

인장시험의 실험과 해석 결과를 이용한 임계손상도의 결정

장성민¹ · 엄재근² · 이민철³ · 전만수[#]

Determination of a critical damage by experiment and analysis of tensile test

S. M. Jang, J. G. Eom, M. C. Lee and M. S. Joun

Abstract

A new method of evaluating critical damage values of commercial materials is presented in this paper. The method is based on the previous study of the methodology [1] of acquisition of true stress-strain curves or flow stress curves over large strain from the tensile test in which the flow stress is described by the Hollomon law-like form, that is, by the strain dependent strength coefficient and the strain hardening exponent. The strain hardening exponent is calculated from the true strain at the necking point to meet the Considéré condition. The strength coefficient is assumed to be constant before necking and represented by a piecewise linear function of strain after necking. With the predicted flow stress, a tensile test is simulated by a rigid-plastic finite element method with higher accuracy of less than 0.5% error between experiments and predictions. The instant when the fracture begins and thus the critical damage is obtained is determined by observing the stress variation at the necked region. It is assumed that the fracture due to damage begins when the pattern of stress around the necked region changes radically. The method is applied to evaluate the critical damage of a low carbon steel.

Keywords : Critical Damage(임계손상도), True Stress-Strain Curve(진응력-변형률 곡선), Tensile Test(인장시험)

1. 서론

소성가공 중 파단은 매우 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 냉간성형된 축류의 제품은 중심파괴(Central bursting)의 위험에 노출되어 있으며, 볼트 등은 머리와 몸체의 연결부, 즉 단면이 변하는 부위에 치명적인 내부 파단 결함의 가능성에 노출되어 있다. 그리고 열간단조에서도 고온 취성 등에 의하여 다양한 종류의 내부 결함이 발생할 수 있다[2].

냉간 가공에서 내부의 파단 이론과 예측 기술이 다양하게 연구되어 왔다[3~26]. 연성파괴이론은 연성이 비교적 큰 소재의 파단 예측 목적으로 널리

사용되고 있다. 이 이론에서는 성형 중 재료에 가해진 손상도가 소재의 특성 중의 하나인 임계손상도를 넘어가면 파단이 발생한다는 것이다. 이 이론은 다수의 연구자들에 의하여 유한요소법에 바탕을 둔 단조 시뮬레이션 기술과 연계되어 현상파괴와 공정설계 등에 적용할 목적으로 연구되었다.

전술한 많은 연구와 노력에도 불구하고, 임계손상도를 구하는 연구는 매우 부진하다. 재료의 임계손상도를 구하는데 있어 해석 기술이 지원된다면 인장시험은 매우 적절한 방법이다. 그러나 Joun 등 [1, 29]의 연구가 있기 이전까지 인장시험의 해석에 대한 체계적인 연구 결과가 없었다. 물론 다수의 연구자들이 유한요소법을 이용하여 인장시험의 해

1. 경상대학교 기계공학과 대학원
2. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터
3. 경상대학교 기계공학과 박사후 과정
경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소
E-mail : msjoun@gnu.ac.kr

석을 시도하였다[3~7]. 그러나 대부분의 연구에서 인장시편에 초기결함을 부여하는 방식에 의하여 네킹을 유도하였으며, 네킹 이후에 발생하는 예측하중과 실측하중의 차이를 줄이기 위한 방법으로 사용된 비선형계획법을 사용하였다. 이로 인하여 결과의 신뢰성이 떨어짐은 물론이고 적용이 매우 국한되어 있는 것으로 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Joun 등[29]은 어떠한 인위적인 결함을 부과하지 않은 완전 인장시험 해석모델로부터 Considéré 조건을 만족시키는 인장시험 해석기술[29]을 개발하였으며, 이용하여 재료의 유동응력 곡선을 획득하는 기술[1]을 개발하였다. 이 기술을 이용하면 네킹 이후부터 파단이 발생하는 지점까지 연신량-하중 곡선 측면에서 공학적으로 정답에 가까운 인장시험 해석결과를 얻을 수 있다. 이 기술은 일반적인 강의 유동곡선과 큰 차이를 보이고 있는 선조질강의 유동곡선 획득에도 성공적으로 활용되었다[30].

본 연구에서는 기 개발된 고변형률 하에서의 진응력-진변형률 곡선의 획득 기술을 이용하여 인장시험을 해석하고 그 결과로부터 임계손상도의 획득방법을 제시하고자 한다

2. 소재의 물성치 획득과 인장시험

시편의 형상비가 일정 수준 이상일 때, 네킹의 시작은 기준 변형경화지수의 지배를 받는다. Fig. 1은 적용 대상 재료에 대한 인장시험의 실험결과이다. Fig. 2는 네킹 시점에서의 진변형률 0.1을 변형경화지수로 간주하여 구한 기준 진응력-진변형률 곡선이다. 강도계수 K는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 해석결과가 네킹 점을 통과하도록 결정하였다. Fig. 2의 기준 진변형률-진응력 곡선은 Fig. 1의 결과에 대하여 네킹 발생을 강조하여 구한 것으로 네킹 발생 시점 및 최대하중을 정확하게 예측하게 한다[29]. 문제는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 네킹 발생 시점 이후에 연신량의 증가에 따라 인장시험에 대한 실험치와 예측치의 차이가 커지며, 단조중 소재의 변형률이 네킹 발생 시점의 변형률보다 대개 10 배 이상 크다는 데 있다. 따라서 Fig. 2의 기준 변형률-응력 곡선을 네킹 발생 이후의 재료의 물성치로 직접 사용하는 데는 한계가 있으며, 유동응력의 적절한 보정이 필요하다. 이러한 목적으로 Joun 등은 축차적인 소재 물성치 획득 기법을 개발하였다[1]. 이 기법에서는 변형된 Hollomon의

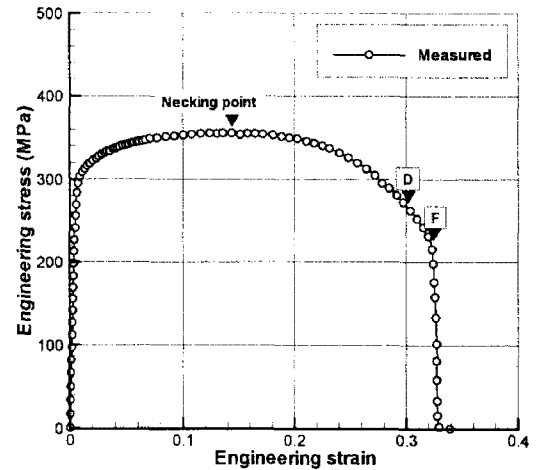


Fig. 1 Experimental result of the tensile test

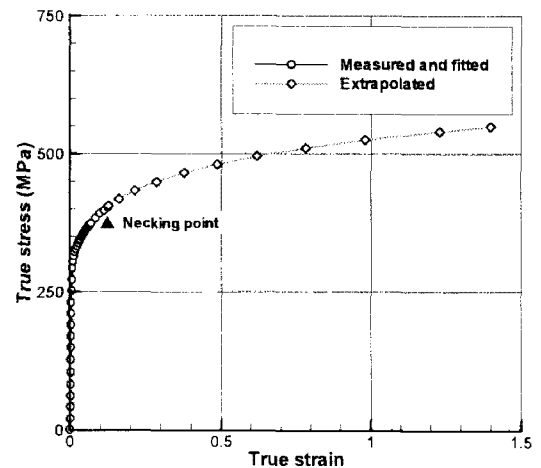


Fig. 2 Reference strain-stress curve, defined by $\bar{\sigma} = K_N \bar{\epsilon}^m$

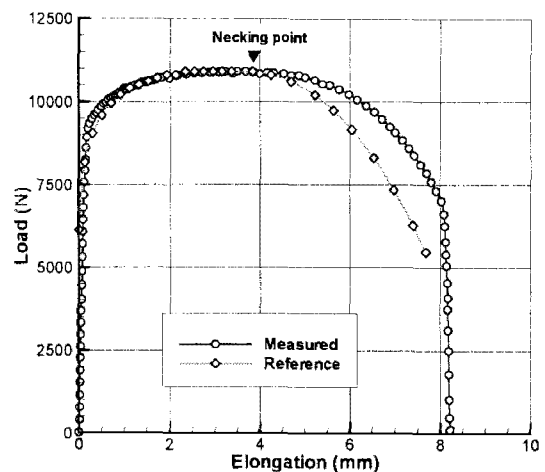


Fig. 3 Comparison of experimental and predicted results of the tensile test

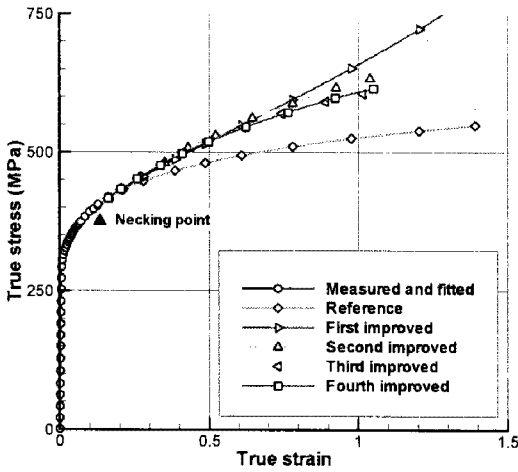


Fig. 4 Comparison of stress-strain curves

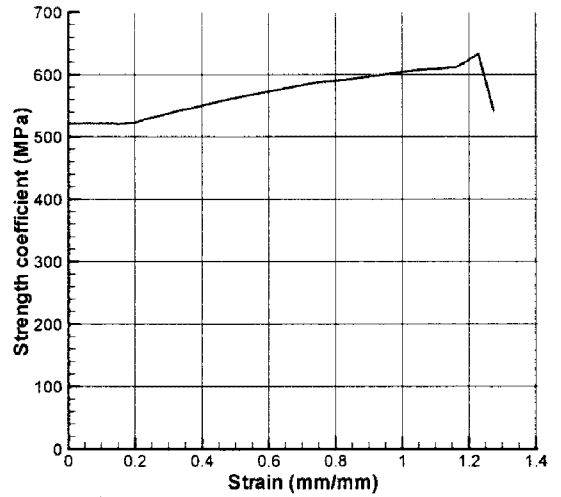


Fig. 6 Variation of strength coefficient with strain

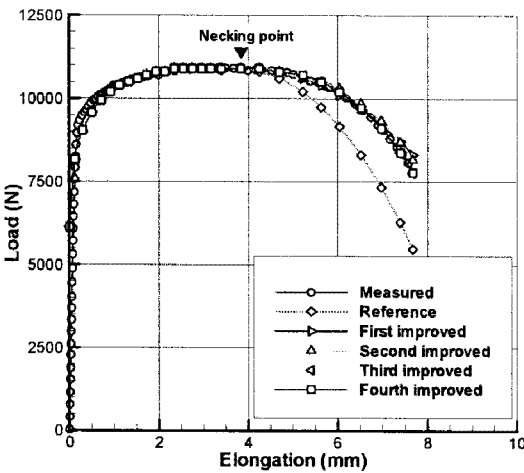


Fig. 5 Comparison of elongation-tensile force curves

수식을 사용하고 있으며, 변형경화지수는 기준 진응력-진변형률 곡선과 동일한 값을 사용하는 대신 강도계수를 변형률의 대한 구간선형함수로 가정하였다. 즉, 유동응력은 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma = K(\varepsilon)\bar{\varepsilon}^n \quad (1)$$

이 식은 임의 모양의 유동응력 곡선의 표현이 가능하다[30]. Fig. 4는 이러한 방법으로 획득된 진응력-진변형률 곡선을 나타내고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 유동응력 곡선으로 구한 해석결과를 실험결과와 비교하고 있다. 4번의 축차적인 방법에 의하여 최대 하중 오차가 0.3% 이하인 결과가 얻어졌다[1].

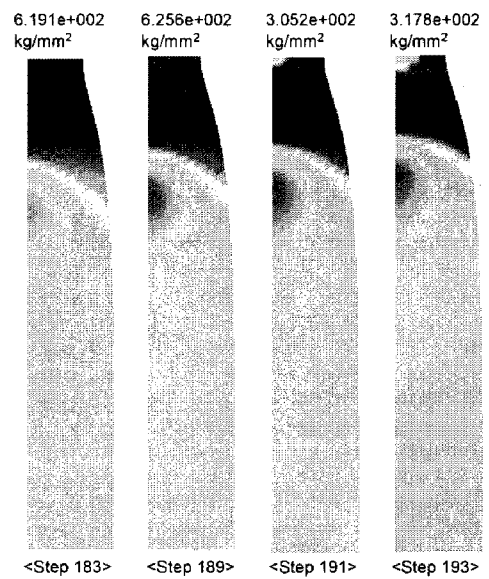
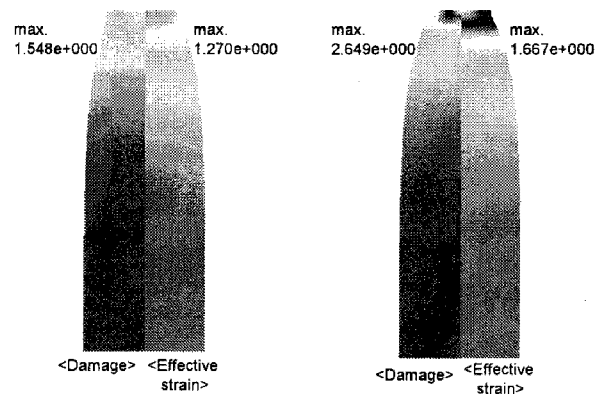


Fig. 7 Abrupt change of flow stress at the necking point



(a) At D (b) At F
Fig. 8 Effective strain and damage

3. 임계손상도의 획득

인장시험에서 재료가 거시적 관점에서 본격적으로 파단되기 시작한 시점이 어디가 될 것인지가 이제 문제로 남아 있다. 그 시점을 알 수 있다면, 앞장에서 얻은 고정도의 인장시험 해석결과로부터 임계손상도를 쉽게 추정할 수 있다. 문제는 그 시점을 Fig. 1상에서 쉽게 알 수 없다는데 있다.

그 시점을 추정하기 위하여 변형률의 구간선형함수로 가정된 강도계수 K 를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 K 값의 급격한 변화가 발생하기 시작한 시점 전후에서 유효응력 수치를 추적하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 정리하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 K 값의 급격한 변화가 발생한 순간, 즉 Fig. 1에서 점 D 를 통과하는 순간 유효응력이 급격하게 줄어들어가는 현상이 나타났다. 이 시점에서 최소단면적의 necking 영역 내부에서 부분적인 파단이 발생한 것으로 추정된다. 즉, 실험에서는 시편의 necking 주위에 부분적으로 파단이 발생하여 하중의 감소로 나타났으나 해석 상에서는 연속체로 간주하였기 때문에 유효응력의 감소로 나타난 것이다. 따라서 이 시점에서 예측된 최대 손상도값을 임계손상도로 간주하는 것이 타당하다고 사료된다.

Fig. 8에 유효응력의 급격한 변화가 시작된 시점, 즉 본 연구에서 내부 파단이 시작된 지점으로 예상한 시점과 실제 최종적으로 시편이 끊어지기 직전의 지점 (Fig. 1에서 점 F)에서의 변형률과 손상도의 분포를 나타내었다. 이 그림으로부터 이 소재의 임계손상도는 1.548이며, 이 값은 인장시편이 최종적으로 분리되기 직전의 손상도 값 2.649와는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 물론 분리되기 직전의 손상도는 내부 파단 발생 시점에서의 임계손상도 계산의 중요성을 강조하기 위한 것이며, 파단이 발생했는데도 불구하고 연속체로 가정하여 얻은 결과이므로 실제로는 의미가 없는 수치이다.

4. 결론

본 연구에서는 과학적인 임계손상도 획득법이 제시되었다. 이 방법은 고변형률에서 진응력-진변형률 곡선의 획득법에 근거한 고정도의 인장시험의 해석 기술에 바탕을 두고 있다. 사용된 인장시험 해석 기술로 예측한 인장시험의 결과인 연신량-하중 곡선은 실험 결과와 파단 직전까지 공학적으로

로 차이가 없다. 그런데 연속체로 가정하여 해석한 결과는 실험에서 내부 파단에 의하여 감소된 인장하중을 반영하기 위하여 유효응력의 감소로 나타났으며, 이 시점을 파단이 발생한 기준 시점으로 간주하였다. 파단 기준 시점에서 최대의 손상도를 구하여 임계손상도로 간주하였다.

5. 후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03] 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large of strains using a tensile test and finite element method, *Mechanics of Material*, in press. Vol. 40, pp. 586~593.
- [2] H. K. Moon, J. S. Lee, S. J. Yoo, M. S. Joun, J. K. Lee, 2007, Hot deformation behavior of bearing steels, *J. Eng. Mater. Technol.-Trans. ASME*, Vol. 129, pp. 349~355.
- [3] Zhang, K. S., 1995, Fracture Prediction and Necking Analysis, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 52, pp. 575~582.
- [4] Zhang, Z. L., Hauge, M., Ødegård, J. and Thaulow, C., 2001, Determinating Material True Stress-Strain Curve from Tensile Specimens with Rectangular Cross-Section, *Comp. Mat. Sci.*, Vol. 20, pp. 77-85.
- [5] Komori, K., 2002, Simulation of Tensile Test by Node Separation Method, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 125~126, pp. 608~612.
- [6] Cabezas, E. E., Celentano, D. J., 2004, Experimental and Numerical Analysis of the Tensile Test using Sheet Specimens, *Fin. Ele. Ana. Des.*, Vol. 40, pp. 555~575.
- [7] Koc, P., Stok, B., 2004, Computer-Aided Identification of the Yield Curve of a Sheet Metal after Onset of Necking, *Comp. Mat. Sci.*, Vol. 31, pp. 155~168.
- [8] Mirone, G., 2004, A New Model for the Elastoplastic Characterization and the Stress-Strain Determination on the Necking Section of a Tensile Specimen, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 41, pp. 3545~3564.
- [9] Avitzur B., 1968, Analysis of central bursting defects

- in extrusion and wire drawing. *Trans ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 90, pp. 79~90.
- [10] Zimmerman Z, Avitzur B., 1970, Analysis of the effect of strain hardening on central bursting defects in drawing and extrusion, *Trans ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 92, pp. 92~135.
- [11] Zimmerman Z, Darlington H, Kottkamp EH., 1971, Selection of operating parameters to prevent central bursting defects during cold extrusion. Hoffmann AL, editor. *Metal forming: interrelation between theory and practice*. New York: Plenum Press, pp. 47.
- [12] Lee EH, Mallett RL, Yang WH., 1977, *Comput Methods, Appl. Mech. Eng.*, pp. 10~339.
- [13] M. Murakawa, 1984, Burr-gree shearing, *Adv. Technol. Plasticity* 2, pp. 854~814.
- [14] Aravas N., 1986, The analysis of void growth that leads to central bursts during extrusion, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, No. 1, pp.55~79.
- [15] P.B. Papat, 1989, Finite element analysis of blanking process, *J. Mech. Work. Technol.*, Vol. 18, pp. 269~282.
- [16] S.E. Clift, P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G.W. Rowe, 1990, Fracture Prediction in plastic deformation process, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, pp. 1~17.
- [17] C.M. Choy, 1995, R. Balendra, Simulation of the effect of tool geometry changes on blanking operations, *Proceeding of the Ninth ICFC, Solihull, UK*, pp. 217~222.
- [18] H. Kim, M. Yamanaka, T. Altan, 1995, Prediction and elimination of ductile fracture in cold forgings using FEM simulations, *Trans. NAMRI/SME*, vol. 23 pp. 63~69.
- [19] A.S. Wifi, N. El-Abbasi, A. Abdel-Hamid, 1995, A study of workability criteria in bulk forming processes, S.K. Ghosh, M. Predeleanu (Eds.), *Mat. Proc. Defects*, pp. 333~357.
- [20] N. Koga, M. Murakawa, 1996, Application of viscoplasticity to experimental analysis of shearing phenomena, *Adv. Technol. Plasticity*, pp. 571~574.
- [21] S.H. Jeong, J.J. Kang, S.I. Oh, 1996, A study on shearing mechanism by FEM, *Proceeding of the Fifth ICTP, Vol. 2*, pp. 631~634.
- [22] D. Broken, W.A.M. Brekelmans, F.P.T. Baaijens, 1996, Numerical analysis of the metal blanking process, *Adv. Technol. Plasticity*, pp. 665~668.
- [23] E. Ceretti, E. Taupin, T. Altan, 1997, Simulation of metal flow and fracture application in orthogonal cutting blanking and cold extrusion, *Ann. CIRP*, Vol. 46, pp. 187~190.
- [24] D.C. Ko, B.M. Kim, S.L. Ko, 1998, Rigid-plastic finite element analysis of burr formation at the exit stage in orthogonal cutting, *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, Vol. 15, pp. 125~133.
- [25] Komori K., 1999, Simulation of chevron crack formation and evolution drawing, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, pp. 513~1499.
- [26] S.W. Lee, M.S. Joun, 2000, Rigid-viscoplastic finite element analysis of the piercing process in the automatic simulation of multi-stage forging processes, *J. Mat. Pro. Technol.*, Vol. 104, No.3, pp. 207~214.
- [27] Komori K., 2001, Simulation of shearing by node separation method, *Comput. Struct.*, Vol. 79, pp. 197~207.
- [28] K. Saanouni, J. F. Mariage, A. Cherouat, P. Lestriez, 2004, Numerical prediction of discontinuous central bursting in axisymmetric forward extrusion by continuum damage mechanics, *Comput. Struct.*, Vol. 82, No. 27, pp. 2309-2332.
- [29] M. S. Joun, I. S. Choi, J. G. Eom, M. C. Lee, 2007, Finite element analysis of tensile testing with emphasis on necking, *Computational Material Science*, Vol. 41, No. 1, pp. 63~69.
- [30] 박지태, 엄재근, 김종훈, 윤덕재, 전만수, 2008, 선조질강 ESW95의 기계적 성질에 관한 연구, 한국소성가공학회 2008년도 학술대회 논문집, pp. 439~443