

압력 용기 반타원형 분할 경판의 제작에 있어서 부분 금형 성형 공정의 적용

권일근* · 윤종근* · 이원재*

Application of Partial-size Die forming Process to Semi-ellipsoidal Segment Head of the Pressure Vessel

I.K. Kwon, J.G. Youn, W.J. Lee

Abstract

The purpose of this study is to apply the partial-size die forming process to actual segment head forming process of semi-ellipsoidal heads and to verify the availability of the suggested forming method. The initial curvature for the preliminary forming process was determined through anticlastic behavior of plate bending and the partial-size die for final forming was designed based on the results of springback analysis using F.E.A. From the results of actual forming, it was concluded that die design was appropriate and proposed forming process would be successfully applied to actual forming jobs.

Key Words : Segment head, partial-size die, springback, die design

1. 서 론

압력 용기 분할 경판은 반구(hemisphere) 형상과 반타원형(semi-ellipsoidal) 형상으로 구분할 수 있다. 반구 형상의 분할 경판은 제품보다 훨씬 작은 국부금형(local pressing die)을 이용해 초기 평판을 국부적으로 성형하고 이 작업을 소재 전체로 확대하여 원하는 구 형상의 제품을 얻는다 [1]. 반면에, 반타원 구 형상의 분할 경판은 곡률이 일정하지 않으므로 국부 금형을 이용하지 못하고 제품과 동일한 크기의 전체 금형(full-size die)을 이용하여 성형 작업을 수행한다. 압력 용기 분할 경판은 크기가 대형이고 다품종 소량 생산이므로 금형 제작비를 절감할 수 있는 새로운 성형기술에 대한 요구가 지속되어 왔다.

본 연구에서는 반타원형 분할 경판의 성형에 있어서 금형의 제작비용을 절감하는 방안으로 금

형의 위도 방향 너비가 제품의 절반인 금형을 이용하여 제품을 성형하는 부분 금형 성형 방법을 제안하고 그 타당성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 실제 압력 용기 분할 경판의 성형 공정에 부분 금형 성형 공정을 적용함에 있어서 이론식으로부터 최적의 예비 성형 금형 형상을 결정하고 유한 요소 해석을 통하여 그 타당성을 검증하였으며 유한 요소 해석의 스프링백 결과를 최종 금형 설계에 반영한 후 시험 성형을 통하여 타당성을 검증하였다.

2. 연구수행 내용 및 연구결과

2.1 부분 금형 성형 공정의 개요

Figure 1의 (a)는 플랜트 설비의 저장용기의 일부인 반타원형 경판을 나타낸다. 경판의 상부를 폴 부위, 하부를 너클 부위라고 부른다. 경판

* 현대중공업 산업기술연구소

의 (a)와 같으며 그림에 표시된 것처럼 분할선을 따라 분할하여 제작된다. 그 각각의 부품을 "너클 세그먼트"라고 부르며 그 형상은 Figure 2의 (b)와 같다.

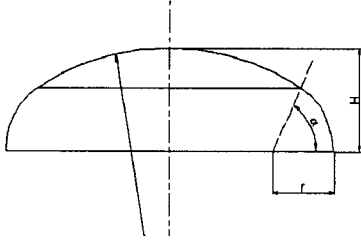


Fig. 1 Semi-ellipsoidal head

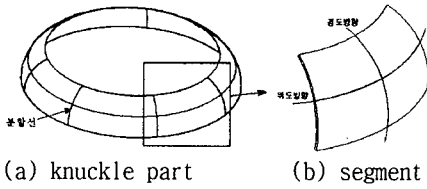


Fig. 2 Knuckle segment

종래에는 반타원형 경판의 너클 세그먼트를 제작하기 위해서 실제 제품과 동일한 크기로 제작된 전체 금형을 이용해 평판 상태의 판재를 한번에 가압하여 제품을 성형하는 방법을 사용하였으나 본 연구에서 제안한 부분 금형 성형 공정은 초기에 평판상태인 소재를 적절한 곡률의 구형상으로 성형하는 예비 성형과 이를 부분 금형을 이용하여 반타원구 형상으로 성형하는 최종 성형으로 이루어진다(Figure 2). 예비 성형에 의해서 구형상으로 성형된 소재는 최종 성형 과정에서 anticlastic 거동에 의하여 경도 방향으로는 (+) 굽힘을 받아 감소하며 위도 방향으로는 (-) 굽힘을 받아 곡률 반경이 증가하여 목표로 하는 타원구면을 형성하게 된다.

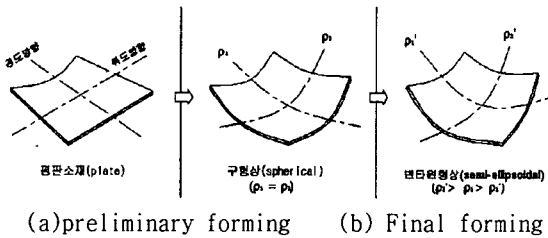


Fig. 3 2-step forming method for partial-size die forming

2.2 부분 금형 성형 공정 설계

부분 금형 성형에 있어서 최종 제품의 형상은 중앙부위의 경도 방향 곡률 반경 및 위도 방향 곡률 반경으로 대표될 수 있다. 최종 성형에서 목표로 하는 경도 및 위도 방향의 곡률 반경의 조합을 얻기 위해서는 적절한 예비 성형품의 곡률 반경을 선정해야하며 성형시 발생하는 스프링백을 고려하여 금형을 설계해야 한다.

2.2.1 예비 성형 곡률 반경의 선정

예비 성형 곡률 반경(ρ_{pre})은 최종 제품의 경도(ρ_{longi}) 및 위도 방향의 곡률 반경(ρ_{lati})을 식(1)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_{pre}} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\rho_{longi}} + \frac{2}{\rho_{lati}} \right) \quad (1)$$

위 식은 보의 굽힘에서의 anticlastic 곡률 관계식을 기초로 판재의 굽힘 변형 시 소성 변형량이 크지 않고 모든 변형이 선형적이라 가정하여 얻은 식이다.

예를 들어, 중심부의 경도 방향의 곡률과 위도 방향의 곡률이 각각 1640mm과 8580mm인 경판의 경우 예비 성형 곡률 반경은 식 (1)에 의거하여 3600mm으로 계산된다.

예비 성형체의 곡률 반경 계산 결과의 타당성을 검증하기 위해서 앞의 예에 대하여 다양한 곡률 반경을 가진 예비 성형품에 대하여 최종 성형 시 소재 곡률 변화를 평가하였다. Figure 4는 예비 성형 곡률 반경을 각각 3000, 3600과 4000mm로 성형한 경우 최종 성형 공정에서의 소재 곡률의 변화를 나타낸다. 식 (1)로부터 얻어진 소재의 곡률 반경의 변화와 성형 해석으로부터 얻어진 소재의 곡률 변화가 일치하므로 성형 중 소재의 변형은 anticlastic 거동을 따른다고 할 수 있다. 또한, 예비 성형 곡률이 3000과 4000mm인 경우 최종 성형 완료 시점에서 소재의 경도 및 위도 방향 곡률 반경은 각각, 1650과 4800mm, 그리고 1650과 12400mm로써 최종 제품의 형상과 차이를 보이는 반면에 예비 성형 곡률이 3600mm인 경우에는 최종 제품 형상과 거의 유사한 곡률의 조합을 얻을 수 있으므로 본 연구에서 제안한 anticlastic 관계식이 타당함을 알 수 있다.

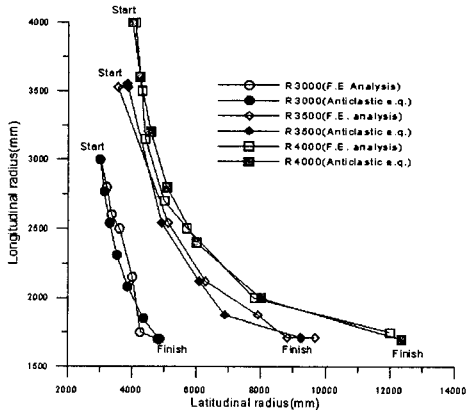


Fig. 4 Radius change in final forming with perform radius

2.2.2 최종 성형의 스프링백 예측

최종 성형에서는 소재를 단지 위도 방향으로 이동시키며 수차례의 프레싱 작업으로 최종형상을 얻어야 하므로 성형중 스프링백을 고려하여 금형설계를 해야 한다. 본 연구에서는 최종 성형에서의 스프링백 예측을 위하여 유한 요소 해석을 이용하였으며 이를 실제 성형 작업 결과와 비교하였다. 최종 성형 해석은 구형상의 예비 성형품을 Figure 5와 같이 최종 성형 금형에 위치시키고 소재를 위도 방향으로 움직여가며 4회의 프레싱 작업이 단계적으로 수행되는 것으로 가정하였다.

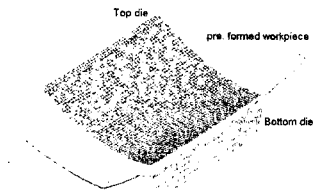


Fig. 5 F.E model for final forming

Figure 6는 유한 요소 해석과 실제 성형 작업에서의 스프링백을 비교하여 나타난 그래프이다. S1, S2, S3, S4는 총 4단계에 걸쳐 이루어진 프레싱 작업에서 스프링백 후의 제품의 곡률을 나타낸다. 유한 요소 해석에서 얻어진 각 단계에서의 스프링백 후 형상은 실제 성형 작업 결과와 매우 유사하다.

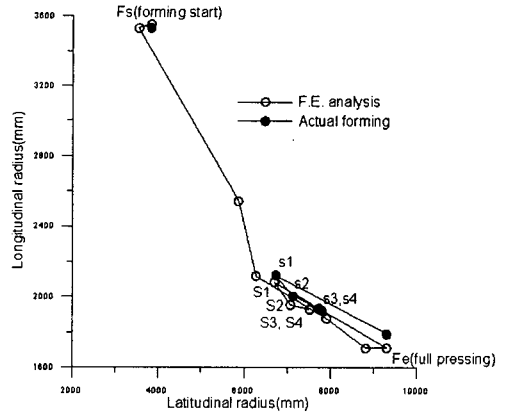


Fig. 6 Springback of F.E analysis and actual forming

2.2.3 최종 성형의 금형 설계

Table 1은 내경이 11500mm인 분할 경판에 있어서 최종 성형 과정중 소재 형상을 유한 요소 해석을 통하여 예측한 것이다. 이와 같이 해석으로부터 얻어진 소재의 곡률 반경 예측값으로부터 스프링백을 고려한 다이의 곡률 반경을 결정하기 위하여 스프링백 변형(ϵ_{sp})과 총 변형(ϵ_f)의 비, 즉, 스프링백 비(k , springback ratio)를 식(2)와 같이 정의하였다.

$$k = \frac{\epsilon_{sp}}{\epsilon_f} \quad (2)$$

목표로 하는 최종 제품의 곡률 반경(ρ_{goal})과 예비 성형품의 곡률 반경($\rho_{preform}$)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(3)과 같이 스프링백 예측값을 고려한 상부 다이의 곡률 반경식을 정의할 수 있다.

$$\rho_{die} = \frac{1 - k}{\frac{1}{\rho_{goal}} - \frac{k}{\rho_{preform}}} \quad (3)$$

Table 1의 우측 열에 나타난 다이 곡률(ρ_{die})은 식(3)를 통하여 얻은 스프링백을 고려한 최종 성형 금형의 경도 방향의 곡률 반경을 나타낸다. 스프링백 후의 곡률 반경과 설계 곡률의 차이는 516mm이며 이를 성형깊이로 환산하면 약 70mm이다.

Table 1 Die design for final forming

Model	State	ρ_{long}	ϵ_1	ϵ_{sp}	ϵ_{sp}/ϵ_1	ρ_{die}
	Design value	1986				
Head ID11500	Preform	3715	0.00021	8E-05	0.38	1539
	forming(punch)	2090				
	springback	2512				

2.3 최종 성형 작업 결과

본 고에서 제안한 부분 금형 성형 공정 및 금형 설계안을 토대로 금형을 제작하여 여러 가지 타입의 분할 경판 제품 제작에 적용하였다. Figure 6은 실제 성형 작업 장면을 나타낸다.

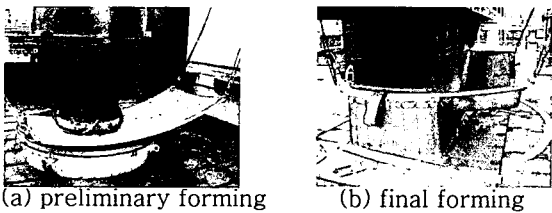


Fig. 6 Actual forming process

Table 2는 내경이 11500mm인 분할 경판의 최종 성형 작업 결과를 나타낸다. 최종 성형 금형 형상은 스프링백 예측 결과를 반영하여 70mm만큼 깊게 제작하고 성형 작업을 수행하였다.

스프링백 비의 값을 비교해 보면 실제 성형 작업에서의 경도 방향의 스프링백 비는 0.30으로 유한 요소 해석의 스프링백 예측값인 0.38보다 다소 낮으나 성형품의 허용 오차를 만족하였다.

Table 2 Results of actual forming

Case	State	ρ_{long}	ρ_{trans}	ρ_{die}	ϵ_1	ϵ_{sp}	ϵ_1/ϵ_{sp}
	Design value	1986	6372	3670			
Experiment	Preform	3882	3799	3826	0.000367	0.000111	0.30
	forming(punch)	1600					
	springback	1944	7936	3914			
F.E.A	Preforming	3715	3715	3715	0.000209	8.04E-05	0.38
	forming(punch)	2090	6769	3876			
	springback	2512	5467	3927			

Figure 7은 내경 11500mm인 제품을 포함하여 내경이 다른 몇 가지 분할 경판의 실제 성형 작업 결과를 소재의 총 변형과 스프링백 비의 관계로 나타낸 것이다. 유한 요소 해석과 성형 작업 결과 모두 총 변형이 증가할수록 스프링백 변형이 감소하는 경향을 나타내며 스프링백에 대한 예측 결과는 ± 0.05 의 오차 범위 내에서 실제 성형 작업의 측정 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 상기의 결과로부터 본 고에서 제안한 부분 금형 성형 공정이 반타원형 분할 경판의 제작에 성공적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

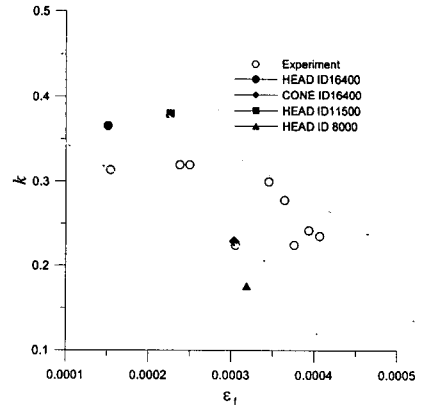


Fig. 7 Springback ratio and total strain

3. 결론

압력 용기 분할 경판의 너클 세그먼트의 부분 금형 성형공정에 있어서 예비 성형 곡률 반경 결정 방안과 스프링백 예측을 통한 최종금형 설계방안의 타당성을 검증하기 위하여 유한 요소 해석과 실제성형 작업을 수행하고 다음과 결론을 얻었다.

- (1) 예비성형품의 곡률 반경을 결정하기 위하여 최종 제품의 경도 및 위도 방향의 곡률 반경과 안티클래스틱 거동을 이용하여 예비성형 곡률 관계식을 정식화 하였다.
- (2) 부분 금형을 이용한 분할 경판 시 스프링백을 고려한 금형 설계를 위하여 예비 및 최종 성형품의 곡률 반경에 따른 스프링백 비를 제안 하였다.
- (3) 설계된 부분 금형 성형 공정을 토대로 금형을 제작하고 여러 가지 타입의 분할 경판 성형 작업을 수행한 결과 본 고에서 제안한 성형 공정이 성공적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Performance of TMCP steel with respect to mechanical properties after cold forming and post-forming heat treatment, David Portera, International Journal of Pressure Vessels and Piping Volume 81, Issues 10-11, 2004, pp.867-877.