

원전 안전 3 등급 고밀도 폴리에틸렌 매설 배관 맞대기 열 용착부의 인장 피로특성 평가

김종성^{*†} · 이영주^{*} · 오영진^{**}

* 순천대학교 기계우주항공공학부, ** 한국전력기술 전력기술개발연구소

Study on Tensile Fatigue Behavior 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^{**}

* Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Sunchon Nat'l Univ.,

** Power Electric Research Institute, KEPCO E& C

(Received May 14, 2014 ; Revised September 2, 2014 ; Accepted October 12, 2014)

Key Words: HDPE Piping(고밀도 폴리에틸렌 배관), Tensile Fatigue Behavior(인장 피로 거동), Stress-Controlled Condition(응력제어 조건), Thermal Butt Fusion(맞대기 열 용착부), Safety Class III Buried Piping(안전 3 등급 매설배관), Nuclear Power Plant(원자력 발전소)

초록: 최근에 원자력 발전소 안전 3 등급 배관에 적용되고 있는 고밀도 폴리에틸렌 배관은 용착 표면을 가열한 후 축방향으로 가압하는 열 용착 공정을 이용하여 맞대기 용착되어진다. 이러한 열 용착 공정은 맞대기 용착부에 비드 형상을 발생시킨다. 이러한 비드 형상의 응력집중에 기인하여 피로 수명이 줄어들 수 있다. 따라서 피로거동에 미치는 맞대기 열 용착부 비드의 효과를 고찰하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 응력 제어 조건 하의 인장 피로 시험과 유한요소 탄성응력 해석을 수행하여 맞대기 열 용착부의 인장 피로 거동을 고찰하였다. 고찰 결과, 중주기 및 고주기 피로 영역에선 피로 수명에 미치는 비드의 영향이 미미한 반면 저주기 피로 영역에선 비드의 존재가 피로 수명을 감소시킴을 확인하였다.

Abstract: High-density polyethylene (HDPE) piping, which has recently been applied to safety class III piping in nuclear power plants, can be butt-joined through the thermal fusion process, which heats two fused surfaces and then subject to axial pressure. The thermal fusion process generates bead shapes on the butt fusion. The stress concentrations caused by the bead shapes may reduce the fatigue lifetime. Thus, investigating the effect of the thermal butt fusion beads on fatigue behavior is necessary. This study examined the fatigue behavior of thermal butt fusion via a tensile fatigue test under stress-controlled conditions using finite element elastic stress analysis. Based on the results, the presence of thermal butt fusion beads was confirmed to reduce the fatigue lifetime in the low-cycle fatigue region while having a negligible effect in the medium- and high-cycle fatigue regions.

1. 서 론

최근에 HDPE(high density polyethylene) 재질은 우수한 부식 저항성, 저렴한 재료/설치 비용 등의 이유로 원자력발전소 안전 3등급 매설배관에 적용

되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 HDPE 배관은 열관을 이용한 용착면 가열이후 유압 또는 수동식 하중인가장치로 압착하는 맞대기 열 용착 공정을 통해 영구적으로 접합된다. 이러한 열 용착 공정 동안, 용착부는 응력집중을 야기시키는 비드(bead)를 발생시킨다. 이러한 기하학적 비드 형상에 의하여 피로 수명이 저감될 수 있다. HDPE 재질의 피로에 대한 다양한 연구들이 수행되었다.⁽²⁻⁴⁾ 특히 EPRI

† Corresponding Author, kimjsbat@sunchon.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

(Electric Power Research Institute)에서 원전 3등급 배설배관의 설계 기술기준 재개정을 위한 응력증대 계수(SIF : stress intensification factor) 결정을 위해 맞대기 열 용착부를 가지고 있는 HDPE 배관의 피로 수명을 평가하였으나 용착부 비드가 없는 배관의 피로수명과 비교하지 않았고 열 용착부의 비드가 피로수명에 미치는 영향을 평가하지 않았다.^(5,6) 또한, 맞대기 열 용착부의 비드가 피로수명에 미치는 연구는 수행된 바 없다.

본 연구에서는 맞대기 열 용착부를 가진 시편과 모재 시편에 대해 응력 제어 조건 하에서 인장 피로실험을 수행하여 맞대기 열 용착부의 비드가 피로수명에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 유한요소 탄성 응력해석을 수행하여 맞대기 열 용착부의 비드가 피로수명에 미치는 영향을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 피로평가 대상

본 연구의 실험에 사용된 HDPE 배관의 레진(resin)은 대한유화의 HDPE PE100 P600 이 사용되었고 조성은 Table 1 과 같다.⁽⁷⁾ 배관 제작시 투입되어 레진 물성 대비 배관 소재의 물성에 영향을 미치는 첨가물의 종류와 양은 정보 보안 때문에 배관 제작사로부터 확보할 수 없었다.

Table 1 Resin material data

Source	Properties	PE100 P600
Resin Manufacturer's Testing or Data Sheet	Cell Classification	445574C Bimodal
	PPI Pipe Grade	PE 4710
	Melt Index	0.07 g/10 min @2.16 kg/190 °C 16 g/10 min @21.6 kg/190 °C
	Density	0.949 g/cc
	Tensile Strength @yield	24.4 MPa
Pipe Manufacturer's Testing	Melt Index	15.24 g/10 min @21.6 kg/190 °C
	Density	0.952 g/cc
	Ring Tensile Strength	25.4 MPa
	Carbon Black Content	2.03 %
Confirmatory Testing	Melt Index	0.09 g/10 min @2.16 kg/190 °C
	Density	0.952 g/cc
	Tensile Strength @yield	10.5 MPa @85 °C

HDPE 배관의 외경과 두께는 각각 319.7mm 와 31.2 mm 이다. HDPE 배관은 ASME B&PV Code Case N-755-1⁽⁸⁾에 제시된 단일 고압 열용착 절차를 적용하여 맞대기 용착된다. Table 2 는 맞대기 열 용착 공정 변수 사양을 제시하고 있다.

2.2 피로시험 방법

HDPE 배관 전체적인 형상으로 피로실험을 수행하는 것은 대량의 자재와 대형 실험장비가 필요하여 비효율적이어서 ASTM D638-02a⁽⁹⁾에 제시된 형상에 따라 내외표면의 가공 없이 HDPE 배관으로부터 채취되었다. Fig. 1(a)는 맞대기 열 용착부가 없는 모재 시편과 Fig. 1(b)는 맞대기 열 용착부가 존재하는 용착부 시편의 기하학적 형상과 차원을 제시하고 있다. 시편의 두께는 배관의 두께와 동일하다. 비드가 형성된 맞대기 열 용착부의 횡절단면 형상을 Fig. 2에 제시하고 있다.

Table 2 Specification of the thermal butt fusion procedure variables

Conditions	Criteria
Heating plate temperature (°C)	205
Interfacial pressure (bar)	5.2
Bead size after heating (mm)	≥6.0
Removal time of heating plate (sec)	≤5.0
Time to interfacial pressure (sec)	≤12.9
Pressure maintenance time (min)	≥18

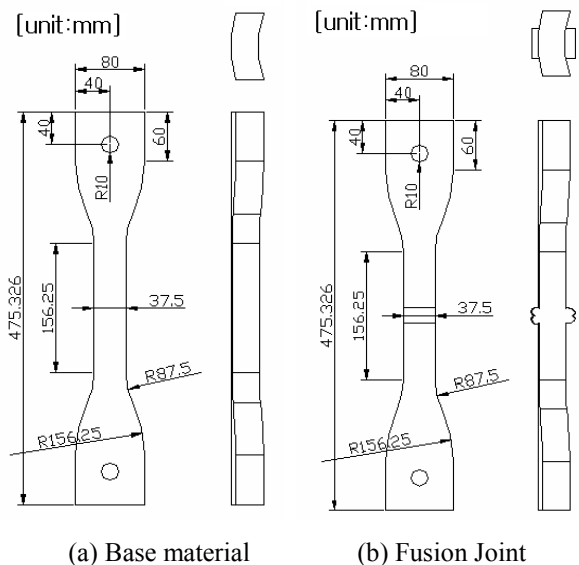


Fig. 1 Schematic configurations and dimensions of the fatigue test specimens.

하중 제어 조건 하에서 피로 실험을 수행하였다. 원전 안전 3 등급 HDPE 매설배관에 실제 작용하는 주된 1 차 하중인 운전압력의 특성을 고려하여 최대 하중에 대한 최소 하중의 비 R 은 0.01 로 고정하였고 하중 제어에서의 최대/최소 하중 모두 인장으로 설정하였다. 인장 피로시험의 최대 하중은 단순 인장 시험을 통해 도출한 최대하중 (21.44kN)의 0.6 배(12.86kN), 0.7 배(15kN), 0.8 배(17.15kN), 총 3 가지로 설정하였다. 가진 주파수는 1Hz 로 설정하였다. 시편의 크기가 클 뿐만 아니라 하중 제어 조건하에서 피로 사이클이 증가 할수록 변형이 크게 증가하는 HDPE 재질의 특성으로 인하여 피로 수명 기준은 Fig. 3 에서 보이는 것과 같이 최대 스트로크(stroke) 변위가 최초 최대 스트로크 변위의 3 배가 되는 사이클 시점으로 설정하였다. 여기서 δ_{o-max} 는 최초 시점에서의 최대 스트로크 변위를, δ_{o-min} 는 최초 시점에서의 최소 스트로크 변위를, δ_{t-max} 는 임의의 시간 t 에서의 최대 스트로크 변위를 의미한다. 3 배의 기준은 인장 하중이 지배적인 경우에 대해 ASME Code Case N-755-1 에 제시된 링 처짐(ring deflection) 기준을 초과하는 강성 저하 임계 기준으로부터 도출된 것이다. 동일 시편 사양과 하중 조건 별로 3 번씩 시험을 최대 하중 10 톤 사양의 MTS 사의 동적 만능재료 시험장비⁽¹⁰⁾를 이용하여 수행 하였다. 아울러 고분자인 HDPE 특성상 반복적인 하중이 빠른 속도로 가해지면 발열 현상이 발생할 수 있어서 피로시험 동안 시편 표면 온도를 FLIR Systems 사의 적외선 열화상 카메라 FLIR T600⁽¹¹⁾(해상도 640× 480 픽셀, 정밀도는 $\pm 2^{\circ}C$, 측정 범위 $-40^{\circ}C \sim 500^{\circ}C$)로 측정하였다.

2.3 피로시험 결과

Fig. 4는 맞대기 열 용착부가 없는 모재 시편과 맞대기 열 용착부를 가진 시편의 인장 피로시험 결과를 비교 제시하고 있다. x축은 피로수명 사이클 수를, y축은 공칭 응력 진폭을 의미한다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 20,000cycles 이하의 저주기 피로 영역에서는 맞대기 열 용착부를 가진 시편의 피로수명이 모재 시편의 피로수명보다 동일 응력진폭 하에서 짧음을 알 수 있다. 20,000cycles 이상의 중고주기 피로 영역에서는 맞대기 열 용착부의 존재 여부에 무관하게 유사한 피로수명을 나타낼 수 있다.

식 (1)과 식 (2)는 맞대기 열 용착부를 가진 시편의 피로실험 관계식과 모재 시편의 인장 피로

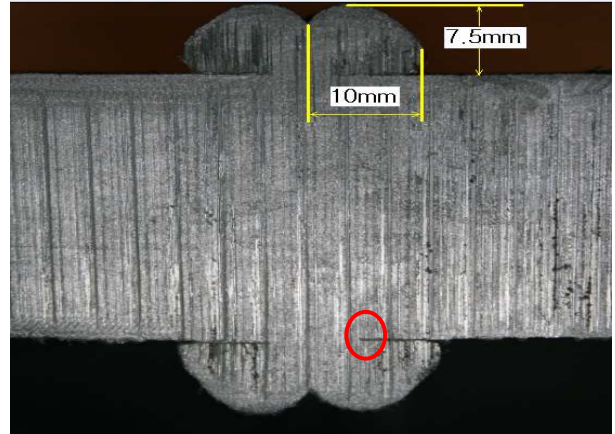


Fig. 2 Cross-sectional configuration of the thermal butt fusion joint

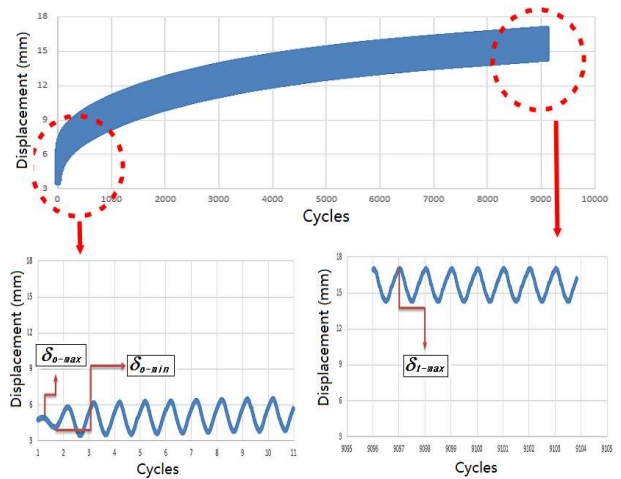


Fig. 3 A representative variation of stroke displacement vs. tensile fatigue cycle

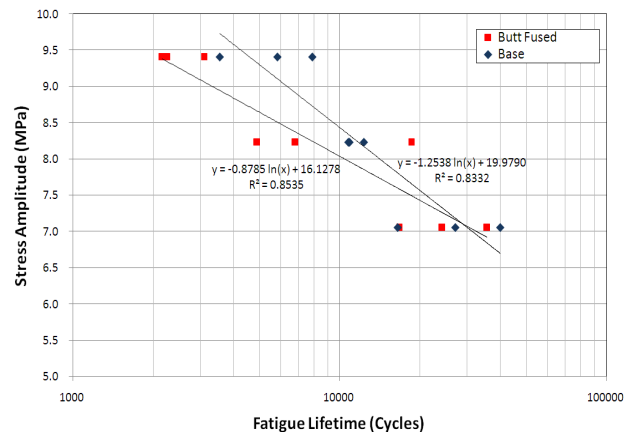


Fig. 4 Tensile fatigue test results of the thermal butt fusion joint and base material specimens

수명-공칭 응력 진폭 관계식을 제시하고 있다.

$$S_t(MPa) = -0.8785 \ln(N) + 16.1278$$

(맞대기 열 용착부 시편) (1)

$$S_t(MPa) = -1.2538 \ln(N) + 19.9790 \quad (\text{모재 시편}) \quad (2)$$

여기서 S_t 는 공칭 인장응력 진폭을 의미하며 N 은 피로수명 싸이클을 의미한다.

주어진 동일 피로수명 싸이클에 대해 용착부를 가지는 배관 또는 시편의 공칭 응력 진폭에 대한 용착부 없는 모재 배관 또는 시편의 공칭 응력 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 싸이클에 대해 큰 공칭 응력진폭이 나타냄을 의미한다.

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

여기서 S_{t-base} 는 주어진 인장 피로 수명 싸이클에 해당되는 모재 시편의 공칭 인장응력 진폭, $S_{t-with fusion}$ 는 주어진 동일 인장 피로 수명 싸이클에 해당되는 맞대기 열 용착부 시편의 공칭 인장응력 진폭이다.

Fig. 5는 인장 피로하중에 대한 SIF 식 (3)과 각 시편의 인장 피로수명 관계식인 식 (1)와 식 (2)을 이용하여 도출한 피로수명 싸이클에 대한 인장 피로 SIF 변화를 제시하고 있다. 여기서 SIF 도출을 위한 기준은 맞대기 열 용착부를 가진 시편의 시험 결과가 아니라 응력집중부인 맞대기 열 용착부를 갖지 않는 모재 시편의 시험 결과이다. 1,000cycles 정도에서 1.1251의 값을 나타냄을 보이고 있다. 즉, 맞대기 열 용착부를 가진 시편의 경우 모재 시편 보다 1.1251배 작은 공칭 인장 응력 진폭에서 동일 피로수명 싸이클 1,000cycles을 나타냄을 알 수 있다. 피로수명 싸이클이 증가할수록 SIF 는 감소하여 30,000cycles 정도 이상에서는 1의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 30,000cycles 정도 이상의 중고주기 피로 영역에서는 맞대기 열 용착부를 가진 시편과 맞대기 열 용착부를 갖지 않는 모재 시편 모두 동일 인장응력 진폭에 대해 동일한 피로수명을 갖음을 의미한다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 용착 비드 부에 균열과 같이 날카로운 노치(적색 원 안)가 존재하므로 피로하중 가진 주파수가 높아질수록 이러한 노치에 국부적인 응력집중으로 인한 발열현상이 발생하여 피로거동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적외선 열화상 카메라를 이용하여 용착부를 갖는 피로인장 시편의 온도와 용착부

없는 모재 피로인장 시편의 온도를 피로시험 동안 측정 비교하였다. Fig. 6은 적외선 열화상 카메라로 측정된 피로 실험 동안의 인장피로 시편의 온도 분포를 보여주고 있다. 여기서 빨간 색은 최대 온도를, 파란색은 최소 온도를 의미한다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 시편 중앙부에 최대 온도가 발생함을 알 수 있다. Fig. 7은 적외선 열화상 카메라로 측정된 피로 싸이클에 따른 최대 온도 지점의 온도 변화를 제시하고 있다. 최대 온도는 피로 싸이클이 증가할수록 증가하는데 그 증가 기울기가 상당히 완만해 지는 것을 알 수 있다. 피로하중이 10,000cycles 작용시 최대 약 2.6°C의 표면 온도 상승이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 온도 상승은 HDPE 재질의 고유한 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 맞대기 열 용착부 시편이나 모재 시편 모두 온도 증가 양상이나 증가 정도가 거의 동일함을 알 수 있다.

2.4 비드의 응력집중 거동 해석

용착하는 동안 용착부 근처의 재료물성도 변화

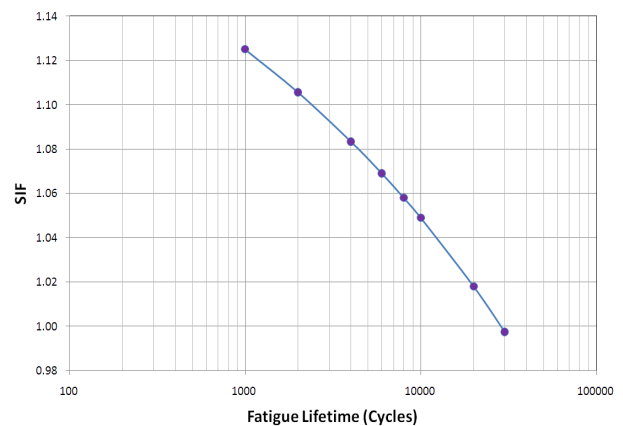


Fig. 5 Variation of the SIF vs. fatigue lifetime cycle

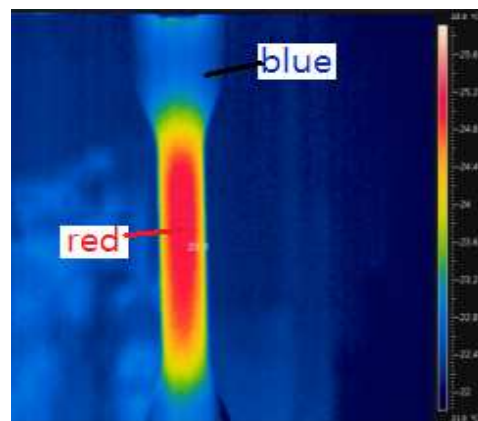


Fig. 6 Temperature distribution during fatigue test measured by an intra-red thermal imaging camera

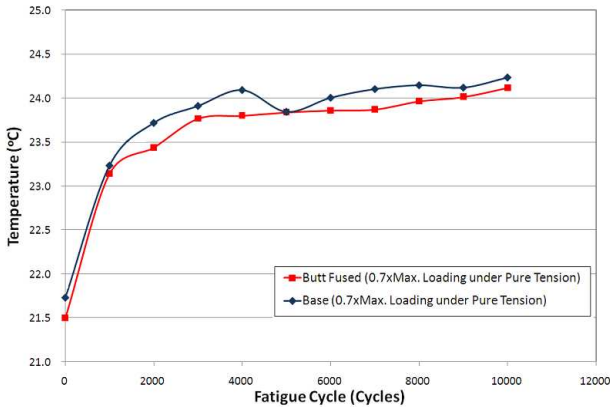


Fig. 7 Temperature histories at maximum temperature generation points during fatigue test measured by an intra-red thermal imaging camera

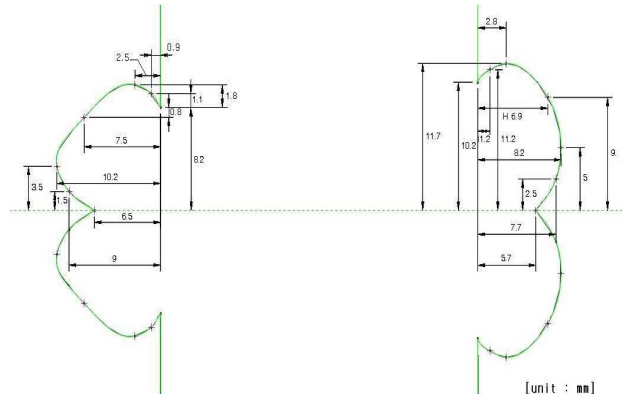


Fig. 9 Geometric dimensions of the thermal butt fusion joint



Fig. 8 3D scanning of the thermal butt fusion joint

하고 잔류응력도 발생하나 본 연구에서는 맞대기 열 용착 비드 형상이 응력집중에 미치는 효과를 상세 유한요소 탄성 응력해석을 수행하여 피로특성 면에서 고찰하였다. 용착부의 물성 변화와 잔류응력이 피로거동에 미치는 영향은 광범위하고 세밀한 연구가 필요하므로 본 연구의 후속 연구로 수행할 예정이다.

Fig. 8 은 HDPE 배관 맞대기 열 용착부의 기하학적 형상을 상세히 조사하기 위한 3D scanning 작업을 보여주고 있다. NextEngine 시스템⁽¹³⁾을 이용하였다. Fig. 9 는 3D scanning 을 통해 결정한 최종적인 기하학적 치수를 보여주고 있다. Fig. 10 은 최종적인 기하학적 치수를 토대로 모델링한 2 차원 유한요소 모델을 보여주고 있다. 사용한 유한요소는 2 차 연속체 저감적분(quadratic solid, reduced integration) 평면 변형률 요소이다. 순수 단위 인장응력 1.0MPa 이 축방향(Fig. 10 의 y 축 방향으로써 시편을 채취한 배관의 축방향을 의미, 용착면에 수직인 방향)으로 작용하도록 설정하였으며 용착 비드와 배관의 내외표면이 접하는 면은 자기 접촉 조건을 부가하였다.

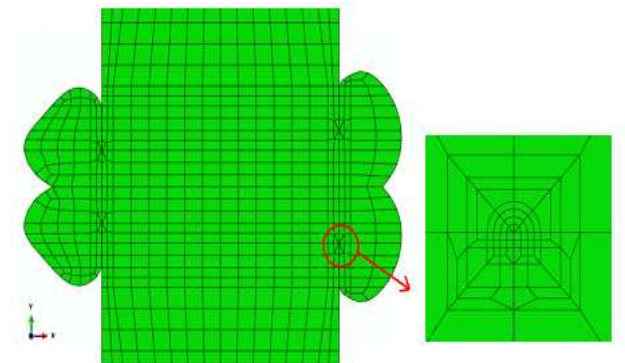


Fig. 10 Finite element model of the thermal butt fusion joint in the fatigue test specimen

상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁴⁾를 이용하여 유한요소 탄성 응력 해석을 수행하였다. 탄계수와 푸아송 비는 각각 1200MPa 과 0.4 로 설정하였다.⁽¹⁵⁾ Fig. 11 은 맞대기 열 용착부의 축방향 응력 분포를 제시하고 있다. 단위 응력을 부가한 것은 추후 응력 값이 아니라 응력집중계수를 고찰하여 비드의 응력집중 거동을 분석할 것이기 때문이다. Fig. 12 는 내표면으로부터 배관 두께 방향 거리에 따른 경로 1 상의 응력 분포를 제시하고 있다. 경로 1 은 Fig. 12 에 제시하고 있다. 그림들에서 보듯이 용착 비드의 중앙부가 아니라 용착 비드가 접혀져 배관 표면과 접하는 지점에서 매우 국부적으로 큰 응력이 발생한다.

원전 안전 3 등급 배관을 설계할 때, 국부적인 피크 응력은 전혀 고려되지 않고 있다. 이는 안전 3 등급 배관의 피로 수명 시점은 안전 1 등급과 같이 엔지니어링 관점에서의 작은 크기의 피로균열 발생이 아니라 피로 균열 관통이기 때문이다.⁽¹⁶⁾

따라서 안전 3 등급 매설 HDPE 배관에 대해서는 국부적인 응력이 아니라 전체 두께에 걸친 피로균열 성장을 지배하는 막응력(membrane stress),

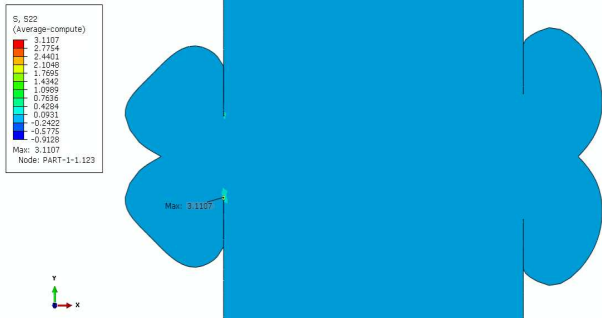


Fig. 11 Axial stress distribution of the thermal butt fusion joint under pure tensile loading

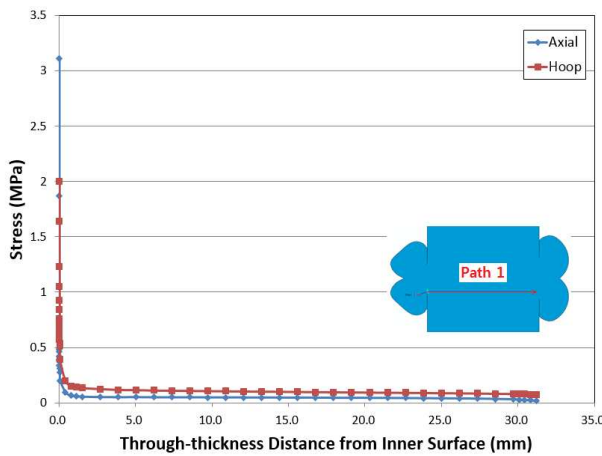


Fig. 12 Stress distributions from inner surface along the path 1 in the thermal butt joint

굽힘응력(bending stress) 및 구조응력(structural stress, 막+굽힘응력)을 도출하여야 한다. 본 연구에서는 유한요소 크기와 특성에 둔감한 구조응력 σ_s 를 도출하는 구조응력 개념⁽¹⁷⁾을 도입하였다. 다음과 같이 힘 평형 조건과 모멘트 평형 조건에 의해 각각 막응력 σ_m 과 굽힘응력 σ_b 가 계산된다.(Fig. 13 참조)

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_{axial}(x) dx \quad (4)$$

$$\sigma_m \frac{t}{2} + \sigma_b \frac{t^2}{6} = \int_0^t x \sigma_{axial}(x) dx \quad (5)$$

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \quad (6)$$

여기서 $\sigma_{axial}(x)$ 는 축방향 응력분포, x 는 응력구분선(경로 1) 상 내표면으로부터의 거리, t 는 배관벽 두께를 의미한다.

또한, 인장하중이 작용하는 맞대기 용착부가 없는 모재 시편 경우, 굽힘 응력 성분이 없기 때문에 구조응력은 공칭 인장응력의 크기와 동일한 막응력 성분만으로 표현할 수 있다. 맞대기 열 용착부 시편의 구조응력 $\sigma_{s-fusion}$ 을 모재 시편의 구조응력 σ_{s-base} 으로 정규화한 맞대기 열 용착 비드의 응

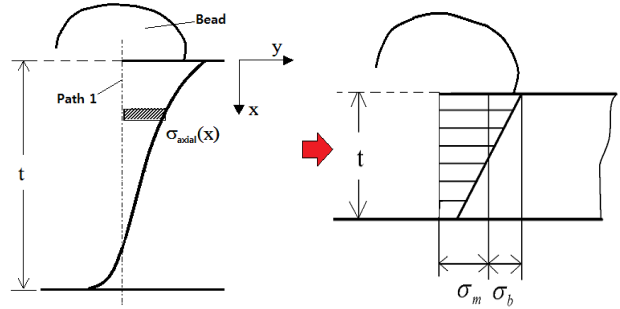


Fig. 13 Overview of the structural stress calculation

력집중계수 K_t 가 식 (7)에 의해 계산되는데 1.0056의 값으로 도출된다. 응력집중계수는 피로 수명의 개념이 반영된 것이 아니라 단순히 하중 작용시 응력집중부 없는 경우 대비 응력집중부로 인한 응력의 집중 정도를 의미한다.

$$K_t = \sigma_{s-fusion} / \sigma_{s-base} \quad (7)$$

이러한 결과는 맞대기 열 용착부 시편에 대한 중주기 피로 영역 이상에서의 SIF 값(약 1의 값)이 타당함을 의미한다. 저주기 피로영역의 경우 비드의 국부 응력집중 지점은 탄성거동이 아닌 탄소성 거동을 할 것으로 예상되므로 저주기 피로영역에서의 피로거동을 탄성응력 해석을 통한 비드 부 응력집중 고찰로 분석하는 것에는 한계가 있다고 판단된다.

3. 결론

HDPE 배관 맞대기 열 용착부의 비드가 인장피로수명에 미치는 영향을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 20,000cycles 이하의 저주기 피로 영역에서는 맞대기 열 용착부를 가진 시편의 피로수명이 모재 시편의 피로수명보다 동일 응력진폭 하에서 짧음.
- (2) 20,000cycles 이상의 중고주기 피로 영역에서는 맞대기 열 용착부의 존재 여부에 무관하게 유사한 피로수명을 나타냄.
- (3) 응력증대계수는 전 주기에 걸쳐 약 1 근방의 값을 가지는데 피로 수명 사이클이 감소할수록 감소하여 30,000cycles 정도 이상에서는 1의 값을 가지는데 이러한 중주기 피로영역 이상에서의 피로거동은 유한요소 탄성 응력 해석을 통해 도출된 응력확대계수 값으로부터 타당함을 확인.
- (4) 피로 하중 동안 용착부 비드의 존재로 인한 시편 온도의 변화는 미미하므로 용착부 비드 존재로 인한 온도 변화가 피로거동에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단됨.

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. 2010T100100780, No. 2013T100200100)

참고문헌

(References)

- (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 Engineering & Science*, 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., Chateaufneuf, 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) Korea Petrochemical Industry Company, Ltd., 2011, *Product Analysis Report for PE100 P600*.
- (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) ASTM, 2003, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM D638-02a, ASME International.
- (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, "Fatigue Tests of Piping Components," *Trans. of the ASME*, April, pp.287~303.
- (13) <http://www.nextengine.com/products/scanner/specs>
- (14) Dassault Systems, *Simulia, User's Manuals for ABAQUS*, Ver.6.12, 2012.
- (15) www.springer.com, 3.3. Polymers, 9783540443766-c3[1].pdf.
- (16) Rao, K.R., 2012, *Companion Guide to the ASME Boiler and Pressure Vessel and Piping Codes*, Fourth Edition, Volumes 1&2, ASME International.
- (17) Kim, J.S., Jin, T.E., Hong, J.K. and Dong, P., 2003, "Finite Element Analysis and Development of Interim Consolidated S-N Curve for Fatigue Design of Welded Structure," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.27, No.5, pp.724~733.