

최대전단응력기준에 의한 U자형 파이프의 피로특성에 관한 연구

A Study on Fatigue Characteristic of U-shaped Pipe by Maximum Shearing Stress Criterion

*권희환¹, 김상영¹, #석창성², 구재민², 모진용³

*H.H.Kwon¹, S.Y.Kim¹, #C.S.Seok², J.M.Koo², J.Y.Mo³

¹성균관대학교 기계공학부, ²성균관대학교 기계공학부, ³삼성전자 DAS사업부

Key words : U-shape pipe, Curvature radius, Maximum shearing stress

1. 서론

유체의 통로로 사용되는 파이프의 경우, 기계 시스템에 적합하도록 복잡한 굽힘 가공을 거친 후 사용된다. 이러한 굽힘 가공은 파이프 내에 다양한 형태의 응력상태를 유발시키고, 이로 인해 피로 파괴의 모드가 변화하게 된다.

본 연구에서는 피로시험을 통하여 파이프의 곡률반경에 따른 S-N선도를 획득하고, 유한요소해석을 이용하여 파이프의 곡률반경에 따른 U자형 구리파이프(KS D 5301, C1220T-O, 직경 9.52mm, 두께 0.7mm)[1]의 응력상태를 평가하고자 한다. 또한 유한요소해석 결과를 최대전단응력기준을 적용하여 곡률반경의 변화에 따른 피로파손특성을 평가하고자 한다.

2. U자형 곡관의 피로특성 평가

2.1 시험편 및 시험방법

구리파이프를 CNC bending machine을 사용한 굽힘 가공을 통해 곡률반경(R)이 20mm인 U자형 파이프 피로 시험편을 제작하였다. U자형 파이프의 피로시험에는 Fig. 1(a)와 같은 시험조건을 부여하였으며 피로시험을 위한 jig를 제작하여 사용하였다. Fig. 1(b)는 피로시험을 위해 제작된 지그와 시험편이 시험기에 장착된 모습을 나타내고 있다. 시험기는 Instron사의 1kN용량 전기 유압식 재료시험기(model 8841)이며 하중제어방식으로 하중비(최소하중/최대하중) -1인 일정 진폭 하중을 가하였고, 반복 하중 속도는 2Hz로 하였다. 피로시험에서 응력은 이상적인 U자형 파이프의 탄성 유한요소해석을 이용하여 구하였다.

2.2 시험결과

피로시험을 통해 획득한 R이 20mm인 U자형 구리파이프의 S-N선도 및 기 수행된[2] R이 15와 25mm인 U자형 구리파이프의 S-N선도를 Fig. 2에 나타내었다. R이 15와 20mm인 파이프의 경우에 피로 균열은 Fig. 2에 나타낸 그림과 같이 곡관부의 측면에서 발생하여 전파되었다. 그러나 R이 25mm인 경우에는 직관부의 안쪽면 또는 측면에서 발생하였으며 균열의 형상이 R이 15와 20mm인 경우와 다르게 나타났다.

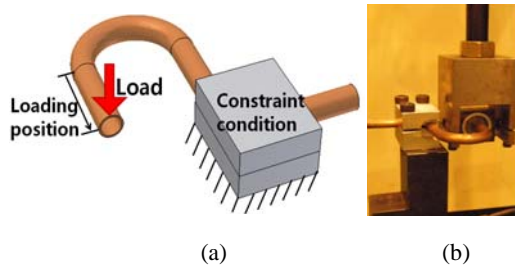


Fig. 1 Boundary condition of fatigue tests

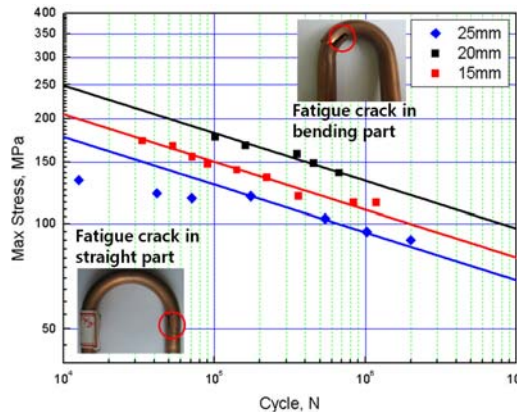


Fig. 2 S-N curve for U-shape pipe specimen

3. 유한요소해석을 이용한 응력 평가

3.1 물성 및 모델링 방법

파이프의 물성들은 KS D5301규격(탄성계수 125GPa, Poisson's ratio 0.33)[1]을 참고하였고, 모델링 및 해석은 MSC사의 Marc프로그램을 사용하였다. R이 각각 15, 20, 25mm 인 U자형 파이프에 8kg의 하중을 굽힘 가공이 끝나는 지점에서부터 30mm(시험조건, loading position)인 지점에 부여하는 탄성 FEM해석을 수행하였다.

3.2 해석결과 및 최대전단응력기준

U자형 파이프의 피로시험에서 대부분의 피로파괴가 발생하는 곡관부(A)와 직관부(B) 부분의 주응력 성분을 FEM해석을 통하여 획득하였고, 이를 사용하여 구리와 같은 연성재료에 잘 맞는 것으로 알려진 최대 전단응력 기준[3]에 적용시켰다.

$$\frac{1}{2}|\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_{yp} \quad (1)$$

여기에서 σ_1 과 σ_2 는 최대, 최소주응력이며, σ_{yp} 는 항복강도이다. Fig. 3은 이를 적용시킨 결과로서 작은 파손기준선은 항복강도를 기준으로 한 것이며, 보다 큰 파손기준선은 인장강도를 기준으로 한 것이다.

곡관부(A)는 소성변형을 거쳐 가공되므로 가공경화로 인해 항복강도가 증가하게 되어, 작은 육각형의 범위를 벗어나게 된다. 그러나 직관부(B)는 가공 과정에서 큰 영향을 받지 않으므로 57MPa의 항복강도[2]가 적용된 작은 육각형의 범위를 벗어나게 되면 항복하게 된다.

곡관부에서 피로파괴가 일어난 R이 15와 20mm 인 경우, R이 15mm인 경우가 R이 20mm인 경우보다 큰 최대 주응력이 나타나 보다 짧은 피로수명을 나타낼 것이라 예측할 수 있다. 이 경우 곡관부는 항복강도를 기준으로 하는 파손기준선 외부에 있는데 비하여 직관부는 두 경우다 파손기준선 내부에 존재하기 때문에 곡관부에서 파손이 일어나는 것을 알 수 있다.

R이 25mm의 경우는 직관부나 곡관부, 모두 파손기준선 부근이기 때문에 직관부나 곡관부 모두에서 파손이 발생할 수 있다. 그러나, 곡관부의 경우 가공경화현상에 의하여 항복강도가 증가하기 때문에 직관부에서 파손이 일어날 가능성이 클 것이라고 예측되며, 실험 결과에서도 대부분의 피로파손이 직관부에서 발생하였다[2].

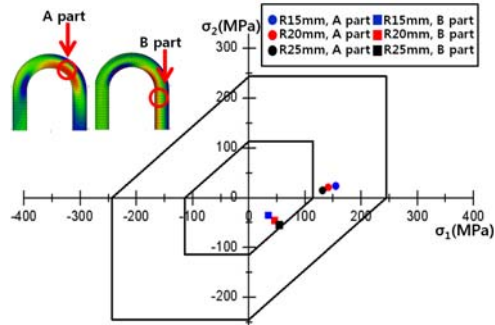


Fig. 3 FEM analysis for U-shaped pipe

4. 결론

본 연구에서는 피로시험 및 FEM해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) R이 15mm인 경우가 R이 20mm인 경우보다 큰 최대 주응력이 나타나 보다 짧은 피로수명이 나타날 것이라 예측할 수 있었다. 또한, 곡관부는 항복강도를 기준으로 하는 파손기준선 외부에 있는데 비하여 직관부는 두 경우다 파손기준선 내부에 존재하기 때문에 곡관부에서 파손이 일어나는 것을 알 수 있다.
- (2) R이 25mm인 경우는 직관부나 곡관부 모두 파손기준선 부근이기 때문에 직관부나 곡관부 모두에서 파손이 가능하나, 가공경화현상을 고려할 때 직관부에서 파손이 발생하리라고 예측되며, 실험결과에서도 직관부에서 파손이 일어났다.
- (3) 따라서 U자형 구리곡관의 경우, 최대전단응력 기준에 의한 파손해석이 가능하다.

후기

본 논문은 2단계 두뇌한국 21 (BK21)사업 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0081802)

참고문헌

1. "Copper and copper alloy seamless pipes and tubes", KS D 5301, KS Standard.
2. 김상영, 구재민, 석창성, 모진용, "잔류응력으로 인한 응력비 변화를 고려한 U자형 구조의 피로 특성평가", 대한기계학회지 2009년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 359~364, 2009.
3. Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster, "Advanced strength and applied elasticity," Prentice Hall, pp. 152, 2003.