

2중 원형동관의 2축압축 변형특성에 관한 연구

유종근¹ · 원시태[#]

Biaxial Compressive Deformation Characteristics of Double Round Copper Pipes

C. K. Yoo, S. T. Won

(Received November 18, 2013 / Revised November 27, 2013 / Accepted December 17, 2013)

Abstract

The deformation characteristics of a double round copper pipe and a single round copper pipe under biaxial compression were studied using a horizontal compression die. The change in punch load and in deformation behavior was measured during the experiments using various compressive deformation rates in the range of 10mm/min. ~ 450mm/min. The maximum punch load for both the double round copper pipe and the single round copper pipe decreased with increasing compressive deformation rate. The maximum punch load for the single round copper pipe was twice that of the double round copper pipe. After a 4.0mm stroke, the deformed shape of the single round copper pipe remained rectangular. However the outer tube of double round copper pipe remained rectangular while the inner tube was clover shaped. The stress and strain distributions in the double round copper pipe and the single round copper pipe show clear differences. The results of numerical simulations using Deform-2D are in good agreement with experimental results.

Key Words : Strain Rate, Biaxial, Compressive, Deformation, Double Round Copper Pipe, Single Round Copper Pipe

1. 서 론

원형관은 배관, 기계구조물, 각종 설비 제작에 많이 사용되고 있고, 이러한 용도의 원형관은 굽힘과 단축 압축에 의한 2차 가공방법이 종래의 주된 가공방법이었다. 이 보다 특수한 원형관의 2차 가공법으로 원형관의 2축 압축가공 방법이 고려될 수 있으며, 단일 원형관의 2축 압축에 관한 다수의 연구가 발표된 바 있다[1~4]. 본 연구자는 원형관의 2축 압축에 관한 선행연구로서 Al 및 Cu재 단일 원형관의 2축 압축 실험을 실시하였고, 두 재료의 2축 압축 변형특성곡선은 모두 압축속도가 빠를수록 압축하중이 낮아지고, 변형 스트로크는 작아지는 특성이

나타났다. 그러나 Cu 단일 원형관의 변형특성곡선은 Al 원형관의 변형특성곡선에 비해 각 단계에서 변곡점(계단형)이 뚜렷하게 나타나고 있으며, Al 원형관의 경우 변형의 전 단계구간에서 윤활유의 영향이 크게 나타나지 않은 반면, Cu 단일 원형관은 변형이 진행된 고압축 조건에서는 점도가 높은 윤활유가 윤활효과가 우수함을 알았다[5~6].

한편 원형관의 경우에는 용도에 따라 내측에는 부식성 환경이, 외측에는 대기 환경등과 같이 환경조건이 각 각 다른 경우가 발생할 수 있고, 이와 같은 경우에는 사용 강도뿐만 아니라 사용 환경에 따라 이중재료 원형관의 2축 압축가공도 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 2중 이중재료 원형

1. 뉴테크

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

관의 2축 압축실험의 선행연구로서 단일(2t) 원형동관과 동일한 두께의 외경과 내경을 갖는 2중(1t+1t) 원형동관의 2축 압축 변형특성을 비교 검토하였다.

2. 시험장치 및 시험 방법

단일 및 2중 원형동관의 2축 압축시험은 Fig. 1과 같은 단동 가경식(單可傾式) 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 작용상태는 Fig. 2와 같다. 압축시험속도는 10mm/min. ~ 450mm/min.에서 실시하였다.

본 실험에 사용한 단일(2t) 및 2중(1t+1t) 원형동관의 화학성분은 Table 1과 같고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

시험편이 장착되는 부분과 시험편의 접촉표면에는 윤활을 실시하였고, 본 실험에 사용한 윤활유는 Ultra D-4080이고 점도는 1020 C.P.이다. 단일 원형동관의 시험편의 형상과 규격은 Fig. 3과 같다. 2중 원형동관 시험편의 형상과 규격은 Fig. 4와 같고, 두 원형관 사이의 편측 간극은 0.05mm의 틈을 주어 윤활효과가 있도록 하였다.

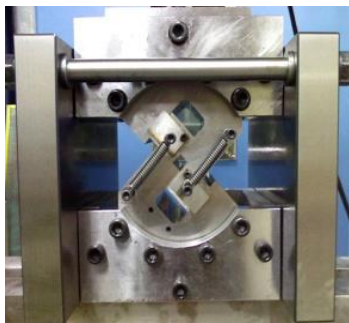


Fig. 1 Biaxial compression experimental apparatus

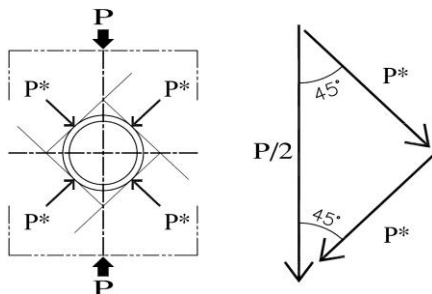


Fig. 2 Biaxial compression load state

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

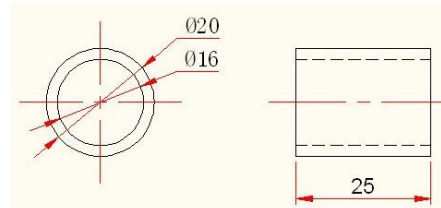


Fig. 3 Geometric of single round copper pipe test specimen

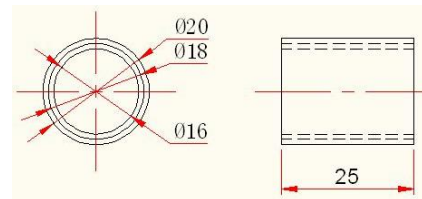


Fig. 4 Geometric of double round copper pipe test specimen

3. 시험결과 및 고찰

Fig. 5는 윤활유(ULTRA D-4080)를 한 종류로 하고 6종류의 2축 압축속도 조건에서 단일(2t) 원형동관의 편치하중과 스트로크(변형)의 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에 첨부된 사진은 각 단계에서 변형된 단일(2t) 원형동관의 단면 모양을 나타낸다.

단일(2t) 원형동관의 하중-변형 특성곡선을 살펴보면 2축 압축시험 장치의 다이면이 원형관에 접촉한 후에 일정하중(약 42kgf)의 1차 하중 일정구간(0.0~ 1.3mm)이 나타나고, 이후 면 접촉이 더욱 커져 1.3~1.8mm 구간에서 급격한 1차 하중 증가구간이 나타난다. 다이와 시험편의 면접촉이 본격적으로 시작되는 스트로크 1.8mm~2.5mm 위치에서 2차 변형 일정구간이 발생한다. 스트로크 4.9mm~5.3mm 구간에서 최대 압축 하중점이 발생하고, 시험속도 범위에서 최대 압축하중은 약 3,400kgf~4,050kgf의 크기를 갖는다. 이후로 내측 면 접촉이 시작되는 3차

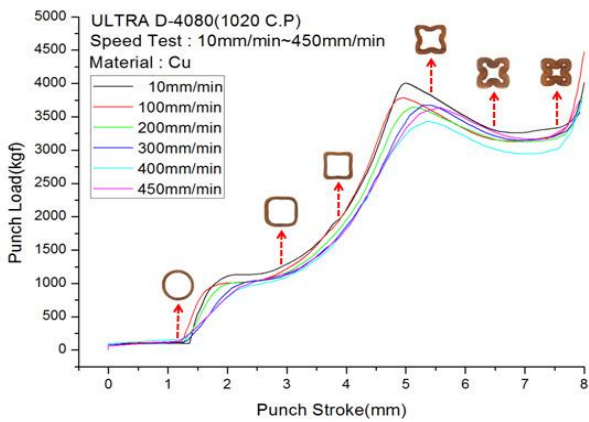


Fig. 5 The relation between punch load-stroke curve and single round copper pipe deformed shapes

하중 증가구간까지 비교적 급격한 구간과 완만한 구간으로 하중변화를 나타내고 있다. 하중 감소구간에서 완만한 구간이 나타나는 이유는 내측으로 4점이 접촉하기 전에 내측으로 꺾인 원형관이 완만한 완곡변형을 하기 때문에 하중변화가 비교적 작게 나타나고 있다. 하중의 최고점과 3차 하중증가 부근의 최대하중 편차는 약 1,270kgf 으로 나타났다.

이상의 단일(2t) 원형동관의 2축 압축 하중-변형 특성곡선은 본 실험에서 사용한 단일 원형동관(2t)보다 두께가 얇은 단일 원형동관(1t)의 실험결과[6]와 비슷하게 2축 압축속도가 높을 수록 2축 압축변형 특성곡선의 변곡점(계단형)이 완만해지는 특성이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 윤활유(ULTRA D-4080)를 한 종류로 하고 6종류의 2축 압축속도에서 2중(1t+1t) 원형동관의 편치하중과 스트로크(변형)의 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에 첨부된 사진은 각 단계에서 변형된 2중(1t+1t) 원형동관의 단면모양을 나타낸다.

2중(1t+1t) 원형동관의 하중-변형 특성곡선을 살펴 보면 2중 원형동관이 다이와 접촉한 후에 일정하중(약 37kgf)의 1차 하중 일정구간(0.0~1.5mm)이 나타나고, 이후 면 접촉이 더욱 커져 1.5~2.1mm 구간에서 급격한 1차 하중 증가구간이 나타난다. 이 구간에서의 2축 압축속도에 따른 하중분포도 단일 원형관의 특성곡선의 결과와 같이 압축속도가 빠를 수록 운동량 증가로 높은 하중을 나타내는 특징을 볼 수 있다. 다이와 시험편의 면 접촉이 본격적으로 시작되는 스트로크 2.1mm~2.5mm 위치에서 변형 일정구간이 발생하는데 높은 속도에서만 비교적 뚜렷

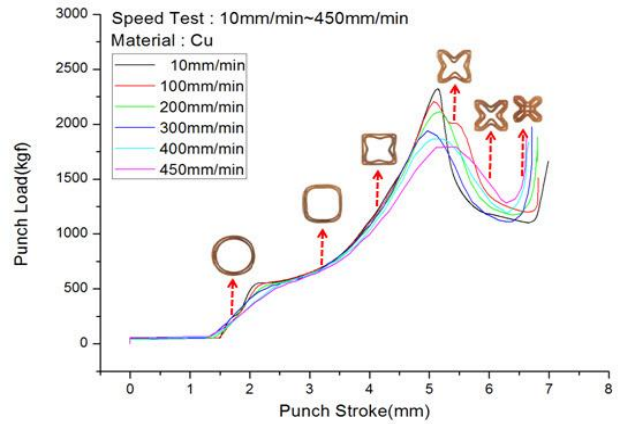


Fig. 6 The relation between punch load-stroke curve and double round copper pipe deformed shapes

하게 나타나고 있다. 스트로크 4.7mm~5.4mm 구간에서 최대 압축하중점이 발생하고, 압축시험속도 범위에서 최대 압축하중은 약 1,750kgf ~ 2,260 kgf의 크기를 갖는다. 이후로 내측 면접촉이 시작되는 3차 하중 증가구간까지 아주 급격한 하중변화를 나타내고 있다. 이 구간은 단일(2t) 원형동관에 비해서 급격하고도 짧게 나타나고 있다. 또한 최고점의 하중의 크기도 단일(2t) 원형동관에 비해서 1,550kgf 정도 낮게 나타나고 있다. 이 이유는 소성거동 관점에서 보면 원형동관의 두께(2t)를 (1t+1t)의 원형동관으로 분할한 경우 두 원형관 사이에서 미끄럼 유동이 쉽게 발생하여 하중이 낮게 나타나는 것으로 생각된다. 하중 최고점과 3차 하중증가 부근의 최대 하중편차는 약 1,530kgf 으로 나타나고 전체 스트로크도 단일 원형동관(2t)에 비해 약 1mm 이상 짧게 나타난다. 이 특징도 단일(2t) 원형동관에 비해서 2중(1t+1t) 원형동관은 두 원형동관의 접촉면에서 유동성이 높으므로 속도에 따른 저항력도 낮게 나타나고 있다. 대표적으로 압축속도 450mm/min.의 1차 하중증가 최고점 하중을 비교해 보면 단일(2t) 원형동관은 1,220kgf 정도인데, 2중(1t+1t) 원형동관은 540kgf 정도로 단일(2t) 원형동관의 하중이 약 2.3배 크게 나타난다. 또한 최대 2축 압축하중은 단일(2t) 원형동관은 4,050kgf 이고, 2중(1t+1t) 원형동관은 2,260kgf 로 단일(2t) 원형동관의 하중이 2중(1t+1t) 원형동관의 약 1.8배 크게 나타난다.

Fig. 7은 단일(2t) 원형동관의 2축 압축시험의 각 스트로크(변형단계)에서 발생하는 시험편의 단면 모양 사진을 나타낸 것이다. 스트로크 2.8mm에서 초

기의 원형단면이 4각 단면모양으로 변형되기 시작한다. 스트로크 4.0mm에서 내측으로 좌굴이 시작되고 있고, 이 지점의 압축하중은 2차 하중 증가에서 기울기가 가장 급격하게 변하는 영역이다. Fig. 4에서 설명한 바와같이 최대 하중점(스트로크 4.7~5.4mm)을 지나면 비교적 급격하게 하중이 저하하지만, 스트로크 6.4~7.6mm의 구간에서는 하중 차이가 거의 없는 일정구간이 나타났다. 그 이유는 Fig. 5의 사진에서 스트로크 6.4mm 부근부터 약 1mm까지 단순한 밀림에 의한 완곡한 변형이 가장 커진 상태를 볼 수 있다. 이것은 양측에서 대칭으로 생겨서 일시적(스트로크 1mm 정도)이지만 큰 하중의 증가 없이 내측으로 변형이 발생하기 때문이다. 스트로크 7.6mm를 지나면 원형동관의 내측면이 서로 접촉되어 편치 하중은 다시 급격하게 증가하는 현상이 나타난다.

Fig. 8은 2중(1t+1t) 원형동관의 2축 압축시험의 각 스트로크(변형단계)에서 발생하는 시험편의 단면 모양을 나타낸 것이다. 단일(2t) 원형동관의 변형에 대해 2중(1t+1t) 원형동관 변형의 특징은 외측과 내측 원형관의 접촉면에서 미끄럼이 발생하는 것이다. 이 특징은 사진에서도 분명하게 잘 나타나고 있다. 스트로크 4.0mm의 모양에서는 2차 하중 증가의 기울기가 가장 급하게 변하는 구간이다. 이 단계에서 내측 원형동관이 외측 원형동관보다 4잎 크로바 모양의 변형이 먼저 발생한다. 내측 원형동관에서 먼저 4 잎 크로바 모양이 발생하는 이유는 외측 원형동관이 4각(스트로크 4.0mm)을 지나서 내측 좌굴이 시작되면 4각 모서리 부근의 내접(內接)된 부분만으로 내측 원형동관의 변형에 필요한 힘이 전달되고, 안쪽으로 변형할 수 있는 공간의 자유가 있으므로 내측으로 먼저 좌굴되는 것으로 생각된다. 한편 Fig. 4에서 보는 바와 같이 최대 압축하중은 스트로크 5mm 부근에서 발생하는데, Fig. 6의 스트로크 5.2mm의 사진에서는 최대 압축하중 지점의 상태는 예상보다 외측 원형동관도 내측으로 크게 좌굴된 상태를 볼 수 있다. 또한 2중(1t+1t) 원형동관은 단일(2t) 원형동관(스트로크 6.4mm 부근)에 비해서 둥근 완곡모양의 변형이 발생하지 않아 완만한 하중 일정구간이 나타나지 않고, 사진의 스트로크 6.5mm에서 볼 수 있는 것처럼 내측 원형동관의 4면이 모두 접촉한 이후에 급격한 하중증가를 나타내는 특징을 볼 수 있다.



Fig. 7 The deformed specimen shapes under punch stroke of single round copper pipe



Fig. 8 The deformed specimen shapes under punch stroke of double round copper pipe

Fig. 9 와 Fig. 10은 각각 단일(2t) 원형동관과 2중(1t+1t) 원형동관의 Deform-2D에 의한 변형해석 결과이다. Fig. 7에 나타난 스트로크 5.5mm의 변형상태는 Fig. 6의 스트로크 6.4mm의 실험 결과의 변형 모양과 비슷함을 알 수 있다. 이 결과는 Deform-2D 해석에서는 실제 2축 압축 시험시 변형단계에서 발생하는 모서리부분의 눌림현상이 없기 때문으로 생각된다. 그러나 각 단계에서 발생하는 해석결과에 의한 변형모양이 Fig. 7 및 Fig. 8의 시험결과와 비교해서 스트로크가 다른점을 제외하고는 잘 일치하고 있다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 Deform-2에 의해 단일(2t) 원형동관과 2중(1t+1t) 원형동관의 변형 단계에서 변형과 응력상태를 해석한 결과이다. 먼저 변형상태를 살펴보면, 단일(2t) 원형동관은 두께에 비해서 축간거리가 짧으므로 내측원도 작게 형성된다. 완전히 압축된 상태(스트로크 5.8mm)를 살펴보면 내측에 폭 0.13mm, 길이 0.65mm의 비접촉 구간이 남아있다.

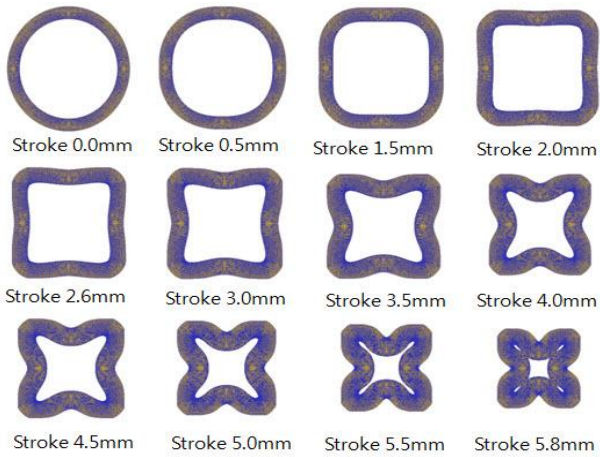


Fig. 9 The FEM result of deformed specimen shapes under punch stroke of single round copper pipe

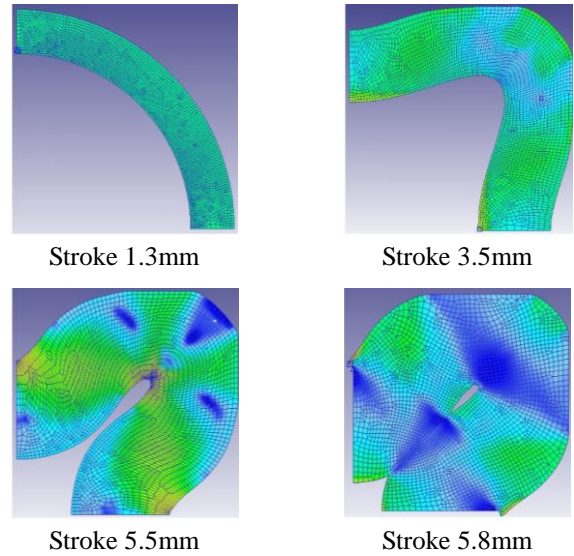


Fig.11 The FEM result of strain distribution under punch stroke of single round copper pipe

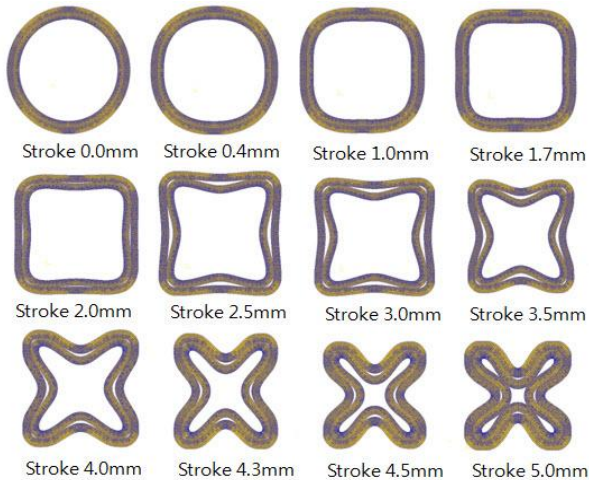


Fig.10 The FEM result of deformed specimen shapes under punch stroke of double round copper pipe

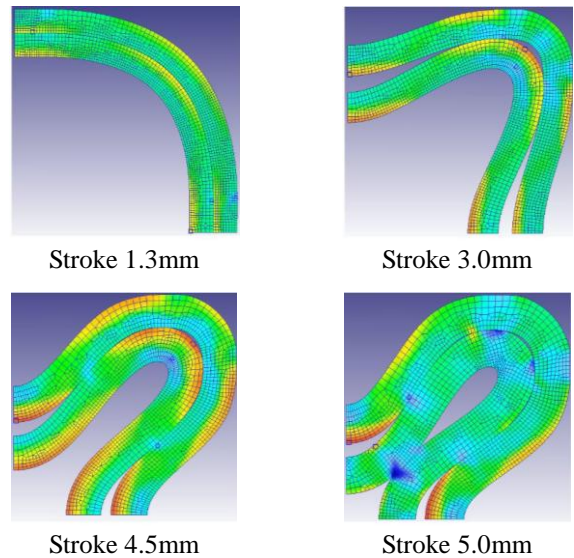


Fig.12 The FEM result of strain distribution under punch stroke of double round copper pipe

그러나 2중(1t+1t) 원형동관은 외측과 내측 원형동관의 접촉면에서 미끄럼이 발생하여 단일(2t) 원형동관에 비해서 내측 원형관이 크게 형성된다. 완전히 압축된 상태(스트로크 5.0mm)에서 폭 0.78mm, 길이 2.5mm의 비접촉 구간이 남아있다.

다음으로 응력분포를 살펴보면, 단일(2t) 원형동관의 최종 압축된 상태의 응력분포는 원형동관이 금형과 접촉한 부분과 내측 접힘부의 압축응력이 완전히 연결된 상태로 나타나고 있다. 또한 금형과 비접촉 굽힘부(순수 좌굴영역)의 응력상태는 내측 접촉부와 바깥 굽힘부에서 큰 압축응력이 발생하고 상호간에는 약하게 연결된 모양로 나타나고 있다.

2중(1t+1t) 원형동관의 최종 압축된 상태의 응력분

포는 내측 원형동관에서만 외측 압축부와 내측 접힘부의 압축응력이 아주 약하게 연결되어 나타나고 있다. 또한 금형과 비접촉 굽힘부(순수 좌굴영역)의 응력상태는 내측 원형동관의 내측 접촉부에서도 두께의 중립축 안쪽으로만 3각형으로 나타나고 있다. 외측 원형동관에서 내측 원형동관으로 압축응력의 전달부분에서는 접촉 점 모양으로 압축응력이 명확하게 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구는 2축 압축을 받는 단일(2t) 원형동관과 2중(1t+1t) 원형동관의 변형특성을 규명하기 위하여 단동 가경식 2축 압축 시험금형을 이용하여 실험과 함께 Deform-2에 의한 해석을 실시하고 다음의 결론을 얻었다.

(1) 단일 원형동관과 2중 원형동관의 2축 압축 변형 특성은 모두 압축속도가 빠를수록 최대 하중은 작게 나타나며, 2축 압축변형 특성곡선의 변곡점(계단형)이 완만해지는 특성이 나타난다.

(2) 1차 하중증가 최고점 하중은 단일 원형동관의 경우 1,220kgf이고, 2중 원형동관은 540kgf 으로 단일 원형동관이 2중 원형동관의 약 2.2배 크게 나타나고, 최대 2축 압축하중은 단일 원형동관은 4,050kgf 이고, 2중 원형동관은 2,260kgf 로 단일 원형동관이 2중 원형동관의 약 1.8배 크게 나타난다.

(3) 스트로크 4.0mm의 변형 단계에서 단일 원형동관은 사각단면을 유지하지만, 2중 원형동관은 외측관은 사각단면을, 내측관은 4 잎 크로바 단면모양을 갖는 특성이 나타난다.

(4) 단일 원형동관과 2중 원형동관의 응력과 변형의 분포와 위치는 명확한 차이가 나타난다.

후 기

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

REFERENCES

- [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 Proceedings of the 43rd Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity Vol. 2(editor: Toshitugu Majaki), The Japan Soc. Tech. Plast. Tokyo, Japan, pp. 561~564.
- [3] M. Gotoh, C. K. Yoo, 1993, The Proc. of the 1993 Japanese Spring Conf. for the Technology of Plasticity Vol. 2(editor: Kouhe Nakajima), The Japan Soc. Tech. Plast. Tokyo, 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: Lee Eung-Sug), The Kor. Soc. Precis. Eng., Seoul, Korea, pp. 1167~1168.
- [5] C. K. Yoo, K. J. Kim, S. T. Won, 2012, Biaxial Compressive Characteristics of Round Aluminum Pipe, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 2, pp. 89~95.
- [6] C. K. Yoo, S. T. Won, 2013, Biaxial Compressive Deformation Characteristics and Microstructure Change in a Round Copper Pipe, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 2, pp. 67~73.