

박판성형 공정에서 발생하는 주름의 예측에 관하여

김종봉* · 양동열**

On the Prediction of the Wrinkling Initiation in Sheet Metal Forming Processes

J. B. Kim* and D. Y. Yang**

Abstract

The finite element analyses of the wrinkling initiation and growth in the sheet metal forming process provide the detailed information about the wrinkling behavior of sheet metal. The direct analyses of the wrinkling initiation and growth, however, bring about a little difficulty in complex industrial problems because it needs large memory size and long computation time. For the description of wrinkling growth, the mesh elements should be sufficiently small and the size of finite element matrix becomes large. In the static implicit finite element method, therefore, the direct analysis of wrinkling growth in a complex sheet metal forming process is rather difficult. From the industrial viewpoint of tooling design, the readily available information of possibility and location of wrinkling is sometimes more preferable to the detailed time-consuming information. In the present study, therefore, the wrinkling factor that shows locations and relative possibility of wrinkling initiation is proposed as a convenient tool of relative wrinkling estimation based on the energy criterion. The location and relative possibility of wrinkling initiation are predicted by calculating the wrinkling factor in various sheet metal forming processes such as cylindrical cup deep drawing, spherical cup deep drawing, and elliptical cup deep drawing. The wrinkling factor is also implemented in the analysis of the door inner stamping process to predict wrinkling.

Key Words : Wrinkling Prediction, Wrinkling Factor, Sheet Metal Forming, Finite Element Analysis

1. 서론

주름은 파단, 스프링백과 같이 박판성형 공정에서 발

생하는 주요 결함중의 하나이다. 주름은 압축응력이 소재가 지지할 수 있는 한계 이상일 때 소재가 소재면에 수직인 방향으로 휘어지는 현상으로 외관상으로도 좋지

* LG전자 DA연구소

** 한국과학기술원

않고, 치수 정밀도가 떨어지기 때문에 조립에 장애가 된다. 또한 주름의 성장이 계속되면 성형 방향으로의 소재 흐름에 제한이 가해지기 때문에 이어지는 성형성을 저하시키는 요인이 되고 금형도 빨리 마모시킨다. 이것은 생산 공정에서 생산성을 크게 저하시키는 요인으로 작용한다. 최근에는 자동차 산업을 비롯하여 전자산업, 항공기 산업 등 다양한 분야에 박판성형 공정이 이용되고 있다. 또한 고정밀도 고부가가치 제품이 요구되고 있고, 공정 개발 기간의 단축이 중요해 짐으로 인해 공정 개발단계에서 미리 생산 공정에서 발생할 수 있는 결함에 대해 예측하고 그에 대한 대처를 하는 것이 필수적이다.

주름은 응력을 비롯하여 소재의 형상(geometry), 소재의 기계적 성질, 접촉 및 경계조건 등 많은 인자들의 영향을 받기 때문에 해석에 많은 어려움이 따른다. 그러나, 이론적(analytic)으로 주름을 해석하는 경우에는 이와 같은 여러 가지 요소들을 고려하는 것이 어렵기 때문에, 이런 요소들을 잘 고려할 수 있는 유한 요소법이 최근에는 많이 이용되고 있다.

유한요소법을 이용한 주름의 해석에서도 사각형 컵 드로잉같이 기하학적으로 주름이 자연스럽게 발생하는 경우는 주름 발생의 해석이 자연스럽게 이루어지지만, 원통형 컵 디프드로잉과 같이 기하학적으로 완전 형상인 경우에는 주름이나 puckering을 해석하기 위해서 분기 이론을 도입해야 한다^(1,2). 그러나 이 방법이 복잡하기 때문에 대부분의 연구에서는 초기 결함을 부여함으로써 분기좌굴(bifurcation buckling) 문제를 극점좌굴(limit point buckling) 문제로 바꾸어 해석하였다^(3,4). 그러나 이런 해석은 결과가 초기 결함의 크기와 방법에 따라 영향을 크게 받는다는 문제점이 있다. Kim 등^(1,2)은 보다 엄밀하게 주름의 발생과 성장을 해석하기 위해 유한요소 해석에 탄성구조물의 해석에만 주로 이용되었던 분기이론을 도입하였다. 그리고 개선된 Yoshida Buckling Test에서의 주름발생⁽¹⁾과 반구형 컵 디프드로잉에서의 퍼커링(puckering)을 해석하였다⁽²⁾.

그러나 일반적인 박판성형 공정에서 발생하는 주름의 경우는 위에서 언급한 사각형 컵 디프드로잉에서와 같이 기하학적 불완전성으로 인해 분기 이론을 사용하지 않고도 주름이 자연스럽게 발생한다. 하지만 복잡한 박판성형 공정에서는 발생하는 주름을 전체적으로 해석한다는 것은 상당한 계산 시간과 컴퓨터의 메모리를 요구한다. 왜냐하면, 실제로 스탬핑 공정에서 발생하는 주름은 크기가 크지 않아 그것을 해석에서 묘사하기 위해서는 매우 작은 유한요소 격자로 이산화를 해야 하기 때문이다. 내연적 유한요소법으로 스탬핑 공정을 해석하는 경우에

는 수렴의 어려움으로 인해 주름을 전체적으로 해석하는 것은 더욱 더 어렵다.

본 연구에서는 주름의 발생시점과 발생 위치 그리고 주름의 형상을 자세히 해석하기 이전에, 주름의 발생 위치와 가능성을 빨리 파악하여 가능한 빠른 시간 안에 금형의 설계에 적용될 수 있는 주름 인자를 제안하였다. 그리고 반구형 편치 디프드로잉, 원통형 컵 디프드로잉, 그리고 타원형 컵 디프드로잉 공정에서 주름 인자를 계산해 봄으로써 신빙성과 효용성과 보였다.

2. 주름인자의 정의

2.1 주름인자(Wrinkling Factor)의 정의

1장에서 언급했듯이 주름은 응력, 변형률, 소재의 두께, 변형률 증분, 소재의 형상, 경계조건 및 접촉 조건 등에 크게 영향을 받는다. 그래서 일반적으로는 주름 인자는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$W = W(\frac{\sigma}{\sigma_y}, \epsilon, \Delta \epsilon, \frac{L}{t}, \frac{\rho_1}{t}, \frac{\rho_2}{t}, C.C, B.C). \quad (1)$$

여기서 L은 주름이 발생하는 부분의 소재의 특성 길이이고, ρ_1 과 ρ_2 는 주 곡률, 그리고 C.C과 B.C는 각각 접촉조건과 경계조건을 의미한다.

물리적으로 고려해 볼 때 주름의 발생은 주 경로(primary deformation path)로의 변형이 불안정 할 때 발생한다. Fig.1에 나타낸 바와 같이 분기점 이전에는 주 경로로의 변형이 안정적이고 분기점 이후에는 부(2차) 경로(secondary path)로의 변형이 안정적이다. 변형 에너지의 관점에서 보면, 분기점 이전에는 주 경로(1차 모드)로의 변형 에너지가 2차 경로(주름 모드)로의 변형 에너지 보다 작고, 분기점 이후에는 2차 경로로의 변형 에너지가 1차 경로로의 변형 에너지보다 작다. 이와 같은 사실로 볼 때 변형은 변형 에너지가 최소가 되는 방향으로 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 사실에 근거하여 주름 인자를 다음과 같이 주경로로의 변형에너지와 부 경로로의 변형에너지의 비로 정의하였다.

$$W = \frac{E_p}{E_s} \quad (2)$$

여기서 W는 주름의 발생 가능성을 나타내는 주름 인자이고 E_p

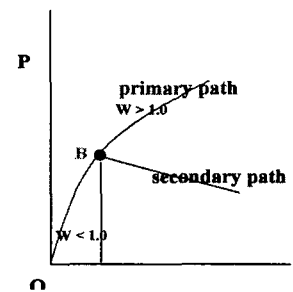


Fig. 1 Solution path of bifurcation type problem

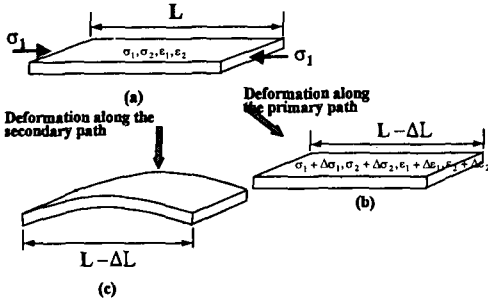


Fig. 2 Schematic illustrations of the deformation along the primary path and along the secondary path; (a) current state of deformation, (b) deformation along the primary path, (c) deformation along the secondary path

는 주 경로로의 변형 에너지, 그리고 E_s 는 부 경로로의 변형 에너지이다. 이와 같이 주름 인자를 정의하면 주름의 발생은 다음과 같이 판단할 수 있다.

$$W < 1: \text{Stable, No Wrinkling} \quad (3)$$

$$W \geq 1: \text{Unstable, Wrinkling}$$

앞에서도 언급했듯이 보다 정확하게 주름의 발생 시점과 위치를 파악하기 위해서는 경계조건과 접촉조건, 그리고 소재의 형상이 고려되어야 한다. 그러나 복잡한 박판성형 공정에서는 주름이 발생하는 영역의 특성 길이 등의 형상과 경계조건을 찾는 것은 쉽지가 않다. 그래서 주름 인자 계산에 다음과 같은 가정을 도입하여 소재의 형상효과를 무시하고 상대적인 주름 가능성을 파악하였다.

- i) 주름은 어떤 일정한 크기(파장)로 발생한다. 즉 주름이 발생하는 영역의 특성 길이는 일정하다. 그래서 식(1)의 주름인자 계산에서 특성 길이는 주름의 길이로 가정한다. 이와 같이 주름인자를 계산하면 계산된 주름인자는 주름의 길이가 임의로 가정되었기 때문에 절대적인 수치가 의미가 있는 것이 아니라 단지 상대적으로 주름이 발생 가능성이 크다는 상대적인 의미만을 가진다.
 - ii) 주름은 주 최소 응력 방향으로 발생하고 이중 곡률의 형상을 갖지 않는다.
 - iii) 주름은 sine파의 형태로 발생한다. 탄성변형 재료의 좌굴은 sine파로 발생한다는 것은 이미 알려져 있지만 가공경화 재료의 소성 좌굴의 경우 sine파로 변형하지 않을 수 있지만 그것을 무시한다.
 - iv) 가정된 소재(Fig.2)의 물성, 두께, 응력과 변형률은 소재 내에서 균일하다.
- 이와 같이 가정하면 식(1)과 식(2)의 주름 인자는 다음

과 같이 쓰여진다.

$$W = \frac{E_p}{E_s} = W\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}, \epsilon, \Delta \epsilon, \frac{L}{t}\right) \quad (4)$$

Fig.2에서와 같이 가정된 박판 소재(Assumed uniform sheet)의 주 경로로의 변형 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$E_p \approx \int_V \sigma_{ij} \Delta \epsilon_{ij} dv = (\sigma_1 \Delta \epsilon_1 + \sigma_2 \Delta \epsilon_2) wtL \quad (5)$$

여기서 $\sigma_1, \sigma_2, \Delta \epsilon_1,$ and $\Delta \epsilon_2$ 는 각각 주 응력과 주 변형을 성분이다. 그리고 w, t, L 은 각각 assumed uniform sheet의 폭과 두께, 그리고 길이이다.

부 경로로의 변형에너지는 sine파 형태라고 가정하면 (Fig.2) 다음과 같이 모멘트를 적분하여 변형 에너지를 계산할 수 있다.

$$E_s = \int_L \frac{1}{2} M d\theta + \sigma_2 \Delta \epsilon_2 wtL \quad (6)$$

$$= \int_L \frac{1}{2} M \frac{d\theta}{dx} dx + \sigma_2 \Delta \epsilon_2 wtL$$

2.2 모멘트 계산

탄성변형의 경우 모멘트는 소재가 받고 있는 응력과 변형률에 관계없이 다음과 같이 정의된다.

$$M = M(t, w, E) = \frac{EI}{\rho(1-\nu^2)} = \frac{EI}{(1-\nu^2)} \frac{d^2y}{dx^2} \quad (7)$$

그러나 소성변형의 경우 박판의 굽힘 강성이 소성변형량이 증가함에 따라 일반적으로 작아진다. 그래서 소성 변형중에 있는 소재의 경우에는 소성 좌굴 이론에서 많이 이용되는 가감 계수(reduced modulus)를 이용하여 다음과 같이 모멘트를 계산하였다.

$$M = M(t, w, E) = \frac{E_p I}{\rho(1-\nu^2)} = \frac{E_p I}{(1-\nu^2)} \frac{d^2y}{dx^2} \quad (8)$$

3. 주름인자의 계산 및 토론

주름 인자는 유한요소 해석 과정에서 각각의 요소마다 각 요소에서 계산된 응력과 변형률 등의 정보를 이용하여 계산된다.

Fig.3은 주름인자의 신빙성을 보여주기 위해 탄성 보의 좌굴 문제를 해석하여 나타내었다. 탄성보의 좌굴 문제는 이론적인 해가 존재하기 때문에 이론 해와도 비교해 신빙성을 보였다. 그림에서 보면, 좌굴이 발생할 때까지 주름 인자가 계속 증가하고 좌굴이 발생하는 지점에서 1.0이 되었고 실제 해석에서도 좌굴이 발생하였다.

Fig.4와 Fig.5는 반구형 펀치 디프드로잉과 원통형 컵

드로잉에서 발생하는 퍼커링(Puckering)과 주름을 예측한 주름 인자와 실제 해석에서 발생한 퍼커링과 주름을 보여준다. 퍼커링과 주름이 발생한 위치를 잘 예측하고 있다.

Fig.6은 타원형 컵 디프드로잉에서 블랭크의 초기 형상에 따라 주름인자를 예측한 결과를 보여준다. 해석에서 블랭크의 형상비가 커질수록 주름의 발생이 지연됨을 알 수 있었는데 이를 주름인자가 잘 예측하고 있다.

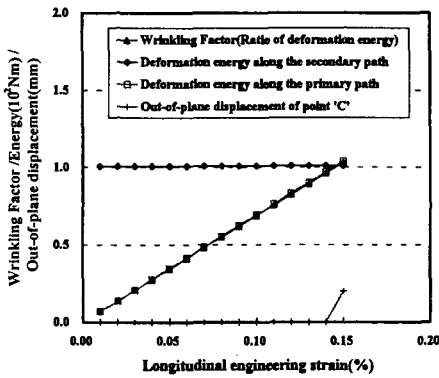


Fig. 3 Wrinkling factor vs. engineering strain curve for elastic buckling of a strip ($t=0.2$ mm)

4. 결론

본연구에서는 주름의 발생을 빠른 시간 안에 예측하고 급형의 설계에 적용하기 위해 주름인자를 제안하였다. 탄성 보의 좌굴 문제와 여러 가지 박판성형 공정의 유한 요소 해석에서 제안된 주름인자를 계산함으로써 제안된 주름인자의 신빙성과 효용성을 보였고, 주름을 잘 예측할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Kim, J. B., Yang, D. Y. and Yoon, J. W., 2000, "Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test finite element analysis by using bifurcation algorithm and experimental comparison", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.42, pp. 1683~1714
- (2) Kim, J. B., Yang, D. Y., Yoon, J. W. and Barlat, F., 2000, "The effect of plastic anisotropy on compressive instability in sheet metal forming", *I. J. Plasticity*, vol. 16, pp. 649~676

- (3) Tomita, Y. and Shindo, A., 1988, "Onset and growth of wrinkling in thin square plate subjected to diagonal tension", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 30, pp. 921~931.
- (4) Cao, J and Boyce, M. C., 1995, "Optimization of sheet metal forming processes by instability analysis", *Proceedings of NUMISHEET'99*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 675~679.
- (5) Yoon, J. W., Yang, D. Y. and Chung, K., 1999, "A elasto-plastic finite element method based on incremental deformation theory and continuum based shell elements for planar anisotropic sheet materials", *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.*, vol. 1, pp. 23~56.

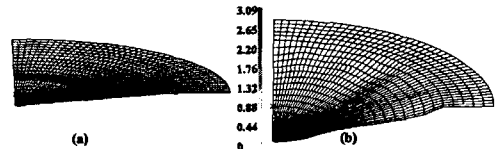


Fig. 4 (a)Wrinkling factor calculated in the spherical cup deep drawing process, (b) Puckering Shape

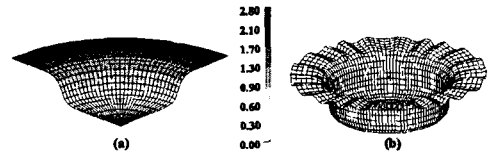


Fig. 5 (a)Wrinkling factor calculated in the cylindrical cup deep drawing process, (b) Wrinkling Shape

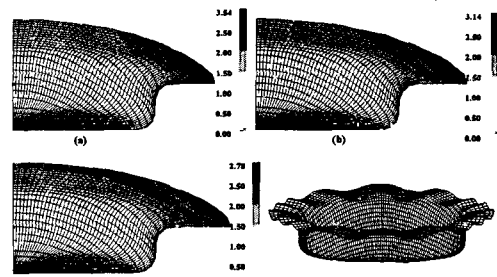


Fig. 6 Wrinkling factor for various aspect ratios of the initial blank in the elliptical cup deepdrawing process ; (a)bb/ab=0.969, (b)bb/ab=1.000, (c)bb/ab=1.031, (d)wrinkling shape