



이 제시되어 있지 않기 때문에 탄성  $J$ -적분을 구하기 위해서는 이를 유도해야 한다. 본 연구에서는 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하여 curved CT 시험편의 탄성  $K$ -계산식을 새롭게 제시하였다. Fig. 5는 유한요소해석으로 구한 형상보정계수  $F$ 나타낸 것이며, 이를 균열 길이에 대해 3차식으로 곡선 적합하면 식(3)과 같다.

$$F = 6.64743 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 3.43003 \left( \frac{a}{W} \right) + 2.28792 \quad (3)$$

$$K = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} F \quad (4), \quad \sigma^\infty = \frac{P}{2\pi R_m t} \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 (5)를 이용하면 curved CT 시험편의 탄성  $J$ -적분 계산식을 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$J_{el} = \frac{1-\nu^2}{E} K^2 = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{P^2 a}{4\pi R_m^2 t^2} F(a/W) \quad (6)$$

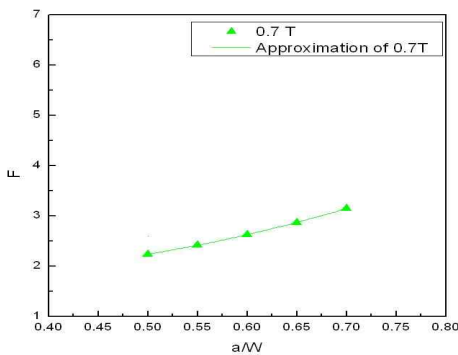


Fig. 5 The values of the shape factors, F for stress intensity factor

### 3.3. $\eta_{pl}$ , $\gamma$ parameter 유도

curved CT 시험편의  $\eta_{pl}$ 과  $\gamma$ 를 구하기 위해서는 소성한계하중인  $P_L$ 을 구해야 한다. 따라서 본 연구에서는 curved CT 시험편에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 소성 한계 하중식을 유도하였다. Fig. 6은 유한요소해석 결과를 나타낸 것으로서 유한요소해석으로 구한 한계하중을 무차원화 시켜 균열 길이에 대해 3차식으로 곡선적합하면 curved CT 시험편의 소성 한계 하중식은 식(7)로 나타낼 수 있다. 여기서,  $P_L$ 은 curved CT 시험편의 소성한계하중이며,  $R_m$ 은 평균반경이다. 또한  $t$ 는 두께이며,  $\sigma_y$ 는 항복강도이다.

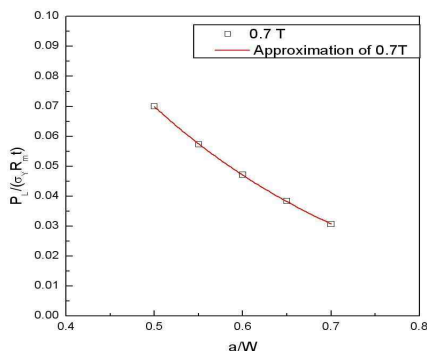


Fig. 6 limit load solution for curved CT specimen under axial tension

$$\frac{P_L}{\sigma_y R_m t} = -0.35401 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 0.96492 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 0.96767 \left( \frac{a}{W} \right) + 0.35676 \quad (7)$$

$$J_{pl} = \int_0^{\Delta_{pl}} \eta_{pl} P d\Delta_{pl} + \int_{a_0}^a \gamma J_p da \quad (8)$$

$$J_{pl} = \int_0^{\Delta_{pl}} \left( -\frac{\partial P_L}{\partial A} \frac{1}{P_L} \right) P d\Delta_{pl} + \int_{a_0}^a \frac{\partial^2 P_L / \partial a^2}{\partial P_L / \partial a} J_p da \quad (9)$$

$$\eta_{pl} = -\frac{\partial P_L}{\partial A} \frac{1}{P_L} \quad (10), \quad \gamma = \frac{\partial^2 P_L / \partial a^2}{\partial P_L / \partial a} \quad (11)$$

curved CT 시험편의  $\eta_{pl}$ 과  $\gamma$ 에 대한 식은 식(8)과 식(9)의 관계로부터 식(10)과 식(11)의 관계를 구할 수 있다. curved CT 시험편에 대한  $\eta_{pl}$ 과  $\gamma$ 는 식(7)을 식(10)과 식(11)에 대입하여 식(12)와 식(13)과 같이 유도된다.

$$\eta = \frac{1}{36.42t} \left[ \frac{-1.06203 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 1.92984 \left( \frac{a}{W} \right) - 0.96767}{-0.35401 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 0.96492 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 0.96767 \left( \frac{a}{W} \right) + 0.35676} \right] \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{1}{36.42} \left[ \frac{-2.12406 \left( \frac{a}{W} \right) + 1.92984}{-1.06203 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 1.92984 \left( \frac{a}{W} \right) - 0.96767} \right] \quad (13)$$

최종적으로 식(1)에 새롭게 구한  $J_{el}$ 과  $J_{pl}$ 를 각각 대입하여 구한  $J$ -적분식과 ASTM에서 제시된 식으로 구한  $J$ -R 곡선을 Fig. 7에 나타내었다.

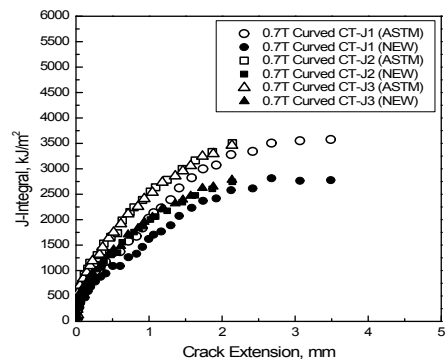


Fig. 7 Comparison of J-R curves between ASTM test method and NEW method for curved CT specimens

## 4. 고찰 및 결론

ASTM E1820에서 제시하고 있는 CT 시험편의  $J$ -적분식과 본 연구에서 새롭게 제안한  $J$ -적분식을 이용하여 curved CT 시험편의 하중-하중선 변위 곡선으로부터  $J$ -R곡선을 구한 결과 새롭게 제안한 curved CT 시험편의  $J$ -적분식 결과가 ASTM 식에 비해 더 낮은  $J$  값을 나타냈다. 본 연구에서 제시한 curved CT 시험편의  $J$ -적분식은 표준 CT시험과는 달리 균열면과 하중선의 중심이 일치하지 않기 때문에  $J$ -적분식에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 이에 따라 curved CT 시험편을 이용한 보다 정확한 파괴인성 평가를 위해서는 향후 새로운  $J$ -적분식과 균열관계식, 구속효과(constraint effect)에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 후기

이 논문은 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842)

## 참고문헌

- U. S. NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," Report of the U. S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061, Vol. 3.
- 김영석, 정현철, 안상복, "제하 컴플라이언스 법 및 직류전 위차법을 이용한 Zr-2.5Nb 압력관 휘어진 CT시험편의 균열시작평가", 대한 기계학회 논문집 A권, 제 29권 제 8호, pp.1118~1122, 2005
- 박재실, 석창성, 김영진 "실배관 파괴특성 평가에 관한 연구", 대한기계학회 A권, 제 29권 제1호, pp. 107-114, 2004