[논문] 한국소성가공학회지, 제 14 권 제 7 호, 2005
Transactions of Materials Processing, Vol.14, No.7, 2005

대형 압력용기의 예비성형체 제작을 위한 공정 설계 및 금형 설계

이석렬[1]· 김경진[1]· 홍진태[1]· 양동열#· 이경훈[2]· 최문선[3]

Process and Die Design for Manufacturing the Preform of a Large Pressure Vessel

S. R. Lee, K. J. Kim, J. T. Hong, D. Y. Yang, K. H. Lee, M. S. Choi

(Received June 7, 2005)

Abstract

The paper is concerned with the process design and the die design for manufacturing the preform of a large pressure vessel. The cold-working processes are introduced to improve the fatigue strength and to simplify the manufacturing process. By the finite element simulation, the parameter design is carried out, which is subjected to constraints such as the blank size, press capacity and other minor limitations. The proposed design results are verified by the model experiments, in which the model is scaled down to one tenth of the original size.

Key Words : Large pressure vessel, Drawing, Ironing, Annealing, Elastic-plastic FEM

1. 서 론

대형 압력용기는 내부가 공동인 캡슐형상으로, 내부의 기체나 액체에 의해 발생되는 고온, 고압에 견디도록 설계되어야 한다. 기존에는 대형 압력용기의 경우 반구형부분과 가운데 실린더 부분을 각각 2 개씩 제작한 후 용접공정으로 결합하여 제작하였다. 기존의 공정은 용접부위가 많기 때문에, 이로 인해 열응력, 피로응력 및 결함 등이 수반되어 제품의 강도나 수명을 떨어뜨리게 된다. 더욱이 압력용기는 사용시 주로 인장응력이 발생하기 때문에, 앞의 단점들은 제품의 신뢰성에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

초기 소재를 가공하여 용접 등의 접합공정없이 원하는 형상으로 성형하는 소성가공공정은 주로 수 1~2mm 내외의 얇은 두께를 가지는 판재에서 많이 연구되었지만, 수십 mm 의 후판에 대한 연구는 크기 및 프레스의 용량의 한계와 소량 다품종의 생산방식 때문에 그리 많지 않다[1]. 이것도 대부분 반구형 부와 실린더부를 각기 제작하여 결합하는 방식이다[2].

본 연구에서는 소성가공 공정을 이용하여 대형 압력용기를 소량 생산하기 위해 적합한 공정설계 및 금형설계를 제안하고자 한다.

2. 제작 공정도

개발하기 위한 대형 압력용기는 지름 800mm, 길이 약 3,000mm 의 내부가 공동인 캡슐형상이다. Fig. 1 과 같은 축대칭 형상을 2 개 제작하여 결합

1. 한국과학기술원, 기계공학과
2. 국방과학연구소
3. ㈜에이에스에이
교신저자: 한국과학기술원, 기계공학과,
E-mail:dyyang@kaist.ac.kr

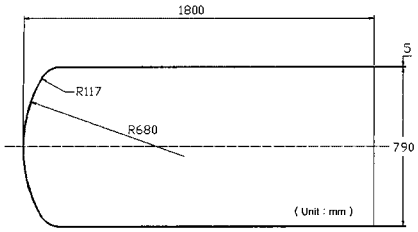


Fig. 1 Dimension of a large pressure vessel

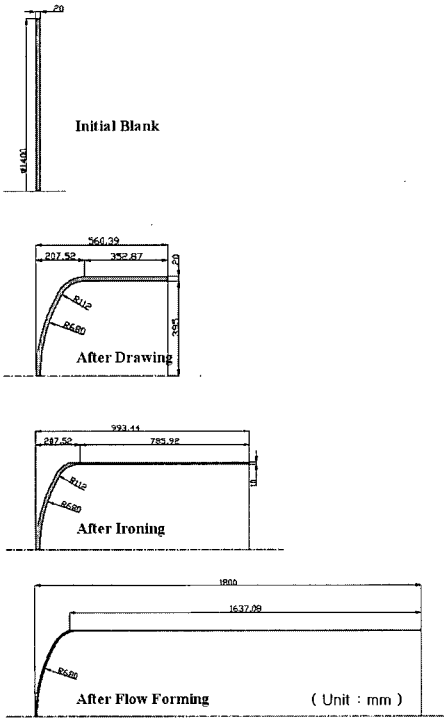


Fig. 2 Process sequences of the large pressure vessel

한다. 본 연구의 목적은 소성가공공정을 이용하여 압력 용기 제작을 위한 공정 설계 및 금형 설계를 제안하고, 이를 유한요소해석과 모사실험을 통해 검증하는 것이다. 제안한 전체 공정순서는 Fig. 2 와 같다.

먼저 드로잉 공정으로 원형 판재를 컵 형상으로 성형하고, 아이어닝 공정으로 드로잉 된 컵형상의 벽의 두께를 목표치에 맞추게 된다. 그 후 절삭공정과 플로우 포밍(튜브스피닝 공정)을 통하여 성형을 완료하고, 제작된 컵 형상의 소재 2 개를 용접공정을 이용해 결합하면 최종 제품이 완

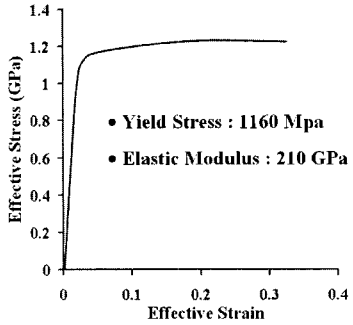


Fig. 3 Flow stress curve of 9Ni-4Co-0.3C

성된다. 본 연구에서는 스피닝 공정의 예비성형체를 제작하기 위한 드로잉 공정과 아이어닝 공정의 공정설계 및 금형설계를 제안하였다. 압력용기에 사용되는 소재재료는 9Ni-4Co-0.3C 강으로 유한요소해석을 위해 압축 및 인장 테스트를 통해 Fig. 3 의 재료물성을 얻었다. 7000ton 유압프레스의 용량 내에서 모든 공정을 수행할 수 있도록 하여야 하므로, 프레스 용량을 공정설계의 제약인자로 두어 공정 방법 및 금형치수를 결정하였다.

3. 드로잉 공정

드로잉 공정은 박판재로부터 컵, 캔, 자동차 패널 등의 제품을 생산하는 공정으로, 다이 공동에 블랭크를 올려놓고 펀치를 내려 성형하는 공정이다[3~5]. 본 연구에서는 금형제작 비용을 감안하여 1 단 드로잉 공정으로 소재의 주름발생 및 파단을 방지하고, 최종 성형력이 7000ton 이하가 되는 금형형상을 설계하였다. 초기 소재의 형상은 지름 1400mm, 두께 20mm 인 블랭크 형상으로, 이는 최종제품의 부피를 고려하여 역으로 계산한 치수이다. 드로잉 금형의 설계변수는 Fig. 4 와 같다. 금형의 코너반경은 일반적으로 소재두께의 4~10 배로 설계하는데, 코너반경이 작을 수록 주름발생 확률이 작아지게 된다. 코너반경은 성형력에 큰 영향을 주지 않기 때문에 주름발생을 최소로 할 수 있는 소재두께의 4 배 값인 80mm 로 결정하여 설계변수에서 제외시켰다. 따라서 사용된 설계변수는 펀치-드로잉 금형 간격, 블랭크 홀더-드로잉 금형 간격, 랜드부 길이로 총 3 개이다. 블랭크 홀더는 홀딩력을 이용하여 소재를 구속하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 블랭크 소재의 크기 및 프레스의 여유 공간 문제로 홀딩력을 조절할 수 있는 홀더를 장착하기가 어렵기 때문에 블랭

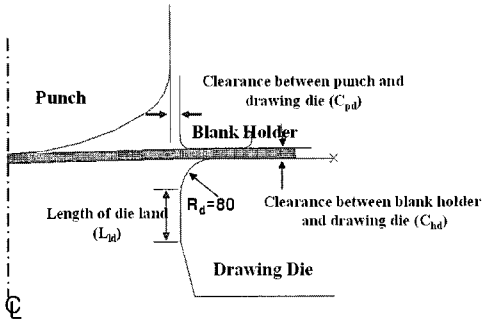


Fig. 4 Definition of Design variable for drawing process

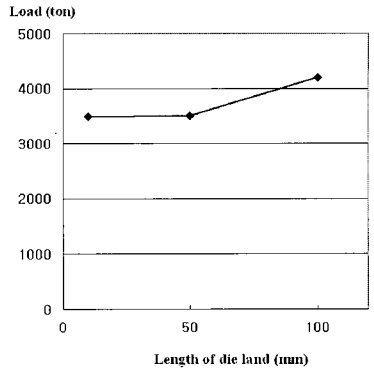
크는 드로잉 금형에서 일정한 간격을 갖도록 설치하였고, 이 간격의 적절한 값을 구해서 홀딩력을 조절함으로써 주름발생 및 파단을 방지하였다.

각 설계변수에 대한 성형결과를 알아보기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 프로그램은 ABAQUS Implicit를 이용하였다: 흑연의 건성 윤활 조건으로 마찰계수(μ)는 0.1로 가정하였으며, Fig. 5에 해석결과에 따른 성형하중을 나타내었다.

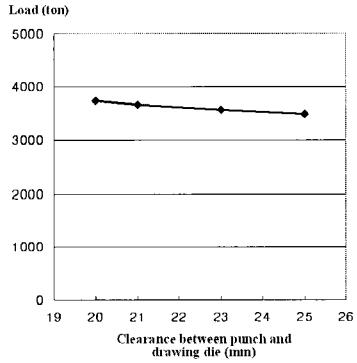
(1) 랜드부 길이 : 랜드부 길이가 짧을수록 마찰력이 감소하므로 성형하중이 감소되나 50mm 이하의 경우에는 감소폭이 거의 없었다. 금형비용을 고려하여 본 연구에서는 10mm 로 결정하였다.

(2) 펀치-드로잉 금형 간격 : 설계변수를 20~25mm 까지 고려하여 해석을 한 결과, 20mm 에서 최대 3,750ton, 25mm 에서 3,500ton 으로 펀치-드로잉 금형 간격이 늘어날수록 성형하중이 감소하는 경향을 보인다. 하지만 성형하중의 감소 정도가 크지 않고, 또한 성형하중도 프레스 용량인 7000 ton 이하이다. 후속공정인 아이어닝 공정의 효율성을 위해 이 공정에서 가능한 소재의 벽 두께를 줄이는 것이 타당하므로 펀치-드로잉 간격을 20 mm 로 하였다.

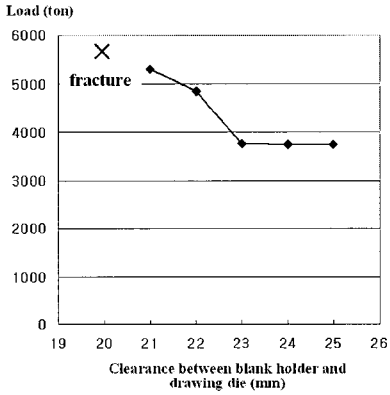
(3) 블랭크 홀더-드로잉 금형 간격 : 홀더-금형 간격을 20~25mm 까지 변화시키면서 해석결과를 비교하였다. 간격이 20mm 일 때, 드로잉 금형의 코너부위에서 소재의 파단이 발생되었다. 간격이 21mm 이상일 때는 파단이 발생하지 않고, 간격이 증가할수록 성형하중이 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 간격이 증가할수록 최대 등가변형율이 줄어드는 경향을 경향을 보이지만 주름의 발생을 발생을 막기 위해서는 최소값을 찾을 필요



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Comparison of Maximum loads with respect to (a) the length of die land, (b) the clearance between punch and drawing die and (c) the clearance between blank holder and drawing die

가 없다. 간격이 23mm이상인 경우에는 변형율 및 응력의 감소로 인한 성형하중의 효과가 거의 없기 때문에 블랭크 홀더-드로잉 금형 간격을 23mm로 하는 것이 적절하다고 판단된다.

4. 아이어닝 공정

아이어닝은 드로잉 또는 압출 가공된 컵 모양의 제품을 펀치-다이 간 간격을 컵 벽의 두께보다 좁게 유지한 채로 펀치를 눌러 컵 벽의 두께를 감소시켜 제품의 길이를 증가시키는 공정이다. 따라서 이 공정은 직경에 비하여 높이가 높은 컵의 제작에 이용된다. 최종 형상이 결정된 소재를 제조하기 위한 방법은 다음과 같다. 드로잉을 거친 소재는 가공경화 및 잔류응력 제거를 위한 완전 풀림의 열처리를 수행한 후, 1 단 혹은 다단 공정으로 최종성형을 완성한다.

먼저 소재의 초기 및 최종 두께로부터 단면적 감소율과 몇 단 아이어닝 공정을 수행할 것인지 결정해야 한다. 드로잉 후 소재의 벽 두께는 20 mm 이고, 아이어닝 후의 두께의 목표치는 10mm 이다. 일반적인 아이어닝 공정의 단면적 감소율은 15 % 내외이므로 아이어닝 공정을 몇 회 수행할 것인지 계산할 수 있다. 본 연구에서는 2 단 아이어닝 공정을 2 회 수행하는 것으로 제안을 하였고, 이에 대한 안정성을 유한요소해석과 모사실험으로 검증하였다.

아이어닝 금형의 설계변수에 따른 성형하중 및 소재의 파단여부를 살펴보기 위해 Fig. 6 와 같이 설계변수를 정의하였다.

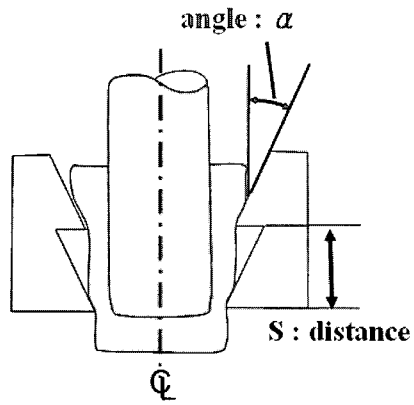


Fig. 6 Design variable of ironing die

(1) 아이어닝 각도 : 아이어닝 각도 변화에 따른 성형하중의 변화를 살펴보기 위해 아이어닝 각도를 5~15° 로 변화시키면서 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과는 Fig. 7 과 같으며, 성형하중을 최소화할 수 있는 아이어닝 각도는 약 10°임을 알 수 있다.

(2) 아이어닝 금형간 거리 : 다단 아이어닝시 금형간 거리가 성형하중에 미치는 영향을 살펴보기 위해 금형간 거리를 50, 100, 150mm 로 변경을 하여 유한요소해석을 수행하였다. 20.0mm 두께의 소재가 1 단 아이어닝 금형을 통과하면, 16.5mm 로 줄어들고 2 단 금형을 통과하면 14.0mm 로 줄어들게 된다. 해석결과는 Fig. 8 과 같이 아이어닝 금형간 거리가 최대 성형하중에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 금형비용을 고려하여 금형간 간격을 100mm 로 결정하였다.

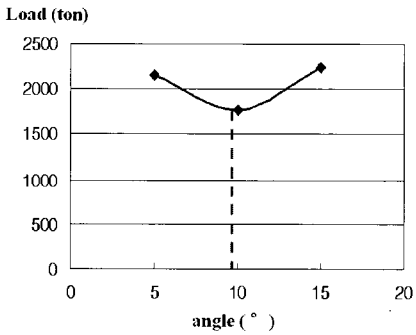


Fig. 7 Maximum load with respect to the ironing angle

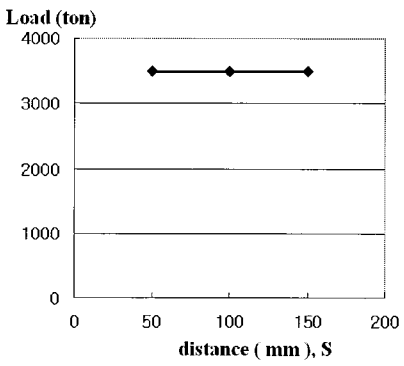


Fig. 8 Maximum load with respect to the distance between ironing dies

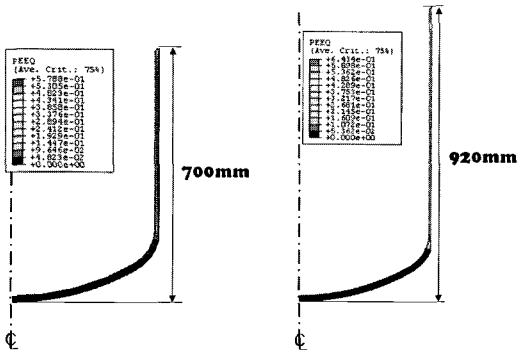


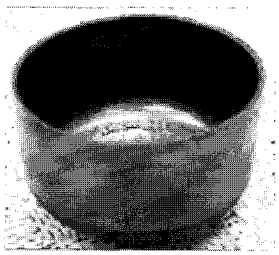
Fig. 9 Analysis results of the 1st (left) and the 2nd (right) stage

위와 같이 금형 형상 변수를 결정한 후, 전체 아이어닝 공정을 유한요소해석으로 해석하였다. Fig. 9 은 1 차 아이어닝 결과로 소재의 벽 두께가 20mm 에서 14.0mm 로 줄어들게 된다. 최대성형하중은 3500ton 이었고, 파단은 발생하지 않았다. 2 차 아이어닝 공정에서는 소재의 벽 두께가 14.0mm 에서 10.0mm 로 줄어들게 된다.

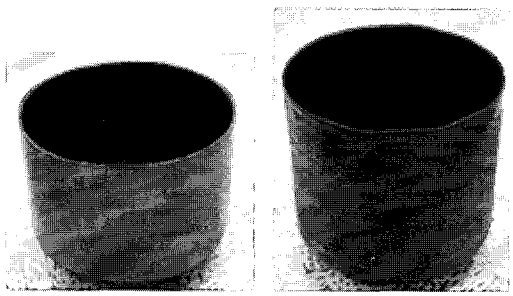
5. 모사실험

대형 압력용기의 제작을 위해 소성가공법을 이용한 방법을 제안하여 공정 설계 및 금형의 치수 설계를 하였다. 유한요소해석을 이용하여 그 타당성을 검증하였지만, 보다 실제 공정에 가까운 방법으로 검증하기 위해 모사실험을 수행하였다. 모사 실험시 소재와 금형의 크기는 1/10 길이비로 축소하였지만 소재 및 금형의 재료와 표면처리는 실제 공정과 동일하게 처리하였다. 기타 열처리, 온도조건, 윤활조건 등도 모두 실제공정에서 사용될 조건과 같게 하였다. 드로잉 및 아이어닝 공정에서 사용한 금형 형상은 앞 절에서 결정한 값을 모두 1/10 로 줄여 사용한다.

Fig.10은 드로잉 및 아이어닝 공정의 모사실험 결과이다. 파단 및 주름을 피하는 수치해석을 하였기 때문에 실험결과도 양호하였다. 또한 풀림 열처리후 재료손실의 가장 큰 요인인 표면 스케일링도 거의 발생되지 않았다. 모사실험으로 성형된 소재의 벽 두께를 측정한 결과 목표치의 벽 두께에서 약 0.1mm 정도 두꺼웠다. 이 이유는 금형의 탄성 변형이 가장 큰 원인이고, 기타 소재의 변형, 소재가 금형에서 이탈시 유발되는 변형 등



(a)



(b)

Fig.10 Results of model experiment of (a)drawing process and (b) 1st(left) and 2nd(right) ironing process

Table 1 Maximum load of model experiment and finite element analysis

Process	Model experiment	Finite element analysis
Drawing	34 ton	37.5 ton
1st Ironing	32 ton	35 ton
2nd Ironing	26 ton	30 ton

이 원인이다. 이 치수 오차는 후 공정이 있기 때문에 큰 문제는 되지 않지만, 더욱 정확한 벽두께 치수를 위해서는 금형 변형을 고려한 연구가 필요하다. 각 공정시 로드셀로 측정한 최대 성형하중 결과를 Table 1에 정리하였다. 모사실험은 실제 모델의 1/10 길이비로 수행하였으므로 성형하중은 1/100 비가 된다. 수치해석 결과와 모사실험시 측정된 성형하중의 최대오차는 약 10% 내외로 매우 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었으며, 드로잉, 1 차 아이어닝 및 2차 아이어닝의 성형하중을 살펴보면 공정에서의 하중경향이 모사실험과 유한요소해석 결과 모두 같음을 알 수 있었다.

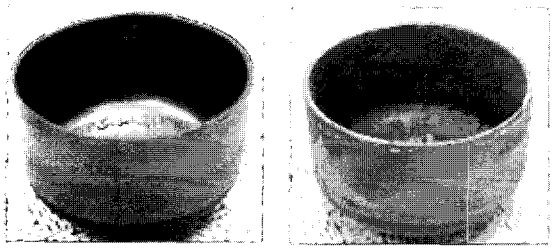


Fig.11 Comparison of workpieces (a) before and (b) after annealing

6. 풀림처리

풀림처리는 재료의 구상화를 위하여 소재를 704℃에서 2 시간 동안 가열한 후 공냉하고, 다시 649℃에서 4 시간 가열하여 공냉하는 방법으로 수행하였다.

또 공기 중에서 어닐링시에는 산화방지제를 재료의 표면에 고르게 도포하는 것이 중요하다. Fig. 11 은 어닐링 전, 후의 소재를 보여주고 있는데, 표면의 산화에 따른 스케일링이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig.12 는 다른 어닐링 조건에서의 최대 성형하중을 정리한 결과이다. 9Ni-4Co-0.3C 강을 일반적으로 알려진 강(鋼)의 어닐링 조건인 870℃로 주었을 경우와 비교해보면, 이 경우 재료의 구상화가 전혀 이루어지지 않아, 내부 잔류응력으로 소재의 강화현상이 증가되어 성형하중이 공정을 거치면서 계속 증가되는 것을 알 수 있다. 하지만, 본 연구에서 사용된 구상화 어닐링 조건에서는 소재의 강화현상이 효과적으로 제거되는 것을 알 수 있다. 이는 유한요소해석에서 얻은 성형하중값과 거의 같은 결과이다.

7. 결론

본 연구에서는 대형 압력용기의 제작공정을 단순화시키고 강도를 증가시키기 위해 소성가공 공정을 이용한 제작방법을 제안하였고, 각 공정에서의 세부 금형 치수를 유한요소해석을 이용하여 결정하였다. 초기 소재의 직경이 1,400mm, 두께가 20mm 의 대형 9Ni-4Co-0.3C 강을 7000ton 용량의 프레스에서 성형가능하도록 하기 위해, 드로잉 공정, 아이어닝 공정을 거치는 공정설계를 제안하였다. 성형시 주름, 파단을 방지하고 표면의 스

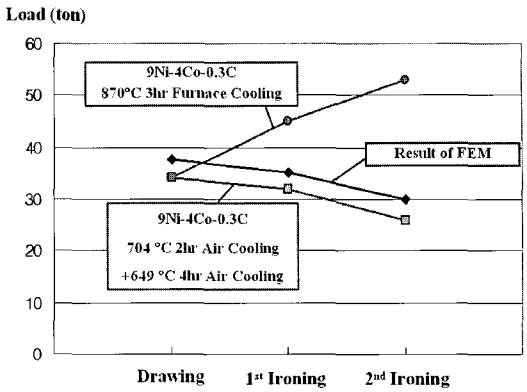


Fig.12 Comparison of maximum load

케일링을 최소화하기 위해 온도 및 윤활조건 등의 공정조건과 금형의 세부 치수를 결정하여 제안하였다. 이렇게 결정된 공정설계 및 금형설계의 타당성을 검증하기 위해 1/10 길이비의 모사실험을 수행하였고, 모든 공정에서 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있었다.

향후 위의 공정설계 및 금형설계를 이용한 실제 공정의 적용이 필요하다. 더욱 정밀한 벽두께의 치수정밀도를 얻기 위해서는 금형변형을 고려한 설계가 필요하고, 이를 통해 제품의 강도 및 피로수명의 향상이 기대되며, 추후 유사한 제품의 공정 및 금형설계에도 쉽게 적용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] 전기찬, 1993, 박판 금속의 성형, 반도출판사.

[2] 이성모, 김대영, 이원재, 2000, 유한요소법을 이용한 후판 압력 용기 성형 금형 설계, 한국소성가공학회 2000 추계학술대회, pp. 151~154.

[3] 윤지훈, 정성윤, 최영, 김철, 최재찬, 2002, 고압가스 용기를 위한 Deep Drawing & Ironing (D.D.I) 공정설계 시스템 개발에 관한 연구, 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 177~186.

[4] 최영, 윤지훈, 박윤소, 최재찬, 2004, 고압가스 용기의 제조를 위한 금형설계에 관한 연구, 한국정밀공학회지, Vol. 21, No. 7, pp. 153~162.

[5] 이동우, 송인섭, 양동열, 1993, 국소 가열 방법을 이용한 2 단계 축대칭 디프 드로잉 공정의 해석 및 설계, 한국정밀공학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 198~204.