

단계적 가압을 이용한 초소성 성형/확산접합의 공정설계

송재선¹, 강영길², 홍성석², 권용남³, 이정환³, 김용환[#]

Process Design of Superplastic Forming/Diffusion Bonding by Using Step-by-step Pressurization

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

(Received May 10, 2007)

Abstract

Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) has been widely used in the automotive and aerospace industry since it has great advantages to produce very light and strong components. Finite element method (FEM) is used to model the SPF/DB process of 3-sheet sandwich panel to predict the pressure-time curve and to analyze the process parameters. In order to eliminate defects of the part, a new pressurization scheme is proposed. Contrary to the conventional one-step pressurization, which causes the folding at the DB joint, two-step pressurization can eliminate the folding. Effect of pressurization cycle was investigated by using FE analysis and proper pressurization cycle is proposed.

Key Words : Superplastic Forming/Diffusion Bonding(SPF/DB), Finite Element Method(FEM), Step-by-step Pressurization

1. 서 론

초소성 성형(superplastic forming)은 일반적으로 특정조건에서 국부적인 단면 수축 없이 큰 인장연신율을 보이는 특징을 가지는 재료에 가스압력을 가함으로써 복잡한 구조물을 단일 공정으로 제조할 수 있는 성형법을 말한다[1].

확산접합(diffusion bonding)은 접합하고자 하는 부분을 고온에서 외부에 압력을 가하여 양 표면을 접합시키는 공정이다. 이러한 초소성 성형법과 확산접합의 기술을 조합한 초소성 성형/확산접합의 공정은 더욱 복잡한 구조물을 일체형으로 성형할 수 있어 수많은 리벳에 의한 구조용 부품 등에 경제적 이익뿐만 아니라 생산 효율의 증대를 기대할 수 있다.

특정한 변형률 속도의 영역 내에서 나타나는 초

소성 재료의 특성은 주로 Ti 합금과 Al 합금에서 나타나고, 성형공정은 최대 변형률 속도를 최적 변형률 속도에 일치하도록 유지시키면서 이루어진다.

초소성 성형/확산접합의 성공적인 성형을 위하여 최적의 변형률 속도를 유지하기 위한 압력-시간 선도의 예측과 최종 형상의 두께분포 예측은 매우 중요한 일이다. 기존의 실험적인 방법의 시행착오에 의한 많은 시간과 노력대신 유한요소법을 이용하여 최적의 변형률 속도를 유지할 수 있는 압력-시간 선도, 두께 분포 및 변형 중의 결합 등을 예측할 수 있다[2].

초소성 성형/확산접합은 여러 장의 판재를 접합한 후 접합되지 않은 부분에 압력을 가하여 성형하기 때문에 내부판재의 변형 또한 고려해야 하고, 내부판재의 굽힘 없이 성형이 완료되어야 하기 때문에 성형에 어려움이 있다.

1. 충남대학교 대학원, BK21 메카트로닉스사업단

2. 국방과학연구소

3. 한구기계연구원

교신저자: 충남대학교, BK21 메카트로닉스사업단,

E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr

송재선[3] 등은 초소성 성형/확산접합의 여러 공정에 대하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 접합된 초소성 재료의 내부에 전체적으로 압력을 가하는 경우 소재가 신장되어가는 정도 차이로 최종 변형형상에서 소재 겹침의 결함이 나타남과 압력을 받는 면적의 차이로 내부판재의 휨을 예측하였다. 이러한 결함 없는 완벽한 성형을 위하여 소재의 두께 및 접합부의 크기 등 공정 변수들을 변화시키는 방법과[4] 압력을 가하는 절차를 다르게 하여 압력을 제어하는 방법이 있다.

이에 본 연구에서는 초소성 성형/확산접합의 완벽한 성형을 위하여 유한요소법을 이용한 공정해석을 수행하였다. 초기에 확산접합된 후 압력을 가하는 방법으로 비접합부에 전체적으로 압력을 가하는 성형방법과 비접합부에 단계적으로 압력을 가하는 성형방법에 대하여 해석을 수행하였으며, 좀 더 빠른 성형시간의 성공적인 성형 조건을 찾고자 한다.

2. 초소성 성형/확산접합 공정해석

특정한 변형률 속도의 영역 내에서 나타나는 초소성 재료의 성형공정은 최대 변형률 속도 값을 최적의 변형률 속도 값에 일치하도록 유지시키면서 이루어진다. 본 연구에서는 Chandra[5]가 제안한 예측·수정 알고리즘을 이용한 압력제어 기법이 적용된 유한요소 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.

2.1 전체적 가압의 공정해석

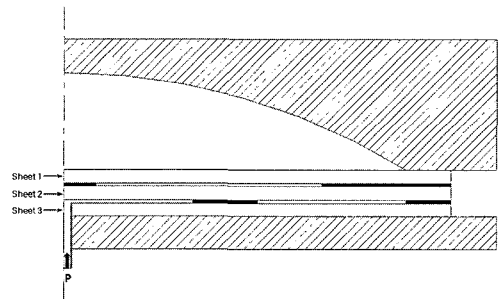
해석에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V ELI 소재로 접합된 3장의 원형 판재에 대하여 1710 개의 축대칭 요소를 사용하였고, 접합부는 Tie 옵션을 적용하여 해석을 수행하였다. 사용된 구성방정식은 식(1)과 같고, 성형공정 동안 변형률 속도를 일정하게 유지시키기 위한 최적의 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{opt} = 0.001/s$ 로 하였으며, 판재의 초기 두께는 각각 2mm, 마찰계수는 0.3 으로 하였다[6].

$$\sigma = 450\dot{\epsilon}^{0.4} (MPa) \quad (1)$$

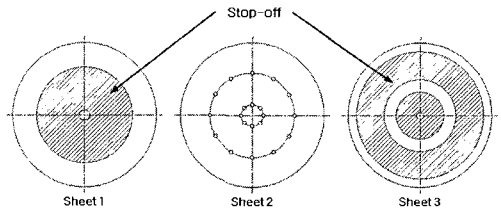
Fig. 1(a)와 같은 금형의 형상에 대하여 Fig. 1(b)와 같이 3장의 원형판재를 부분적으로 확산접합한 후 1개의 가스 유입구와 내부 유동홀을 이용하여 비접합부에 전체적으로 압력을 가하면 변형

이 이루어지고, 상부판재의 비접합부에서 빠르게 성형이 진행되어 금형에 접촉하기 시작한다.

Fig. 2는 시간에 따른 변형형상을 나타낸 것으로서 (a)에서 보이는 것과 같이 상부판재 비접합부의 성형이 빠르게 진행되면서 (b)와 같이 내부판재가 아래로 볼록하게 휘게 되고 (c)에서 보이는 것과 같이 최종 변형형상에서 판재가 겹치게 되는 결함과 내부판재의 휨을 예측 할 수 있다.



(a) Tool geometry



(b) Stop-off patterning

Fig. 1 Tool geometry and stop-off patterning

Fig. 3은 시간에 따른 압력과 변형률 속도를 나타낸 것으로 심한 변형률 속도의 변화를 보이고 있다. Fig. 4는 실험 결과[6]로서 해석결과와 같이 내부판재가 아래쪽으로 볼록하게 휨과 중앙부의 성형이 완료 되지 않았음을 볼 수 있으며, 성형이 완료된다면 해석 결과처럼 겹침의 결함이 발생할 수 있다.

2.2 단계적 가압의 공정해석

1개의 가스 유입구와 내부 유동홀을 이용하여 비접합부의 내부에 전체적으로 압력을 가할 경우 Fig. 2(c)와 같이 최종 변형형상에서 판재 겹침의 결함이 나타날 수 있다. 이를 해결하는 방법으로는 상부판재의 두께를 두겹게 하거나 접합부의 크기를 바꾸는 등 공정 변수를 조절하였다. 그러나 판재의 두께가 다를 경우 그에 따른 강도 저하 및 비용 증가에 따른 문제 등을 감수 해야 한다.

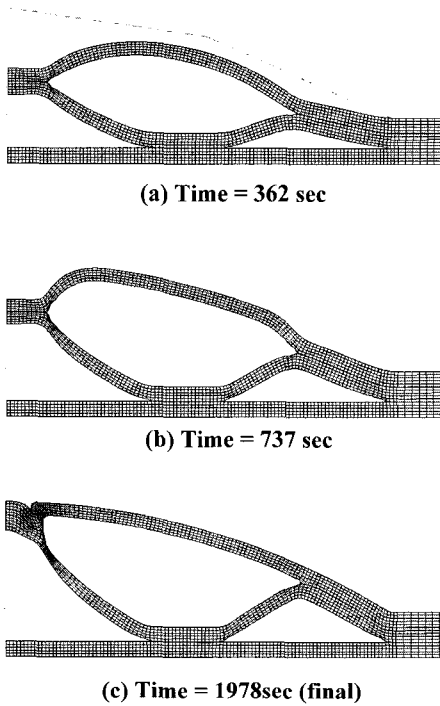


Fig. 2 Evolution of deformed shape at different times for 3-sheet forming

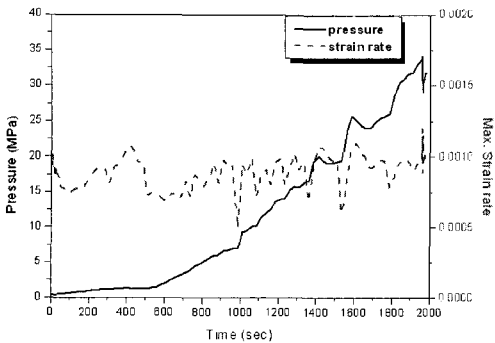


Fig. 3 Variation of pressure and strain rate with time for 3-sheet forming

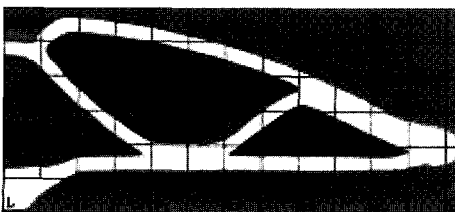


Fig. 4 Shape of part from experiment[6]

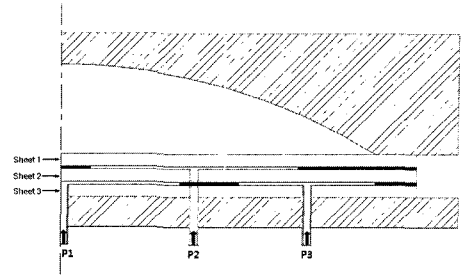


Fig. 5 Tool geometry for step-by-step pressurization

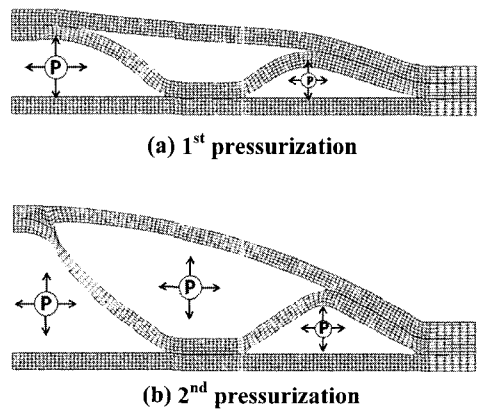


Fig. 6 Schematic of step-by-step pressurization

공정변수의 변화로부터 찾은 최적의 공정조건은 상부판재 접침의 결함 없이 성형을 완료할 수 있으나 상부판재의 두께가 내부판재의 두께보다 2 배 이상 두꺼워지게 되어 내부판재의 강도가 약해지게 되고 많이 휘게 된다.

본 연구에서는 1 개의 가스 유입구와 내부 유동홀 대신 Fig. 5 와 같이 3 개의 가스 유입구를 이용하였으며, 압력을 가하는 방법을 달리하였다. 압력을 가하는 순서는 압력을 받는 면적을 고려하여 결정하였다.

3 개의 유입구에 압력을 Fig. 6 (a)와 같이 P1, P3의 유입구에 일정 시간 동안 1 차 압력을 가한 후 Fig. 6 (b)와 같이 P1, P2, P3의 유입구에 2 차 압력을 가하여 성형공정을 완료한다.

Fig. 7 은 1 차 압력을 가한 후 변형형상과 최종 변형형상을 나타낸 것으로서, 1 차 압력을 가한 시간에 따른 결과들을 나타낸 것이다.

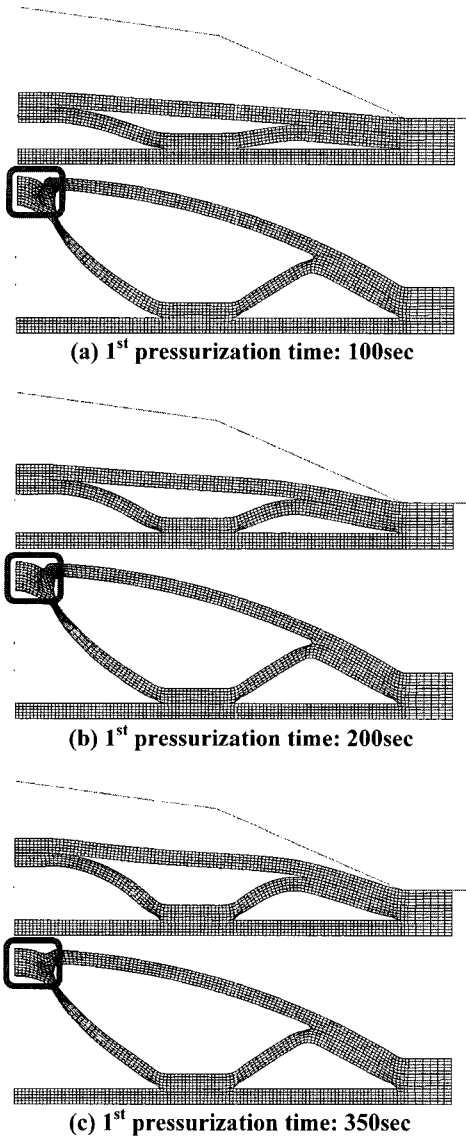


Fig. 7 Evolution of deformed shapes for different 1st pressurization time

1차 압력을 가하는 시간이 늘어남에 따라 성형성이 좋아짐을 알 수 있다. 그러나 1차 압력을 가하는 시간이 너무 길면 상부판재가 급형의 중앙 부분이 아닌 다른 부분에서 판재가 접칠 수 있기 때문에 1차 압력을 가하는 적절한 시간을 결정하는 것이 중요하다.

1차 압력을 가한 후 성형의 높이가 급형 높이의 1/2정도 높이까지 올라오는 360초의 시간부터 성형이 완벽하게 됨을 확인 하였으며 P1, P3의 유

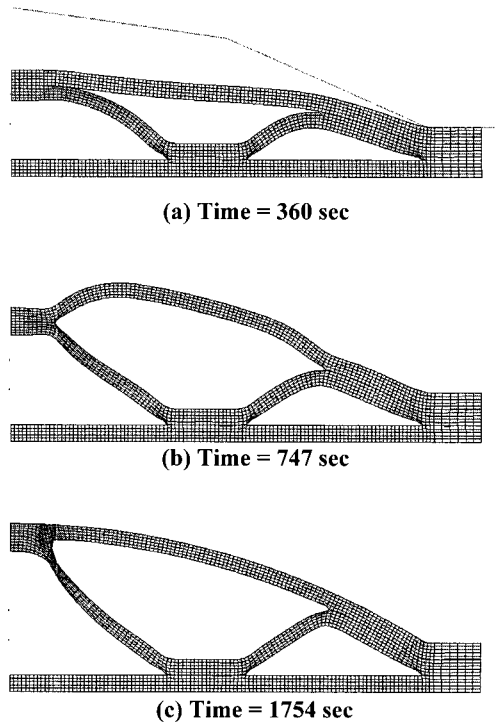


Fig. 8 Evolution of deformed shapes with different time for two-step pressurization(1st pressurization time: 360sec)

입구에 360 초의 시간 동안 1 차 압력을 가한 후 P1, P2, P3의 유입구에 2 차의 압력을 가하는 공정에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다.

비접합부 전체에 압력을 가하는 경우 내부판재가 Fig. 2(a)와 같이 아래쪽으로 볼록하게 휘는 반면 P1, P3에 1차 압력을 가한 경우 Fig. 8(a)와 같이 내부판재가 위쪽으로 볼록하게 휘게 된다. 2차 압력을 가하게 되면서 Fig. 8(b)와 같이 내부판재가 점차 펴지기 시작하고, Fig. 2(c)의 결함으로 야기되었던 판재의 결침은 Fig. 8(c)에서 보이듯이 결함 없이 성형이 완료 되었으며 내부판재의 휨에 대해서도 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 9는 시간에 따른 압력과 변형률 속도를 나타낸 것으로 1차 압력을 가하는 동안 최적 변형률 속도를 잘 유지하고 있으나, 2차 압력을 가하면서부터 심한 변형률 속도의 변화를 보이고 있다. 또한 비접합부에 전체적으로 압력을 가한 경우 보다 높은 압력과 빠른 성형 시간을 나타내고 있다.

Fig. 10은 1개의 유입구와 유동홀을 이용하여 전체적으로 압력을 가한 경우(a)와 3개의 유입구를

이용하여 단계적으로 압력을 가한 경우(b)의 최종 변형형상을 비교한 것으로서, 전체적으로 압력을 가한 경우 상부 소재 바깥 부분의 신장되는 정도가 내부 소재의 신장되는 것보다 빠르게 진행되어 최종 변형형상에서 겹침의 결함이 발생하는 반면 단계적으로 압력을 가하였을 때 상부판재의 겹침의 결함과 내부판재의 휨의 문제 또한 해결됨을 알 수 있다.

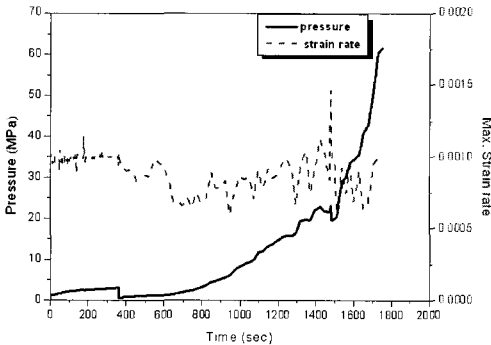


Fig. 9 Variation of pressure and strain rate with time for 3-sheet forming(1st pressurization time: 360sec)

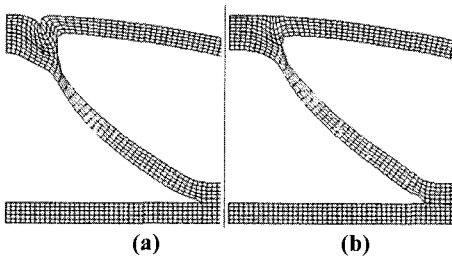


Fig.10 Comparison of final shapes with different pressurization methods: (a) one-step, (b) two-step

3. 결론

초소성 성형/확산접합의 공정설계에 있어서 상부판재의 겹침의 결함과 내부판재의 휨 없이 성형을 하기 위한 최적의 조건을 찾기 위하여 유한요소법을 이용하였다.

1개의 유입구와 유동홀을 이용하여 비접합부에 전체적으로 압력을 가하는 방법과 3개의 유입구를 이용하여 단계적으로 압력을 가하는 방법에 대해 해석을 수행하였으며 해석 결과 다음과 같

은 결론을 얻었다.

(1) 1개의 유입구와 유동홀을 이용하여 전체적으로 압력을 가한 경우에 비해 3개의 유입구를 이용하여 단계적으로 압력을 가한 경우 좋은 성형성을 얻을 수 있었다.

(2) 전체적으로 압력을 가하는 경우에 나타났던 최종 변형형상에서 상부판재의 겹침과 내부판재의 휨에 대하여 단계적으로 압력을 가함으로써 문제를 해결 할 수 있었다.

(3) 3개의 유입구를 이용하여 단계적으로 압력을 가하는 방법은 향후 실험을 통하여 결과를 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Bonet, A. Gil, R. D. Wood, R. Said, R. V. Curtis, 2006, Simulating superplastic forming, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 195, Issues 48-49, pp. 6580~6630.
- [2] 홍성석, 김용환, 1996, 초소성 성형/확산접합 공정의 유한요소해석, 한국소성가공학회지, 제5권, 제1호, pp. 37~46.
- [3] 송재선, 김용환, 홍성석, 강영길, 이정환, 권용남, 2006, 유한요소법을 이용한 초소성 성형/확산접합 공정해석, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 265~268.
- [4] 송재선, 강영길, 홍성석, 권용남, 이정환, 김용환, 2007, 실험계획법을 이용한 초소성 성형/확산접합 공정설계, 한국소성가공학회지, 제16권, 제2호, pp. 144~149.
- [5] R. C. Ramma, N. Chandra, R. E. Goforth, 1993, 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.
- [6] Jong-Hoon Yoon, Ho-Sung Lee, Yeong-Moo Yi, Young-Soon Jang, 2007, Finite element analysis in superplastic blow forming of Ti-6Al-4V multi-sheets, Materials Science Forum, Vols. 546-549, pp. 1361~1336.