

판재의 일축인장 소성불안정에  
미치는 두께의 영향

한규택\*, 강대민\*, 구 양\*, 백남주\*\*

**The Effects of Thickness on the Plastic Instability  
under Uniaxial Tension in Sheet Metal**

K. T. Han, D. M. Kang, Y. Koo, N. J. Baek

**Abstract**

Plastic instability in uniaxial tension of commercial purity Al has been studied with the emphasis of effects of thickness in cold worked specimens and recrystallized specimens.

The thickness change gave rise to change in stress state and the amount of strain localization in specimen after diffuse necking. Therefore the thickness of specimen could control modes of plastic instability. Regardless of recrystallized or cold worked state, the necking mode changed from diffuse necking to local necking, at about 1.5~2mm in thickness.

\* 부산공업대학 교수

\*\*부산대학교 공과대학 교수

### 1. 서 론

판재의 인장성질을 조사함에 있어서 시편의 두께 차이에 따라서 파단형태의 변화가 나타난다는 보고가 있으며 이는 네킹(necking)형태의 변화를 시사해준다.

Hart<sup>1)</sup>는 일축인장시험시 불안정 변형조건을 제시했고 Hill<sup>2)</sup>은 판재의 국부네킹과 변형국한현상에 관하여 Ghosh<sup>3)</sup>는 판재의 확산네킹에서의 변형국한현상에 대해 연구한 바 있으며 Swift<sup>4)</sup>는 확산네킹조건을 제안하였다. 최근에는 백남주<sup>5)</sup> 등이 변형율속도가 판재의 소성불안정에 미치는 영향에 대한 연구를 발표한 바 있다. 그런데 재료의 인장성질 및 소성불안정변형에 관한 많은 연구<sup>6,7)</sup>중 일축인장된 판재에 관한 연구는 주로 얇은 판재에서만 행하여져 왔고 광범위한 두께변화에 따른 국부네킹에서 확산네킹으로의 네킹형태의 변화에 대해서는 거의 보고된 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 가능한 한 시편의 모든 조건은 동일한 상태로 하고 오직 두께만을 변화시켜 냉간가공과 재결정된 상태에서의 네킹의 형태 변화를 관찰하고 이들의 기구를 규명하는데 그 목적을 두고 있다.

### 2. 이론적 배경

일축인장된 판재가 확산네킹조건에 도달하게 되면 불안정변형의 발생에 의해서 응력상태, 국부변형을 등이 변화하게 된다. 이러한 변화는 네킹영역의 경화량을 증가시켜 변형을 안정하게 하고 이웃한 영역으로 네킹을 확장시키는데 이때 확장시키는데 이때 확장되는 거리는 그 응력상태 변화에 크게 좌우된다. 따라서 네킹영역의 응력상태는 곧 네킹형태의 변화를 지배한다고 할 수 있다. 판재에 있어서 확산네킹 이후에 작용하는 이축 응력상태가 소성불안정 변형에 미치는 영향을 조사하기 위하여 불안정변형의 조건을 등가응력( $\bar{\sigma}$ ), 등가변형율( $\bar{\epsilon}$ )식으로 변환시키면 다음과 같다.

즉,  $\sigma_1, X\sigma_1, \sigma_3 = 0$  일때 불안정변형 조건식은

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{Z_1} \dots \dots \dots (1)$$

이다.

여기서,  $Z_1$  : 국부네킹일 경우 ( $i=l$ )

$$Z_l = \frac{2(1-X+X^2)^{1/2}}{1+X}$$

확산네킹일 경우 ( $i=d$ )

$$Z_d = \frac{4(1-X+X^2)^{1/2}}{(1+X)(4-7X+4X^2)}$$

한편,

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}^{1/2} \\ = \sigma_1 (1-X+X^2)^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \{ (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \}^{1/2}$$

체적불변조건과 Levy-Mises식을 고려하면,

$$\bar{\epsilon} = 2\epsilon_1 \frac{(1-X+X^2)^{1/2}}{(2-X)} \dots \dots \dots (3)$$

이때 국부네킹각  $\phi = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left\{ \frac{X+1}{3(X-1)} \right\} \dots (4)$

식(4)에서 일축인장응력인 경우( $x=0$ )에  $\phi$ 는 약 54.7°이며  $x$ 가 1/2에 이르기까지  $\phi$ 는  $x$ 에 따라 증가하며  $x=1/2$ 이면  $\phi=90^\circ$ 가 된다. 그러나  $x>1/2$ 이면  $\epsilon_2 > 0$ 가 되어 국부네킹이 일어날 수 없다.

국부네킹영역과 확산네킹영역을 구분짓는 두가지 변수, 평균응력비  $x$ 와 이방성계수  $R$ 에 대한 불안정변형조건을 임계접선영(Critical Subtangent)의 역수값( $=1/Z_1$ )로 나타내어 보면 완전등방성재료의 경우 식(1)에서  $x$ 의 변화에 대한 불안정 변형조건을  $\beta$ 로 생각할 때  $x$ 가 0에서부터 1/2까지 증가할수록 확산네킹을 시작하여 다시 국부네킹을 일으키는데 통과해야 하는 확산네킹구간의 길이가 짧아져감을 알 수 있다.

### 3. 실험방법

본실험의 재료는 공업용순도AI을 사용하였는데

시편의 제작은 주괴를 두께 15mm로 절단하여 Muffle로에서 500°C, 40분간 열처리한 후 공냉하여 냉간압연하였는데 그 가공공정은 Fig.1과 같으며 냉간압연가공은 직경 125mm인 실험실용 2단 압연기를 사용하였다. 압연시 두께변화에 따른 가공도차에 의한 영향을 줄이고자 각 path의 두께감소율을 가능한 한 동일하게 하였다. 또한 일방향 압연으로 발생할 수 있는 이방성의 영향도 최대한 없애고자 가로, 세로 방향으로 가능한한 일정한 변형으로 한번에 0.2~0.3mm씩 줄였으며 불균일 변형을 최소한으로 줄이기 위해 압연용 윤활유를 충분히 가해 주었다. 한편, Fig.1과 같은 공정에서 준비된 각 두께의 시편중 일부는 재결

정시켜 인장시험을 하였고 각 가공 공정후에 소금비율이  $KNO_3 : NaNO_3$ 가 55 : 45인 염욕로를 사용하여 540°C에서 40분간 열처리하여 공냉시켰다. 열처리시 시편주입으로 인한 온도변화를 최소화하기 위해 소금의 양을 약 4.5ℓ 정도로 크게 하였다. 이상과 같이 각기 다른 두께의 시편은 가로, 세로방향으로 임의로 인장시편을 제작하였는데 그 규격은 Fig.2와 같다. 인장시편은 그 폭방향 및 길이방향의 국부변형량을 측정하고자 원형격자가 있는 스텐슬(stencil)을 사용하여 광격자법(photo grid technique)으로 시편위에 원형격자를 프린팅하였는데 원형격자의 열이 표점거리 구간의 가장자리선과 평행이 되도록 유의하였다.

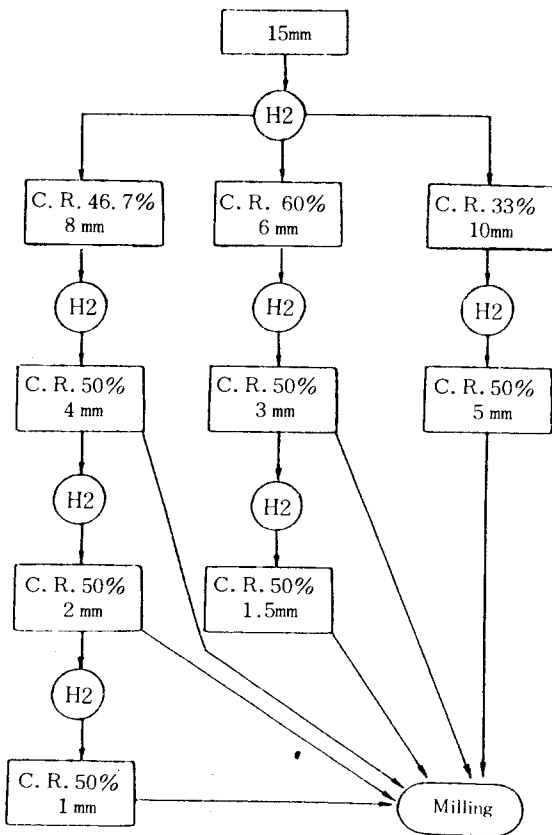


Fig.1 Deformation procedure on commercial purity Al

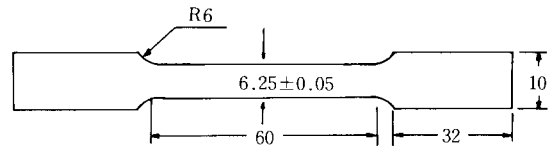


Fig.2 Dimension and shape of tension specimen.

인장시험은 최대 하중이 10톤인 Instron을 사용하여 크로스헤드속도를 1mm/min로 하여 시험하였다.

각 인장시편은 동일한 재질, 동일한 조건의 경우라도 각 두께에 따른 하중의 차이를 보다 정확히 나타내고자 하중범위를 변화시켜가며 시험하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4-1. 기계적 성질

인장시험을 통하여 응력-변형률선도를 구하고 이때 하중은 무게 20kg, 30kg, 50kg인 추를 이용하여 보정하였고 신장량은 표점거리 60mm내에서만 일어난 것으로 가정하였는데 실제 표점거리 외의 부분은 프린팅된 원형격자를 이용하여 국부변형량을 측정해본 결과 변형이 무시할 수 있을 정도로 작은 것이 확인되었다. 두께변화에

있을 정도로 작은 것이 확인되었다. 두께변화에 따른 0.2%항복 및 인장강도와 균일변형도(uniform strain)값을 비교해 보면 Fig.3과 같다. 여기서 시편두께는 이들 기계적 성질에 거의 영향을 미치지않고 있는데 단지 인장강도값이 냉간가공한 시편은 얇은 것일수록 재결정한 시편은 두꺼운 것일수록 커지는 현상을 나타내고 있다. 이것

은 냉간가공도가 두께감소율로 계산되었기 때문으로 생각된다. 판재를 냉간압연할 때 얇은 것일수록 폭방향변형이 적을 것이므로 같은 두께감소율을 갖더라도 실제 가공도는 얇은 것이 더 커져 인장강도는 증가된다. 또한 이를 재결정시키면 얇은 것일수록 보다 빨리 재결정이 일어나 결정성장을 진행시켜 인장강도가 작아지게 된다.

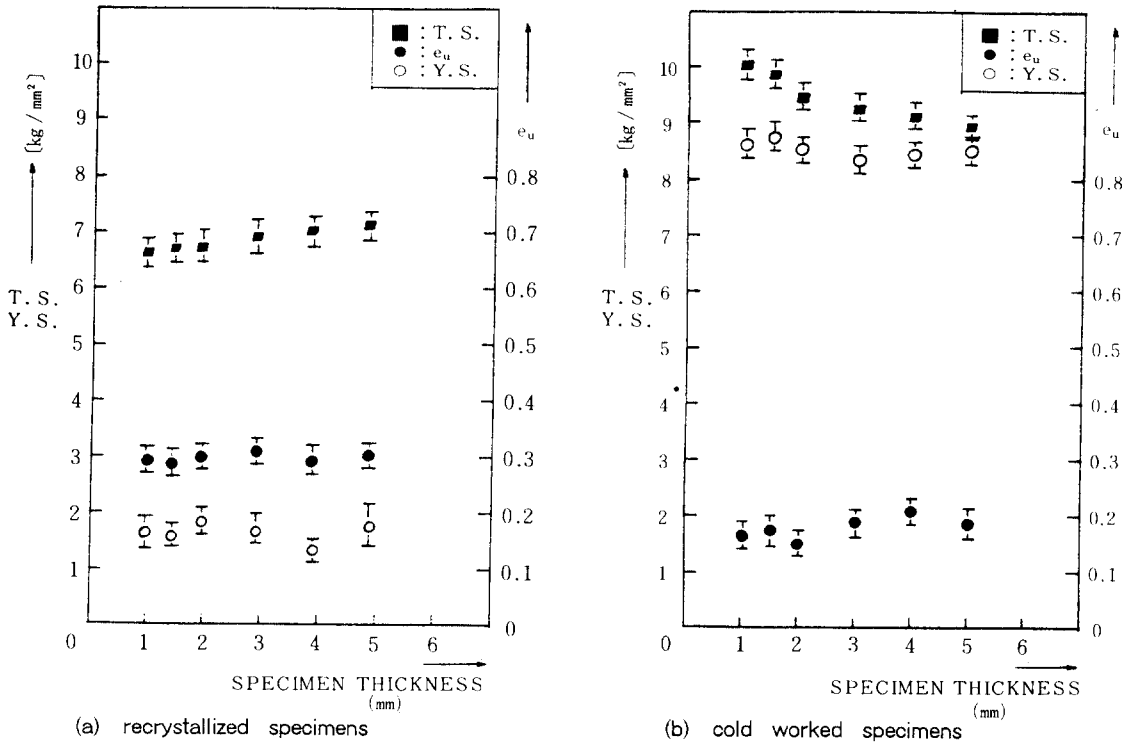


Fig.3 Mechanical properties of commercial purity Al as a function of thickness

4-2. 네킹형태의 변화

재결정된 공업용순도Al의 경우는 photo 1에서 보는 바와 같이 시편 전체에 걸쳐서 심한 소성 변형이 일어났다. 두께 3, 4, 5mm시편은 균일신장후 심한 변형국한현상에 의한 확산네킹이 발생하여 이의 진행에 의해 파괴되었으나 두께 1, 1.5mm시편의 경우는 덜 발달된 변형국한현상을 나타내며 확산네킹이 완만하게 진행된 후 인장축과 55°~70°의 각을 이루면서 국부네킹에 의해 파

단이 일어났다. 2mm두께의 시편인 경우는 앞의 두경우의 중간정도인 비교적 완만한 확산네킹이 일어나 응력축에 수직으로 파괴되었다. 냉간가공된 공업용순도 Al의 경우는 Photo 2에서 보는 바와 같이 소성변형이 극히 적은반면 그 변형국한된 정도는 두께에 따라 재결정 시킨 경우와 비슷한 경향을 나타내었는데 특징적인 것은 두께1mm인 시편에 있어 국부네킹각이 재결정시편 경우보다 작아서 55°에 보다 접근하고 있다.

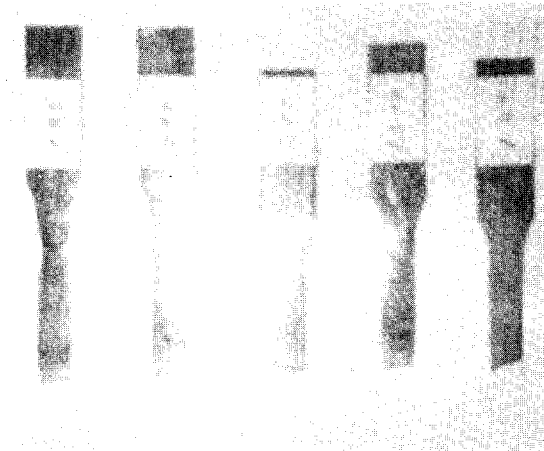


Photo1 Change of necking modes as a function of thickness in recrystallized commercial purity Al

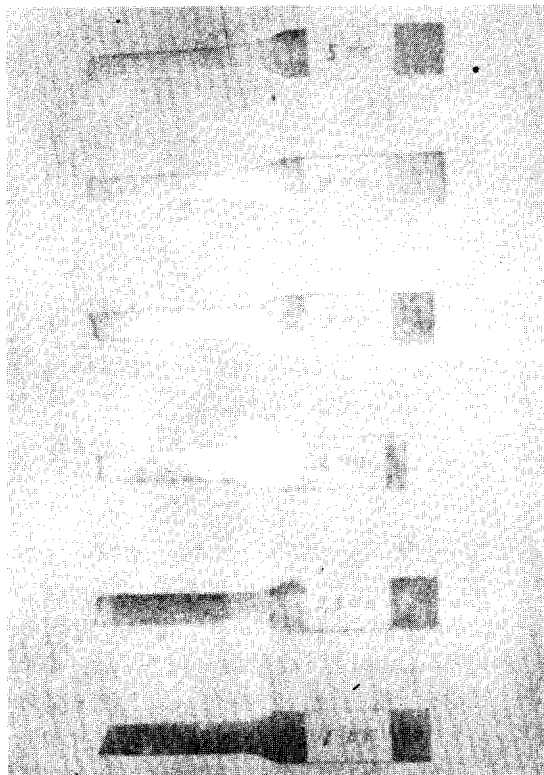


Photo2 Change of necking modes as a function of thickness in cold worked commercial purity Al

### 4-3. 두께변화의 영향

재결정된 상업용순도Al경우 프린팅된 원형격자를 이용하여 파괴후 개개의 길이 및 폭방향 국부변형율을 측정하고 이에따른 두께방향 국부변형율을 소성변형의 체적불변조건에 의해서 구한 다음 네킹으로부터의 초기거리에 따라서 그린것이 Fig. 4(a)이다. 지금 국부네킹에 의해 파괴된 1, 1.5mm 시편과 이와 유사한 네킹에 의해 파괴된 2mm 시편에 있어 길이 및 폭방향 국부변형율을 각각  $\epsilon_{1\ell}^*$ ,  $\epsilon_{2\ell}^*$  라 하고 이에대해 확산네킹에 의해 파괴된 3, 4mm 시편에 있어 그 길이방향 및 폭방향 국부변형율을  $\epsilon_{1d}^*$ ,  $\epsilon_{2d}^*$  라 하면 네킹에 인접한 영역에서  $\epsilon_{1\ell}^* > \epsilon_{1d}^*$ ,  $\epsilon_{1d}^* = \epsilon_{2d}^*$ 임을 알 수 있다.

따라서  $\epsilon_{3\ell}^* > \epsilon_{3d}^*$  또한,  $\epsilon_{2d}^* \approx \epsilon_{3d}^* \approx \frac{1}{2}\epsilon_{1d}^*$ 이다.

판재가 균일연신후 불안정변형조건에 도달하면 확산네킹이 시작되는데 이 초기 확산네킹영역은 응력상태 변화 및 재료의 가공경화에 의해 다시 안정하게 되고 네킹은 시편의 길이방향을 따라 확장을 일으킨다. 시편의 초기두께 변화는 초기 확산네킹이 확장될 때 응력상태 및 그 확장되는 정도의 차이를 가져오게 하여 국부네킹에 의한 파괴를 일으키거나 다시 확산네킹을 발달시켜 파괴되게 한다. 이러한 다시 발달된 확산네킹을 초기 확산네킹과 구별하여 2차 확산네킹이라 하면 Fig. 4(a)에서  $\epsilon_{3\ell}^*$  과  $\epsilon_{3d}^*$ 의 차이는 초기 확산네킹의 시편두께에 따른 변형국한정도의 차이와 그때의 응력상태 변화를 나타낸다. 두께가 2mm 이하인 시편에 있어 초기확산네킹에 의한 변형국한정도는 두께방향으로는 거의없이 폭방향으로만 나타났는데 시편의 두께가 얇은 것일수록 길이방향과 거의 평행하게 작아지는 경향을 나타냈다.

두께가 2mm 이상이 되면 초기 확산네킹에 의한 변형국한현상은 폭뿐만 아니라 두께방향으로도 나타나게 되는데 이러한 폭 및 두께방향으로의 네킹형성은 3축 응력상태를 일으켜 인장축과 각을 이루며 파괴되는 국부네킹을 불가능하게 한다. 한편, 두께 2mm 이하의 국부네킹에 의해 파괴된 시편을 평면응력비X를  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 로 나타낸식  $X =$

$\frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3}$  에 Fig. 4(a)에 나타난 국부변형률값을 대입하여 구해보면 시편의 두께가 얇은 것일수록 평면 응력비가 작아져 일축응력상태에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 또한 평면응력비X가 커져감에 따라서 Z의 크기가 작아져서 초기 확산네킹조건과 국부네킹 조건의 차이가 작아짐을 알 수 있고 이러한 Z의 감소는 초기 확산네킹 이후 2차 확산네킹에 의한 파괴가 일어나기 전에 국부네킹에 의한 파괴를 일으키는 경향을 증가시킨다. 따라서 시편의 초기두께의 증가는 평면응력비X를 증가시켜 국부네킹에 의한 파괴를 일으키려는 경향을 증가시킨다. 이상에 설명한 바와 같이 시편 두께 변화에 따른 변형국한 정도의 차이와 응력상태 변화의 차이는 서로 상반된 작용을 한다.

이들을 종합하여 보면 1mm 두께의 시편은 변형국한 정도가 극히 적어 일축응력 상태에 가깝게 국부네킹이 일어나 국부네킹각 $\phi$ 가  $55^\circ < \phi < 90^\circ$ 인

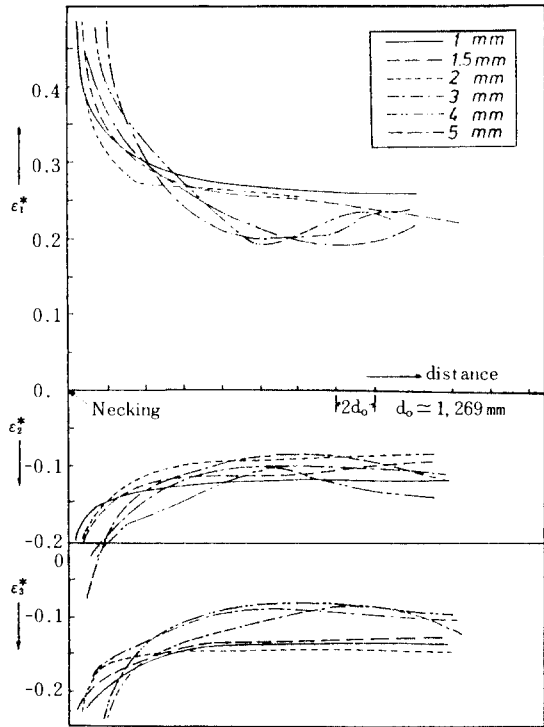


Fig. 4(a) Longitudinal strain distribution as a function of thickness at fracture in recrystallized specimens.

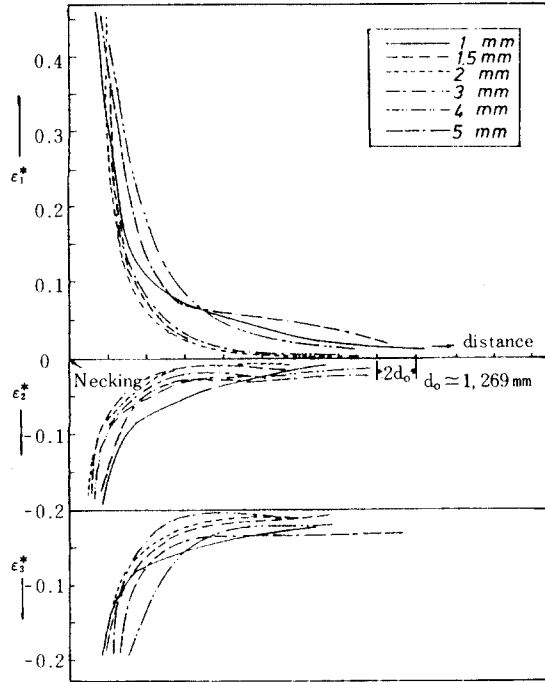


Fig. 4(b) Longitudinal strain distribution as a function of thickness at fracture in cold worked specimens.

값을 갖으면서 점차 증가한다. 시편의 두께가 2mm를 넘어 더욱 두꺼워지면 초기 확산네킹에 의한 변형국한 정도가 커져 폭방향 및 두께방향의 국부적인 수축을 일으켜 3축 응력상태를 형성하게 되어 2차 확산네킹에 의해 파괴가 일어나게 된다.

실험결과 국부네킹과 2차 확산네킹을 구분짓는 임계두께는 약 1.5~2mm로 나타났다. 다음으로 냉간압연의 경우를 보면 국부변형률은 Fig. 4(b)에 나타나 있다. 이 그림에서 네킹과 인접한 영역외에는 국부변형률이 매우 작아 네킹형태에 관계없이 차이를 찾지 못했다. 그러나 네킹영역과 인접한 영역의 국부변형률은 재결정된 시편의 경우와 비슷한 응력상태를 나타내주고 있다. 또한 냉간압연된 시편이 평면등방성을 갖는다고 할 때 국부변형률 값으로부터 이방성계수 R값을 구해보면 냉간가공에 의해 R>1로 증가됨을 알 수 있다. 한편, 냉간압연된 시편을 관찰해 보면 시편의 두께변화에 따른 변형국한 정도의 차이는 재결정된 시편과 거의 같다. 여기서 냉간가공된 시편이라

도 2mm 이상 두꺼운 시편은 초기 확산네킹에 의한 불안정변형이 폭 및 두께방향으로 형성되어 3축 응력상태를 일으켜서 인장축과 각을 이루는 국부 네킹이 일어날 수 없음을 알 수 있다. Fig. 5는 재결정된 시편과 냉간압연된 시편의 불안정변형을 일으키는 변형률 차이를 나타내고 있는데 냉간압연된 시편은 n값 감소에 의해 초기 확산네킹을 일으키는 변형률  $\epsilon_{dc}$ 와 국부네킹을 일으키는  $\epsilon_{lc}$ 의 차이가 재결정된 경우보다 훨씬 작다. 이 상에서 냉간압연된 시편은 n값의 감소로 인해 초기 확산네킹 이후 재결정된 시편보다 용이하게 국부네킹조건에 도달할 수 있으나 시편의 두께가 두꺼워져 초기네킹에 의한 변형국한 정도가 커지면 폭 및 두께방향으로 불안정변형을 일으켜서 3축응력 상태가 형성되면 국부네킹에 의한 파괴는 불가능하게 된다. 이는 냉간 압연된 얇은 시편의 국부네킹각이 재결정된 시편의 국부네킹각보다 작고 시편의 국부네킹에 의한 파괴와 확산네킹에 의한 파괴를 구분짓는 임계두께가 재결정된 시편의 경우와 같음을 잘 설명해 준다.

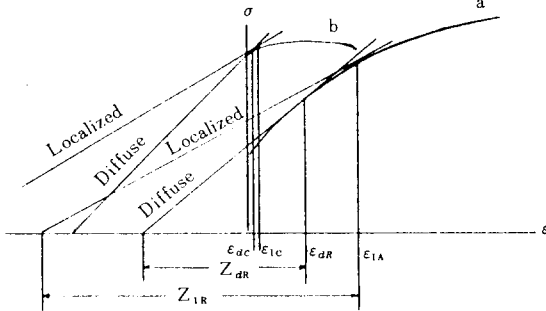


Fig. 5 Strain that causes unstable flow as a function of necking modes.

- (a) recrystallized specimen
- (b) cold worked specimen

### 5. 결 론

1) 일축인장된 A1판재에 있어서 두께변화는 소성 불안정조건 하에서 시편에 작용하는 응력상태를 변화시켜 확산네킹이 발생한 다음 국부네킹을 유발시키는 조건에 이르기까지 변형률의 크기를 결정하는 인자로서 작용한다. 재결정

된 공업용A1의 네킹형태의 변화에서 특히 분명하다.

- 2) 냉간압연된 시편은 이방성계수R을 증가시켜 결론1의 효과를 감소시키나 이때 가공경화지수 n역시 감소시켜 국부네킹을 용이하게 일어나게 한다.
- 3) 네킹형태의 변화는 냉간가공이나 재결정에 관계없이 두께변화에 따른 변형국한 정도의 차이에 의존하며 두께 1.5~2mm를 전후하여 시편의 두께가 얇아짐에 따라 확산네킹에서 국부네킹으로의 변화를 나타내었다.

### 參 考 文 獻

- 1) E. W. Hart, "Theory of Tensile Test", Acta. Met., Vol. 15, PP. 351~355, 1967
- 2) R. Hill, "On Discontinuous Plastic States with Special Reference to Localized Necking in Thin Sheets", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 2, PP. 19~30, 1952
- 3) A. K. Ghosh, "Strain Localization in the Diffuse Neck in Sheet Metal", Met. Trans., Vol. 5, PP. 1607~1616, 1974
- 4) H. W. Swift, "Plastic Instability under Plane Stress", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 1, PP. 1~18, 1952
- 5) N. J. Baek and K. T. Han, "The Effect of Strain Rate on the Instability of sheet Metal", KSME, Vol. 12, PP. 935~943, 1988
- 6) S. P. Keeler and W. A. Backofen, "Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches", Trans. ASM, Vol. 56, PP. 25~48, 1963
- 7) Z. Marciniak and K. Kuzynski, "Limit Strains in the Processes of Stretch-forming Sheet Metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, PP. 609~620, 1967
- 8) 後藤學, 日本機械學會論文集 A編, 第49卷, P. 92, 1983