

Gurson모델을 사용한 전자기성형의 성형성 개선에 대한 연구

김 정*¹⁾ · 송우진²⁾ · 강범수²⁾

부산대학교 항공우주공학과¹⁾ · 부산대학교 부품소재산업협력연구소²⁾

Study on Formability Enhancement of Electromagnetic Forming using Gurson Plasticity Material Model

Jeong Kim*¹⁾ · Woojin Song²⁾ · Beomsoo Kang²⁾

¹⁾Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 14 August 2012 / Revised 8 October 2012 / Accepted 9 October 2012)

Abstract : The effect of the tool-sheet interaction on formability enhancement in electromagnetic forming is investigated using FEM. A free bulging and a conical forming die with 0.7mm AL1050 sheet are used to evaluate damage evolution based on Gurson-Tvergaard-Needleman plasticity material model. The impact between the tool and sheet results in complex stress states including compressive hydrostatic stresses, which leads to a suppression of void growth and restrain ascending void volume fraction of the sheet. Therefore, the damage suppression due to the tool-sheet interaction can be the main factor contributing to the increased formability in the electromagnetic forming process.

Key words : Electromagnetic forming(전자기성형), Gurson model(거슨 모델), Formability(성형성), Void volume fraction(공극체적률), Tool-sheet interaction(금형-가공물 상호작용), FEM(유한요소법)

1. 서론

전자기 성형기술(EMF, Electromagnetic forming)은 폭발 성형 등과 함께 고속 성형 기술의 하나로서 강한 전자기장을 가공하고자 하는 금속에 직접 작용시켜 물리적 접촉 없이 고속(15~300m/s)으로 금속 가공물을 성형하는 기술이다. 순간적으로 짧은 시간(50~200 μ s)동안 감쇠하는 전류를 방전하게 되면 자속(Magnetic flux)의 변화로 인해 가공하고자 하는 금속 가공물에 유도 전류(Induced current)가 발생되고, 이러한 자기장내에서 전류가 흐르는 도체가 받는 힘을 로렌츠의 힘(Lorentz's force)이라 하며, 이 힘이 전자기성형에서 가공력으로 작용하게 된다.

근래에는 자동차 경량화를 위해 사용되는 고강도 강 of 스프링백 또는 알루미늄 합금 등 경량화 소재의 낮은 성형성 문제를 개선하기 위한 방안 중 하나로 전자기 성형 기술이 제시되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 기존의 전자기성형 기술은 주로 관재의 축관, 환관 및 접합 공정에 사용되어졌으나 최근에는 전자기 성형 공정과 기존의 스템핑, 하이드로포밍과 같은 성형 공정의 단점을 보완한 전자기 복합공정으로 자동차 부품을 성형하려는 연구가 시도되고 있다.^{3,4)} 하지만, 아직까지 전자기성형 공정에 대한 완전한 이해와 기존 성형공법에 대비하여 성형성이 개선되는 이유에 대한 체계적인 연구는 이루어지지 않고 있다.

따라서, 본 논문에서는 공극체적률(Void volume

*Corresponding author, E-mail: greatkj@pusan.ac.kr

fraction) 이론에 기초한 Gurson 소성모형을 사용하여 금형과 가공물의 상호작용에 의한 소재의 손상 억제 효과를 정량적으로 평가하여 전자기 성형기술이 기존의 다른 공법에 비하여 성형성이 향상되는 원인을 규명하고자 한다. 이를 위하여 자유벌지 (Free bulge) 금형과 원뿔형(Conical) 금형을 사용하여 전자기 성형시 전자기력에 해당하는 등가 성형 압력에 의한 유한요소해석을 수행하여 전자기 성형에 의하여 성형성이 향상되는 원인을 고찰하였다. Fig. 1은 유한요소해석에 사용되어진 자유벌지 및 원뿔형 금형을 보여주며, θ 는 금형과 가공물의 상호작용이 원활히 발생할 수 있도록 설정한다.

2. 공극체적률 기반 소성모델

연성 금속의 공극 성장(Void growth)을 기술하기 위한 수학적인 모델인 Gurson 모델은 연속적인 공극의 분포를 가정하여 물체를 일종의 다공질 재료 (Porous material)로 기술하는 방법으로서, 소재의 변형이 증가함에 따른 공극의 성장과 이로 인한 국소 변형의 발생 및 재료의 파괴를 기술할 수 있다.^{5,6)} 여기서 파괴란 성장한 기공들이 서로 병합하는 현상을 의미한다. 따라서 공극체적률 소성 모델은 연속체 재료 내부에 별도의 기공 등을 묘사하지 않고

내부적으로 손상의 생성 및 성장을 거시적 관점으로 표현할 수 있는 장점이 있다. 공극체적률 소성 모델은 Gurson에 의하여 최초로 제안되었는데, 항복 함수 Φ 는 von Mises 항복함수에 정수응력으로 인한 항복면을 축소시킬 수 있는 종속항으로 표시할 수 있다. Gurson 항복함수는 Tvergaard와 Needleman에 의하여 수정되어 GTN 모델(Gurson-Tvergaard- Needleman model)로도 불리며, 다음과 같이 수정된 항복식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \left(\frac{\Sigma_{eq}}{\bar{\sigma}} \right)^2 + 2f^* q_1 \cosh \left(q_2 \frac{3\Sigma_{hyd}}{2\bar{\sigma}} \right) - 1 - q_3 f^{*2} = 0 \quad (1)$$

여기서, Σ_{eq} 은 von-Mises 등가응력, Σ_{hyd} 은 정수응력, $\bar{\sigma}$ 은 응력-변형률관계식에서의 항복응력, q_1, q_2, q_3 은 Tvergaard에 의해 제안된 보정계수를 나타낸다. 공극의 병합을 고려하기 위하여 공극체적률 f 에 대하여 유효 공극체적률 $f^* = f^*(f)$ 를 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$f^* = \begin{cases} f & \text{if } f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & \text{if } f \geq f_c \end{cases} \quad (2)$$

여기서, f_c 는 임계 공극체적률, f_f 는 파단 공극체적률, f_u 은 $f_u = f^*(f_f) = 1/q_1$ 이다. 공극체적률의 변화는 기존 공극의 성장 속도 \dot{f}_{growth} 와 새로운 공극의 생성 속도 $\dot{f}_{nucleation}$ 의 합으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\dot{f} = \dot{f}_{growth} + \dot{f}_{nucleation} \quad (3)$$

여기서, Needleman과 Tvergaard는 기존 공극의 성장 속도와 새로운 공극의 생성속도를 식 (4)로 나타내었으며, Chu와 Needleman은 공극의 생성속도가 정규분포를 갖는다고 가정하여 계수 A 를 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\dot{f}_{growth} = (1-f) \dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (4)$$

$$\dot{f}_{nucleation} = A \dot{\bar{\epsilon}}^p$$

$$A = \frac{f_n}{s_n \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\epsilon}^p - \epsilon_n}{s_n} \right)^2 \right] \quad (5)$$

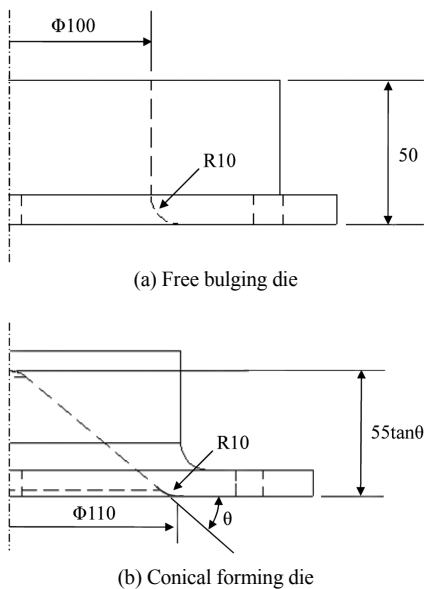


Fig. 1 Schematic view of die used in finite element analysis

Table 1 Gurson model constants

Constant	Value	Constant	Value
q_1	1.5	ϵ_n	0.05
q_2	1.0	s_n	0.01
q_3	2.25	f_c	0.03
f_n	0.01	f_f	0.05

여기서, $\bar{\epsilon}^p$ 은 등가소성변형률, ϵ_n 은 정규분포를 갖는 공극 생성 변형률의 평균값, s_n 은 정규분포를 갖는 공극 생성 변형률의 표준편차이다. 본 연구에서는 Gurson 모델의 매개변수값⁷⁾들을 Table 1과 같이 설정하였다.

3. 유한요소해석 결과

3.1 유한요소모델

전자기 성형 시에 금형과 가공물 사이의 상호작용을 이해하기 위하여 두께 0.6mm인 AL1050 소재와 가운데 구멍이 뚫려있는 자유벌지 금형 및 원뿔형 금형을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 소재의 응력-변형률 관계식은 $\bar{\sigma} = 331.07\bar{\epsilon}^{0.171}$ 이고, ANSYS의 PLANE183요소를 사용하여 다중선형 등방성 가공경화(Multilinear isotropic hardening) 재료 비선형 특성을 부여한 후 비선형 과도동적해석(Transient dynamic analysis)을 수행한다. 시간변화에 따른 공극체적률, 변위, 응력, 변형률 등의 과도응답을 구하기 위하여 자동 가변시간간격 Newmark 시간적분법을 사용한다. Fig. 2는 전자기 성형시 전자기력에 해당되는 등가 성형압력변화를 나타낸 것으로서 최대 압력값은 T = 50 μ s일 때 6.95MPa로 가정하였다. Fig. 3은 2차원 축대칭 문제로 가정한 자유벌지 금형 및 $\theta = 40^\circ$ 인 원뿔형 금형과 가공물의 경계조건에 대한 유한요소모델을 보여 준다. 가공물과 블랭크홀드 및 금형사이에는 CONTA172와 TARGE169 요소를 사용하여 접촉면을 고려하였으며, 마찰계수는 0.01로 가정하였다.

3.2 해석결과

Table 1에 나와 있듯이 파단 공극체적률이 0.05이므로, Fig. 2와 같은 성형압력을 300 μ s 동안 부가할 때, 파단이 발생하기 직전, 즉 공극체적률이 0.05에

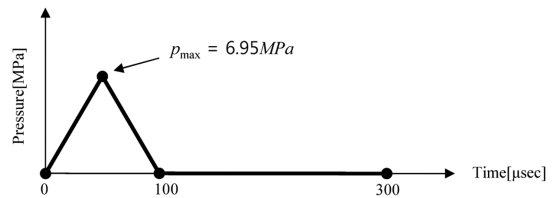


Fig. 2 Loading conditions

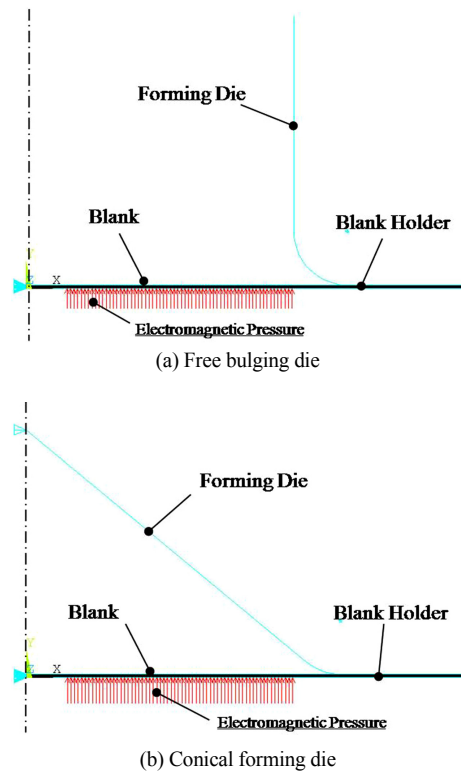


Fig. 3 Finite element models

도달하기 직전까지 시간에 따른 가공물의 변형거동을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 자유벌지 금형을 사용한 경우는 소재의 최대 벌지 높이가 16.74mm로서 완전한 성형이 이루어지지 못한 반면, 원뿔형 금형을 사용한 경우는 45.08mm까지 완전히 금형 내부를 채우는 성형결과를 보여준다. 성형코일의 중앙부는 전자기력이 발생하지 않은 부위(Dead spot)가 존재하여 소재 가운데 부분의 변형이 상대적으로 지연되고 있다. 자유벌지 금형을 사용한 경우는 성형완료 시간 300 μ s에 훨씬 못 미치는 102 μ s에 파단이 발생하였으며, 원뿔형 금형을 사용한 경우는 248 μ s로서 거의 성형이 종료되는 시점에

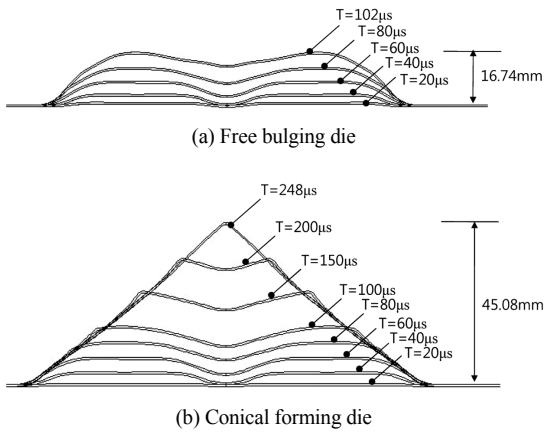


Fig. 4 Deformation of the sheet until fracture occurs

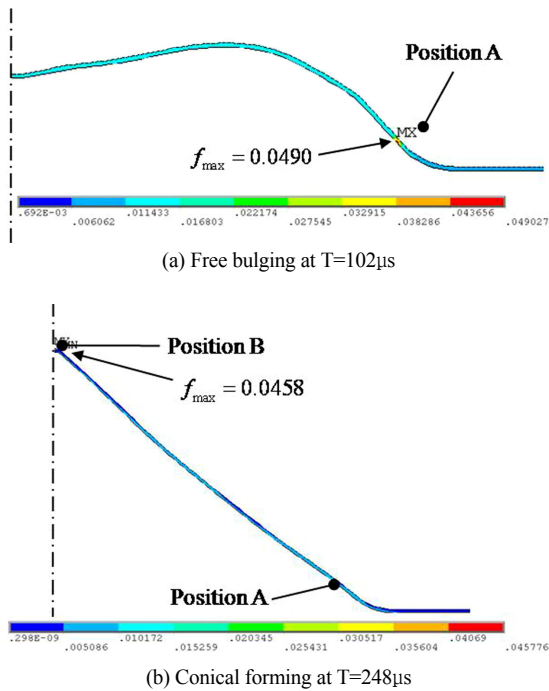


Fig. 5 The position of maximum void volume fraction

서 파단이 예측된다. Fig. 5는 각 경우 최종시간에서 최대 공극체적률이 발생하는 지점, 즉 파단이 발생한 지점을 보여주며, Fig. 6은 그 지점에서의 공극체적률의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 자유벌지 금형을 사용하는 경우는 소재가 자유롭게 변형이 되면서 소재 내부의 공극의 생성이 활발하고 성장이 급격하게 이루어져 짧은 시간내에 파단에 이르게 됨을 알 수 있다. 이와

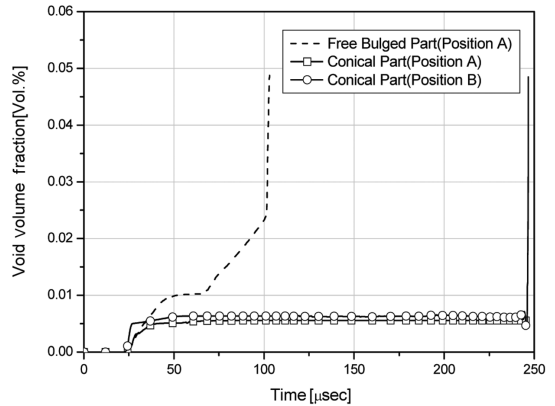


Fig. 6 Variation of void volume fraction at fracture position

반대로, 가공물이 금형과의 지속적인 접촉이 발생하는 원뿔형 금형을 사용한 경우는 소재 내부의 공극 생성 및 성장률이 증가되지 않아 소재의 손상이 지연되거나 억제되어 궁극적으로는 성형성 개선으로 이어질 수 있음을 알 수 있다.

4. 성형성 개선의 주요인

전자기 성형기술이 기존의 다른 공법에 비하여 성형성이 향상되는 원인을 금형과의 상호작용으로 인한 손상 억제 효과에 기인한 것으로 볼 때, 본 절에서는 소재가 금형과의 충격 전후의 소재 내부 응력 변화를 고찰하여 성형성 개선의 주요인을 파악하고자 한다. Fig. 7과 같이 소재가 금형과의 충격 직전인 $T=200\mu s$ 에서 소재의 안쪽(Inside)과 바깥쪽(Outside)에서 하나씩의 요소를 선택한다. Figs. 8-10은 선택된 요소의 시간에 따른 변형방향, 원주방향,

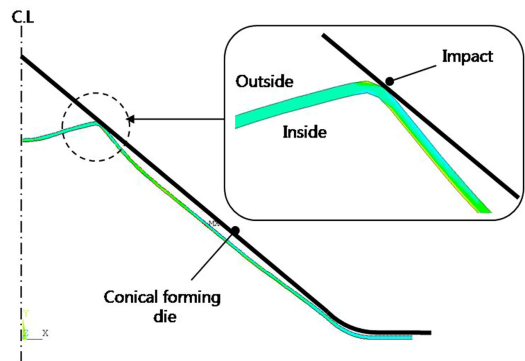
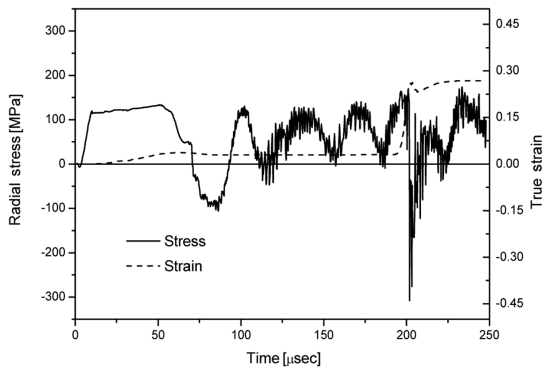
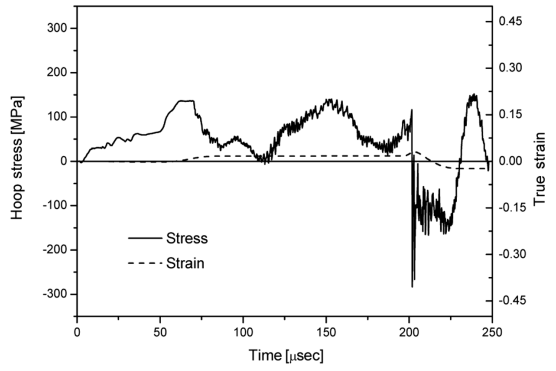


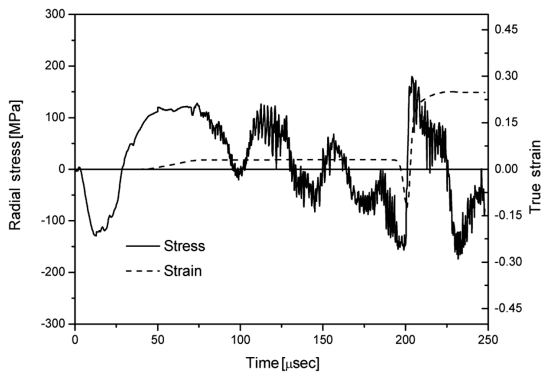
Fig. 7 Deformation shape of pre and post-impact



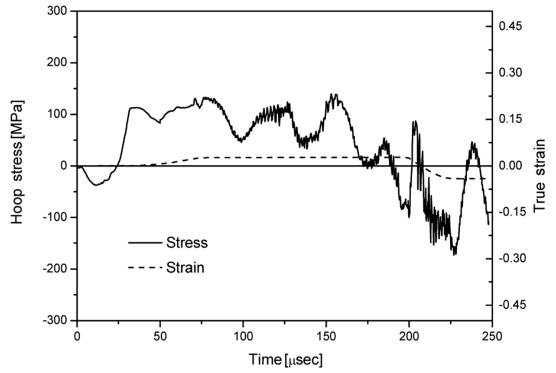
(a) Outside



(a) Outside



(b) Inside



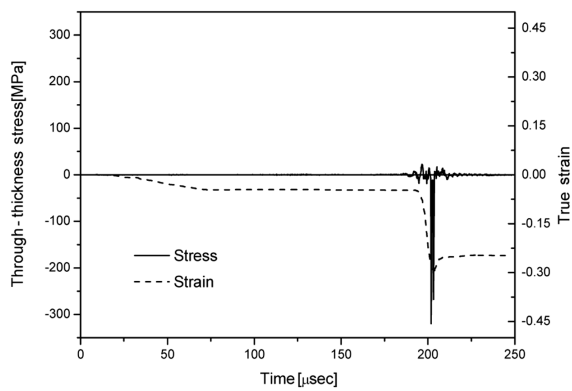
(b) Inside

Fig. 8 Radial stress and strain histories

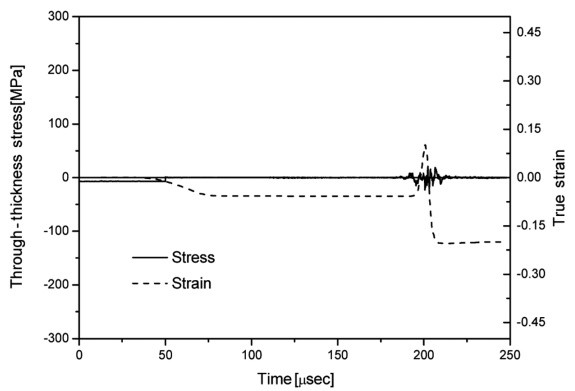
Fig. 9 Hoop stress and strain histories

두께 방향으로의 응력과 변형률 변화를 보여주고 있다. Fig. 8과 9에서 볼 수 있듯이, 초기에 소재는 거의 2축 인장과 굽힘 변형 거동을 보이고 있으며, 급형과의 충격 직전에는 소재가 국부적으로 과도한

굽힘 변형 상태에 놓여져 바깥쪽은 인장응력이, 안쪽은 압축응력이 작용하게 되어, Fig. 11(a)에서와 같이 소재 바깥쪽의 공극체적률이 급격하게 증가하게 된다. 충격시에는 급형과 직접 충돌하게 되는 바



(a) Outside



(b) Inside

Fig. 10 Through-thickness stress and strain histories

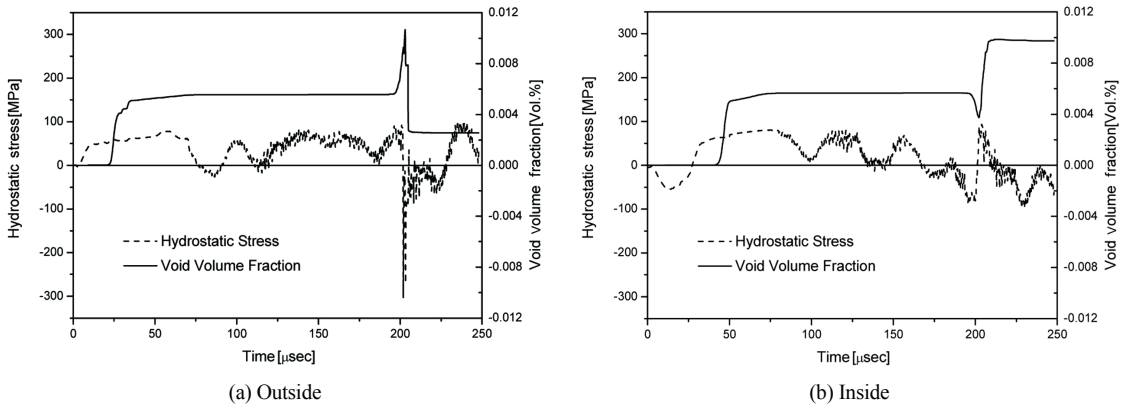


Fig. 11 Hydrostatic stress and void volume fraction histories

끝쪽에는 큰 압축응력이 발생하게 되는데, 그림 10(a)와 같이 특히 두께 방향으로의 큰 압축응력으로 인하여 Fig. 11(a)와 같이 큰 음(-)의 정수응력이 발생하게 되며 이로 인하여 순간적으로 증가되었던 공극체적률이 다시 감소하게 됨을 알 수 있다. 충격 직후에는 반경방향으로 퍼짐(straightening) 현상이 발생함을 알 수 있으며 이로 인하여 소재의 안쪽에는 양(+)의 정수응력이 발생하게 되어 공극체적률이 증가하게 된다. 금형과의 충격 이후 소재는 복잡한 응력상태에 놓이게 되는데, 반경방향으로 바깥쪽은 인장응력이 안쪽은 압축응력이 작용하게 되고, 원주방향은 양측 모두 압축 응력 상태가 되어 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 파단 공극체적률에 훨씬 못 미치는 값으로 공극체적률이 일정하게 유지되는 것이다. 이와 같이 전자기성형은 금형과 가공물 사이에 이러한 충격과 같은 상호 작용으로 인한 응력 상태, 특히 두께 방향으로 압축응력과 반경방향으로의 압축 응력이 소재 내부 공극의 생성 및 성장을 지연시키거나 억제시켜 최종적으로 성형성 개선현상으로 나타나게 되는 것이다. 따라서 전자기 성형을 통하여 성형성을 극대화시키기 위해서는 성형시에 가공물이 금형과의 지속적인 접촉이 될 수 있도록 공정설계 및 가변 금형설계 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자기 성형기술이 기존의 다른

공법에 비하여 성형성이 향상되는 원인을 규명하기 위하여 Gurson 소성모형을 사용한 유한요소해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전자기 성형시에는 금형과 가공물 사이의 상호 작용으로 인하여 소재 내부 공극의 생성 및 성장을 지연시키거나 억제시켜 최종적으로 성형성 개선으로 나타나게 된다.
- 2) 가공물이 금형과 충격시에는 금형과 직접 충돌하게 되는 바깥쪽에는 큰 압축응력과 이로 인한 큰 음(-)의 정수응력이 발생하게 되며 이것이 공극체적률 감소로 이어져서 성형성 향상의 주요인으로 작용하게 된다.

후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었으며, 또한, 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8 A2026095)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya and M. Kleiner, "Electromagnetic Forming-A Review," Journal of Materials Processing Technology, Vol.211, Issue 5, pp.787-829, 2011.
- 2) H. M. Lee, B. S. Kang and J. Kim, "Development of Sheet Metal Forming Apparatus Using Electromagnetic Lorentz Force," Trans-

- actions of Materials Processing, Vol.19, No.1, pp.38-43, 2010.
- 3) J. Imbert and M. Worswick, "Reduction of a Pre-formed Radius in Aluminium Sheet Using Electromagnetic and Conventional Forming," Journal of Materials Processing Technology, Vol.212, Issue 9, pp.1963-1972, 2012.
 - 4) D. Liu, C. Li and H. Yu, "Numerical Modeling and Deformation Analysis for Electromagnetically Assisted Deep Drawing of AA 5052 Sheet," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.19, Issue 5, pp.1294-1302, 2009.
 - 5) A. L. Gurson, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I," Journal of Engineering Materials & Technology, Vol.99, pp.2-17, 1977.
 - 6) V. Tvergaard, "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions," International Journal of Fracture, Vol.17, No.4, pp.389-407, 1981.
 - 7) M. J. Worswick and P. Pelletiera, "Numerical Simulation of Ductile Fracture during High Strain Rate Deformation," The European Physical Journal Applied Physics, Vol.4, Issue 3, pp.257-267, 1998.