

# SUS 316LN의 다층 용접부 변형 특성에 관한 연구

## A study on the distortion behavior of multi-pass weldment of the SUS 316LN

김하근\*, 배범찬, 김대순  
현대중공업(주), 산업 기술 연구소

### 1. 서 론

오스테나이트계 SUS는 일반적인 부식 환경에서 내식성 및 저온 인성이 매우 우수하므로, 원자력 압력 용기, 해양 및 배관 구조물의 구조용 재료로 널리 사용되고 있다. 그러나, 오스테나이트계 SUS를 이용한 용접 구조물 제작시 모재의 열적 기계적 물성에 기인한 과도한 용접 변형은 정도 관리를 통한 생산성 향상에 큰 걸림돌로 작용하고 있는 것이 사실이다. 특히, 용접 구조물 제작시 발생하는 면외 변형이 단순히 정도 문제 뿐 아니라, 구조적인 안정성에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 선급을 비롯한 각종 code에서는 이를 엄격히 제한하고 있다는 것과 오스테나이트계 SUS 용접부의 열적 변형 교정 방안의 제한성을 고려할 때, 오스테나이트계 SUS 용접구조물에 대한 효율적인 변형 예측 및 제어 기법의 정립은 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 오스테나이트계 SUS 다층 개선 용접부의 변형 예측 기법을 제안하고, 이를 토대로 용접 구조물 변형 거동 양상을 평가하고 실 구조물의 측정 결과와 비교함으로써 제안된 예측 기법의 타당성을 규명하고자 하였다.

### 2. 실험 및 해석 방법

SUS 316LN의 다층 용접부의 변형 특성을 평가하기 위해 사용된 시험 모델은 Fig. 1과 같이 용접선 길이(L)가 900 mm이고, 용접부의 폭(W)이 400 mm인 주판이다. 다층 용접부의 변형 거동 특성 평가를 위하여 본 고에서는 기존의 연구 결과를 토대로 용접 입열량과 용접부의 유효 목 두께를 시험 변수로 선정하였다. 이때, 사용된 용접 기법과 용접재는 각각 GTA(Gas

Tungsten Arc), ER308L이며, 용접 조건은 Table 1과 같다. 시험 모델의 용접 pass에 따른 각 변형은 Fig. 2와 같이 dial gage와 data logging system을 이용하여 용접선 방향으로 양 끝단부에서 50 mm 떨어진 위치와 중앙부에서 측정하였으며, 횡 수축은 최종 용접이 완료된 후 용접부가 상온으로 완전히 냉각된 후 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

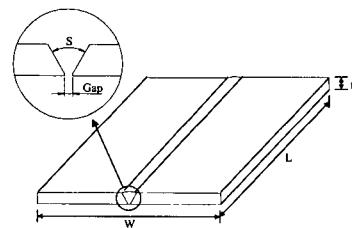


Fig. 1 Schematic diagram of butt weldment for experiment

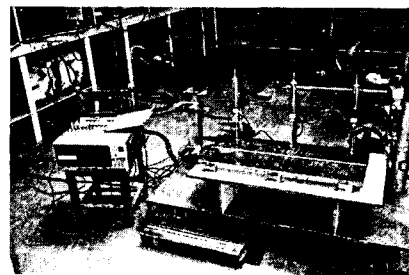


Fig. 2 Experimental device

Table 1. Welding conditions for GTAW

Ampere [A]	Voltage [V]	Speed [mm/min]
100 -200	10 -14	50 - 200

단순 변형 실험을 통하여 정식화된 각 변형 예측 기법의 타당성 평가를 위하여 사용된 해석 및 측정 모델은 Fig. 3과 같으며, 용접 변형 예측

은 간이 열 탄성 해석 기법(STEM, simplified thermal elastic method)을 이용하였으며[1], 용접 후 변형 양상은 3차원 변형 추정기를 이용하여 평가하였다.

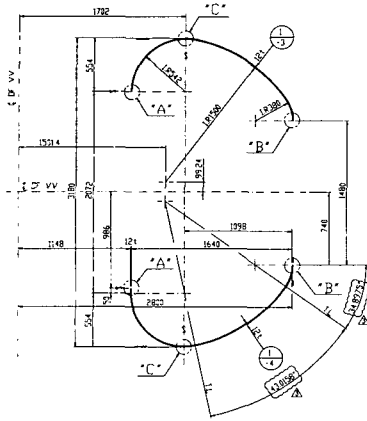


Fig. 3 Schematic diagram of the welded structure

### 3. 실험 및 해석 결과

#### 3.1 용접 변형 특성

Fig. 4는 60° 개선을 가진 다층 butt 용접부서 용접 pass에 따른 각 변형량의 천이 거동에 대한 실험 결과를 도시한 것이다. 용접은 9 pass가 적층되었으며 초층 GTA 용접시 용접부의 각 변형은 역 방향으로 진행되는데, 이는 초층 용접시 용접부의 온도 구배에 의한 수축 하중이 용접부의 하부에서 더 크기 때문이다. 그리고, 용접 pass가 진행됨에 따라 다층 개선 용접부의 각 변형 증가율은 용접 pass가 진행됨에 따라 용접부의 유효 목 두께의 증가에 따른 굽힘 강성의 증가에 기인한다[2].

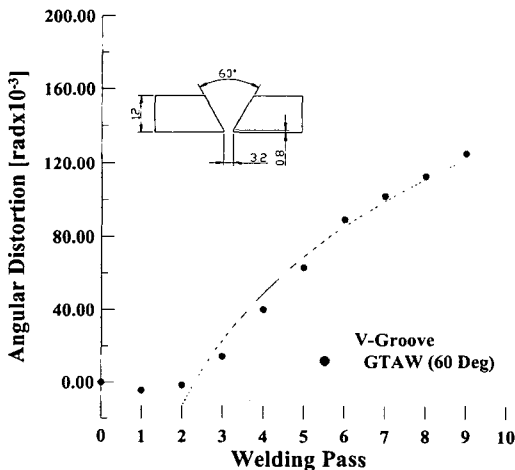


Fig. 4 Changes of angular distortion at the butt joint with welding pass

이상의 다층 개선 용접부의 시험 결과를 바탕으로 용접 입열량(Q) 및 용접부의 유효 목 두께를 고려한 판의 굽힘 강성의 비,  $f(Q/D_b)$ 와 각 변형의 상관 관계를 Fig. 5에서 도시하였다. Fig. 5와 같이 입열량 및 굽힘 강성의 비에 따라 각 변형량의 증감은 천이된다. 그리고, SUS 316LN 용접부의 각 변형은 steel (A-grade)과 비교하여 열 팽창 계수가 steel에 비해 1.5 배 이상 크고, 열 확산 계수는 1/4 정도의 수준이기 때문에 용접시 두께 방향의 온도차의 증가에 따른 수축 하중의 차가 증가함으로써 잔류 각 변형의 크기는 증가한다. 이상의 실험 결과로부터 용접 각 변형과 용접 변수(입열량 및 유효 목 두께)와의 상관 관계를 통하여 오스테나이트계 SUS 다층 용접부의 각 변형 예측 기법을 정식화하였다.

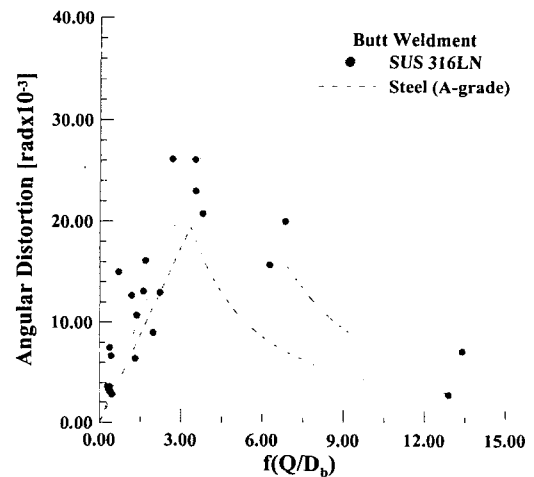


Fig. 5 Relations between  $f(Q/D_b)$  and angular distortion at the butt joint [3]

#### 3.2 각 변형 예측 기법의 타당성 평가

정식화된 각 변형 예측 기법의 타당성 평가를 위하여 다층 개선 용접부를 가진 실 용접 구조물을 대상으로 간이 열 탄성 해석 기법을 이용하여 변형 양상을 평가하였다. Fig. 6은 40°의 다층 개선 용접부를 가진 용접 구조물의 해석 모델을 나타내고 있다. 해석시 upper 및 lower shell 부재와 cylindrical section은 취부 후 fit-up 상태로 가정하였으며 회전 방향의 변위 구속 및 upper 및 lower shell은 대칭 조건을 부여하였다. 40°의 다층 개선 용접부를 위한 하중 조건은 정식화된 각 변형 예측 기법의 결과를 토대로 구현하였다. Fig. 7은 간이 열 탄성 해석에 따

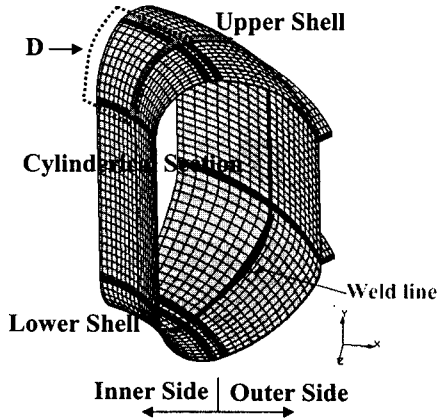


Fig. 6 Analysis model of the welded structure

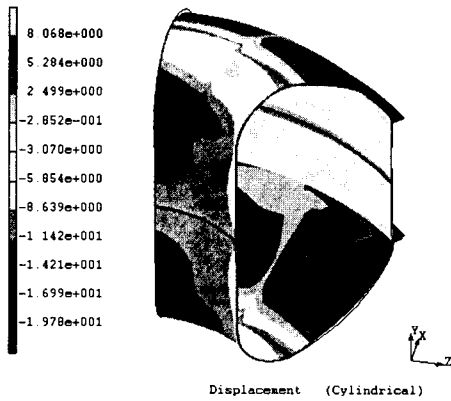


Fig. 7 Contours of the welding distortion of radial dir. at the welded structure

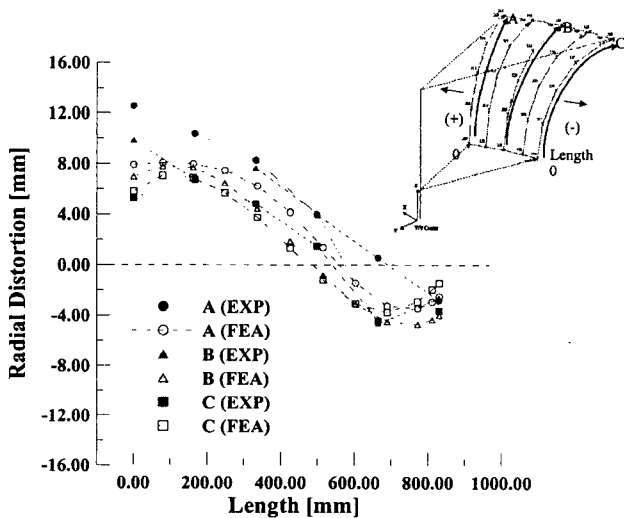


Fig. 8 Comparisons of the radial distortion between EXP and FEA

른 반경 방향의 변형 분포를 도시하고 있다. Fig. 7과 같이 용접 구조물의 inner side는 vessel의 외부로 outer side는 내부로 거치는 각 변형 이 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 8은 upper shell의 "D" 영역에서 반경 방향으로 A - C 구간의 변형 분포를 측정 결과와 해석 결과를 비교하여 도시하였다. Fig. 8과 같이 용접 각 변형에 의한 반경 방향의 변형 분포는 측정 결과와 상당히 유사함을 알 수 있으며 이는 본 연구에서 제안한 각 변형 예측 기법이 타당함을 의미한다.

4. 결 론

오스테나이트계 SUS 다층 개선 용접부의 변형 변형 예측 기법을 제안하기 위하여 유한 요소 해석 및 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SUS 316LN 용접부의 각 변형은 steel (A-grade)과 비교하여 열 팽창 계수가 steel에 비해 1.5배 이상 크고, 열 확산 계수는 1/4 정도의 수준이기 때문에 용접시 두께 방향의 온도 차의 증가에 따른 수축 하중의 차가 증가함으로써 잔류 각 변형의 크기는 증가한다.

2) SUS 316LN의 다층 개선 용접부의 각 변형은 용접 입열량(Q) 및 용접부의 유효 목 두께에 의한 굽힘 강성의 비의 함수로 정의된다. 그리고, 제안된 예측 기법의 타당성 평가로써 수행된 변형 예측 결과는 실 용접 구조물의 변형 양상과 비교적 잘 일치하였다.

참고 문헌

1. Sang Beom Shin, Sung Yun Kim, Dong Ju Lee : A Study on the Welding Deformation of Ship Structures using Simplified Thermo-elastic Analysis, Proceedings of the Annual Meeting of KWS, 274-276, Vo.38 (2001)
2. Sung Yun Kim, Sang Beom Shin : Effect of Groove Shape on the Angular Distortion at the Both Side Multi-pass SA Butt Welds, Proceedings of the Annual Meeting of KWS, 133-135 Vo.37 (2001)
3. Sang Beom Shin : A study on the Distortions of Butt Weldment, Proceedings of the Annual Meeting of KWS, 222-223, Vo.35 (2000)