

## 비대칭 시편의 딥드로잉 실험에 의한 박판금속의 성형한계도

허 훈\* · 이충호\* · 정재웅\*\*

(1997년 7월 27일 접수)

### Identification of Forming Limits of Sheet Metals for Automobile Parts by Asymmetric Deep-drawing Experiments

H. Huh, C. H. Lee and J. W. Chung

#### Abstract

Identification of forming limits of sheet metals is an important task to be done before the sheet metal forming processes. The information of the forming limit is indispensable for design of deformed shapes and related forming processes. This procedure becomes more important than ever as the auto-body becomes complicated and the number of auto-body parts is reduced for lower production cost. To identify the forming limit of sheet metals, stretching with a hemispherical punch has gained popularity because of the convenient experimental procedure. The stretching experiment, however, has slight difference from the real sheet metal forming process. In the sheet metal forming process, the localized deformation or the shear band is originated from the non-uniform deformation in the critical circumstance instead of the absolute criterion. More accurate information of the forming limit, therefore, could be obtained by a more appropriate experiment to the real process. In this paper, an experiment program is devised to practically identify the forming limits of sheet metals for auto-body parts. The experiment program contains not only stretching but deep-drawing. Both forming experiments use the same hemispherical punch while they use different specimens. Deep-drawing experiments use specimens cut out in circular arc on both sides of circular blank to make it torn during the deep-drawing. They also use specimens cut out straight in one side of a circular blank to make it deformed unevenly, which causes local deformation during the deep-drawing. The experimental result demonstrates that the forming limit diagrams in the two cases show difference in their effective magnitude. The forming limit curve from deep-drawing is located lower than that from stretching. It is noted from the result that the deep-drawing process causes acceleration of localized deformation in comparison with the stretching process. From the experimental result, the maximum value of forming limit could be predicted for safe design.

**Key Words** : Forming Limit Diagram (성형한계도), Formability (성형성), Deep Drawing (딥드로잉), Stretch Forming (스트레치 성형)

---

\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\* 삼성전자

## 1. 서 론

박판금속 성형에 관한 공정변수를 효과적으로 결정하기 위해서는 먼저 재료에 관한 물성치를 구하는 것이 필수적이다. 재료의 물성치로는 대표적으로 항복강도, 가공경화지수, 이방성계수, 최대 연신률, 성형 한계도 등이 있다. 이 중에서 성형한계도는 박판성형시 성형의 성공 여부를 판단할 수 있게 해주는 중요한 기준을 제시해 준다. 따라서, 성형한계도에 관한 실험적 및 이론적으로 많은 연구가 수행되어 왔으며, 생산현장에서 많이 이용되고 있다.

성형한계도에 관한 실험적인 연구로, 초기에 Keeler<sup>(1)</sup>는 최대 주변형률과 최소 주변형률을 이용하여 성형한계곡선을 만들었다. Keeler는 편치신장 실험으로 편치와 다이형상 그리고 윤활조건 등을 변화시키면서 다양한 변형상태에 대해 한계변형률을 측정하였다. Goodwin<sup>(2)</sup>은 성형한계도를 인장-압축 영역까지 확장하여 저탄소강판에 대한 이른바 Keeler-Goodwin띠를 완성하였는데, 이것이 오늘날 널리 쓰이는 성형한계도의 기초를 이루고 있다. 처음에 Keeler-Goodwin띠가 완성 되었을 때 모든 판재들이 비슷한 한계변형률을 보이고 이 띠 속에 수렴할 것으로 예상하였으나 그 후 많은 연구<sup>(3-6)</sup>에 의해 물성이 서로 다른 판재들이 다른 성형 한계를 보이며, 여러 가지 인자 또는 변수 (예컨대 공구형상, 윤활, 변형속도, 누름압력, 판재두께, 개재물 등)역시 한계 변형률에 영향을 주는 것으로 알려졌다. 한편, Kim<sup>(7)</sup>은 성형한계도에서 최소 주변형률이 영에 가까운 평면변형률을 측정하기 위한 실험방법을 개발하였는데, 이 방법은 편치신장 실험보다 재현성이 좋은 특징이 있다.

가공경화지수, 이방성계수, 최대 연신률 등의 기본적인 물성치를 이용하여 이론적으로 성형한계도를 구하고자 하는 연구는 Swift,<sup>(8)</sup> Hill,<sup>(9)</sup> Marciniak과 Kuczynski,<sup>(10)</sup> Stören과 Rice,<sup>(11)</sup> Bressan과 Williams,<sup>(12)</sup> Jun<sup>(13)</sup> 등에 의해 이루어 졌다. 그렇지만 이론적인 성형한계도는 다양한 인자들을 정확히 고려하지 못하기 때문에 아직도 실험적인 성형한계도와 차이를 보이고 있는 실정이다.

본 논문에서는 일반적으로 수행되는 많은 시편을 스트레칭하여 성형한계도를 구하는 방법과 달리 적은 시편을 딥드로잉하여 효과적으로 성형한계도를 구하였다. 딥드로잉 실험에서는 시편의 형상을 비 대칭으로 제작하여 한개의 시편에서 다양한 한계변형률 분포를 얻을 수 있도록 하였다. 실험결과에 의해 딥드로잉으로 구한 성형한계도가 스트레칭으로 구한 성형한계도와 차이가 있었으며, 딥드

로잉으로 구한 성형한계치가 스트레칭으로 구한 성형한계치보다 작음을 알 수 있었다.

## 2. 실험 방법

재료는 자동차 차체 성형용 압연강판으로 3 종류의 강판을 사용하였으며, 강판의 명칭은 JIS규격으로 SPCC, SPRC, SPCEN이다. 강판의 두께는 0.7 mm 이고 압연 방향에 대한 영향을 고려하기 위해서 0°, 45°, 90° 방향으로 시편을 만들었다.

인장 실험과 스트레칭 실험 및 딥드로잉 실험을 수행하기 위하여 Simazu사의 50ton만능시험기를 사용하였다. 편치와 다이의 형상은 Fig.1과 같으며, 반구형 편치의 직경은 100 mm이고 다이의 직경은 102 mm이다. 스트레칭 실험시에는 비드가 있는 다이를 사용하였으며 비드의 직경은 141 mm이다. 편치의 하강속도는 30 mm/min으로 하였다.

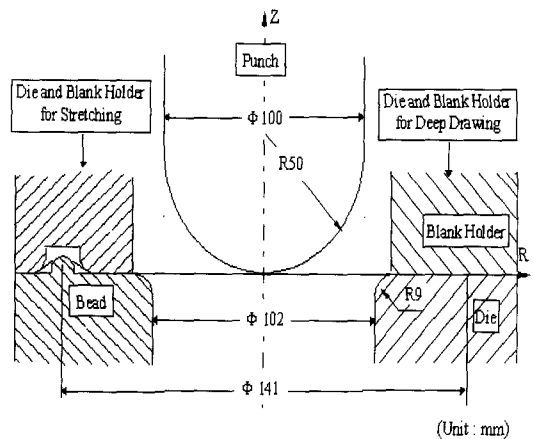


Fig. 1 Geometric description of the tooling for stretching and deep drawing

### 2.1 인장 실험

먼저 판재의 기본적인 물성치를 측정하기 위하여, 인장 시편을 JIS규격의 13A시편 형상으로 Fig.2(a)와 같이 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90°으로 제작하였다.

인장 실험으로부터 항복응력  $\sigma_y$ , 최대인장응력  $\sigma_u$ , 최대 연신률  $E_{max}$ , 균일 연신률  $E_u$ , 이방성계수  $r$ , 가공경화상수  $K$ , 가공경화지수  $n$  등과 같은 기계적 성질이 얻어진다. 항복응력  $\sigma_y$ 은 공칭 변형률이 0.2%인 곳에서 투사하여 구하였고, 최대인장응력  $\sigma_u$ 은 공칭 응력이 최대인 곳에서 구하였다. 최대 연신률  $E_{max}$ 은 파괴가 일어날 때까지

의 연신률이며, 균일 연신률  $E_u$ 은 최대인장응력이 일어날 때까지의 연신률이다. 이방성계수  $r$ 은 두께방향의 진 변형률에 대한 폭방향의 진 변형률의 비이다. 일반적으로 가공경화지수, 이방성계수, 연신률 등이 클수록 더 좋은 성형성을 갖는다.

## 2.2 성형한계도 작성을 위한 시편의 제작

스트레칭 실험에 사용된 시편은 Fig.3과 같다. Fig.3은 Hasek<sup>(14,15)</sup>가 사용한 시편의 형상으로 원형 시편의 양쪽을 원형으로 절단하여 부채꼴 모양으로 제작한 것이다. 이때, 원형 시편의 직경은 245 mm이고, 중심에서 시편의 폭은 20, 40, 60, 80, 100 mm로 Fig.3(a)~Fig.3(e)와 같다. Fig.3(f)는 스트레칭 실험에만 사용된 정사각형 시편으로 폭이 200 mm이다. Fig.3(f)는 정수압 벌징(Bulging)과 유사한 변형을 하게 된다.

딥드로잉 실험에 사용된 시편의 형상은 Fig.4와 같다. Fig.4(a)~Fig.4(e)의 시편은 스트레칭 실험에 사용된 시편과 같다. 시편을 Fig.4(a)~Fig.4(e)와 같이 부채꼴 모양으로 만들면, 다이에서 드로잉되는 부분이 쉽게 파단되는 것을 막을 수 있고 블랭크 부분의 주름 발생을 막을 수 있다. Fig.4(f), Fig.4(g), Fig.4(i)는 원형 시편의 한쪽을 직선으로 각각 60, 50, 30 mm씩 절단한 형상이다. 이와 같이 시편을 편심되게 자르는 이유는 성형중에 불균일한 변형상태를 유도하여 다양한 변형을 분포를 얻기 위함이다. Fig.4(h)는 양쪽을 30 mm씩 절단한 시편이고 Fig.4(j)는 직경이 245 mm인 원형 시편이다.

실험후 변형률을 측정하기 위하여, 시편의 표면에 지름이 5.08 mm(0.2")인 원형격자를 에칭하였다.

## 2.3 스트레칭 및 딥드로잉 실험

스트레칭 실험과 딥드로잉 실험의 전체적인 실험과정은 같으며, 단지 다이와 블랭크 홀더가 다를 뿐이다. 즉, 스트레칭 실험에서는 Fig.1과 같이 비드가 있는 다이를 사용하며 딥드로잉 실험에서는 비드가 없는 다이를 사용한다. 스트레칭 실험은 Hecker의 방법과 같다.<sup>(3,16)</sup>

스트레칭 및 딥드로잉은 파괴가 일어나는 순간까지 계속되며, 파괴가 일어나는 순간을 포착하기 위하여 하중의 변화와 시편에 새겨진 격자의 모양을 관찰하였다. 성형한계 곡선을 그리기 위하여, 네킹과 파괴가 일어난 부분의 변형된 타원격자를 측정하여 최대 주변형률(Major Strain)과 최소 주변형률(Minor Strain)을 구한다. 측정되는 격자는 아래와 같이 3가지로 분류된다.

1) Success : 파괴가 일어난 부위와 가까우면서 변형이 비교적 큰 격자.

2) Neck : 파괴가 진행되다 멈춘 격자나 이웃한 격자.

3) Fracture : 파괴가 일어난 부위의 격자.

원형격자가 타원으로 변형되기 때문에, 최대 주변형률( $E_1$ )은 타원의 장축방향이고 최소 주변형률( $E_2$ )은 타원의 단축방향이다. 주변형률 계산은

$$\text{Percent Strain} = \frac{L-D}{D}100 \quad (1)$$

와 같이 공칭변형률을 이용하였다. 여기서 L은 변형된 타원축의 길이이고 D는 초기 원형 격자의 지름이다.

성형한계도에서 수평축은 최소 주변형률( $E_2$ )이며 수직축은 최대 주변형률( $E_1$ )이다. 측정좌표점들은 시편의 폭과 윤활 방법에 따라 각기 다른 기호로 Fig.9,10,11의 성형한계도에 표기하였다. 그리고 기호의 내부가 빈 것은 측정된 격자의 위치가 파괴나 네킹 바깥부분에 있는 것이고 기호의 내부가 빗금인 것은 네킹이 일어난 부위의 격자이고 내부가 까맣게 된 것은 파괴된 부위의 격자이다. 파괴가 일어나지 않은 내부가 빈 기호는 성형한계곡선 아래에 있을 수 있고, 곡선 위에도 있을 수 있다. 성형한계도에서 각 기호가 나타내는 조건을 설명하면 처음은 윤활조건, 두 번째는 시편의 종류를 나타낸다. 예를 들면 T+P+R(w=20)는 테프론과 플라스틱신으로 윤활을 하고 고무 패드를 사용했으며 시편의 폭이 20 mm임을 뜻한다.

2.3.1 시편의 폭과 윤활조건에 따른 성형한계도  
성형한계도를 작성하기 위해서는 다양한 변형률 비를 가질 수 있도록 파괴가 일어나야 한다. 그래서, 다양한 변형률 비를 만들기 위하여 다양한 시편의 폭과 함께 윤활조건을 변화시켜 주었다.<sup>(16)</sup>

스트레칭 실험에 사용된 시편의 폭에 대한 윤활조건은 다음과 같다.

(1) 무윤활(Dry) : 시편 폭= 200 mm

(2) 테프론(T) : 시편 폭= 200 mm

(3) 테프론+그리스(T+G) : 시편 폭= 200 mm

(4) 테프론+플라스틱신(T+P) : 모든 시편 폭

위와 같은 시편의 폭과 윤활조건에 따라 실험을 하였을 때, 성형한계도상의 대략적인 변형률 위치를 Fig.5에 도시하였다. Fig.5에서 시편 폭이 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm인 경우는 변형률 분포가 성형한계도의 좌측에 위치하고, 시편 폭이 200 mm인 경우는

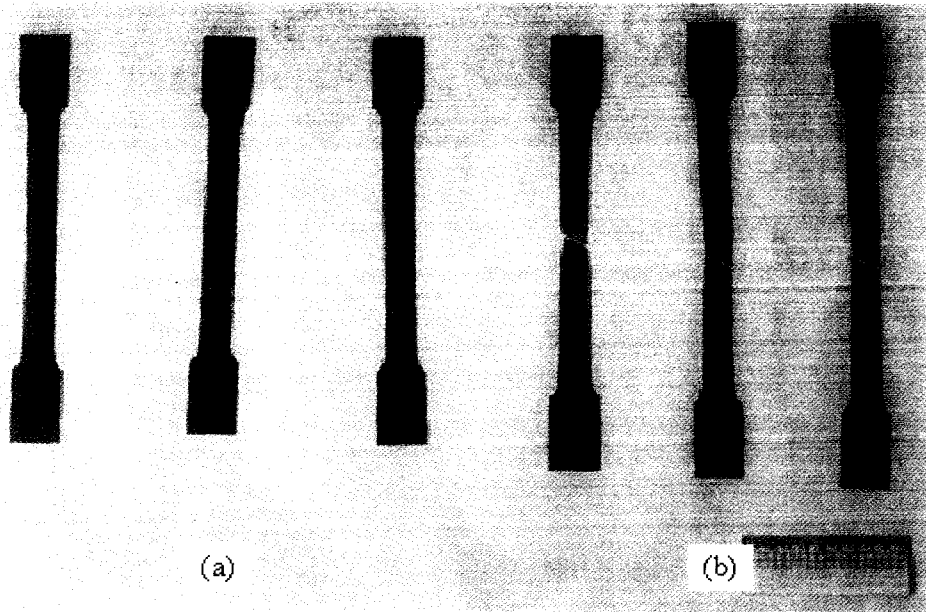


Fig. 2 Specimens used in tension test and fracture of specimens after test

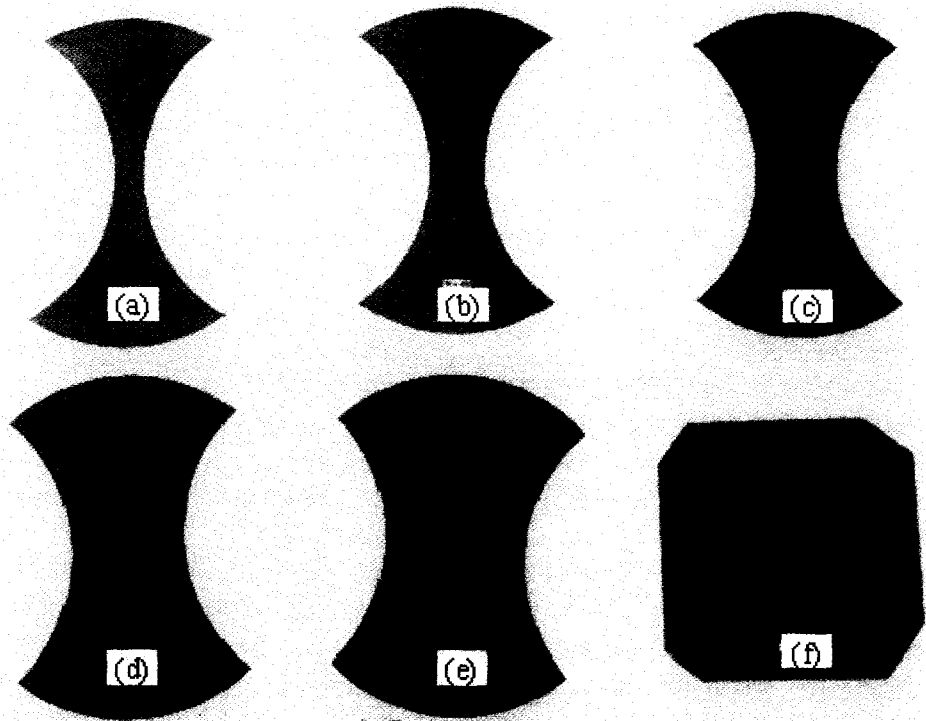


Fig. 3 Various specimens used in experiment for stretching: (a)Width=20 mm; (b)Width= 40 mm; (c)Width=60 mm (d)Width=80 mm; (e) Width=100 mm; (f) Width=200 mm

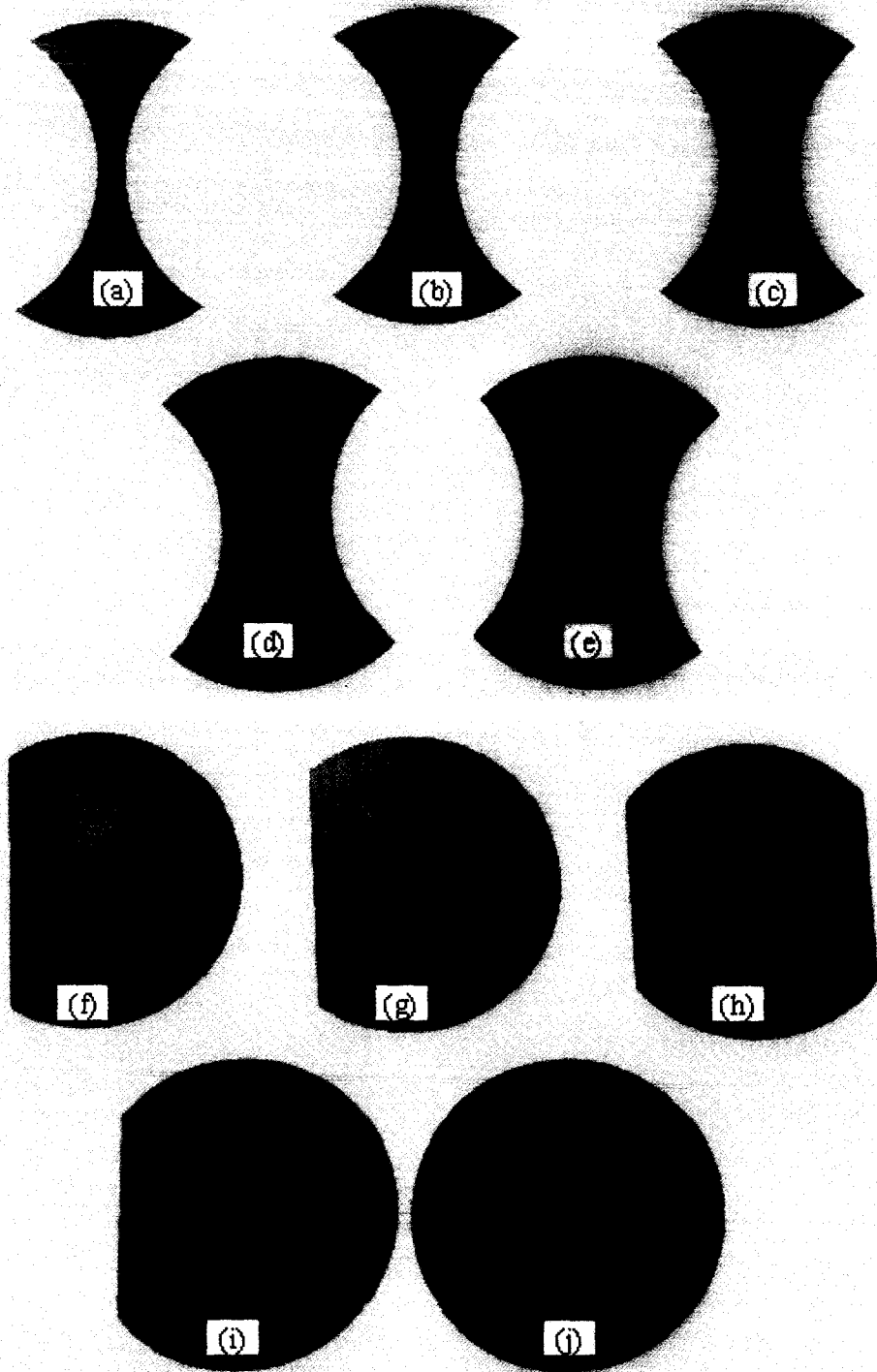


Fig. 4 Various specimens used in experiment for deep drawing: (a)Width=20 mm; (b)Width=40 mm; (c)Width=60 mm; (d)Width=80 mm; (e)Width=100 mm; (f)Width= 185 mm; (g)Width=195 mm; (h)Width=185 mm; (i)Width=215 mm; (j)Width= 245 mm

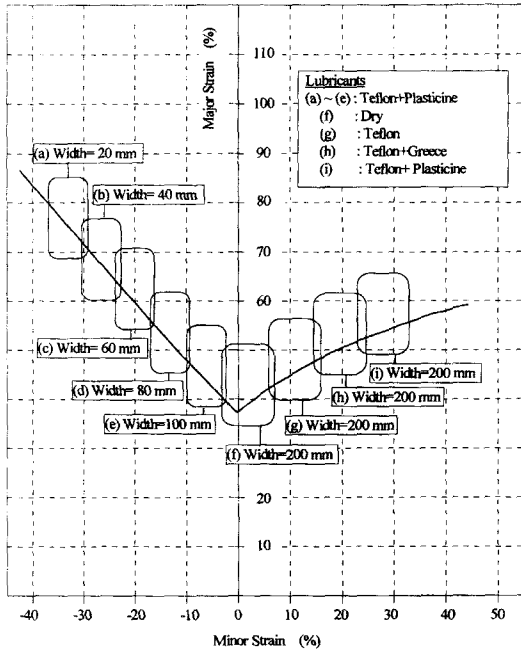


Fig. 5 Schematic diagram for proper specimens to construct forming limit diagram by stretching

성형한계도의 중앙부분과 우측에 위치한다. 성형한계도에서 우측의 변형을 분포는 시편의 폭이 고정되어 있으므로 다양한 윤활조건이 필요하다.

딤드로잉 실험에 사용된 시편의 폭에 대한 윤활조건은 다음과 같다.

- (1) 테프론+플라스티신+고무패드(T+P+R) :

시편 폭 = 20~100 mm, 한쪽만 절단한 시편 폭 = 185 mm, 195 mm

- (2) 테프론+플라스티신 (T+P) :

시편 폭 = 185 mm, 245 mm,

한쪽만 절단한 시편 폭 = 215 mm

위와 같은 시편의 폭과 윤활조건에 따라 실험을 하였을 때, 성형한계도상의 대략적인 변형을 위치는 Fig.6과 같다. 딤드로잉의 경우에도 Fig.6과 같이 시편 폭이 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm인 경우는 변형을 분포가 성형한계도의 좌측에 위치한다. 또한, 한쪽만 절단한 시편 폭 185 mm의 경우도 성형한계도의 좌측에 위치한다. 한쪽만 절단한 시편 폭 195 mm는 성형한계도의 중앙 부분에 위치하며, 시편 폭 185 mm, 원형 시편 폭 245 mm, 한쪽만 절단한 시편 폭 215 mm는 성형한계도의 우측에 위치한다. Fig.6에서 시편 폭이 80 mm와 100

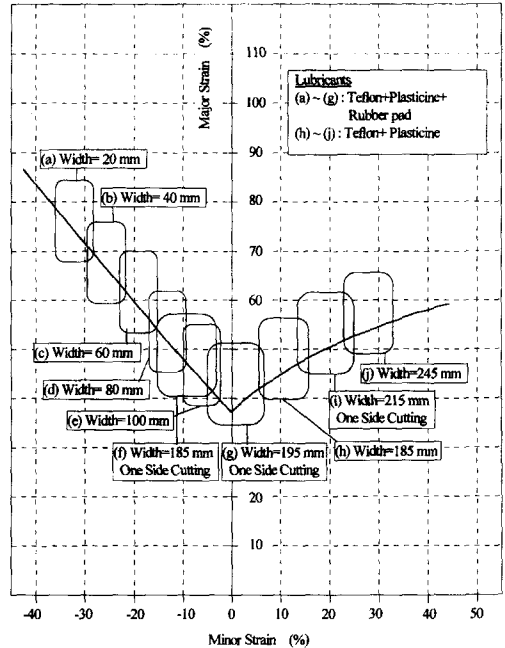


Fig. 6 Schematic diagram for proper specimens to construct forming limit diagram by deep drawing

mm인 경우는 실험을 하지 않아도 성형한계도를 작성하는데 문제가 없다. 시편의 폭이 좁은 실험을 할 때에는 블랭크 홀더와 다이 사이에 고무패드를 두었는데 이는 균일한 블랭크 홀딩력을 주고 마찰력을 키워주기 위함이다.

### 2.3.2 딤드로잉 실험을 위한 고려

본 논문에서 제안한 딤드로잉 실험을 성공적으로 수행하기 위해서는 플랜지부분에서 주름이 발생하지 않고 드로잉이 되면서 파괴가 일어나야 한다. 이와 같은 조건을 만족하기 위하여 딤드로잉을 수행할 때, 블랭크 홀딩력과 시편의 크기, 마찰력 등을 적절히 조절할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 부과하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 드로잉시 주름이 발생하지 않도록 블랭크 홀딩력을 충분히 크게 하였다. 본 연구에서는 시편의 폭이 좁은 경우(Fig.6의 Case(a)~(g)인 경우)에는 10 ton, 시편의 폭이 큰 경우(Fig.6의 Case(h)~(j)인 경우)에는 5 ton의 블랭크 홀딩력을 가하였다. 둘째, 시편의 폭이 좁은 경우에는 드로잉이 너무 쉽게 되기 때문에 파괴를 유도하기 위하여 10 ton의 블랭크 홀딩력과 함께 고무패드를 두어 마찰력을 증가시켜서 드로잉이 억제되도록 하였다. 셋째, 시편의 폭이 큰 경우에는 5 ton의 블랭크 홀딩력의

로 주름이 발생하지 않도록 하고 파괴는 드로잉 비를 이용하였다. 즉, 직경이 245 mm인 시편은 드로잉비(시편의 직경/다이의 직경)가 2.45로서 일반적인 강판의 한계 드로잉비에 근사한 값을 가지게 되어 드로잉이 되면서 파괴가 일어나기 때문이다.<sup>(17)</sup>

### 3. 실험 결과

성형한계도를 작성하기 전에 먼저 인장 실험을 Fig.2(b)와 같이 수행하여 재료의 기본적인 기계적 물성치를 Table.1에 정리하였다. Table.1에서 연신률, 가공경화지수, 이방성계수 등의 값이 큰 SPCC의 성형성이 상대적으로 좋은 것을 알 수 있다. Table.1과 같은 물성치를 이용하여 이론적인 성형한계도를 작성할 수 있다.

Fig.7과 Fig.8은 스트레칭과 딥드로잉을 수행하고 난 후 시편의 변형된 형상이다. Fig.7(a)~ Fig.7(e)는 시편의 폭을 다르게 하여 실험한 것이고 Fig.7(f)~ Fig.7(i)는 윤활조건을 다르게 하여 실험한 시편이다. Fig.8에서는 편심으로 절단한 시편의 변형형상을 볼 수 있다. Fig.7과 Fig.8의 모든 시편에서 파괴가 일어난 것을 볼 수 있으며, 파괴된 부위는 가장 위와 조금 아래 부분이었다.

#### 3.1 실험적 성형한계도와 이론적 성형한계도의 비교

Hill과 Swift,<sup>(8,9)</sup> Bressan과 Williams,<sup>(12)</sup> Jun<sup>(13)</sup> 등의 이론적 성형한계도를 인장실험으로 구한 물성치를 이용하여 Fig.9 ~ Fig.11의 성형한계도에 도시하였다. 실험적 성형한계도와 이론적 성형한계도를 비교해 보면 대부분 실험적 성형한계도가 이론적인 성형한계도보다 위에 위치한다. 이와 같은 차이는 이론적 성형한계도가 다양한 성형인자들을 고려하지 못하기 때문이다. 성형한계에 영향을 주는 재료상수나 공정변수들이 많고, 경우마다 각 인자의

상대적인 기여도가 다를 것이고, 또 인장실험에서 얻은 재료상수가 변형량이나 변형형태에 따라 변화하기 때문에 이 모든 인자들을 고려하여 해석적으로 성형한계도를 정확히 예측한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 즉, 인장 실험에서 얻은 재료상수를 기초로 하여 이론적으로 성형한계도를 예측하는 것은 아직도 미흡한 점이 많다. 특히, 이론적 성형한계도는 일반적으로 실험으로 구한 연신률을 고려하지 않고 있으며, 차체 성형용 강판은 성형성이 특히 좋은 강판이므로 일반재료에 적용하는 이론적 성형한계도보다 실험결과가 위에 위치 할 것이다. 따라서, 성형한계도를 좀더 정확히 작성하기 위해서는 실험을 하는 것이 바람직하다.

#### 3.2 스트레칭에 의한 성형한계도

3종류의 강판에 대하여 Fig.7과 같은 스트레칭 실험을 수행하고 변형률 분포를 측정하였다. Fig.9(a), Fig.10(a), Fig.11(a)는 스트레칭 실험으로 구한 성형한계도로 시편 폭과 윤활조건에 따라 전 영역에 변형률이 분포되어 있음을 알 수 있다. 시편 폭 200 mm는 무윤활 조건(Dry)에서 평면변형 ( $E_2 \cong 0, E_1 > 0$ )에 가깝게 나타나는 데 평면 변형 후 파괴되는 경우는 많지 않았다. 윤활이 잘 될 수록 점점 등축신장 변형( $E_2 \cong E_1$ )을 하게 됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 테프론과 플라스틱을 이용하여 등축신장 변형이 되도록 하였다. 스트레칭에서 플라스틱을 사용하면 윤활이 매우 좋아서 거의 정수압 벌징과 유사한 변형을 하였다.

성형한계도로부터 3종류의 강판에 대한 성형성을 비교해 보면, 대체적으로 9 % 정도의 범위 안에서 차이가 발생하였다. 최대 주변형률 축( $E_2 = 0$ 인 경우)에서 비교해 보면, SPCC의 변형률은 42 %이고, SPRC의 변형률은 31 %이며 SPCC인 경우는 38 %이다.

Table 1 Mechanical properties of experimental specimens

	SPCC	SPRC	SPCEN
Yield Stress $\sigma_y$ (Kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	16.589	20.803	15.018
Ultimate Stress $\sigma_u$ (Kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	28.553	35.364	30.034
Uniform Elongation $E_u$ (%)	23.092	24.452	26.892
Maximum Elongation $E_{max}$ (%)	45.818	42.534	47.064
Work-hardening Coefficient K(Kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	45.505	58.709	53.760
Work-hardening Exponent n	0.1840	0.2113	0.2520
Lankford Value r	2.1669	1.8895	2.0186

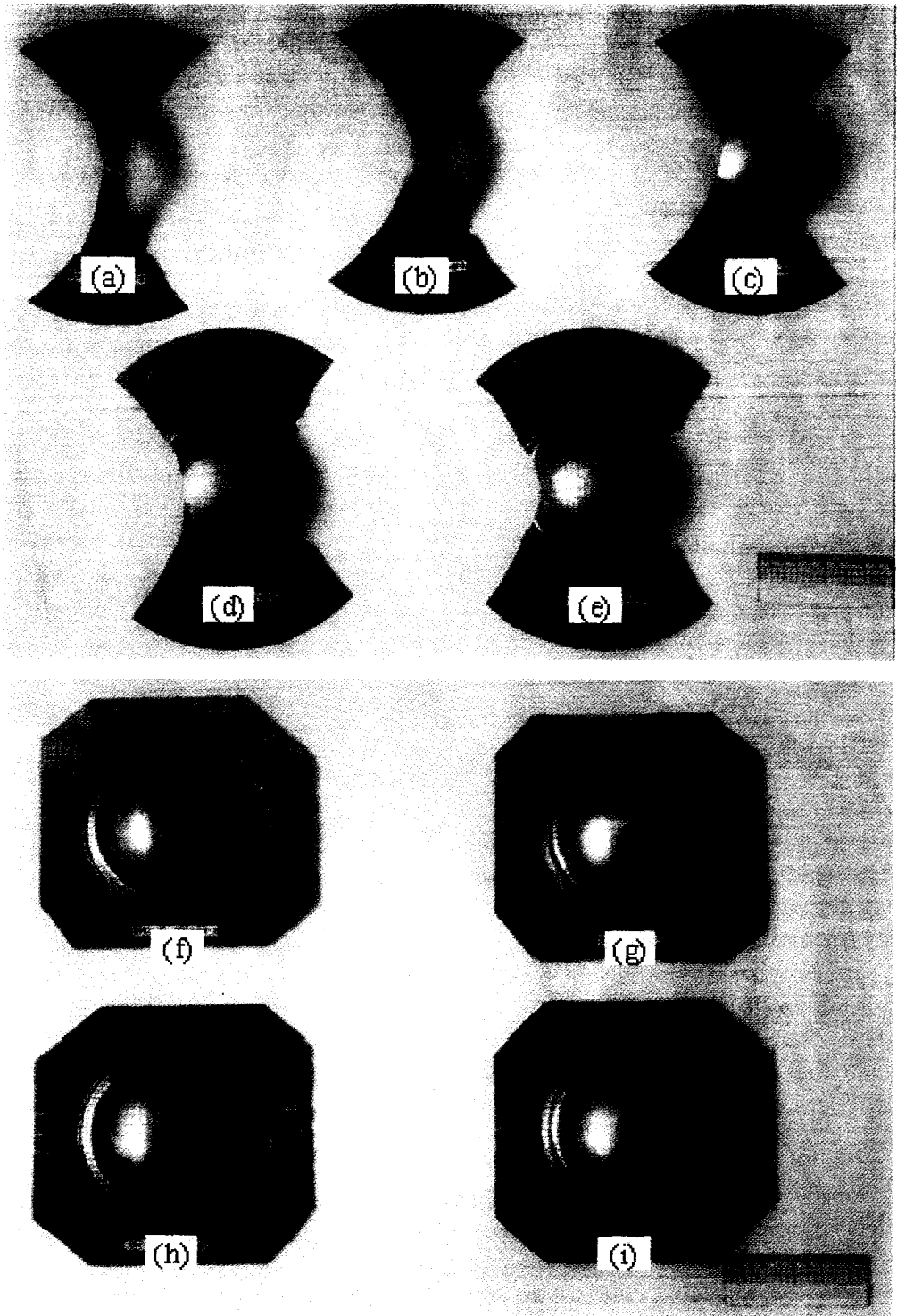


Fig. 7 Deformed shapes by stretching: (a)Width= 20mm; (b)Width= 40mm; (c)Width=60mm; (d)Width=80mm; (e) Width=100mm; (f)-(i) Width=200mm



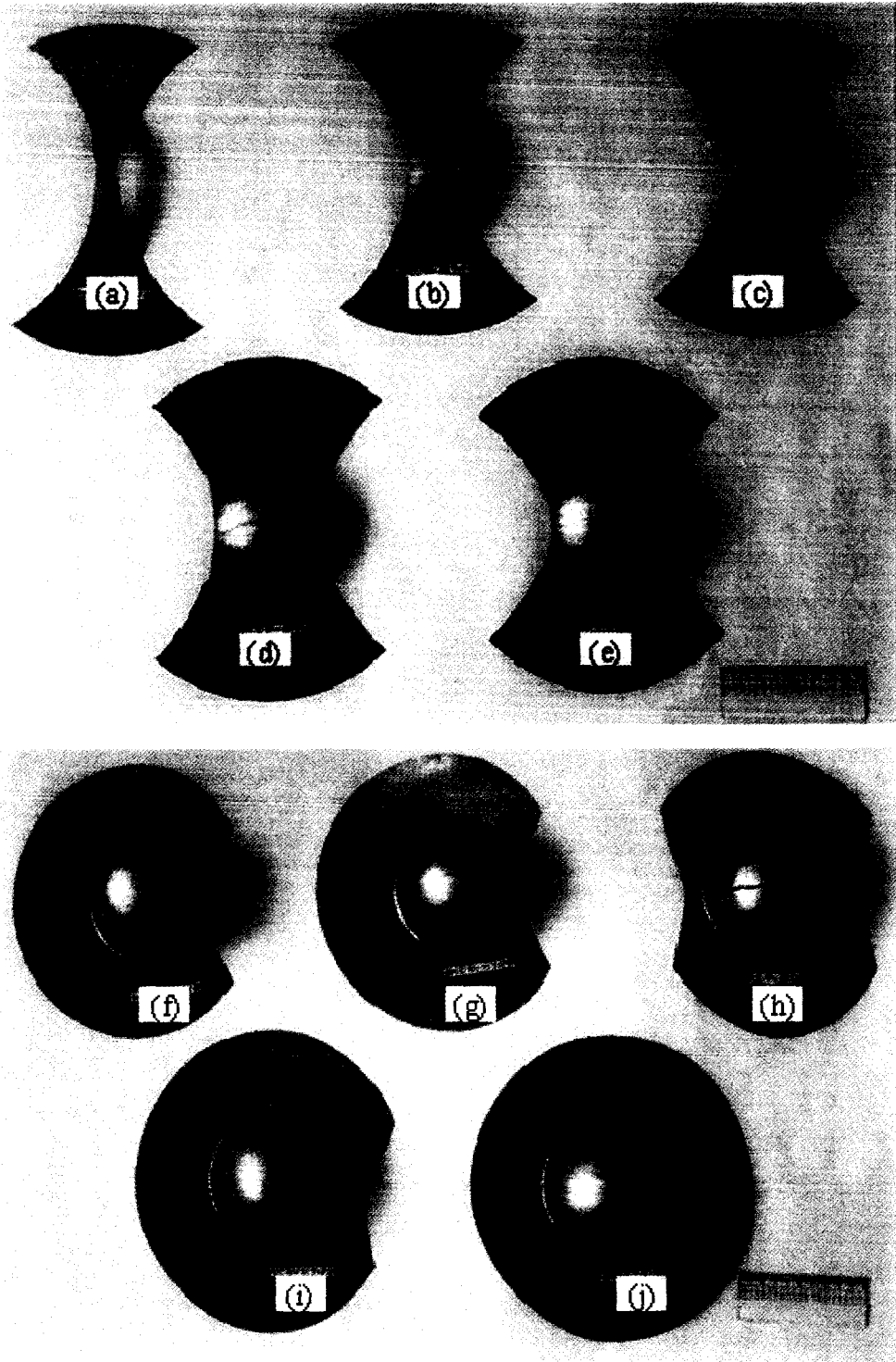
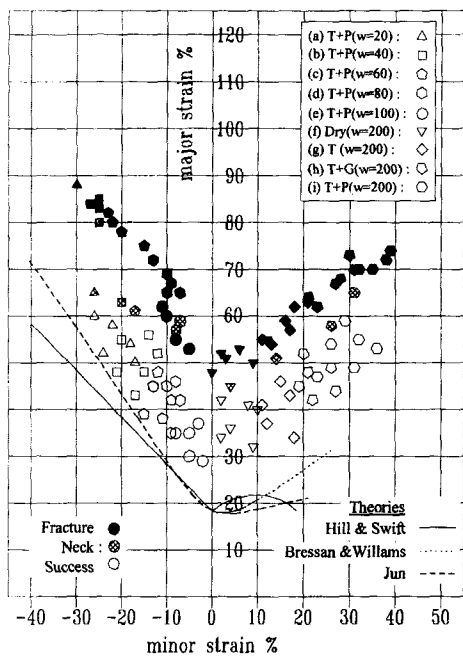
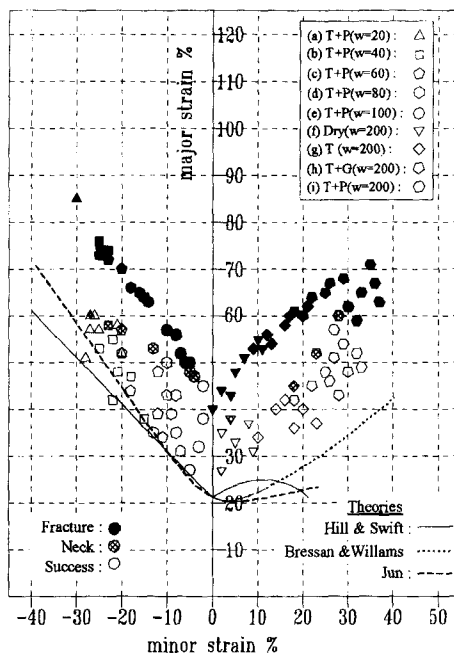


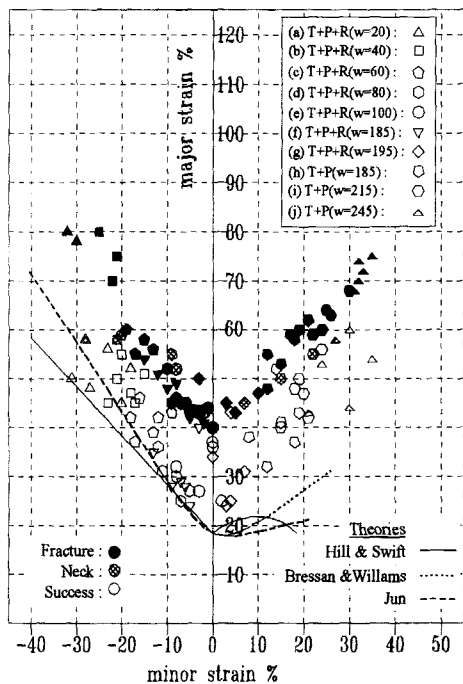
Fig. 8 Deformed shapes by deep drawing: (a)Width= 20mm; (b)Width=40mm; (c)Width=60mm; (d)Width=80mm; (e) Width=100mm; (f) Width=185mm; (g)Width=195mm;(h)Width=185mm; (i)Width=215mm;(j)Width=245mm



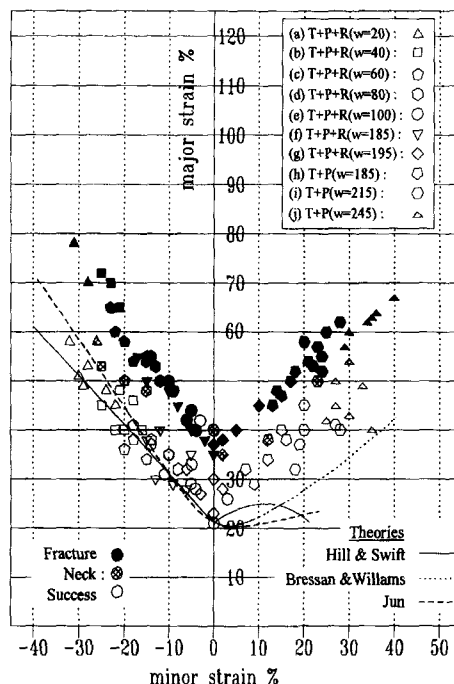
(a)



(a)



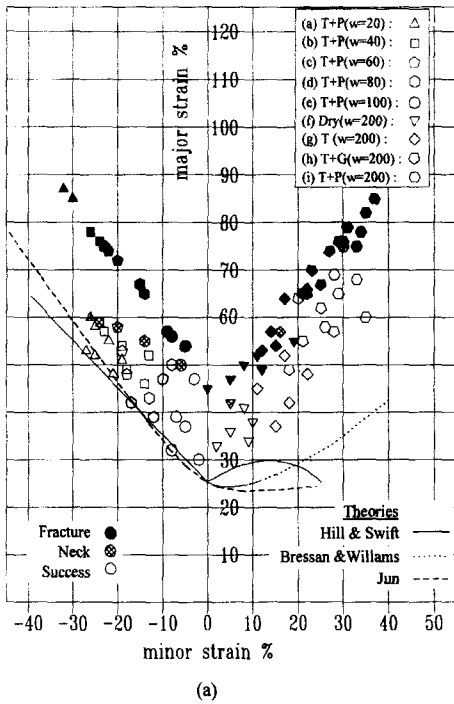
(b)



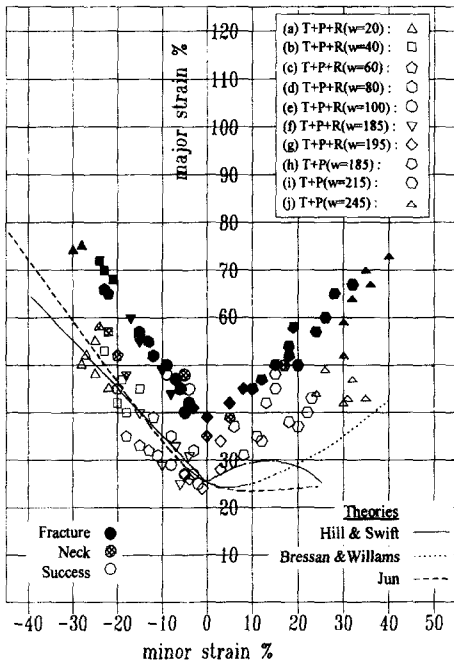
(b)

Fig. 9 Forming limit diagram constructed by stretching and deep drawing for SPCC:(a)stretching, (b)deep drawing

Fig. 10 Forming limit diagram constructed by stretching and deep drawing for SPRC:(a)stretching, (b)deep drawing



(a)



(b)

Fig. 11 Forming limit diagram constructed by stretching and deep drawing for SPcEN:(a)stretching, (b)deep drawing

### 3.3 딥드로잉에 의한 성형한계도

3종류의 강판에 대하여 딥드로잉 실험으로부터 구한 성형한계도는 Fig.9(b), Fig.10(b), Fig.11(b)와 같다. Fig.8과 같이 실험을 수행한 결과 성형한계도 전 영역의 변형을 비를 얻을 수 있었다. 따라서 딥드로잉으로 성형한계도를 작성할 때, 본 논문에서 이용한 실험방법을 이용하면 효과적일 것이다.

성형한계도로부터 3종류의 강판에 대한 성형성을 비교해 보면, 대체적으로 8 % 정도의 범위 안에서 차이가 발생하였다. 최대 주변변률 축( $E_2=0$ 인 경우)에서 비교해보면, SPCC의 변형률은 36 %이고, SPcEN의 변형률은 28 %이며 SPcEN인 경우는 33 %이다. 이와 같은 차이는 인장실험으로 얻은 물성치의 경향과 일치한다. 즉 SPCC, SPcEN은 이방성계수가 크고, 항복 강도가 작은 반면, SPcEN은 이방성계수가 작고 항복강도가 크다.

### 3.4 스트레칭과 딥드로잉에 의한 성형한계도의 비교

Fig.9~Fig.11의 스트레칭과 딥드로잉에 의한 성형한계도를 비교하기 위해서 Fig.12~Fig.14에 성형한계도를 작성하였다. 스트레칭에 의한 변형률이 딥드로잉에 의한

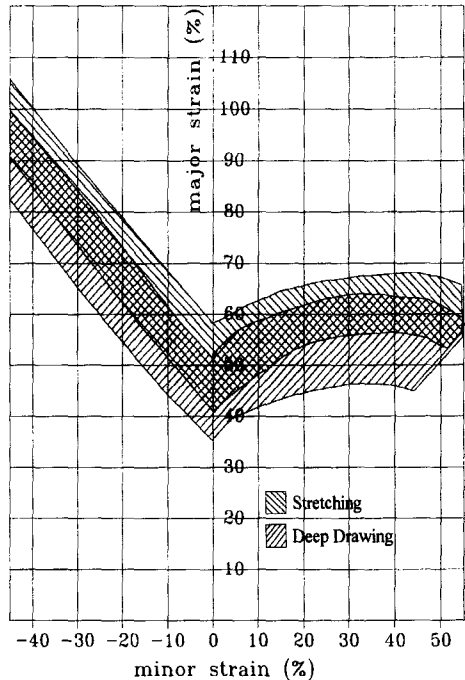


Fig. 12 Forming limit bands constructed by deep drawing and stretching for SPCC

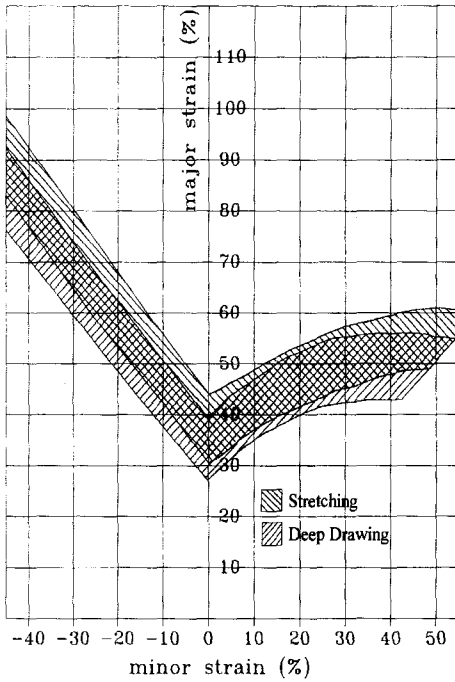


Fig. 13 Forming limit bands constructed by deep drawing and stretching for SPRC

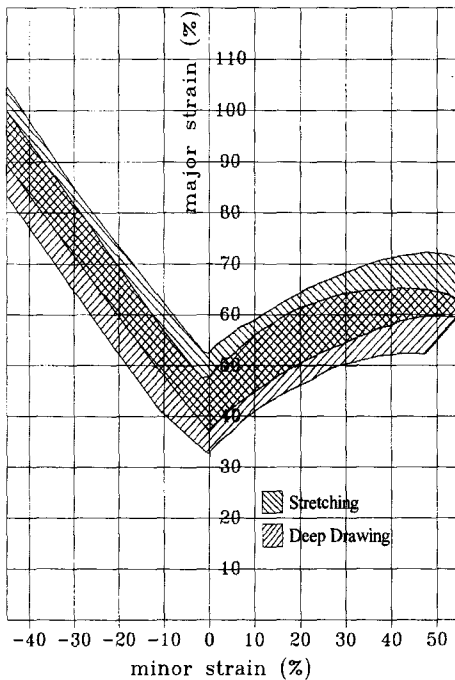


Fig. 14 Forming limit bands constructed by deep drawing and stretching for SPCEM

변형률보다 큰 값을 갖는데, 이는 스트레칭의 경우 펀치가 내려오며 따라 변형률의 변화가 거의 선형적으로 변하는데 반하여 딥드로잉의 경우는 변형률의 변화가 처음에는 완만하다가 변형률이 급격하게 증가하고, (18, 19, 20) 딥드로잉의 파단된 시편을 보면 스트레칭된 시편보다 위쪽에 위치하고 찢어진 양상도 거의 직선적으로 찢어지는 것으로 보아 원주방향의 응력보다는 반경방향의 응력이 지배적이기 때문이다. 일반적인 경우 반경방향의 변형률이 작으므로 딥드로잉 성형의 경우 한계변형률이 한계성형도상에서 스트레칭의 한계변형률 아래에 위치한다. (18) 또한, 이방성이 큰 SPCC의 경우에는 스트레칭의 성형한계띠와 딥드로잉의 성형한계 사이의 격차가 비교적 큰 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 3종류의 재료에 대하여 인장실험으로 재료의 기본적인 물성치를 구하였고, 스트레칭과 딥드로잉 실험으로부터 성형한계도를 작성하였다. 이상의 실험과 고찰로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 딥드로잉 실험으로 성형한계도를 작성할 수 있는 효과적인 실험방법을 제안하였다. 특히, 딥드로잉 실험에서는 비대칭 시편을 포함한 10종류의 시편, 고무패드, 여러 윤활조건 등을 이용하여 성형한계도의 전 영역에서 변형률 분포를 구할 수 있었다.
- (2) 딥드로잉에 의한 성형한계치가 스트레칭에 의한 성형한계치보다 아래에 위치하고 있는 것을 실험적으로 알 수 있었다. 따라서, 딥드로잉에 의한 박판성형공정에서는 딥드로잉에 의한 성형한계도를 이용하는 것이 바람직하며 기존의 스트레칭에 의한 성형한계도를 참조할 경우 성형중에 파단의 위험성이 있게 된다.
- (3) 본 논문에서 제시한 딥드로잉에 의한 성형한계도 작성방법을 자동차 차체와 같이 대부분 딥드로잉에 의해 성형되는 공정에 성형성을 평가하는 도구로 이용하면 효과적일 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- (1) S.P. Keeler and W.A. Backofen, 1963, "Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches", Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.56, pp.25-48.
- (2) G.M. Goodwin, 1968, "Application of strain

- analysis to sheet metal forming problems in the press shop", Trans. Soc. of Automotive Engineers, Vol. 77, pp.380~387.
- (3) S.S. Hecker, 1972, "A simple forming curve technique and results on aluminum alloys", General Motors Research Publication, No.1220.
  - (4) K.S. Chan and D.A. Koss, 1984, "Localised necking of sheet at negative minor strains" Metal. Trans., Vol.15A, p.323.
  - (5) K. Suzuki, 1987, "The relationship between the deep-drawability and the r-values of sheet metals", J. of Mechanical Working Technology, Vol.15, pp.131~142.
  - (6) E. Schedin and A. Melander, 1987, "On the strain distribution during the stretching forming of low and high-strength sheet metals", J. of Mechanical Working Technology, Vol.15, pp.181~202.
  - (7) 김영석, 김기수, 1993, 평면변형 장출시험기술의 개발, 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp1132~1137.
  - (8) H.W. Swift, 1952, "Plastic instability under plane stress", J. Mech. Phys. Sol., Vol.1, pp.1~18.
  - (9) R. Hill, 1952, "On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheet", J. Mech. Phys. Sol., Vol.1, pp.19~20.
  - (10) Z. Marciniak and K. Kuczynski, 1967, "Limit strains in the process of stretch forming sheet metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp.609~620.
  - (11) S. Stören and J.R. Rice, 1975, "Localized necking in the sheets", J. Mech. Phys. Sol., Vol. 23, pp.421~441.
  - (12) J.D. Bressan and J.A. Williams, 1983, "The use of a shear instability criterion to predict local necking in sheet metal deformation", Int. J. Mech. Sci., Vol. 25, pp155~168.
  - (13) G. Jun, 1990, "An extension of shear instability model on localized necking", ICTP, pp.1293~1298.
  - (14) V. Hasek, 1978, "Untersuchung und theoretische beschreibung wichtiger einflussgr sen auf das Grenzforman-derungsschaubild", Institute of Metal Forming Report, Univ. of Stuttgart, West Germany, p.213.
  - (15) C.H. Toh, Y.C. Shiau and S. Kobayashi, 1986, "Analysis of a test method of sheet metal formability using the finite-element method", Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.108, p.3~8.
  - (16) T.L. Hursman, 1978, "Development of forming limit curves for aerospace aluminum alloys", Formability Topics Metallic Materials, STP 647, ASTM, pp.122~149.
  - (17) 전기찬, 1993, "박판금속의 성형 -이론과 실제-", 반도체출판사.
  - (18) P.P. Date and K.A. Padmanabhan, 1992, "On the prediction of the forming-limit diagram of sheet metals", Int. J. Mech. Sci., Vol. 34, No.5, pp.363~374.
  - (19) Z.H. Lu and D. Lee, 1987, "Prediction of history-dependent forming limits by applying different hardening models", Int. J. Mech. Sci., Vol.29, No.2, pp.123~137.
  - (20) M.M. Moshksar, 1993, "The effect of strain rate on the mechanical behavior of Al-Si alloy", J. Mater. Process. Technol., Vol. 36, No. 4, pp.383~394.