

# 유한요소법을 이용한 초소성 성형/확산접합 공정해석

송재선<sup>1</sup>·김용환<sup>#</sup>·홍성석<sup>2</sup>·강영길<sup>2</sup>·이정환<sup>3</sup>·권용남<sup>3</sup>

## Analysis of superplastic forming/diffusion bonding process using a finite element method

J. S. Song, Y. H. Kim, S. S. Hong, Y. K. Kang, J. H. Lee, Y. N. Kwon

### Abstract

The superplastic forming/diffusion bonding is widely accepted as an advanced technique for forming complex industrial components. But the superplastic forming process requires much forming time and generates excessive thinning thickness distribution of formed part. Superplastic in materials is only achieved in a narrow range of strain-rate with optimum value unique to each material. In this study, finite element analysis for superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) processes of three-sheet and four-sheet sandwich parts. From this study, forming analysis have offered a lot of information for developing the forming process.

**Key Words** : SPF, SPF/DB

### 1. 서론

초소성 재료는 유동응력에 대해 큰 변형률 속도 민감도를 보이며 특정한 변형률 속도의 영역 내에서 초소성 특성이 나타나는데, 이러한 성질을 나타내는 금속재료는 주로 Al 과 Ti 계열의 합금으로 낮은 유동응력하에서 큰 인장 연신율을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 일체로 성형할 수 있지만 매우 좁은 범위 내에 존재하는 변형률 속도를 유지해야 하며, 이때의 낮은 변형률 속도로 인하여 성형시간이 오래 걸린다. 초소성 성형(superplastic forming: SPF)은 초소성 재료가 가지고 있는 특성을 이용하여 소재에 가스압력을 가하여 플라스틱처럼 자유롭고 쉽게 복잡한 형상의 부품을 일체로 성형할 수 있다는 장점으로 인하여 항공과 자동차 산업에서 많이 이용하고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 가공시 느린 변

형률 속도에 의하여 성형시간이 길고 최종형상의 불균일한 두께 분포와 생산성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.[1]

초소성 성형공정은 성형과 접합이 동시에 이루어져 복잡한 구조물을 단 공정으로 성형할 수 있다는 것으로서, 공정은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 하나는 확산접합 될 부분이 먼저 접합되고 후에 초소성 성형으로 구조물을 성형하는 것이고, 다른 하나는 성형 중에 소재간의 접촉으로 인하여 확산접합 되어 구조물을 성형하는 것이다. 초소성 Al 합금의 경우 고온에서 산화피막의 형성으로 확산접합이 어려우나, Ti 합금의 경우 성형온도와 유사한 온도구간에서 확산접합이 이루어져 초소성 성형/확산접합 공정에 널리 이용되고 있다. 이러한 초소성 재료의 특성을 가지는 성공적인 성형을 위하여 최적 변형률 속도를 공정 동안 일정하게 유지하기 위한 압력-시간 선도의

1. 충남대학교 대학원

2. 국방과학연구소

3. 한국기계연구원

# 교신저자: 충남대학교 기계설계공학과,

E-mail:yonghkim@cnu.ac.kr

예측과 최종 부품에 대한 두께 분포 등의 예측은 매우 중요한 일이다. 성형에 필요한 공정변수들의 영향을 보다 정확히 예측하기 위하여 성형 공정의 모델링 및 해석이 필수적으로 수행되어야 한다.[2]

이에 본 연구에서는 성형시간을 단축시키고 좀더 균일한 두께 분포를 얻기 위하여 유한요소법을 이용하여 초소성 성형/확산접합 공정의 해석을 수행하고 결과를 비교·검토하여 이를 초소성 성형기술 부품제작에 적용하기 위해 필요한 정보를 제공하고자 한다.

## 2. 재료의 구성방정식 및 압력제어 알고리즘

### 2.1 재료 구성방정식

재료를 비탄성 및 비압축성으로 가정하고 초소성 재료의 구성 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = f(\dot{\epsilon}, \epsilon, d) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$  는 초소성 재료의 단축 유동응력,  $\dot{\epsilon}$  은 변형률,  $\epsilon$  비탄성 변형률 속도, 그리고  $d$  는 결정립 크기를 의미한다. 가장 일반적인 멱급수 형태의 재료모델은 다음의 식과 같다.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n d^n \quad (2)$$

여기서,  $K$  는 재료강성계수이고,  $m$  은 변형률 속도 민감도,  $n$  은 가공경화지수이다.[3] 식(2)에서 실험적인 관찰에 근거를 두어 가공경화 및 결정립 성장의 영향을 무시하면 식(3)과 같이 표현된다.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

### 2.2 압력제어 알고리즘

초소성 특성은 비교적 좁은 영역에서 발생하게 되므로 초소성 성형공정 해석에서 최대 변형률 속도값을 최적의 변형률 속도값에 일치하도록 유지시키는 적절한 압력을 예측하는 것이 매우 중요한 일이다. 압력을 예측하는 방법에는 크게 압력제어 알고리즘을 사용하는 방법과 예측·수정을 반복적으로 계산하는 방법으로 구분할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Cheng[4]이 제안한 유동응력과 하중의 비례관계를 이용한 압력제어 알고리즘과 Chandra[5]가 제안한 예측·수정 알고리즘을 이용한 압력제어 기법을 적용하여 해석을 수행하였다. 유동응력과 하중의 비례관계를 이용한 압력제어 알고리즘은 최대 변형률 속도를 최적의 변형률 속도에 유지시키는 방법이지만 각각의 하중 단계에서의 성형압력은 유동응력과 하중이 비례한다는 아래의 관계로부터 계산된다.

$$\frac{\epsilon_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{\epsilon_{opt}}{\sigma_{opt}} \quad (4)$$

$$P_{new} = P_{old} \times \frac{\sigma_{opt}}{\sigma_{\max}}$$

예측·수정 알고리즘은 최대 변형률 속도와 영역상의 실질적인 위치를 결정하여 최대 변형률 속도를 다음의 하중단계에 대하여 새로운 압력을 예측하기 위한 특정한 단축 변형률 속도와 비교하게 된다. 예측된 압력의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$p^{t+\Delta t} = \nu \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}'} \right)^m p' + (1-\nu) \left( \frac{\dot{\epsilon}_{opt}}{\dot{\epsilon}^{t-\Delta t}} \right)^m p'^{-\Delta t} \quad (5)$$

## 3. 초소성 성형/확산접합 공정해석

초소성 성형/확산접합 공정은 초기에 접합 후 초소성 성형으로 이루어지는 경우와 초기접합 후 일부분이 초소성 성형이 되고 2 차 접합이 되어 최종 구조물을 형성시키는 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 이러한 두 가지 형태의 공정에 대하여 Ti-6Al-4V 의 재료로 해석을 수행하였으며, 재료의 구성식은  $\sigma = 460 \dot{\epsilon}^{0.5} (MPa)$  [2]과 같이 하였고, 성형공정 동안 초소성 소재의 변형률 속도를 일정하게 유지시키기 위하여 사용된 변형률 속도값은  $\dot{\epsilon}_{opt} = 3 \times 10^{-4} /s$  로 하였다. 금형과 소재간의 마찰계수는 0.4 로 하였고, 초기 소재의 두께는 1mm 로 하였으며, 평면변형률 가정에 의한 선요소와 2 차원 평면변형률 요소를 사용하였다.

### 3.1 망 구조물 공정해석

Fig. 1 과 같은 형상에 대하여 4 장의 소재로 구성된 망 구조물의 성형공정에 대하여 성형해석을 수행하였다. Fig. 2 는 시간에 따른 형상의 변형과정을 나타낸 것으로써 확산접합이 되지 않은 부분에서 성형초기에 빠르게 성형되어가는 것을 알

수 있다. 그러나 가장 바깥 부분의 소재가 신장되는 정도가 내부 소재가 신장되는 것보다 빠르게 진행되어 Fig. 3 과 같이 최종 형상에서 겹침 현상이 발생하게 된다. Fig. 4 는 소재의 두께분포를 비교하여 나타낸 것으로써 접합부와 접합부 사이의 두께분포가 얇아짐과 겹침이 발생한 부분에서 두께분포가 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있고, Fig. 5 에서 예측?수정 알고리즘을 이용한 경우가 높은 압력으로 빠른 성형 시간을 나타내고 있다.

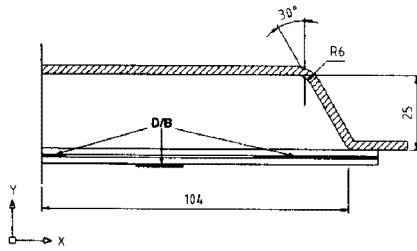


Fig. 1 Tool geometry of cellular structure forming by diffusion bonding.

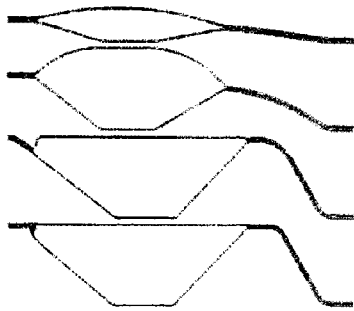


Fig. 2 Evolution of deformed shapes at different forming times for cellular structure forming

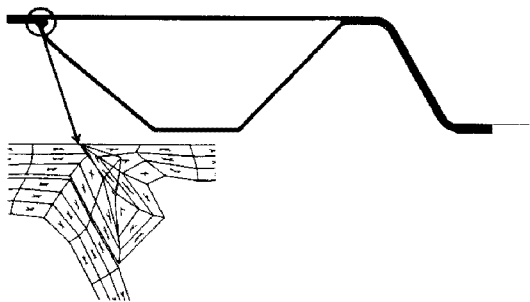


Fig. 3 Final shape for cellular structure forming

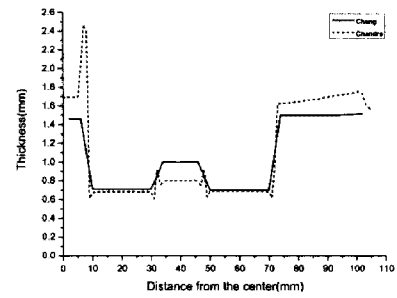


Fig. 4 Comparison of thickness distribution for cellular structure forming

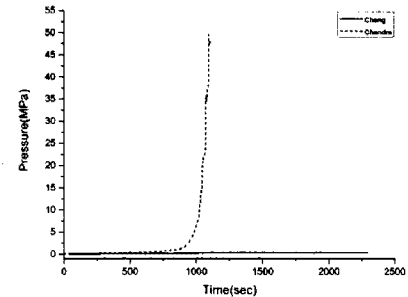


Fig. 5 Comparison of pressure-time curves for cellular structure forming

### 3.2 변형체간의 접촉에 의한 공정해석

4 장의 소재로 구성된 모델에서 초기에 외부의 소재는 블로성형되어 외부구조물을 형성하고, 후에 내부소재가 성형되면서 확산접합되는 공정으로 Fig. 6 과 같으며, 상하 대칭이므로 1/2 만의 해석을 수행하였다. Fig. 7 은 해석 후 시간에 따른 내부 구조물의 형상의 변형과정을 나타낸 것으로써 최종변형형상의 금형 양끝 모서리 부분의 두께가 가장 얇아지는 것을 알 수 있으며, Fig. 8 에서 보이듯이 최종변형형상에서 기공이 발생함을 알 수 있다. Fig. 9 는 시간에 따른 압력을 비교한 것으로써 역시 예측?수정 알고리즘이 높은 압력으로 인해 짧은 성형시간을 나타내고 있다.

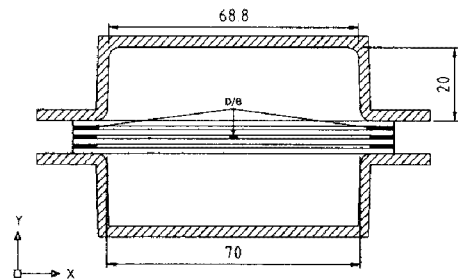


Fig. 6 Tool geometry of four-sheet SPF/DB structure forming by diffusion bonding

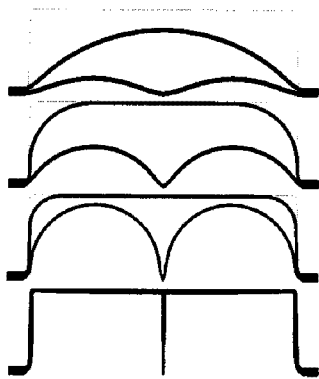


Fig. 7 Evolution of deformed shapes at different forming times for four-sheet SPF/DB structure forming

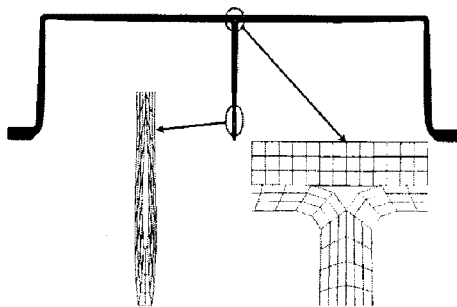


Fig. 8 Final shape for four-sheet SPF/DB structure forming

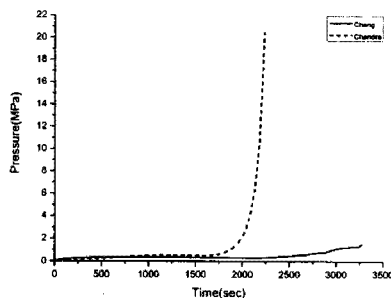


Fig. 9 Comparison of pressure-time curves for four-sheet SPF/DB forming

#### 4. 결론

본 연구에서는 초소성 성형/확산접합에 대하여 유한요소법을 이용한 공정해석을 통하여 압력선도와 변형 거동 형상을 예측 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 공정해석을 통하여 성형/접합에 의한 복잡한 형상의 일체화 가능성을 검토하였다.

(2) 망 구조물 형상의 해석에서는 바깥부분의 소재가 신장되는 정도가 내부 소재가 신장되는 것보다 빠르게 진행되어 최종형상에서 겹침 현상이 발생하게 되는 구조물 내부의 형상 변화에 대한 예측을 하였다.

(3) 변형체간의 접촉에서 접합부의 크기가 미치는 영향과 기공의 발생을 예측하였다.

따라서 유한요소법을 이용한 공정해석이 성형 공정 예측에 적절히 활용 할 수 있음을 알 수 있으며 향후 실험을 통하여 결과를 검증할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] ATT R&D 연구보고서, "알루미늄 차체의 초소성 성형 공정설계를 위한 성형해석기법 개발", 2002.
- [2] 홍성석, "강-점소성 유한요소법을 이용한 초소성 성형공정 해석", 충남대학교 박사학위논문, 1995.
- [3] S.C.Rama and N.Chandra, "Development of a pressure prediction method for superplastic forming processes", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 26, No.5, pp.711-725, 1991.
- [4] J.H.Cheng and S.Lee, "Methods for resolving grooving problems in parts manufactured from combined diffusion bonding and superplastic forming processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 45, pp.249-254, 1994.
- [5] R.C.Ramma, N.Chandra and R.E.Goforth, "Numerical modeling of 3D superplastic sheet forming processes", Advances in Superplasticity and Superplastic Forming, N.Chandra, H.Garmestani & R.E.Goforth eds., TMS, pp. 133-154, 1993.