

고온에서 이중튜브의 열응력특성해석

김은화¹ · 장정환¹ · 박성필² · 문영훈[#]

Analysis of the Stress Characteristics of Double Layered Tube at Elevated Temperature

E. H. Kim, J. H. Jang, S. P. Park, Y. H. Moon

(Received August 11, 2010 / Revised October 26, 2010 / Accepted October 27, 2010)

Abstract

Double layered tube that has been used for transportation and oil piping system is occasionally exposed to elevated temperature. The change in stress state at elevated temperature is important for the safe design of double layered tube. In this study, the variation of stress state for hydroformed double layered tube of which inner tube is stainless steel and outer tube is mild steel has been analytically analyzed. To characterize the thermal stress at elevated temperature, analytical model to provide thermal stresses between outer tube and inner tube was developed by using theories of elasticity and Lamé equation. The feasibility of analytical model is verified by finite element analysis using ANSYS CLASSIC™, commercially available code. The variation of thermal stress at various thickness combination of inner and outer tube has also been investigated by proposed analytical model.

Key Words : Double Layered Tube, Tube Hydroforming, Thermal Stress, Coefficient of Linear Expansion

1. 서 론

파이핑 시스템은 신뢰성, 경제성, 편리성 등의 이점으로 인해 이송수단으로 많이 사용되고 있다. 그러나 파이프 내부에서의 자연부식, 파이프의 노화, 국부 파손 등으로 인한 사고가 발생하게 되면 이송거리가 길어서 안전을 위한 검사와 모니터링은 어려우며 비용 또한 많이 든다[1].

이중튜브는 동일소재 또는 이종소재를 이용하여 내/외부 튜브로 결합되며, 외부튜브에 내압이 가해졌을 때 내/외부 튜브가 접촉되면서 동시에 변형이 일어난다. 그러므로 외부튜브는 내부튜브에 누설이 발생하였을 때 파이프 파열을 막을 수 있어서, 그에 따른 시간적 여유와 누설의 사고를 피할 수 있다. 단일튜브와 비교하면, 이중튜브의 기

밀성, 신뢰성, 파열 저항성, 온라인 검출 등의 측면에서 아주 우수하므로 석유화학, 발전설비, 기계부품 등에 폭넓게 사용될 수 있다[2~3].

특히 스테인리스를 내부로 하고 탄소강이 외부로 되어있는 이중튜브는 파이프 내부의 내식성을 요하는 이송관에 사용되고 있다. 이로써 이송관의 사용기간을 늘릴 수 있고, 재료비용도 절감할 수 있다[4].

이중튜브의 제조방법에는 용접, 기계적 압출, 롤링, 폭발성형, 하이드로포밍(hydroforming)등 여러 방법이 있다 [3,5]. 이중에 하이드로포밍 공법을 이용한 이중튜브의 성형에서는 내/외부 튜브가 서로 다른 응력(압력)-변형 이력을 따르게 되어 외부튜브의 탄성영역 구간에 해당하는 확관 압력을 가해준 후 압력을 제거하게 되면 내/외부 튜브

1. 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터

2. 현대하이스코, 기술연구소 경량화연구팀

교신저자: 부산대학교 기계공학부, yhmoon@pusan.ac.kr

의 탄성회복량의 차이로 인해 이중튜브 사이에 간격이 발생할 수 있으며 성형 후 형상 정밀도가 떨어질 수 있다[6]. 이때 하이드로포밍된 이중튜브가 고온 환경에 노출 되었을 때 온도 변화에 의해 내/외부 튜브에 열팽창이 발생하게 되어 내/외부 튜브의 형상 치밀도에 영향을 미칠 수 있다.

이에 본 연구에서는 내부튜브는 스테인리스스틸 (stainless steel), 외부튜브는 탄소강 (carbon steel)을 이용하여 하이드로포밍 공법으로 성형된 이중튜브의 선 팽창계수를 파악한 후, 그 결과를 적용하여 고온환경에서 사용시 발생하는 열응력을 예측한다. 이후 ANSYS CLASSIC 상용프로그램을 이용하여 내/외부 튜브가 완전히 접촉하였을 때 온도에 의해 발생하는 원주방향과 길이방향 열응력 값을 예측식과 비교하여 검증하며, 마지막으로 예측식을 적용하여 이중튜브의 내/외부 튜브의 두께가 변화했을 때 발생하는 원주방향과 길이방향 열응력을 평가하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 해석모델 치수

시험에 사용된 이중튜브의 외부는 탄소강관(SS400)으로 $\Phi 114.3$, 두께 8.5mm, 길이 700mm 이고, 내부는 스테인리스 강관(STS304)으로 $\Phi 89$, 두께 3mm, 길이 700mm 이다.

2.2 선 팽창 계수 평가

열기계분석기 (TMA)를 이용하여 소재의 선 팽창 계수 값을 측정하였다. 이중튜브 성형 전 내/외부 튜브를 2.5mm 크기의 정육면체로 가공하여 25°C 에서 20°C 까지 선형적으로 온도를 변화시켜 시편의 변위를 측정하였다. 이때 온도상승 속도는 10°C/min 이며, 분위기는 공기를 이용하였다.

2.3 고온 환경에서의 열응력 예측식

하이드로포밍 공법을 이용하여 성형된 이중튜브는 고온의 사용환경에서 열팽창을 하게 된다. 이때, 내부튜브의 변형이 외부튜브의 변형에 비해 더 크게 될 경우 내부튜브와 외부튜브에 인장과 압축 응력이 발생한다.

내부튜브와 외부튜브 사이에 발생하는 열응력을 예측하는 식을 설정하기 위한 가정은 다음과 같다.

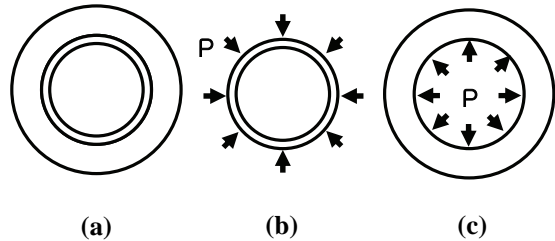


Fig. 1 The force state of a double layered tube at high temperature; (a) double layered tube (b) inner tube (c) outer tube

- (1) 하이드로포밍 공법을 이용하여 성형한 내관과 외관 사이의 간격은 0이다.
- (2) 내/외부튜브는 이상적 탄소성체로 가정하였으며, 하이드로포밍 공정과 열팽창에 의한 변형으로 파단이 일어나지 않을 만큼 충분한 연성을 가지고 있다.
- (3) 온도에 의해 외부튜브는 충분히 열팽창 하며, 외부튜브 대비 내부튜브의 열팽창 양의 차이에 의해 열응력이 발생한다.

Fig. 1 에서와 같이 이중튜브가 열팽창이 될 때 외부튜브의 내측과 내부튜브의 외측면에 작용하는 압력은 같으며 이 값을 P라고 한다.

내/외부 튜브의 직경 변화 값을 구하기 위해 온도변화에 의해 변형된 길이의 값을 나타내면 식(1)과 같다. 이때 L_f 는 변형 후 길이이며 L_0 는 변형 전 길이이며, α_t 는 선 팽창계수 이며 ΔT 는 온도변화이다.

$$L_f = L_0(1 + \alpha_t \cdot \Delta T) \quad (1)$$

온도에 의한 팽창 후 부피는 식(2)과 같이 나타낼 수 있는데, 이와 마찬가지로 팽창 전 부피를 식(3)과 같이 표현한다. V_f 는 팽창 후 부피이며 V_0 는 변형 전 부피이며, D_f, D_0 는 각각 팽창 후 외경과 팽창 전 외경이다.

$$V_f = \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot L_f \quad (2)$$

$$V_0 = \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot L_0 \quad (3)$$

온도 변화에 의한 부피의 변형 식은 식(4)와 같다. 식(1), (2), (3)을 연립하여 정리하면 식(5)와 같

이 표현할 수 있으며, 이는 식 (6)과 같이 온도변화에 의한 변형으로 나타낼 수 있다.

$$V_f = V_0(1 + 3\alpha_i \cdot \Delta T) \quad (4)$$

$$\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot L_0(1 + \alpha_i \cdot \Delta T) \quad (5)$$

$$= \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot L_0(1 + 3\alpha_i \cdot \Delta T)$$

$$D_f = D_0 \cdot \sqrt{\frac{(1 + 3\alpha_i \cdot \Delta T)}{(1 + \alpha_i \cdot \Delta T)}} \quad (6)$$

(1)~(6)의 식은 내/외부 튜브에 각각 적용시켜 내/외부 튜브의 직경 변화량을 예측할 수 있다.

앞의 식(6)에 의해 구한 내부튜브와 외부튜브의 직경 변화량을 이용하여 내/외부 튜브의 열팽창에 의한 차이 값을 δ 라 할 때, 가열 끼워 맞춤 공식에 의해 내부튜브 외관 즉 내부튜브 내부에 작용하는 압력 P 를 식 (6)에서 구할 수 있다[7]. 이때 r_c 는 내부튜브와 외부튜브가 접촉하는 면의 반경이며, r_{oo} 는 외부튜브의 외측의 반경, r_{ii} 는 내부튜브 내측 반경 E_o, E_i 는 각 외부튜브 내부튜브의 탄성계수, ν_o, ν_i 는 포아송 비이다.

$$\delta = r_c P \cdot \left[\frac{1}{E_o} \left(\frac{r_{oo}^2 + r_c^2}{r_{oo}^2 - r_c^2} + \nu_o \right) + \frac{1}{E_i} \left(\frac{r_c^2 + r_{ii}^2}{r_c^2 - r_{ii}^2} - \nu_i \right) \right] \quad (7)$$

식(8)은 *Lame* 의 식으로 내부 튜브 외측 부에 작용하는 원주방향 열응력을 구할 수 있다. 이때 내부튜브 내측에 작용하는 압력은 P_{ii} , 외측에 작용하는 압력은 P_{io} , 내부튜브 외측 반경은 r_{io} 이다. 이때, $P_{ii} = 0$ 이고, $P_{io} = P$ 이며, $r_c = r_{io}$ 라고 하면, 식(9)와 같이 정리된다.

$$\sigma_\theta = \frac{P_{ii} r_{ii}^2 - P_{io} r_{io}^2}{r_{io}^2 - r_{ii}^2} - \frac{(P_{ii} - P_{io}) r_{ii}^2 r_{io}^2}{(r_{io}^2 - r_{ii}^2) r_c^2} \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = - \frac{\delta \cdot \left(\frac{r_{io}^2 + r_{ii}^2}{r_{io}^2 - r_{ii}^2} \right)}{r_c \cdot \left[\frac{1}{E_o} \left(\frac{r_{oo}^2 + r_c^2}{r_{oo}^2 - r_c^2} + \nu_o \right) + \frac{1}{E_i} \left(\frac{r_c^2 + r_{ii}^2}{r_c^2 - r_{ii}^2} - \nu_i \right) \right]} \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 내부튜브와 외부튜브가 완전히 접촉 한 상태에서 온도를 변화 시켰을 때, 내부 튜브와 외부튜브 사이의 직경 변화에 의한 압력으로 발생하는 원주방향 열응력 값을 예측할 수 있다.

길이방향의 열응력 예측식은 길이방향이 고정 되어있을 때 열변형에 의해 발생하는 응력을 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 V_{fo} 는 외부튜브의 부피분율이며, E_o, E_i 는 탄성계수, ϵ_o, ϵ_i 는 식(1)을 이용하여 얻어진 길이방향 변형률이다.

$$\sigma_l = E_o \cdot \epsilon_o \cdot V_{fo} + E_i \cdot \epsilon_i \cdot (1 - V_{fo}) \quad (10)$$

위와 같은 (1)~(10)식을 이용하여 온도 변화에 따른 원주방향과 길이방향의 열응력 값을 예측할 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 선팽창계수 평가

상온을 기준으로 고온(25~200°C)에서 평가되었으며, Fig. 2에서와 같이 온도에 무관하게 내부튜브의 변위가 외부튜브의 변위보다 크게 측정되었다. 각 온도 구간에서 측정된 변위를 이용하여 선 팽창 계수 값을 구한 값은 Table 1에 나타났다.

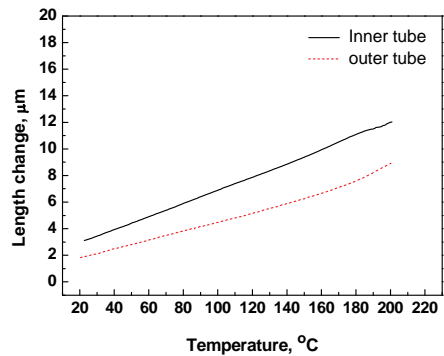


Fig. 2 Length change of inner tube and outer tube

Table 1 Coefficient of linear expansion

25~200°C	
Inner tube	19.87 μm/(m·°C)
Outer tube	14.11 μm/(m·°C)

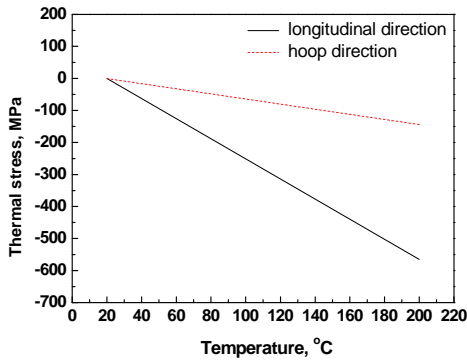


Fig. 3 Analytically obtained longitudinal and hoop thermal stresses

3.2 열응력 예측식의 적용

온도 조건에 의해 팽창하는 이중튜브의 원주방향과 길이방향 열응력을 평가하기 위해 2.3절에서의 예측식을 적용하였다. Fig. 3은 원주방향과 길이방향 열응력을 나타내고 있다. 이때 원주방향과 길이방향에 대해 각각 -144Mpa과 -549Mpa의 열응력이 발생하였다. 특히 소재의 길이방향 열응력은 원주방향과 비교하여 상대적으로 크게 발생하였는데, 이 값은 내/외부 튜브의 인장강도에 달하는 값으로 이중튜브의 고온환경에서 사용시 길이방향 압축응력에 의한 변형을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 특히 길이가 긴 튜브의 경우 길이방향 변형과 응력으로 인한 튜브의 휘어짐 현상에 의해 전체적인 파이핑 시스템의 수명에도 영향을 줄 수 있을 것이라 판단된다.

3.3 열응력 예측식의 FEA이용 검증

본 유한요소해석은 ANSYS-CLASSIC 상용 소프트웨어를 이용하여 이중튜브의 내/외부 접촉부에 발생하는 원주방향 열응력을 평가하였다. 모델은 Solid 90를 사용하였으며, 해석 시 사용된 물성 값은 Table 2에 나타냈고, 선 팽창 계수 값은 3.1에서 측정된 값이다.

해석에 사용된 이중 튜브는 내/외부 튜브의 각 2D 단면을 회전시켜 3D로 모델링 하였다. 이어 튜브의 모든 면에 온도조건을 적용하였으며, 내부튜브와 외부튜브가 팽창에 의해 분리되는 것을 막기 위해 내/외부 튜브의 접촉부의 요소를 결합시켜 해석을 실시하였다.

내부튜브와 외부튜브 접촉면에 열응력이 발생하였으며, 접촉면에 발생하는 응력값을 평균으로

Table 2 Input values for FEA

	E	ν	α_l
Inner tube	193Gpa	0.29	19.87 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
Outer tube	207Gpa	0.26	14.11 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

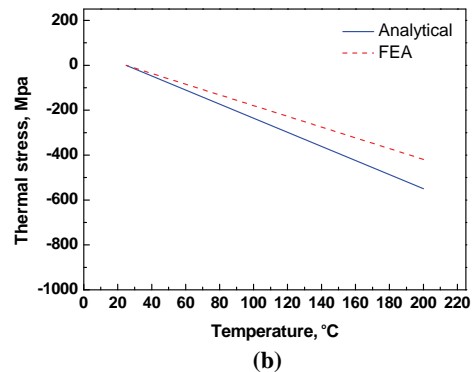
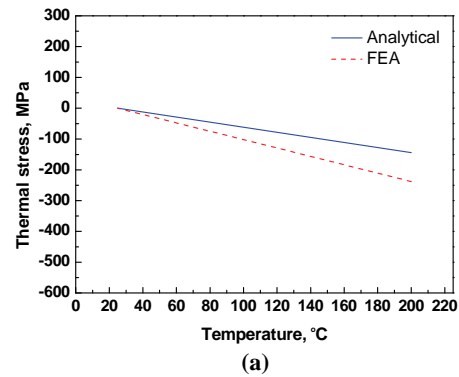


Fig. 5 Comparison of thermal stresses obtained by FEA and analytical model: (a) hoop direction (b) longitudinal direction

제시하였다.

Fig. 5는 이중튜브의 온도 변화에 따른 열응력을 예측식 적용한 값과 유한요소해석을 이용한 값을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 5(a)와 (b)는 각각 원주방향과 길이방향의 열응력을 나타낸다. 원주방향으로 예측식 적용시 -144Mpa의 원주방향 열응력이 걸린데 비해 유한요소해석 적용시에는 -238Mpa의 열응력이 발생하였다.

길이방향으로는 예측식 적용시 -549Mpa의 원주방향 열응력이 걸린데 비해 유한요소해석 적용시에는 -419Mpa의 열응력이 발생하였다.

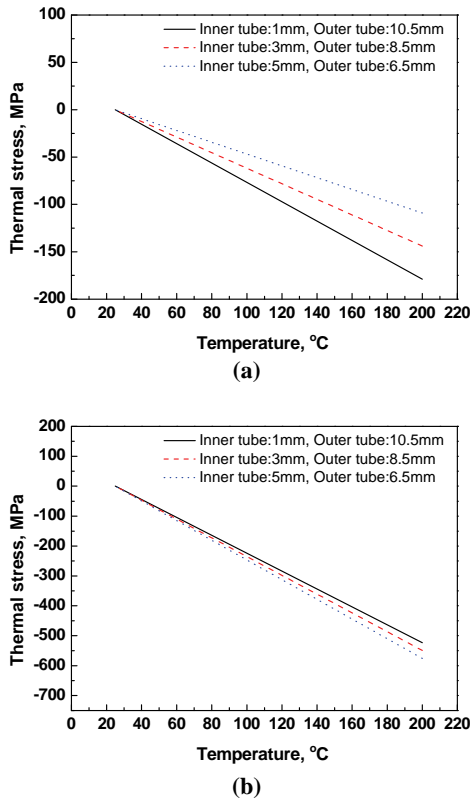


Fig. 6 Analytically obtained thermal stress at various thickness combination: (a) hoop direction (b) longitudinal direction

예측식과 유한요소해석 결과를 비교하면 원주 방향에 비해 길이방향 열응력의 차이가 크게 나타났는데, 이는 길이방향 열응력 예측식에서는 일차원적으로 온도 변화에 비례하여 변형이 발생하며 그 변형에 의해 응력값이 결정되어 결과의 차이가 발생한 것으로 판단 된다. 특히 원주방향 예측식은 유한요소해석 결과에 비해 다소 낮으며 길이방향으로는 다소 높게 나타났는데, 예측식의 각 결과에서는 온도, 반경과 길이에 대한 정보 이외의 변수 이외의 반영하지 못한 데이터에 대한 차이라고 판단된다.

예측식은 유한요소해석과 다소 값의 차이는 있으나, 유사한 경향을 보였다.

3.3 내/외부 튜브 두께 변화에 따른 응력
앞서 언급한 내부튜브 3mm 외부튜브 8.5mm의 이중튜브 외에도 내/외부 튜브의 두께의 합을 11.5mm로 일정하게 고정시켜, 내부튜브 1mm-외

부튜브 10.5mm, 내부튜브 5mm-외부튜브 6.5mm의 이중튜브를 예측식에 적용하였다.

Fig. 6은 예측식을 적용했을 때 두께 변화에 따른 열응력을 나타낸다. 이때 원주방향 열응력인 Fig. 6(a)는 내부튜브의 두께가 두꺼워 지고 외부튜브의 두께가 얇아짐에 따라 원주방향 열응력은 더 작게 발생하며, 반대로 Fig. 6(b)에서 길이방향 열응력은 내부튜브의 두께가 두꺼워지고 외부튜브의 두께가 얇아짐에 따라 더 크게 발생한다.

이에 내부튜브의 두께가 두껍고 외부튜브가 얇을 경우 고온의 환경에서 원주방향에 비해 길이방향으로 더 큰 영향을 미친다고 판단된다.

두께의 조합이 열응력 및 변형에 영향을 미치므로 이중튜브의 사용환경에 따라 내/외부 튜브의 두께 비율 또한 고려할 필요가 있다.

4. 결론

(1) 이중튜브가 고온에 노출 될 경우 온도에 의해 팽창된 내부튜브의 지름과 내/외부 튜브에 접촉하는 압력에 관한 식으로부터 원주방향 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\theta} = -\frac{\delta \cdot \left(\frac{r_{io}^2 + r_{ii}^2}{r_{io}^2 - r_{ii}^2} \right)}{r_c \cdot \left[\frac{1}{E_o} \left(\frac{r_{oo}^2 + r_c^2}{r_{oo}^2 - r_c^2} + \nu_o \right) + \frac{1}{E_i} \left(\frac{r_c^2 + r_{ii}^2}{r_c^2 - r_{ii}^2} - \nu_i \right) \right]}$$

길이방향 응력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_l = E_o \cdot \epsilon_o \cdot V_{fo} + E_i \cdot \epsilon_i \cdot (1 - V_{fo})$$

(2) 유한요소해석을 이용하여 원주방향과 길이방향에 발생하는 열응력에 관한 모델식을 검증하였으며, 원주방향에 비해 길이방향의 열응력이 유한요소해석값과 다소 차이가 나타났으나 경향은 유사한 경향을 보였다.

(3) 모델식을 이용하여 이중튜브의 내/외부 튜브의 두께를 변화시킬 때 발생하는 열응력을 평가 하였다. 내부튜브의 두께가 두꺼워지고 외부튜브의 두께가 얇아짐에 따라 원주방향 열응력은 더 작게 발생하고 길이방향 열응력은 더 크게 발생한다. 이에 내부튜브의 두께가 두껍고 외부튜브가 얇을 경우 고온의 환경에서 원주방향에 비해 길이방향으로 더 큰 영향을 미친다고 판단된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년) 및 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구 센터사업의 연구비 일부지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] K. Kolowrocki, 2003, Asymptotic approach to reliability evaluation of large multi-state systems with application to piping transportation, *Int. J. Press. Vessels Pip.*, Vol. 80, pp. 59~73.
- [2] H. Wright, T. Oduyemi, H.R. Evans, 1991, The experimental behavior of double skin composite element, *J. Constr. Steel Res.*, Vol. 19, pp. 91~110.
- [3] J. L. Alcaraz, J. Gil-Sevillano, J. M. Martinez-Esnaola, 1996, A fracture condition based on the upper bound method for the extrusion of bimetallic tubes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 61, No. 3, pp. 265~274.
- [4] J. L. Alcaraz, J. Cil-sevillano, 1996, An analysis of the extrusion of Bimetallic tubes by numerical simulation, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 38, No. 2, pp. 157~173.
- [5] X. Gomez, J. Echeberria, 2003, Microstructure and mechanical properties of carbon steel A210-superalloy sanicro 28 bimetallic tubes, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 348, No. 1-2, pp. 180~191.
- [6] F. Liu, J. Zheng, P. Xu, M. Xu, Zhu, 2004, Forming mechanism of double layered tubes by internal hydraulic expansion, *Int. J. Press. Vessels Pip.*, Vol. 81, pp. 625~633.
- [7] M. Irfan, W. Chapman, 2009, Thermal stresses in radiant tubes due to axial, circumferential and radial temperature distributions, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 29, pp. 1913~1920.
- [8] J. H. Jang, S. O. Kwon, B. J. Kim, Y. H. Moon, 2008, Investigation on the hydroforming characteristics of Double-layered tubes, *Steel Res. Int.*, Vol. 79, pp. 371~376.