

감육이 존재하고 내압과 굽힘하중의 복합하중을 받는 T 분기관의 한계하중

한재준[†] · 이국희* · 김윤재** · 이성호*** · 박치용***

Limit Loads for Piping Branch Junctions with Local Wall-thinning under Internal Pressure and In-plane Bending.

Jae-Jun Han, Kuk-Hee Lee, Yun-Jae Kim, Sung-Ho Lee and Chi-Yong Park

Key Words : Finite element analysis(유한요소해석), In-plane bending(면내 굽힘), Internal pressure(내압), Piping Branch junction(T 분기관), Limit load(한계하중), Wall thinning(감육).

Abstract

This paper presents plastic limit loads of piping branch junctions with local wall thinning under combined pressure and in-plane bending, based on systematic three-dimensional finite element limit analyses using elastic-perfectly plastic materials. An ideal branch junction without weld or reinforcement around the intersection is considered with two locations of wall thinning; one in the run pipe, and the other in the branch pipe. Based on FE results, effects of thinning geometries on plastic limit moments are quantified and simple approximations of plastic limit loads are proposed.

1. 서 론

발전소 배관 시스템의 건전성 평가에 있어 감육이 존재하는 배관의 소성 한계하중은 주요 관심 대상이다. 특히, 최근 감육배관에 의한 사고가 잇따름에 따라 감육배관의 소성한계하중에 대한 연구는 더욱 중요해졌다. 현재 연구는 주로 직관의 감육에 국한되어 있으며, 실험과 해석 등을 통한 폭넓은 연구가 진행되어 왔다. 반면 침부식에 의한 감육이 분기관에 쉽게 발생할 수 있지만 이에 대한 연구 결과는 소수¹⁻⁵⁾에 불과하다. 굽힘이나 내압의 단일하중을 받는 감육 분기관의 한계하중은 기존에 연구가 이루어 졌으나 복합하중에 대한 연구는 없었기에 이에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 내압과 면내 굽힘하중을 동시에

받는 T 분기관에 대해 다양한 형상 변수를 체계적으로 변화시키면서 3 차원 유한요소 한계해석을 수행하였다. Fig. 1, 2 과 같이 감육이 T 분기관의 하단과 상단에 존재하는 형상에 대해서 해석을 수행하였고, 감육의 형상은 사각으로 이상화하였다. 감육의 길이와 폭과 깊이를 고려한 한계하중 곡선 보간식을 제시하였다.

용어의 명확성을 위해서 분기관(branch run)과 주관(main run)이 접합된 배관 구성요소를 T 분기관 (piping branch junction)이라 지칭하겠다. 그리고 주관(main run)에 접합된 관은 분기관(branch run)으로 지칭하겠다.

2. 유한요소 한계하중해석

2.1 T 분기관 형상과 유한요소망

T 분기관의 유한요소 해석을 위한 모델의 형상은 Fig. 1, 2 에 나타나 있다. Fig. 1 은 주관 하단에 감육이 있는 경우이고, Fig. 2 는 분기관에 감육이 있는 형상이다. 분기관-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,

[†] 회원, 고려대학교 기계공학과 대학원
E-mail :intelligentj@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3749 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

*** 한전 전력연구원 원자력발전연구소

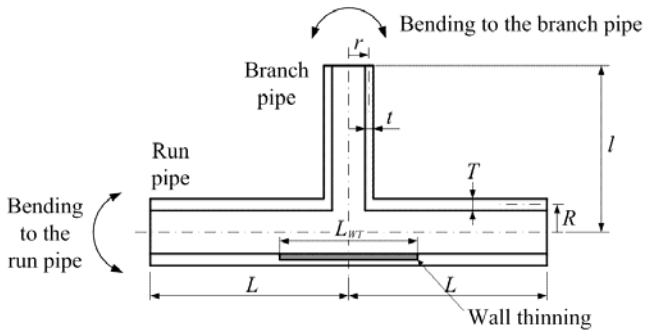


Fig. 1 Schematics of branch junction with main pipe wall-thinning

분기관의 축 방향 길이는 l 이다. 감육의 원주방향으로의 각도는 θ 이고, 두께방향 깊이는 d_{WT} 이고, 축방향의 길이는 L_{WT} 이다.

감육이 주관의 하단에 있는 경우(Fig. 1)에는, T 분기관 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. 감육 형상 변수(θ, d_{WT}, L_{WT})를 $0.0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $0.0 \leq d_{WT}/t \leq 0.7$ $0.5 \leq L_{WT}/D \leq 5$ 의 범위에서 고려하였다. D 는 주관의 지름으로 $2R$ 과 같다.

감육이 주관의 상단에 있는 경우에는, T 분기관 형상 변수(R, T, r, t)를 $0.4 \leq r/R \leq 0.8$, $0.4 \leq t/T \leq 0.8$ 과 $5.0 \leq R/T \leq 20.0$ 의 범위에서 고려하였다. 감육 형상 변수(θ, d_{WT}, L_{WT})를 $0.0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $0.0 \leq d_{WT}/t \leq 0.7$, $0.0 \leq L_{WT}/d \leq 2.5$ 의 범위에서 고려하였다. d 는 분기관의 지름으로 $2r$ 과 같다.

Fig. 3 은 본 연구에서 사용한 유한요소망(Finite element mesh)이다. 모든 경우에 두께 방향으로 6 개의 요소가 사용되었고, 사용된 요소(element)는 9615~10215 개이고, 절점(node)는 45629~48903 개이다.

2.2 유한요소 한계해석 조건

ABAQUS V6.6 를 이용하여 소변형 유한요소 해석을 수행하였다. 재료는 탄성-완전소성 재료를 사용하고, 유한요소해석에서 von Mises 항복조건이 사용되었다. 해석 시간을 단축하기 위해서 대칭 모델을 사용하였다. 소성과 관련된 비압축성문제를 피하기 위해서 저감적분요소(reduced integration element; C3D20R)를 사용하였다. 유한요소 해석에서 탄성 계수 $E=207\text{GPa}$, 포아송 비 $\nu=0.3$, 한계 응

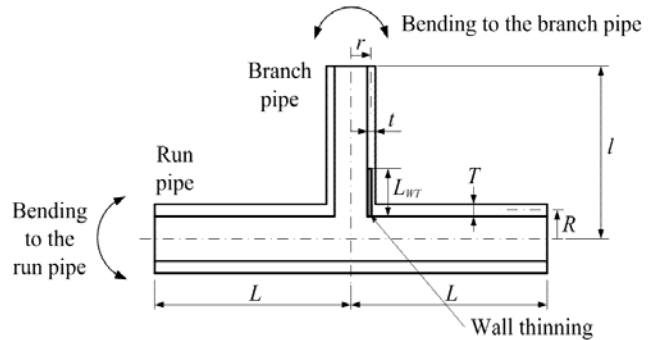


Fig. 2 Schematics of branch junction with branch pipe wall-thinning

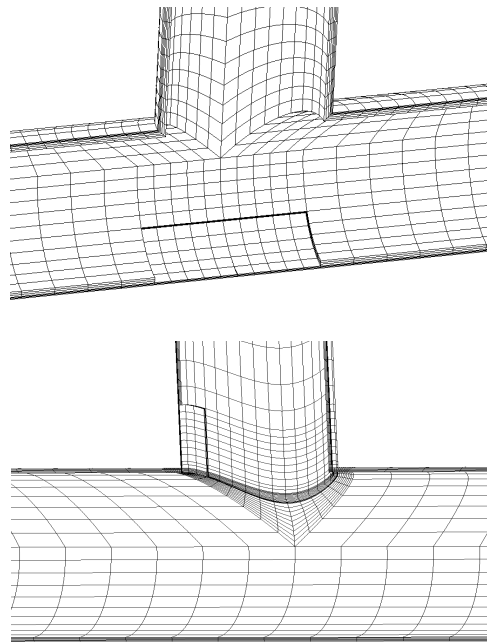


Fig. 3 Finite element meshes

력 $\sigma_0=250\text{MPa}$ 으로 설정하였지만, 본 연구에서 유한요소 결과는 직관의 한계하중으로 무차원화되므로 재료 특성은 한계하중 해석에 영향을 미치지 않는다.

본 연구에서 내압과 면내 굽힘하중의 복합하중을 적용할 경우, 내압을 가한 후 굽힘하중을 증가시키는 방법을 사용하였다. 내압은 유한요소 모델의 내면에 분포력으로 가하였다. 이때, 분기관과 주관의 끝단이 단혀있다고 가정하고 내압에 의한 축방향 응력을 분기관과 주관의 끝단에 분포력으로

로 가하였다. 내압이 T 분기관에 가해지는 상태에서, 다음과 같은 2 가지 굽힘하중 조건에 대한 한계하중 해석을 수행하였다.

한계하중은 배관의 단면 전체가 한계 응력에 도달될 때의 하중이다.²⁾

2.2.1 면내 굽힘하중이 분기관에 작용하는 경우의 경계조건

이 경우에 Fig. 4 와 같이 내압과 면내 굽힘하중을 분기관에 가하였다. Fig. 4 는 한쪽 끝단은 완전히 구속되고 다른 끝단은 단순 지지되어 있는 조건(Clamped-Simply Supported, CL-SS)이다. 주관의 길이가 충분히 길다면($L/R > 60$) 한계하중은 수렴한다¹⁾. 따라서 다음 장에서 제시될 해석 결과는 주관의 길이가 충분히 길고($L/R = 60$), CL-SS 경계조건에서 해석된 결과이다. 그리고, 1/2 대칭 모델을 사용하였다.

2.2.2 면내 굽힘하중이 주관에 작용하는 경우의 경계조건

이 경우에 Fig. 6 와 같이 내압과 면내 굽힘하중을 주관에 가하였다. Fig. 6(a) 와 같이 하중이 가해지는 방향을 열림 방향이라고 지칭하고, Fig. 6(b) 와 같이 하중이 가해지는 방향을 닫힘 방향이라고 지칭하겠다. 주관에 내압과 굽힘하중이 동시에 가해지면, 굽힘하중의 방향에 따라서 한계하중이 다르다.²⁾ 이러한 경향은 감육이 존재하는 경우에 더욱 뚜렷하다. 자세한 내용은 4 장에서 언급하겠다. 또한, 다양한 형상 조건에 있어서 $l/r > 10$ 이면 한계하중은 수렴한다.³⁾ 따라서 본 연구에서는 $l/r = 20$ 으로 설정하고 한계하중을 측정하였다. 그리고 1/2 대칭 모델을 사용하였다.

3 감육이 있는 T 분기관의

단일하중에 대한 한계하중식

T 분기관에 대한 내압과 굽힘하중에 대한 한계하중식을 기존 문헌에서 찾을 수 있다.¹⁻⁵⁾

3.1 내압 한계하중식

감육이 있는 T 분기관의 한계 압력(P_L)은 감육이 있는 직관의 한계 압력(P_0^{WT})과 감육이 없는 T 분기관의 한계 압력(P_0)의 최소값과 같다.⁵⁾ 따라서 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{P_L}{P_0^S} = \min \left(\frac{P_0}{P_0^S}, \frac{P_0^{WT}}{P_0^S} \right) \quad (1)$$

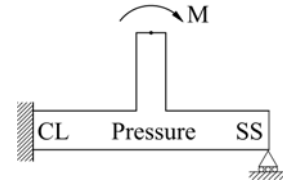


Fig. 5 The boundary conditions for branch junctions under in-plane bending on the branch pipe : clamped-simply supported (CL-SS).

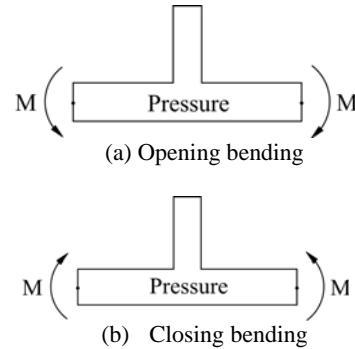


Fig. 6 Two boundary conditions for branch junctions under in-plane bending on the run pipe: (a) Opening bending, (b) Closing bending.

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 은 감육이 없는 T 분기관의 한계압력으로 다음과 같다.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,

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

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

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

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

$$A = \frac{r}{R} ; B = \frac{2R}{T} ; C = \frac{t}{T}$$

P_0^{WT} 는 감육이 있는 직관의 한계압력으로 다음과 같다.⁶⁾

$$\frac{P_0^{WT}}{P_0^S} = \frac{P_0^{WT}(0)}{P_0^S} \left[1 - \left(\frac{P_0^{WT}(0)/P_0^S + d_{WT}/T - 1}{P_0^{WT}(0)/P_0^S} \right) \times \left(1 - \exp \left(- \left(1.5 - \frac{d_{WT}}{T} \right) \frac{d_{WT}}{T} \frac{L_{WT}}{\sqrt{R_0(T - d_{WT})}} \right) \right) \right] \quad (4)$$

여기서, $P_0^{WT}(0)/P_0^S$ 은 감육의 축방향 길이가 극단적으로 짧은 경우의 식이고, 직관의 원주방향 균열식으로 다음과 같다.

$$\frac{P_0^{WT}(0)}{P_0^S} = \min \left(\frac{R}{T} \left[\ln \left(\frac{R+T/2}{R-T/2+d_{WT}} \right) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{R+T/2}{R-T/2+d_{WT}} \right)^2 - 1 \right) \right], \frac{R}{T} \left[\ln \left(\frac{R+T/2}{R-T/2+d_{WT}} \right) + \frac{R-T/2}{R-T/2+d_{WT}} + 1 \right] \right) \quad (5)$$

3.2 면내 굽힘하중

3.2.1 분기관에 가해지는 면내 굽힘한계하중

감육이 있는 T 분기관의 분기관에 가해지는 굽힘한계하중(M_L^B)은 다음과 같다.⁵⁾

$$\frac{M_L^B}{M_0^B} = (1 - f_\infty) \exp(-L_{WT}/D) + f_\infty \quad (6)$$

여기서,

$$f_\infty = 4(a-1)(\theta/\pi)^2 + 1$$

$$a = \begin{cases} 1 & (0.0 \leq r/R \leq 0.7) \\ \frac{b-1}{0.2}(r/R) + \frac{9-7b}{2} & (0.7 \leq r/R \leq 0.9) \\ b & (0.9 \leq r/R \leq 1.0) \end{cases}$$

$$b = 1 - 0.569(d_{WT}/T)^2$$

f_∞ 는 감육이 무한히 길 때에 적용할 수 있는 무차원화된 한계하중이다.

M_0^B 은 감육이 존재하지 않는 T 분기관의 분기관에 굽힘하중이 작용할 때의 한계하중으로 다음과 같다⁴⁾. 굽힘하중식은 직관의 한계하중으로 무차원화하여 나타내었다.

$$\frac{M_0^B}{4\sigma_0 r^2 t} = \min \left(\frac{1}{\pi/2 \cdot Q}, \frac{1}{C \left[(f_1 A + 0.455 f_2 k \sqrt{B})^2 + 0.2385 B f_2^2 k^2 \right]^{0.5}} \right) \quad (7)$$

여기서,

$$Q = (-1.102 - 0.653A)(C - 0.7)^2 - 2.583A^3 + 5.462A^2 - 3.544A + 2.009 - 0.0025B$$

여기서, f_1, f_2, A, B, C 은 식(3)에 주어진 바와 같다.

3.2.2 주관에 가해지는 면내 굽힘한계하중

감육이 존재하는 T 분기관의 주관에 굽힘하중이 가해질 때의 한계 굽힘하중 M_L^R 을 다음과 같이 제시한다. 유한요소해석 결과와 식은 감육이 없는 분기관의 한계하중으로 무차원화하여 나타내었다.⁵⁾

$$\frac{M_L^R}{M_0^R} = 1 - 1.33 \frac{\theta d_{WT}}{\pi T} \quad (8)$$

M_0^R 은 감육이 존재하지 않는 T 분기관의 주관에 굽힘하중이 작용할 때의 한계하중식으로 다음과 같다.⁴⁾

$$\frac{M_0^R}{4\sigma_0 R^2 T} = \left[0.5442 \left(\sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) \right)^\alpha - \beta \frac{r}{R} \right] \frac{t}{T} + m_0 \quad (9)$$

여기서,

$$\alpha = 0.9578(R/T)^{-0.09099}$$

$$\beta = 0.1555(R/T - 4.480)^{0.3104}$$

$$m_0 = \cos \left(\frac{\sin^{-1}(r/R)}{2} \right) - \frac{r/R}{2}$$

4. 감육이 있는 T 분기관의

복합하중에 대한 한계하중식.

실제로 사용되는 배관은 내압과 굽힘하중의 복합하중을 동시에 받는다. 본 논문에서 복합하중은 내압과 굽힘하중이 동시에 가해지는 경우를 의미한다. 2.2 절에서 유한요소 해석에서 복합하중을 가하는 방법을 설명하였다. 본 장에서는 3 장에서 기술한 기존의 T 분기관의 한계하중 식을 이용하여 감육이 있는 T 분기관의 복합하중에 대한 한계하중식을 제시하겠다.

4.1 분기관에 면내 굽힘하중이 작용하는 경우

감육의 위치와 관계없이, 분기관에 내압과 면내 굽힘하중의 복합하중이 작용하는 경우에는 유한요소 해석의 결과에 의해 다음 식을 제시한다.

$$\left(\frac{P}{P_L} \right)^\alpha + \left(\frac{M}{M_L} \right)^\beta = 1 \quad (10)$$

여기서,

$$\alpha = 0.813(r/R) - 0.0255(R/T) + 1.73$$

$$\beta = 1.57 - 0.0177(R/T) + 4.030(r/R - 0.7)^2$$

앞의 2.2.2 절에서 언급했던 감육의 위치와 면내 굽힘하중의 방향과의 관계를 고찰해보면, 분기관에 감육이 있는 경우 분기관에 하중을 가하는 방향은 한계하중에 큰 영향을 미친다. 내압이 가해지면 감육부위는 인장응력을 받게된다. 따라서 감육이 없는 면내 방향으로 굽힘하중을 가하는 것이 감육부위에 인장응력을 더하는 것이므로 한계하중이 된다. 이는 FE 해석 결과를 통해서도 입증하였다.

반면에, 주관 하단에 감육이 있는 경우에는 분기관에 하중을 가하는 방향이 대칭성을 가지므로 한계하중에 영향을 미치지 않는다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 유한요소 해석결과와 식 (10) 을 비교한 그래프이다. 유한요소 해석결과와 식 (10)은 내압이 한계내압의 60%이내에서 최대 10% 정도이다. 한계내압의 60%이상은 실제로 사용범위에 해당하지 않는 범위이므로 보수성이 상당히 큰 값으로 남겨두었다.

4.2 주관에 면내 굽힘하중이 작용하는 경우

감육의 위치와 관계없이, 주관에 내압과 면내 굽힘하중의 복합하중이 작용하는 경우에는 유한요소해석의 결과에 의해 다음 식을 제시한다.

$$\left(\frac{P}{P_L}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_L}\right)^2 = 1 \quad (11)$$

주관에 면내 굽힘하중이 작용하는 경우에 감육의 위치와 면내 굽힘하중 방향과의 관계를 고찰해보면, 분기관에 감육이 있는 경우 주관에 하중을 가하는 방향은 한계하중에 큰 영향을 미친다. 4.1 절의 경우와 같이 내압이 가해지면 감육부위는 인장응력을 받게된다. 따라서 인장응력이 더해지는 열림방향에서 더 낮은 한계하중 값을 얻게 된다.

반면에, 주관 하단에 감육이 있는 경우 주관에 하중을 가하는 방향을 고려해보면, 다른 경우와 달리 파손부분이 주관-분기관 교차부분과 감육 부분 두 곳이다. 따라서 각각의 경우에 따라 어느 부분이 더 먼저 파손에 이르게 될지 알 수 없으므로 한계하중방향을 하나로 정할 수 없다. 따라서 두 굽힘방향 한계하중 중에서 더 작은 유한요소값을 선택하였다. Fig. 9 와 Fig. 10 은 유한요소결과와 식(11) 을 비교한 그래프이다. 유한요소 해석결과와 식(11)은 내압이 한계내압의 75%이내에서 평균오차 8%표준편차 6%정도이다. 한계내압의 75% 이상은 실제로 사용범위에 해당하지 않는 범위이므로 보수성이 상당히 큰 값으로 남겨두었다.

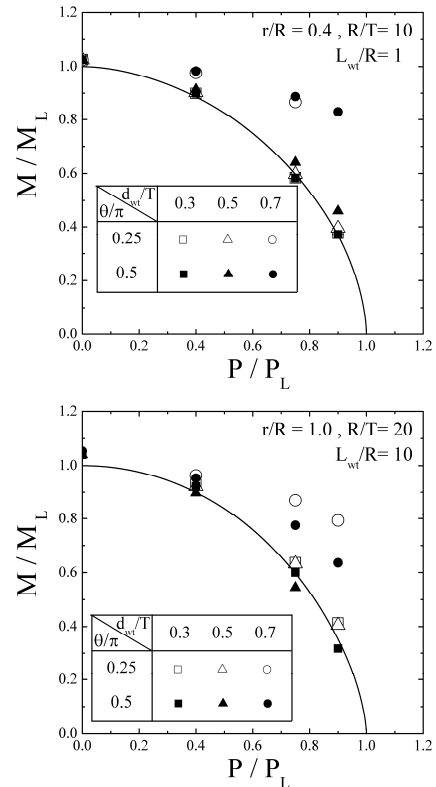


Fig. 7 Comparison FE limit loads with Eq. (10) for branch junctions with run pipe wall-thinning under combined load to branch pipe.

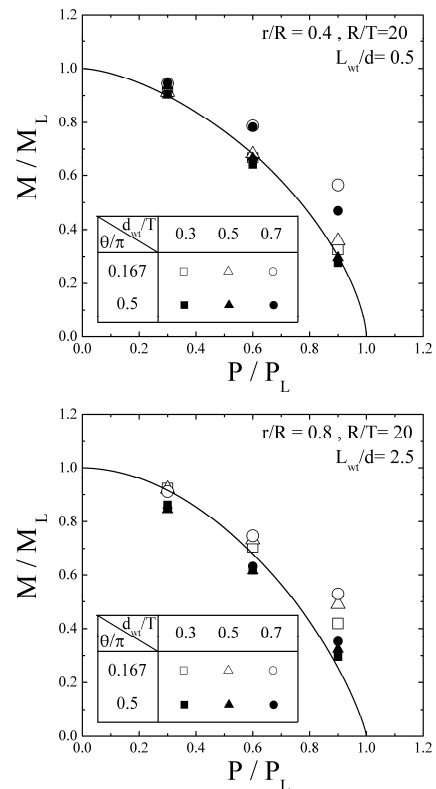


Fig. 8 Comparison FE limit loads with Eq. (10) for branch junctions with branch pipe wall-thinning under combined load to branch pipe.

5 결론

국부 감육이 T.분기관의 분기관과 주관에 존재할 때, 본 논문에서 T 분기관의 복합하중에 대한 한계식을 제시하였다. 탄성-완전소성 재료와 소변형 가정에 기초한 유한요소 한계해석을 수행하였다. T 분기관의 형상과 관련된 변수를 $0.4 \leq (r/R, t/T) \leq 1.0$ 과 $5.0 \leq R/T \leq 20.0$ 범위에서 고려하였다. 감육은 사각 감육으로 이상화하였다. 감육 형상 변수를 주관 하단 $0.0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $0.0 \leq d_{WT}/T \leq 0.7$, $0.5 \leq L_{WT}/D \leq 5.0$, 분기관 $0.0 \leq \theta/\pi \leq 0.5$, $0.0 \leq d_{WT}/t \leq 0.7$, $0.0 \leq L_{WT}/d \leq 2.5$ 의 범위에서 고려하였다.

1) 분기관에 굽힘하중이 가해지는 경우, 분기관에 감육이 존재하는 T 분기관의 한계하중은 감육이 존재하는 반대방향으로 굽힘하중이 가해질 때이며 식(10)으로 표현이 가능하다.

2) 주관에 감육이 존재하는 T 분기관의 한계하중은 굽힘하중의 방향과 관계없이 식 (10)으로 표현이 가능하다.

3) 주관에 굽힘하중이 가해지는 경우, 분기관에 감육이 존재하는 T 분기관의 한계하중은 열림방향으로 굽힘하중이 가해질 때이며 식(11)로 표현이 가능하다.

4) 주관에 감육이 존재하는 T 분기관의 한계하중은 열림방향과 닫힘방향 중에서 더 취약한 부분으로 정의하며 식(11)로 표현이 가능하다.

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) Lee K.H., Kim Y.J., Park C.Y., Lee S.H. and Kim T.R., 2007, "Limit Load Solutions for Piping Branch Junctions under Combined Pressure and In-plane Bending", *Trans. of the KPVP*, Vol. 3, No. 1, pp. 60-68.
- (3) 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", *Trans. of the KPVP*, Vol. 2, No. 2, pp. 104-112.
- (3) 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.
- (4) 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", *Trans. of the KPVP*, Vol. 2, No. 2, pp. 104-112.
- (5) Ryu K.M., Kim Y.J., Lee K.H., Park C.Y., Lee S.H. and Kim T.R., 2006, "Limit Load Analysis for Piping Branch Junctions with local wall-thinning under Internal Pressure and In-plane bending", *KSME, Proceeding of conference, 2007 Fall*, pp. 18-23.

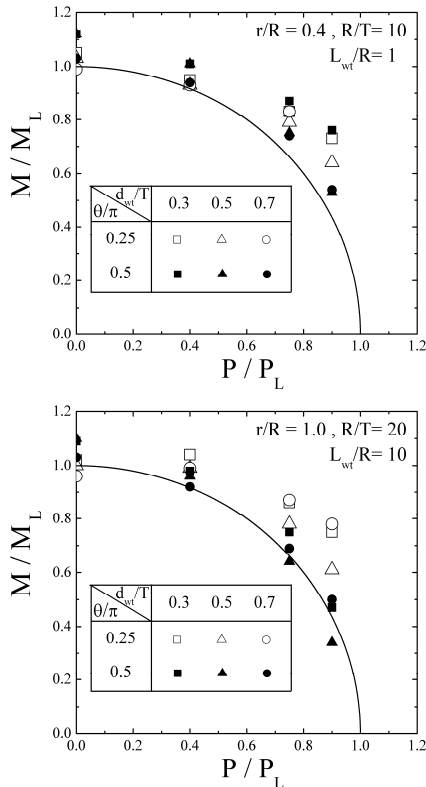


Fig. 9 Comparison FE limit loads with Eq. (11) for branch junctions with main pipe wall-thinning under combined load to main pipe.

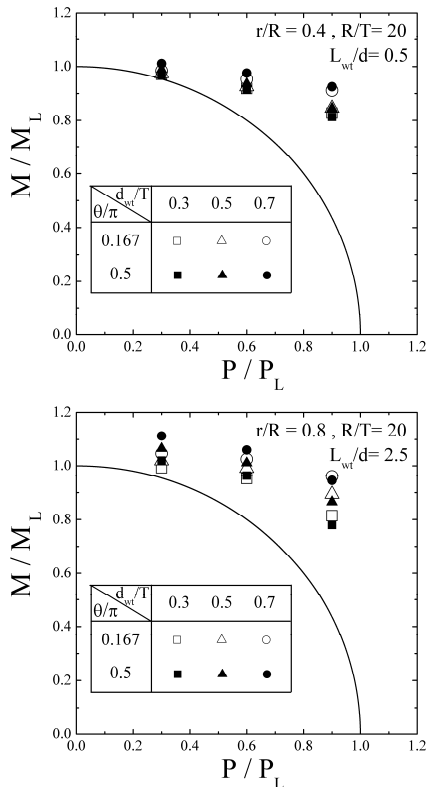


Fig. 10 Comparison FE limit loads with Eq. (11) for branch junctions with branch pipe wall-thinning under combined load to main pipe.