

유한요소법을 이용한 필릿용접 이음부의 잔류응력분포

Residual Stress Distribution on the Fillet Weldment used by Finite Element Method

김 현 성¹⁾ · 우 상 익²⁾ · 정 경 섭³⁾
Kim, Hyun Sung · Woo, Sang Ik · Jung, Kyoung Sup

요 약 : 본 연구는 유한요소법을 이용해서 시간이력 열전도해석과 열탄성해석을 통해 필릿용접 이음부에서의 잔류응력분포를 측정하였다. 필릿용접은 1패스 용접이며, 경계조건으로는 표면유속조건과 온도에 의존하는 재료의 특성치를 고려하여 잔류응력을 평가하였다. 여기서, 용접입열량을 변수로 하였다. 그리고, 열탄성해석에 의해 잔류응력 평가할 때 중요한 문제로 언급되고 있는 cut-off 온도 설정에 대해 조사하였다.

또한, 시험체에서 구멍뚫기 방법에 의해 잔류응력분포를 측정하여 유한요소법에 의한 잔류응력분포와 비교하였다. 그 결과, 용접부에서는 재료의 항복강도 수준에 해당하는 인장잔류응력이 측정되었으며, 유한요소해석에 의한 수치해석 결과는 구멍뚫기 방법에 의한 측정치 및 다른 연구자의 측정치와 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 그리고, Cut-off 온도는 재료의 항복강도가 나타나는 온도로 설정하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

ABSTRACT : A transient heat transfer analysis and thermo-elastic analysis have been performed for the residual stress distribution on the fillet weldment used by finite element method. Specimen is fabricated single-pass fillet welding. This computation was performed for conditions including surface heat flux and temperature dependent thermo-physical properties using by heat input as parameter. Also, cut-off temperature of residual stress estimation by thermo-elastic analysis is determined. The fillet weldment were measured to determined their residual stress distributions for using hole-drilling method. As result, it was found that large tensile residual stress is about material yield strength, and the numerical simulation results for finite element method similar to residual stresses by hole-drilling method and other exiting research. Also, cut-off temperature is effectively determined by temperature which calculated maximum thermal stress equal to material yield strength.

핵심용어 : 필릿용접, 잔류응력, 구멍뚫기방법, 열전도해석, 열탄성해석, cut-off 온도
KEYWORDS : fillet weld, residual stress, hole drilling method, heat transfer analysis, thermo-elastic analysis, cut-off temperature

1) (주)형제건설 부설 기술연구소 연구원
2) 충북대학교 건설기술연구소 전임 연구원
3) 충북대학교 공과대학 구조시스템공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내에서 부가가치가 높은 강구조물 제작의 증가로 용접에 의한 접합이 중요한 위치를 차지하고 있다. 하지만 용접이음에서 잔류응력은 항상 존재하는 것으로 때로는 재료의 항복점을 초과하는 값에 이르는 것도 있어 정적강도 및 취성파괴, 피로강도, 좌굴 등에 영향을 미치고 있다.

이렇듯 용접잔류응력의 크기와 분포는 중요시되고 있지만 아직까지 그 발생과정이 복잡하기 때문에 정량적으로 명백하게 측정되고 있지 않다. 하지만 잔류응력은 용접부의 피로와 파괴에 끼치는 영향을 평가하기 위해서는 우선 잔류응력의 분포를 파악하는 문제가 선결되어야 한다¹⁾.

따라서, 본 연구는 일반적인 용접구조물 중 하나인 필렛용접이음을 대상으로 삼아 이들의 잔류응력분포를 측정하고자, 가장 일반적으로 사용되는 ASTM²⁾의 3축 로켓 스트레인게이지를 이용한 구멍뚫기 방법을 사용하였다.

또한, 최근 컴퓨터의 발달로 인하여 실험적 방법이 아닌 수치적 해석에 의해 적은 노력으로 용접에 있어서 잔류응력 분포를 평가하려는 연구가 시도되어 왔기 때문에, 본 연구에서도 최근에 수행된 연구¹⁾와 마찬가지로 온도에 따라 변하는 재료의 물성치를 고려하여, 시간이력 열전도 해석(transient heat transfer analysis)을 수행함으로써 각 time step의 온도분포를 구한 다음, 준정상상태(quasi-stationary state)의 온도분포에서 열탄성해석(thermo-elastic analysis)을 수행해 용접잔류응력을 모세두께와 길이방향분포를 파악하는 것을 목적으로 했으며, 용접입열량을 변수로 하여 검토했다.

즉, 범용구조해석 프로그램인 NISA의 열전도 해석 모듈인 HEAT II를 이용해서 연구대상인 필렛용접된 대형의 조립부재에서의 온도분포를 평가한 후 선형/비선형 정적해석모듈인 NISA II를 사용하여 잔류응력을 평가하였다.

한편, 이러한 수치해석적 연구는 많은 연구자

들에 의해 수행되었는데 용접을 실시하는 동안 재료는 비등점(boiling point)이상의 온도까지 도달하고 있으며, 이들 비등점 이상의 고온에서는 재료의 역학적 강성이 존재하지 않으므로 잔류응력 계산에서 이들의 영향은 없게 된다. 일반적인 연강에서는 탄성계수가 600℃이상인 경우 급속하게 감소하므로 600℃이상에서의 잔류응력은 매우 작게 된다. 따라서, 고온의 온도는 Cut-off 까지 감소시켜 잔류응력을 계산해야 한다³⁾.

따라서, Tekriwal과 Mazumder³⁾는 Cut-off 온도를 600, 700, 900, 1482℃로 설정한 후 이들의 영향을 평가하였다. 그 결과 용접선과 수직방향의 응력은 600℃과 700℃에서는 별다른 차이가 없고, 900℃ 인 경우에는 melt-pool 영역에서는 현저한 차이를 보였으며, 용융점 온도인 1482℃ 경우 melt-pool 영역에서는 약 15%정도 낮게 평가되고 있었다. 그러나, melt-pool 영역이후에서는 별다른 차이를 보이지 않는 것으로 조사되었다.

Rybicki³⁾는 2 패스 맞대기용접된 파이프의 잔류응력을 계산하였는데, 이동열원에 대해 용접재가 1150℃까지 냉각된 온도이력상태에서 응력계산을 실시하였다. 또한, Arnold 등⁴⁾은 박판의 bead-on-plate 시험편과 pipe-on-plate 시험편의 잔류응력을 계산하였는데, Cut-off 온도를 900℃로 선택하였다. 그리고, 방한서⁵⁾는 후판 용접부에 대해 3차원 열탄소성 해석을 실시했는데, 역학적 강성회복온도를 700℃라 설정하였다.

그러나, 이러한 연구들에서도 Cut-off의 온도 설정의 명확한 기준이 제시되고 않고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구는 잔류응력 평가를 열탄소성 해석시 잔류응력을 평가하기 위한 효과적인 Cut-off 온도 설정 방법을 제안하고자 한다.

2. 구멍뚫기 방법에 의한 잔류응력 평가

잔류응력의 정량적 평가기법 중 신뢰성이 비교적 높은 구멍뚫기 방법은 잔류응력이 존재하는 부

재에 원형 구멍을 천공하면 주변의 변형 구속이 해제된다는 사실에 근거한 것으로, 응력형태의 변화없이 잔류응력의 측정치가 된다.

본 연구에서는 압축플랜지 단면에 잔류응력 측정용 스트레인 게이지를 부착한 다음 정적하중 상태에서 게이지 중앙에 구멍을 천공하여 천공시 이완응력을 측정하는 ASTM E-837의 추천 방법을 적용하였다.

구멍뚫기 방법에 의한 잔류응력의 측정은 천공에 의해 잔류응력을 이완시킬 때 원형 구멍주위에서의 스트레인 변화량을 계측하는 것이기 때문에, 다른 요인에 의한 스트레인의 변화를 최소화하여야 한다. 하지만 본 연구에서는 마그네틱 베이스가 부착된 드릴링 머신을 사용하여 시험체에 위치를 고정시킨 다음 원형 구멍을 천공하였다. 따라서, 문헌⁶⁾에 의하면 40μ 정도의 결보기 스트레인이 발생하게 된다. 천공 구멍의 직경은 ASTM에서 추천하는 잔류응력 측정용 스트레인 게이지의 천공내경(D_0)과 각 스트레인 게이지의 중앙점까지 달하는 직경(D)의 비가 0.3~0.5 범위내에 들도록 추천하고 있는 바, 직경비를 0.42로 하여 천공 직경을 4.3mm로 결정하였다.

시험체의 형상과 부착된 스트레인 게이지의 위치는 그림 1, 그림 2와 같다.

보 시험체의 압축플랜지에 대한 잔류응력 분포

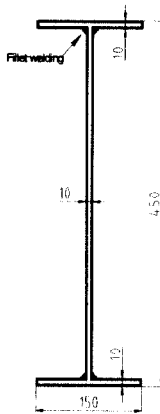


그림 1. 대상 시험체의 형상

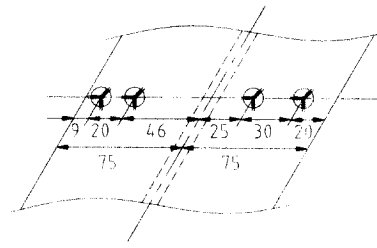


그림 2. 잔류응력측정을 위한 게이지의 위치

를 측정하기 위하여 플랜지 중심점으로부터 각각 66, 46, 25, 55mm에 스트레인 게이지를 부착하였다. 재하된 하중의 크기는 인장부와 압축 플랜지부에서 발생된 응력이 탄성범위를 벗어나지 않도록 재하하였고 재하전과 재하후의 초기 캘리브레이션후에 구멍을 천공하면서 이완응력을 측정하였다.

측정한 용접잔류응력을 그림 3에 나타내고 Keating⁷⁾의 연구와 비교한 결과, 본 연구의 구멍뚫기 방법은 용접비드와 게이지의 크기 때문에 플랜지와 웨브의 이음 중심선에서 25mm 이상 떨어진 지점에서부터 측정이 가능했으며, 인장잔류응력부에서는 $1.0\sigma_y$ 정도의 잔류응력이 측정되었으며, 압축잔류응력부에서는 약 $0.5\sigma_y$ 정도의 잔류응력이 존재하는 것으로 평가되었다. 잔류응력의 분포 형태는 용접단부를 벗어나면서 급격히 감소하여 용접단부로부터 약 35~55mm 정도 떨어진 위치에서 최대 압축응력이 존재하는 것으로 나타났다.

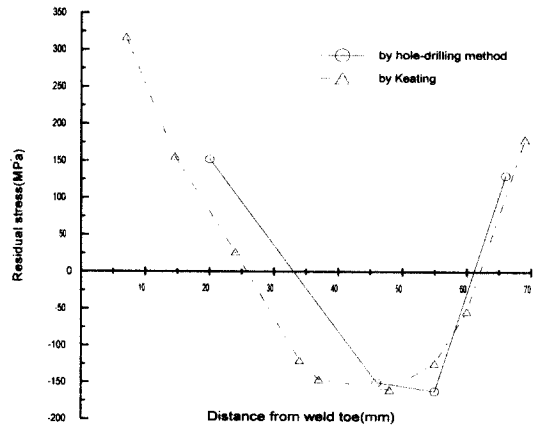


그림 3. 압축플랜지의 잔류응력분포

3. 열전도(Heat Transfer) 해석

3.1 해석모델

본 연구에서 사용한 구조해석 프로그램인 NISA에서 해석 가능한 열전도 해석은 정상상태 해석(steady state heat transfer analysis, SHEAT)와 물성치와 경계조건이 시간에 따라 변하는 시간이력해석(transient heat transfer analysis, THEAT)의 해석이 있지만, 본 연구에서는 THEAT해석인 비선형해석을 실시하여 반복 계산(Iteration)을 통한 온도분포를 구했으며 결과의 증감도는 열량의 증감(heat flux tolerance)으로 제어했다. 또한 NISA의 열전달 해석에서 가능한 경계조건은 열유속(heat flux)조건, 대류조건, 복사조건, 복사면조건, heat generation, 온도조건 등이 있으나⁸⁾, 본 연구에서는 열유속조건인 분포열 유속형태로 요소면에 부여하여 온도분포를 구하였다.

다만, 온도가 1727°C(2000°F)을 초과하면 복사가 지배적인 현상으로 나타나게 되지만 본 연구에서는 대류와 복사를 고려하지 않았다. 그리고, 최근의 연구에서는 상태변화(phase transformation)를 고려하고 있으나⁹⁾ 본 연구에는 이러한 상태변화를 고려하지 않았다.

또한, 모재와 용접재는 물리적, 기계적 성질이 동일한 재료라 가정하여 값을 입력하였다. 해석을 위해 대형의 필렛용접 부재는 용접선 방향으로 일정한 구간(10cm)을 샘플링하여 Yukio Ueda 등¹⁰⁾에 의해 연구되었던 것처럼 단면의 1/4 모델링을 통해 온도 및 응력해석을 수행했다. 그리고, 본 연구에서는 온도해석과 열응력을 해석할 때는 동일한 요소분할 모델을 사용했으며, 이들 모델에서의 가정은 다음과 같다.

- 1) 초기형태에서의 용접부와 모재부의 초기온도는 25°C이다.
- 2) 재료는 등방성체이다.
- 3) 용접재와 모재의 물리적, 기계적인 성질은 동일하다.

한편, 열전도해석에서는 3절점의 삼각형의 요소가 주로 사용되나 응력계산에서는 4각형 요소가 좀더 보편적으로 사용되고 있다. 따라서, 대상 필렛용접이음에서 모재의 경우에는 HEX 요소(hexagonal solid element)로 분할했으며, 필렛용접 이음의 각장 길이가 6mm이며, WED 요소(wedge shaped solid model)로 분할하였다. 이 경우 절점은 1848개, 요소는 1120개이며 용접선 부근의 경우는 온도의 변화가 심할 것으로 예상되므로 요소를 좀더 세밀하게 분할하였다.

또한, 실제의 용접열원은 이동을 하지만, 본 연구의 입열조건은 중심선에서 상하좌우로 대칭인 1/4모델에, Ramp Heat Input Model¹¹⁾을 적용하였다. 아래의 그림 4는 해석에 이용된 모델을 예시하고 있다.

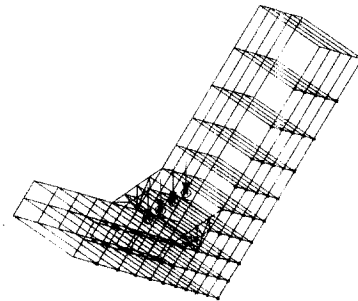


그림 4. 열전도해석의 모델

3.2 재료상수

여기에서 재료는 SM 490B이며, 표 1, 2, 3에 나타난 이들의 온도에 의존하는 물리상수와 기

표 1. 열전도계수

T(°C)	K(W/m°C)
0	74.00
227	65.31
727	52.25
1227	36.92
1677	31.35
1727	60.00
1727이상	860.00

표 2. 비열

T(°C)	C(J/kg°C)
0	320
227	502
477	668.8
477이상	668.8

표 3. 물리 상수 및 기계적 상수

Modulus of Elasticity E(MPa)	Poisson's ratio ν	coefficient of thermal expansion $\alpha (\times 10^{-6})$	density ρ (kg/m ³)
205000	0.3	11.9	7870

계상수 및 제 성질은 유사한 강재의 재료특성을 이용하여 해석에 적용시켰다¹⁾.

3.3 입열조건

용접의 입열을 균일하게 분포된 표면열원으로 가정하여 용접조건에 따른 입열량을 아래의 표 4에 나타내었다.

표 4. 용접조건에 따른 용접입열량

전류 (A)	전압 (V)	용접속도 (cm/min)	Surface* flux (J/mm ² -sec)	아크 효율 (%)	기호
28	450	30~40	11,872,800	80	Q ₁
27	415	30~40	10,558,304	80	Q ₂
26	380	30~40	9,309,780	80	Q ₃

* 식 (1)에 의해 계산된 surface flux

$$\text{Surface flux}^{11)} : Q = \frac{\eta EI}{bL} \quad (1)$$

여기서, b = 비드의 폭

L = 용접방향으로의 입열면적의 길이

E = 아크볼트(V)

I = 아크전류(A)

η = 아크효율

4. 온도분포

1 패스 필렛용접으로 제작된 대형의 필렛용접 조립부재를 용접선 방향으로 10cm의 구간을 샘플링하고 표 4에 제시된 Surface flux를 변수로 하여 온도분포를 해석하였다. 그리고, 모재와 용접부의 초기온도는 25°C라 하였으며 용접속도를 30cm/min이라 했을 때 해석모델의 용접길이인 10cm를 통과하는 시간인 20초 동안 Surface flux를 적용한 다음, 각 절점에서 시간의 경과에 따른 온도변화 과정을 해석하였다.

그림 5은 Q₁을 적용할 경우 용접직후의 온도분포를 보이고 있으며, 그림 6은 용접 후 128초 후의 온도분포를 보이고 있다. 용접부에서 최대온도가 국부적으로는 2936°C에 도달했으며 온도가 용접부 근처에서만 존재하는 것으로 보아 아직까지는 용접부의 열원이 부재의 전영역에 영향을 미치지 못함을 알 수가 있고, 128초 후에는 525°C까지 하강함을 알 수가 있다. 한편, Q₂를 적용할 때는 최대 2581°C, Q₃인 경우는 최대 2257°C까지 상승하였으며, 서로 유사한 경향을 보이고 있었다.

또한, 문헌¹²⁾에서 용접변형량을 산정할 때 용접열의 일부가 웨브를 통해서 달아나기 때문에 플랜지의 입열량은 실제 입열량의 2/3정도를 고려

그림 5. 용접직후의 온도분포(Q₁)

1051은 X방향으로 0.8, 1.1, 1.42, 1.81, 2.27, 2.81, 3.41cm(용접원점으로부터 0.3, 0.6, 0.92, 1.31, 1.77, 2.31, 2.91cm) 떨어진 곳이다. 마찬가지로 Q₂, Q₃의 경우에도 각각의 절점 온도에서 약간의 차이를 보이고 있을 뿐, 유사한 경향을 보이고 있다.

냉각초기에 있어 절점 111의 용접부에서는 급격한 냉각이 이루어지나, 절점 1047에서는 어느 정도의 시간의 지나면 온도는 서서히 증가한 후 감소하여, 좀더 거리가 떨어진 곳에서는 초기온도 정도를 유지하여 온도의 변화가 적음을 알 수가 있다. 이는 용접부에서는 급격한 온도하강이 이루어지나, 어느 정도의 시간이 경과된 후에는 높은 열온에서 전도되는 열량과 주위로 전도되는 열량과 비슷하게 되어 완만한 온도구배를 보이고 있는 것으로 판단된다. 그리고 용접부와 멀리 떨어진 곳에서의 온도변화는 초기에 전달되는 열량이 작기 때문에 온도구배의 변화가 거의 없는 것으로 생각된다.

그림 6. 용접 후 128초일 때의 온도분포(Q₁)

하고 있음을 밝히고 있는데, 본 연구에서도 플랜지 뿐만 아니라 웨브를 통해서도 상당한 열전달이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

그림 7은 Q₁의 경우 플랜지의 안쪽 면에서의 시간의 따른 온도변화를 나타내고 있다. 여기서 절점번호 111은 원점에서 X방향으로 0.5cm(플랜지와 웨브가 교차하는 점) 떨어진 위치이며, 절점 112, 113, 1047, 1048, 1049, 1050,

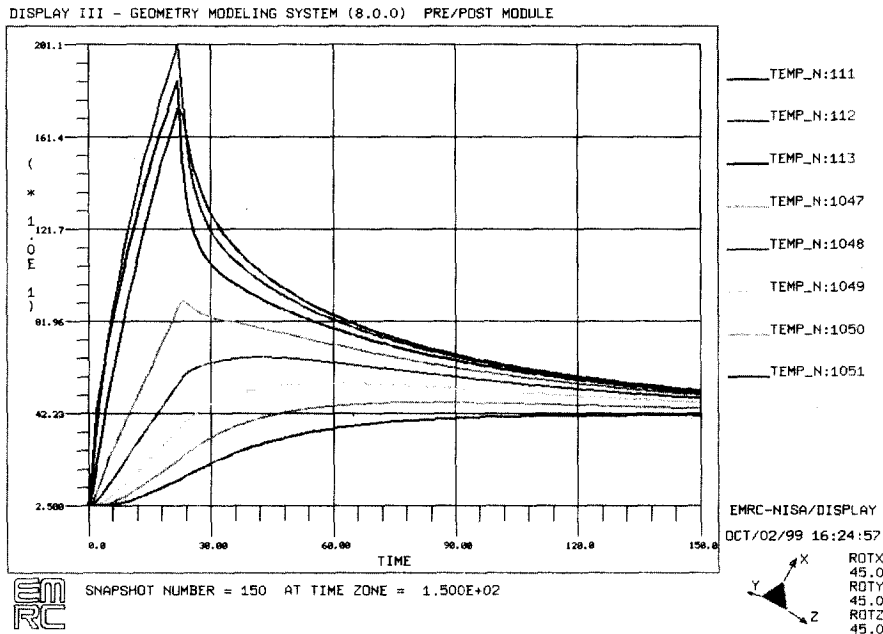


그림 7. 온도사이클(Q₁)

한편, 모노그래프¹³⁾로 800~500℃사이의 냉각시간을 쉽게 추정할 수 있는데, 15,000~25,000 J/cm의 입열량을 갖는 서브머지드 아크 용접(SAW)된 필렛용접의 경우 800℃~500℃사이의 냉각시간은 30~60초 정도이다. 그러나, 본 연구의 800℃~500℃ 냉각시간을 살펴보면, 열영향부인 Node 113에서 의 경우에는 약 60초 정도, Q₂의 경우 약 50초 정도, Q₃ 경우 약 40초 정도로 나타나 모노그래프에서 추정된 값보다는 약간 크게 평가되고 있는데, 그 원인은 유한요소해석시 대류현상과 복사조건을 고려하지 않았던 것에 기인한다고 생각되어진다.

5. 잔류응력의 평가

용접잔류응력은 열전도해석에 의해 구한 온도 분포를 하중으로 하여 정적해석을 실시하여 평가하였다. 열응력 해석의 기본적인 접근 방법은 전체의 구조물에 대한 최대온도를 $t=0$ 에서 최대온도가 미리 명시한 Cut-off 값까지 하강했을 때까지 컴파일 하는 것이다. 이 Cut-off의 온도는 재료 특성치에 의존되는 값이나 일반적으로 용융점(melting point) 이하로 주어지고 있다. 즉, 용융된 금속에서 탄성체로서 응력을 지탱할 수 없기 때문에 구조적 모델에서 용융점 이상의 온도들은 필요가 없다. 오히려, 절점에서는 Cut-off 온도로 유지되며, Cut-off 이상의 온도는 무시되고 있다⁴⁾.

본 연구에서는 열응력 계산시 열전도 해석과 동일한 요소망을 사용했고, 절점들에서의 최대온도가 Cut-off 온도 이하로 하강된 상태의 온도이력에서 평가하였다.

아래의 그림 8은 Cut-off 온도를 600, 700, 800, 900℃로 설정할 경우 발생하는 최대온도를 나타내고 있다. 여기서 surface flux가 큰 Q₁의 경우가 각각의 단계에서 가장 작은 값을 나타내고 있는데, 이는 입열량이 많아질 경우 상대적으로 온도까지 높게 상승한 후 Cut-off 온도까지 하강할 때 입열량이 작을 때보다 많은 시간이 경과해

야 한다. 이때의 온도구배는 상대적으로 작기 때문에 이러한 현상이 나타났다.

또한, 냉각 개시후 32초가 경과한 시점에서의 최대온도와 최대응력을 아래의 표 5에 나타내었다. 이런 경우에는 입열량이 큰 Q₁이 열전도가 상대적으로 덜 진행되어 온도구배가 크기 때문에 온도와 응력이 높게 나타났다. 그러므로, 입열조건에 따라서 동일한 냉각시간 및 온도에서의 온도구배가 다르게 나타남을 확인 할 수 있었다.

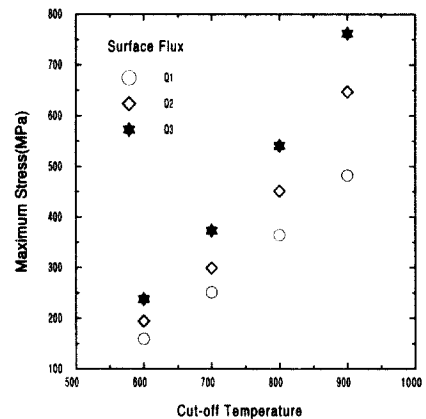


그림 8. Cut-off온도에 따른 최대 응력

표 5. 냉각개시 32초 후의 최대 온도와 최대응력

	최대온도(℃)	최대응력(MPa)
Q ₁	922	507
Q ₂	809	428
Q ₃	700	356

결국 열영향부에서의 최대 인장잔류응력이 강재의 항복응력 수준에 이르고, 온도구배가 응력을 유발시키기 때문에, 본 연구에서는 입열양이 다른 Q₁, Q₂, Q₃의 경우에 동일한 Cut-off 온도를 적용시키는 것은 문제가 있다고 판단되어 열영향부에서의 잔류응력이 항복응력보다 작게 나타날 때를 Cut-off 온도로 설정하였다. 즉, 계산된 응력값이 항복응력(310 MPa)보다 작을 때까지 반복계산을 실시하였다. 따라서, Q₁의 Cut-off 온도는 900℃, Q₂의 경우 846℃, Q₃의 경우는

722°C으로 설정되었다.

그림 9와 그림 10은 Q_1 를 적용했을 때의 잔류응력분포를 나타내고 있다. 용접 잔류응력의 크기는 용접선방향 응력(S_{zz})가 가장 크게 나타나고 있으며, 용접선에 직각방향 응력(S_{xx}), 웨브방향 응력(S_{yy}) 순으로 나타나고 있었다.

필렛용접 구조상세의 용접잔류응력은 열영향부에서 항복응력을 초과하고 있으며 웨브에 잔류응력이 발생한 것을 제외하고는 맞대기 용접상세에서의 잔류응력과 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수가 있다. 그리고 Q_2, Q_3 의 경우에도 거의 비슷한 응력분포를 보이고 있다.

하면 최대 인장잔류응력은 동일하나 인장잔류응력의 영역이 넓어지고 있음을 문헌¹⁾에서 밝히고 있는데, 본 연구에서는 Surface flux Q_1, Q_2, Q_3 의 경우가 모두 매우 유사한 결과를 보이고 있어 그 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 이는 Surface flux값들 간의 차이가 적기 때문에 나타난 현상이라 판단된다. 그리고, 이들 유한요소해석에 의한 잔류응력평가는 Section법에 의한 잔류응력을 측정한 Keating⁷⁾의 연구 결과와 대체로 유사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다.

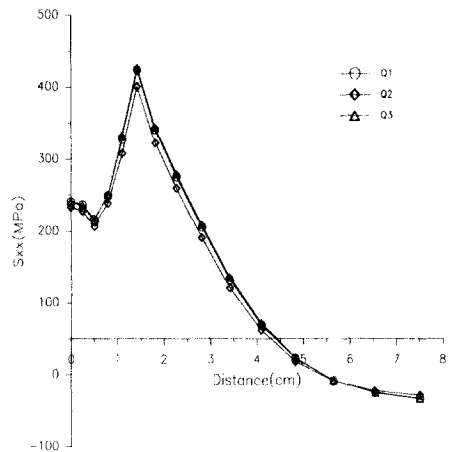


그림 11. 플랜지 안쪽면에서 X방향으로의 잔류응력 S_{xx} 분포

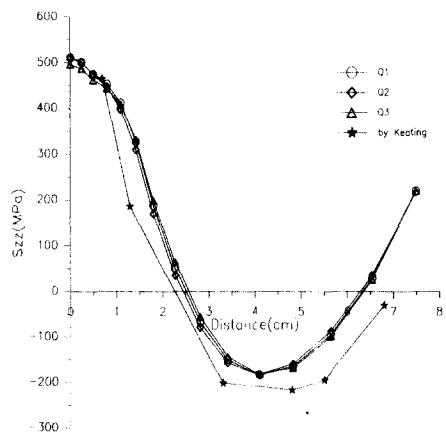


그림 12. 플랜지 안쪽면에서 X방향으로의 잔류응력 S_{zz} 분포

그림 11과 그림 12는 플랜지의 안쪽면에서의 잔류응력분포를 나타내었다. 한편, 입열량이 증가

그림 13과 그림 14는 플랜지의 바깥쪽 면에서의 잔류응력분포를 나타내고 있다. 유한요소해석과 Keating의 연구, 그리고 구멍뚫기 방법으로 측정된 잔류응력을 비교하고 있는 그림 14에 따르면, 유한요소해석에 의한 압축잔류응력 계산값이 Keating의 연구와 구멍뚫기 방법보다 압축잔류응력 영역에서 다소 과대하게 평가되고 있음을 알 수가 있었다.

이 원인은 복사와 대류조건, 잠열 등을 고려하지 않은 온도이력산정과 열응력의 해석시 온도에 따른 재료의 비선형성을 고려하지 않은 해석에 그친 것도 한 원인이다. 또한 온도에 의한 응력은 온도의 차이와 구속조건에 의해 결정되기 때문에, 본 연구와 같이 일부만을 모델링하는 것은 구조물 전체의 거동을 나타내는 완벽한 경계조건을 부과하기가 어려운 점이 있고, 이동하는 실제의 용접 열원을 등분포된 표면열원으로 가정하여 해석한 것도 원인의 하나라고 판단된다.

따라서, 이 부분에 대한 연구는 추후에 구조물 전체의 거동에 대한 해석을 바탕으로 부구조 해석을 이용하는 등 계속 시도되어야 할 것으로 생각된다.

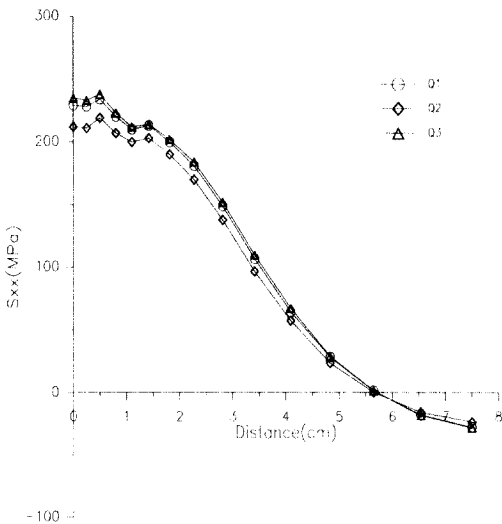


그림 13. 플랜지 바깥쪽면에서 X방향으로의 잔류응력 Sxx 분포

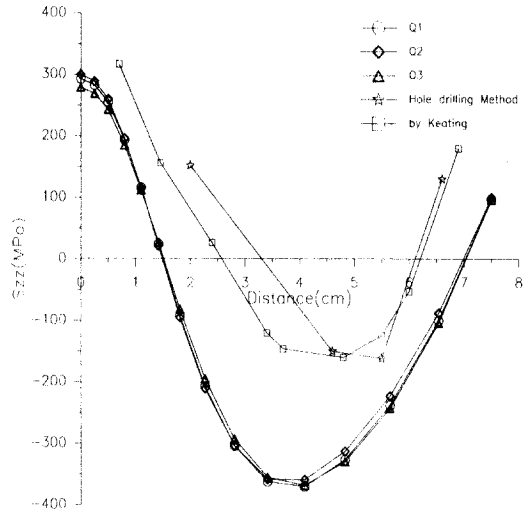


그림 14. 플랜지 바깥쪽면에서 X방향으로의 잔류응력 Szz 분포

그림 15과 그림 16은 웨브방향을 따라서 잔류응력을 예시하고 있는데 용접부 부근의 웨브에서 200 MPa정도의 압축응력이 발생한 후 0에 가까워 지고 있다. 그러나 Keating의 연구에 의하면 열영향부를 벗어난 곳에서는 약 200 MPa 이내의 압축잔류응력이 비교적 균일하게 존재하는 것으로 보고되고 있다.

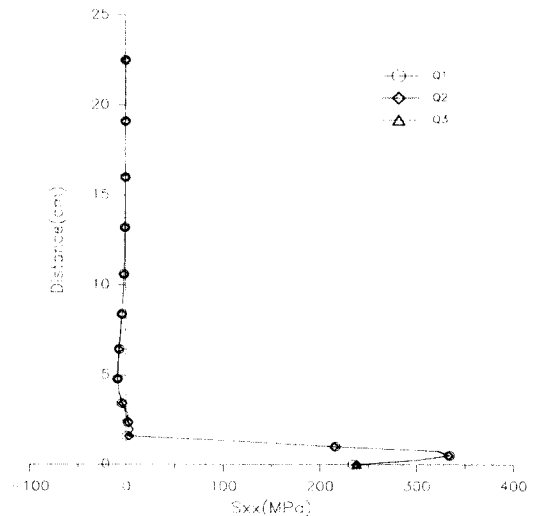


그림 15. 웨브방향으로의 잔류응력 Sxx 분포

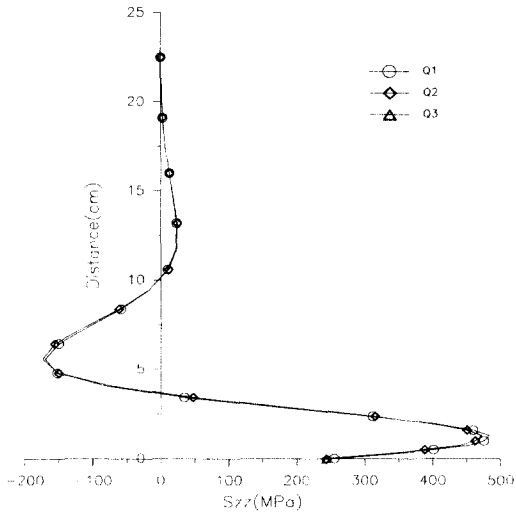


그림 16. 웨브방향으로의 잔류응력 Szz 분포

6. 결 론

이 연구에서는 용접 구조물에 흔히 사용되는 필렛용접으로 시험체를 제작하여 용접부의 잔류응력분포를 정량적으로 측정하고 수치해석을 통해 좀더 쉽게 잔류응력분포를 평가하고자 했다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 상대적으로 정확도가 높고, 사용성이 일반화되어 있는 ASTM E-837의 구멍뚫기 방법을 이용해서 필렛용접으로 제작된 대형의 조립부재 단면에서의 잔류응력분포를 측정했다. 그리고 측정치들을 문헌에서 제시되고 있는 잔류응력 분포와 비교한 결과 만족스러운 분포특성을 얻을 수 있었다.
- 2) 대형 조립부재에 대해 용접시 발생하는 열영향을 변수로 유한요소법에 의한 3차원 열진도해석을 수행하여 열이력 분포를 산정하고, 준정상상태의 온도분포에서 잔류응력을 비교적 성공적으로 평가하였다. 다만 플랜지의 바깥쪽 면에서의 압축잔류응력 값이 구멍뚫기 방법등에 의한 실험치보다 약간 과대평가되고 있었다.

따라서, 정확한 용접조건과 재료특성과 상태변화, 잠열의 효과 등을 고려하여 좀더 효과적으로 잔류응력을 평가할 수 있을 것이다.

- 3) 또한, 열탄성 해석시 Cut-off 온도의 설정은 용접입열에 따라 동일하게 적용하는 것은 약간 문제가 있다고 판단되기 때문에, 용접부에서 잔류응력의 재료의 항복강도 수준으로 나타날 때의 온도로 설정하여 잔류응력을 평가하는 방법이 효과적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 임청권, 박문호, 1998. 12, "용접상세의 변화에 따른 용접이음부의 잔류응력에 관한 연구", 한국강구조학회논문집, 제10권 4호, pp. 709~720
- (2) American Society for Testing and Materials, 1992, "Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method", ASTM Standard E837-92
- (3) P. Tekriwal, J. Mazumder, 1991. 7, "Transient and Residual Thermal Strain-Stress Analysis of GMAW", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 113, pp. 336~343
- (4) J. Arnold Free and Robin F. D. Porter Goff, 1989, "Predicting Residual Stresses in Multi-pass Weldments with the Finite Element Method", Computers & Structures, Vol. 32, No. 2, pp. 365~378
- (5) 방한서, 1992. 12, "후판 용접부의 역학적 특성-유한요소법에 의한 3차원 탄소성 해석", 대한용접학회지, 제10권, 제4호, pp. 250~258
- (6) 이택순, 최병길, 전상윤, 1990, "표면 응력구배시의 잔류응력측정에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제14권 제4호, pp. 761~768

- (7) Peter B. Keating, 1987. 9, "High Cycle Fatigue Behavior of Welded Details Under Variable Amplitude Loading", Lehigh University, pp. 41~56
- (8) EMRC NISA, 1996. 9, "NISA II User's Manual"
- (9) Y. Y. Li, Y. Chen, 1988. 10, "Modeling Quenching to Predict Residual Stress and Micro-structure Distribution", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, pp. 372~379
- (10) M. G. Yuan, Y. Ueda, 1996. 3, "Prediction of Residual Stresses in Welded T-and I-Joints Using Inherent Strains", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 118, pp. 229~234
- (11) 심용래, 이성근, 1993. 9, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발", 대한용접학회지, 제11권, 제3호, pp. 34~47
- (12) 한국강구조학회, 1995, "강구조편람" 제2권 강구조의 집합, pp. 118~149
- (13) 최정영, 1997, "용접강도핸드북", 도서출판 폴드, pp. 2-1~2-16

(접수일자 : 1999년 10월 30일)