

## 신장계에 의한 소성변형비 자동측정법의 평가에 관한 연구

김인수\*

(2003년 4월 24일 접수)

### A Study on the Evaluation of the Automatic Measurement Method of Plastic Strain Ratio by Two Extensometers

In Soo Kim

#### Abstract

The plastic strain ratios(R values) of low carbon steel sheets were determined by the automatic strain measurement method using two extensometers, the indirect photo method for the same tensile specimen during tensile test and the indirect method for the specimen after tensile test. The experimental results showed that the measured plastic strain ratios from the automatic strain measurement method using two extensometers coincided with those from the indirect photo method and the indirect method for all tensile specimens. In addition, the strain dependence of plastic strain ratios could be continuously recorded and the anisotropy of the strength coefficient, K, and strain hardening exponent, n, could be automatically calculated in three directions by computer through the use of two extensometers. The experimental results showed that the strain dependence of R-value was related to the anisotropy of strain hardening exponent in low carbon steel sheets.

**Key Words** : Plastic Strain Ratio, R-Value, Automatic Measurement Method, Tensile Test, Extensometer, Direct Method, Indirect Method

#### 1. 서 론

금속판재의 디프드로잉 성형성은 일축 인장시험에서 폭방향의 진변형률과 두께방향의 진변형률의 비로 표현하는 소성변형비(Plastic Strain Ratio), R-값 또는 Lankf

ord Parameter로 나타낼 수 있다. 지금까지 일축 인장시험에 의한 소성변형비를 측정하는 방법은 매우 다양하다고 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 소성변형비를 측정하는 방법에는 인장시편을 불균일변형이 나타나는 변형률 전까지 일축 인장한 후 직접 두께와 폭방향의 진변형률을 측정하여 소성

\* 남오광과대학교 신소재시스템공학부 금속전공

변형비를 얻는 직접추정방법(Direct Method)과 금속판재의 경우 인장 후 두께방향의 변형률은 측정이 어렵고 작은 측정오차에도 소성변형비에 큰 영향을 줄 수 있으므로, 소성변형에서 부피의 변화가 거의 없다는 가정에 근거하여 두께방향의 변형률을 직접추정하지 않고 폭과 길이방향의 변형률을 측정하여 두께방향의 진변형률로 환산하므로써 소성변형비를 얻는 간접추정법(Indirect Method)이 있다.

간접추정법에는 모아래 신장계를 이용하는 방법<sup>(1)</sup>, 다이아몬드로 압흔을 한 후 변형률을 측정하여 얻는 방법<sup>(2)</sup>, 그리드부위를 입힌 후 변형률을 측정하여 얻는 방법<sup>(3)</sup>, 두 개의 신장계를 이용하여 인장시험중 연속적인 변형률을 측정하여 얻는 방법<sup>(4-7)</sup> 등이 있다.

소성변형비 측정시험의 단순성에도 불구하고 Liu<sup>(8)</sup>는 측정하는 방법에 따라 그 측정값이 넓은 범위에 분포하기 때문에 측정에 정확성을 기해야 한다고 주장하였다. Liu<sup>(8)</sup>는 0.0013mm의 정밀도까지 정확히 측정하였음에도 불구하고 직접추정법과 간접추정법으로 얻은 소성변형비 값의 차이가 낮은 변형률에서 매우 크고 높은 변형률에서도 차이가 있음을 보였다. 직접추정법<sup>(9-10)</sup>의 경우에서도 Liu<sup>(8)</sup>가 요구하는 0.0013mm 측정정밀도 보다 정밀도 조건이 떨어지지만 변형 후 두께방향의 정밀도 오차가 0.005 mm 이하로 정확해야 할 것을 요구하고 있다. 간접추정방법에는 폭방향과 길이방향에 다이아몬드 압흔을 낸 후 변형하고 압흔점의 변화로부터 변형률을 측정하여 두께방향의 소성변형률을 측정하는 다이아몬드 압흔 측정방법<sup>(2)</sup>에서 ±0.005 mm의 측정오차를 요구하고 있다. ASTM E 517에서도 0.025mm의 변형 측정정확도를 요구하고 있으며 I.D.D.R.G.에서는 이보다 더 정확한 0.005mm의 측정정확도를 요구하고 있다. 그 외로 소성변형비 실험의 오차를 줄이는 방법으로 인장시험에서 인장시편의 가장자리에 라운딩이 없어야 하며 변형 후 인장시편이 말리지 않고 평평하여야 한다.

ASTM E 517에는 금속판재의 소성변형비 측정을 위한 폭방향과 길이방향의 구체적인 진변형률 측정방법을 표현하지 않고 있다. 그러나 오늘날 변형률 측정의 간편함과 자동화를 위하여 길이방향과 폭방향으로 각각 신장계를 부착하고 인장시험하는 동안 변형률을 연속적으로 자동추정 함으로서 소성변형비를 얻고 있다. 이와 같이 두 개의 신장계를 인장시편에 부착하여 연속적인 변형률 측정에 의한 소성변형비를 얻는 방법은 동일 종류의 소재에서 두개의 서로 다른 인장시편으로 얻어진 소성변형비와 서로 쉽게 비교 할 수 있지만 하나의 인장시편에서 얻어진 소성변형비의 타당성을 입증하지 못하고 있다.

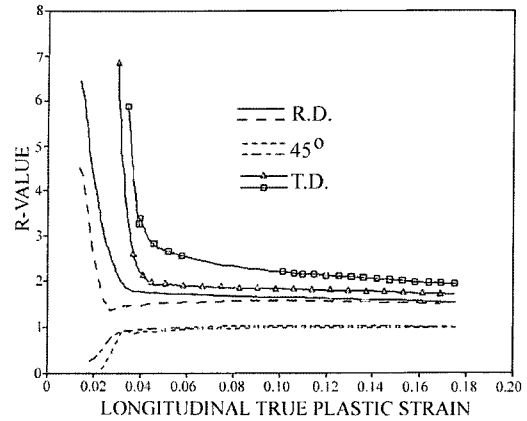


Fig. 1 The strain dependence of plastic strain ratios in two tensile specimens under the same experimental condition

Owen 등<sup>(6)</sup>의 연구 결과에 의하면 두 개의 서로 다른 시편으로부터 얻어진 소성변형비 사이에 약간의 차이가 있음을 보였다. 또 본 연구자<sup>(11)</sup>도 다른 모든 조건들은 일정하나 두 개의 다른 인장시편을 가지고 소성변형비를 측정하여 비교한 결과 Fig. 1과 같이 두 시편에서 얻어진 측정값이 일치하지 않음을 확인하였다. 지금까지 두 개의 신장계를 이용하여 소성변형비를 측정 할 때 한 인장시편을 가지고 측정값의 타당성을 입증하지 못하는 이유는 동일한 인장시편에서 두 개의 신장계로 폭 방향과 길이방향의 변형률을 연속적으로 측정하는 동안 인장시험을 멈추고 인장시편을 꺼내어 폭 방향과 길이방향의 변형률을 측정하고 다시 인장시험기에 장착하여 인장시험하는 작업을 반복할 수 없기 때문이다. 따라서 금속판재의 성분과 조건은 동일하나 또 다른 인장시편으로부터 소성변형비를 측정하여 비교하여 왔다.

그러나 본 논문에서는 동일한 인장시편을 이용하여 두 개의 신장계에 의한 소성변형비 측정방법의 타당성을 검토하고자 한다. 다양한 조건의 자동차용 강판의 소성변형비를 폭 방향과 길이 방향의 변형률을 두 개의 신장계를 부착하여 측정하고 동시에 계속되는 변형을 Fig. 2와 같이 사진기를 설치하여 인장시험 도중에 순간순간의 그리드의 변화모습을 촬영한 후 변형률을 측정하여 소성변형비를 구하였다. 이 방법을 이용하여 동일 시편에서 두 개의 신장계에 의한 소성변형비 자동추정방법의 타당성을 검토 할 수 있다. 그 외로 인장시험을 멈추었을 때도 인장시편을 꺼내고 최종 변형률을 측정하여 소성변형비를 구할 수 있어 위의 두 가지 방법으로 얻어진 소성변

형비와 비교하여 보았다.

본 실험에서 사용한 저탄소강판은 변형률의 변화에 따라 소성변형비가 변하는 급속 중의 하나이다. 두 개의 신장계를 인장시편에 부착하여 연속적으로 변형률을 측정하면 연속적인 소성변형비의 변화를 알아 볼 수 있다.

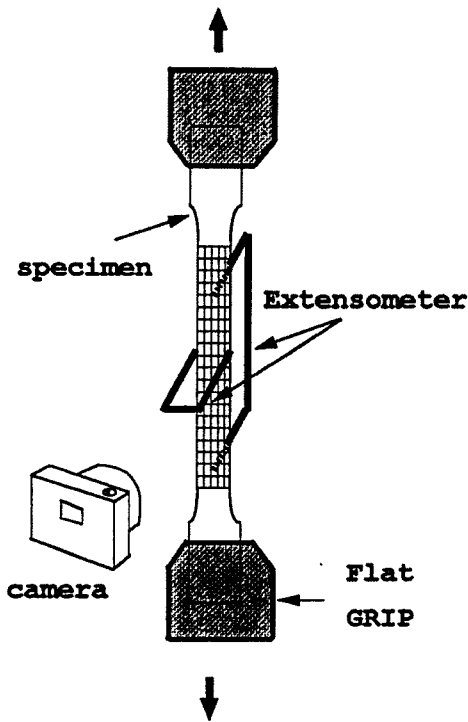


Fig. 2 Schematic diagram of tensile test for strain measurement with the length and width extensometers and camera

그동안 인장시험시 변형률변화에 따른 소성변형비의 변화에 대하여 많은 연구가 있었다. Hu<sup>(12-15)</sup>는 저탄소강판의 변형률변화에 따른 소성변형비의 변화에 대하여, Artthey<sup>(16)</sup> 등은 Al킬드강과 Ti합유강에서의 변형률변화에 따른 소성변형비의 변화의 변화에 대하여 연구하였으며 Liu<sup>(17-18)</sup>는 직접측정법과 간접측정법으로 소성변형비의 변화를 측정하였다. 또한 Liu등<sup>(19)</sup>은 Hill의 미분개념에 의한 소성변형비 정의에 따른 소성변형비에 관하여 연구하였고 Lake등<sup>(20)</sup>은 변형 중에 소성변형비의 변화에 관하여 연구하였다. 특히 Hu<sup>(12)</sup>는 소성변형비의 변형률 의존도는 유동응력과 가공경화지수의 이방성으로 해석하였다. 즉 두께방향의 유동응력이 폭방향의 유동응력보다 크거나 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소하며, 두께방향의 유동응력이 폭방향의 유동응력보다 작거나 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 크면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 증가한다고 하였다.

본 연구에서는 두 개의 신장계를 이용하여 얻어진 응력 변형률 곡선으로부터 유동응력과 가공경화지수의 이방성을 구함으로써 변형률변화에 따른 소성변형비의 변화에 대한 Hu<sup>(12)</sup>의 연구 결과를 검토하여 보았다.

## 2. 실험방법

Table 1은 본 연구에서 사용한 다양한 종류의 저탄소강판의 생산 조건을 보여주고 있다.

Table 1의 저탄소 강판을 밀링가공하여 ASTM 표준 규격의 인장시편을 제작하였으며 인장시험 중 사진을 촬영하여 변형률을 측정하기 위해 인장시편 표면에 화학부식방법으로 2.54mm 크기의 정사각형 그리드 무늬를 인쇄하였다.

Table 1 The conditions of low carbon steels

Specimen No.	Material	Thickness
1	SAE 1008 Galvanized and Temper Rolled Steel	1.50mm
2	SAE 1006 Galvanized & Annealed Drawing Quality Steel(Al Killed)	0.80mm
3	SAE 1006 Galvanized & Temper Rolled Drawing Quality Steel(Al Killed)	1.38mm
4	SAE 1006 Galvanized & Temper Rolled Drawing Quality Steel(Al Killed)	0.70mm
5	SAE 1006 Not Galvanized & Temper Rolled Drawing Quality Steel(Al Killed)	0.98mm
6	SAE 940 High Strength Low Alloy Steel	0.66mm

본 연구에서는 위와 같이 준비한 인장시편 한 개를 이용하여 다음과 같이 세가지 다른 방법으로 소성변형비를 추정 하였다. 첫 번째 소성변형비: 인장시험 중에 두 개의 신장계(추정정밀도: 0.001mm)를 Fig. 2와 같이 부착하여 연속적으로 변형률을 자동추정하여 얻었다.

두 번째로 Fig. 2와 같이 사진기를 인장시편 앞에 설치하고 인장시험 중에 순간순간 인장시편 표면에 표시된 무늬의 모양 변화를 사진 촬영하였다. 사진 촬영한 필름을 현상 인화하여 폭과 길이방향의 변형률을 광학공구측정용 길이측정장치(추정정밀도:0.001mm)를 이용하여 소성변형비를 측정하였다.

세 번째로 인장시험을 최대인장강도에 도달되기 전에 멈추고 변형한 인장시편으로 부터 그리드의 폭과 길이방향의 변형률을 구하여 소성변형비를 구하였다.

위와 같이 한 인장시편에서 3 가지 다른 방법으로 얻어진 소성변형비 값을 서로 비교하여 봄으로서 신장계에 의한 소성변형비 추정법의 타당성을 검토하였다.

Fig. 3은 인장시편 위에 두 개의 신장계가 부착된 모습과 인장시험 중 그리드의 변화 모습을 나타낸 일련의 사진이다.

여기서 신장계와 사진촬영으로부터 얻어진 변형률은 소성변형비를 계산하기 위하여 필요한 소성 진변형률 성분뿐만 아니라 탄성 진변형률 성분을 식 (1)과 같이 내포하고 있다.

$$\begin{aligned} \text{즉, } \quad \epsilon_l &= \epsilon_l^e + \epsilon_l^p, \\ \epsilon_w &= \epsilon_w^e + \epsilon_w^p, \\ \epsilon_t &= \epsilon_t^e + \epsilon_t^p \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 e : 탄성변형률 성분, p : 소성변형률 성분  
l : 길이방향, w : 폭방향, t : 두께방향

탄성변형률은 소성변형비 추정을 위한 소성변형률에 비하여 그 크기가 매우 작으므로 등방성으로 가정하여 길이와 폭방향에서 탄성성분  $\epsilon_l^e$ 와  $\epsilon_w^e$ 는 식 (2)와 (3)으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_l^e = \frac{1}{E} \sigma_l \quad (2)$$

$$\epsilon_w^e = \frac{1}{E} [-\nu \sigma_l] \quad (3)$$

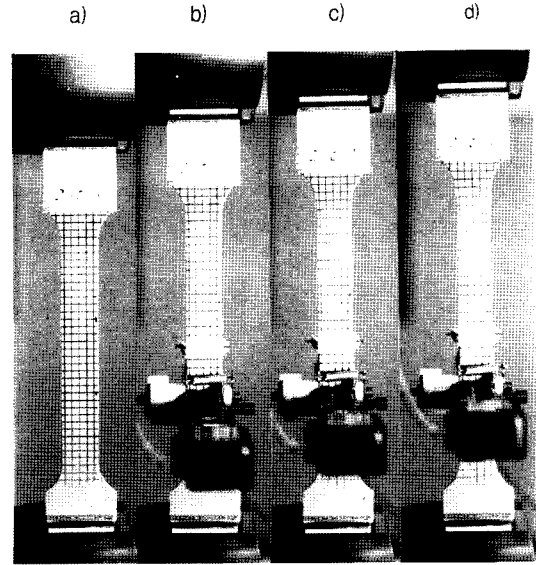


Fig. 3 The photos of the strained specimen during the tensile test

여기서 인장시험 중에 측정된  $\sigma_l$  을 식 (2)와 (3)에 대입하여 탄성성분의 변형률  $\epsilon_l^e$ 와  $\epsilon_w^e$  를 계산할 수 있으며 이 값을 다시 식 (1)에 대입하면 소성성분의 변형률  $\epsilon_l^p$ 와  $\epsilon_w^p$  를 계산할 수 있다. 만약 소성변형시 파괴변화가 없다면 식 (4)가 성립된다.

$$\epsilon_l^p + \epsilon_w^p + \epsilon_t^p = 0 \quad (4)$$

따라서 식 (1)로 계산한  $\epsilon_l^p$ 와  $\epsilon_w^p$  를 식 (4)에 대입하면  $\epsilon_t^p$  를 계산할 수 있다. 그러므로 소성변형비, R의 값을 위에서 얻어진  $\epsilon_w^p$ 와  $\epsilon_t^p$  를 식 (5)에 대입하여 구할 수 있다.

$$R = \frac{\epsilon_w^p}{\epsilon_t^p} \quad (5)$$

즉 두 개의 신장계를 부착한 자동소성변형비추정 장치와 Fig. 2에서 보인 사진촬영한 시편의 변화로부터 측정된 변형률에서 위의 과정으로  $\epsilon_w^p$ 와  $\epsilon_t^p$  를 계산하여 식(5)에 대입함으로써 소성변형비를 얻을 수 있으며 인장시험이 끝난 후 실제 인장시편으로 부터 폭 방향과

길이방향의 변형률을 측정하여 소성변형비를 계산할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

강관의 압연방향(R.D.), 압연방향에 45° 방향(45°) 및 압연방향에 수직인 방향(T.D.)으로 인장시편을 제작하여 인장시험 함으로서 각 시편의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 얻은 후 진응력-진변형률 값을 얻었다.

Fig. 4는 인장시험으로부터 얻은 진응력-진변형률 값을 바탕으로 강도계수, K와 가공경화지수, n을 계산하기 위하여 길이, 폭 및 두께의 세 방향으로 진응력-진변형률의 자연대수를 취한 결과이다. Fig. 4에서 길이방향, 축방향 및 두께방향의 강도계수, K와 가공경화지수, n이 방향에 따라 다른 이방성을 나타내고 있다.

각 강관에서 R.D., 45° 및 T.D. 방향으로 인장시편을 제작하여 인장시험을 한 결과로부터 얻어진 강도계수, K와 가공경화지수, n 값의 결과를 Table 2에 종합하여 나타내었다. Table 2에서 모든 시편의 강도계수, K와 가공경화지수, n이 이방성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에서부터 Fig. 10까지는 Table 1에 보인 각종 강관 시편의 R.D., 45° 및 T.D. 방향 시편의 인장시험으로부터 얻어진 변형률변화에 따른 소성변형비(R 값)의 변화이다. 여기에 (a)는 인장시험시 부착한 두 개의 신장계에 의한 소성변형비이며 (b)는 인장시편의 변화모습을 사진 촬영하여 이로부터 얻은 결과이며 (c)는 최종 인장시험을 멈추고 신장계를 제거하여 실제 인장시편으로부터 변형률을 측정하여 얻은 결과이다. Fig. 5는 두께 1.50mm의 SAE 1008 저탄소강관에서 변형률에 따른 소성변형비로서 (a) 두 개의 신장계를 사용하여 얻어진 값, (b) 인장시험 중에 사진을촬영함으로써 부터 얻어진 값, (c) 최종 인장시험을 멈추고 신장계를 제거하여 광학공구측정용 길이 측정장치를 이용하여 얻어진 값을 비교한 결과이다. 각각의 방법으로 얻어진 소성변형비 값이 약간의 차이를 나타내고 있으나 대체로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 5에서 압연방향에 수직인 방향(T.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 감소되었으며 압연방향(R.D.), 압연방향에 45° 방향의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 증가되었다. 이 결과를 Table 2에서 보인 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성과 비교하여 보았다. Fig. 5와 Table 2에서 T.D. 시편은 폭방향이 두께방향의 가공경화지수보다 컸으며 소성변형비는 변형률이 증가함에 따라 감소하고 R.D.와 45° 방향 시편에서는 그 반대 현상이 일어났

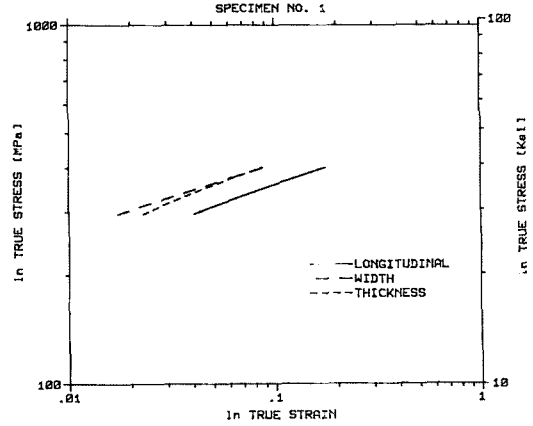


Fig. 4 Work hardening behavior in the length, width and thickness directions of specimen No.1 (R. D. specimen) in tensile test

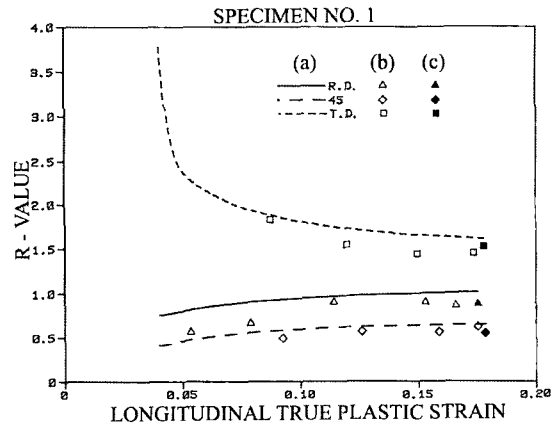


Fig. 5 The strain dependence of the plastic strain ratios of specimen No.1 under the different specimen and measurement method : (a) 2 extensometers (b) photos (c) tensile specimen

다. 이 결과는 Hu<sup>(12)</sup>가 주장한 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성 즉 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소하며, 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 크면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 증가한다고 때문에 일어난다는 연구결과와 일치하였다.

Fig. 6은 두께 0.80mm의 SAE 1006 저탄소강관을 앞서 제시한 세가지 방법을 이용하여 변형률에 따른 소성

변형비를 측정된 값을 비교한 결과이다. 각각의 방법으로 얻어진 소성변형비 값이 약간의 차이를 나타내고 있으나 대체로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6에서 변형률이 매우 작은 부분을 제외하고 압연방향(R.D.), 압연방향에 45° 방향, 압연방향에 수직인 방향(T.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 거의 일정함을 보이고 있다. Fig. 6에서 변형률이 작으므로 인해 소성변형비의 오차가 크게 도입될 수 있는 초기의 작은 변형률 구간을 제외하면 R.D.시편은 변형률이 증가함에 따라 소성변형비가 약간 증가하며 45° 방향 및 T.D.시편에서 변형률이 증가함에 따라 소성변형비가 약간 감소하는 경향이 있다. Fig. 6의 변형률 변화에 따른 소성변형비 변화 양상이 Table 2에서 보인 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성과 비교한 결과 Hu<sup>(12)</sup>가 주장한 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소하며, 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 크면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 증가한다는 연구결과와 잘 일치하였다.

Fig. 7은 두께 1.38mm의 SAE 1006 저탄소강관을 앞서 제시한 세가지 방법을 이용하여 변형률에 따른 소성변형비를 측정된 값을 비교한 결과이다. 각각의 방법으로 얻어진 소성변형비 값이 약간의 차이를 나타내고 있으나 대체로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7에서 변형률이 매우 작은 부분을 제외하고 압연방향(R.D.), 압연방향에 45° 방향, 압연방향에 수직인 방향(T.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 거의 일정하

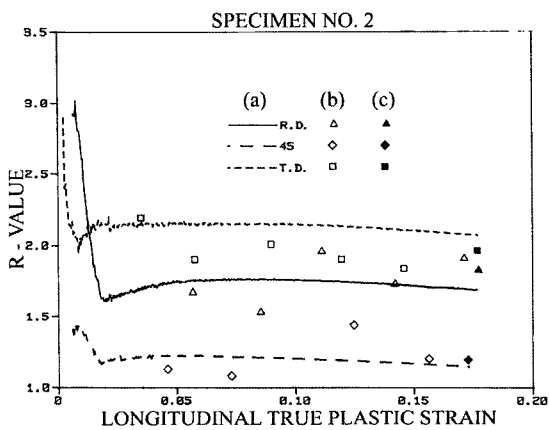


Fig. 6 The strain dependence of the plastic strain ratios of specimen No.2 under the different specimen and measurement method : (a) 2 extensometers (b) photos (c) tensile specimen

거나 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 7의 변형률 변화에 따른 소성변형비 변화 양상을 Table 2에서 보인 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성과 비교한 결과 Hu<sup>(12)</sup>가 주장한 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소한다는 연구결과와 잘 일치하였다.

Fig. 8은 두께 0.70mm의 SAE 1006 저탄소강관을 앞서 제시한 세가지 방법을 이용하여 변형률에 따른 소성변형비를 측정된 값을 비교한 결과이다. 각각의 방법으로 얻어진 소성변형비 값이 약간의 차이를 나타내고 있으나 대체로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 8에서 압연방향에 45° 및 압연방향에 수직인 방향(T.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 감소되었으며 압연방향(R.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 증가되었다. 이 결과를 Table 2에서 보인 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성과 비교하여 보았다. Fig. 8과 Table 2에서 45° 및 T.D.시편은 폭방향이 두께방향의 가공경화지수 보다 컸으며 R.D. 시편에서는 그 반대 현상이 일어났다. 이 결과는 Hu<sup>(12)</sup>가 주장한 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성 즉 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소하며, 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 크면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 증가한다고 때문에 일어난다는 연구결과와 일치하였다.

Fig. 9는 두께 0.98mm의 SAE 1006 저탄소강관을 앞서 제시한 세가지 방법을 이용하여 변형률에 따른 소성변형비를 측정된 값을 비교한 결과이다. 각각의 방법으로 얻어진 소성변형비 값이 약간의 차이를 나타내고 있으나 대체로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 9에서 압연방향에 45° 및 압연방향에 수직인 방향(T.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 감소되었으며 압연방향(R.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 증가되었다. 이 결과를 표 2에서 보인 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성과 비교하여 보았다. Fig. 9와 Table 2에서 45° 및 T.D. 시편은 폭방향이 두께방향의 가공경화지수 보다 컸으며 R.D. 시편에서는 그 반대 현상이 일어났다. 이 결과는 Hu<sup>(12)</sup>가 주장한 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성 즉 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소하며, 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 크면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 증가한다고 때문에 일어난다는 연구결과와 일치하였다.

Table 2 Results of mechanical properties

Specimen No.	Direction		K (Mpa)	n	Specimen No.	Direction		K (Mpa)	n
1	R.D.	Length	575.39	0.205	4	R.D.	Length	536.32	0.257
		Width	628.68	0.185			Width	589.12	0.242
		Thickness	703.29	0.227			Thickness	719.79	0.276
	45°	Length	591.69	0.204		45°	Length	561.69	0.252
		Width	655.11	0.172			Width	675.34	0.260
		Thickness	691.11	0.226			Thickness	660.55	0.244
	T.D.	Length	577.16	0.208		T.D.	Length	521.07	0.243
		Width	670.67	0.230			Width	596.15	0.260
		Thickness	641.26	0.175			Thickness	621.11	0.211
2	R.D.	Length	573.25	0.245	5	R.D.	Length	713.08	0.208
		Width	637.51	0.243			Width	810.04	0.198
		Thickness	732.49	0.245			Thickness	833.98	0.216
	45°	Length	595.44	0.236		45°	Length	703.73	0.202
		Width	692.94	0.239			Width	811.49	0.207
		Thickness	708.63	0.233			Thickness	805.53	0.196
	T.D.	Length	524.89	0.257		T.D.	Length	707.34	0.198
		Width	581.13	0.258			Width	807.08	0.201
		Thickness	699.17	0.255			Thickness	814.20	0.195
3	R.D.	Length	544.99	0.234	6	R.D.	Length	615.69	0.217
		Width	607.63	0.236			Width	684.41	0.219
		Thickness	684.44	0.229			Thickness	753.74	0.212
	45°	Length	571.89	0.234		45°	Length	584.66	0.209
		Width	664.02	0.237			Width	671.77	0.212
		Thickness	681.94	0.231			Thickness	676.48	0.204
	T.D.	Length	532.99	0.237		T.D.	Length	617.11	0.227
		Width	583.92	0.239			Width	678.47	0.228
		Thickness	695.87	0.234			Thickness	787.49	0.227

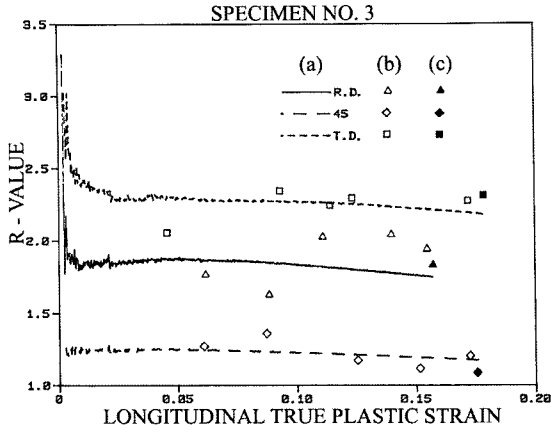


Fig. 7 The strain dependence of the plastic strain ratios of specimen No.3 under the different specimen and measurement method : (a) 2 extensometers (b) photos (c) tensile specimen

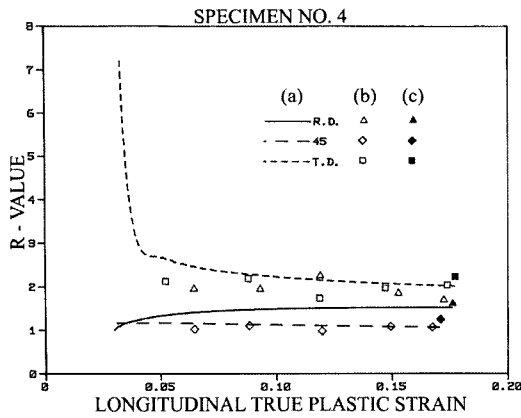


Fig. 8 The strain dependence of the plastic strain ratios of specimen No.4 under the different specimen and measurement method : (a) 2 extensometers (b) photos (c) tensile specimen

Fig. 10은 두께 0.66m의 SAE 940 HSLA강판을 앞서 제시한 세가지 방법을 이용하여 변형률에 따른 소성변형비를 측정된 값을 비교한 결과이다. 각각의 방법으로 얻어진 소성변형비 값이 약간의 차이를 나타내고 있으나 대체로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 10에서 변형률이 매우 작은 부분을 제외하고 압연방향(R.D.), 압연방향에 45° 방향, 압연방향에 수직인 방향(T.D.)의 시편에서 변형률이 커짐에 따라 소성변형비가 거의 일정하거나 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 10의 변형률 변화에 따른 소성변형비 변화 양상이 Table 2에서 보인 폭방향과 두께방향의 가공경화지수 이방성과 비교한 결과

Hu<sup>(12)</sup>가 주장한 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소한다는 연구결과와 잘 일치하였다.

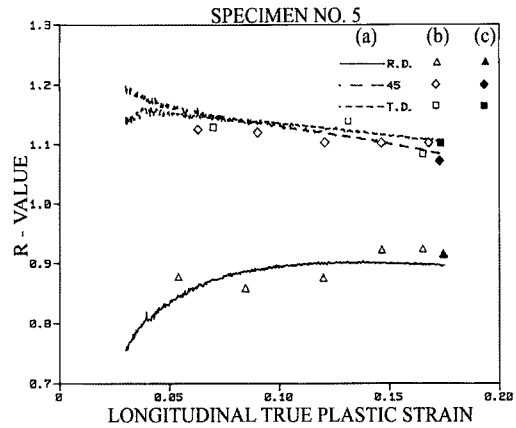


Fig. 9 The strain dependence of the plastic strain ratios of specimen No.5 under the different specimen and measurement method : (a) 2 extensometers (b) photos (c) tensile specimen

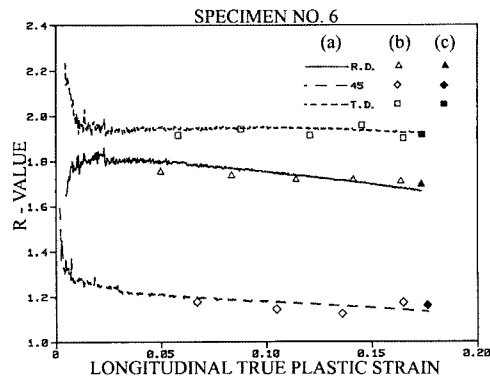


Fig. 10 The strain dependence of the plastic strain ratios of specimen No.6 under the different specimen and measurement method : (a) 2 extensometers (b) photos (c) tensile specimen

이상의 Fig. 5로부터 Fig. 10의 결과로서 알 수 있듯이 저탄소 강판의 상태, 두께 및 종류가 달라도 동일한 인장시편에서 두 개의 신장계에 의한 소성변형비 측정값은 다른 두 개의 측정값과 잘 일치함을 보이고 있다. 그러나 측정방법에 따라 소성변형비가 차이가 나는 것은 측정방법에 따라 길이 측정값이 약간의 오차가 생기기 때문으로 판단된다. 따라서 두 개의 신장계를 이용한 소성변형비를 측정하는 방법도 소성변형비 측정방법으로서 좋은 방법 중의 하나임을 알 수 있었다.



또한 Fig. 5에서부터 10까지와 같이 저탄소강의 인장 시편에서 변형률의 변화에 따른 소성변형비의 변화는 변형률이 증가함에 따라 감소하거나 증가하는 두 가지 모양으로 나타났다. 이 현상을 Table 2의 인장시험에서 얻어진 가공경화지수의 이방성과 비교하여 본 결과 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 작으면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 감소하며, 두께방향의 가공경화지수가 폭방향의 가공경화지수보다 크면 소성변형비는 변형률이 커짐에 따라 증가한다고 하였다 고 하였던 Hu<sup>(12)</sup>의 이론과 일치함을 알 수 있었다.

따라서 두개의 신장계를 이용하여 소성변형비를 자동 측정하는 방법은 소성변형비의 변형률 의존성을 알아 볼 수 있을 뿐만 아니라 강도계수, K와 가공경화지수, n등의 기계적 성질을 측정하여 소성변형비의 변형률 의존성도 해석할 수 있는 부수적인 효과도 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

(1) 두 개의 신장계에 의한 자동변형률 측정장치로 측정된 소성변형비를 인장시험 중 사진촬영에 의한 방법으로 측정된 값 및 인장시험 후 변형된 인장시편으로부터 측정된 값과 잘 일치함을 확인함으로써 두 개의 신장계에 의한 소성변형비 측정방법도 좋은 소성변형비 측정방법 중의 하나임을 알 수 있었다.

(2) 두 개의 신장계에 의한 자동변형률 측정방법은 소성변형비가 자동으로 기록되어 소성변형비의 변형률 의존성을 알아 볼 수 있을 뿐 아니라 각 방향에 따른 강도 계수, K, 가공경화지수, n등의 기계적성질의 이방성을 자동으로 측정할 수 있는 장점도 있었다.

(3) 저탄소강 판재의 변형률의 변화에 따른 소성변형비의 변화를 가공경화지수의 이방성을 이용하여 설명할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

(1) Duncan, J. L., Goni, E. and Johnson, W., 1967, "Measurement of normal plastic anisotropy in steel metal", The J of the Australian Institute of Metals, Vol. 12, No. 2, pp. 127~138.  
 (2) I.D.D.R.G. Working Group II, Brief Report of the Joint Research Work, Liege, June 1966.  
 (3) Marinelli, S. V., June 1966, I.D.D.R.G. Document, Liege.  
 (4) Fukui, S. and Tana, N., June 1966, I.D.D.R.G.

Document, Liege.  
 (5) Fukui, S. and Yoshida, K., 1964, Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Research, Japan, 58, p 1.  
 (6) Owen, L. J., Sidey, M. P. and Atkinson, M., "Automatic measurement of r values", June 1971, Sheet metal industries, pp. 476~482.  
 (7) Jeong, H. T. and Lee, D.N., 1997, "Variation in the plastic strain ratio with tensile strain", J. of the Korean Inst. of Met. & Mater. V. 35, No. 5, pp. 550~557.  
 (8) Liu, Y. C., 1983, "On the R value measurement", Metall. Trans. A, 14A, pp. 1199~1205.  
 (9) Jegaden, G., Voinchet, J. and Rocquet, P. April 1966, I.D.D.R.G. Document.  
 (10) Jegaden, G., Voinchet, J. and Rocquet, P. 1962, 4187, Letter, Nature, p. 771.  
 (11) Kim, I., Private Experiment.  
 (12) Hu, H., April 1975, "The strain dependence of plastic strain ratio( $r_m$  value) of deep drawing sheet steels determined by simple tension test", Metallurgical Transactions A, 6A, pp. 945~947.  
 (13) Hu, H., December, 1975, "Effect of plastic strain on the r value of textured steel sheet", *ibid*, 6A, pp. 2307~2309.  
 (14) Hu, H., June 1976, "Discussion of influence of strain on the plastic strain ratio in cubic metals", *ibid*, 7A, pp. 905~906.  
 (15) Hu, H., July 1983, *ibid*, "on the strain dependence of plastic strain ratio of deep drawing sheet steels", 14A, pp. 1521~1523.  
 (16) Arthey, R. P. and Hutchinson, W. B., October 1981, "Variation of plastic strain ratio with strain level in steels", *ibid*, 12A, pp. 1817~1822.  
 (17) Liu, Y. C., June 1983, "On the R value measurement", *ibid*, 14A, pp. 1199~1205.  
 (18) Liu, Y. C., December 1983, *ibid*, "On the determination of Hill's plastic strain ratio", 14A, pp. 2566~2567.  
 (19) Liu, Y. C. and Johnson, L. K., August 1985, "Hill's plastic strain ratio of sheet metals", *ibid*, 16A, pp. 1531~1535.  
 (20) Lake, J. S. H., Willis, D. J. and Fleming, H. G., November 1988, "The variation of plastic anisotropy during straining", *ibid*, 19A, pp. 2805~2817.