

CNG 저장용기의 성형을 위한 D.D.I. 하중에 관한 연구

A Study on D.D.I. Load for Forming of the CNG Storage Vessel

이현우¹, 배준호², 김철^{3,✉}
Hyun Woo Lee¹, Jun Ho Bae², and Chul Kim^{3,✉}

¹ 부산대학교 창의공학시스템 (Creative Engineering System, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

³ 부산대학교 기계기술연구원 (Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: chulki@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2489

Manuscript received: 2012.12.3 / Revised: 2013.3.27 / Accepted: 2012.5.7

In this study, a theoretical analysis method was suggested for predicting forming loads of continuous deep drawing and ironing processes (D.D.I. processes) by considering back tension and continuity equation, and FEA for D.D.I. processes was performed. Dimensions of a punch and a mold on the basis of design rules for a CNG storage vessel were applied for the analysis. To verify the suggested theoretical analysis, the results of theoretical analysis were compared with both those of FEA and experiments of previous studies. As the result of analysis, the values and tendencies of the loads predicted by the theoretical analysis were in agreement with those of FEA and the experiments. So, it is considered that the analysis suggested has reliability for predicting the forming loads of the continuous processes(deep drawing+ironing(1)+ironing(2)).

Key Words: D.D.I.(디프 드로잉과 아이어닝의 연속공정), Compressed Natural Gas(압축천연가스), Fuel Storage Vessel (연료저장용기), Load(하중), Forming(성형), F.E. Analysis(유한요소해석)

기호설명

$A_{0,1,2,3}$ = Cross section area of each process
 b_2 = Critical draw ratio in redrawing
 $F_{1,2,3,4,5}$ = Forming load of each process
 $k_{2,3}$ = Correction factor with lubrication of process
 $P_{1,2,3,4,5}$ = Forming power of each process
 $R_{0,1,2,3}$ = Outer radius of each process
 r_1 = Radius of punch
 $t_{0,1,2,3}$ = Thickness of each process
 $V_{1,2,3}$ = Punch velocity of each process
 m = Coefficient of shear friction
 $\bar{\sigma}$ = Flow stress
 σ_y = Yield strength
 $\sigma_{z_{1,2,3,4,5}}$ = Axial stress of each process

1. 서론

압축천연가스(CNG) 저장용기는 1990년대 후반 650톤 정격하중 및 8.2 m 편치행정을 가지는 대형 프레스의 도입 후, 디프 드로잉과 아이어닝을 하나의 편치를 이용하여 연속적으로 성형하는 D.D.I. (Deep drawing and ironing) 공정으로 제작되었다.¹⁻³ 이러한 공정은 단동형 프레스를 이용하여 제작하는 것보다 성형시간을 단축하며, 각 스테이지 내의 공정들 사이에 열처리 공정을 생략함으로써 압축천연가스 저장용기의 생산성을 높일 수 있는 장점이 있다. S. Y. Jung⁴은 AutoCAD 환경 하에서 AutoLISP언어를 이용하여 D.D.I. 공정 설계 자동화 시스템을 개발하였으며, 이를 통해 설계시간의 단

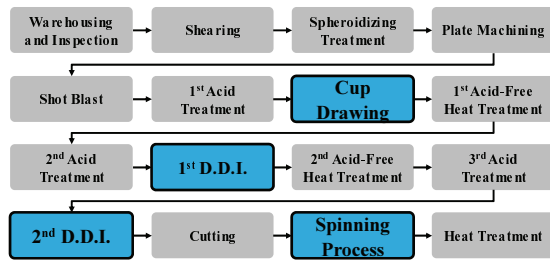


Fig. 1 Process flow to manufacture CNG storage vessel

축을 가능하게 하였다. J. H. Yoon⁵은 D.D.I. 성형하중, 드로잉률, 단면적 감소율 등의 공정변수를 이용하여 설계 규칙을 정식화하였다. E. S. Kim⁶은 간단한 설계변수의 입력만으로 CNG 복합재 압력용기를 위한 설계가 가능하도록 자동화 시스템을 개발하였다. 이와 같이 D.D.I. 공정은 설계, 규칙의 정식화 및 자동화 시스템등의 연구가 주를 이루며 현재까지 활발히 진행되고 있다. 압축 저장용기의 성형에 필요한 공정인, 디프 드로잉과 아이어닝의 각각의 단 공정에 대한 하중 계산은 가능하나 하나의 편치로 3개의 공정(디프 드로잉, 아이어닝(1), 아이어닝(2))을 수행할 경우 수반되는 디프 드로잉과 아이어닝(1)의 연속가공 공정, 아이어닝(1)과 아이어닝(2)의 연속가공 공정, 디프 드로잉과 아이어닝(1) 그리고 아이어닝(2)의 연속가공 공정에 대한 하중계산은 현장 작업자의 경험에 의하여 각각의 공정에 대한 하중계산을 한 후 보정계수를 사용하여 구하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 저장용기를 성형하기 위하여 D.D.I. 설계규칙에 의해 제작된 편치, 금형 및 소재의 치수를 바탕으로 디프 드로잉 공정과 아이어닝 공정의 성형하중은 현장에서 유용하게 쓰고 있는 현장 경험식으로 구했다. 단 공정의 경험식을 이용하여 디프 드로잉과 아이어닝(1)의 연속가공 공정, 아이어닝(1)과 아이어닝(2)의 연속가공 공정, 디프 드로잉과 아이어닝(1) 그리고 아이어닝(2)의 연속가공 공정에 대한 하중계산법을 제안하였다. 이에 대한 검증을 위하여 제안된 해석기법 결과와 기존 연구의 시험 및 유한요소해석결과를 비교하였다.

2. D.D.I. 성형하중의 이론적 접근

저장용기의 금속 라이너는 Fig. 1과 같이 크게 초기 블랭크를 디프 드로잉 공정을 통해 컵 형상

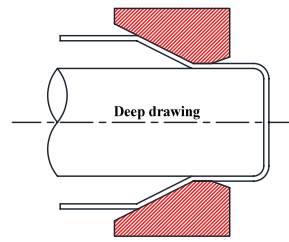


Fig. 2 Schematic drawing of deep drawing process

으로 1차 성형하는 컵 성형공정과 이를 내경과 실린더부 두께를 감소시키면서 용기의 길이를 늘이는 2회의 D.D.I. 공정, 그리고 머리부를 성형하는 열간 스피닝 공정으로 구성된다.

2.1 디프 드로잉 단 공정의 성형하중

디프 드로잉 공정은 트랙트릭스(tractrix) 다이를 이용하여 블랭크 홀더 없이 컵 드로잉을 하는 것으로서, 초기의 블랭크나 용기형상이 디프 드로잉 다이를 통과하게 되면서 직경이 감소되는 공정이다. Fig. 2는 디프 드로잉 공정에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

디프 드로잉 성형 공정에서 성형 가능성을 예측하는데 사용되는 성형하중은 현장에서 유용하게 사용되고 있는 현장 경험식인 식(1)에 의해 구할 수 있다.

$$F_d = k_3 \cdot 2r_1 \cdot t_1 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{b_2 - 1} \tag{1}$$

여기서,

- k_3 : 윤활상태를 고려한 재드로잉시 보정계수 : 1.3
- t_1 : 재드로잉시 두께 : 12.2mm
- σ_y : 항복강도 : 303MPa6
- b_2 : 재드로잉에서의 한계 드로잉비 : 1.35

2.2 아이어닝 단 공정의 성형하중

아이어닝 공정은 디프 드로잉 공정을 통해 성형된 용기형상이 아이어닝 다이를 통과하게 되면 용기의 직경은 감소되지 않고 벽 두께만이 감소되면서 길이가 길어지는 공정이다. Fig. 3은 아이어닝 공정에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

아이어닝(1)과 아이어닝(2) 공정의 성형하중은 현장 경험식인 식(2)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{i(1)} &= k_2 \cdot \pi \cdot 2R_2 \cdot i_{(1)} \cdot \bar{\sigma}_{(1)} \\ F_{i(2)} &= k_2 \cdot \pi \cdot 2R_3 \cdot i_{(2)} \cdot \bar{\sigma}_{(2)} \end{aligned} \tag{2}$$

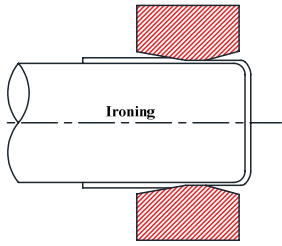


Fig. 3 Schematic drawing of ironing process

여기서,

k_2 : 윤활상태를 고려한 아이어닝시 보정계수 : 1.25

$i_{(1)}$: $t_1 - t_2$, $i_{(2)}$: $t_2 - t_3$

$\bar{\sigma}_{(1)(2)}$: 해당 공정에서의 유동응력

2.3 디프 드로잉 및 아이어닝(1) 연속가공 공정의 성형하중

저장용기 제조를 위한 D.D.I. 공정은 디프 드로잉과 아이어닝(1), 아이어닝(2) 공정으로 구성되어 있으며 이에 대한 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5부터 Fig. 7까지와 Table 1은 상기 공정의 성형하중을 계산하기 위한 개략도와 치수 그리고 저장용기의 소재물성 등을 나타내었다.

각각의 공정을 독립된 3공정으로 작업할 경우 디프 드로잉과 아이어닝(1), 아이어닝(2) 공정시 각 공정의 성형에 필요한 동력은 식(3)~식(5)로 표현되며, 디프 드로잉 공정의 하중 값(F_1)과 아이어닝(1) 공정의 하중 값(F_2) 그리고 아이어닝(2) 공정의 하중 값(F_3)은 식(1)과 식(2)에 의해 구하였다. 계산된 각 단 공정에 대한 하중 값을 이용하여 식(6)~식(8)에 의해 각 공정에 필요한 축방향 응력을 구하였으며 결과 값을 Table 2에 나타내었다.

$$P_1 = \sigma_{s1} \cdot A_1 \cdot V_1 = F_1 \cdot V_1 \tag{3}$$

여기서, P_1 은 디프 드로잉 공정에 필요한 동력

$$P_2 = \sigma_{s2} \cdot A_2 \cdot V_2 = F_2 \cdot V_2 \tag{4}$$

여기서, P_2 는 아이어닝(1) 공정에 필요한 동력

$$P_3 = \sigma_{s3} \cdot A_3 \cdot V_3 = F_3 \cdot V_3 \tag{5}$$

여기서, P_3 는 아이어닝(2) 공정에 필요한 동력

$$\sigma_{s1} = \frac{F_1}{A_1} \tag{6}$$

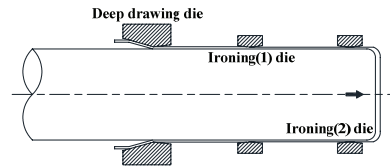


Fig. 4 Schematic drawing of D.D.I. processes

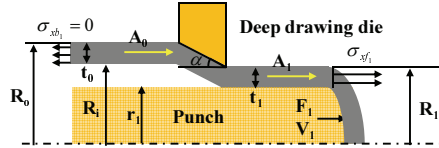


Fig. 5 Schematic drawing for obtaining forming energy of deep drawing process

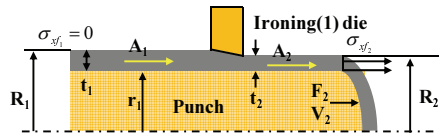


Fig. 6 Schematic drawing for obtaining forming energy of ironing(1) process

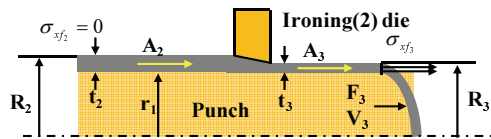


Fig. 7 Schematic drawing for obtaining forming energy of ironing(2) process

Table 1 Dimensions and properties for calculating load of deep drawing

Symbol	Value(mm)	Symbol	Value(mm)
A_0	9631.68	r_1	91.25
A_1	7462.35	t_0	12.20
A_2	5825.29	t_1	12.20
A_3	4204.37	t_2	9.65
R_0	131.75	t_3	7.06
R_i	119.55	σ_y	303 MPa
R_1	103.45	$\bar{\sigma}_{(1)}$	661 MPa
R_2	100.90	$\bar{\sigma}_{(2)}$	715 MPa
R_3	98.31	m	0.11

Table 2 Axial stresses according to each process

Process	Deep drawing	Ironing(1)	Ironing(2)
Load (tons)	170.76	136.42	145.99
Axial stress (MPa)	224.48	229.74	340.64

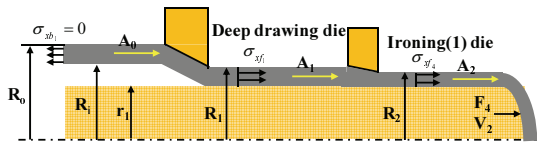


Fig. 8 Schematic drawing for obtaining forming energy of deep drawing and ironing (1) process

여기서, F_1 은 디프 드로잉 공정의 하중

$$\sigma_{z_2} = \frac{F_2}{A_2} \quad (7)$$

여기서, F_2 는 아이어닝(1) 공정의 하중

$$\sigma_{z_3} = \frac{F_3}{A_3} \quad (8)$$

여기서, F_3 는 아이어닝(2) 공정의 하중

2.3.1 디프 드로잉+아이어닝(1) 연속가공 공정의 성형하중

Fig. 8의 디프 드로잉과 아이어닝(1)의 연속가공 공정일 경우, 아이어닝(1) 다이 입구측에서는 디프 드로잉 다이에 의해 후방장력이 발생한다. 이 연속가공 공정의 성형하중을 계산하기 위해서는 후방장력에 의한 응력을 고려해야 하는데, 이 응력은 단 공정에서 발생한 축방향 응력과 같다고 가정하였다. 즉, 이 연속가공 공정의 성형시 전방장력에 의한 축방향 응력(σ_{z4})은 디프 드로잉 공정에서 발생한 축방향 응력(σ_{z1})과 아이어닝(1) 공정에서 발생한 축방향 응력(σ_{z2})의 합이 되며, 이를 식(9)에 나타내었다. 식(9)는 식(10)에 의해 식(11)로 단순화되며, 아이어닝(1) 공정 이후의 면적을 이용하면 식(12)와 같이 상기의 연속가공 공정에 대한 하중(F_4)을 구할 수 있는데 그 값은 269.72톤이다.⁷

$$P_4 = P_1 + P_2$$

여기서, P_4 는 디프 드로잉과 아이어닝(1)의 연속가공 공정에 필요한 동력

$$\sigma_{z_1} A_1 V_2 = \sigma_{z_1} A_1 V_1 + \sigma_{z_2} A_2 V_2 \quad (9)$$

$$A_0 \cdot V_0 = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = A_3 \cdot V_3 \quad (10)$$

$$\sigma_{z_4} = \sigma_{z_1} + \sigma_{z_2} = \frac{F_4}{A_2} \quad (11)$$

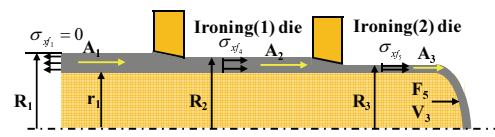


Fig. 9 Schematic drawing for obtaining forming energy of ironing(1) and (2) process

$$F_4 = (\sigma_{z_1} + \sigma_{z_2}) A_2 \quad (12)$$

2.3.2 아이어닝(1)+아이어닝(2) 연속가공 공정의 성형하중

드로잉 공정이 완료된 후에 아이어닝(1) 공정에 진입하게 되면 아이어닝(1) 공정과 아이어닝(2) 공정의 연속가공 공정이 발생하게 된다. 아이어닝(1)과 아이어닝(2)의 연속가공 공정에 대한 개략도를 Fig. 9에 나타내었다. 이 연속가공 공정의 성형시 전방장력에 의한 축방향 응력(σ_{z5})은 아이어닝(1) 공정에서 발생한 축방향 응력(σ_{z2})과 아이어닝(2) 공정에서 발생한 축방향 응력(σ_{z3})의 합이 되며, 이를 식(13)에 나타내었다. 식(13)은 식(10)에 의해 단순화되며, 아이어닝(2) 공정 이후의 면적을 이용하면 상기의 연속가공 공정에 대한 하중(F_5)은 식(15)로 계산되며, 그 결과는 244.45톤이다.

$$P_5 = P_2 + P_3$$

여기서, P_5 는 아이어닝(1)과 아이어닝(2)의 연속가공 공정에 필요한 동력

$$\sigma_{z_5} A_3 V_3 = \sigma_{z_2} A_2 V_2 + \sigma_{z_3} A_3 V_3 \quad (13)$$

$$\sigma_{z_5} = \sigma_{z_2} + \sigma_{z_3} = \frac{F_5}{A_3} \quad (14)$$

$$F_5 = (\sigma_{z_2} + \sigma_{z_3}) A_3 \quad (15)$$

2.3.3 디프 드로잉+아이어닝(1)+아이어닝(2) 연속가공 공정의 성형하중

한 펀치로 3개의 연속가공 공정이 디프 드로잉과 아이어닝(1), 아이어닝(2)의 연속가공 공정에 대한 개략도를 Fig. 10에 나타내었다. 연속가공 공정의 성형시, 전방장력에 의한 축방향 응력(σ_{z6})은 디프 드로잉과 아이어닝(1) 다이에 의해 발생한 후방장력에 의한 축방향 응력(σ_{z4})과 아이어닝(2) 공정에서 발생한 축방향 응력(σ_{z3})의 합이 되며, 이를 식(16)에 나타내었다. 식(16)은 식(10)에 의해 단순

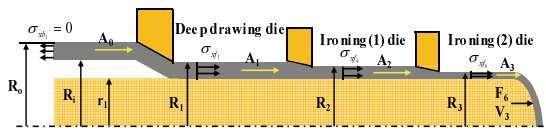


Fig. 10 Schematic drawing for obtaining forming energy of deep drawing, ironing(1) and (2) process

Table 3 Results of forming load calculated by theoretical analysis in six cases

Case		Axial Stress (MPa)	Load (tons)
One process	1 Deep drawing	224.48	170.76
	2 Ironing(1)	229.74	136.42
	3 Ironing(2)	340.64	145.99
Simultaneous processes	4 Deep drawing+ Ironing(1)	454.22	269.72
	5 Ironing(1)+Ironing(2)	570.38	244.45
	6 Deep drawing+ Ironing(1)+ Ironing(2)	794.86	340.66

화되며, 아이어닝(2) 공정 이후의 면적을 이용하면 상기의 연속가공 공정에 대한 하중(F₆)은 식(19)로 계산되며, 그 결과는 340.66톤이다.

$$P_6 = P_4 + P_3$$

여기서, P₆는 디프 드로잉, 아이어닝(1) 그리고 아이어닝(2)의 연속가공 공정에 필요한 동력

$$\sigma_6 A_3 V_3 = \sigma_4 A_2 V_2 + \sigma_3 A_3 V_3 \quad (16)$$

$$\sigma_6 A_3 V_3 = \sigma_1 A_1 V_1 + \sigma_2 A_2 V_2 + \sigma_3 A_3 V_3 \quad (17)$$

$$\sigma_6 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \frac{F_6}{A_3} \quad (18)$$

$$F_6 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) A_3 \quad (19)$$

앞서 계산된 단 공정 및 연속가공 공정에 대한 6가지 유형의 성형하중을 Table 3에 나타내었으며, 모든 경우에 대하여 성형하중이 D.D.I. 프레스의 정격용량(1,000톤)보다 작아 성형이 가능함을 알 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 해석기법의 확립

상기의 6가지 유형에 대한 이론 성형하중 값을

Table 4 Die and punch dimensions used in processes

Process	Punch and Die	Size(mm)
D.D.I.	Punch O.D.	Φ267.95
	Deep drawing die I.D.	Φ300.50
	Ironing(1) die I.D.	Φ294.50
	Ironing(2) die I.D.	Φ289.50

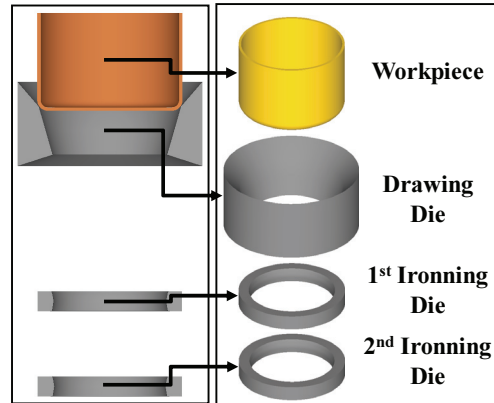


Fig. 11 Modeling for the D.D.I. analysis

검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석 툴은 상용소프트웨어인 Deform 2D를 사용하였으며, 제하시 발생하는 스프링백을 고려하기 위하여 탄·소성 해석을 수행하였다.⁸ 또한 유한요소해석 기법의 신뢰성을 확보하고자 선행연구에 사용된 모델 및 물성을 적용하여 해석을 수행하였으며, 해석된 결과는 실험을 통해 검증된 선행연구 결과와 비교하였다.

3.1.1 해석을 위한 모델 및 경계조건

선행연구에 사용된 해석모델은 디프 드로잉 공정이 완료되는 시점에 아이어닝(1) 공정이 시작되며, 이후 아이어닝(1)과 아이어닝(2)가 연속적으로 성형되는 공정으로 이때 사용된 펀치 및 금형의 치수를 Table 4⁵에 나타내었다. Fig. 11은 상기 공정에 대한 펀치 및 금형의 모델링을 나타낸다. 해석을 위한 소재 물성 또한 선행연구에 사용된 Fig. 12의 저장용기 물성⁵을 사용하였다. 다이-소재, 펀치-소재간의 마찰상수 값은 링 압축시험을 통해 얻은 m=0.11을 입력하였으며,⁵ 해석을 위한 제품은 축 대칭이기 때문에 2D로 해석을 실시하였다. 축 대칭 조건을 부여하기 위하여 Fig. 13과 같이 저장용기 바닥부의 중심에 x 방향의 속도를 0으로 설정하였다.

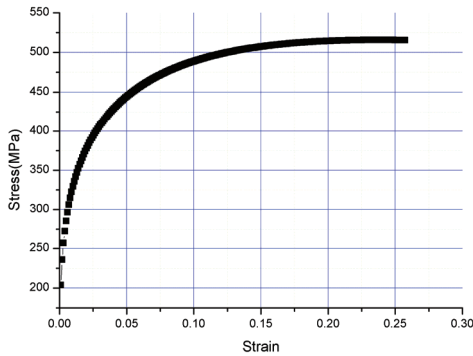


Fig. 12 Stress-Strain curve of 34CrMo4 obtained by tensile test

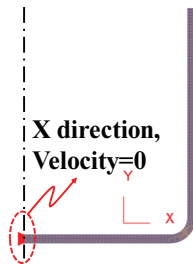


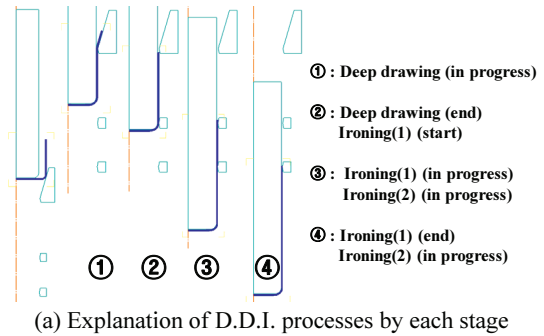
Fig. 13 Boundary condition for the D.D.I. analysis

3.1.2 해석수행 및 선행연구 결과와 비교

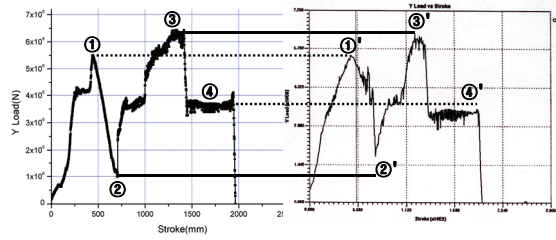
상기의 모델에 저장용기의 물성 및 경계조건을 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과, Fig. 14(a)와 같은 성형해석 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 14(b)와 Fig. 14(c)는 본 해석의 성형하중과 선행 연구결과의 성형하중을 비교하여 나타낸 것으로, 이를 Table 5에 나타내었다. 이 값들을 비교한 결과, 하중 값의 차이는 최소 6.3톤(오차율 1%) 최대 26.8톤(오차율 7%)로 비교적 잘 일치 하므로 저장용기의 성형하중 예측을 위한 유한요소해석 기법은 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

3.2 저장용기의 성형해석

이론 성형 하중 값의 검증을 위한 유한요소해석의 소재 물성은 이론해석과 해석기법 확립을 위해 사용된 Fig. 12의 인장시험 데이터를 사용하였으며, 펀치와 금형 그리고 소재는 Table 1의 값을 이용하여 모델링 하였다. 마찰조건을 포함한 모든 경계조건은 앞선 해석방법과 동일하게 하였으며, 해석의 유형은 Table 3과 같이 총 6가지로 정하였다. 유형 5는 디프 드로잉 공정이 완료된 후에 두 번의 아이어닝 공정이 연속적으로 성형되는 것이



(a) Explanation of D.D.I. processes by each stage



(b) Current study (c) Previous study

Fig. 14 D.D.I. processes and loads by each stage

Table 5 Loads by each stage according to the previous and current studies

Process	Previous study		Current study FEM (tons)
	Experiment (tons)	FEM (tons)	
Deep drawing-①	530~580	551.8	558.1
Ironing(1)+ Ironing(2)-③		632.2	655.1
Ironing(2)-④		352.0	378.8

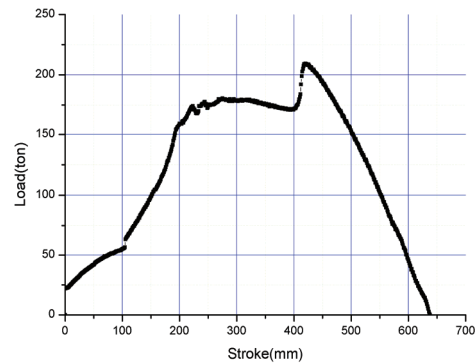


Fig. 15 The result of FEM for the deep drawing process

다. 디프 드로잉(유형1), 아이어닝(1)(유형2), 아이어닝(2)(유형3) 단 공정의 최대 성형하중은 각각 208.34톤, 156.12톤, 164.23톤으로 계산되었으며, 이를 Fig. 15~Fig. 17에 나타내었다.

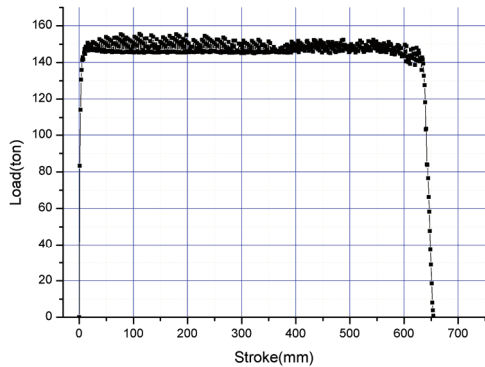


Fig. 16 The result of FEM for the ironing(1) process

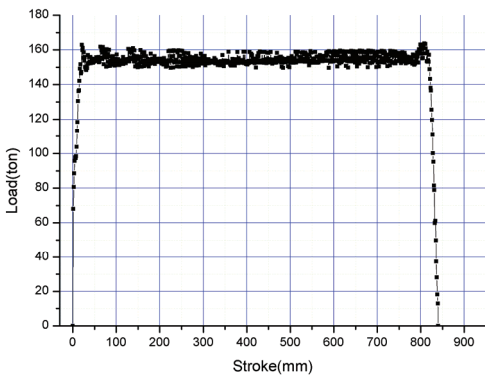


Fig. 17 The result of FEM for the ironing(2) process

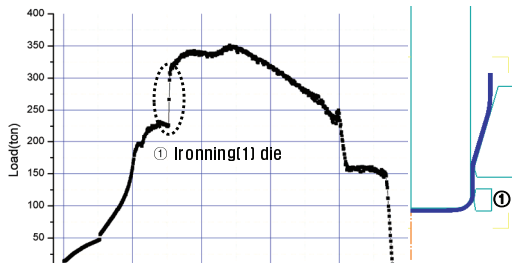


Fig. 18 The result of FEM for the deep drawing and ironing(1) processes

연속가공 공정일 경우 성형하중은, 디프 드로잉과 아이어닝(1) 공정(유형4)은 347.82톤, 디프 드로잉 완료 후 아이어닝(1)과 아이어닝(2) 공정(유형 5)은 319.55톤, 디프 드로잉과 아이어닝(1), 아이어닝(2) 공정(유형6)은 419.56톤으로 계산되었으며, 각 유형마다 성형 도중 또 다른 공정을 만나게 되면 하중이 급격하게 증가되는 것을 알 수 있다. Fig. 18~Fig. 20은 연속가공 공정에 대한 하중(유형 4~유형6)을 나타내었다.

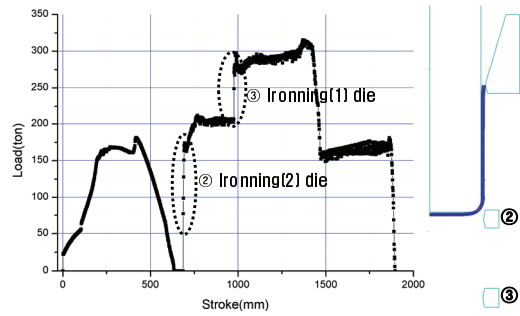


Fig. 19 The result of FEM for the deep drawing after ironing(1) and ironing(2) processes

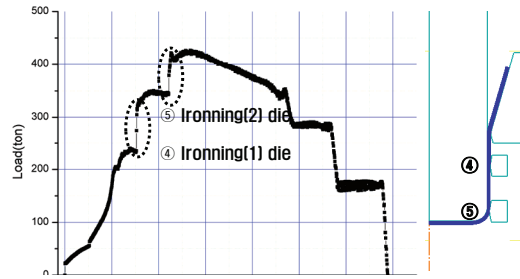


Fig. 20 The result of FEM for the deep drawing, ironing(1) and ironing(2) processes

Table 6 Comparison of loads obtained by theory and FEM

Case	Theory load (tons)	FEM Max. load (tons)
1 Deep drawing	170.76	208.34
2 Ironing(1)	136.42	156.12
3 Ironing(2)	145.99	164.23
4 Deep drawing+ Ironing(1)	269.72	347.82
5 Deep drawing after Ironing(1)+Ironing(2)	244.45	319.55
6 Deep drawing+ Ironing(1)+Ironing(2)	340.66	419.56

상기의 6가지 유형에 대한 유한요소해석의 하중 값과 앞서 계산된 단 공정과 연속가공 공정의 이론하중 값을 Table 6에 나타내어 서로 비교하였다. 단 공정의 경우, 현장에서 유용하게 쓰고 있는 현장 경험식으로 말미암아 두 하중 값의 차이는 평균 25톤으로 매우 잘 일치하였다. 하지만 연속가공 공정의 경우, 두 하중 값의 차이는 평균 77톤으로 단 공정보다는 차이가 많이 발생하였다. 이는 연속가공 공정에서의 후방장력을 단 공정에서의 축 방향의 응력에 해당된다고 가정한 것에

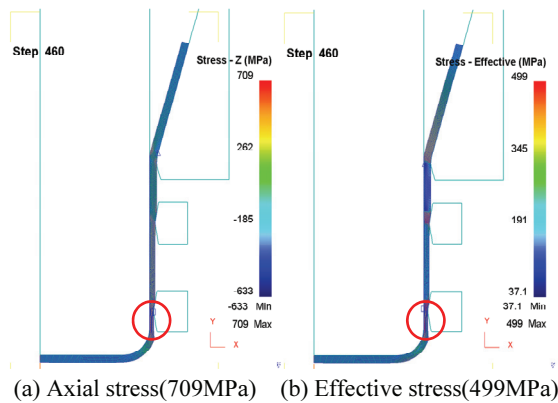


Fig. 21 The distribution of the stresses obtained from FEM on the deep drawing+ironing(1)+ironing (2) process

기인한 것으로 앞으로 후방장력에 관한 세밀한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료됩니다.

상기 유형의 성형 가능성 예측은 6가지 유형 중 이론을 통하여 축 방향 응력이 가장 높게 평가된 디프 드로잉과 아이어닝(1), 아이어닝(2) 공정(유형6)에 대하여 수행하였다. Fig. 21은 유한요소해석을 이용한 유형6의 축 방향 응력과 유효응력을 나타내며, 그 최대값은 각각 709MPa, 499MPa임을 알 수 있다. 축 방향 응력의 경우 이론(794.86MPa)과 약 85MPa정도의 차이를 보이거나 유효응력이 인장강도(638MPa)에 못 미치므로 성형이 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압축천연가스(CNG) 저장용기를 제작하기 위한 D.D.I. 연속가공 공정의 성형하중을 이론적으로 계산하고, 이를 검증하기 위하여 선행 연구와 비교를 통해 신뢰성이 확보된 유한요소해석을 이용하여 이에 대한 검증을 수행하였다.

(1) 본 논문에 제안된 연속가공 공정에 대한 식을 현장에서 이용하면 다양한 치수의 압력저장용기를 성형할 시 발생하는 연속가공 공정에 대한 설계가 가능하다.

(2) 연속가공 공정에 대한 3가지 유형의 이론 및 유한요소해석의 성형하중을 분석한 결과, 모든 경우에 대하여 성형하중이 프레스의 정격용량(1,000톤)보다 작아 성형이 가능함을 알 수 있었다.

(3) 제안된 식을 이용하여 연속가공 공정의 3

가지 유형에 대하여 하중을 계산한 결과, 디프 드로잉+아이어닝(1) 공정은 269.72톤, 아이어닝(1)+아이어닝(2) 공정은 244.45톤 그리고 디프 드로잉+아이어닝(1)+아이어닝(2) 공정은 340.66톤으로 계산되었으며, 유한요소해석 결과와 비교했을 때 비교적 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Yoon, J. H., Jung, S. Y., Choi, Y., Kim, C., and Choi, J. C., "A Study on the Development of Computer-Aided Process Planning System for the Deep Drawing & Ironing of High Pressure Gas Cylinder," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol.19, No. 2, pp. 177-186, 2002.
2. Choi, J. C., Kim, C., Choi, Y., Yoon, J. H., "Process Planning and Die Design for the Deep Drawing & Ironing of high pressure gas cylinder," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 138-143, 2000.
3. Brochure of Fielding Co. Ltd, U.K, 1998.
4. Jung, S. Y., "Development of Computer-Aided Process Design System for Deep Drawing & Ironing of High Pressure Gas Cylinder," M.Sc. thesis, Dept. of Precision Mechanical Engineering, Pusan National University, 2000.
5. Yoon, J. H., "Development of a Computer Aided Process Planning & Die Design System for the Deep Drawing & Ironing of High Pressure Gas Cylinder," Ph.D. thesis, Dept. of Precision Mechanical Engineering, Pusan National University, 2003.
6. Kim, E. S., Kim, J. H., Park, Y. S., Kim, C., and Choi J. C., "Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel using Steel Liner Manufactured by D.D.I. Process," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 20, No. 1, pp. 205-213, 2003.
7. Lee, H. W., "A Study on the Hot Spinning & D.D.I. Process for CNG High Pressure Storage Vessel(TypeII)," Ph.D. thesis, Creative Engineering System, Pusan National University, 2013.
8. Shim, H. B. and Yang, D. Y., "Elastic-Plastic Finite

Element Analysis of Deep Drawings of Circular and Square Cups Considering Bending,” Trans. of the KSME, Vol. 18, No. 7, pp. 1738-1750, 1994.