

〈논 문〉

수술용 강선에 대한 인장력 측정센서의 설계 및 특성평가

주진원* · 이봉식**

(1996년 6월 15일 접수)

Design and Evaluation of the Tension Sensor for Surgical Steel Wires

Jin W. Joo and Bong S. Lee

Key Words : Surgical Steel Wire(수술용 강선), Tension Sensor(인장력 측정센서), Strain Gage(스트레인 게이지), Bridge Circuit(브리지 회로), Characteristic Test(특성평가)

Abstract

This paper presents the design process and characteristic test results of tension sensors for measuring the ultimate tension forces of surgical wires. Three types of sensor were designed and tested for calibration. The first two types which transfer the wire tension to the sensing element by direct contact have too much hysteresis errors due to the frictional effect. This error can be considerably reduced in the modified structure, where a cover and a loading button is used to transfer force and moment to the sensing element. The strains predicted by theoretical equations agree well with those by finite element calculations neglecting friction and the strains by finite element analysis considering friction are in good agreement with those measured by four strain gages. The modified ring type tension sensor developed in this paper is expected to be useful for measuring the tension of surgical wires with nonlinearity of 1.31% FS, hysteresis of 5.74% FS and repeatability of 0.19% FS.

1. 서 론

정형외과 수술에서는 골절의 치료를 위해서 스테인레스 강선을 사용한 고정방법이 널리 쓰이고 있다.^(1,2) 수술용 강선을 사용하여 원회고정 시술(surgical wiring)을 효과적으로 하기 위하여는 강선의 종류(굵기), 매듭방법, 매듭시 사용하는 기구들을 적절하게 선택하여야 한다. 이를 위해서는 수술용 강선의 매듭으로 인하여 대상물이 받는 압축력과, 주로 매듭부분에서 일어나는 강선의 파단하중 간의 관계를 정량적으로 얻어내는 것이 필요하다.

이와 관련된 연구로 강선의 종류에 따른 인장강도 실험을 통하여 강선이 파단될 때까지의 최대 인장력을 구하고 이 때의 인장력에 의하여 강선이 수술부위를 최대로 고정시켜 줄 수 있다고 가정하여 강선을 선택하도록 한 연구가 Schultz 등⁽³⁾에 의하여 발표되었다. 그러나 실제 원회고정시 파단은 매듭부분의 극부적인 소성변형 때문에 일어나므로 강선의 파단인장강도보다는 강선의 굵기, 매듭방법 및 매듭기구 등에 더 영향을 받는다. Shaw와 Daubert⁽⁴⁾는 두개의 시험편을 둘러싸도록 실제 매듭에 의한 고정을 한 후, 인장시험기를 이용하여 각각의 시험편을 반대방향으로 당겨서 강선에 인장력을 가하고 강선이 파단될 때의 힘을 각각의 매듭 방법에 대하여 측정하였다. 그러나 이 방법은 실험

*회원, 충북대학교 기계공학과
**청주기계공업고등학교 항공과

물이 국부적으로 발생하게 된다. 또한 축방향으로는 푸아송비로 인하여 국부적인 인장변형률이 발생하게 되어 이것들을 브리지회로에 연결하면 인장력 측정 장치로 사용할 수 있다.

압축형 감지부를 이용한 측정센서는 Al2024로 제작하여 한쪽 끝부분은 볼트로 고정할 수 있도록 하였으며, 와이어를 감을 수 있는 홈을 라운딩 가공처리하였다. 강선에 25 kgf의 인장력이 작용될 때, 스트레인 게이지 한개에서 발생하는 변형률이 대략 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이 되도록 외경 40 mm, 내경 35 mm로 하고 반경 3 mm의 원으로 라운딩된 홈의 깊이를 0.5 mm로 하여 감지부 벽면의 실제 두께는 2 mm로 하였다. 스트레인 게이지는 안쪽 벽면의 축방향으로 2개, 원주방향으로 2개를 90°간격으로 부착하여 완전결선 브리지(full bridge)를 구성하였으며, 스트레인 게이지의 중심이 홈 중심선에 일치하도록 하였다. 사용한 스트레인 게이지는 힘 센서용 게이지인 Micro-Measurement사의 N2A-13-T004R-350으로 게이지의 길이는 3.18 mm이고, 저항은 350 Ω 이다.

제작된 인장력 측정센서의 출력과 실제 강선의 인장력과와의 관계를 결정하기 위하여는 특성시험을 수행하여야 한다. 또한 특성시험을 통하여 인장력 측정센서가 갖는 비직선성(nonlinearity), 하중이력(hysteresis), 재현도(repeatability) 등을 결정하여 제작된 측정센서의 성능을 평가할 수 있다.

특성시험을 위한 실험장치 및 측정방법은 Fig. 2와 같다. 정형외과 수술시 강선에 의한 압력을 주는 것과 같은 조건을 만들기 위하여 측정센서의 홈을 따라 강선이 한바퀴 완전히 감도록 하고, 추를 이용하여 강선에 인장력을 주도도록 하였다. 표면의 마찰에 의하여 강선의 인장력이 점차로 작아지는 현상을 최소화시키고, 실제 조건과 가깝도록 하기 위하여 그림과 같이 양쪽에 똑같은 하중을 줄 수 있도록 하였다. 특성치를 구할 수 있도록 단계적으로 하중을 가하고 각각의 단계에서 출력을 측정하였다. 측정센서의 감지부에 부착된 4개의 스트레인 게이지로 완전결선방식의 회로를 구성하고, 변형률 측정기를 사용하여 감도를 변형률로 변환하여 측정하였다. 측정의 정확성을 기하고 재현도 특성을 구하기 위하여 같은 시험을 3회씩 실시하였다.

Fig. 3은 압축형 감지부의 특성시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이 감지부가 인장력 측정센서로 사용되기에는 두 가지의 심각한

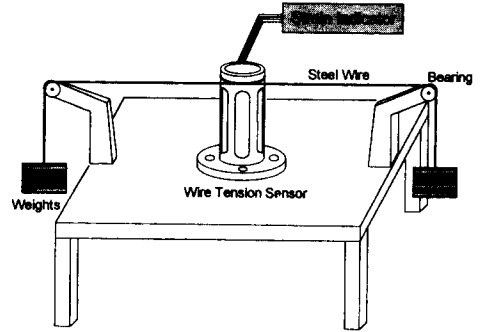


Fig. 2 Experimental setup for the calibration test of wire tension sensor

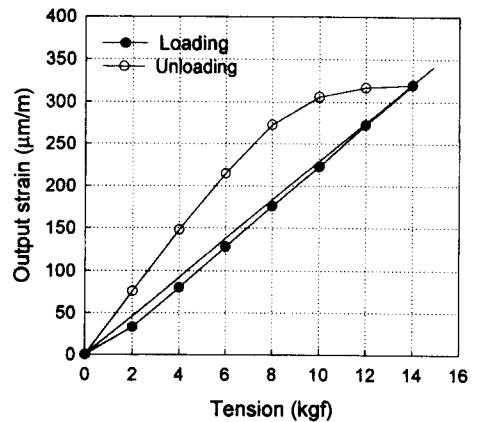


Fig. 3 Calibration results of the cylindrical type tension sensor by the compressive deformation

문제가 있음을 알 수 있다. 하나는 하중을 가할 시에 작은 하중단계에서 변형률 값이 정격출력값까지 임의로 그은 직선보다 작게 나타나서 비직선성이 커지는 현상이며, 다른 하나는 하중을 제거할 때 변형률 값이 감소하지 않는 현상이고, 이것은 하중이력 특성을 크게 하여 와이어에 인장력을 주었다가 감소시킬 때 상당한 오차를 발생시킬 수 있다.

이와 같은 오차를 다음과 같이 정의된 특성치 계산식⁽⁵⁾에 의하여 정량적으로 구할 수 있다.

$$\text{비직선성} = \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_m} \times 100 (\% \text{ FS}) \quad (2)$$

$$\text{하중이력} = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_m} \times 100 (\% \text{ FS}) \quad (3)$$

$$\text{재현도} = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_m} \times 100 (\% \text{ FS}) \quad (4)$$

여기서, ε_m 은 정격출력, 즉 최대하중에 대한 출

이 복잡할 뿐만 아니라, 대상물의 고정력을 측정한다기보다는 고정 후 외부하중에 의한 과단하중을 결정하는 방법이라고 할 수 있다.

매듭으로 인하여 강선에 인장력이 작용되면 그 인장력에 의해서 고정하려는 대상물은 압축력을 받을 것이므로 대상물의 고정력은 강선의 인장력과 비례하여 변화한다고 할 수 있다. 따라서 각각의 매듭조건에 대한 고정력을 평가하기 위하여는 실제로 매듭과정을 수행하면서 매듭부분이 과단되는 때의 강선의 인장력을 측정하면 된다. 이러한 목적으로 매듭과정을 수행하면서 과단이 일어날 때까지의 강선의 인장력을 측정할 수 있는 측정센서가 필요하게 된다.

본 논문에서는 스트레인 게이지를 이용한 강선의 인장력 측정센서를 개발하기 위하여 다음과 같은 과정을 수행하였다. 첫째, 강선의 인장력에 대한 변형거동을 해석하여 감지부의 형상과 스트레인 게이지의 위치를 결정한 후 이론적인 변형해석을 통하여 기초 설계를 수행하였다. 정확한 변형해석을 위하여 유한요소해석을 통해 스트레인 게이지가 부착될 부분의 변형률을 계산해 내고, 이를 이론해석 결과와 비교하여 센서의 출력을 예측하였다. 다음으로는 설계된 유한요소해석 결과의 검증에 위해서 측정센서를 직접 제작하고, 스트레인 게이지 측정 실험을 수행하여 설계의 타당성을 보였다. 마지막으로 특성시험을 수행하여 개발된 측정센서의 여러 가지 기계적인 특성들을 평가하고 만족할 만한 특성이 나타날 때까지 감지부의 형상을 수정하여 앞의 설계 과정을 반복하였다. 또한 제작된 최종 모델에 대하여 실험방법에 대한 영향을 평가하고 실제 수술용 매듭방법에 따른 임상적 시험에 본 측정기를 응용한 결과를 기술하였다.

2. 원통형 인장력 측정센서의 설계 및 특성시험

수술용 강선의 원회고정시에 강선이 과단될 때까지의 고정력을 비교하기 위하여는 정량적인 측정치가 필요하다. 이 경우, 수술 대상물의 고정력을 직접 측정하기는 어려우므로 원회고정하는 강선의 인장력을 정량적으로 측정함으로써 고정력을 간접적으로 평가할 수 있다. 일반적으로 강선의 인장력을 정확하게 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 논문의 목적에 맞도록 사용하기 위해서는 실제 매

듭작업을 하면서 그 때의 인장력을 측정하여야 하므로 수술대상물 혹은 그와 같은 형상의 고정물이 필요하다. 본 논문에서는 강선의 인장력을 탄성체인 고정물의 변형률로 변환하여 측정하고, 특성시험을 수행하여 정량적으로 인장력을 결정할 수 있는 측정센서를 설계하였다.

스트레인 게이지를 이용하는 일반적인 힘 측정센서에서는 출력을 크게 하기 위하여 스트레인 게이지를 인장변형률 및 압축변형률을 받는 방향으로 각각 2개씩 부착하여 휘스톤 브리지(Wheatstone bridge) 회로를 구성한다. 이때의 감도, 즉 회로의 입력전압 E_i 에 대한 출력전압 E 의 비는 다음 식으로 간단히 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$\frac{E}{E_i} = \frac{1}{4}K(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (1)$$

여기서, K 는 스트레인 게이지의 게이지상수이고, ϵ_1, ϵ_3 는 인장변형률, ϵ_2, ϵ_4 는 압축변형률의 값을 나타낸다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 힘을 측정하는 감지부 구조는 힘이 가해지면 인장변형률과 압축변형률이 나타나는 지점이 존재해야 출력이 커지며, 가능하면 그 절대값이 같아야 직선성이 좋아진다.⁽⁶⁾ 설계되어 제작된 힘 측정센서가 감지부의 허용응력을 넘지 않으면서 감도를 크게 하기 위하여, 스트레인 게이지 한개에 가해지는 변형률이 알루미늄인 경우 $800 \sim 1000 \mu\text{m/m}$ 되도록 설계하는 것이 적당하다.⁽⁷⁾

이와 같은 조건을 만족하는 인장력 측정센서를 설계하기 위하여, 먼저 원통의 둘레에 감겨진 강선의 인장력에 의하여 변형하는 중공형 원통을 생각해 볼 수 있다. Fig. 1(a)와 같이 마찰력을 무시한다면 바깥둘레에 감겨진 와이어의 인장력에 의해 원통 주위에는 균일한 압력이 가해진다고 가정할 수 있다. 원통의 바깥면에 압력이 가해지면 원통의 안쪽면에는 원주방향의 응력이 발생되고, 그 응력에 의하여 Fig. 1(b)와 같이 원주방향의 압축변형

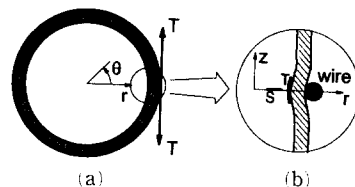


Fig. 1 Cylindrical type tension sensor by the compressive deformation

력을 나타내고, $\Delta\epsilon_1$ 은 원점에서 정격출력까지 연결한 직선으로부터 차이가 가장 큰 출력을 나타내며 $\Delta\epsilon_2$ 는 같은 하중값에서 하중을 가할 때와 제거할 때에 차이가 가장 큰 출력을 나타낸다. 또한 ϵ_{max} 과 ϵ_{min} 은 각각 3회 시험했을 때 정격출력의 최대값과 최소값이고, FS(Full Scale)은 정격출력에 대한 오차를 의미한다.

식 (2)에서 식 (4)에 의해서 결정된 특성값은 인장력 14 kgf까지에서 정격출력 $320 \mu\text{m/m}$, 비직선성 3.96% FS, 하중이력 30.22% FS, 재현도 0.625% FS로 나타나서 재현성은 높으나 비직선성이 너무 크며, 특히 하중이력 값은 측정이 불가능할 정도로 크게 결정되었음을 알 수 있다. 이것은 실험 자체는 신뢰성 있게 이루어졌으나 부하와 제하시 하중상태가 상당히 다르게 작용되었음을 뜻한다. 결과적으로 중공형 원통의 압축변형을 이용하는 인장력 측정센서는 마찰력의 영향, 국부적인 굽힘변형에 의한 급격한 변형률의 변화 등으로 특성이 좋지 않은 것으로 나타나서 인장력 측정센서로서 적합하지 않다고 판단되었다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여는 넓은 범위에 걸쳐 변형률이 심하게 변하지 않는 구조를 선택하여야 하며, 굽힘변형을 이용하여 같은 힘에 대한 변형률을 크게 하는 구조로 설계하는 것이 좋다고 판단하여, 환상형 로드셀의 감지부 구조를 이용한 인장력 측정센서를 고안하였다. Fig. 4는 굽힘변형을 이용한 환상형 인장력 측정센서의 원리를 보여주고 있다. 마찰을 무시한다면 와이어의 장력 T에 의해서 감지부에는 그림과 같은 균일압력이 가해진다고 가정할 수 있다. 이 압력에 의하여 A 지점에는 굽힘모멘트와 압축력이 발생하고 굽힘모멘트에 의해서 바깥쪽에는 인장변형률이, 안쪽에서는 압축변형률이 발생하는 구조가 된다. 또한 압축력에 의해서는 단면 전체에 균일한 압축변형률이 발생되나 그 양은 크지 않을 것으로 예상되므로 이 두가지 하중에 대한 변형률을 중첩하여 계산한 전

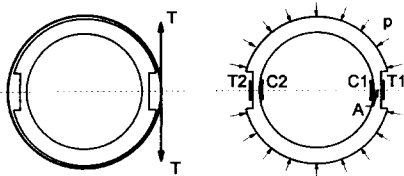


Fig. 4 Ring type tension sensor by the bending deformation

체 변형률을 이용하여 측정센서를 설계할 수 있다. 즉, 중공형 원통의 바깥 면은 인장변형률을 감지하는 스트레인 게이지를, 안쪽면은 압축변형률을 감지하는 스트레인 게이지를 부착하고 브리지 회로를 구성하면 와이어 인장력을 감지할 수 있는 측정센서로서 필요조건을 만족시킬 수 있다.

스트레인 게이지가 부착될 지점에 인장력을 전달하는 강선이 접촉되지 않게 하고, 측정되는 변형률 값이 가능한 커져서 센서의 감도를 크게 하기 위하여 그림과 같이 바깥 면의 일부를 가공하여 단면의 두께를 얇게 설계하였다. 강선에 25 kgf의 인장력이 작용될 때, 스트레인 게이지 한계에서 발생하는 변형률의 최대값이 대략 $800 \mu\text{m/m}$ 이 되도록 외경 48 mm, 내경 36 mm로 하고 스트레인 게이지가 부착될 지점의 단면의 최소두께를 2 mm로 설계하여 제작하였다.

Fig. 5는 굽힘형 감지부의 특성시험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 하중이 가해질 때 비직선성은 2.01% FS로 개선되었으나, 하중을 제거할 때에는 하중이력이 61.7% FS로 더욱 커져서 심각한 문제가 있음을 알 수 있다. 또한 압축력에 의한 변형도 상당히 크게 발생하여 전체가 설계 의도와는 달리 압축력을 받는 구조가 되었으며 결국 정격출력이 25 kgf에서 $240 \mu\text{m/m}$ 로 작게 나타났다. 이 경우에도 재현도는 0.42% FS로 나타나서 시험은 비교적 정확하게 이루어진 것을 알 수 있다. 이와같이 하중이력 값이 상당히 크게 나타난 것은 센서 감지부와 강선 사이의 마찰영향이 가장 큰 이유이며, 강선이 감지부에 직접 접촉하는

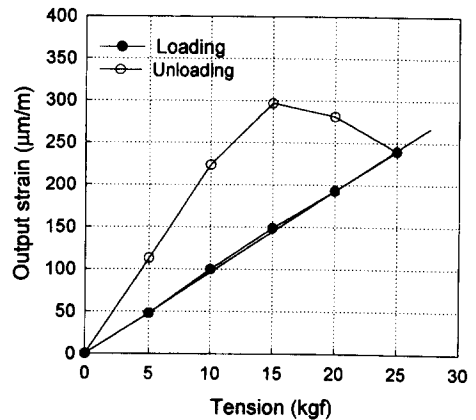


Fig. 5 Calibration results of the ring type tension sensor by the bending deformation

구조로는 신뢰성 있는 측정센서를 제작할 수 없다는 판단을 하였다.

3. 수정된 환상형 센서의 설계

앞에서 설계한 원통형 측정센서들을 특성시험한 결과, 힘의 전달방법이 인장력 측정센서에 적합치 않다고 판단되어 강선의 장력을 감지부에 전달하는 방법을 Fig. 6(a)와 같이 하여 모델을 수정하였다. 강선의 인장력을 감지부에 직접 가하는 경우에는 마찰 등의 영향으로 하중이력 특성이 나빠지므로 이러한 힘전달 과정을 개선하기 위하여 그림과 같이 감지부의 바깥둘레에 와이어를 감을 수 있는 커버를 부착하고 감지부와 사이에 연결된 하중점에 의하여만 하중이 전달될 수 있도록 하였다. 즉, 강선에 인장력이 작용되면 커버부에 균일한 압력을 가하고 그 압력으로부터 발생된 하중점에서의 합력에 의하여 감지부에 Fig. 6(b)와 같은 모멘트가 발생되어 변형을 일으키도록 설계하였다.

강선의 장력 T 에 의해 감지부에 가해 주는 힘 P 를 구하기 위하여 먼저 Fig. 7(a)와 같은 강선과 커버 사이의 힘의 평형관계를 생각해 본다. 해석의 복잡성을 피하기 위하여 강선과 커버 사이의 마찰을 무시하면 장력 T 는 θ 에 대해 일정하게 되며, $d\theta$ 만큼에 해당하는 강선조각의 반경방향 힘에 대한 평형관계는 다음과 같다.

$$\sum F_r = dN - 2T \sin \frac{d\theta}{2} = 0 \quad (5)$$

$dN = pbRd\theta$ 로 놓을 수 있으므로 식 (5)로부터 $pb = T/R$ 로 표현될 수 있다. 여기서, p 는 커버에 가해지는 압력이고 b 는 커버의 폭을 나타내고 있다. 이와같이 강선이 접촉부분에 균일 분포하중으로 가할 경우 이 압력에 의해서 하중점에 가해지는

힘 P 는 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 다음과 같은 적분식으로부터 계산할 수 있다.

$$P = 2 \int_0^{\pi/2} pb \sin \theta R d\theta = 2pbR = 2T \quad (6)$$

즉, 마찰을 무시하였을 때 와이어의 균일한 장력 T 에 의해 하중점에는 $2T$ 만큼의 압축력이 작용한다.

하중점에 작용되는 힘 P 에 의해 스트레인 게이지가 부착된 Fig. 6(b)의 감지부에는 굽힘모멘트 M_0 와 압축력 $P/2$ 가 동시에 발생한다. 굽힘모멘트 M_0 를 구하기 위하여 Fig. 7(c)와 같은 1/4 부분을 생각할 수 있다. 단면에 모멘트 M_0 와 압축력 $P/2$ 가 작용된다고 하면, θ 위치에서의 모멘트 $M(\theta)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M(\theta) = \frac{P}{2} r (1 - \cos \theta) - M_0 \quad (7)$$

대칭관계에 의하여 단면의 회전각은 없으므로 다음과 같은 Castigliano의 법칙⁽⁸⁾을 이용하여 M_0 를 구할 수 있다. 여기서, Fig. 7(c)와 같은 형상은 단면이 균일하지 않은 구조이므로 구간 I과 구간 II로 나누어서 적분을 수행할 수 있다.

$$\frac{d}{dM_0} \left(\int_0^{\phi} \frac{M^2}{2EI_1} r_1 d\theta + \int_{\phi}^{\frac{\pi}{2}} \frac{M^2}{2EI_2} r_2 d\theta \right) = 0 \quad (8)$$

식 (8)에 식 (7)을 대입하여 정리하면 M_0 는 다음과 같이 된다.

$$M_0 = \frac{P}{2} \frac{r_2^2 \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + (\phi - \sin \phi) \left(\frac{r_1^2}{I_1} - \frac{r_2^2}{I_2} \right)}{\left(\frac{r_1}{I_1} - \frac{r_2}{I_2} \right) \phi + \frac{r_2}{I_2} \frac{\pi}{2}} \quad (9)$$

여기서, r_1, r_2 는 각각 구간 I과 구간 II의 평균 반지름이고, I_1, I_2 는 각각의 단면 2차 모멘트이며, ϕ 는 구간간의 경계를 나타내는 각도이다.

스트레인 게이지가 부착될 지점에서의 변형률은 모멘트에 의한 변형률과 압축에 의한 변형률의 합으로 다음과 같이 표현된다.

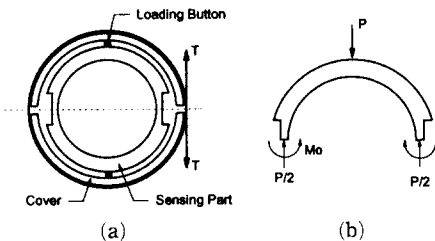


Fig. 6 Modified ring type tension sensor by load button

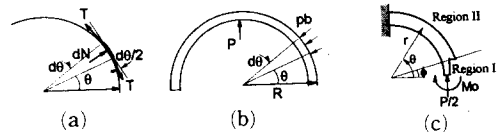


Fig. 7 Free body diagrams of wire(a), cover(b) and sensing element(c) in the modified ring type tension sensor

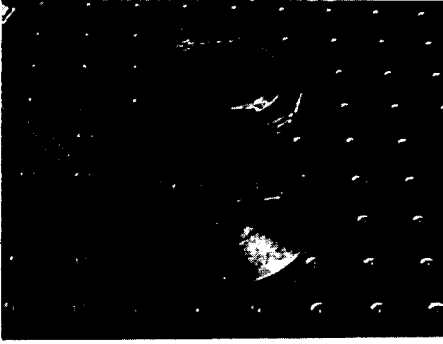


Fig. 8 Photograph of the ring type tension sensor developed

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_c \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \varepsilon_b = \pm \frac{M_0 h / 2}{EI_1}, \quad \varepsilon_c = \frac{P / 2}{EA_1}$$

식 (10)으로부터 감지부에서 발생하는 최대 변형률이 10 kgf의 인장력에서 $320 \mu\text{m/m}$ (정격용량 25 kgf에서 $800 \mu\text{m/m}$)이 되도록 굽힘형 측정장치를 설계하였다. 설계된 감지부의 최소두께는 2 mm, 폭은 10 mm로 앞에서 설계된 환상형 감지부와 같게 하였으며, 잘라낸 부분의 길이는 스트레인 게이지 작업이 가능하고 변형률이 급격하게 변하지 않도록 18.3 mm로 하였다. 커버부의 바깥 지름은 60 mm로 하였고, 커버부와 감지부 사이에 키를 박음 조립하여 하중점으로 하였다. 안정된 측정실험을 위하여 센서의 한쪽 부분이 테이블에 고정되도록 하고 감지부 이외의 몸체에 인장력이 가능한한 전달되지 않도록 감지부와 고정부 사이를 잘라내어 강성이 작게 설계하였다. Fig. 8은 제작된 측정센서의 형상을 보여주고 있다.

4. 유한요소해석 및 변형을 측정실험

설계된 측정센서가 강선의 인장력에 의한 하중을 받을 때, 이론적으로 변형률을 구하는 식들이 적절한 가정 하에서 유도되었는가를 검증하고 감지부의 변형거동을 정량적으로 파악하기 위하여 측정센서에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 강선과 커버부 사이에 마찰이 존재하는 경우에 발생하는 변형률 값을 계산하였다.

마찰을 고려한 경우에 강선의 인장력에 의하여 하중점을 통하여 감지부에 가해주는 하중을 구하기 위하여 Fig. 9(a)와 같은 $d\theta$ 만큼의 강선조각을 생

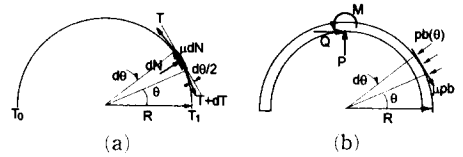


Fig. 9 Free body diagrams of wire(a) and cover(b) in the ring type tension sensor considering friction

각해 보면, 이 강선조각에는 인장력, 커버부로부터의 반력 및 마찰력이 작용된다. 이들 힘에 대한 반지름방향과 원주방향의 힘의 평형식은 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에서 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Sigma F_r &= dN - T \sin \frac{d\theta}{2} - (T + dT) \sin \frac{d\theta}{2} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_\theta &= (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2} - T \cos \frac{d\theta}{2} + \mu dN \\ &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위의 미분방정식의 해를 구하면 커버부에 작용되는 압력의 분포는 다음과 같이 된다.

$$pb(\theta) = \frac{T_1}{R} e^{-\mu\theta} \quad (13)$$

여기서, T_1 은 매듭부위에서 작용되는 강선의 최대 인장력을 나타내고, M 과 b 는 각각 커버의 바깥반지름과 폭을 나타내며 θ 는 매듭부분으로부터의 각도를 표시한다. 식 (13)에서 보는 바와 같이 압력은 매듭부분으로부터 멀어질수록 서서히 감소하여 $\theta = \pi$ 에서 최소값을 갖는다.

이러한 압력분포로 인하여 하중점에서 전달되는 힘과 모멘트를 Fig. 9(b)와 같은 평형관계에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= \int_0^\pi pb \sin \theta R d\theta + \int_0^\pi \mu pb \cos \theta R d\theta \\ &= T_1 (e^{-\mu\pi} + 1) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^\pi pb \cos \theta R d\theta - \int_0^\pi \mu pb \sin \theta R d\theta \\ &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} M &= \int_0^\pi pb R \cos \theta R d\theta + \int_0^\pi \mu pb R (1 - \sin \theta) R d\theta \\ &= T_1 R (1 - e^{-\mu\pi}) \end{aligned} \quad (16)$$

윗식에서 마찰계수 $\mu = 0$ 이라면, $P = 2T_1$, $Q = M = 0$ 이 되어서 식 (6)에서 마찰계수가 없는 경우

로 가정하여 유도한 식과 일치한다. 마찰계수가 0이 아니라면 축하중 P 는 조금 작아지고, 횡하중 Q 는 0이 되며 대신에 모멘트가 발생하게 된다. 예를 들어 금속과 금속의 건마찰계수로 일반적으로 쓰이는 $\mu=0.1$ 을 대입하면 $P=1.730 T_1$, $M=0.2696 T_1 R$ 이 된다.

이와 같이 결정된 하중이 감지부에 결합된 하중점에 작용될 때, 감지부에 대한 유한요소해석을 마찰을 무시할 때와 마찰계수가 0.1일 때의 경우에 대하여 각각 수행하였다. 유한요소해석에서는 2차원 평면응력문제로 가정하였고, Fig. 10과 같이 8절점 2차요소를 사용하여 분할하였다. 제작된 감지부의 재질이 Al2024-T4이므로, 종탄성 계수는 7300 kgf/mm^2 으로 하였고 부아송비는 0.3으로 하였다. 강선의 인장력 T_1 을 10 kgf 로 하면 마찰을 무시하였을 때에는 집중하중 P 는 20 kgf 이 되므로 감지부의 폭을 10 mm 라 하여 2 kgf/mm 의 집중하중이 하중점에 가해지도록 하였고, 마찰계수가 0.1일 때에는 1.73 kgf/mm 의 집중하중과 $8.088 \text{ kgf}\cdot\text{mm/mm}$ 의 모멘트가 하중점에서 가해지도록 하였다. 위와 같은 하중조건에서는 x 축에 대해서는 대칭을 유지하면서 변형하게 되므로 경계조건은 Fig. 10과 같이 감지부 x 축상에 있는 절점들은 y 방향의 변위를 고정하였고 바깥면의 한점을 기준으로 하기 위하여 그 점의 x 방향 변위를 고정하였다.

마찰계수가 0.1인 경우에 힘과 모멘트를 받아 변형된 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 감지부의 바깥면에는 인장변형률이, 안쪽면에서는 압축변형률이 발생된 것을 알 수 있다. 스트레인 게이지 길이방향을 따라서 변형률은 완만하게 분포하였으며, 실제 스트레인 게이지로부터 측정되는 변형률은 이 값들의 평균한 것으로 볼 수

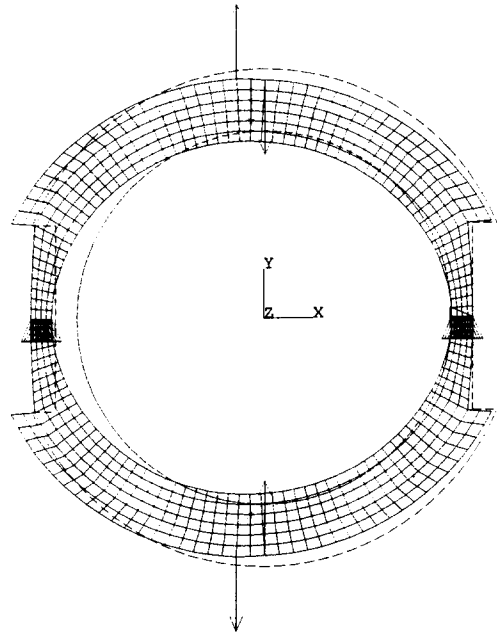


Fig. 10 Finite element mesh and deformed shape of the ring type tension sensor considering friction

있으므로 게이지 길이에 걸치는 변형률을 적분하여 평균값을 구하였다. Table 1은 앞에서 계산하였던 이론값과, 유한요소해석에 의한 변형률 값을 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 이론값은 마찰을 무시하였을 때의 유한요소해석 결과와 어느정도 일치하였으므로 앞에서 유도한 이론식들이 기초설계에 잘 이용될 수 있음을 알 수 있다. 표에서 인장변형률의 절대값이 압축변형률의 절대값보다 크게 발생된 것은 감지부가 하중점의 집중하중에 의하여 굽힘모멘트를 받을 뿐 아니라 압축

Table 1 Comparison of output strains ($\mu \text{ m/m}$) at the strain gage locations by theory, FEM and measurement (Tension of 10 kgf)

Strain gage	Theory ($\mu=0$) Eq. (10)	Finite element analysis		Measurement
		$\mu=0$	$\mu=0.1$	
C ₁	-388	-370	-365	-367
T ₁	252	225	209	211
C ₂	-388	-370	-276	-262
T ₂	252	225	181	181

력도 받기 때문이다. 마찰을 고려하였을 때에 C_2 , T_2 부분에서의 변형률이 C_1 , T_1 부분(매듭부분)에서보다 작게 발생된 것은 강선과 커버부의 마찰력에 의해서 압력이 감소하여 하중점에서 모멘트를 전달하기 때문이다.

강선의 인장력에 의하여 스트레인 게이지에서 실제 발생하는 변형률을 얻어내기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치들을 이용하여 측정실험을 수행하였다. 감지부의 커버에 강선을 감고 강선의 양단에 10 kg의 추를 올려놓은 다음, 4개의 스트레인 게이지에서 발생하는 변형률을 각각 측정하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 실험 값은 스트레인 게이지 C_1 과 T_1 에서 보다 C_2 와 T_2 에서 상당히 작은 절대값을 나타내고 있으며, 이것은 앞에서 마찰계수를 고려하였을 때의 해석결과와 일치한다. 유한요소해석에서 마찰계수를 0.1로 했을 때, 해석결과와 실험결과는 상당히 잘 일치하고 있어서 마찰계수는 잘 예측되었으며 설계를 위한 변형해석이 적절하게 수행되었음을 알 수 있다. 역으로, 이와 같은 해석 및 실험결과를 이용하여 임의의 두 표면 사이의 마찰계수를 예측하는 것도 가능하다.

5. 특성시험결과

제작된 인장력 측정센서의 감도 및 센서가 갖는 특성들을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 이용하여 특성시험을 수행하였다. 변형률을 측정할 때 부착한 4개의 스트레인 게이지로 완전결선 브리지를 구성하고 하중이 가해질 때의 입력전압에 대한 출력전압의 비를 변형률로 변환하여 측정하였다. 실제로 매듭작업을 할 때의 조건과 가깝도록 하기 위하여 강선을 커버주위에 한바퀴 감고 엇갈리게 강선을 잡아당긴 후, 양쪽에 추를 이용하여 똑같은 하중을 줄 수 있도록 하였다. 추는 한 단계에 5 kg씩 5단계로 나누어 가하고 각각의 단계에서 출력력을 측정하여 같은 과정을 3회 반복하였다.

Fig. 11은 커버가 부착된 환상형 인장력 측정센서의 특성시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 직선성과 하중이력이 모두 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 정격용량인 인장력 25 kgf에서 정격출력은 2647 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 나타났으며, 식(2)~(5)로 표시한 특성값은 비직선성 1.31% FS, 하중이력 5.74% FS, 재현도 0.19% FS로 나타나서 마찰로 인하여 아직도 하중이력이 약간 크게 나타

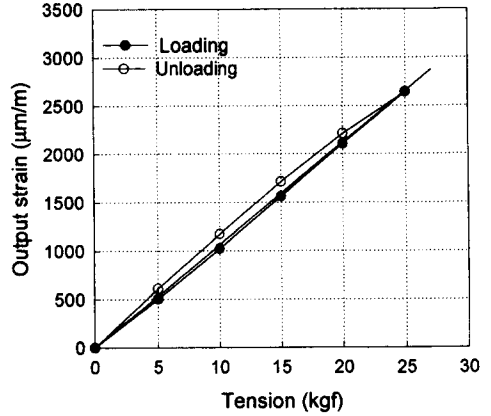


Fig. 11 Calibration results of the ring type tension sensor developed

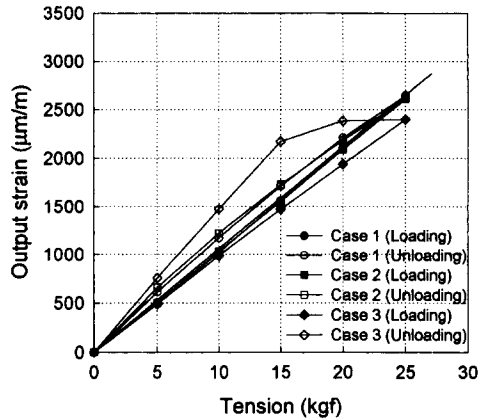


Fig. 12 Calibration results of the ring type tension sensor under different loading conditions

났으나, 강선의 인장력이 하중점을 통하여 전달되는 구조에서는 감지부에 직접 인장력이 작용될 때에 비해서 대단히 많이 개선된 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 제작된 인장력 측정센서는 아주 정밀한 센서로는 볼 수 없으나, 본 연구목적에서 요구하는 용도에는 유용하게 사용될 수 있는 것으로 판단되었다.

개발된 측정센서를 이용하여 매듭시 강선의 인장력을 측정할 때에는 실험조건에 따라서 다른 측정결과가 나타날 가능성이 있다. 즉, 센서에서 매듭부분의 위치, 강선의 종류, 접촉면의 마찰계수에 따라서 결과가 다르게 나타날 수가 있기 때문에 이에 대한 영향을 정량화하기 위하여 각각의 경우에 출력력을 측정하였다.

Table 2 Comparison of output strains($\mu\text{m/m}$) measured with different wire type, wire diameter and contact surface

Wire Tension (kgf)	12W	16G	18G	21G	Cement (12W)
2	200	195	190	189	207
4	405	402	389	382 413	
6	614	614	595	588	623
8	826	824	811	797	830
10	1031	1030	1027	1021	1032
8	885	884	874	872	869
6	665	666	662	654	674
4	456	455	452	443	466
2	242	243	241	239	244
0	-1	0	1	0	-1

Fig. 12는 하중을 주는 방법에 따른 측정센서의 출력값을 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 Case 1은 이제까지 실험한 것과 같이 같은 하중을 양쪽에서 가하고 매듭을 두개의 커버 연결부분(하중점과 직각인 방향)에 위치하도록 한 경우이며, Case 2는 Case 1과 매듭위치는 같으나 강선의 한쪽 끝을 고정하고 다른 한쪽에서만 하중을 가한 경우이다. Case 3는 양쪽에서 하중을 가하나 매듭위치를 90°돌려서 하중점 부근에 놓았을 경우이다. 결과에서 보는 바와 같이 Case 2는 Case 1과 정격출력값 및 하중이력 특성이 거의 같게 나타나서 하중방법에는 큰 영향이 없는 것으로 판단되나, Case 3의 경우는 정격출력 값이 Case 1에 비해서 9.3% 작았고, 하중이력도 29.3% FS로 크게 나타났다. 이것은 두개의 커버에 작용하는 하중의 대칭성이 없어지기 때문이라고 판단된다. 이와같은 결과를 볼 때, 매듭위치에 따라서 센서의 출력은 크게 다를 것으로 예상되므로 센서를 이용하여 강선의 인장력을 측정할 때에는 Case 1과 같은 매듭위치를 주의깊게 선정하여야 함을 알 수 있다.

Table 2는 강선의 종류와 굵기에 대한 출력결과를 나타내고 있다. 표에서 1.2W는 특성시험에서 사용한 강선와이어로 소선들을 꼬아서 잘 구부러지게 만든 지름 1.2mm의 와이어를 표시하고, 16G

($\phi 1.22\text{ mm}$), 18G($\phi 0.97\text{ mm}$), 21G($\phi 0.76\text{ mm}$)는 실제 외과수술에서 사용되고 있는 스테인레스 강선을 표시한다. 측정결과에서 보는 바와 같이 강선의 종류에 따라서는 출력 차이가 거의 없으며, 강선의 굵기가 작아질수록 출력도 작아지나 그 크기는 1% 미만으로 무시할 수 있을 만큼 작고 하중이력 특성도 비슷한 것으로 나타났으므로 제작된 측정센서는 강선의 종류와 굵기에 관계없이 사용될 수 있음을 알 수 있다.

개발된 측정센서는 매듭방법의 비교 평가에 사용

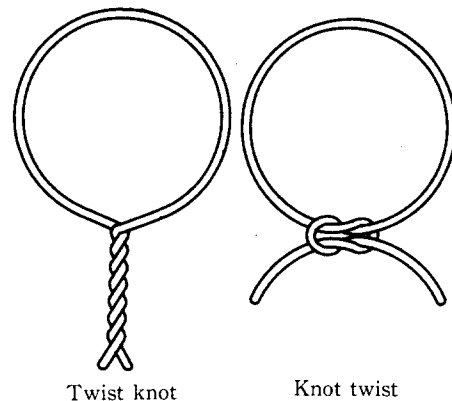
**Fig. 13** Fastening methods of surgical steel wires: twist knot and knot twist

Table 3 Experimental tension force of cerclage wire fixations by using the wire tension sensor developed

Wire size	Cerclage system	Ultimate tension force (kgf)	Rupture tension force (kgf)
16G	Twist knot with wire holder	21.34	19.44
	Twist knot with York	10.93	—
	Knot twist with wire holder	0.29	0.29
18G	Twist knot with wire holder	11.87	11.16
	Twist knot with York	8.56	—
	Knot twist with wire holder	0.65	0.66
21G	Twist knot with wire holder	6.26	6.23
	Twist knot with York	4.22	—
	Knot twist with wire holder	2.29	2.29

되므로 같은 조건에서 측정하면 본래의 목적에 충분히 이용될 수 있지만, 표면의 상태에 따라서 영향을 받을 수 있으므로 커버부의 표면에 실제 뼈와 가까울 것으로 생각되는 시멘트(MM-RS-200-CK)를 접착하여 마찰의 영향을 증가시키고 특성시험을 수행하였다. 특성시험은 12W 강선 와이어를 사용하여 앞에서와 같은 방법으로 3회씩 수행하여 평균 값을 취하였다. 마찰의 증가로 인하여 각각의 스트레인 게이지에서 측정되는 변형률 값은 변화가 있으리라고 예상되었으나 Table 2에서 보는 바와 같이 완전결선 브리지에서의 출력은 하중이력 특성에 약간의 차이가 있으나 전체적으로 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

6. 수술용 강선 매듭평가에의 응용

앞에서 설계되어 제작된 인장력 측정센서를 이용하여 수술용 강선의 매듭방법, 강선의 굵기에 따른 종류, 사용기구 등에 대한 파손될 때까지의 인장력

을 구하였다. 수술용 매듭방법에는 정방매듭, 변형 정방매듭, 매듭꼬임, 꼬임매듭이 있으나 임상적으로 널리 이용되는 꼬임매듭(twist knot)과 매듭꼬임(knot twist)의 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 각 매듭방법은 Fig. 13에 나타내었다. 수술용 강선의 굵기에 대해서는 새가지, 즉 16G, 18G, 21G에 대하여 측정실험이 행해졌다. 또한 사용기구는 와이어집게(wire holder)와 요크(york)의 두 가지를 이용하여 실험이 수행되었다. 실험은 각각의 경우에 대하여 10회씩 충북대학교 의과대학 정형외과 팀에서 직접 실시하였다.⁽⁹⁾

Table 3은 각각의 경우에 대하여 강선의 인장력 최대치를 나타내고 있다. 표에서 ultimate tension force는 강선이 파손되기 직전의 인장력을 나타내고 있으며, rupture tension force는 파손 후 매듭이 떨어져 나간 후의 인장력을 나타내고 있다. 표의 값은 측정된 변형률을 감도(2647/25 ($\mu\text{m}/\text{m}$)/kgf)로 나누어서 계산한 값이다.

실험결과 와이어의 굵기가 굵으면 굵을수록 파손

때까지의 인장력이 크게 나타나며, 꼬임매듭이 매듭꼬임보다 상당히 큰 인장력을 얻을 수 있어서 실험결과를 보면 매듭꼬임방법은 거의 사용될 수 없음을 알 수 있다. 또한 요크를 이용한 매듭방법보다 와이어 홀더를 이용하여 수동작하는 방법이 더 효과적임을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 수술용 강선의 인장력 측정을 위한 측정센서 감지부의 변형을 해석하여 설계하고, 인장력 측정센서를 특성시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 강선의 직접접촉에 의한 압축변형과 굽힘변형을 이용하는 환상형 측정센서들은 국부적인 굽힘변형과 마찰 등의 영향으로 비직선성이 크며 하중이력 특성이 대단히 나빠서 감지부로 사용할 수 없고, 커버에 강선을 감아서 하중점을 통하여 하중을 전달하는 굽힘형 구조에서는 특성을 상당히 개선시킬 수 있었다.
- (2) 인장력 측정센서의 감지부에 대한 유한요소 해석값과 실험값이 잘 일치하였으며, 마찰을 고려했을 경우, 더욱 그 값이 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (3) 개발된 인장력 측정센서의 정격하중에서의 감도는 $2647/25(\mu\text{m}/\text{m})/\text{kgf}$ 이며, 비직선성은 1.31% FS, 하중이력은 5.74% FS, 재현도는 0.019% FS로 연구목적에서 요구되는 용도에 신뢰성 있게 이용될 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 개발된 측정센서는 강선의 종류 및 굽기, 표면상태에 큰 영향을 받지 않고 사용될 수 있으나 매듭위치는 출력에 큰 영향을 미치므로 두 개의 커버 연결부위를 매듭위치로 하고 측정하여야 한다.

참고문헌

- (1) Clarke Jr, R. P., Shea, W. D and Bierbaum, B. E., 1979, "Analysis of Pattern of Wire Fixation Failure and Complications," *Trochanteric Osteotomy*, No. 141, pp. 102~110.
- (2) Lukens, R. P, 1979, "Stainless Steel Flexible Wire for Surgical Fixation of Bone," *ASTM F-666*, pp. 239~110.
- (3) Schultz, R. S., Boger, J. W. and Dunn, H. K., 1988, "Strenth of Stainless Steel Surgical Wire in Various Fixation Modes," *Clin. Orthop.* No. 198, pp. 304~307.
- (4) Shaw, J. A. and Daubert, H. B., 1988, "Compression Capability of Cerclage fixation systems," *Cerclage Fixation Systems*, Vol. 11, No. 8, pp. 1169~1174.
- (5) 백종승 외 5인, 1987, 힘, 정밀측정교재 87-014, 공업진흥청 pp. 89~94.
- (6) 1992, "Errors Due to Wheatstone Bridge Non-linearity," *Technical Note TN-507*, Measurement Group, p. 1~4.
- (7) Dallyand, J. W. and Riley, W. F., 1987, *Handbook On Experimental Mechanics*, Chapter 2. Strain Gages, Society for Experimental Mechanics.
- (8) Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., 1992, *Mechanics of Materials*, 3rd ed., Chapman & Hall, London, pp. 665~685.
- (9) 전경철, 1995, "매듭방법과 굽기에 따른 수술용 철사 강도," 석사학위논문 충북대학교 의과대학.