

개량박막요소를 이용한 이동금형을 갖는 초소성 성형공정의 수치해석

이기석* · 허 훈*

Numerical simulation of the superplastic moving die forming process with a modified membrane finite element method

K.S. Lee and H. Huh

Abstract

Superplastic forming is widely used in the aviation and aerospace industry since it has great advantages to produce very complicated, light, and strong components. A number of superplastic forming processes have been developed and designed to improve the thickness deviation that is inevitable in simple female die forming. Some of forming processes require tool movements for better thickness distribution than simple female forming. The process has to deal with the optimum pressure cycle considering the moving die, the thickness distribution and the final shape. In this paper, superplastic forming processes with a moving die are simulated with a finite element method with modified membrane elements in the convective coordinate system. The result is compared with blow forming processes with a fixed female die to demonstrate that the thickness distribution with a moving die is different from that with a fixed die.

Key Words : Superplasticity, Pressure Control, Moving Die

1. 서 론

초소성 성형(Superplastic Forming, SPF)은 초소성 재료가 가지는 낮은 유동 응력에서의 큰 인장 연신율 특성을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 일체로 성형하는 기술이다. 초소성 재료는 소재의 미세 결정립 구조 특성으

로 인해 소재의 제조공정이 어렵고 소재 가격이 높으며 열간에서의 긴 성형 시간을 갖는 단점이 있어 부가가치가 높은 항공기 구조용 부품을 주류로 발전되어 왔고, 그에 따른 해석적인 접근도 진행되어왔다^(1~4). 초소성 판재의 성형은 압력 성형이 주종을 이루고 있다. 제품의 요구사항에 따라 여러 가지 초소성 성형공정이 개발되어

* 한국과학기술원 기계공학과

왔고, 깊고 복잡한 형상의 제품 성형시 금형도 함께 이동하면서 가압하는 성형공정이 많이 적용된다. 이동금형을 가지는 성형공정에서는 일반적으로 수금형을 이동시키므로써 재료의 점진적인 접촉을 유도하거나, 특정부위의 두께분포를 마찰로서 제어하게 된다⁽⁵⁾. 이러한 성형공정을 통하여 벽면에서의 두께분포를 일반적인 고정된 금형에서 성형하는 경우에 비해 향상시킬 수 있다. 이와 같이 금형의 이동과 가압 과정이 함께 이루어지는 초소성 성형 공정에서는 금형의 이동속도에 따른 최적 성형 압력곡선 그리고 최종 성형 제품의 두께분포와 성형 형상 등이 성형 전에 예측할 수 있어야 성공적인 성형을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 사각칩 초소성 성형을 금형의 이동이 있는 경우의 드레이프 성형공정을 해석하였다. 박막요소를 사용하고 최적 압력제어기법과 경계조건을 부과하여 개발한 해석코드 SUPERB로 해석하였다.

2. 유한요소수식화

2.1 구성방정식

초소성 변형은 비탄성, 비압축성으로 가정하여 다음과 같은 형태의 구성 방정식으로 표현된다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^m \quad (1)$$

여기서, K는 물질상수이고, m은 변형률속도 민감계수이다. 식(1)을 점소성 재료 형태의 구성방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}^p = 2\mu \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \mu = \frac{1}{3} K \bar{\epsilon}^{m-1} \quad (2)$$

여기서, σ_{ij}^p 는 편차 Cauchy 응력이다.

2.2 가상일의 원리

평형방정식과 응력 경계조건으로부터 발산 정리를 이용하여 가상일 원리를 구하면 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij}^p \delta \dot{\epsilon}_{ij} d\Omega = \int_{\Omega} f^i \delta u_i d\Omega + \int_{\Gamma} F^i \delta u_i d\Gamma \quad (3)$$

굽힘효과를 고려하기 위해 Huh등⁽⁶⁾이 제안한 개량박막요소를 사용하여 판재의 내부 일은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta W^b = \int_{\Omega} \sigma_{ij}^p \delta \dot{\epsilon}_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij}^b \delta \dot{\epsilon}_{ij} d\Omega \quad (4)$$

식(4)의 굽힘 에너지 항은 요소간의 곡률과 굽힘 모멘트로 표현하면 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\delta W^b = \int_{\Omega} \sigma_{ij}^p \delta \dot{\epsilon}_{ij} d\Omega + \int_{\Gamma} M_{ij} \delta \dot{\kappa}_{ij} d\Gamma \quad (5)$$

$$\int_{\Gamma} M_{ij} \delta \dot{\kappa}_{ij} d\Gamma \equiv \int_{\Gamma} M_1 \delta \dot{\kappa}_1 d\Gamma + \int_{\Gamma} M_2 \delta \dot{\kappa}_2 d\Gamma \quad (6)$$

여기서, σ_{ij}^p 은 박막변형률과 상응하는 두께 방향에 대한 평균응력이고 M_1 과 M_2 는 각각 각 요소간의 곡률 $\dot{\kappa}_1$ 과 $\dot{\kappa}_2$ 에 상응하는 굽힘 모멘트이다.

2.3 유한 요소 근사화

내부에너지항은 박막에너지항과 굽힘에너지항으로 각각 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\int_{\Omega} \bar{\sigma} \delta(\Delta \bar{\epsilon}) d\Omega = \delta \bar{U}^T \mathbf{Q}^n(\bar{U}) \quad (7)$$

$$\int_{\Gamma} M_1 \delta(\Delta \kappa_1) d\Gamma + \int_{\Gamma} M_2 \delta(\Delta \kappa_2) d\Gamma = \delta \mathbf{U}^T \mathbf{Q}^b(\bar{U}) \quad (8)$$

굽힘에너지항 $\mathbf{Q}^b(\bar{U})$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Q}^b(\bar{U}) = \sum_{\Gamma} \int_{\Gamma} \frac{\mu}{3} t^3 \mathbf{B}_4^T \mathbf{B}_4 \mathbf{U}_d dA \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_4 = \frac{1}{L_i} \left(\mathbf{n}_n^{(1)} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{h}_i^{(1)}} - \mathbf{n}_n^{(2)} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{h}_i^{(2)}} \right) \quad (10)$$

여기서, Γ_v 는 가상 굽힘요소의 면적이다.

2.4 경계 조건

g는 판재와 금형 사이의 거리이고, σ_n 과 σ_t 가 각각 수직 방향과 접선 방향의 응력일 때, 불침투 조건은 다음과 같다.

$$\sigma_n \cdot g = 0, \quad g \geq 0, \quad \sigma_n \leq 0 \quad (11)$$

접촉 처리에서 경사경계조건을 부과하여 처리하였다. 마찰경계조건은 다음과 같다.

$$\sigma_t \cdot U_i \leq \mu |\sigma_n| |U_i|$$

$$|\sigma_t| \leq \mu |\sigma_n|, \quad U_i = 0 \quad \text{for sticking} \quad (12)$$

$$|\sigma_t| = \mu |\sigma_n|, \quad U_i = -\lambda \sigma_t, \quad \text{for sliding}$$

이때, 마찰력은 다음과 같다.

$$F_{\bar{x}} = \frac{U_{\bar{x}}}{|U_{\bar{x}}|} \mu F_{\bar{z}} \tanh \left(\alpha \frac{U_{\bar{x}}}{|U_{\bar{x}}|} \right) \quad (13)$$

여기서, α 는 임의의 큰 양수이다.

2.5 압력 제어 기법

초소성 변형 중에 최고변형률속도가 최적변형률속도를 유지하기 위하여 Bonet등⁽¹⁾에 의해 제안된 압력 기법을 사용하였다. 구성방정식 식(3)은 다음과 같이 다시 나

타낼 수 있다.

$$\mathbf{Q}(\mathbf{U}) = \rho(t)\mathbf{F}(\mathbf{U}) + \mathbf{B} \quad (14)$$

여기서, \mathbf{F} 는 단위 압력에 대한 외력이고, \mathbf{B} 는 경계면의 접촉력이다. 이때 변형률속도 제약 함수는 다음과 같다.

$$C(\mathbf{U}) = \max(\bar{\epsilon}^{(e)}) - \epsilon_0 \quad (15)$$

여기서, ϵ_0 는 재료의 최적 변형률속도이다. 식(15)와 식(14)은 연계하여 축차과정을 통해 다음과 같이 변위와 압력을 증분형태로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{K}_t^{-1} [\mathbf{R} + \Delta \rho \mathbf{F}] \quad (16)$$

$$\Delta \rho = \frac{s - \mathbf{L}^T \mathbf{K}_t^{-1} \mathbf{R}}{\mathbf{L}^T \mathbf{K}_t^{-1} \mathbf{F}} \quad (17)$$

$$\text{여기서 } s = \epsilon_0 - C(\mathbf{U}) \quad (18)$$

여기서, \mathbf{K}_t 는 접선강성행렬이고, \mathbf{R} 은 잔류응력, \mathbf{L} 은 제약함수의 구배벡터, s 는 변형률속도 오차항이다.

3. 수치 해석 결과

해석에 사용된 재료는 8090 SPF Al-Li 로 재료시험을 통해 얻어진 최적성형온도인 520 °C 에서의 물성치를 사용하였다.

물질상수: $K = 262.16$ [sec]^m MPa

변형률속도민감계수: $m = 0.4997$

최적변형률속도: $\epsilon_0 = 1.82 \times 10^{-3}$ [sec]⁻¹

마찰계수: 0.4

해석에 사용된 금형의 1/2모델은 Fig. 1과 같다.

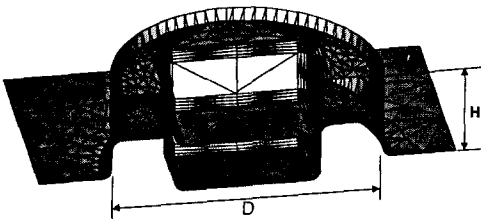


Fig. 1 Geometry of die used in the analysis of moving die forming process (Square block: 70x70x30, D = 130, *corner radii = 5 (unit: mm))

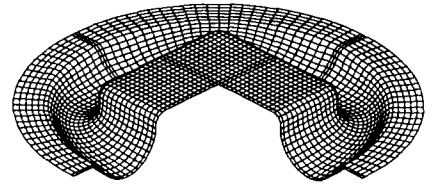
해석에 사용된 금형의 이동조건은 다음과 같다.

$$H = 45.0 - (0.05 \times t) \text{ mm}, \quad t \leq 500.0$$

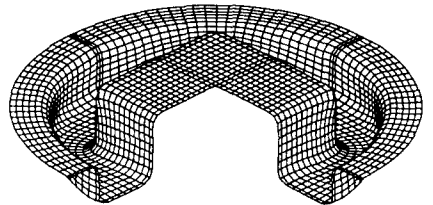
$$H = 20.0 \text{ mm}, \quad t > 500.0$$

$$* \text{Stroke} = 25 \text{ mm}$$

위와 같은 조건의 이동금형으로 성형한 경우의 중간 단계와 최종단계의 형상은 Fig. 2와 같다. 수금형을 이동시켜 성형하는 경우는 일반적인 고정된 압금형과는 반대로 컵이 성형된다. 컵바닥면에서 부터 벽면으로 점진적인 접촉이 일어나고, 벽면의 재료가 점진적으로 금형에 접촉하면서 곡률이 비슷하게 유지되면서 성형되는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Deformed Shapes in the square cup drape forming process with moving die. ; (a) 520 sec, (b) 1080 sec

Fig. 3은 금형 이동에 따른 최적압력곡선을 도시한 것이다. 고정된 금형으로 성형하는 경우에는 재료가 컵바닥면과 접촉한 후에 재료의 곡률이 계속 작아지면서 최적성형압력을 상승시키지만 수금형의 이동을 이용한 성형의 경우 벽면 성형시에도 재료의 곡률이 비슷하게 유지되는 성형 구간이 최종단계 전까지 지속되어 최적성형압력이 보다 일정하게 나타난다.

최종형상의 두께분포를 일반적인 고정된 압금형을 사용한 경우와 비교하여 Fig. 4에 도시하였다.

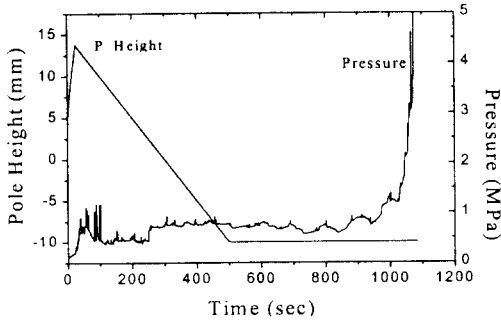


Fig. 3 Optimum pressure and pole height vs. the forming time in the square cup drape forming with moving die

사각컵 압력성형의 특성으로 모서리 부위의 두께가 얇아지는 현상은 두 경우다 동일한 결과를 보인다. 수금형을 이동시키면서 성형한 경우는 고정된 압금형을 사용한 성형의 경우에 비해 가장 얇은 부위의 두께는 비슷한 반면 사각컵에 해당하는 부위의 두께는 좀 더 균일한 분포를 나타낼 수 있다. 고정된 압금형의 사용 경우 벽면과 바닥면의 두께차이가 많이 나지만 수금형을 사용한 성형의 경우 벽면과 바닥면의 두께가 같은 수준의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

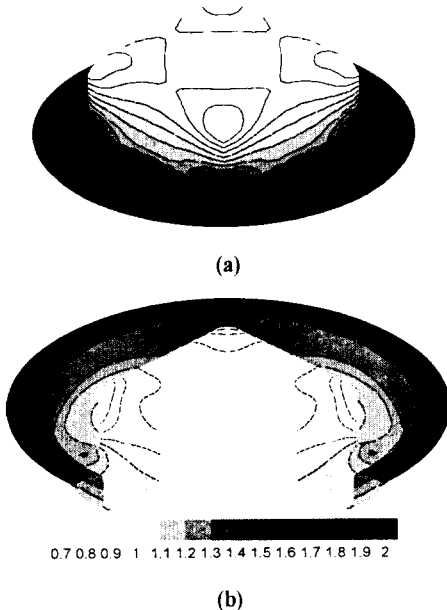


Fig. 4 Comparison of thickness distributions in Simple Female forming (a) and Drape forming with moving die (b)

4. 결론

본 논문에서는 금형의 이동이 있는 사각컵 드레이프 성형공정을 해석하였다. 해석을 위하여 굽힘을 고려할 수 있는 개량박막요소를 이용하여 유한요소수식화를 하고 접촉 알고리즘과 최적압력제어기법을 적용한 해석코드를 개발하였다. 이동하는 금형을 가진 드레이프 성형공정의 성형모사를 통해 재료의 성형 형상과 두께분포 그리고 최적압력선도를 구하였다. 해석결과 이동금형을 가진 드레이프 성형공정에서 일반적인 압금형을 이용한 성형공정에서 비해 좀 더 균일한 두께분포를 갖는 사각컵을 성형할 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) Bonet, J., Wood, R. D., and Collins, R., 1994, "pressure control algorithms for the numerical simulation of superplastic forming", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, p. 297.
- (2) Rama, R. C. and Chandra, N., 1991, "Analysis of superplastic metal forming by a finite element method", *Int. J. Non-Linear Mechanics*, Vol. 26, p. 711.
- (3) Wood, R. D., and Bonet, J., 1996, "A review of the numerical analysis of superplastic forming", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 60, p. 45.
- (4) Lee, K. S., and Huh, H., 1998, "Finite element simulation of three dimensional superplastic blow forming", *Metals and Mater.*, Vol. 4, p. 299.
- (5) Laycock, D. B., 1982, "Superplastic forming of sheet metal", *Conference Superplastic Forming of Structural Alloys*, p. 257.
- (6) Huh, H., Han, S. S., Lee, J. S. and Hong, S. S., 1995, "Experimental verification of superplastic sheet-metal forming analysis by the finite-element method", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 49, p. 355.
- (7) Chandra, N., 1988, "Analysis of superplastic metal forming by a finite element method", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 26, p. 1925.