

유한요소법을 이용한 초소성 성형/확산접합 공정 설계

홍 성 석*, 이 종 수*, 김 용 환**

* 국방과학연구소

** 충남대학교 기계설계공학과

Superplastic Forming/Diffusion Bonding Processes
Design Using A Finite Element Method

Sung Suk Hong*, Jong Soo Lee*, Yong H. Kim**

* Agency for Defense Development

** Dept. of Mechanical Design Eng., Chungnam National
University

Abstract

Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) processes are analyzed using a rigid visco-plastic finite element method. The optimum pressure-time relationship for a target strain rate and thickness distributions were predicted using two-node line element based on membrane approximation for plane strain shapes. Material behavior during SPF/DB of the integral structures with complicated shapes are investigated. The tying condition is employed for the analysis of inter-sheet contact problems. A movement of rib structure is successfully predicted during the forming.

1. 서 론

초소성 성형/확산접합 공정은 성형과 접합이 동시에 이루어지며, 따라서 복잡한 형상의 구조물 부품을 단 공정으로 제작할 수 있는 성형 방법이다. 확산접합이란 두 재료를 고온(0.5-0.8 T_m)에서 거시적인 변형이 생기지 않는 범위의 압력을 가하면서 접합이 충분히 형성되는 시간을 유지시켜 두 재료를 접합시키는 공정으로 고체 상태에서의 접합을 의미한다. 초소성 알루미늄 합금인 경우에는 고온에서의 산화피막 형성으로 인하여 확산접합이 어려우며, 티타늄 합금인 경우에는 성형 온도와 유사한 온도 구간에서 확산접합이 이루어지고 있어 초소성 성형/확산접합 공정에 널리 이용되고 있다.[1]

Rebelo[2]등은 4 장의 소재 가운데 2 장이 길이 방향으로 점용접(spot welding)이 되어 있어 성형후 상자형상으로 되며 상, 하 면에서 확산접합이 되어 최종 구조물을 이루는 형상을 해석 하였으며, Wood[3]등은 확산접합 모사가 가능한 접촉 알고리즘을 벌칙법을 사용하여 제시하였으며 대표적인 다상자 확산접합 해석에 이용하였다.

Bellet[4]등은 평면변형률에서의 3 장의 박판 확산접합 및 3 차원 형상의 확산접합 해석을 수행하였다. 특히 3 차원 확산접합 해석에서는 내부 접촉을 수직 가상벽에 미끄럼(sliding) 접촉하는 것으로 가정하여 해석 하였으며, 구석 부분의 채움 문제와 관련하여 격자 재구성(remeshing)이 필요함을 제시하였다. Bonet[5] 등은 확산접합 해석이 가능한 알고리즘을 제시하였으며 3 차원 2 중상자(two-cell box)의 확산접합 해석에서 웹(web)의 위치가 성형이 진행됨에 따라 이동되는 정도를 예측하였다.

본 연구에서는 초소성 성형/확산접합 공정의 해석을 위하여 강-점소성 유한 요소법을 이용하였다. 2 절점 선요소(line element)를 사용하였으며 평면 변형 형상에 대하여 주어진 변형률 속도를 유지 하기위한 압력-시간 선도, 두께 분포등의 예측이 가능하도록 하였다. 초소성 성형/확산접합에 의한 복잡한 형상의 일체화 내부 구조물의 형상 변화 예측을 수행 하였으며, 또한 결합 조건을 이용한 변형체 소재간의 접촉 문제 해석을 통하여 성형이 진행됨에 따라 내부 리브 형상의 이동하는 위치 및 변형 거동의 예측이 가능하게 하였다.

2. 강-점소성 유한 요소 해석

초소성 성형/확산접합 공정의 해석을 위하여 소재는 등방성으로 가정 하였으며, 막막 이론(membrane theory)에 근거를 둔 2 절점 선요소를 사용 하였다.

2.1 유한요소 해석

평형 상태 방정식은 가상일의 원리(virtual work principle) 로 부터 유도된다. 수식화는 작은 시간 구간내에서 최소 소성일 경로를 가정하는 증분 변형이론 (incremental deformation theory) 에 근거를 두었다.[6] 초소성 변형시의 외력으로 압력 P 를 고려하면 범함수 $\Delta \pi$ 는 다음과 같이 정의 할수있다.

$$\Delta \pi = \int_{V_0} \int_{\bar{\epsilon}_0}^{\bar{\epsilon}_0 + \Delta \bar{\epsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} dV_0 - \int_{V_0}^{V_0 + \Delta V} P dV \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력(effective stress), $\bar{\epsilon} (= \int \dot{\bar{\epsilon}} dt)$ 는 유효 변형률 (effective strain), $\dot{\bar{\epsilon}}$ 는 유효 변형률 속도(effective strain rate)를 각각 나타내며, $\Delta \bar{\epsilon}$ 는 분할된 시간 구간 동안의 유효 변형률 증가분을 나타낸다. 또한 V_0 는 현재의 체적, ΔV 는 미소시간 Δt 동안의 체적 증가분을 각각 나타낸다. 소재는 유한 요소의 조합으로 표현되고 절점 변위 벡터를 ΔU 로 하여 식 (1)에 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같이 표현 할수있다.

$$F_i - PH = F_e \quad (2)$$

여기서 F_i 는 내부 저항력, P 는 압력, F_e 는 절점에서의 외력을 각각 나타낸다.

식 (2)는 비선형 방정식으로 Newton Raphson 법을 이용하여 반복적으로 풀어 해를 구한다. 상세한 강성방정식의 수식화는 참고문헌 [7]에 잘 나타나있다.

항은 조건하에서 미세한 결정립을 갖는 초소성 재료에 대하여 그 주 특성은 유동 응력이 변형률 속도에 매우 민감하다는 것이며, 일반적으로 다음과 같이 유효 변형률 속도의 함수로 표시 할수있다.

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

여기서 K 는 재료의 강도 계수이고, m 은 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)를 나타낸다. 소재와 금형 사이의 경계마찰에 대하여는 수정된 쿨롱(Coulomb) 법칙[8]을 사용 하였다.

2.2 결합 조건을 이용한 변형체 소재 접촉 해석

변형체간의 접촉에 의한 확산접합 공정해석에는 변형중에 중앙면의 리브(rib)형상을 형성하기 위하여는 변형체 사이의 접촉문제의 해석이 수행되어야 한다. 이 부분의 해석방법으로는 Bellet[4] 등이 3 차원 확산접합 해석시 가상의 수직벽을 따라 미끄럼 접촉하는 것으로 해석한 예가 있는데 이 경우에는 초기 접합부분이 중앙에 존재하는 경우만 가능하게 되며, 비 대칭면에 존재하는 경우 해석이 불가능하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 결합조건(tying condition)을 적용하여 해석 하였다.

변형 공정 동안 초기 접합부분을 중심으로 Fig.1(a) 에서처럼 한쪽부분을 master 영역, 나머지 부분을 slave 영역이라 하면, slave 영역의 절점이 master 영역에 접촉하게 되면 Fig.1(b) 에서처럼 다음과 같은 관계식을 가지게 된다.

$$\begin{pmatrix} \delta U_s \\ \delta V_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{l_2}{l_1} & 0 & \frac{l_2}{l_1} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{l_2}{l_1} & 0 & \frac{l_2}{l_1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta U_i \\ \delta V_i \\ \delta U_j \\ \delta V_j \end{pmatrix} \quad (4)$$

이 식을 이용하여 변환행렬(transformation matrix)을 구성하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \delta U_i \\ \delta V_i \\ \delta U_j \\ \delta V_j \\ \delta U_s \\ \delta V_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 - \frac{l_2}{l_1} & 0 & \frac{l_2}{l_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{l_2}{l_1} & 0 & \frac{l_2}{l_1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta U_i \\ \delta V_i \\ \delta U_j \\ \delta V_j \\ \delta U_s \\ \delta V_s \end{pmatrix} \quad (5)$$

혹은

$$(\delta U) = T (\delta U) \quad (6)$$

식 (6)을 사용하여 전체계 행렬(global matrix)을 변환하면

$$\overline{K} = T^T K T \quad (7)$$

$$\overline{F} = T^T F \quad (8)$$

의 형태로 쓸 수 있다. 이렇게 하여 계산된 해 δU 는 slave 절점에 대하여는 해가 성립되지 않으므로 전체계에 대한 해는 최종적으로 다음과 같이 계산된다.

$$(\delta U)_{global} = T(\delta U) \quad (9)$$

2.3 변형률 속도 제어

초소성 성형 공정의 수치 모의화(numerical simulation) 에서 궁극적인 목표인 재료의 최적 변형률 속도를 유지하면서 가능한한 빨리 성형을 완성하기 위하여는 블로 성형 공정에서의 최적 압력 - 시간 선도를 예측 하는것이다.

한 변형 단계에서 수렴이되면 그때의 압력 P_1 에 대하여 요소내의 최대 변형률 속도값을 최적 변형률 속도값과 비교하여 그 차가 주어진 오차 범위내에 존재하지 않으면 임의의 새로운 압력값 P_2 를 사용하여 다시 계산한다. 만약 그 차가 오차 범위내에 존재 하지않으면 다음 단계의 새로운 압력값은 선형 내삽을 이용하여 구한다.[7]

3. 초소성 성형/확산접합 공정 해석

초소성 성형/확산접합 공정의 해석에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V로 응력 및 변형률 속도 관계는 다음과 같이 하였다.

$$\overline{\sigma} = 460 \overline{\epsilon}^{0.5} \quad (MPa) \quad (10)$$

이때 요구 변형률 속도 값은 $3 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 로 하였다. 매 단계마다 최대 변형률 속도와 의 허용 오차 범위는 최적 변형률 속도 값의 $\pm 5\%$ 이내로 하여 유지 시켰다.

3.1 망 구조물 성형 해석

Fig.2는 Ti-6Al-4V 의 4 장의 소재로 제작된 망 구조물(cellular structure)의 형상을 보여 주고 있으며 대칭이므로 해석은 1/4 만을 수행하였다. Fig.3은 중앙부에 확산접합 부분이 있는 경우의 형상이다. 초기 소재두께는 상부 2.5mm, 하부 0.8mm 로 하였으며, 마찰계수는 0.4로 하였다. 해석에 사용된 절점수 및 요소수는 42개로 하였으며, 확산접합이 있는 부분인 그림의 AB 부분은 Z방향으로만 구속시키는 경계조건을 사용하였다.

Fig.4는 중앙부에 확산접합 부분이 있는 경우의 변형 형상을 시간에 따라 나타낸 것으로 그림에서처럼 초기에 확산접합된 부분 A,B 영역이 성형후에는 우측으로 이동

되는 것을 알 수 있으며, 이동된 양은 A 부분이 32.0mm 에서 37.42mm 로, B 부분이 48.0mm 에서 57.64mm 로 나타났으며, 초기 확산접합된 영역이 16mm 에서 20.22mm 로 신장되었음을 알 수 있다. 이러한 해석 결과의 자료는 최종 형상에서의 망구조물이 형성되는 위치와, 확산접합되는 부분의 크기를 정확히 예측할 수 있어 실제 부품설계에 중요한 자료를 제공할 수 있게 된다.

3.2 변형체간의 접촉에 의한 공정해석

해석으로는 초기에 선 접합으로 중앙면이 확산접합된 후에 나머지 일부분이 초소성 성형후에 2 차로 접합되어 최종 구조물을 형성시키는 공정으로 Fig.5와 같은 4 장의 소재로 구성된 모델을 선정하였다. 초기에 외부의 소재는 블로 성형 되어 외부 구조물을 형성하고 후에 내부 소재가 성형 되면서 확산접합되는 공정으로 대칭이므로 상부 1/2 만을 해석 하였으며 내부 소재의 변형만을 고려하였다.

해석에 사용된 재료 구성식은 앞의 경우와 동일하게 하였으며, 절점수는 71 개로 하였다. 초기 소재 두께는 1 mm 로 하였으며, 경계면 마찰계수는 0.5로 하였다. 또한 중앙면의 절점은 z 축으로만 고정하는 경계조건을 사용하였다.

Fig.6은 접합 지점을 중심으로 대칭 형상인 경우로 시간에 따른 내부 구조물의 변형 형상을 가상의 수직벽을 따라 미끄럼 접촉하는 경우와 비교한 것이다. 변형중 변형 소재간의 접촉에 의한 변형이 잘 이루어지고 있음을 보여 주고 있으며, 결합조건을 이용한 변형체 접촉처리가 잘 적용되고 있음을 알 수 있다. 또한 가상의 수직벽을 따라 미끄럼 접촉하는 경우와 동일한 양상을 보여주고 있으며, 대칭 형상인 경우에는 두 가지 해석 결과에 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig.7은 초기에 확산접합된 부분이 중앙면에서 우측으로 2mm 더 이동된 지점인 37.0mm 로한 비대칭 형상인 경우의 시간에 따른 내부 구조물의 변형 형상을 나타낸 것이다. 성형 시간은 중앙면에 접합부분이 있는 경우보다 더 길게 소요되었으며, 초기 접합부분이 성형후 45.8mm 로 8.8mm 우측으로 이동되어 리브 형상이 형성됨을 알 수 있다. 이 경우에도 본연구에 적용된 접촉 알고리즘이 잘 적용되고 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

강-점소성 유한요소법을 이용하여 초소성 성형/확산접합 공정의 해석을 수행 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(i) 초소성 성형/확산 접합 공정 해석으로 성형/접합에 의한 복잡한 형상의 일체화 구조물 성형 공정 설계가 가능하게 되었다.

(ii) 망구조물에서의 성형도중 내부 구조물의 형상 변화 예측이 가능하게 되었으며, 실제 구조물의 정밀성형을 위한 설계 자료를 제공할 수 있게 되었다.

(iii) 결합조건을 이용한 변형체 소재간의 접촉문제 해석을 통하여 성형이 진행됨에 따라 내부 리브형상의 이동하는 위치를 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) D.Stephen, 1986, "Superplastic Forming and Diffusion Bonding of Titanium", Designing with Titanium, Proc. of the International Conference Organised by the Metals Technology Committee of the Institute of Metals, pp.108-124.
- (2) N.Rebelo and T.B.Wertheimer, 1988, "Finite Element Simulation of Superplastic Forming", Proc. 16th NAMRC, pp.107-113.
- (3) R.D.Wood, J.Bonet and A.H.S.Wargadipura, 1989, "Simulation of the Superplastic Forming of Thin Sheet Components Using the Finite Element Methods", Proc. NUMIFORM 89, E.G.Thompson et. al. eds., pp.85-93.
- (4) M.Bellet and J.L.chenot, 1989, "Numerical Modelling of Thin Sheet Superplastic Forming", Proc. NUMIFORM 89, E.G.Thompson et. al. eds., pp. 401-406.
- (5) J.Bonet, P.Bhargava and R.D.Wood, 1992, "Finite Element Simulation of 3-Dimensional Superplastic Forming with Diffusion Bonding", Proc. NUMIFORM 92, J.L.Chenot et. al. eds., pp.843-849.
- (6) Y.Germain, K.Chung and R.H.Wagoner, 1989, "A Rigid-Viscoplastic Finite Element program for Sheet Metal Forming Analysis", Int. J. Mech. Sci., Vol.31, No.1, pp.1-24.
- (7) 홍성석, 김용환, 이종수, Wagoner, R.H., 1993, "강-점소성 유한 요소법을 이용한 초소성 성형 공정 해석(I) -초소성 벌지성형-", 대한기계학회 논문집, 제7권 제4호, pp.796-805
- (8) J.T.Oden and E.B.Pires, 1983, "Nonlocal and Nonlinear Friction Laws and Variational Principles for Contact Problems in Elasticity", J. Appl. Mech., Vol.50, pp.67-76.

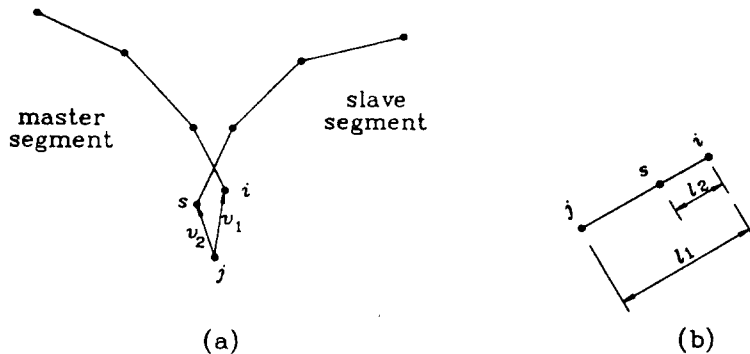


Fig.1 Inter-sheet contact for tying condition : (a) geometry,
(b) definition of contact element.

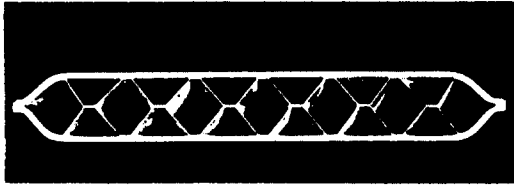


Fig.2 Photo of cellular structure formed by diffusion bonding.

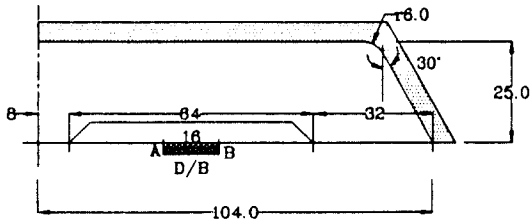


Fig.3 Geometry of forming tool for cellular structure

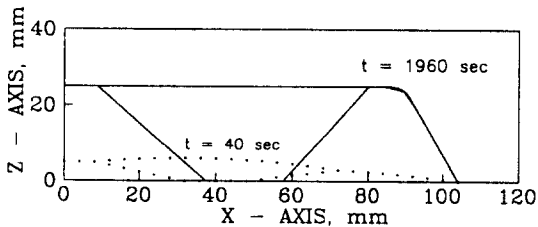
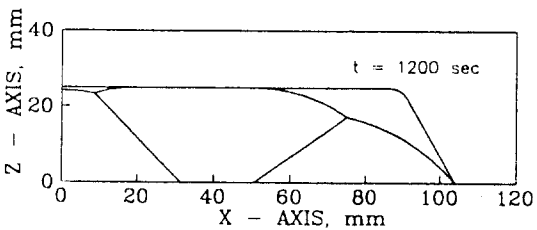
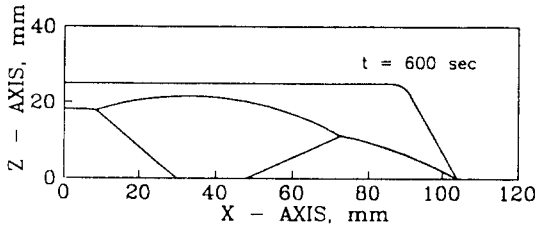


Fig.4 Evolution of deformed shapes at different forming times

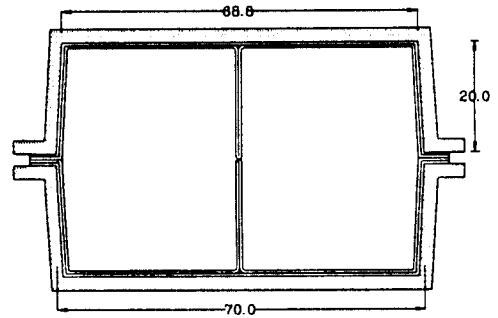


Fig.5 Schematic of four-sheet SPF/DB structure.

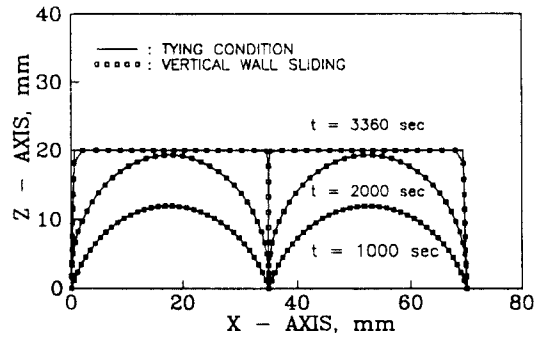


Fig.6 Evolution of deformed shapes at different forming times(sym.)

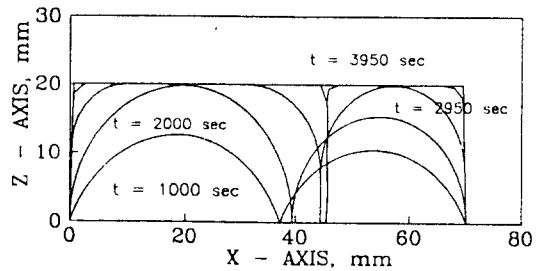


Fig.7 Evolution of deformed shapes at different forming times(unsym.)