

# 동맥 전단부에 분포된 원주 변형률에 대한 잔유 변형률의 영향

황민철\* 신정욱\*\*

\*한국표준과학연구원 인간공학연구소 \*\*인제대학교 의용공학과

## Research on Residual Strain of Arterial Cross-Section

Whang Min Cheol\* Shin Jung Woog\*\*

\*Ergonomics Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science \*\*Department of Biomedical Engineering, Inje University

### Abstract

Residual strain of artery is studied. There has been experimental evidence that residual strain exists in artery. When ring of artery is longitudinally cut, it is opened. Since strain has been determined without considering residual strain, the existence of residual strain is meaningful in mechanics of arterial wall. Intimal strain concentration is considered to be reduced with both account of residual strain and strain determined by loading. However, it is lack of experimental research. Therefore, this study experimentally attempts to quantify the effect of residual strain on circumferential strain which is determined under the assumption of zero strain with zero pressure.

### 1. 서론

최근 동맥벽에 잔유한 변형률에 대해 관심이 커가고 있다. 동맥벽에 잔유변형률이 존재를 증명한 연구들이 활발히 진행되고 있다<sup>1,2,3,4,5</sup>. 동물실험을 통한 이 실험들은 잔유변형률이 존재 할 뿐아니라 그 분포는 부위별(intima, adventitia), 위치별, 나이별, 건강정도에 따라 다르다는 것을 발견했다. 그러나 인체의 동맥에 대한 데이터는 적은 형편이다. 그림1은 본 연구에서 실시한 인체 흉부대동맥의 잔유 변형률을 보이는 실험결과중의 하나이다. 동맥의 잔유변형률을 보이는 실험은 Dr. Y.C. Fung과 P.N. Vashinav가 처음 시도했다. 동맥을 반지모양으로 자른 후 길이 방향으로 자르면 반지모양의 동맥이 열리게 된다. 이것은 동맥의 잔유변형률이 존재한다는 증명이다. 동맥이 열리는 것은 잔유 변형 방향이 안쪽벽의 원주 방향으로 수축함과 동시에 바깥쪽의 원주방향으로 신장 때문에 일어난다<sup>6</sup>. 이 현상은 이론적 thick walled cylinder problem에서 계산된 안쪽벽의 변형률 집중현상을 공학적으로 이해하는 데에 중요한 의미를 부여한다<sup>7,8</sup>. 지금까지 분석된 동맥 벽의 변형률은 잔유변형률을 고려하지 않은 것이다. 즉 압력이 없을 때 변형률도 없다는 가정 하에 결정된 것이다<sup>9,10,11,12</sup>. 다시말하면, 존재된 잔유 변형률은 앞서 결정된 변형률에 포함되지 않은 상태이다. 따라서 잔유변형률을 고려하기 위해 압력에 의한 변형률에 잔유 변형률을 증첩하면 변형률 집중현상을 경감시키거나 안쪽벽에서 바깥쪽벽까지 변형률 분포를 일정하게 한다는 가설을 낳게 된다<sup>7,8</sup>. 그러나 이 가설은 이론적 타당성이 있지만 실험적 증명이 요구되는 형편이다<sup>3</sup>. 본 연구는 잔유 변형률과 압력에 따른 변형률을 측정하여 동맥 전단부에 분포된 원주 변형률에 대한 잔유 변형률이 얼마나 영향을 미치는가를 알아보았다

### 2. 실험 장치 및 방법

생리학적 동맥조건을 최대한 유지하려는 생리학적 동맥구조를 보존하는 중요한 형태는 실린더형을 보존하며 압력은 원주와 직각방향으로 분포시키는 것이다. 또한 전단부의 변형 형태를 측정하는 것으로 기존의 무시된 두께 방향의 변형을 알 수 있게 했다. 두께 부분 측정을 위해 기존의 Uni 또는 Biaxial Test 실험장치를 배제한 특별한 실험장치가 고안되었다. 10μm 검은 입자, 카메라 시스템, 정밀 positioner 구동방식을 이용하여 변형을 해상도를 10<sup>-2</sup>까지 측정할 수 있는 장비가 구현되었다<sup>13</sup>.

실험은 5개의 길이 5mm의 반지모양의 시편으로 0,40,80,120mmHg의 압력에 의한 변형을 측정과 잔유 변형률 측정을 실시하였다. 그림 2는 실험을 시편에 따라 시행하는 방법을 보여준다. 인간 대동맥을 5 mm의 길이의 반지모양으로 자른다. 그 중 한개를 Precondition한 후 압력 0,40,80,120mmHg에 대한 변형률들을 측정한다. 이 측정은 전단부에 실리콘흑연 성분의 검정색 10μm 입자를 전단부에 뿌려서 카메라로 변형률 측정하였다<sup>1</sup>. 나머지 1개는 잔유 변형률 측정에 이용 한다. 전단부를 볼 수 있도록 설치된 카메라로 동맥 전단부에 축첩을 맞춘다. 반지모양의 시편은 NaCl 0.09%용액에 채워진 실험용 플라스틱 접시에 넣는다. 그 화상을 컴퓨터에 저장한다. 동맥시편을 길이 방향으로 자르면 반지형태가 완전히 열린다. 완전히 열리고 더 이상의 변형이 없을 때 그 화상을 컴퓨터에 저장한다.

### 3. 데이터 분석

PC에 저장된 화상을 컴퓨터의 모니터에 복원시켜 화상을 분석하여 필요한 수치데이터인 동맥 전단부에 뿌려진 입자 좌표의 움직임으로 압력에 의한 변형률을 결정했다<sup>13</sup>.

잔유 변형률은 Vashinav등(1987)이 제안했던 방법을 이용하여 결정하였다. 그림 3 (a)에서 보는바와 같이 실험용 접시에 놓여진 형태는 타원형이다. 시편에 두께의 중간 선에 의한 장축 지름을 H 단축 지름을 h이라 한다면 평균반지름 R은

$$R = \frac{1}{4}(H+h)$$

그림 3 (b)에서 보는 바와 같이 길이 방향으로 잘려서 열려진 모양에서 평균 반지름 r은 열린 끝단 사이의 직선거리 d와 그 직선거리 중간지점에서 열린 반대부분까지 직선거리 D로 결정한다.

$$r = \frac{1}{8} \left( \frac{d^2 + 4D^2}{D} \right)$$

결정된 R과r에 의하여 잔유변형률 E<sub>0</sub>는

$$E_0 = \frac{(r-R)}{R} = r \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$$

최대 긍정 변형율과 최대 부정 변형율은 두께 t를 이용하여  $r = \pm (1/2)t$  대입하여 구한다.

$$|E_0|_{\max} = \frac{t}{2} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$$

최대 긍정 변형율은 안쪽벽에 최대 부정 변형율은 바깥쪽 벽으로 결정되면 두께전반에 걸친 잔유 변형율은 두께에 대해 선형 interpolation으로 결정한다.

압력에 의한 변형율은 0 mmHg압력에 변형율이 없다는 가정 하에 결정되었다. 그러나 잔유 변형율이 존재하므로 무 압력 하에 무 변형이란 가정 하에 결정되었던 변형율에 잔유 변형율을 고려해야한다. 그러므로 압력에 의한 변형율에 잔유 변형율을 중첩하여 압력에 의한 변형율에 잔유 변형율을 고려한 통합 변형율을 얻게 되었다.

압력에 의한 변형율과 잔유 변형율을 고려한 변형율의 비교 분석을 위해서 변형율gradient(SG)를 구하였다. SG는 안쪽 벽 변형율  $E_i$ 와 바깥쪽 변형율  $E_o$ 를 두께t를 이용하여 다음과 같이 결정한다.

$$SG_{P=40} = \frac{(E_i - E_o)_{P=40}}{t_P}$$

$$P = 0,40,80mmHg$$

#### 4. 결과 및 토의

그림 4는 실험적인 데이터로서 혈압 40,80,120 mmHg에 따른 원주 변형율과 잔유 변형율을 고려한 원주 변형율을 나타내고 있다. symbol로 연결된 선이 혈압 0 mmHg일 때 변형율이 없는 것으로 가장한 원주 변형율이다. 수평축에 나타난 데이터는 두께를 normalize시킨 것이다<sup>13</sup>. 보는바와 같이 변형율 gradient SG가 압력에 따라 증가한다. 안쪽벽의 변형율이 바깥쪽보다 더 신속히 증가하고 있다. 만약 잔유 변형율을 고려하면 다른 양상을 보인다. 그림에서 symbol없는 선이 잔유 변형율과 혈압에 의한 변형율을 중첩한 결과이다. 이 결과에서 보는바와 같이 변형율의 gradient는 감소되거나 없어졌다. 이 결과가 잔유 변형율이 생리적인 조건에서의 동맥이 갖고 있는 변형율의 상태를 Homeostatic상태 즉 동맥두께에 걸쳐서 균일한 변형율로 변화시키는 역할을 한다는 실험적 입증이다.

#### 5. 참 고 문 헌

1. Vaishnav, R.N., Vossoughi, H. "Estimation of residual strains in aortic segment," In Biomedical Engineering II, Recent Developments (ed. by C.W. Hall), Pergamon Press, 1983.
2. Vaishnav, P.N., Vossoughi, J., "Residual stress and strain in aortic segments," J. Biomechanics, 1987: 20: 235-239.
3. Vossoughi, J., Hedjazi, Z., Borris II. F.S., "Intimal residual stress and strain in large arteries," Adv. Bioengng, ASME, 1993, Bed-Vol 24: 434-437.
4. Whang, M.C., Vito, R.P., Glagov, S., Xu, C., Beattie, D.K., "Measurement of strain in human abdominal and thoracic aorta," 13th Southern Biomedical Engineering Conference, Biomedical Engineering Recent Development, 1994: 9-12.
5. Elad, D., Foux, A., Kivity, Y., "A model for the nonlinear elastic response of large arteries," J. Biomech. Engng., 1988.

6. Chuong, C.J., Fung, Y.C., "On residual stress in arteries," J. Biomech. Engng., 1986: 108: 189-192.
7. Crandall, S.H., Dahl, N.C., Lardner, T.J., "An introduction to the mechanics of solids," McGraw-Hill Co., MA, 2nd ed., 1978.
8. Fung, Y.C., "What are the residual stresses doing in our blood vessels?," Annals of Biomedical Engng., 1991, vol. 19: 237-249.
9. Blatz, P.J., Sharda, S.C., Tachoegl, N.W., "Strain energy function for rubber like materials based on a generalized measure of strain," 1974, Transaction of the Society Rheology, vol. 18: 145-161.
10. Chuong, C.J., Fung, Y.C., "Three-dimensional stress distribution in arteries," J. Biomech. Engng., 1983: 105: 268-274.
11. Fung, Y.C., "Biomechanics: The mechanical properties of living tissue," New York, Springer-Verlag, 1981.
12. Glagov S., Vito, R.P., Giddens, D.P., Zarins, C.K., "Microarchitecture and composition of artery wall-relation to location, diameter, and the distribution mechanical stress," J. Hypertension, 1992: 10.
13. 황민철, 신정옥, Raymond P. Vito, "동맥 전단부의 역학적 분석을 위한 새로운 실험적 방법," 의공학회지, 1995: 16: 2: 149-155.

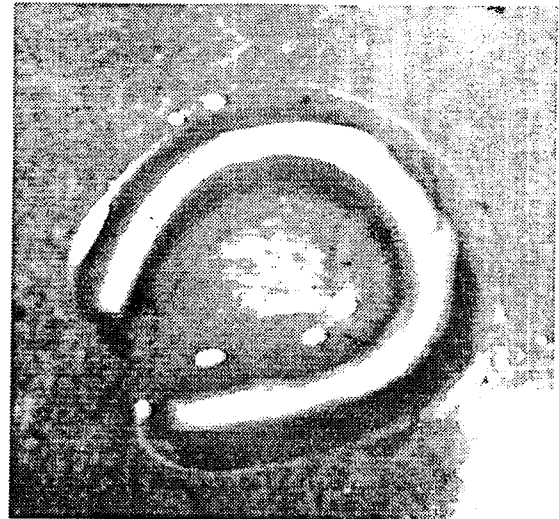


그림 1. 흉부대동맥의 잔유 변형율

동맥전단부에 분포된 원주 변형율에 대한 잔유변형율 영향

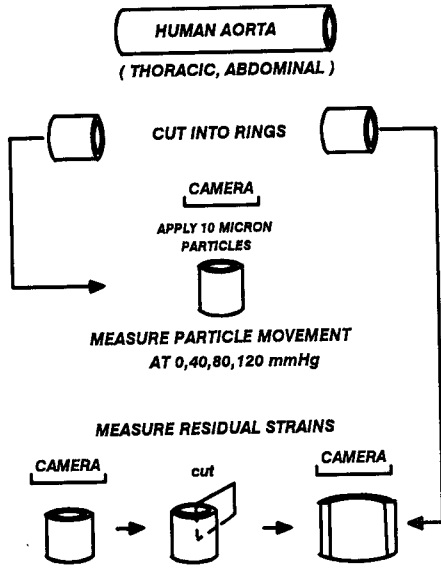


그림 2. 실험방법

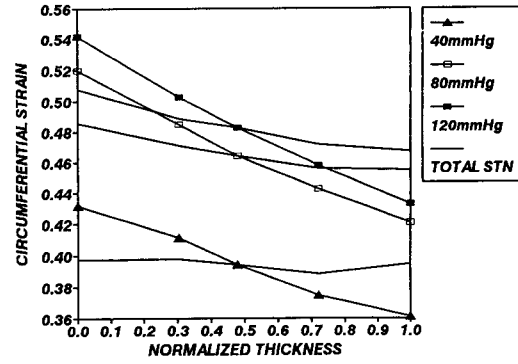


그림 4. 잔유 변형율을 고려한 원주 변형율과 무압력 무변형 가정 하에 결정된 원주 변형율.

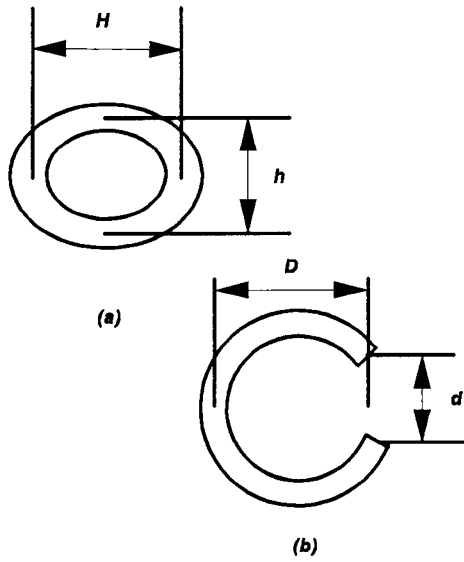


그림 3. 잔유변형율 결정을 위한 닫힌 타원(a)과 열린 원(b)의 기하학적 변수.