

확률밀도함수를 이용한 상수도 실 배관의 피로수명 특성 평가

최정훈*, 박재실(성균관대학교 대학원 기계설계학과)
석창성(성균관대학교 기계공학부)

Evaluation of Fatigue Life Characteristic of a Real Waterwork Pipe Using the Probability Density Function

J. H. Choi, J. S. Park(Department of Mechanical Design, Sungkyunkwan Univ.)
C. S. Seok(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

ABSTRACT

The fatigue characteristic of a material or a structure is derived from fatigue tests of standard specimens. However test results of standard specimens are very different from those of real structures or components. Therefore, to calculate more accurate fatigue life, the geometrical effect and surface condition must be considered by comparing test results of standard specimens with those of real structures or components. Thus the object of this paper is to evaluate the fatigue characteristic of a real waterwork pipe by conducting fatigue tests with standard specimens and non-standard(plate-shaped) specimens of base metal and weld metal. Also, to evaluate fatigue characteristic based on life distribution, statistical fatigue characteristic was analyzed by the normal distribution and related data of P-S-N curve.

Key Words : Waterwork pipe (상수도 배관), P-S-N Curve(확률-응력-수명곡선), Normal Distribution(정규분포), Fracture Probability Curve(파괴확률곡선)

1. 서론

대형 상수도 배관의 경우 피로하중이 파손의 큰 원인중의 하나이며, 이러한 피로특성을 평가하기 위하여 실 배관의 피로시험을 수행하는 것이 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법이라 할 수 있다. 하지만 대형 실 배관의 피로시험을 수행함에 있어 경제적으로나 기술적으로 많은 어려움이 있다. 현재 표준 시험편 시험을 통한 수명 예측이 일반적이지만 시험편과 대형 매설배관의 피로특성에는 형상 및 크기에 따른 구속효과 등으로 인하여 많은 차이가 있는 것으로 알려져 있다.[1,2]

본 연구에서는 상수도 배관의 피로특성을 평가하기 위하여 상수도 배관 재료로 사용되는 도복강관에 대하여 실 배관 피로 시험을 수행하여 시험 결과를 고찰하고자 한다. 또한 실 배관의 피로수명

과 파손확률과의 관계를 나타낼 수 있는 확률-응력-수명(probability stress life, P-S-N)곡선[3,4]관계의 정량적 유출을 위해 수명분포에 기초를 두고 정적인 물성, 분산도 및 P-S-N 관계 데이터에 대한 통계적 분석을 하고자 한다.

2. 실 배관 피로시험

2.1 상수도 실 배관의 피로시험

상수도 배관으로 널리 사용되는 도복강관의 피로 반복 하중에 대한 피로특성을 평가하기 위한 최선의 방법은 실사용 중인 배관을 시험편으로 사용하여 반복 하중을 적용하는 것이다.[5,6] 따라서 상수도용 강관 중 호칭지름이 1000mm인 배관을 대상으로 4점 굽힘 피로 시험(Hasegawa, 2002)[7]을 수행하고 그에 따른 결과를 분석하였다.

2.2 1000mm 배관의 피로시험

호칭지름 1000 mm의 상수도용 아크용접 탄소 강관을 사용하였으며, 크기 및 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 본 시험에 사용된 시험기는 200ton 용량의 전기유압식 시험기로서 출력되는 하중에 비해 단순한 조작으로 시험할 수 있는 시험기로서 인장, 압축, 굽힘 시험에 사용된다. Fig. 2에 시험 장치를 나타내었다. 상온에서 최대·최소 응력비(R)가 0.1이 되도록 하중을 부여하고 모든 시험기의 제어(Control)를 하중 제어 모드에서 수행하였다.

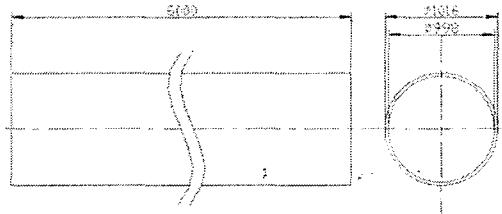


Fig. 1 Schematic of 1000mm pipe

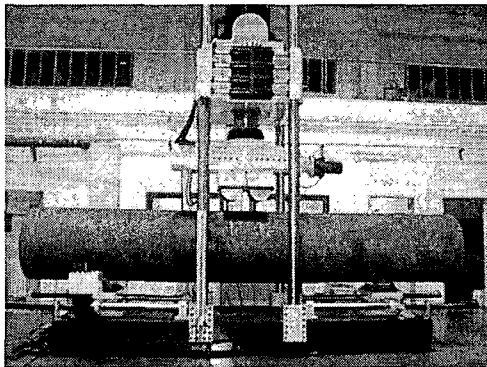


Fig. 2 Dynamic fatigue tester (200 ton)

2.3 시험 결과

Fig. 3에 실 배관의 피로시험 결과를 나타내었다.

하중 부하시점 아래 용접부 비드선단을 따라 길이방향으로 균열이 발생 및 전파 하였으며, 예비시험을 통한 결과 균열길이 80 mm에서부터 균열이 급속하게 전파되었으므로 최종 균열길이 80 mm일 때를 파단수명으로 정의하였다.

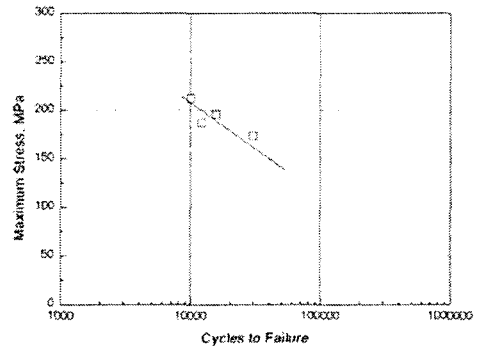


Fig. 3 S-N curves for 1000mm pipe

3. 확률밀도 함수를 이용한 실 배관의 피로특성 평가

3.1 용접부 시험편의 수명시험

호칭지름 1000 mm 배관에서 용접부를 포함하도록 시험편 60개를 제작하여 임의의 3가지 응력레벨에서 각각 20개씩 수명시험을 행하여 시험 데이터를 얻었으며, 이것으로부터 각 파괴확률에 대하여 S-N곡선을 구하여 Fig. 4에 나타내었다.

용접부 시험편의 P=50% 경사부 회귀식은 다음과 같다.

$$N = 3.56 \cdot 10^{12} \cdot \sigma_r^{-3.426}$$

P=10, 90%, 및 P=1, 99%의 곡선은 50% 곡선을 좌우로 각각 $.28 \hat{\sigma}(\log N)$ 및 $.33 \hat{\sigma}(\log N)$ 씩 평행이동 시켜 도시하였다. 또한, P=5, 95%의 P-S-N 곡선을 그리는 경우에는 P=50%에 대한 S-N 곡선을 좌우로 각각 $.64 \hat{\sigma}(\log N)$ 씩 평행이동 시키면 된다.

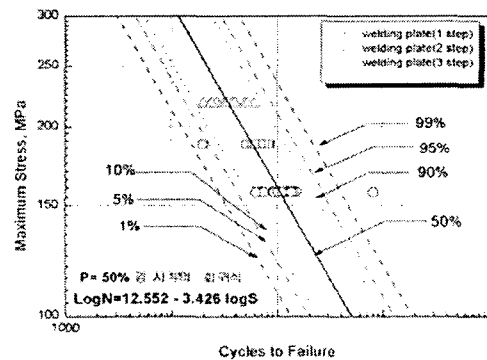


Fig. 4 P-S-N curve welded specimen based on fatigue life

3.2 용접부 시험편의 강도기준 정규 분포곡선

일반적으로 강도분포에 기초한 P-S-N 곡선은 3단 계이상의 응력레벨에서 수개의 시험편을 사용해 시험하며 정규 분포성을 가정하여 P-S-N곡선을 얻은 후, 수명범위를 고려하여 임의의 일정한 간격으로 반복수를 나누어 각각의 반복수에서 각 응력단계에 대한 파괴확률 P에 대응하는 P-S-N곡선을 얻는다. [8] 그러나 본 연구에서는 강도기준 P-S-N곡선에서 각 파괴확률에 대응하는 수명과, 수명기준 P-S-N곡선에서 각 파괴확률에 대응하는 응력과는 동일하다는 점에 착안하여 일반적인 수명기준 P-S-N곡선 결정법의 개념을 유지하면서 보다 간단하게 접근할 수 있는 방법으로서, 수명기준 P-S-N 시험을 행하지 않고 기 수행되어 얻어진 강도기준 P-S-N곡선에서 임의의 수명레벨과 만나는 각 파괴확률선도와의 교차점(추정데이터) 들을 이용하여 수명기준 P-S-N곡선을 도출하는 방법을 제안하였다. Fig. 5에 추정데이터를 산출하는 방법을 개략적으로 나타내었다. 임의의 수명단계에서 수직선을 긋고, 이와 만나는 각 파괴확률과의 교차점을 데이터로 삼아 확률밀도함수를 구한다. 구해진 확률밀도함수로부터 각 수명단계에 대한 파괴확률 P의 분포를 조사하고, 그것을 원활하게 연결하여 수명기준 P-S-N곡선을 구할 수 있으며 최종적으로 각 수명레벨에 대한 파괴확률 곡선을 얻을 수 있다. 따라서 파괴확률 P=1~99%범위에서 총 n 개의 P-S-N 선도로부터 n 개의 추정데이터를 산출한다. 얻어진 추정 데이터 n 개의 강도 S를 $x = \log S$ 로 변환하면 정규 분포를 따르며, 이에 대한 수명기준 PDF를 이용하여 각 수명 단계별 정규분포 곡선을 구하였다.

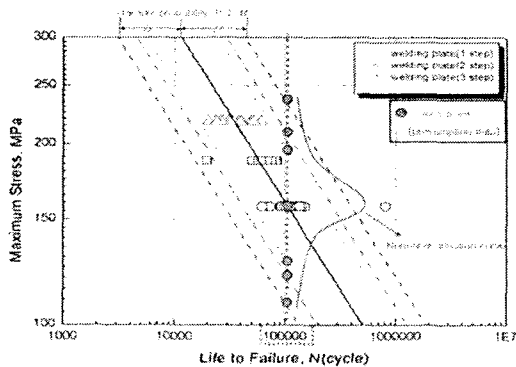


Fig. 5 Paths where presumption data were picked

3.3 실 배관의 파괴확률 선도

실 배관을 이용하여 수명시험을 수행하기에는 시험적 제한과 상당수 시간이 소요된다. 용접부 시험편은 실 배관의 용접부에서 채취되었으므로 재질 및 용접상태가 동일하다. 또한 S-N선도의 기울기는 재료의 고유한 물성이므로 실 배관의 수명시험에 있어 용접부 시험편의 파괴확률 선도를 이용하여 동일한 기울기를 유지하면서 각 파괴확률 선도를 이동시켜 실 배관의 파괴확률에 대한 S-N 곡선을 구할 수 있다. 그러므로 실 배관 시험편의 P=50% 경사부 회귀식은 다음과 같다.

$$N = 1 \cdot 10^{12} \cdot \sigma_r^{-3.426}$$

3.1절과 동일한 방법으로 각 파괴확률 곡선을 구하여 Fig. 6에 P-S-N곡선 결과를 나타내었다.

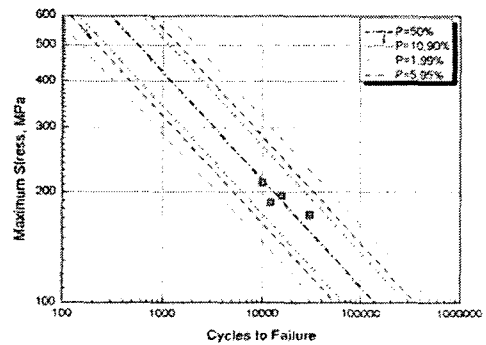


Fig. 6 P-S-N curve of 1000 mm pipe obtained from the fatigue test results of welded specimen

3.4 실 배관의 강도 및 수명기준 정규 분포곡선

시험적, 시간적 제약으로 실 배관의 수명분포 데이터는 획득에는 한계가 있으므로 본 연구에서 제안한 임의의 응력단계에서 파괴확률 P에 대응하는 P-S-N 곡선에서 추정 데이터를 산출 하였다. 또한 3.2절과 동일한 방법으로 임의의 수명단계에서 각 파괴확률 P에 대응하는 P-S-N곡선에서 추정데이터를 산출하였다.

3.5 시험결과의 해석

실 배관의 강도 및 수명기준 확률밀도함수를 이용하여 각 파괴확률 P에 대응하는 점들을 연결하여 Fig. 7~8에 나타내었다. 응력 및 수명레벨이 올라갈수록 파괴확률이 높아지는 것을 알 수 있으며, 파괴확률 P=50%를 기준으로 곡선의 좌우가 점대칭 형태로서 누적분포함수의 특징을 잘 나타내고

있다. 실 배관의 작용응력이 280 MPa인 경우, 파괴 확률 $P=50\%$ 의 수명은 약 4,050 cycle로 나타났다. 200 MPa이 가해 질 경우는 약 12,493 cycle 이며 150 MPa이 가해 질 때는 약 33,884 cycle로 나타났다. 또한 실 배관의 수명을 기준으로 가해지는 작용응력의 파괴확률을 분석 한 결과, 110,000 cycle의 수명을 가지는 실 배관의 경우는 파괴확률 $P=50\%$ 에 달하는 작용응력은 약 108 MPa로 나타났다. 30,000 cycle의 경우는 약 155 MPa이었으며, 5,000 cycle의 경우는 약 264 MPa로 나타났다.

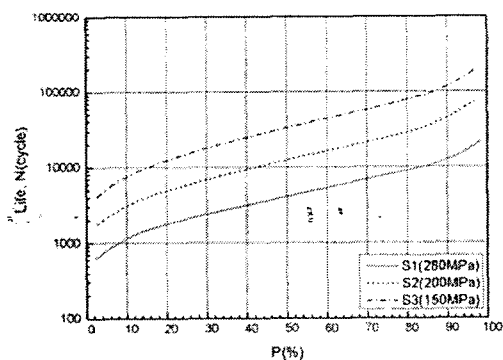


Fig. 7 Fracture probability curve based on fatigue strength

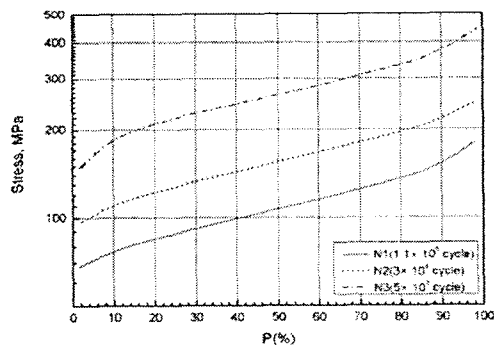


Fig. 8 Fracture probability curve based on fatigue life

4. 결론

용접부를 포함한 시험편 시험 결과로부터 확률론적 피로수명을 확률밀도 함수를 사용하여 상수도 실 배관의 피로특성을 평가하였다.

1. 1000mm 배관에 대한 4점 굽힘 피로 시험을 수행하고 S-N 선도를 확보하였다. 배관의 용접부 비드

선단을 따라 균열이 점차 성장하여 파단이 일어났다. 1000 mm 배관의 제작 특성상 용접으로 인해 기하학적인 형상변화가 야기되어 용접부 비드선단에 응력집중부가 발생하며, 용접부와 열 영향부가 모재보다 취약하기 때문이라고 생각된다.

2. 동일한 재료와 용접부를 포함하고 있는 용접부 시험편의 수명시험을 통하여 실 배관의 P-S-N 선도를 예측하였다. 또한 본 연구에서는 제한한 추정 데이터를 이용하여 실 배관의 강도 및 수명 기준 P-S-N 선도를 예측하였으며, 이를 바탕으로 임의의 응력 및 수명에 대한 파괴확률선도를 얻었다.

3. 용접부 시험편의 수명시험을 통해 얻어진 강도기준 P-S-N 곡선에서 임의의 수명레벨과 만나는 각 파괴확률선도와 교차점(추정데이터)들을 이용하여 수명기준 P-S-N 곡선을 도출하는 방법을 제안하였다. 이는 강도 및 수명기준 P-S-N 곡선에서 각 파괴확률에 대응하는 응력과 수명은 동일하므로 강도기준 P-S-N 선도로부터 수명기준 P-S-N 선도를 유도할 수 있다.

후기

이 논문은 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

참고문헌

- I.V. K. Srivastava "Fatigue behaviour of alumina-fibre-reinforced epoxy resin composite pipes under tensile and compressive loading conditions" Composites Science and Technology 61 (2001) P.2393 ~ 2403
- Seok-Hwan Ahn "Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning" Nuclear Engineering and Design 211 (2002) P.91 ~ 103
- ASTM E8-01 "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2001
- ASTM E466-96 "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of metallic Materials", 2002
- Rahman "Low-cycle fatigue crack growth considerations in pipe fracture analyses" Nuclear Engineering and Design 168 (1997) P.105 ~ 118
- M. K. Rahman "Stress concentration incorporated fatigue analysis of die-marked drill pipes" International journal of Fatigue 21 (1999) P.799 ~ 811
- Iskander S "Development in Petroleum Engineering" (1998)
- 서호복, "신뢰성데이터의 해석법", 한국자동차 공학회논문집, 제9권, 제3호, pp. 23 ~ 35, 1987.