

지르코늄 합금 관의 임계좌굴 압력 산정을 위한 최소안전율[§]

김형규^{*†} · 김재용^{*} · 윤경호^{*} · 이영호^{*} · 이강희^{*} · 강흥석^{*}

* 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부

Minimum Safety Factor for Evaluation of Critical Buckling Pressure of Zirconium Alloy Tube

Hyung-Kyu Kim ^{*†}, Jae-Yong Kim ^{*}, Kyung-Ho Yoon ^{*}, Young-Ho Lee ^{*}, Kang-Hee Lee ^{*} and Heung-Seok Kang ^{*}

* LWR Fuel Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received December 10, 2010 ; Revised January 5, 2011 ; Accepted January 5, 2011)

Key Words : Elastic Buckling(탄성좌굴), Zirconium Alloy Tube(지르코늄 합금 관), Critical Buckling Pressure(임계좌굴 압력), Minimum Safety Factor(최소안전율)

초록: 얇은 관 탄성좌굴 공식의 불확실성을 고려하기 위해, 공식을 구성하는 파라미터인 튜브재료의 탄성계수, 푸아송 비, 튜브 두께 및 지름의 불확실성을 분석하였다. 본 연구는 원자로에서 연소되는 핵연료봉과 같이 사용 중 함몰을 엄격히 방지하고 있는 얇은 관의 설계신뢰도를 향상시키는 데에 중요하다. 분석 방법은 각각의 파라미터가 변화할 수 있는 범위를 충분히 포함할 수 있는 최소의 탄성좌굴 안전율을 구하고 이를 선형적으로 합하여 최종의 최소안전율을 구하였다. 최소 안전율에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터는 관의 두께로 나타났다. 두께가 얇을수록 더 큰 최소안전율이 필요하며 예로 적용한 지르코늄 합금관의 경우, 두께가 0.254 와 0.87 mm 일 때 최소안전율은 각각 1.547 과 3.487 로 나타났다.

Abstract: We consider the uncertainty in the elastic buckling formula for a thin tube. We take into account the measurement uncertainty of Young's modulus and Poisson's ratio and the tolerance of the tube thickness and diameter. Elastic buckling must be prohibited for a thin tube such as a nuclear fuel rod that must satisfy a self-stand criterion. Since the predicted critical buckling pressure overestimated that found in the experiment, the determination of the minimum safety factor is crucial. The uncertainty in each parameter (i.e., Young's modulus, Poisson's ratio, thickness, and diameter) is mutually independent, so the safety factor is evaluated as the sum of the inverse of each uncertainty. We found that the thickness variation greatly affects the uncertainty. The minimum safety factor of a thin tube of Zirconium alloy is evaluated as 1.547 for a thickness of 0.87 mm and 3.487 for a thickness of 0.254 mm.

- 기호설명 -

E	: 탄성계수
E_s	: 시칸트 계수
E_t	: 탄젠트 계수
P_{cr}	: 임계 좌굴압력
P_{cr}^{nom}	: 공칭 두께/지름일 때의 임계 좌굴압력
r	: 관의 중립면까지의 반지름
r_{max}	: 관의 중립면까지의 반지름 최대값
S	: 안전율 또는 최소 안전율

t	: 관 두께
t_{min}	: 최소 관 두께
u_r	: 반경방향 변위
u_θ	: 원주방향 변위
Π	: 포텐셜 에너지
β	: 원주방향 변위의 최대값
δ	: 반경방향 변위의 최대값
ν	: 푸아송 비

1. 서론

두께가 얇은 관의 탄성좌굴이란 관 외부의 압력이 내부의 압력보다 큰 경우, 순간적으로 관 내부로의 함몰이 발생하는 변형거동을 말한다. 관 내 유동

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, hkim1@kaeri.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

또는 관 외부로의 열전달 등의 기능을 수행하는 얇은 관의 경우 탄성좌굴에 의해 기능을 상실하게 되므로 탄성좌굴은 근본적으로 방지하여야 하는 변형거동이다. 탄성좌굴 방지를 고려하여야 하는 중요한 예로서 경수로형 원자력발전소의 핵연료봉을 들 수 있다.

경수로형 원자력발전소의 핵연료봉은 지름 약 10 mm, 두께 약 0.6 mm의 지르코늄 합금으로 된 얇은 관(피복관) 내부에 지름 약 8 mm의 원통형 우라늄 소결체와 이를 지지하는 코일 스프링이 장입되어 있으며 전체 길이는 약 4 m에 달하는 세장비가 매우 큰 구조물이다. 중성자에 의해 우라늄 소결체가 발열하면 이를 핵연료봉 외부로 흐르는 원자로 냉각수에 전달하게 된다. 이때 소결체와 피복관 사이에는 수십 μm 의 틈새가 존재하도록 설계되어 있어 이를 위해 피복관이 내부로 함몰하는 것을 방지하여야 한다.

얇은 관의 탄성좌굴을 발생시키는 임계 좌굴압력을 구하기 위해서 설계공식을 사용한다. 제 2절에서 상세히 분석할 이 공식은 관 재료의 탄성계수와 푸아송 비, 그리고 관의 지름과 두께 등 총 4개의 변수로 구성되어 있다. 그런데 이들 변수 각각에는 불확실성이 존재하므로 이에 따라 계산되는 임계 좌굴압력의 값에도 불확실성이 존재한다. 따라서 설계자는 공식에 의한 결과로부터 적절한 안전율을 적용하여 탄성좌굴 방지를 위한 기준 값으로 사용하고 있다.

공학에서 안전율이란 해석 또는 실험으로부터 구한 결과를 실제에 적용할 때 해석 및 실험에 포함된 각종 불확실성을 고려하여 부여하는 값이다. 이때의 불확실성은 설계 대상물의 치수공차, 표면처리를 포함하는 기계가공 방법, 재료의 기계적 성질 등과 같은 물성치의 변화, 고온고압 또는 방사능 조사 등과 같은 환경에 의한 변수의 변화, 측정 불확도 등 매우 다양한 요인에 기인한다.

따라서 설계자는 안전성을 고려하여 가능한 큰 안전율을 적용하고자 하는 경향이 있다. 그러나 큰 안전율은 이를 만족하기 위한 비용의 증대를 가져오므로 공학에서 안전성 못지 않게 경제성 관점에서 적절치 못한 설계가 될 수 있다. 또한 많은 경우, 어떤 특정 기기, 부품 및 구조물의 설계 시 기존에 적용하고 있는 안전율에는 경험치가 내포되어 있는 경우도 많아 그 근거도 명백히 알지 못하는 상태에서 적용하는 경우도 있을 수 있다.

일례로 본 연구에서 다루고 있는 얇은 관의 탄성좌굴 현상을 실험적으로 확인하고자 할 때, 관 외부의 실험 압력을 결정하기 위해서는 앞서

열거한 불확실성이 매우 중요한 문제가 된다. 특히 실험결과를 이용하여 안전율을 결정하고자 할 때에 이 불확실성은 더욱 큰 어려움을 갖고 온다. 그럼에도 불구하고 중성자 경제성 및 열전달 성능을 위해 두께가 얇을수록 유리한 핵연료봉에 탄성좌굴이 발생하지 않도록 하는 안전한 설계가 수행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 기존의 임계 탄성좌굴압력 설계공식을 구성하는 각 변수의 불확실성을 분석하여 최소 안전율을 제시하고자 하였다.

2. 탄성좌굴 공식의 이론적 배경

얇은 관의 탄성좌굴 공식은 Griffin,⁽¹⁾ Morgan⁽²⁾ 및 Timoshenko 와 Gere⁽³⁾ 등이 유도하였다. 본 논문에는 이를 요약하여 기술한다. 우선 단면이 진원인 두께, t 중립면까지의 반지름, r 의 얇은 관이 외압, p 에 의해 좌굴될 때 Fig. 1과 같이 x 축에 대칭인 형태의 타원형으로 변형된다고 생각한다. 이때 반경방향 및 원주방향의 변위(각각 u_r , u_θ)는 다음과 같다.

$$u_r = \delta \cos 2\theta, \quad u_\theta = \beta \sin 2\theta \quad (1)$$

여기서, δ 및 β 는 각각 $\theta = n\pi/2$ 와 $(\pi/4 + n\pi/2)$ (n 은 정수)에서 나타나는 반경 및 원주방향의 최대변위 절대 값이다.

변형을 위한 포텐셜에너지, Π 는 다음과 같다.

$$\Pi = \frac{\pi}{2} \left[A \left\{ \frac{B}{r} (2\beta + \delta)^2 + 9 \frac{C}{r^3} \delta^2 \right\} - 3p\delta^2 \right] \quad (2)$$

식 (2)에서

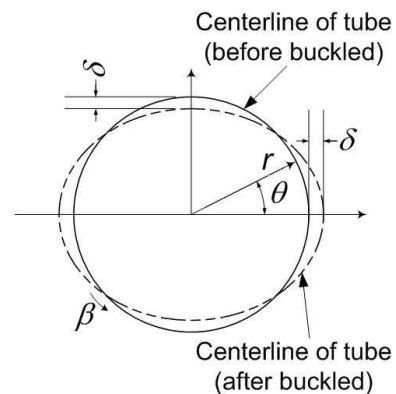


Fig. 1 Centerlines of tube cross section before and after elastic buckling

$$A = 1 - \frac{(1 - E_t/E_s)}{1 + (1 - 4\mu^2)E_t/(3E_s)}, \quad (3)$$

$$B = \frac{E_s t}{(1 - \mu^2)}, \quad C = \frac{E_s t^3}{12(1 - \mu^2)}$$

이며 또한 $\mu = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu\right) \frac{E_s}{E}$ 로서 E_s, E_t, E, ν 는 각각 Secant modulus, Tangent modulus, Young's modulus 및 Poisson ratio를 표기한 것이다. 이들에 대한 정의는 ASTM Standard E 111-04⁽⁴⁾ 및 E 6-08⁽⁵⁾을 참조할 수 있다.

식 (2)를 이용하여 최소 포텐셜에너지 정리를 사용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\beta = -\frac{\delta}{2}, \quad p = \frac{AE_s}{4(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{r}\right)^3. \quad (4)$$

식 (4)를 선형탄성 구간에서 정의하면 $E_s = E$ 이므로 $A = 1, \mu = \nu$ 가 되어 다음과 같은 임계 탄성좌굴압력, P_{cr} 을 구할 수 있으며 이것이 일반적으로 사용하는 얇은 관의 탄성좌굴 공식이다.

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{r}\right)^3. \quad (5)$$

한편, 식 (5)에 보수성을 부여하기 위해 두께의 최솟값과 반경의 최댓값을 사용한 다음 식도 많이 사용하고 있다.

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_{\min}}{r_{\max}}\right)^3. \quad (6)$$

3. 실험적 평가

3.1 탄성좌굴 실험

식 (5) 또는 (6)의 적용성을 검토하기 위해 탄성좌굴 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 관은 Zircaloy-4 재질로서 중수로형 원자력발전소의 핵연료봉 제조에 사용되는 것이다. 중수로 핵연료는 경수로 핵연료와 달리 원자로에 장입되어 연소를 시작할 때 원자로 내의 압력에 의해 탄성좌굴이 발생하도록 하여 원자로 냉각수의 열전달 효율을 높이도록 설계되어 있어 탄성좌굴 실험에 사용하기에 적절하다.

시방서에 의하면 실험에 사용한 관의 최소 두께

는 0.38 mm이며 최대 지름은 13.12 mm이었다. 재료상수로서 MATPRO⁽⁶⁾를 참조하면 350°C에서의 Zircaloy-4의 탄성계수는 77.4733 GPa, 푸아송 비는 0.3이다. 이로부터 식 (6)을 이용한 임계 좌굴압력은 4.518 MPa이므로 시편 관의 외부에서 작용하는 압력의 범위를 2~10 MPa로 하여 실험하였다. 마개를 제작하여 시편 관의 양단부와 용접에 의해 밀봉하였으며 이때 관 내부의 압력이 0.21 MPa가 되도록 하였다.

실험방법은 양단이 밀봉된 200 mm의 시편 관을 오토클레이브에 장입한 후 온도를 350°C까지 상승시켰으며 이때 여러 종류의 실험압력을 가하기 위해 온도를 올리기 전 오토클레이브 내에 이미 계산된 양의 물을 채웠다. 오토클레이브 내의 온도가 350°C가 되었을 때 압력을 측정하였으며 여기에서 관 내부의 초기 압력(0.21 MPa)을 빼준 값을 실험압력으로 하였다. 실험압력에서 한 시간 지속한 후 공기 중에서 냉각시켜 시편을 인출하였다. 한편 하나의 실험압력에 대해 1~3개의 시편을 동시에 오토클레이브 내에 장입하여 그 중 하나에서라도 함몰이 발생할 경우 실험압력이 임계좌굴압력이 초과한 것으로 판단하였다.

Fig. 2에는 실험압력 3.893 MPa에서 시편 관 3개 중 하나가 함몰(즉 탄성좌굴)된 상태를 특징적으로 보여 주고 있으며 Table 1에는 각 실험압력에서의 함몰 여부를 나타내었다. Table 1에 의해 임계 좌굴압력은 3.824 MPa로 평가하였다. 물론 3.824 MPa와 3.893 MPa 사이에서 실험압력을 좀더 세분화할 경우 최종적인 임계 좌굴압력이

Table 1 Result of elastic buckling experiment

Pressure difference (MPa)	Specimen loaded	Number of collapsed tubes
4.065	1	1
3.961	3	2
3.927	1	0
3.893	3	1
3.824	3	0
3.513	1	0
2.272	1	0



Fig. 2 Typical view of collapsed and non-collapsed tube specimen (at pressure difference of 3.893 MPa)

Table 2 Different critical buckling pressure corresponding to the elastic properties

E (MPa)	ν	P_{cr} (MPa)	Temp.(°C)	Ref.
73200	0.30	4.269	400	(7)
70140	0.25	3.971	350	(8)
99300	0.37	6.106	RT	(9)

3.824 MPa 보다 큰 값일 가능성이 있다. 그러나 본 연구에서는 보수성을 부여하여 3.824 MPa 를 임계 좌굴압력으로 결정하였다.

3.2 실험결과 분석 및 토의

식 (6)에 의해 계산된 임계 좌굴압력 4.518 MPa 은 실험에서 평가한 3.824 MPa 에 비해 18% 이상 큰 값이다. 이것은 임계 좌굴압력 공식(식 (5) 또는 (6))이 임계 좌굴압력의 크기를 실제보다 과대평가하여 비보수적일 수 있다는 것으로서, 설계에 사용할 경우 이러한 비보수성을 필히 고려하여야 할 필요가 있음을 의미한다.

이러한 비보수성의 원인을 분석하기 위해 임계 좌굴압력 공식에서 탄성계수와 푸아송 비 값의 변화에 따른 임계 좌굴압력의 변화를 살펴보았다. 식 (5)에서 알 수 있듯이 임계 좌굴압력은 탄성계수와 선형비례관계에 있고, 일반적인 공학 재료의 푸아송 비로 0.25~0.40 을 취할 때 $1/(1-\nu^2)$ 항 역시, 임계 좌굴압력과 거의 선형비례의 관계가 있으므로 이들 값의 정확성은 임계 좌굴압력에 큰 영향을 미치게 된다.

예로서, 실험에서 사용한 Zircaloy-4 의 경우, 탄성계수 및 푸아송 비는 참조문헌 또는 재료의 특성시험에 따라 달라 질 수 있으며, 이로부터 임계 좌굴압력이 서로 다른 값으로 계산되므로 앞서 언급한 보수성을 명백히 판단할 수 없는 문제가 발생한다. Table 2 에 서로다른 재료상수를 보여준다.

Table 2 에서 온도에 해당하는 열은 해당 물성치를 측정할 온도를 나타낸다. 마지막 행에서 나타낸 MatWeb⁽⁹⁾을 이용한 결과는 기본적으로 상온에서의 물성치만을 제공하고 있으므로 고온에서의 값을 적용할 수 없었다. 특히 탄성계수는 고온에서의 값이 상온에 비해 현저히 감소하므로 설계하는 관 구조물의 탄성좌굴이 발생하는 온도를 엄밀히 고려하여야 함을 알 수 있다. 예를 들어 식 (5)를 적용함에 있어 물성치에 대한 정보의 부재로 일반적인 MatWeb 에서의 값을 사용할 경우 실험결과에 비해 약 60%정도 과대평가하게 되어 매우 비보수적인 결과를 얻게 된다.

그럼에도 불구하고 실제 얇은 관의 탄성계수와 푸아송 비를 고온에서 측정할 때 오차가 발생할 것을 쉽게 예측할 수 있으므로 임계 좌굴압력을 공식 (5)에 의해 평가할 때에는 재료의 물성치를 사용할 때 많은 주의가 필요하다. Table 2 에 의하면, Combustion Engineering 사에서 제시한 물성치⁽⁸⁾를 사용할 때 실험결과에 가장 근사한 임계 좌굴압력을 구할 수 있었다. 이는 본 연구의 실험온도와 같은 조건에서의 탄성계수와 푸아송 비가 사용되었기 때문으로 판단된다.

물성치의 변화에 따른 임계 좌굴압력 변화에 대하여 식 (5)를 구성하는 변수 중 치수와 관련된 두께 및 반경에 대해서도 공차를 포함하는 데에 따른 임계 좌굴압력의 변화가 발생하게 된다. 특히 임계 좌굴압력이 두께에 대한 반경의 비(t/r)의 3 승에 비례하고 있으므로 각각의 공차에 따른 영향이 매우 클 것으로 쉽게 예상할 수 있다.

이로부터 외압을 받는 얇은 관의 탄성좌굴 현상을 방지하기 위해 식 (5)의 공식을 이용할 때 설계자는 앞서 언급한 물성치와 치수에 관련한 불확실성을 분석하여 이를 반영한 안전율을 결정하여야 한다. 이에 따라 다음 절에서는 탄성좌굴 공식의 불확실성을 평가하였으며 그 결과에 따른 최소 안전율에 대해 고찰하였다.

4. 탄성좌굴 공식의 불확실성 분석

4.1 물성치 관련 변수의 불확실성

3 절에서 탄성계수 및 푸아송 비의 변화가 임계 좌굴압력에 미치는 영향을 살펴 본 결과 이들 물성치를 실제 조건으로 측정하는 것이 결과의 불확실성을 줄이는 데에 매우 중요하다는 것을 알았다. 앞서 언급한 것과 같이 온도에 따른 탄성계수의 변화가 매우 크므로 실제 탄성계수를 측정할 때에 이를 필히 고려해야 한다. 그러나 여기서는 실험에서 온도의 제어가 잘되었다고 가정하고 기본적인 측정오차만을 고려함으로써 최소의 불확실성을 고찰하였다.

측정결과에 대한 신뢰도를 판단할 수 있는 지표로 근래에는 국제 표준화된 불확도 개념이 도입되어 국제적으로 표준화되어 있다.⁽¹⁰⁾ 탄성계수를 포함한 재료의 인장물성 측정결과에 대한 불확도 평가의 표준지침은 현재 개발 중에 있으며 최근 SUS316LN 재료에 대한 탄성계수, 항복강도 및 인장강도에 대한 상온 실험을 수행한 후 측정불확도가 발표되었다.⁽¹¹⁾ 본 논문에서는 탄성계수에 대한 불확실성을 상기 문헌⁽¹¹⁾의 결과로부터 도입하였

다.

측정불확도를 평가하기 위해서는 측정 시의 모든 입력량 각각에 대한 표준불확도를 계산하고 이로부터 측정량의 추정 값에 대한 표준편차 개념으로서의 합성표준불확도를 계산한 후 이에 포함인자를 곱하여 확장불확도를 계산한다. 이 확장불확도가 측정 값에 대한 최종 불확도이다. 상기 문헌에서 ASTM E8M 을 따른 표준인장시험을 수행한 후 SUS316LN 의 탄성계수는 200.6 GPa 로 측정되었고 확장불확도는 ± 3.314 GPa 로 계산되었음을 발표하였다.⁽¹¹⁾ 이를 백분율로 표시하면 $\pm 1.66\%$ 가 된다.

따라서, 실험에 의해 탄성계수 값을 구하였을 때 실제로는 그 값의 98.34%까지 작을 수 있다는 것을 의미하며 임계 좌굴압력 역시 실험결과의 탄성계수를 식 (5)에 대입하여 얻은 결과에 비해 98.34%까지 작아질 수 있음을 알 수 있다.

상기 문헌⁽¹¹⁾에서 푸아송 비에 대한 측정 결과의 불확도는 발표되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 Table 2 에 나타난 푸아송 비의 범위 전체에 대해 고려하였다. 이를 위해 $0.25 \leq \nu \leq 0.37$ 의 범위에서 재 계산하였으며 $\nu = 0.25$ 과 0.37 에서의 $1/(1-\nu^2)$ 값 차이가 8.6%로 계산되었다. 이것은 푸아송 비를 $0.25 \leq \nu \leq 0.37$ 의 범위에서 어떤 값을 사용하더라도 임계 좌굴압력의 변화는 최대 8.6% 이내가 된다는 것을 의미한다. 이로부터 본 논문에서는 푸아송 비에 의한 임계 좌굴압력의 불확실정도를 8.6%로 결정하였다.

4.2 치수 관련 변수의 불확실성

식 (5)에 의해 임계 좌굴압력에 영향을 미치는 치수는 두께와 반경으로서 이들의 불확실성은 얇은 관의 제조 공차에 기인한다. 제조공차는 얇은 관의 사용목적에 따라 설계자가 부여하게 되는데 핵연료봉의 경우에는 최소 두께와 관의 바깥 및 안지름 각각의 치수와 공차를 규제하고 있다.

한편 ASTM 규격에 의하면 핵연료봉에 사용되는 지르코늄 합금 관(두께 0.25 ~ 0.89 mm, 외경 5.1 ~ 16.5 mm의 치수 범위)의 경우, 모든 관은 두께공차 ± 0.08 mm, 외경공차 ± 0.05 mm를 만족하도록 규정하고 있다.⁽¹²⁾ 또한 일반적으로 사용하는 오스테나이트 계열의 스테인레스강 관에 대해서는 외경이 0.5 ~ 1.5 인치(12.7 ~ 38.1 mm)인 경우(각 경계 값은 불포함) 두께공차 $\pm 10\%$, 외경공차 ± 0.005 인치(0.13 mm)를 만족하도록 규정하고 있다.⁽¹³⁾

이를 이용하여 두께공차에 의한 임계 좌굴압력의 변화는 ASTM 규격에 적용되는 외경의 범위에

서 공차를 고려한 최소 두께를 적용하여 일련의 계산을 수행하고, 다음 반경(또는 외경)공차에 의한 임계 좌굴압력의 변화는 ASTM 규격에 적용되는 두께의 범위에서 공차를 고려한 최대 반경(또는 외경)을 적용하여 일련의 계산을 수행함으로써 두께 및 반경(또는 외경) 각각에 대해 각각의 공차에 의한 임계 좌굴압력의 불확실성 범위를 구하였다.

이와 같은 과정으로 계산한 이유는 각각의 두께에 대해 공차를 고려한 외경의 범위와 역시 각각의 외경에 대해 공차를 고려한 두께의 범위가 서로 독립적이므로 서로 분리하여 고려하는 것이 타당하기 때문이다. 이러한 방법으로 핵연료봉에 사용되는 지르코늄 합금 관에 대해 두께 및 외경의 공차에 따른 임계 좌굴압력의 변화를 계산한 결과를 예로 들면 다음과 같다.

해당 ASTM 규격⁽¹²⁾이 적용되는 범위인 외경 5.1 ~ 16.5 mm에 대해 공칭두께 0.25 ~ 0.89 mm인 관의 최소 두께를 고려하여 공칭두께에서의 임계 좌굴압력과 최소 두께의 그것을 비교하여 각 공칭 두께에 대한 최소 두께에서의 임계 좌굴압력 비를 계산하였다. 다음, 두께 0.25 ~ 0.89 mm인 관의 공칭외경 5.1 ~ 16.5 mm에 대해 최대 외경을 고려하고 각각의 경우에 대한 임계 좌굴압력을 계산하여 그 비를 구하였다. 그 결과를 Fig. 3 과 4의 P_{cr}/P_{cr}^{nom} 부분에 나타내었다. 여기서 P_{cr}^{nom} 은 공칭 두께 혹은 외경일 때의 임계 좌굴압력을, 그리고 P_{cr} 은 최소 두께 혹은 최대 외경일 때의 임계 좌굴압력을 의미한다.

Fig. 3 으로부터 두께가 증가함에 따라 공칭 두께에 대한 최소 두께에서의 임계 좌굴압력 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 외경이 증가할수록 그 차이가 줄어드는 것으로 계산되었으나 Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 외경의 차이에 따른 변화는 거의 무

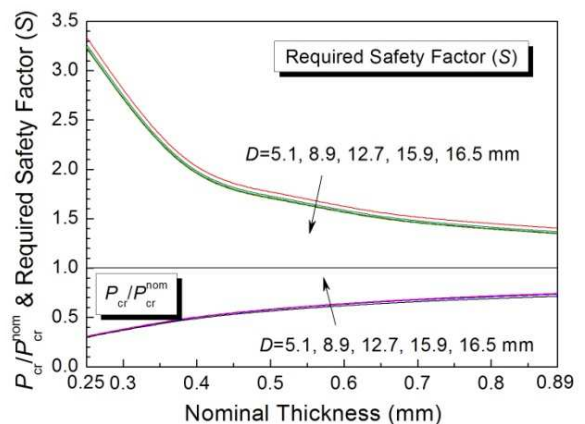


Fig. 3 Variation of critical buckling pressure and required safety factor corresponding to the cladding thickness

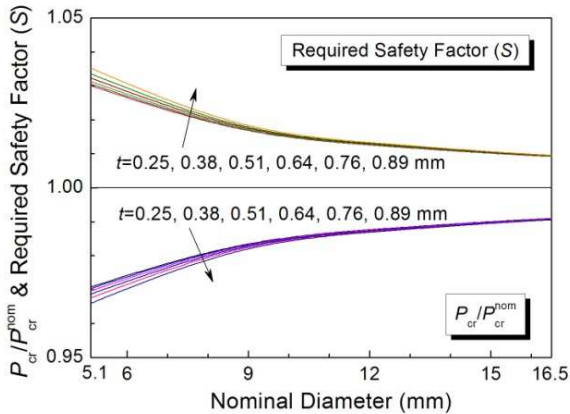


Fig. 4 Variation of critical buckling pressure and required safety factor corresponding to the cladding outer diameter

시할 수 있는 정도이다. 한편 Fig. 4에서는 외경이 증가할수록 두께의 변화에 따른 임계 좌굴압력의 비가 줄어드는 것을 알 수 있고 동일한 공칭 외경에서는 두께가 감소할수록 그 비가 줄어드는 것을 보여준다. 그러나 이때에도 공칭 외경이 약 9.5 mm 이상인 관에서는 두께에 따른 영향이 거의 나타나지 않는다.

5. 최소 안전율

4 절에서 분석한 탄성계수 및 푸아송 비의 불확실성에 의한 임계 좌굴압력의 불확실 정도와 두께 및 외경의 공차에 의한 임계 좌굴압력 비(즉, 최소 두께 또는 최대 외경에서의 임계 좌굴압력과 공칭 두께 또는 외경일 때의 임계 좌굴압력의 비)의 역수를 취함으로써 각 변수에 따른 임계 좌굴압력의 최소 안전율을 구할 수 있다. 그 이유는 각 변수의 범위 내에서 임계 좌굴압력이 가장 작게 계산되는 경우가 최소한의 비보수성 크기가 되기 때문이며, 이때 최소 안전율은 최소한 이 비보수성을 상쇄하여야 하는 정도가 되어야 하기 때문이다.

이에 따라 탄성계수의 측정불확도에 따른 최소 안전율은 1.017 이 되고, 푸아송 비에 대한 최소 안전율은 1.095 로 계산된다. 한편 두께와 외경의 공차에 따른 최소 안전율은 Fig. 3 및 4 의 “Required Safety Factor (S)” 부분에 나타내고 있다. Fig. 3 에서 두께가 0.25 mm 일 때 최소 안전율(즉, Required Safety Factor)은 공칭 지름에 따라 3.23 ~ 3.34 로 계산되었으며 적용 두께의 최댓값인 0.89 mm 일 때에 1.35 ~ 1.40 으로 나타났다. 한편 Fig. 4 에 나타낸 각각의 외경 공차에 따른 최소 안전율의 최댓값은 적용 범위의 최소 공칭지름인 5.1

mm 에서 최대 두께 0.89 mm 인 경우 1.035 로 계산되었다.

이러한 결과로부터 임계 좌굴압력의 불확실성 및 최소 안전율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 관의 두께인 것을 알 수 있다. 결과적으로, 지르코늄 합금 관의 탄성좌굴 압력을 설계할 때 4 절에서 기술한 물성치와 치수관련 불확실성을 전체적으로 고려하여 최소 안전율은 두께 0.25 mm 일 때 3.487 과 두께 0.89 mm 일 때의 1.547 사이의 값으로 관의 두께에 따라 Fig. 3 의 데이터를 활용하여 결정하면 될 것이다.

6. 결론

지르코늄 합금 재료의 얇은 관에 대한 탄성좌굴 압력 공식의 불확실성에 대해 분석하였다. 이를 위해 재료의 탄성계수에 대해서는 측정불확도를, 푸아송 비에 대해서는 일반적으로 적용하는 값의 범위를 고려하였으며 치수관련 불확실성에 대해서는 관의 공칭두께 및 지름의 공차를 고려하였다. 이로부터 각 변수에 대해 요구되는 최소 안전율에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탄성계수의 측정불확도에 따른 최소 안전율은 1.017, 일반적인 푸아송 비의 불확실성에 따른 최소 안전율은 1.095 로 나타났다.

(2) 탄성좌굴 압력 공식의 불확실성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 두께 공차이며 두께가 얇을수록 불확실성이 증가한다. 최소 안전율은 두께 0.25 mm 일 때 3.23 ~ 3.34, 두께 0.89 mm 일 때 1.35 ~ 1.40 로 나타났다.

(3) 탄성좌굴 압력 공식을 적용하여 지르코늄합금으로 된 얇은 관의 임계좌굴 압력을 결정할 때 최소 안전율은 1.547 ~ 3.487 사이의 값을 갖도록 하고 이 범위 내에서 관의 두께에 따라 결정할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Griffin, D.S., 1965, “Inelastic Buckling of Long Axially Compressed Curved Plates,” WAPD-TM-469.
- (2) Morgan, R., 1964, “Report on External Collapsing Pressure of ELK River Reactor Fuel Element Tubing,” ACNP 64-509.

- (3) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., 1961, *Theory of Elastic Stability*, Art. 7.2~7.7.
- (4) ASTM International, 2004, "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus," *ASTM STD E 111-04*.
- (5) ASTM International, 2004, "Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing," *ASTM STD E 6-08*.
- (6) Siefken, L.J. et al., 2001, *SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis*, NUREG/CR-6150.
- (7) *Fuel Design Report for 17×17 Fuel Assembly*, 1987, Kraftwerk Union AG.
- (8) *Fuel Rod Design Manual*, 1988, Combustion Engineering Inc..
- (9) <http://www.matweb.com>
- (10) *EURACHEM/CITAC Guide Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement* 2nd Edition, 2000, edited by S.L.R. Ellison et al.
- (11) Huh, Y.-H., Lee, H.M., Kim, D.J. and Park, J.S., "Estimation of Measurement Uncertainty in Evaluation of Tensile Properties," *Trans. Of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 1, pp. 73~78.
- (12) ASTM International, 2007, "Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding," *ASTM Standard B 811-02*.
- (13) ASTM International, 2010, "Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic stainless Steel Tubing for General Service," *ASTM Standard A 269-10*.