

## Cr-Mo강의 ESW 및 SAW 용접부의 변형 예측

### Prediction of Welding Distortion at the ES and SA Weldment of Cr-Mo Low Alloy Steel

신상범\*, 이희태\*\*, 이동주\*\*

\* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소/울산대학교

\*\* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

**ABSTRACT** The purpose of this study is to establish the predictive equation of the distortion at the ES and SA weldment of Cr-Mo low alloy steel. In order to do it, the effect of heat input, plate thickness and strip wire width for ESW on the distortion at the ES and SA weldment was evaluated using FEA. Based on the results, the principal factors controlling the distortion of the ES and SA weldment were identified and the predictive equation was established.

## 1. 서 론

압력 용기는 성형 및 용접의 일련의 제작 공정을 통해 제작되는데, 제작시 발생하는 용접 변형은 구조물의 피로 파괴를 촉진하기 때문에 엄격히 제어되고 있다. 압력 용기 제작시 사용되는 소재는 운전 조건 및 분위기에 따라 매우 다양하게 사용되고 있으나, 고온 강도, 내식성, 내수소성 그리고, 내열성을 가진 페라이트 기지의 Cr-Mo계의 저 합금강이 거의 대부분을 차지하고 있다[1]. 그리고, 석유 정제 설비와 같이 우수한 내식성이 요구되는 경우 경제성을 고려하여 STS (stainless steel)를 이용한 overlay 용접의 적용 또한 증가하고 있다. 따라서, 본 고에서는 압력 용기의 재질 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 Cr-Mo강의 overlay 용접을 위한 ESW 및 built-up ring flange를 위한 SAW 용접부의 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고, 용접 변형 예측 기법을 제안하고자 하였다.

분포의 열속이 작용하는 것으로 가정하고 유한 요소 해석을 통하여 평가된 용접 열 영향부와 동일 용접 조건하의 용접부 macro단면에서 계측된 열 영향부의 크기를 비교함으로써 입열 효율을 정의하였다. 개발된 입열 모델을 이용한 용접부의 온도 구배를 평가하기 위한 열 전달 해석시 용접 아크에 의하여 피 용접재로 유입되는 열원 용접선 방향으로의 열 전달이 미미하다는 가정하에 3차원 열 전달 문제를 2차원 문제로 단순화하고 해석 영역을 전술한 열속이 용접부의 표면에 등속으로 작용하는 것으로 가정하였다. 그리고, 변형 해석시 용접선 방향으로의 구속 효과를 고려하여 가열시 모재의 팽창에 의한 역변형을 방지하기 위하여 "on-die" 구속 조건을 적용하였다. 이때, Cr-Mo강의 열적 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 것으로 가정하였으며, 해석 변수는 Table 1과 같이 주판 두께, strip wire의 폭 그리고, 용접 입열량이다.

## 2. 해석 모델 및 방법

Overlay 용접을 위한 ES 용접시 입열 모델은 strip wire의 폭과 동일한 영역에서는 균일 분포의 열속이 작용하며, 양 끝단부에서는 가우시안

Table 1 Analysis variables used for FEA

	Thickness [mm]	Electrode Size [mm]	Heat Input [cal/mm]
ESW	10 - 100t	25~90×0.4t	991-3240
SAW		4.0Ø	921

### 3. 해석 결과

Fig. 1은 overlay 용접시 strip wire의 폭에 따라 용접 입열량(Q)과 면내 강성(Di)의 비와 용접선에 수직한 방향의 수축 변형의 관계를 도시한 것이다. Fig. 1과 같이 용접 입열량 및 주판 두께의 비 (Q/Di)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 그리고, 동일 입열 조건하에서 수축 변형은 strip wire의 폭이 감소함에 따라 다소 증가하지만 그 차이는 매우 미미하다.

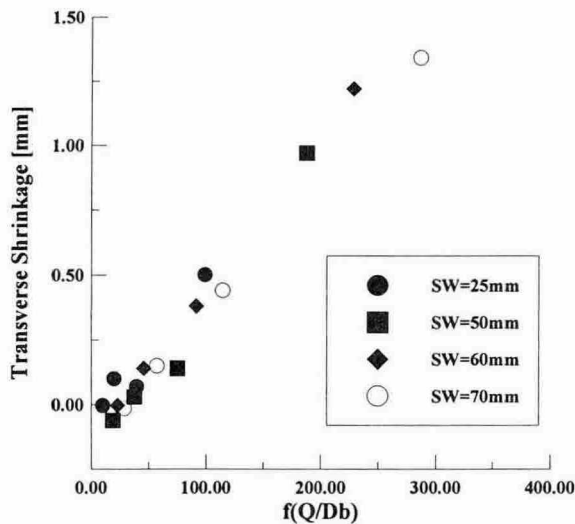


Fig. 1 Changes of transverse shrinkage at the ES weldment with Q/Di and strip wire width

Fig. 2는 용접 입열량(Q)과 주판의 면내 강성(Di)의 비에 따른 횡 수축 결과를 도시한 것이다. SAW 용접부의 횡 수축량 또한 ESW의 용접과 동일하게 용접 입열량 및 주판 두께의 비 (Q/Di)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 이상의 결과를 토대로 overlay 용접시 CrMo강의 횡 수축량을 식(1)과 같이 용접 입열량과 면내 강성의 비(Q/t)에 대한 선형 함수로 정의하였다.

$$\delta_o = f\left(\frac{Q}{D_i}\right) \quad (1)$$

용접선 방향의 수축량은 용접선 방향의 수축 하중과 용접 부재의 용접선 방향의 면내 강성에 의존하는 것으로 알려져 있다[1]. 이에 본 고에서는 용접선 방향의 수축 하중을 유한 요소 해석을

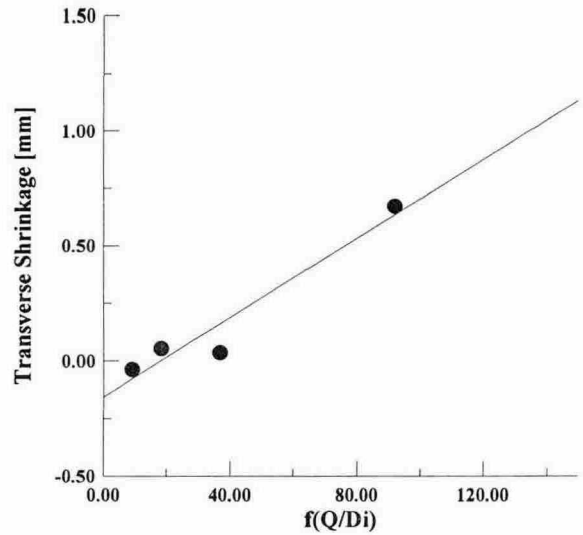


Fig. 2 Changes of transverse shrinkage at the SA weldment with Q/Di

이용하여 평가하고, 그 결과를 Fig. 3, 4에 도시하였다. Fig 3, 4와 같이 overlay와 built-up 용접부에서 용접선 방향의 수축 하중은 용접 입열량과 선형적으로 비례하므로 CrMo강의 overlay와 built-up 용접부의 용접선 방향의 수축 하중 예측식을 식(2)와 같이 정의하였다.

$$SF_L = f(Q) \quad (2)$$

Fig 5와 6은 CrMo강의 ES 및 SA 용접 입열량과 주판 두께에 의한 굽힘 강성의 비(Q/Db)와

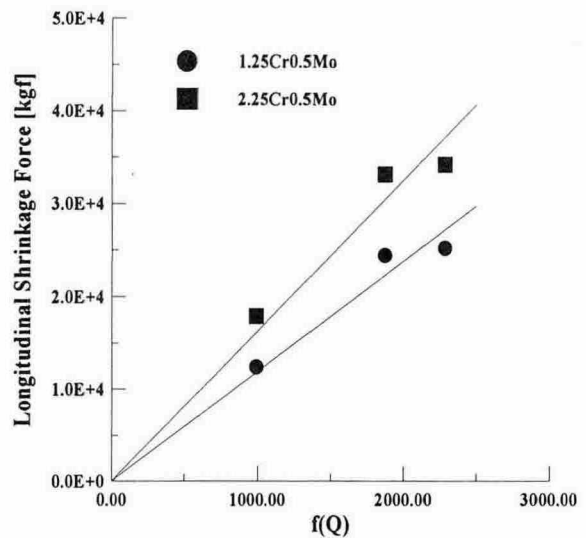


Fig. 3 Changes of longitudinal shrinkage force at the ES weldment with Q

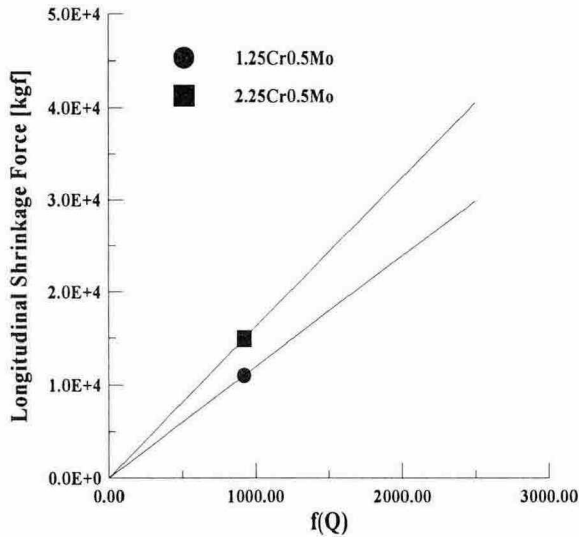


Fig. 4 Changes of longitudinal shrinkage force at the SA weldment with Q

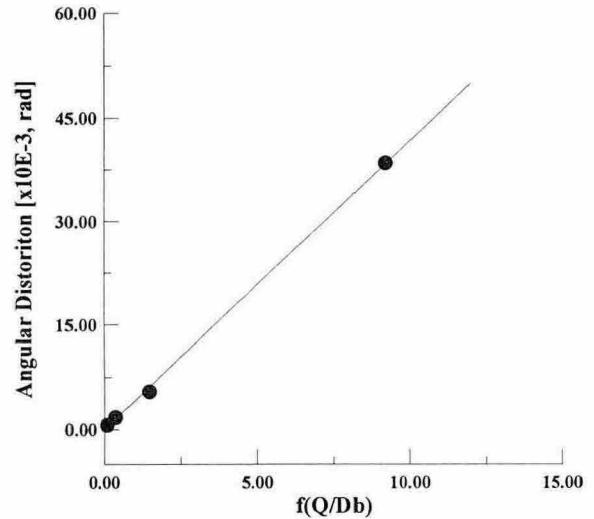


Fig. 6 Changes of angular distortion at the SA weldment with Q/Db

각 변형과의 상관 관계를 도시한 것이다. Figure 5와 같이 overlay 용접부에서 해석 조건 즉, 용접 입열량 및 굽힘 강성의 비(Q/Db)가 10이하인 경우 각 변형은 strip wire의 크기에 관계없이 Q/Db과 선형적인 비례관계가 있음을 알 수 있다. CrMo강의 built-up 용접부의 각 변형 또한 Fig. 6과 같이 overlay 용접부와 동일한 거동 특성을 보인다.

이상의 결과를 토대로 CrMo강의 overlay와 built-up 용접시 용접부의 각 변형 예측식을 식 (6)과 같이 정식화하였다.

$$\phi = f\left(\frac{Q}{Db}\right) \quad (3)$$

#### 4. 결 론

Cr-Mo강의 ESW를 이용한 overlay 용접과 built-up ring flange 시공을 위한 SA 용접부의 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ESW 용접부의 각 변형 및 횡 수축은 각각 용접 입열량과 굽힘 강성 그리고, 면내 강성의 비와 선형적인 비례관계에 있으나, strip wire의 폭에 따른 차이는 매우 미미하다.
2. SAW 용접부의 각 변형 및 횡 수축은 각각 용접 입열량과 굽힘 강성 그리고, 면내 강성의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 용접선 방향의 수축 하중은 용접 입열량에 비례하여 증가한다.

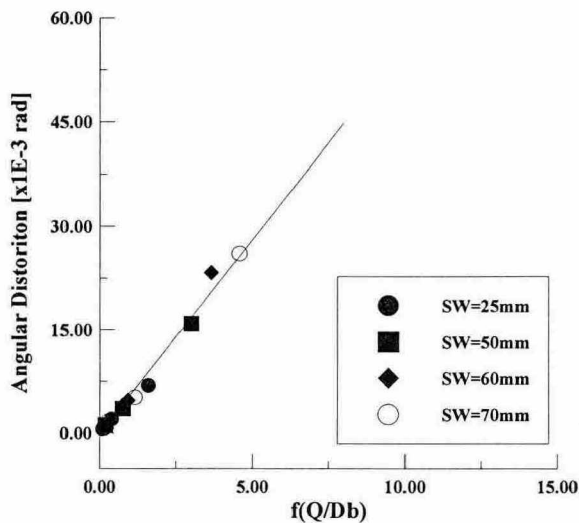


Fig. 5 Changes of angular distortion at the ES weldment with Q/Db and strip wire width

#### 참고문헌

1. 김광수, 노기식, "Cr-Mo계 압력 용기강 용접부의 금속학적 고려사항", Journal of KWS, Vol. 18, No. 1, pp. 30-37