

다층용접배관의 배관형상이 용접잔류응력분포에 미치는 영향 (The Effect of Pipe Geometry on Welding Residual Stress Distribution of Multi-pass Welded Pipe)

신철순*, 김철한*, 조선영*, 김복기**, 배동호***

* 성균관대대학원

** 명지전문대 기계설계과

*** 성균관대 기계공학부

Key word : 용접잔류응력(welding residual stress), 열전달해석(heat transfer analysis), 열응력해석(thermal stress analysis), 요소재생법(element rebirth technique), 축방향잔류응력(axial residual stress), 원주방향잔류응력(hoop residual stress),

1 서론

플랜트내 유체이동, 천연가스나 유류의 운반 등에 사용되는 배관이음부의 상당수는 용접으로 이루어져 있다. 이러한 배관용접부는 역학적, 전기화학적 측면에서 모재(base metal)에 비하여 상대적으로 열악한 조건에 처하게 되어 설계수명에 이르기 전에 파손됨으로써 많은 인명과 재산의 손실을 가져왔다.⁽¹⁾ 이처럼 용접부가 모재에 비하여 취약한 원인으로는 잔류응력, 금속학적 상이성, 용접형상 및 용접결함에 따른 응력집중 등 여러 가지를 들 수 있다. 이 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 용접잔류응력이라 할 수 있겠다. 용접시 용접입열과 부재의 구속으로 인해 발생하는 용접잔류응력(welding residual stress)은 국부적으로 그 크기가 용접재의 항복강도에 이를 정도로 매우 크기 때문에 역학적으로는 외부하중과 중첩되었을 때 심한 강도저하를 야기시키며, 전기화학적으로는 배관 주위의 부식성환경과 용접부간의 부식반응을 국부적으로 촉진시켜 균열의 시작점을 제공한다.⁽²⁾ 게다가, 배관용접부가 피로하중을 받는 경우, 잔류응력에 의한 역학적, 전기화학적 효과는 서로 상승작용을 일으킴으로써 배관의 수명을 현저히 저하시킬 것임은 명백하다. 따라서, 용접잔류응력분포의 정확한 해석을 통하여 취약부를 파악하는 것이 용접구조물의 안전설계와 신뢰성평가에 있어서 매우 중요한 문제로 대두되었으며, 그에 따라 많은 실험적인 방법들과 해석적인 방법들이 연구 개발되어 왔다.

현재 용접잔류응력 측정을 위한 실험적 방법들로서는 X-ray 회절법, 천공법, 초음파탐상법 등을 들 수 있으나, 이러한 방법들은 측정원리의 특성상 용접부의 표면잔류응력측정에 국한되어 적용될

수 있다.⁽³⁾

그리하여, 많은 연구자들이 용접부 내부의 정확한 잔류응력분포를 파악하기 위한 방법으로 유한요소해석(FEA)에 의한 방법을 이용해 왔다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 현재에는 해석기법과 컴퓨터(computer)의 발달에 힘입어 해석결과의 정확도가 높아지고 해석에 소요되는 시간과 비용이 많이 줄어들게 되었다.

따라서, 본 연구에서는 다층배관용접부의 배관형상이 용접잔류응력 분포에 미치는 영향을 FEA를 통하여 해석함으로써, 배관용접부의 안전설계, 파손원인분석 등을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 잔류응력해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 다층용접된 두께 30mm의 배관에 대하여 직경이 100, 254, 600, 1200, 2400mm인 5가지 모델(model)을 가지고 유한요소법에 의한 잔류응력 해석을 수행하였다.

유한요소해석(FEA)에 사용된 모델은 Fig. 1과 같이 용접부의 단면을 NITAL용액으로 에칭(etching)한 후 비드(bead)의 형상을 파악하고 IDEAS를 이용하여 실제와 같이 재현하였다.

배관의 재질은 각종 플랜트의 배관재로서 널리 이용되고 있는 A106 Gr B강으로서 화학성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

용접개선은 ASME B16.25에 의거 컴파운드 베벨(compound bevel)의 형태로 NC선반으로 정밀가공 하였다. 그리고 1번째 패스(pass)는 양질의 비드(bead)를 얻을 수 있는 GTAW를 이용하였

고, 나머지 패스는 FCAW를 이용하여 Table 3과 같은 조건에서 반자동으로 총 24패스의 용접을 하였다. 용접시 패스간 온도는 200℃정도가 되도록 하였다.



Fig. 1 Configuration of FEA model

Table 1. Chemical composition of A106 Gr B

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr+Mo	Ni+Cu
0.10	0.86	0.21	0.010	0.004	0.10	0.06	0.39

Table 2. Mechanical properties of A106 Gr B

Tensile	
Y.S.	T.S
367MPa	486MPa

Table 3. Welding conditions and process

A 106 Gr B	GTAW+FCAW	
	GTAW	FCAW
Gas (%)	Ar 99.99	Ar 99.99
flow rate (ℓ/min)	15~20	15~20
Filler metal	ER70S-G	E7016
Current(A)	100~120	190~210
Volts Range(V)	12~13	30~32
Travel speed(cm/min)	8~10	25~30

2.2 해석방법

본 연구에서는 실제의 용접과정을 합리적으로 재현하기 위하여 요소재생법(element rebirth technique)을 이용하여 2차원적으로 용접잔류응력을 해석하였다.

입열모델(heat input model)은 아크(arc)열로 가열된 후 용접비드에서 모델내로의 열전도(conduction)와 모델표면에서 외부로의 열전달에 의해서 냉각이 이루어지는 고유감소입열모델(inherent shrinkage heat source model)을 사용하였다.⁽⁶⁾

먼저 열전달해석(heat transfer analysis)시에는 각각의 패스가 요소재생, 입열, 냉각의 세 과정을 순차적으로 거칠 수 있도록 해석단계를 총 72단계로 구성함으로써 용접과정에서 모델내의 각 요

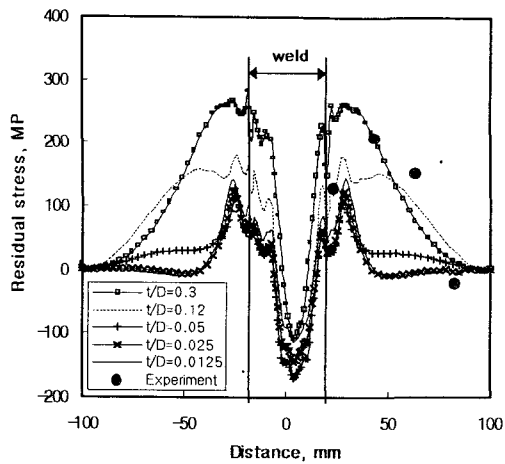
소(element)가 받는 열이력에 관한 데이터를 얻었다. 그리고 열전달 해석으로부터 얻어진 결과를 5가지 모델의 열응력해석(thermal stress analysis)에 동일하게 적용하여 배관의 직경만이 잔류응력 변화에 영향을 미칠 수 있도록 함으로써, 배관형상이 용접잔류응력분포에 미치는 영향을 합리적으로 파악하고자 하였다.

해석에 사용된 코드(code)는 비선형 해(nonlinear solution)의 정확성이 높은 것으로 알려진 HKS사의 ABAQUS implicit이다. 열전달 해석을 위한 요소로는 4절점 열전달 요소(4 node heat transfer element)를 사용하였으며, 응력해석에는 용접시 배관의 구속조건을 만족할 수 있도록 4절점 축대칭 요소(4 node axisymmetric element)를 사용하였다.

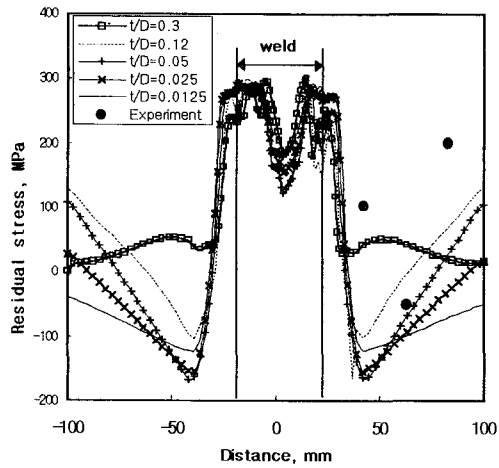
3 해석결과 및 고찰

3.1 외표면에서의 잔류응력분포

Fig. 2는 5가지 해석모델에 대한 배관 외표면(outer surface)의 FEA 결과와 직경 254mm의 실제 용접부에 대하여 천공법을 이용하여 잔류응력을 측정된 결과를 도시한 것이다. 먼저 Fig. 2 (a)의 축방향 잔류응력분포를 살펴보면 마지막 24번째 패스에 의해 생성된 비드의 표면에는 높은 압축잔류응력이, 그리고 열영향부(heat affected zone, HAZ) 부근에서는 높은 인장잔류응력이 존재하는 것을 알 수 있다. 이 때 압축잔류응력의 크기는 직경의 증가에 따라 약간씩 증가하였고 인장잔류응력의 크기는 직경이 증가함에 따라 감소하나 감소폭이 점점 줄어들어 두께에 대한 직경의 비(t/D)가 0.05보다 작을 때에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 2 (b)의 원주방향 잔류응력분포에서는 압축잔류응력이 용접비드부와 약 20mm 정도 떨어진 곳에서 발생하였으며 $t/D=0.3$ 인 경우에는 압축잔류응력이 관찰되지 않았다. 그리고 인장잔류응력의 경우는 용접비드부와 열영향부에 걸쳐 분포되었으며 그 크기와 분포형태는 직경의 변화에 그다지 영향을 받지 않았다. 또한 Fig. 2 (a), (b)의 결과로부터 용접열영향부에서는 축방향과 원주방향 모두 높은 인장잔류응력이 존재하고 있음을 알 수 있다. 즉 이 부분이 내압에 의한 원주방향의 인장력(hoop tension) 및 배관의 외력이나 자중에 의한 굽힘력(bending force)에 대하여 배관의 외표면에서 가장 취약하다는 것을 의미한다.



(a) axial residual stress



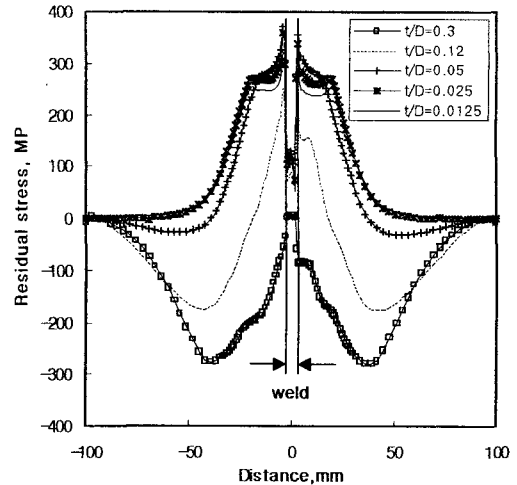
(b) hoop residual stress

Fig. 2 Residual stress distribution of outer surface

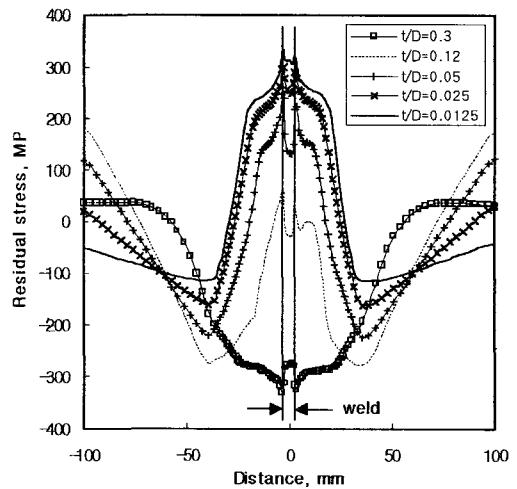
3.2 내표면에서의 잔류응력분포

Fig. 3은 5가지 해석모델에 대한 내표면(inner surface)의 FEA 결과를 도시한 것이다. 외표면의 해석결과에 비해 잔류응력의 분포가 배관의 형상 변화에 훨씬 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. Fig. 3 (a)의 축방향잔류응력 해석결과에서 보는 바와 같이 두께에 비해 직경이 아주 작은 경우 ($t/D=0.3$)에는 내표면 전체에 압축잔류응력장이 분포하게 되나, 직경이 증가함에 따라 잔류응력이 상승하여 내표면의 잔류응력상태는 인장으로 변하게 된다. 그러나 잔류응력의 상승폭은 직경이 증가함에 따라 점점 감소하여 t/D 가 0.05보다 작은 경우에는 현저히 줄어들게 된다. 이러한 경향은 Fig. 3 (b)의 원주방향잔류응력분포에서도 그대로 적용된다. 그러므로 배관의 두께에 비하여 직경이 상대적으로 작은 경우($t/D=0.12$ 이상)에는

비용접부에 비해 역학적으로 안전하지만 직경이 상대적으로 큰 경우에는 인장잔류응력의 영향으로 인해 역학적으로 불리한 상황에 처하게 됨을 알 수 있다. 특히 배관용접부가 운용중인 환경이 부식성인 경우에는 높은 응력상태의 응력부식균열(stress corrosion cracking) 상황에 처하게 되어 용접부의 강도는 현저히 저하될 것이다.



(a) axial residual stress



(b) hoop residual stress

Fig. 3 Residual stress distribution of inner surface

3.3 최대 잔류응력값의 변화

역학적인 관점에서 용접부에서 균열의 시작점이 되는 곳은 최대 인장잔류응력이 존재하는 곳이 될 것이다. 이러한 관점에서 최대 잔류응력의 작용점과 크기에 대한 해석은 매우 중요한 문제이다.

Fig. 4는 직경이 증가함에 따라 배관의 외표면과 내표면에서의 최대 잔류응력값이 어떻게 변화하는가를 도시한 것이다. 최대 인장잔류응력이 나타나는 곳은 $t/D=0.3$ 일 때 내표면을 제외하고는 모두 열영향부 부근이었다. 외표면의 경우, 원주방향의 최대응력값은 직경의 변화에 관계없이 300MPa 정도로 거의 일정한 값을 유지하였으나 축방향의 최대응력값은 t/D 가 0.3~0.05인 영역에서 직경이 증가함에 따라 선형적인 감소세를 보였다. 이와 반대로 내표면의 최대응력값은 축방향과 원주방향 모두 직경의 증가와 함께 선형적인 상승세를 보여 주었다. 특히 축방향의 최대응력값은 직경이 두께에 비하여 상대적으로 작은 영역에서는 외표면이 내표면에 비해 큰 값을 가지지만 직경이 증가함에 따라 그 차이가 점점 줄어들어 t/D 가 0.16이하에서는 내표면이 외표면에 비하여 더 큰 값을 가지게 된다. 그리고 내표면의 원주방향 최대응력값은 직경의 증가와 함께 상승하여 t/D 가 0.025에 이르면 외표면과 거의 같은 값을 나타내었다. 그러므로 배관용접부에 있어서 두께에 비해 직경이 상대적으로 작은 경우에는 역학적으로 가장 취약한 부분이 외표면에 존재하며, 직경이 충분히 큰 경우에는 내표면이 외표면에 비해 취약함을 알 수 있다.

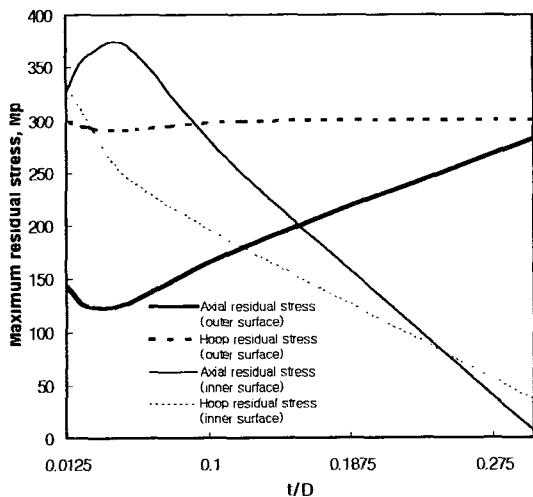


Fig. 4 Maximum residual stress of pipe surface

4. 결론

배관의 형상이 용접잔류응력분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 다중용접된 두께 30mm의 배관에 대하여 직경이 100, 254, 600, 1200, 2400mm

인 5가지 모델(model)을 가지고 유한요소법에 의한 잔류응력 해석을 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배관의 직경이 커질수록 외표면의 축방향잔류응력은 t/D 가 0.05정도까지 선형적인 감소를 하지만 원주방향잔류응력은 큰 차이가 없었다.
- (2) 내표면의 잔류응력의 경우, 직경이 커질수록 축방향과 원주방향 모두 잔류응력이 증가하였으나, 증가폭은 점점 줄어들어 t/D 가 0.05이하에서는 거의 차이가 없었다.
- (3) 최대 잔류응력이 존재하는 곳은 열영향부 부근으로서 설계시 이 부분에 대한 세심한 고려가 요구된다.
- (4) 두께에 비하여 직경이 작을 때($t/D=0/16$ 이상)에는 외표면이 역학적인 취약부가 되나, 직경이 증가함에 따라 내표면이 역학적으로 불리한 위치에 놓이게 된다.

5. 참고문헌

- (1) “機械・構造物の破損事例と解析技術”, 日本機械學會, pp.185-230, 1984
- (2) ‘應力腐食割れ事例の對策と解析’, 日本材料學會, pp.40-60, 1978
- (3) ‘Handbook on Experimental Mechanics’, SEM, pp. 785-823, 1993
- (4) Shim. Y. L., Feng, Z., Lee, S. G., Kim, D. S., Jaeger, J. J., Papritan, J. C. and Tsai, C. L., “Determination of Residual Stresses in Thick-Section Weldment”, *Welding Journal*, Vol. 71, No. 9, pp. 305 - 312, 1992
- (5) K. Masubuchi, “Analysis of Welded Structure”, Pergamon Press, pp. 148-188, 1980
- (6) D. H. Bae, et al, “Effects of Heat Source Models in Numerical Analysis for Transient Thermal History and Residual Stresses”, *Proceedings of Taiwan International Welding Conference '98*, pp. 125 - 130, 1998