

알루미늄 차체성형을 위한 초소성 성형공정해석

김철구* · 김용환* · 우형표** 김만식**

Superplastic Forming Process Analysis for Aluminium Body Forming

C. G. Kim, Y. H. Kim, H. P. Woo and M. S. Kim

Abstract

A rigid-viscoplastic finite element code for superplastic forming processes has been developed. The material is assumed to be isotropic and a modified Coulomb friction law is adopted to explain contact between tool and sheet. This code uses the triangular element based on the membrane approximation and a hierarchical contact searching method is implemented. The optimum pressure-time relationships for target strain rate are calculated by several pressure control algorithms. By the analysis, optimum pressure-time curves and deformation behavior are predicted.

Key Words : Superplastic Forming, Rigid-Viscoplastic FEM, Pressure-Time Curve, Hierarchical Contract Searching Method,

1. 서 론

현재 자동차 산업에서 연비향상과 환경오염 및 규제에 대응하기 위하여 많은 연구가 진행되어지고 있는데, 단기적으로 차체 경량화를 통하여 고연비를 실현함으로써 그러한 문제를 해결하려고 하고 있다. 알루미늄합금은 성형성이나 경량화 효과에 있어 철에 비해서 월등하기 때문에 경량화 소재의 핵심으로 자리잡고 있으며 그 쓰임새가 차츰 증가하고 있다.

알루미늄 합금을 성형하는 방법에는 단조와 스태핑과 같은 기존의 방법 이외에도 알루미늄소재가 가지는 독특한 특성인 초소성을 이용하여 성형하는 방법이 있다.

알루미늄이나 티타늄계열의 합금을 특정 변형률속도와

온도 범위에서 잡아당기면 단면 수축이 일어나지 않고 낮은 유동응력하에서 큰 인장 연신률을 보이게 되는데 이러한 현상을 초소성(superplasticity)이라하며, 이러한 성질을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 가스압력을 이용하여 일체로 성형하는 기술을 초소성성형이라고 한다.⁽¹⁾ 일반적으로 초소성 성형은 일반 스태핑 공정에 비하여 다단계공정을 단공정으로 단순화가 가능하고 금형 비용을 절감할 수 있으며 공정의 단축 및 공정간의 이동시 소요되는 인력과 시간을 단축할 수 있고 부수적으로 성형시 발생하는 가공경화로 인하여 강도를 증가시킴으로써 두께를 줄일 수 있는 장점이 있으나, 미세 구조를 만드는 어려움과 크립에 대한 저항성이 약화되며 무엇보다도 성형시간이 늦어지는 단점이 있다.

* 충남대학교 기계설계공학과

** Advanced Transportation Technology R&D Co.

초소성 성형 공정은 기존의 여러 부품의 조합으로 이루어진 복잡한 부품을 일체로 성형할 수 있다는 장점 때문에 산업의 여러 분야로 그 적용 범위를 넓혀가고 있다. 과거에는 제조공정이 복잡하고 가공시간이 오래 걸리는 단점 때문에 주로 부가가치가 높은 항공 우주산업을 중심으로 발전되어져 왔으나 최근에는 알루미늄계열의 합금이 차체의 각 부분에 적용되고 있고, 이를 제조하는 단조 및 스태핑공정의 대안으로 초소성 성형공정이 시도되고 있다. 국내에서도 ATT R&D에 의해서 초소성 성형공정을 이용한 전기자동차의 개발이 진행되고 있다.

초소성 성형 기술을 부품 제작에 성공적으로 적용하기 위해서는 새로운 기술이 기존의 단점을 보완할 수 있는 새로운 대안으로써 공감대가 형성이 되어야 하고 이를 위해서는 많은 검증과 정보를 필요로 한다. 유한요소법을 이용한 성형공정해석은 비교적 적은 비용으로 사용자가 원하는 많은 정보를 제공할 수 있다. 현재 초소성 공정해석을 위하여 사용되어지고 있는 상용코드는 대부분 범용코드이거나 박판성형 전용해석코드이다. 범용해석코드를 이용하여 성형해석을 수행할 경우 비용이 많이 들고 초소성 재료 및 성형공정이 가지는 특성 즉, 초소성 재료의 특성, 성형방법 및 그에 따른 압력제어 기법이 세밀하게 고려되어지지 않는 단점이 있다.

본 연구에서는 강점소성 유한요소법을 이용하여 초소성을 전용으로 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램을 검증하기 위하여 간단한 평면 변형을 문제 및 확대칭 형상에 대한 해석을 수행하였으며, 현재 ATT R&D에서 개발되어지고 있는 알루미늄 차체의 일부분인 locater-rear에 대한 해석을 수행하였다.

2. 강-점소성유한요소해석

2.1 유한요소 수식화

초소성 성형 공정을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 전체 영역에 대한 요소 분할과 더불어 시간 분할을 고려하여야 한다. 이러한 분할에는 몇 가지 가정이 포함되어야 하는데 본 연구에서는 개발되어진 초소성 성형 공정해석 프로그램에는 다음과 같은 가정이 포함되어져 있다.

1) 시간분할과 관련하여 증분변형이론(incremental deformation theory)을 사용하였으며, 2) 박판의 두께가 곡률에 비하여 매우 작으므로 박막가정(membrane approximation)을 채택하였고, 3) 초소성 성형 공정은 주로 항온 상태에서 이루어지므로 등방성 Von-Mises의

유동 법칙을 따르며, 4) 초소성 재료는 변형을 속도에 매우 민감하므로 구성방정식은 유효변형률 속도만의 함수로 가정하였고, 5) 소재와 금형의 경계면에서는 쿨롱(Coulomb) 마찰법칙이 적용되며 고착영역에 대하여는 선형 함수를 사용하여 마찰력을 완만하게 0으로 접근하게 하였다.

재료가 소성 변형을 함에 따라 물질적인 비선형 뿐만 아니라 경계조건상의 비선형이 발생하게 되는데 이러한 문제는 반복법을 통하여 해결할 수 있다.

2.2 접촉탐색

초소성 성형 공정 중 판재의 일부가 금형의 표면에 접촉하게 되면 마찰이 발생하게 되며, 이 경우 쿨롱 마찰법칙을 적용한다. 변형중의 마찰력을 구하기 위해서는 각 시간단계의 변위 증분 ΔU 를 알아야 구할 수 있으므로 마찰력을 구하는 것 역시 반복법을 사용하여야 한다.

실제 해석에 있어서 많이 시간을 필요로 하는 부분이 접촉 탐색인데 효율적이고 효과적인 접촉 탐색을 위하여 금형을 3차원 격자구조로 세분화하고, 그러한 정보를 계층적 구조(hierarchical structure)의 형태로 저장하고 있어 접촉이 발생하면 상위 단계에서 하위단계로 정확한 접촉점의 위치를 찾는 알고리즘⁽²⁾을 채택하였다.

2.3 압력제어 알고리즘

초소성 성형공정해석의 궁극적인 목적은 최적의 변형률 속도를 유지하면서 가능한 한 성형 시간을 줄일 수 있는 압력-시간 선도를 예측하는 것이다. 압력을 제어하는 기법들은 다양하게 제안되었는데 본 연구에서는 다음과 같은 3가지 압력제어 기법을 적용하였다.

선형 내삽(linear interpolation)을 이용한 압력제어 알고리즘은 다음과 같다.

$$P_{new} = P_1 \left(1 - \frac{\overline{\epsilon}_{opt} - \overline{\epsilon}_1}{\overline{\epsilon}_2 - \overline{\epsilon}_1} \right) + P_2 \left(\frac{\overline{\epsilon}_{opt} - \overline{\epsilon}_1}{\overline{\epsilon}_2 - \overline{\epsilon}_1} \right) \quad (1)$$

여기에서 $\overline{\epsilon}_1$ 및 $\overline{\epsilon}_2$ 는 압력이 P_1 및 P_2 인 경우의 최대 변형률 속도값을 각각 나타내며, $\overline{\epsilon}_{opt}$ 는 요구하는 최적 변형률 속도값을 나타낸다. 실제로 성형공정 해석

에 이용된 오차 범위는 최적 변형률 속도값의 $\pm 5\%$ 이내로 하여 계산한다.

ABAQUS⁽³⁾에서 적용한 알고리즘은 선형내삽법을 이용한 압력제어 알고리즘에 비하여 다음과 같이 비교적 단순한 형태를 갖는다.

$$P_2 = CP_1 \quad \text{if} \quad d_1 \leq \gamma \leq d_2 \quad (2)$$

여기서 γ 는 최대변형률 속도와 최적의 변형률 속도의 비이다.

유동응력과 하중의 비례관계를 이용한 알고리즘⁽⁴⁾도 적용되었는데 다음과 같은 형태의 식이다.

$$P_2 = P_1 \times \frac{\bar{\sigma}_{opt}}{\bar{\sigma}_{max}} \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma}_{opt}$ 와 $\bar{\sigma}_{max}$ 는 재료의 구성방정식으로부터 얻어질 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

강점소성 유한요소법을 이용하여 초소성 성형공정 해석을 수행하였다. 압력제어 개발된 프로그램의 검증을 위하여 Chandra⁽⁵⁾의 모델을 평면변형률 문제를 해석하였고, 해석의 물성치와 경계조건을 동일하게 수행하였고, 그 결과를 Chandra와 홍성석⁽⁶⁾의 논문과 비교하였다. 해석에 사용된 재료로는 Al 7475로 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 2332.5 \bar{\epsilon}^{0.6324} \quad (MPa) \quad (4)$$

해석에 사용된 부품은 Fig. 1과 같은 형상으로 단면형상에 대하여 평면변형률로 가정하여 해석할 수 있다. 해석을 위하여 200개의 3절점 박막요소를 사용하였다. 초소성 성형해석 동안 요소내에서 발생하는 최대 변형률 속도를 일정하게 유지시키기 위한 최적의 변형률 속도는 0.0002/sec이다. 마찰력은 0.4로 하였고 소재의 초기 두께는 1.524mm로 하였다. 해석은 Pentium-III(500MHz)를 이용하였고 시간증분(Δt)은 0.2초로 하여 수행하였다.

Fig. 2는 계산된 압력-시간 선도를 보여주고 있다. 초

기에는 성형압력이 서서히 증가하다가 금형과의 접촉이 일어난 이후 압력이 급격히 증가함을 보여주고 있다. 개발된 프로그램에 의하여 성형해석을 하였을 경우 성형시간은 ABAQUS 알고리즘을 적용한 경우 (analysis-1) 약 5800초, Cheng(analysis-2)의 알고리즘을 적용하였을 경우 약 5100초가 걸렸다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 ABAQUS에서 적용된 압력제어 알고리즘을 사용하였을 경우에 비하여 Chen의 알고리즘을 적용하였을 경우 요소내에서 발생하는 최대 변형률 속도가 최적의 변형률 속도값을 보다 잘 유지하고 성형중에 보다 높은 압력을 유지할 수 있기 때문에 성형시간이 빨라짐을 볼 수 있다. Fig. 4는 시간의 따른 형상의 변화를 보여주고 있다. Fig. 5는 X축에 따른 두께분포를 Chandra 및 홍성석의 해석의 결과를 나타낸 것으로 본 해석의 결과가 Chandra의 해석에 비해 균일한 두께 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Chandra의 해석에서는 접촉이 발생하면 접촉부위의 변형이 발생하지 않는 고착상태로 해석하였기 때문이다.

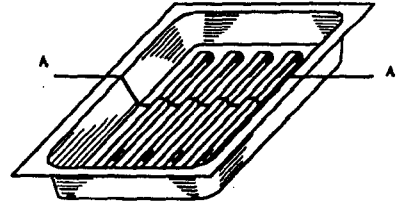


Fig. 1 A typical SPF aircraft component

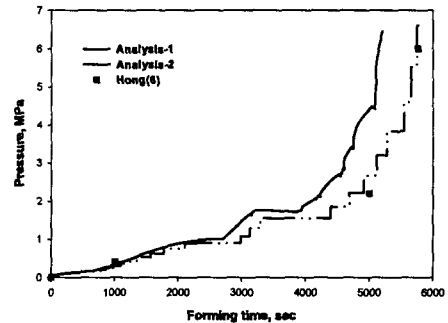


Fig. 2 Pressure-time curve of the component shown in Fig. 1

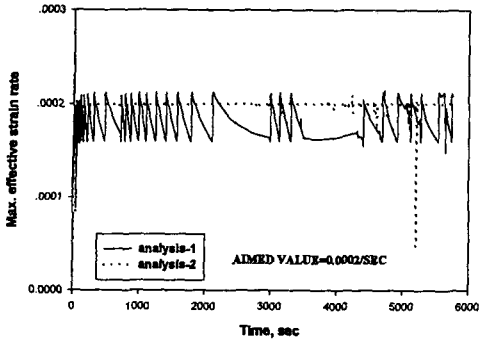


Fig. 3 Variation of the maximum effective strain rate with time of the component shown in Fig. 1

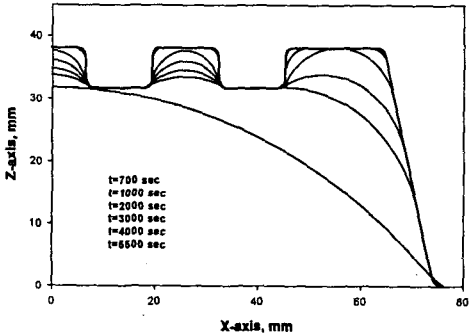


Fig. 4 Deformed shapes for different forming stages of the component shown in Fig. 1

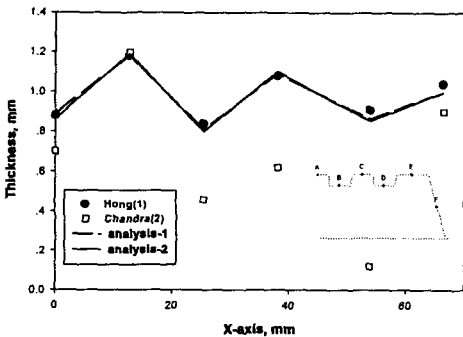


Fig. 5 Thickness distribution of the component

4. 결론

강점소성 유한요소법을 이용하여 알루미늄 차체 성형을 위한 초소성 성형공정 해석을 할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램을 이용하여 성형해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개발된 프로그램으로 초소성 성형 공정 해석을 수행할 수 있었으며, 프로그램의 타당성을 검토하였다.

(2) 기존에 제안된 여러 가지 압력제어 기법을 프로그램에 적용하였고, 이를 비교 검토하였다.

(3) 최적의 변형률 속도를 유지시키는 압력-시간 선도를 구하였다.

(4) 평면변형을 문제에 대해서 Cheng의 알고리즘을 적용할 경우 최적의 변형률 속도에 가까운 변형률을 유지함으로써 성형시간을 단축시킬 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 길상천, 1994, "초소성 합금의 개발과 응용", 신기술, 8권 2호, 산업기술정보원, pp. 1-9.
- (2) 김일권, 2000, "계층적 접촉 탐색방법을 이용한 박판 성형 공정해석", 한국소성가공학회지, 제9권, 제3호, pp.274-283.
- (3) O. Balda, 1994, "Superplastic Forming with ABAQUS", ABAQUS User's Conf., pp.95-109
- (4) Jung-ho Cheng, 1994, "Methods for Resolving Grooving Problems in Parts Manufactured from Combined Diffusion Bonding and Superplastic Forming Processes" J. Mater. Proc. Tech., Vol. 45, pp.249-254
- (5) N. Chandra, 1992, "Application of Finite Element Method to the Design of Superplastic Forming Processes", Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, pp.452-458.
- (6) 홍성석, "강점소성 유한요소법을 이용한 초소성 성형 공정 해석", 충남대학교 박사학위 논문.