

홍진완

한국전기연구소

1. 서론

압력용기, 발전용 boiler, 또는 nuclear reactor 등의 여러분야에서 고온피로현상에 대한 문제는 매우 중요시되고 있다.

특히, 고온에서 재료에 반복적인 힘이 가하여 질때 creep 손상 및 피로손상을 동시에 받게 되며 Low Cycle Fatigue에서의 복합적인 creep-피로손상은 매우 심각하다. 이러한 조건하에서 사용되는 구조물 또는 부품들의 정확한 수명예측은 구조물의 안정성 확보에 필수적이라 하겠다.

최근에 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나 creep 변형에 따른 손상이 피로수명에 영향을 주어 파단까지의 cycle수 N_f 값이 감소하고 파단양상이 입계파괴로 일어난다는 현상학적 분석 뿐이고 creep 손상이 피로수명에 어떠한 기구로 영향을 미치는지에 대한 이론은 잘 정립되어 있지 않다. 따라서 좀 더 정확한 피로 수명예측을 위해서는 creep-fatigue하에서의 damage에 관한 미시적생성 및 성장기구를 규명해야 한다고 보아진다.

Hold time이 주어진 고온피로조건하에서 사용되는 재료는 입계의 round type cavity의 생성과 성장에 의하여 피로 수명이 hold time 이 증가할수록 감소하며 파단이 입계파괴로 일어난다(1)고 보고되고 있으며 creep-fatigue 시 파괴가 fatigue crack의 생성과 성장보다 cavity 생성과 성장에 의하여 지배된다(2)고 알려지고 있다. 이에 본 연구에서는 고온에서 최대 응력이 주어진 시간동안 hold되는 조건하에서 피로변형되는 경우 creep시 cavity의 생성과 성장에 대한 이론적 배경을 토대로 creep-fatigue 상호작용을 규명하여 이때의 피로 수명을 예측하고자 한다. Part I에서는 cavity 생성과 입계확산을 통한 cavity 성장을 토대로 수명예측 model을 제시하고 model의 실험조건과 같은 조건하에서의 타인의 실험 결과를 예측한 피로수명과 비교하여 제시한 model의 타당성을 검토하였다. Part I에서는 고온피로의 경우 creep cavity만의 생성과 성장으로 제시된 수명예측 model이나 실제의 경우 피로 crack의 생성과 성장이 수반되므

로 이를 보완하기 위하여 피로 crack과 creep cavity의 상호작용을 고려한 model을 제시하고 타인의 실험결과와 자체실험을 통하여 증명하는 시도를 Part II에 제시하였다.

2. 수명예측

[Part I] Creep cavity생성 및 성장으로부터의 수명예측

Hold time이 가해진 고온피로의 경우 파단이 피로 crack의 생성 및 전파보다는 cavity의 생성과 성장에 의하여 지배되므로 cycle수와 hold time에 따른 round type cavity area 집적의 model을 제안하여 피로수명을 예측하고자 한다.

지금까지 제안된 대표적인 cavity 생성기구로는 가해진 인장응력하에서의 vacancy clustering형성, dislocation pile up, 그리고 입계 활주에 의한 기구 등을 들 수 있으며 생성된 cavity의 양은 소성변형량에 비례하며⁽³⁾ 피로시험시 cycle수가 증가함에 따라 증가한다⁽⁴⁾고 보고되었다. 이로부터 고온피로 시험시 cavity는 vacancy cluster 형성, 입계 또는 second phase particle에 전위집적 그리고 입계활주에 의하여 생성되며 cavity 생성량은 plastic strain range($\Delta\epsilon_p$)와 cycle수(N)에 비례한다고 볼 수 있다. 즉, 생성된 cavity 수 n은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$n = P \Delta\epsilon_p N \quad (1)$$

(여기서 P는 nucleation factor)

고온피로시 hold time 동안 load relaxation이 일어나며 이로부터 소성변형속도를

측정하면 10^{-9} order로 매우 낮은 값을 보이고 있다. 이렇게 낮은 변형속도하에서는 creep cavity의 성장이 vacancy의 입계확산에 의하여 일어난다고 알려지고 있다.⁽⁵⁾

이상의 실험적 사실과 제안에 근거하여 vacancy 입계확산에 의한 cavity 성장의 기구를 묘사한 Hull과 Rimmer의 관계식을⁽⁵⁾ 보정하여 피로수명을 예측하였다.

이상으로부터 유도한 피로수명예측식은 다음과 같다.

$$N = C (\Delta\epsilon_p)^{-3/5} \left[\frac{\exp(-Q_g/RT) \int_0^t (t) \cdot dt}{T} \right]^{-2/5}$$

여기서 T는 온도, Q_g 는 입계확산에 필요한 활성화 에너지, C는 입계 cavitated area를 포함한 상수 그리고 t는 hold time이다. 이의 타당성을 검토하기 위하여 304 stainless steel^(6,7)과 316 stainless steel⁽⁸⁾, CrMov steel⁽⁹⁾, 그리고 13 CrMo44 steel⁽¹⁰⁾의 타인의 피로수명결과와 예측한 피로수명을 그림 1-5에 도시하여 본 결과 실험치와 예측치가 잘 일치함을 보여주고 있다.

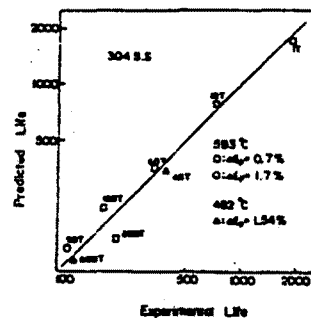


그림 1.

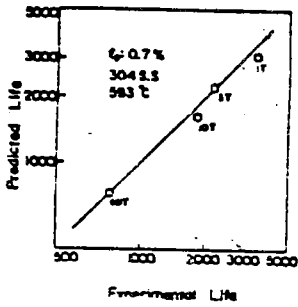


그림 2.

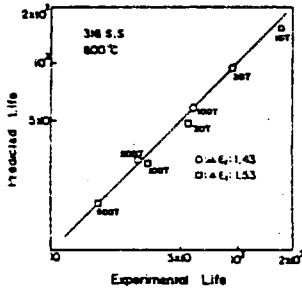


그림 3.

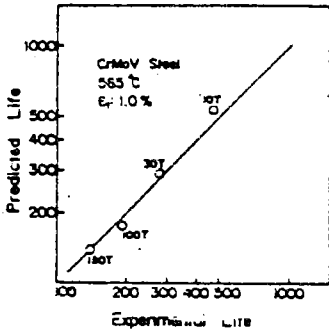


그림 4.

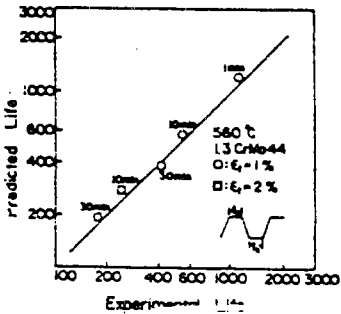


그림 5.

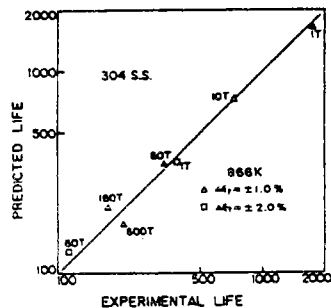
Part I은 고온피로의 경우 creep cavity 만의 생성과 성장으로 피로파단되는 것을 제시한 model이나 실제의 경우 피로 crack의 생성과 전파가 수반되므로 이를 고려하여 주어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 점을 보완하기 위하여 피로 crack과 creep cavity가 생성되고 점진적으로 성장하여 임계조건에 이르면 불안정한 crack의 전파가 시작되고 재료의 수명이 다하게 된다고 하여 피로수명을 예측하는 model을 제시하였다.

피로 crack과 크립 cavity의 상호작용에 의한 수명예측식은 다음과 같다.

$$10\pi P^{1/2} N^{1/2} e^{A_1 \sigma^m} + \left[\frac{32 P^{3/2} \Delta \epsilon_p^{3/2} N^{3/2} D_2 \sigma \int_0^t \sigma(t) dt}{15 R T} \right]^{1/2} = 1$$

즉, 위식에서의 parameter들을 한조건에서 구하면 임의의 조건, 즉 hold time, p 등이 다른 경우의 피로수명을 예측할수 있다. 이의 타당성을 검토하기 위하여 304 stainless steel⁽⁶⁾과 13 CrMo44 steel의 피로수명과 예측된 피로수명치를 비교하여 그림 6,7에 도시하여 본 결과 실험치와 예측치가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.



[Part II] Creep Cavity와 Fatigue Crack의 상호작용을 고려한 수명예측

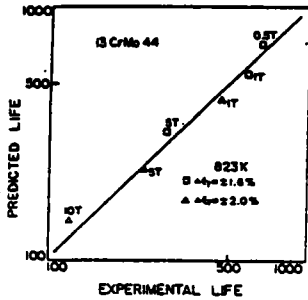


그림 7.

⑦ P.S Maiya, S.Majamdar Met. Trans A. Vol 8A (1977). 1651

⑧ R.A.T.Dawoon, W.J Elder, G.J.Min A.T.Price. Int.Conf. Thermal & High strain Fatigue (1967)

⑨ E.G. Ellison J. of Mech. Eng. Sci. Vol 11 (1969). 318

⑩ E.Lachmann Phd Thesis (1982)

3. 결론

1 피로 crack과 creep cavity 상호작용을 고려한 수명예측식의 예측치와 실험치가 잘 일치한다.

2 LMFBR 사용조건에 따른 압력용기의 수명을 모델의 수명예측식으로 예측할수 있다.

4. 참고문헌

① S.Majamdar and P.S.Maiya Can. Met.Q. Vol 18 (1979) 57.

② S.Baik, Phd thesis (1982)

"Mechanisms of Creep-Fatigue Interaction"

③ D.Lonsdale and P.E.J Flewitt. Met.Sct & Eng. 39 (1979) 217-229.

④ P.O.lattunen, T.Lepisto, G.Kos-torz and G.Goltz Acta. Met. 29 (1981). 969

⑤ D.Hull and D.E.Rimmer, Phil.Mag. 4 (1959). 673

⑥ A.M Ermi, John Moteff. Met. -432-