

Bree 관의 두께방향으로 온도에 따라 변하는 항복강도가 크리프 라체팅에 미치는 영향

*오창식¹, 김윤재²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

The Effect of Temperature Dependent Yield Strength across the thickness of Bree Cylinder on Creep Ratcheting

*C. S. Oh¹, Y. J. Kim²

¹ Graduate, Dept. of Mech. Eng., Korea Univ., ² Dept. of Mech. Eng., Korea Univ.

Key words : Bree cylinder(Bree 관), plasticity(가소성), ratcheting(라체팅), shakedown(셰이크다운), yield strength(항복강도)

1. 서론

원자로에 사용되는 관은 내압과 열응력을 동시에 수반한다. 특히 내부의 고온의 열과 외부의 냉각수와의 온도차이로 인해 큰 열응력이 발생하고, 가동/정지의 운전여건으로 인해 반복적인 열응력이 발생한다. 이러한 반복적인 열하중은 가소성, 라체팅 등의 문제를 야기시킨다. 이러한 문제에 대처하기 위해, ASME 설계코드는 고온 기기 설계에 있어 비탄성 해석의 기초로 Bree 모델^{1,2}을 제시하고 있다. 그러나 Bree 모델은 간단한 가정으로 인해 매우 보수적이다. 예를 들면, 관의 두께방향으로 온도분포가 다르고 그에 따른 재료의 물성이 달라지지만, Bree 모델은 평균온도에 대한 물성을 가지고 두께방향으로 일정하다고 가정하였다.

본 논문에서는 Bree 모델의 가정을 수정하여 두께방향으로 선형적으로 분포된 온도에 따라 항복강도가 달라진다는 가정을 하였다. 이 가정을 통해 새로운 Bree 모델을 유도하였으며, 온도에 따라 변하는 항복강도의 영향을 살펴 보았다.

2. The Uniaxial Stress Model

본 논문에서는 Fig. 1 과 같이 간단한 모델을 만들었다. 관의 길이는 매우 길어 끝단의 영향을 없다. 평균반지름은 r 이며 두께는 $2w$ 이다. Bree 관은 일정한 내압 P 를 받고, ΔT 의 반복적인 열하중을 받는다. 이때 열유량은 두께방향으로 일정하며, 원주방향 응력만 존재한다. 또한 두께방향으로 온도에 따라 항복강도가 선형적으로 변한다. 재료는 탄성-완전소성 재료로 가정하였다. 내압에 의한 원주방향 응력과 열응력은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_p = \frac{Pr}{2w}, \quad \sigma_t = \frac{E\alpha\Delta T}{2} \left(\frac{x}{w} \right) \quad (-1 \leq x \leq 1) \quad (1)$$

따라서 Bree 관에 작용하는 전체 응력은 다음과 같다.

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_t \quad (2)$$

Bree 관은 축방향 응력이 존재하지 않기 때문에 굽힘하중의 합이 0 이다. 실제 축방향 응력이 존재할 때의 응력은 원주방향 응력만 존재할 때보다 낮은 응력을 나타내기 때문에 이 가정은 허용할만 하다. 따라서 원주방향의 평균응력 조건만을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{-1}^1 \sigma d \left(\frac{x}{w} \right) = 2\sigma_p \quad (3)$$

본 논문에서는 ψ , X , Y 의 무차원 변수를 도입하였다. ψ 는 최대 항복강도비이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \frac{\sigma_{yH}}{\sigma_{yL}} \quad (4)$$

이것은 온도가 가장 높은 영역의 항복강도 σ_{yH} 와 온도가 가장 낮은 영역의 항복강도 σ_{yL} 의 비를 나타낸다. ψ 가 1 이 되면 두께방향으로 항복강도가 σ_{yH} 로 일정하게 된다.

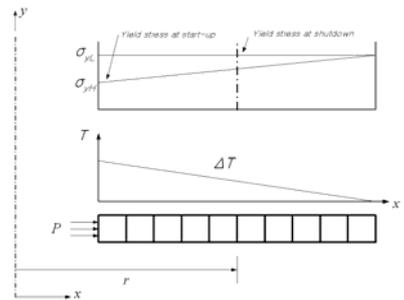


Fig. 1 Schematic diagram of Bree cylinder including temperature gradient and temperature dependent yield stress across thickness.

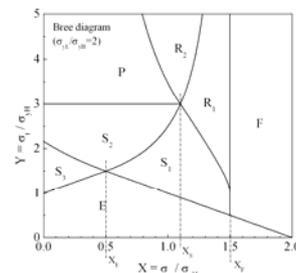


Fig. 2 Stress Regimes for temperature dependent yield strength as $\psi=2$.

X 와 Y 는 원주방향 응력과 열응력을 σ_{yH} 에 대한 비로 각각 나타낸 것이며, 다음과 같이 표현된다.

$$X = \sigma_p / \sigma_{yH}, \quad Y = \sigma_t / \sigma_{yH} \quad (5)$$

3. Solution of Stress Regimes

제 2 절의 조건과 변수를 이용하여 유도한 새로운 Bree 선도가 Fig. 2 에 나타나 있다. 각 영역간의 경계에 대한 설명 및 경계식은 다음에 나타내었으며, 자세한 유도는 지면상 생략하였다.

Elastic Regimes

Fig. 3(a)-(b)는 탄성영역 경계의 응력상태를 보여준다. Fig. 3(a)는 내벽의 응력, Fig. 3(b)는 외벽의 응력이 항복강도에 도달한 경우를 나타낸다. 따라서 탄성영역의 경계는 두 부분으로 나뉘며 다음과 같이 표현된다.

$$Y - X = 1 \quad (0 \leq X \leq \frac{\psi-1}{2} : \text{yield on the inner wall in compression}) \quad (6)$$

$$Y + X = \psi \quad (\frac{\psi-1}{2} \leq X \leq \psi : \text{yield on the outer wall in tension}) \quad (7)$$

Boundary between S_1 & S_2 or R_1 & R_2

Fig. 3(c)는 S_1 과 S_2 영역의 경계에서의 응력상태를 보여주는 한 예이다. 아랫첨자 "1"은 외벽에서, "2"는 내외벽 모두 셰이크다운 또는 라체팅이 발생함을 의미한다. 따라서 열응력이 작용할 때, S_1 과 S_2 또는 R_1 과 R_2 의 경계에서는 내벽($x=-1$)에서의 응력이 압축상태의 항복응력과 같아야 한다.

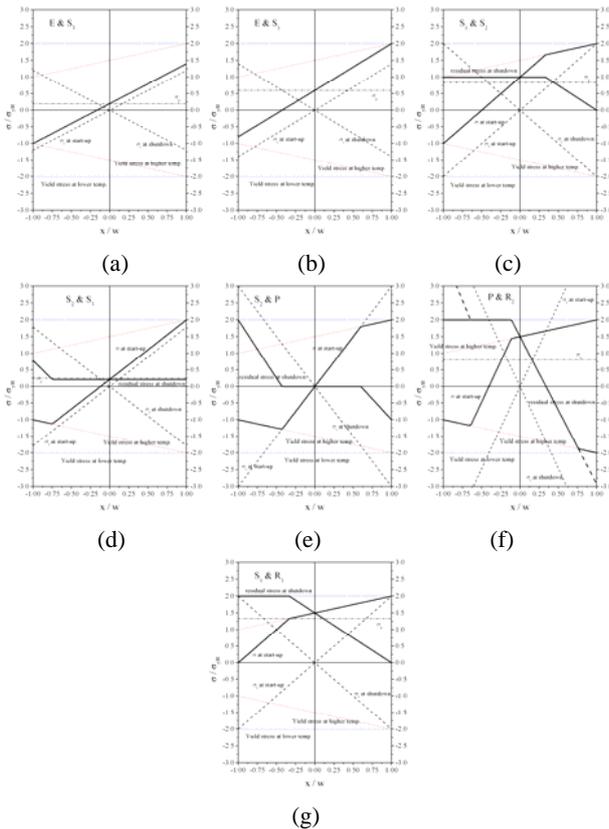


Fig. 3 Stress distribution at the boundary between (a) E&S₃, (b) E&S₁, (c) S₁&S₂, (d) S₂&S₃, (e) S₂&P, (f) P&R₂ and (g) S₁&R₁.

경계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[(\psi + 1) - 2X][2Y - (\psi - 1)] = 4 \quad (8)$$

Boundary between S₂&S₃

Fig. 3(d)는 S₂와 S₃ 영역의 경계에서의 응력상태를 보여주는 한 예이다. 아랫첨자 “3”은 내벽에서 셰이크다운이 발생함을 의미한다. 따라서 열응력이 작용할 때, S₂와 S₃의 경계에서는 외벽(x=1)에서의 응력이 인장상태의 항복응력과 같아야 한다. 경계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(2X + (\psi + 1))(2Y + (\psi - 1)) = 4\psi^2 \quad (9)$$

Boundary between S₂&P

Fig. 3(e)는 S₂와 P 영역의 경계에서의 응력상태를 보여주는 한 예이다. 열응력이 작용할 때에는 내외벽 모두 항복이 발생하며, 열응력이 사라진 경우에는 내벽에서 σ_{yL} 과 같아짐을 알 수 있다. 이러한 응력상태는 Y=3인 경우이며, 경계식은 다음과 같다.

$$Y = 1 + \psi \quad (10)$$

이 응력상태는 일정한 압력의 증가까지 계속되며, 그 한계는 식 (8)과 (10)를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_S = \frac{\psi^2 + 4\psi - 1}{2(\psi + 3)} \quad (11)$$

Boundary between P&R₂

Fig. 3(f)는 P와 R₂ 영역의 경계에서의 응력상태를 보여주는 한 예이다. 열응력이 사라진 후의 잔류응력중 수평으로 분포된 응력이 σ_{yL} 과 같아짐을 알 수 있다. 이 수평으로 분포된 잔류응력이 항복응력보다 커지면 두번째 싸이클부터 압축잔류변형과 인장잔류변형의 크기가 다른 라쳇팅이 발생한다. 경계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$4X - (\psi - 1) = \frac{8\psi(\psi + 1) - (\psi - 1)(5\psi^2 + 2\psi + 1)}{[2Y - (\psi - 1)][2Y + (\psi - 1)]} \quad (12)$$

Boundary between S₁&R₁

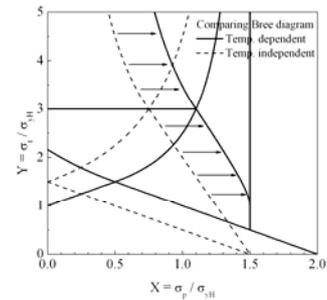


Fig. 4 Effect of temperature dependent yield strength across the thickness.

Fig. 3(g)는 S₁과 R₁ 영역의 경계에서의 응력상태를 보여주는 한 예이다. 열응력이 가해질 때, 외벽에서부터 항복이 발생하여야 하며, 열응력이 사라진후의 잔류응력중 수평으로 분포된 응력이 σ_{yL} 과 같아야 한다. 경계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$2(\psi - x) = \frac{Y^2}{2Y - (\psi - 1)} \quad (13)$$

F Regime

압력에 의한 원주방향 응력의 크기가 σ_{yH} 와 σ_{yL} 의 평균값보다 크고, 탄성영역의 열응력보다 크면, Bree 관은 벽전체에서 항복이 발생하게 된다. 따라서 F 영역의 경계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_F = \frac{\psi + 1}{2} \quad (14)$$

Comparison of solution with Bree Diagram

Fig. 4는 본 논문에서 유도한 식과 기존의 Bree 식을 $\psi=2$ 인 경우에 대해 비교하여 나타낸 것이다. $\psi=1$ 일 때, 제시한 식은 기존의 Bree 식과 같아진다. 그러나 기존의 Bree 식에서는 평균온도에 대한 항복강도를 기준으로 식을 제시하였기 때문에, Fig. 4에서는 1.5배의 X와 Y를 가진다. 기존의 Bree 식은 압력이 작을 때의 탄성영역은 비보수적이며, 압력이 클 때에는 보수적이다. 본 논문에서 제시한 식에서는 P와 S의 영역이 오른쪽으로 확장되었고 라쳇팅영역(R)은 축소되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존 Bree 식의 가정을 수정하여, 벽두께 방향으로 온도가 변함에 따라 항복강도가 달라지는 관에 대해 새로운 Bree 선도를 제시하였다. 그 결과, 기존의 Bree 선도보다 탄성(E), 셰이크다운(S), 반복소성 영역(P)이 확장됨을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 식은 고온설계를 위한 유용한 가이드라인으로 사용될 수 있을 것이다.

후기

이 연구(논문)는 과학기술원 지원으로 수행하는 원자력 연구개발사업(원자력기초공동연구소)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. Bree, “Elastic-plastic behaviour of thin tubes subjected to internal pressure and intermittent high-heat fluxes with applications to fast-nuclear-reactor fuel elements,” *Journal of Strain Analysis*, **2**, 226-238, 1967.
2. T. E. McGreevy, F. A. Leckie, P. Carter, and D. L. Marriott, “The effect of temperature dependent yield strength on upper bounds for creep ratcheting,” ASME PVP Conf., Vancouver, Canada, 2006.