

Girth Seam 용접시 변형 제어를 위한 보강재 설치 기준에 관한 연구

A Study on optimization of control technology for distortion by girth seam welding

이희태*, 고성훈

현대중공업(주), 산업 기술 연구소

1. 서 론

압력 용기는 설계, 성형, 단관/복관 용접, 그리고 열처리 및 수압 테스트 공정 등을 통해 완성되며, 각각의 공정에서 압력 용기의 변형을 제어하기 위해 여러 가지 보강재가 설치된다. 원통형 압력 용기의 girth seam 용접시에 사용되는 대표적인 보강재들로는 작업의 용이성을 위한 터닝 롤러(turning roller), 압력 용기 외판의 국적인 변형을 방지하기 위한 덴트 패드(dent pad), 그리고 압력 용기의 진원도를 유지시키기 위한 bracing pipe가 있다.

Girth seam 용접시 사용되는 이들 보강재들의 최적 설치 기준은 설치·제거 작업에 필요한 공수와 제작후 발생한 변형 교정에 필요한 공수 절감이라는 생산성 향상 차원뿐만 아니라 압력 용기의 자중과 미 응고된 용착 금속에 의한 영구 변형 방지를 통한 품질 향상에 많은 영향을 미치기 때문에 반드시 고려되어야 한다.

이에, 본 연구에서는 압력 용기의 girth seam 용접시 변형 제어를 위해 필요한 보강재들에 대한 최적의 보강재 설계 및 취부 기준을 도출하고자 한다.

2. 터닝 롤러와 덴트 패드

일반적으로 덴트 패드는 터닝 롤러 위에 구조물이 놓일 때 사용되기 때문에 터닝 롤러와 덴트 패드의 설치 기준은 동시에 고려되어야 한다. 즉, 터닝 롤러의 용량에 의해 터닝 롤러의 설치 개수가 결정되면 롤러에 작용하는 하중이 계산되고, 이들 하중에 의해 원통형 구조물에 국부적 소성 변형이 발생시키지 않도록 덴트 패드의 두께가 선정하여야 한다. 따라서, 양끝이

막히지 않은 thin-wall 원통에 국부적인 선하중이 작용할 때에 발생하는 응력의 크기에 대한 평가가 반드시 필요하다.

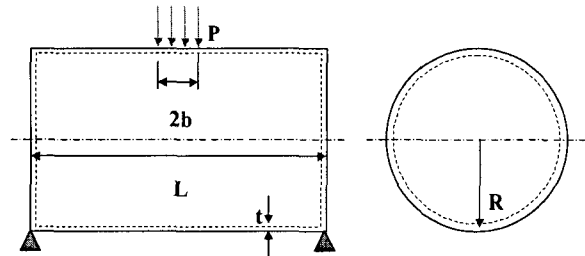


Fig. 1 Cylindrical shell with closed end, end support and concentrated load on a very short length

Odqvist[1]는 Fig. 1과 같이 양끝이 막힌 thin-wall 원통에 국부적인 선하중이 작용할 때 발생하는 길이 및 원주 방향 응력 계산식을 각각 식(1)과 (2)와 같이 선하중의 크기, 반경, 선하중이 작용하는 길이, 그리고 두께의 함수로 정의하였다.

$$\text{Max } \sigma_1 = 0.156B^3PR^{1/4}b^{-1/2}t^{-7/4} \quad (1)$$

$$\text{Max } \sigma_2 = 1.560B^{-1}PR^{1/4}b^{-1/2}t^{-7/4} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } B = [12(1-\nu^2)]^{1/8}$$

본 연구에서는 식(1)과 (2)가 터닝 롤러위에 원통형 압력 용기가 놓일 때 롤러 부근에서 발생하는 응력 예측식으로 사용 가능한지를 판단하기 위해 유한 요소 해석 결과와 비교하였으며, Fig. 2와 Table 1은 각각 유한 요소 해석을 위한 요소 형상 및 경계 조건과 재료 및 해석 조건을 나타내고 있다.

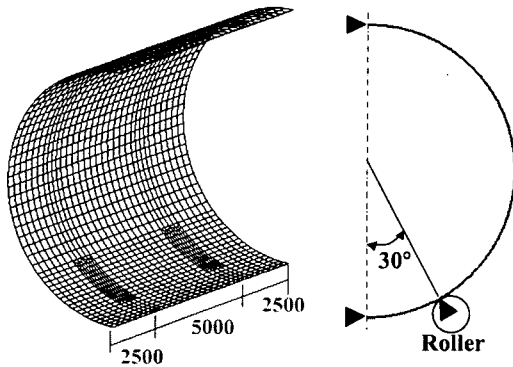


Fig. 2 Analysis model for FEA

Table 1 Model data for FEA[Unit:mm]

Material	Radius	Thickness	Width of Roller(2b)
SA 516-70	2480~4500	20~60	170, 200, 250

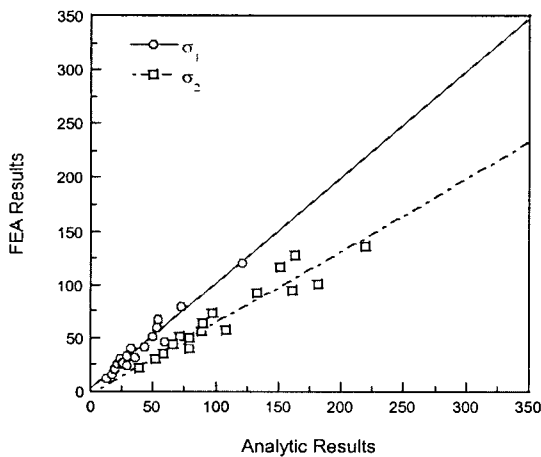
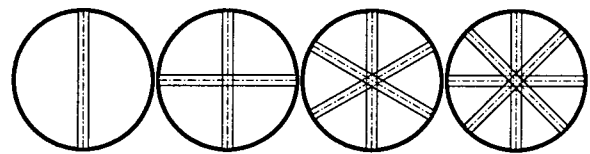


Fig. 3 Comparison of σ_1 and σ_2 obtained from FEA with those from Eqn. (1) and (2)

Fig. 3은 식(1) 및 (2)와 유한 요소 해석 결과의 비교를 나타내고 있는데, 가로축은 계산 결과를, 세로축의 유한 요소 해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 3에서 길이 방향 응력(σ_1)의 경우 식(1)의 계산 결과가 해석 결과와 비교적 잘 일치하고 있으나, 원주 방향 응력(σ_2)의 경우 그렇지 않음을 알 수 있다. 따라서, 터닝 롤러위에 원통형 압력 용기가 놓일 때 롤러 부근에서 발생하는 응력 예측식으로 길이 방향 응력의 경우는 식(1)을 사용할 수 있지만 원주 방향 응력의 경우는 식(2)를 수정해야 함을 알 수 있다.

3. 브레이싱 파이프

브레이싱 파이프는 압력 용기 girth seam 용접시 자체 중량으로 인한 처짐 현상을 방지하는 jig로 파이프형 형강을 등각도로 용접한 후 압력 용기에 부착한다. 브레이싱 파이프는 Fig. 4와 같이 4가지 형태로 제작되는데, 각 브레이싱 type에 따라 변형 제어 효과가 틀리기 때문에 압력 용기가 가지고 있는 고유 강성에 따라 적당한 브레이싱 type이 선정되어야 한다. 일반적으로 브레이싱 개수가 증가할수록 변형 제어 효과는 커지고 브레이싱 파이프에 작용하는 하중 크기는 작아지는데 최적의 브레이싱 파이프 설계를 위해서는 브레이싱 type에 따른 변형 제어 효과 및 브레이싱 파이프에 작용하는 하중에 크기에 대한 정량적인 평가가 필요하다.



(a) B.T.2 (b) B.T.4 (c) B.T.6 (d) B.T.8
Fig. 4 Configuration of bracing types

브레이싱 파이프의 설치 기준이 되는 진원도에 대해 ASME(American Society of Mechanical Engineers)에서는 압력 용기 제작 후 최대 내경과 최소 내경의 차이가 공칭 직경의 1% 이내가 되도록 제안하고 있다[2]. 압력 용기 제작후 발생하는 최대 내경과 최소 내경은 Fig. 5와 같이 각각 $D + \delta_{Major Axis}$ 와 $D - \delta_{Minor Axis}$ 이므로 브레이싱 파이프의 설치 기준은 식(3)과 같이 정의됨을 알 수 있다.

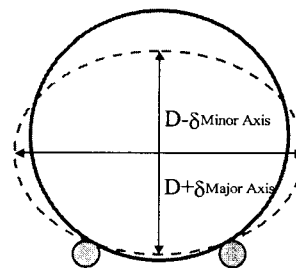


Fig. 5 Definition of $\delta_{Major Axis}$ and $\delta_{Minor Axis}$

$$\delta_{Major Axis} + \delta_{Minor Axis} < 0.01 \times D \tag{3}$$

브레이싱 파이프가 설치된 압력 용기는 터닝 롤러위에서 girth seam 용접을 위해 360° 회전해야 한다. 이 경우, 압력 용기의 회전각에 따라 변형량이 변하기 때문에 브레이싱 파이프는 최대 변형량이 발생하는 회전각에 대해 설치 기준이 정립되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 브레이싱 type별로 압력 용기 회전시의 변형 거동 결과를 이용하여 최대 변형이 발생하는 회전각을 선정하였으며, 선정된 회전각을 기준으로 $\delta_{Major Axis}$ 와 $\delta_{Minor Axis}$ 를 정식화하였다.

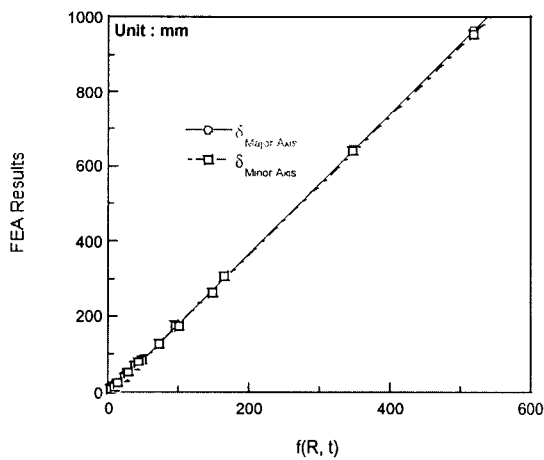


Fig. 6 Comparison between the results of FEA and the function of R and t for distortions

Fig. 6은 브레이싱 type이 B.T 2에서의 $\delta_{Major Axis}$ 와 $\delta_{Minor Axis}$ 에 대한 유한 요소 해석 결과와 압력 용기의 반경과 두께의 함수로 정의한 예측식과의 비교를 나타내고 있다. 정식화 과정을 통해 얻은 식들은 유한 요소 해석 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 다른 브레이싱 type에 대해서도 정식화를 수행하여 변형량 예측식을 개발하였다.

변형량 예측식들은 터닝 롤러간 간격이 5000mm일 때를 기준으로 정식화되었기 때문에 터닝 롤러 간격에 따른 변형량 보정이 필요하다. Fig. 7은 girth 용접시 각 브레이싱 type별 터닝 롤러간 간격에 따른 변형량 변화에 대한 유한 요소 해석 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 Fig. 7에서 얻은 결과를 회귀 분석하여 변형량 보정치를 브레이싱 type과 터닝 롤러간 간격에 대한 함수로 정의함으로써 브레이싱 파이프의 설치 기준을 정식화하였다.

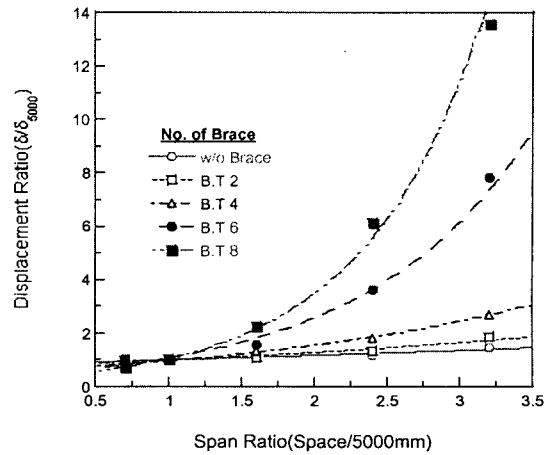


Fig. 7 Change of length factor with span ratio

4. 결 론

압력 용기의 girth seam 용접시 변형 제어를 위해 필요한 보강재들에 대한 최적의 보강재 설계 및 취부 기준을 유한 요소 해석을 통해 도출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 터닝 롤러 및 덴트 패드

유한 요소 해석과 계산식을 이용해 롤러 지지점 부근에서의 발생하는 국부적인 응력을 예측할 수 있는 식을 정식화하였다.

2) 브레이싱 파이프

브레이싱 파이프 설치시 압력 용기에 발생하는 변형량에 대해 유한 요소 해석 결과를 이용하여 각 브레이싱 type별로 압력 용기의 반경, 두께, 그리고 터닝 롤러간 거리에 대한 함수로 정식화하였다.

참고 문헌

1. Odqvist, F. K. G., Om Barverkan Vid Tunna Cylindriska Skäl Ock Karlvggar, Proc. Roy. Swed. Inst. For Eng. Res., No. 164., 19421.
2. ASME Section VIII Div.1 UG-80, Permissible Out-Of-Roundness of Cylindrical, Conical, and Spherical Shells, American Society of Mechanical Engineers, 1995