2010年 2月

博士學位論文

# 極厚板의 EGW 및 FCAW에 대한 熔接部의 力學的 特性에

## 關한 研究

## 朝鮮大學校 大學院

## 船舶海洋工學科

## 高 敏 誠

## 極厚板의 EGW 및 FCAW에 대한 熔接部의 力學的 特性에 關한 硏究

A Study on the Mechanical Behavior of Weld Part of Ultra Thickness Plate by using EGW(Electro Gas Welding) and FCAW(Flux Cored Arc Welding)

2010年 2月

## 朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

高 敏 誠

# 極厚板의 EGW 및 FCAW에 대한 熔接部의 力學的 特性에

## 關한 研究

## 指導教授 房 漢 瑞

이 論文을 工學博士學位申請 論文으로 提出함

#### 2010年 2月

## 朝鮮大學校 大學院

船舶海洋工學科

## 高 敏 誠

# 高敏誠의 博士學位論文을 認准함 본 페이지 결재 본으로 같음

- 委員 韓國生産技術研究院 팀장 印
- 委員 韓國生産技術研究院 팀장 印

2009年 12月

朝鮮大學校 大學院

目 次

シ	(
-	

List of Figures	V
List of Tables	viii
List of Photographs	ix
Abstract	x

## 第1章. 序論

1.1	硏究의	背景	 1
1.2	硏究의	目的	 2
1.3	硏究의	方法	 3

## 第2章. 理論

2	.1	熔接	部의 熱	傳導 解核	所 理論 및	프로그램	•••••	5
	2.	1.1	熱傳導	理論의	有限要素	定式化 ·	•••••	6
	2.	1.2	熱分布	解析用	프로그램	•••••		9
2	.2	熔接	<b>}</b> 殘留應	力 解析	理論 및	프로그램	•••••	11
	2.	2.1	熱彈塑	性 理論:	의 有限要	素 定式化	5	13
	2.	2.2	熔接残	皆腐應力	및 變形	解率析用	프로그램	17

## 第3章. 極厚板 熔接部의 熱分布 特性

3.1 解析 모델 및 熔接 條件
<b>3.2 極厚板 熔接部의 熱分布 特性</b> 24
3.2.1 EGW 熔接部의 熱分布 特性
3.2.2 FCAW 熔接部의 熱分布 特性
3.3 考察 및 結論
3.3.1 EGW 熔接部의 熱的 特性
3.3.2 FCAW 熔接部의 熱的 特性

第4章. 極厚板 熔接部의 力學的 特性

4.1 EGW 熔接部의 力學的 特性	35
4.2 FCAW 熔接部의 力學的 特性	39
4.3 外力에 의한 極厚板 熔接部의 殘留應力	
再分布 特性	43
4.3.1 노치加工에 의한 殘留應力 分布 特性	43
4.4 XRD를 利用한 熔接殘留應力 測定	47
4.4.1 測定方法 및 測定位置	47
4.4.2 有限要素解析 結果와 計測값 比較	49
4.5 考察 및 結論	50
4.5.1 EGW 熔接部의 力學的 特性	50
4.5.2 FCAW 熔接部의 力學的 特性	51
4.5.3 EGW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에	

의한 殘留應力 再分布 特性 ……………… 52

#### 第5章. 極厚板 熔接部의 性能實驗

5.1	EGW	熔接部의	性能評價	•••••		·· 54
	5.1.1	引張試驗	••••••		••••••	·· 54
	5.1.2	굽힘試驗	•••••		•••••	. 55
	5.1.3	衝擊試驗	•••••		•••••	. 56
	5.1.4	硬度試驗	•••••	•••••	•••••	. 58
5.2	2 FCAW	熔接部의	性能評價	[		. 59
	5.2.1	引張試驗	••••••	••••••	•••••	. 59
	5.2.2	굽힘試驗	••••••	••••••	•••••	60
	5.2.3	衝擊試驗	••••••	••••••	•••••	60
	5.2.4	硬度試驗	••••••		•••••	·· 62
5.3	3 考察	및 結論	•••••	••••••	•••••	·· 63
	5.3.1	EGW 熔接	部의 性能	評價 ·		63
	5.3.2	FCAW 熔排	흉部의 性的	能評價	•••••	·· 63

## 第6章.總論

6.1 極厚	板 EGW/FCAW 熔接部의 熱的 特性 65
6.1.1	EGW 熔接部의 熱的 特性 65
6.1.2	FCAW 熔接部의 熱的 特性 66
6.2 極厚	板 EGW/FCAW 熔接部의 力學的 特性 66
6.2.1	EGW 熔接部의 力學的 特性 66
6.2.2	FCAW 熔接部의 力學的 特性 68
6.3 外力	에 의한 極厚板 EGW/FCAW 熔接部의
残留	應力 再分布 特性
6.3.1	EGW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에
	의한 殘留應力 再分布 特性 69
6.3.2	FCAW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에
	의한 殘留應力 再分布 特性 70
6.4 극후	판 EGW/FCAW 熔接部의 性能實驗 71
6.4.1	EGW 熔接部의 性能評價 71
6.4.2	FCAW 熔接部의 性能評價 71

## List of Figures

Fig. 2.1	lso-parametric element (4 Nodal point) $\cdot$ 5
Fig. 2.2	Flow chart of program for thermal
	distribution analysis 10
Fig. 2.3	Material properties11
Fig. 2.4	Plastic-flow 12
Fig. 2.5	lsotropic workhardening rule
Fig. 2.6	Flow chart of program for residual
	stress analysis18
Fig. 3.1	Configuration of welded specimen 20
Fig. 3.2	FE model for numerical analysis 23
Fig. 3.3	Temperature fields in the xy plane in
	heating stage 25
Fig. 3.4	Temperature fields in the xy plane in
	cooling stage
Fig. 3.5	Temperature history of W.M , H.A.Z.
	and B.M 27
Fig. 3.6	Temperature history of crack tip 27
Fig. 3.7	Temperature fields of the xy plane in
	heating stage 28
Fig. 3.8	Temperature fields of the xy plane in
	cooling stage

Fig.	3.9	Temperature history of W.M , H.A.Z
		and B.M
Fig.	3.10	Temperature history of crack tip
Fig.	4.1	Residual stress distribution of
		EGW welded specimen
Fig.	4.2	Plastic strain distribution of
		EGW welded specimen
Fig.	4.3	Stress field near surface crack tip of
		EGW welded specimen
Fig.	4.4	Residual stress distribution of
		FCAW welded specimen 40
Fig.	4.5	Plastic strain distribution of
		FCAW welded specimen
Fig.	4.6	Stress field near surface crack tip of
		FCAW welded specimen
Fig.	4.7	Stress distributions ahead crack tip of
		EGW welded specimen before and after
		notch machined
Fig.	4.8	Stress distributions ahead crack tip
		of FCAW welded specimen before and
		after notch machined
Fig.	4.9	Measurement of variations in the
		lattice spacing from the diffraction
		angle (from chun et al, 2007)47

Fig.	4.10	Measured points on the specimen by XRD
		residual measurement equipment
Fig.	4.11	Comparison of welding residual stress
		values for EGW welded specimen
Fig.	4.12	Comparison of welding residual stress
		values for FCAW welded specimen
Fig.	5.1	Impact test results

## List of Tables

Table 3.1	The chemical composition in EH36-TMCP
	and wire (Wt%)21
Table 3.2	The mechanical property in EH36-TMCP
	and wire
Table 3.3	Welding condition of specimen
	for EGW
Table 3.4	Welding condition of specimen
	for FCAW
Table 5.1	Tensile test results of EGW54
Table 5.2	Bending test results of EGW

Table 5.3	Impact test results of EGW57
Table 5.4	Hardness test results of EGW
Table 5.5	Tensile test results of FCAW
Table 5.6	Bending test results of FCAW
Table 5.7	Impact test results of FCAW61
Table 5.8	Hardness test results of FCAW

## List of Photographs

Photo. 5.1	Bending test of EGW welded specimens $\cdot$	55
Photo. 5.2	Results of CVN impact test	56
Photo. 5.3	Hardness measurement point of EGW	
	welded specimen	58
Photo. 5.4	Bending test of FCAW welded specimens	60
Photo. 5.5	Hardness measurement point FCAW	
	welded specimen	62

### ABSTRACT

A Study on the Mechanical Behavior of Weld Part of Ultra Thickness Plate by using EGW(Electro Gas Welding) and FCAW(Flux Cored Arc Welding)

> Go Min-Seong Advisor : Prof. Bang Han-Sur Ph.D. Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering Graduate School of Chosun University

Recently, a steel structure in industry becomes a larger structure and consequently an application of ultra thickness plate of the high-tensile is augmented.

An application of ultra thickness plate increase man-hours, therefore multi-layer welding FCAW(Flux Cored Arc Welding) substitutions of existing, applies 1Pole EGW(Electro Gas Welding) processes from below steel thick 55mm and above of 55mm 1Pole EGW processes and FCAW processes and 2Pole EGW process high efficiency substitution line welding process are become accomplished for an improvement of welding productivity

However, EGW process affect big in physical properties of the base metal and the welding material, differently the multi-layer welding(FACW).

The welding of ultra thickness plate by EGW as well as limited heat input and a heat treatment after welding is required, for reduce a brittle fracture due to an overdose heat input.

Due to fracture toughness and fatigue life decreased in accordance with highly heat input welding process on an ultra thickness plate.

As some outside Classification (NK, GL) used in steel thickness (65mm or more) questions about filed with the relevant provisions and measures to enhance fracture toughness and CTOD (Crack Tip Opening Displacement) or Kca (Crack Arrest Ability) design standards for the destruction is required.

However, considering the domestic case of brittle fracture of ultra thickness plate established criterion are not applied, as well as the theoretical and experimental research on the effectiveness and the very lack of systematic research is considered.

Thus, for a highly heat input welding in ultra thickness plate performance and mechanical behavior of materials phenomena, by examining the safety and reliability in welding, as well as urgent response, called the plan will prepare. In this study, a high-strength ultra thickness EH36-TMCP steel by highly heat input welding process

In this study, a high strength ultra thickness EH36-TMCP steel highly heat input welding process applied to EGW, A weld reliability and suitability, to ensure endurance, the heat of welding and welding residual stresses due to temperature changes and the prediction of residual stress and its impact on the destructive behavior was identified, as well as conventional multi-layer welding FCAW weld characteristics and differences comparisons, were reviewed.

#### 第1章. 序論

#### 1.1 研究의 背景

최근 강구조산업전반에서 구조물의 대형화 따라 고강도 극후물재의 적용이 증대 되고 있다. 이러한 극후판의 적용은 용접 공수가 증가되므로 용접 생산성 향상을 위하여 기존의 다층용접 FCAW 대신, 강재 두께 55mm이하에서는 1Pole EGW공정을 적용하고 55mm이상은 1Pole EGW공정과 FCAW공정 및 2Pole EGW공정 고능률 대입열 용접 공정이 이루어지고 있다.

그러나 EGW공정은 기존의 다층용접(FCAW)의 경우와 달리 피용접재 및 용접재료 의 물성에 큰 영향을 미치므로, 극후판 용접의 경우 용접입열 과다에 따라 취성파 괴의 발생 가능성을 줄이고자 입열량의 제한은 물론 용접후열처리를 요구하고 있 다.

해양구조물 시공 규격<sup>(1-3)</sup>에 따르면 용접입열이 45KJ/cm<sup>2</sup>이상이거나 구조물 두께 가 50mm 이상인 경우 용접후열 처리 또는 CTOD시험중 한가지를 의무화하여 파괴인 성값에 대한 보증이 요구되고 있다.

이와 같이 강구조물 대형화에 따른 고강도 극후물재 사용 및 대입열 용접공정 적용에 따른 용접이음부 파괴인성저하 및 피로파괴수명 감소로, 최근 일부 국외선 급(NK, GL)에서는 사용강재 두께(65mm이상)에 관한 의문을 제기하고 관련규정을 강화하고 있으며 파괴인성 척도로 CTOD(Crack Tip Opening Displacement) 또는 Kca(Crack Arrest Ability)에 대한 파괴설계기준을 요구하고 있다.

그러나, 국내의 경우 극후판의 취성파괴를 고려한 적용기준이 정립되어 있지 않 을 뿐만 아니라, 이에 대한 이론 및 실험적 연구와 실효성을 고려한 체계적인 연 그러므로, 극후판 대입열 용접부에 대한 재료 성능 및 역학적 제현상을 연구·검 토하여 용접부에 대한 안전성 및 신뢰성 확보는 물론, 이에 대한 대응방안 마련 이 시급한 실정이라 하겠다.

#### 1.2 研究의 目的

강구조물의 용접중에는 불균일한 온도분포와 열응력이 발생하고 용접후에는 비 선형 소성변형으로 인한 용접잔류응력이 필연적으로 발생한다. 이러한 잔류응력은 구조물의 강도적 신뢰성을 저하시키는 원인이 되므로 건전한 구조물을 설계하고 제작 및 확보하기 위해서는 반드시 고려해야할 중요한 문제이다.

본 연구에서는 고강도 극후판 EH36-TMCP강에 대하여 대입열 용접공정 EGW 적용 에 따른 용접부의 안정성과 적합성, 내구성을 확보하기 위해, 용접중의 열전도에 의한 온도변화와 용접잔류응력의 예측 및 잔류응력이 파괴거동에 미치는 영향 등 을 규명하였고 아울러, 기존의 다층용접 FCAW 용접부 특성과 차이점을 비교·검토 하였다.

또한 실 시험편을 제작하여 계측(잔류응력, 경도) 및 용접부 재질의 성능(인장, 굽힘, 충격 및 경도) 평가를 통하여 용접부에 대한 신뢰성의 근거를 이론 및 실험 적으로 제시하고자 하였다.

#### 1.3 研究의 方法

본 연구에서는 용접열원의 물리적 정수(열전도, 비열, 밀도 등)의 온도의존성을 고려한 유한요소법에 의한 비정상 열전도 해석과 아울러, 재료의 기계적 성질(항 복응력, 탄성계수, 열팽창 계수 등)의 온도 의존성을 고려하여 자체 개발한 열분 포, 열탄소성 수치해석용 프로그램을 사용하여 용접부의 역학적 거동(용접잔류응 력, 소성변형율 등의 크기, 분포, 발생기구)을 규명하였다.

용접중심부의 인장잔류응력은 균열 전파력을 증가시켜 피로강도를 감소시키며 취성파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시켜 취성파괴에 대한 구조물의 파괴거동 에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 용접구조물의 피로 및 파괴해석에 있어서 중요하다.

이와 같은 잔류응력은 외부하중과 중첩되어 저응력에서 취성파괴를 발생시키므 로 용접구조물의 강도적 신뢰성 및 내구성을 감소시키는 원인이 된다. 그러므로 용접구조물의 역학적인 지표로서 신뢰성을 나타내는 파괴강도에 있어서 잔류응력 을 고려한 파괴역학적 해석이 필요하다.

위에 필요한 해석은 다음의 세 단계 순으로 수행하였다.

- 1) 열전도 해석 : 용접열원에 의한 온도분포의 시간에 대한 변화의 해석
- 2) 잔류응력 해석 : 온도분포 결과를 이용한 열응력, 잔류응력 및 변형 해석
- 3) 파괴해석 : 잔류응력과 외력의 복합하중이 주어지는 용접부에 대한 평면
   변형 파괴해석

해석모델의 모델링과 이에 따른 요소형상 관련 데이터 작성은 MSC사의 PATRAN을 이용하여 작성하였고, 해석은 2차원 열전도 및 평면변형 열탄소성 이론에 입각하 여 열전도, 열탄소성 프로그램을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이때 열전도해석<sup>(7-12)</sup>에서 얻은 온도분포를 열하중으로 하여 용접체에 발생하는 역학적 메카니즘을 정도 좋게 해석하고, 이들을 분석하기 위해 열탄소성 이론을 도입하여 탄성 및 소성 전 영역에 걸쳐 온도에 의존하는 재료의 물리정수를 고려 하였다. 그리고 변형률 및 응력의 관계를 소성유동 이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 해석의 정도를 높혔다.

또한 열탄소성해석 후 얻어진 용접잔류응력 해석 데이터를 상용프로그램 ANSYS 의 초기응력으로 적용하였으며, 상용프로그램 ANSYS에서 외력(굽힘력)이 작용시 용접구조물의 잔류응력 재 분포 특성을 도출하였다.

용접시험편을 수치해석 모델과 동일한 조건(형상, 크기 및 용접조건 등)으로 실 제작하여, 각종 시험편에 대한 용접잔류응력의 측정 및 용접부 성능(인장, 굽힘, 충격) 실험을 실시하여 실 측정에 의한 역학적 특성과 수치해석의 타당성을 입증 하고, 나아가 측정결과와 수치해석 결과를 비교·검토하였다.

용접구조물의 잔류응력 측정방법은 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법들로서 Hole Drilling, XRD, Neutron회절, 초음파, Barkhausen noise method, 자기적 방 법 등의 방법이 이용되고 있다. 이중 XRD를 이용한 잔류응력 측정방법은 시편의 표면 상태가 매우 좋아야 하는 단점이 있지만 현재까지 알려진 비파괴적 잔류응력 측정 방법들 중 가장 신뢰도가 높은 방법이다. 본 연구에서는 X-Ray회절방법(XRD) 을 이용하여 잔류응력을 계측하고 유한요소해석법을 통하여 얻은 응력결과를 비교 하였다.

#### 第2章. 理論

#### 2.1 熔接部의 熱傳導 解析 理論 및 프로그램(7-12)

본 연구에서는 용접열원 분포의 명확한 해석을 위하여 열원의 효과를 고려하였 으며, 해석의 정도를 높이기 위해 자연좌표계를 이용하여 요소좌표와 변위를 동일 한 보간함수로 하여 절점 및 요소에서 뿐만 아니라 임의의 적분점에서도 필요한 값을 알 수 있는 아이소-파라메트릭 4절점(2차원 해석)(Fig.2.1)를 도입하였다.

또한, 용접의 경우 시간에 따라 온도가 변화하므로 재료 의 물리정수(비저항, 비열, 밀도 및 열전도도등)가 변화하게 되므로 이를 고려한 열분포 해석용 프로그 램을 사용하였다.



Fig. 2.1 Iso-parametric element (4 Nodal point)

#### 2.1.1 熱傳導 理論의 有限要素 定式化

#### 가. 2차원 열전도 방정식의 유한요소 정식화

직교좌표계 (x, y)에서 2차원 비정상 열전도 방정식으로 기술하면 다음과 같다

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \qquad (2.1)$$

여기서, T: 온 도 (°C),  $c: 비열(cal/g \cdot °C)$ , p: 밀 도(g/cm),

 $\lambda: x, y$ 방향의 열전도율(*cal/cm* · sec · °*C*),

t : 시간 (sec), Q : 단위 시간당 입열량 (cal/sec) 이다.

고체의 열전도 문제를 Galerkin법을 적용하여 유한요소법으로 정식화하기 위해, 해석모델을 유한개로 분할하고, 한 요소내의 온도 분포를 아래식으로 표현하였다.

$$T(x,y,t) = [N(x,y)]\phi(t)$$
(2.2)

여기서, T : 요소의 온도

[N] : 절점온도와 요소내의 온도를 연결하는 형상함수 Matrix

 $ρc [N] φ = λ {φ} ∇ <sup>2</sup>[N] + Q$  (2.3) 식(2·3)에 형상함수[N]을 하중함수로 하여 갈라킨법(Galakin method)을 적용하면

$$\int_{v} [N]^{T} \{ \lambda \phi \nabla^{2} [N] + Q - \rho c [N] \phi \} dv = 0$$
 (2.4)

여기서, v : 요소의 영역이다

또한, 물체 표면의 열적 경계조건은 Fourier 법칙을 사용하여 다음과 같이 구성 된다.

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \overrightarrow{n_x} + \frac{\partial T}{\partial y} \overrightarrow{n_y} \right) = -\frac{\partial T}{\partial n} \overrightarrow{n_n}$$
(2.5)

만약 경계에서 열전달이 있을 경우에는 q 는 式(22)이 된다.

$$q = \mathfrak{a}_{c}(T - T_{c}) \tag{2.6}$$

여기서, q : 열유속(Heat flux)  $(cal/\sec \cdot cm^2)$ 

n : 물체표면의 외법선방향

a<sub>c</sub>: 열전달계수 (*cal/cm*<sup>2</sup> · sec · ℃)

T\_: 의부온도(℃)이다.

식(2·4)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 부분적분하고 열 경계조건으로 열전달을 고려하여,

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{c} (T - T_{c}) 를 적용하면 \qquad (2.7)$$

식(2.7)의 요소-절점간의 온도관계를 식(2.3)에 대입하면,

$$\int_{V} \lambda[N]^{T}(\{\phi\} \nabla^{2}[N]) dv$$
(2.8)

여기서, s : 요소의 경계이다.

상기의 2차원 비정상 열전도식을 Matrix화 하면 다음 식이 구하여 진다.

$$[K] \phi + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = F$$
(2.9)

여기서, [K] : 열전도 Matrix, [C] : 열용량 Matrix

{ F } : 열유속 Vector이다.

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \int_{V} \lambda \left( \frac{\partial \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}^{T}}{\partial x} \frac{\partial \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}}{\partial x} + \frac{\partial \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}^{T}}{\partial y} \frac{\partial \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}}{\partial y} + \frac{\partial \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}^{T}}{\partial z} \frac{\partial \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}}{\partial z} \right) dv \Box \phi \Box + \int_{s} \lambda \begin{bmatrix} N \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} ds \Box \phi \Box$$

$$(2.10)$$

$$[C] = \int_{V} \rho c[N]^{T} [N] dv \qquad (2.11)$$

$$\Box F \Box = \int_{s} a_{c} T_{c} [N]^{T} ds + \int_{v} Q^{\bullet} [N]^{T} dv \quad 0 [\Box + (2.12)]^{T} dv$$

#### 나. 비정상문제의 이산화

2차원 비정상 열전도식을 Matrix화 한 식(29)를 풀 경우에  $\{ \phi \} \downarrow \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\}$ 의 2개의 미지량이 존재하지만, 시간 증분을  $\Delta t$ 라하고 증분전의 온도를  $\phi^B$ , 증분 후의 온도를  $\phi^A$  및 그 중간의 온도를  $\phi^M$  이라고 하면, 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi^{A}}{\partial t} = \frac{\Phi^{A} - \Phi^{M}}{(\Delta t/2)}, \qquad \frac{\partial \Phi^{B}}{\partial t} = \frac{\Phi^{M} - \Phi^{B}}{(\Delta t/2)}$$
(2.13)

식(2·14)으로 부터 식(2·15)가 구성된다.

$$\frac{\partial \Phi^{A}}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} (\Phi^{A} - \Phi^{B}) - \frac{\partial \Phi^{B}}{\partial t}$$
(2.14)

따라서, 식(2.10)는 아래와 같이 최종적으로 구할 수 있다.

$$([K] + \frac{2}{\Delta t} [C]) \square \Phi^{A} \square = \square F \square + [C] (\frac{2}{\Delta t} \square \Phi^{B} \square + \square \frac{\partial \Phi^{B}}{\partial t} \square) \quad (2.15)$$
  
여기서 ,  $\Delta t$  : 시간증분,  $\Phi^{A}$  : 증분후의 절점온도,

 $\Phi^B$  : 증분전의 절점온도, [K] : 열점도 Matrix,

[*C*] : 열용량 Matrix, {*F*} : 열유속 Vector 이다. 식(2.15)에서, 시간 t에 대한 φ<sup>B</sup> 의 값을 알면 이 연립방정식의 해인 □ <sup>A</sup>□를 구할 수 있다.

즉, 초기조건으로써 ◘ <sup>₿</sup>□<sub>t=0</sub>의 값을 대입하면 된다.

본 연구에서는 위의 식을 기본식으로 프로그램화하여 열전도해석을 수행하였다.

#### 2.1.2 熱分布 解析用 프로그램

#### 가. 프로그램 구성

(1) 구 성 : 열분포 해석용 프로그램은 1개의 Main문과 45개의 서브루틴 및 3 개의 Function문으로 구성되어 있으며, 데이타를 입력함으로써 손쉽게 수치 시뮬 레이션을 수행하도록 구성되어 있다.

(2) 입력 데이타 : 각 방향의 좌표수 지정, 절점번호 코딩(Coding)순서 지정, 용착금속 요소수, 요소의 용접시간, 온도상승 및 냉각시간 선정, 열영향부(HAZ) 요소로 판별하는 온도지정, 열전달등이 발생하는 요소 지정등이다.

(3) Main문 : 입력 데이타의 형식에 맞추어 초기 데이타를 입력하면, 해석모델 형상에 대한 열전달 및 열복사 유무를 판단하고, 각 좌표에 대한 절점을 자동으로 나누어 요소를 분할한다. 총 절점수 및 Dimension상의 절점수를 판단하여 열영향 부 및 용접된 요소수를 초기화하여 용접이 수행된 요소의 종료시간을 판단하고, 메트릭스에 대한 Bandwidth와 Dimension상의 크기를 판단한다.

전 단계(Step)에 대하여 열전도 메트릭스, 열하중 메트릭스를 구성하며 최고치 온도를 판단하여 시간증분을 결정한다. 시간증분에 따라 용접이 끝난 요소는 온도 하강 과정을, 용접이 수행되는 요소는 온도상승 과정을 겪게 된다.

온도하강 과정에서는 상온 또는 지정된 온도까지 하강하고, 온도상승 과정에서 는 요소의 용접 종료시간을 판단한다.

다음은 전요소의 용접 시간을 판단하여 전체계에 있어서 강성메트릭스와 열하중 벡터(Vector)의 Gloval화를 도모한다. 이러한 과정에 있어서 필요에 따라 서브루 틴과 Function문을 사용하게 된다.

이들 과정을 통하여 시간에 따른 절점의 온도, 시간에 따른 온도증분 계산, 요 소에 대한 열영향부(HAZ) 여부의 판정을 하여 출력하게 된다.

#### 나. 열분포 해석용 프로그램 Flow-Chart



Fig. 2.2 Flow chart of program for thermal distribution analysis

#### 2.2 熔接殘留應力 解析 理論 및 프로그램(7-12)

열응력 문제에서는 맨처음 연속체의 비정상 열전도문제, 즉 시간과 함께 시시각 각 변화하는 온도분포를 구하여야만 한다. 이 온도 변화에 따라 열 변형율 (Thermal strain)이 변화하기 때문이다. 더우기, 각 요소를 구성하는 재료의 물리 적 성질이 온도에 따라 변화하므로 이들의 영향을 고려한 절점력과 절점 변위의 관계식을 작성하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 용접잔류응력의 가장 일반적인 해석을 위하여 재료 (EH36-TMCP)의 등방성(Isotropic)을 고려하여 탄성 및 소성 전영역에 걸쳐 재료정 수의 온도 의존성을 고려하였으며, 변형율 및 응력의 관계를 소성유동(Plastic flow)이론에 입각하여 증분으로 나타내었다.



Fig. 2.3 Material properties



Fig. 2.4 Plastic-flow

또한, 소성역에서는 선형 등방경화 법칙을 고려한 Von-mises의 항복조건을 항복 함수로 사용하였다. 즉, 소성유동(Plastic-flow)동안에 초기 항복곡면은 일정하게 팽창한다고 가정하였다.



Fig. 2.5 Isotropic workhardening rule

#### 2.2.1 熱彈塑性 理論의 有限要素 定式化

#### 가. 2차원 열탄소성 이론의 유한요소 정식화

열은 등방성(Isotropic)이므로 열에 의한 전단변형율은 발생하지 않기 때문에 이를 고려하여, 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$x_{xy} = 0$$
 (2.16)

따라서, 열응력 문제의 변형율-변위 관계식은 다음과 같고,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$
 (2.17)

$$\mathbf{y}_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \qquad (2.18)$$

응력-변형율 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$\varepsilon_{x} = \frac{1}{E} \left[ \sigma_{x} - v \left( \sigma_{y} + \sigma_{z} \right) \right] + a T$$
(2.19)

$$\varepsilon_{y} = \frac{1}{E} \left[ \sigma_{y} - v \left( \sigma_{z} + \sigma_{x} \right) \right] + \alpha T$$
(2.20)

$$y_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} = 0$$
 (2.21)

여기서,  $\{\alpha\}T = \varepsilon^t$ : 열 변형율(Thermal strain),

α : 순간 선팽창계수, Τ : 온도 이다.

따라서, 전 변형율 { $\varepsilon$ }는 탄성 변형율 { $\varepsilon$ <sup>e</sup>}와 열 변형율 { $\varepsilon$ <sup>t</sup>}의 합으로 서 아래 식으로 표현되고,

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{e}\} + \{\varepsilon^{t}\}$$

$$(2.22)$$

$$Habes all (Hacks's low) Q = Hele (Legit 2) C = Hele$$

응력과 변형율은 후크의 법칙(Hooke's law)으로 부터 다음과 같다.

$$\{ \sigma \} = [D^{e}] \{ \varepsilon^{e} \}$$

$$\{ \sigma \} = [D^{e}] (\{ \varepsilon \} - \{ \varepsilon^{t} \})$$

$$(2.23)$$

여기서,  $[D^e]$  : 탄성 응력-변형율 메트릭스 이다.

따라서 상기의 2차원 열탄소성 이론을 유한요소정식화 하면 다음과 같다.

#### 나. 응력-변형율 관계

재료의 물리적 성질의 온도 의존성을 고려한, 응력증분의 영향을 [*C*]*dT*라고 하면, 응력-변형율 관계는 아래식과 같다.

$$\{ d\sigma \} = [D] \{ d\varepsilon \} - [C] dT$$
 (2.24)

#### (1) 탄성역

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 다음과 같다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^{e}\} + \{d\varepsilon^{t}\}$$
(2.25)

$$\{d\sigma\} = [D^{e}]\{d\varepsilon^{e}\}$$
(2.26)

여기서, 탄성변형율 {  $\varepsilon^{e}$  } : 응력 {  $\sigma$  } 및 온도 T의 함수 이다.

탄성변형율의 증분은 아래와 같이 구성되고,

$$\{d\varepsilon^{e}\} = \left\{\frac{\partial\varepsilon^{e}}{\partial\sigma}\right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial\{\varepsilon^{e}\}}{\partial T} dT$$

$$\{d\varepsilon^{e}\} = [D^{e}]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial[D^{e}]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \qquad (2.27)$$

전 변형율 증분은 아래식과 같다.

$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \qquad (2.28)$$

식을 정리하면, 탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\{ d\sigma \} = [D^{e}] \{ d\varepsilon \} - [D^{e}] (\frac{\partial [D^{e}]^{-1}}{\partial T} \{ \sigma \} + \{ \alpha \}) dT$$

$$= [D^{e}] \{ d\varepsilon \} - ([D^{e}] \{ \alpha \} - \frac{1}{E} \frac{E - E_{1}}{\Delta T} \{ \sigma \}) dT$$

$$= [D^{e}] \{ d\varepsilon \} - (E^{e}) \{ \alpha \} - \frac{1}{E} \frac{E - E_{1}}{\Delta T} \{ \sigma \} dT$$

$$= [D^{e}] \{ d\varepsilon \} - \{ C \} dT$$

$$(2.29)$$

여기서, $E_1$ :온도변화  $\Delta T$  후의 탄성계수,  $\{C\}: [D^e] \mathfrak{a} \frac{1}{E} - \frac{E - E_1}{\Delta T} \{\sigma\}$ 이다.

(2) 소성역

재료의 항복응력( $\sigma_Y$ )은 온도 T와 소성일(Plastic work)  $W^P(\overline{\sigma}, \varepsilon^P)$ 의 함 수로서  $\sigma_Y(T, W^P)$ 로 하고, 항복함수 F는 응력 { $\sigma$ }와 항복응력( $\sigma_Y$ )으로부 터 다음과 같이 구성된다.

$$F = f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\overline{\epsilon}^{p}, T)$$
  
=  $\overline{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\overline{\epsilon}^{p}, T)$  (2.30)

즉,  $dF = df - df_0 = 0$ 을 만족할 때 재료는 항복한다.

따라서, 재료가 소성역에서 부하상태에 있을 경우에는 dF = 0의 조건을 만족 해야 한다.

$$dF = \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^{T} \left\{ d\sigma \right\} - \left\{\frac{\partial f_{0}}{\partial \overline{\varepsilon}^{p}}\right\}^{T} \left\{ d\overline{\varepsilon}^{p} \right\} - \frac{\partial f_{0}}{\partial T} dT = 0$$
(2.31)

여기서, 
$$\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T$$
: 상당응력의 변화,  $\left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon^p} \right\}$ : 가공경화,  $\frac{\partial f_0}{\partial T}$ : 온도증분

소성역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜로 가정 하면, 소성변형율 증분은 다음 식이 된다.

$$\{d\varepsilon^{p}\} = \lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}$$
(2.32)

여기서,  $\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$  : 편차응력,  $\lambda$  : 양(+)의 스칼라양이다.

또한, 위의 식은 본-미세스(Von-mises) 항복조건을 따른다.

전 변형율(Total strain)증분 { *d* ɛ }은 아래 식과 같이 탄소성 및 열변형율의 합이 된다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^{e}\} + \{d\varepsilon^{b}\} + \{d\varepsilon^{t}\}$$
(2.33)

따라서, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\{ d\sigma \} = [D^{e}] \{ d\varepsilon \} - [D^{e}] \{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \} \lambda - [D^{e}] \{ a \} dT$$

$$+ \frac{d[D^{e}]}{dT} [D^{e}]^{-1} \{ \sigma \} dT$$

$$(2.34)$$

#### 다. 절점력-절점변위 관계

물체력을 무시하고 가상일의 원리에 따라, 요소 등가절점력 증분 { dF }는 다음 식이 된다.

 $\{ dF \} = [K] \{ dU \} - \{ dL \}$  (2.35)

용접에 의한 열응력 해석에서는 외력의 작용이 고려되지 않으므로, 각 요소에 관한 평형조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum [K] \{ dU \} - \sum \{ dL \} = \sum \{ dF \} = 0$$
  
$$\sum [K] \{ dU \} = \sum \{ dL \}$$
(2.36)

여기서,  $[K] = \int_{v} [B]^{T} [D] [B] dV$  : 요소의 강성 메트릭스,

 $\{dL\} = \int_{v} [B]^{T} [C] dT dV$  : 열에 의한 등가절점력이다.

따라서, 본 연구의 용접잔류응력 해석용 열탄소성 프로그램은 위의 식에 의거하여 구성 되었다.

#### 2.2.2 熔接殘留應力 및 變形解率析用 프로그램

#### 가. 프로그램 구성

(1) 구 성 : 용접잔류응력 및 변형율 해석용 프로그램은 1개의 Main문과 48개 의 서브루틴 및 5개의 Function문으로 구성되어 있으며, 입력 데이타를 입력함으 로써 손쉽게 수치 시뮬레이션을 수행하도록 구성되어 있다.

(2) 입력 데이타 : 각 방향의 좌표수 지정, 경계조건, 절점번호 코딩(Coding)순 서 지정, 용착금속 및 열영향부(HAZ) 요소, 절점의 시간대별 온도이력 등이다.

(3) Main문 : 입력 데이타의 형식에 맞추어 데이타를 입력하면, 해석모델의 전 절점에 대해 요소좌표를 자동적으로 정의하여 형상함수 및 야코비언(Jacobian)메 트릭스를 구성한다.

열분포 이력을 열하중으로 하므로 용접이 수행되는 과정의 온도상승 및 냉각에 서의 온도이력을 입력하여 온도를 하중으로 치환하고, 요소의 강성 메트릭스를 구 성한다.

재료의 항복응력, 소성경화계수, 열팽창율 등을 온도의 변화에 따라 계산하고, 요소의 강성 메트릭스를 중첩한다. 또한, 평형방정식을 계산하여 응력, 소성변형 율 등을 계산한다.

재료의 탄성, 소성 여부를 폰-미세스 항복함수를 토대로 판단하여, 온도, 변위, 응력, 소성변형율 등을 출력하게 되고, 이러한 결과치가 중첩과정을 반복하게 된 다. 나. 열탄소성 프로그램 Flow-Chart



Fig. 2.6 Flow chart of program for residual stress analysis

#### 第3章. 極厚板 熔接部의 熱分布 特性

#### 3.1 解析 모델 및 熔接 條件

본 연구에 사용한 강재는 컨테이너선 대입열용접에 적용되고 있는 조선용 강재 EH36 Grade TMCP강이며 판두께 78mm에 대하여 EGW 대입열 용접 및 FCAW 다층용접 을 사용하여 시험편을 제작하였다.

모재 및 용접봉의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table. 3.1과 Table. 3.2 에 나 타내었다. 시험편의 제원은 선급의 WPQT에 의거하여 길이 (L)=1200mm, 폭(B)=400mm, 판두께 (t)=78mm로 선정하였으며 x는 판의 폭방향, y는 두께방향, z는 용접선 방향 을 나타낸다.

개선형상은 1:1 양면(X)개선, 개선각은 30도, 루트갭은 현장여건을 감안하여 8mm로 선정하였다. 제작된 용접시험편의 이음부 형상, 용접적층 상태 및 용접조건 은 Fig.3.1 및 Table.3.3, Table.3.4 에 각각 나타내었다.





Root Gap : 8mm



(b) Specimen setting for EGW welding



(c) Specimen setting for FCAW welding



(d) Cross section of EGW welded specimen



(e) Cross section of FCAW welded specimen

Fig. 3.1 Configuration of welded specimen
Material	С	Si	Mn	Ρ	S	Ni	Cu	Ti
EH36-TMCP	0.18	0.1~0.5	0.9~1.6	0.035	0.035	0.4	0.35	0.02
Wire for EGW	0.05	0.25	1.6	0.009	0.007	1.4	-	0.05
Wire for FCAW	0.04	0.38	1.10	0.012	0.010	1.55	_	_

Table 3.1 The chemical composition in EH36-TMCP and wire (Wt%)

Table 3.2 The mechanical property in EH36-TMCP and wire

Material Y.S(N/mm <sup>2</sup> )		T.S(N/mm <sup>2</sup> )	E.I(%)	
EH36-TMCP 355		490~620	21	
Wire for EGW	500	615	25	
Wire for FCAW 560		620	29	

Table 3.3 Welding condition of specimen for EGW

Process	Number of Pass (Total /2Pass)	Current (A)	Voltage (V)	Arc Time (s)	Speed (cm/min)	Interpass Temp (℃)	Heat Input (KJ/cm)
EGW (3G)	Top(1Pass)	400	42	1589	4.5	116	235.2
	Bottom(1Pass)	430	44	1310	5.5	162	206.4

Number of Pass (Total / 37Pass)		Current(A)		Voltage(V)		Arc Time(S)		Interpass Temp(°C)	
Тор	Bottom							Tomp ( O )	
1	1	240	300	30	31	405	373	119	119
2	2	280	300	31	31	352	361	123	135
3	3	300	300	31	31	365	359	114	157
4	4	300	280	31	32	143	223	123	128
5	5	300	280	31	32	182	209	141	147
6	6	300	280	31	32	193	262	137	130
7	7	300	280	31	32	172	191	131	112
8	8	300	310	31	31	151	265	115	129
9	9	300	310	31	31	174	262	119	145
10	10	300	320	31	31	147	244	131	125
11	11	300	320	31	31	199	226	149	136
12	12	300	320	31	31	151	237	127	115
13	13	300	320	31	31	201	246	139	118
14	14	260	320	29	31	131	212	152	124
15	15	260	320	29	31	171	187	121	131
16	16	260	320	29	31	121	257	147	135
17	17	260	275	29	31	117	213	114	105
18	18	260	275	29	31	153	227	127	111
	19		275		31		176		125

#### Table 3.4 Welding condition of specimen for FCAW

수치해석 모델 및 요소분할은 열분포 특성 및 응력변화 특성을 고려한 것으로 실험에 사용한 시험편 형상과 동일하게 하였으며, Fig. 3.2에 나타내었다. 또한, 최저인성부라고 평가되는 fusion line 근처의 열영향부의 정량적인 인성값을 산출 하기 위해 노치를 BS7448에 의거하여 결정립 조대부위(CGHAZ)에 삽입하였다.



Fig. 3.2 FE model for numerical analysis

수치해석은 아이소파라메트릭요소를 도입한 유한요소 열전도 프로그램을 사용하 여 요소 및 절점뿐만 아니라 임의의 점(요소의 길이, 넓이 및 두께내의 적분점)에 서도 필요한 온도분포 특성을 고찰하였으며, 또한 용접열원의 이동효과와 재료의 비선형화 즉 재료정수의 온도의존성을 고려하였다. 또한 각 모델에 대한 용접입열 (Q)의 계산은 (3.1)식에 의거하여 산정하였으며,

$$Q = \eta_a \frac{EI}{V} \tag{3.1}$$

여기서, Q : 용접아크의 유효 입열량(J/cm), n<sub>a</sub> : 아크효율, E: 아크전압 (V) I : 아크전류 (A), V: 용접속도 (cm/sec) 용착금속의 각 요소에 대한 입열 (q)는 식(3.1)을 칼로리로 환산 한 식(3.2)을 이용하였다.

$$q = \frac{Q \times l}{4.19 \times A \times l \times t} \tag{3.2}$$

여기서, q : 열유속(cal/cm<sup>2</sup>·sec),  $\ell$  : 용접선길이(cm), t : 용접시간 (sec.)

A : 입열요소면적 (cm<sup>2</sup>)

## 3.2 極厚板 熔接部의 熱分布 特性

본 절에서는 각 용접공정 (EGW 및 FCAW)에 따른 극후판 용접부의 열거동에 대해 고찰해 보았다. FCAW 해석은 다층-다패스(Multi-layer, Multi-pass)를 고려하여 수치해석을 수행하였으며, 공정별 용접조건(패스수, 입열량 등)에 따라 시간별, 위치별 열적 특성을 해석하였다.

#### 3.2.1 EGW 熔接部의 熱分布 特性

Fig. 3.3 (a),(b)의 그림은 해석시험편 단면의 각 패스별 최고온도가 나타나는 시점의 온도분포이다. (a)그림은 전면용접부의 용접 1pass 개시 후 2초일 때, (b) 그림은 후면용접부의 용접 2pass 개시 후 2초일 때의 온도 분포도이다.

온도분포 특성을 살펴보면, 입열량이 큼에 따라 상대적으로 용착금속부 및 고온 분포역이 크게 나타나고 있다. 그리고 후행 용접된 후면용접부의 온도분포가 선행 용접된 전면용접부의 온도영향으로 다소 상승함을 보이고 있다.









Fig. 3.4(a).(b)의 그림은 해석시험편 단면의 각 패스별 냉각 시간대별 온도분 포도이다. (a) 그림은 전면용접부의 용접 1Pass 종료후 26초, 80초일 때, (b) 그 림은 후면용접부의 용접 2Pass 종료후 26초, 80초 일 때, 온도 분포도이다.

용접종료 후 80초가 경과한 시점에서 보면, 전영역에서의 온도분포 양상이 동일 한 형태를 나타내면서 그 크기가 거의 일정해짐을 보이고 있다.



(a-2) 1Pass / 80Sec



(b-1) 2Pass / 26Sec (b-2) 2Pass / 80Sec Fig. 3.4 Temperature fields in the xy plane in cooling stage

Fig. 3.5는 해석시험편의 두께방향 (y=31mm) 지점에서 용접선 폭방(X=198, 210, 220mm) 떨어진 지점에 위치한 용착금속부(Weld metal), 열영향부(Heat affected zone), 모재(Base metal)의 시간에 따른 온도 상승, 냉각 과정을 나타낸 것이다. X=198mm지점은 용착금속부, X=210mm지점은 열영향부, X=220mm지점은 열영향부 부 근 모재에 해당된다.

그림에서 주목하여 보면, 용착금속부의 온도분포는 2초 정도가 경과한 시점에서 최고가 되고, 열영향부는 6초정도, 모재에 있어서는 35초 정도가 경과한 시점에서 열전도에 의해 최고가 됨을 나타내었다. 그리고 용접 후 초기시점(2초후)에서는 용착금속부, 열영향부 및 모재의 온도차가 크게 발생하고 냉각과정에 있어서 높은 온도를 유지하면서 냉각됨을 보이고 있다.

또한 용접종료 후 110초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속, 열영향부 및 모재 의 온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고 온도 구배의 차가 거의 발생되지 않 고 있음을 확인할 수 있었다.



Fig. 3.5 Temperature history of W.M , H.A.Z. and B.M

Fig. 3.6은 해석시험편의 균열선단의 시간에 따른 온도이력을 나타낸 것이다. (a) 그림은 전면용접부의 용접 1Pass시 시간에 따른 온도 이력이고 (b) 그림은 후 면용접부의 용접 2Pass시 시간에 따른 온도이력 곡선이다.

균열선단은 최고온도 800~1,100℃영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있음을 알 수 있다.



Fig. 3.6 Temperature history of crack tip

# 3.2.2 FCAW 熔接部의 熱分布 特性

Fig. 3.7은 해석시험편 단면의 패스별 온도분포도로, 각 패스별 최고온도를 나타내는 시점의 온도분포이다. (a)는 전면용접부의 용접 5pass 개시 후 8초일 때, (b)는 전면용접부의 용접 10pass 개시 후 8초일 때, (c)는 후면용접부의 용접 19pass 개시 후 8초일 때, (d)는 후면용접부의 용접 28pass 개시 후 8초일 때의 온도 분포도이다.



Fig. 3.7 Temperature fields of the xy plane in heating stage

Fig. 3.8는 해석시험편 단면의 각 패스별 냉각과정의 온도분포도로, 용접종료후 10초가 경과한 시점에서의 온도분포이다. (a)는 전면용접부의 용접 5pass 일 때, (b)는 전면용접부의 용접 10pass 일 때, (c)는 후면용접부의 용접 19pass 일 때, (d)는 후면용접부의 용접 28pass 일 때의 온도 분포도이다.

용접종료 후 10초가 경과한 시점에서 보면 전 영역에서 온도분포 양상이 동일한 형태로 나타나고 그 크기가 거의 일정해짐을 보이고 있다.



Fig. 3.8 Temperature fields of the xy plane in cooling stage

Fig. 3.9은 해석시험편의 두께방향 (y=41mm) 지점에서 용접선 폭방향(X=199.5, 194, 190mm) 떨어진 지점에 위치한 용착금속부(Weld metal), 열영향부(Heat affected zone), 모재(Base metal)의 시간에 따른 온도 상승, 냉각 과정을 나타낸 것이다. X=199.5mm지점은 용착금속부, X=194mm지점은 열영향부, X=190mm지점은 열 영향부 부근 모재에 해당된다.

그림에서 주목하여 보면, 냉각과정에 있어서 냉각곡선이 용접 후 초기과정에서 가파르게 나타나고 있는데, 이것은 EGW용접법에 비해 입열량이 적고 시험편 두께 가 극후판이므로 열전도가 빨리 이루어지는 결과로 생각된다.

그리고 용접종료 후 20초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속부, 열영향부, 모 재의온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고 온도 구배의 차가 거의 발생되지 않 음을 보이고 있다.



Fig. 3.9 Temperature history of W.M , H.A.Z and B.M

Fig. 3.10은 해석시험편의 균열선단의 시간에 따른 온도이력을 나타낸 것이다. (a) 그림은 전면용접부의 용접 1Pass시, (b) 그림은 용접 3Pass시, (c) 그림은 용 접 11Pass시, (d) 그림은 용접 18Pass시, (e) 그림은 용접 19Pass시, (f) 그림은 용접 21Pass시, (g) 그림은 용접 29Pass시, (h) 그림은 용접 37Pass시 시간에 따 른 온도이력 곡선이다.

균열선단은 최고온도 750~1,400℃영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있음을 알 수 있다.





Fig. 3.10 Temperature history of crack tip

# 3.3 考察 및 結論

#### 3.3.1 EGW 熔接部의 熱的 特性

1) 입열량이 큼에 따라 상대적으로 용착금속부 및 고온 분포역이 크게 나타나 고, 후행 용접된 후면용접부의 온도분포가 선행 용접된 전면용접부의 온도영향으로 다소 상승함을 보였다.

2) 용착금속부의 온도분포는 2초 정도가 경과한 시점에서 최고가 되고, 열영부는 6초 정도, 모재에 있어서는 35초 정도가 경과한 시점에서 열전도에 의해 최고가 됨을 나타내었다. 그리고 용접 후 초기시점(2초후)에서는 용착금속부, 열영향부 및 모재의 온도차가 크게 발생하고 냉각과정에 있어서 높은 온도를 유지하면서 냉각됨을 보였다.

3) 용접종료 후 110초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속, 열영향부 및 모재 의 온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고 온도 구배의 차가 거의 발생되지 않 고 있음을 확인할 수 있었다.

4) 균열선단은 최고온도 800~1,100℃영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구 배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있었다.

#### 3.3.2 FCAW 熔接部의 熱的 特性

 8착금속의 온도분포는 용접 개시 후 8초 정도 경과한 시점에서 최고가 되고, 열영향부는 8.7초 정도, 모재에 있어서는 9초 정도가 경과한 시점에서 열전도에 의해 최고가 됨을 나타내었다.

2) 냉각과정에 있어서 냉각곡선이 용접 후 초기과정에서 가파르게 나타났고, 용접종료 후 20초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속부, 열영향부, 모재의온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고 온도 구배의 차가 거의 발생되지 않음을 보이 고 있다.

3) 균열선단은 최고온도 750~1,400℃영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구 배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있었다.

本 章에서 얻어진 熱分布 數値解析 結果를 綜合하여 보면, EGW 경우 FCAW 대비 입열량이 큼에 따라 상대적으로 고온 분포역이 크게 나타나나, 균열선단에서 최고 온도는 800~1,100℃ 영역으로, FCAW 균열선단에서의 최고온도 750~1,400℃영역 대 비 크지 않게 나타난다.

# 第4章. 極厚板 熔接部의 力學的 特性

본 장에서는 제 3 장에서 수행한 연구결과 즉 용접열원의 크기 및 분포를 열 하 중으로 하여 용접체에 발생 하는 역학적 메카니즘을 해석하고, 용접 제현상(용접 잔류응력 및 소성변형율의 분포 및 발생기구)을 분석하여 용접부에 대한 역학적 특성을 규명하고자 하였다.

#### 4.1 EGW 熔接部의 力學的 特性

해석 시험편의 형상 및 크기는 Fig. 3.1과 동일한 것, 즉 용접 열분포 해석과 동일하게 채택하였고, 수치해석은 유한요소법에 의한 평면변형 열탄소성 해석을 수행하였다

Fig. 4.1 (a)~(c)는 용접부 해석시험편 전 영역에 대한 용접 잔류응력성분을 도 시한 것이다. (a) 그림은 용접선 폭 방향 용접 잔류응력성분( $\sigma_x$ ), (b) 그림은 판 두께방향 용접 잔류응력성분( $\sigma_y$ ), (c) 그림은 용접선 길이 방향 용접 잔류응력성 분( $\sigma_y$ )의 분포도이다.

용접잔류응력 각 성분의 크기를 비교해 보면  $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 순으로 나타났다. 용 접잔류응력이 이러한 분포를 나타내는 이유는, 해석시험편의 역학적 구속력의 크 기 때문이다. 그리고 전면 용접부의 경우 용접선 길이방향 용접잔류응력( $\sigma_z$ )은 인 장성분을 나타내고 판의 두께 방향( $\sigma_y$ ) 및 용접선 폭 방향( $\sigma_x$ )의 경우 압축 성분 을 나타내고 있다. 특히, 용접선 폭 방향( $\sigma_x$ )의 경우 시험편의 중앙부 영역에 압 축성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다.

후면 용접부의 경우 응력성분 모두 주로 인장성분을 보이고 있으며, 특히 시험 편의 중앙부영역에 인장성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다. 그리고 용접잔류 응력 성분 중 용접 잔류응력 성분을 주도하는 용접선 길이방향( $\sigma_z$ )가 전면 용접부 에 비해 응력이 크게 발생되고 있음을 보이고 있다. 이러한 분포양상은 선행 용접 된 전면 용접부가 후행 용접부, 즉 후면용접부를 구속함에 기인한 것이라 사료된 다.

또한 시험편의 중앙부에서 최대응력이 발생하는데, 이는 용접시 대입열로 인하 여 시험편 중앙부영역으로 열집중 분포 양상이 나타나, 이로 인해 주위에서 강한 구속력이 작용함에 기인한 것이라 사료된다.



(c) σ z

Fig. 4.1 Residual stress distribution of EGW welded specimen

Fig. 4.2는 시험편 전 영역에 걸쳐 발생하는 소성 변형율 성분( $\epsilon_x^p, \epsilon_y^p 및 \epsilon_z^p$ )을 도 시한 것이다. (a) 그림은 용접선 폭 방향 소성변형 성분 ( $\epsilon_x^p$ ), (b) 그림은 판 두 께 방향 소성 변형율 성분( $\epsilon_y^p$ ), (c) 그림은 용접선 길이 방향 소성 변형율 성분 ( $\epsilon_z^p$ )의 분포도이다.

각 성분별 특징을 비교해 보면, 용접선 길이방향 소성 변형율 성분 $(c_{\gamma}^{p})$ 는 용착 금속 및 열영향부에서 인장성분을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축 성분으로 변화하고 있으며, 특히 전면용접부에 크게 인장성분이 발생하고 있다.

그리고 용접선 폭방향 소성 변형율 성분( $e_r^p$ )는 용착금속 및 열영향부 전체영역 에서 압축성분이 나타나는데. 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생하고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다.

판두께 방향성분 ( $\mathcal{E}_{y}^{p}$ )은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분울 보이고 있 으며. 전면 용접부의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다.

이상의 특징은 역학적으로 구송이 가장 z방향 (용접선 길이방향)에 커다란 인장 의 소성변형이 발생되며 소성변형이 비압축성 즉, 체적불변의 조건을 만족하여 역 학적 구속의 가장 약학 y방향(판두께 방향)에 커다란 압축의 소성변형이 발생하는 것으로 사료된다.









#### (c) $\varepsilon^{p} z$

Fig. 4.2 Plastic strain distribution of EGW welded specimen

Fig. 4.3은 균열선단의 용접잔류응력 분포도이다. EGW 용접부의 파괴거동에 미 치는 잔류응력의 효과를 규명하기 위해, 균열선단의 용접 잔류응력 분포특성을 고 찰해 보았다.

용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분( $\sigma_x$ ) 을 주목하여 보면, 그림에 도시한 바와 같이 균열 선단부에 인장잔류응력 성분 (Crack opening stress)을 나타내고 있다. 이러한 EGW 용접부의 균열선단 주위의 인장 잔류응력(Crack opening stress)은 무부하 상태에서도 균열면이 열리게 되어 균열진전에 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다.



Fig. 4.3 Stress field near surface crack tip of EGW welded specimen

#### 4.2 FCAW 熔接部의 力學的 特性

Fig. 4.4 (a)~(c)는 FCAW용접부 해석시험편 전 영역에 대한 용접 잔류응력성분 을 도시한 것이다. (a) 그림은 용접선 폭 방향 용접 잔류응력성분(σ<sub>x</sub>), (b) 그림 은 판 두께방향 용접 잔류응력성분(σ<sub>y</sub>), (c) 그림은 용접선 길이 방향 용접 잔류 응력성분(σ<sub>x</sub>)의 분포도이다.

Fig. 4.5은 시험편 전 영역에 걸쳐 발생하는 소성 변형율 성분 $(\epsilon_x^p, \epsilon_y^p, \epsilon_z^p)$ 을 도시 한 것이다. (a) 그림은 용접선 폭방향 소성변형율 성분 $(\epsilon_x^p)$ , (b) 그림은 판두께방 향 소성변형율 성분 $(\epsilon_y^p)$ , (c) 그림은 용접선 길이방향 소성변형율 성분 $(\epsilon_z^p)$ 의 분포 도이다.

각 성분별 특징을 비교해 보면, 용접선 길이방향 소성변형율 성분( $\epsilon_z^p$ )는 용착금 속 및 열영향부에서 인장성분을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축성 분으로 변화하고 있다. 그리고 용접선 폭방향 소성변형율 성분( $\epsilon_x^p$ )는 용착금속 및 열영향부 전체영역에서 압축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부 영역에서 최대치가 발생하고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내 고 있다.

판두께 방향성분 ( $\varepsilon_y^p$ )은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분울 보이고 있으며, 전면 용접부의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다.





Fig. 4.4 Residual stress distribution of FCAW welded specimen



Fig. 4.5 Plastic strain distribution of FCAW welded specimen

Fig. 4.6은 균열선단의 용접잔류응력 분포도이다. 잔류응력 성분 중 균열 개폐 거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ<sub>x</sub>)을 주목하여 보면, 그림에 도시한 바와 같이 크랙 선단부에 압축잔류응력성분(Crack closure stress)을 나타내고 있 다.

이러한 FCAW용접부 균열선단의 압축 잔류응력(Crack closure stress)은 무부하 상태에서도 크랙면이 닫히게 되어 균열진전을 지연시키는데 크게 영향을 주는 것 으로 생각할 수 있다.



Fig. 4.6 Stress field near surface crack tip of FCAW welded specimen

#### 4.3 外力에 의한 極厚板 熔接部의 殘留應力 再分布 特性

본 절에서 용접공정별(EGW, FCAW) 극후판 용접부의 외력에 의한 잔류응력의 재 분포 특성을 규명하기 위해, 굽힘하중 및 잔류응력과 굽힘하중의 복합하중 각각 에 대한 응력해석을 수행하여 응력분포상태를 비교·분석하였다. 해석은 전 4.1, 4.2절의 열탄소성 해석 후 얻어진 용접 잔류응력 해석 데이터를 상용프로그램 ANSYS에 초기응력으로 하여 용접체의 잔류응력 특성을 고찰하였다.

#### 4.3.1 노치加工에 의한 殘留應力 分布 特性

해석시험편(EGW 및 FCAW용접시험편)에 실제 3점 굽힘시험과 동일하게 최저 인성 부라고 평가되는 Fusion line 근처의 열영향부 결정립 조대부위(CGHAZ)에 노치형 상 및 예비균열을 반영하고 굽힘하중 작용시 노치 및 균열선단의 응력분포 특성을 고찰하였다.

Fig. 4.7은 EGW 시험편의 노치선단부의 각 위치에서의 노치가공 전·후의 각 응력 성분을 도시한 것이다. (a) 그림은 용접선 폭 방향 성분( $\sigma_x$ ), (b) 그림은 용 접선 판 두께 방향 성분( $\sigma_y$ ), (c) 그림은 용접선 길이 방향 성분( $\sigma_z$ ) 의 분포도 이다.

그림에서 나타난 응력성분  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 의 양상을 보면, 노치선단근방의 응력분포 는 노치가공 전 노치선단 연장선 각 위치에서 인장성분을 보이고 있다. 그러나 노 치가공후 모든 응력성분이 압축 성분으로 변화하며, 노치선단 연장선으로부터 멀 어질수록 압축 성분 값이 점자 감소하고 있다.

특히 균열개폐거동과 관련 있는 응력성분( $\sigma_x$ )을 주목하여 보면, 노치가공 전 용 접잔류응력성분이 크랙개구진전을 촉진하는 인장성분을 나타내나, 노치가공후 크 랙진전을 지연시키는 압축성분 값으로 응력분포가 변화하고 있다.











(d)  $\sigma_{eq}$ 

Fig. 4.7 Stress distributions ahead crack tip of EGW welded specimen before and after notch machined

Fig. 4.8은 FCAW 시험편의 노치선단부의 각 위치에서의 노치가공 전·후의 각 응력성분을 도시한 것이다. (a) 그림은 용접선 폭방향 응력성분( $\sigma_x$ ), (b) 그림 은 용접선 판 두께 방향 응력성분( $\sigma_y$ ), (c) 그림은 용접선 길이 방향 응력성분 ( $\sigma_z$ )의 분포도이다.

노치가공 전·후의 노치선단 근방의 응력분포를 주목하여보면, 노치가공 후 용접 선폭방향 응력( $\sigma_x$ )는 압축성분이 더욱 증가함을 보이고, 판두께 방향 응력( $\sigma_y$ )는 인장성분에서 압축성분으로 변화함을 보이고 있다. 그리고 용접선 길이방향 응력 ( $\sigma_z$ )는 인장성분 값이 감소함을 보이고 있다.

특히, 균열개폐거동과 관련 있는 응력성분( $\sigma_x$ )는 노치가공 전 균열진전을 지연 시키는 압축 성분에서 노치가공 후 압축성분이 크게 증가하였다.





















Fig. 4.8 Stress distributions ahead crack tip of FCAW welded specimen before and after notch machined

# 4.4 XRD를 利用한 熔接殘留應力 測定

#### 4.4.1 測定方法 및 測定位置

용접시편은 용접시 발생하는 온도차에 의해서 용융부와 열영향부(HAZ) 그리고 모 재의 조직이 변화하게 된다. Bragg's Law에 의하면 식(4.1)과 같이 조직의 변화에 따라 X-Ray의 회절각(sin2 $\psi$ )이 달라지고 Fig. 2.32에서와 같이 이에 따른 면간거 리(Lattice Spacing)변화 측정함으로서 Strain의 차이에 따른 잔류 응력을 측정하 게 된다. (V Monin et al, 2000)

$$2dsin\theta = n\lambda \tag{4.1}$$

여기서 d는 면간거리이고, heta는 Fig.4.9 에서와 같이 입사각과 반사각을 나타내고, $\lambda$ 는 X-Ray의 파장을 나타낸다.



Fig. 4.9 Measurement of variations in the lattice spacing from the diffraction angle(from chun et al, 2007)

이때 XRD잔류응력 측정방법은 표면의 X-선 회절을 이용하여 잔류응력을 계측하 므로 표면상태에 따라 계측 값의 정확도가 결정된다. 따라서 시편의 표면을 화학 적으로 부식시켜 표면의 상태가 균일하도록 처리한 후에 잔류응력을 계측하였다.

Fig. 4.10 (a), (b)에서와 같이 XRD잔류응력 측정장비에 시편을 설치하고 각 시편에 대해서 용접비드의 끝부분을 시작으로 2, 3, 6, 18mm간격으로 370개의 Point를 측정하였다.



(a) XRD residual stress measurement equipment



(b) Measured points on the specimen

Fig. 4.10 Measured points on the specimen by XRD residual measurement equipment

### 4.4.2 有限要素解析 結果와 計測값 比較

X-Ray 잔류응력 측정기를 이용하여 용접선에 수직방향(X-방향)에 대한 잔류응 력을 측정하였으며, 측정값과 수치해석 결과와의 비교를 Fig. 4.11, Fig. 4.12에 나타내었다. 두 결과값을 비교해 보면 정량적으로는 수치해석값이 측정값에 비해 다소 높은 값을 보이나 정성적으로는 유사한 잔류응력 분포를 나타내었다.



Fig. 4.11 Comparison of welding residual stress values for EGW welded specimen



Fig. 4.12 Comparison of welding residual stress values for FCAW welded specimen

# 4.5 考察 및 結論

#### 4.5.1 EGW 熔接部의 力學的 特性

1) 각 성분별 응력크기는 역학적 크기가 큰 방향의 응력값이 두드러지게 크게 발생하였으며, 각 성분의 크기는  $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 순으로 나타났다. 전면 용접부의 경 우 용접선 길이방향 용접잔류응력 $(\sigma_z)$ 은 인장성분을 나타내고 판의 두께 방향 $(\sigma_y)$ 및 용접선 폭 방향 $(\sigma_x)$ 의 경우 압축 성분을 나타내고 있다.

특히, 용접선 폭 방향( $\sigma_x$ )의 경우 시험편의 중앙부 영역에 압축성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다. 후면 용접부의 경우 응력성분 모두 주로 인장성분을 보이 고 있으며, 특히 시험편의 중앙부영역에 인장성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다.

2) 용접잔류응력 성분 중 용접 잔류응력 성분을 주도하는 용접선 길이방향 응 력성분(σ<sub>z</sub>)가 후면용접부에서 전면용접부에 비해 응력이 크게 발생되였고, 시험편 의 중앙부에서 최대응력이 발생하였다.

3) 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분 (σ<sub>x</sub>)은 균열선단부에 인장잔류응력 성분(Crack opening stress)을 나타내어, 균열 진전에 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다.

4) 소성변형율 분포는 용접선 길이방향 소성변형율 성분(e<sup>p</sup><sub>z</sub>)는 용착금속 및 열 영향부에서 인장성분을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축성분으로 변화하고 있으며, 특히 전면용접부에 크게 인장성분이 발생하였다. 그리고 용접선 폭방향 소성변형율 성분( $\epsilon_x^p$ )는 용착금속 및 열영향부 전체영역에 서 압축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생하고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다. 판두께 방향성분 ( $\epsilon_y^p$ )은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분울 보이고 있으 며, 전면 용접부의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다.

이상의 특징은 역학적으로 구속이 가장 큰 z방향 (용접선 길이방향)에 커다란 인장의 소성변형이 발생되며 소성변형이 비압축성 즉, 체적불변의 조건을 만족하 여 역학적 구속의 가장 약학 y방향(판두께 방향)에 커다란 압축의 소성변형이 발 생하는 것으로 사료된다.

#### 4.5.2 FCAW 熔接部의 力學的 特性

1) 각 성분별 응력크기는 역학적 크기순 σ<sub>z</sub> > σ<sub>y</sub> > σ<sub>y</sub>순으로 나타나고, 선행용 접부는 후행용접시 입열로 인한 응력완화로 후행용접부에 비해 보다 작게 발생하 였으며, 후면 용접부의 경우 전면용접부의 구속으로 인하여 보다 큰 잔류응력이 생성되었음을 알 수 있다. 또한 최대응력값은 표면 부근에서 발생하였는데, 이는 상표면의 열전달 효과로 온도가 급격히 변하기 때문이라고 판단된다.

2) 잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ<sub>x</sub>) 은균열 선단부에 압축잔류응력성분(Crack closure stress)을 나타내고 있다. 이러 한 FCAW용접부 균열선단의 압축 잔류응력(Crack closure stress)은 무부하 상태에 서도 크랙면이 닫히게 되어 균열진전을 지연시키는데 크게 영향을 주는 것으로 사 료된다. 3) 용접선 길이방향 소성변형율 성분(e<sup>p</sup><sub>z</sub>)는 용착금속 및 열영향부에서 인장성분 을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축성분으로 변화하고 있다. 그리 고 용접선 폭방향 소성변형율 성분(e<sup>p</sup><sub>x</sub>)는 용착금속 및 열영향부 전체영역에서 압 축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생하 고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다. 판두께 방향성분 (e<sup>p</sup><sub>y</sub>)은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분울 보이고 있으며, 전면 용접부 의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다.

# 4.5.3 EGW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에 의한 殘留應力 再分布 特性

1) 노치선단근방의 응력분포는 노치가공 전 노치선단 연장선 각 위치에서 인장 성분을 보였으나, 노치가공 후 모든 응력성분이 압축 성분으로 변화하였다. 그리 고 노치선단 연장선으로부터 멀어질수록 압축 성분 값이 점자 감소하였다.

2) 특히 균열개폐거동과 관련 있는 응력성분(σ<sub>x</sub>)은 노치가공 전 용접잔류응력 성분이 크랙개구진전을 촉진하는 인장성분을 나타내나, 노치가공후 크랙진전을 지 연시키는 압축성분값으로 응력분포가 크게 변화하였다.

3) 균열선단전방의 압축잔류응력의 분포가 굽힘하중에 의하여 인장잔류응력 분 포로 재분포되었으며, 균열길이가 커질수록 균열선단전방의 응력이 더욱 커지나 분포양상은 거의 동일하게 나타났다.

# 4.5.4 FCAW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에 의한 殘留應力 再分布 特性

1) 노치가공 전·후의 노치선단 근방의 응력분포는 노치가공 후 용접선 폭방향 응력 $(\sigma_x)$ 는 압축성분이 더욱 증가함을 보이고, 판두께 방향 응력 $(\sigma_y)$ 는 인장성분 에서 압축성분으로 변화함을 보였다. 그리고 용접선 길이방향 응력 $(\sigma_z)$ 는 인장성분 값이 감소함을 보였다.

2) FCAW용접부의 균열개폐 응력성분(σ<sub>x</sub>)이 EGW용접부의 경우에 비해 압축성분 이 균열선단부에서는 다소 적으나, 균열연장선으로부터 멀어질수록 거의 동일한 응력 분포값을 나타냈다. 그리고 FCAW용접부의 균열선단부의 균열개폐 응력성분 (σ<sub>x</sub>)의 압축영역 범위가 EGW용접부의 응력 영역에 비해 다소 크게 분포함을 보이 고 있다. 또한 상당응력값을 비교해보면 FCAW용접부의 균열선단 전방 및 부근의 압축영역 범위가 EGW용접부의 응력영역에 비해 크게 분포함을 보였다.

3) 균열선단전방의 압축잔류응력의 분포가 굽힘하중에 의하여 인장잔류응력 분 포로 재분포되고 있다. 그리고 균열길이가 커질수록 균열선단전방의 응력이 더욱 커지나 분포양상은 거의 동일하게 나타나고 있다.

열분포에 따른 EGW/FCAW 용접부의 역학적 특성을 종합하여 보면, EGW의 경우 용 접부 중앙에서 최대응력을 발생하였으며, FCAW의 경우 최대응력은 용접부 표면부 근에서 발생 하였다. EGW의 최대 잔류응력 분포는 FACW에 비하여 광범위하게 나타 나며, EGW 균열선단에서 모든 잔류응력 성분은 FCAW에 비하여 높게 나타났다.

# 第5章. 極厚板 熔接部의 性能實驗

# 5.1 EGW 熔接部의 性能評價

#### 5.1.1 引張試驗

용접부의 인장강도를 시험편 half thickness에 대해 실시하였다. 인장실험결과 모두 모재에서 파단이 되었으며 인장강도 평균값은 약540Mpa로 규격에서 요구하는 값을 상회함을 확인할 수 있었다. EGW 용접시험편에 대한 시험결과를 Table 5.1 에 나타내었다. 인장 강도의 경우 모든 시편이 최소 요구치인 470MPa을 초과하는 수치를 보이며 규격에 만족하였다.

ltem	Size	$\Lambda r \circ \circ (mm^2)$	Tensile strength			
	(w×tmm)	AT ea(mm)	Total load(Ton)	Unit stress(MPa)		
Spec.	_	_	_	470~620		
1	25.0× 40.2	1005.00	55.60	542.16		
2	25.6× 35.3	903.68	49.80	540.05		
3	25.4× 38.5	977.90	53.30	540.25		
4	24.9× 37.8	941.22	50.85	536.17		
5	14.0Φ	153.86	9.95	633.75		

Table 5.1 Tensile test results of EGW

- Requirement : Min. 470MPa
- Specimen Size (w×t mm): 25× 39(Half thickness)
- Fracture location : B. M.

# 5.1.2 굽힘試驗

굽힘 실험은 각도 180도에서 측면 굽힘 시험을 실시하였다. 실험결과 Table 5.2 및 Photo. 5.1에 보이는 바와 같이 결함이 발견되지 않았으며 선급규격에서 요구 치를 만족함을 함을 확인할 수 있었다.

Table 5.2 Bending test results of EGW

ltem	Specimen Type	Angle	Requirement	Result
1~4	Side bend	180°	Open defect length≤ 3mm	Accepted



Photo. 5.1 Bending test of EGW welded specimens

## 5.1.3 衝擊試驗

용접부의 부위별 -20도에서 샤르피 충격시험(CVN impact test)을 수행하여 얻은 충격 인성 결과치를 Table 5.3 및 Fig. 5.1에 나타내었다. 용접부 부위(용접금속, F.L, F.L+1mm,+2mm,+3mm,+5mm, +10MM)별 및 위치(Face, Middle)별 전 범위에서 모 두 150J 이상의 충격인성을 보이고 있으며 선급규격에서 요구하는 34J이상의 충격 인성을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.



Photo. 5.2 Results of CVN impact test



Fig. 5.1 Impact test results
Notch Location		Domorik			
(Face)	1	2	3	Avg.	Remark
Weld Metal	146.6	148.6	163.4	152.9	
Fusion Line	313.1	210.9	280.6	268.2	
Fusion Line + 1mm	246.0	272.1	280.5	266.2	Trans.
Fusion Line + 2mm	231.0	337.1	325.7	297.9	Requirement 34J(at
Fusion Line + 3mm	341.6	314.1	318.7	324.8	-20℃)
Fusion Line + 5mm	328.0	299.8	316.4	314.7	
Fusion Line + 10mm	323.4	322.9	317.3	321.3	

Table 5.3 Impact test results of EGW

Notch Location		Domorik			
(Middle)	1	2	3	Avg.	nelliar K
Weld Metal	126.7	126.7	119.6	124.3	
Fusion Line	170.8	302.2	328.0	267.0	
Fusion Line + 1mm	270.7	280.5	283.0	278.1	Trans.
Fusion Line + 2mm	217.9	307.0	323.4	282.8	Requirement 34J(at
Fusion Line + 3mm	328.0	328.0	273.2	309.7	-20℃)
Fusion Line + 5mm	350.5	339.5	316.4	335.5	
Fusion Line + 10mm	341.6	341.1	346.0	342.9	

# 5.1.4 硬度試驗

경도 시험은 Photo. 5.3에 도시한바와 같이 Top side와 Bottom side 의 용착금 속, 열영향부, 모재 총22개의 지점을 측정하였다. 경도분포를 살펴보면 용착금속 은 약 218Hv, 열영향부는 215Hv로 후면 용접부가 전면 용접부에 비하여 값이 다소 높게 나타남을 보이고 있으며, 용접금속의 경도는 HV235이하, HAZ는 218이하로 선 급의 Rule 요구치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

Requirement: Max. 260Hv for Weld, Max. 350Hv for HAZ



Photo. 5.3 Hardness measurement point of EGW welded specimen

Table 5.4 Hardness test results of EGW

Hardness Value (HV10)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
206.5	174.4	185.6	175.0	215.4	215.6	209.2	191.7	187.8	190.1	214.9
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
210.4	199.3	204.1	218.1	232.2	235.6	236.4	207.2	216.9	212	211.1

# 5.2 FCAW 熔接部의 性能評價

# 5.2.1 引張試驗

용접부의 인장강도를 시험편 half thickness에 대해 실시하였다. 인장실험결과 모두 모재에서 파단이 되었으며 인장강도 평균값은 약540Mpa로 규격에서 요구하는 값을 상회함을 확인할 수 있었습니다. FCAW 용접시험편에 대한 인장시험 결과는 Table 5.5에 나타내었다.

Table 5.5	Tensile	test	results	٥f	FCAW
Table J.J	1613116	ισοι	ICOULLO	01	

	Size	A (mm <sup>2</sup> )	Tensile strength			
Item	(w×tmm)	Area(IIIII)	Total load(Ton)	Unit stress(MPa)		
Spec.	_	_	_	470 ~ 620		
1	25.3 x 38.0	961.40	52.60	536.17		
2	25.3 x 37.5	948.75	51.30	529.89		
3	25.3 x 37.3	943.69	51.95	539.48		
4	24.9 x 37.8	941.22	52.25	555.13		
5	14.2Ф	158.28	10.50	650.11		

Requirement : Min. 470MPa

- $\bigcirc$  Specimen Size (w × t mm) : 25 × 39(Half thickness)
- Fracture location : B. M.

# 5.2.2 굽힘試驗

굽힘 실험의 경우 각도 180도에서 측면 굽힘 시험을 실시하였고 실험결과는 Photo 5.4에 보이는 바와 같이 결함이 발견되지 않았으며 선급규격에서 요구치를 만족함을 함을 확인할 수 있었다.

Table 5.6 Bending test results of FCAW

ltem	Specimen Type	Angle	Requirement	Result
1~4	Side bend	180°	Open defect length ≤ 3mm	Accepted



Photo. 5.4 Bending test of FCAW welded specimens

#### 5.2.3 衝擊試驗

용접부의 부위별 -20도에서 샤르피 충격시험(CVN impact test)을 수행하여 얻은 충격 인성 결과치를 Table 5.7에 나타내었다. 용접부 부위(용접금속, F.L, F.L+1mm, +2mm, +3mm, +5mm, +10mm)별 및 위치(Face, Middle)별 전 범위에서 모두 150J 이상의 충격인성을 보이고 있으며 선급규격에서 요구하는 34J이상의 충격인 성을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

Notch Location		Pomork			
(Face)	1	2	3	Avg.	nelliai k
Weld Metal	110.1	126.7	107.7	114.8	
Fusion Line	64.8	96.1	98.1	86.3	
Fusion Line + 1mm	278.1	173.3	107.7	186.4	Trans.
Fusion Line + 2mm	337.1	323.4	318.7	326.4	Requirement 47J(at
Fusion Line + 3mm	299.8	318.7	307.0	308.5	-20℃)
Fusion Line + 5mm	346.0	323.4	334.8	334.7	
Fusion Line + 10mm	339.8	340.7	340.2	340.2	

Table 5.7 Impact test results of FCAW

Notch Location		Domorte			
(Middle)	1	2	3	Avg.	
Weld Metal	49.9	52.0	37.6	46.5	
Fusion Line	98.4	84.7	103.1	95.4	
Fusion Line + 1mm	190.8	378.1	334.8	301.2	Trans.
Fusion Line + 2mm	354.8	378.1	343.8	358.9	Requirement 47J(at
Fusion Line + 3mm	323.4	253.4	314.1	297.0	-20℃)
Fusion Line + 5mm	330.3	323.4	309.4	321.0	
Fusion Line + 10mm	309.4	299.8	304.6	304.6	

## 5.2.4 硬度試驗

경도 시험은 비커스경도기를 이용하여 측정하였으며 측정위치는 Photo 4.5에 도 시한바와 같이 Top side와 Bottom side 의 용착금속, 열영향부, 모재를 측정하였 다. 경도분포를 살펴보면 용착금속은 약 218Hv, 열영향부는 215Hv로 후면 용접부 가 전면 용접부에 비하여 값이 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 전체적으로 TMCP 강의 정상적인 경도분포를 보이고 있으며 용접금속의 경도는 HV235이하, HAZ는 218이하로 선급의 rule 요구치를 만족하고 있음을 알 수 있다.



Requirement: Max. 260Hv for Weld, Max. 350Hv for HAZ

Photo 5.5 Hardness measurement point FCAW welded specimen

	Table 5	5.8	Hardness	test	results	of	FCAW
--	---------	-----	----------	------	---------	----	------

Hardness Value (HV10)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
194.8	217.9	212.9	207.9	212.0	218.5	218.2	231.4	223.8	210.2	190.9
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
186.4	229.6	240.6	241.6	204.5	225.2	220.7	232.6	225.3	222.6	198.8

# 5.3 考察 및 結論

#### 5.3.1 EGW 熔接部의 性能評價

 EGW시편의 인장실험시 파단은 모재에서 발생하였으며 인장강도값은 539MPa 최소 요구치인 460MPa을 초과하는 수치를 나타내었다.

2) 측면굽힘실험은 결함이 발견되지 않았고, 샤르피충격실험은 용접부 부위(용 접금속, F.L, F.L+1mm,+2mm,+3mm,+5mm, +10mm)별 및 위치( Face, Middle)별 전 범 위에서 모두 150J 이상의 충격인성을 보이고 최소요구치 34J이상의 충격인성을 충 분히 만족하였다.

3) 경도분포는 용착금속은 약 218Hv, 열영향부는 215Hv로 후면 용접부가 전면 용접부에 비하여 값이 다소 높게 나타남을 보이고 있으며, 용접금속의 경도는 HV235이하, HAZ는 218이하로 최소요구치를 만족하였다.

#### 5.3.2 FCAW 熔接部의 性能評價

 FCAW시편의 인장실험시 파단은 모재에서 발생하였으며 인장강도값은 539MPa 최소 요구치인 460MPa을 초과하는 수치를 나타내었다.

2) 측면굽힘실험은 결함이 발견되지 않았고, 샤르피충격실험은 용접부 부위(용 접금속, F.L, F.L+1mm,+2mm,+3mm,+5mm, +10mm)별 및 위치( Face, Middle)별 전 범 위에서 모두 150J 이상의 충격인성을 보이고 최소요구치 47J이상의 충격인성을 충 분히 만족하였다. 3) 경도분포는 용착금속은 약 218Hv, 열영향부는 215Hv로 후면 용접부가 전면 용접부에 비하여 값이 다소 높게 나타남을 보이고 있으며, 용접금속의 경도는 HV235이하, HAZ는 218이하로 최소요구치를 만족하였다

이상 극후판 EGW 및 FCAW 용접법에 대한 각 시험 결과, EGW 및 FCAW 모두 현재 각 규칙의 기준값을 만족하는 것을 알 수 있다.

# 第6章.總論

본 장에서는 전장을 통하여 얻어진 결과를 종합하였다.

# 6.1 極厚板 EGW/FCAW 熔接部의 熱的 特性

#### 6.1.1 EGW 熔接部의 熱的 特性

1) 입열량이 큼에 따라 상대적으로 용착금속부 및 고온 분포역이 크게 나타나 고, 후행 용접된 후면용접부의 온도분포가 선행 용접된 전면용접부의 온도영향으로 다소 상승함을 보였다.

2) 용착금속부의 온도분포는 2초 정도가 경과한 시점에서 최고가 되고, 열영부는 6초 정도, 모재에 있어서는 35초 정도가 경과한 시점에서 열전도에 의해 최고가 됨을 나타내었다. 그리고 용접 후 초기시점(2초후)에서는 용착금속부, 열영향부 및 모재의 온도차가 크게 발생하고 냉각과정에 있어서 높은 온도를 유지하면서 냉각됨을 보였다.

3) 용접종료 후 110초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속, 열영향부 및 모재 의 온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고 온도 구배의 차가 거의 발생되지 않 고 있음을 확인할 수 있었다.

4) 균열선단은 최고온도 800~1,100℃영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구 배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있었다.

#### 6.1.2 FCAW 熔接部의 熱的 特性

1) 용착금속의 온도분포는 용접 개시 후 8초 정도 경과한 시점에서 최고가 되고, 열영향부는 8.7초 정도, 모재에 있어서는 9초 정도가 경과한 시점에서 열전도에 의해 최고가 됨을 나타내었다.

2) 냉각과정에 있어서 냉각곡선이 용접 후 초기과정에서 가파르게 나타났고, 용접종료 후 20초가 경과한 시점에서 부터는 용착금속부, 열영향부, 모재의온도 분포 양상 및 그 크기가 일정해지고 온도 구배의 차가 거의 발생되지 않음을 보이 고 있다.

3) 균열선단은 최고온도 750~1,400℃영역을 겪고 패스가 증가함에 따라 온도구 배가 다소 완만해지는 열싸이클 영향을 받고 있었다.

#### 6.2 極厚板 EGW/FCAW 熔接部의 力學的 特性

#### 6.2.1 EGW 熔接部의 力學的 特性

1) 각 성분별 응력크기는 역학적 크기가 큰 방향의 응력값이 두드러지게 크게 발생하였으며, 각 성분의 크기는  $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 순으로 나타났다. 전면 용접부의 경 우 용접선 길이방향 용접잔류응력 $(\sigma_z)$ 은 인장성분을 나타내고 판의 두께 방향 $(\sigma_y)$  및 용접선 폭 방향 $(\sigma_r)$ 의 경우 압축 성분을 나타내고 있다.

특히, 용접선 폭 방향( $\sigma_x$ )의 경우 시험편의 중앙부 영역에 압축성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다. 후면 용접부의 경우 응력성분 모두 주로 인장성분을 보이 고 있으며, 특히 시험편의 중앙부영역에 인장성분이 다소 크게 분포함을 보이고 있다.

2) 용접잔류응력 성분 중 용접 잔류응력 성분을 주도하는 용접선 길이방향 응 력성분(σ<sub>z</sub>)가 후면용접부에서 전면용접부에 비해 응력이 크게 발생되였고, 시험편 의 중앙부에서 최대응력이 발생하였다.

3) 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분 (σ<sub>x</sub>)은 균열선단부에 인장잔류응력 성분(Crack opening stress)을 나타내어, 균열 진전에 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다.

4) 소성변형율 분포는 용접선 길이방향 소성변형율 성분(e<sup>y</sup><sub>z</sub>)는 용착금속 및 열 영향부에서 인장성분을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축성분으로 변화하고 있으며, 특히 전면용접부에 크게 인장성분이 발생하였다. 그리고 용접선 폭방향 소성변형율 성분(e<sup>y</sup><sub>x</sub>)는 용착금속 및 열영향부 전체영역에서 압축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생 하고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다. 판두께 방향성분 (e<sup>y</sup><sub>y</sub>)은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분울 보이고 있으 며, 전면 용접부의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다. 이상의 특징은 역학적으로 구송이 가장 z방향 (용접선 길이방향)에 커다란 인장의 소성변형이 발생되며 소성변형이 비압축성 즉, 체적불변의 조건을 만족하여 역학

적 구속의 가장 약학 y방향(판두께 방향)에 커다란 압축의 소성변형이 발생하는 것으로 사료된다.

#### 6.2.2 FCAW 熔接部의 力學的 特性

1) 각 성분별 응력크기는 역학적 크기순 σ<sub>z</sub> > σ<sub>x</sub> > σ<sub>y</sub>순으로 나타나고, 선행용 접부는 후행용접시 입열로 인한 응력완화로 후행용접부에 비해 보다 작게 발생하 였으며, 후면 용접부의 경우 전면용접부의 구속으로 인하여 보다 큰 잔류응력이 생성되었음을 알 수 있다. 또한 최대응력값은 표면 부근에서 발생하였는데, 이는 상표면의 열전달 효과로 온도가 급격히 변하기 때문이라고 판단된다.

2) 잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ<sub>x</sub>) 은균열 선단부에 압축잔류응력성분(Crack closure stress)을 나타내고 있다. 이러 한 FCAW용접부 균열선단의 압축 잔류응력(Crack closure stress)은 무부하 상태에 서도 크랙면이 닫히게 되어 균열진전을 지연시키는데 크게 영향을 주는 것으로 사 료된다.

3) 용접선 길이방향 소성변형율 성분(e<sup>p</sup><sub>z</sub>)는 용착금속 및 열영향부에서 인장성분 을 나타내지만 열영향부에 인접한 모재에서는 압축성분으로 변화하고 있다. 그리 고 용접선 폭방향 소성변형율 성분(e<sup>p</sup><sub>x</sub>)는 용착금속 및 열영향부 전체영역에서 압 축성분이 나타나는데, 그 중에서도 전면용접부의 중앙부영역에서 최대치가 발생하 고 있으며 열영향부에 인접한 모재에서는 인장을 나타내고 있다. 판두께 방향성분 (e<sup>p</sup><sub>y</sub>)은 용착금속 및 열영향부에서 커다란 압축성분울 보이고 있으며, 전면 용접부 의 중앙부 영역에서 인장성분이 크게 나타나고 있다.

# 6.3 外力에 의한 極厚板 EGW/FCAW 熔接部의 殘留應力再分布 特性

# 6.3.1 EGW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에 의한 殘留應力 再分布 特性

1) 노치선단근방의 응력분포는 노치가공 전 노치선단 연장선 각 위치에서 인장 성분을 보였으나, 노치가공 후 모든 응력성분이 압축 성분으로 변화하였다. 그리 고 노치선단 연장선으로부터 멀어질수록 압축 성분 값이 점자 감소하였다.

2) 특히 균열개폐 거동과 관련 있는 응력성분(σ<sub>x</sub>)은 노치가공 전 용접잔류응력 성분이 크랙개구진전을 촉진하는 인장성분을 나타내나, 노치가공후 크랙진전을 지 연시키는 압축성분값으로 응력분포가 크게 변화하였다.

3) 균열선단전방의 압축잔류응력의 분포가 굽힘하중에 의하여 인장잔류응력 분 포로 재분포되었으며, 균열길이가 커질수록 균열선단전방의 응력이 더욱 커지나 분포양상은 거의 동일하게 나타났다.

#### 6.3.2 FCAW 熔接部의 노치加工 및 굽힘荷重에 의한 殘留應力

#### 再分布 特性

1) 노치가공 전·후의 노치선단 근방의 응력분포는 노치가공 후 용접선 폭방향 응력 $(\sigma_x)$ 는 압축성분이 더욱 증가함을 보이고, 판두께 방향 응력 $(\sigma_y)$ 는 인장성분 에서 압축성분으로 변화함을 보였다. 그리고 용접선 길이방향 응력 $(\sigma_z)$ 는 인장성분 값이 감소함을 보였다.

2) FCAW용접부의 균열개폐 응력성분(σ<sub>x</sub>)이 EGW용접부의 경우에 비해 압축성분 이 균열선단부에서는 다소 적으나, 균열연장선으로부터 멀어질수록 거의 동일한 응력 분포값을 나타냈다. 그리고 FCAW용접부의 균열선단부의 균열개폐 응력성분 (σ<sub>x</sub>)의 압축영역 범위가 EGW용접부의 응력 영역에 비해 다소 크게 분포함을 보이 고 있다. 또한 상당응력값을 비교해보면 FCAW용접부의 균열선단 전방 및 부근의 압축영역 범위가 EGW용접부의 응력영역에 비해 크게 분포함을 보였다.

3) 균열선단전방의 압축잔류응력의 분포가 굽힘하중에 의하여 인장잔류응력 분 포로 재분포되고 있다. 그리고 균열길이가 커질수록 균열선단전방의 응력이 더욱 커지나 분포양상은 거의 동일하게 나타나고 있다.

# 6.4 극후판 EGW/FCAW 熔接部의 性能實驗

#### 6.4.1 EGW 熔接部의 性能評價

 EGW시편의 인장실험시 파단은 모재에서 발생하였으며 인장강도값은 539MPa 최소 요구치인 460MPa을 초과하는 수치를 나타내었다.

2) 측면굽힘실험은 결함이 발견되지 않았고, 샤르피충격실험은 용접부 부위(용 접금속, F.L, F.L+1mm,+2mm,+3mm,+5mm, +10mm)별 및 위치( Face, Middle)별 전 범 위에서 모두 150J 이상의 충격인성을 보이고 최소요구치 34J이상의 충격인성을 충 분히 만족하였다.

3) 경도분포는 용착금속은 약 218Hv, 열영향부는 215Hv로 후면 용접부가 전면 용접부에 비하여 값이 다소 높게 나타남을 보이고 있으며, 용접금속의 경도는 HV235이하, HAZ는 218이하로 최소요구치를 만족하였다.

#### 6.4.2 FCAW 熔接部의 性能評價

 FCAW시편의 인장실험시 파단은 모재에서 발생하였으며 인장강도값은 539MPa 최소 요구치인 460MPa을 초과하는 수치를 나타내었다.

2) 측면굽힘실험은 결함이 발견되지 않았고, 샤르피충격실험은 용접부 부위(용 접금속, F.L, F.L+1mm,+2mm,+3mm,+5mm, +10mm)별 및 위치( Face, Middle)별 전 범 위에서 모두 150J 이상의 충격인성을 보이고 최소요구치 47J이상의 충격인성을 충 분히 만족하였다. 3) 경도분포는 용착금속은 약 218Hv, 열영향부는 215Hv로 후면 용접부가 전면 용접부에 비하여 값이 다소 높게 나타남을 보이고 있으며, 용접금속의 경도는 HV235이하, HAZ는 218이하로 최소요구치를 만족하였다

이상 연구 결과

- EGW의 최대 잔류응력 분포는 FACW에 비하여 광범위하게 나타나며, EGW 균열선 단에서 모든 잔류응력 성분은 FCAW에 비하여 높게 나타내고 있다.
- 3) EGW의 경우 용접잔류응력 성분 중 균열 개폐거동과 관련 있는 용접선 폭 방향 응력성분(σ<sub>x</sub>)은 균열선단부에 인장잔류응력 성분(Crack opening stress)을 나 타내어, 균열진전에 크게 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 FCAW의 경우 용접선 폭 방향 응력성분(σ<sub>x</sub>)은 균열선단부에 압축잔류응력성분(Crack closure stress)을 나타내고 있다.
- 3) EGW 및 FCAW 용접법이 실험값이, 현 각 기관의 규정치는 만족하나, EGW의 경우 균열선단에서의 잔류응력에 의한 피로파괴를 고려한 규칙이 마련되어야 할 것 으로 사료된다.

#### 參 考 文 獻

- 1) KR, LR, G.L 各 國 船級規則, 鋼船片. 2004.
- 2) AWS, WELDING HANDBOOK, Vol.1, Eighth Edition, 1987.
- 3) AWS, WELDING HANDBOOK, Vol.2, Eighth Edition, 1991.
- 4) 豊田政男 外, 熔接工學, 理工學社, pp1-90, 1985
- 5) 日本溶接學會,溶接接合便覽,丸善,1990.
- 6) 失川元基 外1人, "有限要素法による熱應力・クリーフ・熱傳導解析",(株)サイエソス, 1985.
- 7) 房漢瑞, "有限要素法에 의한 薄板溶接의 2次元 非定常 熱傳導解析",大韓造船學會誌,第27券,第4號,pp.44~50,1990
- 8) 房漢瑞,有限要素法에 의한 厚板溶接時의 3次元 非定常 熱傳導解析 ", 大韓熔接學會誌,第9券,第2號,pp.37~43,1991
- 9) 房漢瑞, "厚板溶接部의 力學的 特性", 大韓熔接學會誌, 第10券, 第4號,, pp.250~258, 1992
- 10) 房漢瑞, "厚板溶接部의 應力除去 熱處理時의 力學的 擧動에 關한 研究",大韓熔接學會誌, 第11券, 第4號, pp103~111, 1993
- Bang Han-Sur 外 2人, "Mechanical Behavior during SR-Treatment of Welding Residual Stress Through Thickness", Trans. of VWRI, Vol.19, No.2, 1990.
- 12) 房漢瑞,山北,金, "應力除去燒なまし割れ評價法の提案",日本溶接學會論文集,第6券,第3號,pp.335~340,1988
- 13) 上田,外 "厚板補修溶接部の力學的特性",日本溶接學會論文集,第4券, 第3號,pp.335~340,1988

- 14) Yukio UEDA and Min Gang YUAN, " A Prediction Method of Welding Residual Stress Using Sourse of Residual Stress(Report III)", Trans, JWRI Vol.22, No.1, pp.157~168, 1993
- 15) Y.UEDA, K.NAKACHO, "Distributions of Welding Residual Stress in Various Welding Joint of Thick plates", Trans. JWRI Vol. No.1, 1986.
- 16) H.S.Bang, Y.Deda, Y.C.Kim, T.Yamakita, "Mechanical Charateristics of Repair Welding in Thick Plate", 日本溶接學會論文集, 第6券, 第1號, pp.53~59, 1988
- Y.Deda, K.Nakacho, "An Estimating Method of Reduction of Welding Residual Stress Relief Annealing(|)", 1-1, pp174~182, 1983.
- Z.Daley, P.D.Hibbert, "Computation of Temperature in Actual Weld Design", America Welding Journal, Vol.54, No.11, pp.385~392, 1975.
- Yukio UEDA, Tetsuya YAO, Keiji NAKACHO and M.G.Yuan, "Prediction of Welding Stress, Deformation and Ultimate Strngth of Plate Panel", Trans. JWRI Vol. 21, No.2, pp.276~283, 1992.
- A.J.A Parlane, "Residual Stress in Thick Weldments A Rewiew of Contemporary Measurement Techniques", The Welding Institute, Abington, Cambridge, England, Aug. 1977.
- R.Bjorhovde, J.Brozietti, G.A.Alpsten, "Residual stress in thick Weldel PWplate" Welding Journal, 51(8) Research Supplement, 1972.
- W.M.Wilson, C.C.Hao, "Residual stress in Welding structure", TheWelding Journal, 26(5) Research Supplement, 1974.
- David. R.Croft, David G. Lilly, "Heat transfer calculation using finite difference equation", Applied Science Publishers Ltd(London), 1982.
- 24) J. Donea, "On the occuracy of finite element solutions to the transient

heat conduction equation, International Journal for numerical methods in engineering", Vol.8, pp.103~110, 1974.

- 25) E. Freidman, "Analysis of weld puddle distotion and its effect on penetration", welding Journal, Vol.57, No.6, pp.161~166, 1978.
- 26) T.Naiki, Y.Yamazaki, Y.Manago, H.Okabayas, "Stress Relief Crackin in Heat Affected Zone(I)", Journal of Japan Welding Society, 33-9, pp.710~717, 1964.
- S.Kanazawa, K.Yamato, T.Takeda, K.Hasimoto, "Study of Reheat Cracking in Weldment(I)", Japan Welding Society, 44-10, pp.791~798, 1975.
- 28) Vaidyanathan, S., Todaro, A.F, and Finnie, I., "Residual Stresses due to Circumferential Welds", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, pp.238~242, 1973.
- 29) Bynum, J.E., "Modification to the Hole Drilling Technique of Measuring Residual Stress for Improved Accuracy and Reproducibility", Journal of Experimental Mechanics, U.S.A., Vo91.21, No.1, January 1981.
- 30) North,K.H. and Rosenthal, D., "Stress measurement by X-ray diffraction", Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis. M.I.T., 1972.
- 31) Yukio UEDA, Min Gang YUAN, Masahito MOCHIZUKI, Sadao UMEZAWA and Kunio ENOMOTO, "A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual stress(Report IV)-Experimental Verification for Prediction Method of Welding Residual Stress in T-joints Using Inherrent Strains, Trans", JWRI Vol.22, No.1, pp.168~176, 1993.