

<연구논문>

## 사각 감육을 고려한 증수로 공급자관 파열압력 평가

김광수\*·김민규\*\*·조두호\*\*\*·정재준†\*

### Evaluation of the Burst Pressure for Rectangular Wall-thinning of CANDU Feeder Pipe

Kwang Soo Kim\*, Min Kyu Kim\*\*, Doo Ho Cho\*\*\* and Jae Joon Jeong†\*

(Received 14 May 2021, Revised 22 June 2020, Accepted 18 June 2021)

#### ABSTRACT

The flow accelerated corrosion (FAC) is one of significant aging and degradation mechanism and can affect structural integrity of CANDU feeder pipes. Pipe burst can occur under normal operation pressure (min. 10 MPa) if wall-thinning of the feeder pipe due to FAC is accumulated. Previous studies considered simple shapes of feeder pipe with local wall-thinning in order to conservatively assess structural integrity of wall-thinned feeder pipe. In this paper, a new FE model is developed, having an actual shape of the feeder pipe (double bent) as well as the actual wall-thinning shape and location based on the in-service inspection result. Then, the burst pressure assessment of the wall-thinned feeder pipe is performed using lower bound limit load analysis considering elastic-perfectly plastic material. In addition, an improved formulation to predict the burst pressure of the wall-thinned feeder pipe is presented and the safety margin is compared with an existing assessment method.

**Key Words :** Flow accelerated corrosion (유동가속부식), Limit load (한계하중), Wall-thinning (감육), Feeder pipe (공급자관), Finite element analysis (유한요소해석)

#### 기호설명

$D$  = Nominal diameter

$\phi_1$  = Bending angle for 1<sup>st</sup> bend

$\phi_2$  = Bending angle for 2<sup>nd</sup> bend

$t$  = Nominal thickness

$H$  = Distance between gray-loc hub and 1<sup>st</sup> bend

$L_1$  = Distance between 1<sup>st</sup> bend and 2<sup>nd</sup> bend

$L_2$  = Length of straight pipe after 2<sup>nd</sup> bend

$\varphi$  = Wall-thinning length

$\theta$  = Wall-thinning angle

$d$  = Wall-thinning depth

$r$  = Average radius of pipe

$R$  = Bending radius

$M_D$  = Limit moment for double bend pipe

$M_S$  = Limit moment for single bend pipe

$P_L$  = Burst pressure

$P_0$  = Burst pressure of pipe without wall-thinning

$\sigma_y$  = Yield strength

$E$  = Modulus of elasticity

$\nu$  = Poisson's ratio

† 책임저자, 비회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : jjjeong@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2455

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 한국원자력안전기술원

## 1. 서 론

현재 국내에서 운영 중인 중수로 원전의 가동연한이 20년을 초과함에 따라 경년열화로 인한 구조물, 계통 및 기기의 건전성 약화 등을 주기적으로 감시하고 평가하고 있다<sup>(1)</sup>. 중수로 원전의 1차 열수송계통을 구성하는 공급자관의 주요 경년열화 기구는 국내의 중수로 원전의 운전경험 등을 통해 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion)으로 밝혀졌으며, 이로 인해 공급자관 두께가 점차 감소하는 것으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>.

두께 감소로 인해 공급자관의 압력 유지부와 파열 압력이 동시에 감소하게 된다. 두께 감소가 지속되면 정상 운전 압력인 약 10 MPa 이하에서도 파열이 발생할 수 있으므로, 국내 중수로 원전에서는 초음파 두께 검사를 통해 감시 대상으로 선정된 공급자관의 두께를 주기적으로 측정하고 있다. 또한, 측정 결과를 바탕으로 ASME B&PV Code, Sec.III에 따라 결정된 최소요구두께 기준의 건전성 평가 및 잔여수명 평가를 수행하고 있다<sup>(3,4)</sup>. 다만, 최소요구두께 방법에 따른 건전성 평가는 공급자관 내부에 동일한 두께의 감육이 발생한 것으로 가정함에 따라 감육 위치 및 형상에 따른 영향을 고려하지 못해 과도하게 보수적인 잔여수명을 도출한다.

이를 보완하기 위해 감육 위치 및 형상을 고려한 공급자관 및 곡관의 파열압력을 제시한 다수의 연구가 Kim 및 Bae 등에 의해 진행되었다<sup>(5-9)</sup>. 그러나 선행 연구에서는 보수적인 평가를 위해 중수로 공급자관의 이중 곡관 형상 대신 1차 곡관부와 직관으로 구성된 이상화 모델을 이용하여 파열압력을 계산하였으며, 감육 형상을 원형 감육 등으로 가정하여 실제 감육 형상을 고려하지 못하였다. 이로 인해 건전성 및 잔여수명 평가 결과가 비보수적인 값을 나타낼 가능성이 존재한다.

따라서 본 논문에서는 국내 중수로 공급자관의 가동중검사 결과 등을 분석하여 실제 공급자관 형상 및 감육 형상을 고려한 최적 유한요소해석 모델을 제시하였다. 이를 사용하여 유한요소해석을 수행하고 공급자관에 적용할 수 있는 보다 정확한 파열압력 예측식을 제시하였다. 또한, 파열압력 예측식을 사용하여 특정 공급자관에 대한 안전 여유도를 평가하고, 기존 건전성 평가 방법에 따른 안전 여유도와 비교 분석하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석 대상 선정

국내 가동 중인 중수로 공급자관은 출구측과 입구측에 각각 380개가 설치되어 있으며, 기존 연구<sup>(10)</sup>에서 출구측 하부 공급자관이 유동가속부식에 취약한 부위로 확인되었다. 출구측 하부 공급자관은 2.0인치 및 2.5인치 배관으로 구성되어 있으며, 굽힘각도, 1차 곡관 및 2차 곡관 등의 세부 형태에 따라 총 10개의 형태로 구분된다. 공급자관의 대표적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 본 논문에서는 대표적인 해석 모델을 선정하기 위해 주요 변수들을 분석하였다.

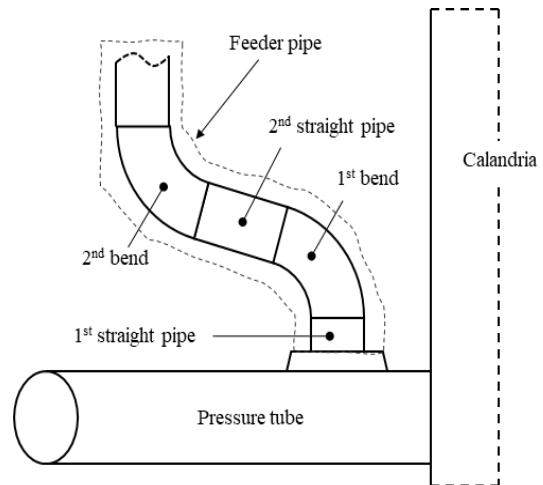


Fig. 1 Typical geometry of feeder pipe

#### 2.1.1 공급자관 고유 형상

공급자관 형상에 따른 영향을 확인하기 위해 감육이 존재하지 않는 1차 곡관만을 고려한 단순화 모델과 2차 곡관부를 포함하는 모델을 사용한 유한요소해석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 1, 2차 곡관을 연결하는 직관의 길이( $L_1$ ) 영향을 뚜렷이 확인하기 위해 파열 굽힘하중을 비교하였으며, 2차 곡관을 포함하는 모델의 파열 굽힘하중( $M_D$ )을 1차 곡관만을 고려한 단순화 모델의 파열 굽힘하중( $M_S$ )으로 나누어 차이를 확인하였다. 비교 결과 2차 곡관을 포함하는 경우  $L_1$ 에 따라 단순화 모델 대비 약 28~37% 낮은 값을 보였다. 따라서, 단순화 모델을 이용한 파열압력 해석은 보수적인 결과를 제시할 수 있지만,

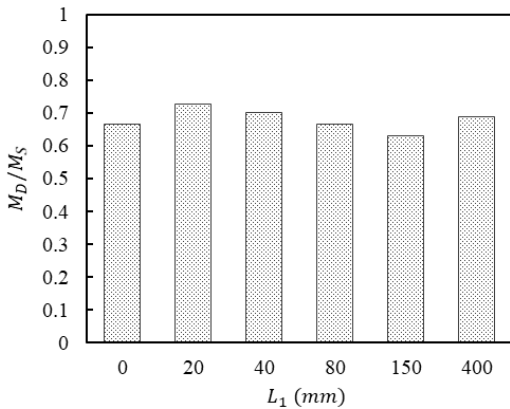


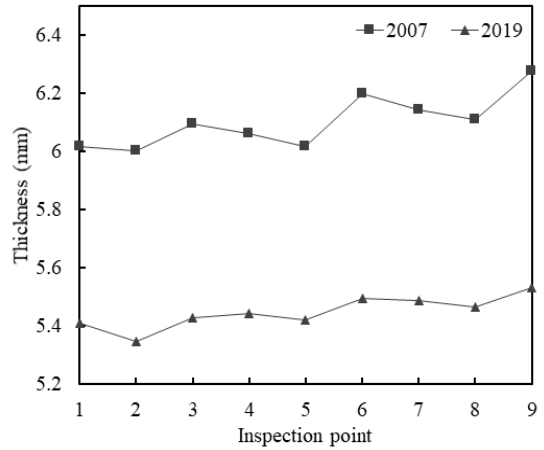
Fig. 2 Comparison of a limit moment for single and double bent feeder pipe

2차 곡관을 포함한 모델이 실제 공급자관의 파열압력을 보다 정확하게 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.

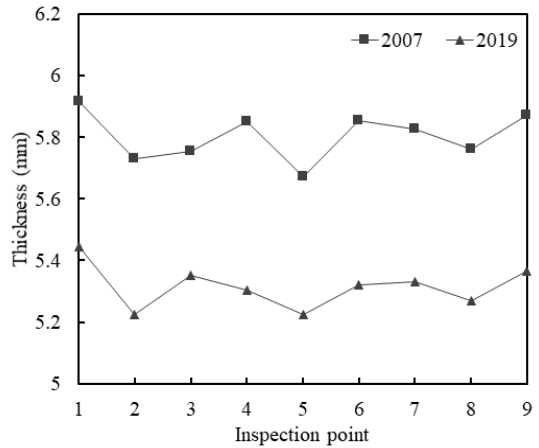
공급자관의 곡관부는 직관을 정해진 각도로 굽힘 성형하여 제작하게 된다. 이 때 발생하는 소성변형으로 곡관 외호부는 얇아지고 내호부는 두꺼워지게 되는데 Kim 등<sup>(11)</sup>은 외호부와 내호부 두께가 공칭 두께 대비 최대 30% 차이가 발생하더라도 파열압력 차이는 최대 10% 이내인 것으로 제시하였으며, Michael 등<sup>(12)</sup>은 난형도(Ovality)가 20% 정도 발생하더라도 파열 굽힘하중의 차이가 최대 11% 정도인 것으로 제시하였다. 따라서, 본 논문에서는 1차 및 2차 곡관 외호부 및 내호부의 두께 차이를 고려하지 않고 원주방향 별 두께가 일정한 것으로 가정하였다. 두께 차이 영향을 제외할 경우, 감육이 존재하는 공급자관의 파열압력은 약 10% 정도 보수적으로 도출될 것으로 예상된다.

2.1.2 감육 형상 및 위치

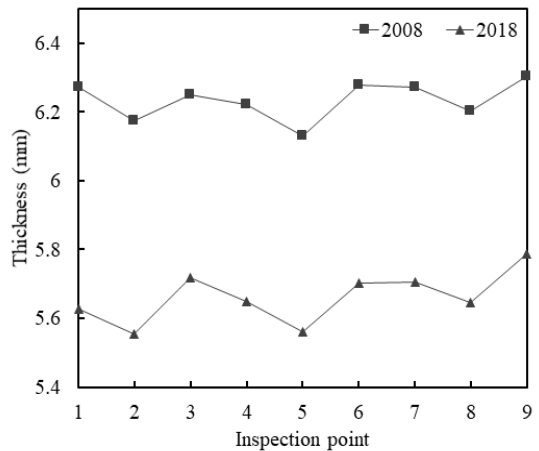
유동가속부식에 의한 실제 공급자관 감육 형상을 파악하기 위해, 국내에서 운영 중인 중수로 공급자관 두께 측정 이력<sup>(13)</sup>을 분석하였다. 공급자관의 외호부 두께 측정 결과를 측정 지점 별로 평균하여 비교한 결과는 Fig. 3과 같으며, 제작 시 결정된 외호부 내부 형상을 유지하며 전반적으로 유사한 속도로 감육이 일어나고 있음을 추정할 수 있다. 따라서, 정확한 파열압력 예측을 위해서는 감육 깊이가 일정한 사각형의 감육 형상을 가정하는 것이 적합하다고 판단하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Average wall-thinned thickness for 1st bend extrados (a) A plant (b) B plant (c) C plant

### 2.1.3 대표 형상 선정

본 논문에서 고려한 공급자관의 형상 변수 및 대표 형상을 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 2.5인치 공급자관을 대표할 수 있도록 굽힘반경 대 평균반경 ( $R/r$ )=4 및 반경 대 두께비( $r/t$ )=4.7인 형상을 기반으로 하였으며, 2.1.1항의 파열 굽힘하중 비교 결과에 따라  $L_1=40$  mm인 공급자관을 선정하였다. 또한 1차 곡관부의 굽힘 각도( $\phi_1$ )는 출구측 공급자관의 약 92%를 차지하는 73°를 선정하였으며, 실제 공급자관 2차 곡관부의 최대 굽힘 각도는 70°이나 모델 단순화를 위해 2차 곡관부의 굽힘 각도( $\phi_2$ )는 1차 곡관부와 같은 73°로 가정하였다. 곡관부 굽힘 각도가 증가할수록 파열압력이 감소하므로, 이러한 가정을 통해 보수적인 파열압력이 도출될 것으로 판단된다. 그레이락 허브로부터 1차 곡관까지 거리 ( $H$ )는 20 mm를 고려하였으며, 2차 곡관 이후 직관 길이( $L_2$ )는 곡관부 파열압력에 영향을 미치지 않도록 충분한 길이(> 10r)를 고려하였다. 사각 감육 형상에 대한 변수는 각각 감육 깊이-두께비( $d/t$ ), 원주

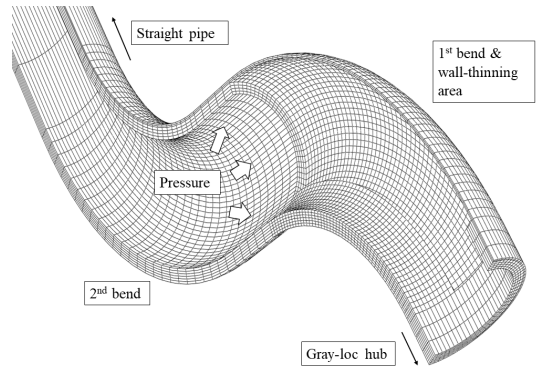


Fig. 5 Typical finite element model

방향 감육 길이각( $\theta/\pi$ ), 축방향 감육 길이각( $\varphi/\phi$ ), 으로 정의하였으며, 해석에는  $d/t=0.3\sim 0.8$ ,  $\theta/\pi=0\sim 1$ ,  $\varphi/\phi=0.5\sim 1$  조건을 고려하였다.  $\theta/\pi=1$ 일 경우 1차 곡관 외호부 내부 전체(내경 원주 길이의 1/2)두께가 원주방향으로 일정하게 감소된 형상을 의미하며,  $\varphi/\phi=1$ 인 경우는 1차 곡관 내부 두께가 곡관 길이만큼 축방향으로 모두 감소된 형상을 의미한다.

### 2.2 재료 물성

해석에 사용된 재료는 항복응력에서 항복이 발생하고 이후 응력이 더 이상 증가하지 않아도 무한 변형이 발생하는 탄성-완전소성 거동을 보인다고 가정하였다. 재료의 물성치는 중수로 공급자관의 재질인 SA-106 Grade B에 대한 정상운전시의 운전온도를 고려하여  $\sigma_y=180$  MPa,  $E=180$  GPa,  $\nu=0.3$  을 사용하였다.

### 2.3 해석 방법 및 조건

본 논문에 사용된 해석 모델은 Abaqus에서 제공하는 3차원 20절점 저감적분요소(C3D20R)를 사용하여 대칭조건을 고려한 1/2 모델을 95223개의 요소와 20330개의 절점으로 구성하였다. 감육부 및 공급자관 내부에 분포하중 형태로 내압을 작용시켰으며, 배관 끝단 효과를 고려하여 2차 곡관부 이후 시작되는 직관 끝단부에 내압에 상응하는 인장응력을 작용시켰다. 그레이락 허브와 연결되는 직관부 끝단을 Abaqus의 MPC(multi-point constraint)를 이용하여 반경방향과 축방향 자유도를 연결하고 중심점의 모든 자유도를 구속하였다. 내압이 작용하는 경우 기하학적 비선형 가정에 따른 파열압력의 차이가

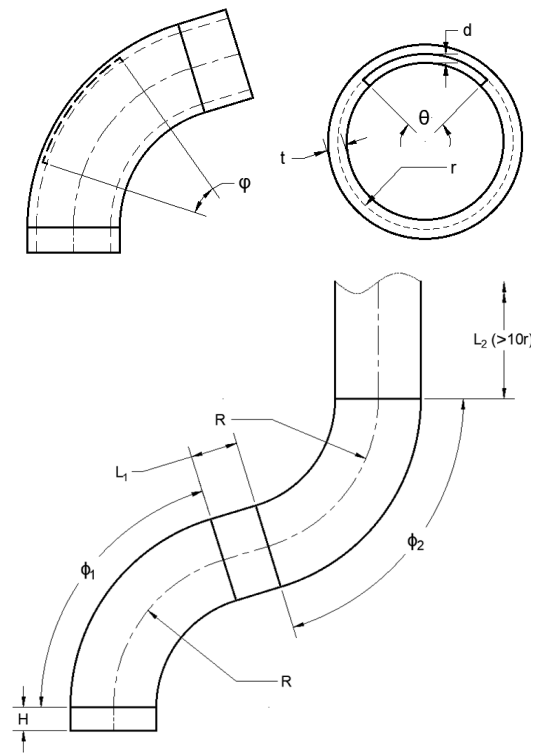


Fig. 4 Schematic illustration of feeder pipe

크지 않으므로 기하학적 선형으로 가정하였으며, Abaqus에서 지원하는 수정 RIKS(Modified RIKS) 방법<sup>(14)</sup>을 채택하여 비압축성 거동에 기인한 수렴 문제를 해결하였다.

### 3. 파열압력 예측식 제시

#### 3.1 유한요소해석 결과

다양한 사각 감육 형상( $d/t$ ,  $\theta/\pi$ ,  $\varphi/\phi$ )을 갖는 공급자관에 대해 총 35개의 해석을 수행하였다. 감육 형상에 따른 영향을 정량화하기 위하여 유한요소해석으로 도출된 사각 감육 형상별 공급자관의 파열압력( $P_L$ )을 감육이 존재하지 않는 정상 공급자관의 파열압력( $P_0$ )으로 무차원화 하여 Fig. 6에 나타내었다. 감육이 존재하지 않는 정상 공급자관의 파열압력( $P_0$ )은 식 (1)<sup>(7)</sup>을 사용하여 구하였다.

$$P_0 = \left\{ \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{t}{r} \right) \left( \frac{1 - (r/R)}{1 - (r/2R)} \right) \right\} \quad (1)$$

감육이 발생한 공급자관의 감육 깊이( $d/t$ )가 증가할수록 무차원 파열압력( $P_L/P_0$ )이 선형으로 감소하는 것이 확인되었다. 이에 대한 원인은 유동가속부식으로 인해 공급자관의 잔여 두께가 비례적으로 감소함에 따라 내압으로 발생하는 원주방향 응력을 지지하는 실 단면적이 선형적으로 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 공급자관의 공칭 두께 대비 감육 깊이( $d/t$ )가 80% 이상 증가할 경우, 약 10 MPa 부근에서도 파열이 발생할 가능성이 높은 것으로 확인되었다.

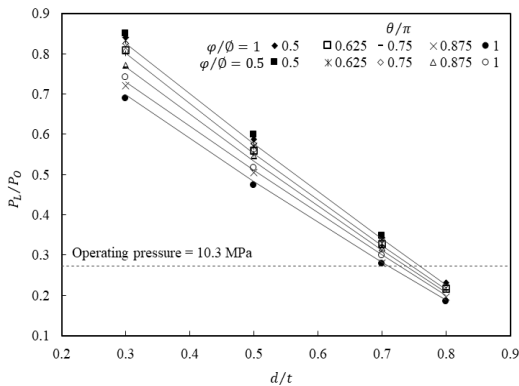


Fig. 6 FEA result(Overall)

Fig. 7(a) 및 7(b)는 감육 크기(축 방향 길이:  $\varphi/\phi$ , 원주 방향 길이:  $\theta/\pi$ )에 따른 공급자관의 무차원 파열압력을 보여준다. 원주 방향 감육 길이( $\theta/\pi$ )가 0.5 이하인 경우 축 방향 감육 길이( $\varphi/\phi$ ) 변화에 따른 파열압력 영향이 최대 1% 이내로 확인되었다. 반면, 곡관 내부에 원주 방향으로 전반적인 두께 감육이 발생한 경우( $\theta/\pi=1.0$ ), 축 방향 감육 길이에 따른 파열압력 차이가 최대 18% 발생하는 것으로 확인되었다. 또한, 유동가속부식으로 인한 두께 감소량( $d/t$ )이 증가할수록, 상대적으로 축 방향 및 원주 방향 감육 길이에 따른 영향 보다는 두께 감소량에 의한 영향이 커지는 것으로 확인되었다. 이를 토대로 감육 형상 변수가 파열압력에 미치는 영향은 공급자관 감육 깊이가 공칭 두께 대비 30%에 도달하기 전( $d/t < 0.3$ )까지는 감육의 축 방향 및 원주 방향 길이에 따른 영향이 지배적이며, 감육이 공칭 두께 대비 30% 이상 진행되는 경우( $d/t \geq 0.3$ )에는 감육 깊이에 따른 영향이 지배적임을 확인할 수 있다.

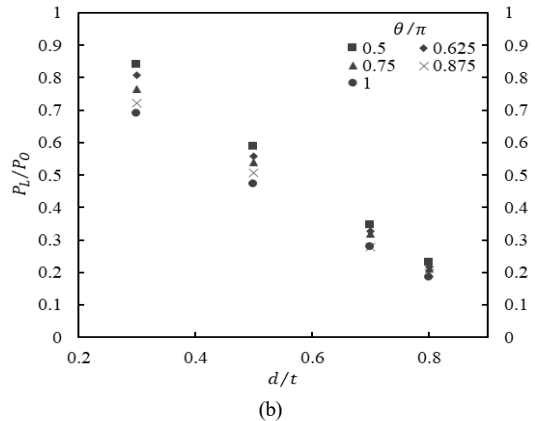
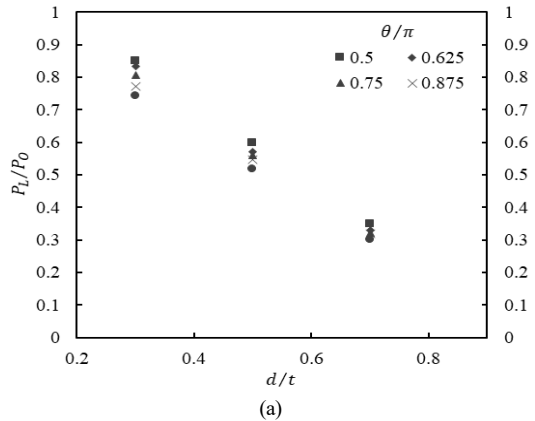


Fig. 7 FEA result (a)  $\varphi/\phi=0.5$  (b)  $\varphi/\phi=1$

### 3.2 파열압력 예측식

3.1절에서 도출된 결과를 바탕으로 공급자관의 감육이 공칭 두께 대비 30% 이상( $d/t \geq 0.3$ ) 발생한 경우 적용 가능한 파열압력 예측식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

예측식은 감육이 존재하지 않는 정상 공급자관의 파열압력 예측식( $P_0$ )과 파열압력에 지배적인 영향을 미치는 무차원 감육 깊이( $d/t$ ) 및 원주 방향 감육 길이( $\theta/\pi$ )에 대한 함수로 나타내었다.

$$P_L = f\left(P_0, \frac{d}{t}, \frac{\theta}{\pi}\right) = P_0 \times \left\{ A\left(\frac{d}{t}\right)^2 + B\left(\frac{d}{t}\right) + C \right\} \quad (2)$$

여기서,

$$A = 12.954\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 - 29.346\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 + 21.455\left(\frac{\theta}{\pi}\right) - 4.8714$$

$$B = -15.923\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 + 36.191\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 - 26.177\left(\frac{\theta}{\pi}\right) + 4.6781$$

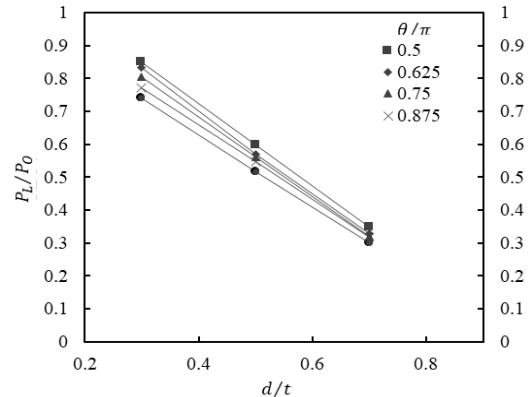
$$C = 4.2325\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^3 - 9.6937\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 + 6.7964\left(\frac{\theta}{\pi}\right) - 0.2848$$

본 논문에서 수행한 35개의 해석 결과와 식 (2)에 따른 파열압력 계산 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 비교 결과 평균 2.8%의 오차를 보여 제시한 예측식은 해석 결과를 잘 나타내는 것을 확인하였다.

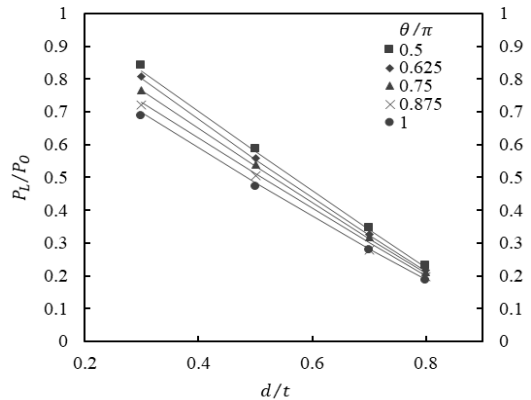
### 3.3 안전 여유도 비교

본 논문에서 제시한 파열압력 예측식을 사용하여 특정 공급자관에 대한 안전 여유도를 평가하고, 현재 중수로 공급자관의 관리 기준으로 사용되는 최소요구두께 기준 평가 방법<sup>(15)</sup>으로 계산된 안전 여유도와 비교하였다.

평가를 위해 고려된 특정 공급자관의 조건은 2.5인치 배관에 공칭두께 대비 29.67%의 사각 감육이 발생한 것으로 가정하였다. 참고로 2.5인치 공급자관의 공칭두께는 7.010 mm이며, 감육 깊이는 2.08 mm이다. 또한, 굽힘반경 대 평균반경( $R/r$ )은 2.5인 경우를 가정하였으며, 원주 방향 감육은 최소한 1차 곡관 외호부 9개 측정 지점을 포함하는 길이만큼 발생한 것으로 가정하였다. 곡관 외호부 중심에 측정 중심점이 위치하고 원주 방향으로 3개의 측정 지점이 위치하며, 각 측정 지점은 15 mm씩 거리를 두고 있으므로 계산된 원주 방향 최소 감육 길이 ( $(\theta/\pi)_{\min}$ )는 0.26이나 보수적으로 0.3으로 가정하였다.



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison of burst pressure for FEA and calculation result (a)  $\varphi/\phi=0.5$  (b)  $\varphi/\phi=1$

또한, 측정 위치를 벗어난 구간에서도 동일 두께 감육이 발생할 수 있으므로 원주 방향으로 외호부 전체에 감육이 발생한 경우( $\theta/\pi=1$ )의 안전 여유도를 함께 고려하였다. 참고로 최소요구두께 기준에 따른 2.5인치 공급자관의 최소요구두께는 3.920 mm로 계산되었다.

Fig. 9는 2.08 mm의 감육 깊이에 대한 평가 결과에 더해 두께가 0.1 mm씩 점점 감소하여 감육 깊이가 최대 2.38 mm까지 증가한 경우에 대해 기존 건전성 평가 방법에 따른 안전 여유도와 식 (1)에 따라 계산된 파열압력에 대한 안전 여유도를 비교하였다. 참고로 파열압력에 대한 안전 여유도는 출구 측 공급자관의 정상 운전압력인 10.3 MPa를 기준으로 하였다. 공칭두께 대비 감육 깊이가 2.08mm까지 누적된 경우, 현행 건전성 평가 기준인 최소요구두께 방법으로 평가된 안전여유도는 약 25.45%로 평가

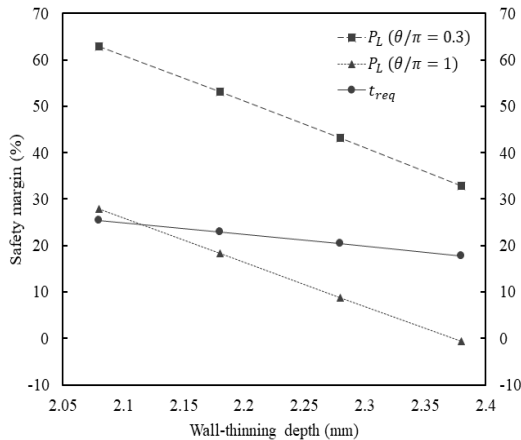


Fig. 9 Comparison of safety margin

되었다. 반면, 1차 곡관 외호부 검사 부위에 대한 감육 형상( $\theta/\pi=0.3$ )을 고려하여 계산한 파열압력의 운전압력 대비 안전 여유도는 약 62%로 평가되었다. 이를 통해 초음파 두께 검사를 통해 확인된 감육 형상을 기준으로 건전성 평가를 수행할 경우, 기존 두께 기준 건전성 평가 방법의 과도한 보수성을 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 초음파 두께 검사를 통해 확인되지 않은 1차 곡관부 내부에 2.08mm의 두께 감육이 동일하게 발생한 것으로 가정 한 경우( $\theta/\pi=1.0$ ), 파열압력 기준 안전 여유도와 최소요구두께 기준 안전 여유도의 차이가 미미함이 확인되었다. 한편, 감육 깊이가 2.1mm 이상 진행된 경우에는 파열압력 기반 건전성 평가 결과가 기존 건전성 평가 방법 대비 보수적인 평가 결과를 제시함을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 중수로 공급자관의 이중 곡관 형상 및 감육 형상 등을 고려한 체계적인 3차원 유한요소해석을 수행하여 감육이 발생한 공급자관의 파열압력을 제시하였다.

공급자관의 감육 깊이( $d/t$ )가 증가함에 따라 파열압력은 선형적으로 감소됨을 확인하였다. 또한 감육 형상 변수가 파열압력에 미치는 영향은 공급자관 감육 깊이가 공칭 두께 대비 30%에 도달하기 전 ( $d/t < 0.3$ )까지는 축 방향 및 원주 방향 감육 길이에 따른 영향이 지배적이며, 감육이 공칭 두께 대비 30% 이상 진행되는 경우( $d/t \geq 0.3$ )에는 감육깊이

에 따른 영향이 지배적임을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 파열압력 예측식은 공칭두께 대비 감육 깊이가 0.3보다 큰 경우( $d/t \geq 0.3$ ) 적용 가능하며, 유한요소해석 결과와 오차가 평균 2.8%의 이내로 확인됨에 따라 기존 연구에서 제안한 예측식 대비 감육이 발생한 공급자관의 파열압력을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서 제시한 파열압력 예측식을 통해 건전성 평가를 수행할 경우, 감육 깊이가 증가할수록 현장에서 적용 중인 두께 기준 평가 방법보다 보수적인 결과를 제시함을 확인하였다. 따라서 공급자관의 건전성 평가를 위해서는 현재 국내 중수로 공급자관에 적용 중인 두께 기준 평가 방법보다 파열압력에 따른 평가 방법이 적합할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) Shin. H. S., Hong. J. K., Kim. J. S., Chung. Y. K., Jhung. M. J., Chung. H. D., and Choi. Y. H., 2011, "Development of Regulation on the Integrated Material Aging Management for Nuclear Facilities," *Trans. of the KPVP*, Vol. 7, No. 4, pp. 12-18. doi:https://doi.org/10.20466/KPVP.2011.7.4.012
- (2) Chung. H. S., 2010, "A review of CANDU feeder wall thinning," *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 42, No. 5, pp. 568-575. doi:https://doi.org/10.5516/NET.2010.42.5.568
- (3) Lee. S. H., Lee. Y. S., Kim. H. D., Lee. K. S., and Hwang. K. M., 2015, "Review on the Integrity Evaluation and Maintenance of Wall-Thinned Pipe," *Trans. of the KPVP*, Vol. 11, No. 2, pp. 51-60. doi:https://doi.org/10.20466/KPVP.2015.11.2.051
- (4) KINS, 2005, "Development of inspection procedure for carbon steel pipe wall-thinning management program," Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, *KINS/RR-350*.
- (5) Kim. J. W., Park. C. Y., and Kim. T. S., 2003, "Effect of Internal Wall Thinning Defect on the Burst Pressure of Elbow," *Spring meeting of the KNS*, Gyeongju, May 29-30.
- (6) Kim. Y. J., and Oh. C. S., 2006, "Closed-form plastic collapse loads of pipe bends under combined pressure and in-plane bending," *Eng.*

- Fract. Mech.*, Vol. 73, Issue 11, pp. 1437-1454. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.02.001>
- (7) An. J. H., Kim. J. H., Hong. S. P., Park. C. Y., and Kim. Y. J., 2007, "Plastic Limit Loads of 90° Elbows with Local Wall Thinning using Small Strain FE Limit Analyses (I)-Internal Pressure," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 31, No. 5, pp. 586-593. doi:<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2007.31.5.586>
- (8) Kim. J. H., An. J. H., Hong. S. P., Park. C. Y., and Kim. Y. J., 2007, "Plastic Limit Loads of 90° Elbows with Local Wall-Thinning Using Small Strain FE Limit Analyses (II)-Bending Moment," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 31, No. 4, pp. 496-505. doi:<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2007.31.4.496>
- (9) Bae. K. D., Je. J. H., Kim. J. S., and Kim. Y. J., 2012, "Limit loads for circular wall-Thinned feeder pipes considering bend angle," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 36, No. 3, pp. 313-318. doi:<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.3.313>
- (10) KAERI, 2002, "Diagnostic technology for degradation of feeder pipes and fuel channels in CANDU reactor," Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, *KAERI/RR-2226/2001*
- (11) Kim. Y. J., Kim. N. H., Oh. C. Y., and Oh. C. S., 2008, "A method to estimate plastic loads for elbows with non-uniform thicknesses," *Fatigue Fract. Eng. M.*, Vol. 31, Issue 9, pp. 822-837. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01268.x>
- (12) Michael. T. C., Veerappan. A. R., and Shanmugam. S., 2012, "Effect of ovality and variable wall thickness on collapse loads in pipe bends subjected to in-plane bending closing moment," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 79, pp. 138-148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.10.009>
- (13) KINS, 2021, *Internal communication*.
- (14) Dassault Systemes, 2020, "Abaqus Analysis User's Guide Ver. 2020", Vélizy-Villacoublay.
- (15) ASME B&PVC Sec.III, Subsection NB, NB-3641.1, 2009, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," American Society of Mechanical Engineers, NY.