[논문] 한국소성가공학회지, 제 21 권 제 2 호, 2012
Transactions of Materials Processing, Vol.21, No.2, 2012
http://dx.doi.org /10.5228/KSTP.2012.21.2.89

Al 원형관의 2 축압축 변형특성에 관한 연구

유종근[1] · 김기주[2] · 원시태[#]

Biaxial Compressive Deformation Characteristics of Round Aluminum Pipe

C. K. Yoo, K. J. Kim, S. T. Won

(Received November 15, 2011 / Revised December 26, 2011 / Accepted January 4, 2012)

Abstract

To examine the deformation characteristics of round aluminum pipe under biaxial compression, a horizontal biaxial compression die was fabricated. The change of material properties, punch load and deformation behavior were monitored in experiments using various compressive deformation rates in the range of 1mm/min.~400mm/min. The tensile and compressive strains were estimated from Vickers microhardness results. The punch load and deformation characteristic of the round aluminum pipes were found to change greatly at a deformation rate of about 200mm/min. The punch load decreased with increasing compressive deformation rate. Results of numerical simulation using Deform-2D were in good agreement with experimental results, and the measured hardness variation with the strain variation was predicted well by the simulation.

Key Words : Deformation Rate, Biaxial, Compressive, Deformation, Aluminum, Round Pipe

1. 서 론

원형관은 배관과 기계구조물 및 각종 설비의 용도로 많이 사용되고 있다. 이러한 용도의 원형관의 2차 가공 및 성형은 굽힘 가공, 단축 압축가공이 종래의 주된 가공법이었다. 이 보다 특수한 2차 가공법으로 원형관의 2축 압축가공이 고려될 수 있다[1~5]. 따라서 본 연구에서는 2축 압축을 받는 Al 원형관의 변형특성을 검토하기 위하여 단동 2축 압축 시험 금형을 제작하고, 압축속도의 크기와 윤활유의 종류에 따른 2축 압축변형 특성을 검토하였다.

2. 시험장치 및 시험 방법

2.1 시험장치

원형관의 2축 압축 시험은 Fig. 1과 같은 단동 가경식(單動可傾式) 2축 압축시험 금형을 제작하여 사용하였다[2]. 본 시험 금형은 가경식으로 상, 하형의 회전 조절에 의해서 각도 변화가 45°(정사각) 에서 최대 70°(장방형) 범위까지 시험할 수 있다. 본 실험은 45°로 동일한 압축비(정사각)로 시험하였고, 시험편에 작용하는 2축 하중의 하중 작용 상태는 Fig. 2와 같다.

2.2 시험재료 및 시험편 형상

본 실험에는 Al 원형관을 사용하였다. 시험편 소재의 화학성분은 Table 1과 같고, 기계적 성질은 Table 2와 같다. 시험편 형상과 규격은 Fig. 3과 같다.

1. 뉴테크
2. 서정대학교,자동차과
교신저자: 서울과학기술대학교,제품설계금형공학과
E-mail: stwon370@seoultech.ac.kr

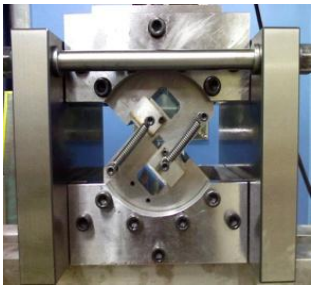

Fig. 1 Biaxial compression experimental apparatus

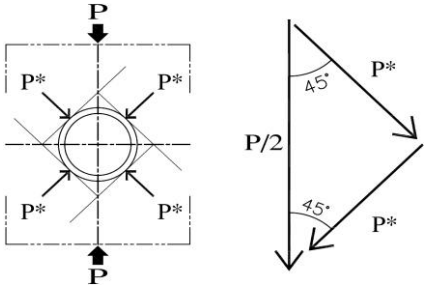

Fig. 2 Biaxial compression load sate

Table 1 Chemical composition (%)

Material	Cu	Al	Ti	Mn	Zn	Pb
Al	0.047	Over	0.008	0.0023	0.073	0.0017

Table 2 Mechanical properties

Material	σ(MPa)	ε(%)	C(MPa)	n	H_{mv}
Al	212.4	10.0	196	0.21	89.3

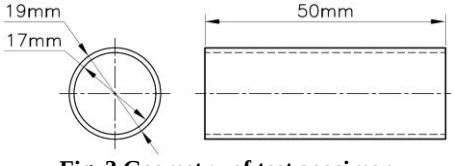

Fig. 3 Geometry of test specimen

2.3 시험조건 및 방법

본 시험 금형(Fig. 1)에서 시험편이 장착되는 부분과 시험편의 접촉표면에는 윤활을 실시하였고, 윤활유의 종류와 점도는 Table 3과 같다.

압축속도는 1mm/min.~450mm/min. 범위에서 몇 단계로 나누어 2축 압축 변형특성을 비교하였다. 또한 2축 압축 응력-변형율 특성곡선에서 주요 지점의 단면 형상변화의 특성을 육안으로 쉽게 구분할 수 있도록 하였고, 압축속도의 크기에 의한 하중과 변위에 따른 변형특성을 규명하였다. 또한

Table 3 Viscosity coefficient of lubrication oils

Lubrication oils	Visosity coefficient(CP)
Soy bean oil	70
MD-501	100
EP gear oil	410
MSD-550	635
Ultra D-4080	1020

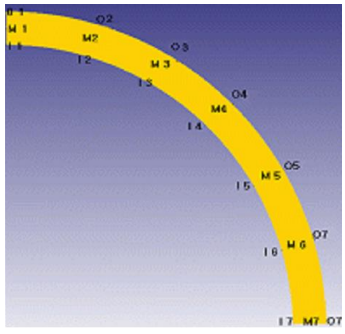

Fig. 4 Micro Vickers measure points

변형과정에 따른 인장과 압축 변형량의 평가를 Deform-2D에 의한 해석을 실시하여 실험결과에 대한 검증 및 보완을 하였다.

각 단계에서 압축 변형된 시험편은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 Fig. 4에서 나타낸 것처럼 시험편의 초기 특정 위치를 지정하고 경도값을 측정(시험하중 50g)하여 각 변형 단계에서의 경도값을 조사하였다.

3. 시험결과 및 고찰

Fig. 5는 압축속도 10mm/min.의 2축 압축 과정에서 펀치하중과 펀치 스트로크(변형)의 특성을 나타낸 것이다. 그래프에 첨부된 단면 사진은 그 지점에서의 변형된 Al 원형관의 단면 상태을 나타낸다. 그래프의 특성곡선을 살펴보면 변형초기에는 2축 압축 시험 장치의 다이면이 원형관에 점접촉한 후 일정하중(6kgf)의 1차 변형 일정구간(0.0~0.4mm)이 나타나고, 이후 면 접촉이 시작되는 0.4~0.7mm 구간에서 급격한 1차 하중증가 구간이 발생한다. 한편 다이와 시험편의 면 접촉이 본격적으로 시작되는 스트로크 0.7mm~1.7mm 위치에서 2차 변형 일정구간이 발생한다. 이 지점을 지나면 스트로크 1.7mm~3.6mm 구간에서 급격한 2차 하중 증가구간이 발생한다. 이때 2차 하중의 증가구간은 면 접촉이 상당히 진전된 상태이다. 그리고

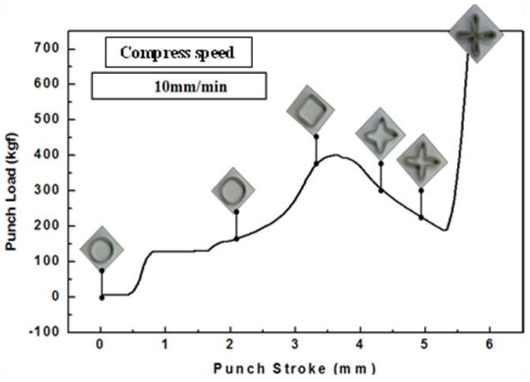

Fig. 5 The relation between punch load-stroke curve and Al circular pipe deformed shapes

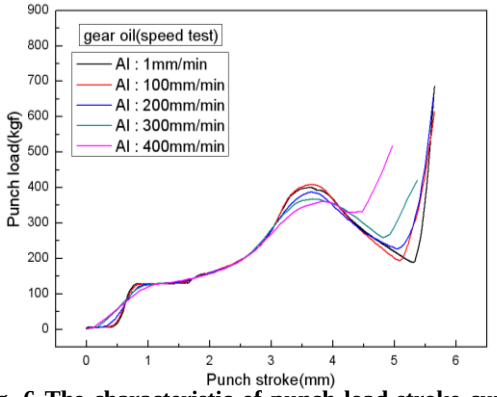

Fig. 6 The characteristic of punch load-stroke curve on various compressive strain rates

2차 하중 증가구간을 지나면서 원형단면 형상이 본격적으로 사각단면 형상으로 변형되기 시작한다. 한편 하중 최대 점(395kgf)은 사각 단면 형상에서 내측으로 좌굴이 약간 시작된 스트로크 3.6mm 부근에서 발생한다. 이후 원형관의 내측으로 계속 변형되어 중심부분에서 4면이 접촉하기 직전인 스트로크 5.3mm 위치까지 하중감소가 나타난다. 이 지점을 지나면 다시 급격한 3차 하중의 증가가 나타나는 전형적인 변형특성이 나타난다.

Fig. 6은 5종류의 압축속도에 대한 시험 결과를 나타낸 것이다.

압축속도 1~200mm/min.에서는 1차 하중 증가구간(스트로크 0.4~0.7mm)이 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 속도 200mm/min. 이상에서는 S자형 1차 상승 구간(스트로크0.3~0.9mm)을 나타내고 속도 300mm/min.과 400mm/min.에서는 완만한 상승 곡선(스트로크 0.2~1.2mm)의 특징을 보이고 있다. 스트로크 0.15~0.45mm구간의 특징을 보면 속도가 빠를수록 1차 하중증가가 빠르고 크게 나타난다. 이는 변형되기 전의 원형관의 저항력에 기인하는 것으로 속도가 빠르면 빠를수록 반력(충격반력)이 커져서 나타나는 것으로 생각된다. 이 저항력이 꺽이면 항복과 같은 현상으로 원형관의 반력의 영향보다 속도에 따른 운동에너지($E=1/2mv^2$)의 영향이 커져 스트로크 0.7~1.1mm에서는 역으로 속 도가 빠를수록 하중이 낮아진다. 변형은 계속되어 스트로크 1.2~2.8mm구간에서는 속도에 따른 변형 하중의 차이가 거의 없는 완만한 상승 곡선을 나타낸다. 스트로크 3.0mm부근에서 원형관은 4각형상으로 되고 이후 좀 더 급격한 하중 증가가 나타난다. 이 구간이 2차 하중 증가 구간이다. 스트로크 3.5mm 부근에서 1차 최대 하중점을 나타낸다. 이 지점에서는 속도가 빠를 수록 낮은 하중을 나타내고 있다 이렇게 속도에 따라 1차 최대 하중이 달라지는 원인은 속도의 제곱에 비례하는 운동에너지에 기인하는 것으로 생각된다. 2축 압축 속도가 빠를수록 운동에너지가 커지므로 빠른 속도에서는 낮은 하중을 나타낸다. 1차 하중 최대 점을 지나면 Al 원형관은 내측으로 더욱 크게 좌굴 되면서 비교적 급격한 하중 감소를 나타낸다. 이후 원형관은 내측으로 좌굴되어 내측의 4면이 접촉 되면서 급격한 3차 하중 증가를 나타낸다. 그러나 3차 하중증가의 시작점은 속도에 따라 각기 다른 위치에서 시작되고 있다. 3차 하중 증가의 시작점은 속도가 빠를수록 빨리 진행되고 있는데 이 또한 속도에 비례한 운동에너지의 영향으로 생각된다. 예를들어 압축속도 400mm/min.은 스트로크 4.4mm 지점에서 시작되고 있다. 그런데 압축속도가 제일 낮은 1mm/min.은 스트로크 5.3mm 지점에서 시작되고 있다. 결국 압축속도 400mm/min.은 큰 운동에너지로 압축속도 1mm/min.에 비해 0.9mm 만큼 더 많이 압축시킨 결과이다. 이와 같이 원형관의 2축 압축변형에서 압축속도에 따른 변형특성 결과는 주목할 만한 특징을 나타내고 있다.

Fig. 7은 압축속도 1mm/min.조건에서 윤활유의 종류에 따른 실험 결과이다. 원형관에 펀치가 접촉되어 스트로크 0.3mm 지점까지 1차 하중 증가가 나타난다. 윤활유에 따른 하중의 영향은 거의 나타나지 않는다. 스트로크 0.3~1.1mm 구간은 일정한 하중구간을 나타내고 스트로크 1.1mm부터 완만

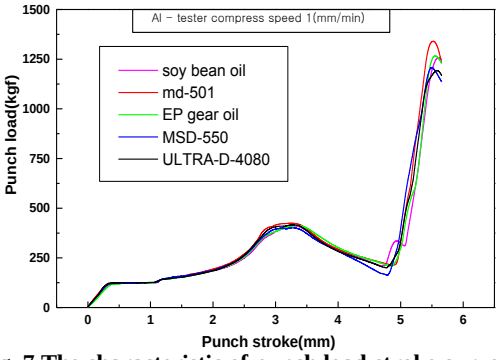

Fig. 7 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rates(1mm/min.)

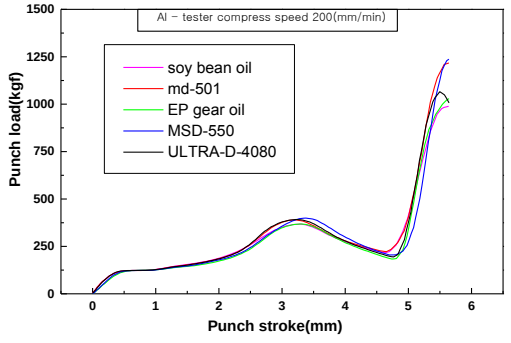

Fig. 8 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rates(200mm/min.)

한 하중 증가를 나타낸다. 스트로크 2.7mm 지점에서 원형관은 4각으로 되고 2차 하중 증가가 급격하게 나타나고 있다. 스트로크 3.2mm 부근에서 1차 최대 하중을 나타내고 있고, 미미하지만 윤활유의 점도가 낮을수록 높은 하중을 나타내고 있으나, 윤활유에 의한 하중의 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 스트로크 3.2mm 부근을 지나면 원형관은 내측으로 더욱 좌굴되어 1차 하중 감소 구간이 나타난다. 스트로크 4.8mm 부근에서 원형관은 내측 4점 접촉 상태가 되어 급격하게 3차 하중 증가가 나타난다. 3차 하중 증가의 시작점은 거의 같은 시점이고 점도가 낮을수록 약간 높은 하중을 나타내고 있다.

Fig. 8은 압축속도 200mm/min.조건에서 윤활유의 종류를 다르게 한 실험결과이다. 원형관에 접촉되어 스트로크 0.4mm 부근까지 1차 하중 증가를 나타낸다. 여기서도 윤활유 종류에 의한 하중의 차이는 아주 미약하다. 스트로크 0.4~1.1mm 구간은 일정한 하중을 나타내고, 스트로크 1.1mm에서 완만한

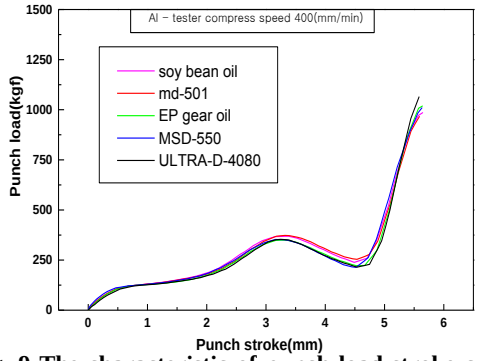

Fig. 9 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rates(400mm /min.)

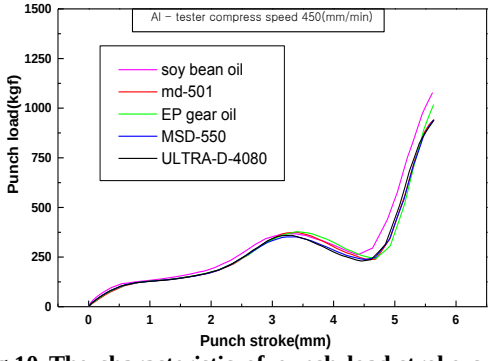

Fig.10 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rates(450mm/ min.)

하중 증가가 시작된다. 스트로크 2.7mm 지점에서 원형관은 4각으로 되고 2차 하중 증가는 완만하게 나타나고 있다.

스트로크 3.3mm 부근에서 1차 최대 하중을 나타내고 윤활유 점도에 따른 하중 특성도 뚜렷하지 않고 하중의 차이도 작다. 스트로크 3.3mm 부근을 지나면 원형관은 내측으로 더욱 좌굴되어 1차 하중 감소를 나타낸다. 스트로크 4.8mm 부근에서 원형관은 내측 4점 접촉 상태가 되어 급격하게 3차 하중 증가를 나타낸다. 3차 하중 증가의 시작은 거의 같은 시점이고 점도가 낮을수록 미약하지만 약간 높은 하중을 나타내고 있다.

Fig. 9는 압축속도 400mm/min.에서 윤활유의 종류를 다르게 한 실험 결과이다. 원형관에 접촉되어 스트로크 0.7mm 부근까지 1차 하중 증가를 나타낸다. 여기서도 윤활유의 종류에 의한 하중의 차이는 아주 작게 나타나고 있다. 스트로크 0.7mm

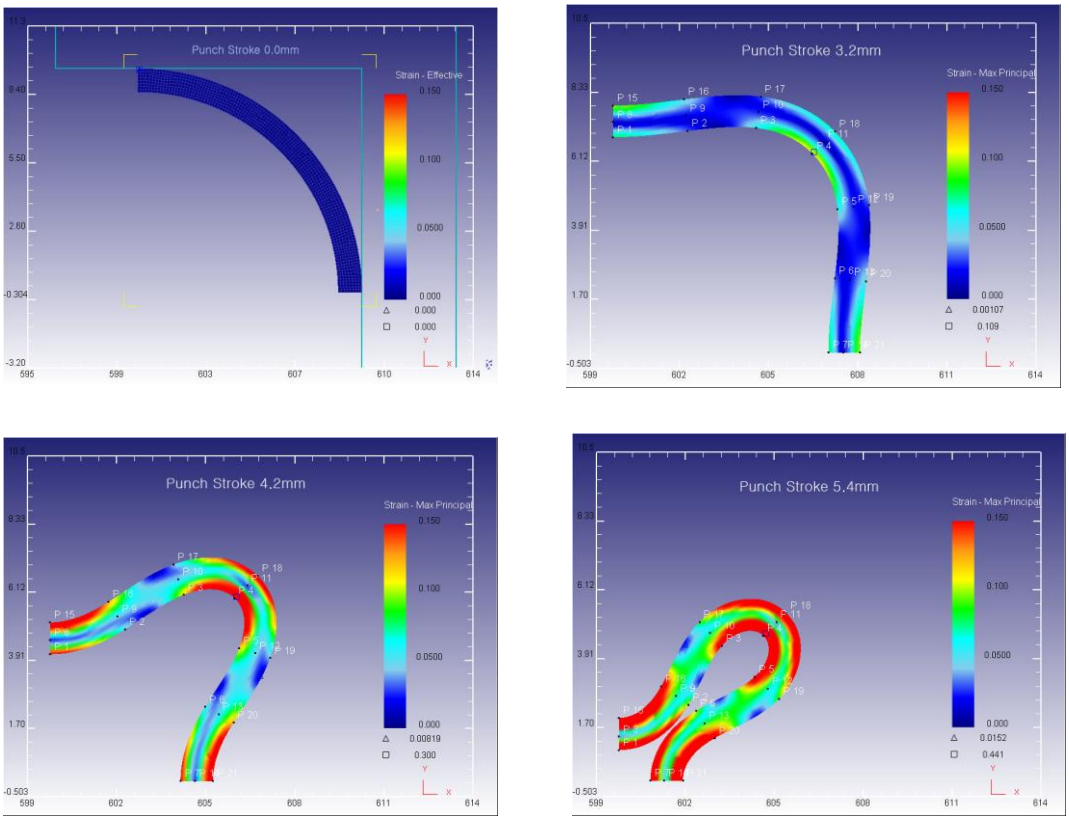

Fig.11 The result of deformation analysis by Deform-2D

지점에서 2차 하중 상승이 나타나지만, 경계가 뚜렷하지 않다. 스트로크 2.7mm 지점에서 원형관은 4각형상으로 되고, 2차 하중 증가는 완만하게 나타나는 특징을 볼 수 있다.

스트로크 3.3mm 부근에서 1차 최대 하중이 나타나고, 윤활유의 점도가 낮을 수록 약간 높은 하중을 나타내고 있다. 스트로크 3.3mm 부근을 지나면 원형관은 내측으로 더욱 좌굴되어 1차 하중 감소를 나타낸다. 스트로크 4.6mm 부근에서 원형관은 내측 4점 접촉 상태가 되어 급격하게 3차 하중 증가를 나타낸다. 3차 하중 증가의 시작은 거의 같은 시점이고 점도가 낮을수록 약간 높은 하중을 나타내고 있다.

Fig. 10 은 압축속도 450mm/min.조건에서 윤활유의 종류를 다르게 한 실험 결과이다. 원형관에 접촉되어 스트로크 0.7mm 부근까지 1 차 하중 증가를 나타낸다. 여기서도 윤활유에 따른 압축하중의 차이는 아주 작게 나타나고 있다. 스트로크 0.7mm 에서 2 차 하중 상승이 나타나지만 경계는 뚜렷하지 않다. 스트로크 2.7mm 지점에서 원형관은 4 각형상으로 되고 2 차 하중 증가는 완만하게 나타나고 있다. 스트로크 3.3mm 부근에서 1 차 최대 하중이 나타나고 있다. 스트로크 3.3mm 부근을 지나면 원형관은 내측으로 더욱 좌굴되어 1 차 하중 감소를 나타낸다. 스트로크 4.6mm 부근에서 원형관은 내측 4 점 접촉 상태가 되어 급격하게 3 차 하중 증가를 나타낸다. 3 차 하중 증가의 시작은 거의 같은 시점이고 점도가 낮을수록 약간 높은 하중을 나타내고 있다.

이상과 같이 점도가 다른 5종류의 윤활유와 5종류의 압축속도에 따른 실험결과를 살펴보면 1차 하중 증가에서 원형관이 4각형상이 되기 전의 하중상태는 어느 윤활유의 효과가 좋다고 판단하기 어려운 결과이다. 그러나 1차 최대 하중 점부터는 전반적으로 높은 점도의 윤활유가 낮은 압축하중을 나타내고 있다. 따라서 점도가 높은 윤활유가 고압축 윤활에 효과적이라는 사실과 잘 일치한다[6]. 그러나 원형관의 2축압축 변형특성은

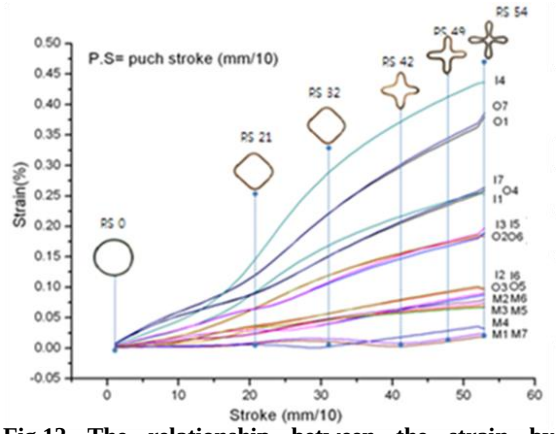

Fig.12 The relationship between the strain by Deform-2D analysis and deformed specimen shape under punch stroke

평면 접촉이 적고 점 접촉이 많으므로 윤활유에 의한 영향보다는, 압축속도의 영향이 더 크게 작용함을 확인 할 수 있었다.

Fig. 11은 Deform-2D에 의한 변형 해석 결과를 나타낸 것으로 Fig. 5의 2축압축 실험 결과의 각각의 변형 단계에서 나타나는 단면 형상 변화와 잘 일치하며, 변형 과정에서의 변형량과 응력상태를 알 수 있다.

Fig. 12는 2축 압축 변형 전 및 변형 시작단계에서 종료시까지의 각 단계에서 Fig. 4의 Al 원형관의 외측, 중립측, 내측의 각각의 위치에서 발생한 변형량의 크기를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 2축 압축 실험결과 변형 전과 변형 시작단계에서 종료시 까지의 각 단계에서 Al 원형관의 외측, 중립측, 내측의 위치에서 측정한 마이크로비커스 경도값을 나타낸 것이다. 이 결과 변형전의 평균 경도값(89.3 Hmv)에 대해 변형 최종단계의 외측(O4) 및 내측(I4)의 최대변형이 발생한 위치에서의 경도값은 각각 96.2Hmv 및 97.7Hmv의 값을 나타내고 있다.

이 결과는 변형이 크게 발생한 곳은 변형 경화에 의해 경화 정도가 커진 것을 의미하므로 경도값도 크게 나타나는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 2축 압축을 받는 Al 원형관의 변형특성을 검토하기 위하여 단동 2 축 압축시험 금형을 제작하고, 압축속도의 크기와 윤활유의 종류에 따

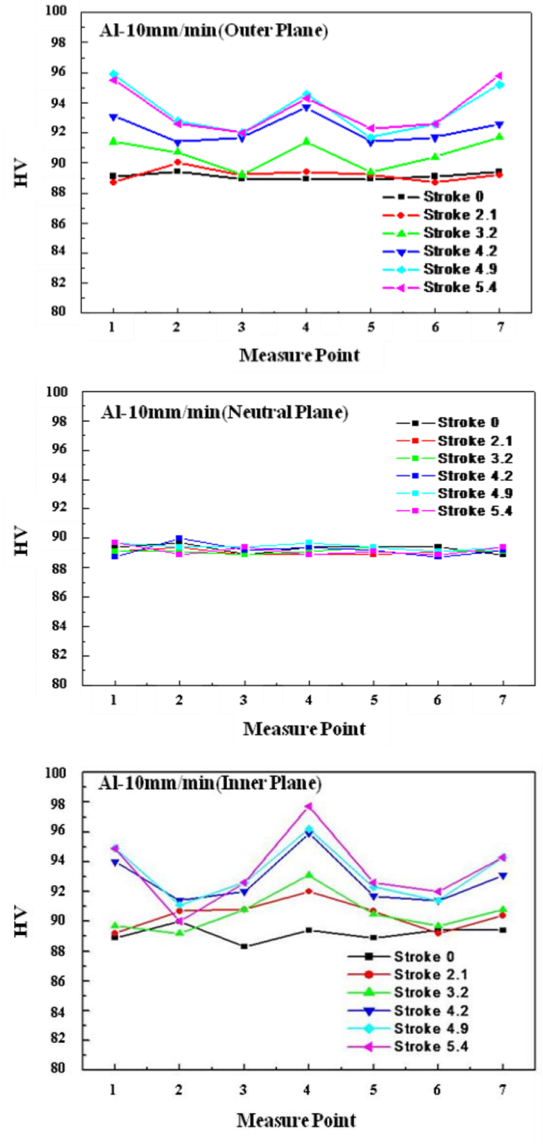

Fig.13 The result of micro Vickers hardness value at deformed stage

른 2축 압축 변형 특성을 검토하였다.

(1) 2축 압축을 받는 Al 원형관의 응력-변형율 특성은 압축속도의 크기에 따른 충격 반력의 영향에 의한 차이를 명백히 확인할 수 있었고, 압축속도가 증가할 수록 운동에너지도 커지므로 압축 하중이 낮아지고, 압축변형 스트로크가 작아지는 특이성을 확인하였다.

(2) 원형관의 경우는 평면접촉이 적고 점 접촉이 많으므로 윤활유에 의한 영향은 크게 나타나지

않음을 확인 할 수 있었다.

(3) Deform-2D를 이용한 변형해석 결과와 실험결과도 어느 정도 잘 일치하고 있음을 알 수 있었고, 원형관의 대-소성변형에 따른 경도값의 차이도 일관되게 나타나는 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 서울과학기술대학교 학술연구비의 지원에 의해서 수행된 연구로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] M. Gotoh, Y. Shibata, 1990, Elastic-Plastic Analysis of Uni-Lateral and Bi- Lateral Compression of A Circular cylinder by Flat Plates, J. Soc. Mech. Eng. Int. J. Ser. A, Vol. 56, No. 529, pp. 2002~2010.

[2] M. Gotoh, C. K. Yoo, 1992, Proc. The 43rd JSTP joint Conf., Jpn. Soc. Technol. Plast., Kyoto-shi, Japan, pp. 561~564.

[3] M. Gotoh, C. K. Yoo, S. Kaneko, M. Yamashita, 1997, Proc. JSTP 1997 Spring Conf., Jpn. Soc. Technol. Plast., Chiyoda-shi, Japan, pp. 281~282.

[4] S. T. Won, C. K. Yoo, K. J. Kim, W. K. Kim, M. Gotoh, K. T. Kim, H. J. Kim, T. H. Kim, 2009, Proc. KSPE Spring Conf., Kor. Soc. Precis. Eng., Jeju-do(Ramada Plaza Hotel), Korea, pp. 733~744.

[5] S. T. Won, C. T. Kim, C. K. Yoo, K. J. Kim, W. K. Kim, J. J. Yoo, 2010, Proc. KSPE Spring Conf., Kor. Soc. Precis. Eng., Jeju-do(Ramada Plaza Hotel), Korea, pp. 1167~1168.

[6] E. Rabinowicz,1995, Friction and Wear of Materials, John Wiely & Sons, Inc., N.Y., pp. 261~263.