

자긴가공된 두꺼운 실린더의 피로균열 전파수명평가

이승인* · 김진용* · 정세희** · 고승기***

(1997년 2월 10일 접수)

Fatigue Crack Propagation Life Evaluation of an Autofrettaged Thick-Walled Cylinder

S. I. Lee, J. Y. Kim, S. H. Chung and S. K. Koh

Key Words: Fatigue Crack Propagation Life(피로균열 전파수명), Autofrettage(자긴가공), Residual Stress(잔류응력), Stress Intensity Factor(응력확대계수)

Abstract

To ensure the structural integrity of the autofrettaged thick-walled cylinder subjected to cyclic internal pressure loading, the fatigue crack propagation life of the cylinder was evaluated. Stress intensity factors of the external cracked cylinder due to internal pressure and autofrettage loadings were calculated using the finite element method. The fatigue crack propagation lives of the cylinder based on the fracture mechanics concepts were predicted and compared to the experimental fatigue lives evaluated from the C-shaped simulation specimens. There were good correlations between the predicted and experimental fatigue lives within a factor of 3 for the single and double grooved C-shaped simulation specimens. Predicted fatigue crack propagation lives of the double grooved cylinders were about 1.5~5 times longer than those of the single grooved cylinders depending on the levels of autofrettage.

1. 서 론

반복적인 높은 내압의 영향을 받는 두께가 두꺼운 실린더는 중화학공업, 발전설비, 병기산업 등의 여러 분야에서 사용되는 구조부재로서 작용하중하에서 안전하게 운전되도록 설계되어야 한다. 따라서 이러한 실린더에 가해지는 반복적인 내압과 실린더의 제작시, 또는 사용중에 생성되는 잔류응력의 영향으로 인하여 발생하는 불안정한 피로파괴로부터 실린더의 안전성을 확보하고 사용수명을 연

장시키는 문제는 주요한 공학적 관심사의 하나이다.

내압의 영향을 받는 두께가 두꺼운 실린더의 내경에서는 가장 큰 인장 접선응력(tensile tangential stress)이 발생하므로 일반적으로 내경에서 균열이 형성, 개시된다. 이러한 실린더를 대상으로 내경에 매우 높은 유압을 가하거나 맨드릴을 강제로 내벽에 통과시켜 벽두께를 따라 소성변형을 유도한 후 탄성회복시켜 내경부위에 압축잔류응력을 유입시킴으로서 매우 효과적으로 내경부위에서의 균열의 형성과 전파를 현저히 지연시킬 수 있는 자긴가공(autofrettage)이 수행된다.⁽¹⁾ 그러나 노치, 구멍, 키홈(keyway groove) 등이 사용중 또는 설계시 불가피하게 실린더의 외경부에 존재하게 되는 경

*회원, 전북대학교 대학원 정밀설계공학과

**회원, 전북대학교 정밀기계학과

***회원, 군산대학교 생산기계학과

우, 자진가공에 의하여 외경부에 발생하는 인장잔류응력은 반복적인 내압에 의하여 발생하는 인장응력과 동시에 작용하게 되므로 이러한 불연속부에서 응력이 집중하게 되고 피로균열의 생성과 전파를 촉진시킴으로써 실린더의 피로수명을 감소시키게 된다.⁽²⁾

일반적으로 부재나 구조물의 피로수명은 피로균열이 발생할 때까지의 생성수명과 피로균열의 전파로 인한 수명의 합으로 평가된다. 소성변형을 동반하며 짧은 수명을 보이는 저주기 피로(low cycle fatigue) 거동에서 피로균열의 생성수명은 변형률-수명(strain-life) 방법에 근거하여 예측되고, 그 전파수명은 균열의 전파속도와 응력확대계수를 이용하는 파괴역학적인 방법에 의하여 예측될 수 있다.

지금까지 자진가공된 두꺼운 실린더의 내, 외경부를 대상으로 수행된 연구들^(3~6)의 대부분은 응력해석이나 외경 홈뿌리(external groove root) 부분에서 응력집중에 따른 피로균열의 생성거동에 관한 것이며 균열의 생성 후 전파거동에 대한 연구는 거의 드문 실정이다.

본 연구는 반복적인 내압을 받는 자진가공된 실린더의 피로수명 향상을 위한 연구의 일환으로서 수행되었다. 여기서 채택된 실린더는 자진가공에 의한 잔류응력과 반복적인 내압에 의하여 외경홈의 뿌리부위에서 매우 큰 응력집중을 받게 되며, 국부적인 소성변형과 함께 저주기 피로파괴의 가능성이 매우 높아지게 된다. 따라서 이러한 실린더의 피로수명을 향상시키기 위해서는 기존의 날카로운 외경홈에 대한 형상 변경이 요구되었으며, 그 외경홈부위에서 최대 응력을 이완시킬 수 있는 최적형상의 실린더로서 이중홈 형상이 선택되었다. 이때, 이중홈 실린더의 제작을 위한 설계변수(design variable)인 홈의 폭과 그 사이폭, 홈의 깊이, 홈뿌리의 반경을 구하는 최적화 절차는 연속적 비구속 최소화방법(sequential unconstraint minimization technique)을 이용한 ANSYS의 최적화 모듈을 사용하여 수행되었다. 외경의 키와 키홈이 두꺼운 실린더에 작용하는 토크로부터 충분한 강도를 갖도록 제한조건내에서 4가지 설계변수중 임의의 1가지를 선택하고 연속적으로 그 크기를 변경시켜 가면서 최저의 응력수준을 갖는 이중홈 형상의 실린더가 설계되었다.⁽⁷⁾

기존의 단일홈 형상과 비교하여 이중홈 형상의

실린더를 이용하므로써 외경홈에서 개시되는 피로균열의 생성수명(fatigue crack initiation life)이 현저히 연장될 수 있었으며, 이러한 피로균열의 생성수명에 관한 연구⁽⁸⁾에 이어서 균열개시 후 파괴될 때 까지의 전파수명을 예측, 평가하고 총 피로수명에서 이들 생성수명과 전파수명이 차지하는 기여도를 검토해 봄으로써 불안정 파괴로부터 실린더의 안전한 사용을 확보하고 그 잔여수명을 예측하기 위하여 본 연구를 수행하게 되었다.

본 연구에서는 434 MPa의 매우 높은 내압을 반복적으로 받는 자진가공된 두꺼운 실린더를 대상으로 유한요소법을 이용한 응력해석을 수행하고 응력확대계수를 계산하였다. 이어서 파괴역학적인 방법에 근거하여 실린더의 피로균열 전파수명을 예측하고, 두꺼운 실린더로부터 채취, 제작된 C형 시물레이션 시험편을 이용하여 실험으로부터 얻어진 수명과 비교하였다.

2. 내압 및 자진가공 잔류응력에 의한 응력확대계수

본 연구에서 사용된 두꺼운 실린더의 형상은 Fig. 1과 같다. 내압과 자진가공 잔류응력의 영향을 받으며, 외경부에 반경방향의 균열을 내포한 두꺼운 실린더의 응력확대계수는 중첩원리를 이용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$K_I = K_{ip} + K_{res} \quad (1)$$

위식에서 K_{ip} 는 내압의 영향을 받을 때의 응력확대계수이며, K_{res} 는 자진가공 잔류응력을 받을 때의 응력확대계수이다. 이 같은 응력확대계수의 해

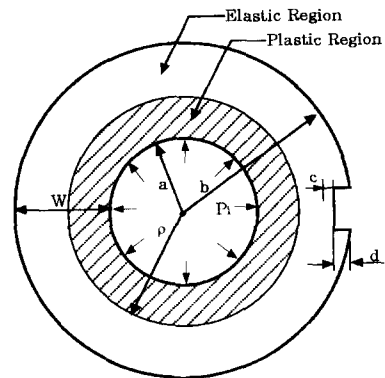


Fig. 1 External grooved thick-walled cylinder.

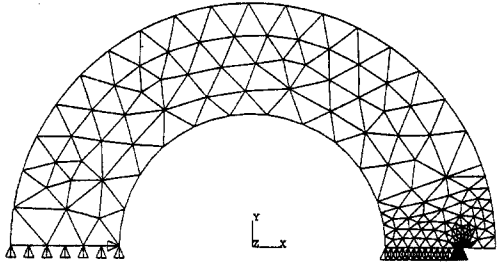


Fig. 2 Finite element model of thick-walled cylinder with an external crack.

는 각각 ANSYS 유한요소 프로그램의 2차원 6절점 삼각형요소(2-dimensional 6-noded triangular element)를 이용하여 얻어졌으며, 균열선단에서의 응력특이성을 고려하여 특이요소(singular element)가 사용되었다. 이때, 균열선단의 요소의 크기는 0.4로 하였고, 균열면을 따라 경로(path)를 결정하고 그 경로의 최초 절점들 균열선단의 절점(crack tip node)으로 정한 후, 균열선단의 변위에 따라 응력확대계수가 계산되도록 하였다. Fig. 2는 외경균열을 내포한 두꺼운 실린더의 유한요소 모델을 나타내고 있다.

434 MPa의 내압을 받는 경우, 내압에 의한 응력확대계수는 벽두께(W)에 대한 균열길이(c)비, $c/W \leq 0.6$ 범위에서 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{ip} = \sigma_{OD} \cdot \sqrt{\pi c} \cdot f\left(\frac{c}{W}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_{OD} = 2P_i \frac{a^2}{b^2 - a^2} \quad (3)$$

$$f\left(\frac{c}{W}\right) = 1.12 + 0.73\left(\frac{c}{W}\right) + 2.61\left(\frac{c}{W}\right)^2 - 1.16\left(\frac{c}{W}\right)^3 + 1.90\left(\frac{c}{W}\right)^4 \quad (4)$$

위식에서, σ_{OD} 는 균열이 존재하지 않는 매끄러운 실린더의 외경에서 내압으로 인해 발생하는 Lamé의 접선응력이며, P_i 는 내압이다. 또한 c/W 에 따른 보정계수는 유한요소법을 통해 얻어진 응력확대계수해를 polynomial curve fitting하고 연속함수 형태로서 식 (4)와 같이 나타내었다.

외경균열을 내포한 자긴가공된 두꺼운 실린더에서 잔류응력을 고려한 응력확대계수의 계산을 위해 중첩법(superposition method)이나 열하중 유사법(thermal loading analogy)을 병행한 유한요소법이 이용된다.^(4, 9) Pu와 Hussain⁽⁴⁾은 열하중(thermal

load)이 자긴가공 잔류응력과 등가인 열응력(thermal stress)을 생성시키는데 이용될 수 있음을 보인다 있으며, 이를 이용한 열하중 유사법은 외경부에 노치나 균열과 같은 불연속부가 존재함으로써 복잡하게 재분포되는 실린더의 잔류응력의 해석에 유용하게 적용될 수 있다. 즉, 자긴가공으로 인하여 발생하는 잔류응력은 열하중에 의한 응력과 일정한 관계로 표현될 수 있으며, 이러한 열하중에 의하여 실린더에 부과되는 온도구배로부터 발생하는 열응력 분포는 자긴가공 잔류응력의 분포와 같게 된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 실린더의 형상모델링이 이루어진 후, 자긴가공 잔류응력과 등가인 열응력을 야기시키는 열하중을 실린더의 내표면($r=a$) 및 각 자긴도에 따른 탄소성 경계면의 반경($r=\rho$)에 적용시킨 상태에서 c/W 에 따라 응력확대계수가 계산되도록 하였다.

100, 75, 50% O.S에 따른 각각의 응력확대계수 해는 $c/W \leq 0.6$ 범위에서 다음식과 같이 나타낼 수 있다. 이때 % O.S(over-strain)는 실린더의 전체 벽두께에 대하여 자긴가공 중에 소성변형이 발생한 벽두께의 비율로 표시되며 자긴도(自緊度)를 의미한다.

$$K_{res} = \sigma_{OD} \cdot \sqrt{\pi c} \cdot f\left(\frac{c}{W}\right) \quad (5)$$

100% O.S의 경우에는 σ_{OD} 가 565 MPa로 얻어졌으며,

$$f\left(\frac{c}{W}\right) = 1.12 - 0.49\left(\frac{c}{W}\right) + 1.41\left(\frac{c}{W}\right)^2 - 1.53\left(\frac{c}{W}\right)^3 + 0.13\left(\frac{c}{W}\right)^4 \quad (6)$$

75% O.S의 경우에는 σ_{OD} 가 330 MPa로 얻어졌으며,

$$f\left(\frac{c}{W}\right) = 1.12 + 0.75\left(\frac{c}{W}\right) + 3.88\left(\frac{c}{W}\right)^2 - 9.96\left(\frac{c}{W}\right)^3 + 5.61\left(\frac{c}{W}\right)^4 \quad (7)$$

50% O.S의 경우에는 σ_{OD} 가 153 MPa로 얻어졌으며,

$$f\left(\frac{c}{W}\right) = 1.12 + 1.23\left(\frac{c}{W}\right) - 3.57\left(\frac{c}{W}\right)^2 + 21.39\left(\frac{c}{W}\right)^3 - 22.69\left(\frac{c}{W}\right)^4 \quad (8)$$

위 식에서, % O.S에 따른 σ_{OD} 는 균열이 존재하

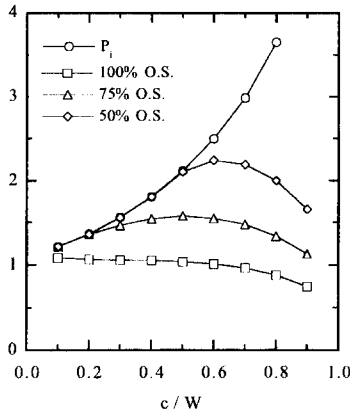


Fig. 3 Stress intensity factors of a cylinder due to internal pressure and autofrettage loading conditions.

지 않는 매끄러운 실린더의 외경부에서 자긴가공으로 인하여 발생하는 점선응력으로써, 이론식⁽¹⁰⁾을 이용하거나 응력확대계수의 계산절차와 동일하게 유한요소법과 열하중 유사법을 이용하여 자긴가공 잔류응력과 등가인 열응력을 야기시키는 열하중을 실린더의 내경(a)과 각 자진도에 따른 탄-소성 반경(ρ)에 적용시켜 발생하는 온도구배에 의한 열응력 해석을 이용하여 얻어진다. c/W 에 따른 보정계수는 각 % O.S에 따라 계산된 응력확대계수해를 polynomial curve fitting하여 연속함수형태로서 식 (6), (7), (8)과 같이 나타내었다.

이같은 계산결과에 따라 얻어진 응력확대계수들은 내압을 받는 경우, c/W 가 증가함에 따라 계속 증가하였으나, 100, 75, 50% O.S로 자긴가공된 경우에는 c/W 가 증가함에 따라 실린더내에서의 잔류응력이 연속적으로 재분포하면서 응력확대계수는 증가하다가 $c/W=0.7$ 에서부터 점차 감소하는 경향을 보였다. 이러한 응력확대계수의 계산결과를 $f(c/W) = K/\sigma_{od} \cdot \sqrt{\pi c}$ 의 무차원변수로 나타내어 보면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 무차원화된 응력확대계수, 즉 보정계수는 내압을 받는 경우에는 c/W 가 증가함에 따라 계속 증가하고 있으나, 자긴가공된 경우에는 서서히 증가하다가 자진도에 따라 어느 크기의 균열길이비 이후에서 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 100% O.S로 자긴가공된 경우에는 균열길이비가 증가함에 따라 서서히 감소하고 있음을 볼 수 있다.

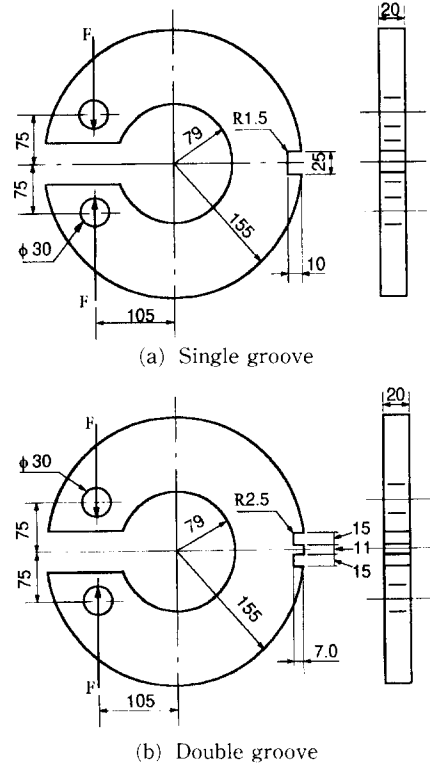


Fig. 4 Simulation fatigue test specimens in this study.

3. 피로균열 전파실험 및 수명평가

자긴가공 잔류응력을 지니며 반복적인 내압을 받는 두꺼운 실린더의 외경부 홈뿌리에서 개시, 성장되는 피로균열의 전파수명을 평가하기 위하여 실제 두꺼운 실린더에 큰 내압을 가하여 피로실험을 수행하기에는 많은 어려움이 동반된다. 본 연구에서는 실제 두꺼운 실린더로부터 직접 채취하여 제작된 단일홈과 이중홈을 지닌 C형 시뮬레이션 시험편을 사용하여 피로균열의 전파수명이 평가되었으며, 이들 시험편의 형상과 크기는 Fig. 4와 같다.

반복적인 내압을 받는 실제 두꺼운 실린더와 시뮬레이션 시험편의 피로균열 전파수명은 피로균열이 진전하는 외경균열에서 응력확대계수의 크기가 가능한 같아지도록 시뮬레이션된다면 근사적으로 동일하다고 가정할 수 있다. 이때, 시험편의 제작시 내재되어 있던 잔류응력이 해방되더라도 외경균열을 내포한 실린더가 받는 내압과 자긴잔류응력을 가능한 유사하게 시뮬레이션할 수 있도록 계산한

피로하중이 시험편에 부과됨으로써 잔류응력을 고려한 피로실험이 수행될 수 있다.

먼저 외경균열을 내포한 C형 시뮬레이션 시험편이 1 kN의 단위하중을 받게 될 때의 응력확대계수는 $c/W \leq 0.6$ 범위에서 유한요소해석을 통해 다음과 같이 얻어졌다.

$$K_t = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{c}{W}\right) \quad (9)$$

$$f\left(\frac{c}{W}\right) = 1.12 + 1.85\left(\frac{c}{W}\right) + 28.29\left(\frac{c}{W}\right)^2 - 72.39\left(\frac{c}{W}\right)^3 + 79.11\left(\frac{c}{W}\right)^4 \quad (10)$$

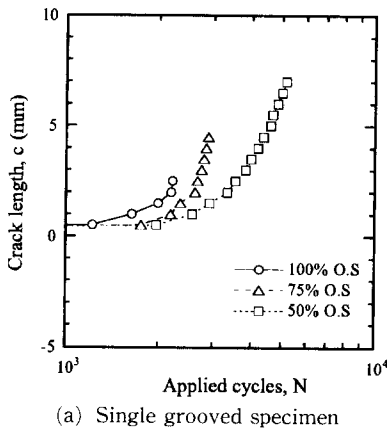
위 식에서 P 는 시뮬레이션하중, B 는 시험편두께이다. 이때 C형 시험편에 가해지는 최대하중은 내압과 자진가공하중을, 최소하중은 자진가공하중을 시뮬레이션하였다. 이미 얻어진 내압과 자진가

공 잔류응력의 영향을 받는 실린더의 응력확대계수해를 이용하여 실제 실린더와 시뮬레이션 시험편의 두 균열선단부가 동일한 균열길이에서 동일한 응력 세기를 지니도록 시뮬레이션 피로하중이 계산되었다. 피로실험이 진행되는 동안, 외경홈의 뿌리에서 진전하는 균열의 길이는 시험편의 양표면에서 두대의 이동식 현미경을 이용하여 측정하였다. 이때, 시험편에 표시된 눈금으로부터 균열길이가 0.25 mm씩 증가할 때 마다 그 균열길이에 상응하는 실린더와 시험편의 응력확대계수값으로부터 비례적으로 계산된 피로하중이 시험편에 연속적으로 부과되었다.

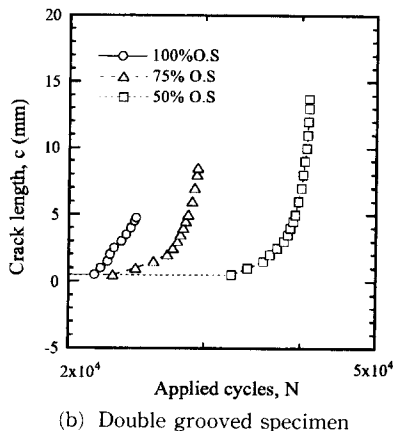
피로실험은 유압식 피로시험기를 이용하여 상온에서 0.3~0.7 Hz의 주기를 갖는 하중제어(load-control) 방식으로 수행되었으며, 홈깊이를 제외한 2 mm 크기의 초기균열길이로부터 균열이 전파하고 시험편이 파단될 때까지의 반복횟수를 피로균열 전파수명으로 정의하였다.

균열길이에 따라 측정된 반복횟수는 외경홈의 형태에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 세가지의 서로 다른 자진도의 모든 경우에서 어느 균열길이까지는 안정된 균열전파거동을 보인 후 급격한 전파가 진행되어 파괴에 이르고 있으며, 자진도가 낮을수록 피로균열의 전파수명은 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

자진도에 따라서 측정된 피로균열 전파수명은 Fig. 6과 같다. 두 가지의 홈형태 모두가 자진도가 낮을수록 피로균열의 전파수명이 점차 증가하고 있음을 알 수 있으며, 단일홈에 비하여 짧은 초기균열길이를 지닌 이중홈의 시험편이 약 3~20배의 연



(a) Single grooved specimen



(b) Double grooved specimen

Fig. 5 Averaged cycles versus crack length for simulation specimen.

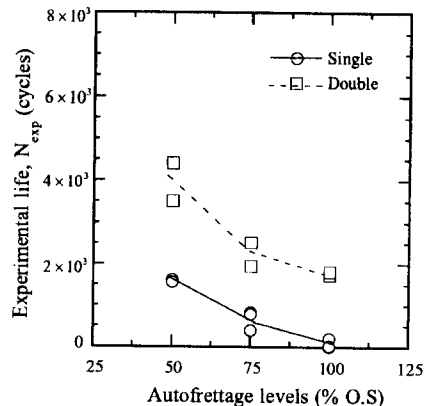


Fig. 6 Autofrettage levels versus experimental crack propagation lives of simulation specimen.

장된 피로수명을 보였다.

4. 두꺼운 실린더의 피로균열 전파수명 예측 및 평가

파괴역학적인 개념에 의거하여 응력확대계수 K 가 그 재료의 파괴인성 K_{Ic} 와 같게 될 때의 임계크기까지 균열이 도달했을때 불안정한 파괴가 일어난다. 두꺼운 실린더재질은 ASTM A723강이며, 파괴인성치, K_{Ic} 는 ASTM standard E813에 따라 예균열된 3점굽힘 시험편을 이용하여 평가한 J_{Ic} 로부터 산출하여 $206.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이 얻어졌다. 이 K_{Ic} 값에 상응하는 임계균열길이 c_{cr} 은 각 자진도에 따라 Table 1과 같이 결정되었으며, 실제 시물레이션 피로시험에서 얻어진 최종 불안정 파단시의 균열길이와 잘 일치하였다. 임계균열길이와 함께 초기균열길이의 결정방법은 정확한 피로수명예측에 있어 중요한 요소이다. 본 연구에서는 각 자진도에 따른 초기균열길이 c_i 를 3가지 방법, 즉 실린더 외경부의 흠집이와 최초의 균열길이 2 mm를 합하는 방법 (present crack method), 흠자체의 깊이를 초기균열길리로 정하는 Socie의 제안법,⁽¹¹⁾ 노치근방

의 천이균열길이와 흠깊이를 합한 길이를 초기균열길리로 정하는 Dowling의 제안법⁽¹²⁾을 이용하여 각각의 초기균열길이 적용방법에 따른 수명예측결과를 비교, 평가하였다. Dowling에 의해 제안된 경험식에 의해 천이균열길이 (transition crack length) l_t 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_t = \frac{D}{K_t^2 - 1} \quad (11)$$

위식에서 D 는 노치깊이, K_t 는 이론응력집중계수이다. 내압과 자진가공 잔류응력에 의하여 단일 흠과 이중흠에서 발생하는 K_t 값은 Table 2와 같으며,⁽⁸⁾ 자진도에 따른 초기균열길이 c_i 는 Table 1에 수록하였다.

내압을 받는 자진가공된 두꺼운 실린더의 피로균열 전파수명을 예측하기 위해 다음과 같은 Paris식 (12)과 Forman식 (13)이 도입되었으며, 실린더재질에 대해서 평가된 피로균열성장 특성치들을 수명예측식에 적용하였다.⁽²⁾

$$\frac{dc}{dN} = 2.46 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.1} \quad (12)$$

Table 1 Initial and critical crack lengths at the outside surface of the autofrettaged thick-walled cylinder.

% O. S	c_i (mm)						c_{cr} (mm)
	Present crack		Socie		Dowling		
	Single	Double	Single	Double	Single	Double	
100	12	9	10	7	10.8	8.37	11.5
75	12	9	10	7	10.92	8.47	14.5
50	12	9	10	7	10.92	8.47	20.5

Table 2 Maximum equivalent stresses $\sigma_{eq,max}$, nominal stresses S_N and theoretical stress concentration factors $K_{t,eq}$ at the external groove root of thick-walled cylinder.

Groove type	% O. S	S_N (MPa)	$\sigma_{eq,max}$ (MPa)	$K_{t,eq}$
Single	100	969.7	3567.8	3.67
	75	855.4	2934.8	3.43
	50	639.8	2196.5	3.43
Double	100	958.5	2366.4	2.47
	75	804.3	1931.6	2.40
	50	601.3	1445.5	2.40

$$\frac{dc}{dN} = \frac{4.5 \times 10^{-8} (\Delta K)^2}{K_{Ic} (1-R) - (\Delta K)} \quad (13)$$

위 식에서 $\Delta K (=K_{max} - K_{min})$ 는 응력확대계수 범위이며, $R (=K_{min}/K_{max})$ 은 100, 75, 50%의 자진도에 따라 각각 0.56, 0.47, 0.29의 값이 얻어졌다.

Fig. 7은 Paris식을 이용하여 세가지 방식으로 규정한 초기균열길이에 따라 예측된 실린더의 피로균열 전파수명을 각 자진도에 대하여 나타낸 그림이다. 단일흡에 비하여 이중흡을 지닌 실린더는 자진도에 따라 약 1.5~5배의 더 연장된 피로수명이 예측되었으며, 자진도가 낮아질수록 전파수명의 예측치는 증가하고 있다.

Forman식을 이용하여 예측된 Fig. 8의 피로균열 전파수명은 Fig. 7의 Paris식을 이용한 예측결과에 비하여 더 짧은 피로수명이 예측되었다. Paris식과 Forman식에 의한 예측결과에서 Socie 제안법은 다른 두 경우에 비하여 가장 긴 수명에 예측결과를 보이고 있으며, 이는 짧은 초기균열길이의 적용에 기인한다.

Paris식과 Forman식을 이용한 수명예측의 결과들을 고찰해 볼 때, 먼저 Paris식의 경우에는 식 (12)에 보인 바와 같이 피로균열의 성장률이 ΔK 에 의해서만 영향을 받게 된다. 내압과 자진잔류응력의 영향을 받는 두꺼운 실린더에서 $\Delta K = K_{max} - K_{min} = [(K_{ip} + K_{res}) - K_{res}] = K_{ip}$ 가 된다. 본 연구에서 K_{ip} 는 세가지 자진도에 상관없이 일정하므로 Paris식의 경우에는 초기균열길이와 자진도에 따른 임계균열길이의 차이만이 피로수명에 영향을 미치

게 되며, 자진도가 감소함에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 한편, 식 (13)의 Forman식을 이용하여 전파수명을 예측할 때, K_{max} 과 K_{min} 을 고려하여 자진도에 따라 계산된 $R (=K_{min}/K_{max})$ 값이 수명에 예측식에 포함되어 예측결과에 영향을 미치게 된다. 특히, 50%의 자진도의 경우에는 다른 두 경우에 비하여 R 값이 현저히 작음을 알 수 있으며, 이러한 R 값과 그에 따른 평균응력이 피로수명에 영향을 끼침으로써 자진도에 따른 피로수명의 증가경향이 비선형성을 보이고 있다고 생각된다. 따라서, 평균응력이 고려되지 않은 Paris식을 이용하여 예측된 피로수명은 평균응력에 따라 피로수명이 크게 영향을 받게 되는 실험결과나 Forman식에 의한 예측결과와는 다른 증가경향을 보이게 된다고 생각된다.

Fig. 9는 Paris식에 의해 예측된 실린더의 피로균열 전파수명과 시뮬레이션 피로시험편을 이용하여 얻어진 실험수명과 관계를 나타낸 그림이다. 실험수명과 예측수명은 초기균열의 적용방법과 자진도에 따라 차이는 있지만 모든 경우에 약 3배 이하의 오차범위내에서 잘 일치하고 있다. 전반적으로 present crack method를 제외하고 단일흡을 지닌 실린더의 예측수명은 실험수명보다 긴 비보수적(non-conservative)인 예측결과를 보이고 있으나, 이중흡을 지닌 실린더의 예측수명은 Socie의 제안법을 제외하고 약 2배 이하의 작은 오차범위에서 보수적(conservative)으로 실험수명과 적절하게 일치하고 있다.

Forman식을 이용하여 예측된 전파수명과 시뮬

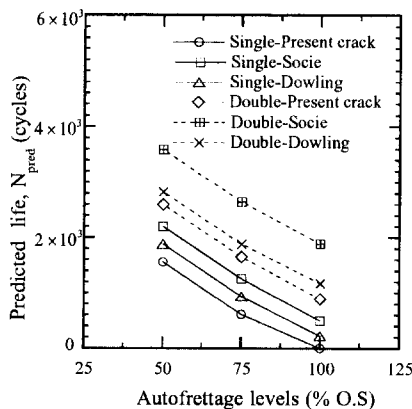


Fig. 7 Autofrettage levels versus predicted fatigue crack propagation lives of cylinder using Paris equation.

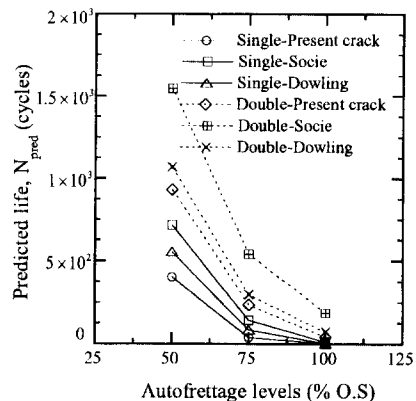


Fig. 8 Autofrettage levels versus predicted fatigue crack propagation lives of cylinder using Forman's equation.

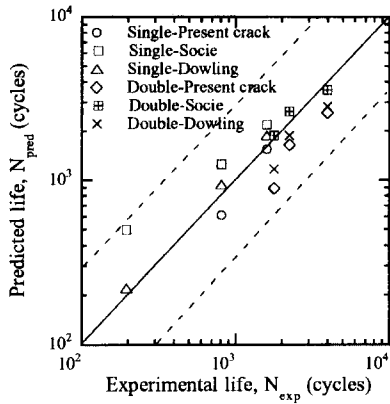


Fig. 9 Predicted crack propagation lives of cylinder using Paris equation versus experimental lives of simulation specimen.

레이션 시험편을 이용한 실험수명과 관계는 Fig. 10과 같으며, Fig. 9의 Paris식에 의한 예측결과에 비하여 더 큰 오차범위를 보이고 있으나, 실험수명이 예측수명보다 긴 안전하고 보수적인 결과를 보이고 있다.

5. 결 론

자긴가공에 의한 잔류응력을 지니고 있는 두꺼운 실린더가 반복적인 내압을 받을 때 외경홈의 뿌리에서 개시, 전파되는 피로균열 전파수명의 예측 및 평가에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 자긴가공 잔류응력을 지니며 내압을 받는 외경균열을 내포한 두꺼운 실린더의 응력확대계수가 유한요소법과 열하중 유사법을 이용하여 계산되었다. 내압을 받는 경우에 균열길이 증가함에 따라 응력확대계수값은 증가하였으나, 자긴가공 잔류응력에 의한 응력확대계수는 균열길이의 변화에 따라 연속적으로 재분포하는 잔류응력장의 영향에 의하여 균열이 증가함에 따라 증가하다가 약 $c/W = 0.7$ 부터는 점차 감소하는 경향을 보였다.

(2) 반복적인 내압에 의하여 두꺼운 실린더의 외경홈에서 생성, 성장되는 피로균열의 전파수명은 C형 시물레이션 시험편을 이용하여 평가되었다. 자긴도에 따라 11.5~20.5 mm의 임계균열길이에서 불안정한 파단이 발생하였으며, 자긴도가 낮을수록 피로균열의 전파수명은 증가하였다. 단일홈의 시험편에서 약 20~1800 반복수, 이중홈의 시험편

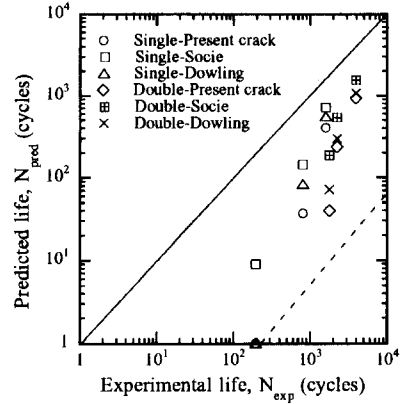


Fig. 10 Predicted crack propagation life of cylinder using Forman's equation versus experimental lives of simulation specimen.

에서 약 1700~4400 반복수의 피로균열의 전파수명이 얻어졌으며, 단일홈에 비하여 이중홈의 경우에서 약 3~20배의 더 긴 피로수명이 얻어진 것은 짧은 초기균열길이의 영향에 기인한다.

(3) 잔류응력에 의한 응력비 효과를 고려한 Forman식을 이용하여 얻어진 실린더의 피로균열 전파수명은 Paris식에 비하여 약간 큰 오차범위를 보이면서 짧게 나타났으며, 보수적인 예측경향을 보였다. 예측된 피로수명은 초기균열길이의 결정방법, 적용된 피로수명예측식에 따라서 약간의 차이를 보이고 있으나 약 3배 이하의 오차범위에서 실험수명과 잘 일치하였다.

후 기

이 연구는 1996년도 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 961-1004-032-2)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Davidson, T. E., Barton, C. S., Reiner, A. N., and Kendall, D. P., 1962, "New Approach to the Autofrettage of High Strength Cylinders," *Experimental Mechanics*, pp. 33~40.
- (2) Kapp, J. A. and Pu, S. L., 1982, "Fatigue Design of Thick-walled Cylinders Considering the OD as a Failure Initiation Site," *Pressure Vessel Design PVP-57, ASME*, pp. 115~128.

- (3) Pu, S. L. and Hussain, M. A., 1983, "Stress Intensity Factors for Radial Cracks in a Partially Autofrettaged Thick-walled Cylinder," *Fracture Mechanics : 14th Symposium, Theory and Analysis, ASTM STP 791*, Vol. 1, pp. I-194~I-215.
- (4) Pu, S. L. and Hussain, M. A., 1981, "Residual Stress Redistribution Caused by Notches and Cracks in a Partially Autofrettaged Tube," *Transactions of the ASME*, Vol. 103, pp. 302~306.
- (5) Kapp, J. A. and Underwood, J. H., 1982, "Service-simulation Tests to Determine the Fatigue Life of Outside-Diameter-Notched Thick-walled Cylinders," *Experimental Mechanics*, pp. 96~100.
- (6) Kapp, J. A., 1985, "Predicting Catastrophic Outside Diameter Initiated Fatigue Failure of Thick-walled Cylinders Using Low Cycle Fatigue Data," *Technical Report ARLCB TR 85035*, Benet Weapons Lab, Watervliet.
- (7) 고승기, 이송인, 정세희, 이경엽, 1996, "CAE 기법을 이용한 자긴가공된 두꺼운 압력용기의 피로설계," 대한기계학회 1996년 추계학술대회논문집 A, pp. 226~232.
- (8) 이송인, 정세희, 김영일, 고승기, 이성우, 1997, "외경홈을 지닌 C형 시험편의 저주기 피로수명평가," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제2호, pp. 199~208.
- (9) Stacey, A. and Webster, G. A., 1988, "Stress Intensity Factors Caused by Residual Stress Fields in Autofrettaged Tubing," *Analytical and Experimental Methods for Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 1004*, pp. 37~53.
- (10) Hill, R., 1950, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford Press, London.
- (11) Socie, D. F., Dowling, N. E. and Kurath, P., 1984, "Fatigue Life Estimation of Notched Member," *Fracture Mechanics ; 15th Symposium, ASTM STP 833*, pp. 284~299.
- (12) Dowling, N. E., 1979, "Fatigue at Notches and the Local Strain and Fracture Mechanics Approaches," *Fracture Mechanics, ASTM STP 677*, pp. 247~273.