

튜브 배열에 따른 튜브/튜브시트 수압 확관 접합의 민감도 해석

김 동 영* · 김 태 완**

(1998년 8월 6일 접수)

Sensitivity Analysis on Hydraulic Expanded Tube-to-Tubesheet Joints for Tube Layout Patterns

Dong-Young Kim and Tae-Woan Kim

Key Words : Tube, Tubesheet, Tube Layout Patterns, Hydraulic Expansion, Contact Pressure, Residual Stress

Abstract

The basic requirements to improve the joints quality of tube-to-tubesheet for heat exchangers are to obtain high residual contact pressures between the tubes and the tubesheet as well as low residual stresses in the transition zone of the tubes. The residual contact pressures and residual stresses which govern the joint quality are influenced by parameters such as material properties, geometric dimension of tube and tubesheet and expansion pressures. There are two types of tube layout patterns, triangular and square, which are frequently used for heat exchangers. The purpose of the present work is to examine the superior tube layout patterns considering the joints quality by comparing numerical results from sensitivity analyses which were performed for both of tube layout patterns.

1. 서 론

산업의 여러 분야에서 이용되고 있는 열교환기의 튜브와 튜브시트 확관 접합에 주로 이용되는 방법은 크게 롤 확관 (Roll expansion), 수압 확관 (Hydraulic expansion), 폭발 확관 (Explosive expansion)으로 나눌 수 있다. 오랫동안 사용되어온 롤 확관은 물을 장착한 맨드릴을 튜브 내경에 밀착시키고 물을 회전시켜 튜브를 확관하는 방법으로 튜브/튜브시트간의 접촉 압력을 크게 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 작업 속도가 떨어지고 작업자의 숙련 정도에 따른 확관 품질에 차이가 있으며 확관 길이에 대한 제약이 따르므로 최근에는 수압 확관과 폭발 확관 방법이 많이 이용되고 있다. 이중 특히 수압 확관 방법은 튜브가 확관되는 부위에 수압을 가하여 튜브를 확관시킴으로써 확관 길이의 제약이 없으며, 타 방법에 비하여 확관 후 상대적으로 낮은 잔류응력과 확관 구간 전반에 걸쳐 균일한 확관이 이루어진다는 장점이 있다.⁽¹⁾ 튜브/튜브시트 확관 접합에 있어서 양질의 확관 접

합을 결정하는 중요한 사항은 튜브 지지 및 누수 방지를 위하여 튜브/튜브시트간의 높은 접촉 압력이 필요한 동시에 튜브/튜브시트 천이구간에서의 응력 부식 균열(Stress corrosion crack)⁽²⁾을 예방하기 위한 튜브 내면의 낮은 축방향 인장 잔류응력이 요구된다.^(3,4)

일반적으로 산업용 열교환기에 많이 사용되는 튜브의 배열 형태는 삼각형 배열과 사각형 배열이며, 두 배열에 대한 접촉 압력과 잔류응력의 해석 및 이와 관련한 확관 품질에 대한 연구는 확관시 튜브 배열을 설계하는데 매우 중요하다.

튜브와 튜브시트 수압 확관에 관련된 연구는 주로 삼각형 배열에 대하여 튜브/튜브시트 재질, 확관 압력, 튜브/튜브시트간의 간극(Clearance) 차이 등의 설계 변수를 변화시켰을 때 나타나는 접촉 압력 변화와 잔류응력에 대하여 이론 및 실험 등이 수행되었으나,⁽⁵⁻⁸⁾ 사각형 배열에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 삼각형 및 사각형 튜브 배열에 대하여 수압 확관시 튜브와 튜브시트의 재질, 기하학적 치수, 확관 압력의 변화에 따른 접촉 압력 변화와 잔류응력 변화를 해석하여 양질의 확관 품질 갖는 튜브 배열을 조사하고자 한다.

* 한국중공업 기술연구원

** 회원, 한국중공업 기술연구원

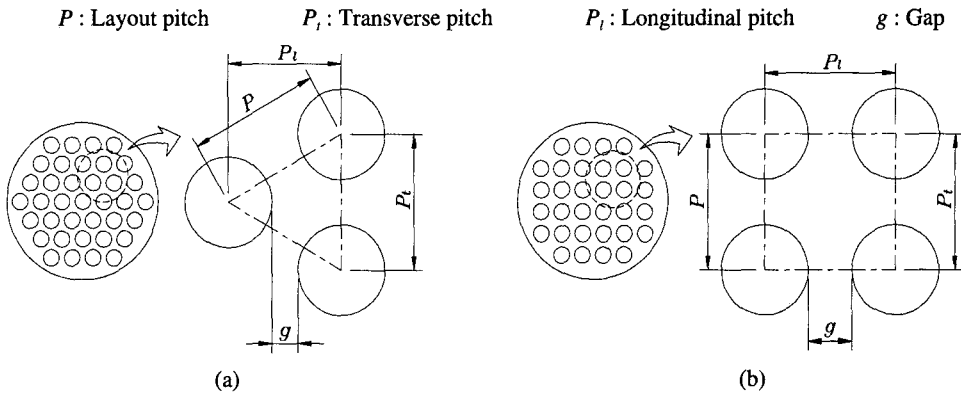


Fig. 1 Tube layout scheme (a) triangular tube layout (b) square tube layout.

Table 1 Pitches and gap in terms of pitch and tube outer diameter (d_o).

Layout pattern	P_t	P_l	g
Triangular layout	P	$P \sin 60^\circ$	$P \sin 60^\circ - d_o$
Square layout	P	P	$P - d_o$

2. 튜브/튜브시트 해석 영역

일반적으로 산업용 열교환기에 많이 사용되어 지는 튜브의 배열 형태인 삼각형 배열과 사각형 배열의 피치(Pitch), 가로피치(Transverse pitch), 세로 피치(Longitudinal pitch), 틈새(Gap) 등을 정의하는 튜브 배열 형상은 Fig. 1 과 같으며, 각각의 피치들과 틈새 사이의 관계에 대한 정의는 Table 1 에 정리하였다.

튜브와 튜브시트의 수압 확관 영역은 Fig. 2 와 같이 1 차면(Primary Side)과 중심 영역(Central Region), 2 차면(Secondary Side)으로 구분할 수 있다. 수압 확관 작업은 1 차면 부분을 일부 확관시켜 튜브를 튜브시트에 고정시키고 튜브/튜브시트가 만나는 끝부분을 용접한 후 최종적으로 전 영역에 걸쳐 튜브 확관을 행한다. 따라서, 해석 구간은 중심 영역인 균일 확관 영역과 2 차면의 천이 영역으로 구별할 수 있다.

본 연구에서는 해석의 간편성을 위해 균일 확관 영역은 평면응력 모델로 가정하여 중심부에서 튜브 원주 방향의 변화에 따른 튜브/튜브시트의 접촉 압력과 튜브 두께 감소량을 나타내는 확관율을 조사하였으며, 천이 영역은 축대칭 모델로 가정하여 확관후 튜브의 축방향 잔류 인장 응력을

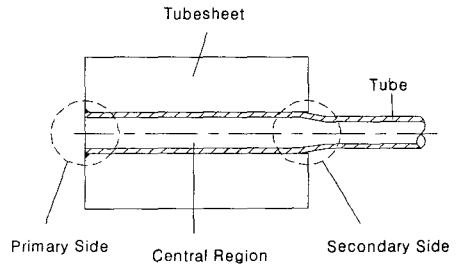


Fig. 2 Expanded tube/tubesheet regions with hydraulic Pressure.

Table 2 Material properties and dimensions of tube/ tubesheet.

Tube outer diameter	18mm
Tube thickness	1mm
Tubesheet inner diameter	18.2mm
Tube yield stress	300MPa
Tubesheet yield stress	450MPa
Tube young's modulus	210GPa
Tubesheet young's modulus	210GPa
Pitch	24mm

조사하였다. 튜브/튜브시트의 기하학적 치수 및 재질 특성은 Table 2 와 같으며, 삼각형과 사각형 배열의 확관 품질을 비교하기 위하여 튜브와 튜브시트의 재질 특성인 항복응력, 탄성계수와 기하학적 치수인 튜브와 튜브시트의 내경, 외경, 피치간격을 동일하게 하여 계산하였다.

3. 균일 확관 영역 해석

균일 확관 해석에 사용된 튜브/튜브시트의 삼각

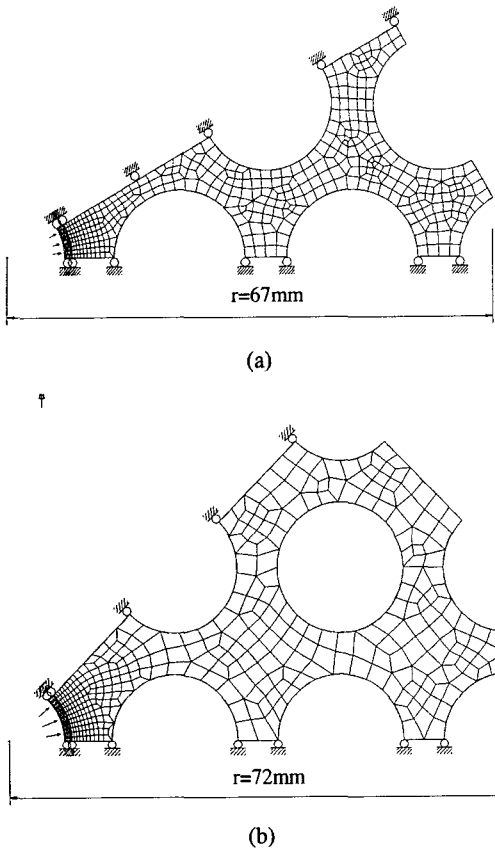


Fig. 3 Two-dimensional finite element mesh for tube/tubesheet (a) triangular model (b) square model.

형 배열과 사각형 배열의 해석 모델과 경계 조건은 Fig. 3 과 같다. 해석은 평면응력 상태를 가정하였으며, 경계 조건은 형상의 대칭성을 고려하여 $\theta=0^\circ$ 평면 및 삼각형 배열의 $\theta=30^\circ$ 평면과 사각형 배열의 $\theta=45^\circ$ 평면의 원주 방향 변위를 구속하였다. ($U_\theta=0$) 삼각형 배열과 사각형 배열의 튜브시트의 바깥거리는 각각 $r=67\text{mm}$, $r=72\text{mm}$ 로 확관 압력의 영향이 미치는 튜브시트의 최대 거리로 설정하였다.

해석은 비선형 유한요소 Code 인 ABAQUS 를 사용하였으며, 삼각형 모델의 경우 438 개의 8 절점 평면응력 요소(CPS8R)와 1511 개의 절점으로 모델링 하였고, 사각형 모델의 경우는 419 개의 8 절점 평면응력 요소(CPS8R)와 1449 개의 절점을 사용하였다. 계산 속도를 빠르게 하기 위하여 Reduced Integration 요소를 사용하였으나 Hourglass 문제는 나타나지 않았다.

튜브와 튜브시트의 경계면에서의 비선형 접촉 해석은 미소 미끄러짐(Small sliding)을 가정하였으며, 튜브시트와 튜브의 접촉면 마찰계수는 0.2 로

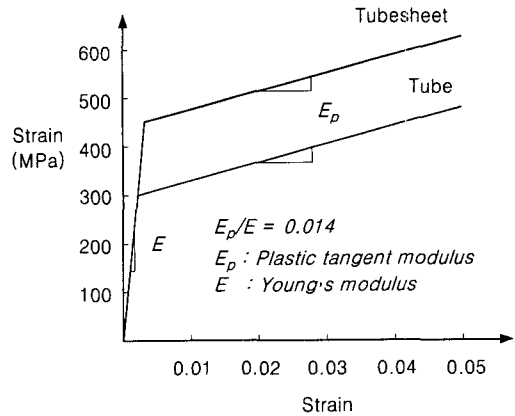


Fig. 4 Stress-strain curves for tube and tubesheet

가정하였다. 탄소성 해석에 사용되는 튜브와 튜브시트의 응력-변형률 선도는 Fig. 4 에서와 같이 소성 접선 계수(Plastic tangent modulus)와 탄성계수의 비가 0.014 인 쌍일차(Bi-linear) 선도를 사용하였다.

Fig. 5 는 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300 MPa 에서의 확관 후 삼각형 모델과 사각형 모델의 튜브/튜브시트 접촉면 원주 방향의 접촉 압력 변화를 나타내고 있다. 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300 MPa 하에서 삼각형 모델의 평균 접촉 압력은 각각 $r=72\text{mm}$ 9.147MPa, 22.632MPa, 36.073MPa 이며, 사각형 모델의 평균 접촉 압력은 각각 7.669MPa, 20.798 MPa, 34.310MPa 로 동일 확관 압력하에서 접촉 압력은 삼각형 배열이 사각형 배열보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 삼각형 배열과 사각형 배열이 동일한 피치이더라도 확관 압력의 영향을 받는 튜브시트의 면적이 상이하므로 두 배열의 튜브시트 강성(Stiffness)의 차이가 발생한다. 동일조건에서 면적이 커지면 강성이 커지고 더불어 변형 저항도 함께 커지므로 사각형 배열의 접촉 압력이 삼각형 배열보다 낮게 나타난다고 할 수 있다^[7]. 튜브/튜브시트간의 높은 접촉 압력이 양질의 확관 품질을 결정하는 요소임을 감안하면, 삼각형 배열이 사각형 배열보다 누수 방지 측면에서 우수한 것으로 판단된다.

튜브/튜브시트 접촉면에서 원주 방향의 접촉 압력은 두 모델 모두 원주 방향으로 균일(Uniform) 하지 않고 $\theta=0^\circ$ 에서 최대값을 나타낸 후 30° 까지 점차 줄어들다가, 사각형 배열은 30° 이후에 다시 접촉 압력이 상승하고 있다. 이것은 앞서 기술한 강성과 관련이 있다고 할 수 있으며, 삼각형과 사각형 해석 모델의 기하학적인 형상으로 인하여 확

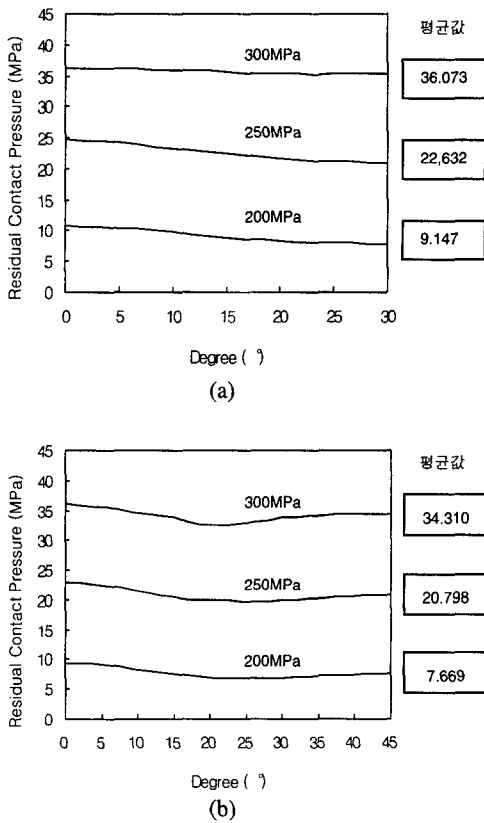


Fig. 5 Variations of contact pressure for three different expansion pressures (a) triangular layout (b) square layout.

관 압력의 영향을 받는 튜브시트의 영역이 각도의 변화에 따라 바뀌므로 튜브시트의 강성의 변화가 생겨 접촉 압력이 변화하는 것으로 해석할 수 있다.

균일한 확관 구간의 해석을 통하여 확관후 접촉 압력에 영향을 미치는 변수들의 영향을 조사하는 것은 튜브/튜브시트 설계에 있어서 매우 중요하다. 수압 확관에 영향을 미치는 변수로는 튜브/튜브시트의 간극, 프와송비, 소성 접선 계수, 탄성 계수, 항복응력, 튜브 두께, 확관 압력 등을 들 수 있다. 이들 변수들이 확관후 접촉 압력에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 2에 나타난 변수들의 값을 기준으로 상하 5%를 변화시키면서 접촉 압력의 민감도 해석을 수행하였다. Table 2에 제시한 변수들로 계산한 삼각형 배열의 기준 접촉 압력은 22.605MPa이며, 사각형 배열의 기준 접촉 압력은 20.798MPa이다.

Table 3은 각각의 설계 변수 변화에 따른 삼각형 배열과 사각형 배열에 대한 접촉 압력 변화를 정리한 것이다. 접촉 압력값 우측 괄호 안의 값은 기준 압력값에 대한 접촉 압력의 변화량을 백분율로 나타낸 것이다. 접촉 압력의 변화는 삼각형 배열과 사각형 배열에서 유사한 양상을 나타내고 있으며, 변동폭 5%를 기준으로 하여 크게 3가지 형태로 분류할 수 있다. 첫째 설계 변수 값의 증가에 따라 접촉 압력이 5% 이상 증가되는 변수로는 확관 압력, 튜브의 탄성계수이며, 둘째 설계 변수 값의 증가에 따라 접촉 압력이 5% 이상 감소되는 변수로는 튜브의 항복응력, 튜브시트의 탄성계수이며, 셋째 설계 변수 값의 변화에 따라 접촉 압력의 영향이 5% 미만으로 나타나는 변수로는 튜브두께, 간극, 튜브시트의 항복응력, 튜브와 튜브시트의 소성 접선 계수, 프와송비, 마찰계수 등이다. 또한 여러 설계 변수들 중에서 접촉 압력에 가장 큰 영향을 미치는 변수로는 확관 압력, 튜브 항복응력, 튜브와 튜브시트 탄성계수 등의 순서임을 알 수 있다. Table 3에서 알 수 있듯이 동일한 설계 변수들의 조건하에서 확관 후 삼각형 배열이 사각형 배열보다 높은 접촉 압력값을 가지며, 이 결과는 앞서 언급한 바와 같이 누수 방지 측면에서 튜브/튜브시트간의 높은 접촉 압력이 요구되는 것을 감안할 때 삼각형 배열이 사각형 배열보다 우수한 것으로 판단된다.

튜브/튜브시트 확관에 있어서 튜브의 접촉 압력과 함께 튜브의 확관율⁽⁹⁾ (Tube wall reduction)은 튜브 품질을 결정하는 중요한 요소이다. 튜브의 확관율은 확관전 최초 튜브 두께에 대한 확관후 튜브 두께 변화율을 나타낸 것인데, 실제로 확관 후 튜브 두께를 측정하는 것이 곤란하기 때문에 확관 후 튜브의 직경을 이용하여 튜브 확관율을 측정한다. 확관율은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Tube wall reduction} = [di' - (di + 2c)] / 2t \quad (1)$$

여기서, di'는 확관 후 튜브 내경이며, di는 확관전의 튜브 내경이다. 2c는 튜브와 튜브시트의 직경 간극이며, t는 확관 전 튜브 두께이다.

Table 4는 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300MPa 하에서 삼각형 모델과 사각형 모델에 대한 튜브의 확관율을 정리한 것이다. 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300MPa 하에서 삼각형 모델의 평균 확관율은 각각 0.76%, 0.82%, 1%이며, 사각형 모델의 평균 확관율은 각각 0.75%, 0.81%, 0.98%로 동일 확관 압력하에서 확관율은 삼각형 배열이 사각형 배열

Table 3 Variations of contact pressure for various design parameters.

Unit : MPa

Parameter		Triangular layout		Square layout	
		-5%	5%	-5%	5%
Expansion pressure		19.162 (-15.2%)	26.095 (15.4%)	17.436 (-16.2%)	24.211 (16.4%)
Tube young's modulus		20.625 (-8.8%)	23.714 (4.9%)	18.875 (-9.2%)	21.859 (5.1%)
Tube thickness		22.081 (-2.6%)	23.070 (2.1%)	20.325 (-2.3%)	21.215 (2%)
Tube yield stress		24.295 (7.5%)	20.126 (-11%)	22.496 (8.2%)	18.318 (-11.9%)
Tubesheet young's modulus		24.499 (8.4%)	20.855 (-7.7%)	22.638 (8.8%)	19.098 (-8.2%)
Clearance		22.857 (1.1%)	22.353 (-1.1%)	21.051 (1.2%)	20.545 (-1.2%)
Tubesheet yield stress		22.584 (-0.1%)	22.618 (0.06%)	20.784 (-0.07%)	20.805 (0.03%)
Plastic tangent modulus	Tube	22.899 (1.3%)	22.313 (-1.3%)	21.089 (1.4%)	20.508 (-1.4%)
	Tubesheet	22.606 (0%)	22.605 (0%)	20.798 (0%)	20.798 (0%)
Poisson's ratio	Tube	22.851 (1.1%)	22.359 (-1.1%)	21.048 (1.2%)	20.547 (-1.2%)
	Tubesheet	22.359 (-1.1%)	22.851 (1.1%)	20.547 (-1.2%)	21.048 (1.2%)
Friction coefficient		22.605 (0%)	22.605 (0%)	20.798 (0%)	20.798 (0%)

Table 4 Tube wall reduction ratio for three different expansion pressures.

Expansion pressure	Tube inner diameter	Triangular model		Square model	
		Expanded tube inner diameter	Tube expansion ratio	Expanded tube inner diameter	Tube expansion ratio
200MPa	16 mm	16.2151mm	0.76%	16.215 mm	0.75%
250MPa	16 mm	16.2164 mm	0.82%	16.2162 mm	0.81%
300MPa	16 mm	16.22 mm	1.00%	16.2196 mm	0.98%

보다 조금 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 확관 압력의 영향을 받는 튜브시트의 면적이 사각형 배열에 비하여 삼각형 배열이 상대적으로 작으므로 확관후 양 배열의 면적의 차이로 인하여 튜브시트의 탄성 회복 차이가 발생한 것에 기인하는 것으로 판단할 수 있다. 확관율이 크다는 것은 튜브와 튜브시트가 더욱 단단하게 밀착되어 접촉 압력이 크고 확관 품질이 우수하다는 것을 의미한다. 따라서 삼각형 튜브 배열의 경우가 사각형 배열보다 접촉 압력과 확관율이 크므로 튜브/튜브시트 간의 접합이 상대적으로 우수한 것으로 판단된다.

4. 천이 영역 해석

튜브/튜브시트 확관 접합에 있어서 양질의 확관 접합을 결정하는 중요한 요소는 서론에서 언급한

튜브 지지 및 누수 방지를 위한 튜브/튜브시트간의 높은 접촉 압력과 응력 부식 균열을 예방하기 위한 튜브 내면의 낮은 축방향 잔류 인장응력이다. 접촉 압력에 관련된 해석은 균일 확관 영역 해석에서 수행하였으며, 본 절에서는 천이 영역에서의 튜브 내면의 축방향 잔류 인장응력을 해석하였다.

천이 영역 확대칭으로 해석하였으며, 해석 모델을 단순화하기 위하여 상당 외경을 갖는 튜브시트 모델을 이용하였다. Fig. 6은 이러한 튜브시트의 상당 외경을 구하기 위한 삼각형 모델과 사각형 모델을 나타낸다. 동일한 확관 압력하에 균일 확관 영역 해석에서 구한 평균 접촉 압력과 동일한 평균 접촉 압력을 갖는 튜브시트의 상당 외경을 시행착오법으로 구하였으며, 삼각형 배열과 사각형 배열의 상당 외경 값은 각각 16.6mm, 17.4mm이다.

천이 영역 해석에 사용된 튜브/튜브시트의 해석

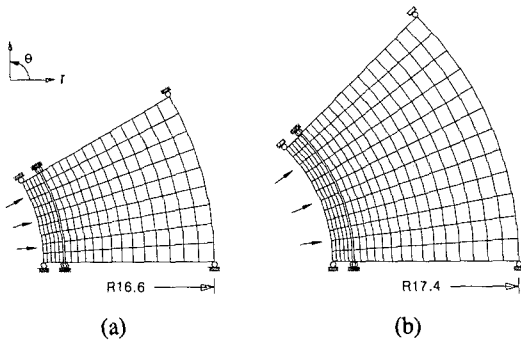


Fig. 6 Finite element meshes for the determination of equivalent outer radius (a) triangular model (b) square model.

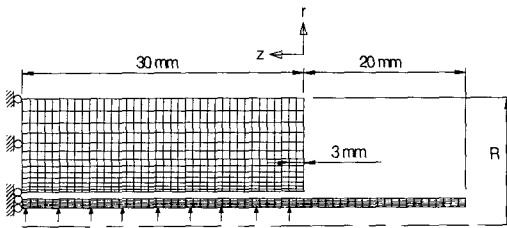


Fig. 7 A finite element mesh for the analysis of transition area.

모델과 경계조건은 Fig. 7 과 같다. 해석은 비선형 유한요소 코드인 ABAQUS 를 사용하였으며, 1,200 개의 8 절점 축대칭 요소(CAX8R)와 5,034 개의 절점으로 모델링 하였다. 튜브와 튜브시트의 경계면에서의 비선형 접촉 해석은 균일 확관 영역 해석과 같은 미소 미끄러짐(Small Sliding)을 가정하였다. 튜브시트와 튜브의 접촉면 마찰계수는 0.2 를 사용하였으며, 탄소성 해석에 사용되는 튜브와 튜브시트의 응력-변형을 선도는 Fig. 4 에서와 같이 소성 접선 계수(Plastic tangent modulus)와 탄성계수의 비가 0.014 인 쌍일차(Bi-linear) 선도를 이용하였다. 튜브시트의 외경은 앞에서 구한 상당 외경값을 사용하였으며, 접촉 압력이 가해지는 위치는 생산 현장에 적용되고 있는 조건을 고려하여 $z = 3\text{mm}$ 부위를 선정하였다. 해석에 이용된 튜브시트의 길이는 전체 길이의 일부인 30mm 이며, 경계 조건은 $z = 30\text{mm}$ 평면의 축방향 변위를 구속하였다($U_z = 0$). 튜브 시트를 z 방향으로 전체 모델링할 경우는 가로, 세로 비율이 약 30 : 1 정도이므로 이것을 미소 요소로 분할하여 해석하는 것은 어려움이 따른다. 따라서, 천이영역을 포함하는 일부분

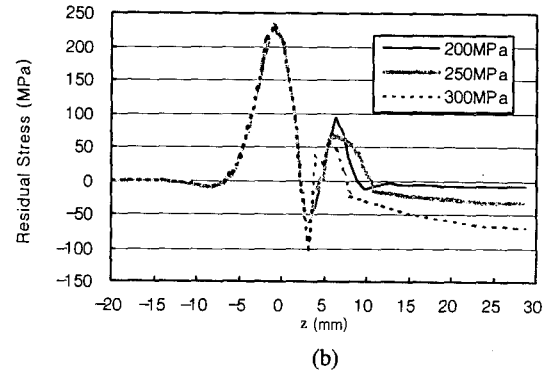
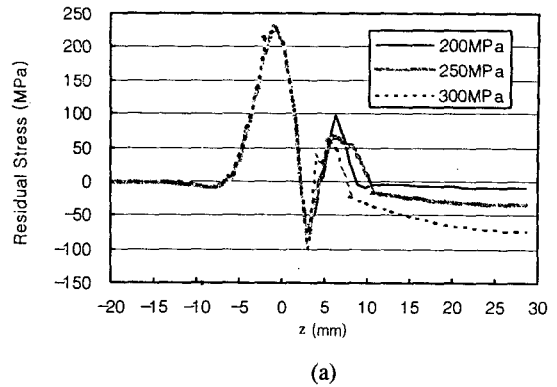


Fig. 8 Distributions of residual stress in the axial direction observed from the internal surface of tube (a) triangular layout (b) square layout.

만을 모델링 하였으나, 이로 인하여 발생하는 응력의 변화량은 매우 미미하므로 무시할 수 있다.

Fig. 8 은 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300MPa 으로 확관 후의 삼각형 모델과 사각형 모델의 튜브 내경의 축방향 잔류 인장응력 분포를 나타내고 있다. 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300MPa 가 작용할 때 튜브내면에서의 최대 축방향 잔류 인장응력은 삼각형 배열의 경우, 각각 229.26MPa, 229.32MPa, 227.06MPa 으로 나타났으며, 사각형 모델의 경우, 각각 229.73MPa, 230.4MPa, 228.31MPa 로 나타났다. 해석에 사용된 튜브의 배열과 확관 압력은 튜브 내경의 최대 축방향 잔류 인장응력에 영향을 크게 미치지 않는다는 것을 확인하였으며, 응력 부식 균열을 예방하기 위해서는 튜브 내면의 낮은 축방향 잔류 인장응력이 요구되는 것을 감안할 때 삼각형 배열과 사각형 배열은 축방향 잔류 인장응력 측면에서 유사한 확관 품질을 보장하는 것으로 판단된다.

Fig. 9 는 확관 압력 200MPa, 250MPa, 300MPa 으로 확관한 후의 삼각형 모델과 사각형 모델의 접

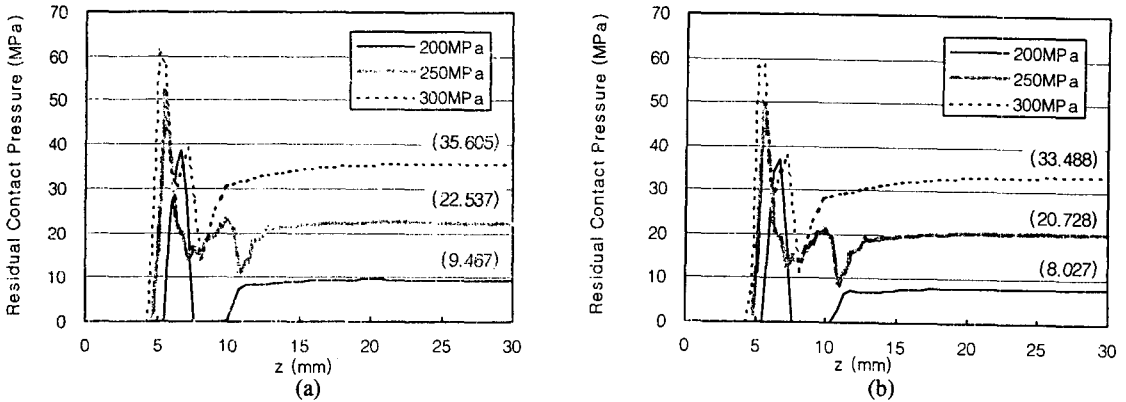


Fig. 9 Variations of residual contact pressure in the secondary side region for three different expansion pressures (a) triangular layout (b) square layout.

Table 5 Comparison of contact pressures between two models.

Unit : MPa

Expansion pressure	Plane stress model		Axisymmetric model	
	Triangular layout	Square layout	Triangular layout	Square layout
200	9.147	7.669	9.467	8.027
250	22.632	20.798	22.537	20.728
300	36.073	34.310	35.605	33.488

촉 압력 변화를 나타낸 것이다. 천이 영역($z \leq 15$ mm)의 최대 접촉 압력은 확관 압력 200MPa, 250 MPa, 300MPa 하에서 삼각형 모델의 경우, 각각 38.5MPa, 51.6MPa, 60.9MPa로 나타났으며, 사각형 모델의 경우, 각각 36.9MPa, 49.7MPa, 58.4MPa로 나타났다. 즉, 동일 확관 압력하에서 삼각형 배열이 사각형 배열보다 접촉 압력이 높게 나타남을 확인하였다. 한편, 튜브와 튜브시트가 접촉하기 시작하는 부분은 삼각형 배열과 사각형 배열 모두 $z = 5$ mm를 기준으로 하여 확관 압력 200MPa에서는 5mm 이후에, 250MPa와 300MPa에서는 5mm 이전으로 조사되었으며, 확관 압력이 높을수록 튜브와 튜브시트의 접촉 부위가 튜브시트 상단에 접근하는 것으로 해석되었다.

$z \geq 15$ mm 구간에서의 평균 접촉 압력과 균일 영역 확관 해석에서 계산한 평균 접촉 압력은 Table 5에 비교하였다. 축대칭으로 모델링한 천이 영역 해석 결과와 평면응력으로 모델링한 균일 확관 영역 해석 결과는 $z \geq 15$ mm 영역에서는 유사한 것으로 조사되었다.

5. 결 론

삼각형 및 사각형 튜브 배열에 대하여 수압 확관시 튜브와 튜브시트의 재질, 기하학적 치수, 확관 압력의 변화에 따른 접촉 압력 변화와 축방향 잔류 인장응력 변화를 해석하여 양질의 확관 품질 갖는 튜브 배열을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 설계 변수들에 따른 접촉 압력의 변화는 크게 설계 변수의 증가에 비례하는 경우와 그와 반대로 반비례하는 경우, 그리고 거의 영향력을 미치지 않는 경우 등의 3가지로 분류할 수 있으며, 설계 변수들 중에서 확관 압력, 튜브 항복응력, 튜브와 튜브시트 탄성계수 등의 순서로 접촉 압력에 크게 영향을 미친다.
- (2) 동일한 조건(확관 압력, 재질, 치수)에서 삼각형 배열이 사각형 배열보다 확관후 튜브/튜브시트 간의 접촉 압력이 높게 나타난다.
- (3) 동일한 조건(확관 압력, 재질, 치수)에서 튜브 내경의 최대 잔류 인장응력은 튜브의 배열과 확관 압력에 영향을 거의 미치지 않는다.

(4) 삼각형 배열이 사각형 배열보다 낮은 확관 압력으로 동일한 확관 효과를 얻을 수 있으며 동일 압력하에서 우수한 확관 품질을 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) Singh, K.P. and Soler, A.I., 1984, *Mechanical Design of Heat Exchangers and Pressure Vessel Components*, Archurus Publishers, Cherry Hill, N.Y.
- (2) 박종진, 유효선, 정세희, 1996, "고온부재의 재질열화에 따른 응력부식균열 평가에 관한 연구," 대한기계학회(A), 제 20 권, 제 4 호, pp.1123~1132
- (3) Ma, H., Chaaban, A. and Bazergui, A., 1990, "Tube-to-Tubesheet Joints Analysis : A Proposed Method," *ASME, PVP*, Vol. 194, pp. 77~83
- (4) Updike, D.P., Kalnins, A. and Caldwell, S.M., 1989, "Residual Stress in Transition Zone of Heat Exchanger Tubes," *ASME, PVP*, Vol. 175, pp. 39~44
- (5) Chaaban, A., Morin, E., Ma, H. and Bazergui, A., 1989, "Finite Element Analysis of Hydraulically Expanded Tube-to-Tubesheet Joints : A Parametric Study," *ASME, PVP*, Vol. 173, pp. 19~25
- (6) Wang, Y. and Soler, A.I., 1988, "Effect of Boundary Conditions on the Tube-Tubesheet Joint Annulus Model-Finite Element Analysis," *ASME, PVP*, Vol. 139, pp. 107~112
- (7) Jawad, M.H., Clarkin, E.J. and Schuessler, R.E., 1987, "Evaluation of Tube-to-Tubesheet Junctions," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 109, pp. 19~26
- (8) Kohlpaintner, W.R., 1995, "Calculation of Hydraulically Expanded Tube-to-Tubesheet Joints," *Transaction of the ASME*, Vol. 117, pp. 24~30
- (9) Updike, D.P., Kalnins, A. and Caldwell, S.M., 1989, "Residual Stress in Transition Zone of Heat Exchanger Tubes," *ASME, PVP*, Vol. 175, pp. 39~44