

압력 선체 관통구 용접부의 변형 제어에 관한 연구

A Study on the Distortion Control for the Penetration Weldments of Pressure Hull

김 하근*, 이 희태

현대중공업(주), 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to establish the control method of angular distortion at the weldment of the pressure hull penetration. In order to do it, comprehensive experiment and FEA were performed to evaluate the distortion behavior for the weldment of HY-100. Based on the results, a proper deposit sequence for the both sides X groove penetration weldment was established. In addition, a proper welding sequence was proposed by evaluation of bending restraint intensity with size and position of pressure hull penetration.

1. 서 론

수중함의 압력 선체는 구조 안정성 및 높은 적재 가능 하중이 요구되기 때문에 일반 압력 용기에 비해 변형에 대한 허용 규정 또한 매우 엄격하다. 특히, 압력 선체의 관통구 용접시 발생하는 국부 변형은 수압과 파랑하중 등과 같은 외부 하중 하에서 내구성의 감소를 유발할 뿐 아니라 국부적인 좌굴에 의한 최종 강도의 감소를 수반하므로 이에 대한 제어 방안 선정은 매우 중요하다. 그리고, HY-100강으로 제작되는 압력 선체의 경우 관통구 용접부의 변형 특성은 모재의 높은 탄소 당량에 기인한 용접부의 응고 및 수축시 발생하는 마르텐사이트 상 변태(phase transformation)에 기인하여 용접부의 변형 거동 특성은 일반 탄소강과 다르므로 변형 제어 기법의 정립은 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 압력 선체의 관통구 용접시 변형을 효과적으로 제어하기 위하여 HY-100강 용접부의 변형 거동 특성을 규명하고 이를 토대로 관통구 용접시 적정 용접 적층 순서를 제안하고자 하였다. 그리고, 다수의 관통구 용접에 의한 변형을 효율적으로 제어하기 위하여 관통구의 크기 및 위치별 구속도를 평가함으로써 적정 용접 순서를 제안하고자 하였다.

2. 실험 및 해석 방법

압력 선체 관통구 제작시 용접 변형 거동은

Fig. 1과 같이 SA 용접 기법을 이용하여 용접장과 폭이 모두 500mm인 HY-100강에 대하여 bead-on 용접을 수행하였다. Table 1은 실험시 사용된 용접 조건을 나타내고 있다. 변형 측정은 용접부를 중심으로 폭이 각각 200mm의 gage length를 마킹하고, 최종 용접이 완료되고 용접부가 상온으로 냉각된 후 버어니어 캘리퍼스 및 3차원 측정기를 이용하여 각 변형과 횡 수축을 측정하였다.



Fig. 1 Experiment for SA bead-on welding

Table 1. Welding conditions used for experiment

Thickness [mm]	Current [A]	Voltage [V]	Speed [mm/min]	Heat input [cal/mm]
10~22	500	30	350~640	338~617

Fig. 2는 주판의 bead-on 용접시 발생하는 각 변형 및 횡 수축을 평가하기 위한 해석 모델이다. 유한 요소 해석시 용접선 길이 방향의 열 유동이 없는 것으로 가정하고, 해석 모델의 기하학적 대칭성을 고려하여 1/2 영역에 대해 4절점

평면 요소망을 구성하였다. 열 전달 해석시 자연 대류에 의한 열 손실이 표면 온도에 의존하는 것으로 가정하고, 열 변형 해석시 경계 조건은 가열시 모재의 열 팽창에 의한 역 변형을 제어하기 위하여 "On die" 조건을 적용하였다. 재료 거동은 온도에 의존하며, 가열 및 냉각시 상변태를 고려하였다. 열 전달 및 변형을 위한 열 탄소성 해석은 각각 비 연성된 것으로 가정하였다.

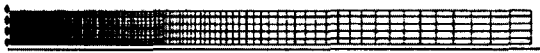


Fig. 2 Mesh design and displacement boundary conditions used for FEA

3. 실험 및 해석 결과

3.1 HY-100강의 변형 거동 특성

Fig. 3은 용접 입열량에 대한 굽힘 강성의 비, Q/Db 에 따른 HY-100강의 각 변형량 거동에 대한 유한 요소 해석 및 실험 결과를 비교 도시한 것이다. Fig. 3과 같이 연강과 HY-100강의 각 변형은 Q/Db 가 증가함에 따라 선형적으로 증가하다가 천이 지점을 기준으로 감소한다. 그러나, Q/Db 가 작은 경우 HY-100강의 각 변형은 연강에 비하여 상대적으로 매우 작다. 이는 Q/Db 가 작은 경우 HY-100강 용접부의 두께 방향으로 냉각시 발생하는 마르텐사이트 변태량의 차이가 상대적으로 큰 반면에 Q/Db 가 증가함에 따라 이러한 차이가 감소하기 때문이다.

Fig. 4는 용접 입열량에 대한 면내 강성의 비, Q/Di 에 따른 연강과 HY-100강의 횡 수축

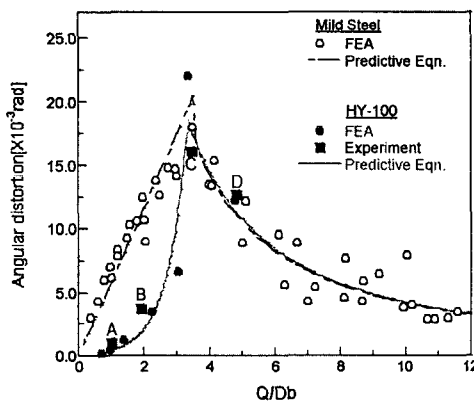


Fig. 3 Changes of angular distortion with Q/Db by FEA and Exp. [1]

량 거동에 대한 결과를 도시하고 있다. Fig. 4와 같이 횡 수축량은 Q/Di 가 증가함에 따라 선형적으로 증가하나 냉각시 마르텐사이트 변태에 의한 체적 팽창으로 인해 그 크기가 연강에 비해 작음을 알 수 있다. 그리고, HY-100강에 대한 실험 결과는 해석 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

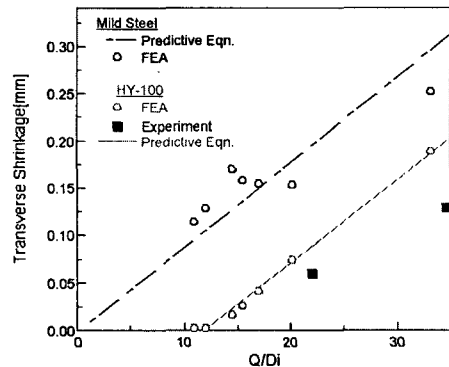


Fig. 4 Changes of transverse shrinkage with Q/Di by FEA and Exp.[1]

3.2 단위 관통구의 적정 용접 적층 순서

HY-100강에 대한 변형 예측 기법을 바탕으로 압력 선체 관통구의 단위 용접부의 변형을 최소화하기 위한 적정 용접 적층 순서를 선정하였다. 제안된 용접 순서는 45°개선부를 먼저 용접하고 5mm 정도 back gouging한 후 55°개선부를 용접하는 것으로 결정하였다. Fig. 5는 관통구의 용접 변형을 제어하기 위하여 선정된 개선 용접부의 적층 순서에 따라 각 변형의 거동을 도시하고 있다. Fig.5와 같이 관통구 용접부에 발생하는 각 변형은 약 0.2×10^{-3} rad 정도로 거의 "0" 수준으로 제어됨을 알 수 있다.

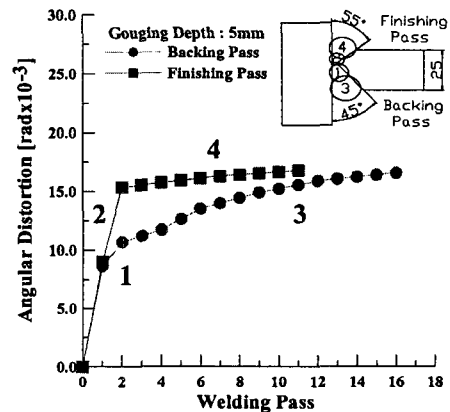
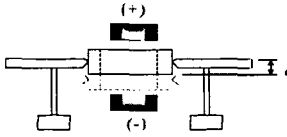


Fig. 5 Changes of angular distortion with deposited welding pass

제안된 용접부의 국부 변형에 대한 타당성을 평가하기 위하여 직경이 396mm인 관통구 용접시 발생하는 국부 변형을 측정하고, 이를 본 연구에서 제안된 HY-100강의 변형 거동 특성을 이용한 간이 열 탄성 해석 결과와 비교하고 이를 Table 2에 나타내었다. Table 2와 같이 관통구 용접시 발생하는 국부 변형에 대한 해석 및 측정 결과는 비교적 잘 일치하고 있을 뿐 아니라 허용 규정인 ±3.0mm를 잘 만족하고 있다.

Table 2. Verification of deposite sequence proposed by this study

Distortion, δ [mm]	FEA	Measured
		-1.85



3.3 각 구속도 평가를 통한 적정용접 순서
 압력 선체 제작시 다수의 관통구에 대한 적정 용접 순서는 각 용접부의 각 구속도(K_0) 평가 결과를 이용하여 선정하였다. Fig. 6은 원형의 관통구의 직경기에 따른 각 구속도의 변화를 도시한 것이다. Fig. 6과 같이 각 구속도는 관통구의 직경이 증가할수록 감소한다. 그리고, Table 3에 나타낸 바와 같이 관통구의 각 위치에 따른 각 구속도는 내부에서 외부로 접근함에 따라 감소한다. 이상의 결과를 토대로 다수 관통구 용접시 중앙에 위치한 직경이 작은 관통구를

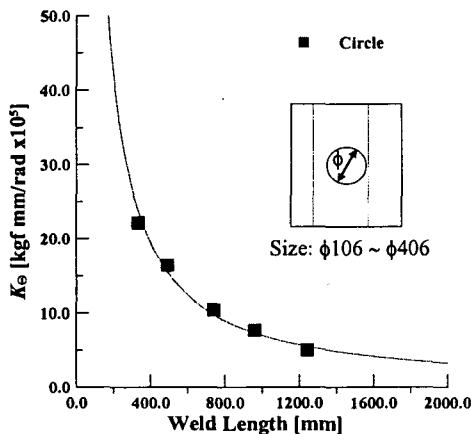
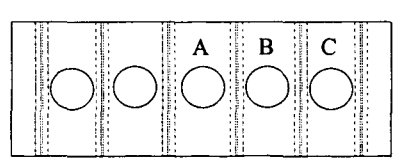


Fig. 6 Changes of K_0 with size of the pressure hull penetration

먼저 용접하고 직경이 큰 외부의 관통구를 최종 용접하는 것으로 용접 순서를 선정하였다.

Table 3. Proper welding sequence with position of the pressure hull penetration

Position	A	B	C
K_0 [kgfmm/radx10 ⁵]	6.9	6.5	5.3
Proper sequence	A → B → C		



4. 결 론

압력 선체 관통구 용접시 변형을 제어하기 위하여 유한 요소 해석 및 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HY-100강의 각 변형 및 횡 수축은 용접 입열량 및 굽힘(면내) 강성의 비의 함수로 정의되며, 일반 탄소강과 달리 상변태에 의한 부피 팽창이 용접 변형에 영향을 미친다.
- 2) 압력 선체 단위 관통구 용접부의 수축에 의한 국부 변형을 최소화하고자 양면 개선 용접부의 적층 순서와 다수의 관통구 용접시 변형 제어를 위한 적정 용접 순서를 제안하였다.

참고문헌

1. H.T. Lee, S.B. Shin, S.Y. Kim, J.G. Youn and D.H. Park : Prediction of Transverse Shrinkage and Distribution of Residual Stress at the HY-100 Weldment, Proceedings of the Annual Meeting of Computer Technology in Welding and Manufacturing, (2004)
2. S.B. Shin and D.J. Lee : Study on the Welding Deformation of Ship Structures using Simplified Thermo-elastic Analysis, Proceedings of the Annual Meeting of KWS, Vol.38 (2001)