

압력 용기 분할 경판의 초기 평판 형상 설계 기법 연구

권일근^{1#}, 박윤기¹

A Study on Design Method of Developed Shape for Pressure Vessel Segment Heads

I. K. Kwon, Y. K. Park

Abstract

In this study, a design method of developed shape for double-curved pressure vessel segment heads was proposed in consideration of in-plane strain induced by forming works. In order to obtain the developed shape of double-curved plate, at first, the segments are subdivided into elements and then they are stacked into a series of strips producing the outline of the approximately developed shape. The developed shape was determined by imposing the in-plane displacement obtained from forming analysis and regression analysis on the outline of the approximately developed shape. The validation of the proposed design method was verified by applying it to the actual products.

Key Words : Segment heads(분할 경판), developed shape(초기 평판 형상), approximate development(근사 전개), in-plane displacement(면내 변위)

1. 서론

3차원 곡면 형상의 분할 경판은 초기에 평판 상태인 소재를 곡면 형상의 몰드 금형내에 장입한 후 프레스로 가압하여 제작한다. 이때 성형 후 수정 작업을 최소화하기 위하여 적절한 초기 평판 형상의 부재를 이용하여 성형 작업을 실시해야 한다.

현재 산업 현장에 일반적으로 사용되고 있는 압력 용기 분할 경판의 초기 평판 형상 설계 방법에는 성형 전·후의 판재 모서리의 길이(arc length) 변화량 차이를 반영하거나 기하학적 맵핑을 이용하는 방법 등이 있으나 설계 정확도가 만족할 만한 수준에 이르지 못한다[1~3]. 특히 압력 용기 분할 경판과 같이 이중 곡률을 가지는 곡판 제품은 기하학적으로 전개가 불가능하므로 초기

평판 형상의 설계 정확도를 높이기 위해서는 면내 변형을 고려한 설계 방법이 필요하다.

일반적으로 면내 변형을 고려할 수 있는 초기 평판 형상 설계 방법으로는 역추적 방법이나 1단 해석 기법을 이용한 유한 요소 해석 방법이 있다. 이러한 설계 방법은 기하학적 방법에 비해 예측 정확도가 높으나 수치해석 기법의 적용 과정이 복잡하므로 실용화를 위해서 많은 비용이 소요된다[4].

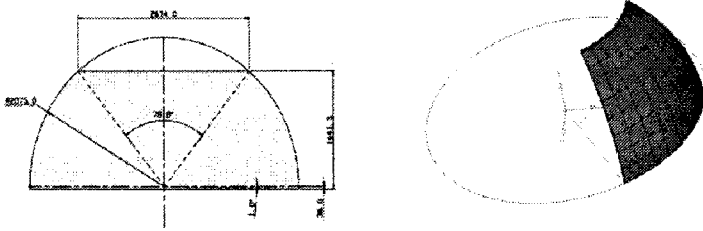
본 연구에서는 분할 경판의 초기 평판 형상의 설계 방법에 있어서 분할 경판 제품의 곡면을 세분화하여 근사 전개한 후 면내 변형에 의해 발생하는 모서리 절점의 변위를 반영하여 초기 평판 형상을 결정하는 방법을 제안하였으며 제안된 설계 방법의 결과를 기존의 기하학적 설계 방법과 비교하여 타당성을 검증하였다.

1. 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소
교신저자: E-mail: ilkeun@hhi.co.kr

2. 분할 경판의 초기 평판 형상 설계

2.1 분할 경판의 곡면 형상 특성

Fig. 1의 (a)는 압력 용기 구형 경판의 형상을 나타낸다. 규모가 큰 경판은 제작의 편의를 위하여 폴 부위와 너클 부위로 분할하며 너클 부위는 다시 Fig. 1의 (b)와 같이 8 ~ 12 등분으로 분할하여 제작한다.



(a) pole and knuckle (b) Single segment

Fig. 1 Segment head of pressure vessel

Fig. 2의 (a)와 같이 굽힘 가공으로 제작되는 단일 곡률 제품은 최종 곡률 형상을 기하학적으로 전개하여 초기 평판 형상을 얻을 수 있다. 그러나 압력 용기 분할 경판과 같이 다이 성형(die forming)으로 제작되는 이중 곡률 제품은 단일 곡률 제품과 달리 기하학적인 전개가 불가능하다.

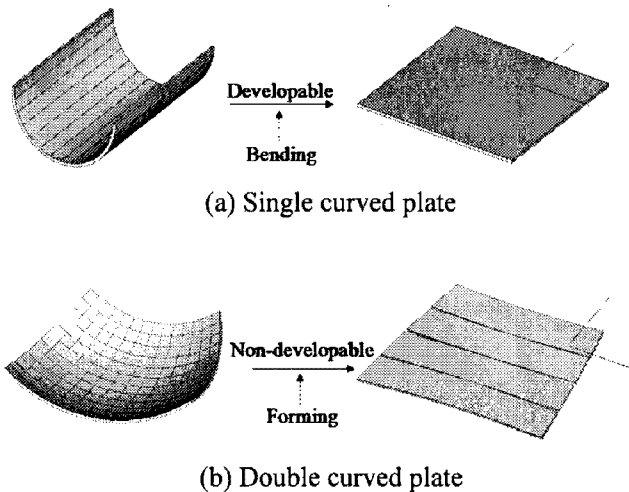


Fig. 2 Development of curved plate

이러한 분할 경판 제품을 스트립의 형태로 절단하여 근사적으로 평면상에 전개하면 Fig. 2의 (b)와 같이 절단한 스트립 사이에 틈새가 존재하는 형태로 나타난다. 이와 같이 이중 곡률 부품의 근사 전개 시에 스트립 사이에 틈이 발생하는 것

은 평판 형상과 최종 형상 사이에 성형 공정에 의한 면내 변형(in-plane deformation)이 관계하기 때문이다. 따라서, 압력 용기 분할 경판의 초기 평판 형상의 설계를 위해서는 이러한 면내 변형을 고려할 수 있는 설계 방법이 필요하며 본 연구에서는 분할 경판 제품의 곡면을 세분화하여 근사 전개한 후 면내 변형에 의해 발생하는 모서리 절점의 변위를 반영하여 초기 평판 형상을 결정하는 방법을 제안하였다

2.2 곡면 세분화 및 근사 전개

초기 평판 형상을 얻기 위한 첫 단계는 곡면을 세분화하여 평면 상에 스트립 형태로 배치하여 전체 윤곽을 얻는 것이다. Fig. 3은 분할 경판의 1/2 대칭 모델을 경도와 위도 방향으로 각각 6 등분으로 세분화한 것을 나타내며 세분화된 평면 요소를 평면상에 스트립 형태로 연속적으로 배열하여 Fig. 4와 같은 근사 전개 형상을 얻는다. 여기서 최종 성형품의 근사 전개 형상은 성형 공정에 의한 면내 변형이 반영되지 않은 상태이므로 앞에서 언급한 것과 같이 배열된 스트립 사이에 간극이 존재함을 확인할 수 있다.

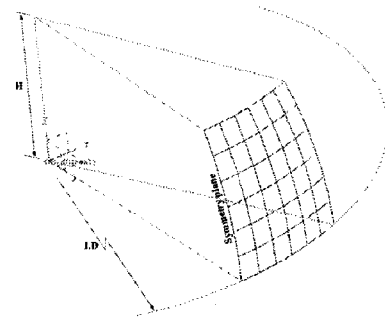


Fig. 3 Subdivision of segment head

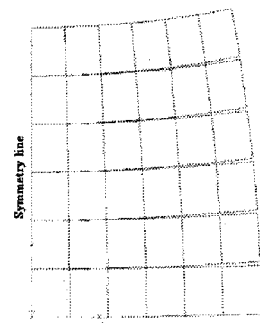


Fig. 4 Approximate development

2.3 근사 전개 형상의 면내 변형 평가

분할 경판 곡면의 윤곽 형상을 결정한 후 분할 경판의 성형 과정에서의 면내 변형에 의해 발생하는 근사 전개 형상의 외곽선의 변형을 평가하여 초기 평판 형상을 결정한다. 통상적으로 성형 작업의 면내 변형에 의해 발생하는 근사 전개 형상의 외곽선 형상과 초기 평판 형상의 차이는 Fig. 5와 같이 나타나므로 외곽선 상의 절점에서의 면내 변위(dx, dy)로 나타낼 수 있다.

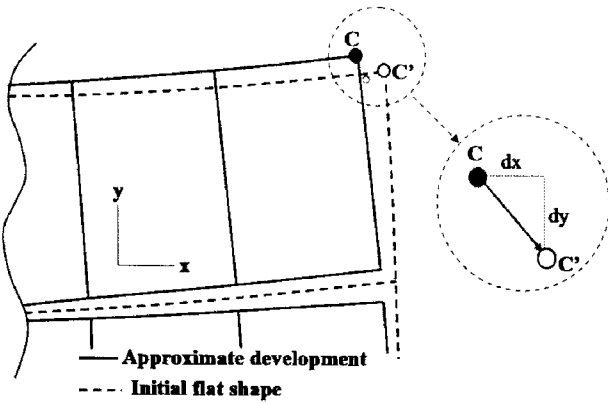


Fig. 5 In-plane displacement of forming work

면내 변위를 평가하기 위한 근사 전개 형상의 외곽선 상의 절점의 수는 통상적으로 나타나는 초기 평판 형상을 오차 1/10mm 이내로 표현할 수 있도록 Fig. 6과 같이 모서리 당 5개씩 배치하였다.

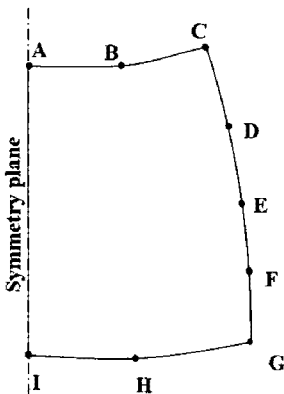


Fig. 6 Points for evaluation of in-plane displacement

2.3 성형 데이터를 이용한 평판 형상 설계

외곽선 절점의 면내 변위 ($D_{in-plane}$)는 (1)과 (2)과 같이 성형품의 성형 깊이(d, forming depth)가 깊을수록 크게 나타나며 성형 깊이는 압력 용기 경

판의 형상 인자 즉, 분할 개수(N.S, No. of segments)와 분할 높이(H, Height of segments), 그리고 직경(I.D, Internal diameter)에 영향을 받는다.

$$D_{in-plane} \propto f(d) \quad (1)$$

$$f(d) \propto f(N.S, \frac{H}{I.D}) \quad (2)$$

따라서, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 실제 성형 작업으로부터 수집된 분할 경판 제품의 치수 사양, 즉, 내경, 분할 개수, 수직 분할 높이에 따른 면내 변위 데이터를 회귀분석을 통해 수식화하여 이로부터 해당 제품의 초기 평판 형상을 얻을 수 있다.

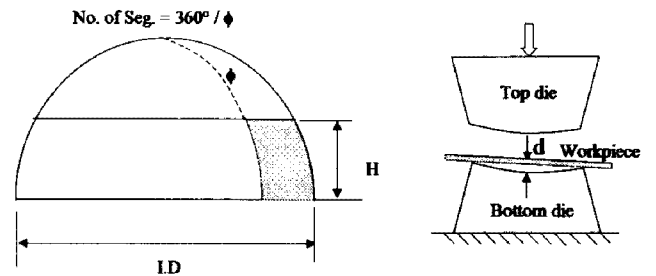


Fig. 7 Dimension factors and forming depth of segment head

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 분할 경판 제품의 형상 조건 별로 성형 해석을 수행하여 근사 전개 형상의 외곽선 상에 위치하는 절점의 면내 변위 데이터를 얻었으며 (3)과 같이 회귀 분석을 수행한 후 얻어진 형상 인자와 면내 변위의 관계식을 이용하여 실제 분할 경판 제품의 초기 평판 형상을 얻도록 하였다.

$$dx, dy = f(N.S, \frac{I.D}{H}) \quad (3)$$

Table 1 Variables used for forming analysis

Variables	No. of Segments	$\frac{I.D}{H}$
Range	8~12	0.2~0.3

3. 실제품 적용 및 타당성 평가

제안된 설계 방법을 이용하여 내경과 수직 분할 높이가 각각, 6000mm와 1380mm인 8 등분 분할 경판에 대하여 초기 평판 형상을 설계하였다. 또한, 이 결과를 Fig. 8과 같이 기존의 기하학적 설계 방법에 의해 구한 설계 형상과 비교하여 설계 방법의 정확도를 평가하였다.

Table 2의 설계 오차의 비교 결과에서 알 수 있듯이 기존의 기하학적 설계 방법의 경우 초기 형상의 상하 모서리 끝 점에 최대 56mm의 오차가 발생하나 제안된 설계 방법의 경우 코너 부위에 17mm의 오차가 발생하므로 본 연구에서 제안한 초기 평판 형상 설계 방법을 적용하는 경우 기존의 기하학적 방법에 비해 설계 오차를 70% 이상 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

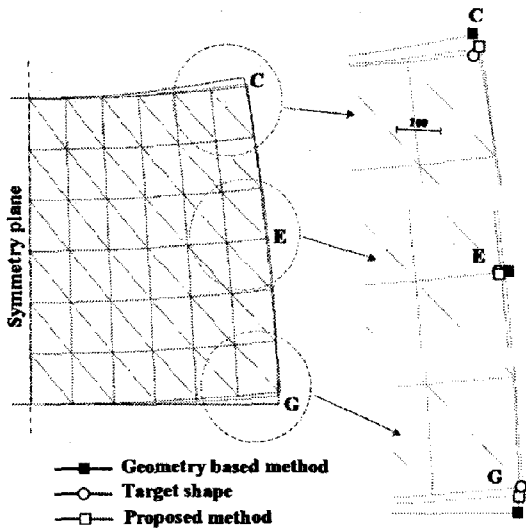


Fig. 8 Comparison of design results of proposed method and geometry-based method

Table 6 Deviation from target value of the geometry-based method and proposed method

(단위:mm)

Design method	Point	C		E		G	
		x	y	x	y	x	y
Geometry-based method		13.7	42.0	8.8	0.9	8.7	56.0
Proposed method		1.65	10.0	1.4	0.1	5.16	16.6

4. 결론

2차 곡면을 가지는 압력 용기 분할 경판의 초기 평판 형상의 설계 방법을 개발을 위한 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분할 경판의 초기 평판 형상의 설계를 위해 분할 경판 제품의 곡면을 세분화하여 근사 전개 형상을 얻은 후 면내 변형에 의해 발생하는 모서리 절점의 변위를 반영하여 초기 평판 형상을 결정하는 방법을 제안하였다.

(2) 제품의 형상 조건 별 성형 해석을 통하여 얻은 해석 결과를 토대로 회귀 분석을 수행하여 면내 변위 예측식을 얻었으며 이를 이용하여 초기 평판 형상 설계를 수행하였다.

(3) 제안된 설계 방법을 실제 분할 경판 제품의 초기 평판 형상 설계에 적용한 결과 기존의 기하학적 설계 방법에 비해 형상 오차를 약 70% 감소시킬 수 있었으며 제안한 초기 평판 형상 설계 방법이 타당함을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] L.F Walker, Shell Plate Development by Computer, Part of the British Shipbuilding Integrated Production System, British Ship Research Association Report NS. 255, Computer Report No. 2, 1969

[2] G.N. Blount, P.R. Stevens, Blank Shape Analysis for Heavy Gauge Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, 24(1990), p65-74.

[3] John S. Letcher, Jr., Lofting and Fabrication of Compound-Curved Plates, Journal of Ship Research, Vol. 37, No. 2, June 1993, p166-175.

[4] D.W Jung, S.J. Lee, The Determination of Initial Blank Shape by Using the One-step Finite Element Method and Experimental Verification, Journal of Materials Engineering and Performance(2000), Vol.9, p183-192.