

<論 文>

# 승용차용 SPC 3 EN 킬드 강판의 등 2 축 인장 가공성에 관한 연구

김 동 원\* · 서 대 교\*\* · 김 형 종\*\*\*

(1986년 4월 8일 접수)

## A Study on the Equi-Biaxial Tensile Workability for the SPC 3 EN Automobile Killed Steel Sheets

Dong Won Kim, Dae Gyo Seo and Hyung Jong Kim

**Key Words:** New Yield Criterion(신 이방성 이론), New Parameter,  $m$ (새로운 변수,  $m$ ) Strain Dependence of  $R$ -Value( $R$  값의 변형률 의존성), Equi-Biaxial Tension (등 2 축 인장)

### Abstract

For the analysis of equi-biaxial tension, the Lankford values at the various strain levels were measured experimentally at first. It was clarified that the  $R$  values depend on strain to a great extent and based on this result, the analysis of the equi-biaxial tension was carried out.

Hill's new yield criterion was used to predict the stress-strain curves theoretically. The value of new parameter,  $m$  for the coincidence of the theory with the experiment was 2.1.

It is desired that the optimum  $R$ -value in the case of  $m=2.1$  is measured at strain, 15% for the reasonable correlation between theory and experiment.

### 기 호 설 명

$l_0, l$  : 변형전후 격자의 길이방향 치수  
 $m$  : 수정계수  
 $P$  : 벌지가공에서의 유압  
 $R$  : Lankford 값  
 $R_0, R_{45}, R_{90}$  : 압연방향에 대하여  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  방향으로 채취한 인장시편에서 얻은  $R$  값  
 $\bar{R}$  : 평균  $R$  값

$t$  : 벌지시험편의 가공 후의 두께  
 $w_0, w$  : 변형전후 격자의 폭방향 치수  
 $\epsilon_{av}$  : 평균 변형률  
 $\epsilon_z$  : 두께방향의 변형률  
 $d\epsilon_{av}$  : 평균 변형률 증분  
 $d\epsilon_z$  : 두께방향의 변형률 증분  
 $\sigma_{av}$  : 평균 응력  
 $\sigma_z$  : 두께방향의 응력  
 $\rho$  : 성형된 벌지시험편의 곡률반경  
 $\theta$  : 압연방향에 대한 각도  
 $r$  : 극점(pole)에서 측정점까지의 수평거리

\* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과  
 \*\* 정회원, 성균관대학교 공과대학 기계설계학과  
 \*\*\* 정회원, 서울대학교 대학원

d : 극점에서 측정점까지의 수직거리

## 1. 서 론

일찌기 Bramley<sup>(1)</sup> 등은 안정화 처리한 강판(stabilized steel sheet)에 대한 벌지 시험을 하여, 그 결과를 단축인장실험결과로부터 이론적으로 추적한 바 있다.  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 인 시험편으로 단축인장실험을 한 결과, 진응력-진변형률 곡선은 각도에 따라 약간의 차이가 있었다.

그는 벌지 실험결과를 이론적으로 추적함에 있어서 세가지 방향으로 시도하였다.  $0^\circ, 45^\circ$  및  $90^\circ$ 의 인장 시험선도를 각각 근거로 하고, Lankford 값은 그 각도에 대응하여 일정하게 취하였다. 그 결과  $\bar{R}$ 를 근거로 추적함이 더 양호한 결과를 얻을 수 있음을 밝혔다. 그 후  $\bar{R}$ 를 이용하여 등 2축인장에 대한 진응력-진변형률 곡선에 관한 이론적 추적이 Pearce<sup>(2)</sup>에 의하여 여러가지 재료를 대상으로 시도된 바 있다.

그 결과 립드강, 아연, 알루미늄, 황동등 많은 재료에서 이론과 실험에 있어서 차이가 컸다. Woodthorpe<sup>(3)</sup> 등은 알루미늄을 대상으로 하여 5%, 10%, 15%, 20%, 25%의 5가지 압하율로 냉간 압연을 해가며 계속 추적하였으나, 이론과 실험의 차이는 좁혀지지 않았다.

Mellor<sup>(4)</sup> 등이 근래에 와서 실험을 하였으나 그 결과는 Pearce의 결과와 흡사하였다. 본 연구는 이상의 연구결과들을 비교한 결과, Hill에 의하여 최근에 제안된 새 항복조건식을 토대로 하여, 종래의 해석방법과 새 항복조건식에 의한 해석방법을 종합 검토함으로써, 실험결과와 이론적 해석결과와의 합리적인 접근을 얻을 수 있다고 예상하여 수행되었다. 더 나아가 Pearce가 그의 연구 결과에 대한 고찰에서, 아마도  $R$  값(Lankford 값)이 변형도중에 계속 일정하게 유지되지 않을 것이며, 그것이 실험결과가 이론적 해석결과와 일치하지 않는 한가지 원인이 될 수 있다고 언급한 사실을 고려하고, 최근  $R$  값에 대한 연구에서<sup>(5-8)</sup>  $R$  값이 변형률의 크기에 의존된다는 사실을 감안하여  $R$  값을 실제로 측정하였으며, 그 결과를 등 2축인장에서의 응력-변형률선도를 해석하는데 적용하였다.

## 2. 이론적 고찰

벌지 가공에서 성형된 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 가정하였다.

이러한 가정은 일찌기 Bramley<sup>(1)</sup>, Pearce<sup>(2)</sup>, Wood-

thorpe<sup>(3)</sup> 등도 채택한 바 있다. 벌지가공에서의 응력-변형률 해석은 이를 단축압축응력과 그에 대응하는 두께방향의 변형률과의 상호관계로 변환하여 고찰함으로써, 실제벌지가공에서의 등 2축 인장응력과 그에 대응하는 변형률과의 관계를 이론적으로 추적할 수가 있다 이를 위한 이론식으로서는 다음과 같은 식이 자주 적용되어 왔다.

$$\sigma_z = \{(1 + \bar{R})/2\}^{1/2} \cdot \sigma_{av} \quad (1)$$

$$\epsilon_z = \{2/(1 + \bar{R})\}^{1/2} \cdot \epsilon_{av} \quad (2)$$

최근 Hill은 다음과 같은 새로운 항복 조건식을 제안하였으며, Taghvaipour<sup>(4)</sup>는 이 식에 의한 해석결과가 식 (1), (2)에 의한 결과보다 우월하다는 발표를 한 바 있다. 그러나 여기에 대한 연구는 현재까지 많지 않다.

$$(1 + 2R)|\sigma_1 - \sigma_2|^m + |\sigma_1 + \sigma_2|^m = 2(1 + R)Y^m \quad (3)$$

식 (3)의  $m$  값은 새로운 계수로서 이 값이  $m=2$ 일 때는 종래의 항복조건식과 일치된다. 즉, 새 항복조건식에서는  $m=2$ 로 고정하지 않음으로써, 재료에 따라서  $m$  값을 따로정하여야 된다는 것이 근본적인 차이점이다. 따라서, 재료에 따라 실험과 이론적 해석을 통하여  $m$  값을 결정해 준다는 것은 큰 의미가 있다.

식 (1), (2)들이 식 (3)으로부터 유도될때 그 결과는 다음과 같다.

$$\sigma_z = \frac{[2(1 + \bar{R})]^{1/2}}{2} \cdot \sigma_{av} \quad (4)$$

$$d\epsilon_z = \frac{2}{[2(1 + \bar{R})]^{1/m}} \cdot d\epsilon_{av} \quad (5)$$

식 (5)는 전변형률(total strain)의 항으로도 표시되고 있으나, 본 연구에서는 식 (4), (5)에 의한 이론적 해석과, 여기에  $R$  값의 변형률 의존성이 함께 고려되고 있으므로 증분항으로 표시하였다.

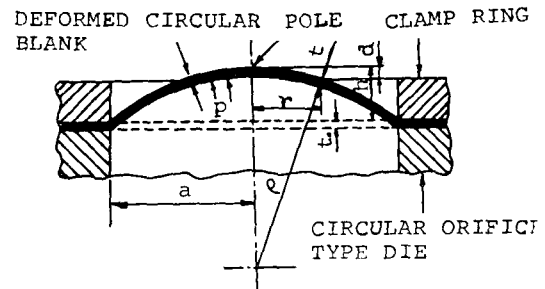


Fig. 1 Geometry of the deformed blank during a hydrostatic bulge test

### 3. R 값의 측정 및 결과

실험에 사용한 재료는 현재 국내에서 각종 승용차용으로 가장 널리 쓰이고 있는 0.8mm 두께의 SPC 3 EN 킬드 강판을 승용차 제조업체로부터 직접 구입하여 사용하였다. 재료의 화학성분은 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of test piece(%)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.0495	0.03215	0.2264	0.01125	0.0102	0.01805
Sn	Al	Ni	Cr	V	
0.00045	0.04775	0.0138	0.0103	0.00125	

시험편은 900mm×1800mm의 연강판에서, 채취하는 위치에 대하여 주의를 기울였다. 즉 단축인장시험, 2축인장 벌지시험을 수행함에 있어서, 소요 블랭크나 인장시험편의 채취 위치가 일정하게 되게하였다. 연강판의 가장자리 4번으로부터 수직거리 100mm의 선을 그어 그 내부에 지름 305mm의 원을 10개그렸다. 실험에 사용한  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  인장시험편들은 이 원의 중심부에서 채취하였다. 같은 각도에 대하여 각각 3개 이상의 시험편을 준비하여 각 시험편에 일변의 길이 2mm인 정방형 격자를 포토그리딩(Photo-Gridding)법으로 입혔다.

실험은 용량 500kg의 인장시험기를 사용하여 크로스 헤드속도(cross head speed) 5mm/min(차트속도 20mm/min)로 일정하게 하고, 하향복점이 끝나는 응력에서부터 인장강도에 이르기까지 Fig. 2의 인장시험편으로 Fig. 3과 같이 5~6 단계로 인장시험을 중단하여, 정밀도 0.001mm의 마이크로미터가 부착된 윤곽투영장치(profile projector)로 격자의 치수를 읽은후 인장을 계속하는 방법으로 하였다. 측정은 Fig. 4와 같이 시험편 중심부에 24개의 정방형 격자를 입히

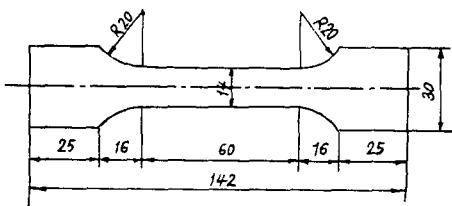


Fig. 2 Dimension of tensile test piece

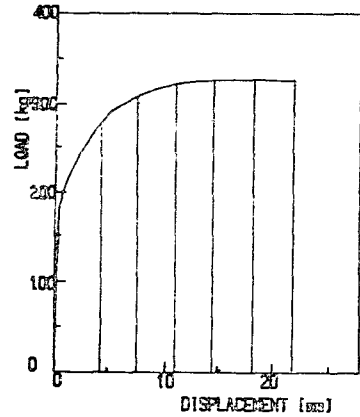
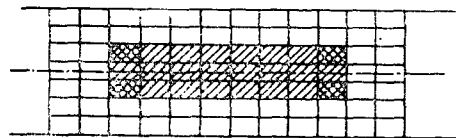
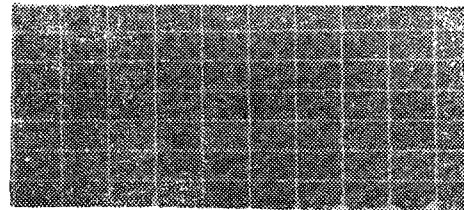


Fig. 3 Typical load-elongation curve of the tensile testing sequence



(a)



(b)

Fig. 4 Scribed squares on the test piece

고 이들에 대하여 Fig. 3의 매단계마다 이들 격자에 대한 변의 길이를 읽어서 다음의 식 (6)으로부터 R 값을 각각의 격자에 대하여 계산한후 24개의 격자전체에 대한 값들의 평균값을 취하여 그 변형률에서의 R 값으로 취하였다.

$$R = \frac{-\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{w}{w_0}} \quad (6)$$

이와같이 하여 얻은 R 값의 측정결과는 Fig. 5~7과 같다. 보는바와 같이 R 값은 예상한대로 변형률 크기에 의존되고 있으며 이러한 사실은 저자에 의하여서도 이미 일반구조용 연강판(0.5mm 두께)에 대하여 실험적으로 밝혀진 바 있다<sup>(9)</sup>. 뿐만 아니라 최근의 연구에서도 이러한 결과들이 발표되고 있으므로 새로운 사실은 아니라고 생각된다.<sup>(5~8)</sup>

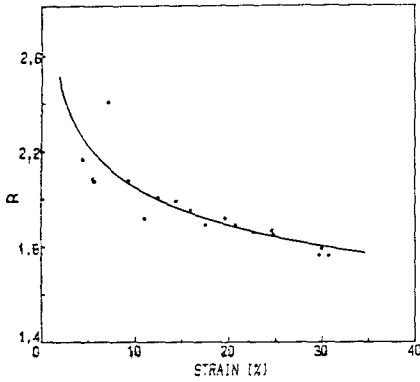


Fig. 5 Experimental  $R$  values for  $0^\circ$  test pieces

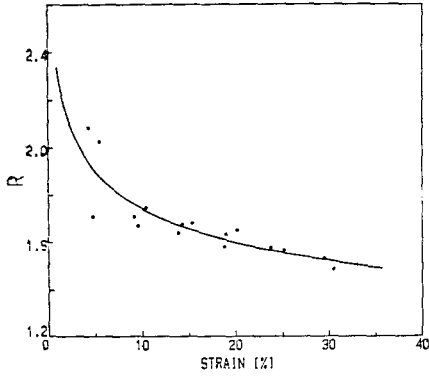


Fig. 6 Experimental  $R$  values for  $45^\circ$  test pieces

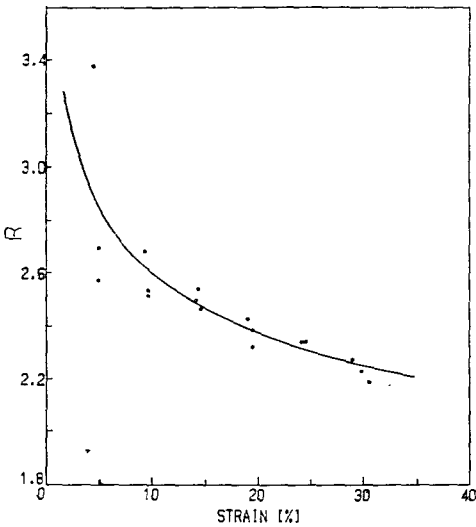


Fig. 7 Experimental  $R$  values for  $90^\circ$  test pieces

4. 이론적 응력-변형률곡선

등 2축 인장에 대한 이론적인 응력-변형률 곡선을 얻기 위하여 식 (4)와 식 (5)를 이용하였다. 이를 수행하기 위하여 먼저 단축인장에 대한 진응력-진 변형률 곡선이 필요하므로 이것을 Fig. 3과 같은 인장시험을 통하여  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 모두 구하였다. 그 결과는 Fig. 8과 같다. 식 (4)의  $\sigma_z$ 를 얻기 위하여는, 변형률을 1%~18% 까지 1% 간격으로 18 단계로 구분하고, 각 변형률에 대응하는 단축인장시험 선도상의 응력을 Fig. 8로부터  $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 모두 읽고, 이를 평균하여  $\sigma_{av}$ 로 취하였으며, 그 변형률에 대응하는 평균  $R$  값  $\bar{R}$ 는, Fig. 5~7로부터 읽은후

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4}$$

으로 계산하여 취하였다. 한편 식 (5)의  $d\epsilon_z$ 를 얻기 위하여는 변형률을 1% 간격으로 18 단계로 구분하였으므로 각 단계 양단의  $\bar{R}$ 로 취해 나가면서 수치적분을 함으로써,  $R$  값의 변형률 의존성을 계산에 고려하고자 하였다.

식 (4), (5)의  $m$  값은, 현재까지 이를 측정할수 있는 실험방법과 실험장치의 규격등에 대한 표준화가 되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는,  $m=2$ 인 경우, 즉, 식 (1), (2)에 의한 이론적 결과를 먼저 실험결과와 비교한후 이를 실험결과와 접근시키기 위하여  $m=2-2.2$  사이의 값을 점차적으로 대입함으로써  $m$  값의 최적치를 찾코자 하였다.

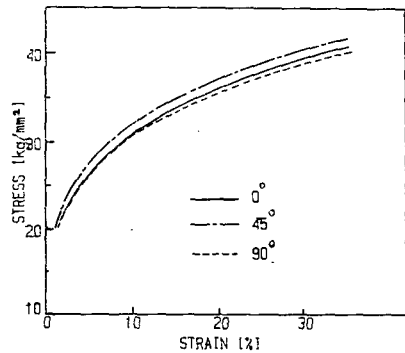


Fig. 8 Stress-strain curves for simple tensile tests

5. 벌지가공 실험

이상의 이론적인 해석결과를 고찰하기 위하여 벌지 실험을 하였다.

실험장치는 최대압력 400kg/cm<sup>2</sup>, 최대시험편 두께 3mm, 다이직경  $\phi$ 150mm인 벌지 시험기를 사용하였다. 198×198mm의 정방형으로 20여개의 시험편을 가공하여, 동심원모양의 격자원을 포토그리딩법으로 입혔으며 실험중 시험편의 고정압력 (clamp pressure)은 60 ton으로 일정하게 하고, 2축 인장을 위한 가압용 오일뱅크도 일정하게 고정하였다. Fig. 9에서와 같이 유압 20kg/cm<sup>2</sup>~55kg/cm<sup>2</sup> 사이의 6단계의 벌지 압력으로 가공하였다. 이렇게 함으로써, Fig. 1에서의  $r$  및  $d$  값은 측정이 가능하므로,  $\rho = (r^2 + d^2) / 2d$ 인 관계로부터 곡률반경,  $\rho$ 를 알 수 있다. 여기서  $r$ 는 극점 (pole)에서 임의 위치까지의 수평거리이며  $d$ 는 극점에서부터 그점까지의 수직거리이다. 측정은 시험편을 공구원미경 테이블위에 고정하여 수평거리는 조절하였으며 수직거리는 1/1000mm 정밀도의 디지털 게이지를 별도로 공구원미경에 부착하여 측정하였다.

가공후의 극점에 있는 격자원을 공구원미경으로 측정 한 것은 현의길이이므로 소요변형률을 얻기 위하

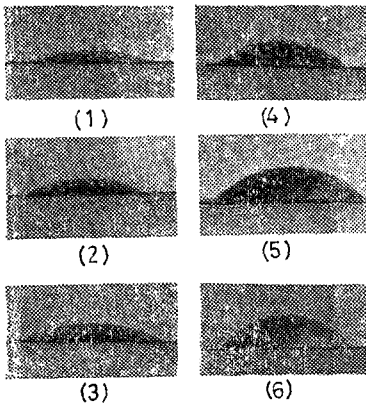
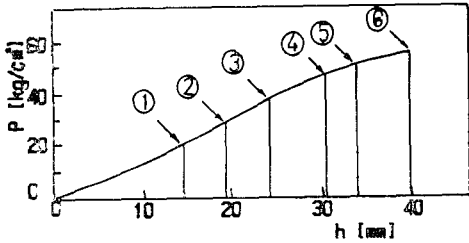


Fig. 9 Pressure-displacement relation in bulge test

여, 이 값을 격자원의 호의 길이로 환산하였다. 즉, 호의 길이는,  $l_i = 2(\rho + t) \sin^{-1} \left( \frac{l_i'}{2(\rho + t)} \right)$  (단,  $l_i'$ 는 격자원을 현의 길이로 읽은 지름이다)로 된다.

사용한 격자원은 최소직경 2mm이고 다음이  $\phi$ 4,  $\phi$ 6,  $\phi$ 8, ...인 동심원이었다. 따라서 직경 2, 4, 6mm 세 개의 격자원에 대해, 압연방향의 현의 길이와 압연방향에 대해 직각방향의 현의 길이를 각각 측정하였고, 이들로부터, 실험적인 응력-변형률 곡선은 얻어질 수 있다. 즉, 응력은 식 (7)로 계산하였고, 두께변형률은 격자원의 초기직경과 가공후의 호의 길이로부터 얻어진 대수변형률의 2배로 하였다.

$$\sigma = \frac{\rho \rho}{2t} \tag{7}$$

변형률의 측정을 위하여는, 극점에 중심을 둔 격자원들 중에서, 그 직경이 작은 격자원일수록 정확한 결과를 얻을 수 있다.

따라서 본 실험에서는 최소지름인 격자원 지름  $\phi$ 2 mm에 대한 변형률을 측정하였으며, 참고로 지름이  $\phi$ 4mm,  $\phi$ 6mm인 격자원에 대하여도 측정하였다. 그러나, 계산결과 지름 2mm인 격자원으로부터 얻은 결과는 지름 6mm인 격자원으로부터 얻은 결과와 거의 같았다.

측정상의 오차도 있을 수 있으므로, 응력-변형률 곡선을 얻기 위한 수치는 이들 3가지 격자원 (한 단계의 가공에 대하여)으로부터 얻은 결과들을 평균하여 사용하였다.

6. 결과 및 고찰

6.1  $m$  값의 영향

곡률반경,  $\rho$ 의 측정결과는 Fig. 10과 같으며 극점에서 약 25mm까지는 완전 구면이라 가정하였다. 종래의 항복조건식으로부터 유도된 식 (1), (2)에 의한 이론적 해석결과를 먼저 실험결과와 비교하였다. 여기서  $R$  값은 Fig. 5~7에서와 같이 변형률 의존성을 그대로 적용하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이  $m=2$ 인 경우, 즉, 식 (1), (2)에 의한 이론적 해석결과는 실험결과와 차이가 있었다. 여기서  $m$  값을 2~2.2로 변경하면서 이론적 해석결과의 변화를 고찰하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 적당한  $m$  값으로서  $m=2.1$ 을 취하였다.

$m$  값에 대한 현재까지의 연구를 살펴보면, Taghvaipour<sup>(4)</sup>는  $\bar{R}=0.44$ 인 립드강에서  $m=1.5$ ,  $\bar{R}=0.72$ 인 알루미늄에 대하여  $m=1.8$ 을 얻었으며; Kleemola<sup>(10)</sup>

는  $\bar{R}=0.5$  인 알루미늄에 대하여  $m=1.6$ ,  $\bar{R}=0.74$  인 알루미늄에 대하여  $m=1.8$  을 얻었다.

Parmar 와 Mellor 는  $\bar{R}=0.63$  인 알루미늄에 대하여  $m=1.7$ ,  $\bar{R}=0.86$  인 황동(Brass)에 대하여  $m=1.8$  을 얻었음이 보고되어 있다<sup>(10,11)</sup>. Bressan 과 Williams 는  $\bar{R}<1$  의 범위에서 이상의 연구결과만으로  $\bar{R}$  와  $m$  값의 관계식으로서  $m=1.14+0.86 R$  라는 관계식을 가정하였고,  $\bar{R}\geq 1$  의 범위에서는  $m=2$  로 들 수 있다고 생각하여 전단불안정 문제에 필요한 수치계산을 수행한바 있다<sup>(10)</sup>. 그러나 Ranta-Eskola 는  $\bar{R}=0.82$  인 황동(Brass)과  $\bar{R}=1.46$  인 킬드강에 대하여 실험을 엄밀히 수행함으로써,  $m=2$  로써 이론과 실험이 충분히 일치함을 밝혔다<sup>(12)</sup>. 이와같이  $\bar{R}<1$  인 범위에서도 연구결과들의 일부는 서로 일관성이 없다. Eskola 의 결과를 고려한다면 위의 Bressan 의 식은 수정되어야 할 것이다.  $\bar{R}>1$  인 범위에 대하여는, 이외에도 Parmar 와 Mellor 에 의하여  $\bar{R}=1.5$  및  $\bar{R}=1.42$  인 킬드강에 대하여  $m=2$  임이 밝혀진바 있다<sup>(4,11)</sup>. 이상의 연구결과들을 종합하면,  $\bar{R}<1$  인 범위에서는,  $\bar{R}=0.44\sim 0.86$  의 범위에서  $m$  값이 구해져 있으며, 이들 결과로부터, Bressan 의 경험식과 같은 가정을 하는 것은, 별도로  $m$  값을 구하지 않아도 되는 방편일 수는 있으나 그것도  $\bar{R}=0.44\sim 0.86$  의 범위에 한하여 허용되어야 할 것이며, 그러한 경험식이 현재 확립되어 있다고 보기에는 아직 시기가 빠르다고 생각된다. Mellor 는 Magee 와의 토론에서, 신 이방성 이론을 사용하기 위하여  $m$  값의 측정,  $R$  값의 측정과는 별도로 수행되어야 하는 추가적부담이라고 답변한 바 있다<sup>(4)</sup>.

$\bar{R}>1$  인 범위에 대하여는  $\bar{R}=1.42\sim 1.5$  인 범위에서  $m$  값이 밝혀져 있는 정도이며 이에 대한 Mellor, Eskola 등의 연구는 모두  $\bar{R}$  값이 거의 비슷한 킬드강에 대한 것이었다. Bressan 이  $\bar{R}>1$  인 경우는  $m=2$  로 들 수 있다고 가정한 것은 이들연구의 결과에 근거를 두고 있다고 생각된다. 그러나  $\bar{R}=1.42\sim 1.5$  의 범위는 극히 좁은 범위이며 이에 대한 연구결과가  $m=2$  로 일치되어 있다고 하여  $\bar{R}>1$  인 모든 범위에 대하여  $m=2$  로 단정하는 것은 성급하다고 생각된다. 즉, 현재까지 연구발표가 거의 되어있지 않은  $0.9<\bar{R}<1.4$  및  $\bar{R}>1.5$  인 영역에서의  $m$  값은 아직은 불명하다고 보아야 할 것이다.

이상의 고찰에서, 본 연구를 통하여 얻어진  $m=2.1$  의 값은 Mellor, Eskola 등이 연구한 경우보다  $\bar{R}$  값이 훨씬크며 ( $\epsilon=15\%$ 를 기준하여  $\bar{R}=1.931$ ),  $\bar{R}<1$  의 범위에서  $\bar{R}$  의 증가에 따라  $m$  값이 민감하게 증가하는

사실등을 고려할때 이러한 가능성을 전적으로 배제할 수는 없다고 생각된다. Mellor 는 Hecker 와의 토론에서,  $m=2$  인 항복조건식이  $\bar{R}=1\sim 2$  인 범위에서는 타당할것이라는 결정학적인 원인이 Dillamore 에 의하여 발표된 바는 있으나 Mellor 자신은 거기에 전적으로 동의 할수는 없다고 하였다<sup>(4)</sup>.

결론적으로 본 연구에서 얻은  $m$  값은 위에 언급한 많은 연구자들의 결과와 함께 하나의 자료를 제공하는 것이며, 이러한 자료가 누적되어 광범위한  $\bar{R}$  값에 대한  $m$  값이 밝혀진 연후라야 비로소  $m$  값과  $\bar{R}$  간의

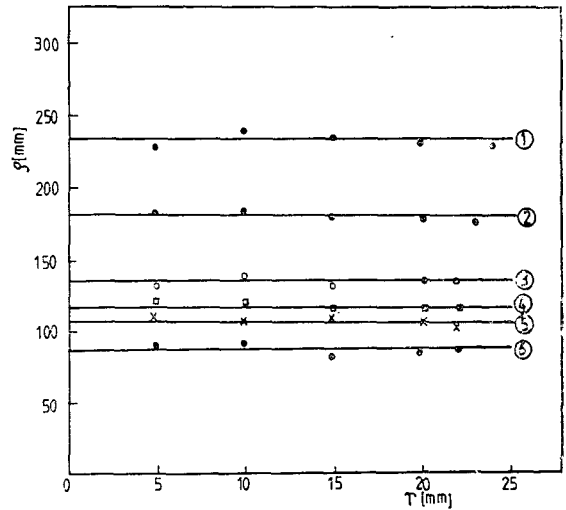


Fig. 10 Average radius of curvature representing various cup heights as a function of the radial distance from the pole

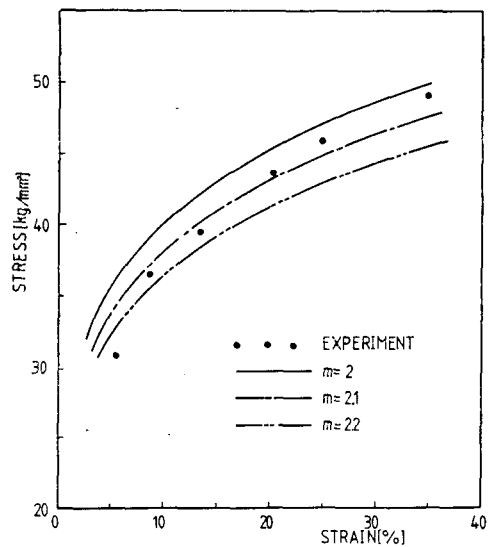


Fig. 11 Effects of m value ( $R$ : variable)

정확한 상호관계가 확립될수 있다고 생각한다.

### 6.2 R 값의 영향

$m$  값을  $m=2.1$  로 고정하고 R 값의 영향을 고찰하였다. Fig. 5~7에서의 R 값을 그대로 대입하여 얻은 이론적 결과와, 변형률을 각각 5%, 15% 및 25%로 선정하여, 여기에 대한 평균 R 값( $\bar{R}$ )을 취함으로써, R 값의 변형률 의존성을 고려하지 않은 결과들을 실험결과와 함께 보여주는 것이 Fig. 12이다. 보는 바와 같이 이 결과들의 차이도 무시할 수 없다고 생각된다. 변형률의 크기에 따라 차이는 있으나, 이들 결과의 최대차이는 약 7.5%였다. 따라서, 소성가공해석의 일반적인 방법으로서, R 값을 변형률의 크기에 무관하게 취급하여 해석할 경우, 그 R 값이 변형률 몇 %에서 취하여진 값인지는 밝힐 필요가 있다고 생각된다. 본 연구의 결과에서는,  $m=2.1$ 로 취하고 R 값은 변형률 15%에서의 평균 R 값( $\bar{R}$ )을 취하여 해석함으로써, 실험결과와 잘 일치하는 이론적 결과가 얻어질수 있음이 밝혀졌다.

### 6.3 R 값의 측정상의 오차

이상의 고찰에서,  $m$  값이 R 값보다 더 큰 영향을 미치는 계수이긴 하나,  $m$  값의 크기는 근본적으로 R 값의 크기에 따라 좌우됨을 알 수 있다. 이와같이, R 값의 엄밀한 측정이 중요한 의미를 가지므로 측정과정에서 일어날수 있는 사항으로서 다음과 같은 고찰을 하였다. Fig. 4의 빗금 부분의 격자 24개씩에 대한 크기를 Fig. 3에서의 배인장시험 단계마다 모두 읽어

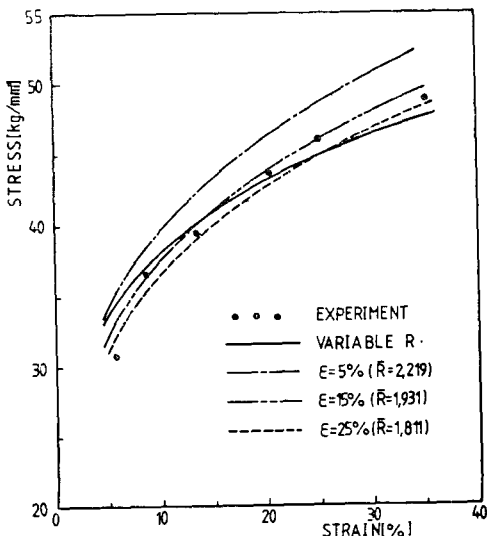


Fig. 12 Effects of the selection of strain ( $m=2.1$ )

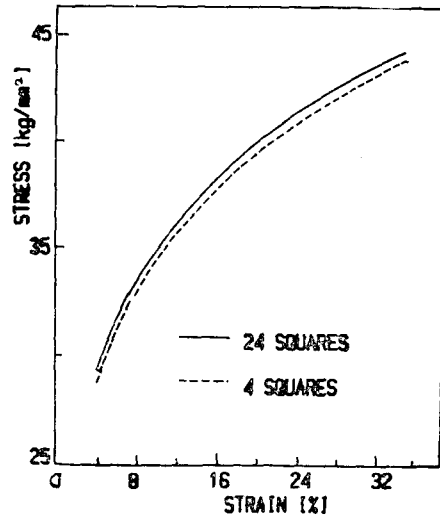


Fig. 13 Effect of the number of squares measured for the calculation of theoretical stress-strain curve

서, 평균값을 취하여 계산하였으나, 이것은 매실험마다 상당한 시간과 주의를 기울여야 하므로, Fig. 4의 네모서리 부분의, 4개의 격자에 대한 측정치만을 취하여 같은 계산을 해보았다. 그 결과 약간의 차이는 있었으나 이로 인하여 논문 전체의 결론에 변화를 가져올 정도는 아니었다. Fig. 13은 여기에 대한 결과를 보여준다.

## 7. 결 론

본 연구는 두께 0.8mm의 킬드강판을 대상으로 하여, 먼저 인장시험편에 격자를 입힌후, 인장시험을 단속해 가면서 격자의 크기를 읽어가는 방법으로 R 값을 측정하였고, 그 결과를 Hill의 수정항복 조건식에 적용함으로써, 등 2축인장에 대한 응력-변형률선도를 이론적으로 해석하였다. 벌지실험을 수행함으로써, 이론적결과를 실험결과와 잘일치시키기 위하여 취하여야 할  $m$  값과 R 값을 고찰하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) SPC 3 EN 킬드강판의 경우, R 값은  $\epsilon=5\%$ 에서  $\bar{R}=2.2$   $\epsilon=25\%$ 에서  $\bar{R}=1.8$  정도로 하향성의 곡선 분포를 보였고 특히 변형률이 작은 영역 ( $\epsilon < 5\%$ )에서는 하향의 정도가 심하였다.

(2)  $\epsilon=5\%$ 에서의  $\bar{R}=2.219$ 를 취하여 해석한 결과는  $\epsilon=25\%$ 에서의  $\bar{R}=1.811$ 을 취하여 해석한 결과와 약 7.5%의 차이가 야기될 수 있다.

(3) 본 연구에서 얻어진  $m$  값은  $m=2.1$ 이었으며

이  $m$  값과  $\epsilon=15\%$ 에서의  $\bar{R}=1.931$  을 취하여 해석한 결과가 실험결과와 양호한 일치율을 보였다.

(4)  $R$  값을 측정하기 위하여 취한 인장시험편 상의 격자의 수나 위치는  $R$  값의 분포와 등 2축 인장의 이론적 해석 결과에 크게 영향을 미치지 않는다고 하였다.

## 후 기

본 연구는 1985년도 문교부 연구조성비의 지원하에 이루어 졌음을 밝히며 이에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

## 참 고 문 헌

- (1) A.N. Bramley and P.B. Mellor, Plastic Flow in Stabilized Sheet Steel, Int. J. Mech. Sci., Vol. 8, pp. 101~114, 1966
- (2) R. Pearce, Some Aspects of Anisotropic Plasticity in Sheet Metals, Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, p. 995, 1968
- (3) John Woodthorpe and Roger Pearce, The Anomalous Behaviour of Aluminium Sheet under Balanced Biaxial Tension, Int. J. Mech. Sci., Vol. 12, pp. 341~347, 1970
- (4) P.B. Mellor and A. Parmar, Plasticity Analysis of Sheet Metal Forming, Proceedings of a Symposium on Mechanics of Sheet Metal Forming Held at the General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan, pp. 53~77, Oct. 1977
- (5) Hsun Hu, The Strain Dependence of Plastic Strain Ratio of Deep Drawing Sheet Steels Determined by Simple Tension Test, Metallurgical Transactions A, Vol. 6A, pp. 945~947, Apr. 1975
- (6) Hsun Hu, Effect of Plastic Strain on the  $R$  Value of Textured Steel Sheet, Metallurgical Transactions A, Vol. 6A, pp. 2307~2309, Dec. 1975
- (7) W. Truszkowski, Influence of Strain on the Plastic Strain Ratio in Cubic Metals, Metallurgical Transactions A, Vol. 7A, pp. 327~329, Feb. 1976
- (8) R.P. Arthey and W.B. Hutchinson, Variation of Plastic Strain Ratio with Strain Level in Steels Metallurgical Transactions A, Vol. 12A, pp. 1817~1822, Oct. 1981
- (9) 徐大教, 金東垣, 박강판의 변형도에 따른 Lankford 값의 변화에 대한 실험적 연구, 大韓機械學會論文集, 第 8 卷, 第 5 號, pp. 481~487, 1984
- (10) J.D. Bressan and J.A. Williams, The Use of a Shear Instability Criterion to Predict Local Necking in Sheet Metal Deformation, Int. J. Mech. Sci., Vol. 125, No. 3, pp. 155~168, 1983
- (11) R. Hill, Theoretical Plasticity of Textured Aggregates, Math. Proc. Camb. Phil. Soc. Vol. 85, pp. 179~191, 1979
- (12) A.J. Ranta-Eskola, Use of the Hydraulic Bulge Test in Biaxial Tensile Testing, Int. J. Mech. Sci. Vol. 21, pp. 457~465, 1979