

## 노화에 의한 동맥의 변형 및 응력 변화

황민철\* 최화순\*\* 신정욱\*\*\*

\*한국표준과학연구원 인간공학연구소 \*\*산업과학기술연구소 \*\*\*인제대학교 의용공학과

### Age Effect on Strain and Stress of Artery

Whang Min Cheol Choi Hwa Soon Shin Jung Woog

#### 1. 서론

노화는 신체의 기능을 저하시키는 중요한 요인중에 하나이다. 구체적으로 어떠한 신체적인 기능이 저하되는가에 대한 많은 임상적인 연구에 의한 결과들이 있다. 그러나 노화에 의한 기계역학적 요소의 기능변화에 대한 데이터는 부족한 실정에 있다. 노화에 의한 생리기능상의 저하가 기계역학적 기능 영향인지 아니면 그 반대현상인지는 불확실하다<sup>1</sup>. 또한 기계역학적 요소를 고려할때 동맥의 물성균일, 두께의 기계역학적 변수의 변화 무시등의 가정<sup>2,3,4</sup>으로 노화로 인한 동맥의 물성 조직변화라든지 구조적인 생리적응상태<sup>5,6</sup> 등의 동맥의 생리적 및 기계적 이해<sup>7,9</sup>가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 파악하고 변형율의 두께 전반의 걸친 분포를 나타내는 gradient와 intima 및 adventitia 부위의 변형율을 측정하고 평균응력을 결정하였다. 그리고 이 변형율과 응력이 노화로 인해 어떤 영향을 끼치는지 살펴보았다. 시편은 사람 흉부 및 복부 대동맥이며 나이는 24세부터 83세까지 백인, 흑인, 히스피닉계의 것을 실험에 사용했다. 결과적으로 변형율 gradient, intima 변형율, adventitia 변형율, 평균 응력은 노화에 따라 저하한다. 저하 순서는 intimal 변형율이 제일 높고 평균 응력이 제일 낮은 것으로 나타났다.

#### 2. 실험 장치

생리학적 동맥구조를 보존하는 중요한 형태인 실린더형을 보존하며 압력은 원주와 직각 방향으로 분포시켰다. 또한 전단부의 변형 형태를 측정하는 것으로 기존의 무시된 두께 방향의 변형을 알 수 있게 했다. 두께 부분 측정을 위해 특별한 실험장치가 고안되었다. 고정밀과 신속한 측정을 위해 카메라 시스템을 이용하였다<sup>8</sup>. 그림 1은 본 실험을 위한 측정장치를 보여준다. 이 실험 장치는 변형과 압력을 측정할 수 있도록 했다.

압력 측정 장치에는 Manometer (Wallace & Tienman Co), Reservoir, Latex 고무 튜브, 수술용 실, Mandril등이 있다. 공기압력을 쓰기 위해 공기압력선이 Mandril, Manometer, Reservoir와 연결되었다. 반지 모양으로 자른 동맥 시편을 그 Latex 튜브에 끼워서 압력을 주고 그 압력은 Manometer에 의해 모니터링 되도록 되

어 있다. 변형 측정 장치로서는 Plexiglas로 고안 제작된 Specimen Bath Chamber는 시편을 실험기간 중에 습기를 유지시켜 주기 위하여 식염수 (0.9 % NaCl, Fisher Scientific)를 채워서 사용한다. 이 Specimen Bath Chamber는 Positioner에 부착되어 있다. Positioner는 4차원 (x,y,z,θ) 선형 운동 장치이며 0.078 μm의 운동 정확도를 가진 고정밀 장치이다. Positioner의 움직임 측정이 바로 변형 측정이다. CID 카메라는 고정되어, 시편 전단부에 초점을 맞출 수 있게 되어 있다. Mono Zoom-7 렌즈는 고확대용으로 최대 field of view는 0.5 mm으로, 최대의 확대효과를 얻기 위해 2.0x 대물 lens와 3.0x 확대 렌즈로 조정했다. 초점거리는 36 mm이며 depth of field는 10-15 μm이다. Fiber Optic Illuminator는 동맥의 전단부의 측정하려고 하는 부분을 집중적으로 밝히는 150 watts 출력의 point 조명장치이다. 시편 전단부에 뿌려지게 될 10 μm Silicon Carbide 입자는 전단부 변형도를 측정하는데 사용되어 졌다. 이 입자는 색깔이 검기 때문에 식별이 용이하고 동맥표면에 잘 접촉되는 장점을 갖고 있다. 입자를 전단부에 뿌릴 때에는 Airbrush를 이용했다.

#### 3. 실험 방법

Latex 고무 튜브를 stretch한 후 (Stretch Ratio 4) Mandril에 끼워 양쪽 끝을 수술용 실로 묶는다. 이때 묶은 부분에 압력이 새지 않도록 주의한다. 인체대동맥을 중간 흉부 및 복부동맥을 택해서 5 mm 정도의 길이로 잘라서 시편으로 쓴다. 실험은 시편이나 튜브나 precondition 한 상태에서 시작하는 것을 원칙으로 한다<sup>9</sup>. 시편 전단부에 10 μm의 Silicon Carbide 입자를 Airbrush로 뿌린다. 카메라로 Mandril 중심을 reference point로 정하고, 그 위치를 좌표 (0,0)으로 정한다. 뿌려진 입자를 카메라로 초점을 맞춘다. 압력을 주면 두께에 분포된 입자가 움직인다. 움직이는 입자를 Positioner를 움직여 카메라로 초점을 맞추면서 추적하여 압력이 0, 40, 80, 120 mmHg일때 각각의 위치를 기록하고 변형 화상을 PC에 저장한다. 한 압력에서 다음 압력으로 넘어갈 때 압력을 0 mmHg로 두고 변형의 회복시간을 둔다.

4. 데이터 분석 방법

변형을 결정은 다음과 같이한다. PC에 저장된 화상 file들은 다시 복원시켜서 분석한다. 화상은 Global Lab Image라는 화상 처리 프로그램에 의해 화상을 향상시킨다. 화상 처리 프로그램에서 얻어진 데이터는 각 압력 (0, 40, 80, 120 mmHg)에 대한 입자 centroid 좌표 데이터이다. 얻어진 입자 centroid는 두 좌표계 데이터이다. 그 하나가 Positioner에 의한 모니터 frame이 가진 좌표 데이터 (X, Y)인 절대좌표계이고 또 하나는 입자 자체가 가지고 있는 모니터 frame안에서의 좌표 데이터 (x, y)인 지역좌표계(local coordinate)이다. 절대좌표계는 Positioner의 단위로 나타난다. 모니터 frame안에서의 입자 좌표 데이터는 화상 처리 프로그램에 의해 입자 centroid를 얻게 되는데 이 좌표는 지역좌표계의 pixel단위로 나타난다. 그러므로 두 좌표 데이터가 하나로 통일되어야 하므로 좌표 변환이 이루어져야 한다. 또한 두 좌표계 축의 misalignment도 고려하였다. 그러므로 translation과 rotation을 동시에 고려하여 좌표변환 matrix를 구하여 X Y에 대한 x y의 관계식 (1)을 유도하였다<sup>8</sup>.

$$\begin{aligned} X &= -9.69x - 0.33y + A \\ Y &= -0.28x + 9.77y + B \end{aligned} \quad (1)$$

상수 A,B는 평면상에서의 translation을 고려한 상수이고, 즉 입자를 화면에 보았을 때의 Positioner의 좌표이고, 입자의 좌표 (X,Y)에 따른 입자들의 반경위치 r(X,Y)를 다음과 같이 계산한다.

$$r(X,Y) = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2)$$

입자들의 반경위치 변화가 결정되면 원주방향 변형율( $E_\theta$ )은 0 mmHg의 입자의 반경 위치 R(X,Y)와 압력에 의한 변형 후 입자의 반경 위치 r(X,Y)를 가지고 결정한다. 동맥은 large deformation을 보이는데 large deformation에 알맞은 Green변형율을 채택하였다<sup>9</sup>.

$$E_\theta = \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{r(X,Y)}{R(X,Y)} \right\}^2 - 1 \right] \quad (3)$$

5. 결과 및 토론

그림 2 (a), (b), (c), (d)는 나이에 따른 변형율 gradient, 최대변형율, 최소변형율, 평균응력의 변화를 보인다. 변형율 gradient는 최대와 최소변형율의 차이를 변형된 두께로 나눈 것이고 최대변형율은 intima, 최소 변형율은 adventitia 쪽의 변형율을 나타냈다. 평균응력은 두께전반의 걸친 응력의 평균값을 나타냈다. 이 결과는 인체 대동맥 흉부 및 복부동맥에 관한 데이터이다. 흉부 및 복부동맥의 노화에 대한 차이는 뚜렷하지 않았다. 그림에서 박스 우측 상단에 나타난 수치는 선형회귀분석에 의한 유효치 p 값과 기울기  $\alpha$ 이다. 유효치 p 값은 5% 이내로 통계적으로 유효한 선형관계를 나타냈다. 변형율, 변형율 gradient, 최대변형율, 최소변형율이 노화에 따라 감소하고 그 감소 정도는 기울기가 큰 최대변형율 ( $\alpha = -0.00814$ )이다. intima 쪽이 노화에 따른 변형 정도가

다른 부위보다 변형 기능의 저하가 심각하다는 것이다. 그러므로 나이가 들면서 혈압에 의한 동맥이 경화하는데 그 부위는 intima 쪽이 경화속도가 큼을 알 수 있다. 평균응력이 가장 작은 기울기인데 이 응력은 압력과 두께로만 결정된 수치이다. 물성을 결정하는 것은 응력과 변형율이므로 이 두 변수의 기울기 정도가 물성 결정에 끼치는 영향을 살펴보면 평균응력이 노화에 의한 물성 영향보다는 변형율이 노화에 의한 물성 영향이 큰 것으로 나타났다. 그러므로 노화에 동맥의 물성변화는 변형율에 의한 즉 두께나 반경에 의한 기능 변화가 큰 영향을 주는 것을 시사한다.

참 고 문 헌

- Glagov, S., Vito, R.P., Giddens, D.P., Zarins, C.K., "Micro-architecture and composition artery walls: relationship to location, diameter and the distribution mechanical stresses," J. hypertension, 1987, vol.10(suppl.6): S101-S104.
- Takamizawa, K., Hayashi, K., " Strain energy density function and uniform strain hypothesis for arterial mechanics," J. Biomech., 1987, vol.20: 7-17.
- Chuong, C.J., Fung, Y.C., "Three-dimensional stress distribution in arteries," J. Biomech. Engng., 1983, vol.105: 268-274.
- Vito, R.P, Demiray, H., "The role of the adventitia in aortic mechanics," Biomed., Engng., 1987, vol.109(2): 100-105.
- Glagov, S., Weisnberg, E., Zarins, C.K., Strankunavicius, R., Klettis, G., "Compensatory enlargement of human atherosclerotic coronary artery," N. Engl. J. Med., 1987, vol.316: 1371-1375.
- Glagov, S., Grande, J.P., Xu, C., Giddens, D.P., Zarins, C.K., "Limited effects of hyperlipidemia on the arterial smooth muscle response to mechanical stress," J. Cardiovasc. Physiol., 1987, vol. 14: S90-S97.
- Whang, M.C., Vito, R.P., Glagov, S., Xu, C., Bettie, D.K., "Measurement of strain abdominal and thoracic aorta," Biomedical Engineering Recent Development, 13th Southern Biomedical Conference, 1994: 9-12.
- 황민철, 신정욱, Vito, R.P., "동맥전단부의 역학적분석을 위한 새로운 실험적 방법," 대한의용생체공학회지, 1995.
- Fung, Y.C., "Biomechanics: The mechanical properties of living tissue," New York, Springer-Verlag, 1987.

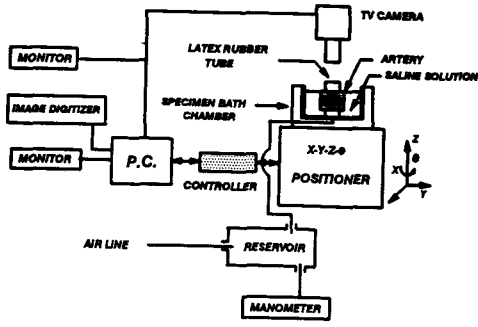


그림 1. 실험장치  
Fig. 1. Experimental System

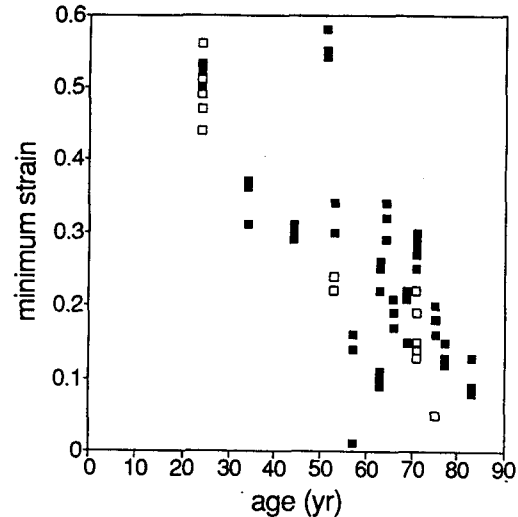


그림 2 (c)

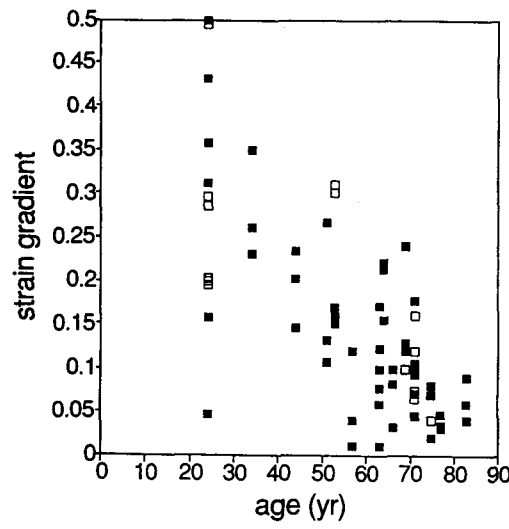


그림 2 (a)

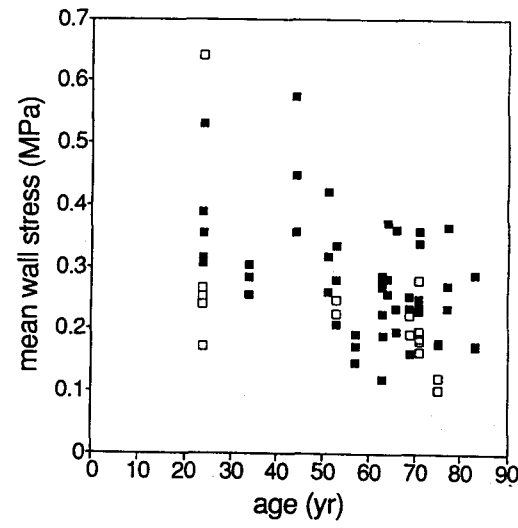


그림 2 (d)

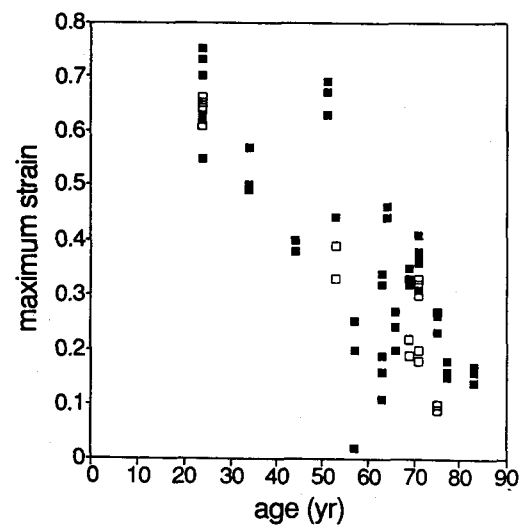


그림 2 (b)

그림 2. 나이에대한 변형을 gradient(a), 최대변형을(b), 최소변형을(c), 평균응력의 변화(d). 검정색 사각형은 흉부 흰색사각형은 복부대동맥 데이터이다.  
Fig. 2. Shown are the age vs strain gradient(a), maximum strain(b), minimum strain(c), mean wall stress(d). Solid square is for thoracic and open one for abdominal aorta.