

Sub-modeling을 이용한 end-to-end 문합의 비선형 해석

한근조*·김태형**·안성찬***·심재준***

Nonlinear Analysis of End-to-End Anastomosis Using Sub-modeling

Geun-Jo Han, Tae-Hyung Kim, Sung-Chan Ahn and Jae-Joon Shim

Key Words: Anastomosis(문합), Compliance(컴플라이언스), Nonlinear Analysis(비선형해석)

Abstract

A finite element analysis of end-to-end artery/PTFE anastomosis has been presented in this study to evaluate the distribution of compliance and stresses in the vicinity of the anastomosis due to any mismatch in compliance characteristics. The artery wall was assumed to be made of linear isotropic material in this simplified model and a nonlinear analysis and convergency study with respect to increasing meshed element numbers were performed with a mean artery pressure loading of the artery-PTFE model. Also, sub-modeling method was introduced to progress the accuracy of the finite element analysis.

The results are as follow :

1. A hypercompliant zone on the artery side was observed around 4.0mm from the anastomosis and a high hoop stresses in the wall of artery and PTFE was dominant.
2. An artery displays large deformation so that nonlinear analysis and sub-modeling method was used.
3. An anastomosis with the thinner thickness and larger diameter PTFE (C type) could reduce the compliance disagreement.

기호설명

- C = Compliance
- D = Internal diameter
- t = Thickness of Artery and PTFE
- ΔP = Pulse Pressure
- σ_e = Equivalent Stress

1. 서론

여러 가지 질환에 의하여 혈관 내에 혈전이 발

생하여 혈관벽에 축적이 되면 혈액의 유동을 방해고, 그것이 심해지면 폐색, 즉 동맥경화와 같은 순환계 질병이 발생된다. 이것을 방지하기 위해 약물을 사용하여 혈전을 용해시키는 약리적 치료 방법, 협착된 혈관강을 확장시키는 혈관성형술, 그리고 최근에는 레이저를 이용한 방법이 채택되고 있으나 모두 많은 문제점을 발생하여, 혈관의 일부분을 외과적으로 제거하고 대체혈관을 이식하는 문합이 많이 시술되고 있다.

하지만 이러한 문합에는 동맥과 인공 혈관 사이에 컴플라이언스의 부적합으로 문합부위가 파열되는 경우가 발생하고 있으며 그에 대한 연구도 다양하게 보고되고 있다. Hasson등(1985)은 문합에서 동맥측으로 3.6mm 떨어진 곳에서 정상 컴플라이언스의 약 1.5배가 되는 것을 실험적으로 측정하였고, 그들은 그 곳을 고(高)컴플라이언

* 동아대학교 기계공학과
 ** 경남정보대학 기계산업계열
 *** 동아대학교 기계공학과 대학원

스영역(Para-anastomotic Hypercompliant Zone)이라 명명하며 문합된 혈관의 주기적인 신장은 문합된 혈관 내막에 과형성이 발생한다고 보고하고 있다.⁽¹⁾ 최근에 Chandran 등(1992)은 문합에서 봉합의 효과를 포함하지 않고 end-to-end 동맥대체혈관에 대해 유한요소법을 이용한 선형해석을 수행하였다.⁽²⁾ 또한, Ballyk 등 (1997)은 다양한 문합의 봉합된 부근에서 발생하는 응력집중현상에 대해 유한요소법을 이용하여 보였으며, 특히 end-to-side 문합에서의 DAIH(Distal Anastomosis Intimal Hyperplasia) 영향을 분석하였다.⁽³⁾

본 연구는 유한요소법을 이용하여 end-to-end 문합에서 구해지는 컴플라이언스 값의 정확성을 향상시키기 위해 요소의 수에 따른 수렴성을 조사하고, 또한 고컴플라이언스가 발생하는 문합 부근에 대해 sub-modeling 기법을 도입하여 보다 정확한 컴플라이언스를 구하였다. 그리고 재료가 대변형 특성을 가지므로 비선형 해석을 수행하여 탄성해석에서 구한 결과값과 비교하였다. 또한 컴플라이언스가 낮은 PTFE의 직경과 두께 변화에 따른 유한요소해석을 수행하여 컴플라이언스의 부적합을 최소화 할 수 있는 형상을 도출하여, 실제 문합의 시술에 필요한 기본적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 동맥과 PTFE의 유한요소모델

본 연구에서는 동맥과 PTFE의 내경을 각각 4mm, 벽의 두께는 1mm로 동일하게 모델링하였으며, 문합시술 이후에 접합부위는 완전히 결합되고 두께의 변화도 전혀 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하였으며, 해석에 사용된 요소는 8절점 3자유도를 가진 육면체 요소로 메시를 하였다.⁽⁵⁾ Fig. 1(a)은 메시된 동맥과 PTFE의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 1(b)은 간단한 치수와 단순화된 형상을 표현하고 있다. 그리고, 음영된 부분은 sub-modeling을 수행한 지역을 나타내고 있으며, Table 1은 동맥과 PTFE의 기계적인 물성치를 나타내고 있다.

그리고, 혈관과 PTFE가 대변형을 나타내는 재료적인 특성으로 인하여, 탄성 및 비선형 해석을 동시에 수행하여 비교하였다.

원통형 압력용기의 컴플라이언스는 다음의 식에 의하여 구할 수 있고, Table 1에는 실제 생체 실험에서 구한 값을 나타내고 있다.⁽⁶⁾

$$C = \frac{\Delta D}{D} \frac{1}{\Delta P} \quad (1)$$

또한, PTFE 직경 변화과 동맥에 대한 PTFE 두께 변화에 의한 컴플라이언스의 변화를 조사하기 위한 유한요소 모델은 Fig. 2에서 나타내었다. 모델은 두 가지 두께 0.8mm과 0.4mm에 대해 PTFE의 내경을 동맥의 내경과 일치하는 경우, 동맥과 PTFE의 두께 중심선이 일치하는 경우, 그리고 동맥과 PTFE의 외경이 일치하는 경우로 분류하여 총 6가지에 대해 비선형 해석을 수행하였다.

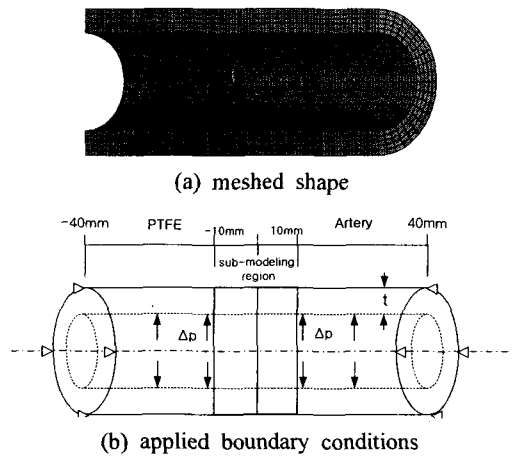
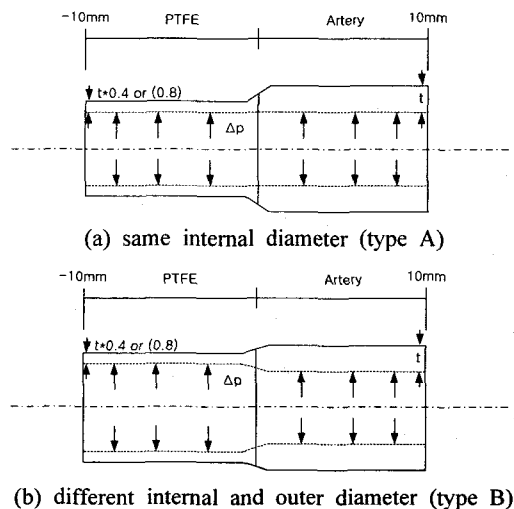
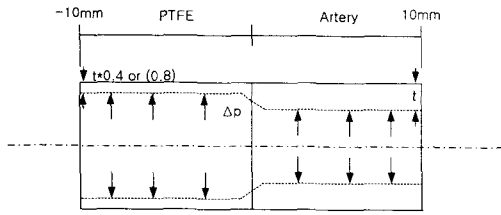


Fig. 1 Finite element model and dimensions of artery & PTFE anastomosis





(c) same outer diameter (type C)

Fig. 2 Each model shape with respect to the variation of a diameter and thickness of the PTFE

Table 1. Material properties of the PTFE and Artery

	Elastic modulus Pa × 10 ⁵	Compliance
		In vivo
Artery	4.55	0.586
PTFE	22.00	0.122

Table 2. Each model dimension with respect to the variation of a diameter and thickness of the PTFE

		Internal diameter	Outer diameter	Wall thickness
Artery		4	6	1
PTFE	Type A	4	4.8	0.4
			5.6	0.8
	Type B	4.6	5.4	0.4
			4.2	5.8
	Type C	4.8	6	0.4
				0.8

2.2 유한요소해석의 경계조건 및 하중조건

해석에 적용하는 모델은 전체 혈관 중 문합이 되는 일부분만을 고려하였기 때문에, 양쪽 끝단의 모든 절점을 축방향에 대해 움직임이 없도록 고정하였고, 하중은 동맥에서 작용하는 평균 압력인 100mmHg(13.3kPa)를 동맥과 PTFE 벽면에 내압으로 일정하게 작용하여 시술 이후에 문합 부근에서 발생하는 현상을 해석하고자 하였다.

Fig. 1(b)에는 부가된 경계조건과 하중조건을 간략하게 나타내었다.

2.3 수렴 해석 및 sub-modeling 기법

본 연구는 Chandran(1992)등에 의해서 적용한 모델대신에 전체 모델을 사용하여 해석을 수행하였으며, 전체 요소수를 480에서 15,000까지 증가시키면서 선형 및 비선형 해석을 수행하여 발생하는 최대 컴플라이언스 값에 대한 수렴 해석을 수행하여, 유한요소해석에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하고자 하였다. 또한, sub-modeling 기법을 도입하여 급격한 응력과 변위의 변화가 발생하는 문합부위인 -10mm~10mm 구간에 대해서는 상세 해석을 수행하여 높은 정확성을 얻도록 하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 수렴해석

수렴 해석을 전체 모델과 sub-modeling 모델에 대해 탄성 해석과 비선형 해석의 각각에 대해 모두 수행하였으며, 도출된 결과는 Table 2에 나타내었다. 모든 해석의 경우에서 요소수가 거의 7,520개 근처에서 수렴함을 알 수 있었다.

Table 2. Hyper-compliance convergence test by increasing the number of elements (units:% × kPa)

E No.	C		full model				sub model			
			linear		nonlinear		linear		nonlinear	
	artery	PTFE	artery	PTFE	artery	PTFE	artery	PTFE		
1,000	0.5982	0.122	0.6880	0.1155	0.5989	0.1123	0.6892	0.1157		
2,160	0.6027	0.1134	0.6931	0.1169	0.6035	0.1134	0.6942	0.1170		
3,024	0.6044	0.1137	0.6951	0.1174	0.6054	0.1139	0.6965	0.1175		
4,032	0.6042	0.1140	0.6949	0.1174	0.6052	0.1141	0.6936	0.1176		
5,120	0.6041	0.1140	0.6952	0.1175	0.6052	0.1142	0.6972	0.1176		
6,080	0.6049	0.1141	0.6957	0.1177	0.6060	0.1143	0.6972	0.1177		
7,520	0.6048	0.1143	0.6957	0.1177	0.6059	0.1144	0.6972	0.1179		
9,000	0.6048	0.1142	0.6957	0.1177	0.6059	0.1144	0.6971	0.1179		
10,000	0.6048	0.1142	0.6957	0.1177	0.6059	0.1144	0.6972	0.1179		
15,000	0.6046	0.1142	0.6957	0.1177	0.6059	0.1144	0.6972	0.1179		

3.2. 유한요소해석

3.2.1. 선형 및 비선형 해석

전체 모델이 수렴이 되는 요소 수에서 탄성 해석을 우선 고려하면, 동맥에서 발생하는 컴플라이언스는 0.5927%/kPa, PTFE의 컴플라이언스는 0.1226%/kPa로 요소 수에 따라서 수렴하는 것을 알 수 있고, 최대 컴플라이언스는 동맥에서 0.6048%/kPa,

PTFE에서 0.1142%/kPa로 동맥에서는 2% 정도 크게 발생하였고, PTFE에서는 6.8% 낮게 발생하였다. 그리고, 비선형 해석에서 동맥의 컴플라이언스는 0.6850%/kPa, PTFE의 컴플라이언스는 0.1261%/kPa로 수렴하며, 최대 컴플라이언스는 동맥에서 0.6957%/kPa, PTFE에서는 0.1177%/kPa로 동맥에서는 1.6% 정도 크게 발생하였고, PTFE에서는 6.7% 낮게 발생하였다.

그리고, 탄성 해석에서 최대 컴플라이언스가 발생하는 위치는 문합부에서 동맥으로 3.5mm, PTFE로 2.6mm 떨어진 곳에서 발생하였고, 비선형 해석에서는 문합부에서 동맥으로 4.0mm, PTFE로 2.8mm 떨어진 곳에서 발생하였다.

혈관과 PTFE를 원통형 형상으로 간단하게 가정하였으므로, 발생하는 응력은 얇은 벽의 압력 용기와 유사한 원환응력(hoop stress)이 지배적으로 영향을 미친다. 따라서 응력은 원환응력과 상당응력으로 Fig. 4, 5에서 표현하고 있다.

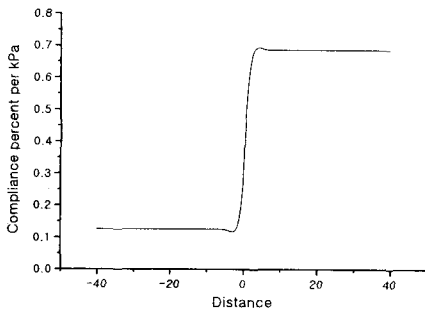


Fig. 3 Compliance distribution in the vicinity of a full model artery/PTFE anastomosis

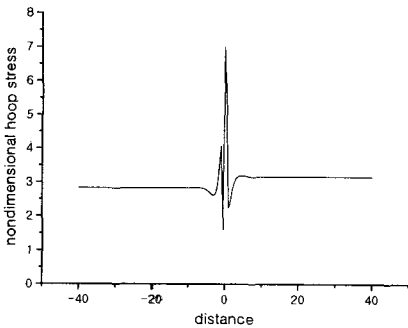


Fig. 4 Hoop stress distribution in the vicinity of a full model artery/PTFE anastomosis

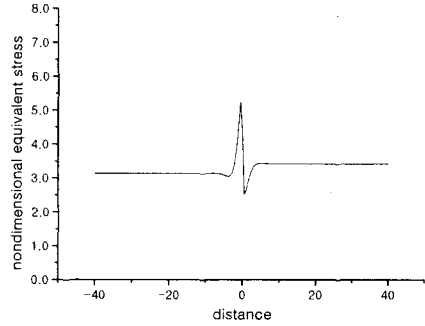


Fig. 5 Equivalent stress distribution in the vicinity of a full model artery/PTFE anastomosis

sub-modeling법을 사용한 탄성해석에서 최대 컴플라이언스는 동맥에서 0.6059%/kPa, PTFE에서 0.1144%/kPa로 동맥에서는 2.2%정도 크게 발생하였고, PTFE에서는 6.7% 낮게 발생하였다. 또한, 비선형 해석에서 최대 컴플라이언스는 동맥에서 0.6972%/kPa, PTFE에서 0.1179%/kPa로 동맥에서는 1.8%정도 크게 발생하였고, PTFE에서는 6.5% 낮게 발생하였다.

그리고, 발생하는 위치는 문합부에서 동맥으로 3.4mm, PTFE로 2.6mm 떨어진 곳에서 발생하였고, 비선형 해석에서는 문합부에서 동맥으로 4.2mm, PTFE로 2.8mm 떨어진 곳에서 발생한다.

그러므로, 비선형 해석과 sub-modeling를 적용하면 컴플라이언스가 값이 커지고, 고 컴플라이언스 지역의 위치도 문합부에서 멀어짐을 알 수 있었다. 또한, 비선형 해석에 의해 대변형 효과는 PTFE보다 혈관에서 뚜렷하게 나타나고 있다.

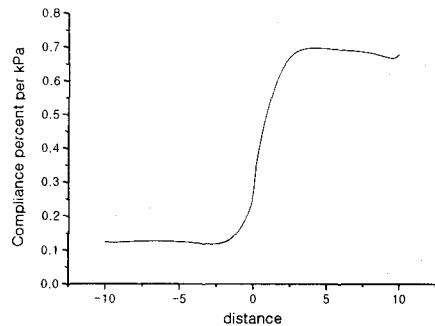


Fig. 6 Compliance distribution in the vicinity of a sub-model artery/PTFE anastomosis

3.2.2. 직경 변화 및 두께변화

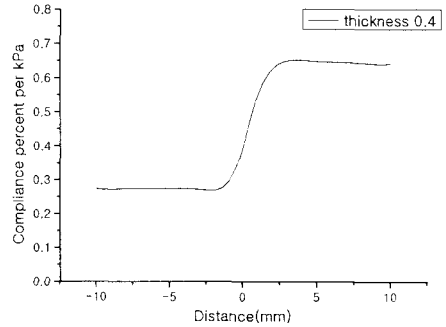
PTFE의 직경 변화와 두께에 따른 모델을 Fig. 2에 나타내었으며, 각 경우에 발생하는 컴플라이언스를 Fig. 7에 나타내었다. 대체적으로 유사한 컴플라이언스 분포를 가지고 있으며, 두께가 0.4mm인 경우에 컴플라이언스 부적합의 차이가 어느 정도 낮아지고 있음을 알 수 있다. 특히 C Type에서 PTFE의 두께가 동맥의 0.4인 경우에 컴플라이언스 차이가 약 0.31%/kPa 정도로 다른 모델보다 차이가 가장 적게 나타남을 알 수 있으나 최대 컴플라이언스가 가장 크게 나타나고 있다. 그리고, 0.8mm 두께에서는 모델에 따른 변화가 거의 발생하지 않았다.

A Type인 경우에서 두께가 0.4mm인 경우에 최대 컴플라이언스는 0.6520%/kPa 이며, 문합 부위에서 3.76mm 떨어진 곳에서 발생하며, PTFE에서는 2.32mm 떨어진 곳에서 0.2697%/kPa 가 발생하였다. 이때, 발생하는 컴플라이언스 차이는 약 0.31%/kPa 정도로 낮은 편이다.

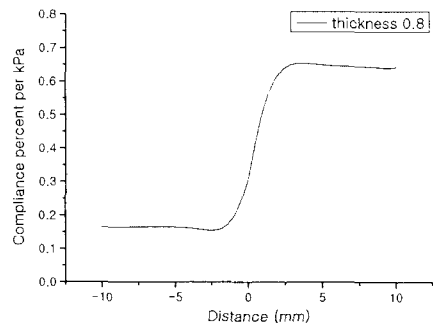
또한 두께가 0.8mm인 경우에 최대 컴플라이언스는 0.6547%/kPa 이며, 문합 부위에서 3.76mm 떨어진 곳에서 발생하며, PTFE에서는 2.32mm 떨어진 곳에서 0.1548%/kPa 가 발생하였다.

B Type인 경우에서 두께가 0.4mm인 경우에 최대 컴플라이언스는 0.6541%/kPa 이며, 문합 부위에서 3.33mm 떨어진 곳에서 발생하며, PTFE에서는 1.36mm 떨어진 곳에서 0.2991%/kPa 가 발생하여 문합부위로 가까워짐을 알 수 있다. 또한 두께가 0.8mm인 경우에 컴플라이언스는 0.6546%/kPa 이며, 문합 부위에서 3.77mm 떨어진 곳에서 발생하며, PTFE에서는 2.32mm 떨어진 곳에서 0.1586%/kPa 가 발생하였다.

C Type인 경우에서 두께가 0.4mm인 경우에 최대 컴플라이언스는 0.6736%/kPa 이며, 문합 부위에서 2.04mm 떨어진 곳에서 발생하며, PTFE에서는 0.88mm 떨어진 곳에서 0.2968%/kPa 가 발생하여, 문합부 근방에 매우 고컴플라이언스 지역이 존재함을 알 수 있다. 또한 두께가 0.8mm인 경우에 컴플라이언스는 0.6546%/kPa 이며, 문합 부위에서 3.75mm 떨어진 곳에서 발생하며, PTFE에서는 2.32mm 떨어진 곳에서 0.1622%/kPa 가 발생하였다.



(a) thickness 0.4mm



(b) thickness 0.8mm

Fig. 7 Compliance distribution in the vicinity of A type artery/PTFE anastomosis

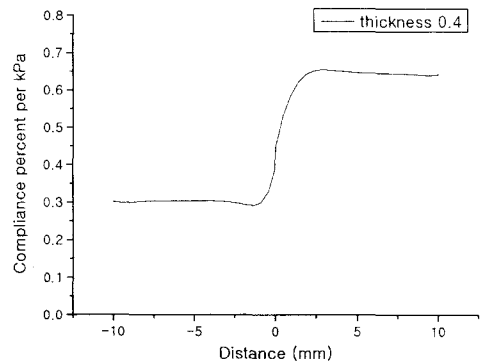


Fig. 8 Compliance distribution in the vicinity of B type artery/PTFE anastomosis

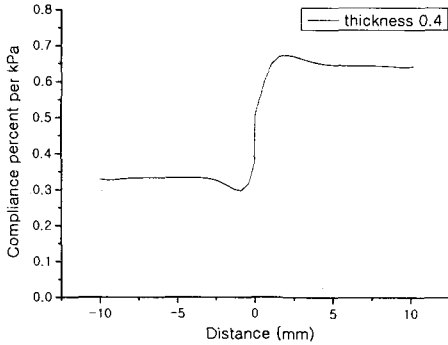


Fig. 9 Compliance distribution in the vicinity of C type artery/PTFE anastomosis

4. 결론

본 연구에서는 동맥과 PTFE의 end-to-end 문합에서 발생하는 컴플라이언스를 재료의 비선형 특성과 sub-modeling을 고려하여 유한요소해석을 이용하여 구하고, 또한 PTFE 직경 변화와 동맥에 대한 PTFE 두께 변화에 따라 컴플라이언스를 구하여 다음의 결론을 구하였다.

(1) 유한요소해석 결과의 오차를 최소화하기 위한 방법 중 요소 수에 따른 수렴해석을 수행하여, 정확한 컴플라이언스 값을 구하고자 하였다.

(2) 대변형을 고려한 비선형 해석에서 선형 해석보다 큰 컴플라이언스값을 얻었으며, PTFE보다 동맥에서의 변화가 더욱 크게 나타났다.

(3) 문합에서 PTFE 직경의 변화가 컴플라이언스에 미치는 영향보다 동맥에 대한 두께 비의 변화가 미치는 영향이 크게 나타났다.

(4) 동맥의 외부직경과 동일하고, 두께가 동맥의 0.4 배가 되는 PTFE를 문합에 적용하면, 컴플라이언스의 차이를 최소화할 수 있으나, 최대 컴플라이언스가 다소 크게 발생하고, 고 컴플라이언스 지역도 문합부에 아주 근접하게 발생한다.

참고문헌

(1) J. E. Hasson, J. Megerman and W. A. Abbott, 1985, "Increased Compliance Near Vascular

Anastomosis", J. Vasc. Surg., 119, pp. 419~423.

(2) K. B. Chandran, D. Gao, G. J. Han, H. Baraniewski and J. D. Corson, 1992, "Finite - Element Analysis of Arterial Anastomoses with Vein, Dacron and PTFE Grafts," Medical & Biological Enngineerig & Computing, pp. 413~417.

(3) P. D. Ballyk, C. Walsh, J. Butany and M. Ojha, 1997, "Compliance mismatch may Promote graft-artery intimal hyperplasia by altering suture-line stresses" J. Biomechanics, pp. 229~237.

(4) John G. Webster, 1988, "Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation" John Wiley & Sons, pp. 328~350.

(5) S. C. Chapra and R. P. Canale, 1998, "Numerical Methods for Engineers," McGraw-Hill, pp. 438~472.

(6) 한근조, 김영호, 안성찬, 심재준, 1998, 직경 및 문합각도가 단측문합의 컴플라이언스 및 응력분포에 미치는 영향,"대한의용생체공학회, 제19권, 제2호.

(7) M. W. Weston, K. Rhee and J. M. Tarbel, 1995, "Compliance and Diameter Mismatch Affect the Wall Shear Rate Distribution Near an End-to-End Anastomosis", J. Biomechanics, Vol.29, No.2, pp. 187~198.