용접잔류응력을 고려한 상수도 강관의 피로특성 평가

최정훈* · 구재민** · 석창성† · 송원근***

Fatigue Characteristic Evaluation in Water Pipe Welds Considering of Welding Residual Stress

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

Key Words: Water pipe(상수도 배관), Welding residual stress(용접잔류응력), Mean stress(평균응력), Goodman equation(굿맨 식), Hole drilling Method(구멍 뚫기법/천공법)

Abstract

In case of large steel water pipe, it have been observed that its fracture mostly occurs due to the complicated outside fatigue load on the pipe in the underground. It is also well known that its damage and leakage happen mainly in a weld zone. In this study we evaluated the fatigue characteristics based on size effect and residual stress by comparing the test results on the standard specimen collected from real pipe with those on full scale pipe.

기호설명

σ_{app} : 작용응력진폭
σ_w : 역전응력진폭
σ_m : 평균응력
σ_T : 인장강도

1. 서 론

최근 인구 증가 및 물 사용량 증가 등으로 인하여 원활한 물 공급 및 누수율 감소를 위한 수도관의 품질관리에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 2006년 UN이 정한 물 부족 국가로 지정된 바 있어 그 어느 때 보다 원활한 양질의 수도 공급에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다. 대형 상수도 강관의 경우 실제 땅속에서 작동중인 수도강관에 작용하는 복합적인 외부 피로하중으로 인해 파손되는 사례가 빈번하며, 파손 및 누수는 주로 용접부에서 발생한다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다[1]. 이러한 강관의 피로 수명 평가 기법의 경우 실 강관에 피로 반복하중을 적용하여 작용 응력에 따른 수명을 판단하는 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 하중형태 그리고 크기에 따른 구속효과 등으로 인하여 많은 차이가 있는 것으로 알려져 있다[2].

이에 본 연구에서는 선행 연구[3]에 의해 도출된 대형 상수도 강관 및 동종의 강관에서 채취한 3종의 시험편 피로시험 결과를 통해 시험편과 실제구조물의 시험결과를 비교하여 형상 및 구속효

† 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : seok@skku.edu
TEL : (031)290-7477 FAX :(031)290-7482
* 성균관대학교 일반대학원 기계설계학과
** 성균관대학교 기계공학부
*** 한국 시설안전 기술공단

과를 평가하였다. 나아가서, 유한요소법을 이용한 3차원 열 탄소성 해석으로 대형 상수도 강관의 잔류응력을 예측하고 이를 실제 측정결과와 비교 분석하여 용접잔류응력에 의한 모재부의 수명선도 차이를 규명하였다.

2. 2 수도강관의 잔류응력 분포 해석

2.1 해석조건

본 연구에서 사용한 해석영역 모델을 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1 Modeled structure of a steel water pipe

강관의 외경은 1000mm, 길이 200mm, 두께는 9mm로 하였다. 모재의 열전도도, 비열, 밀도, 탄성계수 및 항복응력은 온도에 따라 비교적 크게 변화하는 값[4]이므로, 이에 따라 해석 시에도 온도의 함수로 가정하였다. 용접방법은 대형 강관 용접에 널리 쓰이고 있는 SAW(Spiral Arc Welding)으로 가정하였다. 용접순서는 내부 용접을 실시한 후 냉각시킨 뒤 외부용접을 실시하였다고 가정하였고, 내 외부 모두 각각 2패스로 가정하였다. 이는 둘레방향의 용접부에 열원을 2번 통과시키는 방법으로 표현하였다[5,6].

2.2 잔류응력측정 (HDM)

유한요소법을 이용한 열탄소성 해석의 용접부 잔류응력 결과와 비교하기 위하여 수도강관의 용접부에 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력의 측정은 여러 가지 기계적 방법과 방사선을 이용한 측정법[7] 등이 있으나 그 중 스트레인 게이지를 이용, 표면을 드릴링한 후 잔류응력의 이완량을 측정하는 홀 드릴링 방법(Hole-Drilling Method)을 사용하였다. Fig. 2, 3에 RS-200 밀링가이드의 고속 공기터빈(High-speed air turbine)과 현미경을 이용한 중심 맞추기 그리고 천공과정을 나타내었다[8]. 측정부위는 수도강관에서 용접부를 포함하는 부위에 직접 측정하였으며 Fig. 2의 A 지점에서 7mm, 15mm, 30mm, 45mm, 60mm 거리의 다섯 지점을 선정하여 측정하였다.

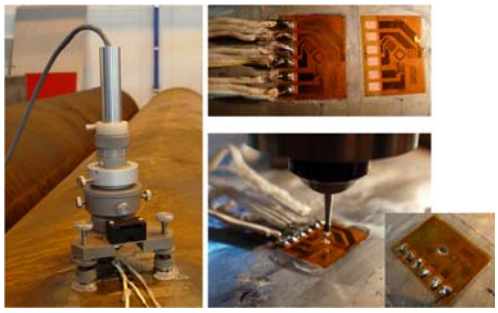

Fig. 2 Drilling process

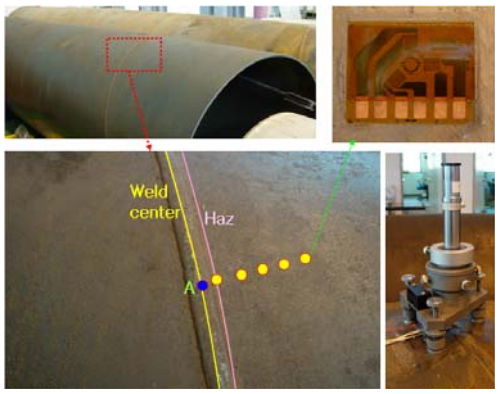

Fig. 3 Position to attach strain gage and centering process

2.3 측정 및 해석결과

잔류응력의 여러 성분 중 그 크기가 가장 큰 강관의 원주(Hoop)방향과 축(Axial)방향 잔류응력을 위주로 분석하였다. Fig. 4(a)에 해석결과와 천공법에 의한 측정결과를 비교하여 도시하였다. 잔류응력 측정에 있어서 유한요소 해석 결과와 실험결과의 오차를 고려할 때 두 결과가 정량적인 차이는 있으나 정성적으로 근사한 결과를 보여주고 있다. Fig. 4(b)의 축방향(용접선에 수직방향)잔류응력 분포 경향을 살펴보면, 용접금속과 열영향부 경계(weld toe)근방 및 용접 비드 내에서 상대적으로 높은 인장응력 상태의 잔류응력 값을 나타내고, Fig. 4(c)의 원주방향 용접잔류응력 분포 또한 Haz부 근방에서 높은 인장 잔류응력을 나타내고 있다. 또한 Fig. 4(d)의 최대주응력 분포에서 알 수 있듯이 일정 각도로 경사진 용접선(welding line)의 영향과는 무관하게 경사진 용접선에 수직한 방향으로 최대주응력이 분포되므

로 본 수도강관 또한 배관 특유의 원주방향 구속력이 적용될 수 있음을 확인하였다.

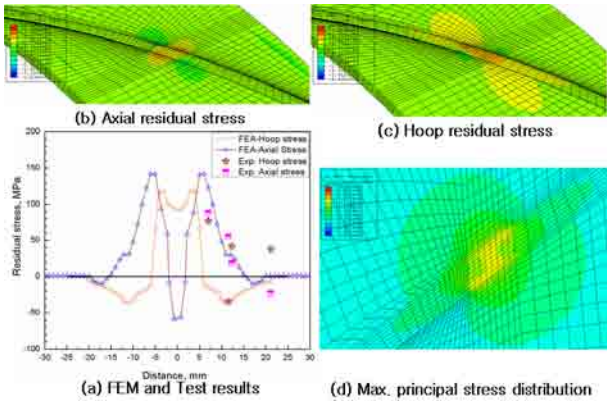

Fig. 4 Residual stress distribution results around weld

3. 3 상수도 강관의 피로강도 예측

3.1 잔류응력을 고려한 시험편의 수명선도변화

수도강관에서 채취한 용접부 포함 시험편의 경우 용접으로 인해 Haz부 근방에 상당량의 인장잔류응력이 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 잔류응력의 영향으로 Fig. 5(a)와 같이 용접부 포함 시험편 S-N 선도가 표준시험편(모재부)에 비해 보다 낮게 나타난다고 판단된다. 이에 용접부 시험편의 S-N 선도에 잔류응력의 영향을 제거한다면 표준시험편의 S-N 선도와 일치될 것으로 예상되는바 본 연구에서는 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향은 평균응력의 영향과 같다고 하여 Goodman식을 적용해 피로한도 선도 상에서 잔류응력을 평균응력에 가산하여 피로강도의 변화를 추정하였다[9].

$$\sigma_{app} = \sigma_w (1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T}) \qquad (1)$$

여기서, σ_{app} : 작용응력진폭
σ_w : 역전응력진폭
σ_m : 평균 진폭
σ_T : 인장 강도

이다. 따라서 식 (1)에서 역전응력진폭을 구할 수 있으며, Fig. 5 (b)~(d)에 역전응력진폭에 대한 S-N 선도 결과를 나타내었다. 피로강도에 대한 잔류 응력의 영향이 평균 응력의 영향과 동일하므로, Goodman식에 적용해 잔류 응력을 평균 응력에 가산하였다[10]. Fig. 5(b)는 잔류 응력을 고려한 평균 응력에 대한 S-N 선도로서, 이때 표준시험편과 용접부 포함 시험편의 결과가 일치함을 알 수 있다.

3.2 Size effect의 영향(용접시편 vs 상수도강관)

Fig. 5(a)에서 상수도 강관의 S-N 선도는 용접부 포함 시험편의 S-N 선도와 기울기가 유사하다. 하지만, 상수도 강관의 수명은 동일한 하중에서 용접부 포함 시험편의 수명보다 짧다. 이는 Size effect의 결과로서 Size가 커질수록 피로 강도가 감소하는 기계 구성요소의 피로 거동에 대한 Size effect의 영향과, 통계적으로 Size가 커질수록 결함의 수가 증가하는 경향이 있다는 점에서 설명될 수 있다[10,11]. 또한, 직경이 4~12 inch 수도강관에 대해 다양한 하중형태 하에서 실시한 많은 실험을 통해 0.75 이하의 Size factor가 존재함이 명백해 졌다[5]. 본 연구에서는 도출된 시험결과에 Size factor 0.75를 적용해 Size effect를 제거하였다. 그 결과, Fig. 5(c)와 같이 용접부 포함 시험편과 상수도 강관의 S-N 선도가 잘 일치함을 확인 하였다.

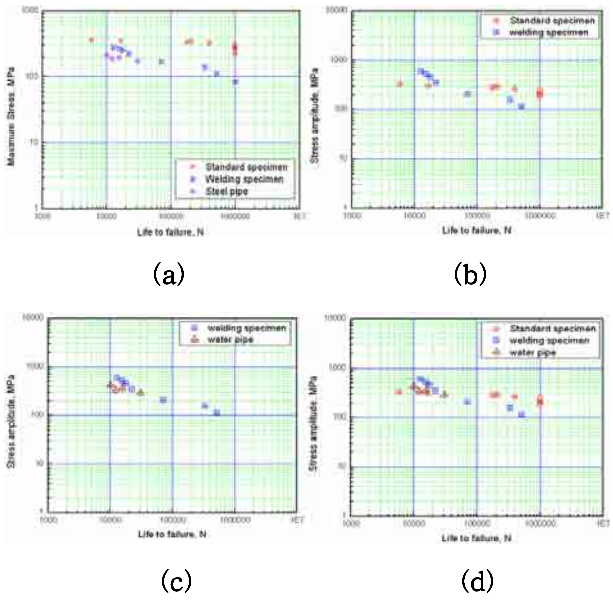

Fig. 5 Prediction procedure of S-N curve considered size effect and residual stress

3.3 표준시험편과 상수도 강관의 비교

용접에 의한 잔류 응력의 효과와 상수도 강관의 Size effect를 제거한 결과, Fig. 5(d)와 같이 S-N 선도의 모든 데이터가 함께 일치함을 보여준다. 따라서 어렵과 힘든 상수도 강관의 피로시험을 실시하지 않고서도 표준시험편의 S-N 선도 결과로 상수도 강관의 피로 수명을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 직경 1000mm 대형 상수도 강관에 대하여 용접잔류응력 및 3차원 탄소성 유한요소 해석을 수행하였으며 이와 함께 선행연구에 의해 도출된 상수도 강관 및 시험편 S-N선도의 비교분석을 통해 대형 상수도 강관 피로수명을 예측하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 유한요소법에 의한 잔류응력 해석결과, 축방향으로 용접금속과 열영향부 경계근방에서 높은 인장응력상태로 나타났다. 천공법에 의한 잔류응력 측정치와 비교했을 때 정성적으로 근사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있어 실험적 오차를 고려한다면 유한요소법을 통한 용접부 잔류응력 해석이 유용함을 확인할 수 있었다.

(2) 천공법(HDM)에 의한 잔류응력 측정 결과, 축뱡향 및 원주방향 잔류응력은 Haz에서 높은 상태의 인장잔류응력을 보이고, 축방향 용접잔류응력의 크기는 약 150 MPa로 나타났다. 이는 모재부 및 용접부 시험편 S-N선도의 피로내구한도 차이와 유사하므로 차후 표준시험편의 S-N 선도로 용접부 시험편의 피로내구한도를 예측할 수 있다.

(3) 용접부 시험편 및 대형 상수도 강관의 S-N 선도의 기울기는 서로 유사하였으나 동일한 용접부를 포함함에도 불구하고 각 피로내구한도의 응력구배가 나타나는 원인을 분석하였으며, size factor를 적용한 결과값이 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

(1) S. Rahman: Nuclear Engineering and Design 168 (1997), pp. 105~118

(2) V.K. Srivastava: Composites Science and Technology 61 (2001), pp. 2393~2403

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

(4) M.K. Rahman: International journal of Fatigue 21 (1999), pp. 799~811

(5) S. Miska: Development in Petroleum Engineering (1998).

(6) D. Chen: Reliability Engineering System Safety 33 (1991), pp. 101-113

(7) 김 철, 2001 “인공신경망을 이용한 구멍뚫기법에서의 잔류응력 측정에 관한 연구”

[8] A.S.R. Murty, U.C. Gupta and A. Radha: International Journal of Fatigue 17 (1995), pp. 85-89

(9) J. H. Han ,"strength and fracture of material", W. J Publishing, 2000

(10) S. J. Maddox,"Fatigue strength of welded structures", Abington Publishing, 1991

(11) Seok-Hwan Ahn "Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning" Nuclear Engineering and Disign 211 (2002) P.91～103