Notched Ring Test 저속균열 시험편의 응력확대계수정식화

표수호¹ · 최선웅^{2†}

¹Gas Technology Institute, ²한남대학교 신소재공학과

Development of Stress Intensity Factor Equation for the Notched Ring Test (NRT) Specimen

SooHo Pyo¹ and Sunwoong Choi^{2†}

¹Gas Technology Institute, Des Plaines, IL, 60018 USA

²Department of Polymer Science and Engineering, Hannam University, Daejeon 305-811, Korea

(2014년 1월 21일 접수 : 2014년 1월 30일 최종수정 : 2014년 2월 3일 채택)

Abstract The Notched Ring Test(NRT) has proven to be very useful in determining the slow crack growth behavior of polyethylene pressure pipes. In particular, the test is simple and an order of magnitude shorter in experimental times as compared to the currently used Notched Pipe Test(NPT), which makes this method attractive for use as the accelerated slow crack growth test. In addition, since the NRT specimen is taken directly from the pipe, having maintained the cross-section, processing induced artifacts that would affect the slow crack growth behavior are not altered. This makes the direct comparison to the slow crack growth specimen in pipe from more meaningful. In this study, for comparison with other available slow crack growth methods, including the NPT, the stress intensity factor equation for NRT specimen was developed and demonstrated of its accuracy within 3 % of that obtained from the finite element analysis. The equation was derived using a flexure formula of curved beam bending along with numerically determined geometric factors. The accuracy of the equation was successfully tested on 63, 110, 140, 160, 250, and 400 mm nominal pipe diameters, with crack depth ranging from 15 % to 45 % of the pipe wall thickness, and for standard dimensional ratio(SDR) of 9, 11, and 13.6. Using this equation the slow crack results from 110SDR11 NRT specimen were compared to that from the NPT specimen, which demonstrated that the NRT specimen was equivalent to the NPT specimen in creating the slow crack, however in much shorter experimental times.

Key words notched ring test(NRT), notched pipe test(NPT), slow crack growth, stress intensity factor, plastics pipes and fittings.

1. 서 론

지속적인 연구와 함께 발전된 고분자 소재는 이전의 단점을 극복하면서 점차 기계 및 구조요소로 현대산업에서 자리를 잡아가고 있다. 이러한 흐름 안에서 요구되는 장기내구특성은 설계수명과 맞물려 중요한 요구성능으로 인식되고 있으며, 이의 측정은 고분자소재로 제작된 제품시장에서 중요한 화두로 떠오르고 있다. 제품의 사용에서 발생하는 다양한 파손 중 직접적인 외부하중의 작용과 설치 및 운용 등의 문제를 제외하면 제품의

생산 또는 사용환경에 노출되어 발생하는 미세결함들이 점차 성장하는 저속균열성장현상이 설계수명에 직접적인 영향을 차지하기 때문에 이에 대한 저항성의 측정은 매우 중요하다. 이러한 저속균열성장은 사용 중 부여되는 낮은 하중이 존재하는 결함의 선단에 집중되고 큰 응력으로 유도되어 균열이 성장하는 동력으로 작용하며 크레이징의 생성과 함께 균열이 저속으로 따라 자라는 매카니즘을 통해 제품을 파손에 이르게 하는 현상이다.¹⁻³⁾

폴리에틸렌소재의 경우 이러한 균열 성장 매카니즘에 대한 많은 선행연구가 진행되어 있고⁴⁻⁶⁾ Notched Ring

[†]Corresponding author

E-Mail : swchoi@hnu.kr (S. W. Choi, Hannam Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1. Diagrammatic illustration of NRT specimen.

Fig. 2. Geometry and loading configuration of NRT specimen.

Test(NRT) 또한 이에 대한 가속시험방법이다. NRT 시험방법은 최근 들어 국제표준규격 ISO TS 16479⁷⁾로 등록되었으며 플라스틱배관의 저속균열성장 저항성측정을 위한 것이다. 기존의 국제표준규격시험방법인 Notched Pipe Test(NPT) Method(ISO 13479)⁸⁾ 그리고 Cone Test Method(ISO 13480)⁹⁾ 같은 배관시험에서 나타나고 있는 응력노출환경과 균열의 성장방향, 시료제작의 어려움과 더불어 고가의 시험장비가 요구되는 등의 단점을 개선하고, 균열성장저항측정에 요구되는 시간의 획기적인 축소라는 큰 장점을 가지고 있는데, 이는 꾸준히 발전해가는 고분자소재 성능에 대응한다는 점에 높은 관심을 받고 있다. 또한 NRT 방법은 Fig. 1과 같이 별도의 성형 공정 없이 배관의 길이방향으로 일정부분 채취하여 고리와 같은 형상으로 진행되는데, 이로 인해 시험편의 제작공정이 단순해지고, 저속파괴거동에 영향을 미치는 잔류응력과 분자배향(molecular orientation) 등 압출가공으로부터 생성된 요소들이 그대로 보존되며, 시료에 부여되는 초기균열 및 균열성장의 측정이 용이해지는 장점을 갖는다.^{10,11)}

Fig. 2에 나타난 바와 같이 NRT 방법은 고리형상을 가

지고 있으며, 시험 전 내면에 초기균열을 가공하여 이를 기준으로 3점 굽힘방식의 하중전달을 사용하고 있다. 축방향 표면균열을 가지는 배관시료에 내압을 걸어 실험되는 NPT 방법과의 비교를 위해서는 이 둘을 포함하는 새로운 비교기준이 요구되기 때문에 두 시험방법 모두에서 가공되는 균열의 선단(notch tip)에 작용하는 응력확대계수를 도입하였다. 일반적으로 배관의 장기내구성을 측정하기 위해 주로 사용되는 NPT의 경우, 선행연구의 결과로 그 계산이 가능하다.^{12,13)} 하지만 NRT방법에서 사용되는 3점 굽힘하중방식의 고리형상시료의 응력확대계수는 아직 정의된 바 없으므로 이 계산을 위한 정식화가 요구된다.

2. 응력확대계수의 정식화

균열선단에 응력장의 세기를 나타내는 인자인 응력확대계수(stress intensity factor)는 파괴현상을 분석하는 일반적인 방법으로서 균열이 존재하는 주변의 국부파괴 및 전체적 파괴거동을 연관시키기 위한 모델을 개발하여 파괴인성의 기하학적 의존성을 특정 짓고 예측하여 정량화된다.^{14,15)} 위와 같이 정의되는 응력확대계수는 아래의 식 1과 같이 나타낼 수 있으며, 식 1에 포함된 형상함수(shape function) Y 는 응력확대계수의 결정에 있어 중요한 요소이다. 현재까지 다양한 형상에 대한 함수가 발표되어 있으며, 수학적인 계산과 유한요소를 사용한 수치해석적 방법, 모두를 사용하여 형상함수를 정의한다.

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 Y 는 NRT 시료의 형상함수이며, a 는 균열길이 그리고 σ 는 작용응력을 말하며, Fig. 2에 시료의 형상을 자세히 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 NRT 방법은 3점 굽힘하중이 고리형상에 전달될 경우, 굽힘하중에 의해 발생하는 내면균열부인 A지점의 모멘트는 식 2와 같이 정의된다.¹⁶⁾

$$M_A = \frac{M_0}{\pi} \left(\theta - \frac{2\sin\theta k_2}{k_1} \right) \quad \text{식 (2)}$$

여기서 M_0 는 우력모멘트(couple moment)로서 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_0 = \frac{L\cos\phi S}{4} \quad \text{식 (3)}$$

L 은 가해지는 하중이고 S 는 지지대중심 사이간 거리이다. S 의 경우, 고려되는 변수들의 감소와 정식화의 용이성을 위해 외경의 반 ($R_2/2$)으로 정의하였다. 식 4의

Fig. 3. Bending moment configuration for the three-point curved beam flexure.

k_1, k_2 는 원형단면에 가해지는 원주응력(hoop stress)과 전단응력(shear stress)의 상관관계를 나타내며 식 4와 식 5로 표현된다.

$$k_1 = 1 - \alpha + \beta \quad \text{식 (4)}$$

$$k_2 = 1 - \alpha \quad \text{식 (5)}$$

식 4와 식 5의 α, β 는 원형을 이루고 있는 단면의 두께에 대한 정보를 나타내는 값이며, 두꺼운 벽(thick wall)으로 적용할 경우, 각각 식 6, 7과 같다.

$$\alpha = \frac{e}{R} \quad \text{식 (6)}$$

$$\beta = 2F(1 + \nu)\frac{e}{R} \quad \text{식 (7)}$$

R 은 원형의 중심으로부터 시료두께 중심까지 거리이고, F 는 시료단면의 형태에 따라 변하는 값으로 사각 또는 원형, 다이아몬드 등 단면형상의 정보를 나타낸다. ν 는 포아송비(Poisson's ratio), e 는 단면에서의 중심축(centroidal axis)과 중립축(neutral axis) 사이의 거리이다. NRT 시험편의 경우, 중심축과 중립축이 같은 위치에 있게 되므로 e 값은 0이 되어 α, β 또한 0이 된다. 따라서 k_1, k_2 값은 모두 1이 된다. 이 결과들을 사용하여 식 2를 다시 정리하면 식 8과 같다.

$$M_A = \frac{M_0}{\pi}(\theta - 2\sin\theta) \quad \text{식 (8)}$$

일련의 과정을 통해서 얻어진 모멘트 값은 식 9와 같이 모멘트 값과 단면중심으로부터의 거리, 단면모멘트 값을 통해 정의되는 굽힘응력식에 대입하여 응력의 계산이 가능하다.

$$\sigma = -\frac{M_A c}{I} \quad \text{식 (9)}$$

식 9의 c 는 작용응력의 중립 축이며 하중이 작용하는 시료두께의 절반에 해당한다. I 는 시료형상이 갖는 단면모멘트이며 식 10과 같이 간단하게 표현된다.

$$C = \frac{t}{2} \quad \text{식 (10)}$$

$$I = \frac{W t^3}{12} \quad \text{식 (11)}$$

여기서 W 는 시험편의 폭, t 는 시험편의 두께를 나타낸다. 따라서 지금까지의 도출된 식들을 정리하여 3점굽힘이 작용하는 NRT 원형시험편의 균열선단에 작용하는 응력은 아래의식 12와 같이 표현된다.

$$\sigma_{NRT} = \frac{3L \cos \phi R_2}{2\pi W_N t^2} [\theta - 2\sin\theta] \quad \text{식 (12)}$$

응력확대계수의 정식화를 위해서 다음으로 정의되는 형상함수 Y 의 경우, NRT 시험편의 내부에 균열이 존재하는 형태이고 이 균열의 깊이는 두께에 대해 일정비율로 조절된다. 따라서 NRT 시료 형상함수의 접근기준으로 두께에 대한 균열 깊이로 하여 형상함수의 접근을 진행하였으며, 파괴역학에서 나타내는 통상적인 형상함수의 정의 역시 다르지 않다. 이러한 이유로 초기 균열 깊이와 두께 간의 관계로서 표현되어지는 형상함수의 기본형을 식 13에 나타내었다.

$$K_{I, NRT} = \frac{3L \cos \phi R_2 (\theta - 2\sin\theta)}{2\pi W_N t^2} \times Y_{SDR No.} \sqrt{\pi a} \quad \text{식 (13)}$$

식 13을 통해 NRT 시료의 형상함수를 얻기 위해서는 응력확대계수의 계산이 요구되는데, 이 과정에서 유한요소해석방법을 사용하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 균열부분에 매우 세밀한 요소를 부여하였으며 특히 균열선단부의 응력특이성을 반영하기 위해 특이요소를 사용하였다.^{17,18)} 형상함수와 균열 깊이의 상관관계를 확인하기 위해 배관 벽 두께와 균열 깊이의 비로 조절하여 15%로부터 5%씩 증가시켜 최대 45%까지 해석을 진행하였으며, 이러한 해석의 수행을 ISO 국제표준규격에서 규정하고 있는 공칭외경 63, 110, 140, 160, 250, 400 mm를 대상으로 외경과 벽 두께의 비 SDR(Standard Dimensional Ratio)가 9, 11 그리고 13.6 값을 갖는 배관

Fig. 4. Finite element model of a) NRT and b) singular elements used at the crack tip.

Fig. 5. Shape function for various SDR's for different a/t .

으로 선정하여 연구를 수행하였다.

Fig. 5에 앞서 언급된 각각의 외경과 SDR 값을 갖는 배관의 NRT 시료에 대한 형상함수를 균열 깊이에 따라 나타내었으며, polynomial curve fitting 방법을 사용하여 얻어진 곡선의 다항식을 식 14, 15 그리고 16에 각각 나타내었다. 이로써 위의 식 12로부터 NRT 시료의 응력을 계산할 수 있으며, 식 13을 통해 균열선단에 작용하는 응력확대계수의 계산이 가능하다.

$$Y_{SDR9} = 53.71\left(\frac{a}{t}\right) - 307.29\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 723.33\left(\frac{a}{t}\right)^3 - 600\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{식 (14)}$$

$$Y_{SDR11} = 42.07\left(\frac{a}{t}\right) - 214.44\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 431.9\left(\frac{a}{t}\right)^3 - 288.89\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{식 (15)}$$

$$Y_{SDR13.6} = 38.08\left(\frac{a}{t}\right) - 212.64\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 493.81\left(\frac{a}{t}\right)^3 - 400\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{식 (16)}$$

3. 수식의 확인 및 적용

NRT 시료 형상의 응력확대계수를 얻기 위해 식 12로 작용응력을 계산하고 식 14~16 중 적용 시료의 형상함수 계산 값을 식 1에 대입하면 계산이 가능하다. 이렇게 정식화된 NRT 응력확대계수 식의 정확성을 판단하기 위해 유한요소 모델을 준비하여 동일한 조건에서 파괴해석을 진행하였다. NRT 시료의 요소 모델 생성은 HyperMesh software를 사용하였고, 해석의 진행은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. NRT 시료의 폭 방향에 대한 변형은 없다고 가정하여 2D 모델의 4절점 노드를 가지는 사각요소(CPE4)를 적용하였다. 또한 균열 선단의 응력 특이성의 반영을 위해 8절점 4변형 요소가 사용되었고 2차원 등매개 요소에서 가운데 변의 절점을 1/4 지점으로 이동시킴으로써 응력에 대한 특이성이 고려되었고, 국부 변형 또한 총 1318개 세밀한 요소를 부여하여 오차를 최소화 하였다. NRT 방법의 경우, 선행 연구에서 이미 그 시험진행이 이루어진 바 있고¹⁹⁾ NRT와 NPT의 결과를 유한요소해석방법을 통해 진행된 각각의 시료조건에 대한 파괴해석을 진행하여 응력확대계수를 얻어낸 후 비교한 결과가 존재한다. 따라서 선행된 시험의 결과를 이용하여 정식화된 식을 통해 재계산을 진행하였으며, 계산된 두 시험결과를 바탕으로 응력확대계수에 따른 파괴시간을 동시에 비교 관찰하였다. 정식화된 NRT 시료형상의 응력확대계수식의 계산결과와 유한요소를 이용한 균열해석의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. SDR 값이 11이고 63 mm 외경을 갖는 시료로부터 하여 외경 400 mm까지 비교된 결과를 관찰하면 식의 계산결과와 파괴해석의 결과가 최대 3 % 이내로 잘 일치하고 있는 것이 확인된다. 특히 200N 이하에서 일반적으로 진행되는 NRT 시험하중을 고려하면 그 오차는 더욱 감소하게 된다.

수식의 적용을 위해 bi-modal 분자량분포의 PE100 class 폴리에틸렌 배관(밀도 0.950 g/cm³; 항복인장강도 23.0 MPa; 110SDR11 pipe)을 대상으로 얻어진 NRT 및 NPT 실험들의 결과¹⁹⁾를 사용하였고 이는 Fig. 7a) 그리고 Fig. 7b) 에 각각 나타나있다. NRT 그리고 NPT 실험은 ISO TS 16479⁷⁾ 그리고 ISO 13479⁸⁾을 따라 각각 진행되었다. NRT 방법의 결과로 Fig. 7a)에 나타난 하중에 따른 균열성장 개시시간과 NPT 방법인 Fig. 7b)의 내압에 따른 파괴 시간을 비교하기 위해, 정식화된 응력확대계수 식을 이용하여 NRT 결과의 Y축 하중을 응

Fig. 6. Comparison of equation derived versus the finite element solution for SDR = 11 and a/t = 0.15. Pipe outside diameter, a) 63 mm, b) 250 mm and c) 400 mm.

력확대계수로 바꾸고, NPT의 결과 또한 내압을 응력확대계수로 바꾸어 Fig. 8에 동시에 나타내었다. 비교 결과를 관찰해보면 NPT의 저속균열파괴 거동과 동일선상에 NRT의 파괴거동이 나타나는 것을 확인할 수 있는데 이는 NPT와 같이 NRT 방법에서도 동일한 매카니즘의 저속균열 성장 거동이 일어난다는 것을 의미하며 각각 시료의 파괴표면의 통해 확인된 바 있다.¹⁹⁾ 이 결과는 NRT

Fig. 7. Experimental data from a) NRT and b) NPT tests.¹⁹⁾

Fig. 8. Comparison of NRT and NPT data using the stress intensity factor.

방법의 큰 장점 중 하나로서 저속균열 성장에 대한 새로운 개념의 가속시험 방법으로 제시되었고 선행 연구에서 그 내용을 자세히 다루고 있다.^{9,10,19)} NRT 시험방법은 현재 국제표준 ISO TS 16479⁷⁾으로 등록되어 있다.

4. 결 론

내면 균열을 갖는 고리형상의 시료에 3점 굽힘하중을

가하여 저속균열성장 저항성을 측정하는 NRT방법에서 균열 선단에 작용하는 응력확대계수를 계산하고자, 전달하중에 대한 응력계산식의 유도과 유한요소해석을 이용한 형상함수결정을 수행하여 정식화하였다. 그 결과로 다양한 크기와 하중조건에 대해 NRT 시료의 응력확대계수를 계산할 수 있었다. 또한 결과의 검증을 위해 계산 시 고려된 형상과 동일한 유한요소모델을 준비하여 각각 파괴해석을 진행하였다. 파괴해석과 계산된 응력확대계수의 하중에 따른 거동을 비교 분석한 결과 3 % 이내에서 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 더 나아가 NRT의 시험하중과 NPT의 시험압력을 균열선단에 작용하는 응력확대계수로 각각 계산하여 둘의 결과를 비교하는 과정을 통해 NRT 방법이 갖는 장점을 재차 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 한남대학교 교비 학술연구비에 의해 부분 지원되었습니다.

References

1. J. Berthold, L. Bohm, H. F. Enderle, V. Lackner, D. Lilge, U. Schulte. in Proceedings of the Plastics Pipes XI, Munich, Germany, p.97 (2001).
2. L. J. Rose, A. D. Channell, S. J. Palmer. in Proceedings of the Plastics Pipes IX, Edinburgh, Scotland, p.588 (1995).
3. A. J. Peacock. Handbook of Polyethylene. Marcel Dekker Inc., New York, (2000).
4. S. H. Beech, J. N. Mallinson, in Proceedings of the Plastics pipes X, Goteborg, Sweden, p.311 (1998).
5. P. A. O'Connel, M. J. Bonner, R. A. Deckett, I. M. Ward, Polym. **36**(12), 2355 (1995).
6. N. Brown, X. Lu, Polym, **36**(3), 543 (1995).
7. ISO TS 16479, International Standard Organization, Geneva, Switzerland, (2012).
8. ISO 13479, International Standard Organization, Geneva, Switzerland, (1997).
9. ISO 13480, International Standard Organization, Geneva, Switzerland, (1997).
10. S. Pyo, J. Nam, Y. Kim and S. Choi, Polym. Test., **30**(3), 324 (2011).
11. S. Pyo, C. Tischler, J. Moon, S. Choi, Polym. Test., **29**(4), 324 (2010).
12. M. Backman, in Proceedings of the Plastics Pipes XI, Munich, Germany, p.85 (2001).
13. Nussbaum M., in Proceedings of the 9th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, New Orleans, USA, p.263 (1985).
14. M. Janssen, J. Zuidema, R. J. H. Wanhill, Fracture mechanics, 2nd ed, Spon Press, Abingdon, (2004).
15. E. E. Gdoutos. Fracture mechanics an introduction, 2nd ed, Springer, Dordrecht, (2005).
16. W. Young, R. Budynas, A. Sadegh, Roark's Formulas for Stress and Strain, 7th ed. McGraw-Hill, New York, (2002).
17. Barsoum, R. S., Int. J. Numerical Methods Eng., **10**(1), 25 (1976).
18. R. D. Henshell, K.G. Shaw, Int. J. Numerical Methods Eng., **9**(3), 495 (1975).
19. S. Choi, S. Pyo, Y. S. Suh and Y. Seo, Plast. Rubber Composites, **36**(5), 219 (2007).