

9% Ni강의 GMA 및 SA 용접부 변형 예측

A Study on the Prediction of the Welding Distortion

for GMA and SA Weldment of 9% Ni Steel

이 희태*, 김 하근, 김 경규

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the behavior of the welding distortion of the 9% Ni steel weldment involving the martensitic phase transformation. In order to do it, an uncoupled thermal-mechanical finite element (FE) model was developed to evaluate the effect of the phase transformation on the distortion for the weldment. High speed quenching dilatometer tests were employed to define the variations of the coefficient of thermal expansion (CTE) with the fraction of the martensitic phase transformation, which strongly depends on the cooling speed after welding. Comprehensive experiments for the welding distortion of the weldment with reference to welding heat input were employed to verify the FE model.

1. 서 론

높은 효율을 가진 청정 에너지인 액화천연가스(LNG)의 소비 증가 추세에 따라 액화된 천연 가스를 저장할 수 있는 LNG 저장탱크의 건설 수요 또한 지속적으로 증가하고 있다. 육상용 LNG 저장탱크는 지하 및 지상에 만들어진 콘크리트 구조물 내부에서 극저온용 소재를 현장 용접하여 제작되기 때문에 지진에 대한 안전성 및 생산성 확보 문제로 대형화를 구현할 수 없었다. 최근에는 이를 극복하기 위해 대형 박스형 구조물을 공장에서 module로 제작한 후 해상에 가라앉혀 생산성과 안전성을 동시에 확보하여 대형화를 구현할 수 있는 신개념의 modular LNG 저장탱크가 개발되어 제작중이다[1]. 비등점이 161.5°C인 LNG의 저장 용기로 주로 사용되는 재료는 9% Ni강, 스테인레스강, 인바, 알루미늄 합금 등과 같이 초저온에서 인성이 우수한 재료들이다[2]. 이중 9% Ni강의 경우 LNG 저장 탱크의 내조(inner tank)로서 전세계적으로 많이 적용되었을 뿐 아니라 modular LNG 저장탱크용 재료로도 적용되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 LNG 저장 탱크 제작시 정도 관리를 위한 생산 공정 설계 시스템을 구축하기 위해 상 변태를 고려한 9% Ni강의 GMA 및 SA 용접시 변형 예측 거동 특성을 규명하고, 이 결과를 토대로 용접 변형을 지배하는 주인자

를 규명하고자 한다.

2. 실험 및 해석 방법

상변태를 고려한 9% Ni강의 용접 변형 해석 모델을 개발하기 위해 high speed quenching dilatometer 시험을 수행하였다. 이 시험은 냉각 속도에 따른 상 분율의 평가를 위함이다. 시험에 적용된 냉각속도는 9% Ni강의 GMA 및 SA 용접 조건에 따른 용접부에서의 열전달 해석 결과를 통해 평가하였으며, 최대 및 최소 냉각속도는 각각 20과 4°C/sec이다.

9% Ni강의 상 변태를 고려한 용접 변형 해석 시 열이력에 따른 오스테나이트와 마르텐사이트의 분율을 계산하고 오스테나이트와 마르텐사이트 분율을 이용하여 상 변태중 발생하는 체적 변화를 고려하였다[3].

3. 실험 및 해석 결과

3.1 실험결과

Fig. 1은 냉각 조건별 dilatometer 실험 결과를 도시한 것이다. 가열시 오스테나이트로의 변태로 인한 체적 감소와 냉각시 마르텐사이트로의 변태로 인한 체적 팽창이 발생하고 있음을 알 수 있

다. 본 고에서는 Fig. 1의 실험 결과를 이용하여 온도에 따른 상 분율과 온도에 따른 변형량을 평가하고, 이를 유한요소해석 모델에 적용하였다. 또한, 상 변태 구간에서는 마르텐사이트 분율의 변화는 Koistinen-Marburger's kinetics 모델을 적용했다[4].

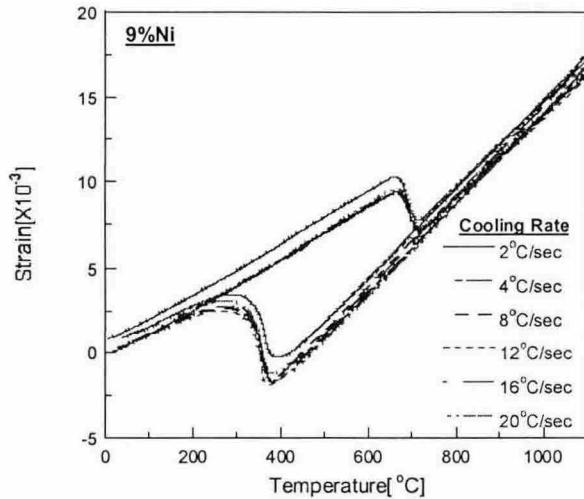


Fig. 1 Variation of thermal strain of 9% Ni steel with cooling rate

3.2 각 변형

Fig. 2는 단위 두께당 용접 입열량의 변화에 따른 9% Ni강의 SA butt 용접부에서의 각 변형량 거동에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. 9% Ni강의 butt 용접부에서의 각 변형량은 일반연강과 동일한 천이 지점을 기준으로 입열량(Q)과 굽힘 강성(Db)의 비가 증가함에 따라 지수적으로 증가하다 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 9% Ni강에 대한 해석 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 단위 두께당 용접 입열량의 변화에 따른 9% Ni강의 GMA fillet 용접부에서의 각 변형량 거동에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. 9% Ni강의 fillet 용접부에서 각 변형량은 용접 입열량과 굽힘 강성의 비(Q/Db)에 따른 butt 용접부의 각 변형량과 거의 동일한 거동 특성을 보인다.

Fig. 2, 3과 같이 입열량과 굽힘 강성의 비가 작은 영역에서 9% Ni강의 각 변형량의 크기가 일반연강보다 작는데, 이는 용접부 상부에서 냉

각중 열 영향부에서 발생하는 상 변태에 의한 체적 팽창으로 인해 수축량이 감소하기 때문이다.

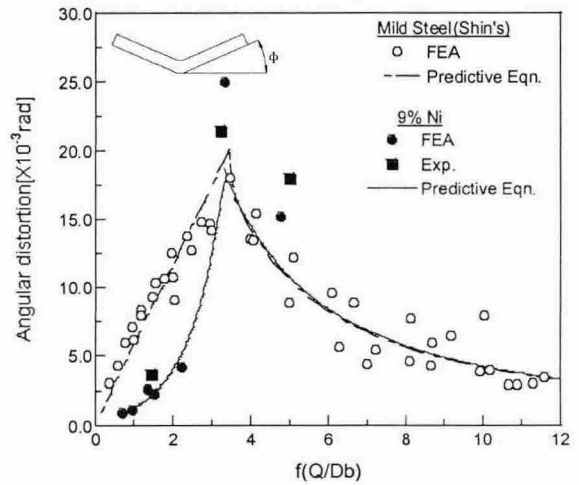


Fig. 2 Changes of angular distortion at the SA butt weldment of 9% Ni steel

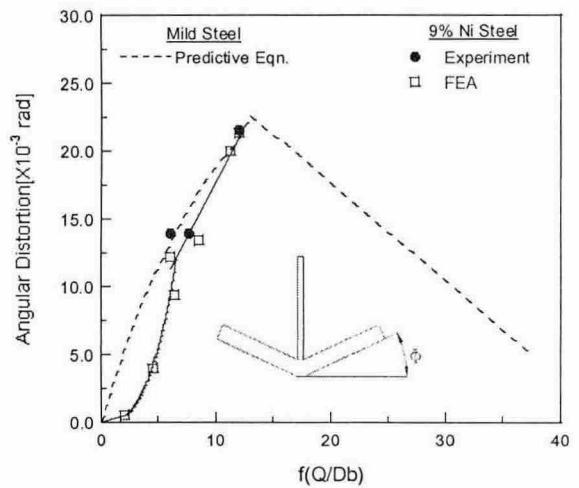


Fig. 3 Changes of angular distortion at the GMA fillet weldment of the 9% Ni steel

3.2 횡 수축

Fig. 4는 단위 두께당 용접 입열량의 변화에 따른 9% Ni강의 SA butt 용접부에서의 횡 수축량 거동에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 4에서 9% Ni강의 butt 용접부에서의 횡 수축량은 면내강성(Di)에 대한 입열량(Q)의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하나 그 크기는 일반연강보다 작음을 알

수 있다.

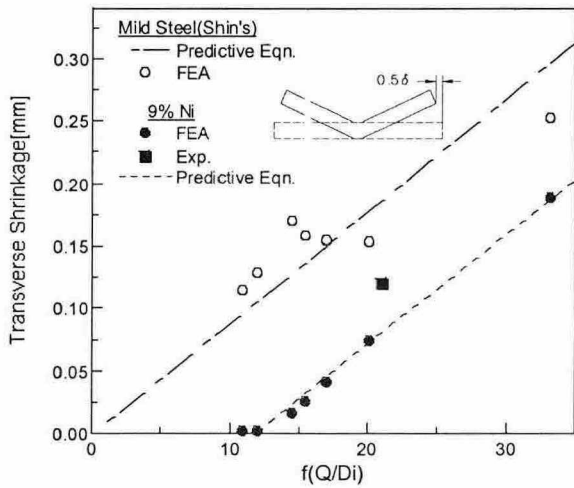


Fig. 4 Changes of transverse shrinkage at the butt weldment of 9% Ni steel with Q/Di

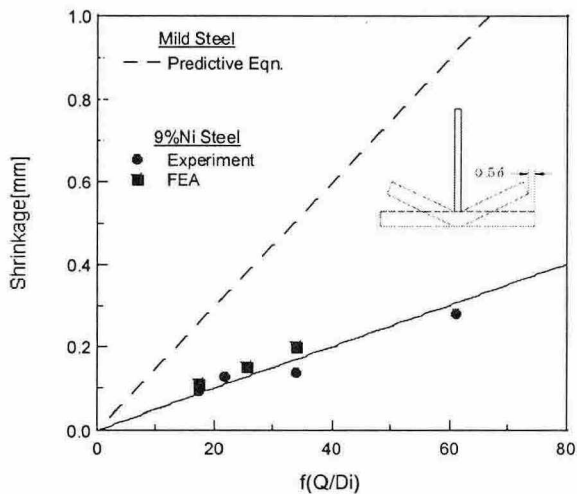


Fig. 5 Changes of transverse shrinkage at the fillet weldment of 9% Ni steel with Q/Di

Fig. 5는 단위 두께당 용접 입열량의 변화에 따른 9% Ni강의 GMA fillet 용접부에서의 횡 수축량 거동에 대한 유한요소해석 및 실험 결과를 비교하여 도시한 것이다. 9% Ni강의 fillet 용접부에서도 butt와 같이 횡 수축량은 면내강성(Di)에 대한 입열량(Q)의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하나 그 크기는 일반연강보다 작음을 알 수 있다.

Fig. 4, 5와 같이 9% Ni강의 수축량이 탄소강

의 수축량보다 작은 이유는 역시 냉각시 발생하는 상 변태에 의한 체적 팽창에 기인한다

4. 결 론

LNG 저장탱크용 9% Ni강의 용접부의 변형 특성을 유한요소해석 및 실험을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 9% Ni강의 SA와 GMA 용접시 각 변형량은 탄소강과 같이 용접입열량과 굽힘강성의 함수로 정의되었다. 또한, 상변태의 영향으로 용접입열량과 굽힘강성의 비가 작은 영역에서의 각 변형량은 일반연강보다 작다.
- 2) 9% Ni강의 SA와 GMA 용접시 횡 수축량은 용접입열량과 면내강성의 함수로 정의되며, 상변태의 영향으로 그 크기는 일반연강보다 작다.

참고문헌

1. L.-E Stridh, L. Karlsson, S. Rigdal, N. Tahlberg, "New Methods in Welding of 9% Nickel Steel for LNG Application", Proceedings of the 58th Annual Assembly of IIW, 2005
2. 장재일등, "LNG 저장탱크 내조용 9% Ni강의 SAW 용접열영향부내 파괴인성 변화 평가", 대한기계학회논문집, 제26권, 제3호, pp. 528~536, 2002
3. ABAQUS Users' Manual Ver 6.4, 2004, ABAQUS Inc.
4. D. P. Koistinen and R. E. Marburger, 1959, Acta Metallurgica, 7, p.59s-60s.