

대형 압력용기 제작을 위한 9Ni-4Co-0.3C 강의 드로잉공정 설계에 관한 연구

홍진태*, 이석렬*, 김경진*, 양동열#, 이경훈**, 최문선***

Design of drawing process of 9Ni-4Co-0.3C steel to make a large pressure vessel

Jin Tae Hong*, Seok-Ryul Lee*, Kyung Jin Kim*, Dong Yol Yang#, Kyung Hun Lee**, Moon Sun Choi***

ABSTRACT

In this work, computer-aided process design is carried out to develop an optimal preform of a pressure vessel. Knowledge-based rules are employed to design the preform, and they are formulated using the handbooks of plasticity theories. In the FE-analysis, a commercial finite element code, ABAQUS was employed. Axisymmetric deep drawing of a hemisphere-bottomed cup has been analyzed for various combinations of die design parameters. The length of the land of die, the clearance between punch and die and the clearance between the blank holder and die are optimized to minimize the forming load. The results of the simulations are verified with the experiments which are scaled down to one tenth of the actual size.

Key Words : Deep drawing (디프 드로잉), Elastic-plastic finite element method (탄소성 유한요소법), Drawing ratio (드로잉 비), Clearance (공차), Blank holder (블랭크홀더), 9Ni-4Co-0.3C steel (9Ni-4Co-0.3C 강)

기호설명

- t/D = Ratio of thickness relative to the diameter in a sheet panel
- L = Length of die land
- CL = Clearance between punch and die
- HG = Clearance between blank holder and die

1. 서론

대형 압력용기는 캡슐 형상의 액체 및 기체의 저장장치이며, 내부 재료의 유동으로 인한 고온, 고압에 잘 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 현재의 대형 압력용기는 헤드부(반구형)와 몸체부(실린더형)를 각기 제작한 후, 용접공정을 통하여 결합하여 제작하므로, 열응력, 피로응력 및 용접결합 등이 자주 수반되어 제품의 강도나 수명의 저하 원인이 된다. 특히, 원주방향 인장응력이 주로 발

접수일: 2005 년 5 월 30 일; 게재승인일: 2005 년 10 월 7 일

* 한국과학기술원 기계공학과

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dyyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

** 국방과학연구소

*** (주)ASA 특수금속사업부

생하는 압력용기에서는 압연 후 축방향 용접으로 제작된 몸체부 때문에 앞의 단점들이 제품의 신뢰성에 치명적이다. 따라서, 소성가공을 통해 헤드부와 몸체부를 일체형으로 제작함으로써 제품의 강도 및 피로수명을 향상시킬 필요가 있다. 일반적인 강재의 동형 드로잉성형 시, 파단이 쉽게 일어나므로 국소가열 등을 이용하는 연구가 있으나,¹ 이는 잔류 열응력을 제거하는 후공정이 수반되어야 하는 단점이 있다. 본 연구에서는 일반적인 강재보다 강한 재료인 9Ni-4Co-0.3C 강을 이용하여 소재의 파단을 방지하고 성형하중을 최적화 할 수 있는 디프 드로잉 공정을 설계하도록 한다.

2. 드로잉 공정개요 및 설계규칙

본 연구에서는 유동성형 공정(flow forming process)으로 직경 800mm 급의 대형 압력용기를 제작하기 위한 전 단계로서, 최대 용량 7000 ton의 유압프레스로 그 예비성형체를 제작하고자 한다. 최종제품의 부피로부터 역방향 계산을 통해 설계된 초기 블랭크소재의 크기 및 성형 후 요구되는 형상은 Fig.1 과 같으며, 소재 물성은 Table 1 에, 압축실험을 통한 변형율-응력 데이터는 Table 2 에 나타내었다.

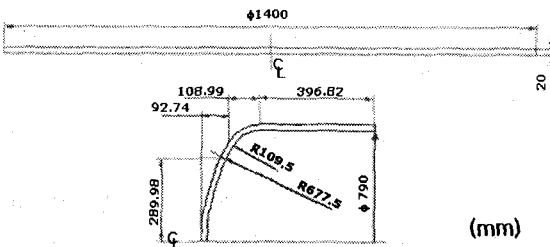


Fig. 1 Design of initial workpiece and preform shape

Table 1 The chemical composition of 9Ni-4Co-0.3C steel

| (wt%) | | | |
|-------|-------|----|-----|
| C | 0.21 | Co | 4.0 |
| Mn | 0.28 | Cr | 1.9 |
| Si | 0.17 | Mo | 1.9 |
| S | 0.001 | V | 0.1 |
| P | 0.007 | Fe | bal |
| Ni | 7.5 | | |

Fig.1 에서 보듯이 초기 소재의 크기가 크고 두껍기 때문에 높은 성형하중으로 인해 성형이 어려울 수 있으므로 성형하중을 최대한 낮출 필요가 있으며, 블랭크인 판재의 특성상 주름발생을 방지하기 위한 블랭크 홀더의 간격 및 채움 여부, 후가공을 줄이기 위한 편치와 다이 사이의 간격, 다이 랜드부 길이의 영향 등을 고려할 필요가 있다. 성형공정 설계를 위한 유한요소해석에서는 ABAQUS 를 이용하여 사각형 요소로 축대칭 탄소성해석을 수행하였으며, 주름발생을 체크하기 위하여 formsys3D 를 이용하여 셀요소로 3 차원 탄소성해석을 수행하였다.^{2,3}

Table 2 Stress-strain data of 9Ni-4Co-0.3C steel

| Strain (ϵ) | Stress (σ , MPa) |
|-----------------------|--------------------------|
| 0 | 1160 |
| 0.05 | 1165 |
| 0.1 | 1170 |
| 0.3 | 1190 |
| 0.5 | 1210 |
| 1 | 1220 |

2.1 트랙트릭스 (Tracktrix) 금형

일반적으로 드로잉비에 대한 주름발생 정도는 Table 3 과 같으며,^{4,5} 본 연구에 이용되는 판재두께/블랭크직경 (t/D)의 값은 20/1400 (1.4 %)로서 일반적으로는 블랭크홀더 없이 주름 발생을 억제하면서 드로잉 공정을 수행할 수 없다고 판단되지만, 소재의 특성을 알 수 없으므로, 공정의 단순화를 위해 트랙트릭스 금형의 사용을 고려하여 보았다.

Table 3 Wrinkling characteristic according to the ratio of thickness and diameter of a steel sheet

| t/D (%) | Wrinkling |
|-----------|---------------|
| 0.5 | Highly severe |
| 0.5-1.5 | Severe |
| 1.5-2.5 | Not severe |
| 2.5 | No wrinkling |

트랙트릭스 금형은 일반적으로 t/D 가 2.5 이상일 때 주로 사용하고, 설계규칙에 의해 알려진 최

적의 금형형상은 Fig.2 와 같다.⁶⁻⁸ Fig.2(a)에서 성형 후의 소재의 내경이 790 mm 이므로 d_p 는 790 mm 이며, 초기소재의 직경이 1400 mm 이므로 h 는 305 mm 이다. 설계규칙을 따라 설계한 금형은 Fig. 2(b) 와 같다.

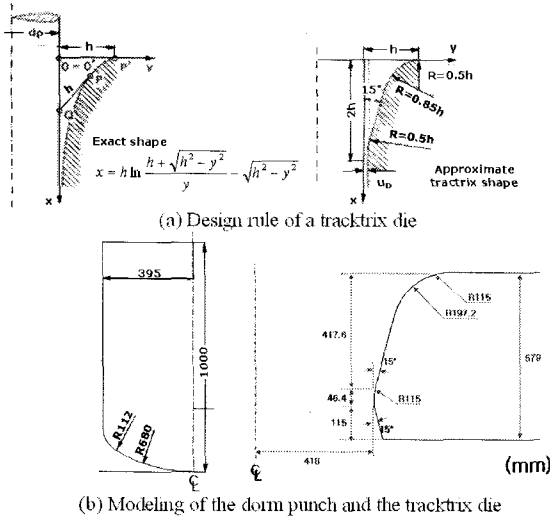


Fig. 2 The design rule and modeling of a tracktrix die

2.2 블랭크 홀더가 있는 드로잉 금형

트랙트릭스 금형을 이용한 드로잉 공정시, 주름이 발생하는 경우, 블랭크홀더가 있는 드로잉 금형(Fig.3)을 통해 드로잉을 수행하여야 한다.

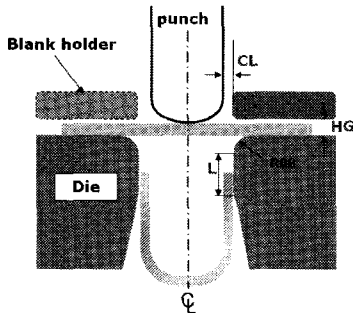


Fig. 3 Schematics of drawing process with the blank holder and design variables

이때, 다이의 곡률반경은 소재 두께의 4 배 이하인 경우 파단이 일어나기 쉽고, 10 배 이상인 경

우 주름이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서는 4 배인 80 mm 를 다이의 곡률반경으로 정하였다. 소재의 파단 및 성형하중에 영향을 미치는 인자인 다이 랜드부 길이 (L), 펀치와 다이 사이의 간격 (CL), 블랭크홀더와 다이 사이의 간격 (HG)을 결정하기로 하였으며, 블랭크홀더는 보유한 프레스의 특성상 블랭크홀딩력을 가할 수 없는 구조이므로 블랭크홀더와 다이의 간격을 유지시키고 침식으로 고정하는 방식을 이용하기로 하였다. 위의 설계변수들을 변화시키면서 유한요소해석을 통해 성형하중을 최적화하는 결과를 구하도록 하였으며, 각각의 설계변수들은 서로 독립적이므로 한 변수씩 조정하여 계산하였다.

3. 유한요소해석 결과

3.1 트랙트릭스 금형을 이용한 드로잉 공정 해석

2.1 절에서 설계한 트랙트릭스 금형을 이용하여 2 차원 성형해석을 수행한 결과는 Fig.4 와 같다.

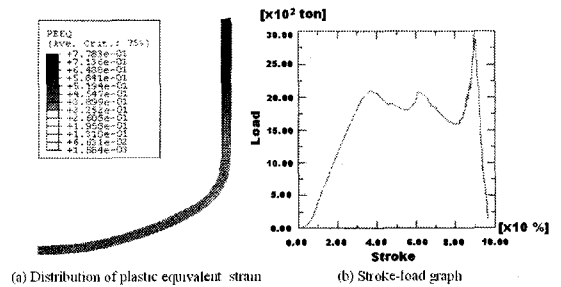


Fig. 4 Results of 2-D FE analysis with tracktrix die

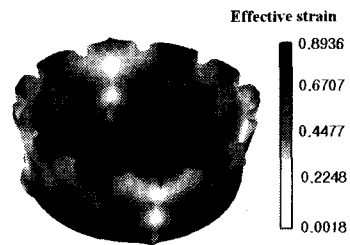


Fig. 5 Result of 3-D FE analysis with tracktrix die

해석결과 소재의 파단은 일어나지 않았으며,

성형하중은 3000 톤으로 프레스의 용량을 넘지 않는 것으로 해석되었다. 그러나, 주름 발생여부를 파악하기 위하여 3 차원 해석을 수행한 결과 Fig.5 와 같이 플랜지 부위에 심한 주름이 발생하는 것으로 파악되었다. 따라서, 본 소재 또한 드로잉 시, 블랭크 홀더가 필요함을 알 수 있다.

3.2 블랭크 홀더가 있는 드로잉 공정 해석

전절에서 소재의 변형형상과 같은 동형 펀치를 사용하여 해석한 결과 소재의 파단이 일어나지 않았으므로, 블랭크홀더를 이용한 드로잉 성형공정 해석에서도 동형 펀치를 이용하기로 하며, 2.2 절에서 설정한 설계변수 값들을 변화시켜보면서 최적의 금형설계를 하도록 한다.

3.2.1 랜드부 길이 (L)

펀치-다이 간격 (CL), 블랭크홀더-다이 간격 (HG)을 각각 25 mm, 25 mm로 고정하고 랜드부 길이를 10, 50, 100 mm로 변화시켰을 때, 소재의 파단 여부 및 등가소성변형률 분포, 압하량에 따른 성형하중의 변화를 비교하여 보았다.

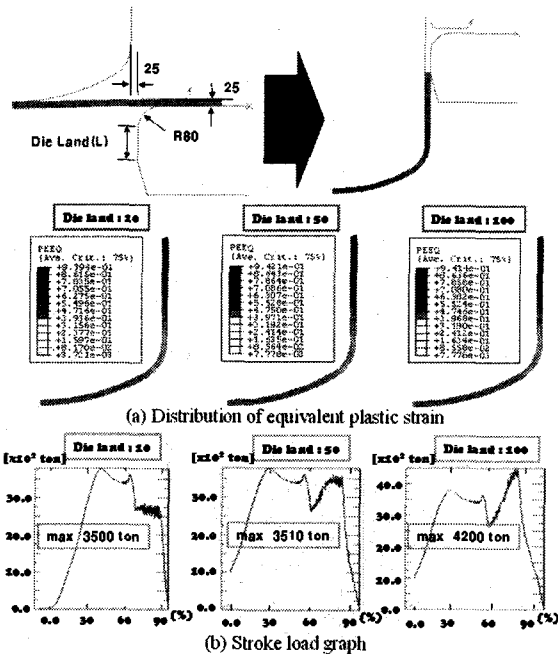


Fig. 6 Comparison of FE analysis with various length of the land of the die

Fig.6 은 흑연 윤활을 가정하여 마찰계수를 0.1로 설정하고 해석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 랜드부의 길이가 길어지더라도 최대 등가소성변형률은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 랜드부 길이는 소성변형률분포에는 큰 영향이 없음을 알 수 있으나, 최대 하중은 3500 ton에서 4200 ton까지 증가하였다. 랜드부 길이가 더 짧은 경우, 하중이 더 감소할 수 있으나, 금형 마모에 따른 제품의 치수정밀도 감소의 우려가 있으므로, 10 mm로 결정하는 것이 타당한 것으로 판단할 수 있다.

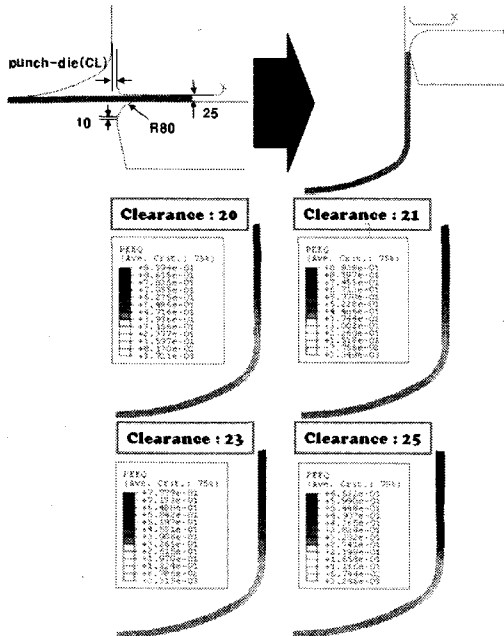
3.2.2 펀치와 다이 사이의 간격 (CL)

전절의 결과로써 랜드부 길이를 10 mm로 고정하고, 블랭크홀더-다이 간격 (HG)을 25 mm로 고정한 후, 펀치-다이 간격 (CL)을 소재 두께인 20 mm에서 21 mm, 23 mm, 25 mm로 변화시키면서 유한요소해석을 수행하였다.

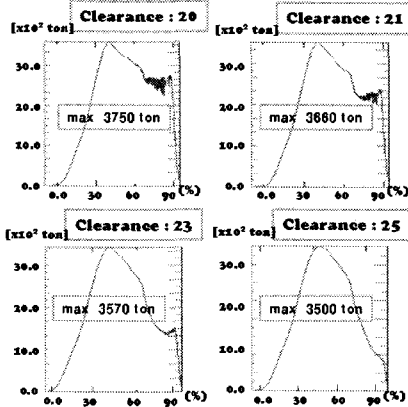
해석 결과는 Fig. 7 과 같으며, 모든 경우에서 소재의 파단은 일어나지 않았고, 펀치-다이간 간격이 커질수록 플랜지부위 등가소성변형률이 낮아지는 대신 등부위와 플랜지 부위의 두께편차가 약 20 %까지 발생하며, 최대 성형하중은 3750 ton에서 3500 ton으로 소폭 감소하였다.

최종제품 생산을 위해서는 아이어닝, 스피닝 등의 후가공을 통해 플랜지 부 두께를 5mm까지 감소시켜야 하는데, 이를 용이하게 하기 위해서는 사용되는 프레스의 최대하중 (7000ton) 내에서 재료의 두께 편차를 최소화하는 것이 유리하다. 플로우 포밍 공정은 정밀한 반면, 2 회 이상 수행할 경우, 내경 증가의 문제점을 야기시키며, 한번에 최대 5mm의 단면감소율을 가지므로, 아이어닝 공정으로 10mm까지 플랜지 두께를 감소시켜야 한다. 일반적인 아이어닝 공정의 최대 단면감소율은 35%이하이므로 2 회의 아이어닝 공정이 필요하며, 드로잉을 거친 소재의 플랜지부 두께는 최대한 20mm에 가까워야 소재의 파단 우려 없이 안전하게 아이어닝공정을 수행할 수 있다.

해석결과, 본 소재의 경우, 펀치-다이간 간격이 20mm인 경우에 소재의 파단이 이루어지지 않았고, 성형하중도 3750 ton으로 프레스의 성능을 충분히 만족하며, 치수 조정을 위한 추가적인 2 차 드로잉공정이 필요치 않으므로, 펀치-다이간 간격은 20 mm로 결정하는 것이 타당하다.



(a) Distribution of equivalent plastic strain



(b) Stroke load graph

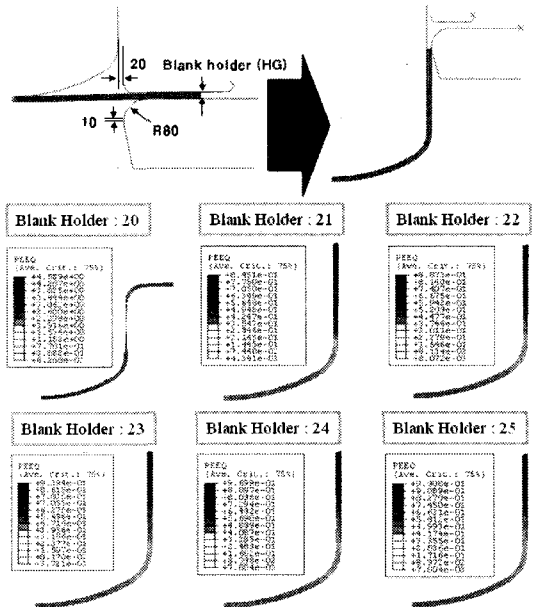
Fig. 7 Comparison of FE analyses with various clearance between punch and die

3.2.3 블랭크홀더 - 다이간 간격 (HG)

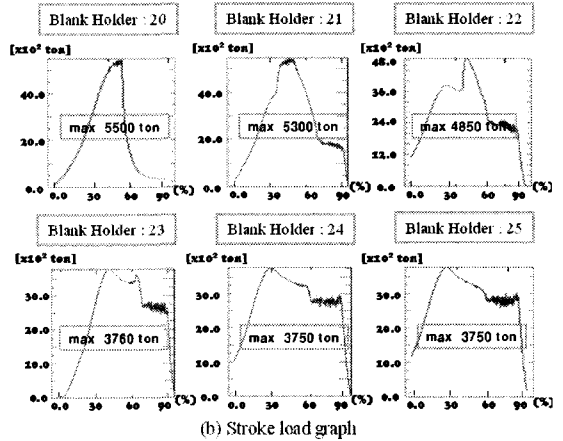
앞의 두 절에서 해석된 결과로 L=10 mm, CL=20 mm 로 고정한 후, 블랭크홀더-다이 간격 (HG)을 20 mm 부터 25 mm 까지 1 mm 씩 변화시키면서 해석을 수행하였다.

해석결과는 Fig.8 과 같으며, 그림에서 보는 바와 같이 블랭크홀더-다이 간격 (HG)이 20 mm 일 때, 소재가 성형되기 시작하면서 플랜지부위의 두

께가 두꺼워졌을 때, 블랭크홀더가 소재의 움직임을 방해하므로, 다이 곡률부분의 소재가 늘어나면서 파단이 발생하였다. HG 가 21 mm 이상인 경우에는 소재의 파단이 발생하지 않았으며, HG 가 증가할수록 최대 등가소성변형률은 증가하였다. 이는 HG 가 클수록 성형 초기에 플랜지부 소재의 두께가 많이 증가했다가 성형 후반부에 다시 20 mm 로 감소하므로 변형량이 많기 때문이다.



(a) Distribution of equivalent plastic strain



(b) Stroke load graph

Fig. 8 Comparison of FE analysis with various clearance between blank holder and die

최대 성형하중은 HG 가 증가할수록 5300 ton 에서 3750 ton 까지 감소하였으며, 특히 HG 가 23 mm 인 경우에 급격히 감소하여 그 이상의 HG 값에서는 비슷한 성형하중을 보인다. 즉, 본 공정에서는 소재의 두께가 23 mm 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 그러나 HG 가 큰 경우 주름 발생의 위험이 있으므로, HG 는 23 mm 가 타당하다.

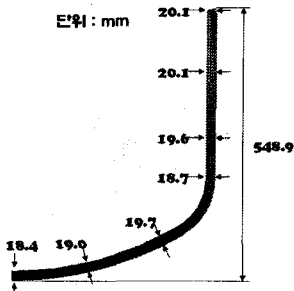


Fig. 9 Geometry of the workpiece after drawing process

이상에서 최종적으로 결정된 금형의 설계변수 값은 L=10 mm, CL=20 mm, HG=23 mm 이며, 유한요소 해석 결과 소재의 치수는 Fig.9 와 같으며, 성형하중 그래프는 Fig.8(b)의 네번째 그림과 같다. Fig.9 에서 보는 바와 같이 소재의 둠과 플랜지와와의 연결부의 두께가 1.3 mm 정도 얇아졌으며, 플랜지의 끝부분은 0.1 mm 정도 두꺼워졌다. 이는 금형을 강체로 가정하여 해석을 수행하였으므로, 랜드부를 통과할 때의 소재 두께가 20mm 인데, 랜드부 통과 후 0.1mm (0.5%)가 늘어난 것으로 소재의 스프링백에 의한 영향으로 파악된다.

4. 모사실험 결과

전절에서 결정된 금형 설계를 바탕으로 실제 재료거동을 파악하기 위하여 실물 크기의 실험을 하는 것은 많은 비용이 소요되므로, 모사실험을 수행하였다.

Fig.10 과 같이 준비된 모사실험은 소재(9Ni-4Co-0.3C 강) 및 금형 (SKD60)의 재료와 표면처리 (열처리, 래핑)는 실제 공정과 동일하게 하였고, 실험실에서 보유한 프레스에서 실험을 수행하기 위하여 소재와 금형의 크기를 1/10 직경비로 축소하였다. 또한, 성형하중을 측정하기 위하여 펀치에 스트레인게이지를 부착하여 실험하였다. 본 실험에

서는 원통형 잉곳(ingot)을 자른 후, 압연에 의해 $\phi 14 \times 2t$ 로 만들고, 어닐링 및 쇼트피닝을 거친 재료를 사용하였다. 이 경우, grain size 가 15 μm 정도 이므로, 두께방향으로 130 개 이상의 grain 이 배치하게 되어 등방성의 연속체로 가정할 수 있을 것으로 판단하였으며, 따라서, 치수효과는 크지 않을 것으로 가정하였다.

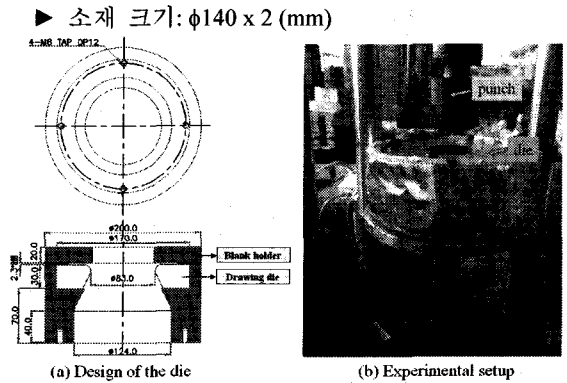


Fig. 10 Design of the die and experimental setup

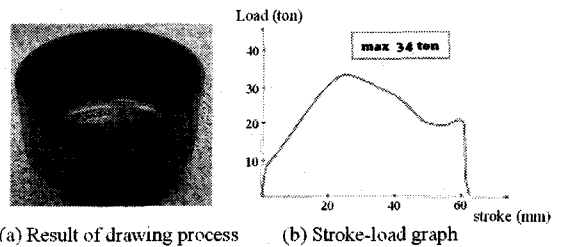


Fig. 11 Result of drawing process of 9Ni-4Co-0.3C

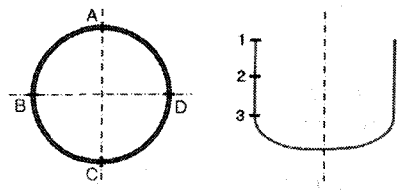


Fig. 12 Positions of measurement of the specimen

드로잉 공정으로 얻어진 소재의 변형형상은 Fig.11 과 같으며, 측정된 최대 성형하중은 34 ton 이었다. 이 결과로부터 치수효과의 영향이 거의 없다고 가정할 때, 실제공정의 성형하중은 모사실험

협에서 얻어진 하중의 100 배인 약 3400 ton 으로 예상된다. 이는 수치해석 결과인 3760 ton 의 90 % 수준으로 비교적 정확한 해석이 수행되었음을 알 수 있다.

성형된 시편의 두께 및 높이 등은 Fig.12 에서 제시한 기준위치에 따라 Table 2 에 나타내었다. 시편의 두께는 유한요소 해석에서 예측했던 바와 같이 Fig.12 의 3 부분에서 1 부분으로 갈수록 더 두꺼워진다. 그러나, 1 부분의 두께가 해석결과에 의한 예측보다 0.1 mm 더 두꺼우며, 이는 성형과정에서 금형의 변형으로 인한 오차로 판단된다. 이는 실험에 사용된 금형의 강성이 성형하중에 비하여 작았기 때문으로 판단되며, 실제 공정에서는 금형의 구조해석을 통하여 해결 가능하리라 판단된다.

Table 4 Thickness of the specimen at each position

| (mm) | A | B | C | D | Ave. |
|--------|------|------|------|------|------|
| 1 | 2.16 | 2.07 | 2.08 | 2.14 | 2.11 |
| 2 | 2.01 | 1.99 | 1.96 | 2.00 | 1.99 |
| 3 | 1.84 | 1.87 | 1.90 | 1.88 | 1.87 |
| height | 54.2 | 54.1 | 53.7 | 54.0 | 54.0 |

제안된 최종 설계에서, 펀치-다이간 간격이 소재의 두께와 같으므로, 더 이상 줄이면 전단에 의한 파단이 일어날 가능성이 높아지기 때문에 금형 설계의 변경은 불가능하다. 이는 다이의 외경의 열박음에 따라 어느 정도 오차를 줄일 수 있으나, 나머지 오차는 후속 공정에서 보완해야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 소성가공을 통해 대형 압력용기를 제작하기 위하여, 유한요소해석을 통해 예비형상을 성형하기 위한 9Ni-4Co-0.3C 강 소재의 드로잉 금형을 설계하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 본 소재에서는 t/D 가 1.4%일 때 트랙트릭스 금형을 이용한 드로잉 공정은 불가능하다.
- (2) 블랭크 홀더를 사용하는 금형에서 유한요소 해석을 통해, 보유한 장비에 적합한 최적의 랜드부 길이 (10mm), 펀치와 다이간 간격 (20mm), 블랭크홀더와 다이간 간격 (23mm)의 공정변수를 결정

하였다.

- (3) 실제모델의 1/10 직경비를 갖는 모사실험을 통해 본 공정 설계의 타당성을 검증하였다.

해석 및 실험 결과, 요구사항에 적합한 금형의 설계가 이루어졌으며, 앞으로 후 가공에 대한 연구에서는 금형의 변형에 대한 고려를 통해 소재의 치수 정밀도를 향상시키는 작업이 필요하다.

참고문헌

1. Lee, D. W., Song, I. S., Yang, D. Y., "Finite Element Analysis and Design of Axisymmetric Deep Drawing Process by Local Heating," J. of the KSPE, Vol.10, No. 3, pp. 198 - 204, 1993.
2. 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," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 2, pp. 177 - 186, 2002.
3. Sim, H. B., Yang, D. Y., "Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Deep Drawings of Circular and Square Cups Considering Bending," J. of the KSME, Vol. 18, No. 7, pp. 1738 - 1750, 1994.
4. Chon, K. C., "Forming of Sheet Metal," Bando Publishing Company, pp.131 - 150, 1993.
5. Avitzur, B., "Handbook of metal-forming processes," pp.581 - 739, 1983.
6. Lange, K., "Handbook of metal forming," McGraw-Hill, pp.20.1 - 20.69, 1985.
7. Choi, J. C., Kim, B. M., Huh, M. J., Kim, S. W., "A Study on Tool Design of Deep Drawing Using Personal Computer," J. of the KSPE, Vol. 7, No. 3, pp. 56 - 65, 1990.
8. Kim, S. H., Han, Y. H., Lee, S. H., "Data Book of Die Design," DaeKwang, pp.247 - 366, 1990.