

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.10.879>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## CNG 압력용기 제작을 위한 D.D.I. 공정의 Tractrix 다이 최적설계

이광오\* · 심현대\*\* · 곽효서\*\* · 김 철\*†

\* 부산대학교 기계기술연구원, \*\* 부산대학교 기계융합기술학과

### Optimal Design of the Tractrix Die Used in the DDI Process for Manufacturing CG Pressure Vessels

Kwang O Lee\*, Hyeon Dae Sim\*\*, Hyo seo Kwak\*\* and Chul Kim\*†

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

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

(Received May 16, 2016 ; Revised August 10, 2016 ; Accepted August 12, 2016)

**Key Words:** Pressure Vessel(압력용기), Deep Drawing Process(딥드로잉 공정), Tractrix Die(트랙트릭스 다이), Forming Load of Punch(펀치 성형하중), Von-Mises Stress(본미세스 응력)

**초록:** CNG 압력용기 제조를 위한 딥드로잉 공정에 사용되는 트랙트릭스 다이는 블랭크 홀더 없이 성형을 가능하게 한다. 기존의 연구에서는 D.D.I. 공정의 1차 딥드로잉 공정에 트랙트릭스 곡선을 다이에 적용하였을 뿐, 다이의 수명향상 및 제조원가 절감을 위한 형상 최적화에 관한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 논문에서는 트랙트릭스 곡선의 점근선 이동을 통하여 다이의 높이에 따른 딥드로잉 공정의 유한요소해석을 수행하였다. 또한 펀치의 성형하중에 따른 다이 응력집중부의 Von-Mises 응력을 분석하여 최적의 트랙트릭스 다이 형상을 제시하였다.

**Abstract:** Tractrix dies, used in the deep drawing process, can be used to form CNG pressure vessels without a blank holder. Previous studies had only applied tractrix profiles to perform the first deep drawing process of DDI; but an optimal design of the tractrix die that focuses on improving die life and reducing production cost has not been performed yet. In this study, finite element analyses of deep drawing processes were conducted according to heights of the tractrix die by using translating asymptotes. In addition, researchers analyzed von-Mises stresses at the part of stress concentration of the die according to the forming punch loads in order to propose an optimal tractrix die design.

### 1. 서 론

소화기와 LPG등을 저장하기 위한 고압 가스용기는 이음새 없는 튜브(seamless tube)를 사용하여 바닥성형(bottom forming)과 접합(closing)공정, 열간 오목성형 공정(forming to concave bottom)을 통해 성형된다. 이러한 방식은 고가의 재료비와 생산비용을 수반하며, 경량화된 고품질 생산이 어렵다. 따라서, CNG 저장용기의 제조에는 D.D.I.

(Deep drawing and ironing) 공정과 열간 스피닝(Hot spinning process) 공정이 도입되었으며, 국내에는 1200톤급의 수평식 프레스가 도입되어 D.D.I. 공정을 통하여 고압가스 용기가 생산되고 있다. 또한, AutoCAD 환경 하에서 AutoLISP 언어를 이용한 공정설계 자동화 시스템이 개발되었고,<sup>(1,2)</sup> 라이너를 보강하기 위하여 E-Glass/에폭시를 이용한 필라멘트 와인딩 설계자동화 시스템에 관한 연구가 수행되었다.<sup>(5,6)</sup>

D.D.I. 공정의 1차 딥드로잉에는 트랙트릭스 곡선이 적용된 다이(Tractrix die)가 사용되는데, 이

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

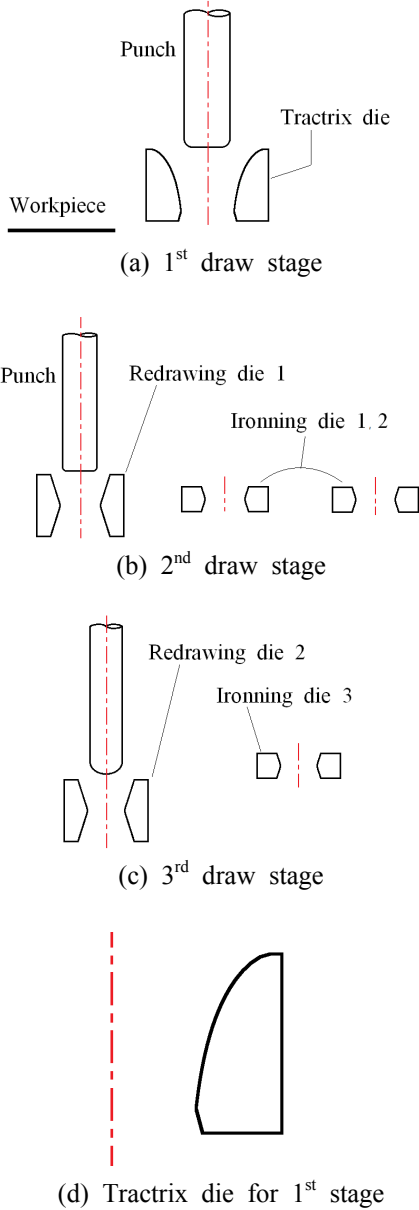


Fig. 1 Schematic view of D.D.I. process

는 별도의 블랭크 홀더 없이 성형이 가능하기 때문에 블랭크에 주름(Wrinkling)이 발생하지 않는다.<sup>(4)</sup> 그러나, 기존의 연구에서는 트랙트릭스 곡선을 다이에 적용하였을 뿐, 다이의 수명향상 및 제조원가 절감을 위한 형상 최적화에 관한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 트랙트릭스 다이의 생산 비용 절감과 수명 향상을 위하여, 기존 연구<sup>(3,5)</sup> 및 이론적 배경<sup>(7,8)</sup>을 바탕으로, 트랙트릭스 곡선의 점근선 이동을 통하여 다이의 높이에 따른 딥드로잉 공정의 유한요소해석을 수행하였다. 펀치의 성형하중에 따른 다이 응력집중부의 Von-

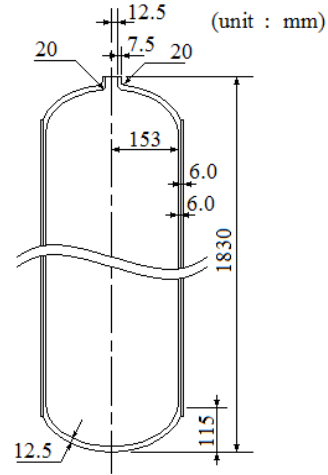


Fig. 2 Modeling of the type II pressure vessel

mises 응력을 분석하여 최적의 트랙트릭스 다이 형상을 제시하였다.

## 2. 압력용기 성형을 위한 D.D.I. 공정

CNG 압력용기의 라이너 제작을 위한 D.D.I 공정은 Fig. 1(a)~(c)와 같이 딥드로잉과 아이어닝 공정이 조합된 한 번의 프레스 행정(Stroke)으로 원통형 용기를 성형하는 공정이다. 1차 성형 단계에서 단동 수직형 프레스와 트랙트릭스 다이를 이용하여 딥드로잉을 수행하며, 2차 성형단계에서는 수평식 프레스를 이용하여 재드로잉(Redrawing) 및 두 번의 아이어닝 연속공정이 이루어지고, 3차 성형단계에서 재드로잉과 아이어닝의 연속공정이 이루어진다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 Type II(130L, 300bar) 압력용기 성형을 위하여, Fig. 1(d)의 트랙트릭스 다이를 이용한 딥드로잉에 관한 연구를 수행하였다.

## 3. 딥드로잉 공정 해석

### 3.1 트랙트릭스 곡선의 정의

트랙트릭스 곡선은 현수선의 신개선(an involute of a catenary)으로, 식 (1) 및 식 (2)의 형상계수  $a$  및 매개변수  $t$ 의 변화에 따라 값을 유지하면서 크기가 변하며, Fig. 3과 같은 형상을 가진다. 이때,  $B$ 는 중심축에서 점근선까지의 거리이다.

$$x = B + a \operatorname{sech}(t) \tag{1}$$

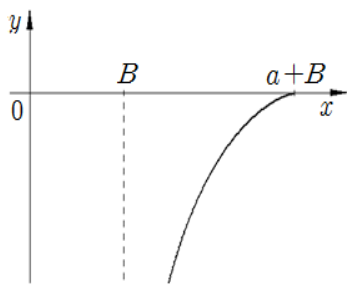
$$y = -a(t - \tanh(t)) \tag{2}$$

**Table 1** Material properties of the liner(34CrMo4)

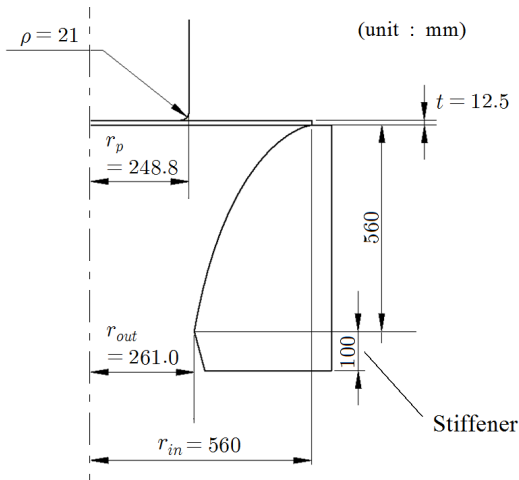
Liner(34CrMo4)		
Density, $(kg/m^3)$	Elastic modulus $E$ , $(GPa)$	Poisson's ratio, $\nu$
7,850	200	0.3
Yield strength $(MPa)$		Tensile strength $(MPa)$
950		1,050

**Table 2** Material properties of the punch and the die (AISI-D2)

Punch and die(AISI D2)	
Elastic modulus, $E$ , $(GPa)$	Poisson's ratio, $\nu$
210	0.3
Yield strength $(MPa)$	
2,150	
Tensile strength $(MPa)$	
2,370	



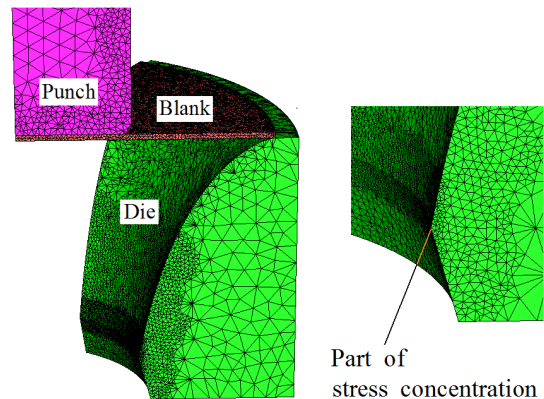
**Fig. 3** Tractrix profile using in the first deep drawing



**Fig. 4** Dimensions of the tractrix die

3.2 모델링 및 물성치

드로잉 공정 해석모델은 소재(Blank), 트랙트릭스 다이와 펀치로 구성되며, 다이에 발생하는 응력을 확인하기 위하여 다이와 펀치는 탄소성체(Elasto-plastic)로 설정하였다. 성형공정의 1차 드로잉에 대한 소재의 두께  $t$ 와 반경  $r_0$ , 다이의 출구반경  $r_{out}$ , 펀치 반경  $r_p$  및 펀치 곡률반경  $\rho$  은 모두 설계규칙,<sup>(9)</sup> 체적일정조건, 한계 드로잉비, 클리어런스 규칙, 곡률반경 공식에 따라 결정된다. 다이의 출구반경  $r_{out}$ 은 결정되었으므로, 다이의 입구 반경을 소재의 반경  $r_{in}$ 와 같게 하



**Fig. 5** 1/6 axisymmetric model for the deep drawing analysis

면 식 (1)과 (2)를 이용하여 트랙트릭스 곡선을 결정할 수 있다. 설계규칙<sup>(9)</sup>에 의해 결정된  $t$ ,  $r_0$ ,  $r_{out}$ ,  $r_p$  및  $\rho$ 의 치수를 Fig. 4에 나타내었으며, 다이 응력집중부(Part of stress concentration)의 파단을 방지하기 위하여, 다이 아래에 100mm의 높이를 가지는 보강재 (Stiffener)를 덧대었다. 압력용기의 라이너 소재(34CrMo4)와 다이 및 펀치(AISI-D2)의 물성치는 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.<sup>(10,11)</sup>

3.3 격자생성 및 경계조건

해석 시간의 절약을 위하여, Fig. 5와 같이 1/6 모델에 축대칭조건을 적용하였다. 소재에는 약 3만개의 사면체(Tetrahedron) 격자를 생성하였으며, 공정이 진행됨에 따라 주기적으로 격자의 재구성(Remesh)이 일어난다. 소재에 비하여 상대적으로 변형이 없는 펀치와 다이는 격자의 재구성이 일어나지 않기 때문에, 응력집중부에 격자를 조밀하게 분포시켰다. 마찰계수의 경우, 일정 전단 마찰계수 0.05와 쿨롱 마찰계수(Coulomb friction coefficient) 0.1로 정의하였다. 해석 과정에서 마찰

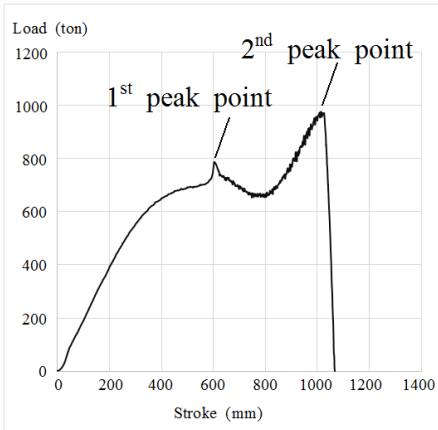


Fig. 6 Forming load of the punch according to stroke

력은 쿨롱 마찰계수와 일정 전단 마찰계수가 계속적으로 계산되며, 두 값 중 작은 값이 실시간으로 적용되며, 마찰력 계산식을 식 (3)~식 (5)<sup>(10)</sup>에 나타내었다. 트랙트릭스 다이의 바닥면에는 고정조건을 적용하였으며, 소재, 펀치 및 다이가 서로 접촉한 상태에서부터 성형이 시작되어 소재가 완전히 다이를 빠져나간 후에 공정이 종료된다.

$$\tau_{coulomb} = \mu\sigma_n \tag{3}$$

$$\tau_{const} = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

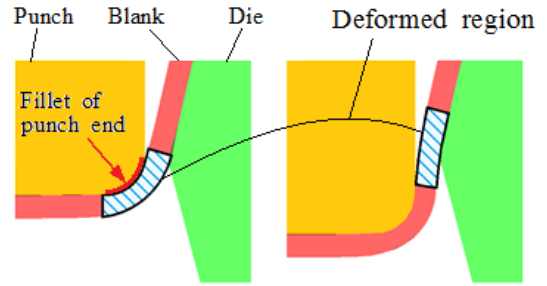
$$\tau \begin{cases} \tau_{coulomb} < \tau_{const} & \text{then } \tau = \tau_{coulomb} \\ \tau_{coulomb} > \tau_{const} & \text{then } \tau = \tau_{const} \end{cases} \tag{5}$$

- $\tau_{coulomb}$  : 쿨롱 마찰력
- $\tau_{const}$  : 일정 전단마찰력
- $\mu$  : 쿨롱 마찰계수
- $m$  : 일정 전단마찰계수
- $\sigma_n$  : 다이 표면에 작용하는 수직응력
- $\sigma_0$  : 다이 표면에 작용하는 Von-Mises 응력

3.4 딥 드로잉 공정 해석 결과

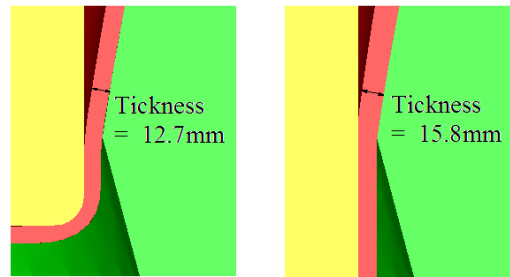
3.4.1 스트로크에 따른 펀치의 성형하중

상용 유한요소해석 소프트웨어인 Forge NxT 1.0.2를 이용하여, Fig. 4의 트랙트릭스 다이를 적용한 딥드로잉 해석 결과, 펀치는 Fig. 6와 같이 두 개의 하중 피크점을 가지는데, 첫 번째 피크점은 펀치가 다이 끝단을 통과하여 스트로크 41.8mm를 지난 지점에서 나타난다. 이는 소재가



(a) 1<sup>st</sup> peak point (b) Just after 1<sup>st</sup> peak point

Fig. 7 Deformed regions according to near and just after 1<sup>st</sup> peak point



(a) 1<sup>st</sup> peak point (b) 2<sup>nd</sup> peak point

Fig. 8 Increase of the blank thickness while punch is descending

펀치 끝의 필렛(Fillet of punch end) 부분을 완전히 감싸고 난 후 소재, 펀치 및 다이의 응력집중부가 동시에 접촉하는 시점이며 이를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 첫 번째 피크점이 나타난 후에는 소성변형 영역이 Fig. 7(b)와 같이 전환되며 성형하중이 감소한다. 이후 스트로크의 진행이 계속되면 응력집중부로 유입되는 소재량이 점점 증가하면서 소재의 두께가 Fig. 8과 같이 두꺼워지기 때문에 성형하중이 다시 증가한다. 두 번째 피크점은 소재 끝단이 다이의 응력집중부를 통과하는 지점으로, 소재가 다이를 완전히 빠져나오기 직전이며 최대의 소재 두께와 최대의 성형하중을 가지며, 소재가 다이를 완전히 빠져나오면 하중은 0이 된다.

3.4.2 스트로크에 따른 다이 응력집중부의 응력

스트로크에 따른 다이 응력집중부의 Von-Mises 응력을 파악하기 위하여, Fig. 9와 같이 1/6 해석 모델에서 등간격인 10개의 노드점을 선택한 후, 노드점에서 발생하는 Von-Mises 평균 응력을 스트로크에 따라 Fig. 10에 나타내었다. 펀치 성형하중의 두 피크점에 해당되는 스트로크 구간에서

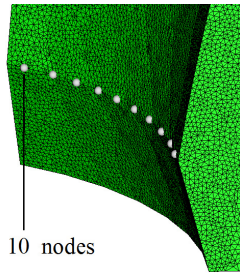


Fig. 9 10 Nodes to obtain Von-Mises stresses at the part of stress concentration

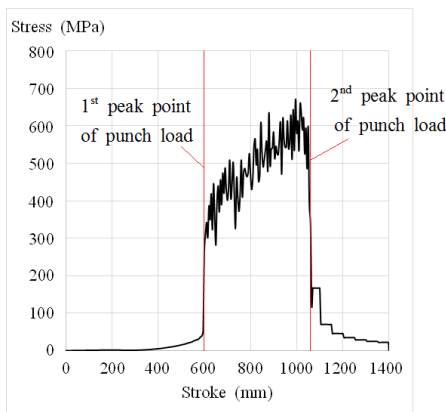


Fig. 10 Von-Mises stress at the part of stress concentration according to stroke

다이의 응력이 집중적으로 발생하는데, 이는 소재가 다이의 응력집중부를 지난 직후부터 다이를 완전히 빠져나가는 지점까지이다. 스트로크에 따른 응력상승의 원인은 3.4.1절에서 언급한 바와 같이, 다이의 응력집중부를 빠져나가는 소재가 점점 두꺼워지기 때문이다. 스트로크에 따른 펀치의 성형하중과 다이의 Von-Mises 응력을 비교한 결과, 경향이 유사하므로 해석 기법이 타당한 것으로 판단되며, 유한요소해석의 오차 및 10개 노드점의 평균응력에 대한 영향으로 응력 진폭이 발생한 것으로 사료된다.

#### 4. 트랙트릭스 다이의 형상 최적설계

트랙트릭스 곡선 형상에 따른 펀치의 성형하중 및 다이 응력집중부의 Von-Mises 응력 분석을 통하여, 트랙트릭스 다이의 수명향상을 위한 형상 최적설계를 수행하였다.

4.1 설계인자에 따른 트랙트릭스 다이의 형상 설계규칙<sup>(9)</sup>에 따라  $r_{out} = 261.0mm$ ,  $r_{in} = 560mm$ ,  $r_p = 248.8mm$ ,  $\rho = 21mm$ 로 결정되며,

Table 3 Dimensions of the tractrix dies according to the heights

Case	Height of die (mm)	Ratio of width to height	Flowed angle of workpiece (°)
1	890	1:2.99	2.8
2	722	1:2.42	5.2
3	630	1:2.11	7.4
4	568	1:1.91	9.5
5	522	1:1.75	10.9
6	486	1:1.63	12.7
7	457	1:1.53	14.5
8	433	1:1.45	15.9

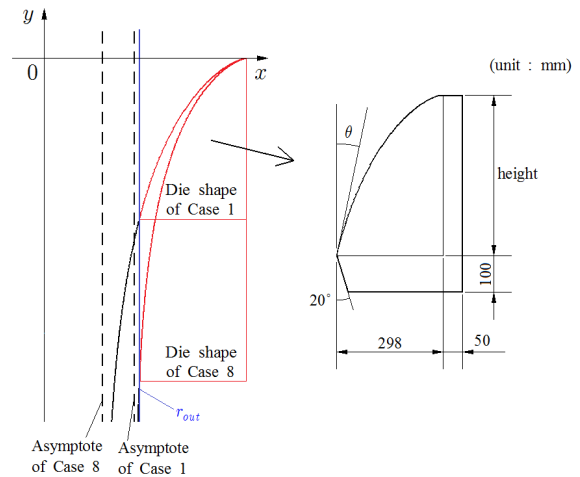


Fig. 11 Shapes of tractrix dies according to the distances of asymptote

변경 가능한 다이의 설계인자는 높이이다. 트랙트릭스 곡선의 형상계수  $a$ 를 변경하여 점근선 (Asymptote)을 이동하면 트랙트릭스 곡선의 높이를 변경할 수 있다. 본 연구에서는 점근선의 간격을 소재의 초기 두께와 같은 12.5mm로 설정하여, 높이가 서로 다른 총 8개의 트랙트릭스 다이를 모델링하였다. 각 Case에 대한 다이의 높이, 종횡비 및 소재의 유입각도(Flowed angle of workpiece,  $\theta$ )를 Table 3에, 다이의 단면을 Fig. 11에 나타내었다.

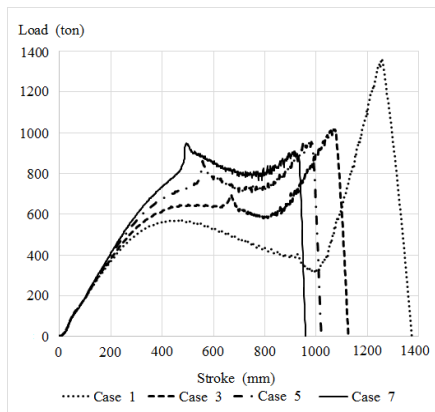
#### 4.2 트랙트릭스 다이의 최적설계

##### 4.2.1 트랙트릭스 다이의 높이 변화에 따른 펀치의 성형하중

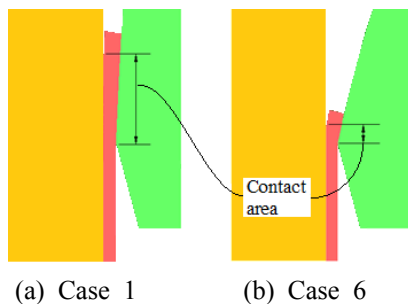
트랙트릭스 다이의 높이에 따른 딥드로잉 해석 결과로, 스트로크에 따른 펀치의 성형하중을 Fig.

**Table 4** Forming load of the punch of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> peak points according to heights of the tractrix die

Case	Load of 1st peak point (ton)	Load of 2nd peak point (ton)
1	403.5	1360.9
2	574.7	1104.1
3	695.2	1016.4
4	787.1	975.4
5	862.1	963.2
6	910.4	948.7
7	950.9	911.3
8	1002.5	963.0



**Fig. 12** Forming load of the punch according to the cases(1, 3, 5, 7) in table 3

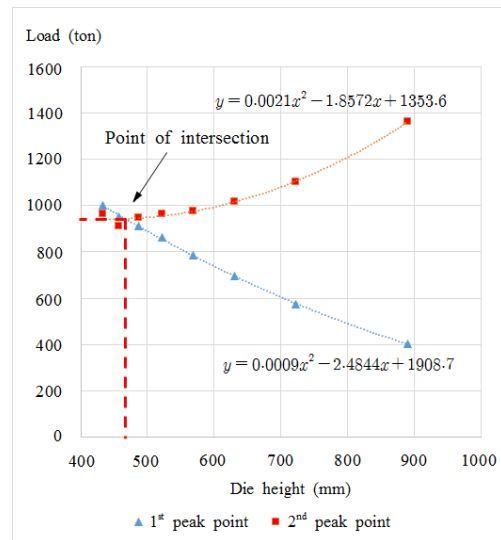


**Fig. 13** Variation of contact area between the die and the blank according to the height of the tractrix die

12에, 첫 번째 및 두 번째 성형하중의 피크점을 Table 4에 나타내었다. 다이의 높이가 낮아질수록 첫 번째 피크점의 하중은 증가하고 두 번째 피크점의 하중은 감소하며, Case7부터 첫 번째 피크점이 두 번째 피크점 보다 커진다. 소재 유입각도가 증가할수록 응력집중부에서 소재의 변형량

**Table 5** Averaged equivalent stress at the part of stress concentration in each cases

Case	Average stress (MPa)
1	573.7
2	500.8
3	479.5
4	488.0
5	475.2
6	430.4
7	443.6
8	517.3



**Fig. 14** Trend lines of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> peak points for calculating the minimum forming load of the punch

이 크므로, 첫 번째 피크점이 나타날 때 다이 높이가 낮아질수록 성형하중이 점점 증가한다. 또한, 두 번째 피크점에서는 소재의 유입각도가 커질수록 다이와 소재의 접촉면적이 Fig. 13과 같이 작아지므로 성형하중이 감소한다.

최소의 펀치 성형하중을 구하기 위하여, 첫 번째 및 두 번째 하중 피크점의 추세선에 대한 교점을 도출하여 Fig. 14에 나타내었다. 그 결과, 다이 높이 467mm, 중형비가 1:1.157일 때 최소 성형하중 944ton을 얻을 수 있었다.

4.2.2 트랙트릭스 다이 응력집중부에 작용하는 Von-Mises 응력

트랙트릭스 다이의 응력집중부에 작용하는 Von-Mises 응력의 평균값을 Table 5에 나타내었으며, 대표적인 4개 Case의 스트로크에 따른 응

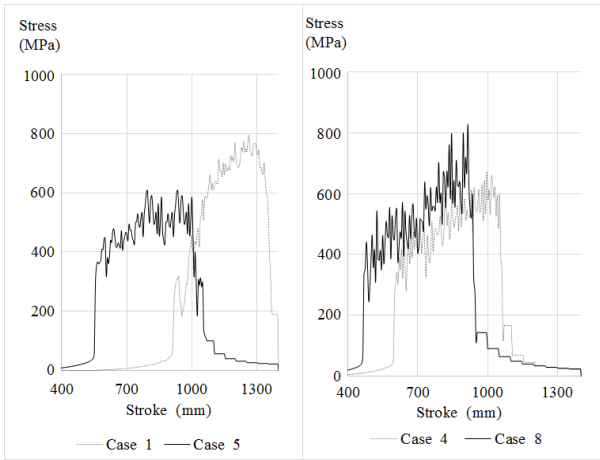


Fig. 15 Von-Mises stress at the part of stress concentration according to stroke

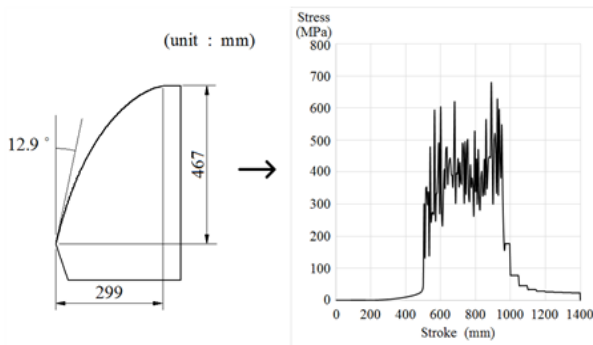


Fig. 16 Model of the optimal tractrix die and its equivalent stress at the part of stress concentration according to stroke

력값을 Fig. 15에 나타내었다. 평균응력은 Case 6에서 최소값 430.4MPa, Case 1에서 최대값 573.7MPa이 나타나며, 이는 펀치의 성형하중과 경향이 비슷하다. 즉, 다이 응력집중부의 응력이 펀치의 성형하중에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, 트랙트릭스 다이의 높이를 제어함으로써, 다이에 발생하는 응력 및 펀치의 성형하중을 감소시킬 수 있다.

따라서, 트랙트릭스 다이가 최소의 응력을 갖기 위하여 최소의 펀치 하중이 발생하는 경우인 트랙트릭스 다이의 중횡비가 1 : 1.57(높이 467mm)일 때 딥 드로잉 해석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 16과 같이 Von-Mises 평균응력이 393.5MPa로 나타났으며 이는 Case1 ~ Case 8 중에서 최소값이기 때문에, 최적의 다이 형상으로 결정했다.

트랙트릭스 다이의 체적 및 AISI-D2(SKD-11)의 kg당 가격 6500원을 이용하여 다이 제작에 소요

Table 6 Material cost of the existing and the optimal tractrix dies

	The existing tractrix die	The optimal tractrix die
Volume ( $mm^3$ )	$8.84 \times 10^7$	$7.40 \times 10^7$
Cost (Won)	4,510,610	3,775,850

되는 재료비는 Table 6에 의하면, 기존 다이의 경우 451만원, 최적 다이의 경우 376만원으로 약 16%의 재료비가 절감됨을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 CNG 압력용기 성형을 위한 트랙트릭스 다이의 생산 비용 절감과 수명 향상을 위해, 트랙트릭스 곡선의 점근선 이동을 통하여 서로 다른 높이를 가지는 8개의 다이의 딥드로잉 공정해석 수행 및 최적의 트랙트릭스 다이 높이를 제안하였다.

(1) 트랙트릭스 다이를 이용한 딥드로잉 공정에서, 두개의 펀치 성형하중의 피크점에 대한 추세선을 도출하였으며, 이들의 교차점을 계산한 결과 다이의 높이가 467mm일 때, 최소의 펀치 성형하중 944ton을 얻었으며, 이때의 단면 중횡 비율은 1 : 1.57이다.

(2) 트랙트릭스 다이의 응력집중부에 발생하는 Von-Mises 평균응력을 도출한 결과, 다이의 높이가 486mm인 Case 6에서 최소값 430.4MPa 나타났으며, 펀치의 성형하중을 감소시켜 다이에 발생하는 응력을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 펀치의 최소 성형하중을 가지는 경우인 다이의 중횡비율이 1 : 1.57일 때, 다이 응력집중부의 평균응력을 도출한 결과, 최소값 393.5MPa로 나타났으며, 이는 다이의 수명 향상 및 제조 원가를 절감시킬 수 있다.

본 논문에서 제시한 트랙트릭스 다이 형상의 최적설계방안은 D.D.I 공정을 이용한 압력용기 제조에 널리 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 후기

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

참고문헌  
(References)

- (1) Yoon, J. H., Jung, S. Y., Choi, Y., Kim, C. and Choi, J. C., 2002, "A Study on the Development of Computer-Aided Process Planning System for the Deep Drawing & Ironing of High Pressure Gas Cylinder," *Journal of KSPE*, Vol. 19, No. 2, pp. 177~186.
- (2) Kim, E. S., Kim, J. H., Park, Y. S., Kim, C. and Choi, J. C., 2003, "Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel Using Steel Liner Manufactured by D.D.I Process," *Journal of KSPE*, Vol. 20, No. 1, pp. 205~213.
- (3) Park, C. W., Kim, C., Kim, Y. H. and Choi, J. C., 2003, "A Study of Automated Process Planning Using Autofrettage for Large-Sized High Pressure Vessel," *Spring Conference Proceeding, KSAE*, pp. 167~172.
- (4) Narayanasamy, R. and Loganathanb, C., 2005, "Study on Wrinkling Limit of Commercially Pure Aluminium Sheet Metals of Different Grades when Drawn Through Conical and Tractrix Dies," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 419, No. 1~2, pp. 249~261.
- (5) Iliescu, C., 1990, *Cold-Pressing Technology*, Elsevier Science Publishing Company, INC., p. 281.
- (6) NK Co., Ltd, 2001, *Process Planning and Die Design for Liner of CNG Cylinder*, NK Co., Ltd, pp. 12~41.
- (7) 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. 865~871.
- (8) Shim, H. B. and Yang, D. Y., 1994, "Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Deep Drawings of Circular and Square Cups Considering Bending," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 18, No. 7, pp. 1738~1750.
- (9) Choi, J. C., Jung, S. Y. and Kim, C., 2004, "Development of an Automated Design System of a CNG Composite Vessel Using a Steel Liner Manufactured Using the DDI Process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 11, pp. 781~788.
- (10) Transvalor, 2016, *Transvalor Solution-Forge NxT 1.0-Reference Document-Processes Tutorial, Part 5 : Process data*, Transvalor, Padova, p. 84.