

U 자형 구조의 피로특성에 대한 잔류응력의 영향 평가

Evaluation of Residual Stress Effect about Fatigue Characteristic of U-shaped Structure

김상영¹, 구재민², 석창성^{2,✉}, 모진용³
 Sang Young Kim¹, Jae Mean Koo², Chang Sung Seok^{2,✉} and Jin Yong Mo³

1 성균관대학교 기계공학부 일반대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

3 삼성전자 DA 총괄 (Mechanical Core Technology Group, DA Network Business, Samsung Electronics Co., Ltd)

✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: 031-290-7446

Manuscript received: 2009.11.26 / Accepted: 2010.2.24

Mechanical structures with power sources experience repeated force produced by motors. In result, the life of the pipes reduces and ultimately, the pipes collapse. Such pipes are formed into several shapes and particularly, the U-shape pipe is damaged frequently. In most cases, the U-shape pipe is made with a straight pipe by complicated bending work. During this work process, plastic deformation of the pipe produces residual stress in the pipe. This residual stress significantly affects the fracture behavior of the pipe and induces the change of the stress ratio (min. stress/Max. stress = R). For this reason, residual stress has to be evaluated. In this paper, the residual stress of a U-shaped pipe was evaluated by FEM analysis. In addition, fatigue tests of the U-shaped pipe were performed by using a uniaxial fatigue testing machine. The results of the fatigue test were modified with the results of FEM (Finite Element Method) analysis for residual stress. The modified fatigue test results of the U-shaped pipe were compared with those of a straight pipe.

Key Words: Copper Pipe (구리 파이프), Residual Stress (잔류응력), Fatigue (피로), Stress Ratio (응력비)

기호설명

R = Stress ratio (Min. stress/Max. stress)

FEM = Finite Element Method

σ_a = Amplified Stress

σ_u = Ultimate Stress

σ_m = Mean Stress

σ_e = Equivalent Stress

1. 서론

각종 기계 시스템에서 유체의 이동경로로 사용

되는 파이프는 주로 압출·인발 등의 가공과정을 거쳐 직관의 형태로 생산된다. 또한 생산된 직관 형태의 파이프는 대부분의 경우 생산된 형태 그대로 사용되지 않고 기계 시스템에 적합하도록 도장 및 복잡한 굽힘 작업을 거친 후 사용된다. 이러한 과정에서 발생하는 파이프 단면의 편평을 변화 등 파이프의 변형은 파이프 내부를 흐르는 유체에 압력저항을 유발시켜 기계 시스템의 성능저하 요인이 될 뿐만 아니라, 파이프에 소성변형에 의한 잔류응력을 남기게 된다. 이러한 형상변화와 잔류응력은 파이프의 물성치에 막대한 영향을 끼치게 되어, 굽힘 가공된 파이프의 물성치는 가공 전 모재

의 물성치와는 물론 압출·인발 등의 생산과정을 거친 파이프의 물성치와도 많은 차이를 나타내게 된다. 또한, 잔류응력은 파이프의 기대 수명보다 훨씬 적은 수명에서 파괴에 이르게 되는 원인이 된다. 실제로 기계시스템에 사용되고 있는 파이프의 파괴현상은 대부분의 경우 굽힘 작업에 의해 변형이 발생한 곳에서 나타나며 이는 기계시스템의 수명에 커다란 영향을 끼친다.

예로써, 허성필¹ 등은 잔류응력이 균열의 진전 속도에 끼치는 영향에 대하여 발표하였으며, 김현수² 등은 용접 접합된 구조물을 이용하여 잔류응력이 피로수명에 끼치는 영향을 연구 발표한 바 있다. 그러나 이러한 연구결과들은 잔류응력이 피로수명에 끼치는 영향을 일반화하지 못하였다.

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 U 자형 구리 파이프(KS D 5301, C1220T-O, 직경 9.52 mm, 두께 0.7 mm)³의 잔류응력을 평가하고, U자형 파이프의 굽힘 피로 시험 및 직판의 인장피로시험을 통하여 피로파괴에서 잔류응력의 영향을 분석하고 잔류응력이 피로수명에 끼치는 영향을 일반화하고자 한다.

2. 인장시험

2.1 시험편 및 시험방법

탄소성 FEM 해석을 통한 잔류응력의 평가와 피로시험을 수행하기 위해서는 인장시험을 통해 항복강도, 인장강도 및 소성영역의 데이터 등을 획득해야만 한다.

본 연구에 사용된 파이프는 인발과정을 통해 제작된 구리 파이프로서 KS D5301(C1220T-O)³ 규격에 따라 구리 99.90 %이상, 인 0.015~0.040 %를 포함하고 있다. 파이프의 직경은 9.52 mm 이며, 두께는 0.7 mm 이다. 구리파이프의 주요 기계물성은 Table 1 에 나타내었다.

인장 시험법을 규정하고 있는 ASTM E8M⁴에서는 직경 25 mm 이하의 파이프의 경우 Fig. 1 에 나타난 것과 같은 2가지 시험편 형상을 제안하고 있다.

- (1) Full-Section 파이프 (metal-plug)
- (2) 파이프에서 채취한 C형 시험편

그러나 이러한 시험편들은 노치나 하중선 정렬 등의 문제로 인해 구리파이프의 인장시험에 사용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2 에 나타난 것과 같은 Kim^{5,6} 등에 의한 2 단 가공 시험편을 이용하여 인장시험을 수행하였다.

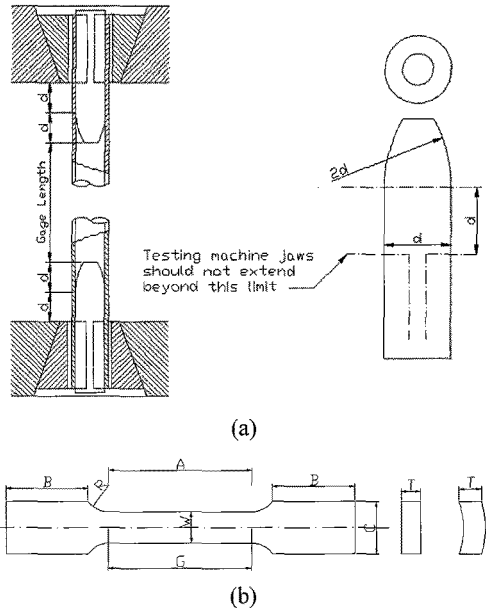


Fig. 1 Tensile specimen of (a) full-size tubular section with metal-plug and (b) C-shaped section (ASTM)

재료의 특성상 연신율계(extensometer)를 장착하지 못하였기 때문에, ASTM 에서 규정한 표점거리 (gage length : 25 mm)를 시험편에 표시하고 늘어난 길이를 측정하여 연신율을 측정하였다. 시험은 2 mm/min 의 속도로 상온에서 수행되었다.

2.2 시험결과

시험으로부터 공칭응력-공칭변형을 선도를 획득하였고, 0.2 % offset 법을 사용하여 항복강도를 획득하였다. 시험은 총 3 회 수행하여 평균값으로 인장강도, 항복강도 및 연신율을 평가하였다.

Figs. 3 과 4 에 시험후의 시험편의 모습과 공칭응력-공칭변형을 선도를 나타내었다. FEM 해석을 이용한 탄소성해석을 위해서 필요한 진응력-진변형을 선도는 공칭응력-공칭변형을 선도의 변환을 통하여 획득하였다. Fig. 5 에 획득한 진응력-진변형을 선도를 나타내었고, Table 2 에는 시험결과를 정리하여 나타내었다.

Table 1 Properties of copper pipe by KS D5301

Tensile Strength (MPa)	205 or more
Elongation (%)	40 or more
Elastic Modululs (GPa)	117.7~132.4
Poisson's ratio	0.33

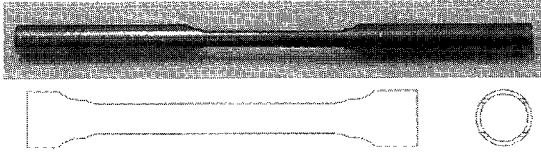


Fig. 2 2-step processed specimens for tensile test.

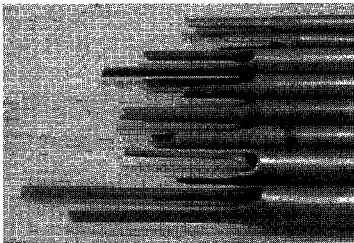


Fig. 3 Tensile test specimens after tests

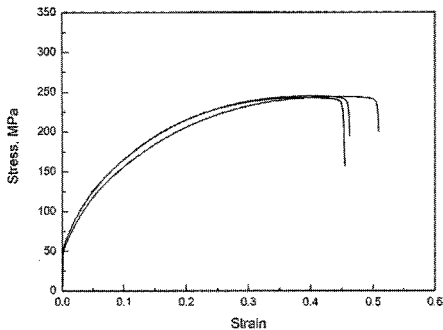


Fig. 4 Engineering stress-engineering strain curves

Table 2 Results of tensile tests

	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
1	54.7	244.2	50.9
2	58.3	244.9	46.2
3	59.1	243.1	45.5
Aver.	57.4	244.04	47.5

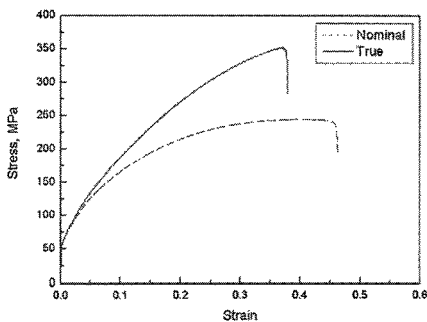


Fig. 5 True stress-true strain curve for FEM analysis

3. 피로시험

3.1 직관의 피로시험

3.1.1 시험편

ASTM E466⁸에서는 일축 인장 피로시험의 경우 인장 시험편과 동일한 형상의 시험편의 사용을 권장하고 있다. 따라서 본 연구에서는 인장시험에 사용한 것과 동일한 2 단 가공 시험편을 사용하여 직관의 피로시험을 수행하였다.

3.1.2 시험방법 및 장치

직관의 일축 인장 피로시험은 50kN 용량의 전기유압식 만능시험기를 사용하여 수행하였다. 또한, jaw 의 노치 등의 효과를 최소화하기 위해 Fig. 6 에 나타낸 것과 같은 피로시험용 지그를 제작하였다. 피로 하중은 정현 파의 형태로 응력비(R)는 0.1 로 하였고, 시험속도는 10 Hz 로 하였다.

3.1.3 시험결과

Fig. 7 에 나타낸 바와 같이, 일반적으로 철강재료의 경우 작용응력이 특정응력 이하가 되면 피로 파괴가 일어나지 않는데, 이 특정응력을 피로한도 (fatigue limit)라고 한다. 이러한 철강재료의 피로한도는 응력(S)-반복수명(N)선도에서 1×10^6 cycle 의 수명에 해당하는 응력으로 평가되는 것이 일반적이다. 그러나 구리, 알루미늄과 같은 비철금속의 경우에는 작용 응력이 낮아져도 피로한도가 관찰 되지 않는다.

따라서 피로 데이터를 외삽하여 충분히 안전하다고 여겨지는 1×10^8 cycle 의 응력을 피로한도로 사용하고 있다.

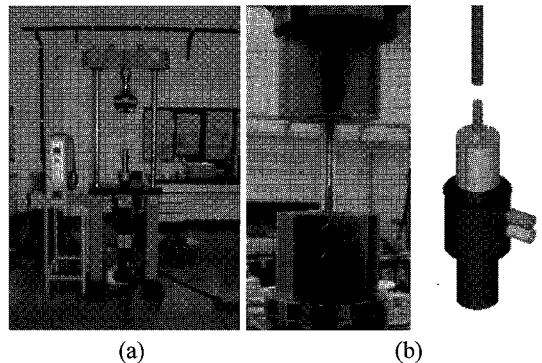


Fig. 6 (a) Test machine and (b) installed jig and assembly of jig for uniaxial fatigue tests

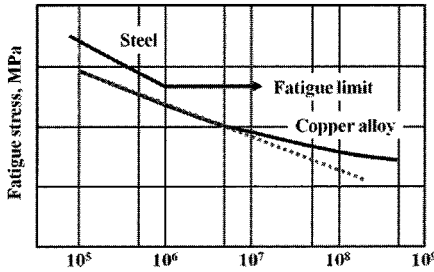


Fig. 7 S-N curve of general copper alloys

이에 따라, 본 연구에서도 피로시험 데이터를 외삽하여 1×10^8 cycle 에 해당하는 응력을 피로한도로 평가하였고, 구리 파이프의 피로한도는 약 91 MPa 로 나타났다. 직관의 일축 인장 피로시험 결과와 S-N 선도를 Fig. 8 에 나타내었다.

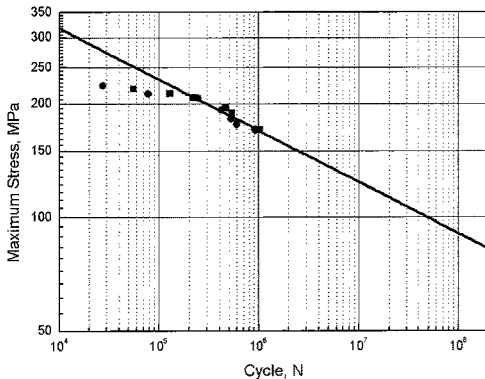


Fig. 8 Obtained S-N curve by uniaxial fatigue tests

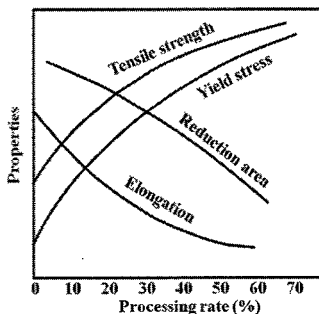


Fig. 9 Change of properties by work hardening

획득한 구리파이프의 피로한도는 항복강도보다 높은 것으로 평가되었다. 일반적으로 철강재료의 피로한도는 항복강도 이하의 값을 가지게 된다. 그러나, 본 연구에서 사용한 구리의 경우는 Fig. 9 에서와 같이 가공경화되어 항복강도가 상승하게

된다. 이에 따라 피로한도는 원래의 항복강도보다 높은 값을 가지게 된다.⁹

3.2 U 자형 곡관의 피로시험

3.2.1 시험편 및 장치

U 자형 곡관의 피로시험을 위해 인장시험에 사용한 파이프와 동일한 직관을 CNC machine 을 이용하여 U 자 형태로 굽힘 가공하였다. 이 때, U 자형 곡관의 굽힘 반경은 15 mm 와 25 mm 로 하였다. Fig. 10 에 가공된 시험편의 모습을 나타내었다.

U 자형 곡관이 부착된 에어컨의 실외기의 진동에 의한 피로현상에 의하여 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 U 자형 곡관의 굽힘가공 부위에서 균열이 발생하였다. 이를 모사하기 위하여 Fig. 12 와 같이 한쪽 다리는 완전히정하고 나머지 한쪽다리에 하중을 부과하는 방식으로 시험조건을 결정하였다. Fig. 12 와 같은 하중을 받을 때 시험편은 Fig. 13 과 같은 회전 및 병진 거동을 하게 된다. 이러한 거동으로 인한 간섭을 막기 위해 피로시험용 지그를 제작하여 사용하였다. Fig. 14 는 제작된 지그와 시험편이 시험기에 장착된 모습을 나타내고 있다.

3.2.2 시험방법

U 자형 구리파이프의 피로시험에 사용된 시험기는 Instron 사의 1 kN 용량 전기 유압식 재료시험기(model 8841)이다. 하중제어방식으로 하중비 -1 (최소하중/최대하중)인 일정 진폭 하중을 가하였고 반복 하중 속도는 2 Hz 로 하였다.

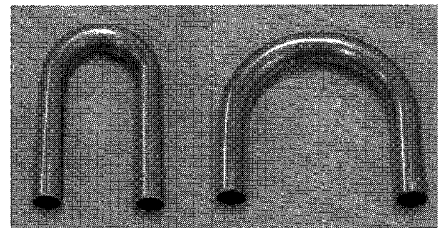


Fig. 10 Shape of U-shaped specimens for stiffness test

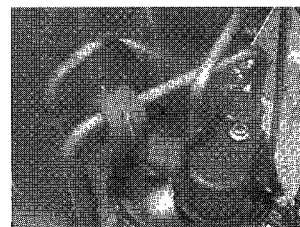


Fig. 11 Failure example of U-shaped pipe

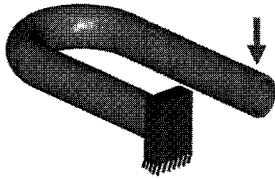


Fig. 12 Boundary condition of fatigue tests

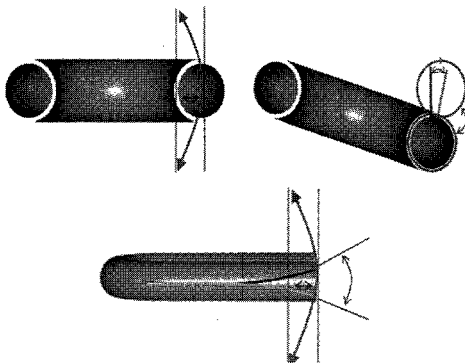


Fig. 13 Specimen's behavior in fatigue test



Fig. 14 Installed specimen and jigs for fatigue test

3.2.3 시험결과

피로시험 결과 모든 시험편에서 균열은 Fig. 15 에 나타난 것과 같이 파손사례와 유사한 형태로 나타났다. 피로시험에서 획득한 하중(load, P)-반복 수명(N)선도를 Fig. 16 에 나타내었다.

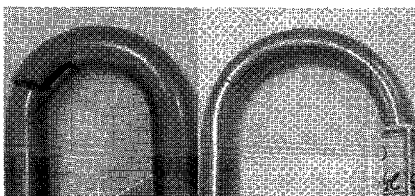


Fig. 15 Crack origination of specimens

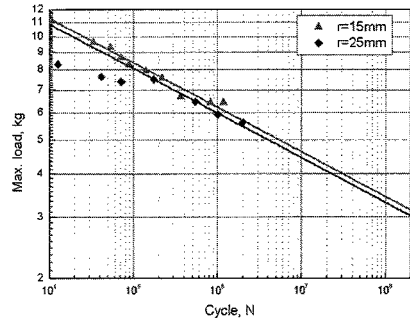


Fig. 16 P-N curve for bending fatigue test

4. FEM 을 이용한 잔류응력 평가

4.1 해석방법 및 재료 물성

직관형태의 파이프가 U 자형 곡관으로 가공될 때 발생하는 잔류응력을 평가하기 위하여 탄소성 FEM 해석을 수행하였다. 파이프의 직경과 두께는 대상 파이프와 동일한 9.52 mm 와 0.7 mm 로 하였고 U 자형 파이프의 곡률반경은 피로시험에 사용된 시험편과 동일한 25 mm 와 15 mm 로 하였다. 탄성계수와 Poisson's ratio 는 KS D 5301³ 를 참고하여 125 GPa 과 0.33 으로 하였다. 탄소성 해석에 필요한 소성역의 데이터는 인장시험으로부터 획득한 진응력-진변형률 선도를 이용하였다. Model 구성 및 해석의 수행은 MSC 사의 Marc 프로그램을 이용하였다.

4.2 해석 Model 및 경계조건

해석 모델은 Fig. 17 에 나타난 것과 같이 구리 파이프, 고정 지그 및 운동 지그로 구성하였다. 굽힘 가공을 위한 고정 및 운동 지그는 rigid surface 로 구성하였고, 구리파이프는 8 절점의 3D-solid 요소를 이용하였다. 구리파이프의 한쪽 끝 및 고정 jig 는 모든 방향에 대하여 완전히 구속하였고, 운동 jig 는 고정 jig 를 중심으로 회전운동을 하도록 하였다. 굽힘 가공을 마친 jig 는 제거되도록 하였으며, jig 가 제거된 후 구리파이프에 나타난 잔류응력을 관찰하였다.

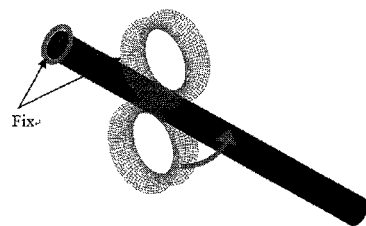


Fig. 17 Model of FEM analysis

4.3 해석 결과

FEM 해석을 통해 굽힘 가공이 끝난 U 자형 구리파이프 표면의 최대 주응력을 관찰하였으며, 잔류응력은 굽힘 반경의 안쪽면과 측면에 인장잔류응력이 나타나는 것으로 확인되었다. 특히 측면의 잔류응력은 가공이 진행될 때에는 거의 나타나지 않다가 지그가 제거되면서 인장잔류응력이 나타났고, 가공이 시작되는 부분보다 가공이 끝나는 부분에서 가장 크게 나타났다. 이러한 현상은 지그의 간섭효과로 생각되며, 굽힘 가공을 진행하는 동안에는 중립 축으로써 응력이 거의 나타나지 않다가 지그가 제거되면서 단면의 변형으로 인해 나타난 것으로 생각된다. 균열이 발생하는 지점인

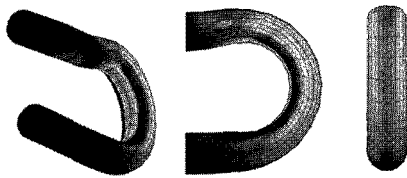


Fig. 18 Result of FEM analysis (curvature radius 15 mm)

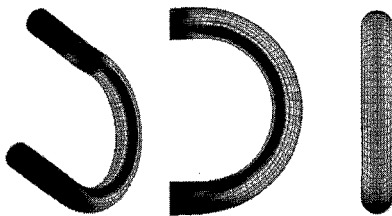


Fig. 19 Result of FEM analysis (curvature radius 25 mm)

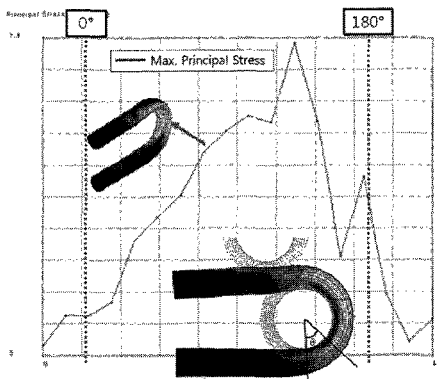


Fig. 20 Residual stresses on the side of U-shaped pipe (curvature radius 15 mm)

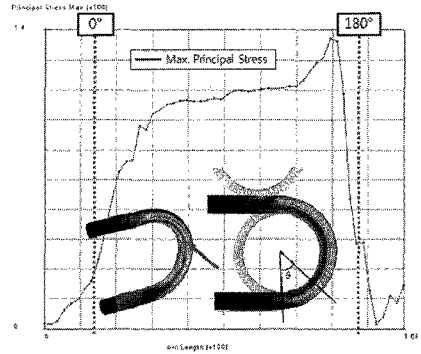


Fig. 21 Residual stresses on the side of U-shaped pipe (curvature radius 25 mm)

측면의 최대 잔류응력은 굽힘 반경이 15 mm 인 경우 약 120 MPa 이 나타났으며, 굽힘 반경이 25 mm 인 경우 약 136 MPa 로 나타났다. Figs. 18 과 19 에는 해석결과 나타난 곡관부 표면의 잔류응력의 분포를 나타내었으며, Figs. 20 과 21 에는 균열이 발생한 측면부분의 잔류응력을 나타내었다.

4.4 해석의 검증

FEM 해석은 이론과 가정을 바탕으로 수행되었으므로, FEM 해석의 타당성을 검증하는 절차가 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 시험편의 변형량을 측정하여 비교함으로써 FEM 해석의 타당성을 간접적으로 검증하였다.

4.4.1 장치 및 방법

실험은 피로시험과 동일한 지그와 시험편을 사용하여 2 mm/min 의 속도로 수행하였으며, 실험으로부터 하중(P)-변위(δ) 선도를 획득하였다. 또한, FEM 해석 프로그램을 사용하여 직관을 U 자형으로 가공하고, 가공된 U 자형 파이프에 실험과 동일한 경계조건을 부여하였다. 그리하여 실험에서 획득한 P- δ 선도와 해석에서 획득한 P- δ 선도를 비교하였다.

4.4.2 비교 결과

시험편의 변형량 측정시험과 FEM 해석에 의한 결과는 Figs. 22 와 23 에 나타난 것과 같이 오차범위 이내에서 일치하는 것으로 나타나 해석 결과는 타당성을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

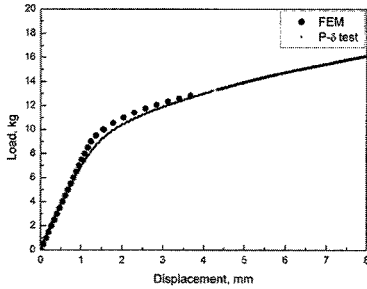


Fig. 22 P-δ curve of test (15 mm)

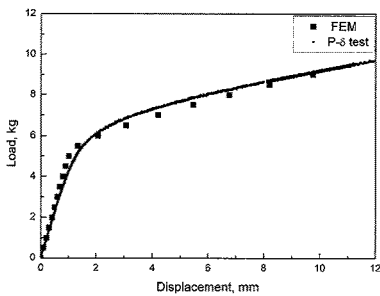


Fig. 23 P-δ curve of test (25 mm)

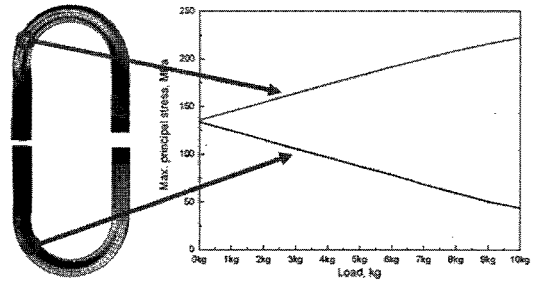


Fig. 25 Variation of maximum principal stress and stress ratio(R) for load (r=25 mm)

5.2 응력비(R)의 영향

피로시험은 대부분 평균 응력이 0 인 완전 역전조건(R=-1)에서 수행된다. 그러나 본 연구에서는 평균응력이 0(R≠-1)이 아닌 경우이기 때문에 Goodman 의 식(1)과 같은 관계를 이용하여 응력비 R 이 -1 인 S-N 선도를 결정하였다.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}} \quad (1)$$

5. 고찰

5.1 피로시험에서 잔류응력의 영향

FEM 해석 결과로부터 U 자형 파이프에 단계적으로 하중을 부여할 때 나타나는 균열 발생부위의 응력을 Figs. 24 와 25 에 나타내었다. 잔류응력은 피로시험에서 평균응력으로 작용하여 응력비 R(최소응력/최대응력)이 변화하는 원인이 된다. 이에 따라 각각의 피로시험 데이터들은 각기 다른 응력비 R 값을 갖게 된다. 따라서 응력비 R 의 영향을 고려해야만 재료 물성으로써의 S-N 선도를 획득할 수 있다.

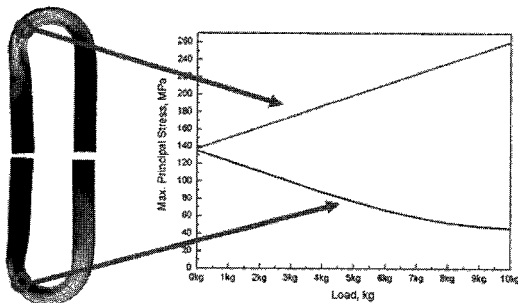


Fig. 24 Variation of maximum principal stress and stress ratio(R) for load (r=15 mm)

피로실험으로부터 획득한 P-N 선도에 FEM 으로부터 획득한 작용하중과 최대/최소 응력과의 관계를 적용하여 U 자형 파이프의 S-N 선도를 획득하였다. 또한 직관의 S-N 선도도 식(1)의 관계식을 이용하여 응력비의 영향을 제거하였다. 그 결과 모든 S-N 선도는 동일한 기울기를 가지는 것으로 나타났다. 실험 및 변환을 통해 획득한 그래프를 Fig. 26 에 나타내었다.

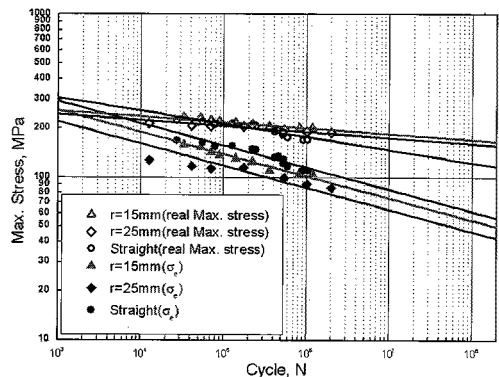


Fig. 26 normalized S-N curves by Goodman's theory

6. 결론

본 연구에서는 FEM 해석을 통해 U 자형 파이프의 잔류응력을 평가하였고 잔류응력이 존재하는 U 자형 파이프의 피로시험결과에 Goodman 의 이론을 적용하여 잔류응력의 영향을 제거하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) U 자형 파이프를 이용한 피로시험결과 실제 파손 위치와 동일한 부분에서 균열이 발생하였으며, FEM 해석결과에서도 파손부위의 응력이 가장 큰 것으로 드러났다.

(2) 일반적으로 철강재료의 피로한도는 항복강도 이하의 값을 가지게 된다. 그러나, 본 연구에서 사용한 구리의 경우는 가공경화로 인하여 항복강도가 상승하였다. 이에 따라 피로한도는 원래의 항복강도보다 높은 것으로 평가되었다.

(3) 유한요소해석결과 U 자형 파이프의 균열이 발생한 지점에 얇은 띠 형태의 인장잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있었다.

(4) U 자형 파이프의 잔류응력은 피로시험 시에 평균응력으로 작용하여 하중에 따라 다른 응력비(R)을 나타나게 하는 원인을 알 수 있었다.

(5) Goodman 의 이론에 따라 각 실험데이터들의 응력비(R)의 영향을 모두 제거하였을 때, 모든 S-N 선도의 기울기가 동일하게 나타나는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2 단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

1. Heo, S. P., Kim, C., Jung, K. H., Ko, M. H. and Yang, W. H., "A Study of Fatigue Characteristics under Residual stress by Cold Expansion," Korean Journal of Aeronautical & Space Sciences, Vol. 31 No. 2, pp. 35-40, 2003.
2. Kim, H. S., Yun, J. K., Kim, H. K. and Park, D. H., "Prediction of fatigue life of a box weldment with residual stress," Proc. of Korean Welding Society Spring Conference, pp. 252-254, 2004.

3. KS D 5301, "Copper and copper alloy seamless pipes and tubes," 2004.
4. ASTM E8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standard, pp. 7-9, 2001.
5. Kim, S. Y., Kim, H. I., Cho, S. K., Bae, B. K., Seok, C. S., Lee, J. K., Mo, J. Y. and Park, D. Y., "An Investigation of Tensile Specimen Appearance for Slender Tubular Products by Copper," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 2001-2005, 2005.
6. Kim, S. Y., Kim, H. I., Seok, C. S., Lee, J. K., Mo, J. Y. and Park, D. Y., "Evaluation of Tensile Properties and Bending-induced Residual Stress of Slender Copper Pipe," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 636-639, 2006.
7. MSC Software, "MSC.Marc and MSC.Marc Mentat," 2004.
8. ASTM E466, "Standard Practice for Conducting force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standard, 2002.
9. Dieter, G. E., "Mechanical Metallurgy(3rd edition)," Mcgraw Hill Publishing Company, 1986.