'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 다층 용접부의 잔류응력해석
Residual stress analysis for multipass welds of Liquid Metal Reactor

김석훈, 주영상, 유봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구덕진동 150

요 약

용접은 금속의 접합이 용융에 의하여 수행되는 접합과정이다. 국부적인 가열후에 용접 과정과 빠른 응고에의해 잔류응력은 용접부 및 모재에서 발생한다. 용접에 의한 잔류응력은 용접 구조물의 좌굴강도를 약화시키거나 취성파괴를 야기시키기 때문에 구조물의 제작시에도 중요한 문제이다. 따라서 잔류응력의 크기와 분포를 평가하는 것은 중요한 일이다. 이번 연구에서는 유한요소 해석을 사용하여 강판의 다층용접 동안의 잔류응력을 예측하였다. 2층용접 에 대한 잔류응력이 평가 되어졌으며 해석의 타당성을 확인하였다. 복잡한 다층용접부에 대해서는 각 용접층에 들어 있는 용접 패스들을 그룹화하여 Lumped pass 로 모델링하는 방법을 사용하였다. 이러한 Lumped pass 는 용접열원으로 부가 됨으로써 효율적으로 용접부의 잔류응력 분포를 평가하였다.

Abstract

Fusion welding is a joining process in which the coalescence of metals is accomplished by fusion. Owing to the welding process and the rapid cooling following the localized heating , residual stress arise in the weld itself and in the base metal. Residual stresses attributed to welding are the significant problems in the fabrication of structures because those stresses induce brittle fracturing and degrade the buckling strength of welded structures. Thus, estimating the magnitude and distribution of welding residual stresses are deemed necessary. In this study, we pridict the residual stresses during the multipass welding in steel plate using the finite element technique. The residual stress for two pass welding was evaluated and the soundness of the analyses were confirmed. For complex multipass weldment, the lumped pass model by grouping the weld passes in a layer was used . As this lumped passes were loaded for the heat source of the welds, the residual stress distributions of the weld were effectively evaluated.

1. 서론

원자로 구조물의 여러 접합 부분과 압력 용기 및 배관 등의 설계 및 제작시에 용접 구조물의 해석은 필수적인 사항이다. 용접은 구조물에 있어서 물리적이고 재질적인 불연속성을 생성시킨다. 이러한 특성은 모재와 용접부 사이의 물성치의 차이로써 나타나며 용접부는 순수 모재에 비하여 많은 결함을 발생시킨다. 용접구조물에 나타나는 기본적인 문제점을 몇가지 살펴보면 다음과 같다. 첫째 균열(crack)이 발생하여 전파하면 저지(arrest) 하기가 어려우며 용접 과정중에 발생하는 기공, 균열, 슬래그 침입(slag inclusion) 등의 결함이 나타날 수 있다. 둘째로 사용 재료에 대해 민감성을 나타내며 용접후 시험하는 비파괴검사의 신뢰성이 부족하다. 고강도 강의 경우에는 작은 결함에도 매우 민감하게 작용하며 쉽게 파괴될 수 있다. 셋째 용접부에 발생하는 잔류응력과 변형의 문제이다. 용접부 가까이에 존재하는 고인장 잔류응력은 구조물 내에서 균열을 발생하기 쉬운 상태로 만든다. 결과적으로 건전한 용접 구조물을 설계하고 제작하기 위해서는 다음과 같은 사항이 필수

적으로 고려되어야 한다. 타당한 설계, 적당한 재료의 선택, 충분한 장비 및 적절한 용접 절차, 엄격한 품질 보증이 정확히 수행되어야 한다.

이러한 고려에 의해 용접구조물의 설계 및 제작시에 건전한 용접 구조물을 유지할 수 있다. 예를들면 용접부 가까이에 존재하는 고인장 잔류응력은 취성파괴, 피로, 응력 부식 균열(stress corrosion cracking)을 증가시킬 수 있다. 그리고 압축 잔류응력 및 내부 변형은 좌굴강도(buckling strength)를 감소시킨다. 또한 문제가 복잡해지는 것은 잔류응력의 영향의 정도가 그 크기 뿐만 아니라 사용재료의 취성(brittleness)에도 관련이 있다는 사실이다. 재료가 취성을 가질 때 잔류응력은 용접부의 파괴강도를 크게 감소시킬 수 있다. 실질적으로 용접 구조물의 설계시 고려해야 하는 것은 용접 평판 두께, 접합 설계, 용접 조건, 용접 절차 등을 변화시켜 잔류응력 및 변형의 영향을 주어진 환경 하에서 최소화 시키는 것이다. 이러한 사항은 제작의 단계 보다는 설계의 초기단계에서 수행하는 것이 바람직하다. 과도 열응력과 잔류응력 및 변형에 대한 해석이 수행되고 주어진 용접 구조물의 환경 하에서 위의 해석에 대한 영향이 평가되어야 한다.

따라서 용접부의 잔류응력을 평가하는 방법에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 구조물에서 용접 동안 재료는 과도 열응력 상태를 야기시키는 복잡한 온도변화를 경험한다. 그리고 비탄성 또는 비 양립적인 변형이 용접부 가까이의 구역에 생성된다. 용접이 끝난뒤에 그러한 변형의 결과로써 잔류응력이 남게된다. 용접 구조물의 잔류응력을 해석하는 방법 및 절차를 살펴보면 첫번째 방법은 해석적 접근을 통해 용접동안 일어나는 것을 모델링하는 것으로써 4 가지단계로 구분된다. 열 흐름의 해석, 과도 열 응력의 해석, 비 양립적 변형의 결정 및 잔류응력의 해석이다.

잔류응력을 해석할 때 비 양립적 변형의 결정 은 가장 중요하다. 과도 열응력이 완전히 탄성적 이고 모순되는 변형이 형성되지 않는다면 잔류응력은 존재하지 않는다. 소성 변형, 고체화 (solidification)에 의한 변형, 상변태 등과 같은 모순되는 변형의 분포가 결정 되면 잔류 응력은 모순되는 변형을 포함하는 탄성문제로 다룰 수 있다. 해석적인 접근이 가장 일반적으로 사용되는 방법이나 복잡한 용접 구조물에서 잔류응력을 정확히 예측 하기가 어렵다. 두 번째 방법은 복잡한 소성해석을 피하고 직접적으로 실험에 의해 서 모순되는 변형의 분포를 결정할 수 있다. 이것은 첫번째 방법에 비해서 복잡한 용접 구조물의 해석에 적용할 수 있다. 그러나 모순된 변형의 분포를 정확히 평가할수 있는 확실한 방법이 없다. 세번째 방법은 위의 두가지 방법을 조합하는 것으로써 실험적 방법 에 의한 변형의 분포에 대한 평가를 해석적인 접근으로써 확인하는 것이다.용접 구조물 에서 전체적인 변형에 영향을 미치는 많은 요소들이 있다. 이러한 요소들에 대해 살펴 보면 다음과 같다. 구조적 요소는 구조물의 기하학적 형태 및 평판두께, 접합 형태를 나타 낸다. 재료적 요소는 모재 및 용착금속의 형태나 상태를 말하며 제작적 요소는 용접방법, 용접전류, 전압, 속도, 예열 및 용접부 구속조건을 나타낸다(1).

본 연구의 목적은 액체 금속로의 다층 용접부의 용접과정을 모사하고 열 해석 및 잔류응력 해석을 수행하여 용접후의 잔류응력 분포를 예측하는것이다. 복잡한 다층용접부의 해석에는 용접패스의 그룹화를 통해 해석방법를 단순화 시키는 방법이 사용되었다.

2. 다층용접의 해석

2.1 지배 방정식

(1) 열적 모델

용접부의 해석시에 열적문제에 대한 수학적 모델은 아래의 방정식에 의해 설명된다(2).

$$\frac{\partial}{\partial X_i}\left(k\frac{\partial T}{\partial X_i}\right)+Q=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

초기상태는 다음과 같이 표시되어 진다

$$T(X_i, t=t_o)=T_o(X_i) \tag{2}$$

경계조건에 대해 살펴보면

- 온도상태

$$T(X_{i,}t) = \overline{T}(X_{i,}\, t) \qquad (3)$$

- 열흐름 상태

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = q \qquad (4)$$

- 대류 경계 상태

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = h(T - T_e) \qquad (5)$$

여기서 n_i는 표면에 수직한 방향의 요소(component) 이며h는열전달 계수,T_e는 주위온도 이다.

- 복사 경계 상태

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = \boldsymbol{s}\, \boldsymbol{e}\ f(T^4 - T_e^4) \qquad (6)$$

$\boldsymbol{s}$ 는 스테판 볼쯔만(Stefan-Boltzman) 상수 이고 $\boldsymbol{e}$는 방사율, f 는 형상계수 이다.

(2) 기계적 모델

재료가 기계적으로 등방성,열 탄소성 등의 거동을 한다고 가정하면 전 변형율은 아래와 같이 표시된다(5).

$$\boldsymbol{e}_{ij} = \boldsymbol{e}_{ij}^{e} + \boldsymbol{e}_{ij}^{p} + \boldsymbol{e}_{ij}^{th} \qquad (7)$$

탄성 변형율은 후크의 법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\boldsymbol{e}_{ij}^{e} = \frac{1+\boldsymbol{n}}{E}\boldsymbol{s}_{ij} - \frac{\boldsymbol{n}}{E}\,\boldsymbol{s}_{kk}\,\boldsymbol{s}_{ij} \qquad (8)$$

$\boldsymbol{d}_{ij}$: Kronecker symbol

$\boldsymbol{n}$: 포아송 비

E : 영 계수

전 소성 변형율은

$$\boldsymbol{e}_{ij}^{p} = \int_0^t \dot{\boldsymbol{e}}_{ij}^{p}\, dt \qquad (9)$$

열 변형율은 다음식과 같이 나타낼수있다

$$\boldsymbol{e}_{ij}^{th} = \boldsymbol{a}\left(T - T_o\right) \qquad (10)$$

여기서 α 는 열 팽창 계수이고 T_o 는 기준온도 이다.
이를 시간 $t+\Delta t$ 에서의 각각의 변형율 증분항으로 나타내면

$$ {}_t\varepsilon_{ij} = {}_t\varepsilon_{ij}^{e} + {}_t\varepsilon_{ij}^{p} + {}_t\varepsilon_{ij}^{th} + {}_t\varepsilon_{ij}^{e'} \quad (11) $$

$$ {}_t\varepsilon_{ij}^{p} = \Delta t \Lambda^{t+\Delta t} \sigma' \quad (12) $$

$$ {}_t\varepsilon_{ij}^{th} = {}^{t+\Delta t}\alpha^{t+\Delta t} T - {}^{t}\alpha^{t} T \quad (13) $$

$$ {}_t\varepsilon_{ij}^{e'} = \frac{\partial \left[C^E\right]^{-1}}{\partial T} \bullet \left\{{}^t\sigma\right\} dT \quad (14) $$

여기서 ${}_t\varepsilon_{ij}^{e}$, ${}_t\varepsilon_{ij}^{p}$, ${}_t\varepsilon_{ij}^{th}$ 는 각각 탄성, 소성, 열 변형율의 증분항, ${}_t\varepsilon_{ij}^{e'}$ 는 등가 초기 변형율, C^E 는 탄성 구성식 텐서, Λ 는 상수 그리고 σ' 는 deviatoric stress 이다. 열응력에 대하여 가상일의 원리를 도입하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$ \int_v \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_v f_i^b \delta U_i dV + \int_v f_i^s \delta U_i dS \quad (15) $$

여기서 f_i^b, f_i^s, δU_i 는 각각 경계 S 에서의 체력, 표면력 및 변위이다(2).

2.2 용접 및 경계조건

본 연구에서 사용한 용접조건은 Table1 에 요약하였다. Fig. 1은 용접평판의 개념도이며 용접 모재의 재료는 AISI 316L 스텐레스강으로 가정하였고 면적 610 mm^2 이고 두께는 13.2 mm 로 선정 하였다. 용접부의 V 형 groove 는 SAW(Submerged Arc Welding)을 사용하여 모재와 같은 재질인 316 스텐레스강으로 채워진것으로 가정하였다열 해석의 경계조건 으로는 2 차원 축대칭 모델이므로 우측면으로는 열손실이 없는 단열로가정 하였다.

용접부에 공급되는 열은 초기에는 용융풀 내에서 전도와 대류에 의해 모재에 전달된다. 용접부로의 열 유입량의 분포는 용접 용융부로의 균일한 입열을 가정 함으로써 모델링 하였다. 또한 용접부의 외부표면으로 자연대류와 복사에 의해 열손실이 발생한다. 복사에의한 열손실은 온도차가 심한 용융풀 주변에서 주로 발생한다. 여기서 가정된 SAW 용접에서는 용융풀이 용재에의해 차단되므로 복사의 효과는 무시 되어졌다. 자연대류에 의한 열손실은 용융풀로부터 먼곳에서 지배적이며 용접부의 냉각속도에 중요한 영향을 끼친다. 따라서 자연대류 열전달 계수는 용접 평판의 윗면 및 아랫면에 대해서 다르게 적용 하였다(3). Fig.2 는 2 층 용접에대한 모델링 형상이며 축 대칭 형상 이므로 좌측의 반만 모델링 하였으며 용접부의 구속조건은 Fig.3 에 표시된 바와같이 우측면은 x 방향으로 구속되었고 용접 평판의 하단부는 양 끝단에서 y 방향으로 단순지지 되었다.

2.3 해석모델

다층용접의 온도 및 응력의 연성 해석는 Direct coupled method를 사용하여 응력해석의 결과가 열해석에 직접적으로 미치는 영향을 고려하였다. 해석요소로는 온도와 변위에대한 자유도를 모두 가지고있는 PLANE 13를 사용하였으며 입열부는 보다 세밀하게 모델링 하였다. 또한 각 용접패스의 용접재는 ANSYS 의 Birth and Death Option을 사용하여 각 패스의 용접직전에 용접영역에 부가되는것으로 모델링 하였다(4). 즉 첫번째 용접패스동안 에는 두번째 용접패스를 비 활성화 시키므로써 실제 해석시에는 모델로부터 제거시킨 후에 다시 활성화 시켜 입열량을 부가하고 해석에 적용한다. 실제적 용접시에는 충분한 시간간격이 용접후의 용접부분의 검사 및 냉각을 위하여 용접패스들 사이에 이루어진다. 그러나 모델링시 냉각되는 일정한 시간 간격을 주어 해석에 적용하였다.

재료의 탄소성 거동에서의 구성 방정식은 해석결과의 정확성에 있어서 중요한 요소이다. 항복의 개시를 정의하기 위하여 Von Mises 항복기준이 사용되어 졌고, 소성변형에서의 유동법칙(flow rule)은 bilinear kinematic hardening 영향을 고려 하였다. 변형율의 계산에서

시간에 의존하는 크립효과는 용접동안 짧은순간에 온도가 가해지기 때문에 무시 되었다. 재료거동의 보다 정확한 해석을 위해서는 조합된 kinematic-Isotropic hardening 모델을 사용하였다. Kinematic hardening 모델에서 용융온도 이상에서의 소성계수는 0 으로 가정하였다. 또한 용융온도에서 항복응력은 매우 작아야 하며 상온에서의 항복응력의 0.5% 값을 사용 하였다(5).

Fig. 4는 해석에 사용된 7층용접의 형상이며 Fig. 5는 7층용접의 잔류응력 해석시 고려된 2차원 축 대칭 모델이다. 결과의 타당성을 비교하기 위해 2층 용접의 경우와 동일한 조건하에서 해석을 수행하였으며 입열부의 형상은 2층용접보다 약간 좁고 깊은 형상으로 모델링 하였다. 7층용접의 경우에 용입되는 용접재는 4개의 lumped pass로 모델링하여 하부에서부터 차례로 용접영역에 부가하였다(6).

3. 해석결과

3.1 2층용접

(1) 온도분포

용융구역주변의 온도분포는 첫번째 용접 패스후 Fig.6 과 같다. 일정시간 간격후 용접평판의 온도가 충분히 냉각된 후에 두번째 용접패스의 진행시에는 첫번째 용접패스의 용융구역의 일부가 부분적으로 다시 용융되어지며 용접 용융부의 크기는 Fig .7과 같이 예측되어진다. 두개의 용접 용융부 주변의 온도분포는 유한요소 해석시 열해석 모델의 mesh 의 형태가 실험적으로 결정된 비드 형상을 따르지 않더라도 매우 부드럽게 변화함을 알 수있다. 이러한 것은 용접재의 고상과 액상의 상호작용에 관하여 좋은 결과를 얻기위하여 용접부 mesh의 형태가 용접 비드의 형상을 따를 필요는 없다는 것을 알 수 가 있다. Fig.8 은 해석에의해 예측 되어진 용접평판의 온도이력을 나타낸다. 용접부 중심으로 부터 윗면으로10, 20, 30 mm 의 위치에 대한 해석결과이다. 첫번째 용접패스는 용접부의 하단에 용입되므로 용접부 중심에서 상부의 온도분포는 낮게 나타나며 그러나 두번째 용접패스는 상부로 용입되므로 보다높은 온도분포를 나타낸다.

(2) 잔류응력 분포

Fig. 9는 첫번째 용접후에 종방향 잔류응력의 등응력선을 나타낸다. 용접부 주변의 잔류응력 분포는 첫번째 용접패스가 진행된 용융부 바닥에서 최대값을 나타낸다. Fig. 10에서처럼 두번째 패스의 용접후에는 응력의 최대값이 두번째 패스가 진행되는 상부로 이동한다. 그러나 두번째 용접 패스에 의한 첫번째 용접패스후의 잔류응력의 변화는 크지 않은 것을으로 나타난다. 두번째 패스는 고인장 잔류응력의 구역의 크기를 증가시킴을 알 수 가 있다. Fig. 11은 용접이 끝난후에 용접부 윗표면에서 x방향거리에 대한 종방향 잔류응력 분포를 나타낸다. 최대응력은 302 MPa 로 용접용융부 에서 발생하며 x 방향으로 약 4 Cm 거리에서 압촉응력으로 전환된다. 해석결과는 참고논문(7) 에서 제시된 ABAQUS simulation 결과와 비교하여 잘 일치 함을 알 수가 있다. 하단부에서 압축잔류응력값의 차이는 해석시간의 차이에서 발생 되는것으로 생각된다.

Fig.12는 2층용접의 바닥면에서 x방향거리에 따라 계산된 종방향 잔류응력 분포이다. 용접부 윗표면에서 잔류응력 분포와 유사한 형태를 가지며 응력값은 용접부 윗표면에 보다 작게 나타난다. Fig. 13은 용접부 중심에서 용접모재의 두께 방향에 대한 종방향 잔류응력 분포이다. 용접부의 바닥면에서는 낮은 인장응력을 보이며 상부로 올라갈수록 높은 잔류응력값을 나타내며 그래프에서 보듯이 ABAQUS의 비교자료 결과와 잘일치 함을 알 수 가 있다.

3.1 복잡한 다층용접

위에서 2층용접에 대한 열 및 잔류응력 해석을 수행 하였다. 복잡한 형상의 다층용접의 경우에는 많은해석 시간을 필요로 하기 때문에 해석의 간소화를 위하여 몇개의 용접패스가 하나로 조합된 lumped pass를 사요했다. 조합된 lumped pass는 용접 해석시에 전체층의 용접 비드 요소위에 일정한 열 유속으로 가해졌다. Fig.14 ~ Fig.17은 7층용접에 대한 잔

류응력 해석 결과를 나타낸다. 각 패스후에 용접부의 종방향 잔류응력 분포는 하부에서 상부로 이동되며 그영역이 증가 되어진다. 마지막 용접패스후에 용융부에서 최대 인장응력 값에 도달한다.

Fig.18 및 Fig.19는 용접부 윗표면 및 바닥면에서 종방향 잔류응력 분포를 나타낸다. 이것은 2층용접과 유사한 온도분포를 나타내며 바닥면에서 응력 분포는 다소 높게 나타난다. 그이유는 7층용접의 경우 바닥면에서부터 용접패스가 진행됨에 기인한다고 추측된다. Fig.20은 용접부 중심 바닥면에서 용접모재의 두께 방향에 대한 종방향 잔류응력 분포이다. 용접부의 바닥면에서는 낮은 인장응력을 보이며 상부로 올라갈수록 높은 잔류응력값을 나타낸다. 이것은 2층용접의 해석결과 유사한 거동을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. 김석훈, 유봉 등, "액체금속로 용접구조에대한 특성 및 잔류응력의 영향",KAERI/AR-508/98, pp 104, 1998.
2. Newman, S., Z.," FEM model of 3D transient temperature and stress fields in welded plates, ph. D. dissertation, Pittsburge, Pa., Carnegie-Mellon university, 1986.
3. 김석훈, 주영상, 유봉, " 액체금속로 다층용접부의 열해석", journal of KNS, March, 2000.
4 . ANSYS user' s manual for revision 5.5
5. Tso-Liang Teng, Chih-Cheng Lin," Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds", International Journal of Pressure Vessel and Piping 75, pp 857~864, 1998.
6. Y. Dong, J. . Hong, C. L. Tsai and P. Dong," Finite element modelling of residual stress in austenitic stainless steel pipe girth welds, Welding Research Supplement, pp 442s ~ 449s,October, 1997.
7. C. K. Leung, R. J. Pick, " Finite element analysis of multipass welds", WRC bulletine 356,pp 11~33, 1990.

Table 1. **용접 조건**

전압(V)	34 V
전류(I)	450 A
용접속도(V)	88.9 Cm/min
열효율(η)	85 %
입열량(Q)	13005 W

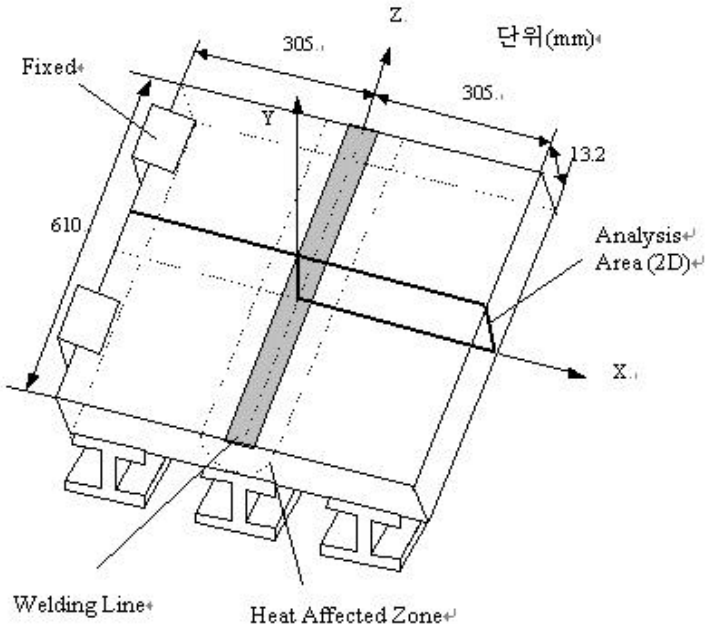

Fig. 1 **용접 평판의 개념도**

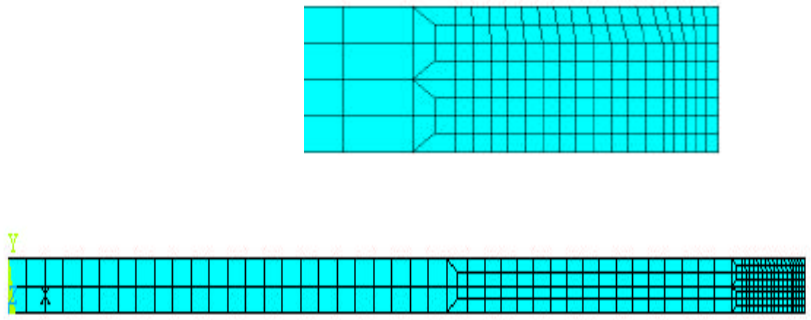

Fig. 2 수직 단순 다층 용접에대한 열 해석 모델

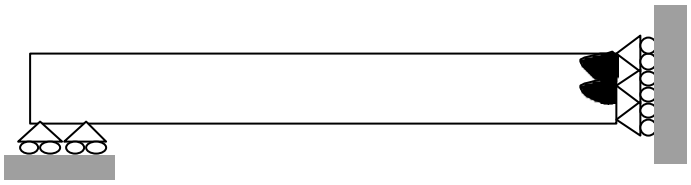

Fig. 3 2층 용접에대한 경계조건

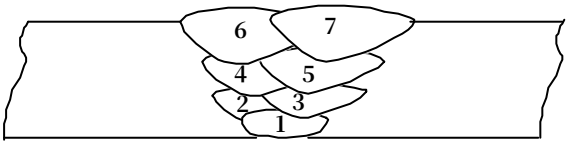

Fig. 4 7층용접에대한 개념도

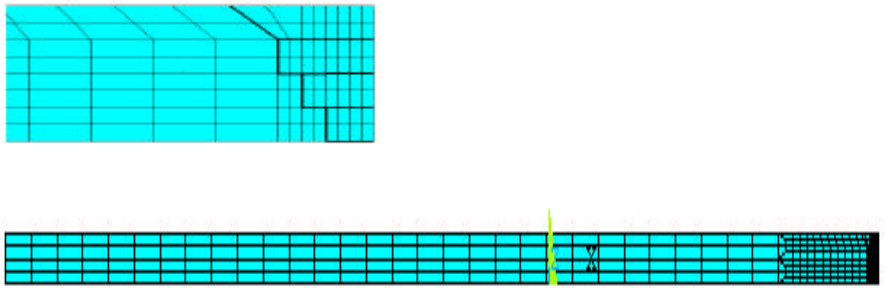

Fig. 5 7층용접에대한 해석 모델

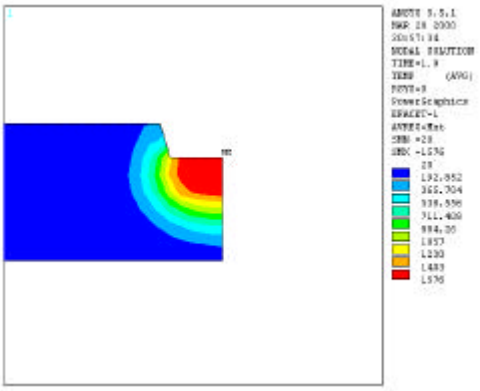

Fig 6. 1pass 후의 용접부의온도분포

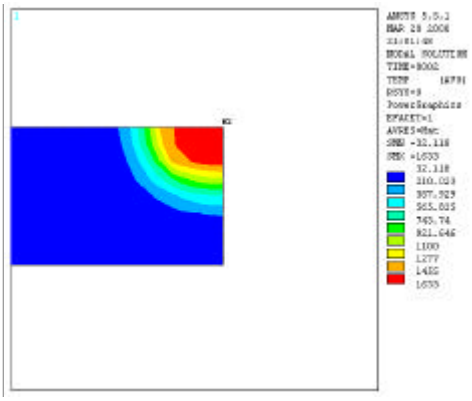

Fig 7. 2pass 후의 용접부의온도분포

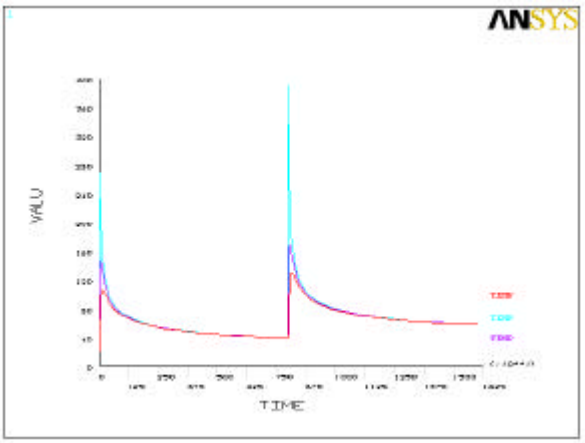

Fig. 8 위치별(10,20,30 mm) 온도 분포 해석 결과(수직 단순다층 용접)

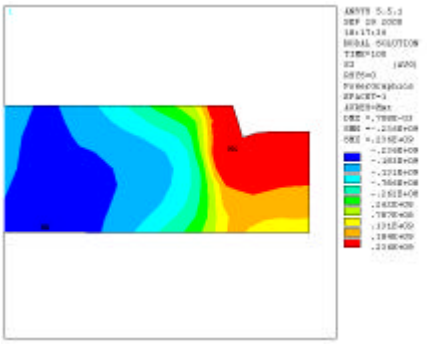

Fig 9. 1pass후의 용접부의 잔류응력 분포

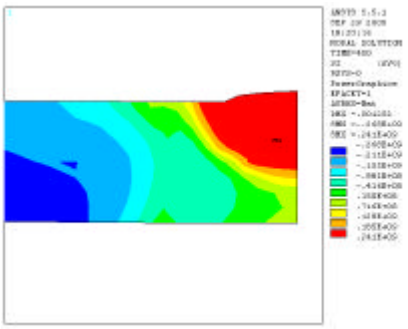

Fig 10. 2 pass후의 용접부의 잔류응력 분포

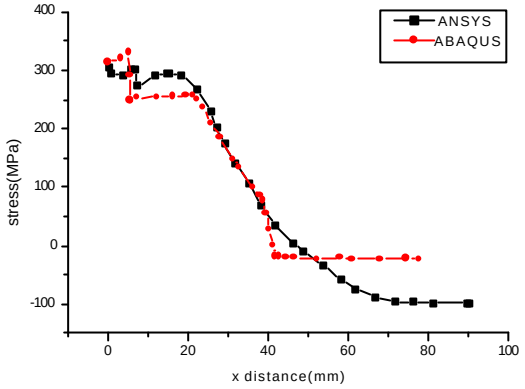

Fig.11 용접평판 윗면의 x방향에대한 종(longtudinal)방향의 잔류응력 분포

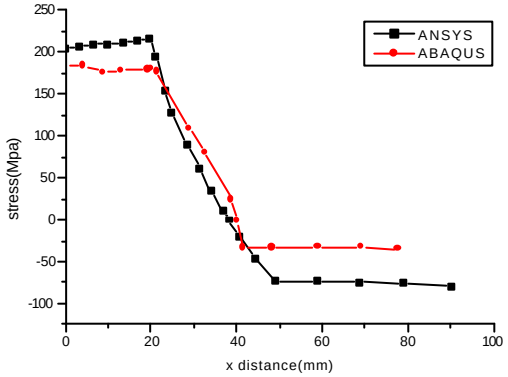

Fig.12 용접평판 바닥면의 x방향에대한 종(longtudinal)방향의 잔류응력 분포

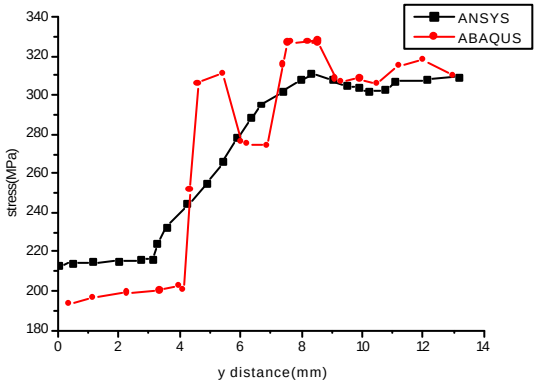

Fig.13 용접평판 중앙의 평판두께에 대한 종(longtudinal)방향의 잔류응력 분포

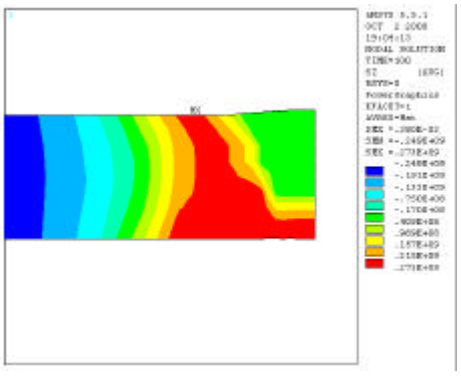

Fig. 14 1pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

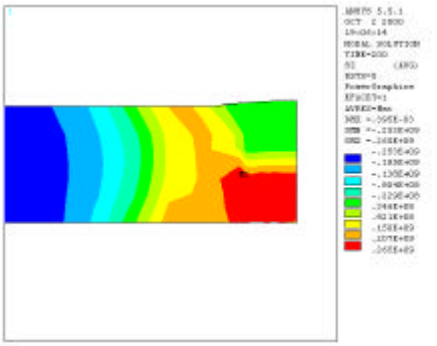

Fig. 15 2 pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

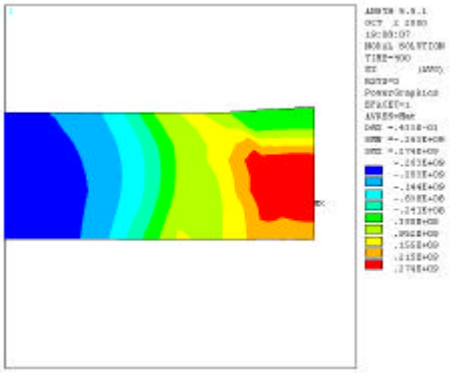

Fig. 16 3pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

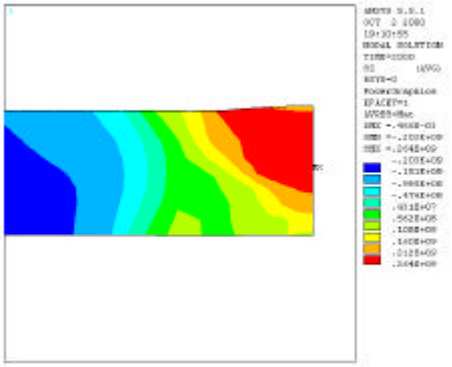

Fig. 17 4 pass후의 용접부의 잔류응력 분포 (lumped pass)

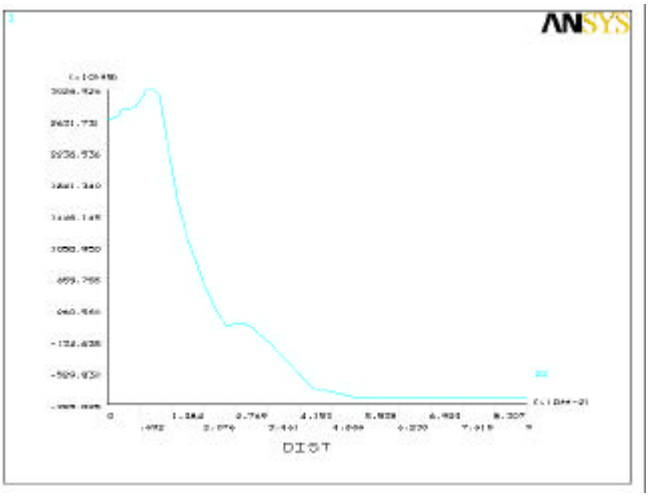

Fig.18 용접평판 바닥면의 x방향에대한 종(longtudinal)방향의 잔류응력 분포 (lumped pass)

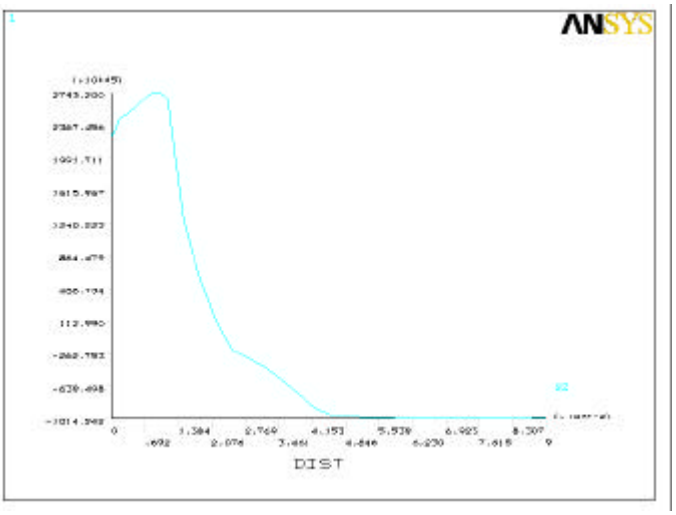

Fig.19 용접평판 바닥면의 x방향에대한 종(longtudinal)방향의 잔류응력 분포 (lumped pass)

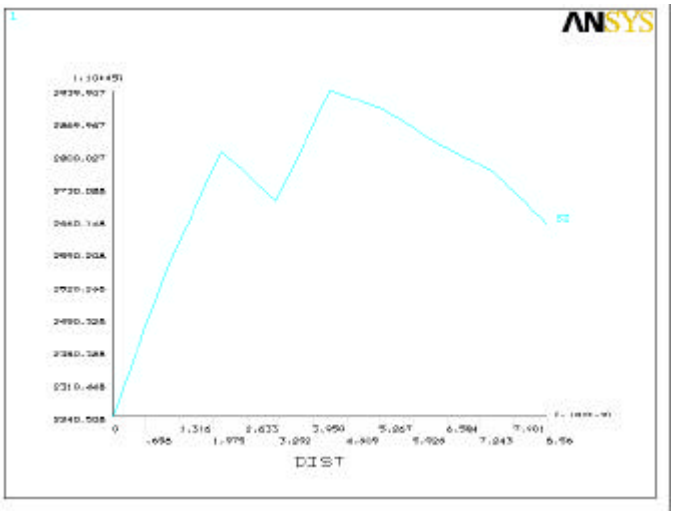

Fig.20 용접평판 중앙의 평판두께에 대한 종(longtudinal)방향의 잔류응력 분포 (lumped pass)