[논문] 한국소성가공학회지, 제 24 권 제 5 호, 2015
Transactions of Materials Processing, Vol.24, No.5, 2015
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.24.5.361

시간의존법에 의한 금속판재 성형한계변형률의 결정

김성곤[1] · 오태환[1] · 김진동[1] · 김형종[#]

Determination of the Forming Limit Strain of Sheet Metals by the Time-dependent Method

S. G. Kim, T. H. Oh, J. D. Kim, H. J. Kim
(Received June 29, 2015 / Revised August 7, 2015 / Accepted August 31, 2015)

Abstract

The forming limit diagram (FLD) is the most commonly used tool for evaluating of sheet metal formability in the manufacturing field as well as the finite element analysis (FEA)-based design process. Determination of the forming limits is considerably influenced by testing/measuring machines, techniques and conditions. These influences may cause a large scatter in FLD from laboratory to laboratory. Scatter is especially true when the 'position-dependent method', as is specified in most national and international standards, is used. In the current study a new 'time-dependent method' is proposed, which is to determine the forming limit strains more accurately and reasonably when producing a FLD from experimental data. This method is based on continual strain measurement during the test. The results are compared to those from the existing standardized methods.

Key Words : Time-dependent Method, ISO 12004-2, Forming Limit Strain, Forming Limit Diagram, Nakajima Test

1. 서 론

성형한계도(forming limit diagram, FLD)는 판재성형 분야의 제품·금형·공정 설계 과정과 제조 현장에서 재료의 성형성을 평가하거나 유한요소해석에서 소재의 파단 기준으로서 가장 보편적으로 사용되는 도구이다. Keeler[1]와 Goodwin[2]에 의하여 그 개념이 도입·확립된 성형한계도를 실험적으로 구하기 위한 방법들은 대부분 Hecker[3]와 Marciniak[4]이 제안한 펀치스트레칭 시험법을 근간으로 하고 있다. 성형한계도에는 여러 가지 변형 모드에 대하여 소재에 파단을 일으키지 않고 가할 수 있는 최대의 변형률 값, 즉 성형한계변형률이 표시되어 있다.

실험적으로 성형한계도를 도출하는 과정이 상당한 시간과 노력을 필요로 하므로 실험에 의하지 않고 이론적으로 이를 얻고자 하는 연구도 많이 수행되어 왔으나[5~7], 성형성은 재료의 기계적 특성 중 하나이므로 본질적으로 시험을 통하여 평가하는 것이 타당하다. 그러나 시험 장비, 기술, 조건 등에 따라 얻어진 결과들이 큰 편차를 나타내는 경우가 허다하다. 측정 장비와 방법, 시편 형상, 마찰 조건 등도 결과에 영향을 크게 미치는 인자들이다. 이러한 배경에서 ASTM-E2218[8], KS B19 ISO 12004[9] 등 국가별 표준과 ISO 12004-2[10] 국제 표준이 성형한계도 시험법에 대하여 규정하고 있다. 특히, ISO 12004-2 규정은 여러 연구기관의 실험실에서 동일한 조건하에서 시험할 때 서로 유사한 결과를 얻을 수 있도록 하는 데 목표를 두고 'Round Robin test'를 통하여

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

공동으로 표준 시험법을 만든 것으로, Hotz 등[11]은 이 국제 표준을 도출한 배경과 과정에 대하여 자세히 기술하고 있다.

현재 국가별 또는 국제 표준은 대부분 네킹(또는 파단) 주변의 주변형률과 부변형률 값들 또는 그 분포를 측정하여, 성형 안전 영역의 경계로써 성형한계선을 도출하거나 파단부의 손실된 데이터를 곡선근사에 의하여 추정함으로써 성형한계를 결정하는방법을 채택하고 있다. 이러한 시험법들은 모두 네킹(또는 파단)이 발생한 후에 측정된 변형률 데이터로부터 성형한계를 구하는, 소위 '위치의존법(position-dependent method)'에 속한다. Strano 등[12]은 이 방법에 사용한 수십 건의 연구논문을 분석하여 안전-실패 영역의 경계에서 성형한계선(또는 성형한계밴드)을 결정하는 방법에 따라 분류하였다.

가장 선진화된 규정이라 할 수 있는 국제 표준 ISO 12004-2는 파단 후의 주변형률과 두께변형률 분포를 역2차식(inverse parabolic)으로 곡선근사(curve fitting)하여 성형한계변형률을 결정하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 통상적인 무윤활 펀치스트레칭 시험에서 얻어지는 비대칭적인 변형률 분포를 근사하는 데 역2차식으로는 한계가 있다. Lee 등[13]은 이를 개선하기 위하여 역4차(inverse quartic) 곡선근사 방법을 제안한 바 있다.

위치의존법은 시험 종료시점의 판단, 파단부에서의 데이터 손실, 곡선근사에 사용되는 데이터 점과 근사식의 선택, 파단 후 새로운 응력 평형에 따른 변형률 변화 등 여전히 복잡한 변수들을 내포하고 있다. 국제표준 ISO 12004-2의 다음 버전으로 발표될 예정인 '시간의존법(time-dependent method)'은 시험 도중 연속적으로 변형률 데이터를 얻을 수 있으므로 네킹 시점과 그 직전의 성형한계를 정확히 판단할 수 있고, 위치의존법이 가진 본질적인 단점들을 상당히 보완할 수 있을 것으로 기대된다. 최근 Merklein 등[14]은 회귀분석에 의하여 자동으로 네킹 시작점을 결정하는 시간의존적 방법을 제안하고, 기존의 위치의존법에 의한 결과와의 비교를 통하여 그 유효성을 입증한 바 있다. 본 연구에서는 시간의존법에 의한 성형한계도 도출을 선제적으로 시도하여 그 과정과 결과를 기존의 방법들과 비교·분석함으로써 더 정확하고 새로운 성형한계 결정법을 제시하고자 하였다.

2. 성형한계도 시험

2.1 시편 준비 및 시험 장비

본 연구는 기본적으로 국제표준 ISO 12004-2[10]에 규정된 조건에 근거하여 진행하였다. 소재는 두께 1mm의 SGARC 440 강판으로, Fig. 1과 같이 중심부가 잘록한 'dog bone' 형상의 Nakajima 시편을 압연방향에 수직으로 채취하였다. 다양한 변형모드를 얻기 위하여 시편 폭은 25, 50, 75, 100, 125 및 150mm 등 6가지로 설정하였으며, 시편의 전체 길이는 200mm로, 평행부 길이(shaft length)는 25mm로 각각 일정하게 유지하였다. 시편 표면에는 백색과 흑색의 스프레이를 사용하여 변형률 측정을 위한 불균일한 반점 패턴(speckle pattern)을 도포하였다. 기본적으로 무윤활 조건에서 시험하되 150mm 폭의 시편에 대해서는 우지 윤활 조건을 추가로 적용하였다. Table 1에 SGARC440 판재의 주요 물성을 정리하였다.

Fig. 2와 3은 각각 시험에 사용된 금형과 장비의 사진이다. '시간의존법'에 의한 성형한계도 도출을 위해서는 시험 도중에 변형률의 변화를 연속적으로 측정할 수 있도록 금형(다이 위쪽)이 열려 있어야 하므로, 본 연구에서는 기존의 100ton 복동식 유압 프레스와 금형 세트를 개조하여 사진과 같은 개방형 성형성 평가 시험기를 제작하였다. 펀치와 블랭크홀더는 기존의 것을 사용하면서 다이의 두께는 최소한으로 줄이고 다이를 고정하는 상판을 테이퍼 가공하여 최대한 카메라 시야를 확보하도록 설계하였다. 펀치변위, 펀치속도 및 펀치하중 데이터는 실시간으로 PC에 전송·저장된다.

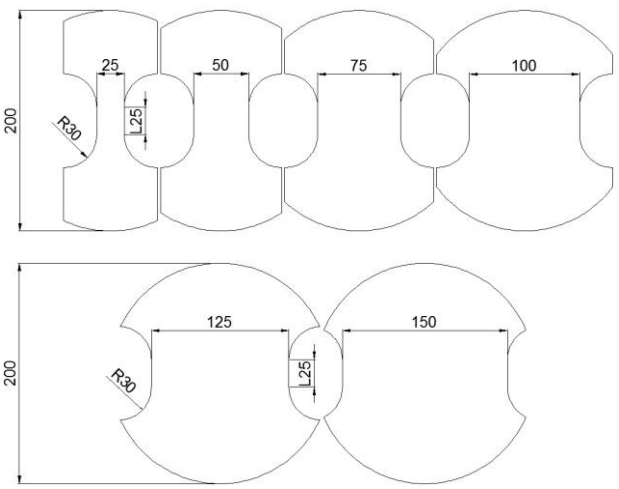


Fig. 1 Geometry of Nakajima specimens

Table 1 Material properties of SGARC440

Yield Stress	379 MPa
Tensile Strength	474 MPa
Stiffness Coefficient, K	717 MPa
Hardening Exponent, n	0.143
R-value, R	0.934

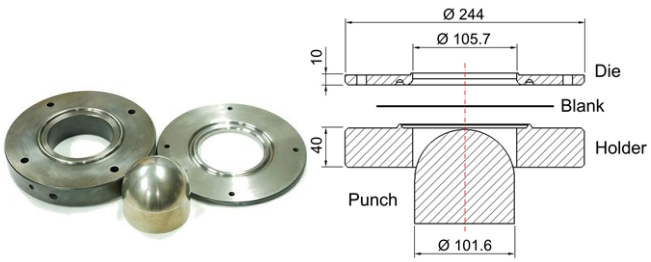


Fig. 2 Die set for FLD test

Fig. 3 Testing and measuring equipment

모든 시험은 상온에서 진행되었으며, 클램핑 하중은 250kN으로 유지하였다. 네킹 직전의 변형률 데이터를 가급적 많이 확보하기 위하여 펀치속도를 0.1mm/s 정도로 느리게 설정하였다.

2.2 변형률 측정

개방 금형을 통한 연속 변형률 측정은 시간의존적 시험법에서 가장 중요한 과정이다. 이를 위해 ARAMIS[15] 시스템을 사용하였다. ARAMIS는 보정(calibration)을 거친 2 대의 카메라로 연속 촬영한 화상으로부터 시편 표면에 인쇄된 불규칙적인 반점

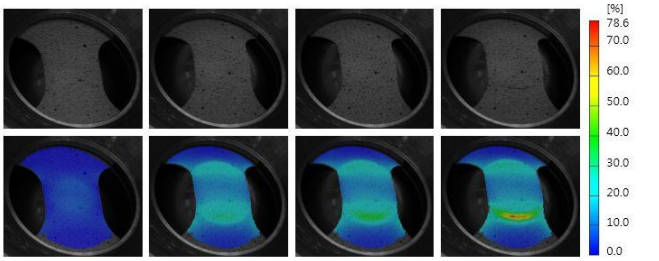
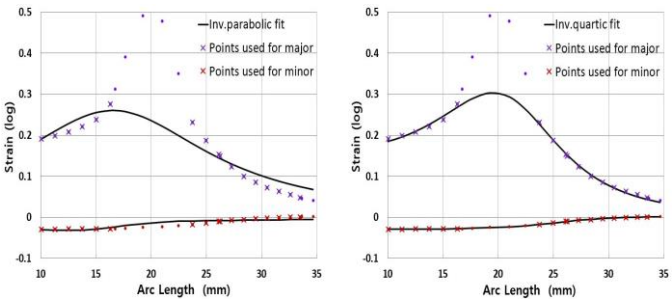


Fig. 4 Strain measurement using speckle pattern



(a) Inverse parabolic fit **(b) Inverse quartic fit**

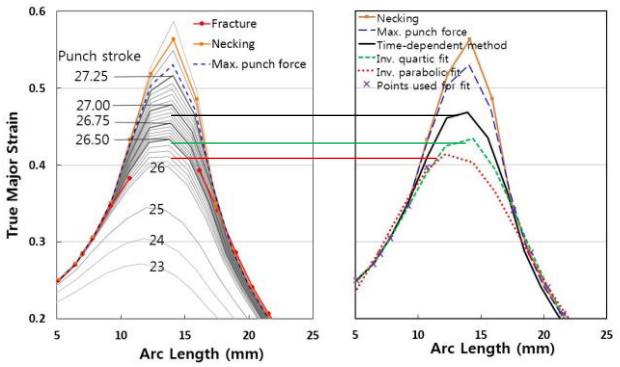
Fig. 5 Comparison between two curve fitting methods

패턴의 변화를 인식하여 3차원 표면변형률(surface strain)의 분포를 자동으로 계산하는 고가의 장비이다. Fig. 4는 반점 패턴을 사용한 변형률 측정 사례를 보여준다. 본 연구에서는 카메라 촬영 주기, 즉 한 단계(stage)의 시간간격을 0.5sec로 최소한으로 설정함으로써 변형률 데이터를 최대한 많이 확보하고자 하였다. 한 단계는 펀치변위 0.05mm에 해당한다.

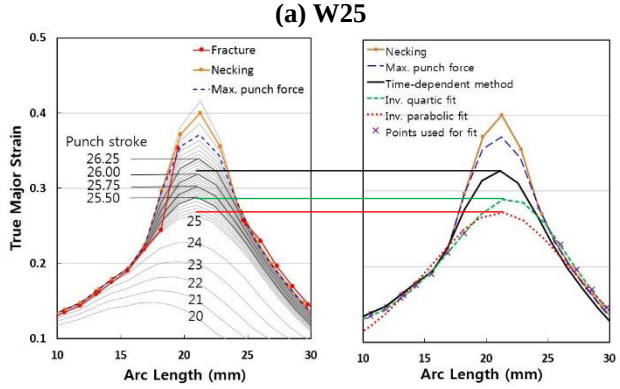
국제표준 ISO 12004-2[10]에는 파단 후의 주변형률과 두께변형률 분포를 역2차식으로 곡선근사하여 성형한계변형률을 결정하는 방법이 제시되어 있으나, 이 방법을 적용하려면 매우 까다로운 윤활조건을 구현하여 파단부를 중심으로 대칭적인 변형률 분포를 얻어야 하는 어려움이 있다. Nakajima 시험은 무윤활 조건에서 실시하는 경우가 많은데, 이때 얻어지는 비대칭적인 변형률 분포를 근사하는 데 역2차식으로는 한계가 있으며, 이를 개선하기 위하여 역4차 곡선근사 방법을 본 선행연구[13]에서 제안한 바 있다. Fig. 5는 역4차식이 역2차식보다 주변형률, 부변형률 모두에 대하여 더 합리적인 근사를 제공하는 것을 보여주고 있다.

3. 결과 및 토론

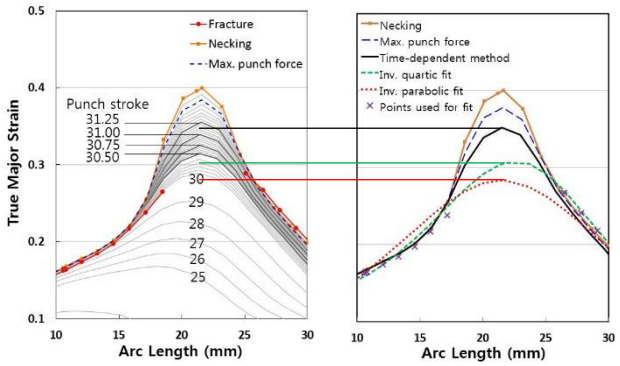
Fig. 6의 왼쪽 그래프들은 여러 가지 시편 폭에 대



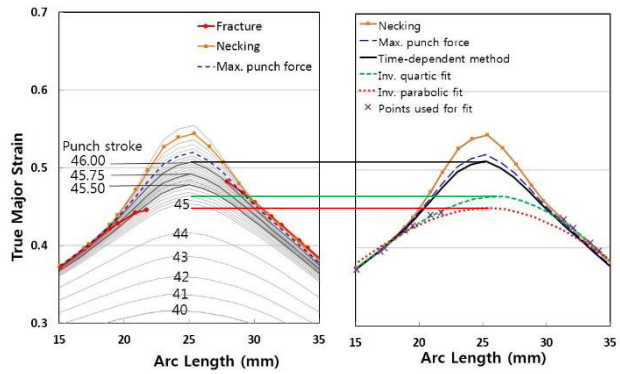
(a) W25



(b) W100

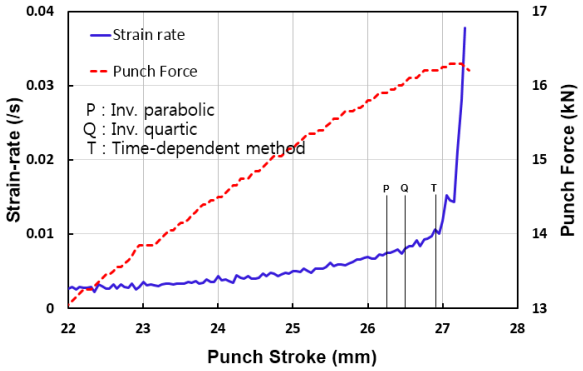


(c) W150

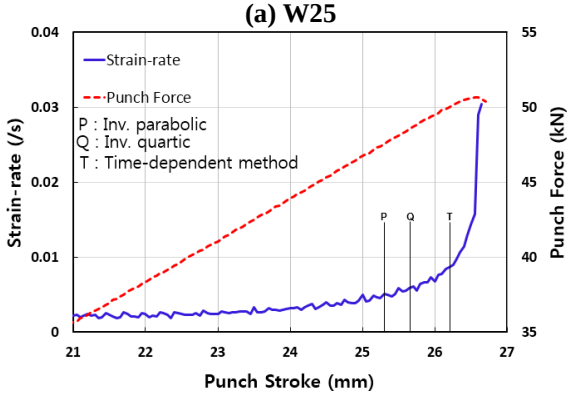


(d) W150, lubricated

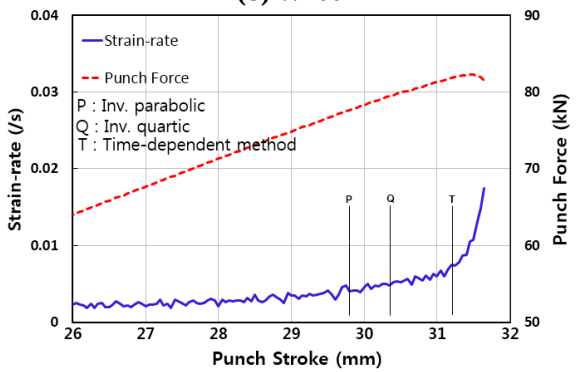
Fig. 6 Major strain distribution along the center line



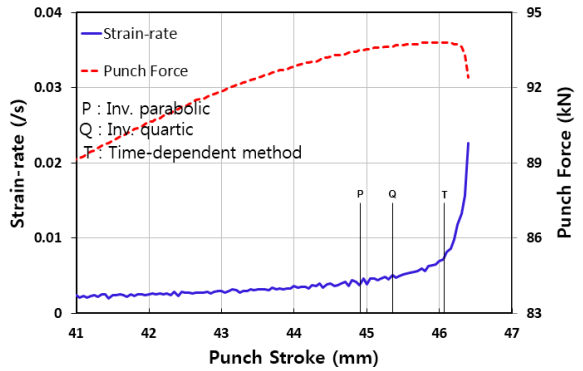
(a) W25



(b) W100



(c) W150



(d) W150, lubricated

Fig. 7 Strain-rate and punch force

하여 중심(pole)으로부터의 거리(arc length)에 따른 주변형률 분포를 0.5sec의 시간간격(펀치변위 0.05mm에 해당)으로 연속 측정한 결과이다. 주변형률은 펀치 진행과 함께 점진적으로 증가하다가 성형한계에 가까워지면서 증가속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 파단이 일어난 후에는 새로운 응력 평형을 유지하기 위하여 파단부 주변의 변형률 값이 파단 이전보다 상당히 작은 값으로 측정되는 등 주변형률 분포 곡선의 형태가 달라지는 것을 확인하였다. 이러한 변화는 파단 후 시편에서 측정한 변형률 분포를 근거로 성형한계변형률을 구할 때 재료의 실제 성형한계보다 대부분 낮은(안전한) 값을 구하게 될 것임을 시사한다. 본 연구에서는 극한의 성형한계를 얻고자 성형의 '실패(failure)' 시점을 네킹 발생 기준으로 판단하였다. 즉, 실시간으로 촬영된 화상들을 육안으로 관찰하여 네킹이 발생한 단계를 찾고 이때의 변형률 값을 성형한계변형률의 '상한값(upper bound)'으로 생각하였다. 시험자가 육안으로 네킹 여부를 결정하므로 이 값은 약간의 오차는 포함할 수 있지만, 파단 단계에서의 찢김(tearing)으로 인한 데이터 손실은 없으므로 곡선근사에 의한 추정값보다는 더 정확하다고 할 수 있다. 이때의 변형률 분포를 곡선근사하여 '위치의존법'에 의한 성형한계변형률을 결정하는 것이 합리적이나, '시간의존법'과의 차이를 확실히 나타내기 위하여 파단 이후의 변형률 분포를 역2차 및 역4차 곡선으로 각각 근사하고 그 결과를 Fig. 6의 오른쪽 그래프에 나타내었다. 이렇게 구한 성형한계에 상당하는 펀치변위를 왼쪽 그래프와 비교하여 표시하였다. 곡선근사에 사용되는 데이터 점들의 선택은 ISO 12004-2 규정에 따랐다.

Fig. 7은 펀치하중과 최대주변형률속도(파단 위치에서의 주변형률속도)의 변화를 펀치변위에 따라 도시한 그림이다. 그림에서 P, Q는 각각 역2차식과 역4차식 근사로 구한 성형한계변형률 값에 해당하는 펀치변위를 나타낸다. 주변형률속도는 펀치 진행과 함께 거의 선형적으로 완만하게 증가하다가 파단예정 부위에서의 변형 집중에 의하여 급격하게 증가하는 추세를 나타낸다. 본 연구에서는 선형증가 구간의 종점, 즉 최대주변형률속도가 급증하기 직전의 천이점('T'로 표시)에 해당하는 주변형률 값을 시간의존법에 의한 성형한계로 제안하였다. 시험 결과 이 점은 모든 시편 폭에 대하여 P, Q점 이후에 나타

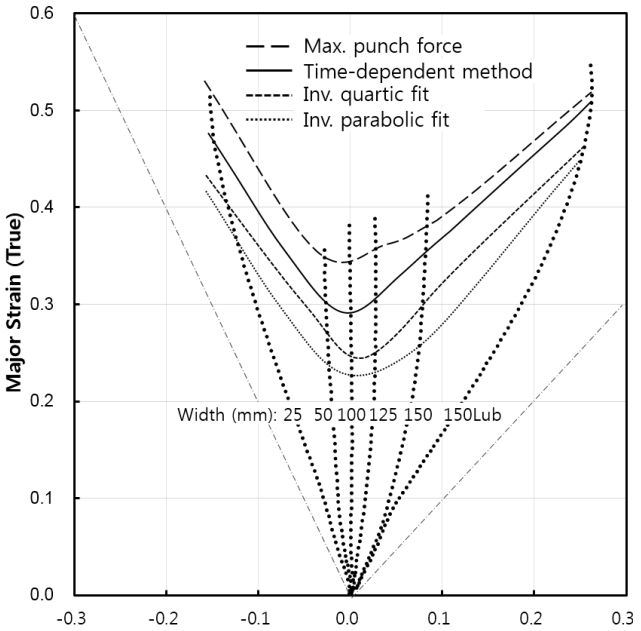


Fig. 8 FLD's obtained by four different methods

났다. 이는 네킹(또는 파단) 후의 변형률 분포로부터 '위치의존법', 즉 곡선근사에 의하여 추정하는 성형한계보다 시간의존법, 즉 변형률(속도)의 연속적인 추적에 근거하여 결정하는 성형한계가 더 극한에 가까운 것을 의미한다. P, Q 및 T에 해당하는 펀치변위에서의 주변형률 분포를 Fig. 6에도 표시하였다.

각 방법에 따른 성형한계변형률을 비교할 때, 역 2 차 근사법(P)와 역 4 차 근사법(Q)의 차이뿐만 아니라 위치의존법(P, Q)과 시간의존법(T)에 의한 차이는 모두 시편 폭이 넓어질수록 대체로 커지는 것으로 나타났다. 시편 폭이 100mm 보다 넓은 경우, 부변형률이 양인 2 축신장(biaxial stretching) 상태가 지속되면 이론적으로 국부네킹(localized necking)을 일으키기 어렵지만, 소재의 국부적인 불균일 또는 펀치와의 마찰로 인하여 2 축신장 모드에서 평면변형 모드로 변형경로가 바뀌면서 국부네킹이 발생하는 것으로 알려져 있다[16].

Fig. 8 의 성형한계도에 점선으로 표시한 변형률 경로의 기울기는 주·부변형률증분의 비($d\varepsilon_1/d\varepsilon_2$)를 나타내며, 특히 'T'(time-dependent method) 위치에서 이 경로 곡선의 기울기가 일정값(수십~수백) 이상으로 커지면서 네킹이 가속화되어 파단이 일어난다는 것을 확인할 수 있다. 성형한계의 결정법에 따른 결과의 차이는 평면변형률 모드와 2 축신장 모드에서 더욱 현저하게 나타나는데, 이는 Merklein[14]의 연구

결과와 유사하다. 성형한계변형률 값은 역시 역 2 차 곡선근사법, 역 4 차 곡선근사법, 시간의존법 순으로 높아진다. 역 2 차 곡선근사법이 가장 보수적이고 안전한 것으로 생각할 수 있으나, 실제 재료가 가진 성형성을 충분히 평가했다고 하기에는 많이 부족하며, 본 연구에서 제안한 시간의존법이 극한의 성형한계를 평가할 수 있는 방법이라고 판단된다. 한편, 이렇게 구한 성형한계변형률도 최대 펀치하중에 해당하는 변형률보다는 낮은 것으로 나타났다. Fig. 7에서 이미 변형률속도가 급증한 후에 최대 펀치하중에 도달하며, 따라서 최대 펀치하중에 근거한 성형한계 결정은 위험하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국제표준 ISO 12004-2의 다음 버전으로 발표될 예정인 '시간의존법'에 의한 성형한계 결정법을 선제적으로 시도하여 그 방법과 결과를 기존의 방법들과 비교·분석함으로써 새로운 성형한계 기준을 제시하고자 하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Nakajima 시험에서 펀치변위 0.05mm 간격으로 연속적으로 변형률을 측정하여 네킹 시점의 변형률 분포와, 펀치변위에 따른 변형률속도 및 펀치하중의 변화 추이를 얻었다. 이로부터 역2차 곡선근사법, 역4차 곡선근사법, 시간의존법, 최대펀치하중법에 의한 성형한계변형률을 각각 구하였으며, 이 순서대로 성형한계가 높아지는 것을 확인하였다.

(2) 본 연구에서 제안한, 시간의존법에 의한 성형한계변형률은 기존의 위치의존법에 의한 성형한계보다 대체로 높은 값을 나타낸다. 성형 안전성 문제는 설계자의 판단에 따라 여유를 고려함으로써 보장받을 수 있으며, 재료의 성형한계와 안전도를 극한까지 정확하게 평가할 수 있다는 데 본 연구의 의미가 있다.

(3) 최대 펀치하중 시점은 이미 변형률속도가 급증하기 시작한 이후이므로 이를 성형한계로 채택하는 방법은 위험하다고 할 수 있다.

(4) 시간의존법을 파단 메커니즘이 다른 합금강이나 비철금속 판재에도 보편적으로 적용할 수 있기 위해서는 여러 가지 재료에 대한 실험 데이터의 확보와, 변형률속도가 급증하는 천이점을 수학적으로 정의하는 방법 등에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2013년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2012R1A1A4A01015127)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 일부는 2013년도 강원대학교 학술연구조성비(120131814)로 연구하였음.

REFERENCES

[1] S. P. Keeler, 1965, Determination of Forming Limits in Automotive Stamping, Sheet Metal Industries, Vol. 42, pp. 683~691.

[2] G. M. Goodwin, 1968, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, Tran. SAE, No. 680093, p. 77.

[3] S. S. Hecker, 1976, Simple Technique for Determining Forming Limit Curves, Sheet Met. Ind., Vol. 52, No. 11, pp. 671~675.

[4] Z. Marciniak, 1974, Aspects of Material Formability, McMaster Univ., Canada.

[5] Z. Marciniak, K. Kuczynski, 1967, Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal, Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, No. 9, pp. 609~620.

[6] A. F. Avila, E. L. S. Vieira, 2003, Proposing a Better Forming Limit Diagram Prediction: a Comparative Study, J. Mater. Process. Technol., Vol. 141, No. 1, pp. 101~108.

[7] P. Eyckens, A. V. Bael, P. V. Houtte, 2009, Marciniak-Kuczynski Type Modelling of the Effect of Through-Thickness Shear on the Forming Limits of Sheet Metal, Int. J. Plast., Vol. 25, No. 12, pp. 2249~2268.

[8] ASTM International, 2008, E2218.

[9] Korean Industrial Standards, KS B ISO 12004.

[10] International Standard, 2008, ISO 12004-2:2008(E).

[11] W. Hotz, J. Timm, 2008, Experimental Determination of Forming Limit Curves, Numisheet 2008 Part A, pp. 271~278.

[12] M. Strano, B.M. Colosimo, 2006, Logistic Regression Analysis for Experimental Determination of Forming Limit Diagrams, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 46,No. 6, pp. 673~682.

[13] 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.

[14] M. Merklein, A. Kuppert and M. Geiger, 2010, Time Dependent Determination of Forming Limit Diagrams, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 295~298.

[15] ARAMIS, GOM mbH, http://www.gom.com.

[16] W. F. Hosford, R. M. Caddell, 1983, Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs, NJ, USA, pp. 294~302.