

한계하중법을 이용한 Curved CT 시험편의 파괴저항곡선에 미치는 형상변수 영향 평가

신인환*, 박치용*, 석창성**†, 구재민**

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, ** 성균관대학교 기계공학과

Evaluation of Shape Parameter Effect on the J-R Curve of Curved CT Specimen Using Limit Load Method

In Hwan Shin*, Chi Yong Park*, Chang Sung Seok**† and Jae Mean Koo**

* Central Research Institute, Korea Hydro Nuclear Power Corporation.

** Dept. of Mechanical Engineering, SungKyunKwan Univ.

(Received March 14, 2014 ; Revised April 24, 2014 ; Accepted May 2, 2014)

Key Words: Curved CT Specimen(휘어진 CT 시험편), J-R Curve(파괴저항곡선), Fracture Toughness(파괴인성), Limit Load Method(한계하중법), Plastic η -Factor(소성 η 계수)

초록: 본 연구에서는 한계하중법을 이용하여 Curved CT 시험편의 J-적분에 미치는 형상변수 영향을 평가하였다. 주요 형상변수인 시험편의 길이와 폭의 비(L/W), 평균곡률반경과 두께의 비(R_m/t)에 대한 파괴인성시험 후, ASTM 시험법에서 제시한 표준시험편의 J-적분과 한계하중법으로 구한 J-적분을 각각 적용하여 구한 파괴저항곡선을 평가하였다. 또한 배관의 파괴저항곡선을 잘 모사한다고 알려진 휨 광폭평판(CWP) 및 표준시험편의 파괴저항곡선과 비교·고찰하여 최종적으로 Curved CT 시험편의 파괴저항곡선에 대한 유효성을 평가하였다. 본 논문의 결과는 향후 실배관의 정확한 파괴인성을 평가하는 데 있어 Curved CT 시험편의 적용가능성을 평가하는 데에 활용할 수 있다.

Abstract: In this study, the effect of shape parameters on the J-R curves of curved CT specimens was evaluated using the limit load method. Fracture toughness tests considering the shape factors L/W and R_m/t of the specimens were also performed. Thereafter, the J-R curves of the curved CT specimens were compared using the J-integral equation proposed in the ASTM (American Society for Testing and Materials) and limit load solution. The J-R curves of the curved CT specimens were also compared with those of the CWP (curved wide plate), which is regarded to be similar to real pipe and standard specimens. Finally, the effectiveness of the J-R curve of each curved CT specimen was evaluated. The results of this study can be used for assessing the applicability of curved CT specimens in the accurate evaluation of the fracture toughness of real pipes.

1. 서론

원자력 발전소(이하 원전) 주요기기의 경우, 가동연수 증가에 따른 노후화로 인해 균열의 발생 가능성이 높아지고 있으며, 건전성 평가(integrity assessment)가 요구되고 있다. 원전 설비의 약 40 %를 차지하는 배관에는 파단 전 누설(Leak

Before Break; LBB) 설계가 도입되어 있으며, LBB 설계의 기초자료인 배관의 파괴저항곡선을 정확히 구하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

ASTM 시험법에서는 표준시험편(compact tension specimen)을 이용하여 파괴인성을 평가하도록 제시되어 있으나 표준시험편의 경우, 배관의 두께 및 곡률 등이 그대로 반영되지 않기 때문에 실제 배관에서의 균열발생 및 진전현상과 다르게 파괴인성시험 결과가 나타나는 문제가 있다. 이와 같은 문제로 인해, 미국 원자력안전위원회(US NRC)에서는 원전 배관의 두께와 동일한 시험편을 이용

† Corresponding Author, seok@skku.edu

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

하여 시험을 수행하도록 권장하고 있다.⁽¹⁾

하지만 수많은 종류의 배관에 대하여 동일한 두께의 표준시험편을 채취하는 것이 어렵기 때문에 이를 해결하기 위해 비표준 시험편에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(2,3)

특히 윤기봉 등⁽⁴⁾의 연구에서는 실배관의 두께와 곡률을 부여한 Curved CT 시험편을 제안하였으나 비표준 시험편인 Curved CT 시험편에 대한 파괴인성 시험법이 아직 정립되어 있지 않기 때문에, 이를 위한 추가적인 연구들이 필요하다. 한편 석창성 등⁽⁵⁾의 연구에서는 표준시험편의 두께, 폭 등 형상변수에 따라 파괴저항곡선이 다르게 나타난다고 보고되었다. 표준시험편과 유사한 형태의 Curved CT 시험편 또한 형상변수의 영향이 있을 것으로 예상되나 이에 관한 연구가 거의 진행되고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Curved CT 시험편의 곡면의 평균곡률반경(R_m), 두께(t), 길이(L) 및 폭(W) 등 주요 형상변수가 J-적분에 미치는 영향을 유한요소해석과 파괴인성시험을 통해 평가하고 이를 표준시험편과 휨 광폭평판(curved wide plate; CWP) 시험편의 파괴저항곡선과 비교 분석하여 배관의 파괴인성을 평가함에 있어 Curved CT 시험편의 유효성 및 적용가능성을 고찰하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델 및 방법

배관의 평균곡률반경과 두께의 비(R_m/t), 시험편의 길이와 폭의 비(L/W) 및 시험편의 균열길이버(a/W)가 Curved CT 시험편의 J-적분에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유한요소 해석모델을 구축하였으며, 해석모델의 대칭성을 고려하여 전체 시험편의 1/2 만을 모델링하였다.

범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.10-1 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 C3D8R이며, 전체 8,344개의 요소로 구성하였다. Curved CT 시험편의 균열 길이버가 0.4~0.7이 되도록 변화시킴과 동시에 R_m/t , L/W 의 값도 고려하여 탄소성 해석으로 형상보정계수를 구하였고, 소성한계하중은 탄성-완전소성으로 가정하여 해석을 수행하였다.

해석모델에 사용된 6인치 소구경 SA312 TP304L 배관의 탄성계수, 푸아송비, 항복강도 및 식 (1)에 나타난 Ramberg-Osgood 상수(α , n)는 박재실 등⁽⁶⁾의 연구에서 제시된 기계적 물성치를 참고 하였다.

Table 1 Cases of Curved CT models for FEM analysis

Material	L/W	R_m/t	a/W
SA312 TP304L	1.0, 1.125, 1.25	5, 7.5, 10	0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7

Table 2 Mechanical properties of Curved CT⁽⁶⁾

Material	E (MPa)	Poisson's ratio	σ_Y (MPa)	R-O Constant	
				α	n
SA312 TP304L	204,300	0.3	264	4.62	4.67

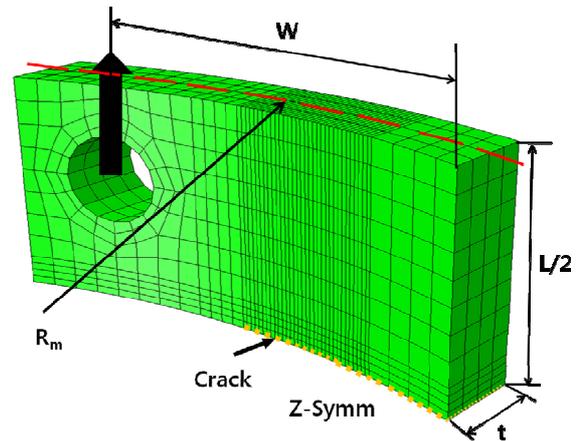


Fig. 1 Analysis model of Curved CT specimen

해석모델의 균열선단부에 응력 특이성(stress singularity)을 고려한 특이요소를 삽입하였으며, Table 1에 정리한 것과 같이 총 63 개의 해석모델을 구축하였다. 구축된 유한요소 해석모델을 Fig. 1에 나타냈으며, Table 2에 해석모델에 사용된 SA312 TP304L 배관 재질에 대한 기계적 물성치를 정리하여 나타냈다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

2.2 형상변수에 따른 형상보정계수 변화

Curved CT 시험편의 형상변수에 따른 J-적분을 구하기 위해서는 식 (2)에 나타난 것과 같이 J-적분의 탄성성분과 J-적분의 소성성분에 관한 식을 각각 구하여야 한다. J-적분의 탄성성분에 관한 식을 식 (3)에 나타냈으며, 식 (3)에서

나타낸 K 값을 구하기 위해서는 식 (4)에 나타낸 K-계산식을 이용하여야 한다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (2)$$

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (3)$$

$$K = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} F = \frac{P}{2\pi R_m t} \sqrt{\pi a} F \quad (4)$$

K-계산을 위해서는 시험형상과 균열길이비에 대한 형상보정계수 F 에 관한 식이 필요하다. 우선 배관의 평균곡률반경과 두께의 비(R_m/t), 시험편의 길이와 폭의 비(L/W) 및 시험편의 균열길이비(a/W)를 달리한 탄성해석으로부터 Curved CT 시험편의 K 값을 구하고 이를 이용하여 형상보정계수식을 도출한다.

Curved CT 시험편의 R_m/t 와 L/W 가 변화할 때 균열길이비에 따른 형상보정계수와 ASTM 에 제시된 표준시험편의 형상보정계수⁽⁷⁾를 비교하여 Fig. 2~Fig. 4 에 나타냈다. 동일한 R_m/t 조건에서 Curved CT 시험편의 길이와 폭의 비(L/W)가 1.0 에서 1.25 로 증가함에 따라 형상계수식의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 균열길이비가 작을 때 L/W 에 대한 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다. Table 3 에 형상변수 별 Curved CT 시험편에 대한 형상보정계수식을 정리하여 나타냈다.

Fig. 5 는 배관의 평균곡률반경과 두께의 비(R_m/t) 변화에 따른 Curved CT 시험편의 형상보정계수 변화를 나타낸 것으로서, R_m/t 가 증가함에 따라 Curved CT 시험편의 형상보정계수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 표준시험편의 형상보정계수와 유사하게 나타났는데 이는 Curved CT 시험편과 표준시험편의 균열선단에 작용하는 하중 형태가 유사하여 형상보정계수 또한 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

특히 Curved CT 시험편의 R_m/t 가 5 일 때, 표준시험편의 형상보정계수와 매우 유사하다는 것을 알 수 있었는데 이는 ASTM E1820 A2.1⁽⁷⁾에 제시된 시험편의 두께조건 ($2 \leq W/t \leq 4$)과 관련된 것으로 판단된다. Curved CT 시험편의 R_m/t 가 5 일 때, W/t 가 3.3 이며, R_m/t 가 7.5, 10 일 때는 W/t 가 각각 5, 6.8 이다. 따라서 Curved CT 시험편의 R_m/t 가 5 일 때 ASTM 의 두께조건에 부합되어 표준시험편의 형상보정계수와 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

Table 3 Shape factor F of Curved CT specimen by FEM

R_m/t	L/W	$F = A + B(a/W) + C(a/W)^2 + D(a/W)^3$			
		A	B	C	D
5	1.00	-31.5	237	-499	383
	1.12	-30.7	230	-484	375
	1.25	-30.4	225	-474	370
7.5	1.00	-35.6	264	-552	420
	1.12	-34.9	256	-538	412
	1.25	-34.5	252	-528	406
10	1.00	-36.3	269	-562	427
	1.12	-35.6	262	-547	420
	1.25	-35.2	257	-537	414

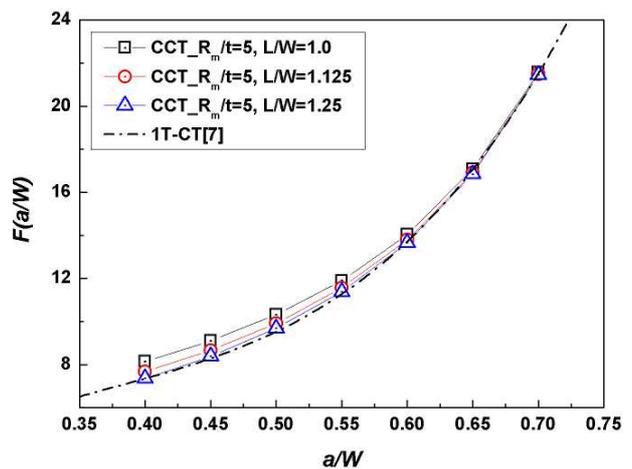


Fig. 2 Comparison of the shape factors, F for the stress intensity factor according to L/W of Curved CT specimen ($R_m/t=5$)

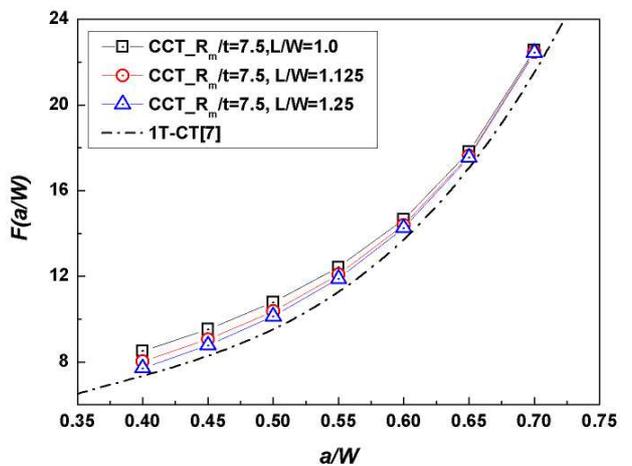


Fig. 3 Comparison of the shape factors, F for the stress intensity factor according to L/W of Curved CT specimen ($R_m/t=7.5$)

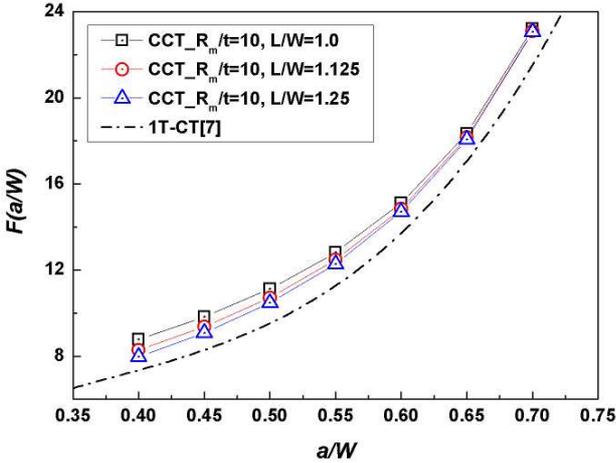


Fig. 4 Comparison of the shape factors, F for the stress intensity factor according to L/W of Curved CT specimen ($R_m/t=10$)

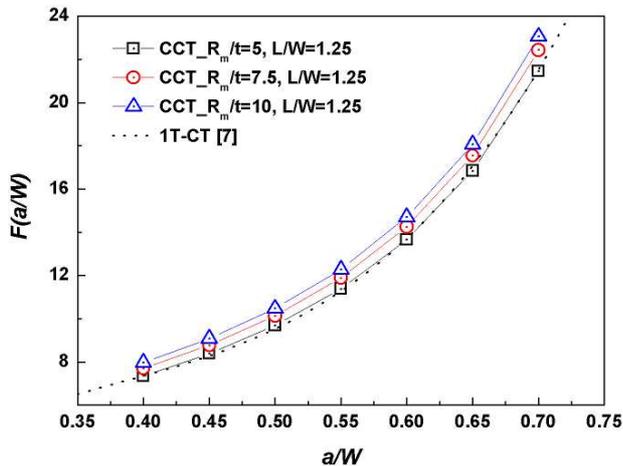


Fig. 5 Comparison of the shape factors, F in Curved CT, CT and CWP specimen according to R_m/t

2.3 형상변수에 따른 소성한계하중 변화

Curved CT 시험편의 각 형상변수에 따른 J-적분의 소성성분을 구하기 위하여, 한계하중법 (limit load method)을 이용하였다. 식 (5)는 J-적분의 소성성분을 나타낸 것이며, 이 때 형상보정계수인 η_{pl} 과 γ 를 구하기 위하여 무차원화된 소성한계하중 (P_N)을 이용하였다. 식 (6) ~ (7)에 J 소성성분의 η_{pl} , γ 및 무차원 소성한계하중 (P_N)에 관한 식을 나타냈다.

우선 Curved CT 시험편의 탄성-완전 소성 해석을 수행하여 형상변수 및 균열길이비 변화에 따른 소성한계하중(P_L)을 구하였으며 재료의 항복강도(σ_Y), 평균곡률반경(R_m), 시험편의 두께(t)를 이용하여 무차원 소성한계하중 (P_N)을 구하였다.

균열길이비와 무차원 소성한계하중 (P_N)간의

Table 4 Limit load solution of Curved CT specimen

R_m/t	L/W	$P_N = A + B(a/W) + C(a/W)^2 + D(a/W)^3$			
		A	B	C	D
5	1.00	0.03	0.52	-1.40	0.89
	1.12	0.17	-0.10	-0.48	0.44
	1.25	0.27	-0.58	0.32	0.00
7.5	1.00	0.10	0.10	-0.61	0.44
	1.12	0.15	-0.05	-0.50	0.44
	1.25	0.20	-0.31	-0.10	0.22
10	1.00	0.10	0.12	-0.62	0.44
	1.12	0.17	-0.21	-0.15	0.22
	1.25	0.26	-0.67	0.62	-0.22

관계를 곡선접합하여 균열길이비에 대한 무차원 소성한계하중식을 구하였으며, Table 4에 Curved CT 시험편의 탄성-완전소성 해석으로 구한 무차원화 소성한계하중과 균열길이비 관계식의 각 계수를 시험편의 형상변수별로 정리하여 나타냈다.

$$J_{pl} = \int_0^{\Delta_d} \eta_{pl} P d\Delta_{pl} + \int_{\theta_0}^{\theta} \gamma J_p d\theta \quad (5)$$

$$\eta_{pl} = \frac{\partial P_L / \partial a}{P_L / a}, \quad \gamma = \frac{\partial^2 P_L / \partial a^2}{\partial P_L / \partial a} \quad (6)$$

$$P_N = \frac{P_L}{\sigma_y R_m t} = f(a/W) \quad (7)$$

배관의 평균곡률반경과 두께의 비(R_m/t)가 일정할 때, Curved CT 시험편의 길이와 폭의 비(L/W)가 1.0에서 1.25로 증가할수록 소성한계하중이 증가하고, 균열길이비가 작을 때 L/W 변화에 따른 소성한계하중의 차이가 큰 것을 알 수 있었으며, 이를 Fig. 6 ~ Fig. 8 에 나타냈다.

Fig. 9는 Curved CT 시험편의 R_m/t 변화에 따른 소성한계하중의 변화를 나타낸 것으로서, R_m/t 가 증가할수록 Curved CT 시험편의 소성한계하중 값이 모든 균열길이비에서 대체적으로 감소하는 것을 알 수 있었으며, 특히 R_m/t 가 5 일 때의

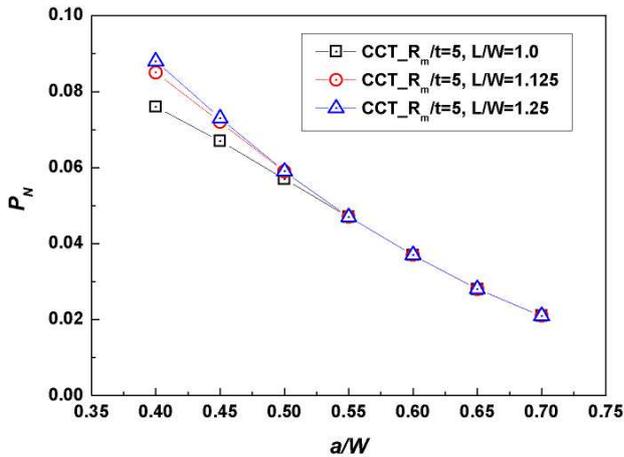


Fig. 6 Resulting values for the limit load solution for Curved CT specimen according to L/W ($R_m/t=5$)

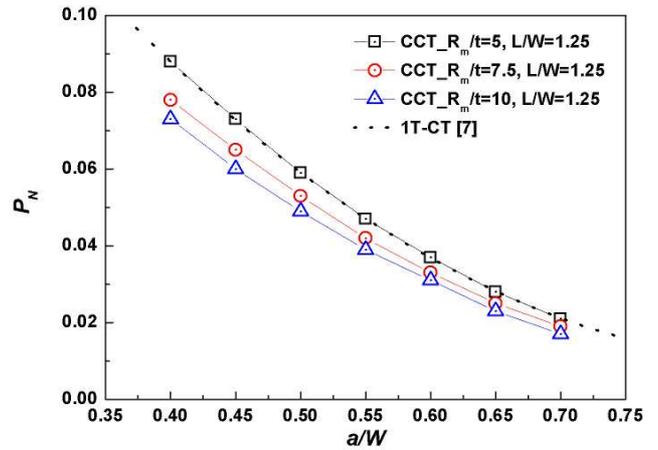


Fig. 9 Comparison of the limit load solution in Curved CT and CT specimen according to R_m/t

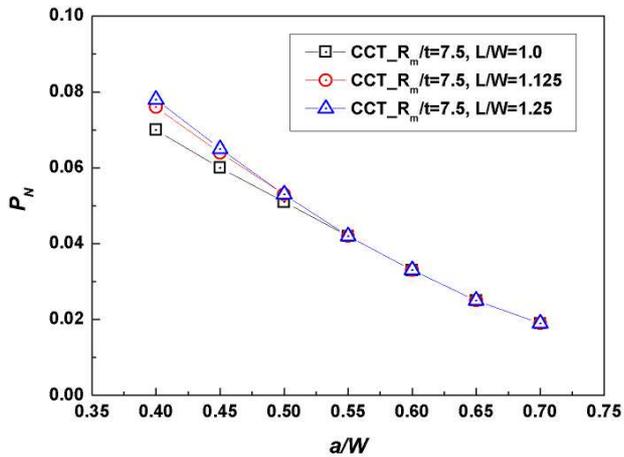


Fig. 7 Resulting values for the limit load solution for Curved CT specimen according to L/W ($R_m/t=7.5$)

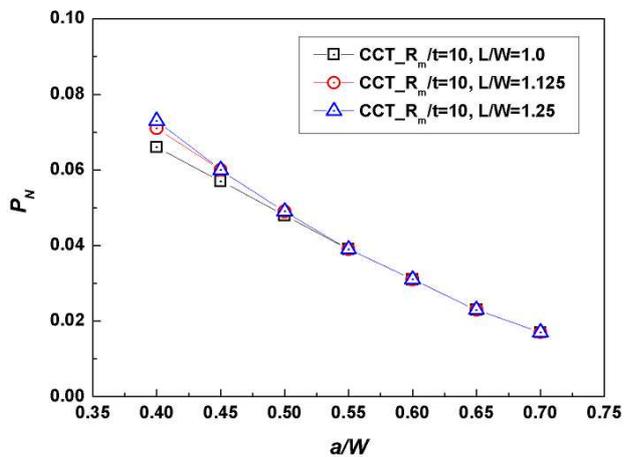


Fig. 8 Resulting values for the limit load solution for Curved CT specimen according to L/W ($R_m/t=10$)

Curved CT 시험편의 소성한계하중이, 표준시험편의 소성한계하중과 유사하게 나타났다.

3. 파괴인성시험

3.1 시험편 및 시험방법

6" SA312 TP304L 배관으로부터 배관의 평균곡률 반경과 두께의 비(R_m/t)가 각각 4, 5 및 6 이고 길이와 폭의 비(L/W)가 1.125 인 Curved CT 시험편을 제작하고 250 kN 용량의 전기유압식 만능시험기 (INSTRON 1332)를 사용하여 파괴인성시험을 수행하였다.

Curved CT 시험편에 대한 파괴저항곡선을 도출하기 위해서는 하중-하중선 변위 곡선을 획득하여야 하므로 균열개구변위(crack opening displacement) 게이지를 사용하여 하중-하중선 변위를 측정하였으며, 전체 시험장치와 시험편 및 시험지그를 각각 Fig. 10 ~ Fig. 11 에 나타냈다.

Curved CT 시험편 중앙에 균열길이비가 0.45가 되도록 쉘브런(chevron) 노치를 기계가공 하였으며 균열길이비 (a/W)가 0.55가 될 때까지 피로하중을 가하여 피로예비균열을 삽입하였다. 1 mm/min의 속도로 파괴인성시험을 수행하였고 ASTM 시험법에 제시된 표준시험편의 제하 컴플라이언스(unloading compliance)법을 적용하여 균열길이를 평가하기 위해 총 30 번의 하중 부하와 제하를 반복하여 시험하였다.

또한 한계하중법을 통해 파괴저항곡선을 도출할 때, 비표준시험편인 Curved CT 시험편에 대한 균열길이 관계식이 제시되어 있지 않기 때문에 하중-변위선도에서 제하구간을 삭제한 후, 정규화 법(normalization method)을 적용하여 각 지점에서의 균열길이를 계산하였다.

또한 파괴인성시험이 종료된 Curved CT 시험편

을 고온챔버에 투입하여 약 400 °C의 온도로 가열 착색하고 피로하중을 가하여 파단한 뒤 9 점법을 이용하여 각 시험편의 초기 및 최종 균열길이를 측정하였다.

3.2 파괴인성시험결과 및 고찰

3.2.1 ASTM 과 한계하중법을 통한 J-R 곡선 비교

배관의 평균곡률반경과 두께의 비(R_m/t)가 서로 다른 Curved CT 시험편에 대하여 파괴인성시험을 수행하여 획득한 하중, 변위, 균열길이 data 를 ASTM 에 제시된 표준시험편의 J-적분⁽⁷⁾과 한계하중법을 이용하여 구한 J-적분에 각각 적용하였을 때의 파괴저항곡선을 비교하여 Fig. 12 ~ Fig.14 에 나타냈다. 두 종류의 J-적분을 이용하여 구한 Curved CT 시험편의 파괴저항 곡선을 서로 비교하여 본 결과, 한계하중법을 이용하여 구한 Curved CT 시험편의 J-적분 결과가 ASTM 시험법의 J-적분 결과에 비해 약 10~20% 정도 낮게 평가되었다.



Fig. 10 Experimental setup for fracture toughness test



Fig. 11 Appearance of fracture toughness test

이는 표준시험편의 경우 두께방향으로 휘어져 있지 않기 때문에 균열의 직진성이 확보되고 시험편 두께 방향으로 하중이 균일하게 작용하는 반면, Curved CT 시험편에서는 균열길이가 진전할 때, 시험편에 부여된 배관의 곡률로 인해 두께방향으로 추가모멘트가 필요하다. 두께방향의 추가모멘트 영향으로 인해 Curved CT 시험편의 좌·우측 균열진전량이 달라진 시험결과를 Fig. 15 에 나타냈다. 동일한 하중 조건에서 ASTM 시험법에 제시된 표준시험편의 J-적분식에 대입하여 J-적분을 계산할 경우, Curved CT 시험편에 작용하는 추가모멘트로 인한 하중 손실을 고려하지 못하기 때문에 한계하중법을 통해 구한 J-적분 결과에 비하여 상대적으로 높게 나타난 것으로 보여진다.

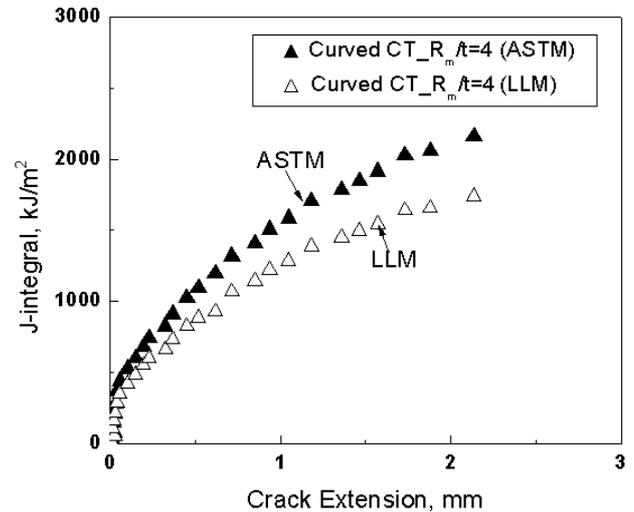


Fig. 12 Comparison of J-R curves between ASTM and LLM for Curved CT specimen ($R_m/t=4$)

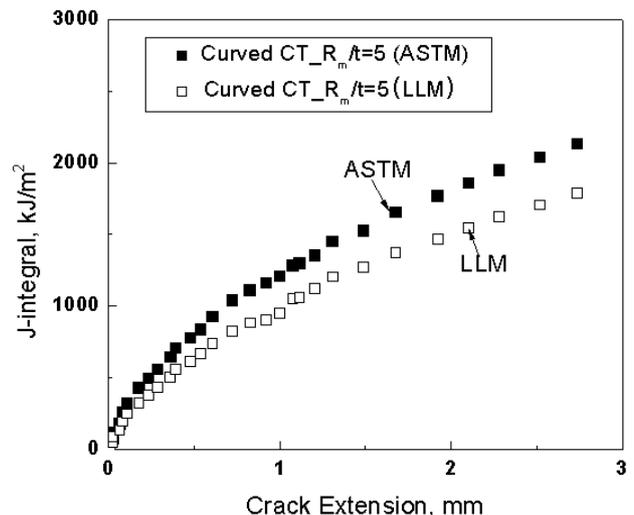


Fig. 13 Comparison of J-R curves between ASTM and LLM for Curved CT specimen ($R_m/t=5$)

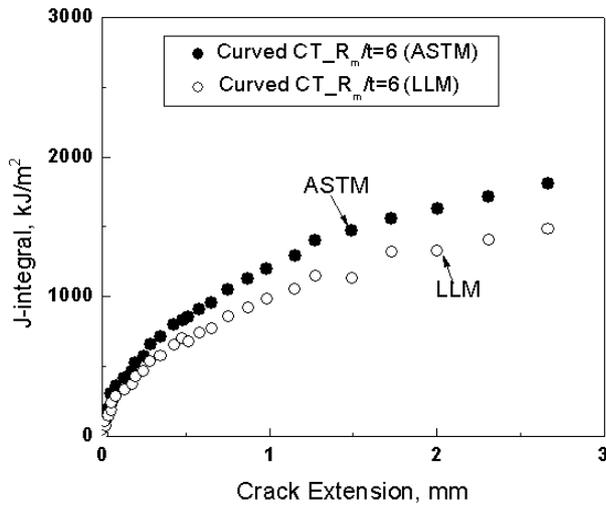


Fig. 14 Comparison of J-R curves between ASTM and LLM for Curved CT specimen ($R_m/t=6$)

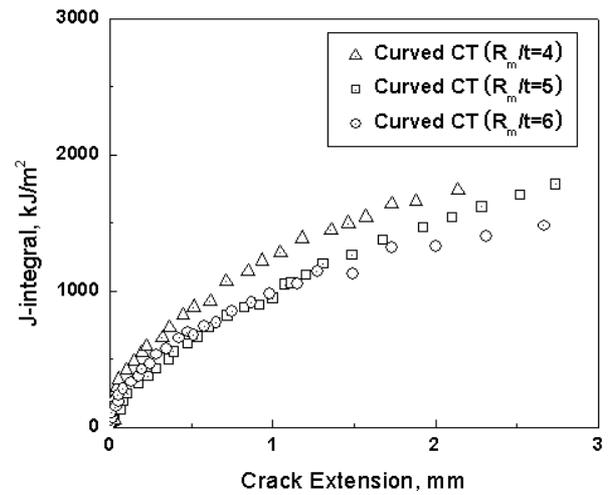


Fig. 16 Comparison of J-R curves Curved CT specimens according to R_m/t

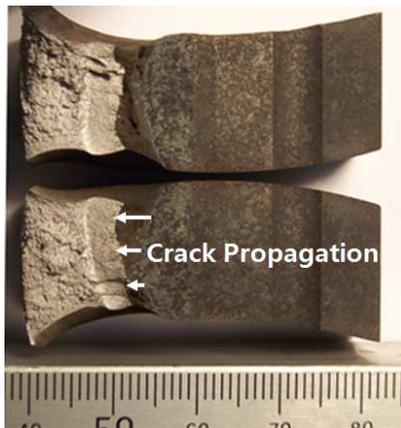


Fig. 15 Fracture appearance of curved CT specimen

3.2.2 R_m/t 에 따른 파괴저항곡선 비교

한계하중법을 통해 도출된 배판의 평균곡률 반경과 두께의 비(R_m/t)가 서로 다른 Curved CT 시험편의 파괴저항곡선을 Fig. 16에 나타낸 것과 같이 비교한 결과, Curved CT 시험편의 R_m/t 가 커짐에 따라 파괴저항곡선이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이는 앞선 유한요소해석을 통해 구한 R_m/t 와 소성 한계하중간 관계에서 R_m/t 가 증가할수록 Curved CT 시험편의 소성한계하중 값이 감소하는 것과 일치하는 결과로 판단된다. 따라서 동일한 시험편의 길이와 폭의 비(L/W)를 가지더라도 R_m/t 가 증가할 경우, Curved CT 시험편의 파괴저항곡선이 감소할 것으로 판단된다.

3.2.3 표준시험편 및 CWP 와의 파괴저항곡선 비교

Fig. 17에 나타낸 바와 같이 Curved CT 시험편의

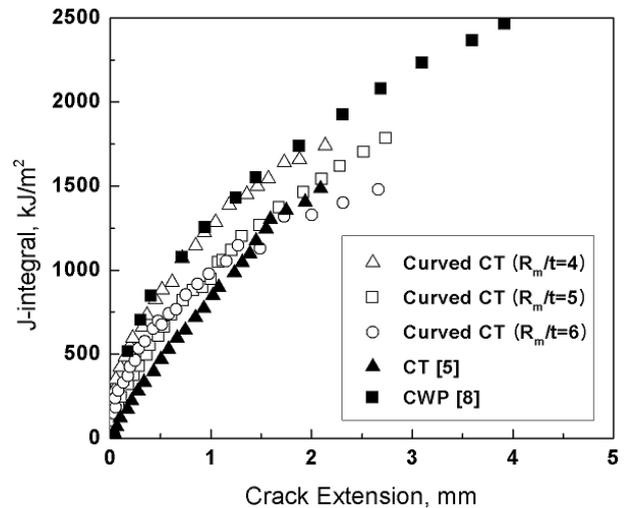


Fig. 17 Comparison of J-R curves for Curved CT specimens, CT specimen and CWP

파괴저항곡선과 CT 시험편⁽⁵⁾ 및 CWP⁽⁸⁾의 파괴저항곡선을 비교한 결과, R_m/t 가 5일 때의 Curved CT 시험편의 파괴저항곡선이 표준(CT) 시험편의 파괴저항곡선과 유사하게 나타났다. 이는 Curved CT 시험편의 유한요소 해석결과에서 나타난 바와 같이 R_m/t 가 5일 때 Curved CT 시험편의 소성한계하중이 표준시험편과 유사하므로 파괴저항곡선 또한 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

R_m/t 가 4인 Curved CT 시험편의 파괴저항 곡선의 경우, CWP의 파괴저항곡선과 유사하게 나타났다. 이는 인장하중을 부가하여 이루어지는 CWP 시험과 굽힘하중을 부가하는 Curved CT 시험간의 하중형태가 다르다 할지라도 Curved CT 시험편($R_m/t=4$)의 평균반경곡률과 두께의 비가 CWP 시험편($R_m/t=4$)과 동일하고 배판의 곡률 또한 동일하게 반영되어 있기 때문에 두 시험간의 파괴저항

곡선이 유사하게 나타난 것으로 보이며, Curved CT 시험편의 두께가 파괴저항곡선에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한 CWP 시험은 시험편에 인장하중을 부가하는 형태로 수행되므로 시험편의 두께가 증가하거나 균열길이비가 작을 경우, 매우 높은 시험하중이 필요하게 되어 수행하기 어려우나 Curved CT 시험은 시험편에 굽힘하중을 주로 부가하는 시험이므로 두께가 증가하거나 균열길이비가 작을 경우에도 시험이 용이하다는 장점이 있으므로 Curved CT 시험편이 실패관의 파괴저항곡선과 유사한 시험결과를 얻고자 할 때 용이하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Curved CT 시험편의 형상변수가 파괴저항곡선에 미치는 영향을 평가하기 위하여 한계하중법을 적용한 유한요소해석 및 파괴인성 시험을 수행하고 파괴저항곡선에 대한 고찰을 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) Curved CT 시험편의 길이와 폭의 비(L/W)가 증가함에 따라 형상계수식의 기울기가 증가하였으며 평균곡률반경과 두께의 비 (R_m/t)가 증가함에 따라 시험편의 형상보정 계수가 증가하였다. 특히 $R_m/t=5$, $L/W=1.25$ 일 때 표준시험편과 유사한 형상보정계수를 나타낸 것을 알 수 있었다.

(2) 한계하중법을 적용하여 Curved CT 시험편의 J-소성성분을 구하기 위한 소성한계하중을 해석한 결과, L/W가 증가함에 따라 소성한계 하중이 증가하는 것을 알 수 있었으며, R_m/t 가 증가할수록 시험편의 소성한계하중이 감소 하는 것을 알 수 있었다.

(3) 한계하중법을 이용하여 구한 J-적분과 ASTM에 제시된 J-적분으로 각각 구한 Curved CT 시험편의 파괴저항곡선을 비교한 결과, 시험편 두께방향의 추가모멘트에 대한 고려 유무에 따라 파괴저항곡선이 차이남을 알 수 있었다.

(4) Curved CT 시험편의 파괴저항곡선을 표준 시험편 및 CWP의 파괴저항곡선과 비교한 결과, R_m/t 가 5인 경우, 표준시험편의 파괴 저항곡선과 유사하게 나타났으며, R_m/t 가 4인 경우, CWP의 파괴저항곡선과 유사하게 나타 났다. 따라서 Curved

CT 시험편의 두께가 파괴저항곡선에 영향을 미치는 것으로 보이며, 특히 R_m/t 가 작을수록 표준시험편 의 보수성을 일부 보완하고 실패관의 파괴저항 곡선에 근접한 시험결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

본 연구의 해석 및 시험결과는 향후 실패관과 유사한 파괴저항곡선을 구할 수 있는 Curved CT 시험법의 적용가능성을 평가하는 데에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Edu., Sci. and Tech. (No. 2012M2A8A1029423)

참고문헌

(References)

- (1) U. S. NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," *NUREG*, Vol. 3.
- (2) Saxena, S., 2007, "On the Accuracy of Ductile Fracture Assessment of Through-Wall Cracked Pipes," *Engineering Structures*, Vol. 29, pp.789~801.
- (3) Chiodo, M. S. G. and Ruggieri, C., 2010, "J and CTOD Estimation Procedure for Circumferential Surface Cracks in Pipes Under Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, pp. 415~436.
- (4) Yoon, K. B., 2003, "A Study on Accuracy of J-R Curves Measured with Curved CT Specimen of Zr-2.5Nb PT," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No.11, pp. 1986~1996.
- (5) Seok, C. S. and Kim, S. Y., 2002, "Effect of Specimen Configurations on the Fracture Resistance Curve," *Nuclear Eng. & Des.*, Vol. 214, pp.47~56.
- (6) Park, J. S., Kim, Y. J. and Seok, C. S., 2005, "A Study on the Evaluation of the Pipe Fracture Characteristic," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No.1, pp. 107~114.
- (7) ASTM International, 2003, Standard Test Method for Measurement of the Fracture Toughness, *ASTM*, E1820-03.
- (8) Huh, N. S., Kim, Y. J., Choi, J. B. and Pyo, C. R., 2004, "Prediction of Failure Behavior for Nuclear Piping Using CWP Test," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, pp.419~425.