

감육이 존재하고 내압을 받는 T 분기관의 한계하중 평가식

류강목* · 김윤재† · 이국희* · 박치용** · 이성호** · 김태룡**

Limit Load Solutions for Piping Branch Junctions with local wall-thinning under Internal Pressure

Kang-Mook Ryu, Yun-Jae Kim, Kuk-Hee Lee, Chi-Yong Park, Sung-Ho Lee
and Tae-Ryong Kim

Key Words : Internal pressure(내압), Piping Branch junction(T 분기관), Limit load(한계하중), Wall thinning(감육)

Abstract

The present work presents plastic limit load solutions for piping branch junctions with local wall-thinning, based on detailed three-dimensional (3-D) and small strain FE limit analyses using elastic-perfectly plastic materials. Three types of loading are considered; internal pressure, in-plane bending on the branch pipe and in-plane bending on the run pipe. The wall-tinning located on variable area of the piping branch junction is considered. A wide range of piping branch junction and wall-thinning geometries are considered. Comparison of the proposed solutions with FE results shows good agreement

기호설명

P_L	내압을 받는 T 분기관의 한계하중
P_0	내압을 받고 손상이 없는 T 분기관의 한계하중
P_0^{WT}	내압을 받고 감육이 존재하는 직관의 한계하중
P_0^s	내압을 받고 손상이 없는 직관의 한계하중
R, r	주관(main run)과 분기관(branch run)의 평균반경
T, t	주관(main run)과 분기관(branch run)의 두께
L, ℓ	주관(main run)과 분기관(branch run)의 길이

L_{WT}	국부 감육의 축방향 길이
d_{WT}	국부 감육의 깊이
θ	국부 감육의 원주 방향 각도
σ_0	탄성-완전 소성 재료의 한계 응력

1. 서론

플랜트 구조 건전성 평가에 있어서, 배관 구성 요소들의 한계하중(limit load)은 중요한 평가 기준이다. 한계하중은 구조물이 지지할 수 있는 최대 하중을 의미한다. 최근 감육배관에 의한 사고가 잇따름에 따라 감육배관의 소성한계하중에 대한 연구는 더욱 관심대상이 되고 있으며 보다 폭넓은 연구의 필요성이 요구되고 있다.

현재 연구는 주로 직관의 감육에 국한되어 있으며, 실험과 해석 등을 통해 진행되고 있다. 그에 반해 T 분기관의 경우는 실제 플랜트 시설에서 빈번하게 사용되고 있으며 침부식에 의한 감육이 쉽게 발생할 수 있으나 그에 대한 연구결과

† 김윤재, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)962-9290

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 한전 전력연구원

는 소수에 불과하다.¹⁻⁵⁾ 감육이 있는 T 분기관의 형상은 감육의 위치, 감육의 축방향 길이, 원주방향의 길이, 두께방향 깊이 등의 감육 형상 변수, 그리고 감육의 모양에 의해 결정되며, 한계하중은 굽힘하중의 방향에 따라 변화한다. 따라서 감육이 존재하는 T 분기관의 한계하중을 결정하기 위해서는 보다 구체적인 접근이 필요하다.

용어의 정확성을 위해 분기관(branch run)과 주관(main run)이 접합된 배관 구성요소를 T 분기관(piping branch conjunction)이라 정의하며, 분기관(branch run)은 주관(main run)에 접합된 관이라 지칭하겠다.

본 연구에서는 감육이 존재하며 내압을 받는 T 분기관의 한계해석을 수행하였다. Fig. 1 과 같이 분기관(branch run)과 주관(main run)의 교차부분의 분기관(branch run)영역에 감육이 존재하며, 다양한 형상 변수를 체계적으로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 감육의 형상은 사각으로 이상화하였으며 길이와 폭과 깊이를 고려한 closed-form 한계하중 곡선보간식을 제시하였다.

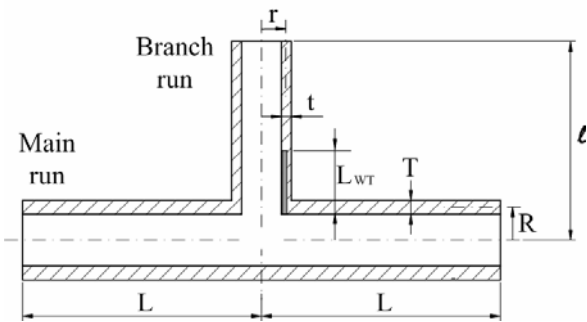
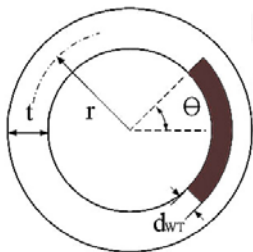
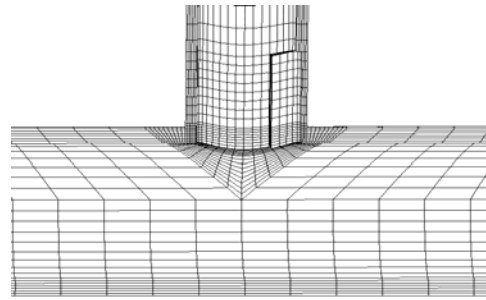
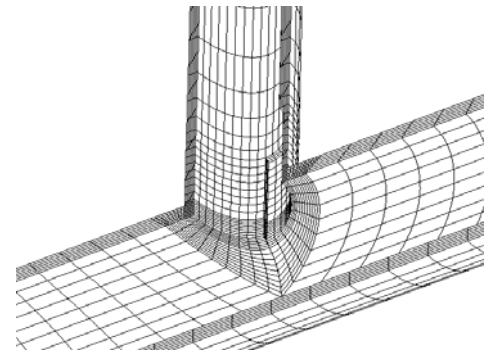


Fig. 1 Schematics of piping branch junction with local wall thinning



(a)



(b)

Fig. 2 Finite element meshes for

(a) $R/T=5, r/R=t/T=0.6, d_{WT}/t=0.5, L_{WT}/d=1, \theta/\pi=1/3$

(b) $R/T=5, r/R=t/T=0.6, d_{WT}/t=0.5, L_{WT}/d=1, \theta/\pi=1/2$

2. 유한요소 한계하중해석

2.1 분기관 형상과 유한요소망

T 분기관의 유한요소 해석을 위한 모델의 형상은 Fig. 1 과 같다. 분기관과 주관의 교차 부분에 강화와 용접이 없다고 가정하였다. 주관의 평균 반경과 두께는 R 과 T 이고, 분기관의 평균 반경과 두께는 r 과 t 이다. 주관의 축 방향 길이는 L 이고, 분기관의 축 방향 길이는 l 이다. 형상 변수(R, T, r, t)를 $0.4 \leq r/R \leq 1.0, 0.4 \leq t/T \leq 1.0$ 과 $5.0 \leq R/T \leq 20.0$ 의 범위에서 고려하였다. 감육의 위치는 Fig. 1 에 나타나있다. 감육은 사각형으로 이상화하였다. 감육의 원주방향으로의 각도는 θ 이고, 두께방향 깊이는 d_{WT} 이고, 축방향의 길이는 L_{WT} 이다. 감육 형상 변수(θ, d_{WT}, L_{WT})를 $\theta/\pi=0.0\sim 0.5, d_{WT}/t=0.0\sim 0.7, L_{WT}/d=0.0\sim 5.0$ 의 범위에서 고려하였다. d 는 분기관의 지름으로 $2r$ 과 같다.

Fig. 2 는 본 연구에서 사용한 유한요소망(Finite element mesh)이다. 모든 경우에 두께 방향으로 6

개의 요소가 사용되었고, 사용된 요소(element)는 10602~10860 개이고, 절점(node)는 49988~51255 개이다.

2.2 유한요소 한계해석

ABAQUS V6.4 를 이용하여 소변형 유한요소 해석을 수행하였다. 재료는 탄성-완전 소성 재료를 사용하고, 비경화 J_2 유동 이론(flow theory)이 사용되었다. 해석 시간을 단축하기 위해서 대칭 모델을 사용하였다. 소성과 관련된 비압축성문제를 피하기 위해서 저감적분요소(reduced integration element; C3D20R)를 사용하였다. 한계해석에서는 저감적분요소를 사용하여도 해석결과에 오차는 없다. 유한요소 해석에서 탄성 계수 $E=207\text{GPa}$, 포아송 비 $\nu=0.3$, 한계 응력 $\sigma_0=250\text{MPa}$ 으로 설정하였지만, 본 연구에서 유한요소 결과는 직관의 한계하중으로 무차원화되므로 재료 특성은 한계하중 해석에 영향을 미치지 않는다.

내압은 유한요소 모델의 내면에 전체적으로 분포력으로 가하였다. 분기관과 주관의 끝단이 단혀있다고 가정하여, 내압에 의한 축방향 응력을 분기관과 주관의 끝단에 가하였다. 탄성-완전 소성 해석에 수반되는 수렴문제를 해결하기 위해서 ABAQUS 의 RIKS 옵션을 사용하였다.

2.3 유한요소 모델 형상과 경계조건의 영향

주관과 분기관의 길이(L, ℓ)에 따라 유한요소 결과가 달라질 수 있으므로^{4,5)}, 본 해석에 앞서 유한요소 모델 형상의 영향과 경계조건에 따른 영향을 고려하였다.

2.3.1 내압

유한요소 한계하중해석에 있어서, 분기관과 주관의 길이가 각각의 반지름의 5 배 이상($L/R \geq 5, \ell/r \geq 5$)이면, 분기관과 주관의 길이는 한계하중에 영향을 미치지 않는다.⁴⁾ 따라서, $L/R=60, \ell/r=20$ 으로 설정하여 한계하중 해석을 수행하였으며 1/2 대칭 모델을 사용하였다.

3. 한계하중식

3.1 내압

3.1.1 기존 한계하중식

주관에 감육이 존재하고 내압을 받는 T 분기관의 한계하중은 다음과 같이 제시되었다.⁴⁻⁵⁾

$$\frac{P_L}{P_0^S} = \min \left(\begin{array}{c} \frac{P_0^*}{P_0^S} \\ \frac{P_0^{WT}}{P_0^S} \end{array} \right)$$

3.1.2 한계하중식

분기관에 국부 감육이 존재하고 내압을 받는 T 분기관의 유한요소 한계하중 해석을 수행하였다. 한계하중의 결과는 감육이 존재하지 않는 T 분기관의 한계하중과 감육이 존재하는 직관의 한계하중과 비교하였다.

T 분기관에 내압이 가해지면 감육의 형상에 따라 분기관과 주관의 교차부분에서 파손이 일어나거나 교차부분이 아닌 감육 부위에서 파손이 일어날 수 있다. dwt/t 가 비교적 작은, 다시말해 감육 깊이가 작을수록 교차 부분이 파손되는 거동을 보이며 이와 같은 경우에는 축방향 감육 길이의 변화는 한계하중에 영향을 주지 않았다. 감육 깊이가 깊은 형상에서는 감육 부위에서 파손이 일어나며 감육있는 직관과 같은 거동을 보인다. 파손이 일어나는 두가지의 경우 모두 θ/π 영향이 미흡하므로 보수적으로 무시할 수 있으며, 특히 직관과 같은 거동을 보이는 경우에는 θ/π 영향은 없었다.

T 분기관의 교차부분에서 파손이 일어나는 경우 제시될 평가식에서 t/T 변수를 $(t-dwt)/T$ 로 보완하여 감육깊이에 의한 교차부분의 두께 손실의 영향을 감안하였으며 이 경우 5% 정도의 보수성을 보이고 있다.

감육이 있는 T 분기관의 한계압력은(P_L)은 두께 손실을 고려한 T 분기관의 한계압력과 감육이 있는 직관의 한계압력(P_0^{WT})의 최소값으로 나타낼 수 있다. 즉 다음과 같은 수식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{P_L}{P_0^S} = \min \left(\begin{array}{c} \frac{P_0^*}{P_0^S} \\ \frac{P_0^{WT}}{P_0^S} \end{array} \right) \quad (1)$$

P_0^S 는 von Mises 소성 기준에 기초한 감육이 없는 직관의 한계압력으로 다음과 같다.

$$P_0^S = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{T\sigma_0}{R} \quad (2)$$

P_0^* 는 감육이 없는 분기관의 한계압력 평가식에서 분기관의 두께방향 감육 깊이를 고려한 감육이 있는 T 분기관의 한계압력이다.⁵⁾

$$\frac{P_0^*}{P_0^S} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Q}{(0.25 - 0.5h_1 + h_1^2 + 0.79h_2^2)^{0.5}} \quad (3)$$

여기서,

$$Q = -(0.4603A + 0.1525)(C^* - 1)^2 + 1.015B^{-0.297}(A - 0.52)^4 + 1.127B^{-0.0505}$$

$$h_1 = 1 + (0.145kA\sqrt{B}f_2 + 0.3185A^2f_1) \left(1 - \frac{C^*}{AB}\right)^2$$

$$h_2 = 0.175kA\sqrt{B} \left(1 - \frac{C^*}{AB}\right)^2 f_2$$

$$f_1 \approx 1 + \frac{1}{3}A^4 ; f_2 \approx \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{3}{16}A^2\right) ; k = \frac{1}{1 + C^{*3}}$$

$$A = \frac{r}{R} ; B = \frac{2R}{T} ; C^* = \frac{t - d_{wt}}{T}$$

P_0^{wt} 는 감육이 있는 직관의 한계압력으로 다음과 같다.

$$\frac{P_0^{wt}}{P_0^s} = \left(\frac{P_0^{wt}(0)}{P_0^s} - \frac{P_0^{wt}(\infty)}{P_0^s} \right) \exp\left(-\left(0.8 + 5\frac{d_{wt}}{t}\right)\sqrt{\frac{r}{t}}\frac{L_{WT}}{2d}\right) + \frac{P_0^{wt}(\infty)}{P_0^s}$$

$$\frac{P_0^{wt}(0)}{P_0^s} = \min \left\{ \left[1 + A_1 \frac{d_{wt}}{t} + A_2 \left(\frac{d_{wt}}{t}\right)^2 \right] \frac{1 - \frac{1}{\pi} \left(\theta \frac{d_{wt}}{t} + 2 \sin^{-1} \left(\frac{d_{wt} \sin \theta}{t} \right) \right)}{\left(1 - \frac{d_{wt} \theta}{t} - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{d_{wt} f(\theta)}{t} \right) \right)} \right\} \quad (4)$$

$$A_1 = 0.0662 - 0.038 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) - 0.96 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2$$

$$A_2 = -0.0598 - 1.525 \left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 1.4267 \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2$$

$$f(\theta) = 0.7854\theta^2 - 0.09817\theta^4 + 0.0040906\theta^6 - 0.000085\theta^8$$

$$\frac{P_0^{wt}(\infty)}{P_0^s} = 1 - \frac{d_{wt}}{t}$$

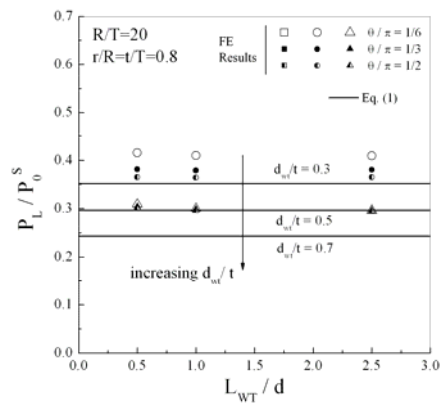
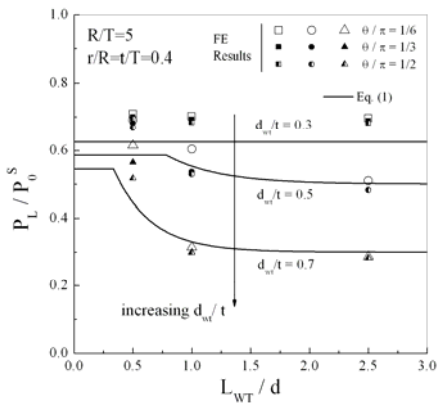
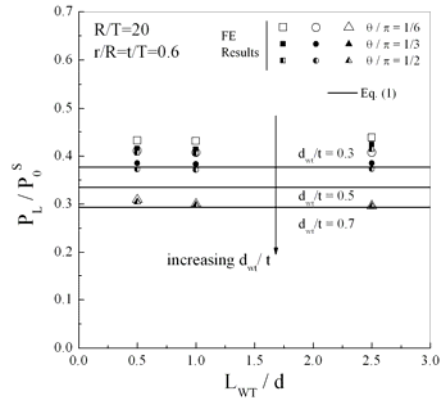
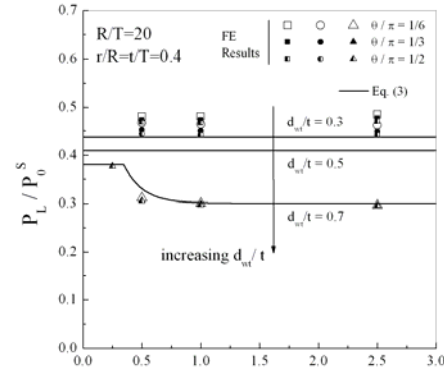
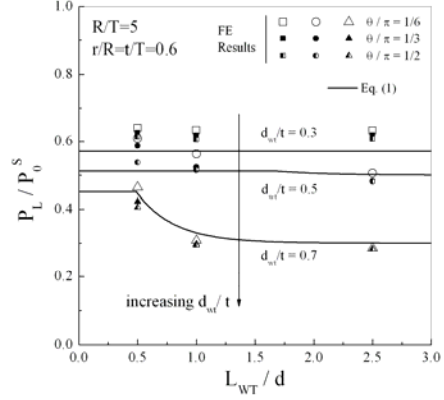


Fig. 3 Comparison of FE limit loads with Eq. (1) for branch junctions under internal pressure

5. 결 론

본 논문에서는 탄성-완전소성 재료와 소변형 가정에 기초하여 내압을 받는 T 분기관의 유한요소 한계하중식을 제시하였다. T 분기관의 형상과 관련된 변수를 $0.0 \leq (r/R, t/T) \leq 1.0$ 과 $5.0 \leq R/T \leq 20.0$ 범위에서 고려하였다. 경계 조건 및 하중 조건이 한계하중에 미치는 영향을 살펴보았다. 주관과 분기관의 길이가 길어짐에 따라 한계하중이 수렴하고 수렴하는 길이에서 한계하중해석을 수행하였다. 유한요소 결과를 바탕으로 내압이 작용하는 경우의 기존의 한계하중식을 개선하는, 주관과 분기관의 교차부분의 감육 깊이로 인한 두께 손실을 고려한 한계하중식(1)을 제안하였다. 이들 식은 유한요소 해석 결과와 잘 일치함을 Fig. 3 에서 확인할 수 있다.

본 논문은 원자력 발전소 배관계통에서 발생하는 국부 감육(local wall thinning)이 존재하는 T 분기관의 한계하중을 위한 기준식 제시가 주 목적이다. 굽힘 하중을 받는 감육이 있는 T 분기관에 대한 한계하중의 결과는 추후에 보고될 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업(원자력기초공동연구소)과 BK21 2007년도 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Xuan F.Z., Li P-N and Tu S-T., 2006, "Limit load analysis for the piping branch junctions under in-plane moment.", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.48, pp.460-467.
- (2) Xuan F.Z., Li P-N and Tu S-T., 2003, "Limit load analysis for the piping branch junctions under internal pressure.", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.224, pp.1-9.
- (3) Takahashi K., Kato A., Ando K., Hisatsune M. and

- Hasegawa K., 2007, "Fracture and deformation behaviors of tee pipe with local wall thinning", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, Issue 2, pp. 137-142.
- (4) Kim Y.J., Lee K.H. and Park C.Y., 2006, "Limit loads for thin-walled piping branch junctions under internal pressure and in-plane bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 645-653.
- (5) Lee K.H., Kim Y.J., Myung M.S., Park C.Y., Lee S.H. and Kim T.R., 2006, "Limit Loads for Piping Branch Junctions under Internal Pressure and In-plane Bending", *Transaction of the KPVP*, Vol. 2, No. 2, pp. 104-112.