

계층적 접촉 탐색방법을 이용한 3-D 초소성 성형/확산접합의 공정설계(I)

강영길¹ · 송재선² · 홍성석¹ · 권용남³ · 이정환³ · 김용환[#]

Analysis of 3-D Superplastic Forming/Diffusion Bonding Process Using a Hierarchical Contact Searching Method(I)

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

(Received December 20, 2006)

Abstract

Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) processes were analyzed using a 3-D rigid visco-plastic finite element method. A constant-triangular element based on membrane approximation and an incremental theory of plasticity are employed for the formulation. The coulomb friction law is used for interface friction between tool and material. Pressure-time relationship for a given optimal strain rate is calculated by stress and pressure values at the previous iteration step. In order to improve the contact searching, hierarchical search algorithm has been applied and implemented into the code. Various geometries including sandwich panel and 3 sheet shape for 3-D SPF/DB model are analyzed using the developed program. The validity for the analysis is verified by comparison between analysis and results in the literature.

Key Words: Superplastic Forming, Diffusion Bonding, Forming Pressure, Hierarchical Contact Search Algorithm

1. 서 론

확산접합(Diffusion bonding)은 접합하고자 하는 표면을 깨끗하게 하여 불활성 분위기나 진공상태의 고온(0.8T_m)에서 양 표면을 접촉시켜 외부에서 압력을 가하여 접합시키는 공정이다.

확산접합에서 접합강도에 영향을 미치는 변수들인 접합온도, 압력, 시간, 표면온도, 표면상태 등을 잘 조절해야 한다. 이러한 확산접합은 기술적으로 새로운 것은 아니며 다른 종류의 접합기술(용접, 브레이징)과 비교하여 많은 장점이 있는데 조립을 위한 부품(리벳, 볼트 등)을 사용하지 않으므로 완제품의 경량화가 가능하고 접합과정이 단

순하고 쉬우며 넓은 면적을 한번에 접합을 할 수 있어 제작비를 경감할 수 있다. 접합 중 소재 전체가 가열되므로 온도구배가 존재하지 않아 온도차에 의한 변형이 거의 없고 다른 접합법에 비하여 가장 많은 종류의 유사재료 혹은 이종재료간의 접합이 가능하다. 이점을 초소성 재료에 적용하면 유리한 점이 많다. 초소성 성형/확산접합(Superplastic forming/Diffusion bonding: SPF/DB)은 접합이 충분히 형성되도록 시간을 유지시켜 접합 완료된 후, 두 재료를 특정한 온도에서 변형률 속도가 최적의 변형률 속도를 유지하도록 압력을 가하면서 두 재료를 동시에 성형하는 방법으로 자동차와 항공우주산업에서 많이 사용된다. 기존

1. 국방과학연구소

2. 충남대학교 대학원, BK21 메카트로닉스사업단

3. 한국기계연구원

교신저자: 충남대학교, BK21 메카트로닉스사업단,

E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr

의 성형방법으로는 한번에 제작이 불가능하던 복잡한 형상의 제품을 하나의 공정으로 쉽게 성형하므로 생산효율을 높이고 생산비를 크게 절감할 수 있다.

소재로는 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 주로 사용하며 알루미늄은 고온에서 산화피막 형성으로 확산접합이 어려우나 현재 일부 공정에 사용하고 있다. 티타늄 합금인 경우는 용융온도와 유사한 온도 구간에서 확산접합이 이루어 지고 있어 초소성 성형/확산접합 공정에 널리 이용되고 있다.

초소성 성형/확산접합시 최종부품에 대한 최적 변형률 속도를 공정간에 유지하기 위한 압력-시간 선도 예측은 매우 중요하며 이러한 예측을 보다 정확히 하기 위해서는 성형공정의 모델링 및 해석이 수행되어야 한다[1~2].

초소성 성형/확산접합의 해석은 Bonet[3] 등이 3차원 2 중 상자의 해석을 통하여 확산접합해석 방법을 제시하였고 Cheng[4]은 ABAQUS 의 연속체 요소를 사용하여 샌드위치 구조물을 평면 변형률로 가정하여 해석하였다. Hong[5], Bellet[6]은 3 장의 확산접합된 판을 선 요소를 사용하여 확산접합 공정을 해석하였다. Lee[7]는 굽힘 효과를 고려한 4 절점 사각형 요소를 사용하여 4 장의 샌드위치 구조물을 해석하여 2 차원 평면 변형률 해석과의 차이점을 설명하였다.

본 연구에서는 접촉을 고려한 초소성 성형/확산접합 공정의 해석을 위하여 3 차원 강-점소성 유한요소법을 개발하는 데 그 목적이 있다. 해석시 가장 까다롭고 복잡한 부분이면서 많은 계산 시간을 필요로 하는 부분은 접촉탐색이다. 따라서 계산효율을 높이기 위하여 효과적인 접촉탐색이 요구된다. 이러한 접촉탐색을 위하여 계층적 접촉탐색법을 초소성 성형/확산접합에 새롭게 적용하였다. 주어진 최적의 변형률 속도를 유지하면서 SPF/DB 3 차원 모델인 샌드위치 패널 및 3 장의 원형판재에 대하여 해석을 수행하였다. 각 해석에서 얻은 압력-시간선도와 수치해석 결과를 기존 문헌들과 비교함으로써 개발된 프로그램의 타당성을 검증하였다.

2. 강-점소성 유한요소 해석

2.1 지배방정식

초소성 성형/확산접합 공정해석을 위하여 강-점

소성 유한요소법을 사용하였고 등방성 von Mises 재료와 막막이론(membrane theory)에 기초한 삼각형 요소를 이용하였다. 성형해석 동안 소재가 급형에 접촉을 하게 되면 마찰현상이 발생하는데 이 경우 수정된 쿨롱마찰법칙을 적용하였다. 항온 조건 하에서 미세한 결정립을 갖는 초소성 재료는 유동응력이 변형률 속도에 매우 민감하다는 것이며 다음과 같이 유효변형률 속도의 함수로 표시할 수 있다.

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

여기서, K는 재료의 강도계수이고, m은 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)를 나타낸다. 초소성 성형 공정해석을 위하여 평형 상태 방정식은 증분변형이론(incremental deformation theory)과 가상일의 원리(virtual work principle)로부터 유도되며 외력으로 작용하는 압력 P는 미소시간 Δt 동안 다음과 같은 형태의 강성 방정식으로 표현할 수 있다.

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

F_i 는 내부저항력, P, F_e 는 압력 및 절점에서의 외력을 각각 나타낸다. 상세한 강성 방정식의 수식화는 참고문헌 [5]에 잘 나타나 있다.

2.2 압력제어 알고리즘

성형해석을 수행하는 동안 최적의 변형률 속도를 유지시키기 위한 압력제어는 Cheng[4]이 제안한 알고리즘을 사용하였다. 이 기법은 최대 변형률 속도를 최적의 변형률 속도와 같게 유지시키는 방법으로 각각의 하중 단계에서의 성형압력은 유동응력과 하중이 비례한다는 다음의 관계로부터 압력을 구하게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{\max} &= \dot{\epsilon}_{opt} \\ \bar{\sigma}_{\max} &= \bar{\sigma}_{opt} \\ P_{new} &= P_{old} \times \frac{\bar{\sigma}_{opt}}{\bar{\sigma}_{\max}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 P_{new} 는 현 시간 증분에서의 새로운 압력이고 P_{old} 는 이전단계에서의 압력이다. $\bar{\sigma}_{\max}$ 와 $\bar{\sigma}_{opt}$ 는 최대의 변형률 속도와 이전 단계에서의 최적의 변형률 속도에 상응하는 유효응력으로 재료

의 구성방정식으로부터 얻어진다. 이 알고리즘은 같은 시간증분내에서 수렴하지 않으면 시간증분량을 변화시켜 수렴성을 다시 만족시키게 되며 동일한 시간증분내에서 반복과정은 수행되지 않는다.

2.3 접촉탐색 알고리즘

기존의 접촉탐색은 주로 재료의 한 절점이 모든 금형요소에 대하여 접촉여부를 확인하는 직접탐색이나 개략적인 전체탐색 후 세밀하게 국부탐색을 동시에 수행하는 방법이 주로 사용된다. 이러한 방법은 계산시간이 많이 소요되어 계산 효율이 낮다. 본 연구에서는 금형 전체를 계층적 구조(hierarchical structure)로 나누어 접촉탐색을 수행하는 방법을 도입하였다. 금형 전체는 3 절점 요소를 사용하여 표현되며 계층적 구조내에 존재하는 금형과 재료절점과의 접촉을 탐색하게 된다.

계층적 구조는 Fig. 1에서처럼 전체 금형을 포함하는 큰 상자(box)로 포장하고, 상자를 X, Y, Z 좌표축에 대하여 금형 한개의 요소만을 포함할 때까지 단계를 낮추어 가며 상자를 나누어 가는 방법이다. 프로그램의 초기에 전체금형을 단 한 번만 상자들로 나누어 두면 해석의 매 단계마다 소재의 절점이 어느 박스를 통과하는지 상자들을 추적하면서 재료절점과의 접촉상태를 탐색하게 된다. 기존의 접촉탐색 방법과는 다르게 각 해석 단계마다 접촉탐색을 수행하지 않기 때문에 탐색 시간을 줄일 수 있다. Fig. 2에서와 같이 가장 큰 상자(Level=0)에서 재료절점이 상자를 통과하면 접촉탐색을 시작하게 되며 단계를 낮추어 가며 작은 상자들을 통과했는지를 검사한다. 마지막으로 탐색한 가장 낮은 단계의 상자(Level=2)가 포함하고 있는 한 요소가 바로 재료절점과의 접촉이 발생하고 있는 금형의 요소이다. 접촉탐색에 대한 상세한 알고리즘은 참고문헌[8]에 잘 나타나 있다.

3. SPF/DB 공정해석

3.1 샌드위치 패널의 공정해석

샌드위치 패널의 공정 해석에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V로 응력 및 변형률 속도 관계는 참고문헌[5]에 표현되어 있으며, 성형공정 동안 초소성 소재의 변형률 속도를 일정하게 유지시키기 위하여 사용된 최적변형률 속도값은 $3 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 로 하

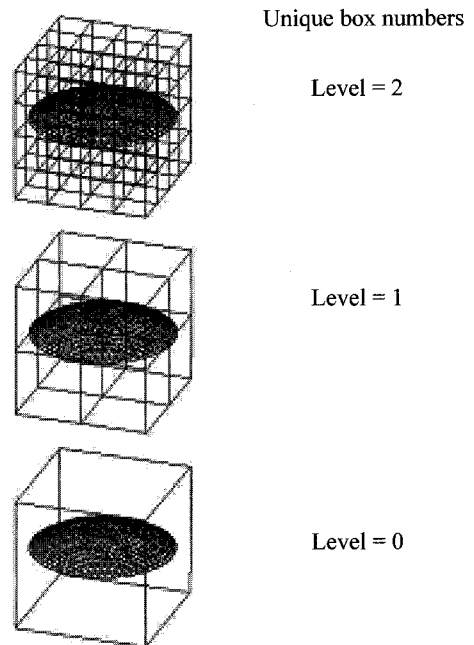


Fig. 1 Box division of tool into two levels

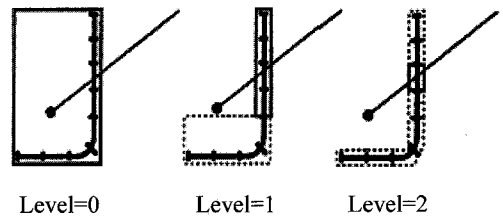


Fig. 2 Contact searching

였다. Fig. 3과 같은 최종형상을 가진 샌드위치 패널은 이형재가 도포된 3장의 판재가 먼저 확산접합이 되고 후에 압력에 의하여 구조물이 성형되는 것으로 상부 2장의 판재 부분의 해석을 수행하였다.

SPF/DB 해석시 평면변형으로 가정하였으며 초기 2 장의 소재 두께는 각각 1mm, 확산접합(D/B)되는 부분은 두께 2mm, 소재의 폭 2mm 로 하였고 판재와 금형 사이의 경계면 마찰 계수는 0.4 로 하였다.

Fig. 4(a)는 해석에 사용된 요소를 나타낸 것으로 절점 120 개와 3 절점 요소 120 개를 사용하였으며, Fig. 4(b)에 최종변형형상을 나타내었다. 계층적 접촉 탐색방법을 적용하여 개발된 3-D 프로그램으로 수행된 샌드위치 패널 형상의 최종변형 형상

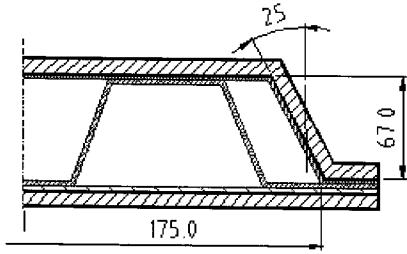


Fig. 3 Schematic of sandwich panel for superplastic forming

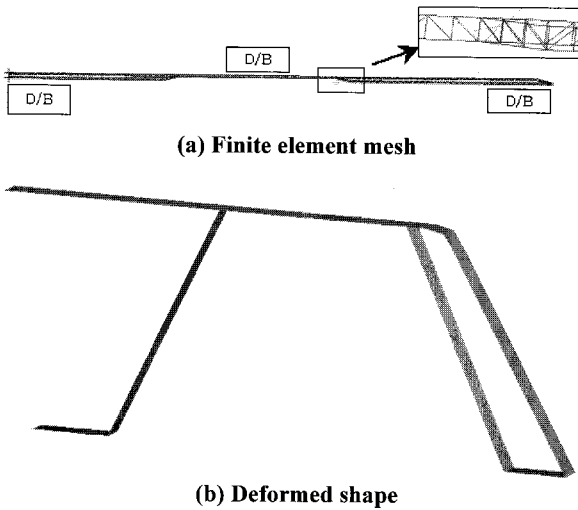


Fig. 4 Finite element mesh and deformed shape for sandwich panel forming

과 직접탐색법을 적용하여 2-D 로 샌드위치 패널의 공정해석[5]을 수행한 내용을 비교한 결과 2-D 와 3-D 가 잘 일치함을 확인하였고, 적용된 접촉 탐색방법이 초소성 성형/확산접합에도 유용하게 사용되었음을 알 수 있다.

Fig. 5 는 압력-시간 선도로 성형초기와 중반 이후까지 압력이 거의 일정하게 유지되다가 후반부에서 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있으며 2-D 와 차이가 없음을 알 수 있다.

두 경우 모두 시간에 따른 변형률 속도는 최적의 변형률 속도값 $3 \times 10^{-4}/s$ 에 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

3.2 3 장의 원형판재에 대한 공정해석

원형판재 3장의 공정해석을 위하여 사용된 재료는 Ti-6Al-4V로 응력 및 변형률속도 관계는 다음과 같다[9].

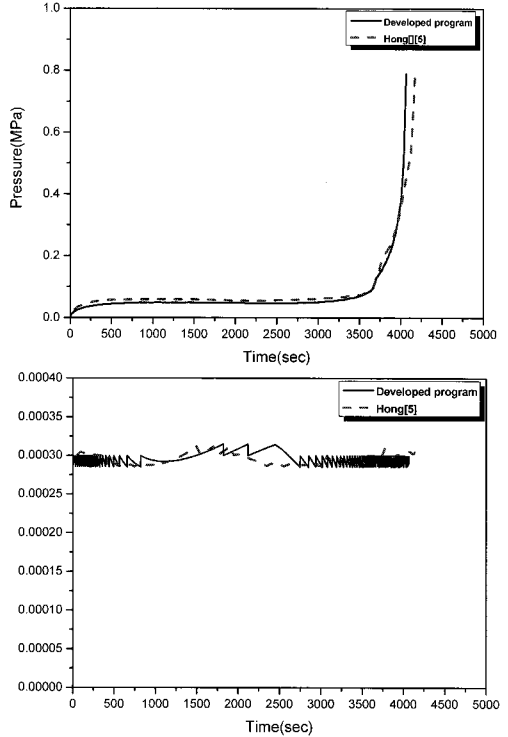


Fig. 5 Pressure and variation of the maximum effective strain rate with time for sandwich panel forming

$$\bar{\sigma} = 450 \dot{\epsilon}^{0.4} \quad (4)$$

성형공정 동안 초소성 소재의 변형률 속도를 일정하게 유지시키기 위한 최적의 변형률 속도 값은 $1 \times 10^{-3}/s$ 이며, Fig. 6에 확산접합된 소재와 금형의 형상을 도시하였다. 각 판의 두께는 2mm이며 중심부에 최대압력 4MPa(장비가 가압할 수 있는 최대압력)까지 가스를 주입할 수 있는 유입구와 확산 접합된 위치(5곳)를 표시하였다.

샌드위치 패널 구조물과 같이 성형초기에 확산 접합 공정이 이루어지고 후에 초소성 성형이 이루어지며, 3장의 판재 중 하부 1장은 금형과 밀착되어 변형이 되지 않으므로 상부 2장의 판재 부분에 대하여 해석을 수행하였다. 해석시 초기 2장의 판재 두께는 각각 2mm로, 확산접합되는 부분은 두께를 4mm로 하였다. 564개의 절점과 1,115개의 3절점요소가 해석에 사용되었으며, 소재와 금

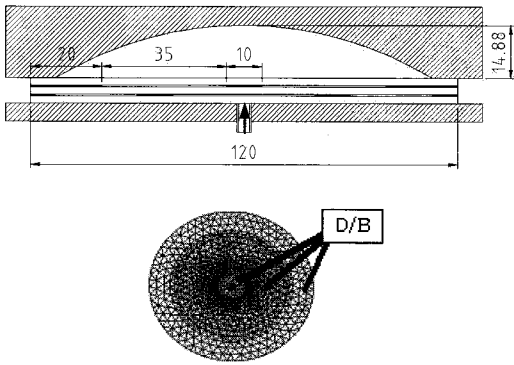


Fig. 6 Diffusion bonded sheet and initial die geometry and finite element mesh

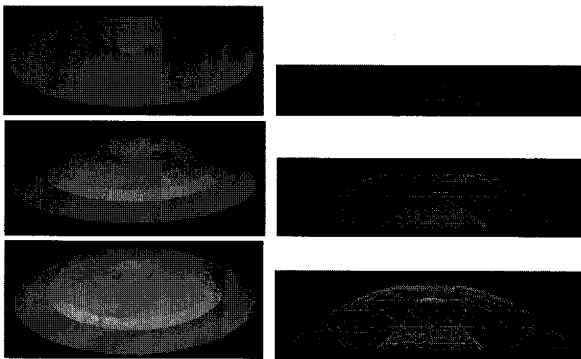


Fig. 7 Evolution of deformed shapes at different forming time for 3sheet forming

형 사이의 경계면 마찰 계수는 0.3으로 하였다.

Fig. 7은 시간에 따른 변형과정을 표시한 것으로서 좌측에는 3차원 외부의 변형형상을 우측에는 내부의 변형형상을 나타내었다.

변형은 확산접합 되지 않은 상부판이 접합된곳에 비하여 빠르게 성형되어 금형에 접촉하기 시작한다. 그러나 최대압력 4MPa에서도 접합된 중심 부분과 외부의 접합부와 비접합부가 만나는 곳에서는 완전히 성형되지 않는다. 이는 하부판의 변형보다 상부 판의 변형이 빠르게 진행되어 발생된 문제이다.

Fig. 8은 시간에 따른 압력 분포와 변형률 속도를 나타낸 것으로 최적의 변형률 속도 $1 \times 10^{-3}/s$ 가 잘 유지되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 해석 후의 최종 변형형상과 실험 후의 최종 형상[9]을 서로 비교한 것으로서 전체적 변형형상은 유사하나 외부의 접합부와 비접합부가 만나는 지점에서 약간의 차이가 남을 알 수 있다.

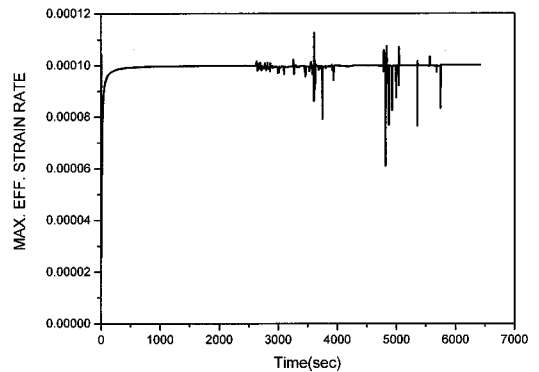
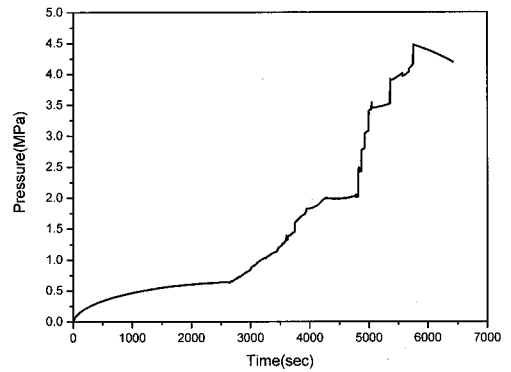


Fig. 8 Pressure and variation of the maximum effective strain rate with time for 3 sheet forming



Fig. 9 Comparison of deformed shape analysis result and experiment result[9]

4. 결론

초소성 성형/확산접합의 공정을 해석하기 위하여 박막요소를 사용한 강-점소성 3-D 유한요소법을 개발하고 다른 형상의 성형공정에 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Cheng의 압력제어방법과 계층적 접촉탐색방법을 고려한 본 프로그램은 SPF/DB 해석에 유용하게 사용될 수 있다. 변형률 속도를 일정하게 유지시킬 수 있는 최적의 압력-시간 선도를 구할 수 있으며 최종형상의 예측이 가능하다.
- (2) 기존에 사용된 접촉 탐색 방법과는 다른 효

과적이고 정확한 계층적 접촉탐색 방법을 개발된 프로그램에 적용하였다. 계층적 접촉탐색법을 검증하기 위하여 샌드위치 패널, 3 장의 원형판 등의 해석에 적용하여 해의 타당성을 비교하였다.

(3) 초소성 성형/확산접합 공정 해석으로 성형/접합에 의한 3-D 의 복잡한 형상의 일체화 구조물 성형 공정 설계가 가능하게 되었다.

(4) 3 장의 원형판재 형상과 같은 구조물의 경우 성형시 내부 구조물의 형상 변화예측이 가능하게 되었으며 실제구조물의 성형을 위한 자료를 제공할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. C. Rama, N. Chandra, 1991, Development of a pressure prediction method for superplastic forming processes, *Int. J. Non-Linear Mechanics*, Vol. 26, No.5, pp.711~725.
- [2] 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 and R. E. Goforth eds., TMS, pp. 133~154.
- [3] J. Bonet, P. Bhargava, 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.
- [4] J. H. Cheng, S. Lee, 1994, 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.
- [5] 홍성석, 김용환, 이종수, R. H. Wagoner, 1993, 강-점소성 유한요소법을 이용한 초소성 성형공정 해석(I)-초소성 별지 성형, *대한기계학회 논문집*, 제 17 권 제 4 호, pp. 796~805.
- [6] M. Bellet, J. L. chenot, 1989, Numerical Modelling of shin sheet Superplastic Forming, *Proc. NUMIFORM 89*, E.G. Thompson et. al. eds., pp. 401~406.
- [7] K. S. Lee, H. Huh, 1999, Simulation of superplastic forming/diffusion bonding with finite-element analysis using the convective coordinate system, *Journal of Material Processing Technology*, pp. 92~98.
- [8] 김일권, 김용환, 2000, 계층적 접촉 탐색방법을 이용한 박판성형 공정해석, *한국소성가공학회지*, 제 9 권, 제 3 호, pp. 274~283.
- [9] Jong-Hoon Yoon, Ho-Song Lee, Yeong-Moo Yi, Young-Soon Jang, 2007, Finite element analysis on superplastic blow forming of Ti-6Al-4V multi-sheets, *Materials Science Forum*, Vol. 546-549, pp. 1361~1366.