

강재(34CrMo4)를 사용한 대형 고압가스 용기의 설계 자동화 시스템 개발

김지훈*, 김의수*, 김 철**, 최재찬#

Development of an Automated Design System of a Large Pressure Vessel using the Steel, 34CrMo4

Ji-Hoon Kim*, Eui-Soo Kim*, Chul Kim**, Jae-Chan Choi#

ABSTRACT

This paper describes a research work on the development of computer-aided design system for deep drawing & ironing of a high pressure vessel. An approach to the system is based on the knowledge-based rules. Knowledge for the system is formulated from plasticity theories, handbook, experimental results and empirical knowledge of field experts. An attempt is made to link programs incorporating a number of expert design rules with the process variables obtained by commercial FEM software, DEFORM and ANSYS, to form a useful package. It is composed of five main modules, which are calculation of product thickness, input, production feasibility check, process planning, and autofrettage process modules and two submodules, which are folding check and process variable verification submodules. Programs for the system have been written in AutoLISP on the AutoCAD 2000 using personal computer. The developed system makes it possible to design and manufacture large high pressure vessel requiring D.D.I. process more efficiently.

Key Words : D.D.I.(디프 드로잉과 아이어닝의 연속 공정), Process design(공정설계), Finite Element Analysis (유한요소해석), Autofrettage Process(자긴처리), Limit drawing ratio(한계드로잉비)

1. 서론

소화기와 LPG 가스통 등과 같은 고압 가스용기의 생산방식은 이음새 없는 튜브(seamless tube)를 사용하여 바닥성형(bottom forming)과 접합(closing)공정 및 열간 오목성형 공정(forming to concave bottom)을 거쳐서 만들어진다. 이러한 생산 방식은 고가의 재료비와 재료·보관상의 문제점이

있으며 경량화된 고품질 고압가스용기의 생산을 어렵게 한다. 그러나 최근에 행정이 긴 대용량의 수평식 프레스가 개발되어 D.D.I.(deep drawing & ironing) 공정을 이용한 고압가스용기의 제조가 가능하게 됨에 따라 후판의 블랭크를 D.D.I. 공정에 적용시켜 고압가스 용기를 제조하는 공정에 관한 연구가 진행되고 있다.^{1,2,3} 본 연구에서는 앞선 연구에서 수행되지 않은 구조장도 및 피로수명의 향

접수일: 2003년 3월 25일; 게재승인일: 2003년 7월 11일
* 부산대학교 정밀기계공학과
** 부산대학교 기계기술연구소
교신저자: 부산대학교 기계공학부
Email: jcchoi@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-3073, Fax: (051) 514-7640

상을 위한 자진 처리와 소성변형시 변형에 의한 소재의 파열, 성형 결함, 연속 공정시의 최대하중을 줄이기 위한 다이 사이의 간격 등과 같은 실제 현장의 생산성과 깊이 관련된 문제들에 대하여 숙련된 기술자의 경험, 축적되어온 관련 연구 결과, 소성가공 이론, 유한요소 해석을 통한 최적의 공정변수를 기술 지식 베이스로 구축한 후, 트랙트릭스 다이 및 D.D.I. 공법으로 대형 강재 고압가스 용기:길이, 1930mm, 외경, 339mm,용 공정 설계 자동화 시스템을 개발했다. 자동으로 창출된 공정의 타당성은 DEFORM 및 ANSYS 로 검증하였다.^{4,5,10,11}

2. 시스템의 구성

본 시스템은 용기 두께 결정 모듈, 입력 모듈, 가공 가능성 검사 모듈, 공정 설계 모듈, 자진 압력 처리 모듈로 구축되어 있고 하나의 환경에서

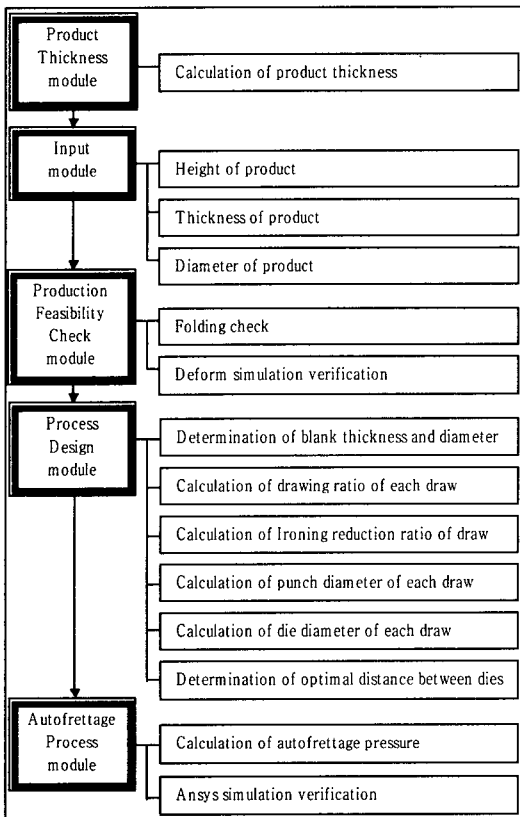


Fig. 1 Configuration of the system

수행되며 각 모듈들이 규칙과 데이터 베이스를 공유하게 되어있다. 시스템의 전체적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 용기 두께 결정 모듈

용기 두께 결정 모듈에서는 용기의 두께가 고압가스 안전관리기준에 준하여 상용압력(working pressure) 2.11kgf/mm²의 2.25 배 내압을 견딜 수 있도록 최소두께를 계산한다.

2.2 입력 모듈

입력 모듈은 생산하고자 하는 최종 제품의 높이와 외경 및 용기 두께 결정 모듈에서 계산된 두께를 AutoCAD 의 DCL 대화창에 사용자가 입력하면 제품에 대한 형상인식을 위하여 형상데이터를 설계에 용이한 수치 리스트 형식으로 변환 시키는 모듈이다.

2.3 가공 가능성 검사 모듈

가공 가능성 검사 모듈은 폴딩 체크 부모모듈, 공정 변수 검증 부모모듈을 통하여 가공 가능한 설계 데이터를 제공한다. 가공 가능성 검사 모듈을 구성하는 각 부모모듈의 기능적인 설명을 아래에서 다루고자 한다.

2.3.1 폴딩 체크 부모모듈

폴딩 체크 부모모듈에서는 입력 모듈에서 입력된 최종 제품의 사양에 대해 블랭크 두께에 대한 펀치 직경비와 블랭크 직경비를 구하여 폴딩 체크 선도를 통해 폴딩 현상이 발생하지 않는 드로잉비를 결정한다.

2.3.2 공정 변수 검증 부모모듈

공정 변수 검증 부모모듈은 소성가공 해석용 도구인 DEFORM 을 이용하여 각 성형 단계의 드로잉비와 아이어링 단면적 감소율에 따른 소재의 파열, 성형 결함 등과 같은 제품의 공정 변수를 검증하는 모듈이다.

2.4 공정 설계 모듈

공정 설계 모듈에서는 가공 가능성 검사 모듈을 통하여 얻은 설계 데이터를 가지고 블랭크의 직경으로부터 최종제품의 내경인 마지막 펀치의 직경까지 가능한 Draw 수를 결정한다. 또한, 설계

된 공정에 대해 디프 드로잉 및 아이어닝 혹은 아이어닝 및 아이어닝 연속 공정의 최대하중을 줄이기 위한 다이 사이의 거리를 결정한다.

2.5 자긴 압력 처리 모듈

자긴 압력 처리 모듈은 제작된 완제품 용기의 구조 강도 및 피로수명을 향상시키는 자긴 처리 (autofrettage process) 공정을 수행하여 용기에 압축 잔류응력을 얻게 하는 모듈이다. 또한 구조 해석용 도구인 ANSYS 를 이용하여 자긴 처리 공정을 검증한다.

3.설계 규칙

3.1 용기 두께 결정 규칙

규칙 1) 용기 두께 계산은 다음식에 의한다.

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = pr / t \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = pr / 2t \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r \approx 0 \quad (3)$$

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/6} = k^2 \quad (4)$$

$$\sigma_1 = 2k \quad (5)$$

Von Mises 조건식에서 $k \approx Y.S / \sqrt{3}$ 이므로

$$\therefore t = \sqrt{3} pr / 2Y.S \quad (6)$$

여기서 p: 파열 시험 압력

Y.S: 항복강도

r: 압력 용기의 반경

3.2 입력 모듈 규칙

규칙 2) 제품의 바닥두께와 블랭크의 두께는 같다.³

규칙 3) 블랭크의 체적은 체적일정조건에 따라 제품의 체적과 같다.³

3.3 가공 가능성 검사 규칙

규칙 4) 초드로잉 공정에서 블랭크 두께에 대한 펀치 직경비(d_p/t_0)와 블랭크 직경비(D/t_0)로 폴딩 체크 선도에 적용시켰을 때 Fig. 4 에서 곡선의 왼쪽 아래 영역에 위치하여야 폴딩이 발생하지 않는다.³

규칙 5) 드로잉 작업시 한계드로잉비(LDR) 이상으로 성형할 수 없다.^{3,6}

규칙 6) 초드로잉 작업시 한계드로잉비는 2.2 로 한다.^{3,6}

규칙 7) 두 번째 드로잉이라면 한계드로잉비는 1.35 로 한다.^{3,6}

규칙 8) 세 번째 이후의 드로잉이라면 한계드로잉비는 1.25 로 한다.^{3,6}

규칙 9) 드로잉 및 아이어닝 작업시, 넥킹 (necking) 및 찢어짐(tearing)이 발생하지 않으려면 아래 식을 만족하여야 한다.⁷

$$F_{forming} < F_{t,max} \quad (7)$$

$$F_{t,max} = \pi \cdot d_m \cdot t_0 \cdot \sigma_u \quad (8)$$

여기서, d_m : 제품의 평균직경[mm]

σ_u : 소재의 극한인장강도[kgf/mm²]

3.4 공정 설계 규칙

규칙 10) 드로잉과 아이어닝 다이사이의 거리는 드로잉시 하중에 최대하중을 지나서 하강하고 있을 때, 아이어닝 공정이 시작되도록 한다.³

규칙 11) 2 차 성형단계에서 드로잉, 아이어닝 I, 아이어닝 II 순서로 성형된다면 컵이 세 공정에 걸쳐서 동시에 성형되지 않도록 다이 사이의 거리를 결정한다.³

규칙 12) 1 차 성형단계에서 초드로잉 공정은 블랭크 홀더가 없는 tractrix 다이에서 작업한다.^{1,8}

규칙 13) 각 성형단계에서 총 한계 단면적 감소율은 50%이다.³

규칙 14) 아이어닝 작업시 한계 단면적 감소율 이상으로 성형할 수 없다.³

규칙 15) 아이어닝 작업시 한계 단면적 감소율은 35%이다.^{3,6}

규칙 16) 각 성형단계의 펀치 직경은 최소 2% 이상 감소하여야 한다.⁶

규칙 17) 아이어닝과 아이어닝 다이 사이의 거리는 전자의 아이어닝시 가공되는 컵 직경보다 크게 한다.⁶

3.5 자긴 압력 처리 규칙

규칙 18) 자긴 압력 (autofrettage pressure)은 다음 식을 만족하여야 한다.⁹

$$p^* < p < p^{**} \quad (9)$$

$$p = 2k \left\{ \ln \frac{c}{a} + \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{c^2}{b^2} \right\} \right\} \quad (10)$$

$$p^* = k \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) \quad (11)$$

$$p^{**} = 2k \ln \frac{b}{a} \quad (12)$$

여기서, p : 자긴 압력
 p^* : 내경 항복 압력
 p^{**} : 외경 항복 압력
 a : 내경
 b : 외경
 c : 자긴 압력을 가했을 때 항복이 발생 하는 직경

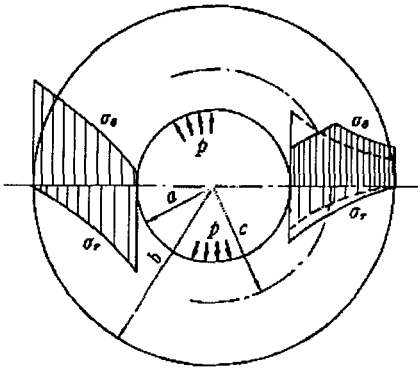


Fig. 2 Stress distribution of thick-walled cylinder subjected to internal pressure

규칙 19) 탄소성해의 소성역 ($a \leq r \leq c$) 에서 각 방향 응력은 다음식에 의해서 구해진다.⁹

$$\sigma_r = -p + 2k \ln \frac{r}{a} \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2k \quad (14)$$

$$\sigma_z = k \frac{c^2}{b^2} \quad (15)$$

여기서, σ_r : 소성역에서 반경방향 응력
 σ_θ : 소성역에서 원주방향 응력
 σ_z : 소성역에서 축방향 응력

규칙 20) 탄성해로 구한 각 방향 응력은 다음과 같다.⁹

$$\Delta\sigma_r = -p \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (16)$$

$$\Delta\sigma_\theta = p \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (17)$$

$$\Delta\sigma_z = p \frac{a^2}{b^2 - a^2} = \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (18)$$

여기서, $\Delta\sigma_r$: 탄성역에서 반경방향 응력
 $\Delta\sigma_\theta$: 탄성역에서 원주방향 응력
 $\Delta\sigma_z$: 탄성역에서 축방향 응력

규칙 21) 자긴처리에 의한 잔류 응력은 아래식 으로부터 구할 수 있다.⁹

$$\sigma_{residual-r} = \sigma_r - \Delta\sigma_r \quad (19)$$

$$\sigma_{residual-\theta} = \sigma_\theta - \Delta\sigma_\theta \quad (20)$$

$$\sigma_{residual-z} = \sigma_z - \Delta\sigma_z \quad (21)$$

여기서, $\sigma_{residual-r}$: 반경방향 잔류 응력
 $\sigma_{residual-\theta}$: 원주방향 잔류 응력
 $\sigma_{residual-z}$: 축방향 잔류 응력

4. 시스템의 적용 및 고찰

본 연구에서는 대형 고압가스 용기의 제작을 위해 개발된 D.D.I. 공정 설계 자동화 시스템에 외경 339mm, 높이 1930mm, 벽두께 7.4mm 의 제품을 적용시켜 각 모듈에서 수행된 결과를 고찰하고자 한다.

4.1 용기 두께 결정 모듈에의 적용

고압가스 안전관리기준에 준하여 상용압력 (working pressure) 2.11kgf/mm² 의 2.25 배인 파열 시험 압력을 견딜 수 있는 압력 용기의 두께는 용기 두께 결정 규칙 1)의 식(6)에 의하여 7.4mm 로 계산되었다.

4.2 입력 모듈에의 적용

사용자의 편의를 위해 AutoLISP 을 기반으로 한 DCL 창을 이용하여 제작 되어질 용기의 형상

치수:높이 1930mm, 벽두께 7.4mm, 외경 339mm 를 Fig. 3 와 같이 입력하면 입력 모듈 규칙 2)에 의하여 초기 원형 블랭크의 두께는 16mm 로 결정되고 입력 모듈 규칙 3)에 의해 원형 블랭크의 직경은 1201.02mm 로 결정된다.

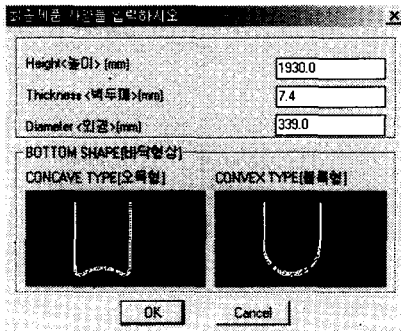


Fig. 3 DCL on the input module

4.3 가공 가능성 검사 모듈에의 적용

4.3.1 폴딩 체크 부모들에의 적용

입력 모듈에서 결정된 원형 블랭크의 두께와 직경, 각 컵드로잉의 드로잉비와 가공 가능성 검사 규칙 5), 6)에 의하여 Table 1 을 얻었다. 각 드로잉비에 대한 d_{p1}/t_0 와 D/t_0 값을 Fig. 4 의 폴딩 체크 선도에 나타낼 때 가공 가능성 검사 규칙 4)에 의하여 폴딩이 발생하지 않는 드로잉비는 2.1 이하

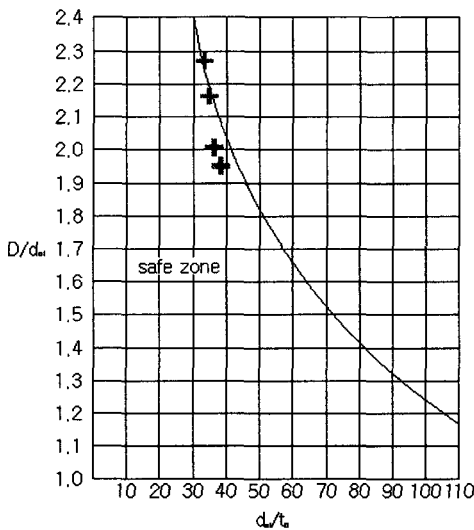


Fig. 4 Folding check diagram for cup drawing

이다. 그러나 초드로잉비 $b_1=1.8$ 이하인 경우는 3draw 공정을 벗어나기 때문에 고려하지 않는다.

Table 1 Ratios between d_{p1}/t_0 and D/t_0 of 1st draw

b_1	1.9	2	2.1	2.2
d_{p1}/t_0	38.46	36.48	34.69	33.07
D/t_0	1.95	2.06	2.16	2.27

4.3.2 공정 변수 검증 부모들에의 적용

폴딩 체크 부모들에서 결정된 드로잉비에 대한 각 공정의 펀치 및 다이 직경은 공정 설계 규칙 7)~17)에 의하여 계산되는데 이를 Table 2, 3, 4, 5 에 각각 나타내었다. $b_1=1.9$ 일 때는 Table 2 에서 보여준 것처럼 3draw 에서 드로잉비, 1.38, 총 단면적 감소율, 51%,로 가공 가능성 검사 규칙 8) 과 공정 설계 규칙 13)에 위배되므로 불가능한 공정이 된다. Table 3 은 $b_1=2.0$ 일 때 3draw 에서 드로잉비, 1.31,로 가공 가능성 검사 규칙 8)에 위배되므로 불가능한 공정이다. 불가능한 공정에 대한 타당성을 검증하기 위하여 DEFORM 해석을 수행하였다. 공구는 모두 강체로 가정되며, 소재와의 접촉면에서는 Coulomb 의 마찰 법칙이 만족되는 것으로 하고 전 공정에 걸쳐서 펀치와 소재사이의 마찰계수, 0.2, 다이와 소재사이의 마찰계수, 0.1 을 적용하였다. $b_1=2.0$ 과 $b_1=1.9$ 일 때 DEFORM 해석 결과는 Fig. 5 와 같이 넥킹이 발생함으로 인하여 불가능한 공정으로 검증되었다. 따라서 폴딩 체크 부모들과 공정 변수 검증 부모들을 통하여 초드로잉비 $b_1=2.1$ 일 때만이 가공 가능한 공정임을 알 수 있다. 초드로잉비가 2.1 일 때 본 부모들에서

Table 2 In the case of drawing ratio, 1.9

1. Blank design		cup length	789.19
thickness	16	cup section area	19711.61
volume	18126341.69	reduction area ratio	16.25
diameter	1201.02	stage-3	
2. Draw 1		die diameter	474.08
drawing ratio	1.9	cup length	979.19
punch diameter	615.32	cup section area	15886.91
die diameter	648.92	reduction area ratio	19.4
cup length	420.74	4. Draw 3	
cup section area	31773.82	drawing ratio	1.38
reduction area ratio	47.37	punch diameter	324.2
3. Draw 2		stage-1	
drawing ratio	1.35	die diameter	344.95
punch diameter	452.24	cup length	1541.07
stage-1		cup section area	10905.15
die diameter	484.24	reduction area ratio	31.36
cup length	660.95	stage-2	
cup section area	23536.31	die diameter	339
reduction area ratio	25.93	cup length	2180
stage-2		reduction area ratio	29.31
die diameter	479.19	total reduction area ratio	51.48

자동으로 계산된 펀치직경과 다이 직경 및 설계 변수들을 Table 4 에 나타내었다.

Table 3 In the case of drawing ratio, 2.0

1. Blank design		cup length	844.59
thickness	16	cup section area	18725.78
volume	18126341.69	reduction area ratio	16.25
diameter	1201.02	stage-3	
2. Draw 1		die diameter	450.67
drawing ratio	2	cup length	1047.91
punch diameter	583.71	cup section area	15092.46
die diameter	617.31	reduction area ratio	19.4
cup length	458.66	4. Draw 3	
cup section area	30184.92	drawing ratio	1.31
reduction area ratio	50	punch diameter	324.2
3. Draw 2		stage-1	
drawing ratio	1.35	die diameter	344.97
punch diameter	428.82	cup length	1539.54
stage-1		cup section area	22359.09
die diameter	460.82	reduction area ratio	25.93
cup length	707.34	stage-2	
cup section area	22359.78	die diameter	339
reduction area ratio	25.93	cup length	2180
stage-2		reduction area ratio	29.38
die diameter	455.77	total reduction area ratio	48.92

Table 4 In the case of drawing ratio, 2.1

1. Blank design		cup length	899.3
thickness	16	cup section area	17834.07
volume	18126341.69	reduction area ratio	16.25
diameter	1201.02	stage-3	
2. Draw 1		die diameter	429.5
drawing ratio	2.1	cup length	1115.8
punch diameter	555.11	cup section area	14373.67
die diameter	588.71	reduction area ratio	19.4
cup length	495.84	4. Draw 3	
cup section area	28747.33	drawing ratio	1.25
reduction area ratio	52.38	punch diameter	324.2
3. Draw 2		stage-1	
drawing ratio	1.35	die diameter	344.97
punch diameter	407.64	cup length	1539.54
stage-1		cup section area	10915.98
die diameter	439.64	reduction area ratio	24.06
cup length	753.16	stage-2	
cup section area	21294.47	die diameter	339
reduction area ratio	25.93	cup length	2180
stage-2		reduction area ratio	29.38
die diameter	434.6	total reduction area ratio	46.37

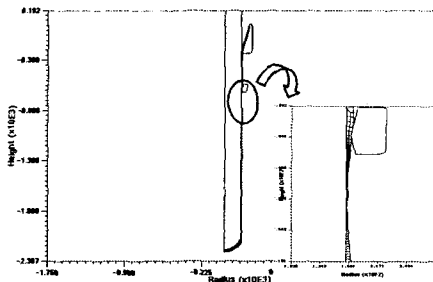


Fig. 5 Plastic instability by the necking in the drawing ratios, 1.9 and 2.0

4.4 공정 설계 모듈에의 적용

입력 모듈로부터 블랭크의 체적이 결정되면 입력 모듈 규칙 2)에 의하여 블랭크의 두께가 결정되고, 입력 모듈 규칙 4)에 의하여 블랭크의 직경이 결정된다.

가공 가능성 검사 모듈을 통하여 얻은 설계 데이터 및 공정 설계 규칙 7)~17)를 통하여 본 모듈에서 자동으로 창출되어진 공정 설계도면을 Fig. 6 에 나타내었다.

창출된 공정에 대해 2draw 에서 연속 공정시의 최대 하중을 줄이기 위해 다이 사이의 최적 거리를 구하였다. D.D.I. 수평 프레스 장비의 최대 스트로크 한계로 인해 다이 사이 거리의 총 합은 900mm 로 하였다. 공정 설계 규칙 10), 11), 17)에 의해 재드로잉과 아이어닝 다이 사이의 거리는 최대 550mm, 최소 100mm 로 할 수 있으며 하중을 줄이기 위한 방안으로 다이 사이 거리를 Table 6 에서처럼 등 간격으로 설정했다.

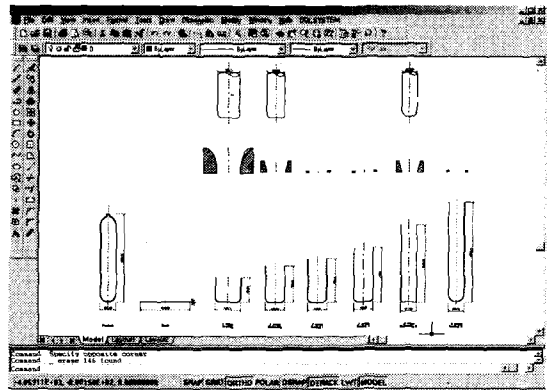


Fig. 6 The D.D.I. process generated in the process planning module for the product.

각 경우에 대하여 Fig. 7 과 같은 모델링으로 DEFORM 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 8~Fig. 10 에 각각 나타내었다. Fig. 8 의 구간 I 에서는 드로잉 작업 수행 시 하중을 보여 주고 구간 II 에서는 드로잉과 아이어닝 작업을 동시에 수행될 때의 하중을 보여주며 구간 III 은 드로잉 작업이 끝난 후 첫번째 아이어닝 작업시 하중을 보여준다. 구간 IV 에서는 첫번째 아이어닝과 두번째 아이어닝 작업이 동시에 수행될 때의 하중을 보여주고 구간 V 는 두번째 아이어닝 작업시의 하중을 보여준다. 두

작업을 동시에 할 때, 즉 드로잉 및 아이어닝 혹은 아이어닝과 아이어닝의 동시 작업시에 최대 하중이 나타남을 알 수 있다. Table 6 의 “C”의 경우, 재드로잉과 아이어닝 다이 사이의 간격, 400mm 아이어닝과 아이어닝 다이 사이의 간격, 400mm 일 때, Fig. 10 에서 보여 준 것처럼 소요되는 하중이 1189 톤으로 가장 낮았다. 동일한 방법으로 3draw 에 대해서도 시뮬레이션을 수행한 결과 드로잉과 아이어닝 다이 사이 거리가 300mm 일 때 소요하중이 810 톤으로 가장 낮았다.

Table 6 Distance between redrawing die and ironing die, and between ironing dies

거리	redrawing die ironing die	ironing die ironing die
A	100mm	800mm
B	250mm	650mm
C	400mm	400mm
D	550mm	350mm

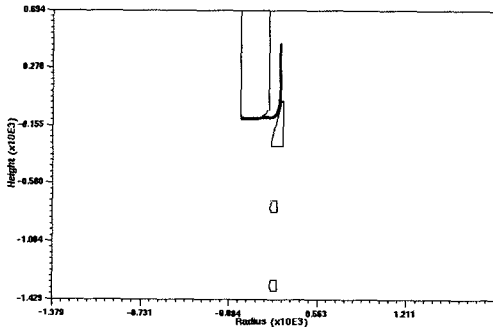


Fig. 7 Deform analysis for optimal distance between dies in the 2nd draw

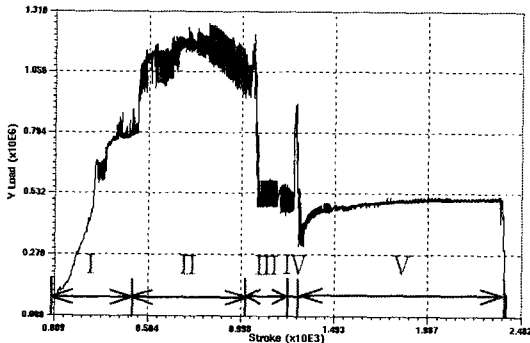


Fig. 8 In the case of “A” in the table 6 (Max. 1261ton)

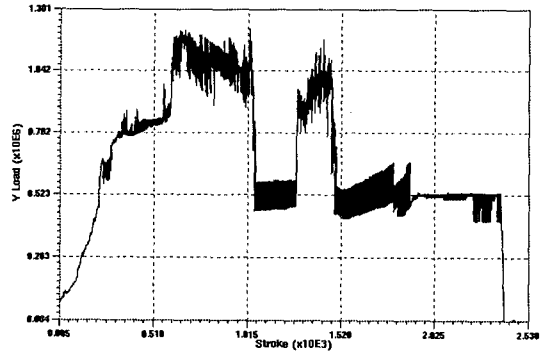


Fig. 9 In the case of “B” in the table 6 (Max. 1219ton)

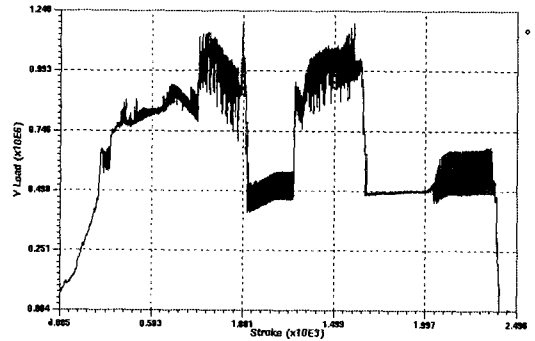


Fig. 10 In the case of “C” in the table 6 (Max. 1189ton)

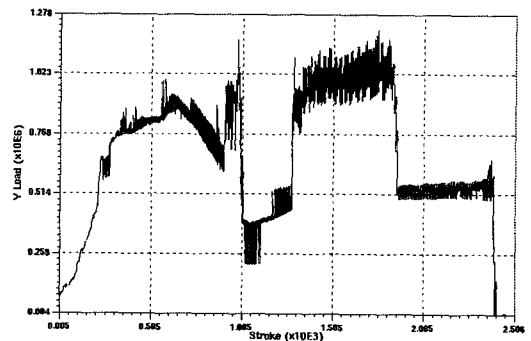
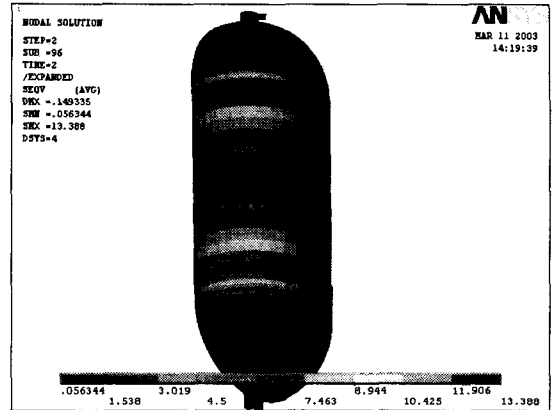


Fig. 11 In the case of “D” in the table 6 (Max. 1209ton)

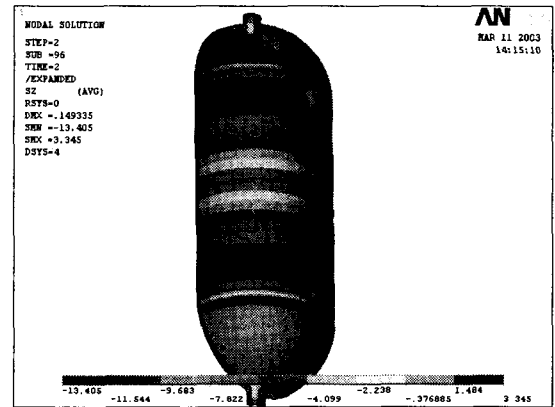
4.5 자긴 압력 처리 모듈에의 적용

공정 설계 모듈에서 제작된 완제품 용기에 대하여 구조강도 및 피로수명 향상을 위한 자긴 처리 작업시 자긴 압력을 높여 좀 더 큰 잔류응력을 얻기 위해 압력용기와 동일한 두께의 원통에 넣고 자긴 작업을 수행한 후 원통을 제거함으로써 기존 용기 두께의 파열압력, 4.64kgf/mm² 이상의 자긴

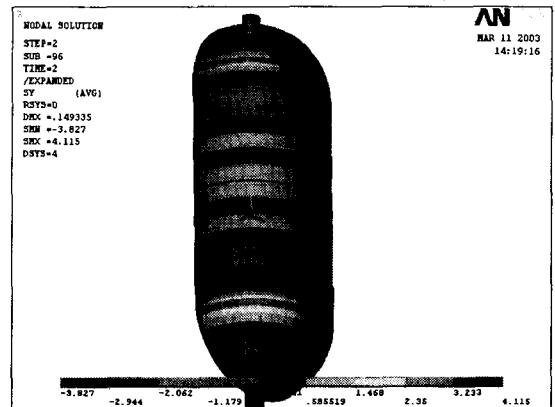
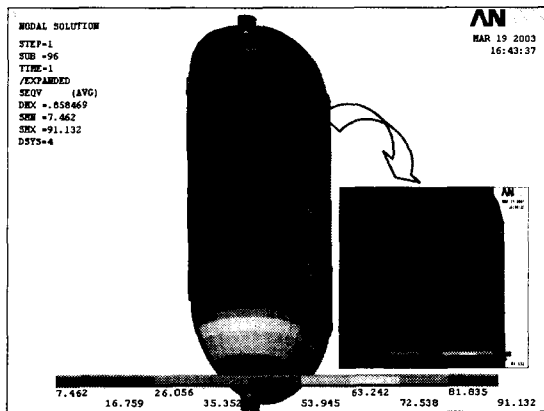
압력, 8.67 kgf/mm^2 을 적용할 수 있고 그에 따른 압축잔류응력 또한 상당히 큰 값을 얻을 수 있었다. 자진 압력 처리 규칙 18)의 식(10)에 의해 계산된 내경 항복 내압, 8.13 kgf/mm^2 과 외경 항복 내압, 8.85 kgf/mm^2 사이에서 내외경의 중간부분까지를 항복시키는 자진 압력, 8.67 kgf/mm^2 이 계산되어진다. 이 자진 압력을 용기에 가한 후 제하 과정을 통해 압축 잔류 응력을 발생시켰다. 압력용기에 발생된 잔류응력은 자진 압력 처리 규칙 19)~21)에 의해 6.85 kgf/mm^2 을 얻었다. 계산된 잔류응력의 타당성을 검증하기 위하여 ANSYS 해석을 수행하였다. Fig. 12는 자진 압력, 8.67 kgf/mm^2 이 작용할 때의 등가응력의 분포를 보여주는 것으로 최대 등가응력이 91.13 kgf/mm^2 로서 소재의 인장강도 101.02 kgf/mm^2 보다 작으므로 안전함을 알 수 있다. Fig. 13에서는 제하 과정 후 각 방향의 압축 잔류 응력 분포를 보여주는데 θ 방향의 최대 압축 잔류 응력이 13.4 kgf/mm^2 으로 자진 압력 처리 규칙에 의하여 계산된 값과 약간의 차이를 보였으나 용기의 실린더 중간부분에서는 자진 압력 처리 규칙 21)의 식(20)에 의해 계산된 값과 거의 일치하였다. 위에서 기술한 과정을 통하여 자진 처리를 수행한 제품은 용기에 압축 잔류응력이 존재함으로 인하여 구조 강도 및 피로수명을 향상시킬 수 있었다.



(a) Equivalent stress

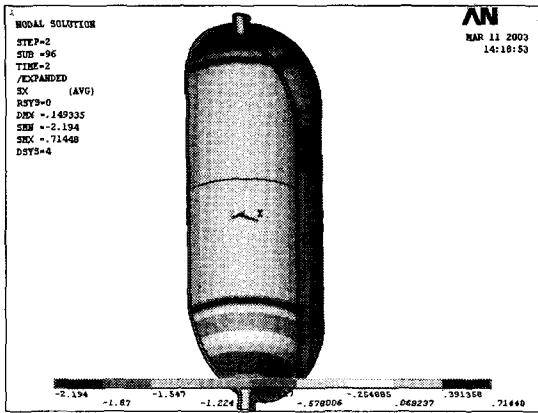


(b) θ -Direction stress



(c) Z-Direction stress

Fig. 12 Distribution of the stress at the autofrettage pressure, 8.67 kgf/mm^2 on loading



(d) R-Direction stress

Fig. 13 Distribution of the residual stress after uncovering the thick-walled cylinder on unloading

5. 결론

본 연구에서는 강재(34CrMo4)를 사용한 대형 고압가스 용기:길이, 1930mm, 직경, 339mm, 두께, 7.4mm 의 제작을 위하여 설계 규칙을 정립하고 D.D.I. 공정 설계 자동화 시스템을 개발했다. 개발된 시스템의 특징은 다음과 같다.

1. 가공 가능성 검사 모듈의 폴딩 체크 부모들을 통하여 폴딩이 발생하지 않는 드로잉비를 결정하였으며, 공정 변수 검증 부모들에서는 가공 가능한 공정의 펀치 및 다이 직경과 설계 변수들을 자동으로 계산하여 검증 할 수 있다.
2. 공정 설계 모듈은 정량화된 설계 규칙에 의해 공정 설계 도면을 자동으로 창출시킬 수 있으며 유한요소해석을 통해 최대 펀치 하중이 최소로 되는 다이 사이의 거리를 구하였다.
3. 자긴 압력 처리 모듈에서는 제작된 완제품 용기에 대하여 자긴 처리 작업시 압력용기와 동일한 두께의 원통에 넣고 더 높은 자긴 압력을 가한 후 원통을 제거함으로써 높은 압축 잔류응력을 얻을 수 있었고 이로 인한 용기의 구조 강도 및 피로 수명을 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

1. Yoon, J. H., Jung, S. Y., Choi, Y., Kim, C., Choi, J. C., "A Study on the Development of Computer-Aided Process Planning System for the Deep Drawing & Ironing of High Pressure Gas Cylinder," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 177-186, 2002.
2. Schmid, W. and Reissner, J., "Critical Deformation In The Ironing of Deep-Draw Cups," Int. J. Mech., pp. 597-604, 1982.
3. Brochure of Fielding Co. Ltd, UK, 1998.
4. Iliescu, C., Cold-Pressing Technology, pp. 257-398, 1990.
5. Yeo, H. T., Hur, K. D., Choi, Y., "Stress Analysis of the Prestressed Dies by Using FEM," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 114-122, 1999.
6. Mi, X., Yang, Y., Liang, Y., Experimental Study on Ironing of Stainless Steel and Optimization of Process Parameters, pp. 1653-1656, 1993.
7. Jun, G. C., Forming of Sheet Metal, Ban Do, pp. 155-177, 1993.
8. Avitzur, B., Handbook of Metal-Forming Processes, pp. 581-739, 1983.
9. Kim, D. W., Theory of Plasticity, pp. 311-315, Cheong Moon Gak, 2001.
10. Jun, S. M., Suh, E. K., Shim, H. B., Kim, T. W., Lee, B. Y., "An Analysis of Bolted Opening Structure and Development of Analysis Expert System Using ANSYS," Trans KSME A, Vol. 17, No. 4, pp. 731-742, 1998.
11. Kim, E. S., Kim, J. H., Park, Y. S., Kim, C., Choi, J. C., "Development of an Automated Design System of CNG Composite Vessel using Steel Liner Manufactured by D.D.I Process," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 205-213, 2003.