

알루미늄 합금 판재 성형성 예측을 위한 유한요소해석 프로그램 개발

김윤근^{1, #}, 김성태¹, 문명수¹, 정완진², 윤정환³

Development of finite element analysis program for aluminum alloy sheets

Y. G. Kim, S. T. Kim, M. S. Moon, W. J. Chung, J. W. Yoon

Abstract

Recently, the usage of aluminum alloy is rapidly increasing in automobile industry to achieve weight reduction for fuel efficiency. However, design of forming process of aluminum is more difficult than steel because of poor formability and severe springback. Since applications of finite element analysis for the design of sheet metal forming process are actively performed, it is required to conduct proper consideration of aluminum material behavior. In this study, a plane stress yield function Yld2000(Yoon et al., 2000), proven to describe well the anisotropic behavior of aluminum alloy, is implemented for FE analysis. One element test is considered to verify the validity of implementation of Yld2000 model. In addition, cylindrical cup drawing test is performed to verify earing shape of a drawn cup.

Key Words : Aluminum alloy, Anisotropy, Yield function, Yld2000-2d

1. 서 론

자동차 차체의 경량화 추세에 따라 그 수요가 점차 증가되고 있는 알루미늄 박판은 비철금속의 이상거동(anomalous behavior)현상으로 인하여 성형해석이 까다로운 것으로 알려져 있다. 따라서 비철금속의 이상거동을 수용할 수 있는 이방성 항복조건과 이 항복조건을 도입한 성형공정의 유한요소 해석이 중요한 연구과제가 되고 있다. 최근 비철금속의 이상거동을 보다 정확히 모델링하기 위하여 비 이차 평면 이방성 항복 조건에 대한 몇몇 연구가 보고되고 있으며, Hill 과 Barlat 등이 제시한 조건식이 이에 해당한다. 하지만 현재까지 보편적으로 사용되는 유한요소해석용 S/W 에서는 알루미늄 박판의 성형해석에서 중요하게 고려되는 이러한 이방성 항복조건을 완벽히 적용하지

못하고 있는 실정이다. 이방성 항복조건을 사용하기 위하여 까다로운 실험을 통해 얻어지는 물성치의 결정 및 유한요소해석 단계에서 적용되는 여러 가지 제약조건 등은 알루미늄 박판과 같은 비철금속의 성형해석을 위해 반드시 해결되어야 할 문제로 여전히 남아있다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄소재의 스탬핑성형공정을 예측하기 위한 유한요소해석코드를 개발하고 검증을 위하여, 한 개 요소(One element) 및 원형 컵 드로잉에 대한 결과를 분석하였다.

2. 알루미늄박판 성형을 위한 재료모델링

Hill 이 제안한 이차 항복식[1]은 오랫동안 가장 널리 쓰이는 이방성 항복식이었다. 이 항복식은 특히 강에 대해서 널리 사용되었는데, 광범위하게

1. ㈜ 코디마

2. 서울산업대학교 금형설계학과

3. Alcoa Technical Center

교신저자: ㈜코디마, E-mail: ygkim@kodima.com

받아들여진 식이면서 또한 일반화된 응력상태에 적용할 수 있기 때문이다.

그러나 이 식은 알루미늄에 대해서는 좋지 않은 결과를 보여 주는 것으로 보고되었다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 이론들이 제안되었으나, 각각의 이론은 이방성 계수에 대한 r-value 이방성이나 항복응력의 이방성 중에 하나만을 고려하였고, 이를 해결하고자 Barlat 등 (1997)[2]은 이방성 계수와 항복응력의 이방성을 동시에 고려할 수 있는 항복식 (Yld96)을 제안하였다. 그러나 Yld96 은 항복식이 삼차원에 대해서, 볼록면을 가짐을 증명할 수 없고 계수 결정법이 복잡하였다.

Yoon 등 (2000)[3] 과 Barlat 등(2003)[4]에 의한 논문에서 Yld96 모델의 약점을 완전히 극복하는 새로운 평면응력 항복식인 Yld2000-2d 이 제안되었으며 "2d"는 평면응력을 의미한다. Yoon 등(2000[3], 2004[5])에 의한 연구에 따르면 이 식은 정확성과 알루미늄 합금박판의 광범위한 사례에 대한 수치적으로 안정성이 입증되었다.

본 연구에서는 Yld2000-2d 모델을 사용하여 알루미늄의 이방성 항복식을 구현하기로 한다.

3. Yld2000 Model

평면응력 상태 하의 이방성 항복식이 Yoon 등 (2000)[3] 과 Barlat 등 (2003)[4]에 의하여 제안되었다.

$$\phi = \phi' + \phi'' = 2\bar{\sigma}^a \quad (1)$$

여기서 지수"a"는 재료상수이다. 그리고

$$\phi' = \left| X_1' - X_2' \right|^a \quad (2a)$$

$$\phi'' = \left| 2X_2'' + X_1'' \right|^a + \left| 2X_1'' + X_2'' \right|^a \quad (2b)$$

$a \geq 1$ 일 때 항복면은 볼록한 성질을 가지고 있다. (1)식에서 지수 "a"는 결정의 구조와 주로 관련이 되어 있다. "a"값이 높으면 항복면의 둥글려진 점에서 꼭를을 증가시키는 효과를 가지며 FCC 재료에 대해서는 $a=8$, BCC 재료에 대해서는 $a=6$ 이 추천된다. 식 (2)에서, X_j' 와 X_k'' 는 X' 와 X'' (2 개의 stress deviator 의 선형변환)의 주 방향 값이며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X'_{XX} \\ X'_{YY} \\ X'_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & 0 \\ C'_{21} & C'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{XX} \\ S_{YY} \\ S_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} X''_{XX} \\ X''_{YY} \\ X''_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C''_{11} & C''_{12} & 0 \\ C''_{21} & C''_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C''_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{XX} \\ S_{YY} \\ S_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

입력 데이터 $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, r_0, r_{45}, r_{90}, \sigma_b$ 를 표현하기 위하여 7 개의 상수가 필요하다. $C''_{12} = C''_{21}$ 가 성립하지 않거나 다른 추가적인 실험 데이터를 고려하게 되면 8 번째 상수를 사용할 수도 있다. 이방성 비($r_b = \dot{\epsilon}_{YY} / \dot{\epsilon}_{XX}$)를 추가적인 실험 데이터로 사용할 수도 있다.

Fig. 1 과 Fig. 2 는 기존 문헌에 나타난 Yld2000 모델을 포함한 여러 항복식에 의한 예측과 실험에 의해 구해진 무차원화된 항복응력과 이방성계수 값을 보여 준다. 기대한 바와 같이 Yld2000 과 Yld96 이 항복응력과 이방성계수 값을 가장 잘 예측한다.

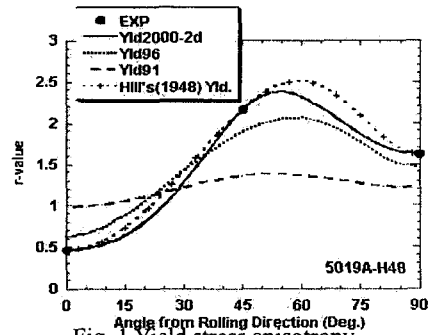


Fig. 1 Yield stress anisotropy

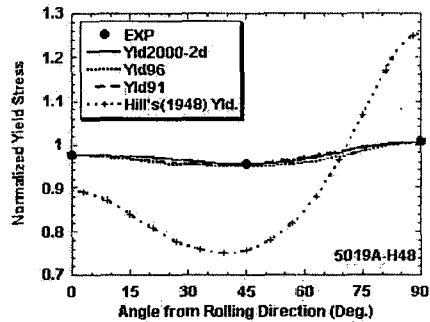


Fig. 2 r-value anisotropy

4. 유한요소코드 및 S/W 개발

본 연구에서 박판 성형 코드인 Z-Stamp 의 개발 방향은 다음과 같다.

- 1) 유한요소해석기법의 지배방정식과 경계조건을 만족하는 해를 구해나가는 방법을 채택하였다.
- 2) 시간적분에 관하여 본 연구에서는 극심한 변형이 많고 접촉현상에 의한 비선형성의 정도가 매우 크므로 해의 수렴성을 고려하여 외연적 시간적분법을 선택하는 것이 적합하다.
- 3) 3 차원 문제를 해석하는 것을 목표로 하므로 3 차원 쉘요소를 사용하되 변형해석에 적합하고 접촉처리에 유리한 사 절점 요소를 사용하였다. 계산시간을 고려하여 한 점 적분에 제로에너지 모드 제거기능을 포함한 요소를 선택하였다.
- 4) 재료모델로는 Yld2000 모델을 따르는 탄소성재료를 구현하였다. MAPLE 소프트웨어를 사용하여 응력의 일차 미분 및 이차 미분을 구함으로써 연쇄 미분에 의한 경우보다 계산시간을 획기적으로 단축하였다.
- 5) 강건한 응력 적분을 위하여 Yoon 등 (1999)[6]에 의해 개발된 다단계 return mapping 법을 사용하여 구현하여 예기치 않은 큰 응력 증분에 대해서도 안정적인 응력적분을 가능하게 해 줄 수 있다.
- 6) 금형의 형상은 외곽의 표면만 막 요소로 모델링하여 표현하여 사용하였다. 금형과 소재의 접촉처리를 위하여 벌칙함수법을 사용하였다. 그리고 비드의 효과를 구현하기 위하여 비드의 수직력과 수평력을 처리할 수 있도록 하였다.
- 7) 금형의 시간에 따른 동작 및 금형에 힘을 가하는 것을 표현하기 위하여 Table 을 사용하여 입력할 수 있도록 하였다.

5. 예제에 의한 검증

Yld2000 모델의 성공적인 구현을 위하여 두 가지 예제를 통하여 검증을 수행하였다. 첫 번째 예제는 한 개 요소를 각 방향으로 인장하는 것으로 Yld2000 모델이 제대로 구현되었는지를 검증하는 것이고, 두 번째 예제는 원형 컵 드로잉에 대하여 방향별로 발생하는 귀의 형상을 실제 실험과 비교하는 것으로 실제의 예제와의 비교를 통하여 코드의 구현의 건전성 및 Yld2000 모델의 유효성을 동시에 검증하는 예제라 할 수 있다.

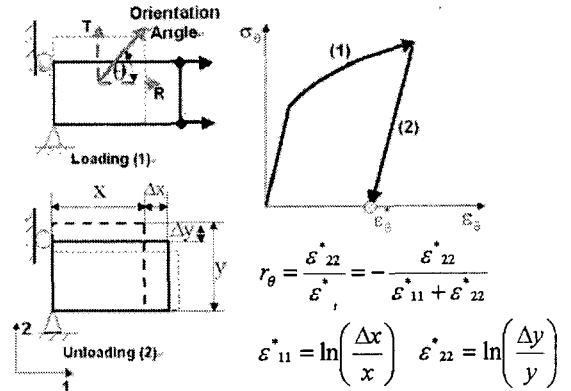


Fig. 3. Schematic diagram for one element test to evaluate r-values along direction ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

5.1 One element verification

Fig. 3 은 한 개 요소 예제의 과정을 보여 준다. 그림과 같은 규격($1 \times 1 \times 0.1$, 단위:mm)의 알루미늄 판을 10% 신장한 다음 이방성계수에 대한 탄성의 영향을 없애기 위하여 탄성회복시키며 세 방향에 대하여 같은 계산을 반복하며 이방성계수 값은 Fig. 3 에 표기된 식에 의해서 계산된다.

시험에 사용된 소재는 Al6016-T4 이며 물성에 대한 자료는 NUMISHEET99 학술대회에서 공개되었다. Yld2000-2d 의 계수들과 이방성계수의 값, 그리고 응력-변형을 관계는 다음과 같다.

$$a_1=0.9580, a_2=1.0450, a_3=0.9485, a_4=1.0568, a_5=0.9938, a_6=0.9397, a_7=0.9200, a_8=1.1482 \quad (4)$$

$$r_0=0.94, r_{45}=0.39, r_{90}=0.64, m=8$$

$$\bar{\sigma} = 385.47(0.082 + \bar{\epsilon})^{0.239} \quad (\text{Mpa})$$

전체계산을 수행하는 데 1000 개의 균일한 시간 증분을 사용하였다. 계산결과를 Table 1 에 나타내었다. 방향별 이방성계수의 값에 대한 오차는 1% 이내로써 코드가 제대로 구현된 것을 알 수 있다.

각도	계산예측 R	실험측정 R
0	0.9349	0.94
45	0.6399	0.64
90	0.3873	0.39

Table 1. Comparison between predicted r-value and experimental r-value

5.2 Earing verification

원형 컵 드로잉의 금형의 구성 및 소재의 형상을 Fig. 4 에 나타내었다.

Yld2000-2d 의 계수들과 이방성계수의 값, 그리고 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$a_1=0.8972, a_2=1.1131, a_3=0.8532, a_4=0.9220, a_5=1.0476, \\ a_6=1.0796, a_7=1.0930, a_8=1.0050 \quad (5)$$

$$r_0=0.46, r_{45}=2.16, r_{90}=1.62, m=8$$

$$\bar{\sigma} = 501.32 - 166.23 \exp(-20.90\bar{\epsilon}) \quad (\text{Mpa})$$

드로잉에서 발생한 귀형상의 높이를 360 도 회전 하며 측정 한 실험치와 본 코드에 의한 해석치 및 기타 다른 모델에 의한 예측치를 동시에 비교하여 Fig. 5 에 나타내었다. 실험결과와 비교할 때 Yld2000 모델을 구현한 본 코드의 예측치가 변형 결과의 예측에서 매우 정확한 것을 알 수 있다.

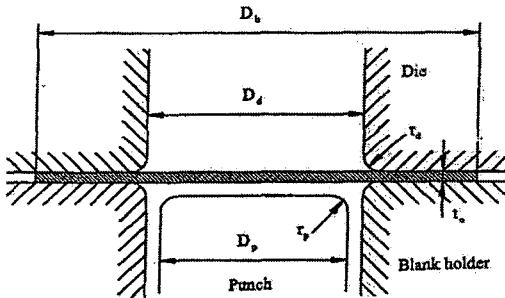


Fig. 4 Schematic view of drawing process

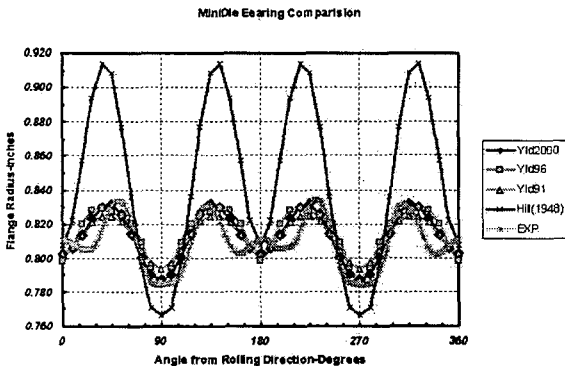


Fig. 5 Comparison of earing profiles among Yld2000-2d, Yld96, Yld91, Hill's(1948) Yld, and experiment

6. 결론

본 연구의 주요 결론은 다음과 같다

(1) 알루미늄 합금 판재의 성형성 예측을 위한 평면이방성 항복식인 Yld2000 을 해석코드로 구현 하였다.

(2) 두 가지 예제를 통하여 개발된 해석코드의 건전성 및 Yld2000 모델의 유효성을 검증하였다

후 기

본 논문은 2004 년 중소기업기술혁신과제로 수행 된 연구 결과임. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Hill. R., 1948, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London A193, pp. 281-297.
- F.Barlat et al., 1997, Yield function development for aluminum alloy sheets, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 45, pp. 1727-1763.
- J.W. Yoon, F. Barlat and R.E. Dick, 2000, Sheet metal forming simulation for aluminum alloy sheet, SAE 2000, Michigan, USA, pp. 67-72.
- F.Barlat et al., 2003, Plane stress yield function for aluminum alloy sheets - Part 1: Theory, Int. J. Plasticity, Vol. 19, pp. 1297-1319.
- J.W. Yoon, F.Barlat and R.E.Dick, 2004, Plane stress yield function for aluminum alloy sheets - Part II: FE formulation and implementation, Int. J. Plasticity, Vol. 20m, pp. 495-522.
- J.W. Yoon, D.Y. Yang, K. Chung, 1999, Elastoplastic finite element method based on incremental deformation theory and continuum based shell elements for planar anisotropic sheet materials, Compt. Methods in Appl. Mech. & Eng., Vol.174, pp.23-56