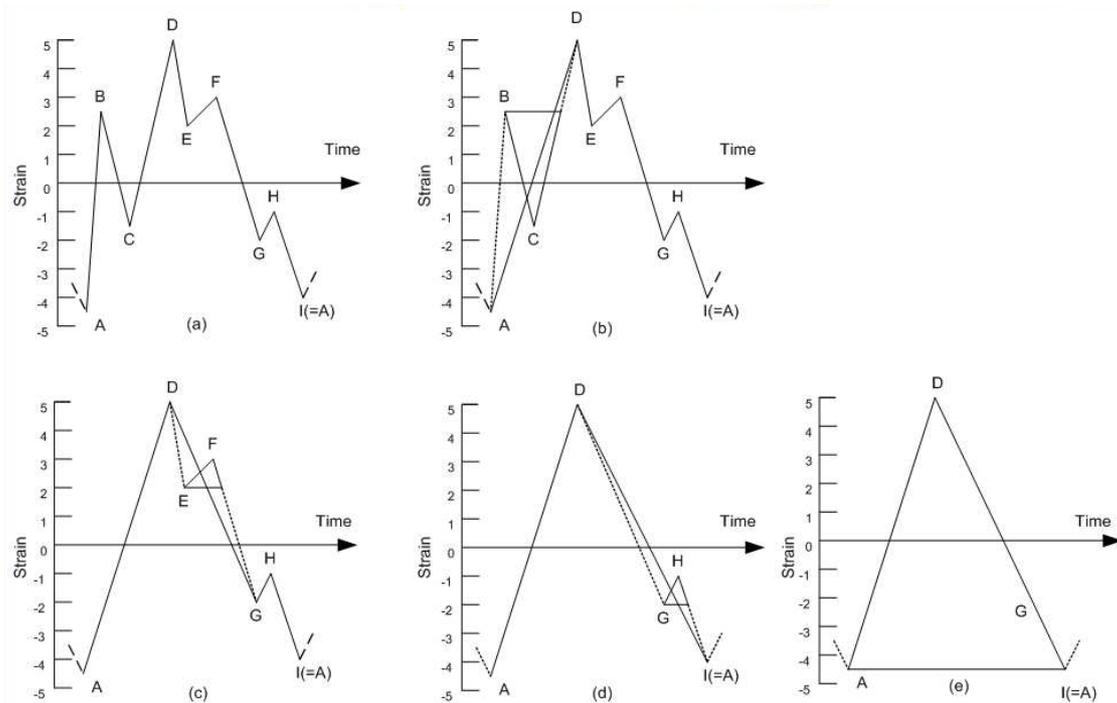


그림 3.4 레인플로 집계(ASTM 기준)

1. 최대점이나 최저점에서 이력이 시작하도록 배열한다.
2. 다음의 최대 또는 최저점을 읽는다. 데이터가 더 없으면 멈춘다.
3. 세 점보다 적으면 Step 1로 간다. 버리지 않은 가장 가까운 최대와 최저점을 이용해서 X와 Y폭을 형성시킨다.
4. X와 Y폭의 절대 값을 비교한다.
 - a. $X < Y$ 이면 Step 1로 간다.
 - b. $X \geq Y$ 이면 Step 4로 간다.
5. Y폭을 하나의 사이클로 보고 폭을 계산한다. 이 때 Y의 최대, 최저점을 버리고 Step 2로 간다.

이 같은 알고리즘은 그림 3.4에 주어진 변형률 이력에서 페쇄히스테리시스루프를 정

하는데 사용된다.

1. $Y = |A - B|; X = |B - C|; X < Y$.
2. $Y = |B - C|; X = |C - D|; X < Y$. $|B - C|$ 를 한 사이클로 계산하고 B, C점은 버린다. (그림 3.4(b) 참조). 한 사이클은 B-C 진폭과 C-D 진폭의 일부분을 한 쌍으로 하여 구성된다.
3. $Y = |A - D|; X = |D - E|; X < Y$.
4. $Y = |D - E|; X = |E - F|; X < Y$.
5. $Y = |E - F|; X = |F - G|; X > Y$. $|E - F|$ 를 한 사이클로 계산하고 E, F점은 버린다. (그림 3.4(c) 참조)
6. $Y = |A - D|; X = |D - G|; X < Y$.
7. $Y = |D - G|; X = |G - H|; X < Y$.
8. $Y = |G - H|; X = |H - A|; X > Y$. $|G - H|$ 를 한 사이클로 계산하고 G, H점은 버린다. (그림 3.4(d) 참조)
9. $Y = |A - D|; X = |D - A|; X = Y$. $|A - D|$ 를 한 사이클로 계산하고 A, D점은 버린다. (그림 3.4(e) 참조)
10. 집계 끝

이 예에서 폐쇄 히스테리시스 루프는 변형률 이력에서 A-D, B-C, E-F, G-H로 구성된다. 이 결과는 그림에서 보여준 방법을 이용해서 얻은 결과와 동일하다.

3.3.2 피로손상의 누적

Miner가 제창한 선형 피로손상 법칙에 따르면 피로손상은 선형으로 누적된다는 가정 하에서 어떤 하중반복횟수 n_i 에 의해 야기된 손상은 같은 응력범위에서 부재를 파괴시키는데 필요한 전체 하중반복횟수 N_i 에 대한 n_i 의 비로 표현할 수 있다. 즉 그림 3.5에서와 같이 응력수준 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 피로수명을 N_1, N_2, N_3 라 하고 σ_1 인 응력수준이 n_1 , σ_2 인 응력수준이 n_2 및 σ_3 인 응력수준이 n_3 회 반복되어 피로파괴가 일어났다면 이 경우의 조건식은

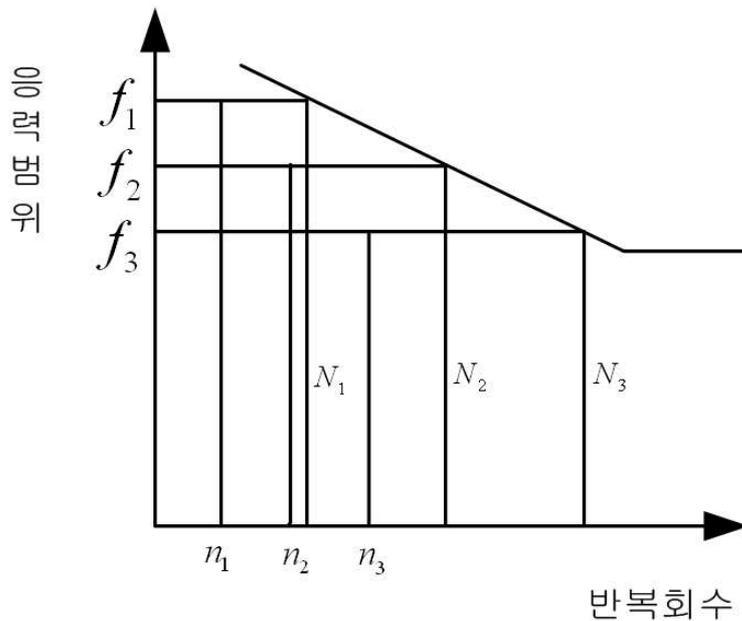


그림 3.5 Miner의 선형피로손상 법칙

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1 \quad (3.2)$$

윗 식을 일반화 하면

$$\sum_1^n \left(\frac{n_i}{N_i}\right) = 1 \quad (3.3)$$

식 (3.3)은 반복 횟수비 $\frac{n_i}{N_i}$ 의 누적이 1로 될 때 파괴되는 것으로, 강재의 피로수명은 반복 작용 수에 대해 선형적으로 상실된다는 것이다.

3.3.3 등가응력범위

등가응력범위 Δf_e 는 그림 3.4에서 보는 바와 같이 같은 반복수에 대해서 변동하중에 의한 누적 피로손상과 같은 양의 누적 피로손상을 일으키는 일정진폭 하중에서의 응력범위로 정의되며, Barsom과 Yamada에 의해 이론적으로 정립되었다. 이러한 등가응력범위의 개념은 변동하중을 받는 구조물의 피로파괴에 대한 확률을 계산하는데 유용하게 이용될 수 있다. 피로시험 데이터에 의한 S-N곡선을 직선으로 가정하고, Miner의 피로손상법칙을 이용하면 그림 3.6과 같은 응력범위분포를 등가응력범위로 환산 할 수 있다.

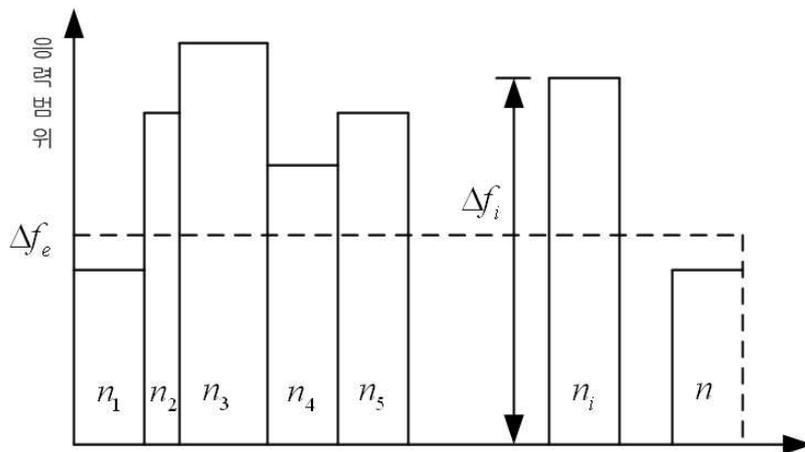


그림 3.6 등가응력범위의 분포

실 동하중을 받고 있는 강교량 부재의 피로특성인 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 와 피로수명 N_i 의 관계는 다음과 같이 나타낸다.

$$\log N_i = \log C - m \log \Delta f_i \quad (3.4)$$

$$N_i (\Delta f_i)^m = C \quad (3.5)$$

식 (3.5)을 이용하면 응력범위분포에 대한 손상 비 D_f 는 아래와 같다.

$$D_f = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{n_i \Delta f_i^m}{C} \quad (3.6)$$

식 (3.6)에 그림 3.6와 같은 등가응력범위 $\Delta\sigma_e$ 를 적용하면

$$D_f = \sum_{i=1}^n \frac{n_i \Delta f_e^m}{C} = \frac{\Delta f_e^m}{C} \sum_{i=1}^n n_i = \frac{\Delta f_e^m}{C} N \quad (3.7)$$

로 되며, 식 (3.6)와 식 (3.7)은 같은 손상정도를 나타내므로 이로부터 등가응력범위 $\Delta\sigma_e$ 를 구하면

$$\sum \frac{n_i \Delta f_i^m}{C} = \frac{\Delta f_e^m}{C} N \quad (3.8)$$

$$\Delta f_e = \left(\frac{\sum n_i \Delta f_i^m}{N} \right)^{1/m} \quad (3.9)$$

이다.

여기서, m=2일 때 Barsom에 의해 제안된 RMS(Root Mean Squar)값이고, m=3일 때

Yamada에 의해 계산된 RMC(Root Mean Cube)값이다. 계산된 등가응력범위 Δf_e 는 하한계응력 확대계수 이상의 피로균열 성장에서 등가응력 확대계수 범위 ΔK_e 를 산정하는데 관계되며, 이로부터 응력변동 진폭 하에서의 피로균열 성장속도를 정확하게 예측할 수 있는 사실이 많은 연구결과에서 입증되고 있다.

본 실험 평가 대상 부위에서 측정된 응력범위 빈도 분포중 $40kg/cm^2$ (3.92MPa)이하의 변동응력은 노이즈에 의한 계측오차 및 피로균열 진전을 평가함에 있어 영향이 매우 적음을 고려하여 무시한다.

강교부재의 피로손상 평가는 그림 3.7과 같이 균열이 없는 경우의 누적피로 손상도 평가와 균열이 발생한 경우, 그림 3.8처럼 균열 진전해석을 통한 피로손상도 평가로 구분할 수 있으며 누적피로에 의한 피로손상도 평가는 피로손상도 누적이 1.0으로 되었을 때 대상 부위에 피로 균열이 발생한다는 개념 하에 수행된다.

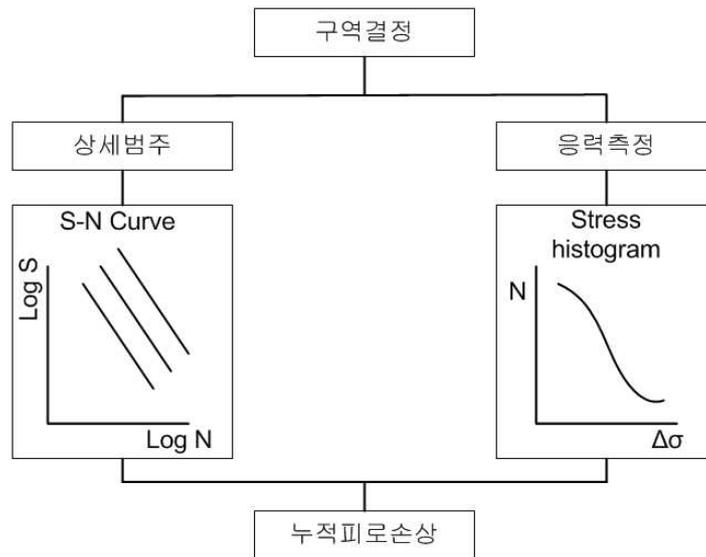


그림 3.7 균열이 없을 때의 피로수명 평가 순서

평가 대상 부위의 피로강도는 구조 상세범주(A~E')에 따라 S-N 곡선 또는 다음의 관계식으로부터 결정된다.

$$N = AS^m \quad (3.10)$$

S : 응력의 범위

N : 피로균열이 발생하는 응력반복 회수

A, m : 구조상세에 따른 상수

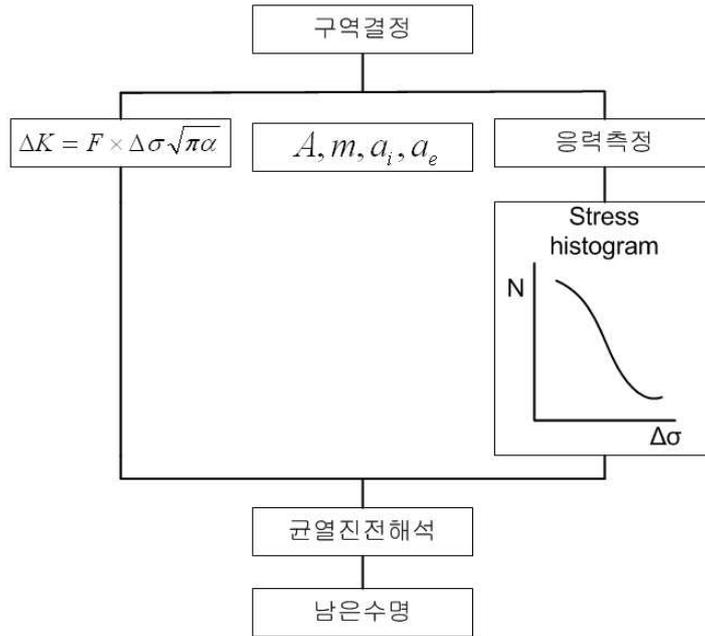


그림 3.8 균열이 있을 때의 피로수명 평가 순서

3.4 응력 확대 계수 범위

강교에 발생된 균열은 일반적으로 선형탄성파괴역학에 의해 해석을 실시한다. 선형탄성파괴역학에서는 균열진전을 지배하는 균열주위의 소규모 영역에서의 응력 확대 계수 범위 ΔK 에 의해 균열진전의 여부가 결정된다. 여기서, 응력 확대 계수 범위 ΔK 는 작용 응력, 초기 균열의 길이 그리고 균열의 기하학적인 형상에 따라 좌우된다. 응력 확대 계수 범위는 실제 부재에서의 균열의 형상, 부재의 치수 및 형상 등을 고려하여 식 (3.11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta K &= F(a)\Delta f\sqrt{\pi a} \\ &= F_e F_s F_t F_g \Delta f\sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (3.11)$$

여기서, a: 균열길이

$\Delta\sigma$: 작용 응력 범위

F_e : 균열 형상에 대한 보정 계수

F_t : 유한 폭 또는 두께에 대한 보정 계수

F_g : 이음에 생기는 응력 집중에 대한 보정 계수

보정 계수 $F(a)$ 는 유한요소해석 등의 수치해석에 의해 구하며, 타원형, 반타원형, 1/4 타원형의 균열에 대해서는 통상 3차원 해석을 실시하거나, 3차원 효과가 보정 계수에 거의 영향을 미치지 않는 것이 명확할 경우에는 2차원 해석을 실시하기도 한다.

1) 균열 형상에 대한 보정 계수

타원형, 반타원형, 1/4타원형의 균열이 단축 방향으로 진전할 경우

$$F_e = 1/E(k) \quad (3.12)$$

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}}$$

장축방향으로의 균열진전

$$F_e' = F_e \sqrt{a/b} \quad (3.13)$$

2) 표면균열에 대한 보정계수

반타원형의 표면균열, 1/4 타원균열이 단축방향으로 진전할 경우

$$F_s = 1.12 - 0.12a/b \quad (3.14)$$

표면관통균열

$$F_s = 1.12 \quad (3.15)$$

3) 유한 폭 또는 두께에 대한 보정계수

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad (3.16)$$

$$\lambda = 2a/d \quad (\text{내부 관통균열})$$

$$\lambda = a/d \quad (\text{표면 관통균열})$$

$$\lambda = 2a/t \quad (\text{타원형의 균열})$$

$$\lambda = a/t \quad (\text{타원형 및 1/4 타원형의 균열})$$

4) 이음부에 생기는 응력집중에 대한 보정계수

하중 비 전달 리브 십자이음 (그림 3.9 참고)

$l/t < 2$ 일 때

$$\begin{aligned}
 F_g &= 0.51(l/t)^{0.27}(a/t)^{-0.31} & a/t &\leq 0.05(l/t)^{0.55} \\
 F_g &= 0.83(l/t)^{-0.15}(l/t)^{0.46}(a/t)^{-0.31} & a/t &> 0.05(l/t)^{0.55}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

$l/t > 2$ 일 때

$$\begin{aligned}
 F_g &= 0.615(a/t)^{-0.31} & a/t &\leq 0.073 \\
 F_g &= 0.83(l/t)^{-0.2} & a/t &> 0.073
 \end{aligned}$$

단, $F_g \geq 1$ 로 한다.

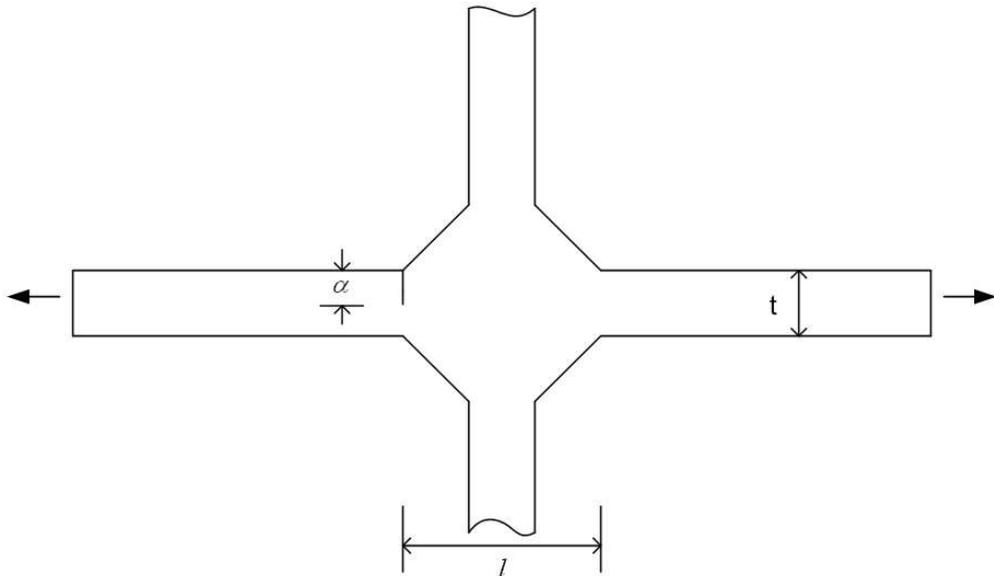
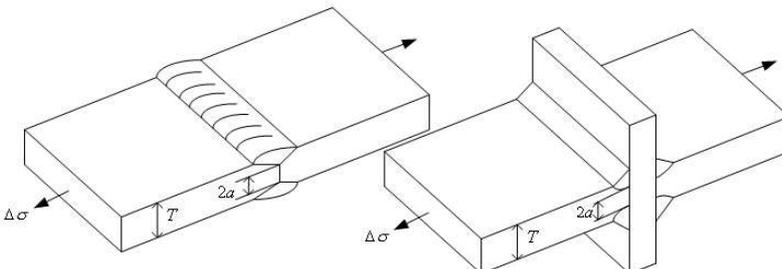
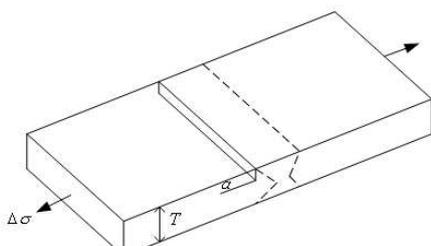


그림 3.9 하중 비전달형 십자이음

식 (3.17)의 응력집중 보정계수 F 는 초기균열의 형상과 크기에 따라 유한요소 해석 등에 의하여 구할 수 있으나 여기에서는 일본 구조물 피로설계 지침상의 표 3.2와 같은 간단한 식을 사용하였다.

표 3.2 균열위치에 따른 수정 계수

| Crack model | 응력확대계수의 수정 계산식 |
|-------------|---|
| 내부균열 | $F = F_g \cdot F_s \cdot F_c$ $F = \sqrt{\sec(\pi\alpha/T)}$ $2a/T \leq 0.7; \text{error} 0.3\%$ $F = \{1 - 0.025(2a/T)^2 + 0.06(2a/T)^4\} \times \sqrt{\sec(\pi\alpha/T)}; \text{error} 0.1\%$ $F = \{1 - 0.592a/T + 0.37092a/T^2 - 0.044(2a/T)^3\} \times \sqrt{1 - (2a/T)}; \text{error} \leq 0.3\%$  |
| 표면균열 | $F = 1.12 - 0.231(a/T) + 10.55(a/T)^2 - 21.72(a/T)^3 + 30.39(a/T)^4$ $a/T \leq 0.6; \text{error} 0.5\%$ $F = 0.265\{1 - (a/T)\}^4 + \{0.857 + 0.265(a/T)\}/\{1 - a/T\}^{3/2}$ $a/T < 0.2; \text{error} \leq 1.0\%$ $a/T 0.2; \text{error} \leq 0.5\%$ $F = \sqrt{\frac{2}{\pi(a/T)} \tan \frac{\pi\alpha}{2T}} \times \frac{0.752 + 2.02(a/T) + 0.37\{1 - \sin(\pi\alpha/2T)\}^3}{\cos(\pi\alpha/2T)}$ $; \text{error} \leq 0.5\%$  |

3.5 피로균열 진전속도

피로균열의 성장특성을 나타내는 대표적인 식은 하중 반복회수당의 하중이력에 따른 균열성장 거동을 나타내는 피로균열 진전속도 da/dN 과 1차적인 인자인 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 구체화한 Paris-Erdogan 식이다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C(\Delta K)^m & (\Delta K \geq \Delta K_{th}) \\ da/dN &= 0 & (\Delta K < \Delta K_{th}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

여기서, 피로균열 진전속도는 상수 C, m의 값에 따라 달라지며, 강재의 특성에 좌우된다. 식 (4.9)의 적용에 있어서 하 한계는 하 한계 응력확대계수 범위 ΔK_{th} 로 주어지며 하한계 응력확대계수 범위 응력비 R의 영향을 받는다. 피로균열 진전거동에 하 한계 응력확대계수범위를 포함시킬 경우의 피로균열 진전속도는 식(3.19)과 같다.

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (3.19)$$

식 (3.19)을 사용하는 경우 일본 JSSC 피로설계지침에서는 표 3.3과 같이 최 안전 설계곡선과 평균 설계곡선을 고려하여 C, m 및 Δ_{th} 의 값을 제시하고 있다.

표 3.3 $da/dN-\Delta K$ 곡선에서의 상수값

| | $C \times 10^{-11}$ | m | ΔK_{th} |
|---------|---------------------|------|-----------------|
| 최안전설계곡선 | 2.69 | 2.75 | 2.0 |
| 평균설계곡선 | 1.54 | 2.75 | 2.9 |

한편 이 식은 하중반복하의 하중이력을 개구모드(Opening Mode)파괴에서 응력확대 계수범위($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$)으로 나타낼 수 있고, 따라서 응력확대 계수범위 ΔK 를 매 사이클당의 최대, 최소응력과 재료형상에 관계되는 함수로서 계산이 가능하다는 것이다. 또, 이식은 최대응력이 항복 응력보다 커지더라도 응력이 작으면 선형탄성 파괴 역학의 적용이 가능하고, $\log(da/dN) = \log(C(\Delta K)^m)$ 의 관계로 해석되며 대수좌표계에서 직선관계를 유지하는 특성을 가지고 있다.

3.6 피로균열 진전수명

피로균열 진전수명은 일반적으로 식 (3.20)과 같고 식 (3.1)의 Paris의 균열 진전식을 반복회수 N 에 대해 초기균열 길이 a_i 에서 한계균열길이 a_c 까지 적분하는 것으로 구해진다.

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (3.20)$$

여기서,

N : 균열수명

a_i : 초기균열길이

a_c : 한계균열길이

ΔK : 응력확대계수범위

식 (3.20)은 ΔK 가 균열에 대한 함수로 주어지고 평면균열인 경우는 균열형상에 의해 달라지기 때문에 일반적으로 수치적분에 의해 구해진다. 예를 들어, 반타원형 또는 타원형의 표면균열의 경우는 균열깊이방향과 폭 방향에 대한 응력확대계수범위 ΔK_A , ΔK_B 를 계산하여 식(3.20)에 대입함으로서 양방향의 균열진전수명을 계산한다. 피로균

열 진전수명의 계산방법에는 균열치수 증가법과 하중반복회수 증가법이 있는데, 비교적 계산이 용이한 하중반복회수 ΔN 을 증가시키면서 균열 증분량을 계산하는 하중 반복회수 증가법을 많이 사용하고 있으며 계산절차를 나타내면 다음과 같다.

1단계 : 균열크기 (a,b)에 대한 응력확대계수범위 $\Delta K_{A1}, \Delta K_{B1}$ 를 구한다.

2단계 : 하중반복회수 ΔN 을 이용하여 균열증분량 $\Delta a', \Delta b'$ 을 다음과 같이 구한다.

$$\Delta a' = C(\Delta K_{A1})^m \Delta N \quad (3.21a)$$

$$\Delta b' = C(\Delta K_{B1})^m \Delta N \quad (3.21b)$$

3단계 : 균열 $(a + \Delta a', b + \Delta b')$ 에 대한 응력확대계수범위 $\Delta K_{A2}, \Delta K_{B2}$ 를 구한다.

용접부 결함이 초기균열로 판단되는 경우는 그 균열이 한계균열까지 진전되어 대상부재가 그 기능을 상실할 경우를 부재의 수명으로 고려하여 피로 손상도를 평가한다. 이는 파괴역학에 기초하는 것으로 한계 균열 길이에 대한 정의 및 재료에 따른 피로균열 진전속도에 관한 충분한 자료가 필요하다.

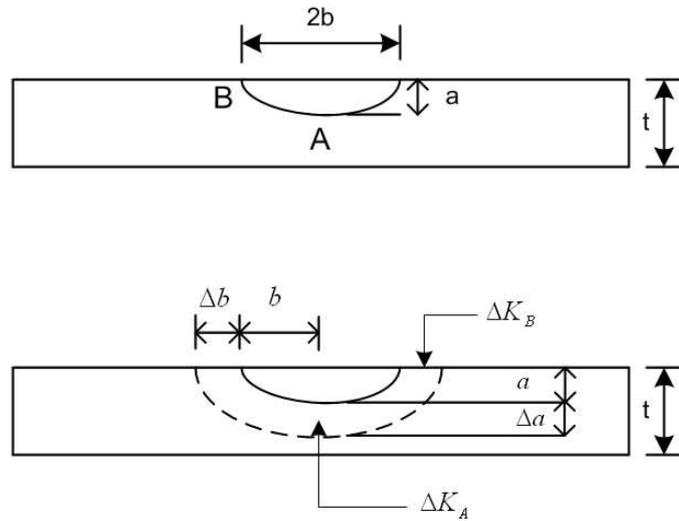


그림 3.10 반타원형 표면균열형상과 응력확대계수범위의 계산

4단계 : 균열이 (a,b) 에서부터 $(a+\Delta a', b+\Delta b')$ 까지 진전할 때의 응력 확대계수 범위는 1, 3단계에서 계산된 응력 확대계수 범위의 평균값을 사용하여 다음 식과 같이 표시되며 이를 도식적으로 나타내면 그림 3.10와 같다.

$$\Delta K_A = (\Delta K_{A1}^m + \Delta K_{A2}^m) / 2^{1/m} \quad (3.22a)$$

$$\Delta K_B = (\Delta K_{B1}^m + \Delta K_{B2}^m) / 2^{1/m} \quad (3.22b)$$

5단계 : 균열 증분량 $\Delta a, \Delta b$ 는 위 식에서 얻어진 결과를 이용하여 계산한다.

제 4 장 용접 결합부 피로수명 평가

4.1 대상 구조물의 제원

용접부 피로균열 진전수명 평가를 하는 교량은 3경간 연속 도로교(3차선)이며, 해석부위는 활하중에 대해서 영향을 많이 받아 처짐 및 처짐 각이 크게 발생하는 1경간 중앙부의 하부 맞대기 용접부에 대해서 피로균열 진전수명을 해석하였다.

- ① 구조형식 : 합성형 스틸박스 거더교(2련)
- ② 지간구성 : 3경간 ($L=40*50*40*=130m$)
- ③ 교폭 : 14.4m (3차선)
- ④ 내진 2등급 설계
- ⑤ 사용강재 : 주부재 - SM 520
부부재 - SM 400

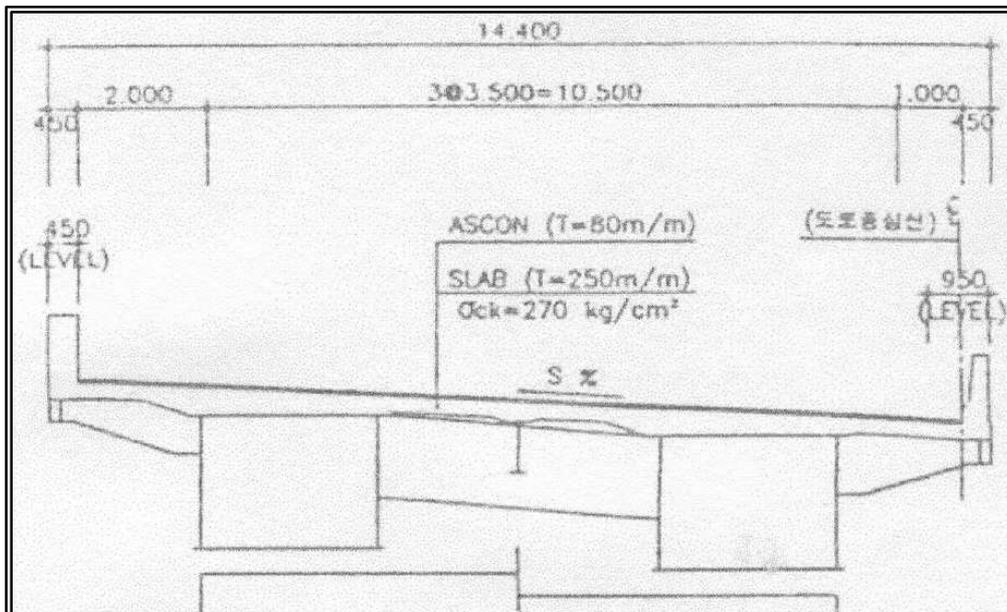


그림 4.1 대상교량의 횡단면도

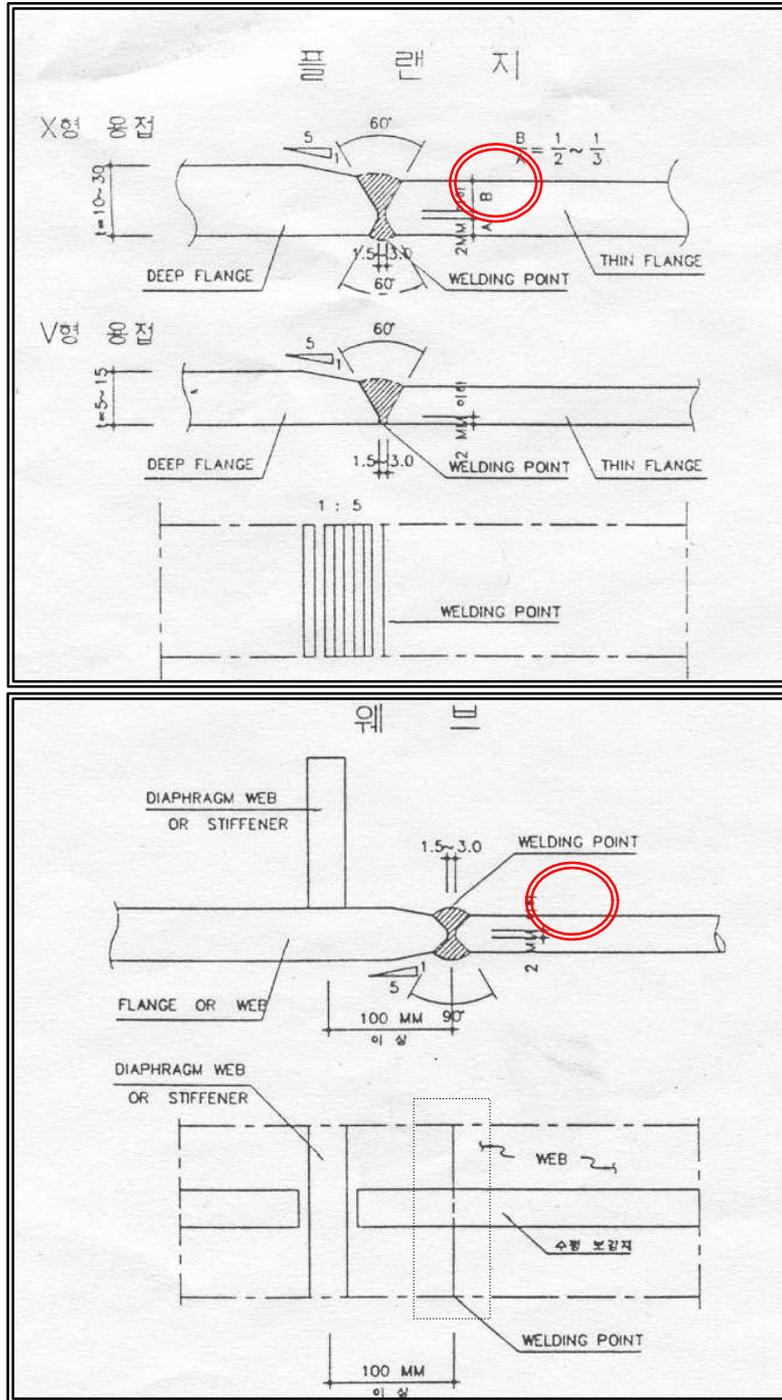


그림 4.2 평가대상부위 도면(플랜지, 웹)

4.2 응력범위 빈도측정 및 평가

4.2.1 응력범위 빈도측정 방법

맞대기 용접부에 작용하는 응력 측정을 위하여 사용한 변형률 게이지는 강제용 게이지 변위 측정게이지를 사용하였고 측정대상부위는 그림 4.1, 4.2에서 보는 바와 같이 북부관 맞대기 용접부로서 변형률 게이지를 맞대기 용접 지단부에서 20cm 떨어진 위치에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.

응력범위 빈도측정은 히스토그램 레코더를 사용하여 수행하였다. 측정에 앞서 측정장비의 신뢰성 및 현장적용 조건을 확인하기 위한 예비 측정결과 여러 가지 주변 환경(온도, 무선전화기, 무전기, 110V 전류)에 의한 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다. 응력범위 빈도측정은 상시 통과 하중 하에서 실시하였으며 측정결과는 레인플로 범으로 응력범위 빈도해석을 수행하였다. 측정기간은 1일, 3일 실시하였다. 하지만 1일 측정 변동응력과 3일 측정 변동응력의 데이터가 거의 유사하므로 계산의 편의상 1일 측정된 데이터를 본 연구에서는 적용하였다. 측정응력 범위는 3.92MPa 증분으로 하였다.

4.2.2 응력범위 빈도측정 결과

교량은 무작위의 변동진폭하중을 받지만 임의의 부재가 어느 기간 중에 일련의 동일한 하중 변동이력이 발생할 확률은 매우 작다. 이와 같은 상태의 피로거동을 검토하기 위해서는 하중변동 특성을 나타낼 필요가 있으며 이것을 해석함수로 표현하여야 한다. 따라서 임의의 변동진폭응력을 표현하기 위해서 확률밀도곡선을 이용한다.

변동진폭응력을 받는 부재의 응력이력은 최대응력의 발생빈도로 정의할 수 있다. 일반적으로 발생빈도는 그림 4.3과 같이 히스토그램의 형태로 나타낼 수 있다. 히스토그램에서 각각의 사각형은 응력범위를 나타내며 최대응력이 그 구간에 속하는 응력발생 빈도를 나타낸다. 응력범위 ΔS 의 임의의 2개의 값으로 둘러싸인 확률밀도곡선 아래의

면적은 그 구간에 속하는 ΔS 의 발생빈도(%)를 의미한다.

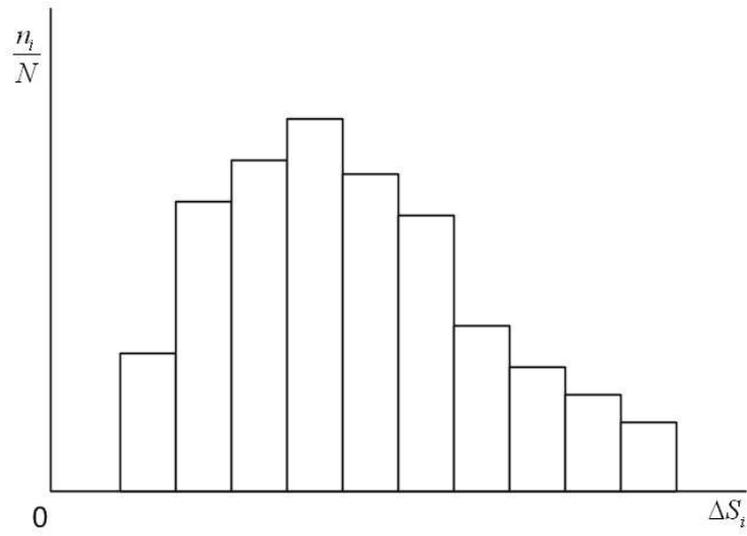


그림 4.3 응력범위 빈도 분포

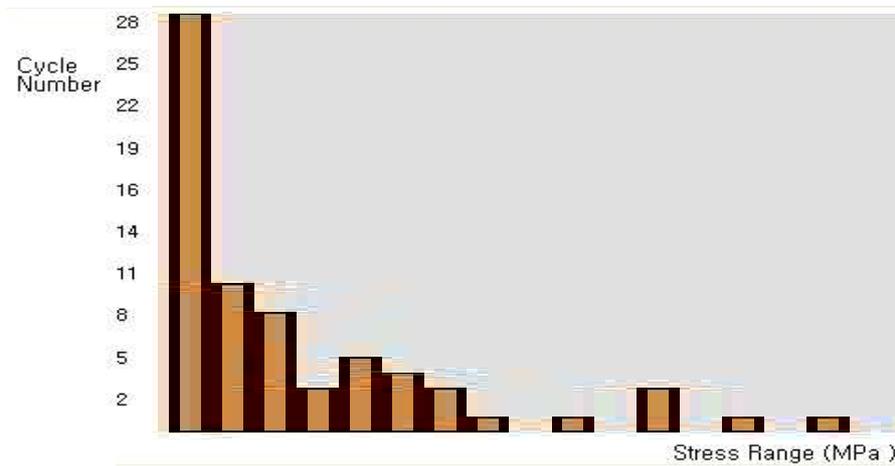


그림 4.4 실제 측정 응력 빈도 분포

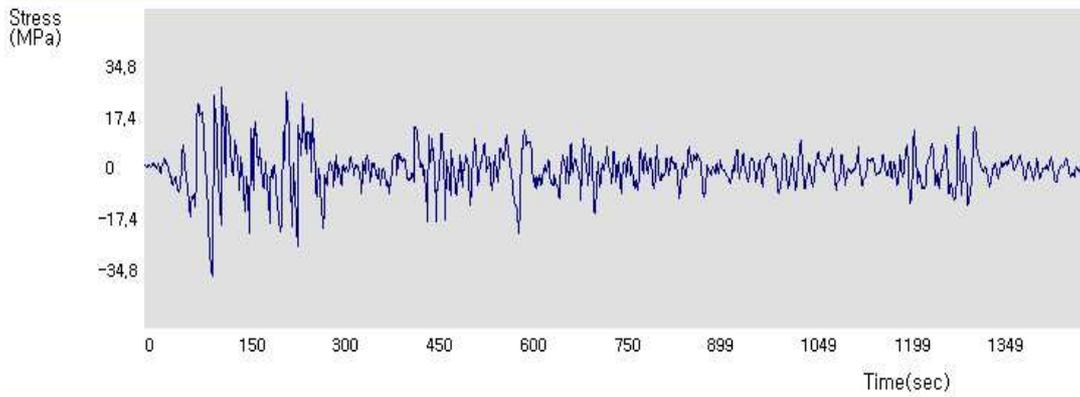


그림 4.5 실제 측정 응력 히스토리 그래프

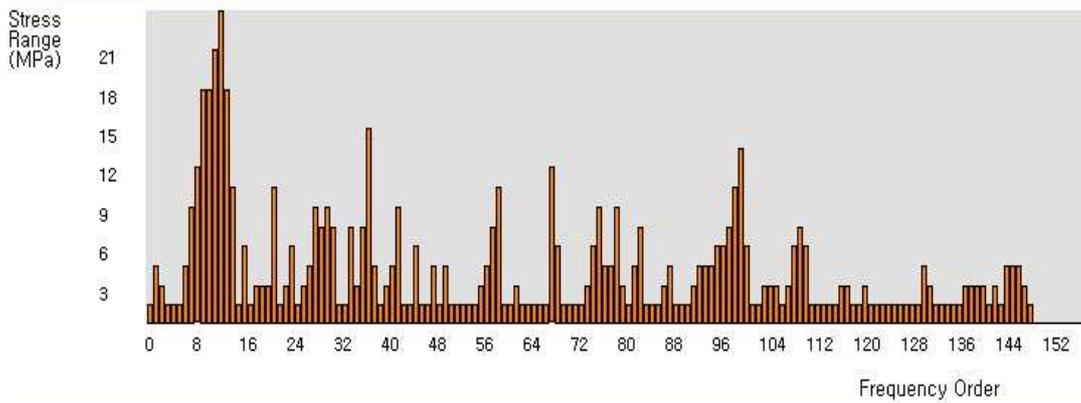


그림 4.6 실제 측정 응력 빈도

4.3 피로수명 평가

용접결함이 존재하는 인장하부 플랜지 맞대기 용접부의 피로강도 평가는 강재에 대한 결함의 크기가 가장 크고 활하중에 의한 변동응력이 상대적으로 큰 교량의 경간 중앙부를 대상으로 하였으며, 인장 하부플랜지 맞대기 용접부의 피로평가에 있어서 대표성을 지닌다.

해석조건으로는 평가 대상부위는 그림 4.7과 같으며 표면 관통균열에서는 한 방향으

로 균열이 진전하므로 초기 균열의 길이는 4mm, 내부 관통균열은 한축에 대해 양방향으로 균열이 일어나므로 2mm 이다. 한편 내부 관통균열의 한계균열길이는 하부플랜지의 폭, 표면 관통균열의 한계균열길이는 판 두께로 가정하였다. 작용하중에 대한 균열 진전은 개구모드(Opening Mode)상태로 가정하였으며, 해석방법은 하중반복회수 증가법을 사용하였다. 하중반복회수의 증가에 따라 단위하중반복회수에 대한 균열 진전량이 나타나고, 균열진전길이가 한계균열길이에 도달하면 해석은 종료된다. 한편, 피로균열진전거동은 식 3.20의 균열진전 속도식에 의해 해석을 실시하였다. 해석에서 상수 C, m 및 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 는 표 3.2에 나타난 일본 JSSC 피로설계지침의 최안전설계 곡선값을 사용하였다.

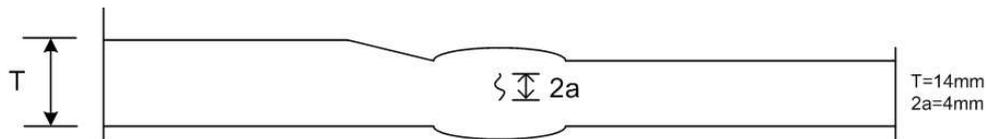


그림 4.7 복부판 맞대기 용접부 내부결합 형상

평가 대상 부위의 크기는 그림 4.7과 같으며 응력범위빈도 분포도는 그림 4.4와 같다. 그림 4.7과 같이 초기 균열이 내부에 있는 경우 그림 4.4의 변동 응력 하에서 피로균열진전 해석을 수행과정과 결과는 표4.1과 그림 4.8과 같다.

내부균열의 크기 $2a = 4mm$

한계균열 치수 a_c = 플랜지의 판 두께 $14mm$ $\Delta a = (14 - 4)/1000 = 0.001$

응력범위 $\Delta\sigma = 8.6479$

계산스텝수 = 500

균열 치수 증가법에 의한다.

$$y = \frac{1.545 \times 10^8}{3000 \times 365} = 141.08 \text{년}$$

표4.1 및 그림4.8의 평가결과에 나타낸바와 같이 복부판 맞대기 용접부 내부에 존재하는 표면결함이 피로균열로 성장하여 0.5mm 진전하는데 필요한 작용회수는 현장에서 계측된 등가 변동응력 8.6479Mpa 하에서 1.545×10^8 회가 되므로, 현 교통상태 하에서 0.5mm 균열 진전에 필요한 년 수는 141년이 된다.

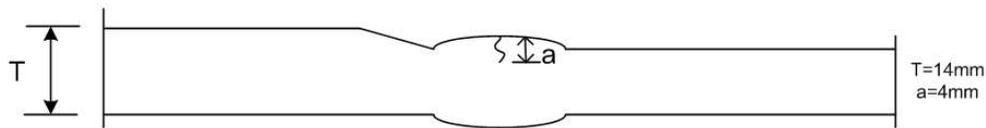


그림 4.9 복부판 맞대기 용접부 표면결함 형상

평가 대상 부위의 크기는 그림 4.9과 같으며 응력범위빈도 분포도는 그림 4.4와 같다. 그림 4.9와 같이 초기 균열이 표면에 있는 경우 그림 4.4의 변동 응력 하에서 피로균열 진전 해석을 수행과정과 결과는 표4.2와 같다.

내부균열의 크기 $a = 4mm$

한계균열 치수 $a_c =$ 플랜지의 판두께 $16mm$ $\Delta a = (14 - 4)/1000 = 0.001$

응력범위 $\Delta \sigma = 8.6479$

계산스텝수 = 500

균열 치수 증가법에 의한다.

$$y = \frac{6.422 \times 10^7}{3000 \times 365} = 58.64 \text{년}$$

표 4.2 및 그림 4.10의 평가결과에 나타난 바와 같이 복부판 맞대기 용접부 표면에 존재하는 표면 결함이 피로균열로 성장하여 0.5mm 진전하는데 필요한 작용회수는 현장에서 계측된 등가 변동응력 8.6479MPa 하에서 6.422×10^7 회가 되므로, 현 교통상태 하에서 0.5mm 균열 진전에 필요한 년 수는 59년이 된다.

표 4.1과 표 4.2의 평가 결과에 의하면 평가 대상 부위에 따라 응력범위의 작용회수에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

제 5 장 결 론

연구에서는 정밀안전단시 검출된 강교량의 인장 하부플랜지에 존재하는 불완전용입 결함 및 표면균열의 진전해석을 통한 피로수명 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 하부플랜지 맞대기 용접부의 표면균열이 4mm(부재두께의 33%)로서 매우 큰 용접 결함이 존재하는 경우 결함의 크기가 0.5mm 전진에 필요한 소요 년 수는 59년이고, 내부에 용접결함이 존재하는 경우는 결함의 크기가 0.5mm 전진에 필요한 소요 년 수는 140년으로 평가되었다.
- 2) 결함의 발생위치에 따른 피로수명을 평가한 결과 내부균열보다 표면균열이 교량의 피로수명에 크게 영향(2.3배)을 주었다. 따라서 안전진단시 표면균열의 검출에 세심한 주의가 필요하다.
- 3) 이는 현재의 교통 상황 하에서 평가 대상 부위에 작용하는 응력의 등가응력범위가 8.6479MPa인 경우 계산된 소요 년 수로서 향후 대형차량 혼입률 증가, 교통량의 급격한 증가 등 교통상황의 변화가 있을 경우 재평가가 수행되어야 한다.
- 4) 피로수명 평가결과를 이용하여 대상 부위의 점검주기 및 보수시기를 결정함으로써 용접결함부의 효율적이고 경제적인 유지관리를 수행할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) 박정용, 경갑수, 박연수, 정경섭공역, “교량과 강재”, 2004. 6
韓國剛構造學會審議, “강도로교의 피로설계요령”,98. 3
- 2) 日本剛構造學會, “강구조물의 피로설계지침·동해설” 2000. 4
- 3) 서울특별시, “성수대교 정밀안전진단 최종보고서”, 1995. 5
- 4) 韓國剛構造學會, “강형교의 교통량 분석을 통한 설계피로하중 산정과 방생응력 모형화 연구 최종 보고서”, 1997. 12
- 5) 建設交通部, “도로교설계기준”, 2000
- 6) 建設交通部, “도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침”, 2000. 3
- 7) 장동일, “구조공학에서의 파괴와 피로”, 동명사, pp. 231~251, 1999.
- 8) 한석열, “몬테카를로 시뮬레이션에 의한 교량 강부재의 피로신뢰성 해석모델”,
전남대학교 博士學位論文, 2005. 2
- 9) 하창민, “강교 용접이음부의 피로균열진전 수명에 미치는 대형차의 영향”, 부경대학교 碩士學位論文2002. 2
- 10) 조상명, “용접결합을 가진 강교량의 피로수명평가 시뮬레이션” 1995.
- 11) 최준혁, 경갑수, 최동호, 장동일, “힘응력을 받는 바닥강판의 피로균열진전해석”, 韓國剛構造學會論文, 제 11권 4호, pp. 409~416, 1998. 8.
- 12) 建設交通部, “도로교통행량통계연보, 2003.
- 13) 엄창희, “강상형교 용접이음부의 피로균열진전해석에 관한 연구”, 부경대학교 碩士學位論文, 1999. 2
- 14) 김윤기, 조재병, “강교의 변형률 측정값을 이용한 통과차량의 축중량 산출방법에 관한 연구”, 韓國剛構造學會學術發表論文, pp. 278~281, 1998
- 15) 심낙훈, 양준열, 박영석, “우리나라 도로교의 피로하중 모형에 관한 연구”, 韓國鋼構造學會學術發表論文集, pp 327~332, 1998.
- 16) 백영남, 장영권, “강교량 맞대기용접 결합부의 피로수명 평가”, 大韓鎔接學會支 18권 제2호, 2000. 4

- 17) AASHTO,(American Association of Standard Highway and Transportation Official) "Standard Specification for Highway Bridges", 15th ED., 1992.
- 18) AASHTO(American Association of Standard Highway and Transportation Official), "LRFD Bridge Design Specification", 1st Ed., 1994.
- 19) AASHTO(American Association of Standard Highway and Transportation Official), "Guide Specifications for Fatigue Design of Steel Bridge", 1989
- 20) CEN, "Eurocode 3 - Design of Steel Structures", 1993.
- 21) BSI, "BS 5400 Part 10 - Code of Practice for Fatigue", 1980.