

## 변형체간의 접촉을 고려한 3차원 초소성 성형/확산접합의 유한요소해석

3-D Finite Element Analysis of Superplastic Forming/Diffusion Bonding Processes  
with Consideration of Contact between Deformable Bodies

**강영길\***  
Kang, Yung-Kil

**송재선\*\***  
Song, Jae-Sun

**홍성석\***  
Hong, Sung-Suk

**김용환\*\*\***  
Kim, Yong-Hwan

### ABSTRACT

Superplastic forming/diffusion bonding(SPF/DB) processes with inner contact 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 hierarchical search algorithm for the contact searching has been applied. The algorithms for contact force processing were designed to handle equally well contact between deformable bodies, as well as rigid bodies. The plate of three and four sheets for 3-D SPF/DB model are analyzed using the developed program. The validity for the analysis is verified by comparison between analysis, experiment and results in the literature.

주요기술용어(주제어) : Superplastic Forming/Diffusion Bonding(SPF/DB), Hierarchical Search Algorithm

### 1. 서론

Al이나 Ti계열의 합금은 특정 변형률속도와 특정 온도( $0.8 T_m$ (melting point)) 범위에서 단면 수축이 일어나지 않고 낮은 유동응력 하에서 큰 인장 연신률을 보이는데 이러한 특성을 초소성(superplasticity)이라 한다. 초소성 성질은  $10\mu m$  이하의 미세 결정립 구조를 가져야 하고 재료 용해온도 중간이상의 성

형온도를 유지해야 하며 가공시  $10^{-3} \sim 10^{-5}/sec$ 의 느린 변형률 속도를 유지해야 한다. 확산접합(diffusion bonding)은 접합하고자 하는 표면을 깨끗하게 하여 불활성 분위기나 진공상태의 고온에서 양 표면을 접촉시켜 외부에서 압력을 가하여 접합시키는 공정이다.

초소성 재료의 성질과 확산접합의 특성을 접목한 초소성 성형/확산접합은 여러장의 판재를 겹쳐놓고, 접합이 필요하지 않은 부위에 이형재(stop off)를 도포하고 부분적으로 접합하여 성형시 이형재가 도포된 부분은 분리가 일어나게 되는 공정으로 선택적으로 접합과 분리가 가능하기에 복잡한 구조물 제작에 용이하다.

초소성 성형/확산접합 공정은 크게 그림 1과 같이 두가지로 구분된다. 하나는 (a)와 같이 확산접합을 먼

† 2007년 10월 31일 접수~2007년 12월 14일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 충남대학교 대학원

\*\*\* 충남대학교, BK21 메카트로닉스사업단

교신저자 이메일 : yonghkim@cnu.ac.kr

저 한 후에 블로성형하는 Hollow Wide Chord Fan Blade 등과 같은 소재와 금형의 접촉을 다루는 성형 공정이고, 다른 하나는 (b)와 같이 판재의 양끝을 먼저 확산접합하고 외부 판재를 블로성형한 후에 내부 판재를 성형하는 Cooler Outlet duct 등과 같은 소재와 금형, 변형체(소재와 소재)간의 접촉을 다루는 성형 공정이다.

이러한 초소성 성형/확산접합공정은 공정 수 및 생산비의 절감차원에서 항공/유도무기 분야의 실제 제품 제작에 많이 이용되고 있다.

성공적인 초소성 성형/확산접합을 위해서는 재료의 초소성 성질을 유지하도록 압력을 제어하고 성형시 부분적인 과도변형에 의한 성형난이도를 예측하여야 한다.



(a) Hollow Wide Chord Fan Blade



(b) Cooler Outlet duct(flighter aircraft)

[그림 1] Superplastic forming/diffusion bonding

오늘날 컴퓨터 하드웨어의 발전에 따라 성형예측은 유한요소법이 많이 사용되나, 유한요소해석시 접촉이 포함된 문제는 금형의 형상이 복잡하면 소재와의 접촉위치가 계속적으로 변함으로 하여 수치적인 모사에 있어서 효과적인 처리가 어렵다.

또한, 접촉탐색은 소재가 변형을 하는 동안 금형과 소재, 변형체간의 정확한 접촉점을 찾아내는 것

으로, 계산효율면에서 중요하며 많은 알고리즘들이 제안되었고, 전체탐색 방법으로는 계층적 접촉탐색인 Hierarchy-Territory 알고리즘, Spherical sorting 알고리즘 등이 있으며 본 논문에서 접촉탐색은 계층적 접촉탐색 알고리즘을 사용하였다<sup>[1~3]</sup>.

계층적 접촉탐색 알고리즘은 금형의 형상을 일정한 크기의 격자 형태로 나누어 접촉탐색을 수행하는 방법으로 다른 접촉탐색법에 비하여 탐색시간이 짧다<sup>[4]</sup>.

금형과 소재사이에서 발생한 절점들의 침투현상을 처리하기 위한 접촉처리인 불침투 조건의 부과는 크게는 벌칙함수법(penalty method), 라그란지 승수법(lagrangian multiplier) 그리고 금형과 소재의 운동학적 관계를 이용하는 시행착오법(trial and error method)이 있다. 벌칙법은 DYNA3D<sup>[5]</sup> 등에서 사용하였으며 접촉경계간에 변위를 추적하는 방법으로 접촉으로 판정되면 탄성의 강성을 증가시켜 접촉조건을 부여한다. 이 방법은 수식의 정식화 및 프로그래밍이 용이하다는 점은 있으나 증분하중이 너무 크면 결함이 발생하는 단점이 있다. 라그란지 승수법은 Zhong<sup>[1]</sup> 등이 사용한 방법으로 수학적으로 라그란지 미정승수를 전체 강성행렬에 도입한 것으로 응력과 변형이 미소한 경우에 적당한 방법이나 접촉영역이 클 경우에는 미지수의 증가로 인하여 계산 효율성 측면에서 불리하다. 시행착오법은 소재 이동과 금형 움직임의 상호관계에 따라 유한요소 방정식내에 직접 제한조건식을 부과하여 얻어진 해가 접촉조건을 만족할 때 까지 축차적으로 해를 구해 나가는 방법으로 접촉절점설정의 용이성이나 접촉방향의 변화에 대한 유연성이 좋으므로 판재성형이나 대변형 해석에 유리하다.

Chang<sup>[6]</sup>은 탄-소성 해석의 변형체(소재-소재)간 접촉에서 master-slave법으로 접촉탐색 하였고 소재가 금형(소재)에 접촉할 경우 결합조건(tying condition)을 적용하여 변형체접촉 문제를 처리하였다. Bellet<sup>[7]</sup> 등은 변형체사이에 가상의 수직 벽을 세우고 이 수직 벽에 변형체가 미끄럼 접촉하는 것으로 가정하여 다상자 문제를 해석하였고 홍성석<sup>[8]</sup> 등은 초소성 성형/확산접합의 변형체간 접촉에서 2차원으로 4장의 박판을 확산접합한 후에 평면변형으로 가정하여 접합부의 이동에 따른 변형체 간의 접촉진행 상태를 보여주었으며 Bellet<sup>[7]</sup>의 결과와 비교하여 초소성 분야에서 시

행착오법과 결합조건이 잘 적용됨을 보여주었다.

본 연구에서는 시행착오법과 계층적 탐색법을 적용하여 금형과 소재, 소재와 소재사이의 접촉을 고려한 3차원 강-점소성 유한요소법(SPFORM3D/DB)을 개발하였다. 개발된 프로그램으로 초소성 성형/확산접합의 3차원 모델인 3장의 판재와 4장의 판재형상을 해석하고 각 해석에서 얻은 수치해석 결과를 실험 및 기존문헌과 비교하였다

## 2. 유한요소 수식화

공정해석에 이용된 강-점소성 유한요소법은 등방성 재료와 박막이론(membrane theory)에 기초한 삼각형 요소를 사용하였다. 고온의 항온조건에서 초소성 재료는 유동응력이 변형률 속도에 매우 민감하여 유효변형률 속도의 함수로 표시할 수 있고, 증분변형이론(incremental deformation theory)과 가상일의 원리(virtual work principle)로부터 유한요소 방정식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$F_i - PH = F_e \quad (1)$$

여기서,  $F_i$ 는 내부저항력,  $P$ 는 압력,  $F_e$ 는 소재가 금형에 접촉하는 경계면에서 외력을 각각 나타낸다. (1) 식에 뉴턴-랩슨(Newton Raphson)법을 적용하여 고차 항을 무시하고 선형화하면 다음과 같다.

$$(K_1 - PK_2 - K_3) \delta U = F_e - F_i + PH \quad (2)$$

$K_1, K_2, K_3$ 의 상세한 수식은 참고문헌 [8]에 잘 나타나 있다.

## 3. 접촉탐색 및 접촉처리

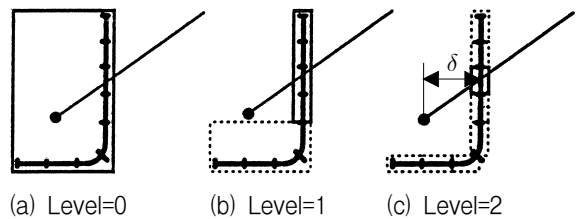
### 가. 금형과 소재의 접촉

접촉탐색은 주로 재료의 한 절점이 금형요소에 대하여 접촉여부를 확인하는 탐색방법으로 본 연구에서는 금형전체를 계층적 구조로 나누어 접촉탐색을 수

행하였고 금형전체는 삼각형요소를 사용하였다.

3차원에서 계층적 구조는 고정된 전체금형을 포함하는 큰 상자(box)로 포장하고, 상자를 X, Y, Z 좌표축에 대하여 8개의 하부 박스로 나누고 이 하부 박스들을 같은 방법으로 계속 나누어 간다. 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 해석단계마다 접촉탐색을 수행하지 않기 때문에 탐색시간을 줄일 수 있다.

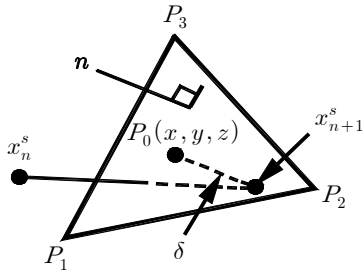
이 방법을 2차원으로 설명하면 그림 2에서와 같이 가장 큰 상자(Level=0)에서 재료절점이 상자를 통과하면 접촉탐색을 시작하게 되며 단계를 낮추어 가며 작은 상자들을 통과했는지를 검사한다. 마지막으로 탐색한 가장 낮은 단계의 상자(Level=2)가 포함하고 있는 한 요소가 바로 재료절점과의 접촉이 발생하고 있는 금형의 요소이다. 접촉탐색에 대한 상세한 알고리즘은 참고문헌 [9]에 잘 나타나 있다. 그림 2의 (c)에서  $\delta$ 는 침투거리를 나타낸다.



[그림 2] Schematics of contact searching

그림 3과 같이 접촉탐색에서 금형(박스안의 단 하나의 금형요소)을 통과한 소재의 절점이 탐색되면 통과한 소재의 절점위치 ( $x^s, y^s, z^s$ )와 금형표면사이의 가장 짧은 거리( $\delta$ )로 정의된 금형표면위의 점( $P_0$ )으로 투영된다. 접촉점은 금형을 통과하는 절점 위치 좌표와 침투거리  $\delta$ , 그리고 각 방향의 단위벡터  $n$ 을 이용하여, 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= x^s + \delta n_x \\ y &= y^s + \delta n_y \\ z &= z^s + \delta n_z \end{aligned} \quad (3)$$

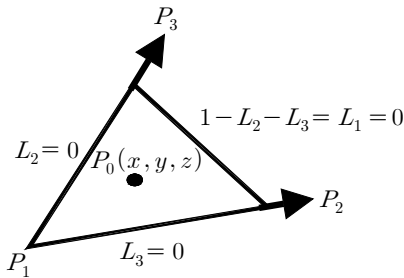


[그림 3] Tool segment to find exact contact position and penetration

정확한 접촉점과 침투거리  $\delta$ 를 계산하기 위해 그림 4의 좌표계(natural coordinate)를 도입하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_1 &= 1 - L_2 - L_3 = L_1 \\ N_2 &= L_2 \\ N_3 &= L_3 \end{aligned} \quad 0 < L_1, L_2, L_3 < 1 \quad (4)$$

하나의 금형요소위에 접촉점의 위치와 변위는 다음처럼 적절한 보간함수(interpolation function)로 묘사될 수 있다.



[그림 4] Natural coordinate for tool segment

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^3 N_i \mathbf{x}_{P_i}, \quad \mathbf{y} = \sum_{i=1}^3 N_i \mathbf{y}_{P_i}, \quad \mathbf{z} = \sum_{i=1}^3 N_i \mathbf{z}_{P_i} \quad (5)$$

여기서,  $(\mathbf{x}_{P_i}, \mathbf{y}_{P_i}, \mathbf{z}_{P_i})$ 는 금형요소를 표현하는 3개의 절점  $P_1, P_2, P_3$ 의 좌표와 변위이다.

그러면, 식 (3)과 식 (5)를 이용하여  $L_1, L_2, L_3$ 와  $\delta$ 에 대한 연립방정식을 풀어 접촉이 발생하는 정확한

접촉점( $P_0$ )과 침투거리  $\delta$ 를 구할 수 있다. 식 (3)과 식 (5)를 이용하여 수식을 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^s + \delta \mathbf{n}_x &= N_1 \mathbf{x}_{P_1} + N_2 \mathbf{x}_{P_2} + N_3 \mathbf{x}_{P_3} \\ \mathbf{y}^s + \delta \mathbf{n}_y &= N_1 \mathbf{y}_{P_1} + N_2 \mathbf{y}_{P_2} + N_3 \mathbf{y}_{P_3} \\ \mathbf{z}^s + \delta \mathbf{n}_z &= N_1 \mathbf{z}_{P_1} + N_2 \mathbf{z}_{P_2} + N_3 \mathbf{z}_{P_3} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 다시 정리하면

$$\begin{bmatrix} -n_x & \mathbf{x}_{P_2} - \mathbf{x}_{P_1} & \mathbf{x}_{P_3} - \mathbf{x}_{P_1} \\ -n_y & \mathbf{y}_{P_2} - \mathbf{y}_{P_1} & \mathbf{y}_{P_3} - \mathbf{y}_{P_1} \\ -n_z & \mathbf{z}_{P_2} - \mathbf{z}_{P_1} & \mathbf{z}_{P_3} - \mathbf{z}_{P_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^s - \mathbf{x}_{P_1} \\ \mathbf{y}^s - \mathbf{y}_{P_1} \\ \mathbf{z}^s - \mathbf{z}_{P_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있고 침투거리  $\delta$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta = \frac{1}{DET} [ & (Dy_{21} Dz_{31} - Dy_{31} Dz_{21})(x^s - x_{P_1}) + \\ & (Dz_{21} Dx_{31} - Dz_{31} Dx_{21})(y^s - y_{P_1}) + \\ & (Dx_{21} Dy_{31} - Dx_{31} Dy_{21})(z^s - z_{P_1}) ] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} DET &= [ -n_x(Dy_{21} Dz_{31} - Dy_{31} Dz_{21}) \\ & -n_y(Dz_{21} Dx_{31} - Dz_{31} Dx_{21}) \\ & -n_z(Dx_{21} Dy_{31} - Dx_{31} Dy_{21}) ] \\ Dx_{ij} &= x_{P_j} - x_{P_i} \end{aligned} \quad (9)$$

같은 방법으로  $L_1, L_2, L_3$ 도 구할 수 있다.

침투거리  $\delta$ 가 0보다 크면 소재의 절점은 금형안으로 침투한 것이 되며 이점은 금형의 표면으로 투영하고 그 점을 접촉점( $P_0$ )으로 하여 접촉처리를 수행하게 된다. 또한 소재가 금형 표면에 접촉하게 되면 접촉점에서는 마찰이 발생하고 금형 위의 접촉점은 접선 및 수직 응력의 비에 따라 고착(stick)이나 미끄럼(slip)으로 나누어지며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_t < \mu \mathbf{F}_n & : \text{고착상태} \\ \mathbf{F}_t = \mu \mathbf{F}_n & : \text{미끄럼 상태} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $\mu$ 는 마찰계수,  $F_t$ 는 접선력,  $\mu F_n$ 은 마찰력이다. 접촉점의 접선력  $F_t$ 는 수정된 쿨롱마찰 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$F_t = -\mu F_n \frac{\Delta U_t}{\|\Delta U_t\|} \quad (11)$$

여기서,  $\Phi(\Delta U_t)$ 는 접선 변위가 0으로 접근함에 따라 마찰력도 완만하게 0으로 접근한다. 접촉 절점의 외력  $F_e$ 는 다음과 같이 표현된다.

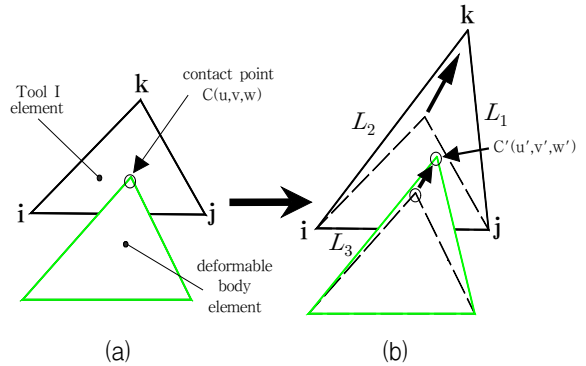
$$F_e = F_t + F_n = (\mu \Phi(\Delta U_t) \cdot t + n) F_n \quad (12)$$

식 (12)를 식 (2)에 대입하여 변형량  $\delta U$ 를 구할 수 있다.

#### 나. 변형체 간의 접촉

금형과 소재, 변형체간의 접촉탐색은 계층적 접촉탐색 방법을 사용하였고, 그림 5와 같이 불침투 조건에 따라 한쪽의 소재를 금형으로 가정(이하에서, 금형 I(Tool I)라 함)하여 소재간의 접촉탐색을 수행하였다. 3장 가절의 고정된 금형과는 달리 금형 I는 압력증가에 따라 변형을 하므로 매 변형단계마다 변화된 형상을 박스로 세분화하고 소재와의 접촉을 탐색하게 된다. 박스안의 단 하나의 요소(금형 I의 한개 요소)를 통과하는 소재의 절점이 탐색되면 금형 I의 요소 표면위의 점으로 투영한다.

초소성 성형/확산접합은 일반적으로 고온에서 성형하므로 변형체 간의 접촉은 결합조건(tying condition)으로 가정하여 해석하였다. 변형 공정동안 그림 5에서 처럼 변형체의 접촉점(C)는 금형 I의 접촉요소 표면에 계속 접촉하고 있는 것으로 가정하여 금형 I의 접촉요소가 압력으로 인하여 변형하게 되면 접촉점을 기준으로 접촉요소의 면적 변형만큼 같은 면적비로 소재의 절점도 변형하는 것으로 하였다. 즉, 그림 5(a)의 접촉점 C에서 (b)의 C'로 변형할 때 소재의 절점변위 ( $\delta u$ ,  $\delta v$ ,  $\delta w$ )는  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ 를 사용하여 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.



[그림 5] Inter-sheet contact: (a) Just in contact (b) Application of contact after deformation (tying condition)

$$\begin{aligned} \delta u &= L_1 \delta U_i + L_2 \delta U_j + L_3 \delta U_k \\ \delta v &= L_1 \delta V_i + L_2 \delta V_j + L_3 \delta V_k \\ \delta w &= L_1 \delta W_i + L_2 \delta W_j + L_3 \delta W_k \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 사용하여 변환행렬  $T_1$ (transformation matrix)을 구성하면 식 (14)와 같다.

$$\delta U^{(s)} = T_1 \delta U^{(e)} \quad (14)$$

소재의 절점변위  $\delta U^{(s)}$ 와 금형 I의 접촉요소 절점변위  $\delta U^{(e)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta U^{(s)} = [\delta u \quad \delta v \quad \delta w]^T \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \delta U^{(e)} &= [\delta U_i \delta V_i \delta W_i \delta U_j \delta V_j \delta W_j \delta U_k \delta V_k \delta W_k]^T \\ T_1 &= [A_1 A_2 A_3] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,  $L_3$ 는 3×3 단위벡터, 0은 3×3의 0행렬이다.

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} L_2 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 \end{bmatrix} \\ A_3 &= \begin{bmatrix} L_3 & 0 & 0 \\ 0 & L_3 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

소재의 절점변위 ( $\delta u, \delta v, \delta w$ )는 금형 I의 접촉요소에 결합되어 있으므로 그림 5의 (b)에서 금형 I의 접촉요소 절점변위를 고려하여 변위벡터  $\delta U^{(e)}$ 를 표현하면 식 (18)과 같다.

$$\delta U^{(e)} = T_2 \delta U'^{(e)} \quad (18)$$

여기서 변환행렬  $T_2$ 와  $\delta U^{(e)}$ ,  $\delta U'^{(e)}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta U^{(e)} &= [\delta U_i \delta V_i \delta W_i \delta U_j \delta V_j \delta W_j \delta U_k \delta V_k \delta W_k \delta u \delta v \delta w]^T \\ \delta U'^{(e)} &= [\delta U_i \delta V_i \delta W_i \delta U_j \delta V_j \delta W_j \delta U_k \delta V_k \delta W_k]^T \\ T_2 &= \begin{bmatrix} I_3 & 0 & 0 \\ 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \\ A_1 & A_2 & A_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (18)을 소재(금형 I 포함)의 전체 절점 수 N개의 변위벡터에 포함하여 다시 나타내면 식 (20)으로 표시할 수 있다.

$$\delta U = T \delta U' \quad (20)$$

여기서,  $T$ 는 변환행렬이며  $\delta U$ 와  $\delta U'$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta U &= [\delta U_1 \delta V_1 \delta W_1 \cdots \delta U_i \delta V_i \delta W_i \delta U_j \delta V_j \delta W_j \delta U_k \\ &\quad \delta V_k \delta W_k \delta u \delta v \delta w \delta U_N \delta V_N \delta W_N]^T \\ \delta U' &= [\delta U_1 \delta V_1 \delta W_1 \cdots \delta U_i \delta V_i \delta W_i \delta U_j \delta V_j \delta W_j \\ &\quad \delta U_k \delta V_k \delta W_k \delta U_N \delta V_N \delta W_N]^T \end{aligned} \quad (21)$$

식 (20)을 식 (2)의 전체 계 행렬에 대입하여 변환하면 식 (22)와 같다.

$$K T \delta U' = F \quad (22)$$

여기서, 양변에  $T^T$ 를 곱하면 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K' \delta U' = F' \quad (23)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K' &= T^T K T \\ F' &= T^T F \end{aligned} \quad (24)$$

소재의 절점 변위( $\delta u, \delta v, \delta w$ )는 식 (22)에서 구한  $\delta U'$ 를 이용하여 식 (20)을 사용하여 구할 수 있다.

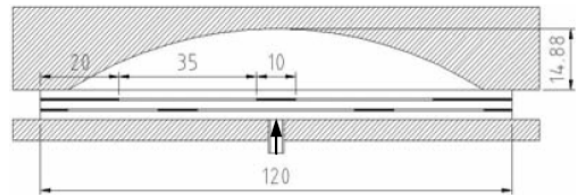
#### 4. 공정해석

가. 금형과 소재의 접촉

3장의 판재 성형해석에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V로 응력 및 변형률속도 관계는 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

$$\bar{\sigma} = 450 \dot{\epsilon}^{0.4} \quad (MPa) \quad (25)$$

최적 변형률 속도값은  $1 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 이며, 그림 6에 최대압력 4MPa까지 가스를 주입할 수 있는 유입구와 확산 결합된 위치(4곳)를 표시한 소재와 금형의 형상을 도시하였다.

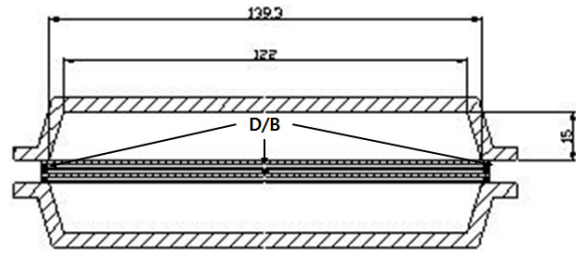


[그림 6] Diffusion bonded sheet and initial die geometry

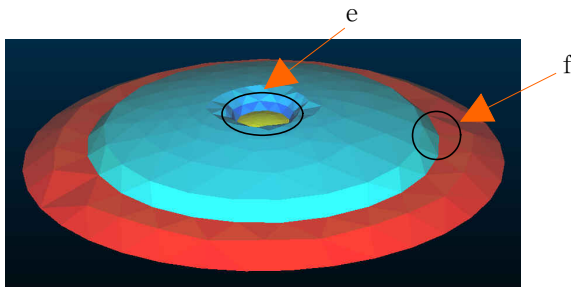
성형전에 확산접합이 이루어지고 후에 초소성 성형이 이루어지는 공정으로 3장의 소재 중 하부 1장은 금형과 밀착되어 변형이 되지 않으므로 상부 2장의 소재에 대하여 해석하였다. 해석시 초기 2장의 소재 두께는 각각 2mm, 확산접합되는 부분은 두께를 4mm로 하였으며 소재와 금형사이의 경계면 마찰 계수는 0.3으로 하였다.

그림 7은 3장의 판재 최종변형형상을 표시한 것으로 3차원 외부 변형형상을 나타냈다. 최대압력 4MPa

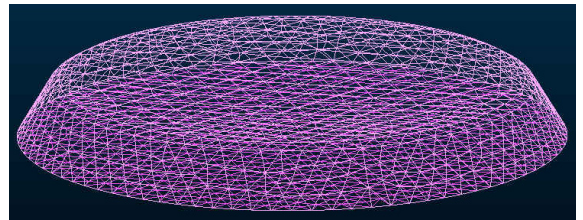
에서도 접합된 중심 부분(e)과 외부의 접합부와 비접합부가 만나는 곳(f)에서는 소재가 금형에 완전히 접촉하지 않는다. 이러한 이유는 하부판의 변형보다 상부판의 변형이 빠르게 진행된 결과이며, 그림 8은 실험후의 최종 변형형상<sup>[10]</sup>과 해석후의 최종변형형상을 서로 비교한 것으로서 전체적인 변형형상은 유사함을 알 수 있다.



(a) Tool geometry and material

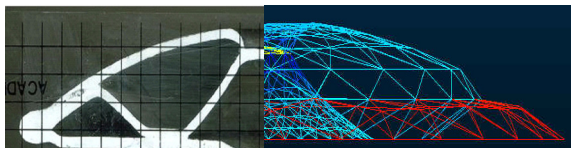


[그림 7] Deformed shape of 3 sheet at final forming



(b) finite element mesh

[그림 9] Diffusion bonded sheet and initial die geometry and finite element mesh



(a) Experiment

(b) Analysis

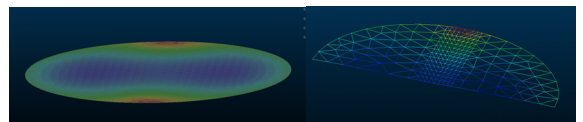
[그림 8] Comparison of deformed shape between experiment<sup>[10]</sup>and computation

#### 나. 변형체 간의 접촉

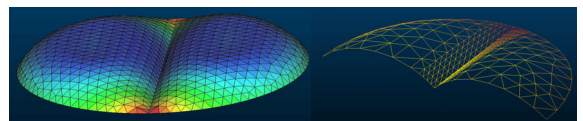
그림 9에서 (a)는 초기에 중앙에 확산접합된 소재와 금형의 형상을 도시하였다. 4장의 원형판재의 변형체간 공정해석에 사용된 재료의 구성방정식은 식 (25)와 같고 최적 변형률 속도값은  $3 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 로 하였다.

초기 판재의 두께는 0.74mm로 하였고 소재와 금형 사이의 경계면 마찰 계수는 0.3으로 하였다.

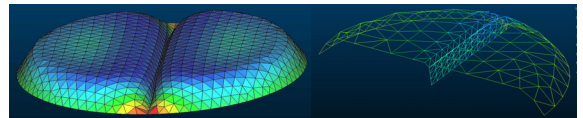
전체적으로 대칭형상이므로 내부 2장의 소재만을 고려하였다. 해석을 위하여 3절점 삼각형 박막요소를 이용하였으며, (b)는 전체의 1/2모델로 1,600개의 절점과 2,900개의 요소를 사용하여 유한요소 모델을 구성하였다. 해석은 1/2과 1/4의 형상에 대하여 수행하였다.



t=0sec



t=700sec



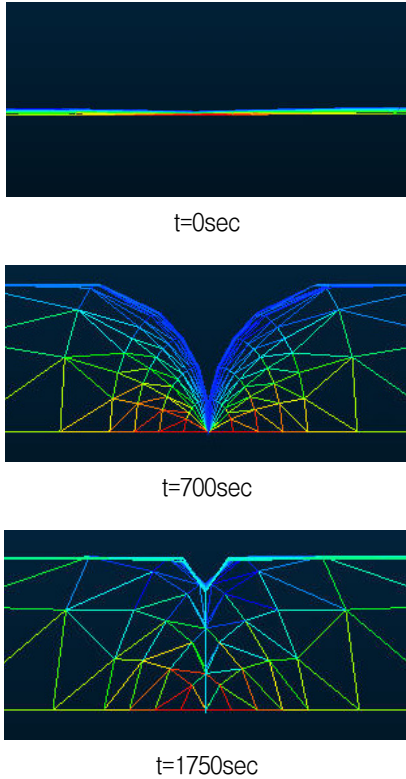
t=1,750sec

[그림 10] Evolution of deformed shape at different forming times

그림 10은 시간에 따른 변형형상을 나타낸 것으로 좌측에는 1/2을 해석한 결과를 우측에는 1/4을 해석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 11은 중앙대칭면에서 소재간 접촉이 진행되는 과정을 시간에 따라 나타낸



것으로서, 변형초기에는 변형체가 금형에 접촉이 이루어진 후 변형체간 접촉이 진행되며, 프로그램에 적용된 결합조건이 변형체간 접촉에도 잘 적용되고 있음을 알 수 있다.

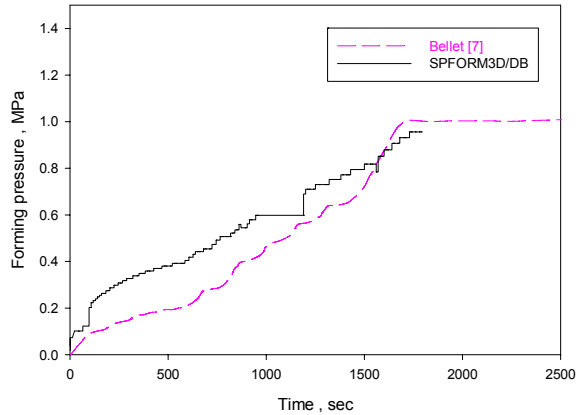


[그림 11] Evolution of inner contact shape at different forming times

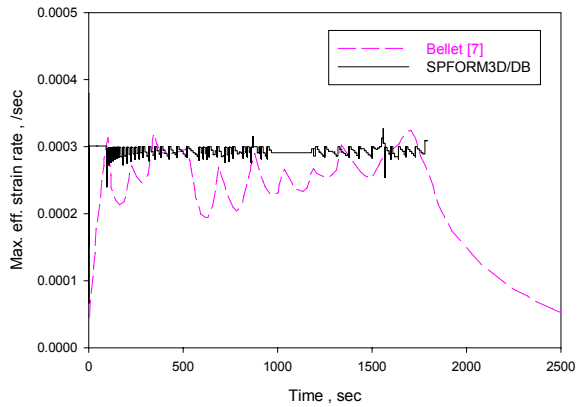
그림 12는 시간에 따른 압력선도로서 해석결과와 참고문헌 [7]의 결과를 비교하여 나타냈으며, 차이가 있는 이유는 압력제어 알고리즘의 차이로 판단된다. 압력이 최대값을 나타내는 시간은 1,700초 정도로 일치하나 참고문헌 [7]은 성형을 위하여 일정시간 유지시켰으며, 그림 13의 최적 변형률 속도유지는 해석결과가 참고문헌 [7]에 비하여 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

또한 그림 14의 5 곳의 위치에서 두께분포를 측정하여 표 1에 해석결과와 참고문헌 [7]값을 비교한 결과 각 위치별 측정값이 유사함을 알 수 있다. 참고문

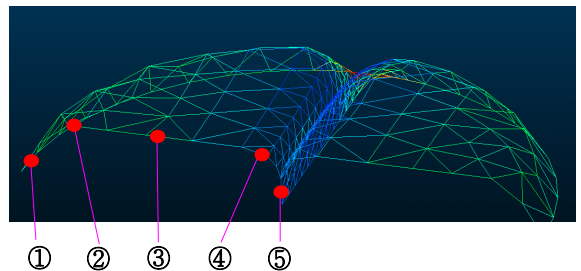
헌 [7]에서는 ⑤의 위치에서 0.3mm의 두께감소로 다른 부분에 비하여 심하게 나타났고 해석결과 또한 이 부분의 두께감소가 다른 위치에 비하여 심함을 알 수 있다.



[그림 12] Comparison of pressure-time curves



[그림 13] Comparison of eff. strain rate-time curves



[그림 14] Measuring positions



[표 1] Comparison of thickness of 4 circular sheet

		Measuring Position				
		①	②	③	④	⑤
두께, (mm)	Bellet's analysis[7]	0.65	0.55	0.62	0.52	0.44
	SPFORM3D/DB	0.70	0.52	0.61	0.54	0.45

#### 4. 결론

본 논문에서는 초소성 성형/확산접합의 3차원 구조물의 성형공정 해석을 위하여 금형과 소재, 변형체 간의 접촉을 고려한 3차원 강-점소성 유한요소 프로그램(SPFORM3D/DB)을 개발하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 공정해석에서 계층적 접촉탐색 알고리즘을 이용하여 접촉을 탐색하였고 소재의 절점이 최종적인 박스 안에 있는 하나의 금형요소를 통과할 때 소재가 금형에 접촉하는 것으로 판단하였다.
2. 수정된 접촉마찰법칙과 경계조건을 적용한 접촉처리인 시행착오법을 적용하여 금형과 소재, 변형체 간의 접촉을 해석하고 실험 및 문헌과 비교하여 타당성을 검증하였다.
3. 항공/유도무기 분야에서 초소성 성형/확산접합 성형시 외부/내부의 형상 변화예측이 가능하며 복잡한 구조물의 성형시 요구되는 기술적인 정보와 자료를 제공할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Z. H. Zhong, Finite Element Procedures for Contact Impact Problems, Oxford University Press, 1993.
- [2] J. Benson and J. O. Hallquist, A single surface contact algorithm for the post-buckling analysis of shell structure, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Vol. 78, pp. 141~163, 1990.
- [3] P. Papadopoulos and R. L. Taylor, A simple algorithm for three dimensional finite element analysis of contact problems, Computer and Structure, Vol. 46, No. 6, pp. 1107~1118, 1993.
- [4] Z. H. Zhong and L. Nilsson, A Contact Searching Algorithm for General Contact Problems, Computers and Structures, Vol. 33, No. 1, pp. 197~209, 1989.
- [5] LS-DYNA3D, "USER'S MANUAL".
- [6] Chang, Steve H., "A Finite Element Simulation of elasto-plastic contact problems", Dissertation, west virginia university, 1985.
- [7] M. Bellet and J. L. chenot, Numerical Modelling of shin sheet Superplastic Forming, Proc. NUMIFORM 89, E. G. Thompson et. al. eds., pp. 401~406, 1989.
- [8] 홍성석, 김용환, 확산접합 공정의 유한요소 해석, 한국소성 가공 학회지, 제5권 제1호, pp. 37~46, 1996.
- [9] 김일권, 김용환, 계층적 접촉 탐색방법을 이용한 박판성형 공정해석, 한국 소성 가공학회지, Vol 9, No. 3, pp. 274~283, 1999.
- [10] Jong-Hoon Yoon, Ho-Song Lee, Yeong-Moo Yi and Young-Soon Jang, Finite Element Analysis on Superplastic Blow Forming of Ti-6Al-4V Multi-Sheets, Material Science Forum, Vol. 546~549, pp. 1361~1366, 2006.