

## 척추경나사의 최적설계를 위한 유한요소해석과 형상가공에 관한 연구

남기우\*, 장성민(인하대 대학원), 이성희(한국생산기술연구원), 조명우(인하대 기계공학과)

A study on the finite element analysis and machining methods for optimum design of pedicle screw system

K. W. Nam, S. M. Chang (Graduate School, Inha University), S. H. Lee(KITECH)  
and M. W. Cho (Department of Mechanical Engineering, Inha University)

### ABSTRACT

The objectives of this research are to develop lumbar and lower-thoracic pedicle fixation system for Korean patients. To achieve the aimed goals, first, optimized shape design process is performed, and finite element methods are applied to evaluate the mechanical strength of the developed fixation system. Second, appropriate machining experiments are carried out to develop optimum machining conditions for titanium alloys those are known as one of the most difficult-to-cut material. As the results of this research, new pedicle screw system, considering the morphological characteristics of Korean patients, is developed by applying the finite element analysis, optimum shape processing method and optimize design algorithm.

**Key Words** : 척추경나사 시스템(pedicle screw system), 유한요소법(finite element method), 절삭력(cutting force)

### 1. 서론

인체의 척추는 일상생활을 통하여 부가되는 다양하고 복잡한 하중을 지지하는 중요한 구조물로서, 사고나 선천적 영향에 기인한 손상 또는 변형은 인체의 활동에 지대한 영향을 미친다. 척추에서 흔히 발생하는 문제점은 low-back pain, 인위적 혹은 자연적인 척추 손상(spinal injury), 퇴행성 질병(degenerative diseases) 등을 들 수 있으며, 그 원인으로 여러 가지가 있을 수 있으나 그 중 역학적(mechanical) 요인이 가장 문제가 되는 것으로 알려지고 있다. 손상된 척추의 교정 및 고정을 위하여 척추경나사(pedicle screw)가 현재 가장 다양하게 사용되고 있으며, 이의 응용범위는 척추의 변형, 관절, 퇴행성병변 등 척추외과의 광범위한 분야에 적용되고 있다. 그러나 현재 대다수의 척추경나사는 수입에 의존하고 있는 실정이며, 국내의 몇몇 업체에서 개발하여 시판하고 있으나, 이에 대한 체계적이고 효율적인 설계 및 생산기술의 개발은 미흡한 실정이라 할 수 있다.

본 연구는 한국인의 형태학적 특성을 고려하여 기존의 외국제품에 비하여 시술이 용이하고 기계적 강도 및 체결력이 우수한 척추경나사를 개발하는데 목적을 두고 있으며, 이를 위하여 다음과 같은 내용의 연구가 진행되었다.

첫째, 한국인의 형태학적 특성 및 시술의

용이성을 고려하여 최적설계방법을 사용하여 형상설계를 하였다. 이 때, 기존의 제품은 척추에 나사를 삽입하여 체결할 때 3 또는 4 개의 부분을 조립하던 것을 2 개의 부품으로 완벽하게 체결이 가능하도록 설계하여 시술성을 대폭 향상시켰으며, 설계된 나사가 인체의 움직임에 대하여 지지할 수 있는 요구되는 기계적 강도를 유한요소법(FEM)을 사용하여 해석하였다. 둘째, 척추경나사의 재료는 생체적합성이 뛰어난 티타늄 또는 티타늄 합금을 사용하는 것이 일반적이나, 티타늄은 대표적인 난삭재의 하나로 이의 기계적 가공이 용이하지 않다. 따라서, 여러 가지 절삭조건에 따른 절삭력 및 표면거칠기의 변화를 실험을 통하여 최적가공조건을 도출하고자 하였다.

본 연구의 결과 한국인의 형태학적 특성에 적합한 척추경나사의 개발을 달성할 수 있었으며, 향후 지속적인 관련 기술의 개발 및 검증을 통하여 이의 성능향상 및 관련 의공학분야에의 적용도 가능하리라 사료된다.

### 2. 척추경나사의 설계 및 해석

#### 2.1 척추경나사의 설계

척추는 인체의 하중을 지탱하는 가장 핵심적인 구조이므로 인체의 운동형태에 따라 다양한 하중을 받는다. 척추의 형상(높이, 지름)은 연령, 인종 및 척추의 위치(경추, 흉추, 요추) 등에 따라

다양하게 변화하고, 동일인의 인체 내에서도 척추 마디의 위치마다 부가되는 하중의 특성도 변한다. 따라서 척추의 손상을 보정하기 위하여 사용되는 나사의 길이와 지름은 물론 나사의 형상도 이러한 다양한 특성을 고려하여 설계하여야 한다. 요구되는 기능에 적합한 척추경 나사의 형상을 결정하기 위하여 고려되어야 하는 설계인자들은 다음과 같다.

- 나사의 길이와 직경
- 나사산의 형상과 피치
- 나사의 머리모양
- 나사단면의 모양

나사의 길이와 직경 등은 인체의 척추모양에 따라 최대 가능한 길이와 직경이 제한되며, 이러한 범위 내에서 척추경나사는 시술된 척추부위의 하중 조건을 반복적으로 받으며, 이 때 척추에 미치는 영향을 최소화하고 삽입된 나사에 요구되는 기능이 저하되지 않고 견딜 수 있도록 가능한 한 작은 크기로 결정되는 것이 바람직하다. 또한 시술자의 편의성 또한 확보되어야 시술시의 오류를 방지하고 전체적인 시술시간을 단축할 수 있다. Fig.1 은 이러한 절차를 거쳐서 설계된 척추경나사의 형상을 나타내고 있다. 본 설계형상의 주요 특징은 기존의 제품이 3 개 또는 4 개의 부품을 순차적으로 조립하여야 하는 것을 개선하여 전체 부품은 3 개로 감소시키고 cap 에 미리 고정용 screw 를 장착하여 시술자가 2 개의 부품만 조립하면 시술이 완료되는 매우 편리한 구조로 되어 있다는 것이다.

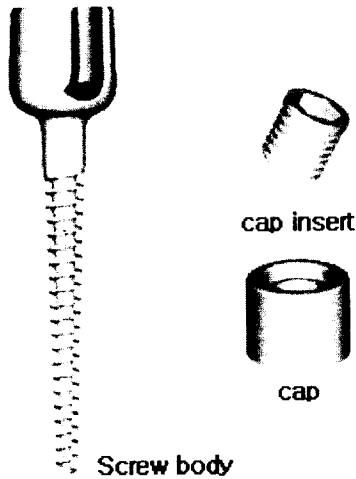


Fig. 1 3D modeling of pedicle screw

### 2.3 유한요소 해석

척추경 나사가 지지하여야 하는 하중조건으로는 시술의 편의성이 보장되는 한도 내에서 단기하중

및 장기반복하중에 대한 영향이 고려되어야 하나, 본 연구에서는 우선 단기하중 해석에 관한 결과를 도출하였다. 설계된 척추경나사의 해석을 위하여 생성된 3 차원 모델을 ANSYS 에서 불러들여 척추경 사가 인체에 고정되었을 때의 인장 및 굽힘에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 척추경나사의 재질은 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)이며, 재료의 기계적 물성치는 탄성계수가 113.8GPa, 포아송비가 0.342 이며, 재료의 인장 및 압축 항복강도는 790Mpa, 인장극한강도는 860Mpa 이다. 해석을 위해 인체에 고정되는 부위는 강체거동을 한다고 가정하였다. 따라서 실제 Fig.2 의 모델에서 screw 부분은 요소분할이 복잡해 지며, 본 해석에서 사용된 경계조건의 경우에는 screw 부의 형상이 전체적인 거동에 영향을 미치지 않으므로 Fig. 3 과 같이 단순화된 모델을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

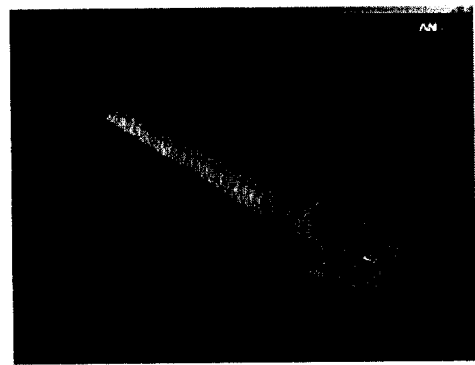


Fig. 2 Imported ANSYS solid model of pedicle screw

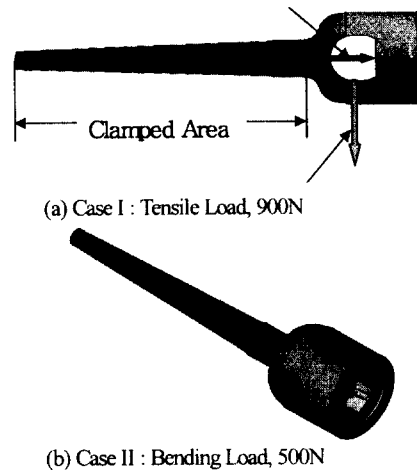


Fig. 3 Simplified ANSYS solid model and boundary conditions

척추경나사의 강도를 평가하기 위한 구조해석을 수행하기 위해서 Fig. 3의 솔리드 모델을 요소 분할 하였으며, 요소 분할된 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 사용된 요소는 Solid 95로 20개의 노드를 가지는 3차원 요소이며, 각각의 노드는 x, y, z 변위에 대한 자유도를 갖는다. 이러한 요소를 사용하여 Fig. 3에서와 같은 인장 및 굽힘조건에 대한 해석 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 표시된 값은 Von Mises Stress를 의미하며, USUM은 변형결과를 의미한다. 두 해석 결과에서 보듯이 척추경나사가 인체에 고정되는 부분에서의 응력범위가 대략 300MPa임을 알 수 있는데, 이는 재료의 항복응력(790MPa) 및 극한강도(860MPa)와 비교할 때 약 35% 정도 수준으로 구조적으로 안정함을 알 수 있다.

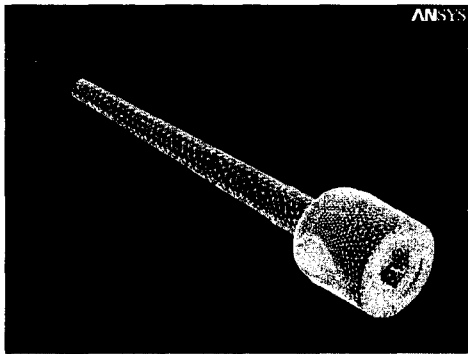


Fig. 4 Result of meshing for pedicle screw

Fig. 5 Tension test result of pedicle screw (upper: VON, lower: USUM)

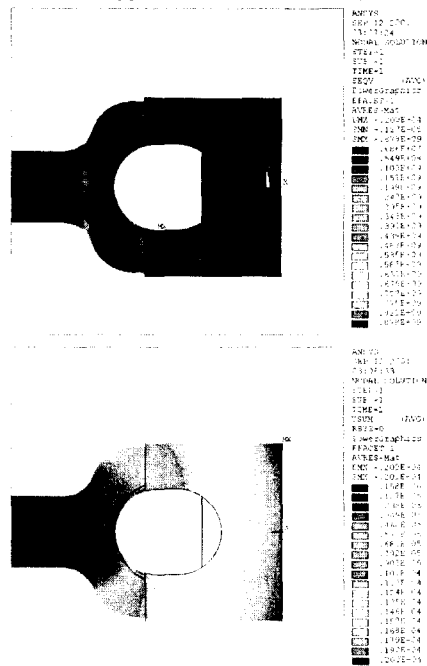


Fig. 6 Bending test result of pedicle screw (upper: VON, lower: USUM)

### 3. 가공특성 실험

본 연구에서 척추경나사의 소재로 사용된 티타늄 합금은 우수한 기계적 특성과 열저항 그리고 부식저항 때문에 의공학 재료 외에도 항공, 화학 그리고 선박 건조 산업에 널리 사용된다. 그러나, 티타늄 합금은 가공 중 발생하는 높은 절삭온도와 공구와 공작물간의 강한 부착성, 낮은 열전도와 높은 화학적 반응성 때문에 공구의 마모가 빠르게 진행되며, 이러한 이유로 대표적인 난삭재의 하나로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 티타늄을 재료로 사용한 척추경나사의 생산에 필수적인 공정인 선반가공에서 절삭조건에 따른 절삭력 및 표면거칠기의 거동을 분석하여 티타늄 재료의 가공특성을 실험적으로 연구하였다.

#### 3.1 실험장치 및 방법

티타늄의 가공특성 시험을 위한 시스템 구성은 Fig. 7과 같으며 시편의 기계적, 화학적 성분 분석은 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

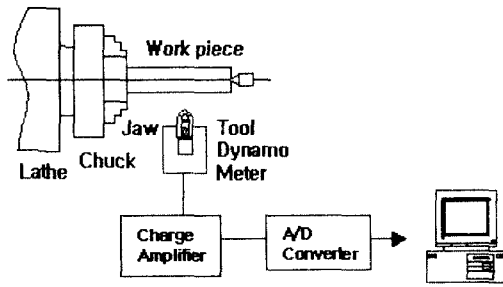


Fig. 7 Test equipments for experiments of machining characteristics of Ti-6Al-4V Alloy

Table 1. Mechanical properties of specimen

Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yielding strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Contraction (%)
101	90	16	51

Table 2. Chemical compositions of specimen

Chemical composition (%)						
Fe	Al	C	H	O	N	V
0.21	5.80	0.08	2.48	0.004	0.0001	4.19

### 3.2 절삭력 실험

티타늄 재료를 이용하여 가공특성을 알아보기 위해 Table 3과 같은 조건으로 선반가공 실험을 수행하였다. 본 실험에는 실제 척추경나사를 생산하기 위한 재료와 동일한 크기의 시편이 사용되었으며, 건식가공조건에서 수행되었다.

Table 3. Cutting conditions

Cutting velocity (m/min)	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/rev)
16~56.5	0.5~2.0	0.418~0.97

본 실험에 사용된 공구는 고온경도가 높고 내마모성이 양호한 코팅한 초경합금 공구(rake angle=-5°, nose radius=0.8)를 사용하였으며, 절삭력 측정을 위해 Kistler 공구동력계(5011)와 charge amplifier(9272)를 사용하였다. 절삭력을 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 양호한 표면거칠기를 가지는 절삭속도 56.5m/min에서 절삭깊이 0.5mm 일 경우와 절삭속도 16.02m/min에서 절삭깊이 2mm 일 때 각각 이송에 변화를 주어 주절삭력을 측정된 결과를 나타내었다. 주어진 조건에서 절삭력을 측정된 결과 양호한 표면거칠기 결과를 주는 절삭에서는 주절삭력의

변화가 거의 선형으로 나타났으며, 절삭속도와 절삭깊이가 큰 경우 주절삭력의 값은 이송속도 0.314mm/rev 이상에서는 변화가 거의 없었다. Fig. 9는 절삭속도 56.5m/min, 절삭깊이 0.5mm와 절삭속도 16.02m/min, 절삭깊이 2.0mm에서의 이송속도에 따른 표면거칠기의 변화를 나타내고 있다.

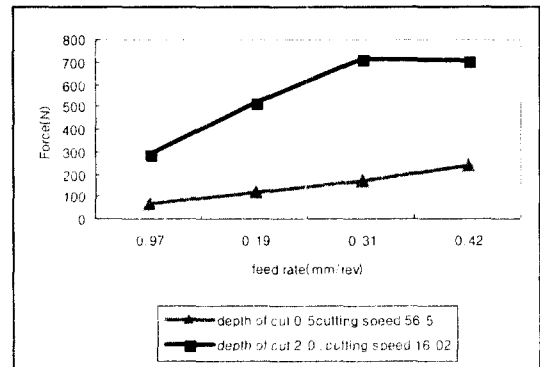


Fig. 8 Effect of feed rate variation to the cutting force

### 3.3 표면 거칠기 실험

테이블에 나타난 것과 같이 절삭깊이 2.0mm에 이송속도 0.418mm/rev에서는 표면거칠기 값의 차이가 불규칙적인 형태로 나타나는데, 이것은 재료의 직경의 급격한 감소로 인하여 발생하는 공작물의 좌굴현상에 원인이 있는 것으로 판단되며 절삭속도 56.5m/min에서의 이송속도 0.97mm/rev에서는 Ra3μm에 비교하여 표면거칠기의 변화가 가장 안정적이고 양호한 것을 알 수 있다.

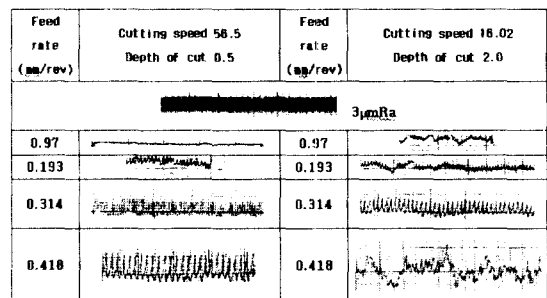


Fig. 9 Results of surface roughness of machined specimen

## 4. 결론

본 연구는 척추경나사 시스템 개발에 필요한 설계방법과 형상가공에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 설계된 척추경나사 모델에 대하여 정적하중 조건에서 유한요소해석을 했을 때, pulling,

bending test 모두 티타늄 합금의 항복응력을 넘지 않았다. 이는 일반적인 경우, 사람의 움직임과 체중에 의해 일어나는 하중에 의해 나사의 뺨힘 현상이나 파손 등이 일어나지 않는 것을 의미한다. 따라서 이 모델은 척추고정에 있어서 기대 성능 이상의 기능을 할 것으로 사료된다.

2. 난삭재인 티타늄합금의 가공성 실험을 수행한 결과, 절삭속도가 빠르고 절삭깊이가 작은 경우의 절삭력 값은 절삭속도가 느리고 절삭깊이가 큰 경우에 비해 작게 나타났으며, 특히 이송속도 0.314mm/rev 이상에서 절삭깊이에 의한 절삭력의 변화는 거의 차이가 없었다. 이론적으로 절삭깊이는 표면거칠기에 영향을 주지 않지만 실제로는 공작물과 공구간에 발생하는 채터링 현상으로 인하여 절삭깊이가 너무 깊은 경우 표면거칠기는 악화되며, 특히 본 연구에서와 같이 직경이 작은 공작물의 경우에 공작물의 좌굴현상으로 표면 조도의 상태가 불규칙하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 이송속도와의 관계는 이송속도가 작을수록 공작물의 표면상태는 가장 양호하게 나타났다

Materials Processing Technology, Vol.100, pp.80 – pp.86

10.Shane Y.Hong, Irel Markus, Woo-cheol Jeong, 2001, "New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V", International Journal of Machine Tools & Macnufacture, Vol. 41, pp.2245 - pp.2260

### 참고문헌

- 1.서울대학교 차승익 외, 1998, "척추궁 뿌리 나사못 삽입에 따른 변화 및 역학적 강도에 관한 연구", 대한정형외과학회지 제 31 권 제 1 호 pp.42 - pp.51
- 2.서울대학교 정준모 외, 1995, "비선형 3 차원 유한요소 모델을 이용한 동적 충격하중 상태에서 요추의 응력분포의 해석", 대한정형외과학회지 제 30 권 제 4 호 pp.795 - pp.807
- 3.Vijay K. Goel, John M. Winterbottom and James N. Weinstein, 1994, "A method for the fatigue testing of pedicle screw fixation devices", J. of Biomechanics, Vol.27, No.11, pp.1383 - pp.1388
4. John M. Gorup, MD, Courtney Brown, MD and David Donaldson, MD, 1996, "The biomechanics of transpedicular fixation", SPINE : State of the Art Reviews, Vol. 10, No. 3, pp.489 - pp.495
- 5.연세대학교 김남현 외, 1990, "한국인 척추궁뿌리의 형태계측학적 연구", J. of Korean orthop. Assoc. Vol. 25, No. 4, pp.1199 - pp.1207
- 6.Micheal R. Zindrick, MD and Leon L. Wiltse, MD, 1987, "Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles", SPINE . Vol. 12, No. 2, pp.60 - pp.166
- 7.이순옥, 송정일 외 1999, "후방 척추고정기구의 평가 및 jig 설계", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 517 - pp. 522
- 8.홍우표, 김형철 외, 2000, "Ti-6A-4V 타이타늄 합금의 선삭특성", 한국정밀공학회추계학술대회 논문집 pp. 818 – pp. 822
- 9.Z. A. Zoya, R. Krishnamurthy, 2000, "The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys", J of