한국소성가공학회 2003년도 추계학술대회 논문집 pp.21~24

압력선체 경판의 열간 성형 및 열처리에 관한 연구

권일근*· 윤영철*· 윤중근*

Hot Forming and Heat Treatment of the End-Bulkhead of a Pressure Hull

I.K. Kwon, Y.C. Yoon, J.G. Youn

Abstract

In hot forming process of the backward end-bulkhead of a pressure hull, the blank diameter and the tool clearance are the critical factors which influence wrinkling defect, forming load and shape completeness of the product. Two F.E.A softwares with the elasto-plastic material model and rigid plastic model were utilized to predict the occurrence of wrinkling defect. Tool clearance was determined by considering the increase of blank thickness, die strength and the stretching effect. Heat treatment condition after the hot forming to recover the original properties of the material was estabilished by specimen-based heat treating experiment.

Key Words : end-bulkhead, submarine, blank diameter, tool clearance, wrinkling, heat treatment

1. 서 론

일체형 경판 부품은 제품의 크기가 충분히 작은 경우 스피닝으로 성형이 가능하나 제품의 크기가 크면 스피닝 공정의 적용이 어려우며 프레스 장치를 이용해서 성형한다. 프레스를 이용한 대형 경판의 성형에서는 블랭크 홀더 장치를 사용하기 어려우므로 제품에 주름이 발생할 확률이 높다. 주름의 발생 유무는 블랭크의 형상비 및 소재온도에 의해 결정된다. 주름 발생의 예측기법으로는 흔히 탄소성 유한요소해석이 사용되며 주름의 발생 유무 및 발생시기의 예측에 유용한 것으로 알려져있다. 잠수함 선미 경판의 경우 형상비가 높아 주름이 발생할 가능성이 높으므로 소재를 변형저항을 낮출 낮추기 위해 열간 성형 방법을 사용한다.

본 연구에서는 HY80 재질의 경판을 고온에서 성형할 경우 제품형상 불량이나 성형하중의 초과없이 일체형 성형으로 제작이 가능한지 검토하고 그에 따른 성형공정방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 고온성형에 적합한 펀치, 블랭크 형상, 펀치-다이 간극을 설계하고 그에 따른 성형하중, 제품의 정도 및 금형의 강도를 유한요소해석을 통하여 평가하였다. 또한, 퀜칭-템퍼링 소재를 고온에서 성형함으로서 소실되는 원소재의 물성을 재확보하기 위하여 필요한 열처리

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

조건, 특히, 온도, 유지시간 및 냉각속도를 실험적으로 정립함으로써 선미 경판 제품에 요구되는 품질을 만족할 수 있는 열처리 공정을 확립하고자 하였다.

2. 열간 성형 공정

2.1 금형 장치 및 성형 공정 인자

일체형 경판의 성형에 있어서 공정인자로는 먼저 블랭크의 직경을 들 수 있다. 블랭크 직경이 너무 작은 여유를 가질 경우 성형시 이어링(earing) 결함이 소재를 침범할 수 있으며 직경이 너무 큰 경우 성형시 블랭크 가장자리에 주름이 발생할 수 있다. 그 다음으로 펀치-다이 간극(tool clearance)을 들 수 있다. 펀치-다이 간극(tool clearance)은 성형 중 소재의 두께 변화를 고려해서 결정되어야 한다. 본 연구에서 다루는 경판의 일체형 성형의 금형 셋업을 Fig. 1에 나타내었다.

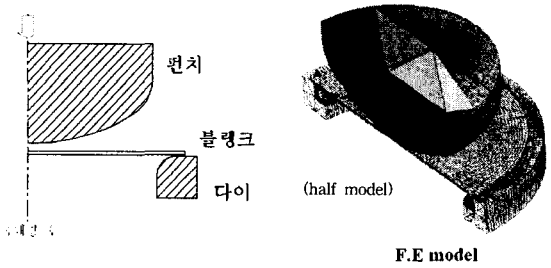

Fig. 1 Setup of die tools

2.2 블랭크 직경

성형 중 제품에 주름이 발생할 확률은 블랭크의 직경이 커질수록 증가한다. 현재까지의 연구결과에 의하면 유한요소해석을 이용하면 주름 발생의 예측이 어느 정도 가능하다. 주름의 형상을 정확히 예측하기는 어렵지만 주름 발생 유무와 발생 시점은 예측할 수 있는 것으로 알려져 있다[2] 본 연구에서는 내연적 해법의 강소성 모델을 사용하는 D 제품과 외연적 해법의 탄소성 모델을 사용하는 P 제품을 이용하여 소재온도가 850℃~950℃일 때 주름 발생 경향을 예측하였다.

Fig. 2는 강소성 모델을 이용하여 얻은 해석 결과이다. 블랭크 직경이 3120mm, 3200mm인 경우 주름이 발생하지 않았지만 3300m 이상인 경우 주름이 발생하였다. Fig. 3은 동일한 문제에 대하여 동적 외연적 해법의 탄소성 모델을 이용하여 해석한 결과이다. 강소성의 해석결과와 마찬가지로 블랭크 직경이 3200mm인 경우 주름이 발생하지 않았으며 3300mm인 경우 주름이 발생하므로 두 가지 해석방법 모두 해의 발생유무에 대한 예측은 동일한 것이다. 다만, 동적 내연적 해법을 이용하는 경우의 주름 형상이 정적 내연적 해석법에 의한 결과보다 크게 나타나는데 이는 해석의 특징상 포함되는 동적효과 때문으로 판단된다. 따라서, 주름 발생 없이 성형 가능한 블랭크의 직경은 3200mm이다.

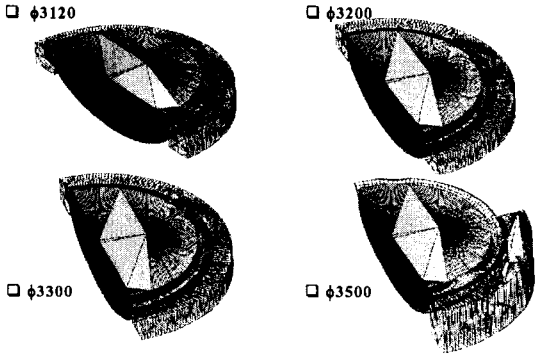

Fig. 2 Wrinkling defect
(implicit solver, rigid plastic model)

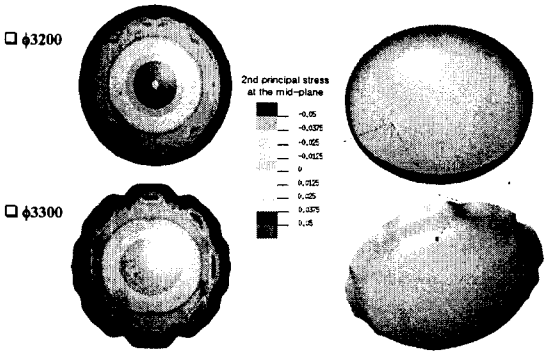

Fig. 3 Wrinkling defect
(explicit solver, elasto-plastic model)

2.3 펀치-다이 간극(Tool clearance)

2.3.1 소재 두께의 변화

Fig. 4는 소재가 등온상태를 유지한다는 가정 하에 성형해석을 수행하여 얻은 성형 후의 소재의 두께 분포를 나타낸다. 여기서, 펀치와 다이의 간극은 40mm로 두어 소재 금형사이에 끼이지 않도록 하였다. 해석 결과를 살펴보면, 초기에 35mm의 두께를 가지는 블랭크가 성형 후 중앙부위에는 34mm로 두께가 약 1mm 감소하였으며 가장자리에는 38.4mm로 두께가 약 3.4mm 증가한 것을 알 수 있다. 이와 같이 성형 중 발생하는 소재의 두께 변화는 초기 소재의 두께 선정 및 펀치-다이 간극을 결정 시 반영되어야 한다.

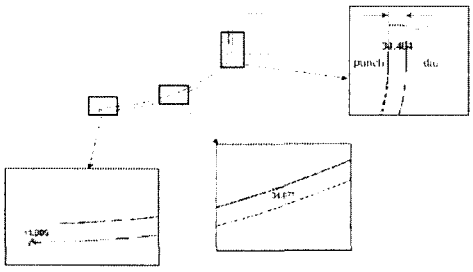

Fig. 4 Thickness distribution after forming

2.3.2 펀치-다이 간극(Tool clearance)의 영향

일체형 경판의 성형공정에서 펀치-다이 간극이 성형에 미치는 영향은 Fig. 5에서와 같이 가장자리의 소재가 펀치와 다이 사이에 끼인 채 펀치가 소재의 중앙부위를 아랫 방향으로 끌어내리므로 소재가 스트레칭을 받으면서 펀치 표면에 밀착되는 효과를 들 수 있다. 따라서, 펀치-다이 간극이 너무 넓으면 소재가 금형사이에 끼지 않으므로 소재가 스트레칭을 받지않아 제품의 스커트 부위가 펀치에서 이격되는 밀착 불량이 발생할 수 있다. 반면에 소재가 펀치사이에 강제로 끼이게 되면 하부 금형에 높은 압력이 가해지며 성형하중의 증가를 초래한다.

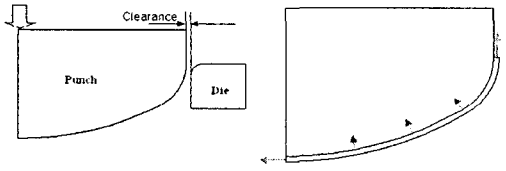

Fig. 5 Stretching effect

적절한 펀치-다이 간극을 결정하기 위하여 펀치-다이 간극이 각각, 32mm, 35mm와 40mm인 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 이때 소재와 금형간의 열전달은 무시하여 등온조건으로 하였다. 펀치-다이 간극이 40mm인 경우 소재가 금형에 전혀 끼이지 않았으며 약 300톤 정도의 낮은 성형하중이 소요되었다 (Fig. 6). 이에 비해 펀치-다이 간극이 32mm이며 마찰계수가 0.1인 경우에는 1,300톤 정도의 높은 하중이 소요되었다. 또한 펀치-다이 간극이 35mm이며 마찰계수가 0.1인 경우에는 약 800톤의 하중이 소요되며 동일한 간극에 마찰계수가 0.3인 경우에는 약 1,200톤의 성형하중이 소요되었다.

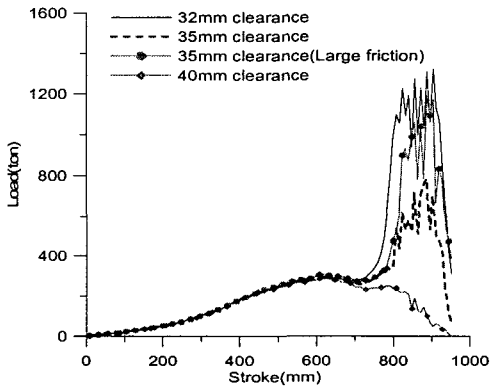

Fig. 6 Forming load on tool clearance

성형 시 소재-펀치의 밀착 불량은 제품의 스커트 부위에 주로 발생한다. 반타원형 경판의 성형에서 밀착 불량은 반구형상 경판의 성형에서 보다 적은 것으로 알려져 있다[3]. 성형해석 결과에서 관찰된 소재의 밀착 불량 위치와 펀치-다이 간극에 따른 밀착 불량의 정도를 살펴보면, 펀치-다이 간극이 35mm이하인 경우 대체로 1mm이하의 소재-펀치 이격이 발생하므로 문제가 없으나 펀치-다이 간극이 40mm인 경우 2.5mm의 이격이 발생하므로 제품의 형상 불량이 발생할 가능성이 있다. 따라서 펀치-다이 간극은 두께 대비 약 2.5%정도의 이격을 가지며 초기 블랭크의 두께와 동일한 35mm가 적당하다.

펀치-다이 간극이 35mm인 경우 성형하중과 금형강도를 평가하기 위하여 980℃로 가열된 소재를 가열로로부터 프레스로 옮기는데 약 3분이 걸리며 펀치가 20mm/s의 속도로 하강한다는 가정 하에 금형간의 열전달을 고려하여 성형해석을 수행하였다. 성형하중은

약 2000톤이 소요되며 하부 다이에 걸리는 유효응력은 소재와 접촉하는 부위를 중심으로 150~350MPa 정도의 응력이 분포하였다.

3. 소재 가열 및 열처리 모사시험

3.1 가열조건 및 소재 이송 중 냉각

열간 성형을 위한 소재의 가열 시간은 소재의 두께 방향의 온도 편차가 없이 균일하게 가열하는데 소요되는 온도 균일화를 위한 유지시간이다. 보통의 가스로를 사용하는 경우 판재 제품에 대한 유지시간은 (1.2×두께)+10~15분으로 알려져 있다. 이 관계식에 의하면 소재의 두께가 35mm일 때 975℃에서 약 1시간이 소요되며 이는 유한요소해석 결과와 일치한다.

3.2 모사 실험

모사 실험에 사용한 HY80 강재 시편 크기는 35 t ×220 w×170 l이며 가열 및 냉각시의 온도 변화를 측정하기 위해 표면에 K-type 열전대를 부착하였다. 모사 실험은 시편을 열간 성형 온도로 가열, 유지, 공냉하는 것, 퀜칭 온도로 가열, 유지, 수냉하는 것, 템퍼링 온도로 가열, 유지, 공냉하는 것의 세 가지로 진행하였다.

공냉한 경우에 시편 표면의 냉각속도는 약 29℃/min(975℃→540℃)인 것으로 측정되었다. 이 시험 결과로부터 소재 이송시 3분 이상의 시간이 소요되면 소재의 온도가 850℃이하로 떨어지므로 주름발생의 가능성이 높아짐을 알 수 있다. 따라서, 소재 이송 시간을 줄이거나 이송시 열손실을 방지할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

퀜칭 온도인 910℃로 가열한 후 수냉한 경우 시편 표면의 냉각속도는 약 7500℃/min(865℃→365℃)인 것으로 측정되었다. 소재 중앙부에서의 냉각속도를 금번 실험에서는 측정하지 못했으나 유한요소해석을 통하여 표면부의 냉각속도를 구현하면 내부의 냉각속도는 1400~1900℃/min 정도인 것 나타난다. 따라서, CCT 선도로부터 얻은 HY80 강의 퀜칭 시 마르텐사이트 조직을 얻기 위한 임계냉각속도는 850℃/min정도이므로[4] 본 조건은 충분한 냉각속도를 가진다고 할 수 있다.

템퍼링 열처리 조건은 앞에서 언급한 것처럼 일반적으로 as quenched 상태의 경도를 기준으로 결정하게 된다. 이를 위해서 기 보고된 HY80 강에 대한 템퍼링 온도와 경도의 상관관계를 이용하여[5] 템퍼링 온도를 670℃로 결정하였다.

이상에서 언급한 모사 실험의 공정별 조건과 이러한 과정을 거친 시편의 물성시험 결과, 항복강도는 697MPa, 인장강도는 800MPa, 그리고 -84℃에서 232J의 높은 충격인성을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

HY80 재질인 잠수함 선미 경판의 열간 성형 공정 및 열처리 방안의 정립을 위하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 주름의 발생을 억제하기 위하여 블랭크 직경은 3200mm이하로 두어야 하며 소재-펀치의 밀착 불량을 고려할 때 다이-펀치의 간극은 35mm가 적당하다.
2) 성형 후의 퀜칭 & 템퍼링 열처리 공정을 정립하였다.

참 고 문 헌

[1] Metal Handbook 9th edition, Vol.14, Forming and Forging, p.620-621

[2] Simulation of wrinkling in sheet metal forming, M. Kawka, L. Olejnik, Journal of material processing technology 109 (2001), p.283-289

[3] 유한요소법을 이용한 후판 압력 용기 성형 금형 설계, 이성모, 김대영, 이원재, 한국소성가공학회 2002년도 추계학술대회 논문집 pp.151-154

[4] Atlas of CCT diagram for eng. steels, ASM, 1980

[5] HY강의 강도가 Subcritical Cracking 성질에 미치는 영향, 김희진, 성희준 등, 대한금속학회지, Vol.28, No.2, p.162, 1990