

단순봉합모델을 이용한 문합에서 탄성경계층의 두께 변화에 따른 컴플라이언스 부적합에 관한 연구

이성욱*, 심재준, 한동섭(동아대 대학원 기계공학과), 한근조(동아대 기계공학과),
김태형(경남정보대 기계계열)

The Study on Compliance Mismatch with respect to the Thickness Variation of Elastic Foundation in Anastomosis Using Simplified Suturing Model

S. W. Lee*, J. J. Shim, D. S. Han(Dept. of Mech. Eng., DAU Graduate School),
G. J. Han(Dept. of Mech. Eng., DAU), T. H. Kim(Dept. of Mech. Eng., K.I.T.)

ABSTRACT

In this paper we analyzed the effect of compliance mismatch with respect to the thickness variation of elastic foundation(fatty tissue) in end-to-end anastomosis. This study considered the preliminary deformed shape induced by suturing in the anastomosis of coronary artery and PTFE with different diameters using simplified suturing model and the fatty tissue surrounding heart and coronary artery for more accurate result using finite element method. Area compliance(C_A) was used to analyze the final deformed shape of the anastomotic part with respect to the thickness variation of fatty tissue under mean blood pressure, 100mmHg(13.3kPa).

The results obtained were as follows :

1. When the elastic foundation, assumed to be incompressive material, surrounded the grafts in anastomosis, the compliance mismatch of artery and PTFE was improved by 47~72%.
2. As the initial diameter ratio(R_i) became larger, the higher difference of compliance was induced in spite of elastic foundation surrounding grafts.

Key Words : End-to-end anastomosis(단단문합), Suturing effect(봉합효과), Elastic foundation(탄성경계), Compliance mismatch(컴플라이언스 부적합)

1. 서론

스트레스, 고혈압, 당뇨, 흡연, 운동부족 및 고지혈증과 같은 유발인자에 의하여 동맥내막의 이상변화를 일으킴으로써 혈류의 이동을 방해하는 동맥경화증(arteriosclerosis)은 신체의 어느 부위에서나 발생이 가능하지만 대동맥, 뇌동맥, 관상동맥 부위에서 발생빈도가 높다. 특히 심장에 혈액을 공급하는 관상동맥에 발생하는 경우에는 관상동맥협착으로 이어져 협심증(angina pectoris)이 발생할 수 있으며, 심할 경우 협착이 있는 관상동맥에서 혈전이 발생하여 심근 혈류가 완전히 차단되는 심근경색증(myocardial infarction)으로 발전할 수 있다. 또한 급성 심근경색증과 부정맥등은 급사(sudden death)로 이어질 가능성이 존재하므로 치명적인 위험을 인간에게 입힐 가능성이 있다.⁽¹⁾

따라서 이러한 관상동맥질환에 관한 치료 연구도

활발하게 진행되고 있는데 가장 널리 사용되는 방법으로는 1912년 Carrel이 개발한 혈관 문합(anastomosis) 기술로 협착이 발생한 혈관부위를 인위적으로 제거하여 동맥이나 정맥, 인공혈관 등으로 이식하는 방법이나 협착된 부위를 위와 같은 재료를 사용하여 우회관로를 만들어 혈액을 소통시켜 주는 관상동맥 우회로이식술(coronary artery bypass graft)이 있다.

이와 같은 방법의 혈관 이식시 환자 자신의 동맥이나 정맥을 사용하는 것이 가장 이상적이나 사용할 수 있는 양이 한정되어 있고 목적에 맞는 혈관을 채워하는 데에도 어려움이 있어 합성재료를 사용하여 자연혈관과 유사한 성질을 가질 수 있도록 제작한 Dacron이나 PTFE(Polytetrafluoroethylene)와 같은 인공혈관을 많이 사용하고 있다.

그러나 이러한 인공혈관을 이용한 방법은 봉합사나 봉합기술과 같은 수술상의 문제뿐만 아니라 혈류 유동, 벽면전단응력, 재료의 화학 성분, 물리적 특성,

다공성, 컴플라이언스의 부적합(compliance mismatch), 표면구조 등이 혈관 내부에 혈전을 형성하고 이물 반응을 유발시켜 이식을 실패로 돌아가게 하는 경우가 많다. 예를 들면, Dacron은 이식 초기에 혈전을 잘 형성하는데 그것은 피브린과 혈소판의 침착으로 인하여 혈전 반응이 유도되기 때문이다. 반면 PTFE는 문합 수술이후 문합부위에 혈관 내막 세포가 과도한 성장을 하게 되는 현상(intimal hyperplasia/IH)이 발생되어 이식후 일정한 시간이 경과하게 되면 혈관 폐색이 유발될 수 있다.⁽²⁾

특히 직경 6mm이하의 작은 혈관 문합에 이러한 인공혈관이 사용될 경우에는 시술 후 3년 이상이 되면 혈관 개통률(patency rate)이 매우 낮게 되므로 이를 방지하기 위해 인공혈관 내막에 생물학적 처리를 하여 IH의 발생을 억제시키거나 인공혈관의 직경을 자연혈관보다 40~60%정도 크게하여 그 영향을 줄이는 방법들이 사용되고 있다.⁽³⁾

따라서 본 연구에서는 직경이 서로 다른 관상동맥과 PTFE를 단단문합(end-to-end anastomosis)하는 경우에 대하여 보다 실제적인 유한요소해석결과를 도출하기 위하여 다음과 같이 해석을 수행하였다.

먼저 직경이 서로 다른 동맥과 PTFE의 문합에서 봉합으로 인한 예변형을 고려하였으며, 그리고 관상동맥의 경우 심장과 지방조직 사이에 위치하고 있으므로 심장을 덮고 있는 지방조직을 모델에 도입하여 지방조직의 탄성경계효과가 컴플라이언스 부적합에 미치는 영향에 대하여 분석함으로써 실제 문합 시술에 필요한 기본적인 자료를 제공하고자 하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델

2.1.1 단순봉합모델

직경이 서로 다른 동맥과 PTFE의 문합시 봉합으로 인한 예변형을 구현하기 위해서 Han⁽⁴⁾이 제시한 가정을 바탕으로 한 단순봉합모델을 이용하였다.

먼저 동일한 두께(1mm)를 지나 문합 전 동맥의 내경에 대한 PTFE의 내경을 나타내는 초기 직경비(R_i)가 서로 다른 동맥(4mm)과 PTFE(4~6.4mm)의 축대칭모델을 생성한 후 동일한 하중을 동맥은 윗방향으로, PTFE는 아래방향으로 작용시켜 마주보는 두 끝단을 서로 동일한 위치를 갖게 한 이후 동맥과 동일한 기계적 특성을 지니는 요소를 동맥과 PTFE 사이에 생성시켜 서로를 연결하였다. 그리고 변형된 좌표틀 기준으로 3차원 요소를 생성시킴으로써 봉합으로 인한 문합부의 예변형을 구현하였다.

2.1.2 탄성경계층모델

관상동맥의 문합에 대한 보다 실제적인 결과를 위하여 본 연구에서 적용한 탄성경계층은 Han⁽⁵⁾ 등이

제시한 모델을 기준으로 Fig. 1과 같이 단순봉합모델을 이용하여 얻어진 문합부에 탄성경계층을 적용하였다. 그러나 이러한 탄성경계층이 컴플라이언스 부적합에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그 크기를 고정하지 않고 Fig. 2와 같이 상부 PTFE측에서의 두께(T_F)를 0.5~2mm까지 0.5mm간격으로 변화시켰다. 하지만 나머지 부분의 치수는 PTFE 직경보다 3mm씩 크게 직사각형 형상으로 모델링하였다.



Fig. 1 Finite element model of anastomosis with elastic foundation after suturing

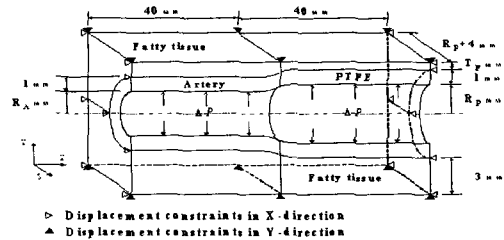


Fig. 2 Dimensions and boundary conditions of anastomotic model with elastic foundation

2.2 재료의 물성치

본 연구에서 사용된 동맥과 PTFE, 탄성경계층(지방층/fatty tissue)은 선형 탄성체이며, 등방, 등질 재료로 가정하였다. 또한 모든 재료가 비압축성 재료를 나타내기 위하여 프와송비를 0.499로 하였다. Table 1은 적용된 재료의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 Mechanical properties of each material

Division	Elastic modulus (Pa × 10 ⁵)	Poisson's ratio
Artery	4.55	0.499
PTFE	22.00	0.499
Fatty tissue	0.06	0.499

2.3 하중 및 경계조건

해석에 적용된 모델은 전체 혈관 중 문합이 되는 부분만을 고려하였기 때문에 양쪽 끝단의 모든 결점을 축방향에 대해 움직임이 없도록 고정하였고, 지방층으로 구성된 탄성경계층은 문합부에 완전히 결합된 것으로 가정하였다. 그리고 탄성경계층은 외부와 접촉하므로 접촉되는 면의 수직방향에 대해 움직

임이 없도록 고정하였다. Fig. 2는 탄성경계층을 포함한 문합부의 간단한 치수와 적용된 경계조건을 나타내고 있다. 관상동맥의 경우 지방조직에 일부가 묻혀있으므로 비대칭적으로 모델링하였다.

그리고 실제 혈관에 작용하는 혈압은 심장의 박동으로 인하여 시간에 따라 주기적으로 변동하는 맥동압이나 본 연구는 정적해석을 수행하였으므로 평균 혈압인 13.3kPa(100mmHg)을 문합부 내부 벽면에 내압(ΔP)으로 균일하게 하중으로 부과하였다.

2.4 혈관의 컴플라이언스

원통형 압력용기의 내부에서 가해진 하중에 대한 압력용기의 변형특성을 나타내는 전체 부피에 대한 컴플라이언스(C_V)는 식(1)과 같이 구할 수 있으며 이는 단면적 컴플라이언스(C_D)와 동일한 값이다. 또한 식(2)에서 ΔD 가 매우 작은 값이라면, 제곱항을 생략할 수 있으므로 식(3)과 같이 직경 컴플라이언스(C_D)를 구할 수 있으며, 이는 단면적 컴플라이언스(C_A)의 0.5배임을 알 수 있다.

$$C_V = \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{\Delta P} = \frac{\Delta AL}{AL} \frac{1}{\Delta P} = C_A \quad (1)$$

$$= \frac{\Delta A}{A} \frac{1}{\Delta P} = \frac{(D + \Delta D)^2 - D^2}{D^2} \frac{1}{\Delta P} \quad (2)$$

$$= 2 \left(\frac{\Delta D}{D} \frac{1}{\Delta P} \right) = 2C_D \quad (3)$$

이 때, 내압으로 인한 단면적의 변화량(ΔA)은 탄성경계층의 불연속적인 분포로 인하여 각도에 따른 함수로 나타내게 되므로 식(4)에 의하여 구할 수 있으며 이 때 사용된 $U(\theta)$ 는 각도 변화에 따른 반경 방향 변위를 식(5)와 같은 다항식으로써 커브피팅한 결과이다.

$$\Delta A = \int_0^{2\pi} \int_R^{R+U(\theta)} r dr d\theta \quad (4)$$

$$U(\theta) = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3 + \dots + C_n\theta^n \quad (5)$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 기본모델의 컴플라이언스 비교

탄성경계층을 적용하지 않고 봉합으로 인한 예변형만을 고려한 모델에 대하여 직경과 단면적 컴플라이언스의 최대/최소값을 서로 비교한 결과는 다음과 같다. Table 2에서 직경에 대한 컴플라이언스(C_D)와 단면적의 컴플라이언스(C_A)는 각 초기직경비(R_i)에서 모두 식(3)에서 주어진 $C_A = 2C_D$ 의 관계가 성립함을 확인할 수 있다. 또한 $R_i=1.0$ 인 모델의 실제 생체 실험에서 얻어진 직경의 컴플라이언스(C_D) 값인 0.586/0.122%/kPa과도 봉합으로 인한 예변형의 효과를 고려하면 거의 동일하다고 판단할 수 있으므로 본 연

구에서 제시된 단면적 컴플라이언스(C_A)는 신뢰할 수 있다.⁽⁶⁾ 그러므로 본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 동맥과 PTFE의 컴플라이언스에 관하여 논의할 때 단면적 컴플라이언스(C_A)를 활용하였다.

Table 2 Comparison of max. and min. values of diameter and area compliances with respect to the initial diameter ratio(R_i) without elastic foundation (unit:%/kPa)

Division	Diameter compliance(C_D)		Area compliance(C_A)	
	Max. value	Min. value	Max. value	Min. value
$R_i=1.0$	0.604	0.114	1.253	0.230
$R_i=1.2$	0.650	0.124	1.356	0.250
$R_i=1.4$	0.708	0.133	1.483	0.268
$R_i=1.6$	0.773	0.141	1.625	0.284

3.2 탄성경계층의 두께(T_E) 변화에 따른 컴플라이언스 비교

Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 탄성경계층의 두께(T_E)에 따른 각 초기직경비(R_i)에서 얻어진 최대/최소 컴플라이언스의 차이를 Fig. 3에 나타내었다.

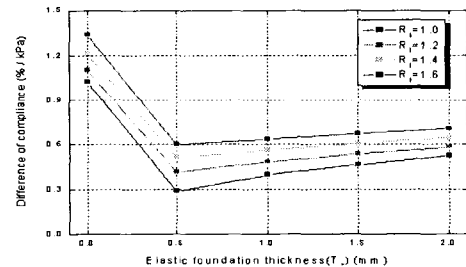


Fig. 3 Difference of compliance between max. and min. values with respect to the thickness of elastic foundation(T_E)

탄성경계층을 고려하지 않은 기본 모델의 경우 최대/최소 컴플라이언스의 차는 모두 1.0%/kPa 이상으로 높게 발생함을 알 수 있다. 하지만 탄성경계층이 기본모델을 감싸고 있는 경우 이러한 기본모델의 컴플라이언스 부적합 현상이 매우 개선됨을 확인할 수 있다. 초기직경비(R_i)가 1일 경우 탄성경계층이 존재하면 49~72%가량 컴플라이언스가 개선되었으며, $R_i=1.6$ 인 경우에도 47~55%가량 향상되었다.

또한 같은 R_i 에서라도 상부 탄성경계층 두께(T_E)가 증가하면 컴플라이언스 차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각도변화에 따른 반경방향의 변위를 나타낸 Fig. 4를 참고하면 쉽게 판단할 수 있다. 본 연구에서는 탄성경계층도 동맥과 PTFE와 마찬가지로 비압축성이라고 가정하였으므로 T_E 가 얇은 경

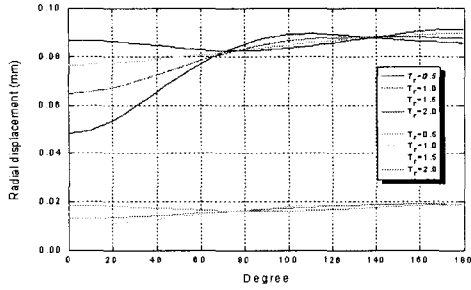


Fig. 4(a) Radial direction displacement distribution with respect to angular variation ($R_1=1.0$)

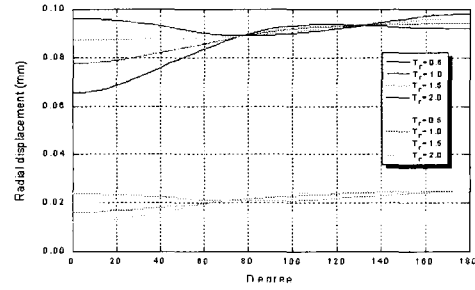


Fig. 4(b) Radial direction displacement distribution with respect to angular variation ($R_1=1.2$)

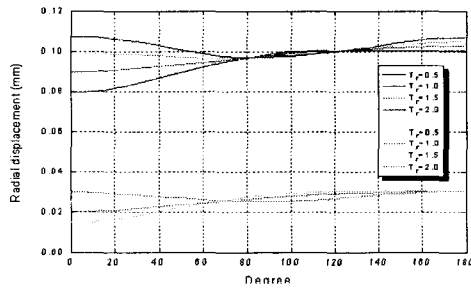


Fig. 4(c) Radial direction displacement distribution with respect to angular variation ($R_1=1.4$)

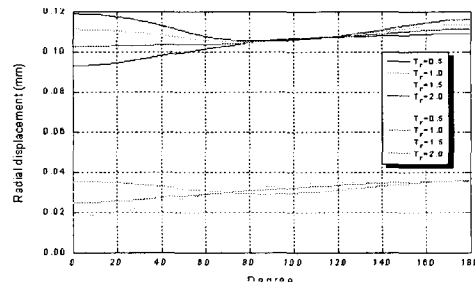


Fig. 4(d) Radial direction displacement distribution with respect to angular variation ($R_1=1.6$)

우에는 상부에 위치한 탄성경계층이 부근의 PTFE 변형을 제한하는 역할을 하게 된다. 따라서 전체 단면적의 변화를 줄이게 됨으로써 컴플라이언스 부적합을 방지하는 효과를 나타낸 것이다. 하지만 T_F 의 크기가 증가할수록 부근의 PTFE의 변형도 증가하게 되어 전체적인 단면적의 상승을 가져오게 된 것으로 판단된다.

4. 결론

직경이 서로 다른 관상동맥과 PTFE의 문합에서 보다 실제적인 유한요소해석결과를 도출하기 위해 봉합으로 인한 예변형과 탄성경계층을 고려함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 봉합효과 적용으로 인하여 문합부에서 예변형이 존재하더라도 단면적 컴플라이언스(C_A)를 이용하여 문합부의 컴플라이언스 부적합문제를 분석할 수 있다.

(2) 이종재료인 동맥과 PTFE의 문합에서 비압축성으로 가정한 탄성경계층이 존재할 경우 그 두께에 따라 두 재료간의 컴플라이언스 부적합 문제를 47~72%까지 완화시키는 역할을 하였다.

(3) 탄성경계층이 존재하더라도 동맥과 PTFE의 초기직경비(R_1)가 커질수록 최대/최소 컴플라이언스의 차는 증가하였다.

(4) 탄성경계층의 분포위치와 두께는 이종재료간의 문합에서 반경방향 변위를 제한하는 역할을 하여

재료의 컴플라이언스에 영향을 미치게 되며, 이는 혈관의 형상을 원형이 아닌 타원형으로 변형시킬 수도 있으므로 혈류동학적인 측면에서도 영향이 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kim, W. G., "Thoracic & Cardiovascular Surgery," Korea Medical Publishing Co., pp. 348-361, 1994.
2. James, J. Y., and Lee, I. W., "Tissue Engineering," Korea Medical Publishing Co., pp. 169-177, 1998.
3. Chandran, K. B., "Cardiovascular Biomechanics," New York Univ., pp. 94-248, 1992.
4. Han, G. J., Lee, S. W., and Shim, J. J., "The Study on the Diameter Ratio of the Artery-PTFE Anastomosis for the Optimized Deformed Shape," J. of Biomed. Eng. Res., Vol. 24, No. 2, pp. 113-119, 2003.
5. Han, G. J., Shim, J. J., and Ahn, S. C., "The Study for Compliance Mismatch in the End-to-End Anastomosis of Coronary Artery and PTFE," J. of KSME, Vol. 27, No. 1, pp. 34-41, 2003.
6. Chandran, K. B., Gao, D., Han, G. J., Baramiewski, H., and Corson, J. D., "Finite Element Analysis of Arterial Anastomosis with Vein, Dacron and PTFE Grafts," Med. & Bio. Eng. & Comput., pp. 413-417, 1992.