

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.9.707

확률밀도함수를 이용한 상수도 실 배관의 피로수명 특성 평가

최정훈* · 구재민** · 석창성[†] · 송원근***

(2007년 4월 24일 접수, 2008년 7월 29일 수정, 2008년 7월 31일 심사완료)

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

Jung-Hun Choi, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok and Weon-Keyu Song

Keywords: Waterwork Pipe(상수도 배관), Non-Standard Specimen with Weld Metal(용접부 포함 시험편), P-S-N Curve(확률-응력-수명곡선), Normal Distribution(정규분포), Fracture Probability Curve(파괴확률곡선)

Abstract

The fatigue characteristics of a material or a structure are generally derived from fatigue tests of standard specimens. However, test results of standard specimens are 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 characteristics of a real waterwork pipe. Also, to evaluate fatigue characteristic based on life distribution, the statistical fatigue characteristics were analyzed by the normal distribution and related data of P-S-N curve.

1. 서 론

대형 상수도 배관의 경우 피로하중이 파손의 큰 원인중의 하나이며, 이러한 피로특성을 평가하기 위하여 실배관의 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 있

다.^(1,2)

본 연구에서는 상수도 배관의 피로수명 평가 방법을 개발하기 위하여 상수도 배관 재료로 사용되는 도복장 강관에 대하여 피로수명과 파손확률과의 관계를 나타낼 수 있는 확률-응력-수명(probability stress life, P-S-N)곡선⁽³⁻⁵⁾관계의 정량적 도출과 수명분포에 기초한 정적인 물성 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 도복장 강관의 피로특성을 평가하기 위한 최선의 방법은 실사용 중인 배관을 시험편으로 사용하여 반복 하중을 적용하는 것이다.^(5,6) 본 연구에서는 상수도용 강관 중 호칭지름이 1000mm인 배관을 대상으로 4점 굽힘 피로 시험(Hasegawa, 2002)⁽⁷⁾을 수행하였으며, 석창성⁽⁸⁾이 실배관의 용접부에 대해 기 수

[†]책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

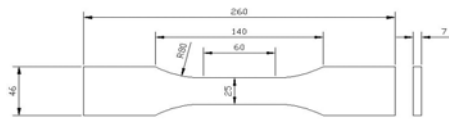
E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482

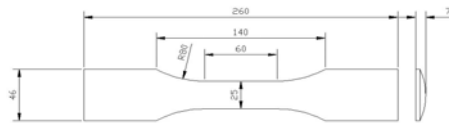
* 성균관대학교 일반대학원 기계설계학과

** 성균관대학교 기계공학부

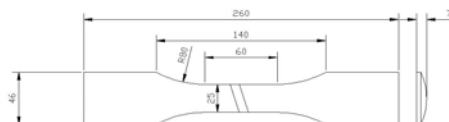
*** 한국 시설안전 기술공단



(a) Standard specimen



(b) Non-Standard specimen



(c) Non-Standard specimen with weld metal

Fig. 1 Appearance of fatigue test specimens

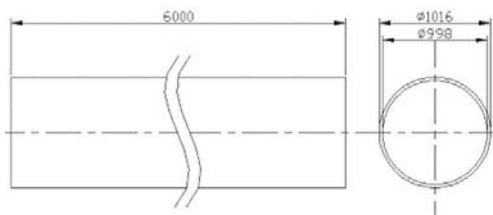


Fig. 2 Schematic of 1000mm pipe

행한 용접부 포함 시험편의 피로시험 결과⁽⁸⁾와 비교하여 S-N 선도의 관계를 분석하였다. 수행된 시험편 피로시험⁽⁸⁾의 각 시험편 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 1000mm 배관의 피로시험

실배관 피로시험은 호칭지름 1000 mm의 상수도용 아크용접 탄소 강관을 사용하였으며, 크기 및 치수는 Fig. 2와 같다. 본 시험에 사용된 시험기는 200ton 용량의 전기유압식 시험기로서 인장, 압축,

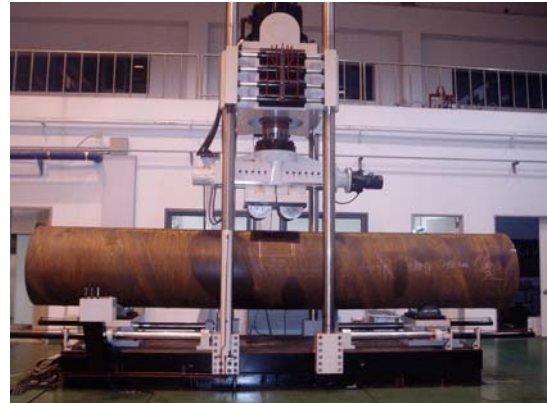


Fig. 3 Dynamic fatigue tester (200 ton)

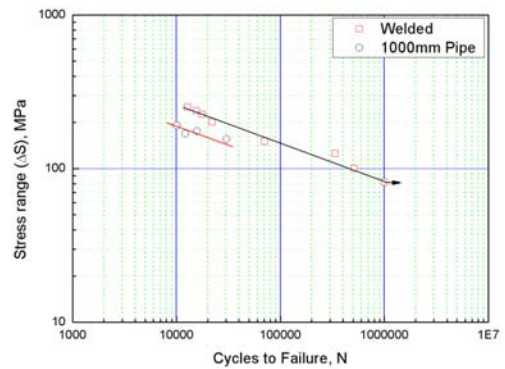


Fig. 4 Comparison between weld metal and 1000mm pipe

굽힘 시험에 사용된다. Fig. 3에 시험 장치를 나타내었다. 상온에서 최대·최소 응력비(R)가 0.1이 되도록 하중을 부여하고 하중 제어 모드에서 수행하였다.

2.3 시험 결과

Fig. 4에 용접부 포함 시험편의 피로시험 결과와 배관의 실험결과를 비교하였다. 용접부 포함 시험편과 유사한 기울기를 보였으며 동일한 하중에서 용접부 포함 시험편보다 실 배관의 수명이 낮은 것을 알 수 있다. 이는 잔류응력상태 및 형상과 크기에 따른 영향이라고 판단되어 진다. 파괴양상은 하중 부하지점 아래 비드선단인 열영향부(Haz)를 따라 길이방향으로 균열이 발생 및 전파 하였다. 육안관측법을 사용하여 균열발생 및 진전량을 측정하였다. 비드선단 Haz에 균열발생이 관측 된 후 균열길이가 배관 두께의 80~90%에 해당하는 80mm까지 진전하도록 관측하였으며, 이후

균열이 급속하게 진전하여 최종 균열길이 80 mm 일 때를 과단수명으로 정의하였다.

3. 확률 밀도함수를 이용한 실 배관의 피로특성 평가

3.1 용접부 포함 시험편의 수명시험

통계적 방법에 의한 수명평가는 하나의 응력 레벨에 대한 단 하나의 중앙수명만을 나타내는 방법과는 달리 여러 응력레벨에서 각 피로수명과 파손확률간의 관계를 나타낼 수 있는 P-S-N 관계의 정량적 평가로서 신뢰성을 바탕으로 한 설계시 요구되는 중요한 기계적 방법 중의 하나이다.⁽⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 호칭지름 1000 mm, 길이 6m 배관에서 용접부를 포함하도록 시험편 60개를 제작하여 임의의 3가지 응력레벨에서 각각 20개씩 시험을 수행하였다. 또한 시험 결과를 바탕으로 수명 및 강도기준에 따른 응력-수명곡선의 관계식과 정규 변수, 피로수명 표준편차를 이용하여 각 응력 구간에서의 파괴확률(Fracture probability) 1 ~ 99%에 대한 통계적 해석을 실시하였다.

3.1.1 실험결과

3가지의 응력레벨에서 용접부 시험편의 수명시험을 행하여 시험 데이터를 얻었으며, 이것으로부터 각 파괴확률에 대하여 S-N곡선을 구하여 Fig. 5에 나타내었다.

용접부 시험편의 P=50% 경사부 회귀식은 다음과 같다.

$$N=3.56 \times 10^{12} \times S^{-3.426}$$

P=10, 90%, 및 P=1, 99%의 곡선은 50% 곡선을 좌우로 각각 $\pm 1.28 \hat{\sigma}(\log N)$ 및 $\pm 2.33 \hat{\sigma}(\log N)$ 씩 평행이동 시켜 도시할 수 있다. 또한, P=5, 95%의 P-S-N 곡선을 그리는 경우에는 P=50%에 대한 S-N 곡선을 좌우로 각각 $\pm 1.64 \hat{\sigma}(\log N)$ 씩 평행이동 시키면 된다. Fig. 5에 나타낸 것처럼 양대수 좌표상에서 S-N 곡선을 직선으로 간주할 수 있다.⁽¹⁰⁾

3.2 용접부시험편의 강도기준 대수정규분포곡선

수명시험에서 얻어진 n개의 수명 N을 $x = \log N$ 으로 변환한 수명의 분포로서 강도기준 확률밀도

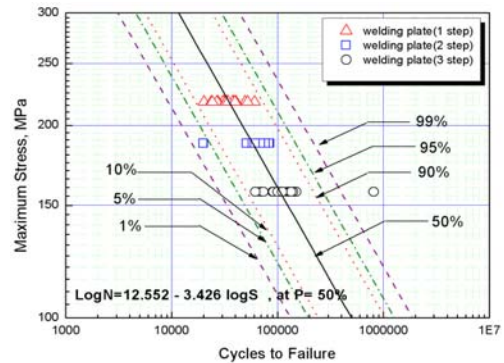


Fig. 5 P-S-N curved of welded specimen based on fatigue life

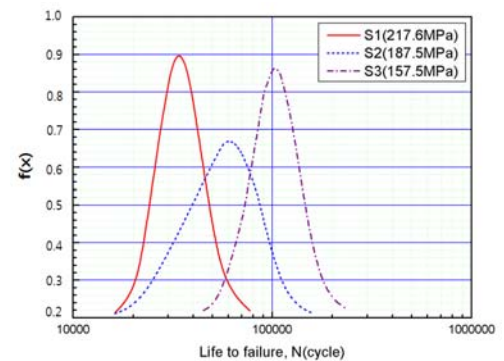


Fig. 6 Comparison of normal distribution curves based on fatigue strength

함수(PDF: Probability density function, f(x))를 이용한 각 응력단계별 대수정규분포의 확률밀도함수는 Fig. 6과 같다.

3.3 용접부시험편의 수명기준 대수정규분포곡선

일반적으로 강도분포에 기초한 P-S-N 곡선은 3 단계이상의 응력레벨에서 수개의 시험편을 사용하여 시험하며, 대수정규 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.^(10,11) 그러나 본 연구에서는 식 (1)에서와 같이 임의의 변수 X가 평균 μ 와 분산 σ^2 을 가지는 경우,

경사부 회귀식 $X^* = c_1X + c_2 (c_1 \neq 0)$ 는

$$\mu^* = c_1\mu + c_2 \tag{1}$$

$$\sigma^{*2} = c_1^2\sigma^2$$

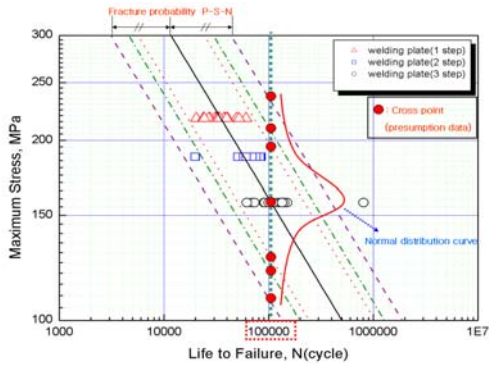


Fig. 7 Paths where presumption data were picked

으로 변환이 된다.⁽¹²⁾ 따라서 강도기준 P-S-N곡선에서 각 파괴확률에 대응하는 수명과, 수명기준 P-S-N곡선에서 각 파괴확률에 대응하는 응력과 동일하므로 일반적인 수명기준 P-S-N곡선 결정법의 개념을 유지하면서 보다 간단하게 접근할 수 있는 방법으로서, 수명기준 P-S-N시험을 행하지 않고 기 수행되어 얻어진 강도기준 P-S-N곡선에서 임의의 수명레벨과 만나는 각 파괴확률선도와 교차점(추정데이터)들을 이용하여 수명기준 P-S-N곡선을 도출하는 방법을 제안하였다. Fig. 7에 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 n개의 P-S-N선도로부터 n개의 추정데이터를 산출한다. 얻어진 추정 데이터 n개의 강도 S를 $x = \log S$ 로 변환하면 정규 분포를 따르며, 이에 대한 수명기준 PDF를 이용하여 Fig. 8에 각 수명 단계별 정규 분포 곡선을 나타내었다.

3.4 실 배관의 파괴확률 선도

실 배관을 이용하여 수명시험을 수행하기에는 실험적 제한과 상당한 시간이 소요된다. 용접부 시험편은 실 배관의 용접부에서 직접 채취하였으므로 재질 및 용접상태가 동일하다. 또한 S-N선도의 기울기는 재료의 고유한 물성이므로 실 배관의 수명시험에 있어 용접부 시험편의 파괴확률

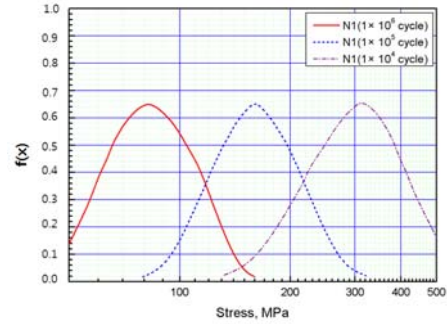


Fig. 8 Comparison of normal distribution curves based on fatigue life

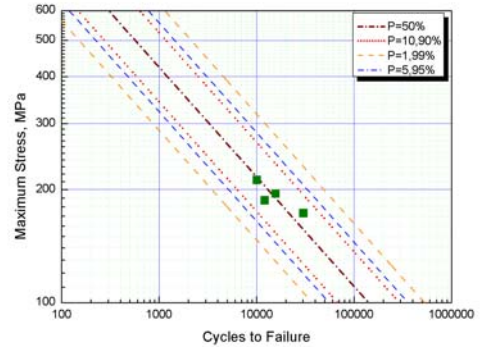


Fig. 9 P-S-N curve of 1000 mm pipe obtained from the fatigue test results of welded specimen

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.

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

3.1절과 동일한 방법으로 각 파괴확률 곡선을 구하여 Fig. 9에 P-S-N곡선 결과를 나타내었다.

3.5 실 배관의 강도기준 대수정규분포곡선

실험적, 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. 얻어진 n개의 수명 N을 $x = \log N$ 으로 변환하면 대수정규분포를 따르며, 이에 대한 강도기준 PDF(Probability Density Function)를 이용하여 Fig. 10에 각 응력단계별 정규분포 곡선을 나타내었다.

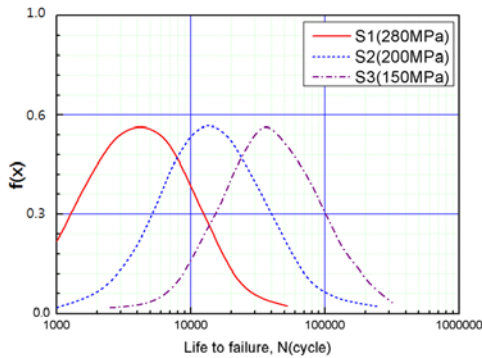


Fig. 10 Comparison of normal distribution curves based on fatigue strength

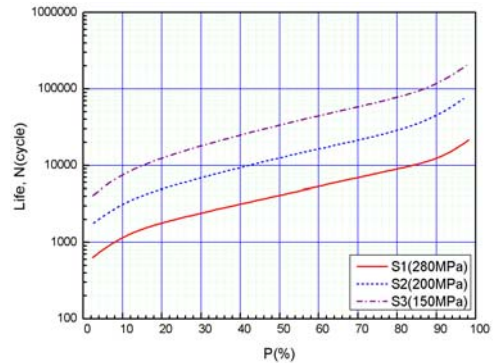


Fig. 12 Fracture probability curve based on fatigue strength

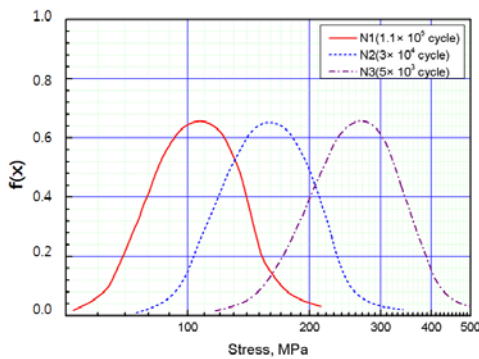


Fig. 11 Comparison of normal distribution curves based on fatigue life

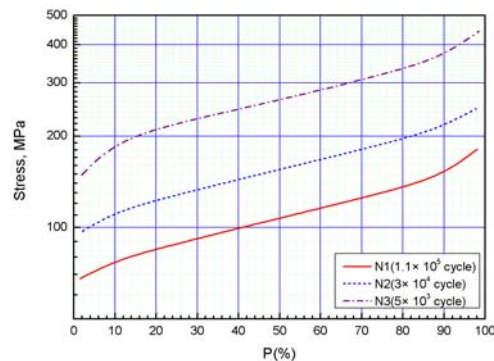


Fig. 13 Fracture probability curve based on fatigue life

3.6 실 배관의 수명기준 대수정규분포곡선

3.3절과 동일한 방법으로 임의의 수명단계에서 각 파괴확률 P에 대응하는 P-S-N곡선에서 추정 데이터를 산출하였다. 이를 통해 얻어진 추정 데이터 n개의 강도 S를 $x = \log S$ 로 변환하면 대수정규분포를 따르며, 이에 대한 수명기준 PDF를 이용하여 Fig. 11에 각 수명 단계별 정규분포 곡선을 나타내었다.

3.7 실험결과의 해석

실 배관의 강도 및 수명기준 확률밀도함수를 이용하여 각 파괴확률 P에 대응하는 점들을 연결하여 Fig. 12~13에 나타내었다. 응력 및 수명레벨이 올라 갈수록 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, 파괴확률 P=50%의 수명은 약 4,050 cycle로 나타났다.

200 MPa이 가해 질 경우는 약 12,493cycle 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, 5,000cycle의 경우는 약 264 MPa로 나타났다.

4. 결론

1000 mm 배관에서 추출한 용접부 시험편의 피로시험과 실 배관인 1000mm 배관의 굽힘 피로시험을 수행하였다. 또한 용접부를 포함한 시험편을 통한 피로시험으로 상수도 실 배관의 확률론적 피로수명을 확률밀도 함수를 사용하여 평가하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 1000mm 배관에 대한 4점 굽힘 피로 시험을

수행하고 S-N 선도를 확보하였다. 용접부 시험편과 유사한 기울기를 보였으며 동일한 하중에서 용접부 포함 시험편보다 실 배관의 수명이 낮은 것을 알 수 있었다. 이는 잔류응력 상태 및 형상과 크기에 따른 영향이라고 판단되어진다.

(2) 용접부 시험편의 수명시험을 통해 얻어진 강도기준 P-S-N곡선에서 임의의 수명레벨과 만나 는 각 파괴확률선도와의 교차점(추정데이터)들을 이용하여 수명기준 P-S-N곡선을 도출하는 방법을 제안하였다. 이는 강도 및 수명기준 P-S-N곡선에서 각 파괴확률에 대응하는 응력과 수명은 동일하므로 강도기준 P-S-N선도로부터 수명기준 P-S-N 선도를 유도할 수 있다.

(3) 동일한 재료와 용접부를 포함하고 있는 용접부 시험편의 수명시험을 통하여 실 배관의 P-S-N선도를 예측하였다. 또한 본 연구에서는 고안한 추정데이터를 이용하여 실 배관의 강도 및 수명 기준 P-S-N선도를 예측하였으며, 이를 바탕으로 임의의 응력 및 수명에 대한 파괴확률선도를 얻었다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21 (BK21) 사업과 건설교통 기술 혁신 사업(산학연 공동연구 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Srivastava, V. K., 2001, "Fatigue Behaviour of Alumina-Fibre-Reinforced Epoxy Resin Composite Pipes Under Tensile and Compressive Loading Conditions," *Composites Science and Technology*, 61, pp. 2393~2403.

(2) Seok-Hwan Ahn, 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nuclear Engineering and Design*, 211, pp. 91~103.

(3) JSME 002, 1998, "A General Method for Estimating Reliability of Machine Elements Subjected to Fluctuating Load."

(4) ASTM E8-01, 2001, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials."

(5) ASTM E466-96, 2002, "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of metallic Materials."

(6) Rahman, S., 1997, "Low-Cycle Fatigue Crack Growth Considerations in Pipe Fracture Analyses," *Nuclear Engineering and Design*, 168, pp. 105~118.

(7) Kunio Hasegawa, 2002, "Fatigue Strength for Pipes with Allowable Flaws and Design Fatigue Curve," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79, pp. 37~44.

(8) Jae-Sil Park, Chang-Sung Seok and Jung-Hun Choi, 2005, "Evaluation of Fatigue Life Characteristic of Waterworks Pipe Welds Using Probability Density Function," *Advanced Materials Development & Performance Conference*, pp. 2302~2307.

(9) Miska, S., 1998, "Development in Petroleum Engineering."

(10) Chang, C. H., 1983, "A General Method for Estimating Reliability of Machine Elements Subjected to Fluctuating Load," *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, pp. 150~159.

(11) Rahman, M. K., 1999, "Stress Concentration Incorporated Fatigue Analysis of Die-Marked Drill Pipes," *International journal of Fatigue*, 21, pp. 799~811.

(12) Erwin Kreyszig, 1983, "Advanced Engineering Mathematics."