

환형노치시편(CNB)을 이용한 폴리에틸렌 배관재의 피로거동해석

A study on the Fatigue Characteristics of Pipe Grade Polyethylene Using Circular Notched Bar Specimens

*조용건¹, #최병호², 이정무³

*Y. J. Zhao¹, #B.-H. Choi(bhchoi@korea.ac.kr)², J.-M. Lee³

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과, ² 고려대학교 기계공학과, ³ LG화학 테크센터

Key words : Fatigue, Polyethylene(PE), Circular Notched Bar(CNB), Ductile, Brittle

1. 서론

High density polyethylene (HDPE)와 Medium density polyethylene (MDPE)는 최근 파이프 (가스 파이프 및 상/하수도 파이프)의 재료로 많이 적용되고 있는데, 실제 현장에서 일어나는 문제들은 기존의 재료역학적인 정적해석으로 예측이 불가능한 경우가 많다. 배관재료의 파괴기구가 연성(ductile), 취성 (brittle) 그리고 환경파괴 (Environmental cracking)의 세 가지로 변화하고, 이에 따라 최종 수명도 큰 차이를 나타내게 된다. 이 중 특히 취성파괴가 발생하는 경우, PE 재의 균열진전은 많은 경우 장기간에 걸쳐 준벽개 (quasi-brittle) 상태로 나타나므로 소성변형이 극히 제한되어 외관상 균열을 판단하는 것은 매우 어렵다. 이를 해석하기 위하여 반드시 균열발생거동과 더불어 저속균열진전 (slow crack growth : SCG)의 특성을 해석하여야 한다.

본 논문에서는 균열진전거동이 전혀 다른 Uni-modal MWD를 갖는 배관용 PE 두 종류와 Bi-modal MWD를 갖는 배관용 PE 두 종류의 선택하여, 피로하중 하에서의 균열진전거동을 환형노치시편 (CNB)을 이용하여 실험적으로 검토하였다.

2. 시험재료 및 조건

시험재료는 Dow Chemical Company의 배관용 PE 4종류를 선정하여 각각 Uni-modal MWD를 갖는 재료의 경우 PE-UM-1 및 PE-UM-2, 그리고 Bi-modal MWD를 갖는 재료의 경우 PE-BM-1 및 PE-BM-2로 표기하였다. Table 1에서는 4가지 PE들에 대한 기본물성을 나타내었다. 파이프 가공조건 (저속 냉각 및 등방 물성)을 만족하기 위하여 압축몰딩 (Compression molding)을 통하여 판재를 가공하고, 이 판재를 절단 하여 Fig. 1과 같이 본 실험에 사용한 환형노치시편 (Circular Notched Bar; CNB) 시험편을 가공하였다.

Table 2에서는 본 연구에서 수행된 시험조건을 나타내었다. 본 연구에서 피로시험은 MTS 사의 유압식 만능 피로시험기를 사용하였으며, 노치를 1.0mm, 응력비를 0.1로 정하였다. 그리고 피로응력 범위($\Delta\sigma$)를 재료의 인장특성을 참고하여 9.9, 10.8, 11.7, 12.6, 13.5 MPa 중 4가지로 설정하여 시험하였다.

Table 1 Physical properties of materials

Number of samples	Density (g/cm ³)	Melt index (g/10 min)	Melt temperature (°C)	Flexural modulus (MPa)
PE-UM-1	0.933	0.7	190	550
PE-UM-2	0.941	0.55	190	660
PE-BM-1	0.940	0.15	193	621
PE-BM-2	0.949	0.08	193	1030

Table 2 Comparison of experiment conditions

Properties	Value	Unit
R-ratio	0.1	
$\Delta\sigma$	9.9, 10.8, 11.7, 12.6, 13.5	MPa
Notch depth (a)	1.0	mm
Frequency (f)	10	Hz

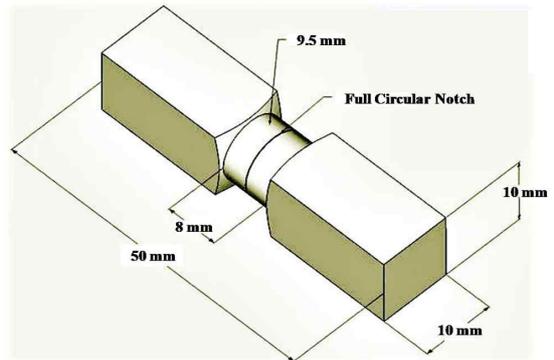


Fig. 1 Geometry of specimen

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2에는 피로시험으로 측정된 4가지 종류 배관재에 대한 S-N 선도 관계식을 나타내었다. 저하중에서는 PE-UM-1이 더 긴 수명을 갖지만 두 재료의 S-N 선도는 교차하여 고응력부에서는 PE-UM-2가 더 긴 수명을 갖는다. ASTM에 정의되어 있는 PENT시험을 실시한 경우 PE-UM-1재료가 월등히 긴 수명을 갖는 것으로 측정되지만 이 시험은 균열발생 및 진전 거동, 그리고 파괴기구를 동시에 고려하지 못하므로 재료의 SCG 특성을 해석하는 데에는 많은 문제가 있음을 알 수 있다.

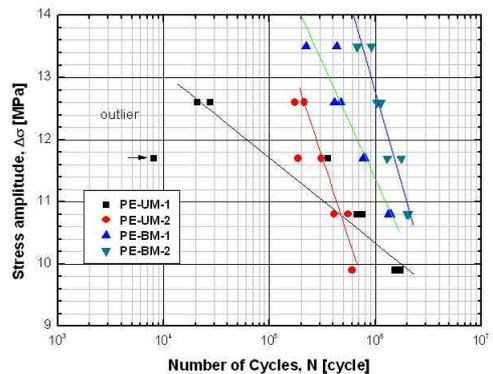


Fig. 2 S-N curve of all tested materials

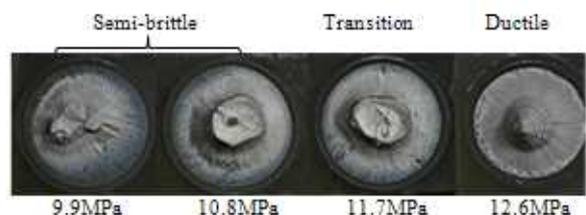


Fig. 3 Fracture surfaces of PE-UM-1 for variable load ranges

한편, PE-BM-1과 PE-BM-2는 대체적으로 긴 수명을 갖지만 저하중 일수록 PE-UM-1의 S-N선도와 교차되는 현상이 나타내었다. 역시 PENT 시험을 통하여 얻은 수명이 거의 두 시험편의 경우 매우 크게 나타나지만 그 값은 재료의 실질적인 균열저항성을 설명할 수 없다. 특히 저응력이 시험편에 적용할 때는 준벽개

(quasi-brittle) 형태의 파괴가 일어나지만 고응력 일수록 재료는 연성 (ductile) 형태의 파괴가 일어나는 파괴기구의 변화가 관찰된다 (Fig. 3). PE-UM-2와 PE-BM-1는 비록 밀도는 같지만 피로수명은 S-N 선도에서 작은 기울기의 차이를 보이며 고수명으로 이동함을 관찰할 수 있었다. 즉 Bi-modal MWD를 갖은 PE-BM-1은 Uni-modal MWD를 갖은 PE-UM-2 보다 어떤 하중에서나 무관하게 긴 수명을 나타내었다.

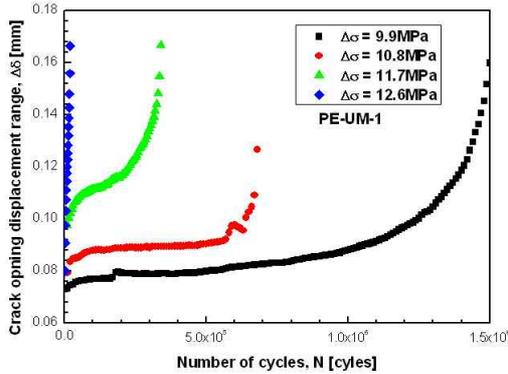


Fig. 4 COD vs. number of cycles, N (PE-UM-1)

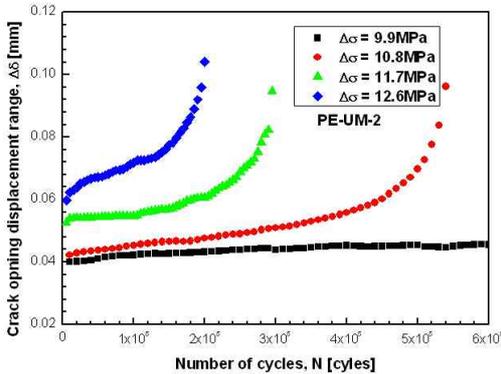


Fig. 5 COD vs. number of cycles, N (PE-UM-2)

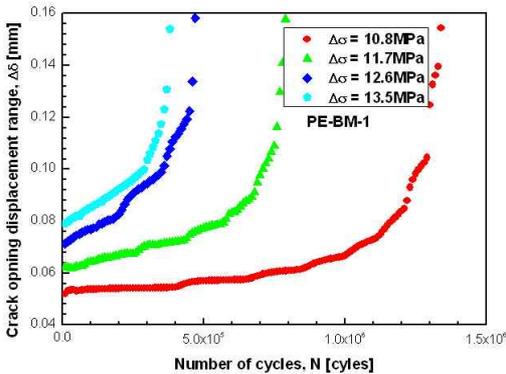


Fig. 6 COD vs. number of cycles, N (PE-BM-1)

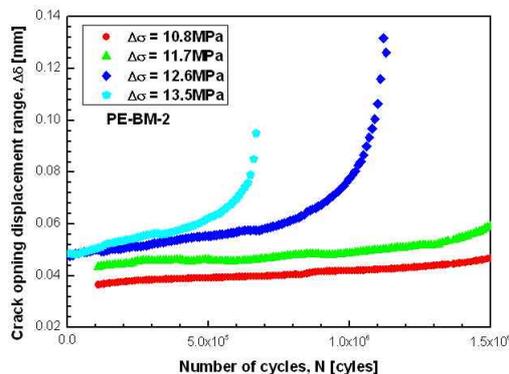


Fig. 7 COD vs. number of cycles, N (PE-BM-2)

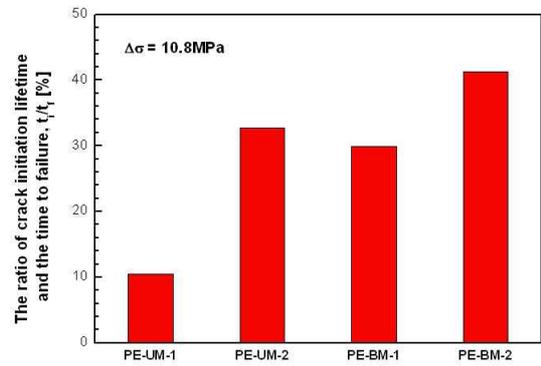


Fig. 8 The ratio of crack initiation lifetime and the time to failure

각 재료들의 시험편과 단면을 관찰했을 때 PE-UM-1의 경우에는 상당히 균열의 진전거동이 동심원의 형태로 진전하는 데에 반하여 PE-UM-2, PE-BM-1과 PE-BM-2의 경우에는 특히 준벽개 파괴가 일어나는 경우 상당히 심한 편심원의 형태로 균열이 진전함을 관찰할 수 있다. 이는 PE-UM-2, PE-BM-1과 PE-BM-2의 경우 높은 밀도로 인해 균열진전의 저항성이 적어 국부적인 균열발생 및 진전이 비교적 쉽게 일어나기 때문이다. Fig. 4-7은 각 재료들의 균열진전 거동을 나타낸 그림이다. 이 그림에서는 COD 범위 ($\Delta\delta$)는 피로시험중에 최대 응력과 최소 응력을 받았을 때 측정된 Extensometer의 값을 이용하여 계산하였다. PE-UM-1과 PE-BM-1는 준벽개 형태로 균열이 진전하는 저응력의 경우에는 단속적인 균열진전거동이 관찰되었다. 이를 이용하여 균열의 발생수명을 예측하는 것이 가능하다. 하지만 PE-UM-2와 PE-BM-2의 경우에는 균열진전특성이 보다 연속적인 거동이 나타나는데 이는 이 재료가 균열진전 저항이 상대적으로 낮아서 충분한 Process zone의 형성이 되지 않은 채, 균열이 진전하게 됨을 의미한다. Fig 9에서는 각 재료들의 준벽개 형태로 균열이 진전하는 저응력의 경우 균열발생 수명과 피로수명의 비를 나타낸 그림이다. 그림에서 보다 싶이 PE-UM-1의 경우는 상당히 낮은 균열발생 수명을 갖았으며 반면 PE-BM-1, PE-UM-2와 PE-BM-2는 상대적으로 긴 균열발생 수명을 갖는다. 이것은 피로수명에서 PE-UM-1는 균열발생 수명보다 균열진전이 더 큰 역할을 하며 반면 특히 PE-UM-2와 PE-BM-2는 균열진전 속도보다 균열발생 수명이 더 큰 역할을 하기 때문이다. 그리고 PE-BM-1의 경우는 비교적 긴 균열발생 수명을 가졌을 뿐만 아니라 Fig 6 및 8에서 볼 수 있는 것처럼 균열이 발생 후 진전형태를 봤을 때 일정한 균열진전 저항력도 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전혀 다른 4가지 종류의 배관용 PE의 균열진전 거동을 알기위하여 실험적으로 검토를 해봤다. 그 결과 PE-UM-1의 경우 준벽개 형태의 파괴가 일어나는 저응력의 경우 상당히 긴 피로수명을 나타내었지만 고응력이 적용할 때는 연성 파괴가 일어나면서 PE-UM-2보다 낮은 피로수명이 나타내었다. 그러나 균열진전 저항력은 매우 강했다. PE-UM-2는 비록 긴 균열발생 수명을 가졌으나 균열진전 저항력이 매우 약함을 관찰하였다. 한편 Bi-modal MWD를 갖은 PE-BM-1은 상당한 균열 피로수명이 측정되었을 뿐만 아니라 일정한 균열진전 저항력도 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 Bi-modal MWD와 고밀도 PE인 PE-UM-2는 비 상당히 긴 균열발생 수명을 가졌지만 PE-BM-2과 비슷하게 균열진전 저항력은 비교적 낮았다.

참고 문헌

<생략>