

2축 인장 시험 방법에 관한 고찰

박진기¹· 안덕찬²· 남재복²· 김영석[#]

State of Art for Biaxial Tensile Test Systems

J. G. Park, D. C. Ahn, J. B. Nam, Y. S. Kim

(Received December 17, 2010 / Revised April 28, 2011 / Accepted May 3, 2011)

Abstract

This paper is a review of biaxial tensile test equipments and specimens. The stresses acting on a component in service are multiaxial in nature. Therefore, it is necessary to consider the mechanical properties of sheet materials not only under uniaxial but also under these multiaxial stress states. Biaxial testing of metal in industry becomes an important investigation tool for the evaluation of mechanical properties of sheet metals. In this paper, several types of biaxial tensile tests were reviewed, and their advantages and limitations were discussed.

Key Words : Biaxial Tensile Test, Yield Loci, Material Properties, Cruciform Specimen

1. 서 론

판재성형기술은 자동차, 항공, 가전, 생활기기 등 우리나라 산업의 근간인 뿌리산업에서 널리 활용되고 있는 중요한 기초기술이며 대량 생산에 유리한 장점을 가지고 있다.

그러나 이러한 성형공정에 사용되는 재료들은 종종 성형성에서 문제를 야기시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 재료의 기계적 특성 및 변형 특성을 이해하고 성형한계에 미치는 요인들을 확인하는 것이 무엇보다도 중요하며 이를 통해서 생산단가를 낮추고 고품질의 제품을 생산할 수 있다 [1].

재료의 기계적 특성을 나타내는 항복응력, 인장강도, 가공경화 지수 등을 주로 단축인장 시험을 통해서 얻어진다. 그러나 거의 모든 판재 성형공정은 평면응력 즉, 2축 응력 상태에서 이루어지기 때문에 단축인장 시험을 통해 얻은 데이터 만으로 판재의 성형공정을 묘사하기에는 부족한 점이

많다 [2].

그래서 다축 응력 상태의 재료의 소성변형특성 및 변형거동을 이해하기 위한 방법으로 2축 인장시험이 널리 행해지고 있다. 더욱이 대부분의 금속재료들은 소성 이방성을 가지고 있으며 이는 2축 인장 실험을 통해서 쉽게 확인된다 [3]. 그리고 2축 인장 실험은 항공구조물이나, 다리의 지지대 및 기계 요소의 기계적 특성을 평가하기 위한 방법으로 널리 사용되고 있다.

반면, 아직까지 2축 인장시험방법에 대한 규격화된 시험방법이 없어 많은 연구자들이 다양한 실험방법을 사용하고 있는 실정이다. 그러나 한 가지 동일한 것은 시편형상이 Makinde[4] 등이 제안한 것과 같은 십자(+) 형태로 되어 있다는 것과 그 방향으로 인장을 하여 실험을 한다는 것이다.

그리고 시험 방법과 시편의 형태는 조금씩 다르지만 십자 시편의 중앙부에서 변형률을 측정하고 그 단면적을 이용하여 응력을 산출 한다는 것이다.

1. 경북대학교 대학원

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 경북대학교, E-mail: caekim@knu.ac.kr

그래서 시험이 진행되는 동안 시편의 중앙부에서 균일 변형이 생성되도록 하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 여러 연구자들이[4~8] 제안한 2축 인장 시험기와 시편에 대해서 살펴보고 그 특징과 문제점 및 대안을 논의하고자 한다.

2. 2축 인장 시험기

2.1 하중제어 방식

2축 인장 시험을 통해서 얻을 수 있는 대표적인 결과물은 평면응력 상태에서의 항복곡면이다. 2축 인장 시험으로 구한 특정 소재의 실험적 항복곡면과 여러 종류의 이론적 항복 조건식을 비교하여 소재 소성거동을 가장 잘 묘사하는 조건식을 선택하게 된다. Fig. 1은 시편에 부여되는 응력 상태를 나타내고 있다. 항복곡면의 1 사분면은 주 응력(σ_1)과 부 응력(σ_2)이 모두 양(+)인 2축 인장 상태이고, 2 사분면은 주 응력이 음(-)이고 부 응력이 양(+)인 전단상태이며 4 사분면은 주 응력과 부 응력의 2 사분면과는 반대의 상태이다. 그리고 3 사분면은 주 응력과 부 응력 모두가 음(-)인 상태로 2축 압축 상태이다.

2축 인장 시험기가 도입되기 이전에는 항복곡면을 작성하기 위해서는 Fig. 1과 같이 1 사분면의 기준의 등2축 인장 데이터는 벌지시험으로 구하고, 평면변형 구간은 평면변형 시편을 이용하였으며, 주·부 응력 축 선상의 데이터는 각 방향별 단축인장 시험으로 구하며, 2 사분면과 4 사분면의 데이터는 전단 시편을 이용하여 확보하였다. 또한

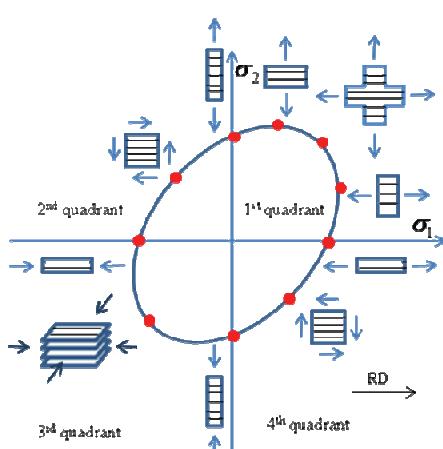
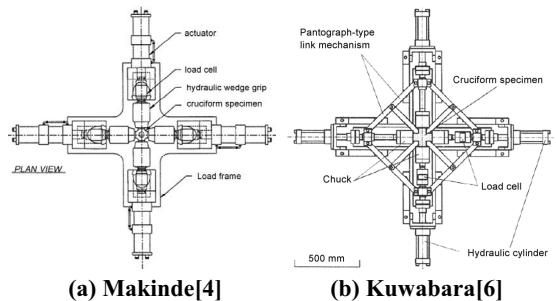


Fig. 1 Stress on each specimens



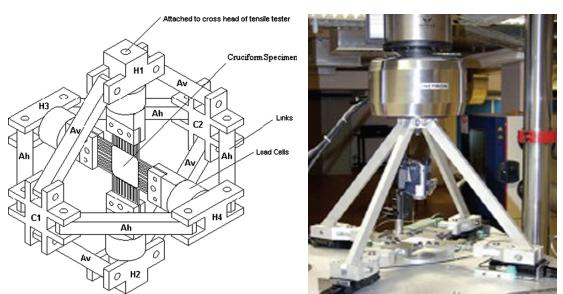
(a) Makinde[4]

(b) Kuwabara[6]



(c) Park[3]

Fig. 2 Biaxial tensile test machine controlled by load



(a) Ferron[8]

(b) Fraunhofer[9]

Fig. 3 Biaxial tensile test machine controlled by displacement

각 방향별 면내(In-plane) 압축실험으로 주·부 응력 축 선상의 압축 데이터를 확보하였으며 판재의 면외(Out-plane) 압축 실험으로 3 사분면의 등 2축 압축 데이터를 확보하였다. 그러나 이 방법은 모두 단축 인장 시험기를 이용하여 다축 인장 상태로 변형하여 시험하는 방식이며 시험 과정에서 수학적 가정을 내포하기 때문에 정확한 데이터를 확보하는데 어려움이 따른다.

일반적으로 단축인장 시험은 변위를 제어하여 하중을 측정하는 방법으로 변위가 독립변수이며 하중이 종속변수이다.

그러나 Fig. 1에 나타낸 것 같이 항복곡면은 응력공간상에 작도 되며 주 응력과 부 응력이 서로

연동되어 실험이 진행되어야 하기 때문에 변위제어가 아니라 하중제어 되어야 함이 마땅하다. 그래서 박[3], Makinde[4], Kuwabara[6] 등이 이용한 2축 인장 시험기는 서로 다른 두 개의 축이 서로 연동되어 있으며 주 응력 축을 기준으로 하여 하중을 선형적으로 증가시켜가며 변위 및 변형률을 측정하는 방식으로 진행된다. 즉 2 축 인장 시험은 응력이 독립변수가 되고 변형률이 종속 변수가 된다.

최초 Makinde[4] 등이 고안한 방법(Fig. 2(a))을 그 이후의 연구자[3, 5, 6]들이 보완하여 나갔는데, Makinde[4]의 시험장비는 서로 마주보고 있는 유압실린더의 반응속도가 달라서 십자 시편이 한쪽 방향으로 끌려가는 단점이 있었다. 이를 보완하기 위해서 각 실린더에 완충장치를 부착하였다. 하지만 완충장치 만으로는 완벽하게 균형을 유지할 수가 없었다. Kuwabara[6] 등은 서로 마주 보고 있는 한 쌍의 유압실린더에 팬토그래프 (Pantograph) 형태의 기구를 부착하여 거의 완벽하게 균형을 이루게 하였으며 Park[3]등은 Kuwabara[6]가 제안한 시험기에 승온장치와 CCD카메라를 이용한 변형률 측정장치를 부착하였다. 경북대학교[3]에서 보유한 2축 인장 시험기는 700°C까지 승온 실험이 가능하며 시험기의 최대 하중은 5톤(ton)이다. Fig 2(c)에 경북대학교에서 보유하고 있는 2축 인장 시험기를 나타내었다.

하중제어 방식은 항복곡면의 기본 개념에 아주 충실히 실험 방법인데 반해 그 실험방법이 다소 까다롭고 고가의 장비가 필요하다.

2.2 변위제어 방식

단축인장 시험이 재료 물성평가에 널리 사용되는 이유는 비교적 간단한 방법으로 누구나가 수행할 수 있기 때문이다. 때문에 단축인장 시험기를 이용하거나 비교적 간단한 시험 방법으로 항복곡면을 확보하고자 하는 연구가 이루어지고 있다[5, 8~10]. Lin[5]이 제안한 방법은 기준의 인장시험기에 별도의 구동축을 부가하여 2축 인장 시험을 구현하였으며, Ferron[8] 등은 Fig. 2(a)와 같은 팬토그래프 기구를 이용하여 2축 인장을 구현하였다. Fraunhofer[9]도 Fig. 3(b)와 같은 링크(Link) 기구를 이용하여 2축 인장을 구현하였으며 Geiger[10]는 성형한계도 시험에서 등 2축 인장 모드를 구현하는 것과 같은 방법으로 특수한 형태의 시편을 이용하여 2축 인장 시험을 구현하였다. 그러나

이와 같은 방법은 변위를 제어하기 때문에 항복 점까지 비례부하를 구현하기가 어려우며 등 2축 인장 이외의 경우도 시험하기가 쉽지않다. 변위제어 방식의 시험방법은 조작이 용이한 장점이 있지만 다양한 시험 데이터 확보의 어려움이 따른다.

3. 2축 인장 시편

현재의 2축 인장 시편의 형상은 재료의 희로파괴연구[11, 12]에서부터 시작 되어 수정 및 발전되어 왔다. 이후 Makinde[4] 등은 2축 인장 시편에 대해 깊이 있는 고찰을 통해 시편의 형상을 최적화 하였다. Makinde[4] 등은 Fig. 4(a), (b)와 같이 슬릿(Slit)이 있는 시편과 없는 시편을 비교하였다. 그리고 두 시편 모두 응력 및 변형률을 측정하는 2축인장 시편의 중앙부만을 두께를 얇게 기계가 공 하여 사용하였다. 가운데 부분의 두께를 얇게 한 것은 측정 부위에서 변형을 유도하기 위함이다. 그러나 Fig. 4(a) 시편과 같은 경우에는 시편 두께의 불연속과 복잡한 시편형상으로 인해 측정 부위의 응력 및 변형률이 균일 하지 않을 뿐 아니라 두께 변화로 인해 기준 단면적을 얼마로 해야 되는지에 대한 기준이 모호하다. 그래서 시편을 Fig. 4(b)와 같이 단면적이 변하는 부분을 사각 형태로 만들어 기준 단면적을 명확하게 제시하였고 시편의 날개부위에 슬릿을 공급하였다. 이 슬릿은 십자 시편에서 아주 중요한 역할을 담당하는데, 시편의 날개 부분의 세장비를 크게 하는 역할을 할 뿐 아니라 2축 인장 시 시편 형상으로 인한 수직 방향 변형저항을 감소 시켜 응력 및 변형률 측정부위에 균일 변형을 유도하여 실험의 신뢰도를 향상시킨다.

그 후 Kuwabara 등[6]은 Makinde[4] 등이 제안한 시편을 수정하여 Fig. 4(c)와 같은 시편으로 판재의 소성변형 거동 연구에 적용하였다. 슬릿의 두께는 가능한 최소한으로 하여 현재는 0.2mm로 제안하고 있으며 측정부위의 두께 감소 없이 일정하게 유지 하고 있다. 앞서 서술한 바와 같이 슬릿의 효과는 균일 응력 및 변형률 생성에 긍정적인 역할을 하지만 시험이 진행되면 슬릿부에 변형 및 응력이 집중되어 파단에 이르게 되므로 대 변형을 유도하기가 힘들다. 그래서 Fig. 4(c)와 같은 시편을 이용하게 되면 소성 변형률을 10% 이상으로 유도하기가 어렵다.

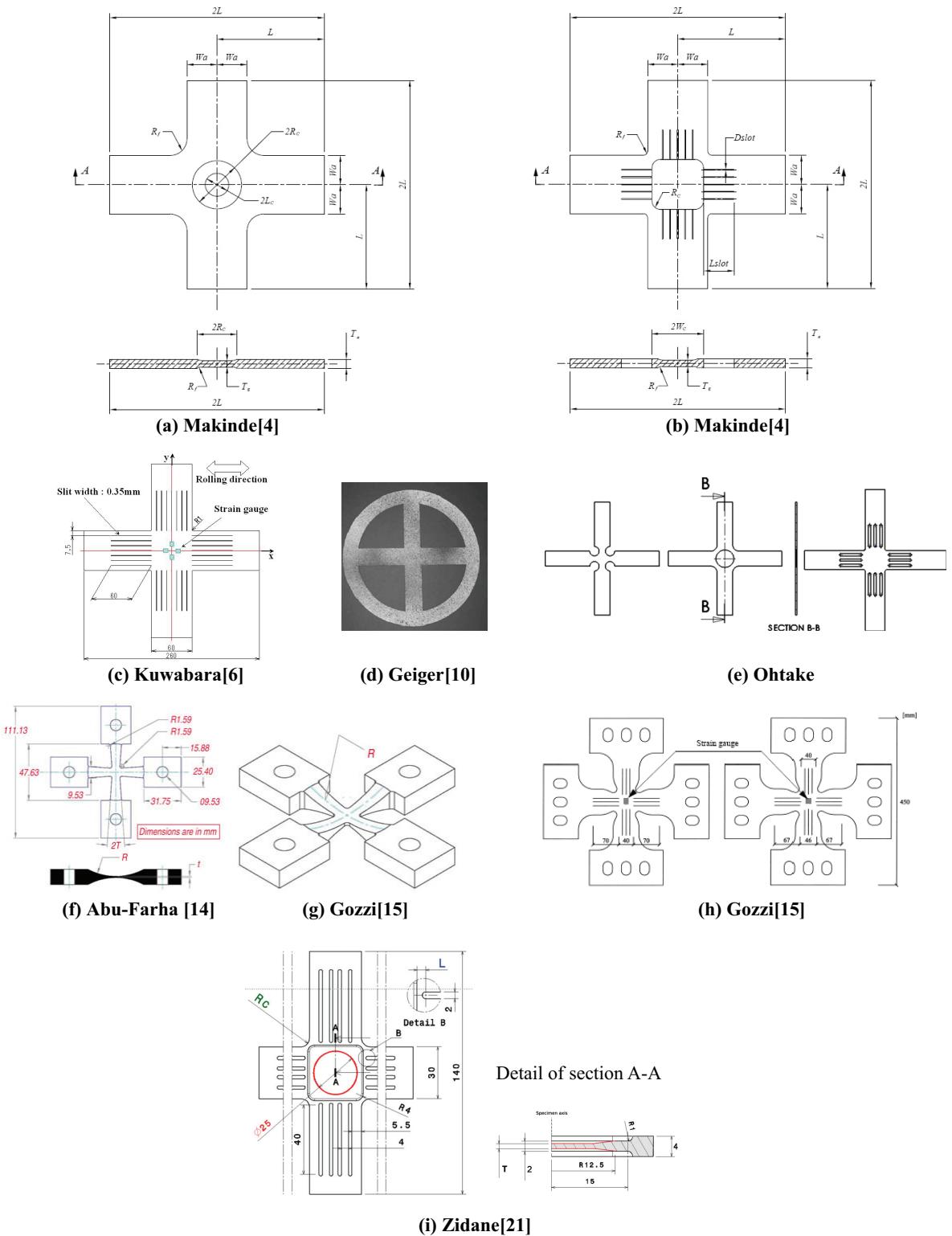


Fig. 4 Proposed geometry for cruciform specimens

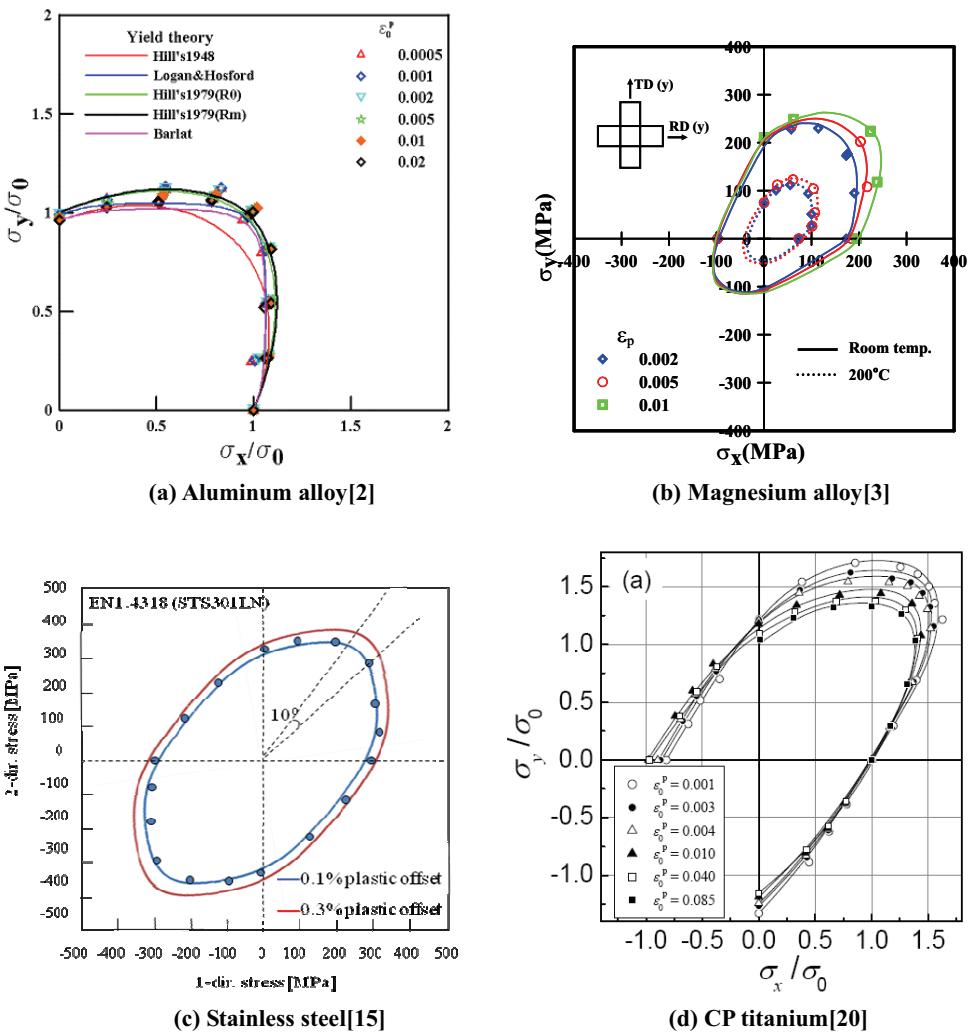


Fig. 5 Yield loci for various materials

일반적으로 현장에서 10%이상으로 소성변형을 하여 제품을 성형하고 있기 때문에 재료의 소성변형 거동 연구도 10%이상의 범위에서 이루어져야 하지만, 현재는 비교적 낮은 소성변형 영역에서 확인한 변형거동으로 대변형 영역의 변형거동을 유추하고 있다. 그래서 판재시험의 경우에는 Ohtake [13] 등이 제안한 Fig. 4(e)와 같이 여러 종류의 시편 중에 첫 번째 방법으로 측정부위의 단면적을 감소시키는 형태가 가장 유용할 것으로 판단되며, 비교적 두꺼운 구조재시험의 경우에는 Abu-Farha [14] 등이 제안한 Fig. 4(f)와 같은 방법으로 두께를 감소시켜 단면적 감소를 확보하는 방법이 유용할 것으로 판단된다.

앞에서 언급한 이 두 가지의 경우 모두 슬릿을 포함하는 형태가 더욱 합당하다고 판단된다. Gozzi[15]는 스테인레스 판재의 소성변형 특성을 알아보기 위해 Fig. 4(g), (h)의 시편을 이용하였다. 그리고 Geiger[10]는 Fig. 4(d)의 시편을 이용하여 소성형복거동 연구를 수행하였으나 주목할 만한 결과는 아직 얻지 못하였으며 Zidane 등[21]은 성형 한계도를 작성하기 위하여 Fig. 4(i)와 같은 시편을 이용하였다.

4. 2축 인장 시험의 응용

초기의 2축 인장시험은 재료의 피로파괴[11, 12]

연구에 주로 활용 되었지만, 최근에는 재료의 소성변형 거동 규명에 주로 활용되고 있다. 그 중 Kuwabara 등[6]이 연구한 방법이 널리 이용되고 있으며 많은 결과들이 보고되고 있다. 박[2, 3, 16, 17] 등은 Fig. 2(c)에 나타낸 2 축 인장시험기를 이용하여 마그네슘, 알루미늄, 타이타늄 등 이방성 재료들의 소성변형 특성에 대해 연구하였으며, Fig. 5(a) 와 (b)에 나타낸 것과 같이 알루미늄 및 마그네슘 합금 재료에 대한 항복곡면을 확보하였다. 특히 강한 이방성과 낮은 성형성 때문에 주로 고온에서 성형하는 마그네슘[3]과 타이타늄[17]에 대해서는 2 축 인장 시험기에 승운 장치를 부착하여 고온 항복곡면을 작성하였다.

기존의 2축 인장 시험기와 시편만으로는 Fig. 5의 (a)와 같이 1 사분면의 데이터 밖에 확보하지 못한다. 그리고 Fig. 5(b), (d)와 같이 마그네슘과 타이타늄 등과 같은 이방성 재료들은 면내 수직 이방성 뿐만 아니라, 인장항복응력과 압축항복응력의 크기가 다른 인장-압축 비대칭 특성도 가지고 있다[3, 18, 19]. 이는 단축 인장 시편을 이용한 면내 압축 시험으로도 간단하게 확인 할 수 있다. Ishiki 등[19]은 기존의 2축 인장 시험기를 수정 보완하여 2, 4 사분면의 실험 결과도 확보하였다. 2, 4 사분면의 실험 결과를 얻기 위해서는 주 응력 방향으로는 인장, 부 응력 방향으로는 압축응력을 부여해야 하는데, 판재를 면내 압축하게 되면 좌굴이 발생하는데 이를 방지하기 위하여 시편 상부 및 하부에 지그를 장착하였다. Gozzi[15]는 1, 2, 4 사분면과 등 2축 압축 영역인 3사분면을 포함하는 전 구간의 항복곡면을 확보하는데 성공하였다.

최근에 2축 인장 시험기를 이용하여 발표되고 있는 연구 결과들은 판재의 소성변형 거동[3, 6, 15 ~19]이 대부분이며, 그 중 Kuwabara 등[6]이 제안한 시험 장비뿐만 아니라 시편형상으로 수행한 연구결과들이 가장 활발하게 발표되고 있다[16, 17]. 이러한 결과를 바탕으로 일본, 한국 등 학자를 중심으로 2축 인장시험에 대한 ISO 규격 제정을 위한 준비가 진행 중이다.

그러나 앞서 언급한 것과 같이 재료의 소성변형 특성을 명확히 규명하기 위해서는 2축 인장 시험으로도 단축인장 시험과 같이 파단까지 시험이 가능해야 한다. 그러면, 변형 초기의 소성변형 거동을 확인 할 수 있을 뿐만 아니라 대 변형의 소성변형 거동과 넥(Neck) 발생시의 성형한계까지 확인 할 수 있다.

한편 Zidane 등[20]은 판재의 항복곡면의 평가에 적용하기 위해 개발된 2축 인장시험 방법을 판재의 성형한계도 평가에 처음 적용하였다. 앞에서 논한 것 같이 기존의 중앙부 단면의 두께가 시편 두께와 동일한 경우는 슬릿부에서 일찍 파단이 발생하므로 중앙부 단면 두께를 Fig. 4(i)와 같이 감소 시킴으로써 재료의 파단한계까지 변형이 가능해진다. 그러나 1mm 균방의 박판의 경우에는 두께의 영향을 무시하기 어렵기 때문에 두께 감소 보다는 Fig. 4(g)에 나타낸 것과 같이 측정부위의 단면적 감소를 통해 대 변형을 유도 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

많은 기계구조물이나 그 요소들은 항상 다축 응력 상태 하에 있고, 판재 성형공정도 2축 응력 상태에서 이루어 지기 때문에 단축인장 시험을 통해 얻은 데이터 만으로 재료의 거동을 모사 예측 하기에는 부족한 점이 많다. 그래서 다축 응력 상태의 재료의 소성변형특성 및 변형거동을 이해하기 위한 방법으로 2축 인장 시험이 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 2축 인장 시험기의 종류와 특징 그리고 그 시편의 여러 형태의 특징과 장단점에 대해서 알아보았다.

2축 인장 시험기의 종류를 제어방식으로 분류하면 하중제어방식과 변위제어방식이 있다. 하중제어 방식은 재료의 소성변형 특성을 규명하기 위한 방법으로 적합하다. 그러나 시험방법에 있어 다소 수고로움이 따르기 때문에 변위제어방식으로 전환하고자 하는 연구가 활발히 진행 되고 있다.

그리고 2축 인장 시편으로는 십자(+)형태가 대부분이며, 재료의 넥 생성 및 파단까지 시험을 진행하기 위해 여러 종류의 시편이 제안되고 있다. 비교적 두꺼운 재료들은 측정부위의 두께 감소로 대 변형을 유도하며 1mm 이하의 박판의 경우에는 측정부위의 폭 감소로 대 변형을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 중점연구소지원사업으로 수행된 연구임(2010-0020089).

참 고 문 헌

- [1] W. Klaus, J. Gerlach, 1998, Biaxial Experimental Approach to Characterize Formability of Steel Sheet Metals, Soc. Auto. Eng., pp. 69~75.
- [2] H. Shin, J. Park, C. Park, Y. Kim, 2009, Study on the yield locus of aluminum alloy sheet using biaxial cruciform specimens, Trans. Mater. Process., Vol. 18, pp 416~421.
- [3] J. Park, J. Kim, N. Park, Y. Kim, 2010, Study of forming limit for rotational incremental sheet forming of magnesium alloy sheet, Metal. and Mater. Trans. A, Vol. 41A, pp. 97~105.
- [4] A. Makinde, L. Thibodeau, K. W. Neale, 1992, Development of an apparatus for biaxial testing for cruciform specimens, Exp. Mech., Vol. 32, pp. 138~144.
- [5] S. B. Lin, J. L. Ding, 1995, Experimental study of the plastic yielding of rolled sheet metals with the cruciform plate specimen, Int. J. Plasticity, Vol. 11, pp. 583~604.
- [6] T. Kuwabara, S. Ikeda, K. Kuroda, 1998, Measurement and analysis of differential work hardening in cold rolled steel sheet under biaxial tension, J. Mater. Proc. Technol. Vol. 80-81, pp. 517~523.
- [7] J. S. Welsh, D. F. Adams, 2002, An experimental investigation of the biaxial strength of IM6/3501-6 carbon/epoxy cross-ply laminates using cruciform specimens, Composites: Part A 33 (6), pp. 829~839.
- [8] G. Ferron, A. Makinde, 1988, Design and development of a biaxial strength testing device, J. Test. Eval., Vol. 16, pp. 253~256.
- [9] Fraunhofer, 2005. Dynamic material testing(<http://www.emi.fraunhofer.de>).
- [10] M. Geiger, W. Hubnatter, M. Merklein, 2005, Specimen for a novel concept of the biaxial tension test, Mater. Process. Technol., Vol. 167, pp. 177~183.
- [11] K. J. Pascoe, J. W. R. de Villiers, 1967, Low-Cycle Fatigue of Steels Under Biaxial Straining, J. Strain Anal., Vol. 2, pp. 117~126.
- [12] L. H. Wilson, D. Z. White, 1971, Cruciform specimens for Biaxial Fatigue Tests: An Investigation Using Finite Element Analysis and Photoelastic-Coating Techniques, J. Strain Anal., Vol. 6, pp. 27~37.
- [13] Y. Ohtake, S. Rokugawa, H. Masumoto, 1999, Geometry determination of cruciform type specimen and biaxial tensile test of C/C composites, Key Eng. Mater., Vol. 3, pp. 151~154.
- [14] F. Abu-Farha, L.G Hector, Jr., M. Khraisheh, 2001, Cruciform-Shaped Specimens for Elevated Temperature Biaxial Testing of Lightweight Materials, JOM, Vol. 61, pp. 48~56.
- [15] J. Gozzi, 2004, Plastic behavior of steel, Ph. D. Thesis of Lulea Univ. of Tech.
- [16] J. Park, Y. Kim, B. You, T. Kuwabara, 2005, Plastic deformation characteristic of AZ31 magnesium alloy sheets, Trans. Mater. Process., Vol. 14, pp. 520~526.
- [17] J. Park, N. Park, Y. Kim, 2010, Plastic deformation characteristics and evaluation of press formability for Ti-6Al-4V sheet at warm temperature, Mat. Sci. For., Vol. 654-656, pp. 875~878.
- [18] O. Cazucu, B. Plunkett, F. Barlat, 2006, Orthotropic yield criterion for hexagonal closed packed metals, Int. J. Plastic., Vol. 22, pp. 1171~1194.
- [19] M. Ishiki, T. Kuwabara, Y. Hayashida, 2009, Analysis of differential work hardening behavior of pure titanium sheet using spline function, Int. J. Mater. Form., Vol. 2, pp. 69~72.
- [20] I. Zidane, D. Guines, L. Leontoing, E. Ragneau, 2010, Development of an in-plane biaxial test for forming limit curve(FLC) characterization of metallic sheets, Meas. Sci. Technol., Vol. 21, pp. 1~11.