



공 학 석 사 학 위 논 문

# 다층 FCA용접한 해양구조물용 강재의 피로균열전파저항에 관한 연구



부경대학교대학원

기계설계공학과

손 상 훈

공 학 석 사 학 위 논 문

## 다층 FCA용접한 해양구조물용 강재의 피로균열전파저항에 관한 연구



부경대학교대학원

기계설계공학과

손 상 훈

## 손상훈의 공학석사 학위논문을 인준함

2010년 12월 15일



위 원 공학박사 김 선 진 (인)

차
차

Nomenclature       v         제 1 장 서 론       1         1.1 연구의 배정       1         1.2 연구의 목적 및 법위       4         제 2 장 이론적 배경       5         2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류       5         2.2 신형과괴역학       8         2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 甚포       24         제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35	Abstract
제 1 장 서 론       1         1.1 연구의 배경       1         1.2 연구의 목적 및 범위       4         제 2 장 이론적 배경       5         2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류       5         2.2 선형파괴역학       8         2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24         제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 철차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	Nomenclature w
1.1 연구의 배경       1         1.2 연구의 목적 및 법위       4 <b>제 2 장 이론적 배경</b> 5         2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류       5         2.2 선형파괴역학       8         2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24 <b>제 3 장 시험편 및 실험방법</b> 27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	제 1 장 서 론 1
1.2 연구의 목적 및 범위       4         제 2 장 이론적 배경       5         2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류       5         2.2 선형파괴역학       8         2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24         제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2 1 실험시스템       35	1.1 연구의 배경
제 2 장 이론적 배경       5         2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류       5         2.2 선형파괴역학       8         2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24         제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35	1.2 연구의 목적 및 범위 4
2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류       5         2.2 선형파괴역학       8         2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24 <b>제 3 장 시험편 및 실험방법</b> 27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35	제 2 장 이론적 배경
2.2 선형파괴역학       8         2.3 피로균열전파 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24 <b>제 3 장 시험편 및 실험방법</b> 27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류 5
2.3 피로균열전과 특성       15         2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24 <b>제 3 장 시험편 및 실험방법</b> 27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	2.2 선형파괴역학
2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델       21         2.4 Weibull 분포       24 <b>제 3 장 시험편 및 실험방법</b> 27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35	2.3 피로균열전파 특성15
2.4 Weibull 분포       24         제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35	2.4 신뢰성이론에 기초한 확률모델
제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	2.4 Weibull 분포24
제 3 장 시험편 및 실험방법       27         3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	AL TO THE AL
3.1 재료 및 시험편       27         3.1.1 시험재료       27         3.1.2 FCA 용접방법 및 절차       29         3.1.3 시험편       32         3.2 실험 장치 및 방법       35         3.2.1 실험시스템       35	제 3 장 시험편 및 실험방법
3.1.1 시험재료 ····································	3.1 재료 및 시험편
3.1.2 FCA 용접방법 및 절차	3.1.1 시험재료
3.1.3 시험편	3.1.2 FCA 용접방법 및 절차
3.2 실험 장치 및 방법	3.1.3 시험편
3.2 실험 장치 및 방법	
3.2.1 실험시스템	3.2 실험 장치 및 방법
	3.2.1 실험시스템



#### A Study on Fatigue Crack Growth Resistance of Multi-Path Flux Core Arc Welded Offshore Structural Steel

Sang-Hoon Sohn

Department of Mechanical Design Engineering Graduate School Pukyong National University

## Abstract

Fatigue cracking of structural details in ship and offshore steel structures due to cyclic loading has gained considerable attention in recent years. Numerous research works have been conducted in this field on both theoretical and practical aspects. Consequently, a great deal of studies have been published resulting in various topics relating to fatigue crack initiation and propagation problems.

Welding is most widely utilized as a joining method for steel structures. Among many welding processes, the Flux Cored Arc Welding (FCAW) process has grown in use in recent times as a function of its characteristics of high productivity, good quality and low cost, associated with suitable mechanical properties in welded joint, especially in ship and offshore structure fields. However, the welded joints often contain defects such as slag inclusions, incomplete fusion, gas pores, undercuts at weld toes, etc.

The welded joint consists of three zones from the material's microstructural viewpoint : weld metal (WM), heat affected zone (HAZ) and base metal (BM). The individual zones exhibit different mechanical behavior such as hardness, and fatigue properties. Several researchers have revealed that no significant

variations exist in the fatigue crack propagation properties for the three zones, however some others showed that these three zones had significant differences in fatigue crack propagation behavior.

For practical application, it is important to understand the fatigue crack propagation behavior of cracked welded structures. Fatigue crack growth rate data of welded structures should be determined accurately so that the fatigue crack propagation life of the welded structure can be accurately evaluated. Several fatigue crack growth data for the welded joints are available but very few data are available for the welded structures in the stress range viewpoint. And also, it is widely recognized that the fatigue crack growth is fundamentally a probabilistic phenomenon. Several studies have demonstrated the inherent randomness of fatigue crack growth beyond crack initiation. Risk assessment and remaining fatigue crack growth life prediction require accurate probabilistic fatigue crack growth models.

Therefore, there are tow main aims in this study. The first one is to investigate the effects of the load range on fatigue crack growth behavior in three different zones, WM, HAZ and BM for API2W Gr. 50 steel. The second aim of this study is to investigate the effects of the load range on the spatial variation of fatigue crack growth resistance in three different zones, WM, HAZ, and BM for API 2W Gr. 50 steel using the stochastic model based on reliability theory.

Experimental fatigue crack propagation test were performed on ASTM standard CT specimens. The results indicates that the load range have strong dependency on fatigue crack propagation for the three different zones WM, HAZ and BM, and also, on spatial variation of fatigue crack propagation resistance.

### Nomenclature

а	:	Crack length		
B	:	Specimen thickness		
С	:	Constant of Paris' law		
$C_1$	:	Positive random variable describing the behaviour deviation in different specimens		
$C_2$	:	Random process which models the deviation of the crack growth rate within each specimen		
da/dN	:	Fatigue crack growth rate		
E	:	Elongation		
HV	: /	Micro-Vickers hardness number		
Hz	:/>	Frequency		
K	10	Stress intensity factor		
$K_c$	S	Fracture toughness		
$K_{max}$		Maximum stress intensity factor		
$K_{min}$	5	Minimum stress intensity factor		
$\Delta K$	12	Stress intensity factor range		
$arDelta K_{th}$	: \	Threshold stress intensity factor range		
т	: \	Exponent of Paris' law		
N	:	Number of cycle		
P	:	Load		
$\Delta P$	:	Load range		
R	:	Stress ratio		
S	:	Safety factor		
t	:	Specimen thickness		
W	:	Specimen width		
$\alpha$	:	Shape parameter of Weibull distribution		
eta	:	Scale parameter of Weibull distribution		
$\sigma_t$	:	Tensile strength		
$\sigma_{y}$	:	Yield strength		

### 제1장서 론

#### 1.1 연구의 배경

현재 대형 해양구조물과 10,000TEU 이상의 대형 컨테이너 운반선과 같 은 비교적 대형 구조물의 조립에는 60mm이상의 극후판의 해양구조물용 강재가 사용되고 있다. 최근에는 북극과 같은 저온 환경하에서 사용되는 해양구조물의 강도를 확보하기 위하여 강판의 두께가 80mm이상의 극후판 의 사용이 요구되고 있다. 특히 해양구조물의 경우에는 최근 육상 및 연근 해 등 비교적 생산이 용이한 지역에서의 원유생산은 이미 한계에 도달하였 다는 판단이 제기되고 있어, 심해 및 극지방으로 유전개발이 이동됨에 따 라 해양구조물에 작용하는 하중조건이 과거보다 훨씬 가혹해지면서 구조물 의 높은 안전성이 요구되고 있다<sup>(1)</sup>. 대부분의 해양구조물용 강재는 모재 및 용접부에 대해서 API RP 2Z에서 정하고 있는 항목에서 평가가 되나 모재와 용접부에 대한 피로 및 취성파괴에 대한 연구는 현재 부족한 실정 이다. 해양구조물은 하중 특성상 피로하중을 받기 때문에 이에 대해서는 어떤 방법으로든지 평가가 되어야 한다.

선박 혹은 해양구조물 등의 피로파괴는 재료결함, 가공 또는 용접에 의 한 균열상의 결함을 기점으로 일어나는 경우가 많다. 피로와 파괴에 대한 연구는 재료나 구조물의 강도에 관한 학문분야에 속하며, 약 100년동안 꾸 준하면서도 활발히 연구되어 현재 그 응용분야도 광범위한 실정이다. 특히 피로 및 파괴에 대한 공학적인 해석은 설계 및 실용상 대단히 중요한 문제 라 할 수 있으며, 안전과 직결되는 공학적인 문제를 해결하기 위해서는 피 로파괴에 의한 피로손상에 대한 고찰은 안전한 설계의 관점뿐만 아니라 기 기의 운용, 보수, 점검 등을 위해서도 파악되어야 할 중요한 사항이다<sup>(2)</sup>.

- 1 -

미소한 피로균열은 초기에 발생하고 그 균열의 전파율과 정류조건에 의해 서 피로수명과 피로한도가 거의 결정된다. 균열의 거동이나 균열재의 강도 를 역학적 측면에서 평가, 해석하기 위한 방법이 이른바 1950년대 이후 급 속히 발전한 파괴역학에 기초한 균열전파거동에 대한 연구이다. 이러한 학 문과 기술의 발전에도 불구하고 기계 구조물의 파괴사고의 대부분은 피로 에 기인한 경우가 많다. 그 때문에 피로파괴 기구(mechanism)의 구명이나 피로강도평가법의 개발을 위해서도 피로균열전파에 관한 연구가 필요하여 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>(3~5)</sup>.

일반적으로 부재의 피로수명은 피로균열의 발생수명과 전파수명의 합으 로 이루어져 있다. 선박 및 해양구조물 등과 같은 비교적 대형구조물의 경 우 전체 피로수명에서 피로균열전파수명이 약 70% 이상의 비중을 차지하 고 있기 때문에, 이와 같은 균열전파수명이 지배적인 경우에는 균열의 전 파거동을 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 피로손상의 누적은 주로 균 열의 발생과 전파과정, 또는 초기결함에서의 균열의 전파과정으로서 추론 가능하다. 따라서, 구조물의 내피로신뢰성평가는 반복하중을 받는 부위에 대해서 균열의 발생, 전파과정 특히 용접부와 같이 초기결함이 상정된 경 우에는 균열의 전파과정 해석이 필요로 하게 된다<sup>(6~8)</sup>.

후판 또는 해양구조물용 재료는 이러한 피로파괴를 방지하기 위해서 높 은 항복강도가 요구되고, 심해 및 극지방에서의 사용으로 인해 저온에서도 고인성을 가져야만 하며 용접성도 우수해야 한다. 이러한 극후판이나 TLP 등의 구조물에 API 2W Gr. 50 강재가 현재 많이 사용되고 있는 실정이다.

API 2W Gr. 50은 미국석유협회(API : American Petroleum Institute)에 서 규격을 제정하고 인증한 재료로서 TMCP(Thermo Mechanical Control Process)법을 적용한 강재이다<sup>(9)</sup>. 고인성과 고강도를 가진 강재로서 탄소당 량이 낮음에도 불구하고 높은 인장강도를 발휘하고 낮은 탄소당량으로 용 접성을 개선하고 강재의 두께가 증가하더라도 항복강도의 저하가 없도록 강재의 특성을 향상시킨 것이다. 해양구조물 및 선박의 건조에 있어서 용 접은 가장 많은 작업을 차지하는 하는 것으로서 용접에 의한 균열상의 결 함을 방지하고 결함에 따른 피로특성을 연구하는 것이 중요하다.

해양구조물용 강재의 대표적인 용접법에는 SMAW, SAW, GMAW 그리 고 FCAW가 있다. 용접기술의 발전과 더불어 작업의 용이성, 구조물의 단 순화, 기밀의 우수성과 같은 많은 장점이 있지만 용접시에는 가열과 냉각 의 반복으로 인한 수축과 변형이 발생하고 사용기간중 필연적으로 피로에 의한 용접결함이 생기게 된다. 이러한 용접부는 외력에 의한 응력 집중원 이 되는 것은 물론 용접과정에서의 입열로 인한 성분과 조직의 변화에 의 해 반복하중에 대한 피로강도가 모재의 그것에 비해 훨씬 떨어져서 피로균 열의 발단이 되고 있다.

이러한 관점에서 파괴역학에 기초한 피로균열전파 거동에 대한 용접부의 영향에 대한 고찰이 필요하다고 할 수 있다. 또한 현재 피로균열전파가 확 률론적 본성을 가지고 있다는 것은 널리 알려진 사실로, 동일 하중 조건에 서도 그 전파거동에는 변동성이 존재하며, 하나의 시험편에서도 피로에 대 한 전파저항의 변동성이 존재함이 알려져 있다. 따라서 용접재의 피로균열 전파저항에 대한 재질의 공간적 변동특성을 고찰하는 것은 신뢰성 확보에 의미있는 연구라 사료된다.

#### 1.2 연구의 목적 및 범위

선박 및 해양구조물에 사용되는 구조재료는 강도와 피로수명이 매우 중 요하게 거론되고 있다. 이전에 비해 대형화 되고 정밀화 되면서 강도향상 과 더불어 피로수명까지 고려되고 있는 추세이다. 특히 해양구조물의 특성 상 혹독한 외적환경에 노출되어 있고, 극지방에서의 빙해 및 파도의 영향 에 기인한 부재의 피로파괴를 최소한으로 방지하기위해 피로균열전파에 관 한 연구가 필요한 실정이다. 또한 구조물의 대부분이 용접으로 이루어진 특성상 용접부에 대한 피로파괴 문제를 고찰하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이상과 같은 관점에서 해양구조물용 강재로 널리 사용되고 있는 API 2W Gr. 50 강재에 대하여 두께 60mm강판의 동종재료 를 다층 FCA용접을 수행하여 모재부(BM), 용접부(WM), 열영향부(HAZ) 부분을 채취하여 시험편을 가공하였다. 가공한 시험편은 하중범위의 조건 을 각각 달리하여 피로균열전파시험을 수행하여 피로균열전파거동에 미치 는 용접부의 재질, 즉 용접부, 열영향부 그리고 모재의 영향을 검토하였으 며, 마지막으로 피로균열전파거동의 확률론적 본성을 고찰하기 위하여 신 뢰성 이론에 근거한 피로균열전파저항의 공간적 변동성에 미치는 재질의 영향을 고찰하고자 하였다.

### 제 2 장 이론적 배경

#### 2.1 파괴역학의 발전과정 및 분류<sup>(10)</sup>

파괴역학의 이론 면에서 선구적 연구는 1920년대에 Griffith에 의해 행해 진 것으로 유리와 같은 이상적인 취성재료 중에 존재하는 균열(crack)의 파괴거동에 대해 해석적으로 검토한 것이다. Griffith는 만약 계의 전체에 너지가 균열전파로 낮아진다면 부재의 균열이 전파할 것이다라는 개념을 공식화했다. 이것은 만약 균열팽창으로 인한 탄성변형률 에너지의 변화가 새로운 균열 표면을 발생하는데 필요한 에너지보다 크다면 균열이 진전한 다는 것이다. Griffith의 취성파괴이론(theory of brittle fracture)에서는 균 열의 미소 성장에 대한 에너지적 고찰에서 균열의 진전조건을 두고 있다. 그 후 1940년대 Irwin은 이 이론을 연성재료로 확장시켰다. 그는 새로운 균열표면에 발생하는 표면에너지에 소성변형으로 인한 에너지가 추가되어 야 한다고 가정했다. 그는 연성재료에서는 표면에너지의 항은 소성에너지 의 항에 비해서 무시할 수 있다고 판단했다. 또한, 그는 변형률에너지 해방 률(strain energy release rate) 또는 균열진전력 G를 정의했는데 이것은 균열진전 동안의 단위길이당, 단위 두께당 흡수된 전체에너지이다. 또 Irwin은 균열선단 근방에서의 응력장 및 변위장을 나타내기 위한 파라메터 로서 에너지해방률과 일대일로 대응하는 응력확대계수(stress intensity factor) K를 정의하였다.

Griffith와 Irwin 의 연구에 기초한 그 후의 연구는 소규모 항복조건을 만족시킨 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics)으로 발전하 여 현재에는 구조물 파괴를 방지하기 위한 유력한 공학적 방법으로서 정착 하고 있다. 한편 고인성의 중저강도강에서와 같이 균열선단 근방에 대규모

- 5 -

의 소성변형을 일으키는 파괴형태가 있으며, 이와 같은 파괴양식을 탄소성 파괴(plastic deformation fracture) 또는 연성파괴(ductile fracture)라고 부 르고 있다.

탄소성 파괴에서는 소성영역의 영향을 무시할 수가 없기 때문에 취성파 괴에서 정의한 K나 G가 그 유효성을 잃는다. 그 때문에 탄소성 파괴에서 균열진전 조건으로서는 J적분이 Rice에 의해 제안되어 응용연구가 실시되 고 있다. 이 J적분의 물리적 의미는 에너지 해방률을 나타내며 선형탄성 상태에서는 G와 등가의 물리량으로 된다. 그 밖의 파괴조건으로는 COD(crack opening displacement), R6법 등이 제안되어 연구를 하고 있다. 또한 불안전파괴의 연구가 주목을 끌고 있는데 LBB 연구에서 배관의 불 안정 파괴의 발생을 정확히 예측하는 것은 중요한 문제로 되어있으며 Paris등은 연성 불안정 파괴의 발생조건으로 티어링 불안정(tearing instability)기준을 제안하였다.

구조물 파괴에서는 관성력이나 변형속도의 영향을 무시할 수가 없는 파 괴현상이 존재한다. 이와 같은 파괴현상을 동적 파괴라 부르며 실험적, 이 론적인 면에서 널리 연구되어 왔다.

파괴역학은 대부분의 파괴현상을 실험적, 이론적 방법에 의해 해명하는 학문이다. 현재까지의 파괴역학 연구를 변수 및 파괴조건에 따라 분류해 보면 다음과 같이 Table 2-1으로 나타낼 수 있다.

또 파괴역학은 크게 결정론적 파괴역학과 확률론적 파괴역학으로 분류할 수 있다. 결정론적 파괴역학에서는 존재하는 균열의 진전조건이나 균열전 파 속도 등을 직접 구하는데 대하여 확률론적 파괴역학은 관련하는 요소의 불확정 인자를 고려한 파괴확률 등을 평가하는 것이다.

Fracture mechanic parameter	Fracture condition	Limited condition
Strain energy release rate $G{=}{-}\frac{\partial U}{\partial A}$	$G = G_c$	$G_{\!c}(=2\gamma_s)$ Surface energy by Griffith crack resistance force by Irwin
Stress intensity factor K	$K_I = K_{Ic}$	$egin{array}{c} K_C \ K_{Ic} \end{array}$
Crack tip opening displacement ${oldsymbol{\delta}}$	$\delta = \delta_c$	$\delta_c$ critical crack tip opening displacement
Stretch zone width: <b>szw</b> Stretch zone width: <b>szd</b>	$(szw) = (szw)_c$	$\left(szw ight)_{c}$ Critical stretch zone width
J-integral J	$J=J_c$	$J_{Ic} = \frac{J_{Ic}}{\frac{(1 - v^2)K_{Ic}^2}{E}}$ $(J_{Ic}^{-\text{test}})$
Tearing modulus $T = \frac{\partial J}{\partial A}$	$T_{App} = T_{Mat}$	JI F
	aus	/

Table 2-1 Classification of fracture mechanic parameter

### 2.2 선형파괴역학<sup>(11~13)</sup>

구조물이나 기계의 설계 또는 사용에 있어서 강도상 안전한지를 추정하 는 수단으로 종래는 재료역학이 중요한 역할을 하여 왔다. 그러나 재료역 학적 방법에서는 응력집중계수나 노치 근방의 응력집중을 고려하고 있으나 예리한 균열상의 결함이 구조부재 또는 기계부품 속에서 발견되는 경우는 그 결함을 제거하는 방법, 또는 제거 할 수 없으면 결함발생 구조부재 또 는 부품을 즉시 교환한다는 전제 하에 그 이상의 대책은 강구되지 않았다. 그러나 결함검사 기술의 진보에 따라 대형구조물 또는 기계류에서 많은 미 소결함이 검출됨에 따라 이러한 미소결함에 대해서 그것을 포함하는 부재 또는 부품을 즉시 교환하는 일은 매우 비경제적이며, 또한 미소결함에서 즉시 부재전체의 파괴가 발생하는 것은 아니므로 불합리하기도 하다. 이것 은 종래의 재료역학이 균열상의 결함에 대하여 아무런 고려를 해오지 않았 기 때문에 생기는 문제들이다. 이러한 중요한 문제를 해결함에 있어 최근 에 현저한 발전을 본 분야가 파괴역학이다. 즉, 파괴역학<sup>(8)</sup>은 균열상의 결 함을 포함하는 구조물 또는 기계를 안전하게 사용하기 위한 방법이라 할 수 있다. 파괴역학은 균열을 포함하는 부재의 응력해석과 파괴인성 시험이 라는 두 개의 기둥으로 성립되며, 따라서 기본적으로는 구조물의 응력해석 과 재료시험 두 가지로 이루어지는 재료역학적 방법의 일부라고 할 수가 있다. 즉, 재료역학에서는 구조물의 응력집중부 등에서 최대응력 (Omax)를 응력해석에 의해 구하며, 이것과 재료시험에서 얻어진 재료강도 파라메터 로부터

$$\sigma_{\max} \le \sigma_Y / S \tag{2.1}$$

- 8 -

가 되도록 설계를 한다, 여기에서 S는 안전율(safety factor)이며, 외력을 추정 할 때의 부정확성, 구조물의 모델화와 응력해석에 의해 생긴 오차 및 재료 자체의 강도의 분산 등을 고려하여 각각의 입장에서 경험적으로 정하 고 있다. 균열둘레의 탄성응력장은 일반적으로 ( $\sigma_{max}$ )가 무한대로 되기 때 문에 식(2.1)을 그대로 적용할 수는 없다. 따라서 균열근방의 탄성응력장을 특정 짓는 파라메터 K를 사용하여 식 (2.2)와 같이 취성파괴(brittle fracture)를 방지하는 조건을 기술하려는 입장을 소위 선형파괴역학(linear elastic fracture mechanics)이라고 부르는 것이다.

여기서 파라메터 K 및 K<sub>c</sub>는 각각 응력확대계수(stress intensity factor) 및 파괴인성(fracture toughness)이라 부르고 있다.

 $K \leq K_c/S$ 

균열선단 근방의 응력장은 기본적으로 세 가지 형태로 분류할 수 있다. 그 각각은 Fig. 2-1과 같은 세 가지 독립적은 방법으로 변형된다. 모드 I 은 열림형(opening mode)으로 (x, y)와 (y, z)평면에 대하여 대칭성을 가지 며 균열면이 서로 떨어지는 변형을 한다.

모드Ⅱ는 미끄럼형(sliding mode)으로 (x, z)평면에 대하여 비대칭이나 (x, y)평면에 대해서는 대칭성을 가지며 미끄러지는 변형이 일어난다. 모드 Ⅲ은 찢음형(tearing mode)으로 (x, y)평면과 (x, z)평면에 대해서 비대칭 성으로 균열면이 서로 z에 평행하게 미끄러지는 변형을 한다.

이러한 세 개의 기본적인 변형양식을 적당히 조합함으로써 균열선단 근 방의 임의의 변위장을 기술할 수 있다. Fig. 2-2에 나타나듯이 균열선단에 직각좌표 (*X*, *Y*, *Z*)또는 원주좌표 (*y*, *θ*, *z*)를 생각할 때 좌표 (*y*, *θ*)에 있어 서 x, y, z에 관한 응력성분 σ<sub>ij</sub>(*i*, *j* = *x*.*y*, *z*)는 어느 균열의 변형양식에 대 해서도 *y*<sup>(n-1)/2</sup>(*n* = 0, 1, 2, ...) 의 무한급수로 다음과 같이 주어진다.

(2.2)

$$\sigma_{ij} = (C_1/\sqrt{\gamma})f_{ij}^{(1)} + (C_2/\sqrt{\gamma})f_{ij}^{(2)} + (C_3/\sqrt{\gamma})f_{ij}^{(3)} + \cdots$$
(2.3)

C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 균열의 변형양식, 균열재의 형상치수, 경계조건에 의해서 결정되는 것으로 γ, θ에는 관계가 없다.  $f_{ij}^{(1)}(\theta), f_{ij}^{(2)}(\theta) \cdots = \theta$ 만의 함수이고, 균열의 변형양식 및 각 응력성분에 의해 결정되는 응력의 θ방향 분포를 주는 고유함수이다. 지금 균열선단의 아주 가까운 곳의 응력을 생각하면 위의 식에서 γ를 θ에 점근시켜감에 따라서 제1항이 제2항 이하에 비하여 아주 크게되고, 제2항 이하는 상대적으로 무시될 수 있으므로 응력은 제1항만으로 근사시킬 수 있다. 즉,

$$\sigma_{ij} = (C_1/\sqrt{\gamma})f_{ij}^{(1)}(\theta)$$

(2.4)

이 제1항의 계수  $C_1$ 에  $\sqrt{2\pi}$ 를 곱한 값  $(C_1\sqrt{2\pi})$ 을 K로 나타내고 응력확 대계수라고 부른다. K를 사용하면  $\sigma_{ij}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다,

$$\sigma_{ij} = (K/\sqrt{\pi\gamma}) f_{ij}^{(1)}(\theta)$$

(2.5)



Fig. 2-1 The three modes of cracking

위의 식에 의해 균열선단의 응력은 균열선단에서 무한대로 되는 특이 응 력장이고, K는 이 특이응력장의 강도를 나타내는 계수이다.  $f_{ij}^{(1)}(\theta)$ 는 균열 의 변형양식 또는 응력성분마다 정해진 계수로서, 균열선단 근방의 응력 절대값은 균열재와 형상치수와 경계조건에 의해서 결정되는 응력확대계수 K에 의해 완전히 결정된다. 즉 K값이 같다고 하면 균열재의 형상치수, 경 계조건이 달라도 균열선단 근방의 응력상태들은 일치한다.

응력확대계수 K를 Fig. 2-1에 나타난 세 개의 기본적인 변형양식 각각 에 대해 표현하면 다음과 같다. 모드 I 과 모드 II는 탄성론의 2차원 평면문 제로서 해석 할 수가 있고 균열면에 관해서 각 대칭부분으로 해석할 수 있 으며 균열면에 관해서 각 대칭부분으로 나누어진다. 모드 III는 순수전단 또 는 비틀림 문제로 생각할 수 가 있다. 좌표 및 응력성분에 관해 Fig. 2-2 의 기호를 사용하면 응력과 변위는 아래와 같이 되고 있다. 다만 균열선단



Fig. 2-2 Coordinate system and components ahead of a crack tip

Mode I

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos\frac{\theta}{2} (1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{2\theta}{2})$$
(2.6)

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{2\theta}{2}\right) \tag{2.7}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}$$
(2.8)

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \tag{2.9}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \tag{2.10}$$

$$u = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \cos\frac{\theta}{2} (1 - 2\nu + \sin^2\frac{\theta}{2}) \tag{2.11}$$

$$v = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin\frac{\theta}{2} (2 - 2\nu - \cos^2\frac{\theta}{2})$$
(2.12)

$$w = 0 \tag{2.13}$$
Mode II

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos\frac{\theta}{2} (2 - \cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2})$$
(2.14)  
$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2})$$
(2.15)

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)$$
(2.16)

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \tag{2.17}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \tag{2.18}$$

$$u = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin\frac{\theta}{2} (2 - 2\nu + \cos^2\frac{\theta}{2})$$
(2.19)

$$v = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin\frac{\theta}{2} (-1 + 2\nu + \sin^2\frac{\theta}{2})$$
(2.20)

$$w = 0 \tag{2.21}$$

 ${\rm Mode}\ {\rm I\!I}$ 

$$\tau_{xx} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \sin\frac{\theta}{2} \tag{2.22}$$

$$\tau_{yx} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos\frac{\theta}{2} \tag{2.23}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \tag{2.24}$$

$$u = v = 0 \tag{2.25}$$

$$w = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin(\frac{\theta}{2}) \tag{2.26}$$

여기서 ν는 프와송비(Poison ratio)이고, μ는 전단계수이다.

식 (Mode I)~(Mode II)는 평면 변형률(plane strain)(즉  $\omega = 0$ )인 경우 지만 평면 응력(plane stress)의 경우에는 이러한 식에서  $\sigma_z = 0$ 으로 두고, 또 변위를 나타내는 식 중의 Poison 비를  $\nu/(1+\nu)$ 로 바꾸어 놓음으로써 간단히 구할 수가 있다. 식 (Mode I)~(Mode III)은 y에 관한 고차의 항 을 무시함으로서 구해진다. 따라서 이러한 식은 y가 균열 길이라든가, 리가 멘트 길이 등 X-Y면 내에서 이 물체에 관계한 치수에 비하여 충분히 작 은 경우에 좋은 근사를 주는 것이 가능하다. 또 y가 제로인 극한에서는 이 것들은 엄밀해로 되고 있다.

이들 식 중의 파라메터 K<sub>I</sub>, K<sub>II</sub>, K<sub>III</sub> 등은 각각의 형에 대한 변위장과 응력 장에 대응하는 응력확대계수(stress intensity factor)라 부르고 있다. 이 응 력확대 계수는 좌표 y, θ에 의존하지 않는다. 따라서 각각의 변형양식에 대해서 응력장의 강도에는 영향을 주는데 분포의 형에는 영향을 주지 않는 다는 점에 주의를 해두는 것이 중요하다. 식 (Mode I)~(Mode III)을 차 원해석의 입장에서 바라보면 탄성체의 경우, 응력확대계수는 외력의 크기 에 비례하고, 또 균열을 포함하는 물체의 형상에 의존하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 물리적으로는 응력확대 계수는 물체 중에 균열을 도입함

- 13 -

으로써 응력을 재분배, 특히 균열의 변형양식과 균열선단부를 통과하는 힘 의 크기를 나타내는 파라메터라고 생각할 수가 있다.

이상과 같은 선형 탄성론에 의한 특이 응력장의 강도 K를 기본으로 하는 역학체계를 선형파괴역학이라 한다.



#### 2.3 피로균열전파특성<sup>(14)</sup>

금속재료는 반복하중을 받으면 피로손상이 생기고 저응력에서도 파단에 이르는 것이 잘 알려져 있는데 이 피로과정의 오랜 연구에서 피로과정 대 부분은 피로균열의 발생, 성장에 소비되는 것으로 인식되어 이 피로균열의 전파에 착안한 파괴역학적 방법이 유력한 정량적 평가 방법으로서 주목되 어 활발한 연구가 진행되고 있다. 평활재의 피로과정을 대략적으로 Fig. 2-3과 같이 되고 평활표면에서 전단형의 균열 내지 미끄럼이 수명초기에 발생하여 마침내 기구형의 안전성장으로 이행하여 스트라이에이션 (striation)을 형성하면서 성장 후 취성 내지 연성파괴를 교차시키면서 급속 파단에 이른다. 파괴역학에서는 이 제 2단계의 스트라이에이션을 수반하는 피로균열의 전파과정을 대상으로 하여 그 전파율 da/dN을 파괴역학 파라 미터로 특성 짓는다. 이 균열에 대하여 소규모 항복조건이 만족되면 그 성 장속도는 ΔK로 특성 짓게 되는 것을 알 수 있다.

이 전파특성은 3영역으로 나눈다. *ΔK*가 작은 영역에서는 그 이하에서 균열이 성장하지 않는 하한계 *ΔK*<sub>th</sub>가 존재하고 그 근방에서의 균열성장 속 도는 급속히 감소한다. 이 영역에서는 재료, 환경, 응력비의 영향이 현저하 게 된다. 이 영역에서는 로그 좌표 그림 상에서 직선적으로 변하고 통상 다음의 Paris-Erdogan 법칙으로 나타낸다<sup>(15)</sup>.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{2.27}$$

이 법칙의 제 2단계 영역에서는 비교적 각종인자의 영향이 적고, *C와 m* 은 재료 상수로 간주할 수 있다. 단, *C와 m*은 독립이 아니라 어떤 종류의 상관관계가 있으며 또 취성재료일수록 *m*은 크고, 연성이 크게 되면 *m*=2에

- 15 -

가깝게 되는 경향이 있다. 또한, K가 큰 영역에서는 이 직선 관계에서 이 탈하며 급속한 성장이 나타난다. 이 영역에서는 취성파괴 내지 연성파괴가 혼재하며 그 성장특성이나 급속파단 조건은 파괴인성과 마찬가지로 시험편 형상 및 치수의 영향을 받으므로 주의가 필요하다.



Fig. 2–3 Fatigue fracture process in plate specimen or growth rate characteristic and effective factor



Fig. 2-4 Time variation of stress intensity factor and load

Fig. 2-4와 같이 하중 또는 응력이 시간에 대하여 변화하면, K도 시간에 대하여 변화하는데 K의 변동범위인 ΔK뿐만 아니라 그 평균치도 피로에 당연히 영향을 미친다. K의 변동범위인 ΔK뿐만 아니라 그 평균치도 피로 에 당연히 영향을 미친다. 그 대표량으로 다음과 같은 응력비 R을 사용한 다.

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$
(2.28)

따라서 식을 일반화하면 *AK*와 *R*의 함수로서 전파법칙으로 다음 Walker의 식이 간편성 때문에 잘 사용된다.

$$\frac{da}{dN} = CK_{\max}(1-R)^{n^m} = C\Delta K(1-R)^{n-1^m}$$
(2.29)

여기서 n은 0.3~0.7정도의 값이 되고, 주로 강재의 피로균열 성장특성에 적용되고 있다. 피로균열의 진전은 제 Ⅰ단계와 제 Ⅱ단계로 구별된다. 앞 에서 설명했듯이, 소규모 항복조건하에 균열선단의 소성변형은 선형파괴역 학 파라미터의 하나인 응력확대계수(stress intensity factor) K로 규정된 다. 따라서, 비교적 소규모 항복조건을 만족하기 쉬운 제 Ⅱ단계 균열의 진 전속도 *da/dN* 은 K의 함수로 표시될 수 있다. 지금 반복응력의 최대값, 최소값을 Omax, Omin으로 할 때, L의 최대값 Kmax와 최소값 Kmin은 아래의 식으로 나타낸다.

$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \bullet F \tag{2.30}$$

 $K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \bullet F \tag{2.31}$ 

여기서, a는 균열길이, F는 시험편과 균열의 형상, 치수, 부하방법 등에 의 한 K의 보정계수이다. 따라서, K의 변동범위 ΔK(stress intensity factor range)는 식 (2.32)와 같다.

$$\Delta K = K_{\rm max} - K_{\rm min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \bullet F \tag{2.32}$$

여기서,  $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 이다.

Paris 와 Erdogan은 △K에 의해 da/dN가 아래의 함수로 표시될 수 있 음을 식 (2.27)에 밝혔다.

이 식을 일반적으로 Paris-Erdongan 법칙 또는 Paris법칙이라 부른다. 여기서, C와 m은 재료상수이다. 알루미늄 합금에서의 실험결과를 정리해 보면 m= 4 이며, 그러나 그 후 m은 대개 2~9의 범위를 가지는 결과를 보 이고 있다. 그 후에 실시된 많은 실험에서 식(2.27)은 특정의 범위에서만 성립되고 da/dN~ AK관계도 Fig. 2-5와 같이 3개의 영역으로 나타나는 것으로 밝혀져 있다. Fig. 2-5의 좌측의 제 Ⅱa 단계에서는 ΔK의 감소와 함께 da/dN은 급격히 감소하고 균열의 진전이 사실상 없는 것으로 인정되 는 ΔK의 감소와 함께 da/dN은 급격히 감소하고 균열의 진전이 사실상 없는 것으로 인정되는 △K에 이른다. 이 △K를 하한계 응력확대계수범위 (threshold stress intensity range)  $\Delta K_{th}$ 라 부른다. 우측의 제 II c 단계에서 는  $\Delta K$ 의 증가에 따라서 da/dN은 급속히 증가하고,  $K_{\max}$ 가 파괴인성 Kc에 이르면 불안정 파괴한다. 이 Kc는 일반적으로 정적인 파괴인성보다 낮 고 피로파괴 인성(fatigue fracture toughness)  $K_{fc}$ 라 부르는 경우도 있다. 양측을 제외한 중간의 제Ⅱb 단계에서는 균열은 안전하게 진전하고, Paris 법칙인 식 (2.27)이 잘 성립한다. 다음에 제Ⅱa~제Ⅱc 단계의 균열진전속 도에 영향을 주는 인자와 특징을 간단히 정리해서 나타낸다.

제Ⅱa 단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 환경의 영향이 크다. 시험편 치수의 영향은 없다. 파면에는 미시조직에 대응하는 흔적이 보이고 불연속 인 진전을 하고 있다고 생각된다. 균열닫힘이 현저하게 생기는 수가 많다.

제Ⅱb 단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 시험편의 치수의 영향은 적고 거의 영률에 의존하고 있다. 파면은 스트라이에이션이 주이고, 이 간격에 대응하는 연속진전을 하고 있으며, 균열닫힘이 일어나는 수가 많다.

제Ⅱc 단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 시험편의 치수의 영향이 크나 환경의 영향은 적다. 파면에는 딤플, 벽개, 입계 등 정적파괴가 점하는 비 율이 50%이상이 되고 진전속도는 점차로 ΔK에서 K<sub>max</sub>에 지배된다. 균열 닫힘은 보이지 않는다.



 $\log \Delta K$ 

Fig. 2–5 Between factor crack growth rate and stress intensity factor range

이와 같이 각 단계에 미치는 영향인자가 다른 것을 알 수 있다. 일례로 서, 미시조직 및 응력의 영향, 응력비(stress ratio or load ratio) *R*로 나타 낸다.

σ<sub>min</sub> < 0, 즉 < 0의 경우에는 ΔK=K<sub>max</sub> 가 일반적으로 사용되지만, 압
축 측도 포함한 전 응력범위에 대해 식 (2.6)과 같은 형식으로 구한 ΔK가
사용되는 수도 있으므로 주의를 요한다. 미시조직과 응력비는 저 및 고
ΔK영역, 즉 제 Πa 단계와 Πc 단계의 균열 진전에 크게 영향을 주고, 중
간의 제 Πb 단계에서는 영향이 적다는 것이 알려져 있다.



#### 2.4 신뢰성 이론에 기초한 확률모델

 $C_1$ 

 $C_{2}(a)$ 

C(a)

파괴역학에 근거한 피로균열전파거동을 평가하는 식에는 여러 가지가 있 지만, 현재 가장 널리 사용되는 식 (2.27)의 Paris-Erdogan 식을 이용하였 다.

신뢰성 이론에 기초한 피로균열전파를 확률변수화 하는 방법에는 크게 세 가지로 나눌 수 있다<sup>(16,17)</sup>. 첫째로, 파라메터치가 시험편간 변동하는 방법 둘 째로, 파라메터치가 동일 시험편 내에서만 변동하는 방법 그리고 셋째로 파 라메터치가 동일 시험편내에서 변동하고 동시에 시험편간에서도 변동을 고 려하는 방법이다.

즉, 기존의 Paris-Erdogan 식에서 재료 상수 C를 다음과 같이 모델화 한 다.

(2.33)

여기서 a는 균열선단에서의 위치(균열길이)를 나타내고, C<sub>1</sub>은 다른 시험편 간의 편차를 나타내는 양의 확률 변수이고, C<sub>2</sub>는 동일 시험편 내에서의 편 차를 나타내는 하나의 확률과정이라 가정한다. 분모안의 확률적 용어는 Madsen 이 일찍이 제안한 것과 일치한다<sup>(18)</sup>. 따라서 Paris-Erdogan식을 다 음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1}{C_2(a)} (\Delta K)^m \tag{2.34}$$

여기서, *C*<sub>1</sub>과 *m*이 고정 되었다고 하면 각 시험편 내에서의 피로균열전파의 변동을 나타낸다. 이 식으로부터 재질의 공간적 변동을 하나의 확률과정으 로 취급하는 것이 가능하다.

식(2.34)에 의한 각 시험편간 파라메터치의 추정은 Paris 식에 의해 응력 확대계수범위와 피로균열전파율과의 관계 데이터를 회귀자승법에 의한 커브 피팅 함으로써 *m*<sub>j</sub>와 *C*<sub>1j</sub>를 구할 수 있다.

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right)_{j} = \log(C_{1j}) + m_{j}\log(\Delta K) + \zeta_{j}(a)$$
(2.35)  
여기서, 잔차  $\zeta_{j}(a) = -\log(C_{2j}(a))$ 이다.  $\zeta_{j}(a)$ 에 대하여 정리하면 다음과 같  
다.  
$$\zeta_{j}(a) = \log\left(\frac{da}{dN}\right)_{j} - \log(C_{1j}) - m_{j}\log(\Delta K)$$
(2.36)

계수 *m<sub>j</sub>*와 *C<sub>lj</sub>*는 최소자승법에 의하여 간단히 계산할 수 있다. 또한 *C<sub>2j</sub>* 에 대한 재질의 공간적 변동도 식(2.36)를 통해 구할 수가 있다. 일정응력진폭시험하에 대하여 식(2.34)을 수정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dN = \frac{C_2(a)}{C_1(\Delta K)^m} da \tag{2.37}$$

식(2.37)에서 적분을 취해 N(a)에 대하여 나타내면 식 (2.38)과 같다.

$$N(a) = \int_{a_0}^{a_f} \frac{C_2(a)}{C_1(\Delta K)^m} da$$
(2.38)

C<sub>2</sub>(a)는 하나의 확률과정이고, 적분은 확률적분이 된다. 그리고 N(a)는 하 나의 확률변수이다. C<sub>1</sub>과 m은 하나의 동일 열처리 재질의 시험편에서는 일 정하고, C<sub>2</sub>만의 통계적 양상에 의하여 잔여수명을 예측하는 것이 가능하다.



### 2.4 Weibull 분포<sup>(19~21)</sup>

Weibull분포는 1939년 강구 재료의 파괴 연구에 대해서 스웨덴의 W. Weibull<sup>(19)</sup>이 고안한 분포로 오늘날 신뢰성공학에 있어서 가장 많이 사용 되고 있는 확률분포 중의 하나이다. Weibull분포는 다음과 같은 확률분포 함수를 갖는 분포이다.

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha}\right\} \quad (x-\gamma \ge 0)$$

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta-\gamma} \left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha}\right\}$$
(2.40)
(2.41)

여기서, α는 분포의 형상을 특정짓는 형상 계수(shape parameter)이다. β 는 특수한 수명을 나타내는 척도 계수(scale parameter)이다. γ는 위치(또 는 최소수명)를 나타내는 위치계수(location parameter)이다. 그리고 α는 무차원의 량이고 β,γ는 각각 x와 동일한 차원의 량이다.

이들을 3-parameter Weibull 분포라 부르고, 특히 γ=0의 경우를 2-parameter Weibull분포라 한다.

한편 Weibull분포의 신뢰도 함수와 고장률 함수는 각각 다음 식과 같다.

$$R(x) = 1 - F(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\beta - \gamma}\right)^{\alpha}\right]$$
(2.42)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}$$
(2.43)

α < 1,α=1,1 < α로 가정하면 그때의 확률밀도 함수는 Fig. 2-11 에서와 같이 시간적으로 감소, 일정(지수분포), 상승의 세 가지로 대응시킬 수 있 다.

α < 1 에서는 신뢰도는 지수보다 더욱 더 급격히 떨어진다. 또, 1 < α에 서 α가 크게되면 고장은 차차 집중적으로 일어나고 α=2~4 정도에서는 정규분포에 가깝다.

이 분포의 평균수명과 분산은 다음 식으로 나타난다.



Fig. 2-6 Failure density function of Weibull distribution

또, 평균수명 M 및 고장율식은 다음과 같다.

$$M = \beta (\ln 2)^{1/\alpha} \tag{2.46}$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta^{\alpha}} t^{\alpha - 1} \tag{2.47}$$

 $\left[\Gamma\left(1+\frac{1}{\alpha}\right)
ight]$  혹은  $(\ln 2)^{1/\alpha}$ 는  $\alpha$ 가 1보다 큰 영역에서는 거의 0.8~1에 가까 운 값이 된다.  $\beta$ 를 사용하면  $R(t) = e^{-(t/\beta)^{\alpha}}$ 이기 때문에  $t = \beta$ 일 때  $R(\beta) = e^{-1} = 36.8\%$ 가 된다. Weibull 분포는 직관적으로 지수분포의 확장임 은 확실하다. 이 분포가 흔히 사용되는 이유는 적용범위가 넓고 더욱이 모 수의 추정을 확률치에 의해서 비교적 간단히 행할 수 있기 때문이다.



### 제 3 장 시험편 및 실험 방법

#### 3.1 재료 및 시험편

#### 3.1.1 실험재료

본 연구에 사용된 API 2W Gr. 50 강재는 국내 P사에서 개발한 해양구 조물용 고장력강재로서 높은 항복강도가 요구되는 대형 컨테이너 운반선의 극후판에 사용된다<sup>(22)</sup>. 또한 해양구조물인 TLP(tension leg platform)를 구 성하는 구조부재들 중 Tendon에 부착되는 Tendon porch는 이의 파괴가 구조물 전체의 구조적 안전성에 치명적인 영향을 주기 때문에 'special category'로 분류되는 가장 중요한 구조부재중 하나로 알려져 있어, 이 부 분에 고강도와 저온에서도 고인성을 가지는 API 2W 강재를 사용해서 제 작되고 있다<sup>(23)</sup>.

API 2W Gr. 50 강재는 TMCP(Thermo Mechanical Control Process)법 을 적용한 강재로서, 이것은 가공 열처리 또는 열가공 제어법이라고 불리 고 있다. 즉 강재의 압연시 온도를 제어하는 제어압연을 기본으로 하고 그 후 공랭 또는 수냉에 의한 가속 냉각법을 이용하여 원하는 강재의 기계적 성질을 확보하는 것이다. 강재의 강화기구가 합금원소에 기인한 것이 아니 고, 강의 저온변태조직을 이용한 것으로 제어압연을 통하여 미세한 페라이 트(ferrite)조직을 얻을 수 있어 고인성확보가 가능하며 제어냉각으로 베이 나이트(bainite)조직을 분산한 고강도 강재이다.

일반적으로 강재의 인장강도가 커질수록 탄소함유량이 많아지는데 탄소 함량이 많다는 것은 취성적인 성질을 가지게 되어 열에 약한 특성을 가지 게 되어 용접성이 떨어지게 된다. 그런데 TMCP강은 탄소당량(carbon
equivalent)이 낮음에도 불구하고 높은 인장강도를 발휘하고 낮은 탄소당량 으로 용접성을 개선하고 강재의 두께가 증가하더라도 항복강도의 저하가 없도록 강재의 특성을 향상시킨 것이다. 즉, TMCP는 제어압연으로 확보한 야금학적 특성을 유지시키면서 상변태도 제어하여 저탄소당량(Ceq)일지라 도 TMCP에 의해 높은 인장강도와 항복강도를 확보할 수 있다.

본 연구에 사용된 API 2W Gr. 50 강재의 화학적 조성 및 기계적 성질 을 Table 3-1 및 Table 3-2에 각각 나타낸다.

Table 3-1	Chemical	compositions	of materials	(wt.	%)
-----------	----------	--------------	--------------	------	----

	C Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	
API 2W Gr.50	0.08 0.027	1.44	0.011	0.001	0.01	0.02	0.01	0.018	0.019	
Table 3-2 Mechanical properties of materials										
API Gr	2W .50	Te: Stro o <sub>t</sub> (I	nsile ength MPa)		Yie Stren o <sub>y</sub> (M	eld ngth IPa)	E	longat E (%	tion )	
Base material (BM)		531			447			41.0		
Weld material (WM)		634			601			38.0		
Heat Affe	ected Zone	cted Zone			474			41.6		

#### 3.1.2 FCA 용접방법 및 절차

후판 및 해양구조물의 조립에는 일반적으로 다층 용접이 사용되고 있다. 해양구조물용 강재의 대표적인 용접법에는 SMAW(Shielded Metal Arc Welding), SAW(Submerged Arc Welding), GMAW(Gas Metal Arc Welding) 그리고 FCAW(Flux Core Arc Welding)가 있다. 그 중에서 FCAW는 자동화가 용이하고 용착 속도가 좋으므로 후판의 용접에 가장 많이 사용하는 방법중의 하나이다. 대부분 정도의 차이는 있겠지만 저온에 서의 샤르피 충격 성능 요구에 대응 가능하고, CTOD 요구에도 대응 가능 하다. 용접재료의 설계와 성능향상을 위해 특히 인성향상에는 저산소화와 함께 용접금속 조직의 미세화가 요구되고 있고, 이것은 강도에 관계없이 공통의 과제라 아니할 수 없다.

FCAW는 연속적으로 공급되는 플럭스가 내장된 와이어를 사용하고 CO<sub>2</sub> gas와 세경와이어속에 내장된 플럭스로서 용착금속을 보호할 뿐만 아니라 효율이 높고 전자세 용접이 용이하며 넓은 용접조건 범위에서 안정된 아크 를 얻을 수 있어 조선 공업의 대표적인 용접방법이다. 전체적인 구성은 아 래의 Fig. 3-1과 같다.



Fig. 3-1 Norm of FCAW

본 연구에 사용된 재료의 두께는 60mm이며, FCAW으로 동일재료를 가 지고 다층 맞대기 용접을 AWS A5.20 spec.에 따라 수행하였다. 재료를 전 면 용접후 후면 용접전에 뒷면 가우징(back gouging)을 하고 후면용접을 수행하였다. 용접조건은 Table 3-3 에 나타내었고 용접적층순서와 용접개 선형상은 Fig. 3-2와 Fig. 3-3 에 나타내었다.



Fig. 3-3 Shape of the X-groove FCA butt welded joint

		Size of			Type of	Treesel	Heat
_	_	filler	Current	Voltage	Lype of	Iravei	11000
Run	Process	metal	•	v	current/Pola	speed	input
		(mm)	А	•	rity	(mm/sec)	(kJ/mm)
1	FCAW	Φ1.3	224~235	30~32	DC / EP	4.49	1.34
2	FCAW	Φ1.3	220~230	30~31	DC / EP	5.63	1.01
3	FCAW	Φ1.3	227~235	30~32	DC / EP	5.93	1.02
4	FCAW	Φ1.3	208~217	30~31	DC / EP	6.78	0.79
5	FCAW	Φ1.3	200~215	30~32	DC / EP	6.45	0.87
6	FCAW	Φ1.3	206~210	30~31	DC / EP	5.63	0.92
7	FCAW	Φ1.3	204~212	30~31	DC / EP	5.80	0.91
8	FCAW	Φ1.3	200~207	30~32	DC / EP	5.26	1.01
9	FCAW	Φ1.3	200~204	31~32	DC / EP	5.71	0.91
10	FCAW	Φ1.3	200~214	31~32	DC / EP	6.25	0.88
11	FCAW	Φ1.3	202~212	30~31	DC / EP	7.84	0.67
12	FCAW	Φ1.3	200~209	30~31	DC / EP	6.96	0.75
13	FCAW	Φ1.3	201~212	30~31	DC / EP	6.45	0.81
14	FCAW	Φ1.3	202~210	31~32	DC / EP	5.63	0.95
15	FCAW	Φ1.3	204~208	30~31	DC / EP	6.06	0.85
16	FCAW	Φ1.3	200~206	30~31	DC / EP	6.67	0.77
17	FCAW	Φ1.3	20~205	30~32	DC / EP	6.56	0.80
18	FCAW	Φ1.3	201~206	31~32	DC / EP	7.77	0.68
19	FCAW	Φ1.3	200~204	30~31	DC / EP	7.14	0.71
20	FCAW	Φ1.3	201~209	30~31	DC / EP	6.06	0.86
21	FCAW	Φ1.3	204~212	30~31	DC / EP	5.26	1.00
22	FCAW	Φ1.3	201~207	30~31	DC / EP	6.67	0.77
23	FCAW	Φ1.3	203~206	31~32	DC / EP	6.56	0.80
24	FCAW	Φ1.3	200~204	30~32	DC / EP	7.08	0.74
25	FCAW	Φ1.3	200~208	31~32	DC / EP	6.06	0.88
26	FCAW	Φ1.3	206~212	31~32	DC / EP	5.06	1.07
27	FCAW	Φ1.3	200~205	30~31	DC / EP	6.25	0.81
28	FCAW	Φ1.3	200~205	30~31	DC / EP	6.25	0.81
29	FCAW	Φ1.3	200~204	30~31	DC / EP	5.06	1.00
30	FCAW	Φ1.3	201~206	30~31	DC / EP	5.80	0.88
31	FCAW	Φ1.3	200~208	30~31	DC / EP	6.25	0.83
32	FCAW	Φ1.3	206~210	30~31	DC / EP	6.06	0.86
33	FCAW	Φ1.3	204~208	30~32	DC / EP	6.96	0.77
34	FCAW	Φ1.3	200~206	30~32	DC / EP	6.96	0.76
				- B.C -	4/		
35	FCAW	Φ1.3	204~208	30~32	DC / EP	5.71	0.92
36	FCAW	Φ1.3	204~208	30~32	DC / EP	5.71	0.92
37	FCAW	Φ1.3	201~204	31~32	DC / RP	6.15	0.85
38	FCAW	Φ1.3	200~203	30~32	DC / RP	6.25	0.83
39	FCAW	Φ1.3	208~210	30~32	DC / RP	6.78	0.79
40	FCAW	Φ1.3	206~210	30~32	DC / RP	6.06	0.89
41	FCAW	Φ1.3	204~208	30~31	DC / RP	5.93	0.87
42	FCAW	Φ1.3	200~204	30~31	DC / RP	6.61	0.77
43	FCAW	Φ1.3	203~208	29~31	DC / RP	4.35	1.19
44	FCAW	Φ1.3	201~209	27~31	DC / RP	4.49	1.15
45	FCAW	Φ1.3	201~208	29~31	DC / RP	4.76	1.08
46	FCAW	Φ1.3	206~212	28~30	DC / RP	4.47	1.14

Table 3-3 Welding parameters on  $\operatorname{FCAW}$ 

#### 3.1.3 시험편

본 연구에 사용한 경도 시험편은 두께 60mm의 다층 FCAW 한 용접부 단면으로 Fig. 3-4에 그 형상을 나타내었다.

또한 본 연구에 사용된 피로균열전파시험편은 ASTM E647-08 규정<sup>(25)</sup> 에 의해 폭(W)는 50mm, 그리고 시험편 두께 12.5mm 인 CT(compact tension) 시험편이다.

시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 직각(L-T direction)이 되도록 하였다. 이것은 대부분의 많은 기계 구조물이 재료의 압연방향을 힘이 걸리는 방향으로 하고 있기 때문이다. 기계가공시 평면부는 열영향이 극소화 되도록 앤드밀과 정면커터를 사용하여 가공하였으며, 노치부는 방전가공으로 행하였다. Fig. 3-5와 같이 상부에서 2/3지점에서 용접재(WM), 열영향부(HAZ) 그리고 모재(BM)에 대하여 채취, 가공하였다. 그리고 CT시험편의 형상과 치수를 Fig. 3-6에 나타내었다. 또한 시험 편 사진의 예를 Fig. 3-7에 나타내었다.



Fig. 3-4 Hardness test specimen



Fig. 3-5 Illustration of specimen cutting from welded component



Fig. 3-7 Photo of fatigue crack growth test specimen

## 3.2 실험장치 및 방법

#### 3.2.1 실험시스템

경도 시험에 사용된 미소 비커스 경도 시험기(Micro Vickers hardness tester)는 Hitachi사의 HM-124 모델로 하중제어를 자동으로 수행 할 수 있 으며, 시험하중은 0.5g부터 2,000g까지 가능하고 가압시간(duration time)은 5초에서 99초까지 조절 가능하도록 되어 있다.

비커스 경도시험은 ASTM E384-10 규격<sup>(24)</sup>에 준하였으며 측정자의 오 차(error of the measurement)를 감소하기 위하여 동일 시험자가 경도시험 을 수행하였다. 시험하중의 조건은 하중 300g, 가압시간 10초로 두고 실험 을 시행하였다. 또한, 동일한 표면 거칠기를 갖도록 사포 800~2000으로 표 면 경면 연마를 하여 경도를 측정하였다. 본 실험에 사용된 경도 시험기의 형상을 Fig. 3-8에 각각 나타내었다.



Fig. 3-8 Micro Vickers hardness tester (HM-124)

피로균열발생시험에 이용한 시스템은 시험편에 하중을 부하하는 용량 100kN의 전기유압서보식 피로시험기(Instron Model 8821S)를 사용하였다. 서보 시험기를 움직이는 유압펌프, 실험의 제어 등을 행하는 마이크로 컴 퓨터, 그리고 주변기기 등으로 구성하였으며, 균열길이의 측정은 컴플라이 언스법을 사용하여 측정하였다. Fig. 3-9에 피로균열 전파시험에 사용한 시험기를 나타내었다.



Fig. 3-9 Fatigue test machine (Instron 8821S)

#### 3.2.2 균열전파율과 응력확대계수범위 결정

 $n_{i+1} - a_{i+1}$ 

 $N_{i+1}$ 

da

dN

균열길이가 0.2mm증가할 때마다 균열길이 *a*, 응력반복수 *N*, 응력확대계 수범위 △*K*, 최대하중, 최소하중, 최대개구변위, 최소개구변위 등을 하드디 스크에 자동적으로 기록하였다.

균열길이 a의 반복수 N 관계에서 피로균열전파율 da/dN를 결정하기 위 해 시컨트법(secant method)을 사용하였다. 이는 통상 널리 사용되는 방법 이며 인접하는 두 개의 데이터점을 직선으로 맺어 그 구배에서 da/dN를 결정한다. 즉 da/dN는 다음식으로 주어진다.

(3.1)

이 경우의 da/dN는 균열길이 증분  $a_{i+1}-a_i$ 에 대한 평균치이므로 평균균 열길이  $(a_{i+1}-a_i)/2$ 를 사용하여 △K를 계산한다.

한편, 균열선단의 응력확대계수범위 △K는 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left\{ C_0 + C_1 \frac{a}{W} + C_2 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + C_4 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right\}$$
(3.2)

 $C_0 = 0.886$   $C_1 = 4.64$   $C_2 = -13.32$   $C_3 = 14.72$   $C_4 = -5.6$ 

위 식은 a/W≥0.2에 대하여 유효한 식이다.

#### 3.2.3 실험조건

본 실험에 앞서 시험편의 가공에 의한 열적영향과 가공경화 등의 영향을 최소화하고 이상적인 실험조건을 만들기 위하여 실험실의 대기중에서 응력 반복속도 10Hz, 응력비 R=0.4의 정현과 조건에서 본 실험의 응력레벨보다 낮은 응력하에서(△P=9000N) 1.5mm의 예비균열(pre-crack)을 삽입한 후 실험을 행하였다.

피로균열전파 실험은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 하중범위 를 12000N, 14000N, 16000N, 18000N 으로 각각 조건을 달리하여 정현파 인장-인장 일정하중제어 방식으로, 모재부, 용접부 그리고 열영향부 각각 3 개씩 총 12개의 시험편에 대하여 동일 실험자가 동일의 하중 조건하에서 실험을 수행하였다. Table 3-4에서는 실험조건을 나타내었으며, Fig. 3-9에 는 실험조건에 대한 응력 범위의 개념도를 나타낸 것이다.

	ΔP (N)	$P_{\mathrm{amp}}$ (N)	P <sub>max</sub> (N)	$P_{\min} \ (N)$
Condition I	12000	6000	20000	8000
Condition II	14000	7000	20000	6000
Condition III	16000	8000	20000	4000
Condition IV	18000	9000	20000	2000

Table 3-4	Experimental	conditions
-----------	--------------	------------



Fig. 3-9 Load range for each experimental conditions

# 제 4장 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 경도 분포

Fig. 4-1은 용접부 중심으로부터 좌우로 20mm씩 0.5mm 간격으로 횡단 면 경도분포를 나타낸 것이다.

평균적으로 용접부의 경도가 약 HV 289정도로 나타났으며, 그림에서 알 수 있듯이 용접부에서의 경도값이 가장 크게 나타났다. 그 다음 열영향부 부분이 HV 261정도로 나타났으며, 모재부는 HV 226정도로 가장 낮게 나 타났다. 즉 용접부가 모재부보다 열에 의해서 더 단단하고 취성적인 특성 으로 변하였으며 조직이 더 치밀해진다는 것을 알 수 있다. 그리고 이것은 내부에서 결함이 생성되어 확장될 여지가 남아 있음을 의미한다. 또한 일 반적으로 비커스 경도값과 항복, 인장강도는 서로 비례한다고 가정하고 Table 3-2와 비교해 보았을 때 어느정도 경향이 일치함을 알 수 있다.

한편, 용접부는 용융하여 응고된 용접부와 열영향부, 모재부로 나누어지 며 각 영역은 서로 다른 불균일한 기계적 성질을 나타낸다. 그리고 이러한 불균일부는 피로균열전파와 수명에 상당한 영향을 미친다.





Fig. 4-2 Hardness distribution of API 2W Gr. 50

### 4.2 피로균열전파 거동

#### 4.2.1 피로균열전파 곡선

모재부 4개, 용접부 4개, 열영향부 4개 총 12개의 시험편에 대하여 최대 하중(*P<sub>max</sub>*)를 20000*N*으로 고정시키고, 각각 하중범위(△*P*)가 12000, 14000, 16000, 18000*N*의 조건에서의 CT시험편에 대하여 얻은 균열길이 *a*와 응력 반복수 *N*과의 관계를 Fig. 4-3에 나타내었다. 모든 시험편에 대하여 12mm에서 25mm까지 전과하는 것으로 하였다.

그림에서 보는 바와 같이 *a-N* 선도의 형태는 일정진폭하중피로시험의 곡선의 전형적인 특징을 보여주고 있다. 동일 균열길이까지 전파할때의 응 력반복수(*N*)은 모든 하중범위조건에서 열영향부가 가장 크게 나타났으며, 그 다음 모재부, 용접부 순서로 나타났다.

또한 하중범위가 증가할수록 응력반복수는 감소하게 되는 경향을 확인할 수 있다. 이는 균열전파의 구동력이 증가하면 피로균열전파율이 빠르게 진 행됨을 의미한다.



(b)  $\triangle P = 14000N$ 



Fig. 4-3 a-N curve for each specimen by loading range

#### 4.2.2 응력확대계수범위와 피로균열전파율과의 관계

Fig. 4-4는 모재부, 용접부 그리고 열영향부의 피로균열전파를 각각 하 중범위 조건에 따라 피로균열전파율(*da/dN*)과 응력확대계수범위(△*K*)와의 관계를 나타낸 것이다. 본 실험결과의 피로균열전파거동은 안정영역의 전 파단계인 Ⅱ영역의 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림에서의 실선 은 각각 시험편에 대하여 최소자승법을 사용하여 구한 회귀직선을 나타낸 다.

이들의 관계로부터 얻은 Paris석의 *C* 와 *m*값을 Table 4-1에 정리하였 다. 여기서의 *m*값은 실선의 기울기를 나타내고 log *C*는 Y축 절편을 나타 낸다. 그리고 하중범위와 재질별 *m*값과 log *C*값을 Fig. 4-5와 4-6에 각각 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각 직선의 기울기는 서로 다르고 동일 *ΔK*에서도 그 피로균열전파율이 다름을 알 수있다. 각각 모든 하중범 위 조건에서 *m*값의 크기는 열영향부가 가장 크게 나타났으며, 그 다음 모 재부, 용접부 순서로 크게 나타났고, log *C*값은 용접부가 가장 크게 나타 났다. 또한 하중범위가 12000*N*일 때 모든 부위에서의 *m*값이 가장 크게 나 타났음을 확인하였다.

	$\Delta P$		т		log C			
	(N)	BM	WM	HAZ	BM	WM	HAZ	
Condition I	12000	2.567	2.345	3.099	-7.441	-7.075	-8.290	
Condition II	14000	2.281	2.095	2.833	-7.011	-6.716	-7.981	
Condition III	16000	2.362	2.105	3.097	-7.188	-6.752	-8.479	
Condition IV	18000	2.362	2.319	2.760	-7.213	-7.079	-7.956	

Table 4-1	<i>m</i> and	log	C	values	for	each	specimen	by	loading	range
-----------	--------------	-----	---	--------	-----	------	----------	----	---------	-------



- 46 -



Fig. 4-4 da/dN versus  $\triangle K$  curves for each specimen by loading range



Fig. 4-5 m value for load range and each each specimen



Fig. 4-6 log C value for load range and each each specimen

# 4.3 하중범위가 재질의 공간적 변동에 미치는 영향

Fig. 4-7에서 Fig. 4-10은 균열길이(*a*)에 대한 *C*<sub>2</sub>의 변동을 모재부, 용접 부 그리고 열영향부를 각각의 실험조건에 대하여 나타낸 것이다. 이것은 시험편내의 확률적 변동이 공간적으로 어떻게 변화하는가를 보여주는 것으 로서 식 (2.44)에 대하여 *C*<sub>2</sub>값을 계산할 수 있고, 보다 쉽게 비교분석을 하 기위하여 0을 기준으로 표준화 시켜서 나타내었다. 즉 *C*<sub>2</sub>값은 각 시편 내 의 균열 성장률의 편차를 하나의 확률과정(random process)으로 모델링하 기 위한 변수로서 각각의 균열성장곡선의 평균적 거동은 재료파라메터인 *m* 과 *C*<sub>1</sub>, 그리고 계산되어진 *C*<sub>2</sub>를 Paris식에 적용함으로써 얻어질 수 있 다.

각각 동일한 하중범위 일때에 모재부, 용접부 그리고 열영향부의 균열길 이에 따른 재질의 공간적 변동을 비교해보면 열영향부가 0을 기준으로 했 을 때 변동이 가장 큰 것을 확인 할 수 있었고 그 다음 모재부, 용접부 순 으로 변동이 나타남을 알 수 있다. 이는 피로균열전파저항이 증가할수록 재질의 공간적 변동이 증가함을 알 수 있다.

또한 하중범위가 증가할수록 각 부위별로 재질의 공간적 변동은 점점 감 소하는 경향을 보이고 있는데 이것을 종합적으로 나타낸 것이 Fig. 4-11에 서 확인할 수 있다. 즉, 피로균열전파저항이 감소할수록 재질의 공간적 변 동 또한 작아짐을 의미한다.



Fig. 4-7 Variation of  $C_2$  by crack length for loading range 12000N



Fig. 4-8 Variation of  $C_2$  by crack length for loading range 14000N



Fig. 4-9 Variation of  $C_2$  by crack length for loading range 16000N



Fig. 4-10 Variation of  $C_2$  by crack length for loading range 18000N



Fig. 4-11 Variation of  $C_2$  by crack length for BM, WM and HAZ

## 4.4 하중범위에 따른 피로균열전파율의 영향

Fig. 4-12~Fig. 4-16은 균열길이에 따른 피로균열전파율을 나타낸다. 예 비균열을 제외한 12mm부터 25mm까지의 각 하중범위에 따라 나타낸 것이 다.

각각 하중범위 내에서 피로균열전파율은 용접부가 가장 크게 나타났으며 열영향부가 가장 전파율이 낮게 나타났다. 이는 피로균열전파저항과 시험 편 내의 공간적 확률변동이 용접부가 가장 낮아서 기인된 결과라 사료된 다.

또한 하중범위가 증가할수록 피로균열전파율은 확연하게 증가하게 됨을 보이고 있다. 12000N 일때는 각 부위별 피로균열전파율의 차이가 명확하 게 나타나지는 않지만 18000N의 경우에는 각 부위별 전파율이 가장 크게 증가함을 육안으로도 확인 할 수 있다. 이것을 Fig. 4-16에 종합적으로 보 여주고 있다. 한편 균열길이가 진전될수록 전파율은 점점 증가하는 경향을 보였으며 이것은 하중범위가 증가할수록 더욱더 뚜렷하게 나타났다.

Wall of m



Fig. 4-12 Fatigue crack growth rate by crack length for loading range 12000N



Fig. 4–13 Fatigue crack growth rate by crack length for loading range 14000N



Fig. 4-14 Fatigue crack growth rate by crack length for loading range 16000N



Fig. 4-15 Fatigue crack growth rate by crack length for loading range 18000N



Fig. 4-16 Fatigue crack growth rate by crack length for BM, WM and  $$\rm HAZ$$ 

## 4.5 피로균열전파저항의 확률특성

Fig. 4-17은 각각 모재부, 용접부, 열영향부의 C2값의 2-파라메터 Weibull 확률지에 플롯트 한 것을 보여주고 있고, Table 4-2는 하중범위에 따라 모재부, 용접부, 열영향부에 대해 추정한 2-파라메터 Weibull 분포의 α (형상모수, shape parameter) 와 β (척도모수, scale parameter)값을 나 타내었다. 본 실험에서 얻은 C2의 확률분포는 확률지에 플롯트한 결과를 보았을 때 Weibull 분포에 잘 따르는 것으로 판단된다.

하중범위가 증가하게 됨에 따라 형상모수 α값은 대체적으로 증가하는 경향을 보였고 척도모수 β값은 반대로 감소하는 결과를 보였다. 하중범위 가 16000N일 때 모재부의 α, β 값은 이러한 경향과 다소 상반되는 결과를 보이는데, 이는 시험편 1개씩만 실험을 수행하였기 때문에 다소 변동이 가 능한 확률치라 판단되며 보다 많은 시험편을 가지고 실험을 수행하여 평균 적인 거동을 관찰하게 되면 하중범위에 따른 α값이 증가하는 경향은 더욱 뚜렷하게 나타날 것이라 사료된다. 이상의 종합적인 결과는 Fig. 4-18과 Fig. 4-19에 나타내었다.

일반적으로 형상모수 α값이 커지게 되면 Fig. 2-6에서 보는바와 같이 통계적 변동치가 집중된다. 이는 부재의 공간적 변동의 편차가 작아진다는 뜻으로, 앞의 4.4절에서의 결과와 마찬가지로 하중범위가 증가할수록 공간 적 변동이 감소하는 경향과 일치한다. 따라서 공간적 변동이 감소하게 되 면 피로균열전파율이 증가하게 되는 경향을 나타나게 된다.

β 값은 63.2%의 특성수명을 나타내는 값으로 본 실험 데이터에서는 하 중범위가 증가할수록 감소되는 결과를 보여주는데 이는 당연한 결과로서 하중범위가 큰 것이 피로균열전파가 빠르게 진전됨으로써 나타난 결과라 판단된다.

- 62 -

한편 C<sub>2</sub>의 확률과정이 명확히 정의된다면 식(2.39)의 방법으로 피로균열 전파의 잔여수명 예측이 가능할 것으로 판단된다.




(b) WM



Table 4-2	Estimated dis	tribution	parameters 1	for $C_2$	

	$\Delta P$	a		β			
	(N)	BM	WM	HAZ	BM	WM	HAZ
Condition I	12000	11.64	15.32	8.001	1.049	1.037	1.073
Condition II	14000	19.50	15.93	10.97	1.029	1.036	1.052
Condition III	16000	18.76	19.17	14.34	1.030	1.029	1.040
Condition IV	18000	28.59	21.14	17.16	1.019	1.027	1.033



Fig. 4–19 Comparison between parameter  $\beta$  and  $\varDelta P$ 

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 선박 및 해양구조물용 강재로 널리 사용되는 API 2W Gr. 50을 시편으로 하여 일정진폭반복하중하에 하중범위를 변화시켜 피로 균열진전시험을 수행하였다. 경도측정, 각각 하중범위 조건에 따른 피로균 열 전파거동과 재질의 공간적 변동, 피로균열 전파저항의 확률적 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로균열전파곡선은 전형적인 일정하중진폭피로시험 곡선의 특징을
 보여주고 있다. 하중범위조건과 각각 모재부, 용접부 그리고 열영향부 부위
 에 따라 피로균열전파가 다르게 나타남을 확인하였다.

(2) 본 실험의 피로균열전파거동은 안정영역의 전파단계인 Ⅱ영역의 거 동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 모든 하중범위 조건에서 m값의 크기는 열영향부가 가장 크게 나타났으며, 그 다음 모재부, 용접부 순서로 크게 나 타났고, log C값은 용접부가 가장 크게 나타났다. 또한 하중범위가 12000N
일 때 모든 부위에서의 m값이 가장 크게 나타남을 보였다.

(3) 각각 동일한 하중범위일 때에 모재부, 용접부, 열영향부의 균열길이
 에 따른 재질의 공간적 변동은 열영향부가 변동이 가장 크고 그 다음 모재
 부, 용접부 순으로 변동이 나타났다. 이는 피로균열전파저항이 클수록 피로
 균열전파가 감소하는 경향을 알았다.

(4) 하중범위가 증가할수록 피로균열전파율은 증가한다. 또한 균열길이가 전파될수록 전파율은 점점 증가하는 경향을 보였으며, 이는 하중범위가 증 가할수록 더욱더 뚜렷하게 나타남을 확인하였다.

(5) 본 실험에서 얻은 피로균열전파저항의 확률분포는 Weibull 분포에 잘 따르는 것으로 판단된다. 하중범위가 증가하게 됨에 따라 a값은 대체적 으로 증가하는 경향을 보였고, β값은 반대로 감소하는 결과를 보였다.



## 참 고 문 헌

- (1) 임성우, 장인화, 조철희, 박관규 (2005), "API 2W Gr.50 강재를 이용한 대형 Tubular Joint 피로성능평가", 한국해양공학회지, 제19권, 제3호, pp. 54-58.
- (2) J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock (1990),"Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice-Hall.
- (3) 최성대, 이종형 (2000), "해양구조물용 TMCP강의 피로균열진전거동에 미치는 용접이방성 및 과대하중의 영향", 한국공작기계학회지, 제9권, 6
   호.
- (4) 이재원 (2010), "선박구조용강의 잔류응력과 피로균열진전거동", 창원대 학교 석사학위논문.
- (5) S. W. Kim, H. K. Yoon, W. J. Park and A. Kohyama (2004),
  "Fatigue Crack Growth Behavior of JLF-1 Steel Including TIG Weldments", Journal of Nuclear Materials, 329–333, 248–251.
- (6) 김주환, 김병호, 이원석, 이현우 (1998), "-45℃에서 API 2H Grade 50 재료의 균열 성장에 관한 연구", 대한기계학회논문집, A권, 제22권, 제 12호, pp. 2146~2152.
- (7) J. M. Choung (2009), "Comparative Studies of Fracture Models for Marine Structural Steels", Ocean Engineering, Vol. 36, pp. 1164–1174.
- (8) D. Bowness and M. M. K. Lee (1998), "Fatigue Crack Curvature under the Weld Toe in an Offshore Tubular Joint", International Journal of Fatigue, Vol. 20, No. 6, pp. 481–490.
- (9) American Petroleum Institute (2006), "Specification for Steel Plates

for Offshore Structures, Produced by Thermo-mechanical Control Processing (TMCP)", Handbook Revision 10.01.09.

- (10) David Broek (1988), "The Practical Use of Fracture Mechanico", KAP.
- (11) Norman. E. Dowling (2007), "Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue", Pearson Education International, pp. 535–599.
- (12) 장동일, 정경섭, 한민구 (1995), "파괴역학", 원창출판사.
- (13) 이강용 (2003), "응력해석 및 재료거동학", 연세대학교 출판부, pp. 313-366.
- (14) T. L. Anderson (1995), "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications Second Edition", CRC Press, pp. 31–95.
- (15) Paris, P. C and Erdogan. F. (1963), "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", ASME J. Basic Engineering, Vol. 55, pp. 528–534.
- (16) Ichikawa. M and Nakamura. T (1986), "Decomposition of Variability of Fatigue Crack Propagation Rate into Inter-Specimen and Intra-Specimen Variabilities", Materials, Vol. 36, No. 408, pp. 922–926.
- (17) Casciati. F, Colombi. P. and Faraveli L. (2007), "Inherent Variability of an Experimental Crack Growth Curve", Structural Safety, Vol. 29, pp. 66–76.
- (18) Madsen H. O. (1983), "Probabilistic and Deterministic Models for Predicting Damage Accumulation due to Time Varying Loadfing", Danish Engineering Academy, Dialog 5–82.
- (19) Waloddi Weibull (1952), "A Statistical Distribution Function of

Wide Applicability", Journal of Applied Mechanics.

- (20) 송지호, 박준협 (2007), "신뢰성공학 입문", 인터비젼.
- (21) 강영식, 백종배, 이근오 (2002), "신뢰성공학", 동화기술.
- (22) 이장현, 황세윤, 양용식, 임성우 (2008), "다층 FCA 용접에 의한 극 후판 버트 접합부의 잔류응력 해석 연구", 한국해양공학회 추계학술대 회 논무집, pp. 130-138.
- (23) 임성우, 이주성 (2006), "API 2W Gr. 50 강재를 이용한 해양구조물 Tendon Porch의 피로성능평가", 한국해양공학회지, 제20권, 5호, pp. 82-88.
- (24) ASTM E384-10 (2010), "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials".
- (25) ASTM E647-08 (2008), "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates".

## 감사의 글

2005년 가을로 기억이 납니다. 당시 풋내기나 다름없던 제가 우리 SMARE 연구실과 인연이 닿아 생활을 해온지 벌써 5년이란 세월이 흐른 지금, 감사의 글을 쓰는 이 순간이 참으로 감회가 새롭습니다. 그 동안 연 구실에서 많은 것을 배우고 성장한 제 자신이 뿌듯하기도 하지만 이제 곧 정든 연구실을 뒤로하고 새로운 사회에 진출한다고 생각하니 마음 한켠에 는 아쉽고 가슴이 먹먹해짐을 느낍니다.

먼저 부족하고 게으른 저를 학부시절부터 지금까지 한결같은 인자함으로 올바른 길로 이끌어주신 존경하는 김선진 지도교수님께 한없이 깊은 감사 를 드립니다. 항상 건강하시고 행복하시길 진심으로 기원합니다.

연구하는데 있어서 많은 조언과 따뜻한 관심을 가져주신 공유식 교수님, 정원택 박사님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 논문심사에 있어서 세심한 가르침과 격려를 해주신 김영식 교수님과 윤문철 교수님께도 감사 드립니다.

그리고 이 논문을 무사히 마칠 수 있게끔 옆에서 도와준 우리 SMARE 연구실 학생들에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 1년반동안 모자란 제게 많은 힘이 되어주고 묵묵히 저를 잘 따라와준 연구실 후배 혜정이와 제가 힘들때 의지가 되어준 석사동기 재영이에게도 진심으로 고맙다는 말을 전 하고 싶습니다. 그리고 그 동안 연구실 생활 성실히 잘해주고 제게 많은 도움을 준 연구실 후배들, 현오, 인준, 재헌, 현수, 의한, 성준이에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또 많은 지식을 공유해준 Gunawan 박사에게도 감사의 말을 전해드립니다. 끝으로 항상 사랑하는 아버지, 어머니께도 진심 을 담아 고마운 마음을 전합니다.

> 2010년 12월 24일 손상훈 드림