

척추경 나사못 고정시스템의 피로하중 영향

Effects of locking system of pedicle screw on the fatigue loading

이순욱¹⁾, 송정일¹⁾, 배성인¹⁾, 안면환²⁾
S.W.Lee¹⁾, J.I.Song¹⁾, S.I.Bae¹⁾ and M.H.Ahn²⁾

1)창원대학교 기계공학과, 2)영남의대 정형외과

Keywords : Pedicle Screw, One Level System, Locking System, Fatigue Loading, Bending Direction, Thread Direction,

Abstract

The purpose of this study is to verify the relations with the fatigue life and stress distribution on the screw thread for thoracic and lumbar spine. These screws are now developed for Korean in this research group. The fatigue life of single screw was found longer than that of up-left-screw, but shorter than that of up-right-screw. The fatigue life of screw used was associated with the angle between bending and thread direction. In the case of upper left and right screw were fractured in the region of one pitch and two pitch of the thread valley from the shank of pedicle screw, respectively.

1. 서론

척추경 나사못의 개발은 Broucher가 척추 고정 시 척추경(pedicle)을 통하여 추체(vertebra body)로 나사못을 삽입한 아래 Roy-Camille^[1]등, Krag^[2]등에 의해 개발되었다. 이러한 척추경나사못을 이용한 척추고정의 장점은 Harrington, Luque시스템에 비하여 강력한 고정력으로 척추기형의 교정에 큰 효과가 있고, 적은 관절의 척추유합으로 운동가능 부위를 더 많이 보존할 수 있다는 것이다.

기존의 논문에서는 대부분 척추의 골밀도(bone density), 척추경의 해부학적 특성(anatomical characteristics of pedicle), 나사못의 특성(나사못의 굵기, 모양, 나사산의 높이 및 간격, 나사산 모양, 나사산의 간격 등) 및 수술 수기에 따른 고정력의 차이^[3-6]와 one-level system에서의 생역학적 시험에 관한 연구^[7,8]와 jig를 이용한 시험^[9,10]이 있어왔지만 one-level system에서의 피로하중에 대한 시험이 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 척추 후방 내고정기구로 널리 사용되는 척추경 나사못 고정시스템의 개발 및 상품화의 일환으로 현재 개발되고 있는 국산 척추경 나사못, one level system에서 피로하중을 받을 때 발생하는 생역학적특성을 파악하는 것이다. 정하중에 대한 앞선 연구들은 하중에 대한 변위가 봉(rod)에 의해서 대부분 발생하지만 실제 피로하중에 의한 파괴는 나사골부분에서 많이 발생한다. 그러므로 봉에 대한 정하중 시험보다 중요한 것이 나사골 부분에 대한 피로수명 예측이라고 볼 수 있다.

종래의 연구에^[9,13] 따르면, 손상된 척추의 상부 척추체에 삽입된 척추경 나사못이 손상된 척추의 하부에 삽입된 척추경 나사못 보다 큰 하중을 받는다. 따라서 피로하중에 의한 파괴도 상부 척추경 나사못에서 먼저 발생한다. 하지만 기존의 생역학적 연구에서는 상부의 척추경 나사못에 동일 하중이 작용하는 것만 고려하였으며 실제로 나사에 나타나는 응력에 대해서는 언급이 없었다.

그러므로, 본 연구에서는 one level system의 피로하중 시험시 상부 척추경 나사못에서 균열이 발생하는 피로주기(fatigue cycle)를 왼쪽 나사와 오른쪽 나사로 나누어서 연구하였으며, 그 결과를 단일 스크류의 굽힘 시험결과와 비교하였다. 또한 이들 데이터의 비교 결과로부터 상부 척추경 나사못에 작용되는 응력과 피로수명을 굽힘 방향과 나사산 방향의 사이각(β)으로 설명하였다.

2. 시험재료 및 Jig

2.1 시험재료

시험재료로는 Fig.1에서 처럼 현재 개발중인 국산 척추경 나사못을 사용하였다. 국산 나사못의 종류는 두 가지이며, Table. 1은 STS316L과 Ti6Al4V의 기본 물성치를 나타낸 것이다.

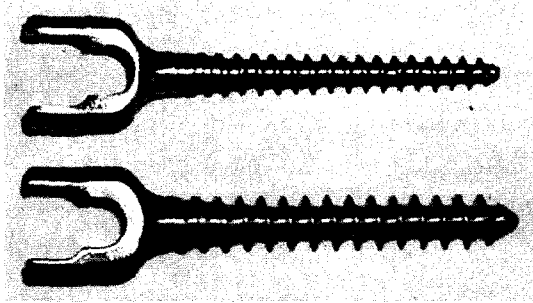


Fig. 1 Conical(U) and cylindrical(D) shape screw

Table 1. Material property of STS316L and Ti6Al4V

Material	E (GPa)	σ_y (MPa)	Elongation(%)
STS316L	193	380	45
Ti6Al4V	160	855	10

2.2 시험지그

Fig.2는 single screw test jig(L)와 upper-level system test jig(R)를 나타낸다. one-level system test(OLT) jig는 column부분과 상하부 assembly부분으로 이루어져있다. 상부 assembly는 상하 운동과 회전운동이 가능하며 하부 assembly는 회전운동만 가능하다. 측면부 column부분은 상하부 assembly의 상하 운동 및 회전 운동이 가능하도록

홈이 파져있다. ULT는 OLT에서 봉의 영향을 없애기 위해 상부 screw들을 jig에 고정시키도록 설계하였다. 같은 추체(vertebra body)에서 척추경 사이각은 30° 로 고려하였다. Single screw test jig는 단순히 나사못의 머리부분을 고정할 수 있도록 설계되어있다.

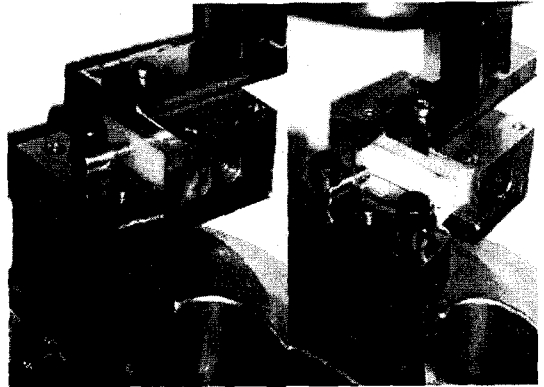


Fig.2 Single screw(L) and ULT(R) jig for fatigue

3. 실험방법

본 연구에서는 피로시험기(MTS810, USA)를 이용하여 각 screw의 강성도(stiffness)시험과 피로시험을 각각 수행하였다. 단일 나사못 시험은 척추경 나사못을 초고밀도폴리에틸렌(UHMWPE)에 삽입한 후 나사두부(screw head)에서 40mm되는 지점에 상부지그를 고정하여 정하중 및 피로하중을 가하였다.

Upper level system test에서는 척추경 나사못을 assembly내의 초고밀도폴리에틸렌에 삽입을 한 후 나사가 삽입된 곳에서 40mm되는 지점에 피로하중을 가하였다. Bone 대체물 변화에 따른 나사못 골(thread valley)부분에서의 응력분포를 확인하기 위한 시험으로 초고밀도폴리에틸렌 대신 MC 나일론을 이용하였다.

실제 수술시 척추경 나사못을 완전히 삽입하는 것이 좋으나 임상시 1 Pitch(피치)를 남겨놓고 삽입하는 경우가 종종 발생한다. 이와같은 임상조건을 고려하여 본 연구에서는 나사의 삽입 시 1피치

를 남겨두고, Table.2와 같은 조건으로 피로시험을 수행하였다.

Table.2 Loading conditions of fatigue test

	$P_{min}(kN)$	$P_{max}(kN)$	R	Hz
Thoracic	-165	-16.5	0.1	2
Lumbar	-250	-25	0.1	2

4, 결과 및 고찰

4.1 Single Screw Bending Test(SSBT)

Fig.3은 SSBT의 시험결과를 나타내며, 재질이 STS316L인 thoracic screw에서는 시험변위 25mm 까지 소성 변형만 발생했으며 나사골 부분에서의 파단은 발생하지 않았다. Ti6Al4V로 제작된 lumbar screw의 경우에는 시험 변위가 20mm인 지점에서 표면에서 크랙이 발생하여, 전체 응력이 크게 감소하는 결과를 나타냈다. Table.3 에서는 Fig.3의 시험 결과를 screw의 굽힘에 대한 항복하중 및 극한강도로 나타내었다.

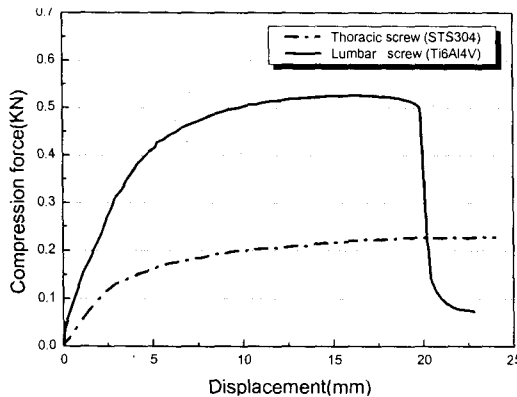


Fig.3 Bending moment test for single screw

Table 3. Material property for bending moment

Material,	Yield Strength (kN)	Displacement (mm)	Ultimate Strength(kN)
STS316L	0.126	2.716	0.227
Ti6Al4V	0.4	4.757	0.527

※Cantilever arm length = 40mm

4.2 Single Screw Fatigue Test(SSFT)

단일 나사에 작용하는 하중 결정은 인체의 상반신 하중을 고려하여 thoracic screw의 경우는 최대 하중을 165N로 하였으며 lumbar screw의 경우는 최대 하중을 250N으로 정하였다. Screw에 작용되는 피로하중은 인체의 보행에 의해서 이루어지므로 load ratio를 0.1로 하여 피로하중의 진폭을 결정하였다. 즉, 피로하중은 P_{min} 과 P_{max} 를 모두 압축으로 주었다. 시험 결과 thoracic screw에서는 피로주기가 34000에서, 그리고 lumbar screw에서는 10400에서 파단되었다. 두 가지 경우 모두 파단은 나사골 부분에서 발생하였으며 나사가 삽입된 초고밀도폴리에틸렌의 표면에서 2 pitch 아래부분에서 피로균열이 개시(crack initiation)되었다.

4.3 Double Screw Fatigue Test(DSFT)

DSFT(Double Screw Fatigue Test)는 one-level locking system 실험시 하나의 추체(body)에 나사못이 두 개 삽입된 상태의 의미하며, 이때는 SSFT시 하중의 2배를 적용하였다. Fig.4는 USFT 시험후의 파단된 나사못을 나타낸 것이며, 두 가지 나사(thoracic, lumbar)의 경우 모두 상부 왼쪽의 나사부터 파단되는 결과를 보였으며, crack 발생부는 좌우가 다른 결과를 보였다. 즉, 상부 왼쪽 척추경 나사못(Upper Left Screw : ULS)의 경우에는 초고밀도폴리에틸렌의 삽입부 1 pitch 아래부분에서 파단되는 반면, 상부 오른쪽 척추경 나사못(Upper Right Screw : URS)은 초고밀도폴리에틸렌 삽입부의 2 pitch 아래부분에서 파단이 발생하였다.

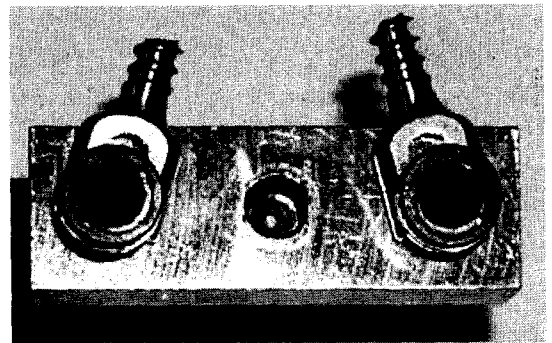


Fig.4 Typical photo after DSFT

Thoracic screw의 경우, 상부 왼쪽나사는 30,000cycle 에서, 상부 오른쪽나사는 40,000cycle에서 피로균열이 발생되기 시작하였다. Lumbar screw는 상부 왼쪽나사가 9,000 cycle 에서, 상부 오른쪽나사는 12,600 cycle에서 각각 파단되었다.

Bone 대체물 변화에 따른 피로시험 하중은 P_{min} 이 -500N, P_{max} 은 -50N을 작용시켰다. Bone 대체물로 초고밀도폴리에틸렌 사용시 상부 왼쪽나사는 삽입된 면으로부터 1pitch 안쪽의 나사골에서 피로파단되었지만, MC의 경우는 나사삽입부, 즉 삽입된 표면과 접촉부의 나사골에서 파단되었다. 이것은 MC의 물성치(탄성계수, 항복강도)등이 초고밀도 폴리에틸렌보다 높아서 삽입된 부분에서의 변형이 작게 발생하였음을 의미한다.

Table.3은 단일나사와 두 개의 나사(double screw system)를 이용한 피로시험시 각각의 피로수명을 비교한 것이다.

Table.4 Fatigue fractured cycles of each screw

	DLS	SS	DRS
Thoracic	40,000	34,000	30,000
Lumbar	12,600	10,400	9,000

DL(R)S : Double Left (Right) Screw, SS : Single screw

비교 결과 SS의 피로수명은 DLS와 DRS의 중간 수명임을 알 수 있는데, 이것은 굽힘모멘트의 방향과 나사산의 방향각에 의해서 결정된다. 그리고 피로하중시에는 나사못의 상부에는 인장력이, 하부에는 압축력이 작용되는데 이 경우 인장응력이 동일 하중인 압축응력보다 빠른 균열발생을 유발시키므로[14] 상부 응력을 잘 관찰해야한다.

Fig.5는 단일나사의 피로시험시 굽힘 방향과 나사산의 접선방향을 나타낸 것이며, Fig.6은 double screw system을 마찬가지로 나타내었다. Fig.5와 Fig.6에서 사용된 변수는 나사산의 방향과 굽힘방향 사이의 각(β)이다. Fig.7은 실제 나사를 그림의 윗쪽 부분을 나사산 방향으로 최대응력이 작용하는 나사골 부분을 따라서 파단된 그림이다. 그림에서처럼 윗 부분은 나사골 부분과 접하게 되고 아랫부분은 나사산과 다시 만나게 된다. 즉, 단면을 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데 Fig.7에서 가운

데의 원형 부분과 나사산의 단면부분에 해당하는 영역으로 나눌 수 있다. 여기서 원형 부분은 피로수명 예측을 위한 기본 형상단면(원형)이며, 나사산의 단면부(사선)는 응력이 집중되어 피로수명을 저하시킬 수 있다. 나사산의 단면부 형상은 피로시험시 굽힘 방향과 나사산의 접선 방향사이의 각(β)에 의해서 결정되어진다.

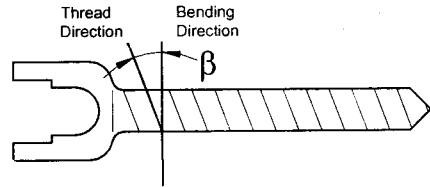


Fig.5 The angle(β) of bending direction and thread direction for single screw

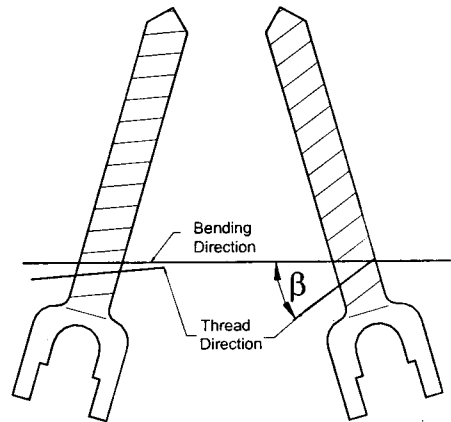


Fig.6 The angle(β) of bending direction and thread direction for upper level system

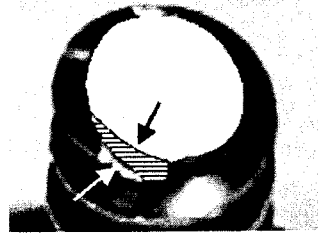
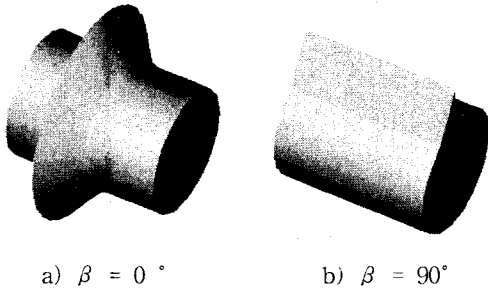


Fig.7 Fractured surface of pedicle screw

Fig.8은 β 와 수명과 관계를 관찰하기 위해 β 가 가장 작을 때인 0° 와 가장 클 때인 90° 인 경우를 비교하기 위하여 도식화한 것이다.



a) $\beta = 0^\circ$ b) $\beta = 90^\circ$
 Fig.8 The angle(β) of bending direction and thread direction

그림에서와 같이 β 가 0° 인 경우에는 나사골 부분에서 응력집중 현상을 발생시켜서 피로수명을 저하시킬 수 있으며, β 가 90° 인 경우에는 나사산이 보강재(rib) 역할을 하여 피로수명을 향상시키는 역할을 한다. 그러므로 실제 실험에서도 단일 나사의 피로시험이 double screw system 시험시 상부 왼쪽 나사보다는 수명이 길었고, 상부 오른쪽 나사보다는 수명이 짧았다.

Bone에 삽입된 척추경 나사못이 피로하중을 받을 경우 척추경 나사못은 나사골 부분에서 피로파괴가 일어난다. 하지만 경우에 따라서 나사의 삽입 부로부터 1 pitch 아랫부분에서 파괴가 일어날 수 있으며, 또는 2 pitch 아랫부분에서 파괴가 일어날 수도 있다. 이처럼 피로 파괴가 일어나는 나사골 부분은 여러 가지 요인에 의해서 결정되지만 본 연구에서는 bone 대체물의 물성치와 척추경 나사못 삽입 각도에 따른 screw의 굽힘강성 변화에 중점을 두었다.

결과적으로 bone 대체물의 강성이 높아질수록 삽입부 표면쪽의 나사골에서 파괴가 일어났으며 척추경 나사못의 삽입 각도 변화에 의해 굽힘강성이 좋아질수록 삽입부보다 더 깊은 나사골에서 파괴가 일어났다. 즉 피로하중에 의한 나사골 파괴부분은 bone 대체물의 stiffness에는 반비례하고 나사못의 굽힘 강성에 대해서는 비례하는 결과를 보였다. 예를들면, 이것은 bone 대체물이 rigid body로 가정할 경우, 삽입된 척추경 나사못은 bone 대

체물내부에서는 파단이 일어나지 않고 삽입부 표면에서 발생할 것이다. 다른 예로, 척추경 나사못만 rigid body로 가정한다면 이 경우에는 척추경 나사못에서는 피로파괴가 일어나지 않는다는 것을 의미한다.

Fig.9는 피로파괴 나사골 pitch와 bone 대체물의 강성(stiffness)과 척추경 나사못의 강성을 비교하여 설명한 것이다. 그림에서 계단 함수로 나타나는 것은 피로파괴가 항상 나사골 부분에서 발생하기 때문이다.

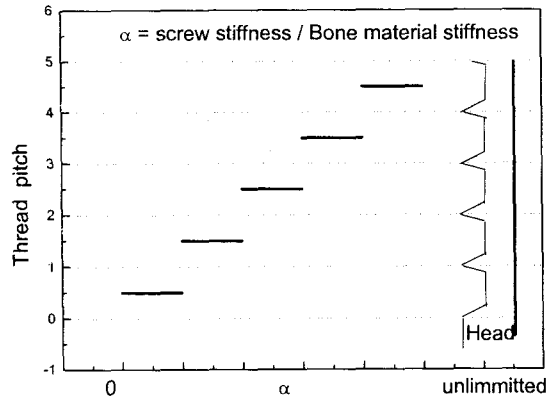


Fig.9 Fractured thread valley by fatigue test

5. 결론

본 연구는 척추경 나사못의 피로수명에 관한 연구로서, 단일 나사와 double screw system을 이용하여 피로하중실험 후 이에 관한 수명을 나사산 방향과 벤딩방향 사이의 각으로 설명을 하였다.

1) 나사의 재질변화에 따른 정하중 실험 결과 단일 나사 사용시 굽힘시험에서는 Ti6Al4V인 lumbar screw에서 높은 항복강도와 인장강도를 나타냈으며, 이 경우 lumbar screw는 변위가 20mm 근방에서 파단되었지만 연성재료인 STS316L로 제작된 thoracic screw는 사용 jig의 변위 한계까지 파단이 발생하지 않았고 소성 변형만 발생하였다.

2) Double screw system의 피로시험결과 척추경 나사못의 피로수명은 동일 하중이라고 하더라도 나사산 방향과 굽힘방향에 따라서 크게 변화하였는데, 왼쪽에 삽입된 나사의 경우 나사골 부분에서

의 응력집중 현상에 의해서 피로수명이 짧아지고, 오른쪽에 삽입된 나사에서는 나사산이 보강재(rib) 역할을 해서 피로수명이 길어졌다. 결과적으로 단일 나사못의 피로수명은 double screw system의 왼쪽나사보다는 증가하였고 오른쪽 나사보다는 감소하였다.

3) Bone 대체물의 비교시 강성이 높을수록 피로 파괴가 일어나는 나사골 부분은 삽입부 표면에 가까웠고, screw의 굽힘 강성이 클수록 삽입부 표면의 안쪽에 삽입된 나사골 부분에서 피로파괴가 발생하였다.

본 연구는 보건복지부 1999년도 기술개발과제 (HMP-98-2-046-a)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Roy-Camille R. et al, "Osteosynthesis of thraco lumbar spine fractures with metal plate screwed through vertebral pedicles", Reconstr. Sur. Traumatol 1976;15
- (2) Krag M H, et. al "An internal fixation for thoracic, lumber or lumborsacral spine", Clin. Orthop 1986; 203:75
- (3) 유명철, "척추경 나사못의 고정력에 대한 생역학적 연구", 대한정형외과학회지, 1995;30-3: 495
- (4) 송정일, 이순욱 등 "척추경 나사못 설계를 위한 요소연구", 대한의용생체공학회 98추계학술대회는 문집, 1998; 20-2:PA22-23
- (5) Panjabi MM, "Three-dimensional mathematical model of the human spine structure", J Biomech, 1973; 6-71
- (6) Panjabi MM, "Mechanical Behavior of the Human Lumbar and Lumbosacral Spine as Shown by Three-Dimensional load-Displacement Curves", The Journal of bone and joint surgery, 1994; 76A-3
- (7) A.T.Rahmatalla, "A pedicle screw bridging device for posterior segmental fixation of the spine: preliminary mechanical testing results", The journal of Biomechanical Engineering, 1991. Vol13. March
- (8) Masahiro Chiba, "Short-segment Pedicle instrumentation", Spine, 1996; Vol21:288-294
- (9) Roger C. Duffield, "Longitudinal element size on load sharing, internal loads and fatigue life of tri-level spinal impalnt constructs" Spine, 1993, Vol18.No12.:1695-1703.
- (10) 왕진만, "척추경 나사못과 후궁 갈고리를 이용한 흉요추부 골절의 수술적 치료" 대한외과척추학회지, 1998, Vol5.No1.:62-69
- (11) 유재원 "단분절 후방척추 고정술에서 추궁판 갈고리 추경 나사못 추가고정의 생체역학적 연구"
- (12) 이종서, "장분절 후방 척추 기기술에서 다분절 갈고리와 나사못 고정에 관한 생체역학적 연구" 대한척추외과학회지, 1997, Vol4.No2:212-222
- (13) Chiba M, McLain RF, Yerby SA, Moseley TA, Smits and Benson DR, "Short-segment pedicle instrumentation : Biomechanical analysis of supplemental hook fixation", Spine, 21:288-294, 1996
- (14) H.O.Fuchs and R.I.Stephens, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons, 1980