

곡률변화에 따른 U자형 파이프의 잔류응력 평가 및 피로수명 예측 Fatigue Life Prediction and Residual Stress Evaluation of U-shaped Pipe due to Curvature Radius

*김상영¹, 권희환¹, 석창성², 구재민², 모진용³

*S. Y. Kim¹, H. H. Kwon¹, #C. S. Seok(seok@skku.edu)², J.Y. Mo³

¹성균관대학교 기계공학과, ²성균관대학교 기계공학부, ³삼성전자 DAS사업부

Key words : U-shape, Pipe, Residual stress, Fatigue life, Curvature radius,

1. 서론

주로 압출·인발 등의 가공과정을 거쳐 직관의 형태로 생산되는 파이프는 생산된 형태 그대로 사용되지 않고 복잡한 굽힘 작업을 거친 후 사용된다. 이러한 과정에서 발생하는 잔류응력은 파이프의 기계적 특성에 막대한 영향을 끼치게 된다. 실제로 파이프의 파괴현상은 대부분의 경우 굽힘 작업에 의해 변형이 발생한 곳에서 나타나며 이는 기계시스템의 수명에 커다란 영향을 끼친다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 곡률반경에 따른 U자형 구리 파이프(KS D 5301, C1220T-O, 직경 9.52mm, 두께 0.7mm)[1]의 잔류응력을 평가하고, U자형 파이프의 굽힘 피로 시험을 통하여 피로파괴에서 잔류응력의 영향을 분석하고자 한다.

2. U자형 파이프의 피로시험

2.1 시험편 및 시험방법



Fig. 1 (a)Failure example and (b)boundary condition

U자형 파이프의 피로시험을 위해 직관을 CNC machine을 이용하여 U자 형태로 굽힘 가공하였다. 이 때, 굽힘 반경은 15와 20 mm로 하였다.

U자형 파이프에서 주로 발생하는 Fig. 1(a)와 같은 피로균열을 모사하기 위하여 Fig. 1(b)와 같은 시험조건을 부여하였다. Fig. 2는 피로시험을 위해 제작된 지그와 시험편이 시험기에 장착된 모습을 나타내고 있다. U자형 구리파이프의 피로시험에 사용된 시험기는 Instron사의 1 kN용량 전기 유압식 재료시

험기(model 8841)이다. 하중제어방식으로 하중비 -1(최소하중/최대하중)인 일정 진폭 하중을 가하였고 반복 하중 속도는 2 Hz로 하였다.

피로시험에서 응력은 이상적인 U자형 파이프의 탄성 유한요소해석을 이용하여 구한 응력을 사용하였다.

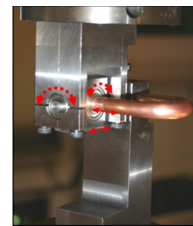


Fig. 2 Installed specimen and jigs

2.2 시험결과

피로시험 결과 모든 시험편에서 균열은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 파손사례와 유사한 형태로 나타났다. 피로시험에서 획득한 응력(S)-반복수명(N)선도를 Fig. 3에 나타내었다.

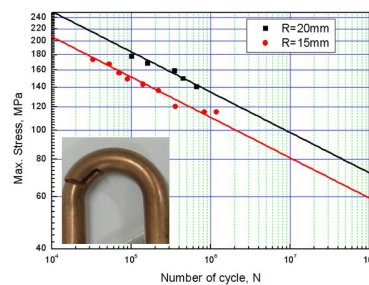


Fig. 3 S-N curves and specimen after test

3. FEM을 이용한 잔류응력평가

3.1 해석모델 및 경계조건

U자형 파이프의 잔류응력을 평가하기 위하여 직관형태의 파이프를 U자 형태로 가공하는 과정을 모사한 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 이 때, U

자형 파이프의 곡률반경은 15, 20, 25 및 30 mm로 하였다. 탄성계수와 Poisson's ratio는 KS D 5301[1]을 참고하여 125 GPa과 0.33으로 하였다. 탄소성 해석에 필요한 소성역의 데이터는 인장시험으로부터 획득한 진응력-진변형률 선도를 이용하였다. Model 구성 및 해석의 수행은 MSC사의 Marc 프로그램을 이용하였다. 해석 모델은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 파이프, 고정 jig 및 운동 jig로 구성하였다. 굽힘 가공을 위한 고정 및 운동 jig는 rigid surface로 구성하였고, 파이프는 8절점의 3D-solid 요소를 이용하였다. 굽힘 가공을 마친 jig는 제거되도록 하였으며, jig가 제거된 후 파이프의 잔류응력을 관찰하였다.

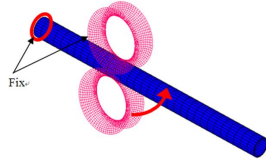


Fig. 4 Model and boundary condition of FEM analysis

3.2 해석결과

FEM 해석을 통해 굽힘가공이 끝난 후, 균열 발생 지점의 최대주응력을 관찰한 결과, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 균열 발생지점인 가공 끝부분에서 최대 잔류응력이 발생하였으며, 각각 138, 114, 107, 96MPa로 나타났다.

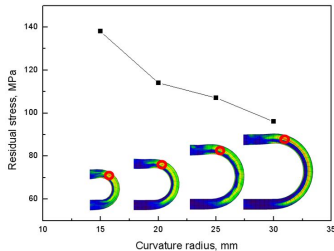


Fig. 5 Results of FEM analysis

4. 고찰

피로시험으로부터 획득한 10^6 cycle에서는 피로 한도는 각각 110 MPa(R=15 mm)과 134 MPa (R=20 mm)이며, 참고문헌[2]으로부터 획득한 인장피로 시험으로부터 획득한 직관의 피로 한도는 170MPa이다. 일반적으로 인장피로시험으로부터 획득한 피로 한도는 굽힘피로시험으로부터 획득한 피로 한도의 약 70%수준이라고 알려져 있으므로[3], 굽힘 조건이라고 가정하면 직관의 피로 한도는 약 243MPa로 나타낼 수 있다.

획득한 피로 한도와 잔류응력의 합은 약 248 MPa 수준이며 이는 직관의 피로 한도와 크게 다르지 않다. 이로부터 직관의 S-N 선도를 FEM 해석으로부터 구한 잔류응력만큼 평행 이동 시키면 Fig. 6과 같이 U자형 파이프의 S-N 선도를 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

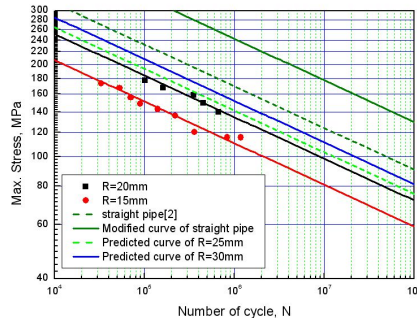


Fig. 6 Predicted S-N curves

5. 결론

본 연구에서는 FEM 해석 및 피로시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) U자형 파이프의 잔류응력해석과 피로시험 결과 피로균열 발생위치에서 최대 잔류응력이 발생하는 것을 확인하였다.
- (2) U자형 파이프에서 발생한 잔류응력은 피로시험에서 최대응력을 상승시켜 피로수명을 저하시키는 것으로 나타났으며, 직관의 S-N 선도를 잔류응력만큼 평행 이동시켜 서로 다른 곡률반경을 가지는 U자형 파이프의 S-N 선도를 예측할 수 있다.

후기

이 논문은 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0018888).

참고문헌

1. "Copper and copper alloy seamless pipes and tubes", KS D 5301, KS Standard.
2. 김상영, 구재민, 석창성, 모진용, "U자형 구조의 피로특성에 대한 잔류응력의 영향 평가", 한국정밀공학회지, 제24권 제4호, 79-86, 2010.
3. Julie A Bannantine, Jess J. comer and James L. Handrock, "Fundamentals of metal fatigue analysis," Prentice Hall, pp. 13, 1990.