

이방성 가공경화를 고려한 냉간 압연강판의 넥킹 예측

인정제* · 김권희** · 함주희***

(2001년 2월 6일 접수)

Prediction of Sheet Metal Necking with Anisotropic Hardening

J. J. Yin, K. H. Kim and J. H. Ham

Abstract

Uniaxial necking is studied for steel sheets with initial anisotropy. The state of anisotropy is continuously altered by subsequent tensile deformation at angles to the rolling direction. The orientations of orthotropy axes are changed before the onset of necking. A simple hardening rule which incorporates the rotations of orthotropy axes is proposed and the necking strains are predicted at angles to the rolling direction. Predicted results show good agreement with the experiments.

Key Words : Necking, Anisotropy, Orthotropy, Uniaxial Tension, Anisotropic Hardening, Cold Rolled Steel Sheet

1. 서 론

소재의 이방성과 이에 관련된 가공경화 특성은 넥킹의 발생을 지배하는 중요 인자가 된다는 것이 널리 알려져 있다. 넥킹에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으나 넥킹을 예측하는 방법은 대략 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫 번째는 Hill⁽¹⁾과 같이 넥킹을 일종의 bifurcation으로 생각하는 관점과 Marcinia^(2,3)와 같이 불균일성의 진화(imperfection growth)로 생각하는 관점이 있다. 어느 경우에나 항복함수의 형태가 예측결과를 결정적으로 좌우하므로 이방성 소재의 항복조건 및 가공경화 특성에 대한 연구와 넥킹에 대한 연구는 서로 밀접한 관계에 있다고 볼 수 있다. 이에 따라 이방성 소재에 대한 매우 다양한 형태의 항복

함수가 연구되어 왔으나^(4~9) 아직도 넥킹은 예측하기 어려운 현상으로 인식되고 있다.

이방성 금속 판재의 넥킹에 대한 대부분의 기존 연구는 주어진 직교대칭축들의 방향이 후속변형에 의해 변화하지 않는 경우에 국한되어 있다.^(10~16) 그러나, 이방성 금속판재에 직교대칭축과 다른 방향으로 변형이 가해지는 경우 후속변형에 의해 직교대칭축의 방향변화가 발생하게되며 이는 Kim과 Yin^(17~23)이 튜브와 판재에 대하여 실험적으로 확인한 바 있다. 최근 Arrieux 등^(24~25)에 의해 직교대칭축의 회전을 고려한 판재의 변형한계에 대한 연구가 이루어지고 있으나, 직교대칭축의 운동학적 회전만을 고려하는데 그치고 있다.

본 논문에서는 Kim과 Yin이 제안한 운동학적 회전 및 결정립 변형에 의한 회전을 동시에 고려한 직교대칭축

* 인덕대학 컴퓨터응용기계계열
** 고려대학교 기계공학과
*** 고려대학교 대학원 기계공학과

회전모델을 개선하였다. 또한, 예변형된 압연강판에 직교 대칭축과 다른 각도로 인장변형이 일어나는 경우의 베킹을 개선된 직교대칭축의 회전모델을 이용하여 예측하고 실험과 비교하였다.

2. 직교대칭축의 회전모델

2.1 직교대칭축 회전모델의 개선

Hill의 직교대칭축의 방향에 대한 가정은 비틀림에는 실험결과와 일치하지만, 일반적인 평면변형 조건에는 적합하지 않다는 것이 확인되었다.^(19,20) 소성회전(plastic spin) 개념에 근거한 Dafalias 등⁽¹⁰⁾의 이론 또한 실험결과와 일치하지 않는다는 것이 확인되었다.⁽²¹⁾ 이런 단점을 보완하기 위해 실험결과의 관찰에 근거한 현상학적 모델이 Kim과 Yin에 의해 제안되었다.^(21,22) Fig. 1은 이들의 실험방법을 도식적으로 나타낸 것이다.

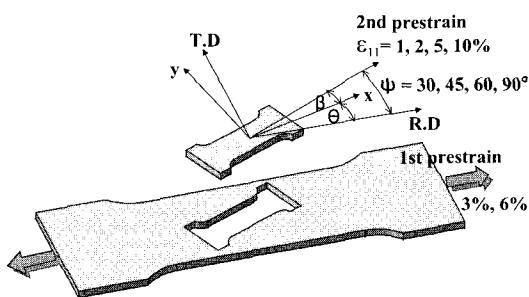


Fig. 1 Schematic illustration of experimental procedure
 ϕ : 2nd prestrain(ε_{11}) axis angle from the
 R.D.(rolling direction)
 θ : x-axis angle from the R.D.
 β : 2nd prestrain axis angle from the x-axis

이들은 실험결과에 근거하여 단축인장시험 중에 발생하는 직교대칭축의 회전에 대한 다음과 같은 현상학적 모델을 제안하였다.

$$d\beta = (1 + C_S) d\varepsilon_{12} \quad (1)$$

여기서 β 는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 인장방향과 직교대칭축 x가 이루는 각도이고, 1과 2는 각각 인장 시편의 길이방향 및 폭 방향이며, C_S 는 재질의 가공경화 상태에 따라 변하는 회전계수이다.

식(1)의 우변은 인장변형시 전단변형에 의한 강체회전

량($d\varepsilon_{12}$)과 결정립 변형에 의한 회전량($C_S d\varepsilon_{12}$)을 포함한다.

Fig. 1로부터 β 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \psi - \theta \quad (2)$$

실험결과⁽²²⁾에 의하면 직교대칭축의 방향 변화속도는 예변형률이 커질수록 둔화되고, 인장축과 가까운 직교대칭축과의 사이의 각도가 커질수록 빨라지는 것으로 나타났다. Kim과 Yin은 이러한 경향을 반영하기 위해 소성일과 β 의 함수로 회전계수 C_S 를 제안한 바 있는데⁽²²⁾, 본 논문에서는 실험치와 예측치의 일치도를 높이기 위해 회전계수 C_S 를 다음과 같이 개선하였다.

$$C_S = C (\min(\beta, \pi/2 - \beta))^a (W_o + W_p)^b \quad (3)$$

여기서 C : 상수

W_o : 초기소성일

W_p : 1차, 2차 예변형에 의한 소성일

a, b : 상수

실험에 사용된 냉간 압연강판은 초기에 약간의 이방성을 갖고 있으며 이에 대응하는 소성일이 W_o 이고, 예변형 과정에서 측정된 인장응력-인장변형률 관계에서 W_p 를 계산할 수 있다.

여기서 이방성 재료의 가공경화특성에 대해 다음과 같은 가정을 도입한다. 즉, 직교대칭축의 방향은 식(1)과 (3)에 의해서 결정되며 $\sigma_x - \sigma_y - \tau_{xy}$ 응력공간의 항복곡면의 형태는 변형 중에 닮은꼴을 유지한다. 위의 가정을 Hill의 이방성 항복 함수에 적용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{d\varepsilon_{12}}{d\varepsilon_{11}} = \frac{-\{(g+2h)\cos^2\beta - (f+2h)\sin^2\beta - (\cos^2\beta - \sin^2\beta)\}\sin\beta\cos\beta}{g\cos^2\beta + f\sin^2\beta + h - (g+f+4h-2)\sin^2\beta\cos^2\beta} \quad (4)$$

여기서 $f=F/N$, $g=G/N$, $h=H/N$ 은 Hill의 이방성 항복함수의 계수들의 비이며, $\sigma_x - \sigma_y - \tau_{xy}$ 응력공간에서 항복곡면의 형상이 닮은꼴을 유지하면, 일정한 값을 갖게 된다.

한편, 윗 식의 우변 분자 세 번째 항($\cos^2\beta - \sin^2\beta$)

의 부호는 -로서 참고문헌 (22, 23)에서는 수식정리 과정에서의 오류로 +로 되어 있던 것을 바로 잡은 것임을 밝혀둔다.

2.2 모델 예측치와 실험 결과의 비교

Fig. 2~4는 직교이방성 대칭축의 방향변화에 대한 실험결과⁽²²⁾와 개선된 모델에 의한 예측 결과를 비교한다.

초기상태 소재에 대하여 예변형률 빙향이 $\psi = 30^\circ, 60^\circ$ 인 경우와, 1차 예변형률 3%, 6%인 소재에 대하여 2차 예변형률(ε_{11})방향이 $\psi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 인 경우의 직교대칭축의 방향 변화를 $\theta - \varepsilon_{11}$ 의 관계로 나타내고 있다.

C, a, b 의 상수는 실험치와 일치도를 얻을 수 있는 $C = 1300, a = 1.3, b = -1.1$ 의 값을 사용하였다. 따라서, C_S 의 값은 변형률이 증가함에 따라 0으로 접근하게 된다. 즉, 직교대칭축의 방향이 주응력 방향에 가까워지면 직교대칭축의 회전이 감소함을 의미한다.

개선된 모델이 예변형률의 크기와 방향에 따른 직교대칭축의 방향 변화 경향을 양호하게 예측하고 있음을 보여주고 있으나, $\psi = 45^\circ$ 인 경우에서 급격한 대칭축의 변화를 수용하지는 못한다.

3. 이방성 가공경화에 의한 넥킹(necking)의 예측

3.1 넥킹 실험

이방성 소재의 불안정 변형률을 측정하기 위한 실험은 1차 예변형 후의 상태와 2차 예변형 후의 상태 각각에 대하여 수행되었다.

먼저, 1차 예변형 후의 넥킹 거동을 살펴보기 위해 압연방향으로 3%와 6%의 1차 예변형률을 가한 시편에서 압연 방향에 대하여 10° 간격으로 넥킹 실험을 위한 소형 인장시편을 채취하였다. 또한, 2차 예변형 후의 넥킹 거동을 살펴보기 위해 압연방향으로 3% 1차 예변형 후 예변형 방향에 직각으로 5%, 10%의 2차 예변형률을 각각 가한 시편으로부터 10° 간격으로 소형 인장시편을 채취하였다. 마찬가지로 압연방향으로 6% 1차 예변형 후 예변형 방향에 직각방향으로 5%, 10%, 15%의 2차 예변형률을 각각 가한 시편으로부터 10° 간격으로 소형 인장시편을 채취하였다.

이렇게 채취된 인장시편들을 이용하여 시편이 파단될 때까지 인장응력-인장변형률 데이터를 기록하고 최대하중점에서의 인장변형률로 넥킹 변형률을 측정하였다.

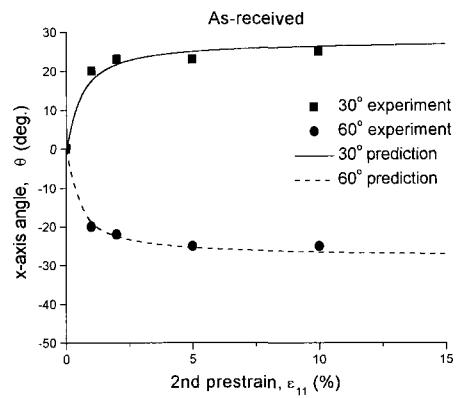


Fig. 2 Rotation of x-axis with the tensile prestrain at angle to the rolling direction for the as-received state

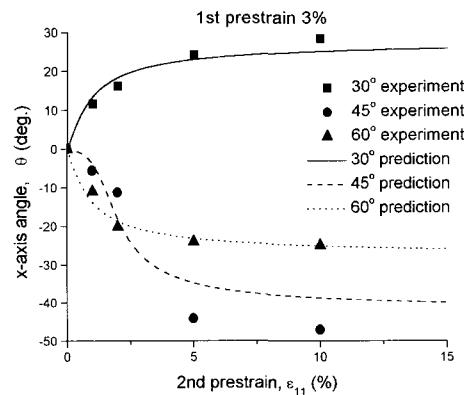


Fig. 3 Rotation of x-axis with the 2nd tensile prestrain at angle to the rolling direction for the 1st prestrain of 3% in the rolling direction

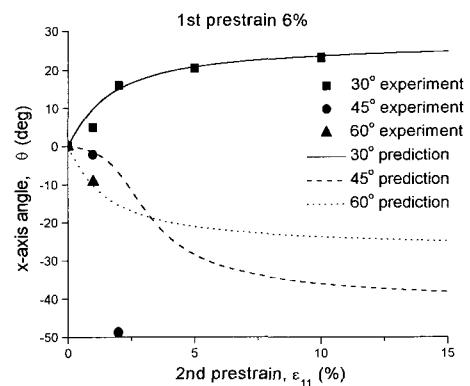


Fig. 4 Rotation of x-axis with the 2nd tensile prestrain at angle to the rolling direction for the 1st prestrain of 6% in the rolling direction

3.2 넥킹 예측

이방성 소재의 넥킹을 예측하기 위해서는 앞서 제시된 직교대칭축 회전 모델과 더불어 가공경화 특성을 기술할 수 있어야 한다. 여기서는, 앞서의 항복곡면의 형상이 닮은꼴을 유지한다는 가정 이외에 항복곡면의 체적은 소성일의 함수로 정해진다는 가정을 도입한다.

x -축으로부터 β 방향으로의 일축 인장 응력은 Hill의 2차 이방성 항복함수로부터 다음 식으로 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\sigma = [f \sin^2 \beta + g \cos^2 \beta + h + (2 - f - g - 4h) \sin^2 \beta \cos^2 \beta]^{-\frac{1}{2}} N^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

초기 소재에 대한 인장시험($\beta = 0^\circ$ 또는 90°)에서 $\sigma - \epsilon_{11}$ 곡선을 얻으면, 식(7)로부터 $\sigma - N$ 의 관계를 알 수 있다. 또한, 인장시험에서 얻은 $\sigma - \epsilon_{11}$ 곡선을 적분하면 $\sigma - W_P$ 관계를 얻을 수 있고, 이 $\sigma - W_P$ 관계와 앞서 구한 $\sigma - N$ 관계로부터 주어진 소재의 가공경화 특성으로 $N - W_P$ 관계를 결정할 수 있다.

다음, 직교대칭축 x 로부터 임의의 각도 β 로 인장 변형률 ϵ_{11} 이 가해지는 경우, ϵ_{11} 에 따른 직교대칭축의 회전($\beta - \epsilon_{11}$ 관계)을 식(1)~(4)를 이용하여 계산한다.

이상에서 구한 가공경화 특성과 직교대칭축의 방향 변화를 이용하여 일축인장 변형률증분 $\Delta \epsilon_{11}$ 후의 일축 인장응력 σ 를 구하는 방법은 다음과 같다.

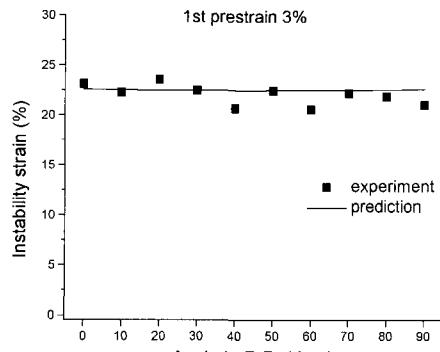
먼저, $\Delta \epsilon_{11}$ 에 대한 소성일 증분 $\Delta W_P = \sigma \Delta \epsilon_{11}$ 을 구하여 $N - W_P$ 특성으로부터 N 을 구하고, 미리 구한 $\beta - \epsilon_{11}$ 관계에서 β 를 얻어 식(7)에 대입하면 $\Delta \epsilon_{11}$ 후의 응력 σ 를 구할 수 있다. 이상의 과정을 인장변형률을 증가시켜 가며 반복함으로써 $\sigma - \epsilon_{11}$ 곡선을 수치 계산할 수 있다. 구해진 $\sigma - \epsilon_{11}$ 관계에서 $\Delta \sigma / \Delta \epsilon_{11}$ 이 σ 보다 작아지는 점을 이방성주축의 회전과 이방성 가공경화를 고려하여 예측된 넥킹 발생시점으로 한다.

3.3 예측치와 실험 결과의 비교

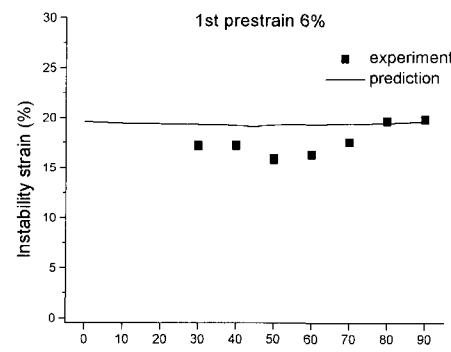
Fig. 5~7에 직교대칭축의 회전모델과 가공경화 특성으로부터 예측된 불안정 변형률을 실험 결과와 함께 나타내었다.

Fig. 5는 1차 예변형률 3%, 6% 후의 각 방향으로의 넥킹 변형률을 나타낸 것인데 실험과 예측치 모두 큰 차이 없이 비교적 일정한 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 1차 예변형률 3%, 2차 예변형률 5%인 Fig. 6(a)와 1차 예변형률 6%, 2차 예변형률 5%인 Fig. 7(a)에서도 비슷하게 나타난다.

그러나 Fig. 6(b) 와 Fig. 7 (b)-(c)에 나타낸 바와 같이, 2차 예변형률 10% 이상일 때는 예변형 방향에서의 인장 각도가 $20^\circ \sim 30^\circ$ 이상이 되면 넥킹 변형률이 급격히 떨어지는 실험결과를 보여주고 있다. 이는 예변형이 진행됨에 따라 소재의 가공경화 능력은 점점 떨어지고, 직교대칭축은 인장방향의 항복응력이 극소값이 되는 방향으로 회전하게 되므로 이로 인한 소재의 연화가 가공경화를 능가함에 따른 결과로 유추된다.



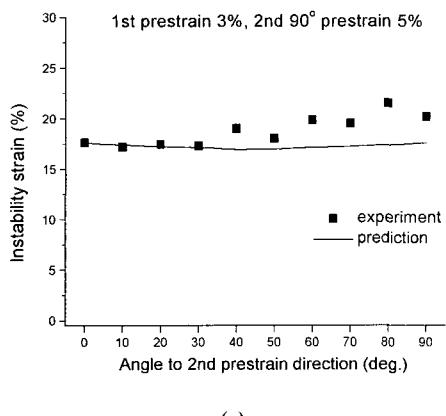
(a)



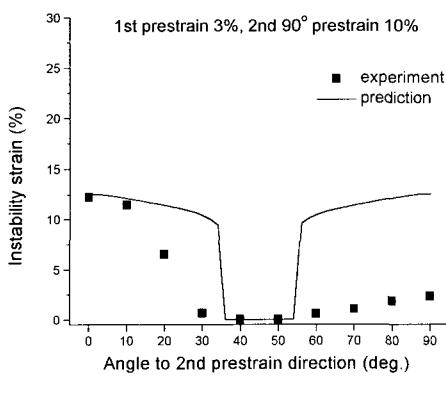
(b)

Fig. 5 Instability strain distribution of prestrained AK steel (a) after 3% prestrain to R.D. (b) after 6% prestrain to R.D.

이상의 실험결과와 예측치를 비교하면, Hill의 2차 이방성 항복함수와 개선된 직교대칭축의 회전 모델을 사용하여 비교적 양호하게 넥킹 발생시점을 예측하고 있다. 하지만 실험결과에서는 예변형 방향에서 60° 이상 회전하여 변형이 발생하면 예변형률의 크기가 작을 때는 넥킹 발생 시점이 늦어지고, 예변형률의 크기가 커지면 금방 넥킹이 발생한다. 그러나 실제 금속판재의 성형 중에 변형률의 방향이 이 정도로 급격하게 변하는 경우는 거의 없으므로 본 연구에서 제안된 모델은 박판 성형시의 넥킹 발생을 예측하기 위한 모델로 적용될 수 있을 것이다.

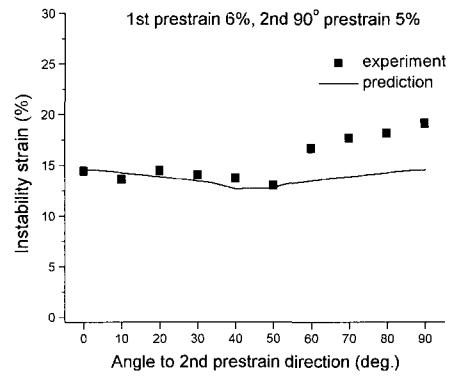


(a)

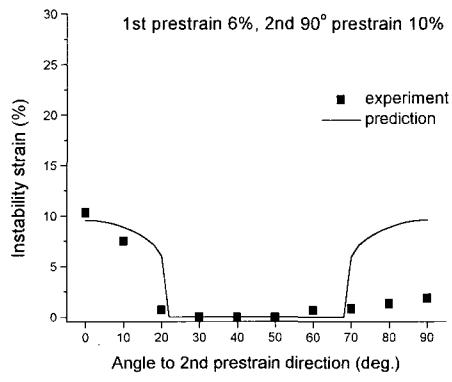


(b)

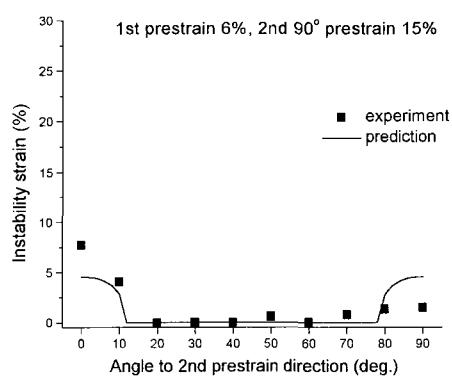
Fig. 6 Instability strain distribution of prestrained AK steel (a) after 5% 2nd prestrain orthogonal to 3% 1st prestrain direction (b) after 10% 2nd prestrain orthogonal to 3% 1st prestrain direction



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Instability strain distribution of prestrained AK steel (a) after 5% 2nd prestrain orthogonal to 6% 1st prestrain direction (b) after 10% 2nd prestrain orthogonal to 6% 1st prestrain direction (c) after 15% 2nd prestrain orthogonal to 6% 1st prestrain direction

4. 결 론

본 연구에서는 Kim과 Yin이 실험적 관찰결과에 근거하여 제안한 직교대칭축 회전모델을 실험결과의 예측정도를 높이도록 개선하였다.

또한, 예변형된 압연 강판에서 여러 각도로 넥킹 시험을 실시한 결과 예변형률이 증가하면 인장 방향이 예변형 방향에서 벗어날수록 직교 대칭축 회전의 결과로 넥킹 변형률이 급격히 낮아지는 현상을 나타내었다.

본 연구에서 제안된 단순한 모델은 직교이방성 대칭축의 방향 변화와 여러 조건에서의 넥킹 발생 시점을 비교적 양호하게 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Hill, R., 1958, "A General Theory of Uniqueness and Stability in Elastic-Plastic Solids", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 6, p. 236.
- (2) Marciniaik, Z. and Kuczynski, K. 1967, "Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 9, p. 609.
- (3) Marciniaik, Z., Kuczynski, K. and Pokora, T., 1973, "Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension ", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 15, p. 780.
- (4) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press.
- (5) Bassani, J. L., 1977, "Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 19, p. 651.
- (6) Gotoh, M., 1977, "A theory of plasticity anisotropy based on a yield function of fourth order(plane stress state)-I", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 19, p. 505.
- (7) Hill, R., 1979, "Theoretical plasticity of textured aggregates", *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, Vol. 85, p. 179.
- (8) Hill, R., 1990, "Constitutive modelling of orthotropic plasticity in sheet metals", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 38, p. 405.
- (9) Hill, R., 1993, "A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals", *J. Mech. Sci.* Vol. 35, p. 19.
- (10) Dafalias, Y. F. and Rashid, M. M., 1989, "The effect of plastic spin on anisotropic material behavior", *Int. J. Plasticity*, Vol. 5, p. 227.
- (11) Rees, D. W. A., 1996, "Sheet Orientation and Forming Limits under Diffuse Necking", *Appl. Math. Modeling*, Vol. 20, p. 624.
- (12) Rees, D. W. A. and Power, R. K., 1997, "Orientation and formability of orthotropic sheet metals", *J. Strain Analysis*, Vol. 1, No. 1, p. 61.
- (13) Chan, K. S., 1985, "Effects of Plastic Anisotropy and Yield Surface Shape on Sheet Metal Stretch ability", *Metall. Trans. A*, Vol. 16A, p. 629.
- (14) Nicolaou, P. D. and Semiatin, S. L., 1997, "An Analysis of the Effect of Normal Plastic Anisotropy on the Tensile Ductility of sheet Tension Specimens", *Scripta Materialia*, Vol. 36, No. 1, p. 83.
- (15) Esche, S. K. and Shivpuri, R., 1998,"A Consistent Criterion for Diffuse Necking in Sheet metals Using Hill's 1979 Yield Surface", *J. Eng. Mat. and Tech.* Vol. 120, p. 177.
- (16) Hu, P., Na, J. and Li, D. Y., 1998, "Bifurcation and Post-bifurcation Behaviour in Sheet Metal Tension with Strong Anisotropy", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 74, p. 276.
- (17) 김권희, 1991, "전단변형에 의한 직교 이방성의 변화", *대한기계학회논문집*, Vol. 15, p. 413.
- (18) Kim, K. H., 1992, "Evolution of anisotropy during twisting of cold drawn tubes", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, p. 127.
- (19) 인정제, 1992, "이방성 금속 판재의 가공경화특성에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교.
- (20) 김권희, 인정제, 김동원, 1992, "이방성 금속판재의 가공경화 특성에 관한 연구", 추계학술대회 및 심포지움 논문집, 1992.10.30-31, 한국과학기술원, 한국소성가공학회, 반도출판사, p. 85.
- (21) 인정제, 김권희, 1994, "평면응력하에서의 직교이방성 대칭축의 회전", *한국소성가공학회지*, 제3권 제3호 p. 320.
- (22) 김권희, 인정제, 1996, "이방성 금속판재의 가공경화에 따른 직교대칭축의 회전", *한국소성가공학회지*, 제5권 제4호 p. 320.
- (23) Kim, K. H., Yin, J. J. 1997, "Evolution of anisotropy under plane stress", *J. Mech. Phys.*

- Solids, Vol. 45, No. 5, p. 841.
- (24) Arrieux, R., Vacher, P. and Nguyen Nhat, T., 1996, "A Method to Predict the Onset of Necking in Numerical Simulation of Deep Drawing Operations", Annals of the CIRP, Vol. 45/1, p. 255.
- (25) Nguyen Nhat, T., Arrieux, R., Vacher, P. and Tabourot, L., 1998, "Plasticity Instability for off-axes Loading in Deep-drawing operation", J. Mat. Processing Technology 77., p. 175.