

# 용접가공된 STS304 파이프에서의 잔류응력 해석

남현일, 박재학\*, 이호진\*\*, 한상인

한국가스안전공사, \*충북대학교, \*\*한국원자력연구소

## Analysis of Residual Stresses in a Welded and Plastically Deformed STS304 Pipe

Hyun-Il Nam, Jai-Hak Park\*, Ho-Jin Lee\*\*, Sang-In Han

Korea Gas Safety Corporation, Shihung-shi, Korea

\*Chungbuk National University, Cheongju, Korea

\*\*Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon, Korea

### I. 서론

용접접합은 둘 이상의 금속 대상물들을 국부적으로 용융점이상의 고온으로 가열함으로써 일체화시키는 금속접합가공법으로 접합되는 두 물체를 완전한 일체로 결합시키는 특징을 갖고 있고, 또한 시공상의 간편함으로 인하여 광범위하게 이용되고 있는 접합가공법이다. 그러나 이 같은 용접접합법은 국부적인 고온가열(heating), 용융(melting), 냉각(cooling)과정으로 이어져 열하중(thermal loading) - 불균일 온도분포 - 에 따른 용접잔류응력의 발생을 피할 수 없다. 용접과정에서 이와 같이 발생하는 용접잔류응력은 용접구조물의 제작시 여러 가지 장애를 유발할 뿐만 아니라 구조물의 초기조건으로 작용하여 파괴 발생 또는 파괴의 전파에 직, 간접적으로 기여하는 등 악영향을 미치게 된다[1]. 이러한 용접구조물의 안전성을 해치는 용접잔류응력 문제를 해결하기 위해 우선적으로 용접부위의 잔류응력분포를 정확히 이해하고 해석하며 더 나아가 보다 신뢰성과 경제성이 있는 새로운 예측법과 방지법이 요구된다. 그러므로 용접에 대한 시뮬레이션(simulation)은 용접 과정에서 발생하는 제반 근본현상들에 대한 이해를 돕고, 나아가서 설계시 용접에 의한 잔류응력과 변형을 예측케 하고, 이를 억제 또는 제어할 수 있는 방법의 제시를 가능하게 할 수 있다는 측면에서 그 중요성이 강조되고 있다. 또한 용접으로 인해 발생하는 잔류응력 및 변형에 대한 연구는 많은 반면 용접잔류응력이 분포하고 있는 구조물에 소성가공을 수행할 경우 소성가공으로 인한 응력이 기존의 용접잔류응력분포에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 그래서 용접구조물에 소성가공을 행하여 용접 잔류응력에 어떠한 변화가 일어나는지를 알아보았다. 본 논문에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 과도 열전달 해석 및 열탄소성 해석을 수행하여 용접의 역학적 거동을 해석하였다. 해석의 타당성을 알아보기 위하여 해석모델과 동일한 형상과 물성을 가진 STS304 파이프에 대하여 길이방향으로 용접을 한 뒤 구멍뚫기 방법(hole-drilling method)을 사용하여 잔류응력 측정실험을 실시하였다.

## II. 유한요소해석

해석에 사용한 모델은 그림 1에 나타내었다. 해석에 사용된 요소는 8절점 등매개변수 3차원 요소이며, 총 2000개의 요소와 2400개의 절점으로 구성하였다. 보통 높은 온도구배를 가지는 영역인 입열부는 조밀한 메쉬를 구성하지만 본 해석에서는 추후의 소성가공해석을 고려하여 전체적으로 균일한 메쉬를 구성하였다.

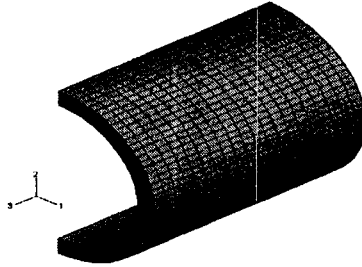


Fig. 1 Finite element mesh for analysis (symmetry)

### 2.1 온도장해석

온도장 해석에 대한 수학적 모델은 아래의 방정식에 의해 설명된다.

$$-\frac{\partial}{\partial X_i} \left( k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

또한, 표면에서의 경계조건으로 사용되는 열대류방정식은 다음과 같다.

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial X_i} n_i = h(T_A - T_B) \quad (2)$$

해석에 사용한 열원은 분포열유속이라는 이상화된 형태로 모델링하였다. 판에 직각을 유지하는 열원은 Gauss정규분포를 갖는 열유속으로 가정하여 다음의 식으로 표현하였다.[2]

$$q = \frac{\eta_a VI}{\pi} \frac{3}{r_b^2} e^{-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2} \quad (3)$$

여기서  $q$ 는 한 지점(x,y)에서의 열유속이고  $r^2$ 은  $(x-a)^2 + y^2$ 으로 나타내는 상수이며,  $a$ 는 용접진행방향에서의 용접토치의 위치를 나타낸다. 온도장 해석은 용접열원이 가해지고 난 이후의 냉각과정을 추적하기 위하여 총 3600초에 대하여 수행하였다. 이때의 시간 증분 구간(time step)의 수는 열원이 통과하는 초기 12초간에 24구

간, 용접완료 후 냉각 기간에는 82구간으로 총 106시간증분 구간으로 설정하여 계산하였다. 최소 시간구간(time step)은 0.5초이고 최대는 100초이다. 그림 2는 해석에 사용한 STS304의 열적 물성이다.

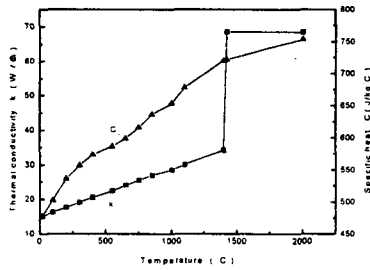


Fig. 2 Thermal properties of STS 304

그림 3의 (a)에서 (f)는 용접시작 후 0.5초가 경과한 시점부터 150초에 이르기까지의 온도분포를 보여 주는 것인데, 그림에서 보는 바와 같이 시편 내의 온도분포는 용접이 진행되는 부위에서 최고치를 보이고 거리가 멀어짐에 따라 급격히 낮아지는, 불균일하고 국부적인분포를 보인다. 이 같은 현상이 잔류응력 등을 유발시키는 요인이 된다.

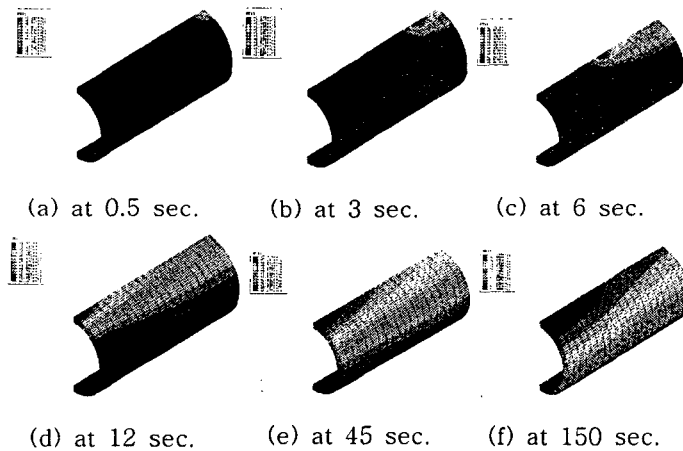


Fig. 3 Temperature distribution varying with time

그림 4의 여섯 곳을 참조점(reference point)으로 지정하여 열원이 통과하고 난 후의 온도변화를 그림 5에 나타내었다. 해석 결과의 타당성을 알아보기 위하여 해석상에서 재료의 melting point 이상으로 온도가 상승한 부분의 위치와 실제 시편의 용융부 위치를 비교하였다. 비교한 결과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

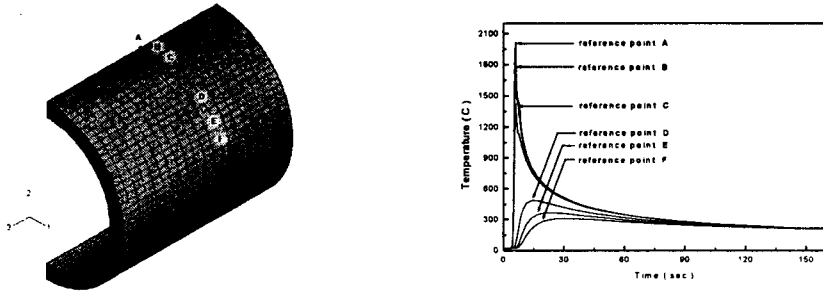


Fig. 4 Selected reference points for Fig. 5 Temperature histories at the monitoring temperature and residual stress.

### 2.2 열탄소성 해석

재료가 기계적으로 등방성, 열탄소성 등의 거동을 한다고 가정하면 전 변형율은 다음과 같이 표시할 수 있다.[3]

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^{th} \quad (4)$$

탄성변형율은 후크의 법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} \sigma'_{ij} - \frac{(1-2\nu)}{E} \sigma_m \delta_{ij} \quad (5)$$

열변형율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^{th} = \alpha(T - T_r) \delta_{ij} \quad (6)$$

또한 전 소성변형율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^p = \int_0^t \dot{\epsilon}_{ij}^p dt \quad (7)$$

온도장 해석의 결과인 절점 온도는 열탄소성 해석의 열하중(thermal loading)으로 작용하여 열응력을 발생시킨다. 온도장 해석시와 마찬가지로 총 3600초동안의 해석을 수행하였다. 유한요소 메쉬와 시간증분구간은 온도장 해석과 동일하다. 그림 6은 열탄소성 해석에 사용된 STS304의 기계적 물성을 나타내었다.

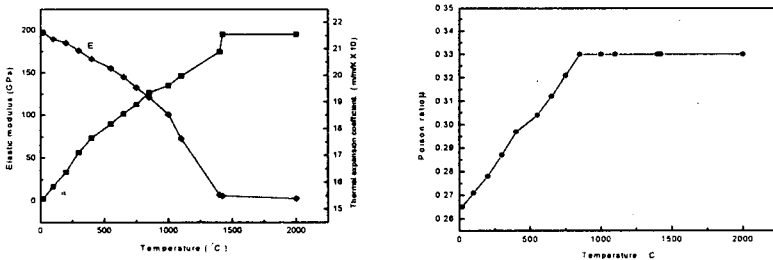


Fig. 6 Mechanical properties of STS 304

용접 중 응력의 변화상태를 그림 7에 도시하였다. 용접을 시작한 후 4초 후, 즉, 용접열원

이 막 통과하는 순간에 용접부에서의 응력상태는 0이고(용융상태), 열영향부에서는 압축응력이었다가 모재 중간에서는 인장응력이 되고 있다. 용접열원이 통과하여 결합이 이루어지고 난 후에는 용접부의 수축으로 인하여 용접부 부근에서는 인장응력이 발생하고, 용접부에서 조금 멀리 떨어진 부분에서는 압축응력, 그리고 더 멀어지면 인장응력이 나타나고 있다.

그림 8은 용접된 파이프를 상온까지 냉각을 시키고 난 후 파이프의 발생하는 잔류응력으로 최대 잔류응력은 재료의 항복강도와 비슷하게 나타나고 있다.

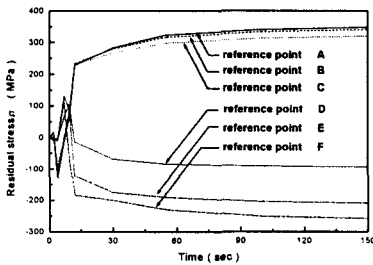


Fig. 7 Stress histories at the reference points on the pipe

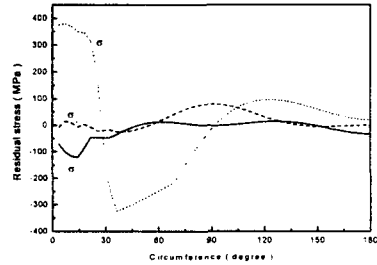


Fig. 8 Calculated welding residual stresses on the pipe

### 2.3 소성가공해석

열탄소성해석을 마친 후에 구한 응력, 즉 용접 잔류응력을 초기 응력으로 하여 유한요소모델에 대입한 뒤 모델에 변형을 가하였다. 용접으로 인한 잔류응력은 변형이 진행되어감에 따라 변형으로 인한 응력발생에 의해 상당부분 흐트러졌다. 변형이 완전히 끝난 후의 잔류응력은 용접 잔류응력의 영향을 거의 받지 않았으며 다만 변형으로 인한 응력이 지배적이었다. 이는 용접부에 존재하는 잔류응력을 적절한 가공에 의해 상쇄시키거나 제거할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 9에서 보듯이 파이프의 상하좌우에 롤링지그를 설치한 뒤 동시에 균일한 힘으로 롤링을 하여 원형의 파이프를 사각형이 되도록 가공하였다.

그림 10은 소성가공을 하고 난 후 사각형으로 변형이 되고 난 후의 모델이다. 그림 11은 소성가공을 행하고 난 후의 잔류응력을 나타내고 있다. 그림 8의 용접잔류응력 분포를 보면 길이방향 응력( $\sigma_{zz}$ )이 지배적이었으나 소성가공을 하고 난 후에는 다른 응력성분들도 상당히 증가하였음을 알 수 있었다. 특히 용접잔류응력은 용접부 부근에 거의 집중되어 있었으나, 소성가공을 한 뒤에는 용접부보다는 각 면의 중앙부에서 높게 나오고 있었다.

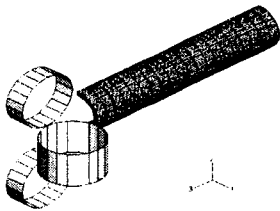


Fig. 9 A schematic diagram of a compression jig and a pipe for rectangular rolling plastic process

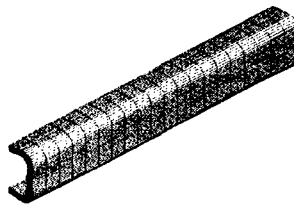


Fig. 10 Deformed shape after rectangular rolling plastic process

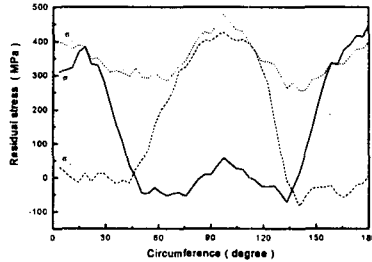


Fig. 11 Calculated residual stresses after rectangular rolling plastic process.

### III. 잔류응력 측정실험

해석의 타당성을 검토하기 위하여 해석모델과 동일한 형상과 조건에서 제작된 실제 시편에 대하여 실험을 수행하였다. 실험은 크게 두 단계로 진행되었다. 하나는 용접 잔류응력 측정을 위해 열처리된 원형의 STS304 파이프에 대하여 길이 방향으로 불활성가스 텀스텐 아크 용접(GTAW)을 수행하여 용접잔류응력 측정을 위한 시편을 제작하였다. 용접 조건으로는 용접전압 13V, 용접전류 155A, 용접속도 7.1mm/sec로 하였다. 그 후에 용접이 끝난 원형의 STS304 파이프를 사각형으로 만들기 위한 소성가공을 수행하였다. 각 단계가 완료된 후 잔류응력 측정용 로제트 스트레인 게이지(rosette strain gage)를 이용하여 용접잔류응력 및 소성가공 후의 잔류응력을 측정하였다.

#### 3.1 잔류응력 측정

용접 및 소성가공에 의한 잔류응력은 응력이완기법의 일종인 구멍뚫기 방법을 사용하여 측정하였다. 이 방법은 잔류응력을 측정하고자 하는 부위에 스트레인 게이지를 부착시키고 구멍을 뚫어 잔류응력을 제거함으로써 발생하는 변형률의 변화를 측정하여 역으로 구멍을 뚫기 전에 존재하던 잔류응력을 알아내는 것이다. 실험시의 상세한 과정은 ASTM E 837-92 규정을 따랐다.[4] 로제트 스트레인 게이지는 Micro-Measurement사에서 잔류응력 측정용으로 개발한 EA-06-062RE-120을 사용하였다. 구멍을 뚫기 위해 엔드밀을 사용하였으며, 로제트의 중심을 정확하게 가공하기 위하여 RS-200 밀링가이드를 사용하였다. 변형률 측정장치로는 P-3800 스트레인 인디케이터와 SB-10 밸런스 유니트를 사용하였다.

구멍깊이와 스트레인 게이지의 평균반경과의 비를 0.7로 하였고, 구멍깊이를 0.254mm씩 7층분으로 나누어 비관통구멍(blind hole)을 가공하였다. 실험에 사용한 3축 스트레인 게이지의 크기는 길이와 폭이 1.57mm이고, 게이지 중심을 지나는 원의 직경은 5.13mm이며 구멍의 직경은 1.58mm이다. 먼저 오차의 범위를 줄일 수 있는 가장 중요한 요건은 구멍을 뚫을 때 편심이 생기지 않도록 정확히 게이지 중심에 구멍을 뚫어야 한다는 것이다. 그래서 본 실험에서는 편심이 발생하지 않도록 하기 위하여 밀링 가이드를 그리프시멘트(grip cement)를 사용하여 작업대 위에 단단히 고정시키고 측정하고자 하는 물체의 게이지 중심에 맞추었다.

#### 3.2 실험치와 해석치의 비교

그림 12는 실험을 통하여 측정된 파이프의 길이방향(z방향)잔류응력과 열탄소성해석을 통하여 구한 용접잔류응력을 비교한 것이다.

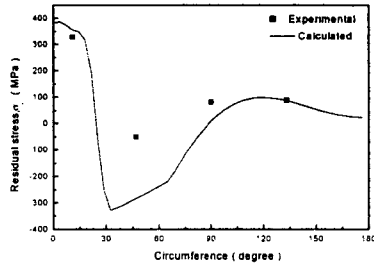


Fig. 12 Calculated and experimental residual stresses after welding

용접부에서의 잔류응력은 320MPa로 실험치와 거의 일치하고 있다. 그러나 원주방향 45°에서는 해석결과와 실험결과 사이에 상당한 오차가 발생하고 있다. 이러한 응력의 차이는 해석에 사용된 재료물성치의 부족과 수치해석상의 가정이 실제조건과 정확하게 일치하지 않기 때문이라고 판단된다. 그 이후의 위치에서는 해석치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있다.

소성가공을 하고 난 사각형 형태의 STS304 파이프에 대하여 용접잔류응력 측정시와 동일한 방법을 사용하여 소성가공을 하고 난 뒤의 잔류응력 분포를 측정하였다. 측정위치는 용접부를 중심으로 하여 10°, 30°, 45°, 90°, 135°, 그리고 180°의 여섯 곳을 선택하였다.

그림 13은 소성가공 해석을 통하여 구한 응력과 실험을 통하여 측정한 응력을 비교한 것이다. 동일위치에 대한 응력은 큰 차이를 보이고 있으나 전체적인 경향은 일치하고 있다. 즉, 두 경우 모두 사각형 형태로 가공하였을 때 모서리 부분보다는 측면부에 큰 응력이 집중되고 있음을 알 수 있었다. 여기서 0° 위치가 용접부의 중심에 해당하고 45° 및 135°는 소성가공 후의 사각형의 모서리 부분에 해당한다. 용접부에서의 응력을 보면 용접시의 잔류응력과 소성가공 후의 잔류응력은 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 용접부 이외의 다른 부분에서는 소성가공에 의하여 잔류응력이 상당히 변화하고 있다. 특히 모서리 부분과 측면부 중앙에는 용접잔류응력이 거의 존재하지 않던 부분이었으나 소성가공을 하고 난 후 응력이 크게 증가하였다.

또한 용접 및 소성가공에 의해 발생되는 잔류응력을 측정한 결과 각 과정에서 발생되는 잔류응력은 항복강도를 초과하므로 열처리 등을 이용한 응력 감소가 필요할 것으로 판단된다.

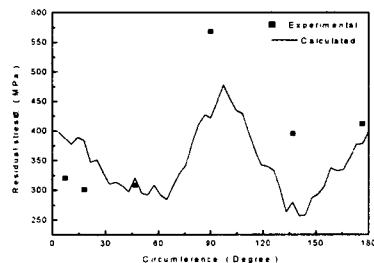


Fig. 13 Calculated and experimental residual stresses after welding and rectangular rolling plastic process

#### IV 결론

길이방향으로 용접을 한 STS304 파이프에 대해 온도 및 응력해석을 통하여 용접 잔류응력을 구하였고, 용접을 하고 난 후 파이프에 소성가공을 행하여 가공으로 인한 응력발생이 용접잔류응력에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 해석을 수행하였다. 또한 해석결과의 타당성을 알아보기 위하여 구멍뚫기 방법을 이용해 잔류응력을 직접 측정된 뒤 해석결과와 비교하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 용접잔류응력분포를 해석한 결과 용접부에서는 350MPa의 인장응력이 발생하였다. 용접부와의 거리가 멀어짐에 따라 압축응력이 나타나다가 점차 응력의 발생이 감소하여 용접부 반대쪽에서는 응력이 나타나지 않았다. 구멍뚫기 방법에 의해 잔류응력을 측정된 결과 용접부에서의 응력은 해석치와 잘 일치하였으나 압축응력발생부에서는 해석치보다 작은 값이 얻어졌다. 또한 용접잔류응력이 존재하는 파이프에 대해 압축지그를 사용하여 사각형으로 소성가공을 하는 과정을 해석한 결과 용접부에서의 잔류응력의 크기는 크게 변하지 않았으나 측면부의 중앙에서는 최대 475MPa의 인장잔류응력이 발생하였다. 이를 측정치와 비교할 때 응력은 차이를 보였으나 응력의 분포형태는 비슷한 양상을 보였다.

#### 참고문헌

- (1) Karlsson, L., 1986, "Thermal Stresses in Welding", ed. R. B. Hetnarski, North-Holland, pp. 299-389.
- (2) Chang, U. I., 1983, "Critical Thermal Radius in Laser Soldering", Proceedings of 1983 ASM Conference on Applications of Lasers in Materials Processing, Los Angeles, Jan., pp. 218-228.
- (3) Johnson, W. and P. B. Mellor, 1986, Engineering Plasticity, Ellis Horwood, pp. 80-99.
- (4) ASTM, 1994, "Standard Test Method of Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM Standard E837-94a, pp. 1-7.