

## 판재의 성형한계 결정을 위한 시간의존적 방법의 제안

김성곤<sup>1</sup> · 김형종<sup>#</sup>

### Proposal of a Time-dependent Method for Determining the Forming Limit of Sheet Metal

S. G. Kim, H. J. Kim

(Received January 11, 2018 / Revised March 2, 2018 / Accepted March 7, 2018)

#### Abstract

Most domestic and international standards on the forming limit diagram (FLD) including ISO 12004-2, use a 'position-dependent method,' which determines the forming limit from a strain distribution measured on the specimen after necking or fracture. However, the position-dependent method has inherent problems such as the incidence of asymmetry of a strain distribution, the estimation of missing data near fracture, the termination time of test, and the deformation due to the new stress equilibrium after a fracture, which is blamed for causing sometimes a significant lab-to-lab variation. The 'time-dependent method,' which is anticipated to be a new international standard for evaluating the forming limit, is expected to greatly improve these intrinsic disadvantages of the position-dependent method. It is because the time-dependent method makes it possible to identify and accurately determine the forming limit, just before the necking point from the strain data as continuously measured in a short time interval. In this study, we propose a new time-dependent method based on a Gaussian fitting of strain acceleration with the introduction of 'normalized correlation coefficient.' It has been shown in this study that this method can determine the forming limit very stably and gives a higher value, which is in comparison with the results of the previously studied position-dependent and time-dependent methods.

**Key Words** : Forming Limit Diagram, Sheet Metal, Time-dependent Method, ISO 12004-2, Strain Acceleration, Normalized Correlation Coefficient

#### 1. 서론

성형한계도(forming limit diagram, FLD)는 주변형률-부변형률 평면에서 주변형률의 부호와 크기에 따른 다양한 변형 모드에서 판재가 파단을 일으키지 않는 주변형률의 한계값을 나타낸 그림으로, 기본적으로 시험을 통하여 구해야 하는 재료 물성이다. 그러나 같은 재료에 대해서도 시험 장비나 조건뿐만 아니라 시험자의 숙련도나 판단력 등에 따라 결과 간에 상당한 편차를 보이는 경우가 많다.

성형한계도를 실험적으로 얻기 위해서 Hecker[1] 또는 Marciniak[2]이 제안한 신장성형(stretch forming) 시험법이 주로 사용되어 왔는데, 국제규격 ISO 12004-2[3]를 비롯한 대부분의 국가별 표준규격들도 이 방법에 기반을 두고 실험실 간 편차를 최소화하기 위한 여러 규정을 명시하고 있다.

Hotz 등[4]은 최신의 국제규격을 도출한 배경과 함께 그 한계에 대해서도 자세히 설명하고 있다. ISO 12004-2 규격은 네킹 또는 파단 직후 시편에서 측정된 변형률 분포로부터 성형한계를 결정하는 '위

1. 강원대학교 대학원 융합시스템공학과, (주)광진  
# Corresponding Author : Dept. of Mechanical and Biomedical Eng.,  
Kangwon National Univ., E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

치의존법(position dependent method)'을 사용하므로, 변형률 정보를 얻기 어려운 파단부의 변형률은 역2차식(inverse-parabolic) 곡선근사를 통해 추정하는 방법을 사용한다. 그러나 역2차 곡선은 보통의 제조현장에서와 같은 무윤했 또는 부분윤했의 경우나 고강도 강판, 알루미늄 등 불균일한 변형거동을 보이는 재료에 대해서는 적절한 근사식이 되기 어렵다.

제조현장에서는 종종 ISO 12004-2 규격에 따라 결정된 성형한계보다 더 큰 변형률로 성형된 부품들이 있는 것으로 Hotz 등[5]은 후속 연구에서 밝히고 있다. Lee 등[6]은 통상 얻어지는 비대칭적 변형률 분포를 합리적으로 근사하기 위한 방법으로 역4차식(inverse-quartic) 곡선근사법을 제안하고, 이 방법으로 구한 한계 주변형률이 역2차식 근사에 비하여 5%p 정도 더 높게 나타났다는 결과를 발표한 바 있다. 그러나 위치의존법은 곡선근사식뿐만 아니라 시험 종료 시점, 곡선근사에 사용되는 데이터 점의 선택, 파단 후 새로운 응력 평형에 따른 변형률 변화 등 상당한 실험실 간 편차를 나타낼 수밖에 없는 본질적인 문제를 내포하고 있다고 할 수 있다.

한편, 국제표준규격의 새로운 성형한계 평가방법으로 예고되어 많은 연구가 진행되고 있는 '시간의존법(time dependent method)'은 시험 도중 짧은 시간(또는 행정) 간격으로 연속적으로 측정된 변형률 데이터를 적절히 가공함으로써 네킹 시점과 그 직전의 성형한계를 비교적 정확히 판단할 수 있어 위치의존법이 가진 본질적인 단점들을 상당히 보완할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 배경에서 Merklein 등[7]은 변형률가속도(strain acceleration)를 기반으로 회기분석적 접근으로 성형한계를 결정하는 방법을 제안하고 그 결과를 위치의존적 방법과 비교하였으며, Volk 등[8]은 부분 2차(piecewise quadratic) 곡선근사법을 통해 변형률속도를 평활화하고, 두께방향 변형률속도 이력곡선을 2개의 직선으로 근사하여 성형한계를 결정하는 선형 곡선근사 알고리즘을 발표하였다. 또한, Hotz 등[5]은 Volk 등의 방법을 수정한 최적선형근사법(linear best fit method)을 비롯하여 상관계수법(correlation coefficient method), 활공상관계수법(gliding correlation coefficient method), 평균값-중간값 차이법 등 다양한 방법으로 구한 성형한계도를 그 안정성과 함께 상호 비교한 연구를 수행하였다. 국내에서는 Kim 등[9]이 주변형률속도가 급증하기 시작하는 천이점을 성형한계로 결정하는 방법을 제안

하고, 그 결과를 위치의존적 방법과 비교할 때 더 높은 성형한계를 나타낸다고 발표한 바 있다.

본 연구에서는 변형률가속도와 편치행정 간의 '정규화 상관계수(normalized correlation coefficient)'를 기반으로 하는 새로운 시간의존법을 제안하고, 그 과정과 결과를 선행 연구된 위치의존법 및 시간의존법들과 비교·분석하여 그 안정성과 유효성을 확인하고자 한다. 그리고 최종적으로 얻어지는 성형한계 평가 결과에 대하여 논한다.

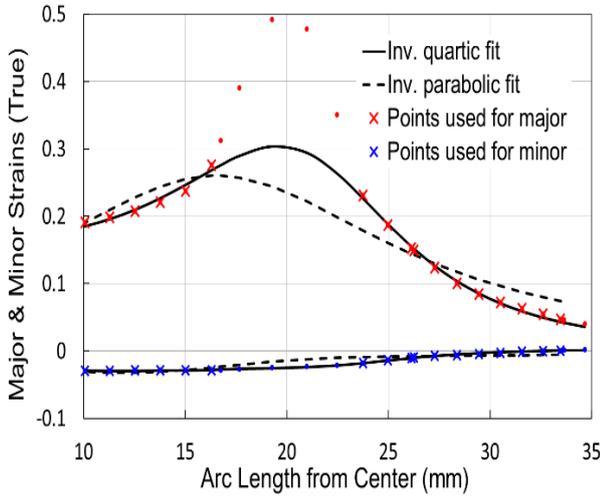
## 2. 기존 성형한계 결정법에 관한 고찰

### 2.1 위치의존적 방법

성형한계의 결정은 결국 네킹의 시작점을 결정하는 방법에 달려있다. 국제표준규격 ISO 12004-2[3]는 시편에 발생한 넥 또는 크랙에 수직인 방향의 여러 단면을 따른 주변형률과 주변형률의 분포를 역2차 곡선으로 근사하여 성형한계변형률을 추정하는 '위치의존적' 방법을 규정하고 있다. 그러나 서론에서 기술한 바와 같이 이 방법은 재료의 성형한계를 상당히 저평가하는 경우가 많으며, 특히 고강도 강판이나 경량 소재의 경우에 더 그러한 것으로 알려져 있다[5]. 역2차곡선은 시편 중심부에서 파단이 일어나 변형률이 대칭적으로 분포하는 경우에는 좋은 근사식이 될 수 있지만, 이러한 상황은 소재와 편치 사이에 여러 층의 윤했막을 형성하여 마찰을 거의 제거한 경우에만 가능하다. 제조현장뿐만 아니라 실험실 환경에서도 완벽한 윤했조건을 적용하여 대칭적인 변형률 분포를 얻는 것은 매우 어렵다. Fig. 1은 성형한계도 시험에서 보통 얻어지는 비대칭적인 변형률 분포의 경우 저자들의 선행 연구[6]에서 제안한 역4차식 곡선근사법이 역2차식보다 더 적합하며, 성형한계도 더 높게 평가하는 것을 보여주고 있다.

### 2.2 시간의존적 방법

시간의존법은 위치의존법이 갖고 있는 여러 가지 문제들을 극복하기 위해 ISO 국제규격의 다음 버전으로 개발을 진행하고 있는 방법이다. 시편의 성형과정 동안 짧고 일정한 시간 간격으로 연속적으로 변형률 분포를 측정해야 하므로 광학식 자동 변형률 측정장비가 필요하다. 본 연구에서는 세계적으로 널리 보급되어 있는 ARAMIS[10] 시스템을 사용하였다.

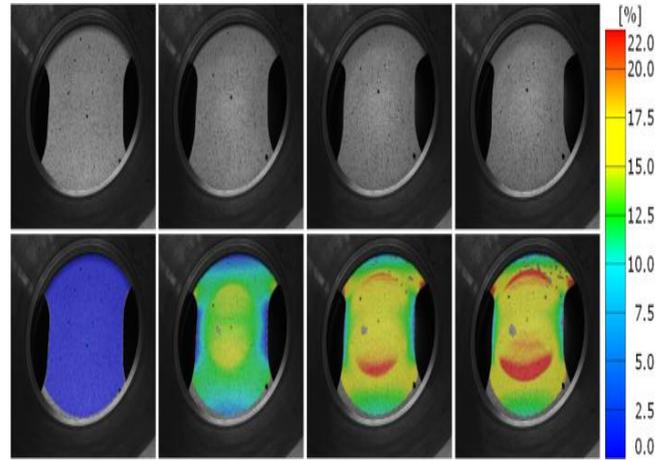


**Fig. 1 Comparison between inverse parabolic fit and inverse quartic fit [6]**

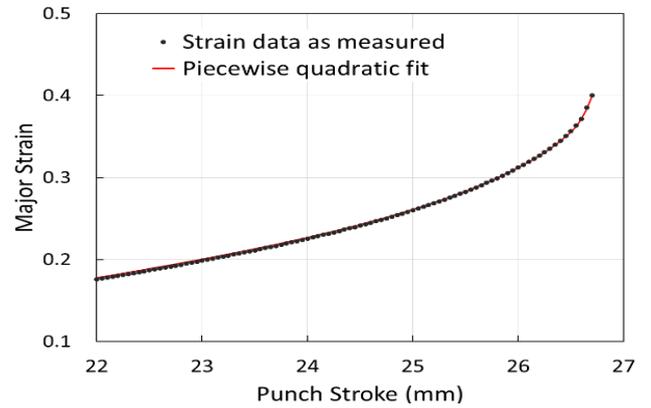
성형한계도 시험에 사용한 재료는 두께 1 mm의 SGARC440 강판이며, 25~150 mm 사이의 6가지 성형부 폭을 가진 Nakajima 시편으로 가공하여 표면에 백색과 흑색 스프레이를 사용하여 불균일한 스패클 패턴(speckle pattern)을 도포하였다. 50 ton 복동식 유압프레스에서 지름 100 mm의 반구형 펀치로 신장성형하면서 0.5 sec의 일정한 시간간격(펀치행정 0.05 mm 간격)으로 스테레오 영상을 촬영하였다. 시험 후 이 영상들로부터 매 성형단계에서의 변형률 분포를 계산하고, 네킹이 발생한 위치에서 시간(또는 행정)에 따른 변형률 변화 곡선을 얻는다. Fig. 2는 폭 100 mm 시편의 주변형률 분포를 나타내며, Fig. 3은 네킹 위치에서 발생하는 최대 주변형률 값의 펀치행정에 따른 변화를 그린 것이다. 이후 모든 분석은 폭 100 mm 시편에서 측정된 주변형률 데이터를 기반으로 한 것이다.

현재까지 발표된 시간의존적 성형한계 결정법으로 상관계수법[5,7], 활공상관계수법[5], 최적선형근사법[5,8] 등을 대표적으로 들 수 있다. 상관계수법은 회귀분석법의 하나로, 2개 또는 그 이상의 변수들 사이의 선형성 또는 상관성을 분석하는 방법이다. Merklein 등[7]이 성형 불안정 구간의 시작점을 찾는 데 시간과 변형률가속도의 상관계수를 처음 도입하였다. 식 (1)은 두 변수  $x$ 와  $y$  사이의 상관계수(correlation coefficient, C.C.)를 정의하는 식이다.

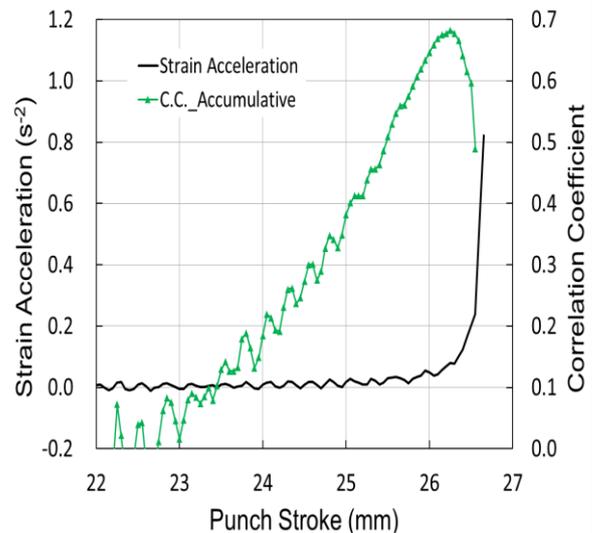
$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (1)$$



**Fig. 2 Major strain distribution at several stages**



**Fig. 3 Variation of major strain measured at the neck position with punch stroke**



**Fig. 4 Simple correlation coefficient method**

상관계수법은 주로 시작점을 고정하고 이후의 변형률가속도 데이터를 누적식(accumulative)으로 계산하여 상관계수가 최대가 되는 점을 성형한계로 결정하는 방법이다. Fig. 4에 보인 바와 같이 안정 구간에서는 데이터가 누적되면서 선형성이 점점 강해져 상관계수가 증가하다가 변형률가속도가 급증하는 불안정 구간에 진입하면서 선형성과 상관계수가 감소하는 현상이 그 이론적 배경이다.

활공상관계수법은 식 (1)을 계산하는 데이터 점의 수를 적절히 정하고 시간 축을 따라 활공(gliding), 즉 미끄러지면서 계산하는 이동식(shifting) 방법이다. 계산 값에 대응하는 시간 또는 행정은 전후의 상관계수를 모두 고려할 수 있는 중앙값으로 결정하는 것이 타당하다. 성형 안정 구간과 불안정 구간의 데이터 수가 비슷하게 되는 위치에서 상관계수가 최소가 되며, 이 시점이 성형한계로 결정된다. Hotz 등 [5]은 상관계수를 누적식으로 계산할 때 시작점에서 항상 0이 되는 수학적 불안정성을 극복하기 위해 변형률가속도에 0~1 사이의 기울기를 가진 1차항을 더한 곡선을 사용하였다. Fig. 5는 이 방법으로 구한 활공상관계수가 불안정 구간의 시작점에서 최소가 되는 것을 보여준다.

Fig. 6은 최적선형근사법을 예시한 그림으로, Volk 등[8]이 제안한 선형근사법을 일부 수정한 방법이다. 앞의 두 방법은 변형률가속도를 사용한 반면 최적선형근사법은 두께변형률속도를 사용하였다. 먼저 파단 전 펀치행정 4~2 mm 사이의 안정 구간을 근사한 직선 L1과, 파단점을 포함한 이전의 데이터 점들을 하나씩 추가해가면서 선형근사 할 때 기울기가 최대가 되는 직선 L2를 각각 구하고, 두 직선의 교차점에 해당하는 시점에서의 변형률을 성형한계로 결정하였다. Fig. 4~6에 도시된 변형률속도와 변형률가속도는 모두 변형률 변화 곡선으로부터 후술하는 ‘부분2차 곡선근사법’을 통하여 계산한 값이다.

### 3. 새로운 시간의존적 방법의 제안

시간의존적 방법은 연속적으로 측정된 변형률 데이터로부터 변형률속도와 변형률가속도를 시간 또는 펀치행정의 함수로 도출하고, 이들의 변화 양상으로부터 성형 초기의 안정 구간과 네킹 이후의 불안정 구간 사이의 경계, 즉 변형률, 변형률속도 및 변형률가속도가 급증하기 시작하는 천이점에서의

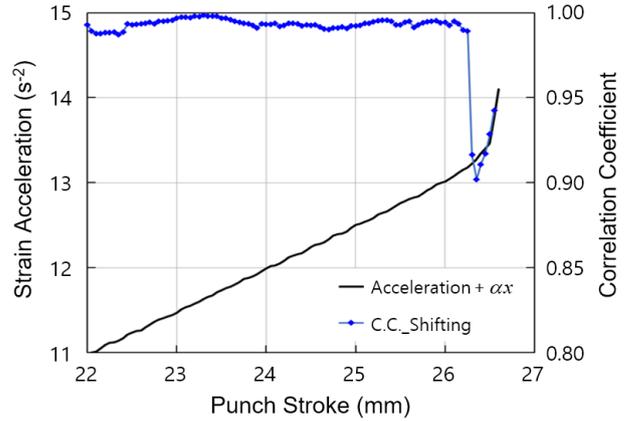


Fig. 5 Gliding correlation coefficient method

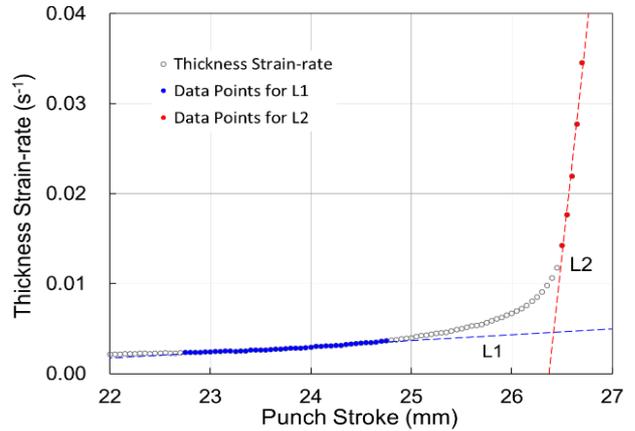
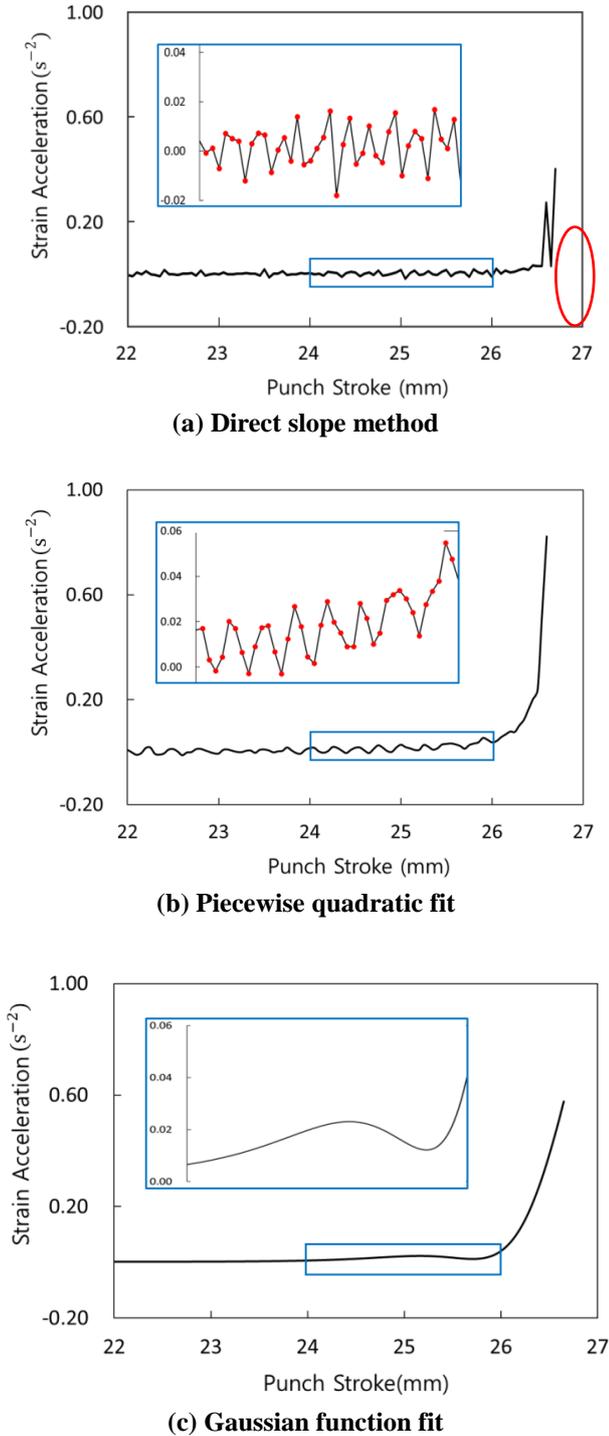


Fig. 6 Linear best fit method

변형률을 성형한계변형률로 결정하는 방법이다. 따라서 변형률 데이터로부터 변형률속도와 변형률가속도를 계산하는 방법과 천이점을 정의하는 방법이 핵심이라 할 수 있다. 본 연구에서는 보다 명확하게 천이점을 확인할 수 있도록 변형률이나 변형률속도 대신 변형률가속도를 분석 대상으로 채택하였다.

변형률 데이터로부터 변형률가속도를 구하는 방법으로, Fig. 7과 같은 3가지 방법을 고려하였다.

먼저, 시간에 따른 두 데이터 점 사이의 기울기와 그 기울기의 기울기를 계산하는 ‘직접 기울기 방법(direct slope method)’을 생각할 수 있다. 이 방법은 가장 간단하지만 시험이나 측정 과정에서 포함된 오차나 노이즈에 의해 Fig. 7(a)에서처럼 상당한 데이터 진동이 발생하며, 특히 불안정 구간(타원으로 표시)에서 지나치게 큰 진동이 나타나는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 완화하고자 제안된 방법으로 ‘부분2차(piecewise quadratic) 곡선근사법’이 있다.



**Fig. 7 Strain acceleration derived from raw strain data by three different methods**

이는 각 데이터 점 전·후의 5~9개의 데이터 점을 2차함수로 근사하고, 각 데이터 점에서 이 함수의 미분계수를 변형률속도로, 2계 미분계수를 변형률가속도로 사용하는 방법이다. 부분2차 곡선근사법은

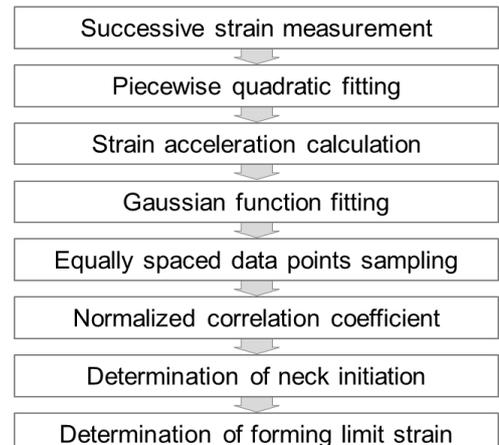
Fig. 7(b)와 같이 불안정 구간에서도 지나치게 큰 진동은 발생하지 않으나, 전체적으로는 직접 기울기 방법과 비슷한 정도의 진동을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

이 방법은 2장에서 소개한 상관계수법 및 선형근사법 등 현재 제안된 시간의존적 방법에 주로 사용되고 있다. 세 번째는 시간에 따른 변형률 측정값의 전체적인 변화 양상을 잘 묘사하는 Gauss 함수로 곡선근사하는 방법이다. 이 함수는 변형률 값의 변화를 대체로 잘 근사하나( $R^2 > 0.95$ ), 미분했을 때 Fig. 7(c)에서와 같이 천이점 직전에서 굴곡이 생기는 문제가 있다. 식 (2)는 n개의 항을 가진 Gauss 함수이다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i \exp \left[ -\left( \frac{x-b_i}{c_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서  $a_i, b_i, c_i$  ( $i = 1, \dots, n$ )는 곡선근사의 결과로 얻어지는 계수들이다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하고자 부분2차 곡선근사법과 Gauss 곡선근사 방법을 조합하여 변형률속도와 변형률가속도를 도출하는 방법을 생각하였다. 각 방법의 적용 대상(변형률/변형률속도/변형률가속도), 적용 순서, Gauss 함수의 항 수, 부분2차 곡선근사 데이터 점 수 등 조합을 다양하게 시도한 결과, 부분2차 곡선근사법을 사용하여 변형률가속도를 계산하고 이를 Gauss 함수로 근사한 후 정규화 상관계수법을 적용하여 천이점을 체계적으로 결정하는 일련의 과정을 도출하였다. 그 전체적인 절차는 Fig. 8의 순서도와 같으며, 그 주요 과정의 채택 배경은 다음에 설명한다.



**Fig. 8 Procedure of the time-dependent forming limit strain determination**

변형률, 변형률속도, 변형률가속도 등 변수들의 정규화(normalization)는 식 (3)으로 정의되며, 편치행정과 정규화 변형률가속도 사이의 상관계수는 식 (1)로 계산된다.

$$\hat{y} = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \quad (3)$$

여기서  $y_{max}$ 와  $y_{min}$ 은 각각 분석에 사용한 데이터 구간에서 변수  $y$ 의 최대값 및 최소값이다.

Fig. 9는 Gauss 함수로 근사한 변형률가속도의 편치행정에 대한 상관계수를 누적식(accumulative)과 이동식(shifting)으로 각각 계산하여 비교한 그림이다. 누적식 상관계수는 안정 구간에서 서서히 감소하다가 천이점 근처를 지나면 불안정 구간의 데이터가 추가되어 선형성이 계속적으로 급격히 감소한다. 누적식 상관계수가 Fig. 4에서와 달리 안정 구간에서 서서히 감소하는 이유는 매끄러운 Gauss 함수 근사에 의하여 데이터 점들의 진동이 없어졌기 때문이다. 반면, 이동식 상관계수는 안정 구간에서는 거의 1에 가까운 강한 선형성을 나타내다가 천이점에 가까워지면 누적식과 마찬가지로 감소하나, 계산에 사용된 데이터 수가 안정 구간과 불안정 구간이 비슷해지는 지점, 즉 천이점 위치에서 최저를 기록한 후 다시 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 2가지 상관계수의 장단점을 분석한 결과 천이점 위치를 명확히 찾을 수 있는 이동식 상관계수 방법을 채택하였다. 그러나 이동식 상관계수는 그 특성상 계산에 포함되는 데이터 점 수와 간격, 그리고 이에 따른 데이터 변화 양상 등에

민감하게 영향을 받는데, Fig. 9에서와 같이 불안정 구간에서는 변형률이나 변형률가속도가 급증하므로 파단에 이르기 전까지 얻을 수 있는 데이터 점 수가 매우 적고 점 간 거리도 안정 구간에서보다 훨씬 클 수밖에 없다. 또한, 마지막 데이터 점을 처음으로 계산에 포함하는 위치에서 항상 최소가 되는 문제도 발견되었다. 천이점 전·후의 데이터 점 수나 간격에 대한 이러한 근원적인 불균형 문제는 변형률가속도 데이터를 Gauss 함수로 근사한 후 안정 구간에서의 데이터 간 평균거리로 데이터 점을 보간, 재생성하는 방법으로 해결하였다. 이 때 수평축(편치 행정)과 수직축(변형률가속도)의 단위와 물리적 차원이 다르므로 두 양을 각각 식 (3)으로 무차원화 한 후 등간격으로 데이터 점을 재생성하였다.

Fig. 10(a)는 11개의 재생성 데이터 점을 사용하여 이동식 정규화 상관계수를 계산한 결과로, 명확하고 안정적으로 최소값을 나타내는 천이점을 발견할 수 있다. 원래 값으로 역변환한 Fig. 10(b) 그래프에 점선으로 표시한 시점, 즉 편치행정 26.2 mm에 해당하는 변형률을 성형한계로 결정한다.

마지막으로 재료 종류와 시편 폭, 그리고 편치속도 등 공정조건에 따라 성형한계에서의 편치행정과 변형률, 변형률가속도가 모두 다르므로, 분석에 사용할 데이터 범위를 적절하게 정하기 위한 비교시험을 시도하였다. 시간 함수로서의 전체 변형률가속도 데이터 중 마지막 5%부터 30% 이상까지 5%씩 데이터를 추가하면서 전술한 절차에 따라 성형한계 변형률을 구한 결과, 무윤활조건인 경우 15%, 윤활조건인 경우 10% 정도의 데이터를 사용하면 안정 구간의 데이터를 충분히 확보할 수 있어 더 많은 데이터를 사용한 경우와 차이가 없음을 확인하였다.

## 4. 결과 및 토론

Fig. 11은 국제표준규격에 따른 위치의존법의 역2차 곡선근사법과 이를 보완하기 위한 역4차 곡선근사법, 그리고 정규화 상관계수에 기초하여 본 연구에서 제안한 시간의존법으로 각각 얻은 성형한계도를 비교한 그림이다. 시간의존법이 위치의존적 방법들보다 성형한계를 더 높게 평가하는 것을 알 수 있다. 위치의존적 방법이 성형한계를 더 보수적으로(안전하게) 평가하는 것으로 볼 수도 있으나, 반면

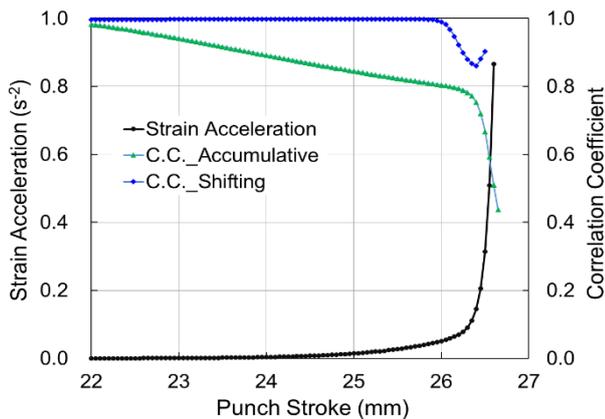
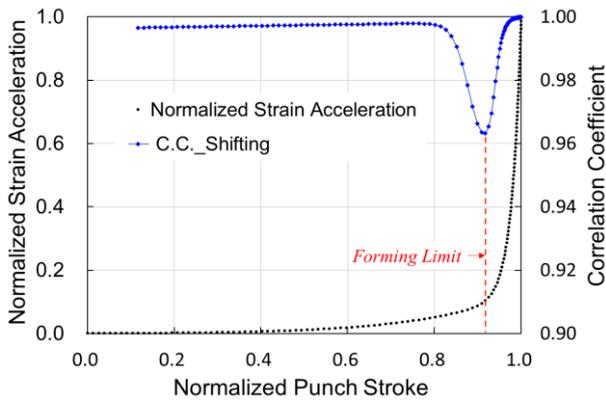
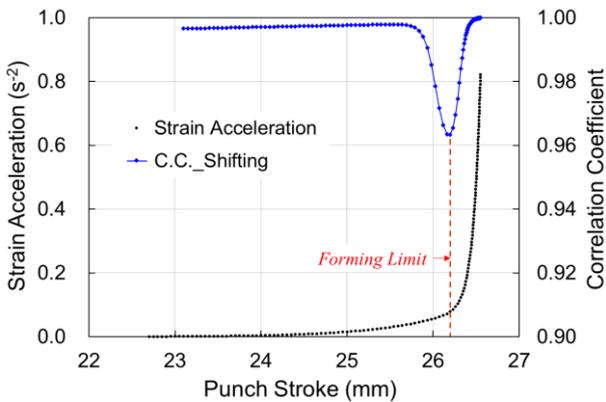


Fig. 9 Correlation coefficients calculated by accumulative and shifting methods



(a) Calculated from normalized values



(b) Calculated from original values

Fig. 10 Correlation coefficients calculated from equally-spaced points on Gaussian fit curve

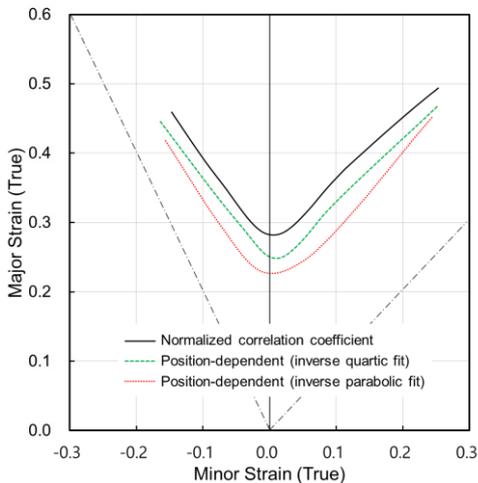


Fig. 11 FLC based on the normalized correlation coefficient compared with the results from the position dependent methods

실제 소재의 성형성을 극한까지 충분히 평가하지 못하는 것으로 판단할 수도 있다. 특히, 최근에 자동차 제조산업에 많이 적용되고 있는 (초)고강도강판의 낮은 성형성을 고려하면 재료의 극한 성형한계를 구하는 것은 경제적 관점에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

시간의존적 방법 중 단순 상관계수 방법은 변형률가속도 데이터를 누적하며 상관분석으로 성형한계를 결정한다는 점에서 신뢰성은 높지만 안정 구간에서 데이터 진동이 클수록 최대 상관계수가 극한으로 이동하는 문제가 있다. 활공상관계수는 안정 구간에서 데이터 진동이 발생하면 성형한계가 그 위치에서 잘못 결정될 가능성이 있고, 이러한 불안정성을 피하기 위하여 추가하는 1차식의 적절한 기울기를 시행착오로 선택하는 것이 매우 어려워 사용자에게 따라 편차가 발생할 수 있다. 최적 선형근사법의 대상인 변형률가속도는 변형률가속도에 비하여 데이터 진동이 크지는 않지만 안정 구간과 불안정 구간을 구분하기 어렵고, Fig. 6의 L1 직선을 구하기 위한 구간의 설정이 어렵다는 단점이 있다. Volk 등 [8]의 연구에서 제시한 파단 전 행정 4~2 mm 영역이 재료나 시편에 따라 안정 구간에 속하지 않는 경우도 있고, 특정 구간의 기울기가 안정 구간 전체를 잘 근사하는 것으로 보기도 어렵다. L2 직선의 경우, 기울기가 클수록 극한으로, 작을수록 보수적으로 성형한계를 평가하게 된다. 그림에도 앞의 2가지 방법보다 데이터 진동이 작고 비교적 간단하며, 천이점 근처에 교차점을 가지므로 안정성은 상당히 높다고 할 수 있다.

본 연구에서 제안한 정규화 상관계수는 Gauss 함수 근사를 통하여 변형률가속도의 진동을 크게 줄일 수 있으며, 시편 폭, 윤활조건, 편치변위, 가속도 등에 영향을 받지 않고 자동화·표준화 할 수 있다. 또한, 성형한계를 극한까지 평가할 수 있는 장점을 갖는다. 다만 변형률가속도 곡선 도출에 2가지 방법을 조합하므로 다른 방법들보다 절차가 복잡하다는 단점은 있으나, 전체 절차를 하나의 프로그램으로 구성함으로써 이 문제는 극복할 수 있다.

Fig. 12는 Hotz 등[5]의 논문과 본 연구의 결과들을 종합하여, 전술한 여러 가지 성형한계 평가방법들의 안정성과 최종 결과물인 성형한계변형률의 크기를 상대적으로 비교한 참고용 그림이다. 본 연구에서는

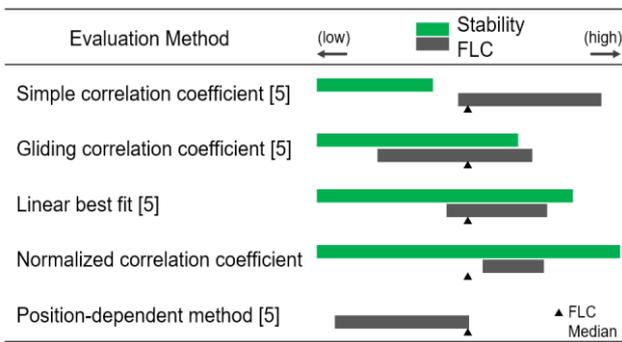


Fig. 12 Comparison table for different methods

3가지 시간의존적 방법을 적용해본 결과, 전술한 바와 같이 방법마다 고유한 불확실성 요인이 있음을 재확인하였고, 새롭게 제안한 이동식 정규화 상관계수 방법은 이러한 불확실성을 최소화하여 매우 안정적이고 체계적으로 비교적 높은 성형한계를 도출하는 것을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구는 성형한계도 시험의 국제표준으로 규정되어 있는 위치의존적 방법의 여러 가지 문제점을 해결하고, 국제표준의 다음 버전으로 예고된 시간의존적 방법에 선제적으로 대응하는 데 목표를 두었다. 기존의 위치의존법과 선행 연구된 시간의존적 방법들을 비교·분석하고, 이를 바탕으로 정규화 상관계수에 기초한 새로운 성형한계 평가방법을 제안하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 부분2차 곡선근사법과 Gauss 곡선근사법을 조합하여 매끄러운 변형률가속도 곡선을 도출하고, 불안정 구간에서 충분한 수의 데이터 점을 재생성한 후, 시간(편치행정)과 변형률가속도 간의 정규화 상관계수를 이동식으로 계산함으로써 명확하고 안정적인 성형한계 시점을 결정할 수 있는 방법을 제안하였다.

(2) 정규화 상관계수는 통계적 분석방법을 통하여 소재의 성형한계를 극한까지 평가하며, 시편 폭, 윤활조건, 편치변위 등 시험조건에 상관없이 성형한계 결정과정을 표준화·자동화 할 수 있다.

(3) 제안된 시간의존적 절차를 따라 구한 성형한계도를 역2차식 및 역4차식 곡선근사에 기초한 위

치의존적 방법으로 구한 성형한계도와 비교한 결과, 시간의존적 방법은 위치의존적 방법들보다 4~8% 정도 높은 극한의 성형한계 주변형률을 결정해주는 것을 확인하였다.

(4) 선행 연구된 다른 시간의존적 방법들과 안정성 및 성형한계를 비교·분석한 결과, 본 연구에서 제안한 정규화 상관계수법은 상대적으로 매우 안정적이면서 비교적 높은 성형한계를 도출하는 것으로 평가되었다.

### REFERENCES

- [1] S. S. Hecker, 1976, Simple Technique for Determining Forming Limit Curves, Sheet Met. Ind., Vol. 52, No. 11, pp. 671~675.
- [2] Z. Marciniak, 1974, Aspects of Material Formability, McMaster Univ., Canada.
- [3] International Standard, 2008, ISO 12004-2:2008(E).
- [4] W. Hotz and J. Timm, 2008, Experimental Determination of Forming Limit Curves, Numisheet 2008 Part A, pp. 271~278.
- [5] W. Hotz, M. Merklein, A. Kuppert, H. Friebe and M. Klein, 2013, Time dependent FLC determination - Comparison of different algorithms to detect the onset of unstable necking before fracture, Key Eng. Mater., Vol. 549, pp. 397~404.
- [6] J. S. Lee, J. D. Kim, H. J. Kim, 2013, Determination of the Forming Limit Strain of Sheet Metal Using Inverse Quartic Curve Fitting, Trans. Mater. Process, Vol. 22, No. 6, pp. 328~333.
- [7] M. Merklein, A. Kuppert and M. Geiger, 2010, Time dependent determination of forming limit diagrams, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 295~298.
- [8] W. Volk, P. Hora, 2011, New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination, Int. J. Mater. Form, Vol. 4, pp. 339~346.
- [9] S. G. Kim, T. H. Oh, J. D. Kim, H. J. Kim, 2015, Determination of the Forming Limit Strain of Sheet Metals by the Time-dependent Method, Trans. Mater. Process, Vol. 24, No. 5, pp. 361~367.
- [10] ARAMIS, GOM mbH, <http://www.gom.com>.