

라만 분광법을 이용한 잔류응력 측정에 관한 연구

A Study on Residual Stress Measurement Using Raman Spectroscopy

강민성¹, 김상영¹, 박수¹, 구재민², 석창성^{2,✉}
 Min-Sung Kang¹, Sang-Young Kim¹, Soo Park¹, Jae-Mean Koo² and Chang-Sung Seok^{2,✉}

1 성균관대학교 기계공학부 일반대학원 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: 031-290-7446

Manuscript received: 2009.9.30 / Revised: 2009.11.24 / Accepted: 2009.11.27

A straight pipe is used after complicated bending work in a mechanical system. In this work process, the plastic deformation of the pipe produces residual stress in the pipe. This residual stress significantly affects the behavior of pipe fracture. For this reason, residual stress must be evaluated. Measuring the residual stress of a U-shaped pipe is difficult with existing destructive and nondestructive measurement methods. In this paper, the residual stress of a U-shaped aluminum pipe (99.7% pure aluminum) was evaluated from the Raman shift by Raman spectroscopy and FEM(Finite Element Method, FEM) analysis. The results of the stiffness test by FEM analysis are compared with those by experiments. The analyzed results of the Raman spectra showed a similar tendency with the results of the FEM analysis with respect to the residual stress distributions in U-shaped pipes. Also, the results of the bending tests showed resemblance to each other.

Key Words: Residual Stress (잔류응력), Raman Shift (라만이동), Raman Spectroscopy (라만분광기)

1. 서론

기계 구조물이나 건축 구조물에 사용되는 파이프는 설치하고자 하는 공간에 적합한 크기와 형태로 직관을 구부리거나 절단하는 과정을 거치게 된다. 최근에는 CNC 장비를 이용하여 원하는 규격에 맞게 자동 또는 수동으로 파이프를 굽힘 가공하여 사용하고 있다.

그런데 굽힘 가공 과정에서 파이프에 국부적인 단면 감소와 더불어 내부에 잔류응력이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 잔류응력은 파이프의 파괴 특성에 영향을 주어 파이프의 기대 수명보다 훨씬 짧은 수명에서 파괴에 이르게 되는 원인이 된다.¹⁻³

따라서 굽힘 가공된 파이프를 시스템에 적용하

기 위해서는 잔류응력에 관한 평가가 반드시 이루어져야 한다.

최근에는 잔류응력을 측정하기 위하여 여러가지 비파괴 측정법이 사용되고 있지만 X-ray 회절법(X-Ray Diffractometer, XRD)^{4,5} 같은 경우 그 절차가 복잡할 뿐만 아니라 파이프에 존재하는 잔류응력을 측정하기에는 여러 가지 어려움이 있다. 예를 들면 XRD 장비를 이용하여 재료 표면의 잔류응력을 측정하기 위해서는 X-ray 가 정확히 조사될 수 있도록 별도의 측정용 지그에 알맞게 고정해야 하기 때문에 시험편을 절단(cutting) 및 고정하는 과정이 필요하고, 회절(Diffraction)에 사용되는 X-선은 비교적 파장이 길기 때문에 인체에 쉽게 흡수되므로 조심해야 한다. 또한 XRD 장비는

비교적 복잡하고, X 선관(X-Ray Tube)의 경우 충격에 매우 약하므로 관리에 주의해야 하며 X 선 발생장치(X-Ray Generator)는 고전압 회로로 구성되어 있으므로 방전사고에 주의해야 한다.

반면 라만 측정 장비는 광원으로 사용하는 파장이 인체에 직접적으로 유해하지 않으며 XRD 장비와는 달리 초보자도 사용법을 쉽게 숙지하여 시험편을 직접 손으로 움직이며 측정할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 순도 99.7%의 U 자형 알루미늄 파이프를 대상으로 FEM 해석을 수행하여 잔류응력을 평가하였고, 라만 분광법을 이용하여 평가한 잔류응력 결과와 비교하여 고찰하였다. 또한 FEM 해석 모델과 동일한 재료를 이용하여 실험을 수행하여 FEM 해석 결과를 검증하였다.

2. FEM Analysis

2.1 Tension Test

FEM 해석을 통하여 알루미늄 파이프의 잔류응력을 평가하기 위하여 탄소성 해석을 수행해야 하는데, 해석에 필요한 물성치를 획득하기 위하여

ASTM E8M 에 따라 알루미늄 직관에 대한 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험에 사용한 장비는 SHIMADZU 社의 25ton 용량의 전기모터식 시험기이고, 시험이 진행되는 동안 DAQ 를 이용하여 하중과 변위 데이터를 저장하였다. 시험 속도는 2mm/sec 로 하였고 extension meter 를 사용하여 파이프의 연신율을 측정하였다. 파이프 시험편의 양 끝단에는 insert 를 삽입한 뒤 jaw 에 장착하여 그립 부에서 발생하는 압력으로 인한 시험편의 국부적인 소성 변형 및 응력 집중을 방지하였다.

Fig. 1 에서서는 파이프에 삽입한 insert 의 형상을 보여주고 있으며, 인장 시험 모습 및 파이프 시험편을 나타내고 있다. 인장 시험은 총 3 회 수행하였으며 Fig. 2 에 인장선도를 나타내었다.

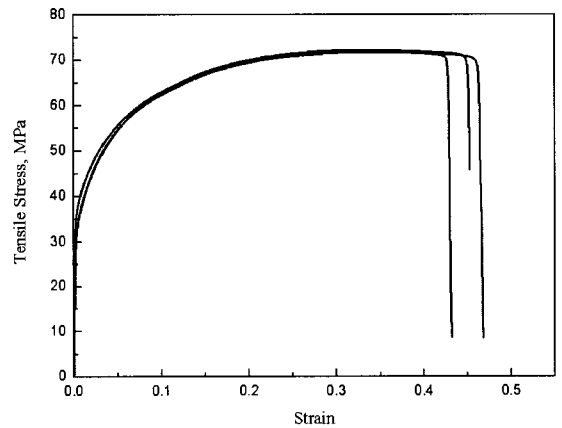
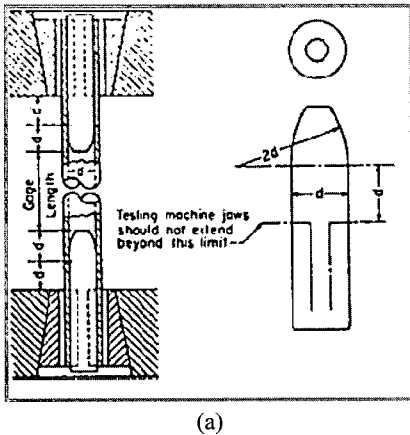


Fig. 2 Results of tension test

2.2 Modeling and Boundary Condition

본 연구에서는 FEM 해석을 통하여 파이프가 굽힘 가공되는 경우 발생하는 잔류 응력을 평가하기 위해 탄소성 해석을 수행하였다. 파이프의 소성역 데이터는 인장 시험으로 획득한 진응력-진변형률 선도를 이용하였다. 해석을 위한 모델은 직경이 10.12mm, 두께가 0.8mm 이고 곡관부 지름이 20mm 인 U 자형으로 굽은 알루미늄 파이프를 대상으로 하였다. 파이프의 기계적 물성은 Table 1 에

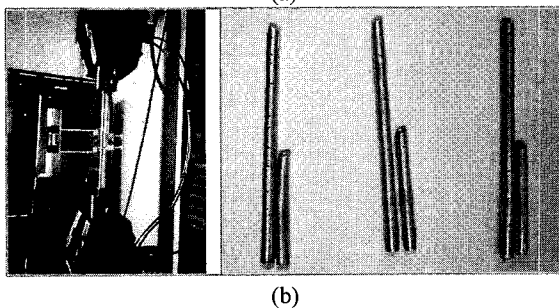


Fig. 1 Tension Test (diameter of pipe : 10.12mm)

Table 1 The mechanical properties of pipe

E (GPa)	ν	Tensile Stress (MPa)	Yield Stress (MPa)	Elongation %
69	0.33	71.9	36.4	0.42

나타내었다.

파이프의 굽힘 가공을 위해 사용한 지그는 rigid body 로 구성하였고, 파이프 위쪽에 위치한 지그는 모든 방향으로 구속하였으며, 파이프의 아래쪽에 위치한 지그는 상단에 위치한 지그의 중심을 기준으로 180도 회전하도록 하였다.

이때 파이프의 한 쪽 끝 부분은 완전히 고정되도록 하였고, 반대쪽 끝은 자유롭게 하여 U 자 형태로 가공되도록 하였다. 최종적으로 Fig. 3 과 같이 모델을 구성하였다.

모델링과 해석은 MSC 社의 'Marc2005' 프로그램⁷을 통해 수행하였고, 파이프는 8 절점의 solid 3D 요소를 이용하여 모델링하였다.

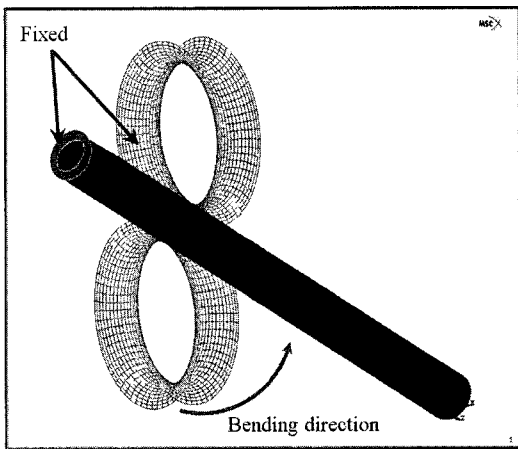


Fig. 3 Boundary conditions

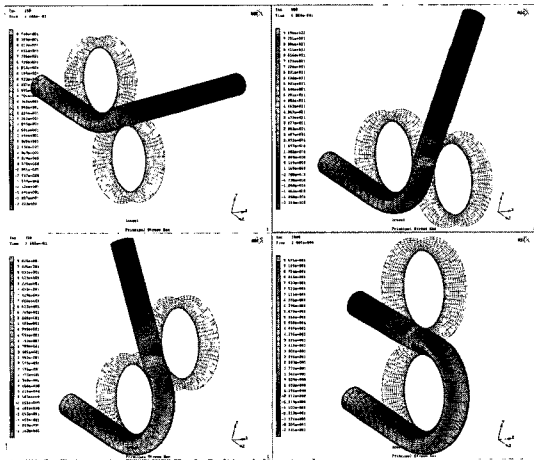


Fig. 4 Bending process of pipe model

2.3 Results

Fig. 4 는 파이프가 굽힘 소성 변형이 발생하는 동안 잔류응력이 발생하는 것을 보여주고 있다. 굽힘 과정이 완료되어 U 자형으로 소성 변형된 파이프의 측면에 발생된 인장 잔류응력은 Fig. 5 와 같다. Fig. 6 은 굽힘 소성변형 완료 후 파이프의 표면에 발생한 잔류응력 분포를 보여 주고 있는데, 최대 잔류응력이 발생한 지점은 파이프의 4 번과 5 번 지점 사이이며, 이 부분에서 잔류응력이 비교적 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다.

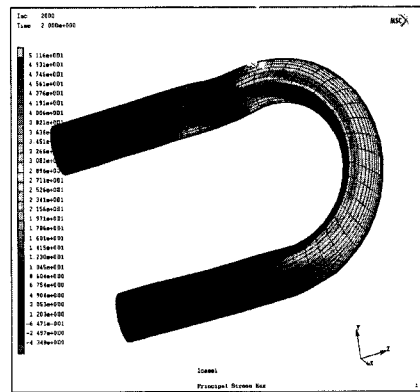


Fig. 5 Result of bending Process

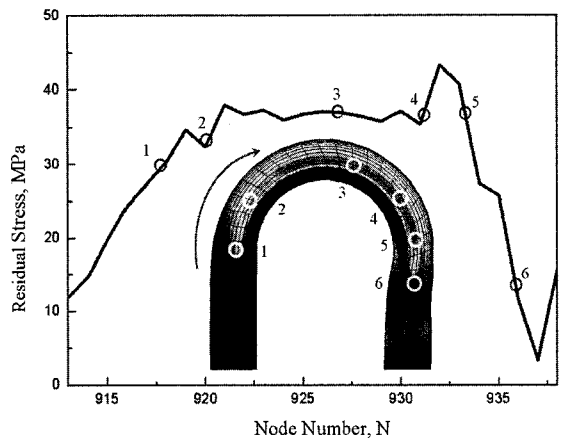


Fig. 6 Residual stresses on the side of pipe

3. Stiffness Test

3.1 Methods

FEM 해석 결과를 검증하기 위하여 U 자형 알루미늄 파이프에 대하여 강성 시험을 수행하였다. Instron 社의 0.1ton 용량의 8841 모델의 시험기를

강성 시험에 사용하였고, 시험이 진행되는 동안 하중과 변위 데이터를 PC 에 저장하였다. Fig. 7 에 강성 시험에 사용한 알루미늄 파이프 시험편의 모습과 구속점, 하중 부가 지점을 나타내었고, Fig. 8 은 강성 시험을 수행하는 모습이다. 해석에 사용한 조건과 동일한 조건으로 강성 시험을 수행하였다.

3.2 Results

Fig. 9 의 왼쪽 사진은 알루미늄 파이프를 이용하여 시험한 뒤 소성 변형이 발생한 시험편의 모습이고, 오른쪽 사진은 해석 프로그램에 의한 모

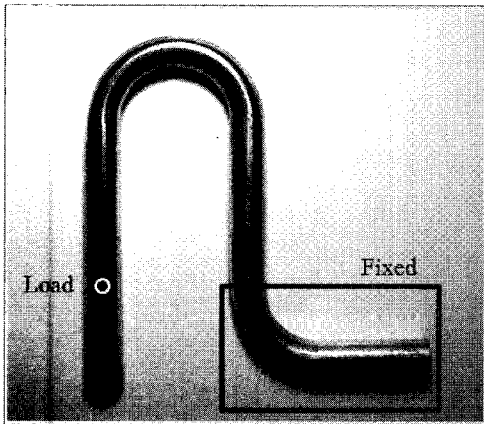


Fig. 7 Specimen of stiffness test

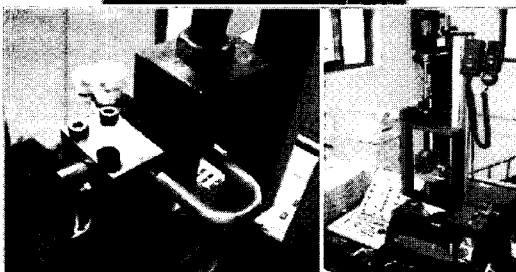
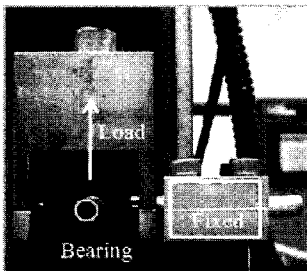


Fig. 8 Stiffness test of U-shaped Aluminum pipe specimens

의 강성 시험을 완료한 뒤의 모델이다.

알루미늄 파이프의 강성 시험 결과와 해석 프로그램에 의한 모의 강성시험 결과를 비교한 결과 Fig. 10 과 같이 하중과 변위선도가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 FEM 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

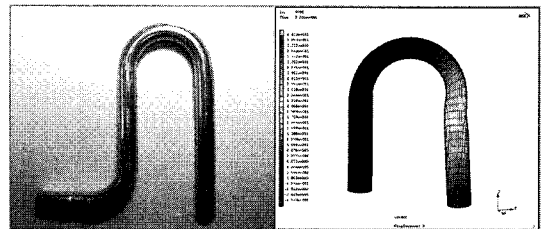


Fig. 9 Specimen and FEM model after stiffness test

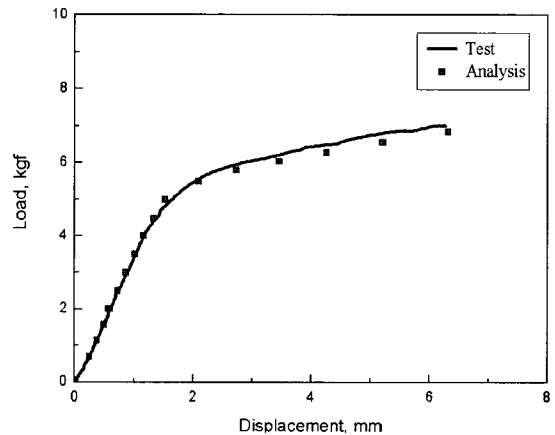


Fig. 10 P-δ curves obtained FEM analysis and stiffness test

4. Raman Spectroscopy

4.1 Specimens

FEM 해석에서 사용한 모델과 동일한 규격을 가진 U 자형 알루미늄 파이프를 대상으로 하였다. 이 파이프는 순도 99.7%의 알루미늄으로 제작하였는데, 이와 같이 단일 원소로 이루어진 재료의 경우 원소의 라만 이동(raman shift) 현상을 보다 정확히 측정할 수 있다. 라만 분광 측정에 사용한 시험편은 사전에 알루미늄나 파우더(0.5 μm)를 이용하여 측정 표면을 polishing 하였으며 ultra-sonic wave 를 사용하여 세척하였다.

FEM 해석을 통하여 평가한 잔류응력 분포를 참고하여 잔류응력이 변화하는 6 지점을 Fig. 11 에

서와 같이 표시를 한 뒤 해당하는 지점을 라만 분광기를 이용하여 측정하였다.

4.2 Raman Spectrum Measurements

본 연구에서 측정에 사용한 라만 분광 장치는 영국의 Renichaw 社의 장치로써 500 배율의 렌즈를 탑재하고 있고 헬륨-네온 레이저(wave length : 633nm)를 광원으로 사용하고 있다. 헬륨-네온 레이저의 경우 단일 파장으로 구성되어 있고 높은 출력을 발생시킬 수 있기 때문에 강한 출력 값을 얻어 보다 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 라만 분광 측정 시 관심 파장 영역대가 shift 되는 것을 확인 및 비교함으로써 재료 입자 내부에 존재하는 잔류응력을 관찰할 수 있었다. 사용한 라만 분광 장치를 Fig. 12 에 나타내었다.

4.3 Results

Fig. 13 은 라만 분광 측정 결과 도출된 라만 스펙트럼 이동 값과 FEM 해석을 통하여 얻은 잔류응력 분포를 함께 나타낸 선도이다. 라만 분광 장치를 이용하여 측정한 라만 이동 평균값이 FEM 해석을 통하여 얻은 잔류응력 분포도와 거의 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

라만 스펙트럼 측정 결과를 분석해 보면 잔류응력이 감소하는 경우 라만 이동(raman shift)이 감소하고, 잔류응력이 증가하는 경우 라만 이동이

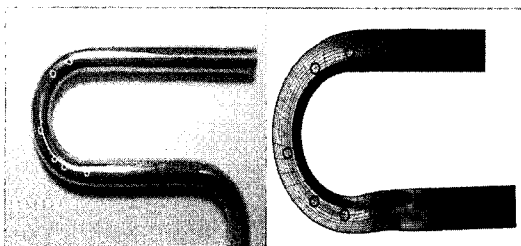


Fig. 11 The checked specimens for Raman measurements

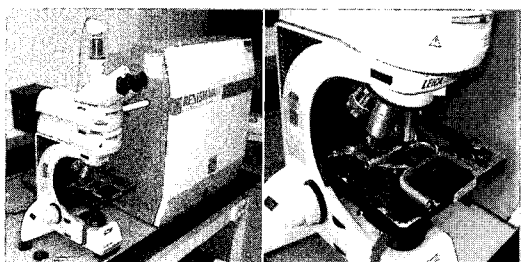


Fig. 12 Raman spectrum measurement

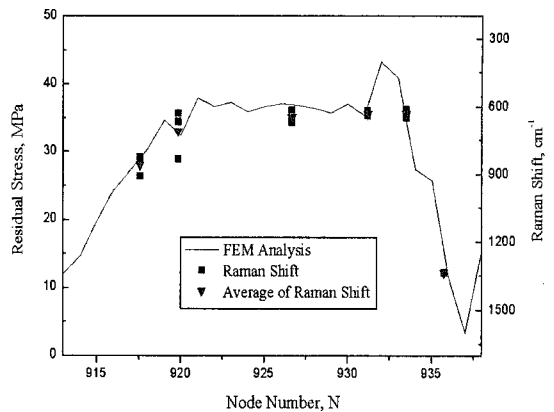


Fig. 13 Results of Raman spectrum measurement with FEM analysis

증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 그리고 라만 이동량과 잔류응력간의 변화량을 비교해 보면 라만 이동이 1cm¹ 일어나는 경우 잔류응력은 35KPa 만큼 변화한다는 것을 알 수 있다.

5 Conclusions

본 논문에서는 U 자형 알루미늄 파이프에 존재하는 잔류 응력을 FEM 해석과 라만 분광법을 이용하여 측정하여 보았다.

1) FEM 해석 결과의 타당성 확보를 위해 해석 모델과 동일한 규격의 시험편을 이용하여 강성 시험을 수행하였다. 그 결과 하중-변위 선도가 거의 일치하는 것을 확인함으로써 FEM 해석 결과를 검증하였다.

2) 라만 분광법을 이용하여 측정한 잔류응력 분포가 FEM 해석을 통해 얻은 잔류응력 분포와 거의 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 이로부터 라만 분광법을 사용하여 알루미늄 파이프에 존재하는 잔류 응력의 측정이 가능함을 확인하였다.

3) 라만 스펙트럼 측정 결과 잔류응력이 감소하는 경우 라만 이동(raman shift)이 감소하고, 잔류응력이 증가하는 경우 라만 이동이 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다

후 기

이 논문은 서울시의 서울장학생 사업, 2 단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009 년도 정부(교육과학

기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

1. Kim, S. Y., Koo, J. M. and Seok, C. S., "Evaluation of residual stress of copper pipe by using raman spectroscopy," Modern Physics Letters B, Vol. 22, No. 11, pp. 1007-1012, 2008.
2. Kim, S. Y., Kim, H. I., Seok, C. S., Lee, J. K., Mo, J. Y. and Park, D. Y., "Evaluation of Tensile Properties and Bending-induced Residual Stress of Slender Copper Pipe," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 636-639, 2006.
3. Kim, S. Y., Lee, J. K., Mo, J. Y., Koo, J. M. and Seok, C. S., "Evaluation of Residual Stress in the U-shaped Aluminum Pipe," Proc. of KSME Autumn Conference, pp. 1-6, 2006.
4. Jeon, S. G., Kim, J. H., Shin, J. Y. and Lee, S. G., "A Study on Improvements of Residual Stress of Pipe Bending By X-ray Diffractometer Test," Proc. of KSAE Autumn Conference, Vol. III, pp. 1111-1116, 2004.
5. Yoo, K. B. and Kim, J. H., "Residual Stress Evaluation and Fatigue Life Prediction in the Welded Joint by X-ray Diffraction," Proc. of KSME Spring Annual Meeting, pp. 68-73, 2009.
6. ASTM E1683-02, "Standard Practice for Testing the Performance of Scanning Raman Spectrometers" Annual Book of ASTM Standard, pp. 1-6, 2002.
7. MSC. Software Corp., MSC.Marc and MSC.Marc Mentat.