

원형 동관의 2축압축 변형특성 및 조직변화에 관한 연구

유종근¹ · 원시태[#]

Biaxial Compressive Deformation Characteristics and Microstructure Change in a Round Copper Pipe

C. K. Yoo, S. T. Won

(Received December 3, 2012 / Revised February 1, 2013 / Accepted March 8, 2013)

Abstract

The deformation characteristics and microstructure changes in a round copper pipe under biaxial compression was studied using a horizontal compression die. The change of material properties, punch load and deformation behavior were monitored using various compressive deformation rates in the range of 0.5mm/min~450mm/min. The strains, either tensile or compressive, were estimated from Vickers microhardness test results. The punch load and deformation characteristics of the round copper pipes were found to change greatly at a deformation rate of about 200mm/min. The punch load decreased with increasing compressive deformation rate. The results of numerical simulations agreed well with what was expected from the final microstructure and the hardness profile estimated from the final deformation strains.

Key Words : Deformation Rate, Biaxial, Compressive, Microstructure, Deformation, Round Copper Pipe

1. 서 론

원형관의 2차 가공법에 관한 원형관의 2축 압축 가공에 관한 연구를 Gotoh, Yoo 등의 연구자가 발표한 바 있다[1~4]. 본 연구는 원형관의 2축 압축에 관한 일련의 연구로서, Al 원형관의 2축 압축 실험 결과[5]에 이어 동(Cu) 원형관의 2축 압축 변형특성을 조사하였다. 본 연구를 위해 개발한 2축 압축 시험금형[2]을 이용하여, 압축속도의 크기와 윤활유의 종류에 따른 압축변형 특성곡선을 Al 원형관의 실험결과와 비교하고 조직변화를 고찰하였다.

2. 시험장치 및 시험 방법

Cu 원형관의 2축 압축시험은 상, 하형의 회전 조절에 의해서 각도 변화가 45°(정사각)에서 최대

70°(장방형) 범위까지 시험할 수 있는 단동 가경식(單動可傾式) 2축 압축시험 금형[2]을 사용하였고, 45°로 동일한 압축비(정사각)로 시험하여 C. K. Yoo 등의 논문[5]과 같이 Al 원형관의 시험편에 사용하는 2축 하중의 하중 작용 상태와 동일하게 하였다.

본 시험에 사용한 Cu 원형관의 화학성분은 Table 1과 같고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Cu 원형관 시험편의 형상과 규격은 C. K. Yoo 등의 논문[5]와 같이 Al 원형관 시험편과 동일하게 길이 50mm, 외경 19mm, 내경 17mm이다.

시험편이 장착되는 부분과 시험편의 접촉표면에는 윤활을 실시하였고, 윤활유의 종류와 점도는 Table 3과 같다.

압축속도는 0.5mm/min~450mm/min 범위에서 2축 압축 변형특성을 비교하였다.

1. 뉴테크

Corresponding Author : Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology, E-mail: stwon370@seoultech.ac.kr

Table 1 Chemical composition (%)

Material	Cu	Al	Ti	Mn	Zn	Pb
Cu	Over	0.023	0.052	0.004	0.0013	0.0031

Table 2 Mechanical properties

Material	σ (MPa)	ϵ (%)	C(MPa)	n	H_{mv}
Cu	456.2	4.67	54.0	0.71	134.9

Table 3 Viscosity coefficient of lubrication oils

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

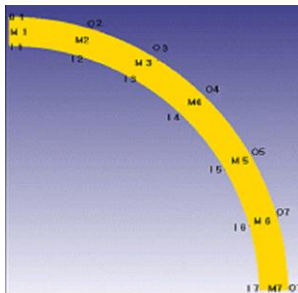


Fig. 1 Micro Vickers measure points

각 단계에서 압축 변형된 시험편은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 Fig. 1과 같이 시험편의 초기 특정 위치를 지정하고 소성 대 변형의 척도가 되는 각각의 변형 단계에서의 경도값(시험하중 50g)을 측정하였다.

변형 단계에서 발생한 조직사진은 각각의 변형 단계에서 시험편 단면을 절단하고, 마운팅과, 연마 후 부식액(증류수 120ml, 32%염산 30ml, 염화철 10g)으로 10-30 초 동안 부식한 후 금속 현미경에서 관찰하였다.

3. 시험결과 및 고찰

Fig. 2는 압축속도 10mm/min의 2축 압축 과정에서 펀치하중과 펀치 스트로크(변형)의 특성을 나타낸 것이다. 그래프에 첨부된 단면 사진은 그 지점에서의 변형된 Cu 원형관의 단면 상태를 나타

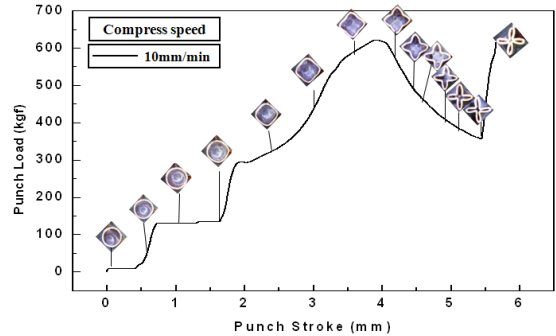


Fig. 2 The relation between punch load-stroke curve and round Cu pipe deformed shapes

낸다. 그래프의 특성곡선을 살펴보면 변형초기에는 2축 압축 시험 장치의 다이 면이 원형관에 점 접촉한 후 하중(약16kgf)이 일정한 1차 하중 일정 구간(0.0~0.4mm)이 나타나고, 이후 면 접촉이 더욱 커져 0.4~0.6mm 구간에서 급격한 1차 하중 증가구간이 발생한다. 한편 다이와 시험편의 면 접촉이 본격적으로 시작되는 스트로크 0.7mm~1.6mm 위치에서 2차 변형 및 하중이 일정한 구간이 발생한다. 이 지점을 지나면 스트로크 1.6mm~1.85mm 구간에서 급격한 2차 하중 증가구간이 발생한다. 이때 2차 하중의 증가구간은 면 접촉이 상당히 진전된 상태이다. 그리고 스트로크 2.1mm 부근에서 비교적 완만하게 3차 하중 증가가 시작된다. 이 지점에서 원형 단면형상이 본격적으로 4각 단면형상으로 변형되기 시작한다.

한편 하중 최대 점(630kgf)은 사각 단면형상에서 내측으로 좌굴이 약간 시작된 스트로크 3.9mm 부근에서 발생한다. 이후 원형관은 내측으로 계속 변형되어 중심부에서 4면이 접촉하기 직전인 스트로크 5.4mm 위치까지 하중감소가 나타난다. 이 하중감소의 초기 기울기는 좌굴 구속이 작아 하중변화의 기울기가 급격하지만 내측으로 좌굴이 집중되면서 구속이 커져 좀 더 완만한 특성을 나타낸다. 이 지점을 지나면, 내측 좌굴이 한 곳으로 모이면서 축의 지탱이 커져서 급격한 4차 하중증가를 나타낸다.

Fig. 3은 11종류의 압축속도에 대한 시험 결과를 나타낸 것이다. Cu 원형관은 Al 원형관의 2축 압축 시험결과[5]와는 달리 안정된 시험이 가능하여 압축속도를 최대한 세분화하였다. 특히 0.5mm/min과 1mm/min은 (준)정적하중 상태이고, 이 (준)정적 상태를 포함한 낮은 속도에서는 뚜렷한 계단형으

로 하중이 상승하는 것을 볼 수 있다.

압축속도 0.5~50mm/min에서는 1차 하중 증가 구간(스트로크 0.4~0.7mm)이 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 속도 100~400mm/min에서는 S자형 1차 하중상승 구간(스트로크 0.2~1.0mm)을 나타내고 속도 450mm/min은 처음부터 완만(기울기 약 40도)한 하중상승곡선(스트로크 0.0~1.0mm)의 특징을 볼 수 있다. 스트로크 0.0~0.6mm구간의 특징을 보면 속도가 빠를 수록 1차 하중증가가 빠르고 크게 나타난다. 이는 원형관의 저항력에 기인하는 것으로 속도가 빠르면 빠를 수록 반력(충격반력)이 커져서 나타나는 것으로 생각된다. 이 저항력을 초과하면 항복과 같은 현상으로 원형관의 반력의 영향보다 속도에 따른 운동에너지($E=1/2mv^2$)의 영향이 커져 스트로크 0.7~1.1mm에서는 역으로 속도가 빠를 수록 하중이 낮아진다. 스트로크 1.1mm부근에서 한 교점이 형성되는데 순간적이지만 속도 450mm/min이 가장 낮은 하중을 나타낸다. 그러나 아직도 Cu 원형관의 저항은 커서 2차 하중증가 구간 스트로크 1.2~1.8mm에서 1차와 같은 속도에 비례한 하중 증가 결과가 나타난다. 스트로크 1.2~1.8mm에서 원형관의 상태를 보면 원형의 모양은 완전히 사라지고 둥근 모양이지만 모서리는 점점 4각에 가까운 모양의 단계로 변형한다. 스트로크 1.8~2.2mm의 구간을 보면 1차(스트로크 0.7~1.1mm) 때와 유사한 속도에 따른 하중변화이지만 가장 빠른 속도에서 가장 낮은 하중으로 나타나지는 않는다. 그 이유는 4각에 가까워지면서 단면이 완만한 곡선에서 점점 모서리가 형성되어 그 만큼 단면 수직도가 커져 충격 저항도 커진 것으로 판단된다. 스트로크 2.2mm를 지나면 비교적 완만한 3차 하중 상승구간이 나타난다. 스트로크 2.6mm 부근에서 가장 완전한 사각형으로 성형된다. 이 지점을 지나면 사각형은 내측으로 좌굴이 시작되지만 저항은 아직도 커서 하중은 계속 증가하게 된다. 스트로크 3.7~4.1mm 부근에서 각각의 최대 하중점을 나타낸다. 최대 하중점에서 원형관의 상태는 내측으로의 좌굴 깊이도 1mm 이상 들어가 있어 폭이 넓은 V자 형을 하고 있다. 1차 하중 최대점을 지나면 Cu 원형관은 내측으로 더욱 크게 좌굴되면서 비교적 급격한 하중 감소를 나타낸다. 이후 Cu 원형 관은 내측으로 좌굴되어 내측의 4면이 접촉되면서 급격한 4차 하중 증가를 나타낸다. 그러나 4차 하중증가의 시작점은 속도에 따라

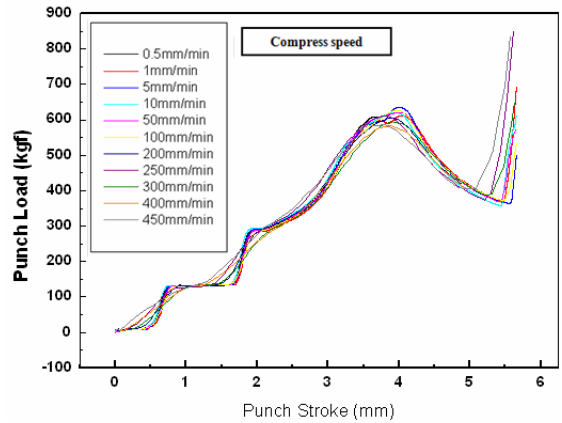


Fig. 3 The characteristic of punch load-stroke curve on various compressive strain rates

각기 다른 위치에서 시작되고 있다. 4차 하중 증가의 시작점은 속도가 빠를수록 빨리 진행되고 있는데 이 또한 속도에 비례한 운동에너지의 영향으로 생각된다. 예를 들어 압축속도 450mm/min은 스트로크 5.0mm 지점에서 시작되고 있다. 그러나 압축속도가 낮은 1mm/min은 스트로크 5.4mm 지점에서 시작된다. 결국 압축속도 450mm/min은 큰 운동에너지로 압축속도 1mm/min에 비해 0.4mm 더 많이 압축시킨 결과이다. 이와 같이 원형관의 2축 압축변형에서 압축속도에 따른 변형특성의 결과는 주목할 만한 특징을 나타내고 있다.

Fig. 4는 압축속도 1mm/min.조건에서 윤활유의 종류에 따른 시험 결과이다.

원형관에 펀치가 접촉되어 스트로크 0.2mm 지점까지 1차 하중증가가 나타난다. 1차 하중증가 구간에서 윤활유의 영향은 미미하며 점도가 낮은 식용유를 윤활유로 사용한 경우 더 낮은 하중을 나타내고 있다. 스트로크 0.2~1.2mm 영역은 하중 일정구간을 나타낸다. 이 하중 일정구간에서는 윤활유의 특성이 나타나지 않는다. 스트로크 1.2~1.4mm 구간은 2차 하중 증가를 나타낸다. 2차 하중 증가구간의 윤활 특성은 점도가 낮은 식용유에서만 낮은 하중으로 나타나고 나머지는 거의 같은 하중의 크기를 나타낸다. 스트로크 2.6mm 부근에서 원형관은 사각형으로 성형되고 3차 하중 증가는 계속된다. 스트로크 2.3mm 부근에서 서서히 윤활유의 종류에 따라 하중의 격차가 발생한다. 1차 최대 하중을 나타내는 스트로크 3.5mm 부근까지 윤활유 종류간의 하중 격차는 최대 발생한다.

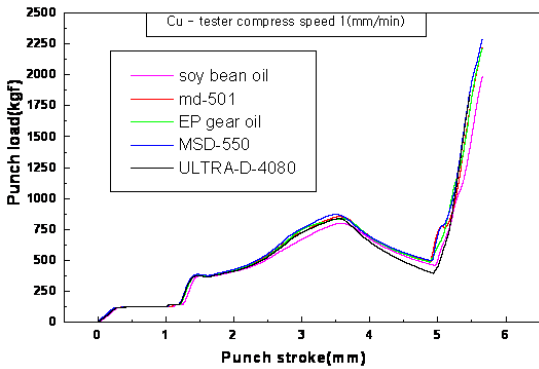


Fig. 4 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rate (1mm/min.)

스트로크 3.0mm 지점에서 하중격차는 식용유/640kgf, ULTRA4080/730kgf, md-501/730kgf, EP-gear/750kgf, MSD550/770kgf을 나타내고 있다. 윤활유간의 하중 격차가 가장 큰 스트로크 2.8~3.5mm의 구간에서 원형관의 상태를 보면 사각형에서 내측으로 좌굴이 시작되어 원형관과 2축 압축 금형의 접촉 면적은 서서히 양 끝 단의 좁은 영역만 접촉하게 된다. 시험편은 아주 느린 속도와 사각형 모서리에서의 상호 유동으로 복잡한 상태가 되어 윤활유 개개의 특성이 나타나지 않는다. 스트로크 3.5mm 부근을 지나면 원형관은 내측으로 더욱 좌굴되어 1차 하중 감소구간이 나타난다. 스트로크 4.8mm 부근에서 원형관은 내측 4점 접촉 상태가 되어 급격하게 4차 하중 증가가 나타난다. 4차 하중 증가의 시작점은 스트로크 0.2mm 이내의 편차로 시작된다. AI 원형관의 경우[5] 보다 압축성이 작게 나타나고 있다. 1차, 2차, 3차 하중 증가 구간에서는 점도가 가장 낮은 식용유에서 가장 낮은 하중이 나타났으나, 여기서는 점도가 가장 높은 ULTRA4080의 하중특성곡선이 가장 낮게 나타난다. 이는 점도가 높을 수록 고 압축에서 윤활효과가 탁월하다는 일반이론[6]을 입증한다.

Fig. 5는 압축속도 200mm/min.조건에서 윤활유의 종류에 따른 시험 결과이다. 원형관에 접촉되어 스트로크 0.3mm 부근까지 1차 하중증가를 나타낸다. 이 구간에서 윤활유 종류에 의한 하중의 차이는 거의 나타나지 않는다. 스트로크 0.3~1.1mm 영역은 1차 일정 하중 구간을 나타내고, 5종류의 하중 특성곡선은 겹쳐져 나타난다. 스트로크 1.1~1.6mm 구간은 2차 하중 증가 구간이다. 이 구간에서도 하중특성곡선은 겹쳐져서 윤활유의 종류에 따른 특성을

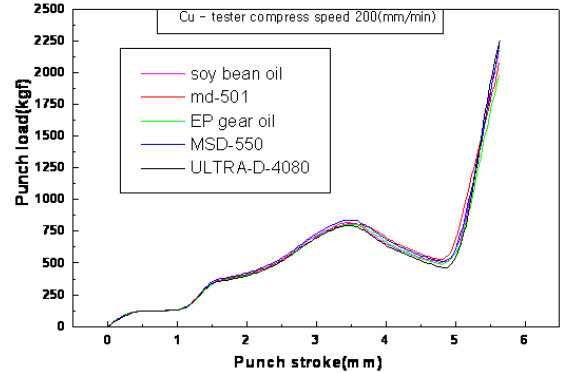


Fig. 5 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rate (200mm/min.)

볼 수 없다. 스트로크 1.6mm 지점에서 3차 하중 증가가 완만하게 시작되며, 여기서부터 윤활유 종류에 따라 하중 격차가 조금씩 나타난다. 스트로크 1.6~3.5mm 구간의 윤활 특성을 보면 ULTRA4080은 가장 낮은 하중을 나타낸다. 구간에 따라 약간의 순서 바뀔도 있지만 EP-gear, md-501, 식용유, MSD550의 순서로 하중이 증가한다. 스트로크 3.5mm 지점에서 1차 최대 하중 점에서 스트로크 4.8mm 영역은 하중 감소구간을 나타낸다. 이 감소 구간에서의 윤활 특성을 보면 ULTRA4080이 가장 낮은 하중을 나타내고 있고, EP-gear, 식용유, MSD550, md-501의 순서로 나타난다. 스트로크 4.5mm 지점에서 윤활유의 종류에 따라 가장 큰 하중 격차를 볼 수 있는데 ULTRA4080과 md-501의 격차는 약 123kgf이다. 점도가 높을수록 높은 압축에서의 윤활성이 우수한 것으로 알려져 있는데[6] 압축속도 200mm/min에서는 ULTRA4080의 윤활유에서 그 특징이 비교적 잘 나타나고 있다.

Fig. 6은 압축속도 400mm/min.에서 윤활유의 종류를 다르게 한 시험 결과이다.

원형관에 접촉되어 1차 하중 증가 속도가 더욱 낮고 완만하게 나타나고 있다. 스트로크 0.7mm 부근까지 1차 하중 증가를 나타낸다. 1차 하중 증가구간에서 윤활 특성은 식용유가 가장 낮지만 나머지의 윤활유는 중복되어 구분하기 어렵다. 하중 일정구간은 스트로크 0.7mm 지나서 매우 짧게 나타나고 있다. 윤활유의 종류에 따른 특성은 거의 나타나지 않는다. 스트로크 0.8~1.6mm 영역은 2차 하중 증가구간이다. 이 구간에서 가장 낮은 하중을 나타내는 윤활유는 md-501이고 다음으로 식용유, EP-gear, MSD550, ULTRA4080의 순으로 나

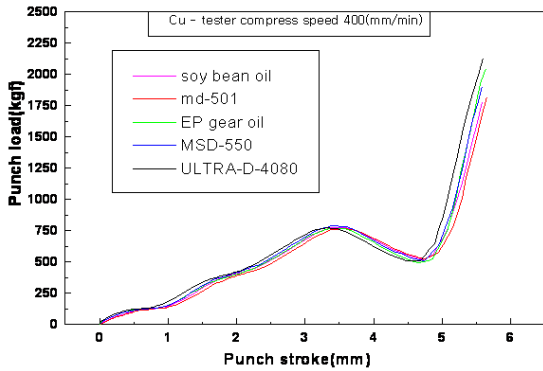


Fig. 6 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rate (400mm/min.)

타난다. 구간이 뚜렷하지 않지만 스트로크 2.0mm 부근에서 3차 하중 증가구간이고, 이 구간에서도 하중의 순서는 2차 하중 증가구간과 비슷한 특성이 나타나고 있다. 스트로크 3.4mm 지점에서 최대 하중 점을 나타낸다. 스트로크 4.3~4.7mm의 영역은 스트로크가 증가함에 따라 하중이 감소하는 구간이다. 이 하중 감소구간에서 윤활 특성은 ULTRA4080이 가장 낮게 나타나고 EP-gear, MSD550, md-501, 식용유의 순서로 나타난다. 4차 하중증가가 진행되고 급격히 하중이 높아지는데 이 영역에서는 점도가 높은 윤활유의 스트로크가 짧게 나타난다. 이것은 점도가 높은 윤활유일수록 고압에서의 윤활성이 양호함으로 유동성에 영향을 미쳐 압축량도 커졌기 때문에 스트로크도 짧게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 압축속도 450mm/min.에서 윤활유의 종류를 다르게 한 시험 결과이다.

스트로크 0.0~0.7mm 영역은 1차 하중 증가구간이지만 이후에 나타나는 하중 일정구간은 거의 구분하기 어렵다. 이 구간에서의 윤활 특성은 식용유가 가장 낮게 나타나지만 윤활유 종류에 따른 큰 차이가 없어 구분하기 어렵다. 스트로크 0.8mm의 짧은 영역을 하중 일정구간으로 단정하고, 스트로크 1mm 지점을 지나면 2차 하중 증가구간이 시작된다. 이 구간을 지나면서 윤활유에 따른 하중 격차가 구분 가능하게 된다. 스트로크 2.0mm를 지나면 3차 하중 증가구간이 시작되는데 윤활유 종류에 따른 하중 격차는 약 30~37kgf 정도로 스트로크 1.2~3.3mm 구간의 비교적 넓은 영역에서 일정하게 나타나고 있다. 스트로크 3.4mm 부근에서 최대 하

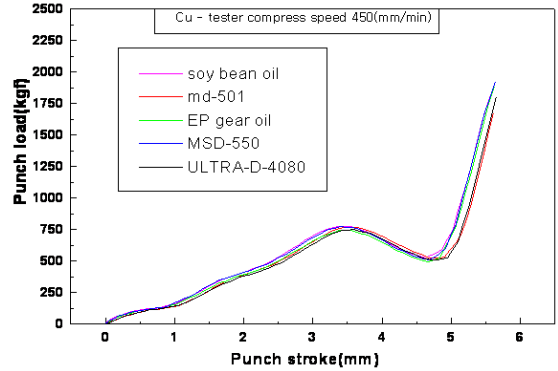


Fig. 7 The characteristic of punch load-stroke curve on lubrication compressive strain rate (450mm/min.)

중을 나타내고, Fig. 4, 5, 6의 경우와 유사하게 점도가 높은 윤활유가 낮은 하중을 나타내고 있다.

Fig. 8(외측), Fig. 9(중립축) 및 Fig. 10(내측)은 펀치 스트로크 0mm(압축 시작단계)에서 펀치 스트로크 5.4mm(압축 종료단계)의 각 단계에서 측정된 경도값을 나타낸 것이다. 스트로크 2.1mm 단계에서 경도값의 편차는 외측 1.7Hmv, 중립축 0.8Hmv, 내측 2.1Hmv를 나타내고 있다. 스트로크 5.4mm 단계에서 경도값 편차는 외측 6.1Hmv, 중립축 2.0Hmv, 내측 8.1Hmv를 나타내고 있다. 그 래프의 전체적인 상태에서도 편차가 뚜렷하게 나타난다. 또한 이 편차는 인장 구간과 압축 구간에 따른 소성변형의 척도를 나타내는 기준치로 볼 수 있다. 같은 외측에서도 굽힘(좌굴) 위치에 따라 인장부분과 압축부분이 발생하는데 경도값의 측정에서도 특징이 잘 나타나고 있다. 이 결과는 AI 원형관의 실험결과[5]와도 잘 일치하고 있다.

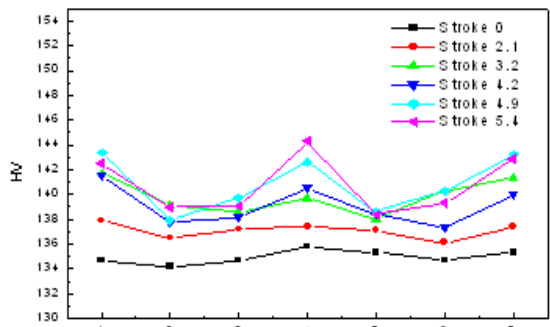


Fig. 8 The result of micro Vickers hardness value at deformed stage, 10mm/min. (Outer Plane)

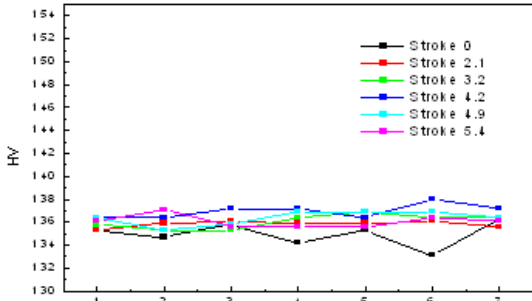


Fig.9 The result of micro Vickers hardness value at deformed stage, 10mm/min(Neutral Plane)

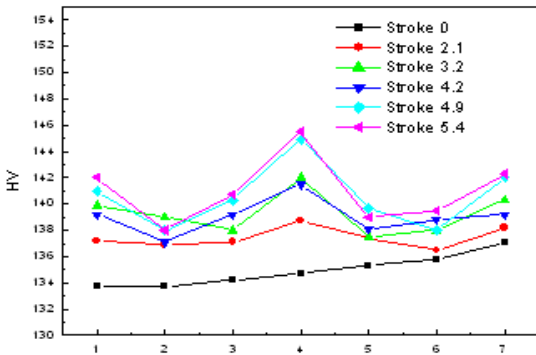


Fig.10 The result of micro Vickers hardness value at deformed stage, 10mm/min(Inner Plane)

Fig. 11, 12, 13은 좌측에 나타난 형상부분 중에서도 변형이 큰 모서리 부분의 확대조직 사진이다. Fig. 11은 Cu 원형관(스트로크 0.0mm)의 조직 사진으로 압축 변형 전 단계로 외측과 내측의 원호선이 균일하다. Fig. 12는 스트로크 3.3mm 단계에서 원형관 모서리 부분의 조직 사진으로 이 단계에서는 소성변형에 의해 원형관의 내측으로 압축이 발생하여 균일했던 원호선에 약간의 굴곡이 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 13은 스트로크 5.4mm 단계에서 발생한 조직 사진이다. 2축 압축의 진행에 따라 소성적으로 대 변형이 발생하여 원형관의 외측은 인장에 의해 늘어나는 조직변화가 발생하고, 내측은 압축에 의해 두께 중심방향으로 울퉁불퉁한 모양의 조직변화가 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 14, 15, 16은 2축 압축을 받는 원형관의 FEM 해석결과[3]이고, 특히 Fig. 16의 2축 압축 변형의 마지막 단계에서의 원형관 내측은 두께 중심방향으로 울퉁불퉁한 모양의 변형을 볼 수 있어 Fig. 13의 조직사진의 실험결과와도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

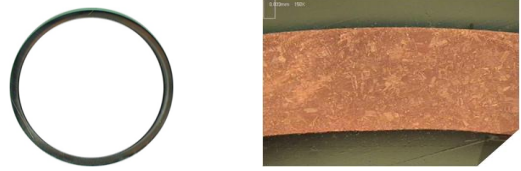


Fig.11 Microstructure deformation (stroke 0.0mm)

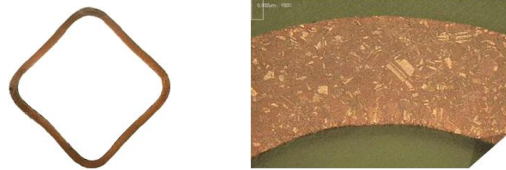


Fig.12 Microstructure deformation (stroke 3.3mm)

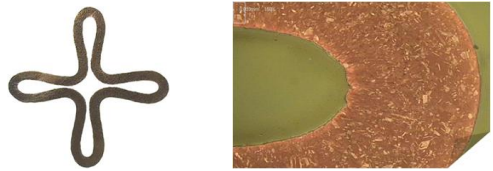


Fig.13 Microstructure deformation (stroke 5.4mm)

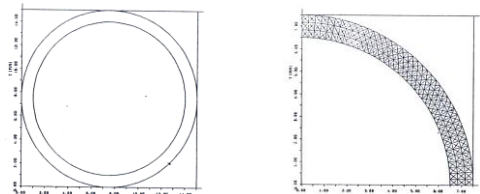


Fig.14 FEM deformation (stroke 0.0mm) [3]

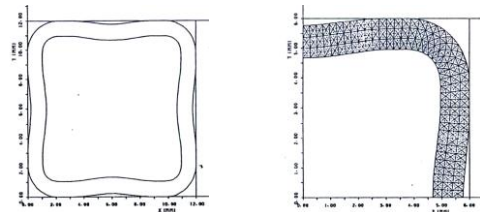


Fig.15 FEM deformation (stroke 3.3mm) [3]

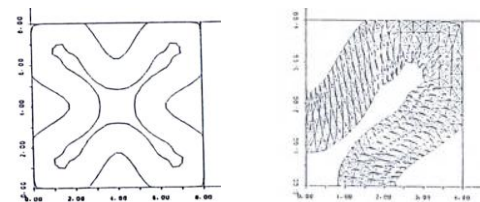


Fig.16 FEM deformation (stroke 5.4mm) [3]

4. 결 론

본 연구는 2 축 압축을 받는 Cu 원형관의 변형 특성을 검토하기 위하여 단동(單動) 2 축 압축시험 금형을 이용하여 압축속도의 크기와 윤활유의 종류에 따른 2 축 압축 변형특성과 조직변화를 검토하였다.

(1) 2 축 압축을 받는 Cu 원형관의 초기 하중-변형 특성은 압축속도가 클 수록 충격 반력도 커져서 같은 스트로크 지점에서 하중도 크게 나타난다. 이로 인해서 압축속도가 높을 수록 2 축 압축 변형특성곡선도 완만해지는 특이성을 확인하였다.

(2) 원형관의 좌굴이 충분히 커지면 초기의 충격 반력의 영향은 아주 작아지고 운동에너지($E=1/2mv^2$)의 영향을 크게 받게 된다. 이에 대한 결과는 원형관이 내측에서 4 점 접촉된 지점의 스트로크의 차이로 입증되었다. 즉 압축속도가 빠를 수록 운동에너지가 커지므로 압축량도 커져서 스트로크가 작게 나타나고 있음을 확인하였다.

(3) Cu 원형관의 2 축 압축 변형특성 곡선은 Al 원형관의 결과 보다 각 단계의 변곡점(계단형)이 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있었다.

(4) 원형관의 2 축 압축특성은 변형초기 단계에서는 평면 접촉이 적고 점 접촉이 많으므로 윤활유에 의한 영향이 크게 나타나지 않지만, 변형 진행단계의 고압축 조건에서는 점도가 높은 윤활유의 윤활효과가 우수함을 확인할 수 있었다.

(5) 각 단계(Stroke)의 현미경 조직 사진에서 원형관의 외측은 인장의 영향을 받고, 내측은 압축의

영향을 크게 받아 조직변화에서도 확연한 소성변형의 차이를 확인할 수 있었다.

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, The 43rd JSTP Joint Conference(editor: Toshitugu Majaki), Kyoto-shi, Japan, pp. 561~564.
- [3] M. Gotoh, C. K. Yoo, 1993, Proc. JSTP Spring Conf.(editor: Kouhe Nakajima), Tsukuba-shi, Japan, pp. 221~224.
- [4] S. T. Won, C. T. Kim, C. K. Yoo, K. J. Kim, W. K. Kim, J. J. Yoo, 2010, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. Spring Conf.(editor: E. S. Lee), Jeju-do(Ramada Plaza Hotel), Korea, pp. 1167~1168.
- [5] C. K. Yoo, K. J. Kim, S. T. Won, 2012, Biaxial Compressive Deformation Characteristics of Round Aluminum Pipe, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 2, pp. 89~95.
- [6] E. Rabinowicz, 1995, Friction and Wear of Materials, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp. 261~263