

# 용접상세의 변화에 따른 용접이음부의 잔류응력에 관한 연구

## A Study on the Residual Stress in the Welded Joints with Different Details

임 청 권<sup>1)</sup> · 박 문 호<sup>2)</sup>

*Lim, Cheong Kweon Park, Moon Ho*

요 약 : 용접잔류응력의 모재두께방향을 포함하는 3차원 분포를 파악하기 위해, 용접상세를 변화시킨 필렛용접이음 대상으로 해서 실험 및 해석을 수행하였다. 특히, 지금까지 계측이 곤란했던 필렛용접이음의 용접루트부의 잔류응력을 실측하였다. 파라메타로서는 용접입열량과 용접층수를 취급하고, 모재두께방향을 포함하는 3차원 잔류응력의 분포를 조사하였다. 그 결과, 입열량이 증가하면, 용접토우와 루트부를 포함하는 용접부에서는 잔류응력의 크기에 변화가 거의 없지만, 인장잔류응력의 영역이 크게 나타났다. 또 단층과 다층용접의 비교에서는, 다층용접 쪽이 단층용접보다 잔류응력이 상당히 낮음을 알 수 있었다. 용접부 근방의 인장잔류응력의 영역도 다층용접 쪽이 단층용접보다 작게 나타난 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT : In order to study the distribution of welding residual stress through the plate thickness, experiment and analysis of fillet welding details were carried out. Especially, a residual stress in the weld root part of T-joint fillet weld whose measurement was difficult up to now was measured. By using the heat input and the number of the weld layers as parameters, the distribution of the 3-dimensional residual stress was investigated. As a result, we can say that with increasing the heat input, the residual stress in the weld toe and weld root barely changes. But, the area of the tensile residual stress became wide. Then, comparing a single pass with multi-pass weld method, it was found that the residual stress decreased more in multi-pass than in single pass. Moreover, it was found the thing that the area of tensile residual stress by multi-pass is lower than that by single-pass in the near weld part.

핵심용어 : 용접잔류응력, 필렛용접, 입열량, 용접층, 용접패스

KEYWORDS : welding residual stress, fillet welds, heat input, weld layers, weld pass

1) 정회원, 서일대학교 토목공학과, 초빙교수

2) 정회원, 경북대학교 토목공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

용접잔류응력은 용접부재의 피로강도나 취성과 파괴에 다양한 영향을 미친다. 예를들어, 필렛용접 이음부의 피로균열은 용접토우부에서부터 발생하는 경우와 루트부에서부터 발생하는 경우가 있다<sup>(1)~(3)</sup>. 이것은 외력에 의해 생기는 응력집중<sup>(4)</sup>과 함께, 용접이음부에 거의 불가피하게 발생하고 있는 용접잔류응력, 용접결함 및 용접에 따른 강의 치금적성질의 변화 등의 영향이라고 생각된다<sup>(5)~(7)</sup>. 용접잔류응력에 관해서는 지금까지도 많은 연구가 행해져 왔지만, 그 대부분이 좌굴강도에 대한 영향과의 관계로 검토되어지고 있고<sup>(8)~(10)</sup>, 그 경우에 대해서는 부재를 구성하는 모재의 평균압축잔류응력의 크기 및 분포가 중요시된다<sup>(11)</sup>. 한편, 피로나 파괴의 영향에 대해서는 인장잔류응력 그것도 국부적인 3차원 분포가 문제로 되지만, 그 발생과정에 많은 요인이 복잡하게 관계하고 있기 때문에 그렇게 명백하게 밝혀지지 않고 있다. 그런데, 용접부에서 부터 발생하는 피로균열의 현상이나 파괴현상을 평가, 예측하기 위해서는 용접부에 발생하는 용접잔류응력의 3 차원 분포를 정확히 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 용접잔류응력의 모재두께방향분포를 파악하는 것을 목적으로 해서, 실험 및 해석적인 검토를 수행하였다. 대상으로 한 이음은, 강용접교량의 대표적 이음인 필렛용접이음으로 하였다. 여기에서는, 용접입열량 및 용접층수의 잔류응력에 대한 영향을 변수로 하여 검토한다.

## 2. 시험체 및 용접조건

잔류응력측정 및 해석에 이용한 필렛용접이음의 형상을 그림 1에 나타낸다. 필렛용접이음의 시험체는 외적구속이 없는 주변자유판의 상태로 용접을 행하였다. 시험체의 사용강재는 SM490이고, 용접은 등질용접을 기본으로 하였다. 각 시험체의 용접조건을 표 1에, 강재의 기계적성질을 표 2에 보인다. 본 시험체는, 단층용접으로 입열량이 약 10, 20, 30 (KJ/cm)인 Series A와, 총 입열량을 같이 해서 3층과 단층용접을 각각 행한 Series B가 있다.

그림 1에 보이듯이, 시험체의 좌표축은 용접선의 직각방향을  $x$ , 용접선 방향을  $y$ , 모재두께 방

표 2. Millsheet에 의한 강재의 기계적 성질

Material	Yield Stress [Mpa]	Tensile Stress [Mpa]	Elongation [%]	Specimens
SM490	355	507	29	series A and B

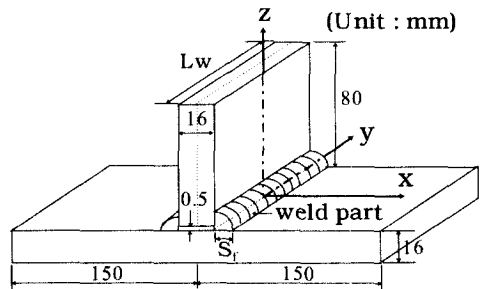


그림 1. 필렛 용접이음 (Series A 및 B)

표 1. 용접조건

Joint Type	Kind of Specimens	Parameter	No. of Specimens	Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/cm)
T-Type fillet weld	series A	heat input	I	1	270	29	45	10.4
			II	1	270	29	23	20.4
			III	1	270	29	15	31.3
	series B	weld layer	IV	1	270	29	14	33.6
			V	1	270	29	40	11.7
				2	270	29	43	10.9
3	270	29		44	10.7			

향을  $z$ 로 하였다. 이들 좌표축의 원점은 용접루트부, 즉 대칭면에서  $x$ 축으로 8mm 떨어진 위치를 가정하였다. 또한, 그림 1(a)에 보인, Series A와 B의 용접선 길이  $L_w$ 는 각각 200mm와 100mm 이다. 필렛용접은 등각용접을 기본으로 하고, Series A-I, II, III의 필렛 size  $S_f$ 는 각각 6mm, 8mm, 10mm정도이다. 또 해석에 이용한 필렛용접의 루트 갭(gap)은 실측으로 부터 0.5mm로 하였다.

### 3. 실험방법

모재두께 방향의 3차원적 잔류응력 분포를 측정하기 위해, 본 연구에서는 고유변형률을 매개체로 하는 절단법을 이용하였다<sup>(12)</sup>. 이 방법은, 새롭게 소성변형을 일으키지 않는 한 고유변형률의 분포와 크기는 불변이라고 하는 특성을 이용하고 있다. 따라서, 측정대상의 외표면 뿐만 아니라, 적당히 절단해 가면서 새롭게 외표면으로 되는 장소에서 탄성 변형률을 계측하고, 이것을 이용해서 고유변형률을 추정할 수가 있다. 그리고 추정한 고유 변형률을 무응력 상태의 측정대상에 대해 탄성해석 함으로써 잔류응력이 측정될 수 있다.

#### 3.1 Series A의 실험 (용접토우 단면)

용접잔류응력의 모재 두께 방향 분포를 측정하기 위해, 그림 2에 보이는 이완 변형률의 측정을 행한다. 우선, 모재 1의 상하면에서, 용접토우로부터 2mm 떨어진 위치에 단축 변형률 게이지를, 그 게이지로부터 5mm 위치에 집중 게이지를 그림처럼 부착한 후, 용접토우에서 부터 약 5cm의 위치를 잘라 내었다. 이 절단에 의해 부착한 변형률 게이지에서는 거의 변형률의 변화가 측정되어 지지 않았기 때문에 이 절단에 의한 잔류응력의 변화는 무시할 수 있다고 생각된다. 다음에 모재 두께 방향으로 두께 4mm로 그림과 같이 slice상으로 잘라내었다. 여기서, 잔류응력이 보다 더 이

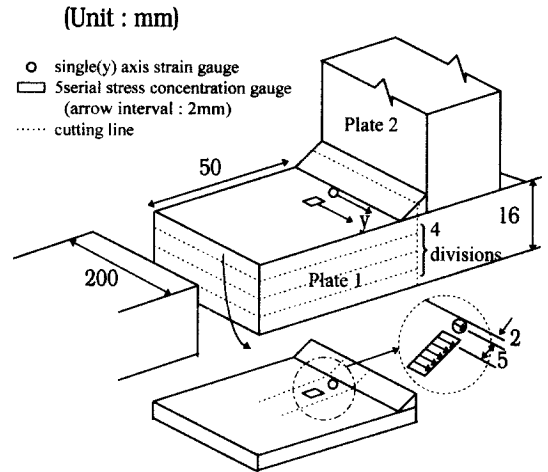


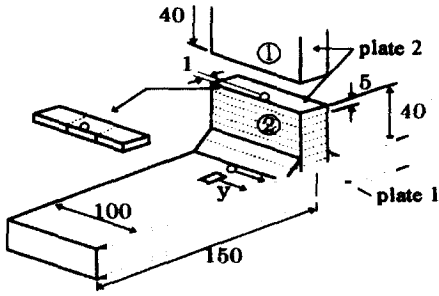
그림 2. Series A의 이완변형률의 측정

완될 수 있도록 하기 위해 slice 후, 잘라낸 면을 다시 빗살상모양으로 게이지 주변을 잘랐다. 또한, slice 절단 후 남은 부분은 다시 표면에 변형률게이지를 부착한 후 두께 4mm로 slice 절단하는 작업을 반복해서 모재 두께 방향 분포를 측정하였다. 그리고 절단할 때에는 절단에 의해 시험체가 고온으로 되지 않도록 가능한 한 천천히 절단을 하였다.

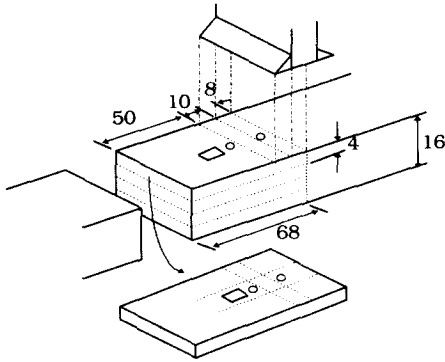
#### 3.2 Series B의 실험 (루트부 단면)

용접층수의 변화에 의해서 용접금속부, 특히 용접루트부에서 특징적인 잔류응력 변화가 예상된다. 따라서, 본 실험에서는 용접토우와 함께 루트부 근방의 잔류응력 측정을 행하였다. 기본적으로는 3.1절의 측정법과 같지만, 용접루트부의 직접 측정은 불가능하기 때문에 모재 2를 자른 후, 루트부에서 측정되어진 이완변형률을 보정해서 잔류응력을 구하였다.

그림 3에 그 측정법을 나타낸다. 모재 1의 용접토우 및 하표면의 잔류응력을 직접 계측하기 위해, Series B의 시험체의 토우 및 모재 1의 하표면에 변형률 게이지를 부착하였다. 그리고, 토우 단면의 측정 때와 같이, 절단에 의한 잔류응력의



(a) 모재 2의 측정



(b) 용접루트를 포함하는 모재 두께방향의 측정

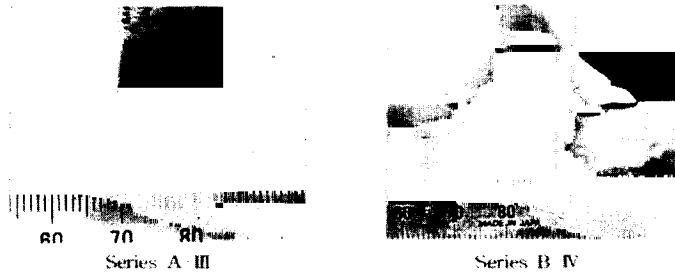
그림 3. Series B의 이완변형률의 측정

변화가 없는 모재 2의 ①에 해당하는 부분을 잘라내었다. 남아있는 ②의 새롭게 표면으로 된 부분에 변형률 게이지를 부착한 후 5mm 두께의 등간격으로 8분할하였다. 또한 잘라낸 slice에는 더 큰 응력이완을 위해 빗살상으로 게이지 주변을 잘랐다. 그리고 그림 3(b)에 나타나듯이 모재 2를 잘라낸 후 표면으로 된 모재 1의 용접루트부에 변형률 게이지를 부착하였다. 그 후는 그림 2와 같이 모재 1의 용접토우에서 5cm의 위치를 잘라내고, 용접루트부를 포함한 두께 4mm의 slice 상으로 반복절단하였다.

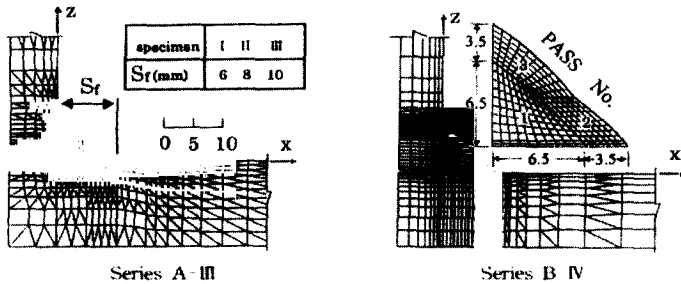
## 4. 해석 방법

### 4.1 모델 설정

본 연구에서는, 용접부에서 발생하는 잔류응력 분포를 해석하기 위해, 열탄소성유한요소프로그램인 SYSWELD<sup>(13)</sup>를 이용하였다. 그림 4에 나타나듯이, 실험에 이용한 시험체의 매크로시험 결과에 기초해서 2차원 해석모델을 설정하였다. 또 해



(a) 매크로 시험



(b) 2차원 해석모델 (1/2 모델)

그림 4. 해석모델의 설정

석에서는, 시험체가 좌우대칭이기 때문에 1/2 모델을 취급하고, 그림 4에 나타난 형태로 요소분할을 행하였다.

#### 4.2 재료 정수

용접이음부에 발생하는 잔류응력 분포는 모재와 용접금속의 재질의 영향을 받는다<sup>(14)</sup>. 그런데 일반적인 이음에서, 용접잔류응력에 미치는 영향은 모재쪽이 용접금속에 비해 훨씬 현저하다고 보고된 바 있다<sup>(15)</sup>. 그래서, 본 연구에서는 용접금속의 재료특성을 모재와 동일하다고 설정하였다. 여기에서, 재료는 SM490으로 하고 물리정수, 기계적 제정질의 온도 의존성을 그림 5에 나타낸다. 이들 재료정수의 각각의 값을 구하는 것은 극히 어려운 작업이기 때문에, 대상으로 한 강재와 유사한 재료의 특성<sup>(16)</sup>을 참고로 해서 결정하였다. 그림 5중의 (a), (b), (c)는 온도계산에서, 또 (d), (e)는 응력계산에서 각각 이용되어졌다.

강재는 용접에 의해서 특정 온도를 넘으면 상변태가 생기고, 그 재료특성도 불연속적으로 변화한다<sup>(17)</sup>. 따라서, 보다 충실히 용접현상을 분석하고 정확한 용접잔류응력 분포를 파악하기 위해서

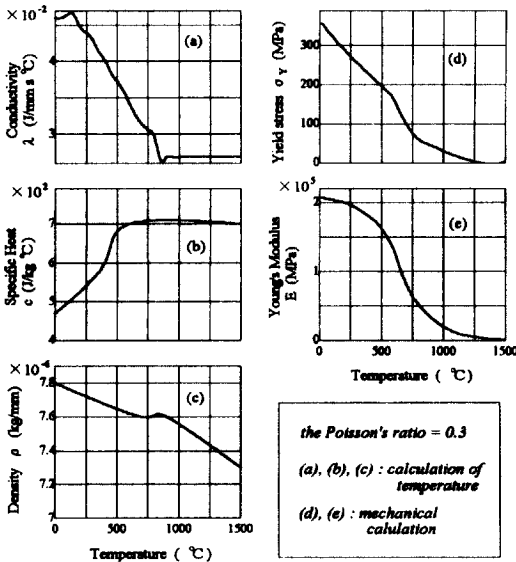


그림 5. 재료정수

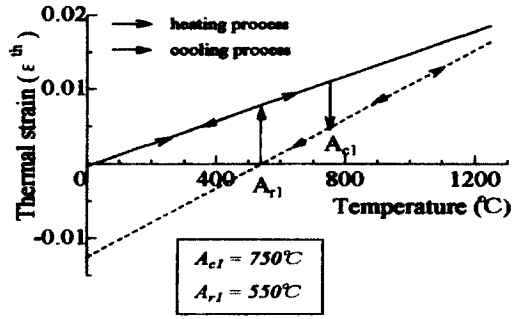


그림 6. 열이력에 의한 상변태거동

는 상변태의 영향을 고려할 필요가 있다. 상변태는 규정의 온도에서 일어나고, 상변태에 의해서 가열시는 압축이, 냉각시는 팽창이 순간적으로 일어난다고 생각된다<sup>(17)</sup>. 여기에서 강재의 열팽창 및 열수축 특성은 그림 6에 나타내는 온도-열변형률의 관계를 이용하였다. 이 그림은 Dexter 등의 연구<sup>(18)</sup>를 참고로 한 것이다.

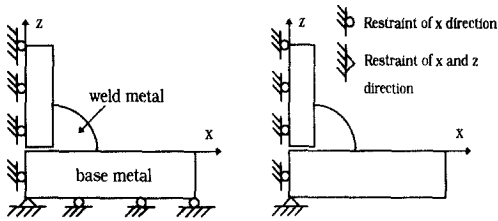
본 연구에서는, 상변태가 일어나는 온도를 연속냉각변형도(CCT Curve)<sup>(19)</sup>로부터, 온도상승과정에서의 오스테나이트 화(그림중의 Ac1) 온도를  $750^\circ\text{C}$ 로 하고, 냉각과정에서 배이나이트 화(그림중의 Ar1) 온도를  $550^\circ\text{C}$ 로 하였다. 여기에서 용접금속과 모재는 상변태온도 및 팽창률이 동일하다고 가정하였다.

#### 4.3 입열 조건

실제의 용접열원은 이동하지만, 해석에서는 대칭면의 좌우에 대해서 동시에 그것도 순간적으로 용접에 의한 열원이 용접금속부에 가해진다고 가정하였다. 또한, 용접시의 용착금속부의 최고 도달온도는  $1500^\circ\text{C}$ 로 가정하였다. 이에 따른 용접부재의 각 점에서의 온도변화가 용접 후의 경과시간에 대해서 계산된다.

#### 4.4 구속 조건

이음의 용접길이가 충분히 긴 경우, 중앙부분



(a) 가열과정 (b) 냉각과정

그림 7. 필렛이음의 구속조건

에 있는 각 횡단면은 용접 중이나 용접 후에도 평면을 유지한다고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 평면변형을 조건을 만족하는 단위장의 2차원 모델을 이용해서 수치해석을 행한다. Series A와 B의 시험체는 주변자유판이고, 용접부재에 대해서 어떠한 외적구속을 가하지 않지만, 본 해석에서는 해석이 불안정으로 되지 않도록 그림 7에 나타나는 구속조건을 가열과정과 냉각과정으로 나누어서 주고 있다. 실제의 용접시, 가열과정은 거의 변형이 일어나지 않고 냉각과정에서 각 변형 및 수축변형이 크게 발생한다<sup>(23)</sup>. 따라서 본 해석은, 가열과정에서는 대칭면의 구속조건 및 각 변형을 구속하는 조건 (a)를, 또 냉각과정에서는 대칭면 이외는 자유변형이 가능하도록 구속조건 (b)를 적용한다. 이때, 어느것도 횡수축은 구속하지 않는다.

#### 4.5 다층용접의 모델화

무응력 상태에 있는 부재에 용접하는 경우는 특히 문제는 없지만, 많은 용접패스를 취급하는 다층용접과 같이 이미 열응력을 발생시키고 있는 모재 및 앞 패스의 용착금속 위에 용접하는 경우에는, 각 패스의 상변태점 이상의 고온에 달하는 부분이 응력을 가지지 않기 때문에 다음과 같은 취급이 필요하다. 다층용접을 행한 필렛 용접이음에서는, 우선 전체의 용접층에 해당하는 요소분할을 행하고, 1 패스재의 용접을 행할 때에는, 2 패스재와 3 패스재 영역의 강성을 0으로, 또 온도

를 20℃로 유지하고 해석을 행한다. 또한 2 패스재를 용접할 때에는, 3 패스재에만 상술의 조건을 적용하는 방법으로 다층용접을 모델화하였다. 그리고 본 해석은 각 패스간 온도를 20℃로 하고, 각 패스의 용접 종료시에 존재하는 응력을 용접잔류응력으로 정의하였다.

### 5. 실험 및 해석 결과의 비교·검토

#### 5.1 온도분포의 계산

본 연구의 시험체에 대한 온도해석을 행한 결과의 일례를 그림 8에 보인다. 그림 8은 Series A-I의 시험체로써, 냉각이 시작한 순간의 온도분포를 등온도선으로 표시한 것이다.

본 연구에서의 해석의 타당성을 조사할 목적으로, 木原 등<sup>(19),(20)</sup>의 모재두께 20mm, 입열량 16300 J/cm의 저탄소강 피복용접봉을 사용한 모재상 비드(bead on plate)용접실험과 동일한 조건으로 해석을 하였다. 그림 9는 용접의 냉각과정의 일부에 대한 온도변화를 나타낸 것이다.

본 해석의 온도계산결과, 원점을 중심으로 하는 직경 12mm의 타원영역에서 온도가 순간적으로 1500℃로 된 후, 열영향부의 여러점의 온도 변화이다. 이 그림 9에서 부터 알 수 있듯이, 용융상태에서 수 초간에 500℃까지 냉각되고, 또 상변태의 대표적 온도인 800℃에서 부터 500℃까지 냉각되어지는 시간은 실험치와 해석치가 거의 일치하고 있다.

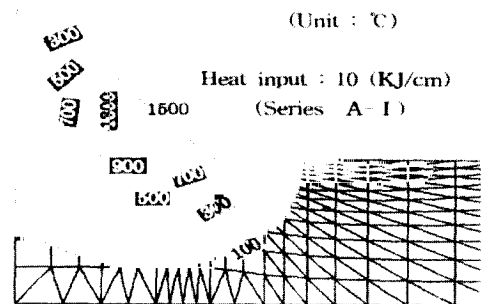


그림 8. 용접종료후 2초 경과했을때의 온도분포

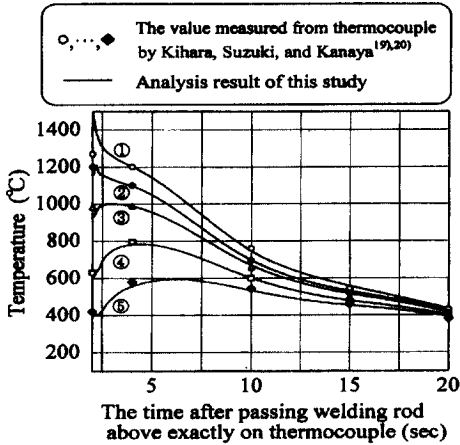
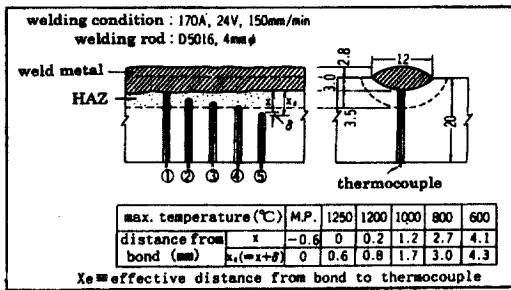
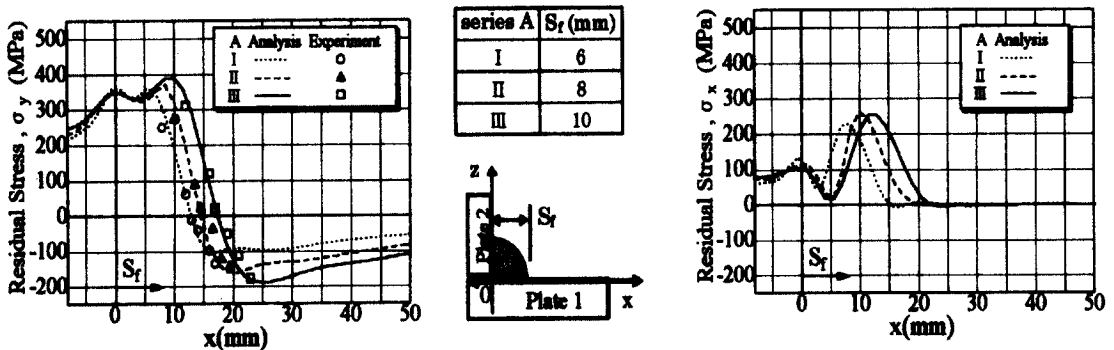


그림 9. 저탄소강의 용접열 Cycle (木原 등 (19)(20)의 실험과 본 해석결과와의 비교)

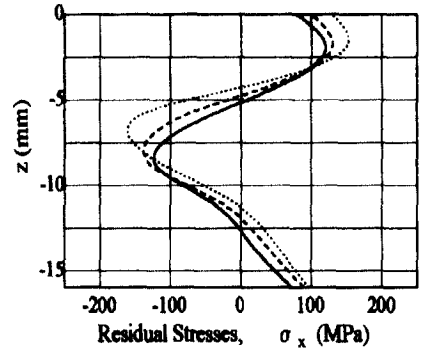
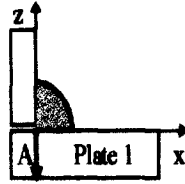
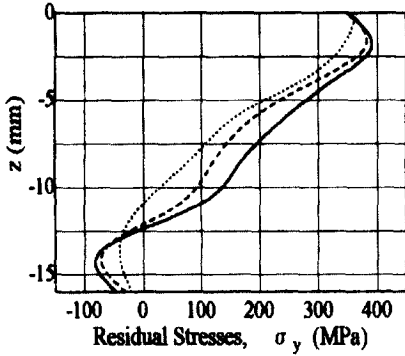
## 5.2 필렛 용접이음의 입열량 변화에 따른 잔류 응력 분포

그림 10과 그림 11에 Series A - I, II, III의 시험체를 대상으로 한 입열량 변화에 의한 단층 필렛 용접이음의 잔류응력 분포의 실험결과와 해석결과를 나타낸다. 이들 각 시험체의 입열량은 약 10, 20, 30 (KJ/cm)이다. 여기에서 그림 10은 용접선방향의 잔류응력 분포를, 그림 11은 용접선 직각방향의 잔류응력 분포를 각각 나타낸다. 본 실험은 용접선방향의 잔류응력에 주목하고, 그림 2에 보이듯이 모재 1의 표면과 용접토우에서부터 모재두께 방향으로의 잔류응력 측정만을 행하고 있기 때문에, 용접선 직각방향 및 루트부를 포함하는 모재두께 방향으로의 잔류응력 분포는 해석결과만을 나타냈다. 그림 10과 그림 11에 대해서, 용접토우에서부터 모재두께 방향의 잔류응력 분포는 토우에서  $x$ 방향으로 2mm 떨어진 위치 B에서의 실험과 해석결과이다.

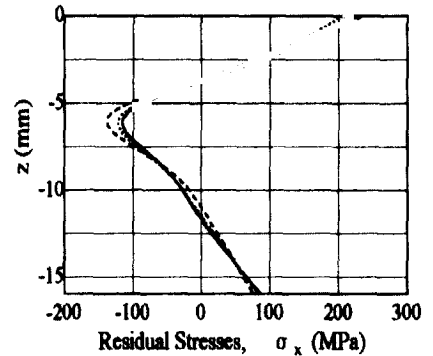
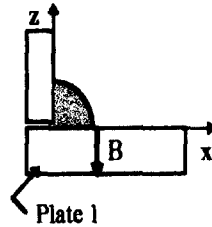
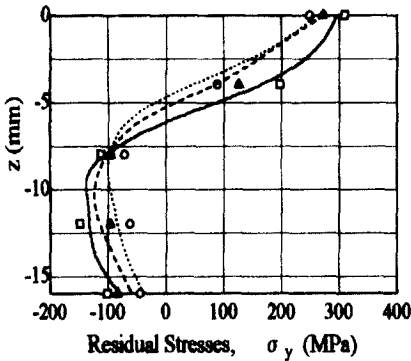
그림 10에서 부터, 실험치와 해석치가 잘 일치하고있는 것을 알 수 있다. 그림 10(a)의  $x$ 축에 따른 용접선 방향의 잔류응력 분포에서는, 모재 1의 표면의 용접부근, 특히 용접토우와 루트부에서 강재의 항복응력 정도의 높은 인장잔류응력이 생기고 있다. 이 값은 입열량의 변화에도 불구하고 거의 동일하지만, 입열량이 증가함에 따라 인장잔류응력이 발생하고 있는 영역은 넓어지는 것을 알 수 있다. 이것은 입열량의 증가에 따라서 비드폭이 넓어지기 때문이라고 생각된다.



(a)  $x$ 축(모재상표면)에 대한 분포



(b) A(용접루트를 포함하는 판두께 방향)에서의 분포



(c) B(용접토우를 포함하는 판두께 방향)에서의 분포

그림 10. 입열량의 변화에 의한 용접선직각 방향 잔류응력의 분포

그림 11. 입열량의 변화에 의한 용접선방향 잔류응력의 분포

또한 이러한 인장잔류응력에 평형을 취하기 위해 압축잔류응력의 크기도 커지고 있다.

그림 10(b) 및 (c)의 용접부 근방의 모재두께 내부 A와 B에서 용접선 방향의 잔류응력은, 모재 1의 상표면 부근에서 어떤 입열량의 용접에 대해서도 강재의 항복응력까지 도달하고, 그 인장잔류응력의 영역이 입열량의 증가에 따라 넓어지고 있는 것을 알 수 있다. 용접루트부를 포함하는 A에서의 분포가 용접토우 근방의 B보다 인장영역이 넓은 것은, 용접에 의해 모재 1의 중첩형 변형을 모재 2가 저항하고 있기 때문에 모재 2의 직하부에 있는 A부가 B부보다 상대적으로 변형이 작다.

바꿔 말하면, A부가 B부 보다 내부구속이 엄격하기 때문에 인장잔류응력이 넓게 존재하고 있다고 생각된다.

그림 11의 용접선 직각방향의 잔류응력 분포를 보면, 모재 1의 표면(x축)에서는, 용접토우에서 최대 잔류응력 값이 나타나고, 입열량의 증가에 따라 그 인장영역은 증가하지만 최대 잔류응력 값은 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또 모재두께 방향으로의 잔류응력 분포는 입열량의 변화에도 불구하고 잔류응력의 값은 거의 변화가 없고, 모재두께 중심부근이 압축으로 되는 분포를 보이고 있다.



### 5.3 필렛 용접이음의 용접층수의 변화에 의한 잔류응력 분포

그림 12는 다층 필렛 용접이음에서, 해석에 의한 온도분포를 나타내고 있다. 이 그림은 각 패스에서의 용접이 종료하고, 냉각이 시작한 순간의 온도분포이다. 이들 시험체는 표 1에 보인 Series B-V이고, 시험체의 총 입열량은 약 30 KJ/cm, 다층용접의 전체 패스 수는 3 패스이다.

본 해석에서는 미리 전체의 용접층에 대해서 요소분할을 행하고, 1 패스째의 용접시는 2 패스와 3 패스에 상당하는 요소가, 또 2 패스째의 용접시는 3 패스에 상당하는 요소가 실제로는 존재하지 않는 부분이기 때문에 실온(20°C)으로 설정하고 있다. 필렛이음의 다층용접에 의해서, 이미 용접을 행한 용접부분은 그 후의 용접에 의해서 복잡한 열이력을 받는다. 따라서, 1 패스째에서 이미 발생한 응력은 반복 열사이클에 의한 큰 변화가 예상된다.

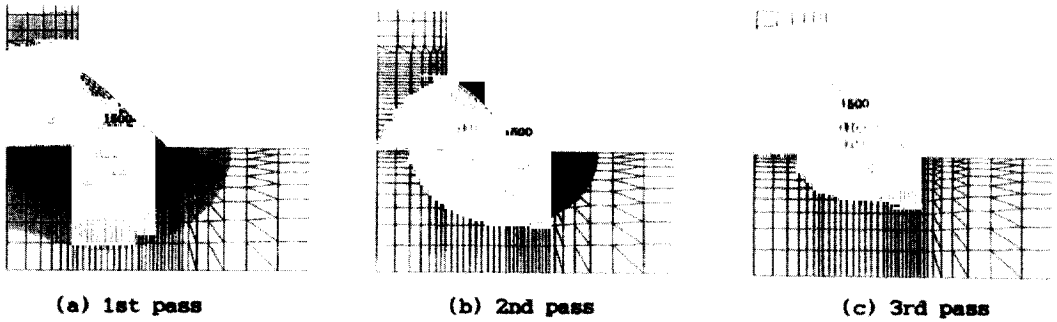
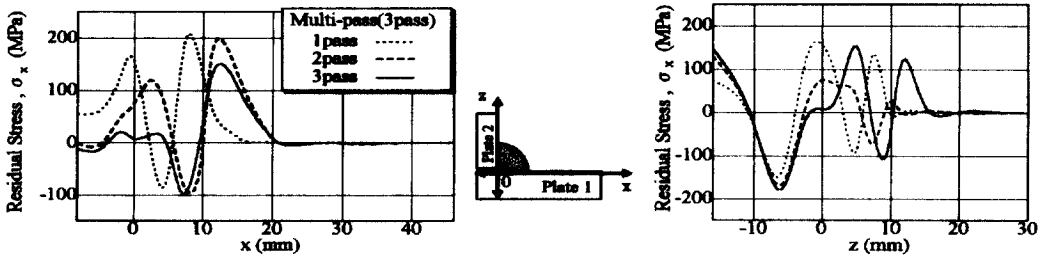
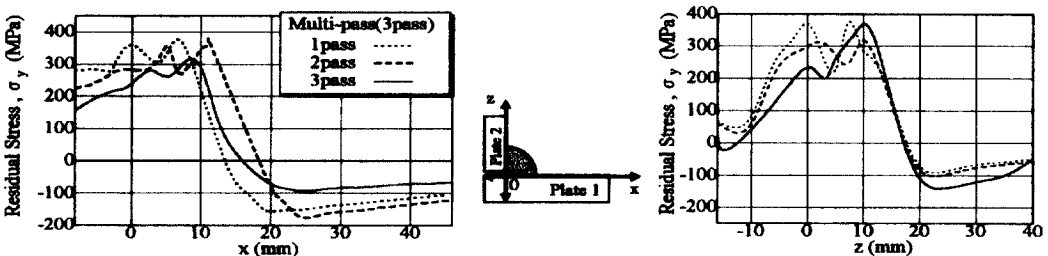


그림 12. 다층필렛용접 이음의 각 패스에 대한 온도 분포



(a) 용접선직각방향의 응력분포



(b) 용접선방향의 응력분포

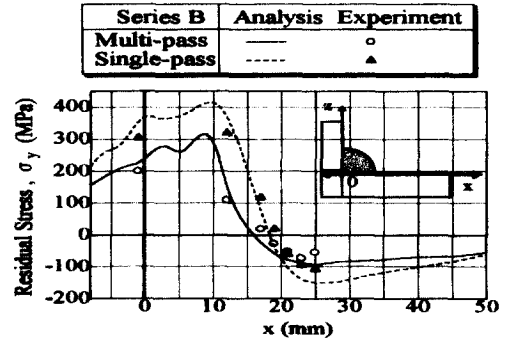
그림 13. 다층필렛용접이음부의 x축 및 y축에 대한 각 패스종료시 잔류응력분포 (해석결과)

그림 13은 Series B - V의 다층필렛 용접이음에 대한 각 패스 종료 후의 잔류응력 분포를 해석에 의해서 구한 것이다. 그림 13(a)는 용접선 직각방향, 동 그림 (b)는 용접선 방향의 잔류응력 분포를 각각  $x$ 축과  $z$ 축에 대해서 나타낸다. 이 그림으로부터, 이미 놓여진 용접부는 새로운 용접 패스에 의해서 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 12의 온도분포에서도 알 수 있듯이, 각 패스의 용착금속부는 금속의 용융온도까지 상승하고, 그 주변은  $500\sim 700^{\circ}\text{C}$ 에 달하는 높은 온도분포이다. 냉각중, 보다 저온의 영역에서는, 아직 고온인 부분에 비해서 빨리 강도를 회복하기 때문에 고온영역의 자유수축을 구속한다<sup>(21)</sup>. 반복 열사이클시, 용융온도까지 달하는 용착 금속부에서는 이전의 열이력과 무관개로 용접부의 수축에 의한 응력이 발생하고<sup>(22), (23)</sup>, 그 주변은 소성변형률에 의한 응력의 재분포가 일어난다고 생각한다. 이때 그림 13에서의 응력 재분포 경향은, 이미 열이력을 받은 소성영역에서 비교적 큰 응력감소 경향이 보인다. 이것은 1 패스째의 용접시는 용접루트가 용접부에 해당되고 용접부 수축에 의한 잔류응력이 발생하고 있지만, 2 패스와 3 패스째의 용접시는 용접루트가 용접부의 주변에 해당되어 온도가 비교적 낮고 강성을 회복하는 속도가 빠르다. 따라서, 대상용접부의 수축을 그 주변이 구속함에 의해서, 이전의 응력이 어느 정도 완화되어진 상태에서 부터 응력의 재분배가 일어났기 때문이다.

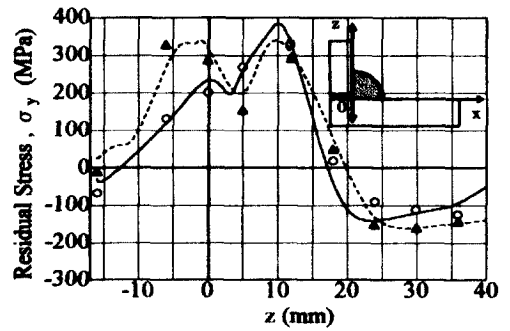
그림 14는 단층용접의 잔류응력과 3 패스 용접 후의 최종잔류응력분포를 비교한 것이다. 그림 14는 총 입열량이 약  $30\text{ KJ/cm}$ 인 Series B - IV, V의 시험체에 대한 실험과 해석의 결과이다. 그림 14(a)는 모재 1의 상면에서  $x$ 축에 대한 용접선 방향의 잔류응력 분포를, 동 그림(b)는 용접루트를 포함하는  $z$ 축에 대한 용접선 방향의 잔류응력 분포를, 동 그림(c)는 용접토우에서 부터  $2\text{mm}$  떨어진 위치에서 모재두께 방향(그림중의 A)으로 용접선 방향의 잔류응력 분포를 각각 나

타내고 있다.

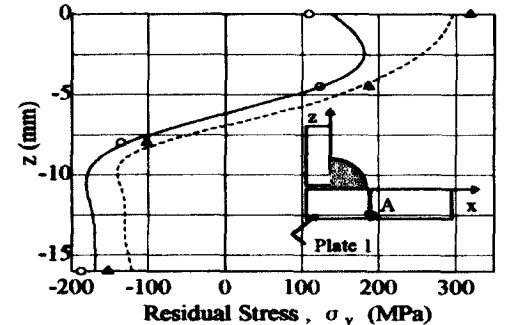
그림 14에서부터, 다층용접 쪽이 단층용접보다 용접루트부, 및 모재 1 축의 용접토우에서 잔류응력이 상당히 낮음을 알 수 있다. 또 그림 14(b)에서부터도 알 수 있듯이 모재 2축의 용접토우부



(a) 모재상면( $x$ 축)에 대한 분포



(b)  $z$ 축에서의 분포



(c) A에서의 분포

그림 14. 필렛용접이음의 총수변화에 의한 용접선방향의 잔류응력 분포

잔류응력은 단층용접의 경우와 같이 항복응력에 도달하는 상당히 큰 값으로 되어있다.

즉 다층용접에서는 최종층 부근에서 단층용접의 경우와 같이 높은 인장잔류응력이 생겨 있지만, 용접루트부나 모재 1층의 용접토우 등은 단층용접보다도 잔류응력이 상당히 낮게 되어 있고, 다층 용접을 행함에 의해 잔류응력의 저감 효과가 있는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

필렛 용접이음을 대상으로 해서 실험과 해석을 행한 결과, 용접입열량과 용접층수의 변화에 의한 용접잔류응력의 분포에 대해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 용접잔류응력의, 용접루트부 및 용접토우부를 포함하는 3차원 분포의 절단법에 의한 측정을 시도하였다. 측정결과는 해석결과와 매우 좋은 일치치를 보이고, 본 연구에서 이용한 방법에 의해 용접잔류응력의 3차원 분포를 정도 좋게 측정할 수 있다는 것을 알았다.

(2) 단층용접에서 입열량을 변화시킨 필렛 용접이음의 경우, 상당히 큰 인장잔류응력이 용접토우부와 용접루트부에서 발생하고, 그 크기는 입열량에 관계없이 모재의 항복응력 정도였다. 또, 인장잔류응력이 발생하고 있는 영역은, 모재 표면뿐 아니라 모재두께방향 분포를 보아도 입열량의 증가에 따라 넓어지는 것을 알 수 있었다. 그리고 모재두께내의 용접선 직각방향의 잔류응력은 모재 중심부 근방이 압축이고, 모재의 상하표면으로 갈수록 인장잔류응력이 커지는 경향이 있었다.

(3) 동일의 총 입열량으로 단층용접, 및 다층용접을 행한 필렛 용접이음의 용접잔류응력을 비교한 결과, 다층용접을 행함에 의해 용접루트부의 잔류응력을 크게 감소시킬 수 있음을 알았다. 또 용접부 근방의 인장잔류응력의 영역도 다층용접 쪽이 작아진다는 것을 알 수 있었다. 그런데, 최대잔류응력은 최종 용접층의 토우부 및 최종 용접

층의 루트부에서 생기고, 그 값은, 단층용접의 경우와 동일하게 항복응력 정도까지 도달해 있었다. 한편, 그 반대측의 용접토우부에서의 잔류응력은, 최종 용접에 의해 크게 감소해 있었고, 이에 따라 다층용접의 순서가 용접잔류응력분포에 대해서 큰 영향이 있다고 생각된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 太田省三郎, 石塚桂太 : 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労におけるルト破壊の防止, 日本溶接學會論文集, No. 14-4(1996), pp. 773~780.
- (2) Yamada, K. and Hirt, M.A. : Fatigue crack propagation from fillet weld toes, ASCE, Vol. 108, No. ST7, 1982.
- (3) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治 : 初層すみ肉溶接における残留応力と割れの形態について, 日本溶接學會誌, No. 44-3(1975), pp. 250~257.
- (4) 館石和雄, 慶 甲秀, 町田文孝, 三木千壽 : 高張力すみ肉溶接継手部の疲労強度の溶接材料依存性, 土木學會論文集, No. 543/I-36, pp. 133-140, 1996. 7.
- (5) 佐藤邦彦, 上田幸雄, 藤本二男 : 溶接変形・残留応力, 産報出版 (1979).
- (6) 松岡一祥, 高橋一比古, 飯高洪男 : 荷重非伝達溶接継手の疲労強度に及ぼす残留応力の影響, 溶接學會論文集, No. 9-1 (1991).
- (7) 高橋一比古 : 海洋構造物用溶接継手の疲労強度に及ぼす残留応力の影響, 船舶研究發表會, No. 55 (1990), 57 (1991), 第1~3報.
- (8) Huber, A.W. and L.S. Beedle : Residual stress and the compressive strength of steel, The welding journal, Vol.33, No. 12, Research supplement, pp. 589-s~614-s, 1954. 12.
- (9) 長谷川彰夫, 長振正孝, 西野文雄 : 壓縮を受ける補強された板の座屈強度, 土木學會論文報告集, No. 236, pp. 1-14, 1975. 4.
- (10) 小松定夫, 北田俊行, 宮崎清司 : 残留応力及び初期たわみを有する壓縮板の弾塑性解析, 土木學會論文報告集, No. 244, pp. 1-14,

1975. 12.
- (11) 近藤明雅, 日浦隆文, 菊池 洋 : 溶接I形斷面部材の残留応力の推定に關する研究, 土木學會論文報告集, No.288, pp. 1-11, 1979. 8.
- (12) 上田幸雄, 中長啓治 : 溶接残留応力の解析と測定の方法論, 溶接學會誌, No. 55-8 (1986), pp. 458-465.
- (13) SYSWELD, Users manual, Version 231, Framasoft+CSI, 1990.
- (14) 寺崎俊夫, 平居孝之, 瀬尾健二 : 残留応力に及ぼす材料定數, 試験体寸法の影響, 溶接學會論文集, No. 6-2 (1988), pp. 284-288.
- (15) 上田幸雄, 金 裕哲 : 相變態の力學的取扱いと拘束応力・拘束ひずみの解析的計算法, 溶接學會論文集, No.2-1 (1984), pp. 89-97.
- (16) 上田幸雄, 高橋英司, 福田敬二, 中長啓治 : 極厚板の多層突合せ溶接における過渡及び残留応力, 溶接學會誌, No. 44-6(1975), pp. 466-474.
- (17) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫 : 溶接残留応力・溶接變形に及ぼす相變態の影響, 溶接學會誌, No. 45-7 (1976), pp. 560-566.
- (18) R.J. Dexter and C.P. Leung : Residual stress analysis in reactor pressure vessel attachments, EPRI Interim Report, C102-3, December 1991.
- (19) 鈴木春義, 田村 博 : 溶接金屬學, 産報出版社 (1978).
- (20) 木原 博, 鈴木春義, 金谷文善 : 鋼の溶接硬化に關する研究(第1報), -冷却速度の測定-, 溶接學會誌, No. 26-2 (1957).
- (21) K. Satoh, Y. Ueda, H. Kihara : Recent trend of researches on restraint stresses and strains for weld cracking, IIWDoc. IX-788-72, X-659-72.
- (22) 豊貞雅宏, 後藤浩二, 山口喜久次, 中島 到, 松岡一祥 : 溶接順序の影響を考慮した溶接構造物の残留応力分布及び疲労壽命推定法について, 日本造船研究會 第255部會, 研究報告書 (1997).
- (23) 渡辺正紀, 佐藤邦彦 : 溶接力學とその応用, 朝倉書店 (1971).

(접수일자 : 1998년 10월 28일)