

## 열간 스피닝 공정을 통한 CNG 고압용기의 돔 및 입구 부 성형

이광오\* · 박건영\* · 곽효서\*\* · 김 철\*†

\* 부산대학교 기계기술연구원, \*\* 부산대학교 기계융합기술학과

### Forming of Dome and Inlet Parts of a High Pressure CNG Vessel by the Hot Spinning Process

Kwang O Lee\*, Gun Young Park\*, Hyo Seo Kwak\*\* and Chul Kim\*\*†

\* Research Institute of Mechanical Technology, Pusan Nat'l Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Convergence Technology, Pusan Nat'l Univ.

(Received May 16, 2016 ; Revised June 21, 2016 ; Accepted July 4, 2016)

**Key Words:** Pressure Vessel(압력용기), Spinning(스피닝), Buckling(좌굴), Roller Feeding Distance(롤러 이송 거리), Dome Part(돔 부), Inlet Part(입구 부), Radius of Dome Part(돔 부 반경)

**초록:** 압축천연가스(CNG) 압력용기는 D.D.I공정을 통해 실린더부를 제작한 후, 스피닝 공정을 통해 돔 부 성형이 이루어진다. 그러나 스피닝 공정의 입구 부 성형에 관한 연구는 미미하며, 현장 작업자들의 경험이나 시행착오에 의해 제작되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 이론 임계좌굴하중 및 유한요소해석에서 축 방향 하중의 비교를 통하여 좌굴발생을 예측하였고, 상용 소프트웨어를 이용하여 돔부의 좌굴 방지를 위한 방법을 제안하였다. 또한, 입구 부 성형을 위하여 돔 부와 롤러가 맞닿는 점에서의 돔부의 반경에 따른 롤러 하중을 분석하고, 이를 토대로 입구 부 성형을 수행하였다.

**Abstract:** The CNG pressure vessel is manufactured by a deep drawing and ironing (D.D.I) process for forming cylinder parts, followed by a spinning process for formation of the dome part. However, studies on the buckling phenomenon of the dome part and formation of the inlet part have not been performed yet, and the CNG pressure vessel is produced by the experience of the field engineers and the trial and error method. In this study, buckling phenomenon during the spinning process was predicted by comparing critical buckling loads obtained through theoretical analysis with axial loads from the FEA, and a method for preventing buckling of the dome part was proposed by employing commercial software (Forge NxT 1.0.2). Also, to form the inlet part, forming loads of the roller at contact point between the roller and the dome part were analyzed according to radii of the dome part, and the inlet part was formed by controlling the radius of the dome part.

### 1. 서 론

압축천연가스(CNG)는 경유나 휘발유와 비교하여 대기오염물질 발생량이 10% 수준으로, 친환경 에너지로 널리 사용되고 있다. 이에 따라, 최근 CNG 저장용기 성형을 위한 D.D.I(Deep drawing and ironing) 공정 최적설계 및 자진공정을 통한 피로수명 향상에 관한 연구가 진행되고 있다. 또

한, 용기의 저장밀도를 높이기 위한 고압화 및 경량화가 요구됨에 따라, 금속 라이너(34CrMo4)로 구성된 Type I 용기에서, 금속 및 비금속 라이너를 복합재료(Fiber)로 보강한 Type II 및 Type III 압력용기가 개발되었으며, 경량화를 위한 라이너 두께 및 복합재층의 최적설계에 관한 연구가 수행되고 있다.<sup>(1-6)</sup>

압력용기 돔(dome) 부 성형에는 스피닝(Spinning) 공정이 이용되는데, H.W. Lee 등<sup>(7)</sup>은 열간 스피닝 공정의 최적화 및 성형 하중의 최소화를 통하여

† Corresponding Author, [chulki@pusan.ac.kr](mailto:chulki@pusan.ac.kr)

롤러의 성능을 개선하는 연구를 수행하였으며, Hamed Zoghi 등<sup>(8,9)</sup>은 피드 속도, 롤러 시작점에 따른 잔류응력 및 변형률에 관한 연구를 수행하였다. 또한, N.Akkus 등<sup>(10)</sup>은 알루미늄 튜브 스피닝 공정에 관한 연구를 수행하였으나, 현재까지는 용기 돔 부 성형을 위한 스피닝 공정중의 좌굴현상 및 입구 부(Inlet part) 성형에 관한 연구는 미미하며, 현장 작업자들의 경험이나 시행착오에 의해 제작되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 상용 소프트웨어 Forge NxT 1.0.2를 이용하여 유한요소해석에서 축 방향 하중과 이론적 임계좌굴하중과의 비교를 통하여 좌굴 발생을 예측하였다. 이를 통해 스피닝 공정의 성형인자(롤러 이송거리, 성형온도, 소재회전속도, 롤러 이송속도) 중에서 스피닝 공정에 가장 큰 영향을 미치는 이송거리를 제어하여 돔 부의 좌굴 방지를 위한 방법을 제안하였다. 또한, 입구 부 성형을 위하여 돔 부와 롤러가 맞닿는 점에서의 접선 기울기에 따른 롤러 하중과 돔 부 반경과의 관계를 분석하였으며, 돔 부 반경 제어를 통한 입구 부 성형을 수행하였다.

## 2. 이론적 해석

### 2.1 스피닝 공정 개요

CNG 압력용기 라이너를 제조하기 위해서, Fig. 1과 같이 딥 드로잉(Depth drawing)과 아이어닝(Ironing)의 복합공정인 D.D.I 공정을 통하여 실린더 부를 성형한 후, 열간 스피닝 공정을 통해 돔 부와 입구 부를 생성한다.

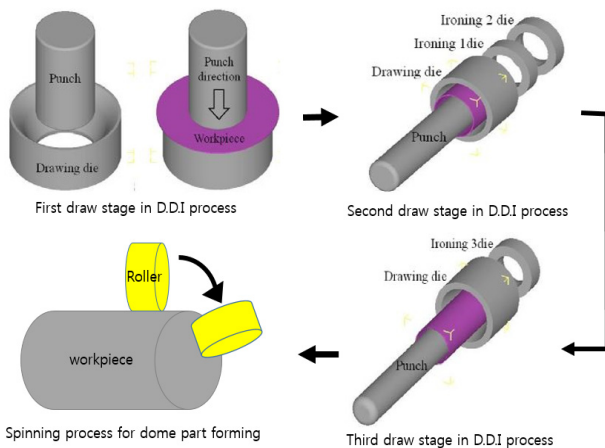


Fig. 1 Liner forming process of the high pressure vessel

스피닝 공정은 Fig. 2와 같이 소재(Workpiece), 맨드릴(Mandrel) 및 롤러(Roller)로 구성된다. 소재가 맨드릴에 의해 회전축을 중심으로 회전하고, 롤러가 회전경로( $\widehat{S_n E_n}$ )를 따라 회전하면서 이동한다. 회전경로에 따른 롤러의 1회 운동을 패스(Path)라고 하며,  $S_1$ 에서  $S_2$ 까지의 거리( $\widehat{S_1 S_2}$ )를 롤러 이송거리(Feeding distance)라고 한다. 첫 번째 패스( $\widehat{S_1 E_1}$ )가 완료된 후 롤러는  $S_1$ 에서  $S_2$ 로 이송된 후 다음 패스가 진행되며, 최종적으로 Fig. 3과 같이 20mm 길이의 입구 부 및 반경이 166.5mm인 돔 부가 성형된다.

### 2.2 돔 부의 임계 좌굴하중

압력용기의 돔 부 성형을 위한 스피닝 공정의 패스가 진행됨에 따라 축 방향 압축하중이 증가하며, 이로 인하여 좌굴 현상이 발생한다.

스피닝 공정 시 돔 부에 발생하는 좌굴현상을 이론적으로 분석하기 위하여, Fig. 4와 같이 용기의 일부를 한쪽이 핀으로 지지된 기둥(column)으로 가정하였다.

기둥에서의 좌굴 임계하중은 처짐 곡선의 미분 방정식을 통해 얻어진다.<sup>(11)</sup> 기둥에 좌굴이 발생

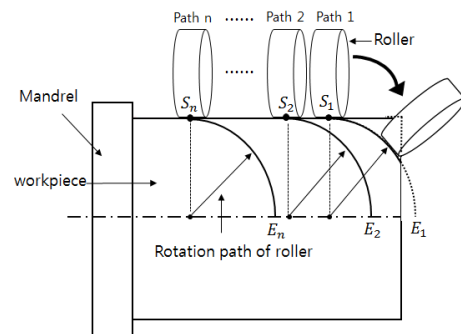


Fig. 2 Scheme of hot spinning process

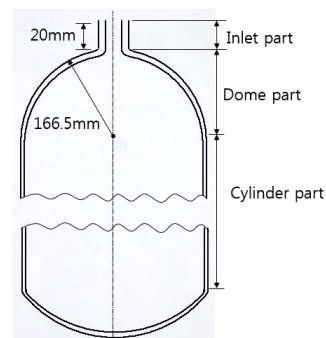


Fig. 3 The dome and inlet shape of the CNG pressure vessel

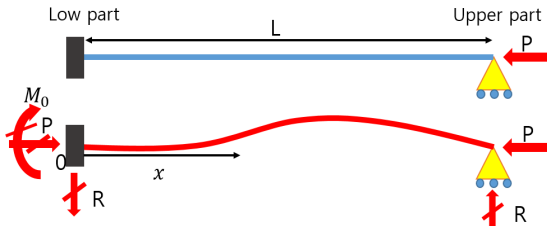


Fig. 4 Scheme of column supported by pin for calculating critical buckling load of the dome part

할 때, 하단 점(점 O, Low part)에서 반력모멘트  $M_0$ 가 식 (1)과 같이 작용된다.

$$M_0 = RL \quad (1)$$

하단점 으로부터  $x$ 만큼 떨어진 곳의 좌굴된 기둥에서의 굽힘 모멘트는 식 (2)와 같이 나타나며, 이때,  $v$ 는 처짐,  $R$ 는 반력,  $P$ 는 축 방향 하중이다.

$$M = M_0 - Pv - Rx = -Pv + R(L - x) \quad (2)$$

식 (2)의 미분방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$EIv'' = M = -Pv + R(L - x) \quad (3)$$

$k^2 = P/EI$ 로 정의하여 식 (3)에 대입하면, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v'' + k^2v = \frac{R}{EI}(L - x) \quad (4)$$

미분 방정식 (4)의 일반해는 식 (5)로 나타낼 수 있으며,

$$v = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + \frac{R}{P}(L - x) \quad (5)$$

식 (5)로부터 좌굴임계하중에 관한 식 (6) 및 식 (7)을 얻을 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$P_{cr} = \frac{20.19EI}{L^2} \quad (6)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (7)$$

여기서,  $L$ ; 기둥의 길이  $I$ ; 단면 관성모멘트,  $E$ ;

Table 1 Simulation conditions of the spinning process<sup>(7)</sup>

	Mandrel	Roller	Workpiece
Material	Rigid	Rigid	34CrMo4
Friction coefficient	Sticking	0	-
Heat transfer coefficient ( $W/m^2K$ )	10 (with air)	10 (with air)	2000 (with roller)
Young's modulus(GPa)	-	-	200 (Room temperature) 105 (1000 °C)

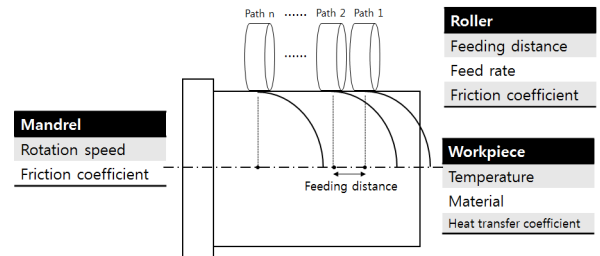


Fig. 5 Design parameters inference on the spinning process

소재탄성계수,  $b$ ; 롤러와 소재의 접촉 길이 및  $h$ ; 용기의 두께이며 임계 좌굴하중보다 큰 축 하중이 작용하면 돔 부의 좌굴이 발생하게 된다.

### 3. 유한요소 해석

#### 3.1 경계조건 및 해석조건

압력용기의 스피닝 해석의 성형인자는 Fig. 5와 같이 롤러 이송속도, 성형온도 및 소재회전 속도가 있으며, 본 연구에서는 기존 연구<sup>(7)</sup>의 성형인자 값을 참고하여, 롤러 이송속도; 7rpm, 성형온도; 1000°C 및 소재회전 속도; 1000rpm으로 해석을 수행하였다. 소재 물성치의 경우, 유한요소해석 프로그램(Forge NxT 1.0.2)에 내장되어 있는 34CrMo4의 물성정보를 활용하여 해석을 수행하였으며, 소재탄성계수, 마찰계수 및 열전달 계수를 Table 1에 나타내었다. 롤러와 맨드릴의 경우, 스피닝 해석 결과에 미치는 영향이 미미하므로 강제로 가정하여 해석을 진행하였다. 맨드릴은 소재를 고정시키고 소재가 원활히 회전할 수 있도록 하므로, 맨드릴과 소재가 고착(Sticking)되도록 설정하였다.

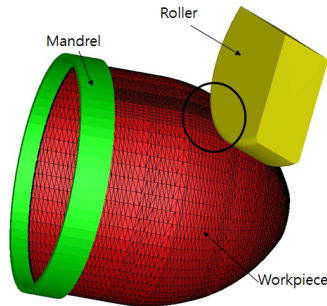


Fig. 6 Generation of ALE mesh

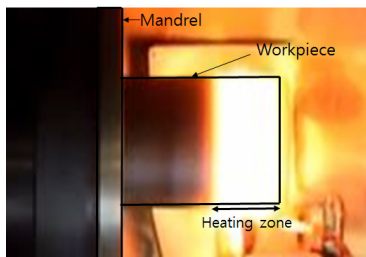


Fig. 7 Local heating for the hot spinning process

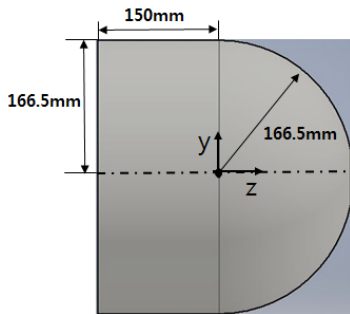


Fig. 8 Initial dome shape of the pressure vessel to checking buckling phenomenon

소재와 롤러가 접촉되는 부분에서 소성변형이 발생하므로, 해석의 정확성 및 시간단축을 위해 성형되는 부분의 메쉬를 조밀하게 생성하기 위한 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법을 Fig. 6 과 같이 적용하였다. 실제 스피닝 공정은 Fig. 7 과 같이 토치를 이용하여 성형부위에 국부가열을 한 후 성형이 진행된다. 따라서, 유한요소해석에서도 성형부위에 가열조건(1000°C)을 설정한 후 해석을 수행하였다.

3.2 돔 부의 좌굴방지를 위한 스피닝 해석

스피닝 해석을 위하여 Fig. 8과 같이 실린더 부 길이; 150mm, 돔 부 반경; 166.5mm인 초기 모델링을 수행하였다. 압력용기의 입구 부 성형을 위하여 Fig. 9와 같이 돔 부가 시작되는 점(z축 좌

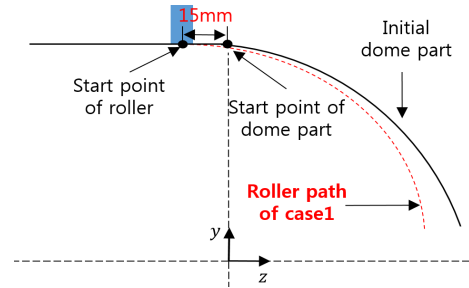


Fig. 9 Roller path and feeding distance for the spinning process in the case(1)

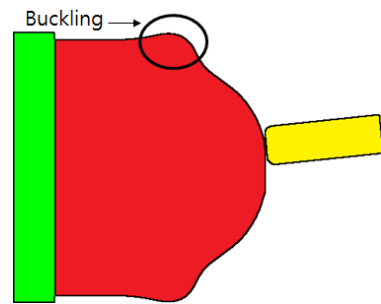


Fig. 10 Buckling phenomenon of the dome part in the case(1)

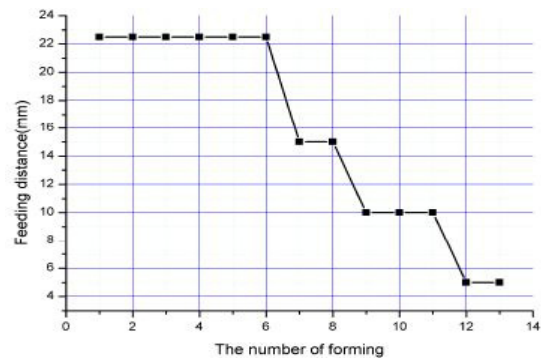
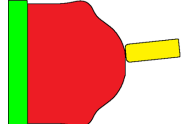
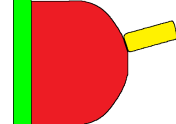


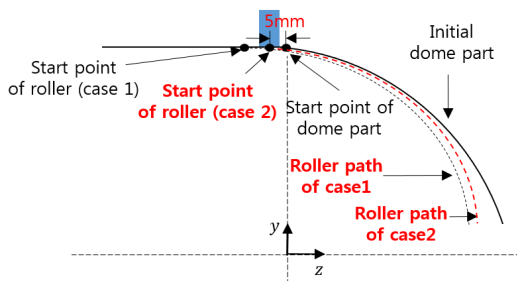
Fig. 11 The values of feeding distances from path1 to path13 to prevent buckling<sup>(7)</sup>

표; 0)에서 -15mm 떨어진 지점(Case 1)에서 롤러를 위치시켜 성형을 수행한 결과, Fig. 10과 같이 좌굴 현상이 나타났다. 이는, 돔 부의 축 방향(-Z 방향) 압축 하중이 임계 좌굴하중보다 크기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

Lee, H.W.의 연구<sup>(7)</sup>에서는 입구 부를 제외한 돔 부 성형에 대한 스피닝 공정을 연구하였다. 총 1~13패스의 해석을 수행하였으며, 성형 중 7, 9, 12패스에서 좌굴현상이 발생하였다. 좌굴을 방지하기 위해 이송거리를 초기 22.5mm로 시작하여 돔 부가 반원에 가까워질수록 점점 줄여나가

**Table 2** The results of spinning processes according to the feeding distances

	Case 1	Case 2
Feeding distance	15mm	5mm
Buckling	Occurred	Not occurred
Inlet part forming	failed	failed
Result of simulation		



**Fig. 12** Roller path and feeding distance for preventing buckling in the case(2)

12~13패스에서 5mm로 하였으며, 각 패스별 이송거리는 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11을 참고하여 돔 부의 좌굴 방지를 위한 이송거리를 초기 15mm(Case 1)에서 5mm(Case 2)로 감소하여 롤러경로를 수정하였으며, 이를 Fig. 12에 나타내었다.

롤러의 이송거리 감소에 따른 스피닝 해석 결과를 Table 2에 나타내었으며, Case 2에서 좌굴현상이 발생하지 않았으나, 돔 부 끝단에서의 굽힘이 발생하지 않아, 여전히 입구 부 성형은 불가능한 것을 확인할 수 있었다.

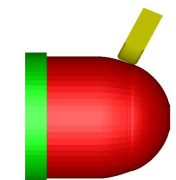
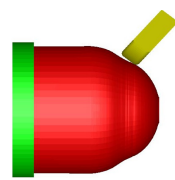
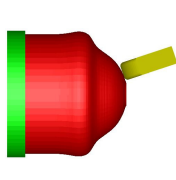
3.3 좌굴현상의 이론적 검토 및 고찰

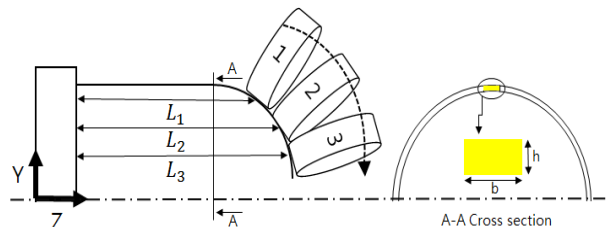
Fig. 13과 같이 식 (6) 및 식 (7)을 이용하여 L (맨드릴과 롤러까지의 소재 길이)에 따른 이론 임계좌굴하중을 계산하였다. 이때, 1000°C에서의 탄성계수(105Gpa), b(10mm) 및 h(6.5mm)를 적용하였다. Table 3에서 L값이 증가함에 따라 이론 임계좌굴하중은 감소하지만, 해석에서의 축 방향 압축하중은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 임계좌굴하중과 유한요소해석의 압축하중을 비교한 결과, L이 225mm인 지점 이후로는 압축하중이

**Table 3** Comparison of buckling loads obtained from theoretical analysis with those from FEA

L (mm)	Theoretical buckling loads(ton)	Z-directional compressive loads obtained by the FEA(ton)	Condition
225	0.385	0.38	No-buckling
255	0.25	0.52	Buckling
290	0.2	1.8	Buckling

**Table 4** Shape of dome according to the lengths between mandrel and roller(L)

225mm (No-buckling)	255mm (Buckling)	290mm (Buckling)
		



**Fig. 13** Scheme for calculating the critical buckling load

임계좌굴하중보다 커지므로 좌굴현상이 발생함을 예측할 수 있다. Table 4에서 유한요소해석으로부터 얻은 용기의 형상을 분석한 결과 또한, L이 225mm일 때는 좌굴이 발생하지 않았으며 255mm 및 290mm일 때 좌굴이 발생하였다. 이는 이론식 해석을 통한 좌굴판단 방법과 결과가 일치하므로 유한요소해석 기법의 타당성을 검증하였다.

3.4 입구 부 성형을 위한 스피닝 공정설계

돔 부가 반원에 가까워짐에 따라, Fig. 14와 같이 소재가 롤러와 맞닿는 점에서 접선의 기울기가 커지며, 축(-Z)방향으로의 압축하중( $P_z$ )이 증가함과 동시에 Y방향( $P_y$ )으로 하중이 감소한다. 따라서, 좌굴발생 가능성이 높아지며 소재 끝단에서의 Y방향으로의 굽힘이 발생하지 않아 입구

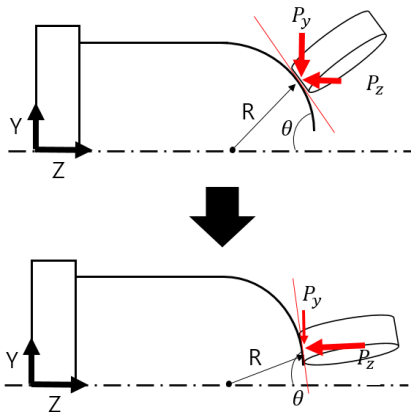


Fig. 14 Variation of forming loads in z and y-axis according to the dome shapes

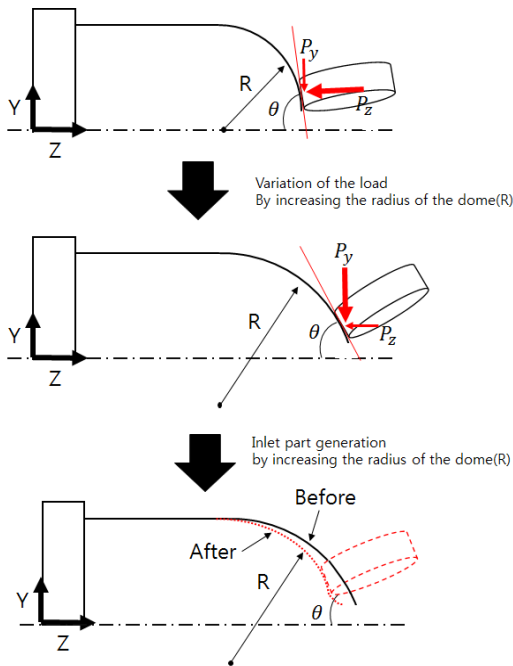


Fig. 15 Increasing the radius of the dome (R) to form the inlet part

부 성형이 불가능하다.

그러나, Fig. 15와 같이 돔 부 반경(R)이 증가하면 접선 기울기가 감소함에 따라 Y방향의 하중이 증가하며, 소재 끝단에서 굽힘이 발생하여 패스가 진행됨에 따라 입구 부가 점진적으로 성형된다.

20mm의 입구 부를 가지는 최종 돔 부 형상(Fig. 2)를 성형하기 위하여, Fig. 16과 같이 초기 모델의 돔 부 반경을 증가 시켰으며, 성형 전 돔 부의 길이(AB)와 성형 후 돔 부(AC)길이 및 입구 부(CD)길이를 합한 길이를 같게 하는 돔 부 반경(236.5mm)을 이용하여 스피닝 공정 해석에

Table 5 Roller's rotation radius to form inlet part without buckling by paths

Path	Feeding distance (mm)	Center of roller's rotation		Roller's rotation radius(mm)
		Z	Y	
1	0	0	-55	221.5
2	5	-5	-45	211.5
3	5	-10	-35	201.5
4	5	-15	-25	191.5
5	5	-20	-15	181.5
6	5	-25	5	171.5
7	5	-30	0	166.5
8	5	-35	0	166.5

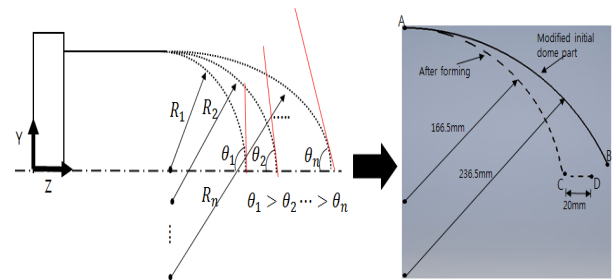


Fig. 16 Modified initial dome shape for forming inlet part of the pressure vessel

적용하였다.

롤러는 돔 부가 시작되는 점(z축 좌표; 0)에서 첫 번째 패스를 시작하여, 현장 작업자의 경험을 토대로 얻은 롤러의 회전반경(221.5mm)에서부터 10mm 씩 감소시켜가며 입구 부 성형을 위한 스피닝 해석을 수행하였다. 굽힘에 의한 입구 부 성형을 위해서는, 롤러가 돔 부 끝단까지 이송되면 입구부가 돌출되지 않기 때문에, 입구 부가 성형되기 시작하는 지점에서 롤러의 회전을 멈추어야 한다. 패스가 진행 될수록 입구 부의 길이가 길어지며, 본 연구에서는 8회 패스를 수행하여 최종 형상(Fig. 2)의 돔 부 및 입구 부 형상을 얻을 수 있었다. 스피닝 공정 시뮬레이션을 위하여 Forge의 전 처리기에 롤러의 이송경로를 입력하는데, 이때 입력되는 값은 롤러의 중심이 이동한 자취이며, 롤러 중심에서의 회전경로 및 좌표를 Table 5 및 Fig. 17에 나타내었다. 이송거리의 경우, 3.2절에서 도출한 좌굴이 발생하지 않는



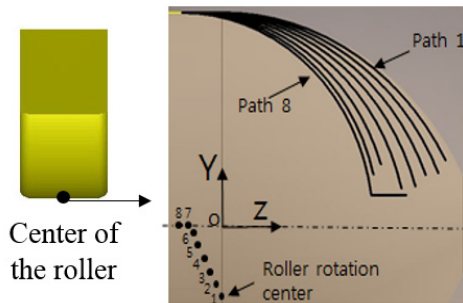


Fig. 17 Variations of roller path and rotation center in order to form the inlet part of pressure vessel

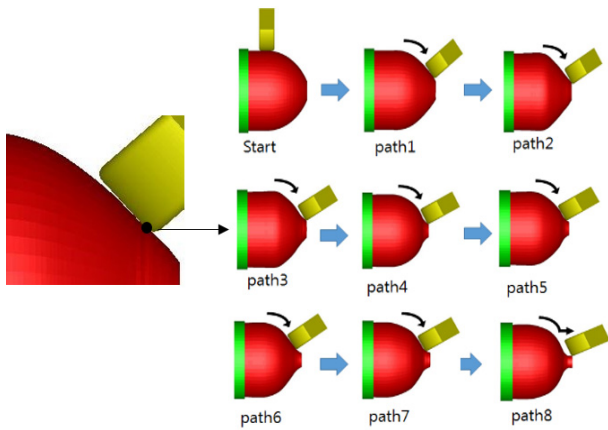


Fig. 18 Shapes of dome and inlet part by path(1~8)

5mm로 고정하였다.

Fig. 18은 롤러가 Fig. 17의 경로를 따라 이송된 후 첫 번째 패스에서 여덟 번째 패스까지의 입구 부 성형 과정이며, 마지막 여덟 번째 패스 후, 최종형상(입구 부 길이 20mm 및 돔 부 반경 166.5mm)을 나타내었다. 실제 스피닝 공정에서는 입력된 롤러의 중심이 아닌 롤러의 앞부분이 소재와 접촉하므로, Fig. 17의 경로와 상이하게 돔 부의 형상이 성형된다.

20mm 길이의 입구 부 및 반경이 166.5mm인 돔 부를 성형하기 위하여, 현장에서 수행되는 스피닝 공정에서는 2분 30초 가공시간(총 30패스)에 걸쳐서 압력용기가 완성된다. 반면에, 유한요소해석에서는 입구 부 및 돔 부 성형을 위해서 각각 8패스 및 13패스, 총 21패스<sup>7)</sup>에 걸쳐 성형이 이루어지며, 1분 45초의 가공시간이 소요된다. 따라서, 본 연구에서 개발된 스피닝 공정이 현장에 적용된다면, 45초의 공정 시간이 단축되어 생산성 향상에 도움을 줄 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압력용기 돔 부의 이론 임계좌굴하중 및 유한요소해석에서 축 방향 하중의 비교를 통하여 좌굴발생을 예측하고, 좌굴 방지를 위한 방법을 제안하였다. 또한, 입구 부 성형을 위하여 돔 부와 롤러가 맞닿는 점에서의 접선 기울기에 따른 롤러 하중과 돔 부 반경과의 관계를 분석하였으며, 돔 부 반경 제어를 통한 입구 부 성형을 수행하였다.

(1) 반지름이 166.5mm인 돔 부의 스피닝 해석을 수행하여, 좌굴이 시작될 때 이론적 해석을 통한 임계 좌굴하중(0.385ton)과 유한요소해석의 축 방향 하중(0.38ton)의 비교를 통하여 좌굴현상 발생 여부를 판단하였다. 이론값과 해석상에 나타난 결과와 일치하며, 유한요소해석 기법의 타당성을 검증하였다.

(2) 압력용기 입구 부 성형을 위하여, 돔 부와 롤러가 맞닿는 점에서의 접선 기울기에 따른 롤러 하중과 돔 부 반경과의 관계를 분석하였으며, 입구 부 성형을 가능하게 하는 초기 돔 부 반경(236.5mm)를 도출하였다.

(3) 각 패스의 롤러 이송거리를 5mm로 고정된 상태에서, 돔 부 반경을 감소시켜가며 총 8패스에 대한 스피닝 해석을 수행한 결과, 돔 부 끝단에서의 굽힘에 의해 입구 부가 성형되었으며 입구 부 길이 20mm 및 돔 부 반경 166.5mm인 최종형상을 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과는 향후 돔 부 형상과 반경 및 스피닝 공정의 최적화에 상당한 도움을 줄 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 201523870001)

#### 참고문헌 (References)

- (1) Kang, M. C., Lee, H. W. and Kim, C., 2011, "Optimal Design Considering Structural Efficiency of Compressed Natural Gas Fuel Storage Vessels for Automobiles," *Transactions of Nonferrous*

- Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 199~204.
- (2) Kim, C. H., Park, J. H., Kim, C. and Choi, J. C., 2004, "Expert System for Process Planning of Pressure Vessel Fabrication by Deep Drawing and Ironing," *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 155~156, pp. 1465~1473.
- (3) Bae, J. H., Lee, H. W., Kim, M. S. and Kim, C., 2012, "Optimal Design for CNG Composite Vessel Using Coupled Model with Liner and Composite Layer," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* Vol. 29, No. 9, pp. 1012~1019.
- (4) Kim, H., Bae, W., Jang, Y. and Kim, C., 2008, "Optimal Design of the Fuel Storage Vessel of CNG Automobile by Considering Structural Efficiency," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 6, pp. 465~473.
- (5) Kim, J.-H., Kim, E.-S., Kim, C. and Choi, J.-C., 2003, "Development of an Automated Design System of a Large Pressure using the Steel, 34CrMo4," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 8, pp. 21~29.
- (6) Bae, J. H., Lee, H. W., Kim, M. S. and Kim, C., 2013 "Optimal Process Planning of CNG Pressure Vessel by Ensuring Reliability and Improving Die Life," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No.7, pp. 865~873.
- (7) Lee, H. W., Jung, S. Y. and Kim, C., 2013, "Study of Hot Spinning Process for Head of CNG Storage Vessel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 4, pp. 547~554.
- (8) Zoghi, H. and Sayeafabi, M., 2013, "Enhanced Finite Element Analysis of Material Deformation and Strain Distribution in Spinning of 42CrMo Steel Tubes at Elevated Temperature," *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 234~242.
- (9) Zoghi, H., Arezoodar, A. F. and Sayeafabi, M., 2012, "Effect of Feed and Roller Contact Start Point on Strain and Residual Stress Distribution in Dome Forming of Steel Tube by Spinning at an Elevated Temperature," *Journal of ENGINEERING MANUFACTURE*, Vol. 226, No. 11, pp. 1880~1890.
- (10) Akkus, N. and Kawahara, M., 2006, "An Experimental and Analytical Study on Dome Forming of Seamless Al Tube by Spinning Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, No. 2, pp. 145~150.
- (11) Gere, J. M. and Goodno, B., 2011, *Mechanics of materials 7th*, McGraw-Hill, NewYork.