

工學碩士 學位論文

박육 파이프와 브라켓의 양면 겹치기 필릿 용접부에서의 고온 균열 발생 현상 분석

2006년 2월

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

金 泳 周

工學碩士 學位論文

박육 파이프와 브라켓의 양면 겹치기 필릿 용접부에서의 고온 균열 발생 현상 분석

指導教授 趙 相 明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2006년 2월

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

金 泳 周

金泳周의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005年 12月

主 審 工學博士 金 雨 烈 (印)

委 員 工學博士 徐 源 贊 (印)

委 員 工學博士 趙 相 明 (印)

목 차

Abstract	1
 제 1장 서론	 2
1.1 연구 배경	2
1.2 연구 목적 및 개요	4
 제 2장 이론적 배경	 5
2.1 용접부의 고온균열	5
2.1.1 응고균열	7
2.1.2 HAZ 액화균열	16
2.1.3 용접금속 액화 균열	18
2.1.4 연성저하 균열	19
2.2 용접 균열 시험법	20
2.2.1 바레스트레인트 균열시험법	20
2.2.2 TRC 시험법	22
2.2.3 RRC 시험법	24
 제 3 장 실물 양면 겹치기 필릿 용접부의 균열 발생 현상 검토-	 25
3.1 서언	25
3.2 균열 발생 현상	26
3.3 균열 개구변위(COD)	27
3.4 용접 균열부 SEM사진	28
3.5 고온 균열 발생 인자	31
 제 4장 재현 시험편에 의한 실험 방법	 32
4.1 재현 시험편	32

4.2 측정 장치 구성 및 측정 시스템 캘리브레이션 -----	33
4.2.1 측정 장치 구성 -----	33
4.2.2 측정 장치 캘리브레이션 -----	35
4.3 실험 방법 -----	38
 제 5장 실험 결과 및 고찰 -----	
39	
5.1 입열량에 따른 브라켓과 박육 파이프의 온도 변화 -----	39
5.2 용접선 위치에 따른 브라켓과 박육 파이프의 변형 거동 -----	42
5.2.1 1차 용접 후 브라켓의 변형 거동 -----	42
5.2.2 1차 용접 후 파이프의 변형 거동 -----	44
5.3 고온균열 발생 현상에 대한 고찰 -----	46
 제 6장 결 론 -----	47
 참고 문헌 -----	48

An Analysis on the Phenomenon of Hot Crack Occurred in the Both Sides Lab Joint Fillet Welds of a Thin Pipe and Bracket

Young-zoo Kim

Department of Materials Processing Engineering, The Graduate School,
Pukyung National University

Abstract

The fuel filler necks which transfer fuel safely from a fuel inlet to a tank, are assembled with many brackets. Jointing of the components is performed by metal active gas welding or CO₂ welding. Weldments of fuel filler neck must be not leaked by air pressure test. But the leak of weldment is sometimes happened after welding due to welding cracks.

The purpose of this study is exactly to make an analysis on the phenomenon of hot crack occurred in the both sides lab joint fillet welds of a thin pipe and bracket..

The result showed that hot crack of 2nd welds while in low cooling rate is easily happened by extreme tensile strain which is combined with contraction of bracket and expansion of pipe in the both sides lab joint fillet welds.

Key Words : Gas metal arc welding, Leak of weldment, Both sides lab joint fillet welds, Thermal diffusivity, Hot crack, SEM, Crack opening displacement, Deformation rate

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

자동차 산업에서 연료를 연료주입구에서 연료탱크까지 안전하게 이송하기 위한 연료주입넥(**Fuel filler neck**) 부품은 기계구조용 탄소강인 박육파이프(**Pipe**)와 냉간압연강판인 브라켓(**Bracket**)의 결합으로 구성된다. 그 부품간 결합은 **CO₂** 또는 **MAG**용접으로 이루어지며 공압 시험에서 누설이 없어야 한다. 그러나 용접공정에서는 종종 용접부 고온 균열로 인해 공압 시험 시 누설불량이 발생하게 된다.

일반적으로 용접은 국부적이지만 새로운 미세한 주조조직을 형성하고 비평형 상태의 빠른 가열 및 냉각이 발생하게 된다.¹⁾ 그러나 박판(브라켓: **1.2t**, 파이프: **1.2t**)의 경우는 두께방향의 열전도가 없는 **2D** 열전달이 발생하므로 냉각속도가 상당히 느려질 수 있는 문제가 있다. 용접부의 응고는 용접부 주변 가장자리에서 핵생성에 의해 시작하고 핵생성 발생위치에서 특정 결정방향으로 진행하게 된다. 고온균열은 용접금속 또는 용접열영향부에서 고온에서 발생하는 균열로서, 응고 도중에 특정 결정방향으로 성장한 주상정 및 수지상정의 경계를 포함한 결정립계에서 주로 발생하며²⁾ 응고균열, 액화균열, 연성저하균열로 분류할 수 있다.³⁾

고온균열은 크게 금속학적 인자와 시공 인자로 그 발생 원인을 나눌 수 있는데, 금속학적 인자로서는 주로 **S**, **P**등의 불순물 원소들의 편석에 의한 저융점화합물의 생성에 기인하는 것으로 알려져 있다. 기존 연구는 주로 고온균열을 방지하기 위하여 재료의 화학조성에 대해 많은 연구가 진행되었고 용접 후 용착금속의 응고시 발생하는 인장응력을 극소화하는 방법으로 미세조직을 제어하는 방법이 보다 효율적일 것으로 판단되어 많은 연구들이 진행되어 왔다.⁴⁾ 그러나 박판 용접부에서 발생하는 고온균열에 미치는 인장스트레인에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 또한 기존의 고온균열 감수성에 대한 연구는 인장균열시험 방법인 **TRC** 및 **RRC**와 굽

힘균열시험방법인 **Varestraint**⁵⁾으로 연구되었지만 시공인자와 실물 시험편을 직접 이용하여 현상 규명과 원인분석을 한 연구는 미미한 실정이다.

1.2 연구 목적 및 개요

본 연구의 목적은 박육 파이프와 브라켓의 양면 겹치기 필릿 용접부에서 1차 용접 후 2차 용접시 발생하는 용접부 균열 발생 원인을 분석하는 것이다. 실험에서는 겹치기 필릿 용접부 모델을 만들어 1차 용접시 입열량 및 용접선 위치를 변경하였을 때 박육 파이프와 브라켓의 온도 및 변위를 측정하여 2차 용접시 균열 발생에 영향을 미치는 브라켓과 박육 파이프의 변형에 대해 분석하였다.

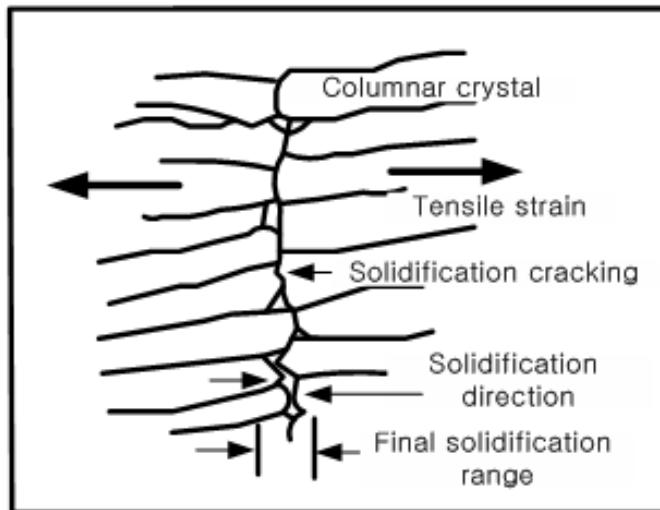
제 2 장 이론적 배경

2.1 용접부의 고온균열

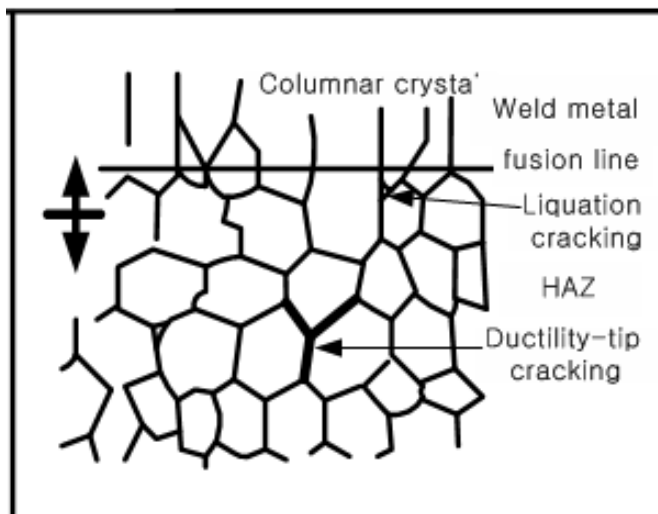
고온균열은 용접시 발생하는 일차결함으로서, 주로 용접금속에서 발생하며, **HAZ** 또는 부분 용융역에서 발생하기도 한다. 이러한 고온균열은 용접 중 또는 용접 직후의 고온(일반적으로 $TMP/2$, 여기서 TMP ; 용접(K))에서 용접부에 자기수축 및 외부구속 등에 의한 인장스트레인과 균열에 민감한 조직이 존재하면 발생한다. 고온균열은 응고균열, **HAZ** 액화균열, 용접금속 액화균열, 연성저하균열로 세분되고 있다.

Fig. 2.1은 용접부에서 발생하는 고온균열의 모식도이다. **Fig. 2.1(a)**는 고상선(**Solidus line**)온도 이상에서 발생하는 응고균열(**Solidification cracking**)의 발생 기구를 보인 것이다. 응고균열은 용접열원에 의해 용융되었던 금속이 응고되는 과정에서 용접금속내의 최종 응고부에서 발생하기 쉽고 일반적으로 용접선과 평행한 방향으로 발생하는데 주로 강중에 함유되어 있는 **P, S, Cu** 등의 불순물 원소의 입계의 편석에 기인한다.

Fig. 2.1(b)는 액화균열 및 연성저하균열을 나타낸 것으로 액화균열 및 연성저하 균열은 고상선(**Solidus line**)온도 이하에서 발생되는데, 액화균열은 용접금속 또는 **HAZ**조립역에서 고온으로 가열된 결정입계에 불순물원소가 편석하여 입계가 다시 용융됨으로서 발생한다. 연성저하균열은 냉각 중 $600\sim 900^{\circ}\text{C}$ 범위에서 재결정에 의해 새로이 형성된 입계를 따라서 발생하고 주로 불순물 함량이 매우 낮은 고청정강이 이 균열에 민감하여 파면에는 일반적으로 액화의 흔적이 없고 **Slip band** 및 **thermal etch**면이 관찰되는 경우가 많다.



(a) Solidification cracking



(b) Liquation cracking and ductility-dip cracking

Fig. 2.1 Schematic illustrating hot cracking

2.1.1 응고 균열

응고균열은 주로 응고 결정립계를 따라 발생하며, 경우에 따라서는 아 결정립계를 따라서 발생하기도 한다. 이 균열에 대해서는 많은 종류의 소재를 대상으로 40년 이상 연구가 진행되어 왔다. 근본적으로 응고균열의 발생여부는 열 또는 기계적 변형/응력과 재료의 응고 또는 조직적 특성에 의해 결정된다.

1) 응고균열 이론

응고균열의 발생기구로서 지금까지 제시된 이론들을 정리해 보면 다음과 같다.

- 수축-취성 이론(shrinkage-brittleness theory)
- 변형이론(strain theory)
- Borland 이론(generalized theory)
- 수정된 Borland 이론(modified generalized theory)
- 강도이론(technical strength theory)

이러한 모든 이론의 공통점은 응고의 마지막 단계에서 액상의 필름이 응고 결정립계를 따라서 존재함으로써 입계를 약화시켜 균열이 발생한다는 점이다. 이 필름상의 액상이 존재하는 입계가 응고 및 냉각 중 발생하는 수축과 외적구속에 의해 발생하는 응력을 견디지 못해 균열이 발생하게 된다.

2) 액상필름의 생성

합금의 응고는 일정 온도범위에 걸쳐서 진행되어 용질원자(불순물과 합금원소)의 편석을 유발시키며 특정한 원소의 성질, 농도, 그 원소와 용매 원자간의 상평형 등은 고온균열 감수성에 영향을 미치게 된다. 실제로 모든 공업용 합금들은 많은 합금원소들을 함유하고 있으며, 이들간의 상호작용이 영향을 미치게 된다. 그러나 3원계, 4원계, 5원계 등의 합금계 상

평형은 대체로 잘 알려져 있지 않으며, 용접부의 응고거동은 이원계 상태도 또는 삼원계 상태도로부터 예측되어 왔다. 지금까지의 연구결과에 의하면 일련의 합금원소와 불순물 원소들이 고온균열 감수성에 악영향을 미친다고 보고되어 있다. **S, P, B, C, Si, Ti, Nb, As, Sb** 등의 원소들은 액상필름의 형성을 촉진시킨다고 알려져 있으며, 이들이 어느 정도로 액상필름의 형성을 촉진시키는지는 합금 성분계에 따라 달라진다. 물리적인 성질의 측면에서 이 원자들의 일관된 공통점은 없으나, 이들 원자들은 모두 응고도중 응고 결정립계에 편석하여 응고 종료온도를 저하시킨다. 이 원소들이 고온균열 감수성에 미치는 영향은 용접부의 거시적 응고거동에 의해 좌우되며, 이들의 응고거동은 많은 경우 2원계에서의 거동으로부터 예측되고 있다. 본질적으로 균열 감수성을 증가시키는 것은 이들 원자들이 응고 결정립계에 편석되기 때문이 아니라, 이들 원소의 편석으로 입계의 응고 종료온도가 낮아지기 때문이다. 대부분의 경우, 모재의 응고온도(공칭조성의 응고온도)와 마지막으로 응고하는 고상(결정립계 등)의 응고온도와의 차이는 응고균열 감수성에 직접 영향을 미치며, 이 온도차가 커지면 커질수록 균열 감수성은 증가하게 된다. 이 개념은 실험적으로 측정이 가능한 **BTR** 값이 균열 감수성을 예측하는데 사용될 수 있다는 것을 설명하고 있으며, 또한 균열 감수성을 예측하기 위하여 **Borland**에 의해 제안된 **RPF(Relative Potency Factor)**의 이론적 근거가 된다.

3) 응고균열 감수성 지수(RPF)

응고균열 감수성 지수는 1960년대 초기에 **Borland**가 2원계 합금의 응고균열 감수성에 미치는 합금원소와 불순물 원소의 영향을 판단하는 지수로서 제안하였다. 이 지수는 2원계의 상평형 조건으로부터 도출되었기 때문에 이 지수로 용접부의 거동을 정확히 판단할 수는 없지만 개략적인 예측은 가능하다. 공업적으로 이용되는 대부분의 합금계가 다원계이나 **RPF**는 특정 원소와 타 원소와의 동반작용(**synergic effect**)을 고려하지 않고 있으므로 종종 그 원소의 영향이 과대 또는 과소 평가될 수 있다는 점을

명심하여야만 한다. 예를 들면, S는 Fe-S나 Ni-S 같은 이원계 합금에서는 응고균열 감수성을 크게 증가시키지만, 이들 합금계에 소량의 Mn이 첨가 되면 거의 영향을 미치지 않게 된다. 응고균열 감수성 지수는 이와 같은 합금원소간의 상호작용을 예측하는 것이 불가능하다.

응고균열 감수성 지수는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$RPF = mL(1 - 1/k)$$

이 값은 응고온도 범위를 합금의 조성 C0로 나눈 값($\Delta T/C0$)이며, Fig. 2.2에 나타낸 바와 같이 2원계 상태도를 이용하여 구할 수 있다. 이 지수의 최대값은 조성이 그 원소의 최대 용해도 값인 경우에 얻어지며, 이 때 그 합금계에서 가장 넓은 응고온도 구간을 나타낸다. RPF의 최대값은 다음과 같이 정의된다.

$$MPF \text{ (Max. Potency Factor)} = mL \text{ Cmax } (1 - 1/k)$$

또한 특정한 조성에서의 지수는

$$SPF(\text{Specific Potency Factor}) = mL \text{ Co } (1 - 1/k)$$

으로 정의된다. Table 2.1에 Fe기 2원계 합금에서 몇가지 원소의 RPF와 MPF를 나타내었다.

Table 2.1 RPF and MPF

구분	합 금 원 소							
	S	B	C	P	Ti	Nb	Mn	Si
RPF	166	137	32	121	14	29	26	2
MPF	925	917	322	338	97	130	26	32

Fig. 2.2는 최대 용해도에서 균열 감수성이 최대로 된다는 것과, 용접부의 응고는 비평형 상태로 일어나기 때문에 실제 최대 균열 감수성은 조성이 최대 용해도 보다 작은 경우에 나타난다는 것을 설명하고 있다.

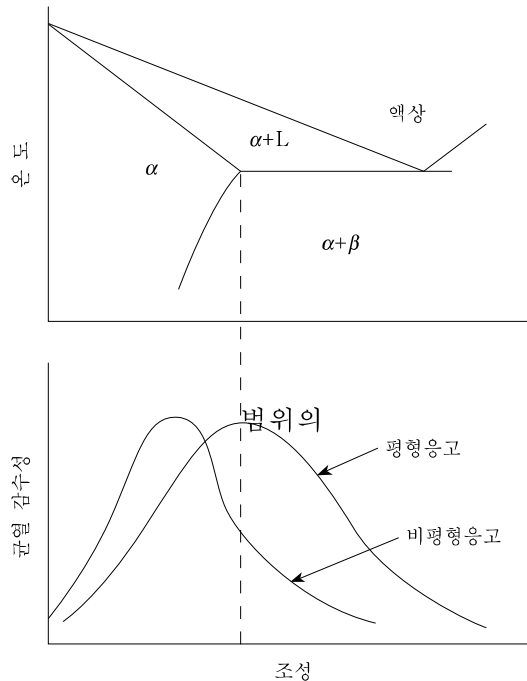


Fig. 2.2 The effect of solidification temperature range on crack sensitivity

4) 응고균열 감수성에 영향을 미치는 기타 인자들

앞 절에서는 응고균열의 생성에 필수적인 인자인 액상필름의 형성에 관하여 기술하였으며, 이 절에서는 그 외의 인자들에 관해서 기술하기로 한다.

(가) 조성

각각의 합금원소 또는 불순물 원소의 영향은 그 합금계에 존재하는 다른 원소들의 영향을 받는다. 2원계를 근거로 균열 감수성을 평가하는 것은 잘못된 결론을 유발할 가능성이 많다. 따라서 다원계에서 모든 원소들

의 영향을 고려함으로써 그 합금계의 균열 감수성을 예측할 필요가 있다.

많은 합금계에서 화학적 조성에 근거하여 균열 감수성을 예측하기 위한 실험적인 식들이 제안되어 있다. TWI의 **Bailey**와 **Jones**는 **C-Mn**강에 대하여 다음의 식을 제시하였다.

$$\text{CSTWI} = 230\text{C} + 190\text{S} + 75\text{P} + 45\text{Nb} - 12.3\text{Si} - 5.4\text{Mn} - 1$$

여기서 **CSTWI**가 20보다 크면 그 재료는 균열 저항성이 크다. 이 식은 **C**와 **S**가 균열 감수성을 증가시키며, **Si**와 **Mn**이 감수성을 저감시킨다는 것을 설명하고 있다. 이와 같은 예측은 연강의 용접시 **Mn/S**비가 증가함에 따라 응고균열 감수성이 저하한다. 실험결과 등에서 확인된 바 있다.

오스테나이트계 스테인리스강에 대해서도 용접금속의 페라이트 지수 (**Ferrite Number, FN**)를 근거로 유사한 식이 제안되어 있다.

$$\text{FN} = 4(\text{Creq}) - 3(\text{Nieq}) - 34$$

여기서, $\text{Creq} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1.5\text{Si} + 0.5\text{Nb}$, $\text{Nieq} = \text{Ni} + 0.5\text{Mn} + 30(\text{C} + \text{N})$ 이다. **FN**이 3보다 크고 20보다 작으면 통상 응고균열에 대한 저항성이 크다(**HAZ** 액화균열 포함). 하지만 **Cieslak** 등에 의하면, 상온에서의 페라이트 양보다 초정 응고양식과 고온에서의 페라이트 양이 응고균열 감수성에 더 큰 영향을 미친다고 보고되고 있다. 이 외에도 여러 종류의 합금계에 대한 많은 다른 실험식들이 제안되어 있지만, 이들 식들은 단지 하나의 지침에 불과하다는 것을 명심하여야만 한다.

(나) 결정립계에 존재하는 액상의 양

결정립계의 액상필름은 응고균열 발생에 필수 조건이다. 이 액상의 양이 증가할수록 일반적으로 균열 감수성은 감소하며, 이 개념이 브레이징 및 용접용 재료를 디자인하는 기본이다. 예를 들어, **Al** 합금 **4047**은 **Al-Si**

합금계에서 공정반응의 성분계에 가깝기 때문에 여러 종류의 **Al** 합금간 이종재료 접합에 자주 이용된다. 이러한 합금처럼 응고 결정립계를 따라서 많은 양의 공정액상을 형성하는 합금들의 경우에는 변형의 국부적인 집중이 일어나지 않기 때문에 균열이 발생하지 않는다. 이 현상은 합금계에서 조성이 최대 용해도 값을 초과하면 균열 감수성이 감소하며, 균열 감수성이 가장 높은 조성이 최대 용해도 값 이하로 이동하는 것을 부분적으로 설명하고 있다. 응고균열을 발생시키는 결정립계의 입계 액상의 양은 응고온도보다 낮은 온도에서 매우 적지만 입계를 완전히 둘러쌀 수 있는 양이라고 생각된다.

(다) 결정립계 젖음(wetting)

응고 결정립계를 따라 존재하는 액상이 입계의 분리 즉 균열을 발생 시키기 위해서는 입계를 균일하게 젖게끔 해야만 한다. 입계가 액상에 의해 젖는 정도는 서로 접촉하고 있는 고상과 액상의 상대적인 계면 에너지에 의존하며, 이 관계는 다음의 식으로 표현이 가능하다.

$$YSS/YLS = 2 \cos\Theta/2$$

여기서 Θ 는 액체와 고체사이의 접촉각을 말하며 $\Theta = 0^\circ$ 이면 표면이 균일하게 젖음을 의미한다. 이 각이 증가함에 따라 젖음의 정도는 감소하게 되며, 액체 필름이 존재하는 면적도 작아져 균열 감수성은 낮아지게 된다. 계면 에너지와 입계의 젖음도 사이의 관계를 **Fig. 2.3**에 나타내었다. 그러나 통상 다원 합금계에서 상대적인 계면 에너지의 값을 얻는 것은 어렵기 때문에 젖음도를 정량화하는 것은 거의 불가능하다. 단지, 많은 **Fe**계 합금에서 **S** 함량을 낮추거나 **O** 함량을 증가시킴으로서 액체의 젖음성을 저하시켜 균열 감수성을 낮출 수 있다는 정도가 알려져 있다. 응고균열 감수성을 저감시키는 방안으로서 젖음도를 조절하는 것은 실용적인 방법이 되지 못한다.

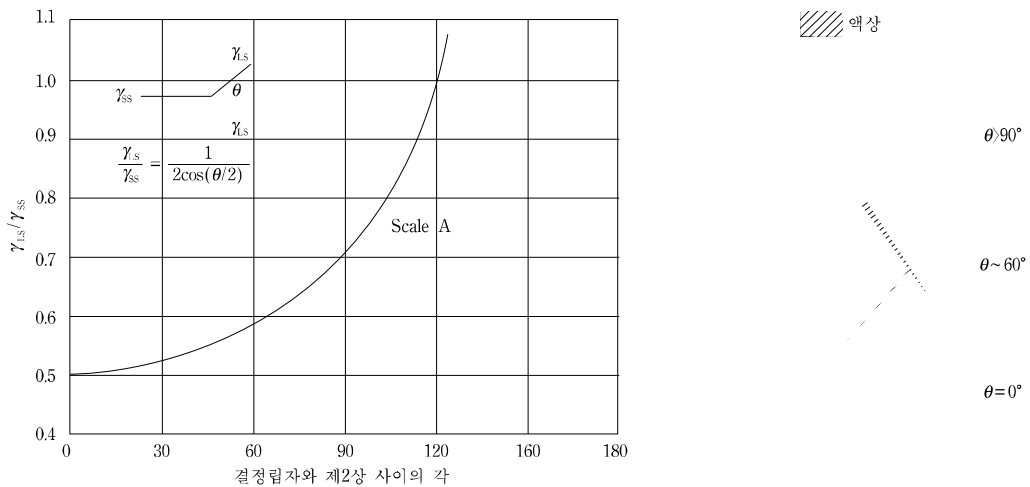


Fig. 2.3 The effect of surface energy and θ on boundary wettability

(라) 용접부 형상

용접부의 응고균열 감수성에 영향을 미치는 또 다른 중요한 인자가 용접비드의 형상이다. 용접비드의 형상은 응고 종료시 용접부에 작용하는 구속도에 영향을 미친다. Fig. 2.4는 구속도에 미치는 비드형상의 영향을 설명하기 위한 것으로, 대입열의 큰 비드보다는 소입열의 작은 비드가 균열방지에 효과적임을 알 수 있다. 이와 함께 용융지의 형상도 균열 감수성에 영향을 미친다. 통상 용접속도가 빠른 경우에 형성되는 테어드롭 형상의 풀에서는 용접 중심선을 따라 편석이 일어나기 쉽고, 형상적으로 이 중심선을 따라 응력이 집중되기 때문에 균열 감수성이 높다. 응력이 중심선을 따라 집중되는 이유는 이 중심선이 응고, 수축과 외부적인 구속에 의하여 발생하는 용접부의 응력에 수직하기 때문이다. 용융지 형상이 타원형인 경우와 테어드롭 형상인 경우 형성되는 결정립의 형상을 Fig. 2.5에 나타내었다. 후자의 경우 선명한 중심선이 보이고 있으며 이와 같은 형상은 용접속도 및 전류를 변화시키거나 용접전극을 좌우로 움직여줌으로써(weaving) 방지할 수 있다.

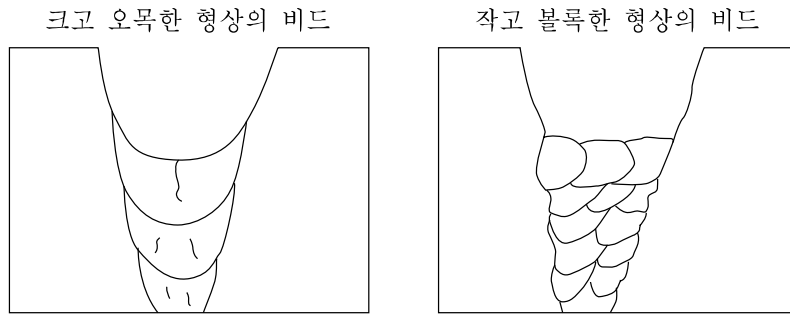


Fig. 2.4 The effect of bead shape and size on solidification crack sensibility

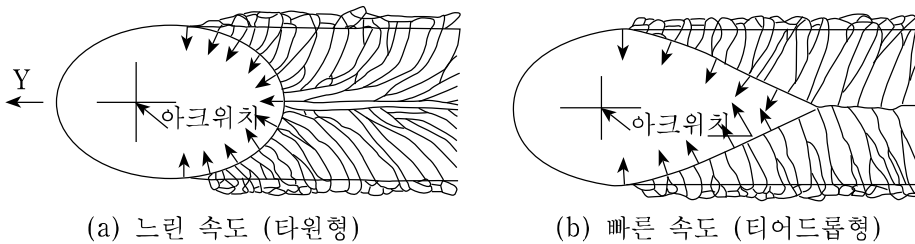


Fig. 2.5 The variation of welds shape by welding speed

(마) 용접부 구속도

용접부의 구속은 자체에서도 발생하며, 외부의 지그 등에 의해서도 발생한다. 용접부 자체에서의 구속은 주로 용접부의 응고, 수축에 의하여 발생하며, 용접비드의 형상, 주위의 **HAZ**와 모재의 성질도 영향을 미친다. 대부분의 외적구속은 구속장치에 의해 발생한다. 응고 중에 발생하는 구속도와 액상필름으로 젖어 있는 결정립계를 따른 변형이 어떤 식으로 집적되는가는 정량화하기 어렵고 제어하기도 어렵다. 일반적으로 용접부의 구속도는 적절한 이음부 및 고정장치의 설계, 용접공정의 선택과 용접변수의 제어, 재료의 선택과 준비등에 의한 정성적인 제어만이 가능하다.

(바) 응고균열의 확인

응고 균열은 주로 응고 결정립계를 따라서 발생하며, 종종 아결정립계를 따라서 발생하기도 한다. 용접부가 완전히 응고한 후에 응고 결정립계가 표면 에너지를 줄이기 위하여 이동을 하는 경우도 있지만 이와 같이 이동된 입계를 따라서 발생하는 균열은 일반적으로 고상에서 발생하기 때문에 응고균열로 분류되지 않는다. 응고균열의 발생시기는 응고의 마지막 단계이며, 용접 직후에 현미경 또는 비파괴 검사에 의해서 확인이 가능하다. 경우에 따라서는 용접부의 표면, 특히 용접금속의 중심선을 따라서 육안으로도 확인할 수 있으며, SEM을 이용하면 이 균열면이 수지상의 형상을 보이는 것이 쉽게 확인된다. 모재나 용접재료의 불순물 함량이 높고, 용접부의 조직이 균열에 민감한 형태이며, 구속도가 높으면 균열이 발생하기 쉽다.

2.1.2 HAZ 액화균열

1) HAZ 액화균열의 이론

PMZ나 HAZ의 결정립계를 따라서 발생하는 액화균열을 HAZ 액화균열이라 부르며, 이와 같은 균열은 많은 합금계에서 관찰되고 있다. HAZ 액화균열은 통상 길이가 짧으며 용융선에서부터 2~3개의 결정립 직경 정도의 길이로 HAZ 측으로 성장한다. 이 균열은 입계균열이며, 부분 용융역이나 HAZ에서 최고 온도가 국부적인 응고온도 이상, 모재의 응고온도 이하로 가열된 영역에서 냉각시 발생한다. HAZ 액화균열은 HAZ/PMZ의 결정립계가 국부적으로 용융되어 발생하며, HAZ 액화균열에 대해서는 크게 다음과 같은 2가지의 기구가 제안되어 있다.

2) 균열형성에 영향을 미치는 변수들

(가) 결정립 크기

일반적으로 입자 크기가 증가하면 HAZ의 액화 균열 감수성은 증가한다. 결정립이 작아지면 입계의 면적이 증가하기 때문에 입계가 액체필름에 의해 완전히 젖게 될 가능성이 줄어들며, 또한 용접부의 구속력에 견딜 수 있는 강한 미세조직을 형성하게 된다.

(나) 용체화 처리

모재의 용체화 처리는 액체표피를 형성하여 이동하는 입계를 젖게 만드는 금속간 화합물들을 용해시키고, 모재의 강도 수준을 낮춤으로써 자체 구속력을 저감시키기 때문에 HAZ 고온균열 감수성을 저감시킨다.

(다) 불순물 함량

S, P, B 같은 불순물 원소의 함량을 저감시키면 고온균열 감수성은 감소한다.

(라) 용접재료의 선택

모재보다 강도가 낮은 용접재료를 사용하게 되면(undermatch) 구속력이 저감되어 균열 감수성이 저하하게 된다.

3) HAZ 액화균열에 민감한 재료

오스테나이트 조직을 갖는 재료들이 민감하며, 페라이트 조직을 나타내는 재료들은 균열 저항성이 크다. 그러나, 많은 페라이트계 합금들도 고온에서는 오스테나이트 조직을 나타낸다. 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 347, 321의 경우는 NbC, TiC 등에 의한 침투기구에 의해서 균열이 발생하며, STS 310은 편석기구에 의해서 발생한다. 오스테나이트계 스테인리스강 중에서도 합금조성이 C_{req}/N_{req} 가 1.5보다 크면 고온에서 HAZ 결정립계를 따라 어느 정도의 페라이트가 형성되기 때문에 균열 감수성을 저감시키게 된다. 또한 (S + P)의 함량을 낮추는 것도 균열을 억제하는데 효과적이다.

Inconel 718, Waspaloy, Hastelloy X 등의 Ni기 초합금에서는 MC 탄화물(NbC, TiC)의 조성적 액화에 의한 침투기구에 의해서 균열이 발생하며, HY 130강과 같은 고강도강에서는 편석기구에 의해서 발생한다.

4) HAZ/PMZ 액화균열의 확인

균열은 통상 HAZ 최고온도로부터 냉각시에 발생한다. 통상 균열은 금속 조직학적 검사에 의해서 확인이 가능하며, 비드의 표면이나 단면관찰로 구별할 수 있다. 이 균열들은 대체로 매우 작아서 비파괴 검사(Non-Destructive Testing, NDT)에 의해 검출이 안되는 경우도 있다. 파면은 입계파면의 형상을 보이며, 많은 경우 표면이 부분적으로 용융된 입자들로 덮혀있다. 균열이 이동 입계(migrated grain boundary)를 따라서 발생하였으면 평평한 입계파면을 보이며, 용접금속 응고 결정립계를 따라 발생하였으면 수지상의 파면을 보인다.

2.1.3 용접금속 액화균열

용접금속 액화균열은 다른 형태의 HAZ 액화균열로서 다층용접 중 재가열된 용접금속에서 발생한다. 이 균열은 HAZ 액화균열과 마찬가지로 응고 결정립계 또는 이동 결정립계를 따라 발생한다. 이 균열 역시 합금원소/불순물 편석에 의하여 응고 결정립계가 국부적으로 용융됨으로써 발생한다. 다층 용접금속에서의 HAZ는 이미 불순물이 편석되어 있는 상태이기 때문에 입계의 국부적인 용융은 합금원소/불순물이 더 이상 이동하지 않아도 가능하다.

전술한 바와 같이 용접금속 액화균열은 결정학적으로 이동된 입계를 따라서도 발생하며 이 결정립계를 따라서 일어나는 용질원자와 불순물 원자의 농축은 편석에 의해서 일어난다. Fig. 2.6은 응고균열과 용접금속 액화균열의 차이를 보여주고 있다.

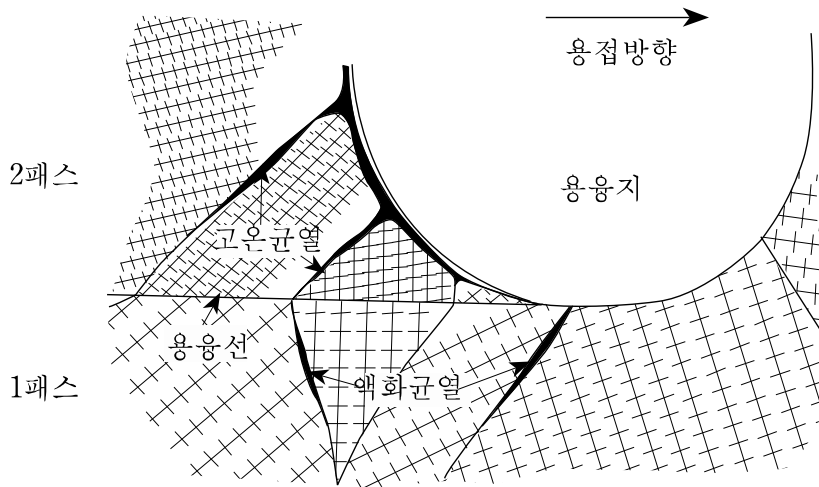


Fig. 2.6 Solidification crack and welds liquation crack

2.1.4 연성저하 균열

이 균열은 고상균열로서 입계균열이며, 통상 HAZ보다 용접금속에 주로 위치한다. 연성저하란 용어는 이 균열에 민감한 재료가 재결정 온도보다 약간 높은 온도에서 심각한 연성저하 현상을 나타내는데 기인한다. 이 연성저하 균열의 발생기구는 명확히 밝혀지지 않았으나, 특이하게 불순물 원소의 함량이 매우 낮은 오스테나이트계 재료에서 주로 관찰된다. Fig. 2.7에 오스테나이트계 재료의 온도에 따른 연성의 변화를 나타내었다. 이 그림에 나타낸 것같은 고온연성의 저하현상은 순도가 매우 높은 오스테나이트계 재료, 즉 $C_{req}/N_{req} < 1.3$, $(P+S) < 100ppm$ 인 재료에서 전형적으로 나타난다.

연성저하 균열에 의한 파단은 보통 재결정 온도보다 약간 높은 온도에서 일어나기 때문에 대부분의 이론들은 균열이 연성저하 온도 범위에서 급격한 입자성장과 그 결과로 나타나는 입자 조대화에 기인한다고 설명하고 있다. 이 합금계에서는 불순물 또는 제 2상이 없기 때문에 입계의 움직임에 대한 장애물이 없으며 이 때문에 결정립이 매우 조대해진다. 그 결과, 결정립계의 면적은 매우 작으며, 변형이 입계에 집중되어 균열이 일어난다고 설명하고 있다. 연성저하 현상에 의한 파괴가 입계를 따라서 일어나며 입계파면은 덤플이 존재하는 입계 연성파면의 특징을 보이고 있는 것이 상기의 가설을 지지하고 있다.

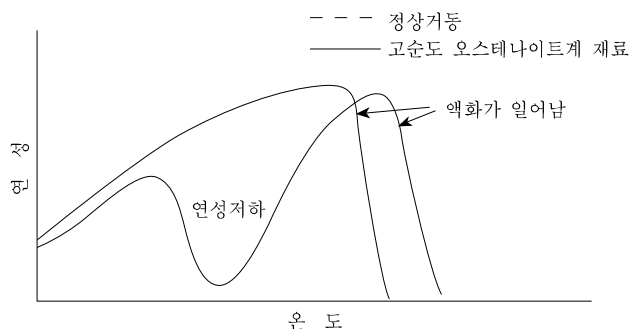


Fig. 2.7 Hot ductility for general material and austenitic material

2.2 용접균열 시험법

용접부에서 발생하는 균열은 발생위치와 온도 또는 기구에 따라서 구분된다. 이들 균열의 발생은 여러 인자가 중복되어 복합적으로 발생하는 경우도 있으므로, 일정한 시험방법에 의해서 균열감수성을 평가하는 것이 곤란한 경우가 많다. 그러므로 다양한 균열시험법 중에서 균열의 발생형태, 특징 등에 따라서 적절한 시험방법을 선택하여야 하며, 또한 특정 균열에 대한 시험법은 한가지로 제한되지 않고, 여러가지 방법을 사용할 수도 있다. 용접부에서 발생하는 균열에 대한 시험법 중에서 지금까지 비교적 많이 사용되고 있거나 중요하다고 생각되는 것을 발생온도에 따른 균열별로 소개하였다.

2.2.1 바레스트레인트 균열시험법

바레스트레인트 균열시험법(Varestraint crack test)은 Savage 등에 의하여 개발된 것이다. 이 시험법은 원래 고장력강 등의 용융경계부에 인접한 열영향부의 고온균열 감수성을 평가하기 위하여 고안된 것으로, 용접금속에서 발생하는 고온균열도 동시에 평가할 수 있다. 시험편의 형상 및 시험방법의 개략을 Fig. 2.8에 나타내었다. 시험편은 외팔보(cantilever beam)의 형태로 그 한편이 고정척에 부착되며, 비드용접을 고정척의 방향으로 진행시켜 (A)의 위치에 도달하였을 때 하중 F로 시험편에 급속 굽힘 변형을 가한다. 이 때 시험편의 이면(裏面)이 (B) 블록과 밀착되도록 하는 것이 중요하며, 변형을 가한 후에도 아크는 그대로 일정거리를 진행시킨다.

시험편에 부가하는 스트레인 ε 은 개략적으로 $(t/2R)$ 로 주어지며, 여기서 t 는 시험편의 두께, R 은 (B)블록의 곡률반경을 나타낸다. 시험편에 부가되는 변형량은 여러 종류의 곡률반경을 가지는 블록으로 변화시킨다. 부가 스트레인을 어느 한계치 이상으로 설정하면, 균열은 용융풀 후단의 응고 취성온도 영역에서 발행한다.

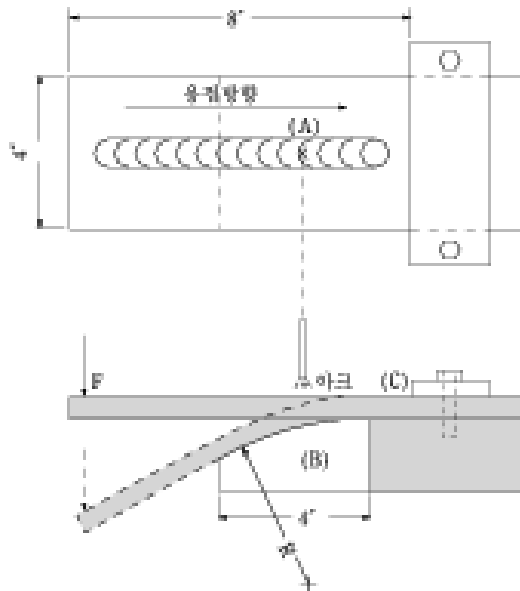


Fig. 2.8 Varestraint crack test

균열감수성을 정량적으로 평가하는 지표는 다음과 같은 것들이 있다.

- 균열발생 한계 스트레인; 균열이 발생하는 최저 부가 스트레인
- 최대 균열의 길이; 균열 중에서 최대 길이를 가지는 균열의 길이로, 이것은 응고취성온도 영역의 폭을 나타낸다.
- 총 균열의 길이; 발생한 모든 균열의 길이를 더한 것으로 가장 평가하기 쉬운 지표이다.

한편, 바레스트레인트시험에 의하면 균열이 용접금속과 열영향부에서 동시에 발생할 수 있다는 점에 대하여, 주로 용접금속에서 발생하는 균열만을 재현하기 위하여, 용접선에 직각방향으로 굽힘변형을 가하는 트랜스식 바레스트레인트(**trans-varestraint**) 시험법도 개발되어 있다. 이 시험법은 그 개요도를 Fig. 2.9에 나타내는 바와 같이 바레스트레인트시험법과 거의 동일하다.

또한 바레스트레인트시험은 시험편의 크기가 작고, 두께가 얇은 것에 적용할 수 있는 소형바레스트레인트시험, 아크스팟부용에 대한 시험 등 많은 방법이 개발되어 널리 사용되고 있다.

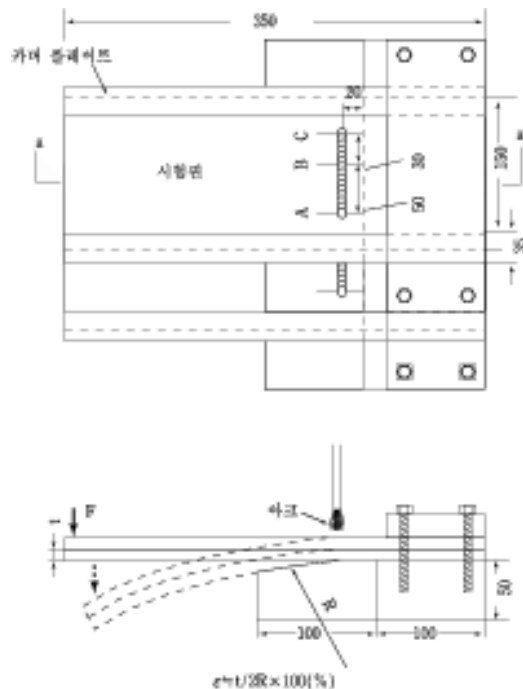


Fig. 2.9 Trans-varestraint crack test

2.2.2 TRC 시험법

TRC 시험(Tensile Restraint Cracking Test)은 고장력강 등의 맞대기용 접부의 루트균열에 대한 시험법이다. 시험편의 형상은 여러 종류가 있으며, Fig. 2.10에 나타내는 바와 같은 1쌍의 시험편의 양단을 고정하고, 용접종료후에 일정한 인장하중을 가한 상태에서 통상 24~48시간 방치하여 균열발생을 조사한다. 이 시험법에 의한 균열감수성은 균열발생에 대한 한계응력과 부하시간과의 관계에 대하여 재질, 예열, 수소량 등을 변화시켜 조사한다. 예를 들어, 고장력강의 경우에는 예열온도가 높을수록, 수소량이 적을수록 균열발생시간 및 균열발생 한계응력이 높아진다. **TRC** 시험기의 인장하중력은 10톤에서 부터 초대형시험편을 대상으로 한 2,000톤의 것도 있다.

용접금속내의 루트부에서 발생하는 저온균열을 검토하기 위하여, 상기

한 TRC 시험을 개량한 LB-TRC(Longitudinal Bead TRC)시험이 있다. 이 시험법은 인장하중력이 2~10톤 정도인 소형 시험기를 사용하며, 용접금속만을 대상으로 한 TRC 시험방식이다. 시험편의 형상 및 크기를 Fig. 2.11에 나타내었다. 이 시험법은 시험 모재 및 용접재료의 소모도 적기 때문에 실험실적인 검토에 편리하며, 이 시험법에 의한 결과는 루트간격이 0인 TRC 시험결과와 일치하는 것으로 알려져 있다.

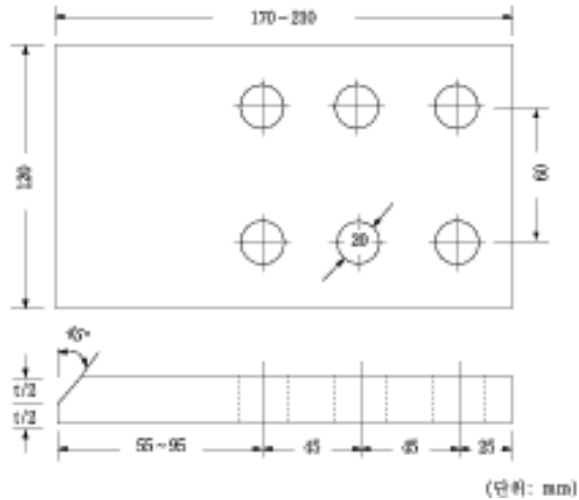


Fig. 2.10 Tensile Restraint Cracking Test

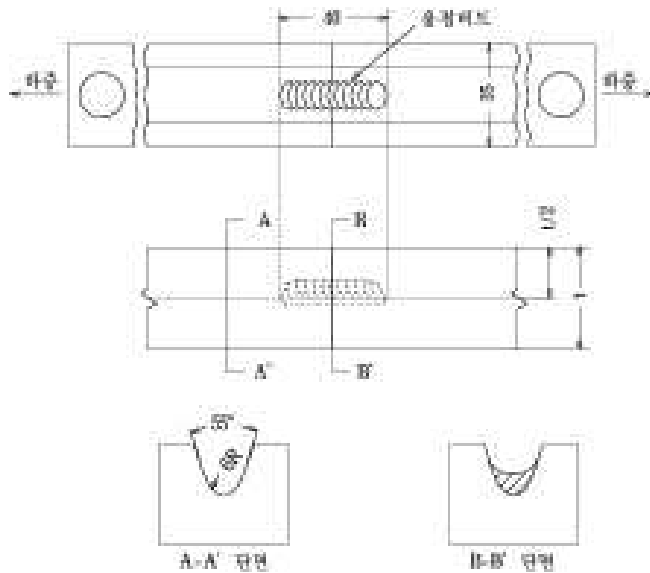


Fig. 2.11 LB-Tensile Restraint Cracking Test

2.2.3 RRC 시험법

RRC 시험(Rigid Restraint Cracking Test)²⁸⁾은 완전 구속 균열시험으로, 연강이나 고장력강 등의 루트균열에 대한 시험법이다. 이 시험법은 시험용접비드를 사이에 두고 모재상에 표점을 정하여, 용접 중 또는 용접 후에 그 표점간을 항상 일정하게 유지되도록 하중을 자동적으로 조정함으로써 루트균열의 발생유무를 조사하는 방법이다. 시험편의 폭은 30~1000mm이며, 홈의 형상은 Y 및 y형이 주로 사용된다.

연강을 사용하여 용접개시후의 비드의 냉각곡선과 각 표점거리(구속거리)를 일정하게 유지하였을 경우의 하중의 변화의 예를 Fig. 2.12에 나타내었다. 구속거리가 짧을수록 구속력이 크게 나타나고 있으며, 용접금속이 150~100℃ 이하의 온도범위에서는 구속력이 거의 일정하게 된다. 그리고 구속거리 l이 200mm로 짧은 경우에는 파단한다. 이러한 결과로부터 용접부의 파단 한계 구속응력을 구할 수 있다. 그리고 RRC 시험에 의한 균열 발생 한계곡선은 TRC 시험결과와 대체로 일치하는 양호한 상관성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

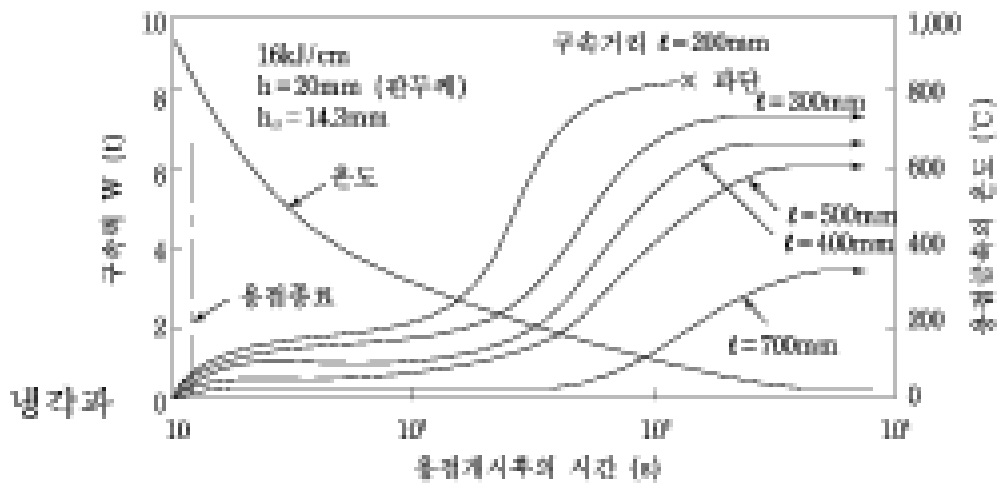


Fig. 2.12 The variation of bead cooling and restraint force by RRC test for mild steel

제 3 장 실물 양면 겹치기 필릿 용접부의 균열 발생 현상 검토

3.1 서언

현장에서 발생하는 여러 불량유형 중에서 90%이상이 연료주입넥 부품에서 1차 용접 후 2차 용접 시 발생하는 박육 파이프와 브라켓의 용접부 균열로 인한 누설불량이다. 본 장에서는 실물 양면 겹치기 필릿 용접부의 균열 발생 현상을 검토하기 위하여 균열개구변위(COD: Crack opening displacement)를 측정하였고 주사전자현미경(SEM: Scanning electron microscope)을 이용하여 파면을 관찰하였다.

Fig. 3.1은 연료주입넥 부품을 보인 것이다. 내부 장착을 위해 박육 파이프에 여러 브라켓 부품이 가스 메탈 아크 용접으로 결합된 것을 볼 수 있으며 많은 양면 겹치기 필릿 용접부를 가지게 된다.

Fig. 3.2는 브라켓과 파이프의 양면 겹치기 필릿 용접부의 1차, 2차 용접비드를 보인 것이다.

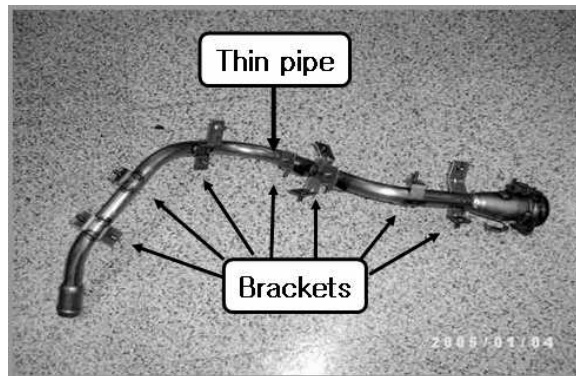


Fig. 3.1 Thin pipe and brackets with many both sides lab joint fillet welds in fuel filler neck

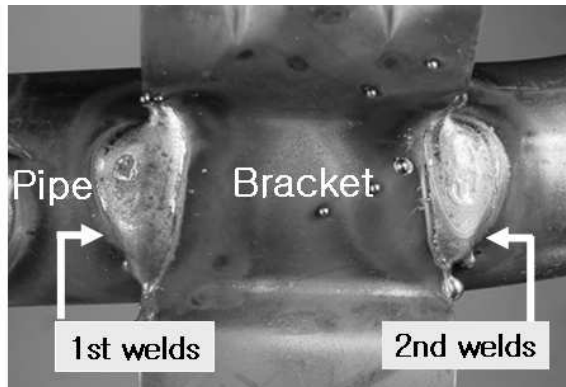


Fig. 3.2 Both sides lab joint fillet welds

3.2 균열 발생 현상

Fig. 3.3은 양면 필릿 용접의 1차 용접 후 2차 용접을 실시할 때 균열 발생 모식도로서 2차 용접부의 응고 및 수축과정에서 1차 용접에 의한 브라켓 및 파이프의 용접 후 변형에 의해 2차 용접부에서 균열이 발생되었다고 판단된다.

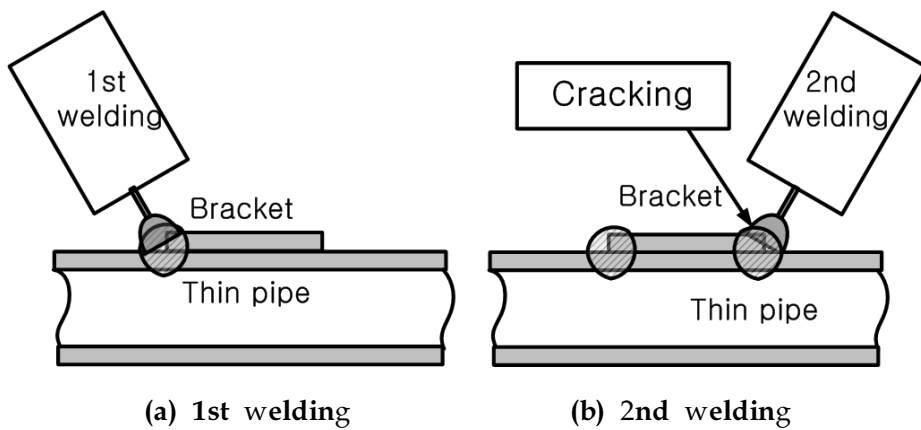
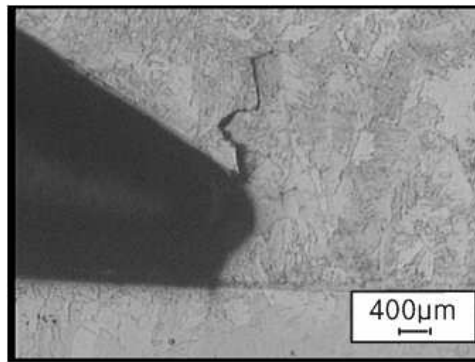


Fig. 3.3 Weld cracking after 2nd welding

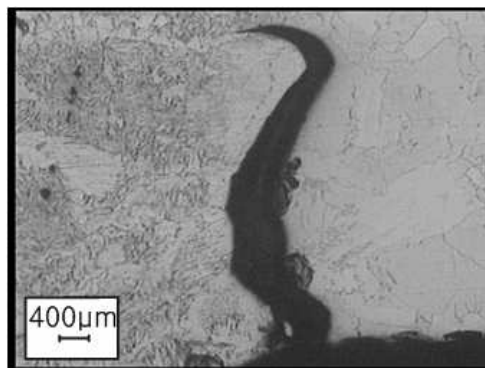
3.3 균열개구변위(COD)

용접부 균열(crack)은 인장스트레인이 작용하는 경우 균열이 벌어지게 되며 이때 벌어진 균열의 변위량을 균열개구변위 COD(Crack opening distance)로 정의한다. Fig 3.4는 공압 시험 시 누설불량이 발생했던 용접 균열 발생부의 균열개구변위(COD)를 보인 것이다. Fig 3.4(a)의 Crack A는 브라켓에서 발생한 용접 균열이며 Fig 3.4(b)의 Crack B는 박육 파이프에서 발생한 용접 균열이다. Crack A 및 B는 각각 125 μ m, 793 μ m의 최대 균열개구변위(COD)값을 가지며 용접부의 응고수축과정에서 작용한 인장스트레인에 의해 균열이 벌어졌다고 판단되었다.



Crack opening displacement: 125 μ m

(a) Crack A (bracket)



Crack opening displacement: 793 μ m

(b) Crack B (Thin pipe)

Fig. 3.4 Crack opening distance

3.4 용접 균열부 SEM사진

Table 3.1은 브라켓에서 발생한 균열로 Table 3.1(a)는 마크로 단면, Table 3.1(b)는 마크로 조직, Table 3.1(c)는 파면, Table 3.1(d) 및 Table 3.1(e)는 주사전자현미경(SEM: scanning electron microscope)사진을 보인 것이다. Table 3.1(b)의 마크로 조직을 보면 용접균열은 용접 금속(Weld metal)에서 발생하였다. Table 3.1(d) 및 Table 3.1(e)의 SEM사진을 보면 재결정 온도보다 약간 높은 온도에서 심각한 연성저하 현상에 의해 발생된 고온균열중의 연성저하균열로 판단된다. Table 3.2는 박육 파이프에서 발생한 균열로 Table 3.2(a)는 마크로 단면, Table 3.2(b)는 마크로 조직, Table 3.2(c)는 파면, Table 3.2(d) 및 Table 3.2(e)는 SEM사진을 보인 것이다. Table 3.2(b)의 마크로 조직을 보면 용접균열은 조대화된 열영향부(HAZ: Heat affected zone)에서 발생하였다. Table 3.2(d) 및 Table 3.2(e)의 SEM사진을 보면 용접균열이 조대화된 열영향부(HAZ)의 결정립계를 따라 발생하였으며 수지상의 파면을 보이므로 고온균열중의 HAZ 액화균열로 판단된다. Crack A, B는 모두 입계파단인 것을 명확하게 알 수 있으며, SEM 사진에 존재하는 돌기들은 균열이 발생할 때 결정립계에는 액상이 존재하고 있었다는 증거를 보여주며 균열 A부, B부는 고상선 온도 이하에서 발생하는 고온균열인 것으로 보인다.

Table 3.1 Welds section, Macro structure, fracture shape, and SEM photograph (Crack A)

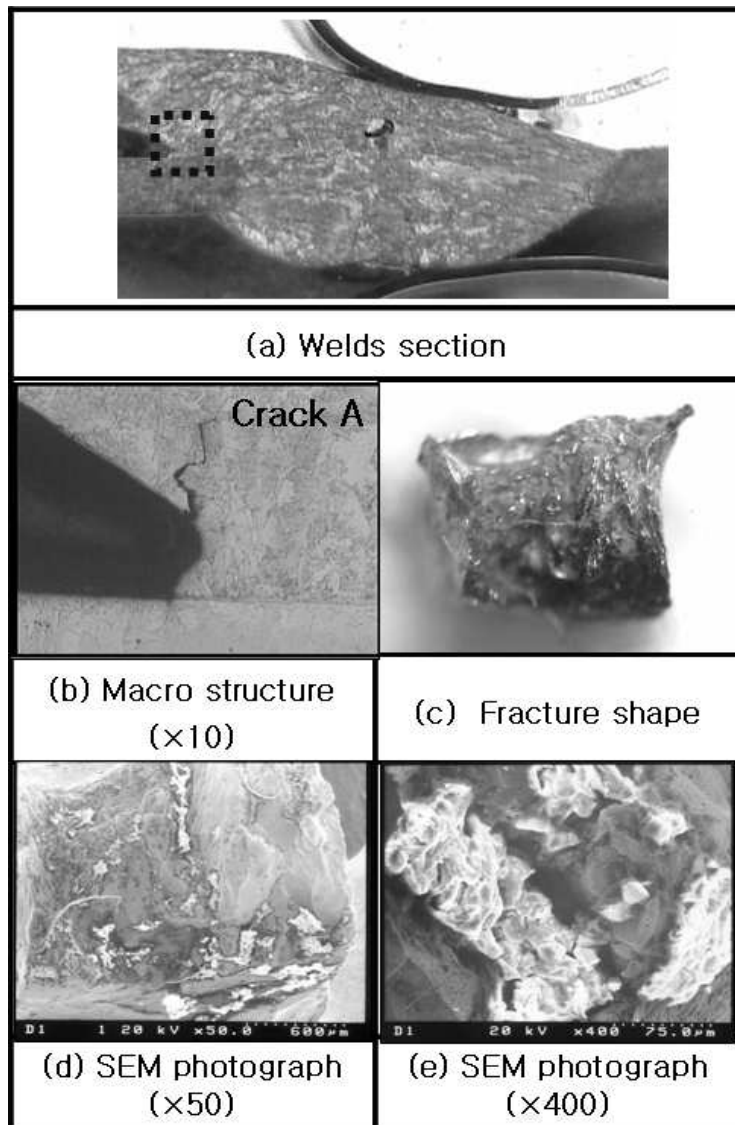
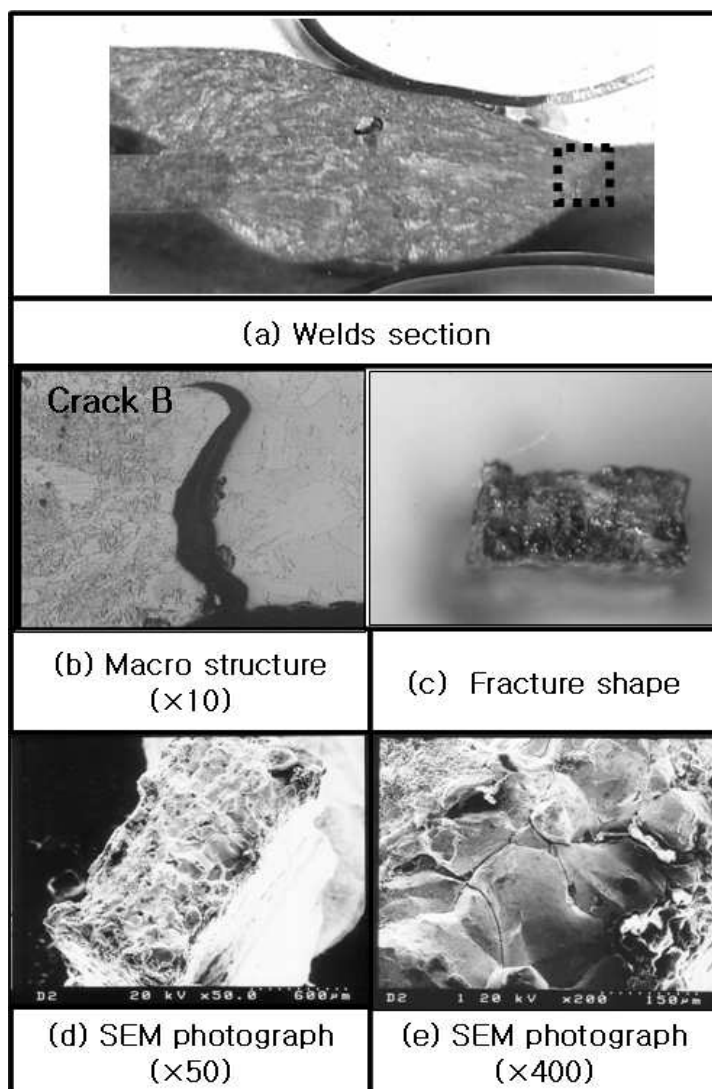


Table 3.2 Welds section, Macro structure, fracture shape, and SEM photograph (Crack B)



3.5 고온균열 발생 인자

일반적으로 고온균열의 발생 기구는 수지상 입계를 따라 발달하는 취약한 상(액상 포함)에 과대한 인장스트레인이 인가되어 균열이 발생하게 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 용접부의 고온균열은 다음과 같은 경우에 쉽게 발생할 수 있다.

- 1) 고온균열이 잘 생길 수 있는 화학 조성.
- 2) 용접부의 냉각속도가 느린 경우.
- 3) 과대한 인장스트레인이 걸리는 경우.

본 연구에서는 2차 용접부의 응고 및 냉각 시에 발생하는 인장스트레인을 재현하기 위하여 1차 용접시 입열량 및 용접선 위치를 변경하여 용접을 실시하였고 1차 용접 후 파이프와 브라켓에서 발생하는 변형에 대해 분석하였다.

제 4 장 재현 시험편에 의한 실험 방법

4.1 재현 시험편

Fig. 4.1은 두께 1t의 냉간압연강판을 사용하여 겹치기 필릿 용접 시편을 만들어 2차 용접부에 작용하는 인장스트레인을 재현하기 위한 시편 형상을 보인 것이다. Fig. 4.1(a)는 브라켓 변형량을 측정하기 위한 시편으로서 여기서 브라켓 변형량(D_b)은 변위계로 측정되는 브라켓 변위값(δ_b)에서 파이프 변위값(δ_p)을 뺀 값으로 정의하였다. Fig. 4.2(b)는 파이프 변형량을 측정하기 위한 시편으로서 파이프 변형량(D_p)은 변위계로 측정되는 파이프 변위값(δ_p)으로 정의하였다. 브라켓과 파이프의 치수는 각각 $30 \times 30 \times 1\text{mm}$, $40 \times 30 \times 1\text{mm}$ 이었다.

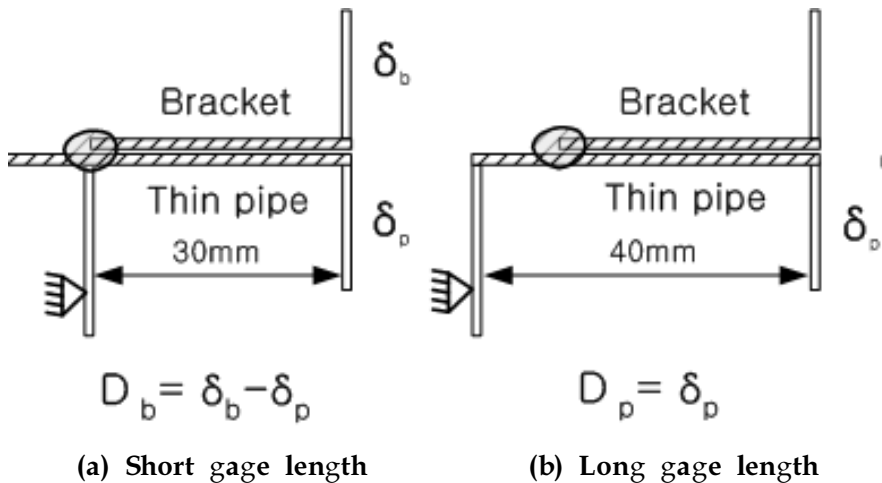


Fig. 4.1 Configuration of Specimen

4.2 측정 장치 구성 및 측정 시스템 캘리브레이션

4.2.1 측정 장치 구성

Fig. 4.2는 측정 장치 모식도를 보인 것이다. 용접 시 용접 파형 측정 장치를 사용하여 용접전류 및 용접전압을 측정하였으며 온도 측정 장치 및 변위 측정 장치를 사용하여 용접전후의 박육 파이프와 브라켓의 온도 및 변위를 측정하였다. Fig. 4.3은 실제 설치된 실험 장치 사진을 보인 것이다. Fig. 4.4는 열전대 부착 위치를 보인 것으로 브라켓의 표면과 박육 파이프의 이면에 열전대를 부착하였다.

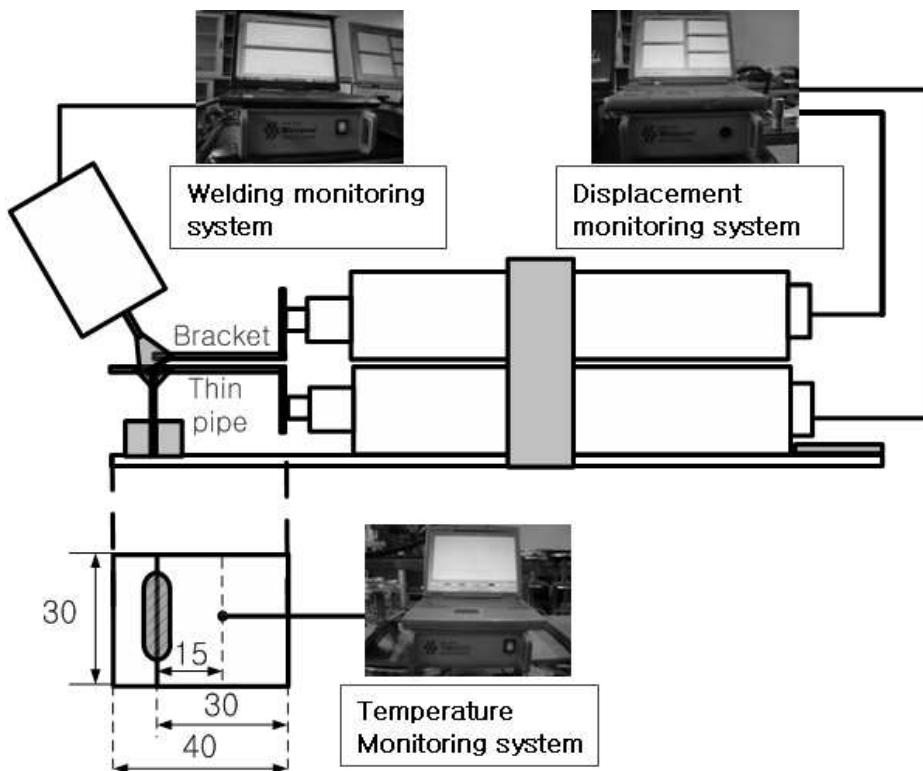


Fig. 4.2 Experimental setup

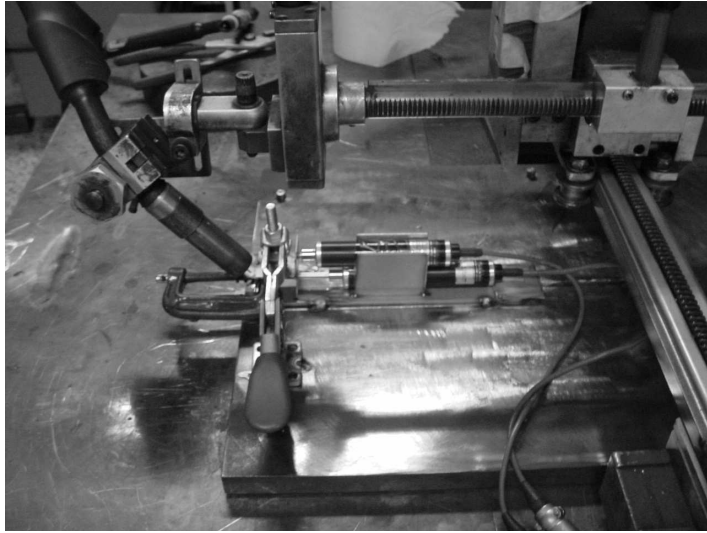


Fig. 4.3 Experimental device

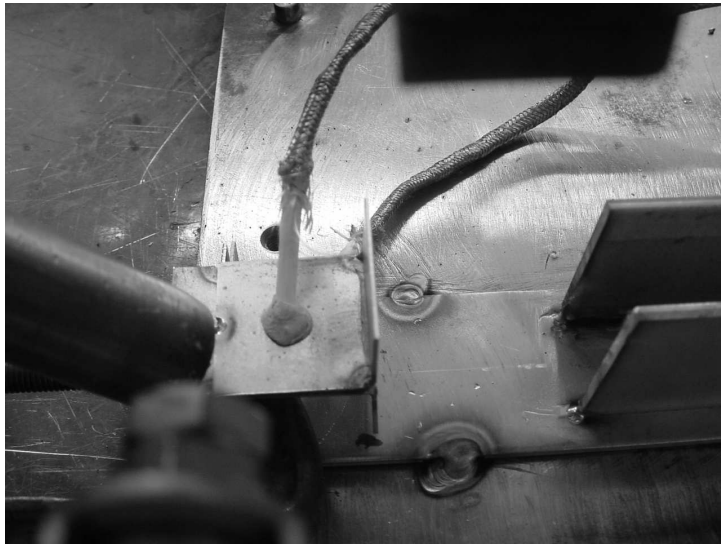


Fig. 4.4 The position of thermocouple

4.2.2 측정 장치 캘리브레이션

1) 변위 측정 장치 캘리브레이션

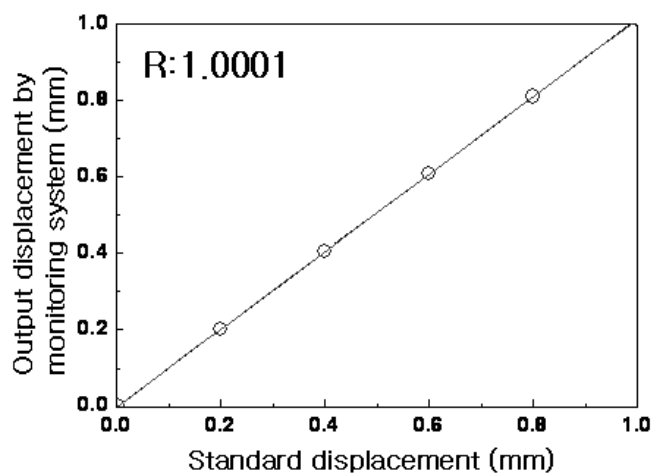
Fig. 4.5는 측정에 사용되는 변위계에 기준 변위값을 주었을 때 모니터링 장비를 통하여 측정된 변위값을 보인 것이다. Fig. 4.5(a) 및 Fig. 4.5(b)는 각각 브라켓 및 박육 파이프에 설치되는 변위계를 나타낸 것으로 상관계수가 1.0001 및 0.9998로서 모니터링 장비를 통해 측정된 값이 상당히 신뢰성을 가짐을 볼 수 있다.

2) 온도 측정 장치 캘리브레이션

Fig. 4.6은 온도 모니터링 장비의 캘리브레이션 과정을 거쳐 구해진 보상값을 적용한 경우에 측정 응고점에 대한 이론 응고점 값을 나타낸 것이다. 실제 본 연구에서 구해진 브라켓 및 박육 파이프의 온도(Y)는 온도 모니터링 장비로 측정된 온도(X)를 보상식에 대입하여 계산하였다.

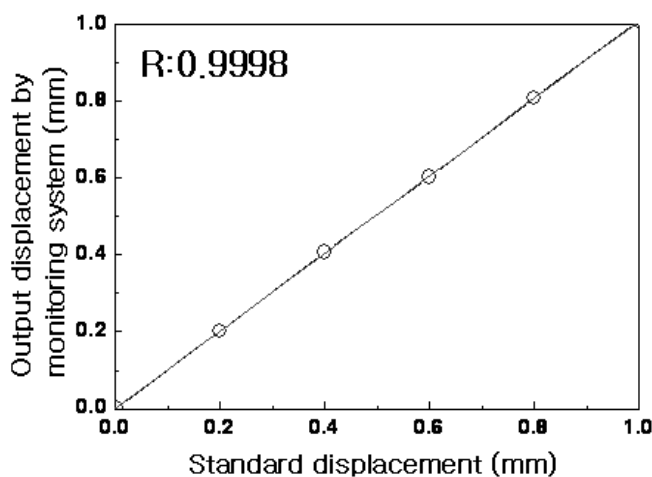
3) 용접 모니터링 시스템 캘리브레이션

Fig. 4.7은 기준 용접전류에 대해 아크 모니터링 장비로 측정된 출력전류를 나타낸 것으로 상관계수가 0.9999이상으로 높은 신뢰성을 가진다.



Output displacement
 $= 1.01191 \times \text{Standard displacement} + 0.000176$

(a) Displacement device (Bracket)



Output displacement
 $= 1.00679 \times \text{Standard displacement} + 0.00119$

(b) Displacement device (thin pipe)

Fig. 4.5 Output displacement by Standard displacement

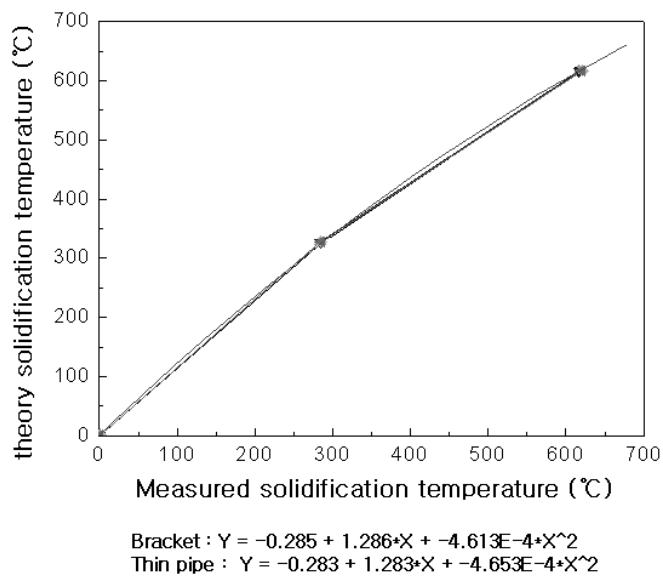


Fig. 4.6 Temperature monitoring device calibration

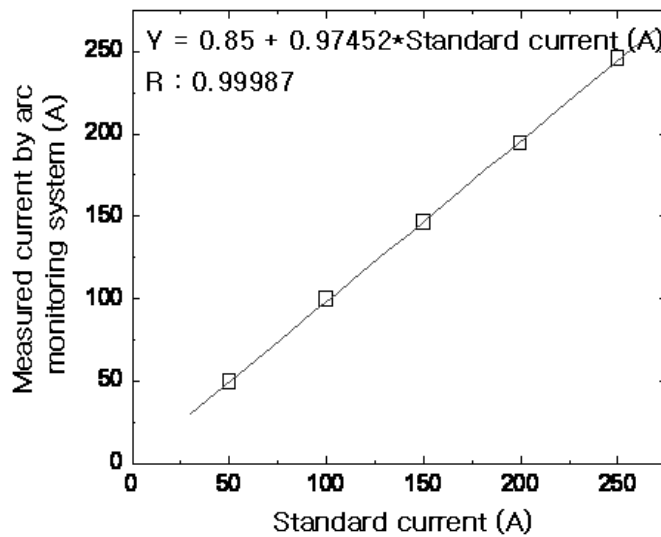


Fig. 4.7 Measured current by standard current

4.3 실험방법

Table 4.1은 2차 용접부에 발생하는 인장스트레인을 재현하기 위하여 1차 용접의 시공인자인 입열량과 용접선 위치를 변경하여 실험하였을 때의 용접 조건을 보인 것이다. **Fig. 4.8**은 용접선 위치에 대한 모식도를 보인 것이다.

Table 4.1 Welding Condition

Power source	Fronius TPS4000
Welding mode	Lab joint fillet welding
Welding current	100A
Welding voltage	15.7V
Welding wire	YGW 11, $\Phi 1.2$
Shielding gas	Ar-20%CO ₂ , 15L/min
CTWD	10mm
Work angle	30°
Bead length	20mm
Heat input	0.15kJ/mm (1.9sec)
(Welding time)	0.25kJ/mm (3.2sec)
Welding line (mm)	-1.5, 0, +1.5

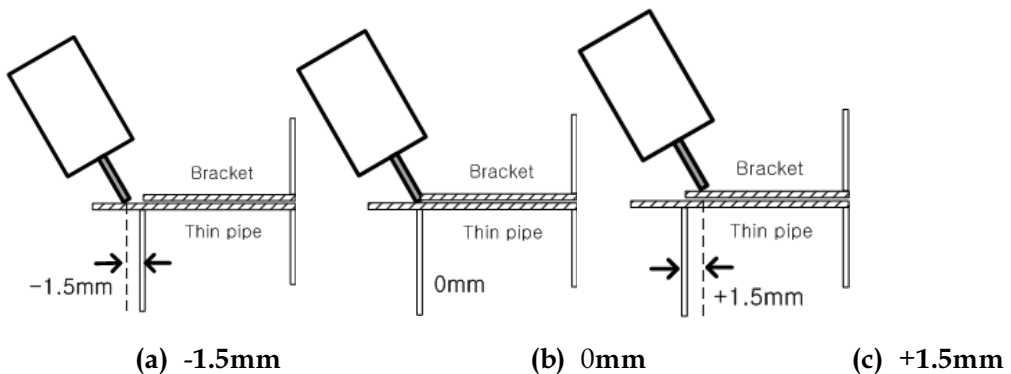


Fig. 4.8 Various welding line

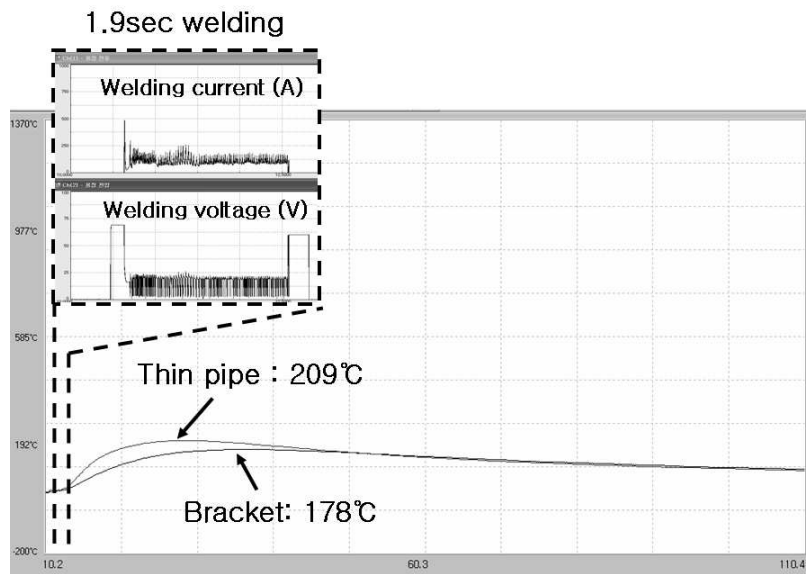
제 5 장 실험 결과 및 고찰

5.1 입열량에 따른 브라켓과 박육 파이프의 온도 변화

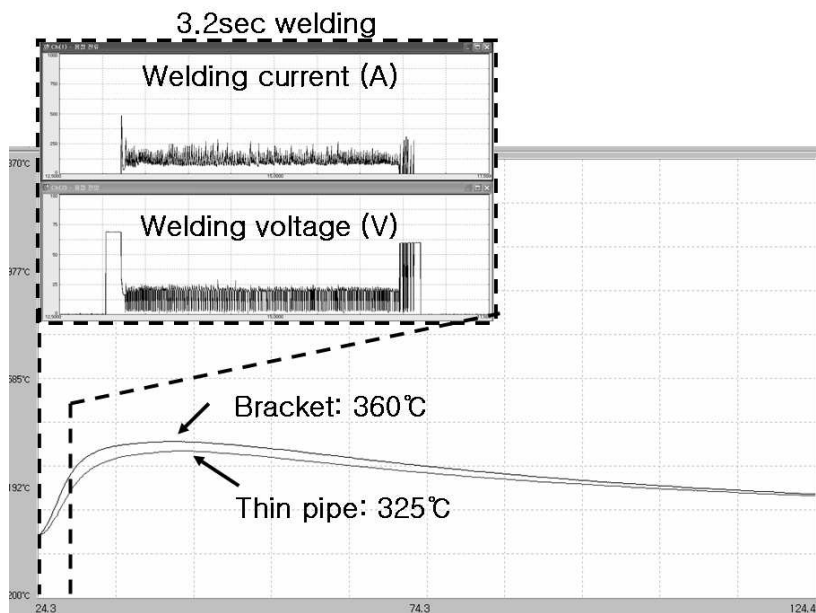
Fig. 5.1은 용접선 위치 -1.5mm 에서 입열량 0.15kJ/mm , 0.25kJ/mm 로 용접할 때 측정 시스템을 통하여 측정된 용접과형 및 온도과형을 보인 것이다. Fig. 5.1(a), Fig. 5.1(b)의 용접과형을 보면 입열량 0.15kJ/mm 와 입열량 0.25kJ/mm 의 용접시간은 각각 1.9초와 3.2초였다. Fig. 5.1(a)는 입열량 0.15kJ/mm 에서 용접시작 후 100초 동안의 온도 변화를 보인 것이며 Fig. 5.1(b)는 입열량 0.25kJ/mm 에서 용접시작 후 100초 동안의 온도 변화를 보인 것이다.

Fig. 5.2는 입열량에 따른 브라켓과 파이프의 용접 후 온도변화를 보인 것이다. 0.15kJ/mm 조건은 용접시간이 1.9sec이고, 0.25kJ/mm 조건은 용접시간이 3.2sec이므로 용접 직후 시작점의 온도는 0.25kJ/mm 가 더 높다. 또한 용접선 위치가 파이프로 -1.5mm 옮겨져 용접되면 브라켓에 비해 파이프의 온도가 더 높아진다. 만약 과대한 입열량으로 1차, 2차 용접이 이루어지는 경우 2차 용접비드의 냉각속도가 느려지므로 과대한 인장스트레인이 걸리는 경우 고온균열이 쉽게 생길 수 있다.

Ankara등의 연구⁶⁾에 따르면 용접시 높은 용접전류나 낮은 용접속도는 입열량을 증가시켜 느린 용접부 냉각속도를 유발하므로 용접부의 용입 깊이는 증가하고 길이가 길고 예리한 끝을 가진 수지상정을 형성하게 되어 결정입계에서 편석의 양을 증가시켜 고온균열 감수성이 증가한다고 다루고 있다. 따라서 열확산성⁷⁾이 작은 브라켓과 파이프의 양면 겹치기 필릿 용접부는 용접 중 응고가 느려지므로 1차, 2차 용접부의 입열량을 최소화하는 것이 바람직하다.



(a) 0.15kJ/mm



(b) 0.25kJ/mm

Fig. 5.1 Welding waveform and temperature profile
(welding line: -1.5mm)

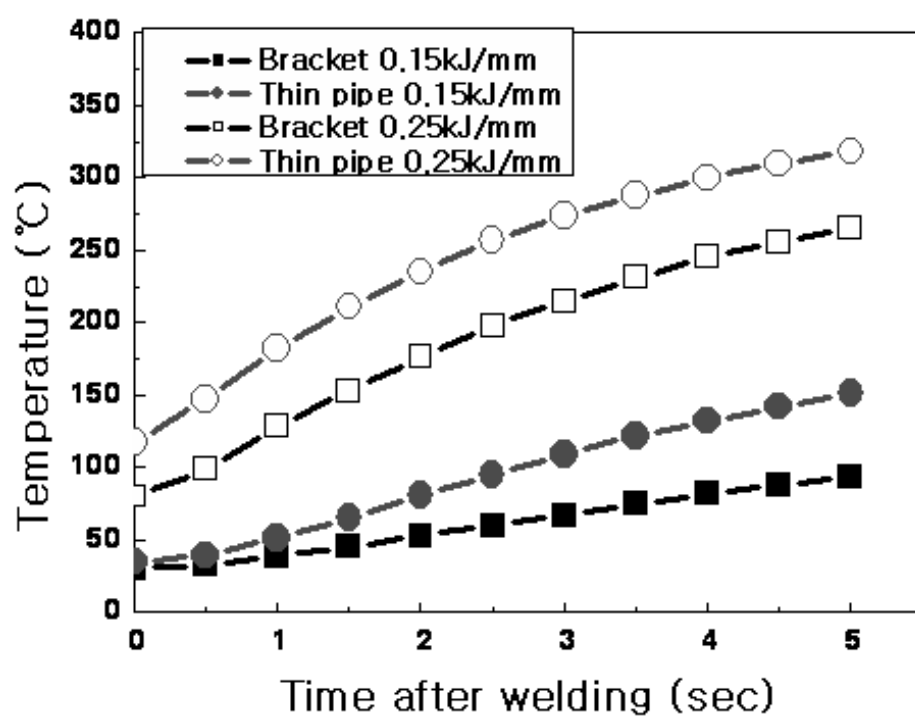


Fig.5.2 The temperature profile after welding

5.2 용접선 위치에 따른 브라켓과 박육 파이프의 변형 거동

5.2.1 1차 용접 후 브라켓의 변형 거동

Fig. 5.3은 용접선 위치에 따른 표면비드 외관을 보인 것이다. 용접선 위치 -1.5mm 에서 용접비드는 파이프 위에서 형성되며 용접선 위치 0 , $+1.5\text{mm}$ 에서 용접 비드는 파이프와 브라켓 위에서 형성된 것을 볼 수 있다.

Fig. 5.4는 입열량 0.15kJ/mm 로 용접하였을 때 용접 후 시간 경과에 따른 용접선 위치별 브라켓 변형량(D_b)을 보인 것이다. 용접비드가 브라켓에 걸쳐 형성되는 0 , $+1.5\text{mm}$ 에서 브라켓은 용접 후 비드의 응고 수축으로 인해 용접비드 쪽으로 수축(-)한다. 용접비드가 파이프 위에서 형성되는 -1.5mm 에서 브라켓은 용접 후 아크 열에 의한 가열로 인해 팽창(+)한다.

Fig. 5.5는 입열량 0.15kJ/mm 로 용접하였을 때 용접 후 시간 경과에 따른 용접선 위치별 브라켓 변형속도(D_b/dt)를 보인 것이다. 여기서 1차 용접 후 2차 용접이 브라켓의 수축(-)이 큰 상태에서 실시된다면 2차 용접부의 비드는 1차 용접부쪽으로 당겨지면서 인장스트레인 상태에 놓이게 된다.

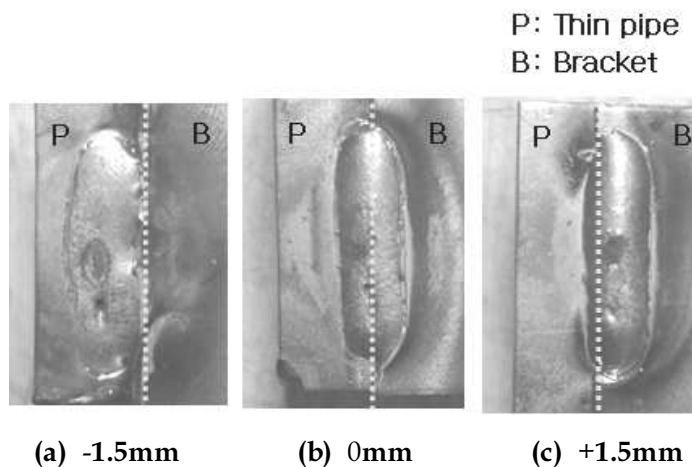


Fig.5.3 Surface bead appearance for welding line (heat input: 0.15kJ/mm)

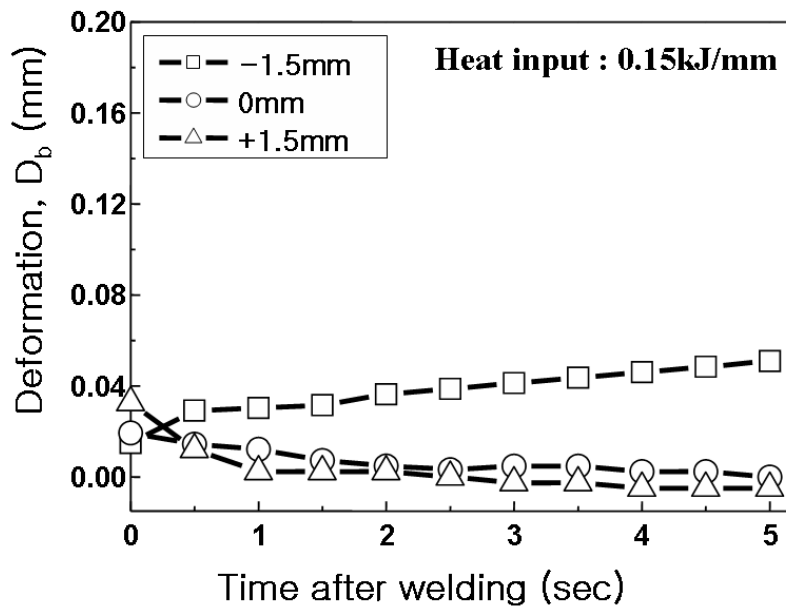


Fig.5.4 Deformation profile of bracket after welding

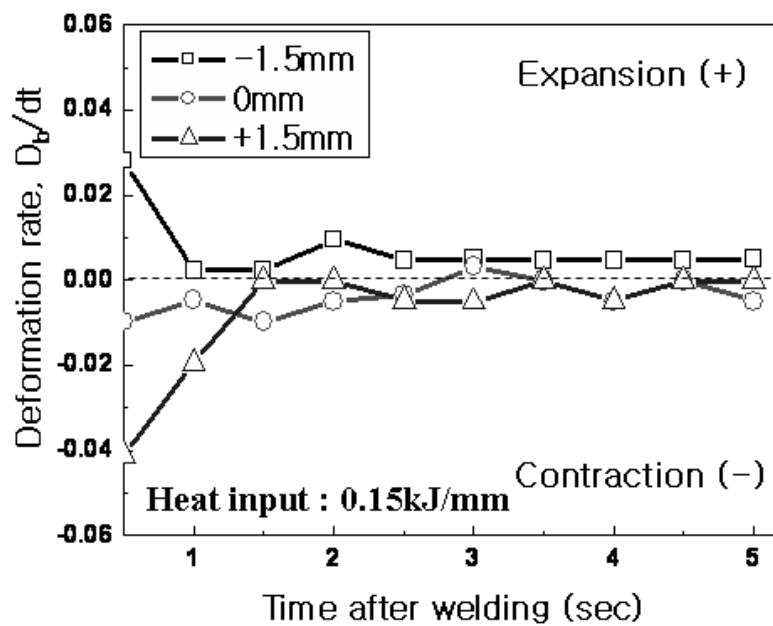


Fig.5.5 Deformation rate profile of bracket after welding

5.2.2 1차 용접 후 파이프의 변형 거동

Fig. 5.6은 용접선 위치에 따른 이면비드 외관을 보인 것이다. 용접선 위치 -1.5mm 에서는 아크열이 파이프에 집중되므로 이면비드가 크게 형성되었고, 용접선 위치 $+1.5\text{mm}$ 에서는 이면비드가 형성되지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5.7은 입열량 0.15kJ/mm 로 용접하였을 때 용접 후 시간 경과에 따른 용접선 위치별 파이프의 변형량(D_p)을 보인 것으로 용접선 위치에 관계없이 모두 팽창(+)하고 있다. -1.5mm 에서 파이프의 열팽창이 크므로 이면비드가 형성되어도 큰 팽창값을 가진다. 0mm 가 $+1.5\text{mm}$ 에 비해 파이프 팽창이 더 적은 이유는 이면 백비드 형성으로 인한 팽창값 저하로 판단된다.

Fig. 5.8은 입열량 0.15kJ/mm 로 용접하였을 때 용접 후 시간 경과에 따른 용접선 위치별 파이프의 변형속도(D_p/dt)를 보인 것이다. 여기서 1차 용접 후 2차 용접이 파이프의 팽창(+)이 큰 상태에서 실시된다면 2차 용접부의 비드는 파이프 팽창으로 인해 당겨지면서 인장스트레인 상태에 놓이게 된다.

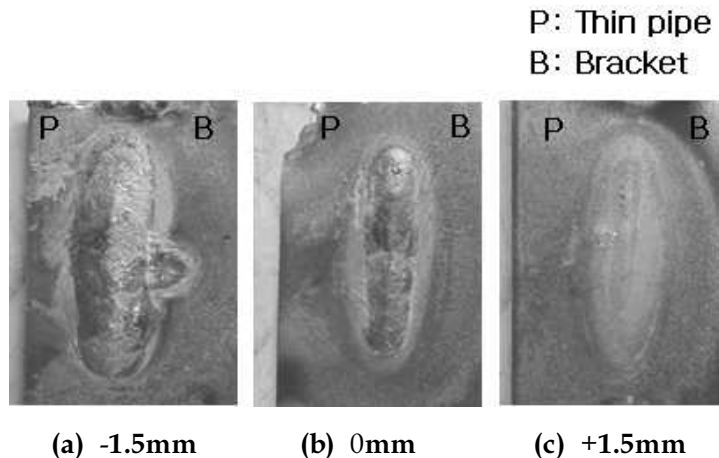


Fig. 5.6 Back bead appearance for welding line (heat input: 0.15kJ/mm)

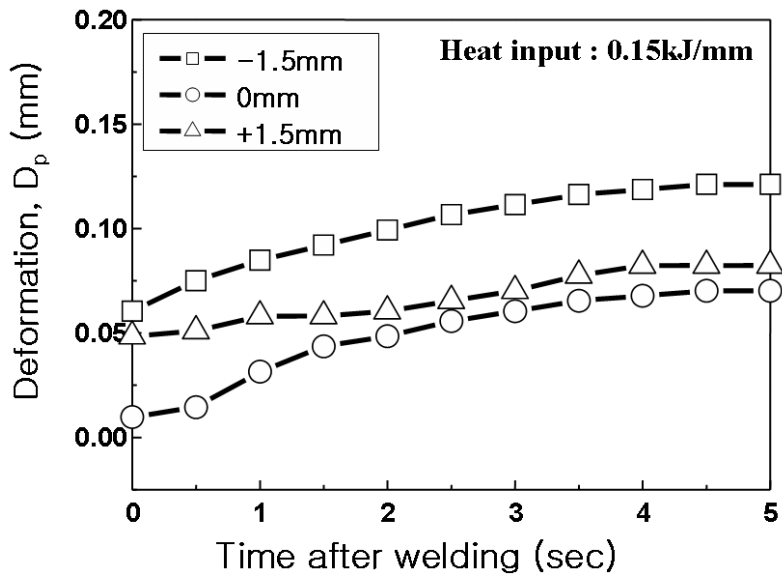


Fig. 5.7 Deformation profile of pipe after welding

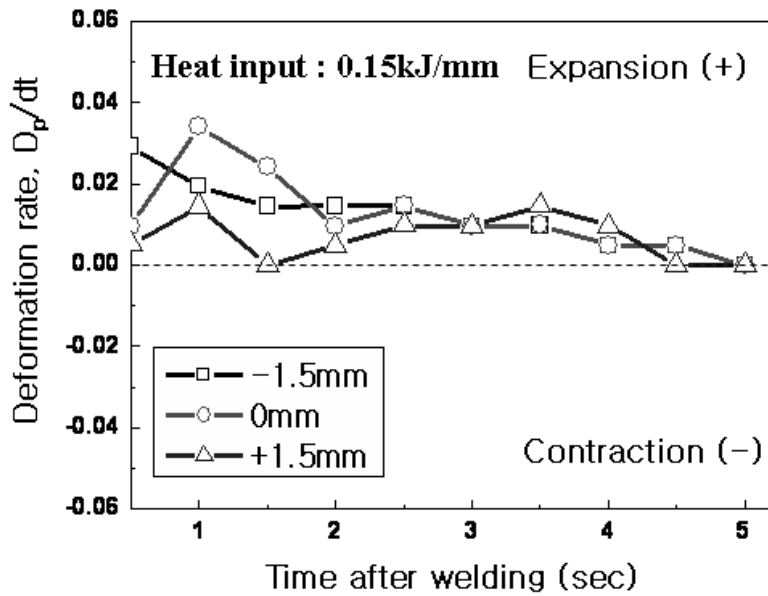


Fig. 5.8 Deformation rate profile of pipe after welding

5.3 고온균열 발생 현상에 대한 고찰

Fig. 5.9는 냉각속도가 느린 경우에 브라켓의 수축과 파이프의 팽창으로 인한 인장스트레인이 작용하여 고온균열이 발생하는 모식도를 보인 것이다. 따라서 양면 겹치기 필릿 용접부에서 2차 용접비드에는 브라켓의 수축에 의한 인장스트레인과 파이프의 팽창으로 인한 인장스트레인이 겹쳐져서 매우 큰 인장 스트레인이 작용하여 냉각속도가 늦은 경우에는 고온균열이 쉽게 발생 될 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 열확산성이 작은 박육 파이프와 브라켓의 양면 겹치기 필릿 용접부는 인장 변형을 지배형 고온균열이 발생한 것으로 판단된다.

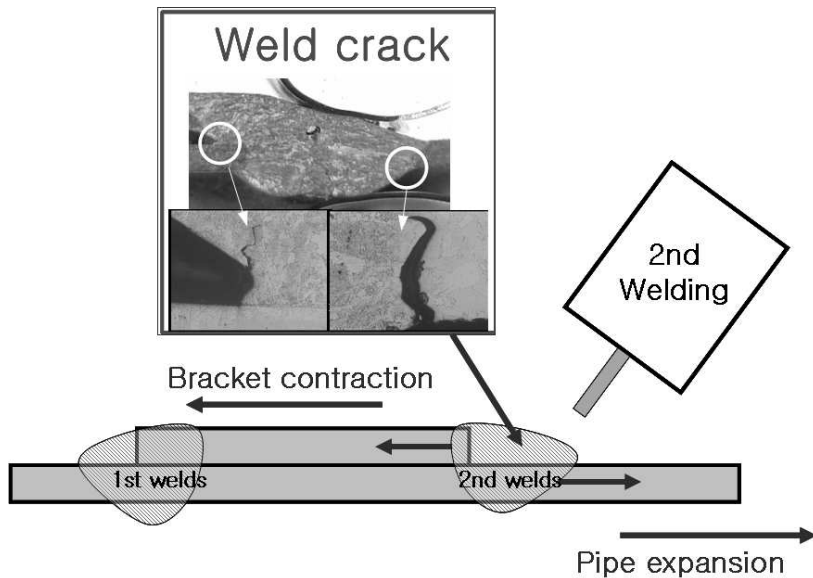


Fig. 5.9 Hot crack appeared due to tensile strain in 2nd welds

제 6 장 결 론

박육 파이프와 브라켓의 양면 겹치기 필릿 용접부에서의 고온 균열 발생 현상을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1) 냉간압연강판인 박육 파이프와 기계구조용 탄소강인 브라켓의 양면 겹치기 필릿 용접부에서 발생하는 균열은 균열개구변위 측정 및 파면에 의하면 고온 균열인 것으로 보인다.

2) 1차 용접부 입열이 크면 2차 용접부가 고온으로 예열되어 2차 용접 후 냉각속도가 크게 낮아 질 수 있고, 1차 용접직후 브라켓이 팽창했다가 비드의 냉각수축에 의해 그 반대편은 1차 용접부쪽으로 많이 이동하게 된다. 이때 파이프는 계속 팽창하여 2차 용접부에 해당하는 부분도 늘어나므로 2차 용접 후 그 용접비드가 냉각 수축할 때 브라켓은 수축하고 파이프는 팽창하므로 2차 용접 비드는 큰 인장스트레인이 작용하여 고온균열이 발생되는 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. C. H. Lee, S. S. Cho : Mechanism of Hot Cracking in High Strength Al Welds, Journal of KWS, Vol.14, No. 3, (1996), 93-104
2. H. C. Jeong : Weld Hot Cracking in C-Mn Steel, Journal of KWS, Vol.17, No. 5, (1999), 1-9
3. AWS : Welding Handbook. Vol. 4, 8th Ed (1998), 6-10
4. D. Y. Kim, H. J. Kim : Effect of Heat Input on Hot Cracking Susceptibility in the Austenitic Stainless Steel Overlay, Journal of KWS, Vol.6, No. 2, (1988), 40-46
5. 대한용접학회 : 용접·접합 편람(1998). pp. 879-885
6. Alpay Ankara, Haldum Bülent Ari : Determination of hot crack susceptibility in various kinds of steels, Materials & Design, Vol.17, No. 5/6, (1996), 261-265
7. J. N. DuPONT, A. R. MARDER : Thermal Efficiency of Arc Welding Processes, Welding Research Supplement, December, 1995
8. Y. H. AHN, J. B. LEE, R. W. CHANG and M. S. SO : Effects of Center Segregation on Weld Cold Cracking Susceptibility, Journal of KWS, Vol.12, No. 2, (1994), 87-96

감사의 글

1998년 처음 접한 용접공학개론 수업에서 용접공학박사이자 기술사이신 조상명 교수님의 열정적인 강의에 매료되어 강한 아크 불빛처럼 꺼지지 않는 저의 인생 목표를 ‘대한민국 최고 용접 엔지니어가 되자’라고 잡은 지 벌써 8년이 되었습니다. 용접공학에 대한 학문적이고 이론적인 체계를 확립하기 위하여 2002년 9월경 부푼 꿈을 안고 용접 IT 연구실에 들어와 많은 것을 배우고 느꼈고 지난 대학원 생활을 돌이켜 보니 감회가 새롭습니다.

가장 먼저 고개 숙여 감사의 말씀을 전하고 싶은 분은 바로 저의 지도 교수님이신 조상명 교수님이십니다. 저의 삶에서 항상 옳고 바른 생각을 가지도록 많은 조언을 해주셨고, 학문에 대해 많은 지도를 해주셨습니다.

학부 및 석사 과정에서 많은 지도를 해주신 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님들께도 감사의 말씀을 올립니다. 논문 완성을 위해 많은 조언을 해주신 김우열 교수님, 서원찬 교수님께도 다시 한번 감사드립니다.

처음 연구실에 들어온 제게 많은 도움을 주셨던 조호재, 박찬우, 김진우, 공현상, 김선희, 박금기, 박대규, 탁정수, 김기정, 조성우, 박덕조 선배님들께 고마움을 전하고 싶습니다. 그리고 항상 후배들에게 모범이 되셨던 오동수, 황동수, 지정민, 고명훈, 고미혜, 감병오, 장경복 박사과정 선배님들께도 많은 고마움을 전하고 싶습니다. 감사합니다. 같이 공부하고 같이 울고 웃었던 유광선님, 김인태님께도 고마움을 전하고 싶습니다. 마지막으로 항상 열심히 노력하는 조진안, 김대만, 고찬식, 윤승종, 김진욱, 함효식, 배광무, 황규민, 문영덕, 김성덕, 윤영현들에게 감사의 말을 전하고 싶습니다. 또한 우리연구실의 꽃인 이정현양에게도 감사의 말을 전하고

싶습니다.

또한 제가 무슨 일을 하던 항상 묵묵히 지원해 주신 부모님께 정말 감사하게 생각합니다. 그리고 지금은 초등학교 선생님이신 큰누나와 멀리 서울에서 돈벌고 있는 작은 누나에게 감사의 마음을 전하며 본 논문을 마칩니다.