

고압증기도관의 포복수명에 주는 용접잔류응력의 영향

김일진, 리영섭

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서 최첨단돌파전을 힘있게 벌려 경제발전과 국방력강화, 인민생활향상에 이바지하는 가치있는 연구성과들을 많이 내놓아야 합니다.》

선행연구[2]에서는 련속손상력학의 방정식을 리용하여 포복조건에서 운영하고있는 고압증기도관에서 변형과 응력의 재분포와 그 수명에 대하여 논의하였다.

선행연구[3]에서는 용접련결부를 가진 고압증기도관의 보다 정확한 포복수명평가를 위하여 운영과정에 생기는 관의 모양변화를 고려하였다. 이를 위하여 ABAQUS프로그램의 모형비선형(GNL)기능을 리용하였으며 부분프로그램 UMAT에 의하여 포복손상방정식을 적용하였다. 용접과정은 높은 온도의 많은 열순환을 포함하는데 이 열에 의하여 열영향구역(HAZ)에서 재료의 포복저항특성은 매우 약해진다. 용접과정의 복잡성으로 하여 여러가지 인자들이 열영향구역의 수명에 영향을 미치게 된다.

특히 소려후에도 무시할수 없는 용접잔류응력이 여전히 남아있게 된다.[1, 4]

본문에서는 용접련결된 $\phi 273\text{mm} \times 36\text{mm}$ 고압증기도관(12Cr1MoV강)에 대한 연구를 통하여 포복수명에 주는 용접잔류응력의 영향에 대하여 논의하였다.

1. 포복손상방정식과 재료특성

포복손상방정식 계산에서 리용된 포복손상방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A \sigma_{eq}^{n-1} S_{ij} / (2 - 2\omega)^n \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = M \sigma_{rup}^{\chi} / [(1 + \phi)(1 - \omega)^{\phi}] \quad (2)$$

여기서 A , n , M , χ , ϕ 는 재료상수, ω ($0 < \omega < 1$)는 손상파라미터, σ_{eq} 는 등가응력, σ_1 은 최대주응력, σ_{rup} 는 $\sigma_{rup} = \alpha \cdot \sigma_1 + (1 - \alpha)\sigma_{eq}$ 로 표시되는 파괴응력, α ($0 < \alpha < 1$)는 3축응력 상태파라미터이다.

손상방정식에서는 손상파라미터 ω 가 1에 도달할 때에 수명이 끝나는것으로 본다.

계산에서 리용된 재료특성 550°C 운영조건에서 12Cr1MoV강재료의 특성값들은 표 1과 같다.

표 1. 550°C 에서 12Cr1MoV강재료의 특성

재료	$A/(\text{MPa}^{-4.95} \cdot \text{h}^{-1})$	n	$M/(\text{MPa}^{-4.9} \cdot \text{h}^{-1})$	χ	ϕ	α	E/MPa	ν
모재	1.732×10^{-16}	4.95	5.998×10^{-15}	4.9	4.5	0.3	173 000	0.3
용접	1.510×10^{-16}	4.95	5.998×10^{-15}	5.07	4.5	0.49	173 000	0.3
HAZ	4.486×10^{-16}	4.95	4.530×10^{-15}	5.8	4.3	0.6	173 000	0.3

2. 계산 및 결과분석

1) 계산

계산모형과 그물분할, 요소형은 선행연구[1]에서와 같다.

요소형은 CAX4R, 요소개수는 12 600개이다.

계산에서 리용된 관의 축대칭모형은 그림 1과 같다.

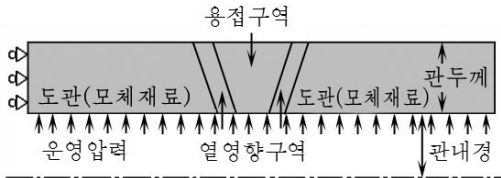


그림 1. 계산에서 리용한 축대칭모형

초기응력분포는 그림 2와 같다.

경계조건으로서 그림 1에서 보여주는것처럼 수평방향의 변위만을 고정하였으며 운영시 압력은 12.26MPa로 설정하였다. 모의에서는 각이한 준위의 초기응력에 대한 포복손상과 초기응력을 무시하였을 때의 포복손상을 계산하였다.

포복손상방정식을 해석에 적용하기 위하여 ABAQUS의 부분프로그램 UMAT를 리용하였다. 초기응력으로서 열응력계산방법[4]을 리용하여 얻은 선행연구[1]에서의 값을 리용하였는데 이것을 받아들이기 위하여 부분프로그램 SIGINI를 리용하였다.

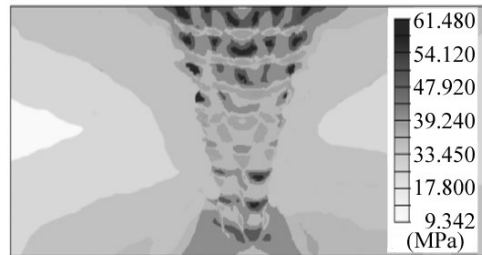


그림 2. $\phi 273\text{mm} \times 36\text{mm}$ 관에서의 초기응력분포

2) 결과분석

손상도분포특성과 거동, 각이한 잔류응력에 따르는 도관의 수명 운영 과정에 포복에 의하여 완전히 손상되었을 때 $\phi 273\text{mm} \times 36\text{mm}$ 관의 손상분포는 그림 3과 같다.

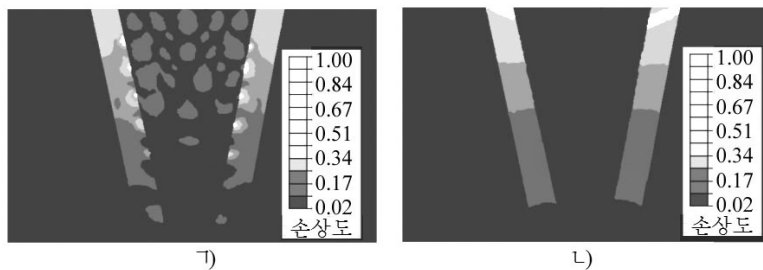


그림 3. $\phi 273\text{mm} \times 36\text{mm}$ 관에서의 손상분포

7) 잔류응력을 고려한 경우, 2) 잔류응력을 무시한 경우

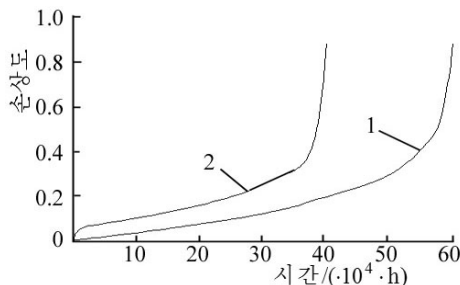


그림 4. 시간에 따르는 손상도의 변화

1- 잔류응력을 무시한 경우,
2- 잔류응력을 고려한 경우

그림 3에서 보는바와 같이 손상값은 세 재료구역들중 열영향구역에서 제일 크다.

손상은 잔류응력을 고려한 경우와 무시한 경우 다같이 바깥경계에서 크며 내부경계로 가면서 작아진다. 잔류응력을 고려한 경우 손상값은 용접구역과 열영향구역의 경계에서 먼저 1에 도달한다.

손상값이 제일 먼저 1에 도달한 요소에서 시간에 따르는 손상의 거동은 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이 잔류응력을 고려한

경우 손상의 증가속도는 초기에 매우 크며 점차 감소하여 일정한 값을 유지하다가 파손 시간의 근방에 이르러 급격히 증가한다. 잔류응력을 무시한 경우의 곡선에서는 운영과정에 일정한 속도값을 유지하다가 파손시간의 근방에 이르러 급격히 증가한다.

표 2에 보여준것처럼 잔류응력의 준위에 따라서 관의 수명은 크게 변한다.

표 2. 각이한 최대잔류주응력에 따르는 수명

소려시간/h	3	4	6	8	12
잔류응력/MPa	97.7	84.9	69.7	61.5	51.4
수명/h	122 229	226 070	321 920	378 460	442 580

잔류응력을 무시했을 때 용접부의 수명은 603 300h이다. 이 값은 12h동안 소려한 관의 수명과 비교하면 매우 큰 차이를 가진다. 이것은 용접부의 수명평가에서 잔류응력의 고려가 매우 중요하다는것을 보여준다.

표 2에서 보는것처럼 도관의 수명을 늘이기 위하여 잔류응력을 낮추는것이 좋다.

응력거동 운영시 잔류응력을 고려한 경우의 시간에 따르는 응력분포는 10 000~15 000h 운영후에 잔류응력을 고려하지 않은 경우의 분포와 거의 같아진다. 즉 운영하여 10 000~15 000h동안에 잔류응력은 완전히 소거된다.

그러나 이 시간동안에 관의 수명에 주는 잔류응력의 영향은 매우 크다.

맺 는 말

1) 잔류응력을 고려한 경우 손상은 용접구역과 접한 열영향구역에서 먼저 1에 이르며 세 재료구역들중 HAZ에서 제일 크고 관외부경계에서 내부경계로 가면서 점차 작아진다.

2) 용접부의 수명에 주는 잔류응력의 영향은 매우 크며 고압증기도관의 수명평가에서 반드시 고려하여야 한다.

3) 잔류응력의 값에 따라 고압증기도관의 수명은 크게 변한다.

참 고 문 헌

- [1] 김일진 등; 기계공학, 3, 19, 주체104(2015).
- [2] T. H. Hyde et al.; Int. J. Pressure Vessel Piping, 76, 925, 2000.
- [3] T. H. Hyde et al.; Int. J. Pressure Vessel Piping, 81, 363, 2012.
- [4] A. H. Yaghi et al.; Int. J. Strain Analysis, 43, 275, 2007.

주체104(2015)년 5월 5일 원고접수

The Effect of Welding Residual Stress on Creep Lifetime of High Pressurized Pipes

Kim Il Jin, Ri Yong Sop

We studied the effect of residual stress on creep lifetime through the simulation of $\phi 273\text{mm} \times 36\text{mm}$ pipe made of 12Cr1MoV steel, using ABAQUS and subroutine UMAT and SIGINI.

Key words: residual stress, creep, lifetime, high pressurized pipe