

## SUS304L 튜브의 U-Bending 성형공정에 관한 해석적·실험적 연구

김유범<sup>1</sup> · 강범수<sup>2</sup> · 구태완<sup>#</sup>

### Numerical and Experimental Study of U-Bending of SUS304L Heat Transfer Tubes

Y. B. Kim, B. S. Kang, T. W. Ku

(Received March 18, 2014 / Revised July 23, 2014 / Accepted July 31, 2014)

#### Abstract

As a major type of heat exchanger, the steam generator (SG) produces steam from heat energy of a nuclear power plant reactor. The steam produced by the steam generator flows into a turbine, and plays an important role in electric power generation. The heat transfer tubes in the steam generator consist of approximately 10,000 U-shaped tubes, which perform a structural role and act as thermal boundaries. The heat transfer tubes conduct the thermal energy between the primary coolant (about 320 °C, 157kgf/cm<sup>2</sup>) obtained from the reactor and the secondary coolant (about 260 °C, 60 kgf/cm<sup>2</sup>) as part of the secondary system. Recently, the heat transfer tubes in the steam generator of the pressurized water reactor (PWR) are primarily produced from Alloy 600 and Alloy 690 seamless tubes. As a pilot study to find process parameters for the cold U-bending process using rotary draw bending, numerical and experimental investigations were conducted to produce U-shaped tubes from long straight SUS304L seamless tubes. 3D finite element simulations were run using ABAQUS Explicit with consideration of the elastic recovery. The process parameters studied were the angular speed, the operation period and the bending angle. Experimental verifications were conducted to insure the suitability of the final U-shaped configurations with respect to both ovality and wall thickness.

**Key Words** : Rotary Draw Bending Process, Heat Transfer Tube, U-Shaped Tube, Ovality

#### 1. 서 론

국내에서 운영되는 대부분의 원자력발전소는 가압경수형 원자로(PWR, Pressurized Water Reactor)를 채택하고 있으며, 가압 경수형 원자로는 원자로 내부에서 1 차 냉각수(Primary Coolant)의 상태변화가 발생하지 않기 때문에 터빈 및 발전기를 구동시키기 위한 고온·고압의 건증기(Dried Steam)를 얻기 위한 증기발생기(SG, Steam Generator)가 필수적이다. 가압 경수형 원자로 내부에서 핵분열에 의해 발생된 고

온의 열이 1 차 냉각수를 약 320°C 및 약 157kgf/cm<sup>2</sup> 수준으로 가열·가압하게 되며, 이후 1 차 냉각수는 증기발생기의 전열관(Heat Transfer Tube) 내부로 유입된다. 고온·고압의 1 차 냉각수는 전열관 외부에 존재하는 2 차 냉각수(Secondary Coolant)와 전열관을 경계로 열교환을 통해 수증기로 상태 변화가 일어나고, 증기발생기 상부의 습분분리기를 거쳐 터빈 계통으로 이송된다. 이와 같이 전열관은 증기발생기 내부에서 직접적인 열교환이 이루어지는 일종의 열교환 경계이다.

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

# Corresponding Author : ERC of Innovative Technology on Advanced Forming, Pusan National University, E-mail: longtw@pusan.ac.kr

증기발생기의 전열관은 다양한 굽힘 반경을 가지고 있으며, 설치 위치 및 배열에 따라 U형과 L형의 형상을 가지게 된다. 이러한 전열관의 성형에는 로터리 드로우 벤딩(Rotary Draw Bending), 롤 벤딩(Roll Bending) 그리고 램 벤딩(Ram Bending) 등의 공정이 적용 가능하며, 굽힘 반경이 작은 경우에는 로터리 드로우 벤딩 공정이 주로 이용된다[1,2].

180.0°로 굽혀진 튜브를 얻기 위한 주요 공정변수는 디스크 회전각 및 공정시간(Bending Duration)이 고려되었다. 본 연구에서는 SUS304L 직관 튜브를 이용한 U형 굽힘(U-Bending) 공정에 대해 탄성회복이 고려된 유한요소 해석을 ABAQUS Explicit를 이용하여 수행하였다. 또한, 로터리 드로우 벤딩 장치를 이용한 실험을 병행하였으며, 해석 결과들을 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 로터리 드로우 벤딩과 전열관

### 2.1 로터리 드로우 벤딩

본 연구에서 사용되는 로터리 드로우 벤딩 장치의 주요 구성품을 Fig. 1에 나타내었다. 클램프(Clamp)는 초기에 튜브 가이드(Tube Guide)에 접한 상태에서 인입된 튜브를 고정시킨 상태로 로터리 드로우 디스크의 외부 궤적을 따라 회전하게 되며, 이를 통해 튜브를 굽히는 기능을 수행한다. Fig. 1에서의 로터리 드로우 디스크는 튜브가 직접적으로 접촉함에 따른 굽힘 공정에서의 압축응력 및 변형에 의한 표면 결함을 방지하기 위해 금속재질이 아닌 압축강도가 상당히 높은 MC Nylon 소재를 적용하는 것이 일반적이다.

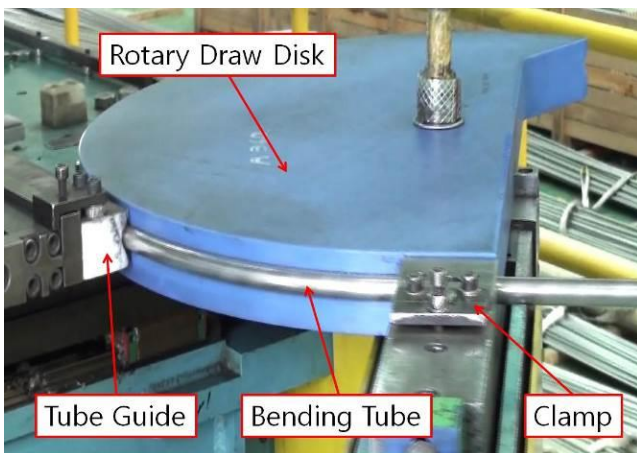


Fig. 1 Rotary draw bending apparatus

### 2.2 증기발생기용 전열관

증기발생기용 전열관은 1차 냉각수와 2차 냉각수 사이의 열교환이 이루어지는 열경계 기능을 담당하며, 1차 계통내 방사능 물질의 외부 유출을 차단하는 부수적인 기능도 가지고 있다. 증기발생기에는 약 10,000여개 이상의 전열관이 사용되며, 이들 중에서 최내측에 배치되는 U형의 전열관은 굽힘반경이 76.20mm이며, 최외측에 배열되는 U형 전열관의 굽힘 반경은 279.40mm이다. 전열관 재료로 SUS304L 튜브가 사용되었으나, 장기간 운용에 따른 부식과 균열 등의 결함이 발생할 수 있음이 보고됨에 따라 최근에는 Alloy 600 혹은 Alloy 690 소재로 교체되는 추세이다[3-4].

본 연구에서는 SUS304L 튜브를 이용한 U형 굽힘 공정에서의 주요 공정변수를 도출하였다. 다양한 U형의 전열관들 중에서 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 76.20mm의 최소 굽힘 반경을 가지는 경우에 대한 해석적 및 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 SUS304L 튜브의 외경은 15.88mm이고, 내경은 12.786mm이며, 두께는 1.547mm이다. 유한요소 해석에 적용되는 SUS304L 튜브의 재료 특성을 확보하기 위해서 ASTM E8/E8M과 ASTM B167-11에 제시된 규격에 따라 튜브 인장시험 시편을 제작하였으며, 동적 재료시험기인 Instron 8516을 이용하여 단순인장시험을 수행하였다. 이로부터 얻어진 응력-변형률 선도를 Fig. 3에 나타내었으며, Table 1에 세부적인 단순인장시험 결과를 요약하였다.

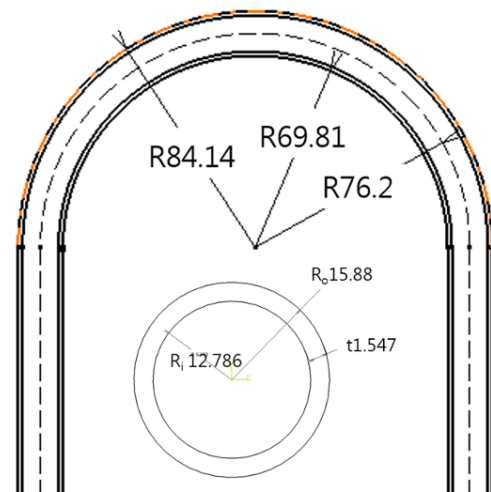


Fig. 2 Schematic view of U-shaped heat transfer tube with bending radius of 76.20mm (unit: mm)

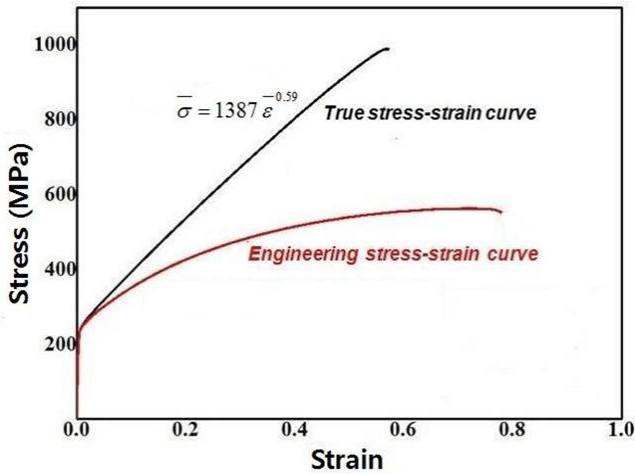


Fig. 3 Stress-strain curves of SUS304L tube

Table 1 Mechanical properties of SUS304L tube

Properties	Unit	Value	
Young's Modulus	GPa	203	
Yield Strength	MPa	244	
Ultimate Strength	MPa	563	
Poisson's Ratio	-	0.3	
Density	kg/m <sup>3</sup>	7,830	
Flow Stress Law	K	MPa	1,387
	n	-	0.59

### 3. 로터리 드로우 벤딩 공정

#### 3.1 유한요소 모델

본 연구에서는 로터리 드로우 벤딩 공정을 이용하여 SUS304L 튜브를 180° 굽혀진 전열관으로 성형하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 앞서 Fig. 1에 제시된 로터리 드로우 벤딩 장치와 성형 메커니즘을 고려하여 Fig. 4와 같은 유한요소 해석 모델을 구성하였다. 유한요소 해석 모델은 Fig. 2에서와 같이 반경이 76.20mm인 회전 가능한 로터리 드로우 디스크와 튜브가 일정하게 인입되도록 튜브를 지지하는 튜브 가이드, 그리고 인입된 튜브를 고정하여 디스크의 원주 궤적을 따라 움직이는 클램프(Clamp)를 3차원 4절점 강체 쉘(Shell) 요소로 모델링하고, 성형 소재인 SUS304L 튜브는 8절점 육면체 요소

(C3D8R)를 이용하여 튜브의 두께 방향으로 3층(3 Layers) 구조로 모델링 하였다. 유한요소 해석 수행을 위해 초기 공정변수로는 14.5초의 소요 공정시간, 금형과 소재 간의 마찰계수 0.1, 그리고 목표 굽힘 각도인 180.0°를 얻기 위해 탄성회복을 고려한 디스크 회전각을 181.0°로 설정하였고, 디스크의 원주를 고려하여 튜브의 길이는 충분히 길게(약 500mm) 가정하였다[5, 6].

#### 3.2 유한요소 해석 및 탄성회복 거동

탄성회복(Elastic Recovery)을 고려한 굽힘 반경이 76.20mm인 SUS304L 전열관 성형 공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 디스크 회전각이 181.0°인 경우 성형해석과 탄성회복 공정을 수행한 후의 유효응력 분포를 Fig. 5에 제시하였다. 최대 유효응력은 튜브의 굽힘이 시작되는 부위에서 약 625MPa로 나타났으며, 탄성회복 후의 최대 유효응력도 약 360MPa 수준으로 동일한 위치에서 발생함을 알 수 있었다. 또한, 탄성회복 공정 이후 탄성회복량을 조사해 본 결과, Fig. 6과 같이 약 5.48°의 탄성회복이 발생하는 것으로 예측되었고, 이는 초기 굽힘각 측면에서 과도굽힘(Over-bending)이 필요하다는 것을 의미한다. 이를 바탕으로 최종 목적형상에 도달할 수 있도록 디스크 회전각을 변경할 경우 탄성회복에 따른 목표 굽힘각을 보정할 수 있을 것으로 판단되었다.

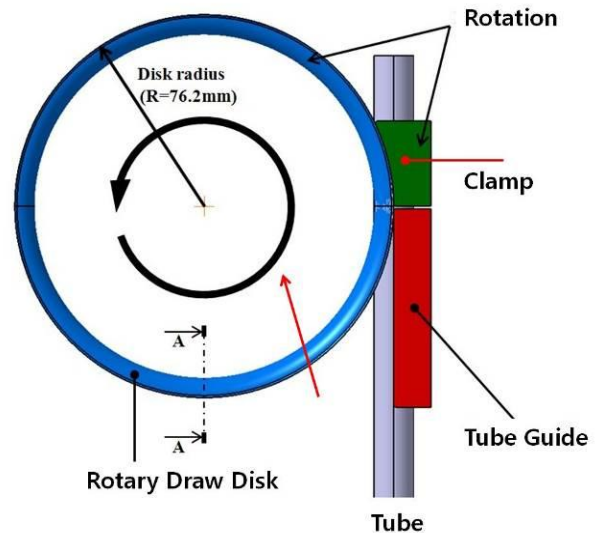


Fig. 4 FE model for cold U-bending process using rotary draw bending apparatus

3.3 탄성회복을 고려한 유한요소 재해석

회전 디스크의 회전각이 181.0°일 때 5.48°의 탄성회복이 발생하는 것으로 예측되었으며, 최종형상이 튜브의 양쪽 끝단이 평행(180.0°)을 이루지 못함에 따라 초기 디스크 회전각의 보정이 필요하다. 따라서 탄성회복량을 고려하여 초기 디스크 회전각을 수정하였고 성형 및 탄성회복 해석 과정을 재수행하였다. 즉, 튜브의 양쪽 끝단이 평행한 목적형상을 얻을 때까지 일련의 유한요소 해석을 반복하였다. 초기 디스크 회전각을 185.0°, 186.0°로 변경하여 유한요소 해석을 수행하였고, 그 외의 나머지 조건은 앞서의 해석 조건과 동일하게 부여하였다.

Table 2는 SUS304L 튜브의 180.0° 굽힘 공정에서 디스크 회전각에 따른 탄성회복량과 최종 굽힘각을

나타낸 것이다. 디스크 회전각이 185.0°일 경우 5.61°의 탄성회복으로 인해 튜브 양 끝이 이루는 각도가 179.39°, 디스크 회전각이 186.0°일 때 약 5.90°의 탄성회복에 의해 튜브 양쪽 끝단이 이루는 각도를 180.10°로 예측하였다. 탄성회복을 고려한 유한요소 해석 결과, 목적형상인 180.0° U자형 전열관을 얻을 수 있는 디스크 회전각을 186.0°로 예측할 수 있고, Fig. 7과 Fig. 8은 탄성회복을 고려한 반복적인 유한요소 해석으로 얻어낸 디스크 회전각에 대한 유효응력분포와 탄성회복량을 나타낸 것이다. 유효응력분포는 181.0°의 디스크 회전각과 유사한 경향을 보이며, 굽힘 직후의 최대 유효응력 약 631MPa, 탄성회복 이후 최대 유효응력 350MPa이 굽힘이 시작되는 부분에서 발생함을 알 수 있었다.

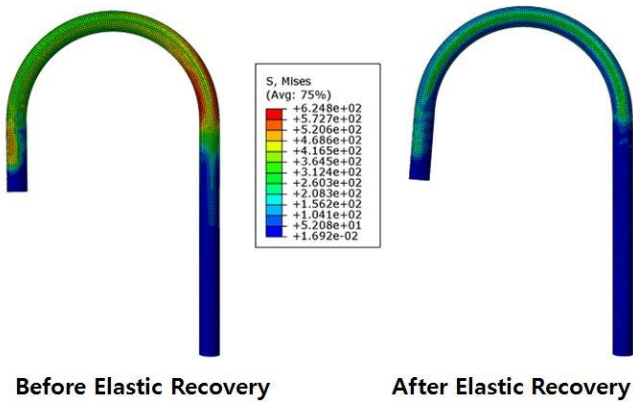


Fig. 5 FE simulation results of U-bending process with bending angle 181.0°

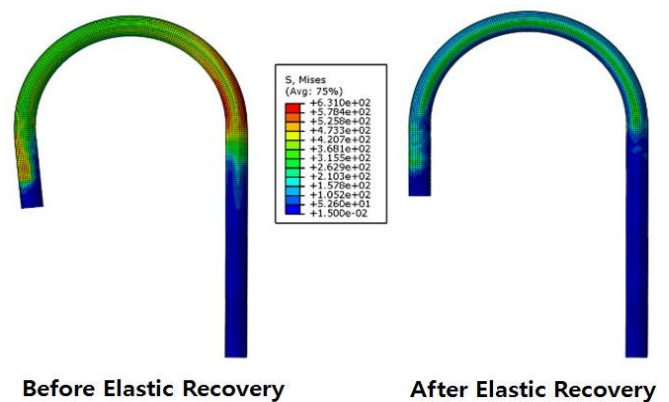


Fig. 7 FE simulation results of U-bending process with bending angle 186.0°

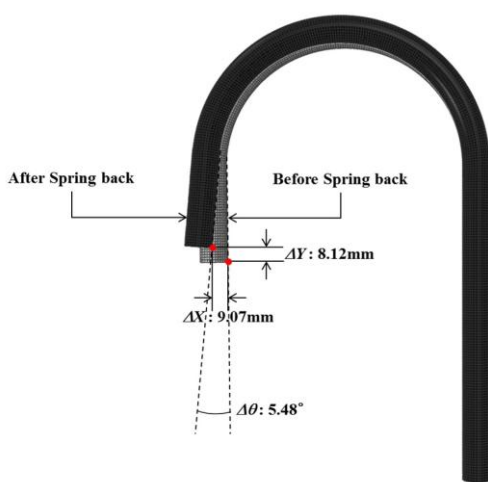


Fig. 6 Predicted elastic recovery amount after U-bending process with bending angle 181.0°

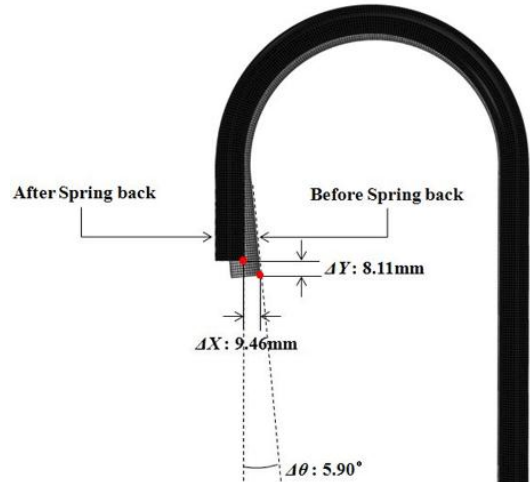


Fig. 8 Predicted elastic recovery amount after U-bending process with bending angle 186.0°

**Table 2 Bending Angle and Elastic Recovery Amount on Initial Rotation Angle**

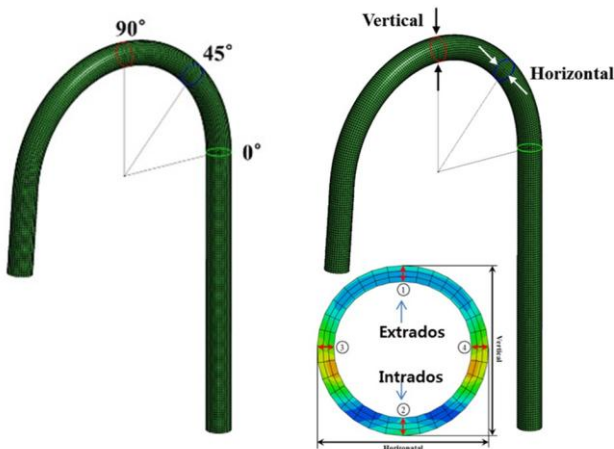
Initial Rotation Angle	Elastic Recovery Amount	Final Bending Angle
181.0°	5.48°	175.52°
185.0°	5.61°	179.39°
186.0°	5.90°	180.10°

### 4. 단면형상 검토

#### 4.1 두께 변화

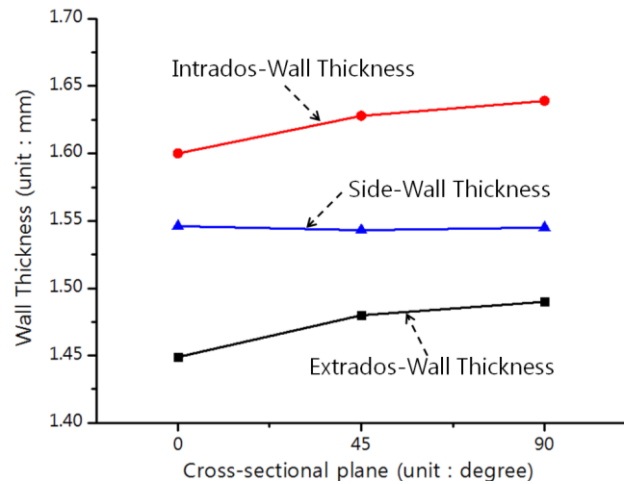
튜브를 180.0° 굽혀진 곡관으로 성형할 경우에 튜브 단면상의 중립축이 이동하거나 내경측에서 과도한 압축에 의해 좌굴 현상이 나타날 수 있다. 과도한 변형은 전열관 운용에 결함을 발생시킬 수 있어 전열관 성형에는 벽 두께나 단면의 형상변화가 두께와 직경의 비가 약 3% 내가 되도록 이루어져야 한다[3,7]. U형 굽힘 성형이 적절히 이루어졌는지 확인하기 위하여 초기 디스크 회전각을 186.0°로 설정하였을 때의 성형 후 단면 형상을 Fig. 9에서와 같이 수평(Horizontal)과 수직(Vertical) 방향의 외경, 굽힘부의 외경측(Extrados) 및 내경측(Intrados)에서의 벽 두께와 측면부(Side-Wall)의 벽 두께 등으로 정의하여 조사하였다. 탄성회복을 고려한 해석 결과에 대해 Fig. 9와 같이 굽힘이 시작되는 지점을 기준으로 0°, 45°, 90° 위치에서 단면 형상 정보를 조사하였다.

두께 변형 양상은 굽힘부 외경측에서는 인장 변

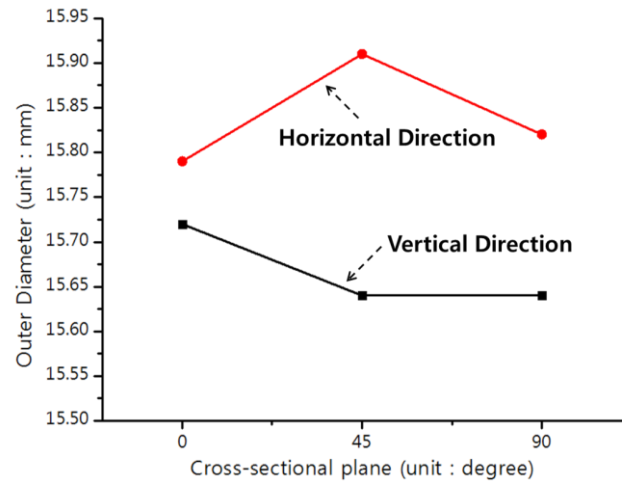


**Fig. 9 Defined cross-sectional planes of 180.0° U-shaped SUS304L tube**

형에 의해 두께가 다소 감소하는 경향을 보이고, 내경측에서는 압축 변형에 의해 두께가 약간 증가함을 알 수 있었다[8]. 각 위치에서 단면의 두께변화를 Fig. 10에 도시하였다. 굽힘 부의 외경측과 내경측의 벽 두께는 초기두께(1.547mm)를 기준으로 유사한 경향성을 보이고 있음을 알 수 있다. 굽힘부의 외경측에서 -0.067mm ~ -0.048mm 수준의 두께 감소와 내경측에서 0.053mm ~ 0.092mm 범위의 두께 증가가 발생하는 것으로 조사되었다. 두께 변화가 가장 두드러지는 단면을 살펴보면, 외경측의 경우 45° 단면에서 두께 감소가 -0.067mm, 내경측의 경우 90° 단면



**Fig.10 Wall thickness of SUS304L heat transfer tube along position on bent tube**



**Fig.11 Diameter of SUS304L heat transfer tube along position on bent tube**

에서 두께 증가가 0.092mm 정도 발생하는 것으로 예측되었다. 반면에 측면부의 벽 두께는 변화가 거의 없었다.

#### 4.2 성형 후 난형도(Ovality)

전열관 U형 굽힘 성형과정에서는 두께 변화와 더불어 단면이 형상이 변하게 된다. 성형 전 정원(Circle)이었던 단면이 성형공정을 거치면서 중립축(Neutral Axis)이 이동하게 되어 외경측의 소재가 내경측으로 이동함에 따라 타원에 가까운 단면 형상을 가지게 된다. 이러한 단면 형상 변화의 정도를 난형도(Ovality)라고 하며, 단면의 중점을 기준으로 수직과 수평방향에서의 외경변화를 통해 확인 할 수 있다. Fig. 11과 Table 3은 Fig. 9에서 정의된 0°, 45°, 90° 단면에서 수직 및 수평 방향으로의 외경변화를 나타낸 것이다. Fig. 11에서의 유한요소 해석을 통해 얻은 결과를 살펴보면, 수직 방향에서 외경은 감소하는 경향을 보이고, 수평 방향의 외경은 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 수직 방향과 수평 방향의 외경 변화에 의해 성형 전의 초기 원형 단면과는 다른 형상을 보인다는 것을 의미한다. 이를 확인하기 위해 디스크 회전각이 186.0°인 굽힘 공정 및 탄성회복을 고려한 후의 변형 형상을 성형 전·후 외경에 대해서 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 수직방향의 외경은 초기 형상과 비교할 경우, Table 3에서와 같이 0.16mm~0.24mm의 외경감소를 보이고 있음을 알 수 있고 이는 초기 외경의 약 1.01% ~ 1.51%에 해당하는 수치이다. -0.09mm~0.03mm의 외경 변화가 수평방향에서 보이는 것으로 나타났으며, 이는 초기 외경의 약 0.19%~0.57%에 해당하는 값으로 수직방향에 비해 상대적으로 적은 외경 변화이다. 이는 U형 굽힘 공정이 진행되면서 굽힘부의

외경측이 인장변형에 의해 중립축이 내경측으로 이동하면서 수직방향의 외경이 수평방향에서 보다 상대적으로 더 큰 변형이 발생하는 것이라 판단할 수 있다. 앞서 예측하였던 두께와 직경의 비를 계산하면 약 9%의 비를 얻을 수 있는데, 이 수치는 허용 가능한 두께와 직경의 비인 3%를 넘는 수치이므로 형상변화를 감소시킬 수 있도록 튜브 내부의 맨드렐(Mandrel)의 적용을 고려하여야 한다.

### 5. U-bending 실험 및 결과

SUS304L 튜브를 이용하여 180.0° 굽혀진 곡관을 성형하기 위한 유한요소 해석결과에 있어서, 굽힘 각도와 수직 및 수평 방향의 외경, 그리고 두께 분포를 검증하기 위해 Fig. 1에 제시된 로터리 드로우 벤딩 장치를 이용한 성형실험을 수행하였다. 본 실험에서 튜브는 외경이 15.88mm, 내경이 12.786mm 그리고 두께가 1.547mm로 유한요소 모델링과 해석에 사용된 것과 동일한 규격을 가지는 튜브를 사용하였다. 180.0° 굽혀진 U형의 곡관 성형을 위해 디스크 회전각을 181.0°, 185.0° 그리고 186.0° 등 총 3가지 경우로 설정하여 실험을 수행하였다. 각각의 디스크 회전각에 대한 실험 조건과 결과들을 Table 4와 Fig. 13에 나타내었다. 실험을 통해 측정된 결과들을 살펴보면, 각 측정 위치에서(Fig. 11 참조)에서 단면 변화 추세는 해석적 결과와 유사한 경향을 보이고 있으나, Fig. 14에서와 같이 45°와 90° 단면 부위에서는 유한요소 해석결과와 다소 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있었고, 전반적으로 곡관의 치수 측정 위치에 따른 오차의 추세는 해석결과와 유사한 경향성을 갖는 것으로 나타났다. 실험결과를 세부적으로 살펴보면, 수직방향의 외경은 45° 단면에서 최대 3.53%(약 0.56mm)가 감소하며 내경 두께는 45° 및 90° 단면에서 최대 9.89%(약 0.153mm) 증가하는 것으로 조사되었다. 두께 분포 측면에서 해석 및 실험 결과를 살펴보면 0.1mm(약 6.46%)의 두께 차이가 90° 단면의 내경측에서 나타나는 것으로 파악되었으며 외경측에서는 최대 0.4mm(약 2.52%)의 외경 차이가 90° 단면에서 발생함을 파악하였다. 이러한 실험결과와 앞서 제시하였던 해석결과를 비교하면, 실험에서의 변화가 해석에서의 변화보다 다소 큰 값을 보이지만, 전체적인 변형 거동에서는 내경측 두께를 제외한 나머지 요소에서 유사성을 확인할 수

**Table 3 Summary on predicted outer diameter on each cross-sectional plane for ovality of SUS304L tube**

Plane	Diameter(mm)		
	Initial	Vertical	Horizontal
0°	15.88	15.72	15.79
45°	15.88	15.64	15.91
90°	15.88	15.64	15.82

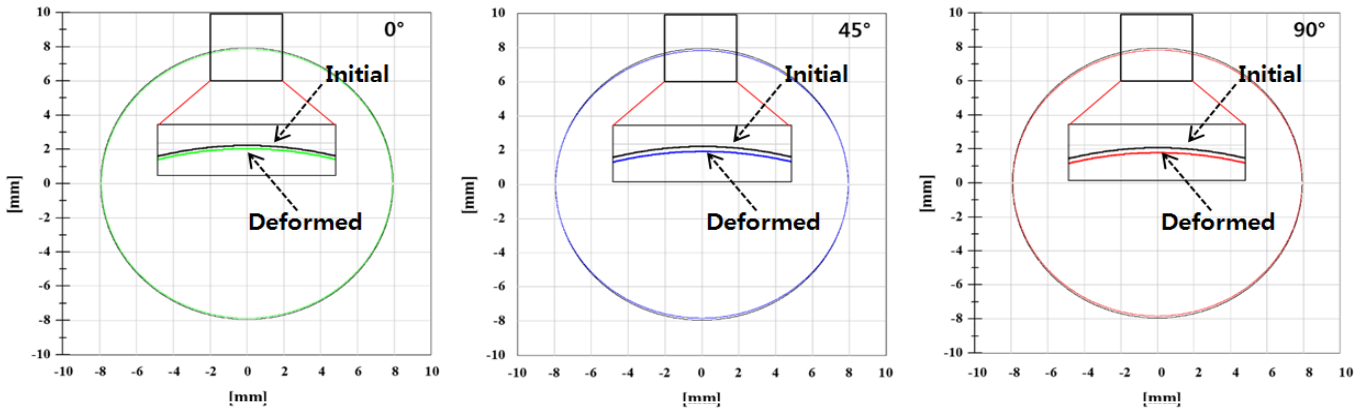


Fig.12 Geometric comparison of outer diameter between initial and deformed tube

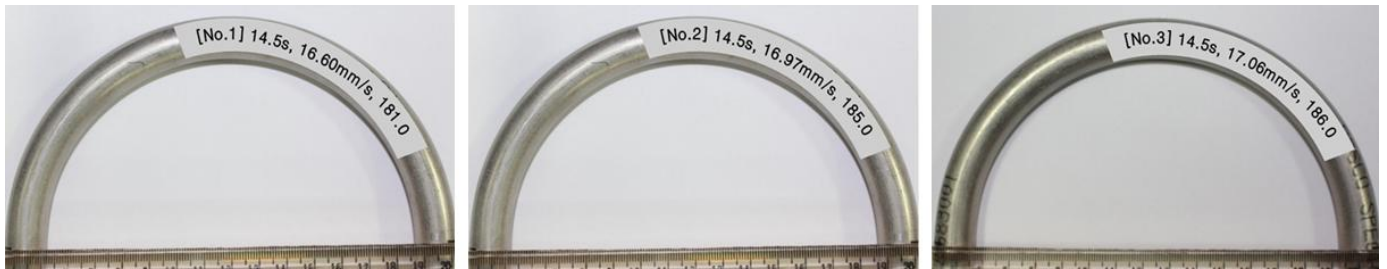


Fig.13 Experimental results of U-bending process with various process parameters

Table 4 Summary of experimental results of U-bending using SUS304L tube

No.	Process Parameters				OD (Outer Diameter, mm)									
	Angular Speed (mm/s)	Time (s)	Angle (°)	Initial OD (mm)	0°		45°		90°		135°		180°	
					Value	Error	Value	Error	Value	Error	Value	Error	Value	Error
1	16.60	14.5	181.0	15.88	15.66	0.22	15.32	0.56	15.32	0.56	15.36	0.52	15.70	0.18
2	16.97	14.5	185.0	15.88	15.64	0.24	15.29	0.59	15.28	0.60	15.28	0.60	15.59	0.29
3	17.06	14.5	186.0	15.88	15.63	0.25	15.27	0.61	15.25	0.63	15.24	0.64	15.62	0.26

있었다. 해석과 실험의 차이는 디스크가 공정 중에 압축되었다가 다시 원 형상으로 돌아오는 과정에서 튜브에 힘을 가해 직경이나 두께의 변화가 생긴 것으로 추측할 수 있고, 또한 실험에 사용되었던 튜브의 불균일한 측정오차에 의한 것으로 추측할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구는 가압 경수형 원자력 발전소 증기발생기의 주요 부품인 전열관의 U형 굽힘 성형을 위한

연구로써, 외경이 15.88mm이고 두께가 1.547mm인 SUS304L 튜브를 사용하였다. SUS304L 튜브를 로터리 드로우 벤딩 공정을 이용하여 굽힘 반경이 76.2mm이고 회전각이 180.0°인 전열관으로 성형하기 위한 공정변수를 도출하고 해석과 실험을 수행하였다. 유한요소 해석을 위해 ABAQUS Explicit를 이용하였으며, 성형공정 해석과 탄성회복에 따른 유효응력 분포를 확인하였다. 또한 탄성회복을 고려한 반복적인 유한요소 해석을 통해 180.0° U형 전열관을 얻을 수 있는 최적 디스크 회전각을 찾아내었고, 단면형상 변화를 조사하였다. 또한, 전열관 성형 실험을

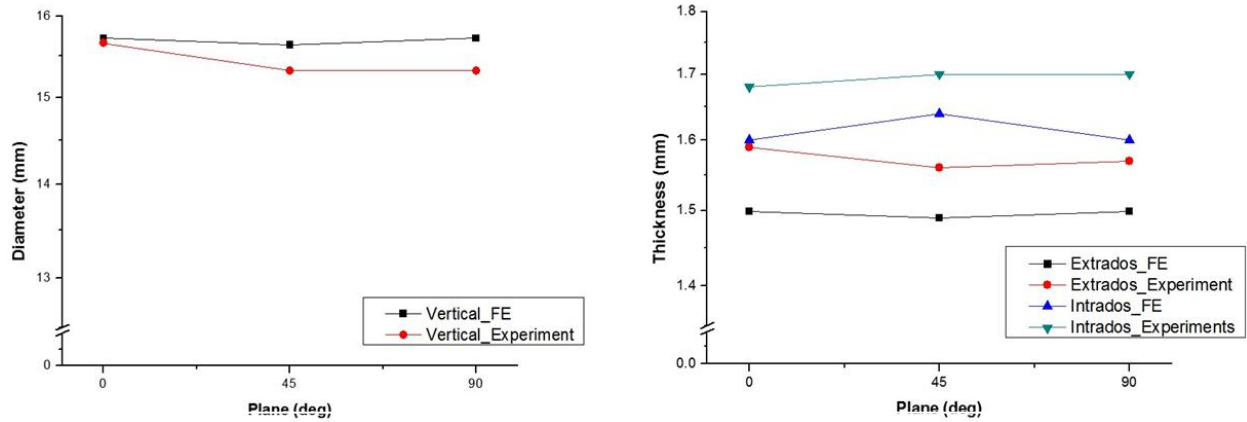


Fig.14 Comparison between numerical and experimental results of SUS304L U-bending tube

수행하여 해석결과와 비교하였다. 본 연구 에서 도 출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 탄성회복이 고려된 180.0°의 최종 굽힘각을 얻기 위해 디스크 회전각이 181.0°, 185.0° 및 186.0°인 경우의 유한요소 해석을 수행한 결과, 디스크 회전각이 186.0°일 때 목적형상과 0.1°의 오차 범위 내에서 거의 일치하는 결과를 보였다.

(2) 디스크 회전각이 186.0°인 경우의 유한요소 해석 결과로부터 굽힘 시작점을 기준으로 0°, 45° 및 90° 위치에서 단면의 형상, 벽 두께, 수직 및 수평 방향에서의 직경 등을 확인하였다.

(3) 유한요소 해석과 실험 결과들을 종합하여 살펴보면, 몇몇 항목에서 다소 차이가 있으나 전반적인 변형 거동은 유사한 것으로 나타났다.

(4) U-bending 공정에 대한 해석적·실험적 접근을 통해 디스크 회전각이 중요한 공정 변수임을 확인할 수 있었으며, 유한요소 해석과 실험을 통해 공정 변수에 대한 영향을 검토하였다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업(No. 20124030200020)과 한국연구재단의 선도연구센터(NRF-2012R1A5A1048294)의 지원을 통해 수행된 연구 결과입니다.

## REFERENCES

[1] H. S. Jeong, J. W. Jeon, M. Y. Ha, J. R. Cho, 2012, Finite Element Analysis for Inconel 625 Fine Tube

- Bending to Predict Deformation Characteristics, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 8, pp. 1395~1401.
- [2] J. B. Yang, B. H. Jeon, S. I. Oh, 2000, Tube Bending Analysis for Hydroforming Process, Trans. Mater. Process., Vol. 9, No. 3, pp. 249~256.
- [3] H. Naoi, N. Kitakami, M. Mizumura, Y. Kuriyama, 2008, Study of Intrusion Bending for Steel Tubes with Thin Wall Thickness, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 17, No. 3, pp. 376~381.
- [4] A. V. Kale, H. T. Thorat, 2009, Effect of Precompression on Ovality of Pipe after Bending, J. Pressure Vessel Technol., Vol. 131, No. 1, Article No. 011207.
- [5] E. Daxin, Z. Guan, J. Chen, 2012, Influence of Additional Tensile Force on Springback of Tube under Rotary Draw Bending, J. Mater. Eng. Perform, Vol. 21, pp. 2316~2322.
- [6] H. S. Jeong, M. Y. Ha, J. R. Cho, 2012, Theoretical and FE Analysis for Inconel 625 Fine Tube Bending to Predict Spring-back, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 12, pp. 2143~2148.
- [7] W. G. Kim, J. S. Jang, I. H. Kuk, J. W. Joo, S. C. Kim, 1998, Geometric Variations and Surface Residual Stresses in U-Bending Processes of an UNS N06690 Row-1 Heat Exchanger Tubes, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 22, No. 1, pp.238~246.
- [8] T. W. Ku, J. H. Cha, Y. B. Kim, O. K. Kwak, W. S. Kim, B. S. Kang, 2014, A Study on Process Parameters for Cold U-bending of SUS304L Heat Transfer Tube using Rotary Draw Bending, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 27, No. 10, pp. 3053~3061.