

원전 안전 3등급 고밀도 폴리에틸렌 매설 배관 맞대기 열 융착부의 굽힘 피로특성 평가

김종성[†]·이영주^{*}·오영진^{**}

Investigation of Bending Fatigue Behaviors of Thermal Butt Fusion in Safety Class III High-Density Polyethylene Buried Piping in Nuclear Power Plants

Jong Sung Kim[†], Young Ju Lee^{*} and Young Jin Oh^{**}

(Received 30 November 2015, Revised 7 December 2015, Accepted 4 November 2015)

ABSTRACT

The fatigue behavior of thermal butt fusion in safety class III high-density polyethylene (HDPE) buried piping for nuclear power plants was investigated using load-controlled bending fatigue on four-point bend test specimens. Based on the results, the presence of thermal butt fusion beads was confirmed to reduce the fatigue lifetime in the low- and medium-cycle fatigue regions while having a negligible effect in the high-cycle fatigue regions.

Key Words : Nuclear Power Plant (원자력 발전소), Safety Class III Buried Piping (안전3등급 매설배관), High-Density Polyethylene (고밀도 폴리에틸렌), Bending Fatigue (굽힘 피로), Thermal Butt Fusion (열 맞대기 용착부)

기호설명

B = Thickness of section
C_V = Charpy V-notch impact energy
C_{VN} = Charpy V-notch
K_I = Mode I applied stress intensity factor
K_{Ic} = Plane strain fracture toughness
K_{mat,25} = K-based fracture toughness corresponding to thickness 25 mm

1. 서론

최근 HDPE (high density polyethylene) 재질은 우

수한 부식 저항성, 저렴한 재료/설치 비용 등의 이유로 원자력발전소 안전 3등급 매설배관에 적용되고 있다⁽¹⁾. 이러한 HDPE 배관을 접합하는 대표적인 열 융착 공정 동안, 용착부에 발생하는 비드 (bead)로 인하여 응력집중이 야기되며 결국 피로 수명이 저감될 수 있다. HDPE 재질의 피로에 대한 다양한 연구들이 수행되었다⁽²⁻⁶⁾. 이러한 기존 연구들은 열 융착부의 비드가 피로수명에 미치는 영향을 평가하지 않았다. 김종성 등⁽⁷⁾은 맞대기 열 융착부의 비드가 인장 피로 하중 조건하에서 피로수명에 미치는 연구를 수행한 바 있으나, 굽힘 피로 하중 조건에서의 열 융착부 비드의 영향을 고찰한 바 없다.

본 연구에서는 맞대기 열 융착부를 가진 시편과 모재 시편에 대해 하중 제어 조건 하에서 굽힘 피로 실험을 수행하여 맞대기 열 융착부의 비드가 굽힘 피로수명에 미치는 영향을 고찰하였다.

[†] 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부
kimjsbat@sunchon.ac.kr
TEL: (02)123-1234 FAX: (02)123-1234

^{*} (주)삼우ECO

^{**} 한국전력기술(주)

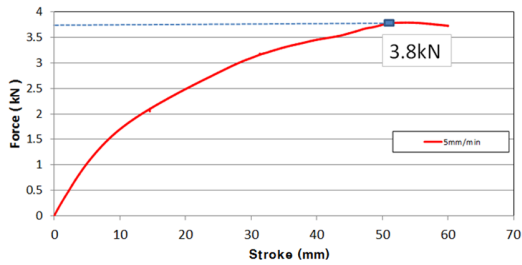


Fig. 4 Maximum force during monotonic bending test

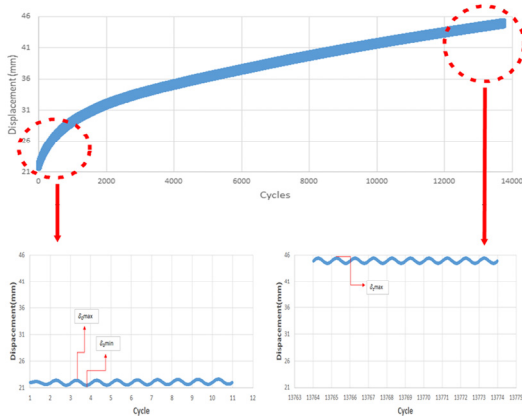


Fig. 5 Variation of stroke displacement vs. bending fatigue cycle

또한, 굽힘 피로시험 동안 시편 표면 온도를 FLIR Systems 사의 적외선 열화상 카메라 FLIR T600⁽¹¹⁾ (해상도 640× 480픽셀, 정밀도는 ±2℃, 측정 범위 -40℃~ 500℃)로 측정하였다. 온도를 측정한 이유는 고분자인 HDPE 특성상 반복적인 하중이 빠른 속도로 가해지면 발열 현상이 발생할 수 있기 때문이다.

맞대기 용착부 없는 모재 시편과 맞대기 용착부를 가진 시편에 대해 최대 하중의 0.5는 두 가지 시편 각각 2개씩, 최대 하중의 0.75는 두 가지 시편 각각 1개씩시험이 수행되었다.

2.3 굽힘 피로시험 결과

Fig. 6은 공칭 굽힘응력 진폭에 대한 굽힘 피로수명 사이클 수를 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 1×10⁵Cycles 이하의 중저주기 피로 영역에서는 맞대기 용착부가 없는 모재 시편의 피로수명이 맞대기 용착부를 가진 시편의 피로수명보다 동일 응력진폭 하에서 짧음을 알 수 있다. 1×10⁵Cycles 이상의 고주기 피로영역에서는 맞대기 용착부의 존재 여부에 무관하게 유사한 피로수명을 나타냄을 알 수 있다.

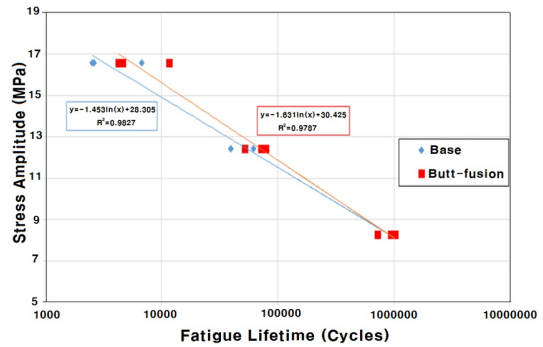


Fig. 6 Bending fatigue test results of the thermal butt fusion joint and base material specimens

식 (1)과 (2)는 맞대기 용착부를 가진 시편의 피로 실험 관계식과 맞대기 용착부가 없는 모재 시편의 굽힘 피로실험 관계식을 각각 제시하고 있다.

$$S_b = -1.631 \ln(N) + 30.425 \text{ (용착부 시편)} \quad (1)$$

$$S_b = -1.453 \ln(N) + 28.305 \text{ (모재 시편)} \quad (2)$$

여기서 S_b 는 공칭 굽힘응력 진폭 (MPa), N 은 피로 수명 사이클 횟수 (Cycles)를 의미한다.

주어진 동일 피로수명 사이클에 대해 용착부를 가지는 배관 또는 시편의 공칭 굽힘응력 진폭에 대한 용착부 없는 모재 배관 또는 시편의 공칭 굽힘응력 진폭의 비인 대비 응력증대계수 SIF 는 Markl에 의해 다음과 같이 정의된다⁽¹²⁾. SIF 가 1보다 크다는 것은 용착부 없는 모재 배관 또는 시편의 경우 용착부를 가지는 배관 또는 시편 보다 동일 피로수명 사이클에 대해 큰 공칭 굽힘응력진폭이 나타냄을 의미한다.

$$SIF = S_{t-base} / S_{t-withfusion} \quad (3)$$

여기서 S_{t-base} 는 주어진 굽힘 피로 수명 사이클에 해당되는 모재 시편의 공칭 굽힘응력 진폭, $S_{t-withfusion}$ 는 주어진 동일 굽힘 피로 수명 사이클에 해당되는 맞대기 열 용착부 시편의 공칭 굽힘응력 진폭이다.

Fig. 7은 굽힘 피로하중에 대한 SIF 식 (3)과 각 시편의 굽힘 피로수명 관계식인 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 도출한 피로수명 사이클에 대한 굽힘 피로 SIF 변화를 제시하고 있다. 여기서 SIF 도출을 위한 기준은 맞대기 용착부를 가진 시편의 시험 결과가 아니라 응력집중부인 맞대기 용착부를 갖지 않는 모재 시편의 시험 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 1,000Cycles 정도에서 0.9535의 값을 나타냄을 보이고 있다. 즉, 맞대기 용착

부를 가진 시편의 경우 맞대기 응착부를 갖지 않는 모재 시편보다 0.9535배의 굽힘 응력진폭에서 동일 피로수명 사이클 1,000cycles을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 8은 적외선 열화상 카메라로 측정된 굽힘 피로 실험 동안의 시편의 온도 분포를 보여주고 있다. 여기서 빨간 색은 최대 온도를, 파란색은 최소 온도를 의미한다. 그림에서 보이는 바와 같이 시편 중앙부 하단(즉, 최대 굽힘 응력 발생 부위)에서 최대 온도가 발생함을 알 수 있다. Fig. 9는 적외선 열화상 카메라로 측정된 피로 사이클에 따른 굽힘 피로시편의 최대 온도 발생

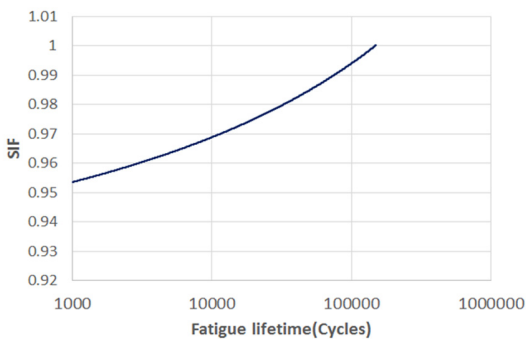


Fig. 7 Variation of the SIF vs. bending fatigue lifetime cycle

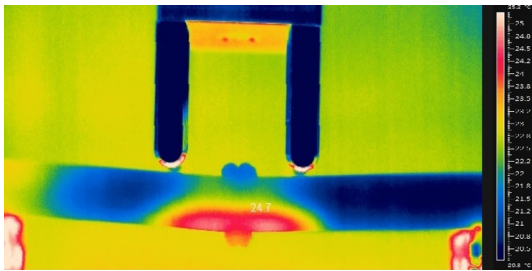


Fig. 8 Temperature distribution during bending fatigue test measured by an intra-red thermal imaging camera

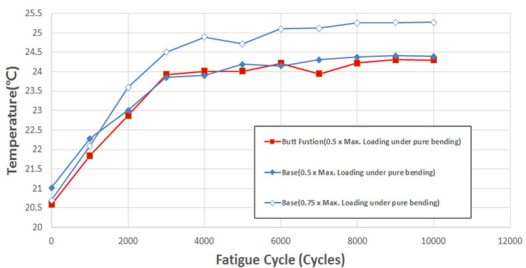


Fig. 9 Temperature histories at maximum temperature generation points during bending fatigue test measured by an intra-red thermal imaging camera

지점의 온도 변화를 제시하고 있다. 최대 온도는 피로 사이클이 증가할수록 증가하는데 약 4,000cycles 이후 그 증가 기울기가 완만해지는 것을 알 수 있다. 피로하중이 10,000cycles 작용시 최대 약 4.66°C의 표면 온도 상승이 발생하는 것을 알 수 있다. 피로하중인 응력진폭이 증가할수록 온도 상승도 증가한다.

3. 결론

HDPE 배관 맞대기 열 응착부의 비드가 굽힘 피로 수명에 미치는 영향을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 저주기 피로 영역에서는 응착부를 갖지 않는 모재 시편의 피로수명이 맞대기 응착부를 가진 시편의 피로수명보다 동일 응력 진폭 하에서 짧음
- 고주기 피로영역에서는 맞대기 응착부의 존재 여부에 무관하게 유사한 피로수명을 나타냄
- 피로수명 사이클이 증가할수록 SIF는 증가하여 1.5×10^5 cycles 이상에서는 맞대기 응착부를 가진 시편과 맞대기 응착부를 갖지 않는 모재시편의 동일 응력 진폭에 대해 동일 피로 수명으로 인하여 1의 값을 갖음
- 적외선 열화상 카메라로 측정 결과 최대 온도는 시편 중앙부 하단(즉, 최대 굽힘 응력 발생 부위)에서 증가하고 4,000cycles 이후 증가율이 완만해지고 피로하중인 응력 진폭이 증가할수록 온도 상승도 증가함

후 기

This work was supported by the Nuclear Power Core Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. 2013T100200100)

참고문헌

- (1) <http://www.plasticpipe.org/pdf/hdpe-pipe-used-in-nuclear-power-industry.pdf>
- (2) Bucknall, C. B. and Dumbleton, P., 1987, "Effects of loading history on fatigue crack growth in high density polyethylene and toughened poly(methy

- methacrylate), *Polymer Eng. & Sci.*, Vol. 27, Issue 2, pp.110-115.
- (3) Scavuzzo, R. J., Cakmak, M., Srivatsan, T. S., Widera, G.E.O., Zhao, L., Chen, H., Hu, P. and Lam, P. C., 1999, Plastic Pipe – Burst and Fatigue Testing of PVC and HDPE Pipe, Welding Research Council.
- (4) Khelif, R., Chateaneuf, A., and Chaoui, K., 2008, "Statistical analysis of HDPE fatigue lifetime," *Meccanica*, Vol.43, pp.567-576.
- (5) EPRI, 2007, "Fatigue and Capacity Testing of High-Density Polyethylene Pipe and Pipe Components Fabricated from PE4710," *TR-1015062*.
- (6) EPRI, 2010, "Stress Intensification and Flexibility Factors of High Density Polyethylene Pipe Fittings," *TR-1020439*, Vol.1.
- (7) Kim, J. S., Lee, Y. J., and Oh, Y. J., 2015, "Study on tensile fatigue behavior of thermal butt fusion in safety class III high-density polyethylene buried piping in nuclear power plants," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 39, No. 1, pp.11-17.
- (8) ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2011, ASME B&PV Code Case N-755-1: Use of Polyethylene (PE) Class 3 Plastic Pipe, Section III, Division I and Section XI, ASME.
- (9) KSA, 2011, Testing Method of Flexural Fatigue of Rigid Plastics by Plane Bending, KS M 3036.
- (10) MTS, 2010, Manuals for MTS Landmark 100kN Dynamic Material Testing System.
- (11) <http://www.flir.com/cs/apac/kr/view/?id=41437>
- (12) Markl, A.R.C and Louisville, K.Y., 1952, "Fatiguetests of piping components," *Trans. of ASME*, pp.287-303.