

연속 3 차원 튜브 벤딩장치 개발에 관한 연구

문현준[†] · 김정섭* · 김종두**

(2008 년 4 월 4 일 접수, 2008 년 5 월 22 일 수정, 2008 년 6 월 4 일 심사완료)

A Study on the Development of the Continuous 3D Tube Bending Machine

Hyeon Jun Mun, Chung Sup Kim and Jong Doo Kim

Key Words : Bending Machine (벤딩장치), Former (포머), Springback (스프링백), Tube Bending (튜브 벤딩), 3D Bender (3 차원 벤더), 3D Measurement (3 차원 측정기)

Abstract

A continuous 3D tube bending machine has been developed for industrial boiler panel production. The machine consists of a main bender, a sub bender, a side bender, tube feeding rollers and control system that includes data management system. Tube position is controlled by a numerical control system. The bending former can be easily replaced according to the shape of bending form. Reduction of working time and improvement of production capacity from the practice have been achieved by bending a long tube in the machine developed.

기호설명

- θ : 벤딩 각도 (°)
- θ' : 벤딩 후 스프링백에 의한 벤딩각도 (°)
- R : 벤딩 반경 (mm)
- R' : 벤딩 후 스프링백에 의한 벤딩반경(mm)
- S_f : 고정 스프링백 량 (°)
- S_p : 비례 스프링백 량 (%)
- e : 신장률 (%)

1. 서 론

산업 발전으로 전력수요가 증가함에 따라 대형발전설비의 요구가 커지고 있으며, 이에 따라

산업용 보일러의 수요가 증가되고 있다. 발전설비의 보일러는 가열을 위한 버너와 버너주변을 둘러싸고 있는 보일러 판넬 등으로 구성되어 있다.

일반적으로 벤딩(bending)작업은 작업부재의 길이가 긴 경우, 벤딩시 공간점유가 많고 부재를 다루기 힘들기 때문에 작업의 편리성을 위하여 다루기 쉬운 길이로 튜브(tube)를 절단하여 벤딩하며, 각 벤딩 튜브들은 보일러 판넬로 제작되기 위해 연결 용접작업 공정을 거친다. 벤딩작업은 절단된 짧은 부재를 포머(former)에 의해 먼저 2차원 형상으로 벤딩하고, 벤딩된 튜브를 수작업에 의해 3차원으로 벤딩하여 요구되는 형상으로 제작하게 된다. 이어서 벤딩된 부재는 제품의 정도 측정을 위해 공장바닥에 마킹(marking)된 현도와 벤딩 부위를 체크하고, 측정과 수정작업을 반복하여 교정하게 되며, 전체 벤딩부재를 가조립하여 버너부와외 간섭여부를 체크하게 된다.

이렇게 짧게 절단한 부재를 이용한 제작공정은 중간의 공정이 많아짐으로 인해 작업공수가 많이 투입되고, 수작업과 다량의 튜브 맞대기 용접부에

[†] 책임저자, 회원, 현대중공업 산업기술연구소
E-mail : joymoon@hhi.co.kr
TEL : (052)202-3213 FAX : (052)250-9583

* 현대중공업 산업기술연구소

** 현대중공업 공사관리부문



Fig. 1 Appearance of the boiler panel

대한 용접작업 및 측정 등으로 인해 생산성이 낮다는 문제점을 가지고 있었다.

장치에 있어서는 개발된 여러 종류의 많은 벤딩 장치가 정확한 위치로 제어되는 수치제어 방식을 채택하고 있으나, 좌우, 상하의 공간적인 장소의 제약사항 때문에 길이가 짧은 단편부재만을 벤딩 대상으로 하고 있고, 길이가 20m가 되는 긴부재를 연속적으로 3차원 벤딩하는 장치는 아직 없었다.^(1~4)

본 연구에서는 이와 같이 공간상의 제약이 있는 벤딩공정에서 단편부재 작업에 따른 공정의 복잡성과 작업공수가 많이 투입되는 문제를 개선하고, 길이가 긴부재를 하나의 작업공정내에서 벤딩 및 측정작업을 할 수 있는 연속 3차원 벤딩장치를 개발하였으며, 개발된 장치를 통해 제품의 벤딩특성 평가도 더불어 실시하였다.

2. 적용 부재 및 벤딩 이론

2.1 적용 대상

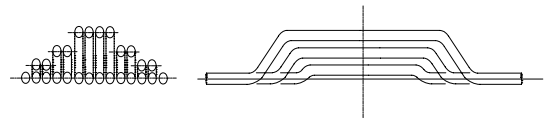
아래 그림 Fig. 1은 버너가 부착되는 버너 주변부의 보일러 판넬이다. 하나의 판넬에 버너가 주로 4개에서 6개 정도가 부착되며, 버너주변의 튜브는 벤딩되어 조립된다.

산업용 보일러 판넬에 주로 사용되는 튜브의 부재사양은 튜브 외경이 38.1~76.2mm, 튜브 두께는 4.0~9.0mm, 튜브 길이는 2,000~20,000mm이고, 벤딩 반경 R은 65~1,000mm까지 적용되고 있다.

아래 Fig. 2의 (a)는 종전의 길이가 짧은 단편 부재를 사용하여 버너 설치부 주변의 튜브를 조립하는 모습을 보여주고 있으며, Fig. 2의 (b)는 조립되는 부재의 단면도를 나타내고 있다. 이렇게 조립된 튜브들은 각 부분별 튜브들 간의 용접작업을 거쳐 보일러 판넬로 조립하게 된다.



(a) Assemble work of the short tube pieces.



(b) Arrange schematic diagram of tube pieces

Fig. 2 Tube shape of a burner circumference

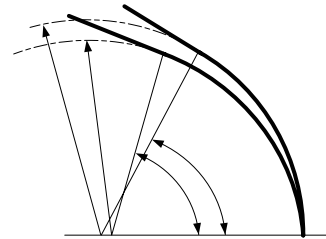


Fig. 3 Relation of the bending angle and radius by spring-back after bending

2.2 벤딩 이론

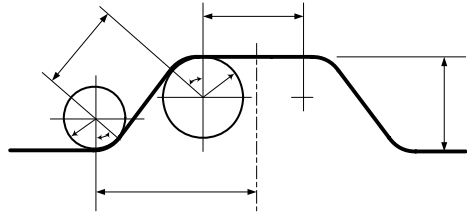
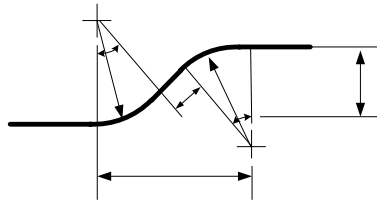
일정길이의 튜브를 반경 R로 θ 만큼 회전시켰다가 벤딩을 해제하게 되면, 튜브의 탄성적인 요소인 스프링백(springback)에 의해 벤딩된 튜브의 벤딩각도가 풀려지게 되며, 최종적으로 튜브는 반경 R'과 각도 θ' 를 가지게 된다.

Fig. 3에서 원주상 벤딩에 접하는 길이를 L이라 했을 때, 벤딩에 따른 신장은 적어서 무시되는 경우, L의 값은 벤딩 전후에도 같으며, 그 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\pi R\theta/180 = \pi R'\theta'/180 \quad (1)$$

튜브의 직경이나 두께 등의 물성에 따라 벤딩후의 각도 변화는 스프링백에 의하여 차이가 있다. 스프링백은 Fig. 4에서와 같이 고정 스프링백(fixed springback) S_f 와 비례 스프링백(proportion springback) S_p 로 나뉘어진다.

Table 1 Calculation of tube length for main, sub and side bending

	메인, 서브벤딩	사이드 벤딩
벤딩도		
Lm, Ls구간별 튜브 전체 길이	$Y_m = \pi R_1 \theta / 180 + B + \pi R_2 \theta / 180 + A/2$	$Y_s = 2\pi R \theta / 180 + D$
스프링백 및 신장률 적용 후 길이	$Y_m' = \pi R_1 \theta' (1-e/100) / 180 + B + \pi R_2 \theta' (1-e/100) / 180 + A/2$	$Y_s' = 2\pi R \theta' (1-e/100) / 180 + D$

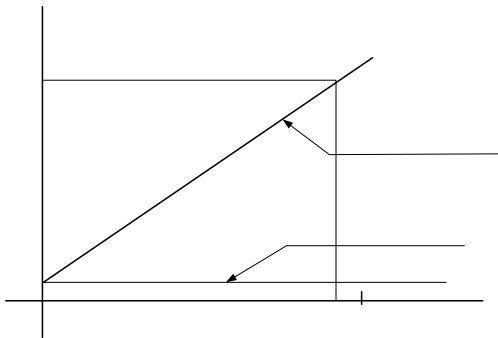


Fig. 4 Springback components

벤딩 뒤의 스프링백에 의한 각도 변화 $\Delta\theta$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\theta = \theta \cdot S_p / 100 + S_f \quad (2)$$

따라서 벤딩 뒤의 튜브의 각도 θ' 는

$$\theta' = \theta + \Delta\theta = \theta (1 + S_p / 100) + S_f \quad (3)$$

로 표현될 수 있다.

2.3 연속벤딩 길이

주어진 공간내에서 길이가 긴 튜브를 연속해서 벤딩하는 경우, 각 공정에서 정확한 벤딩을 위해서는 튜브의 길이 계산이 중요하다.

아래 Fig. 5는 버너주변의 연속되는 튜브의 벤딩 형상을 나타내고 있으며, 그 모양은 3차원 형상으로 이루어져 있다.

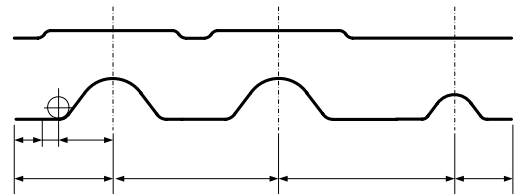


Fig. 5 Diagram of a continuous bended tube

연속벤딩의 순서는 Fig. 5의 아래부분 형상도와 같이 서브벤딩(sub bending)이나 메인벤딩(main bending)이 먼저 수행되고, 튜브를 90도 회전하여 메인벤딩 부위에 사이드벤딩(side bending)이 실시되면, Fig. 5에서 보여주는 것과 같은 형상으로 벤딩이 완료되게 된다.

각 벤딩 공정에서의 거리 구분라인은 벤딩의 중심점을 의미하며, 벤딩장치의 베드 위에서 척이 튜브를 물고 이동해야 하는 거리이다. 따라서 위와 같은 형상을 제작하기 위하여 벤딩장치에서 계산된 구간별 튜브의 총길이 Y_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_n = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \quad (4)$$

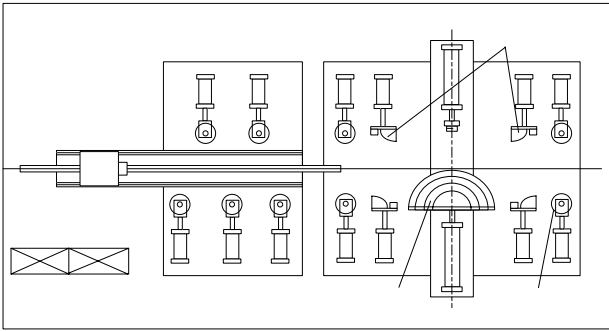
이때, Y_1 구간의 세부적인 튜브 총길이는 직선부 L_1 과 사이드벤딩 구간인 L_s 영역에서의 튜브길이 Y_s 및 메인벤딩 L_m 구간에서의 튜브길이 Y_m 의 합이다.

$$Y_1 = L_1 + Y_s + Y_m \quad (5)$$

B
R1
θ

Table 2 Case of the bending parameter

	Case	Result
R2	R2 1개	A = 0 사다리꼴
	R2 2개	
C	$C < R2$	B값 변화
	$C = R2$	
	$C > R2$	

**Fig. 6** Configuration diagram of the 3D bending machine

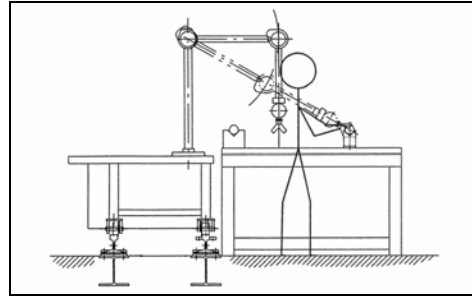
튜브 길이 계산에 있어서 각 경우의 벤딩에 대한 기본적인 튜브의 길이 계산식과 부재의 특성 스프링백 및 신장률이 고려된 총 튜브길이 산출방법을 Table 1에 나타내었다.

메인벤딩과 서브벤딩에서는 Table 2에서 보여주는 것과 같이 많은 경우의 수가 있으며, 각각의 조건에 의해 튜브 길이가 다르게 산출된다. 메인벤딩과 서브벤딩을 위한 R2 포머가 한개 있는 경우는 A의 거리값이 0으로서 벤딩 원이 하나가 존재하고, R2 포머가 두개 있는 경우는 튜브는 사다리꼴 형상이 된다. 포머의 밀어넣기량 C의 값에 따라서도 $C < R2$, $C = R2$, $C > R2$ 의 경우가 존재하며, 각 경우에 따라서도 튜브의 총길이가 다르게 산출된다. 사이드 벤딩은 메인벤딩 후에 90도 회전하여 이루어지므로 좌우 같은 반경의 포머를 가지고 있다.

3. 전체 장치시스템의 구성

3.1 3차원 연속 벤딩장치

전체장치의 구성은 메인벤더부, 서브벤더부, 사이드벤더부, 척(chuck)부, 제어반, 데이터관리반 이외에도 튜브 인입부, 벤딩된 튜브 이송롤러 정반, 등으로 구성되어 있으며, Fig. 6에서 개발된 벤딩장치의 개략도를 나타내었다.

**Fig. 7** 3D measurement system for long tube

튜브의 길이는 20m까지 연속적으로 벤딩이 가능하며, 수치제어에 의해 척에 물려진 튜브가 벤딩위치로 이송되는 방식이다. 각 포머는 본체 프레임과 분리되어 있으며, 요구되는 벤딩형상의 크기에 따라 쉽게 포머를 변경할 수 있는 구조로 제작되어 있다.

연속벤딩을 위한 기본적인 데이터 입력은 작업자가 터치스크린을 통해 직접 입력하도록 되어 있다. 데이터는 각 벤딩공정 간의 거리설정 이외에도, 벤딩 횟수, 관경, 두께 등의 기본데이터와 스프링백 량, 신장률 등의 데이터를 입력하여 보정된 데이터로서 벤딩을 수행하는 방식으로 되어 있다.

연속 벤딩공정은 인입부에 공급된 튜브를 척이 클램프하여 초기위치로 이동 세팅하고, 설정된 수치에 의해 자동 계산된 위치로 튜브를 이송하여 서브벤딩을 수행하게 된다. 이어지는 다음 위치에서 메인벤딩을 실시하고, 정지한 상태에서 튜브를 90도 회전시켜 사이드벤딩을 실시하게 되며, 설정된 값에 따라 메인벤딩과 사이드벤딩을 반복해서 작업하게 된다.

이렇게 튜브의 인입, 회전, 벤딩, 튜브 압출 및 척킹 등은 모두 유압실린더와 AC 서보모터에 의해 구동되고, 4축의 벤딩각도, 회전각도, 이송량 및 헤드 밀어넣기량은 모두 수치제어에 의해 제어된다.

3.2. 3차원 측정기

벤딩공정 뒤에 제품의 정도관리는 후공정의 작업관리를 위해서 반드시 필수적이다. 이전에는 벤딩된 부재를 기본형상이 마킹된 바닥에 두고 직접 눈금자나 실을 이용하여 실측하였으나, 이러한 불편한 점이 개선되어 개발된 3차원 측정기는 20m 길이까지 연속적으로 측정할 수 있다.

측정기의 측정정밀도는 0.01mm 이며, 벤딩형상의 측정은 설치된 측정정반 위에 부재를 클램프로 고정된 상태에서 작업자가 직접 연속적으로 제품



Fig. 8 Overview of the developed 3D bending machine

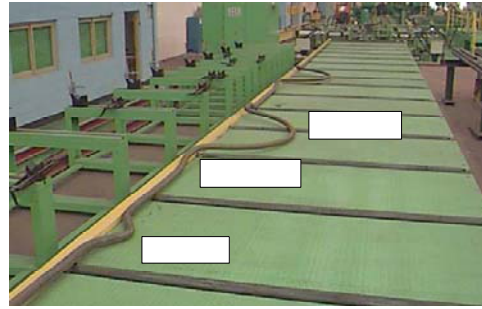


Fig. 9 Shape of the bended 3D tube

의 벤딩정도를 측정하게 된다.

측정된 벤딩 데이터는 YBC좌표 방식이나 XYZ 좌표 방식으로 표기되며, 필요시 데이터를 서로 전환하여 쉽게 파악할 수 있도록 되어 있다.

4. 적용시험 및 결과

개발된 3차원 연속 벤딩장치에 대해서 장치의 기본적인 동작특성 뿐만 아니라 벤딩특성 평가를 수행하였으며, 아래 Fig. 8은 개발된 3차원 연속 벤딩장치의 전체 외관 모습을 나타내고 있다.

벤딩특성 변수는 스프링백을 비롯하여 두께감소율, 타원율 등의 여러 변수들이 있으나, 제품의 벤딩형상을 결정하는 스프링백이 가장 중요한 변수로서 다루어진다.

시험에 사용된 튜브의 재질은 A213-TP347H, 튜브 직경은 63.5mm, 두께는 4.6mm 이며, 벤딩 관리기준은 두께감소율 12%, 타원율은 10% 이내로 이루어져야 한다.

Fig. 9는 서브벤딩 및 메인벤딩과 사이드벤딩이 완료된 3차원의 연속 튜브 벤딩형상을 나타내고 있다. 버너 주변홀에 대한 메인벤딩에 적용되는 포머는 단계적으로 조립되어 벤딩에 이용되며, 반경 692 ~ 954mm 까지 적용되고 있다. 아래 그림의 메인벤딩에 적용된 포머는 반경 692mm 용이며, 벤딩반경 길이까지 포머의 밀어넣기량을 적용시켰다.

메인벤딩에 있어서 메인포머의 벤딩각도(θ)와 벤딩 완료 뒤의 벤딩각도(θ')에 대한 스프링백 비 (springback ratio) $\theta'/\theta (= R/R')$ 는 다소의 편차를 가지는 것으로 측정되었으나, 평균적으로 스프링백 비의 값은 1.11로 나타났다.

사이드벤딩은 튜브들을 버너주변의 회전부에서 최소 공간에 조립하기 위하여 벤딩하는 것으로 3가지의 단차조건을 가지고 있다. 단차가 다른

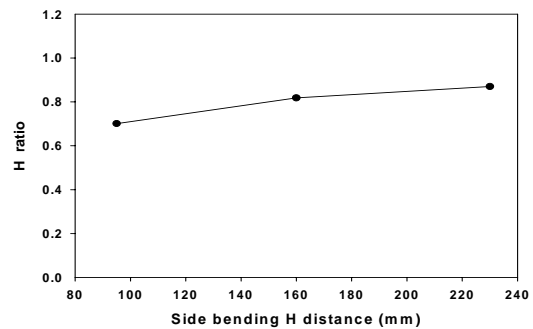


Fig. 10 Relation between H ratio and H distance for side bending

튜브를 제작할 때는 그에 맞는 포머를 교체해야 함을 의미하며, 적용된 단차거리 조건은 95, 160, 230mm 이다. 사이드벤딩의 단차부에서의 스프링백 량은 양측 롤러부의 거리(Ls), 단차거리(H)와 사이더 롤러포머의 반경(R)에 기인해 복합적으로 작용하게 된다. 사이드벤딩 롤러간의 고정된 거리에서 단차거리(H)와 벤딩에 의한 단차비(H ratio = 벤딩후 단차값/설계 포머 단차값)와의 관계를 아래 Fig. 10에서 나타내었다.

단차거리가 증가할수록 벤딩에 따른 단차비는 0.7에서 0.86값으로 증가하고 있으며, 이것은 단차거리가 증가할 때 스프링백에 의해 사이드 벤딩에 의한 단차비가 상대적으로 커짐을 나타내고 있다.

또한 사이드 벤딩실험을 통해 나타난 튜브의 특성변화는 평균적인 두께감소율이 3.57%, 타원율은 3.78% 로 측정되었으며, 이것은 기준치 12%, 10% 이하를 모두 만족시켰다.

5. 결 론

보일러 관넬제작의 튜브 벤딩공정에서 단편적인 수작업을 줄이고, 생산능력을 향상시키기 위해

서 연속 3차원 벤딩장치를 개발하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 부재를 단편적으로 벤딩하여 용접 조립하는 것이 아니라, 길이가 긴부재를 연속해서 일괄공정으로 생산할 수 있는 3차원 연속 벤딩장치를 개발하였다.

(2) 개발된 벤딩장치는 메인, 서브벤딩을 비롯하여 사이드벤딩이 가능하도록 복합적으로 구성하였으며, 각 벤딩에 따른 스프링백이 고려된 분리형태의 포머로 제작되었다.

(3) 개발된 장치를 이용하여 시험부재를 벤딩한 결과, 부재의 두께감소율, 타원율 등의 요구되는 조건을 모두 만족하였다.

(4) 본 장치의 개발에 의해 보일러 판넬 제작은 품질과 공수절감에 따른 생산성향상과 안전사고의 방지 및 자동화에 따른 경쟁력 향상 등의 결과를 가져왔다.

참고문헌

- (1) Gillanders. J., 1994, "Pipe and Tube Bending Manual 2nd Edition," Fabricators & Manufacturers Association.
- (2) Yoeg. J. K., Kim. K. Y., Park. S. D., Lim. H. H., Ahan. J. B. and Jang. J. H., 2000, "A Study of Pipe Piece Bending and Welding Method," HHI Engineering Review Vol.20 No 2, pp. 25~31.
- (3) Kim. S. Y., Park. S. K., Park. S. J., Kim. Y. H., 1994, "Development and Design of Single Drum, Bottom Supported Boiler for Cogeneration Power Plant," HHI Engineering Review Vol.14 No 3, pp. 95~102.
- (4) Duston. P. S., Bernold. L.E., 1994, "Adaptive Control for Robotic Rebar Bending," Micro-computers in Civil Engineering 9, pp. 53~60.