

척추경 나사못의 디자인이 고정력 및 구동 토크에 미치는 영향 분석: 이중 나사 및 이중 피치 나사

최선각 · 차은중 · 김경아 · 안운호

충북대학교 의용생체공학과

Mechanical Performance Comparison of Pedicle Screw Based on Design Parameters: Dual Lead and Dual Pitch

Sun-Gak Choi, Eun-Jong Cha, Kyung-Ah Kim and Yoon-Ho Ahn

Department of Biomedical Engineering, Chungbuk National University

(Manuscript received 10 April 2018 ; revised 24 May 2018 ; accepted 28 May 2018)

Abstract: One of the most common problems with pedicle screw system is pullout of the screw. This study was performed to evaluate the pullout strength and driving torque of newly designed pedicle screws. The design of three type screws were standard pedicle screw, which had single lead threaded and single pitched design (Type A), single pitched and dual lead threaded pedicle screw (Type B), dual pitched and dual lead threaded pedicle screw (Type C), respectively. The tests were performed in accordance with the ASTM standards using polyurethane (PU) foam blocks. There was no significant difference in pullout strength among three types of screw. Type B and Type C exhibited higher insertion torque and removal torque than Type A, respectively ($p < 0.05$). Pedicle screws newly developed with dual pitched and dual lead threaded design showed higher driving torque without decrease in pullout strength compared to the standard pedicle screw and could be inserted more rapidly with the same number of revolutions.

Key words: Pedicle screw, Pullout strength, Driving torque, Dual lead, Dual pitch

1. 서 론

척추 측만증(scoliosis), 퇴행성 디스크 질환(degenerative disc disease), 척추 골절(vertebral fracture) 등 척추 질환을 가진 환자들은 척추 고정술(spinal fixation)로 광범위하게 치료되고 있다. 척추 고정술을 이용한 치료 중 척추경 나사못 시스템(pedicle screw system)이 일반적으로 가장 많이 사용되며, 이와 관련된 문제점으로는 나사못의 이완(screw loosening), 뽑힘(screw pullout), 파단(screw failure) 등이 있다[1,2].

현재까지 척추경 나사못의 뽑힘 문제를 피하기 위해 다양

한 연구 결과가 발표되었다. 척추경 나사못은 원추형 코어(conical cored), 원통형 코어(cylindrical cored), 확장형(expandable), 피치(pitch) 등 다양한 설계 인자들이 있다 [3-7]. 이들 중, 고정력(pullout strength)만을 고려했을 때 확장형 나사못의 성능이 가장 우수한 것으로 여겨진다. 그러나 확장형 나사못은 체내 삽입 후에 나사산 부분이 확장되기 때문에 고정력이 증가하지만 수술 후 나사못의 확장된 부분으로 골 조직이 침투(bone ingrowth)하기 때문에 재수술 시 나사못을 제거하는데 문제점이 있는 것으로 보고되었다[4].

최근에는 척추의 해부학적 구조에 적합한 이중 피치 나사(dual pitched screw) 제품들이 개발되고 있다. 이중 피치 나사 제품은 척추의 전방 추체(anterior body) 뼈와 후방 추체(posterior body) 뼈의 구조와 물성이 다른 특징을 이용하여, 각 추체의 고정에 적합한 피치를 적용한 기술이다 [1]. 또한 의사들의 수술 속도를 증가시키기 위해 다중 나사(multi-start lead threaded screw) 제품들도 개발되고 있

Corresponding Author : Yoon-Ho Ahn
Department of Biomedical Engineering, Chungbuk National University 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea
TEL: +82-2-6717-2802
E-mail: hoya2510@gmail.com

다[8]. 단일 나사(single lead threaded screw) 제품은 나사의 시작점이 하나이며 연속적인 반면 다중 나사 제품은 나사의 시작점이 여러 개로 비연속이다. 일반적으로 동일한 피치일 때 시작점의 개수에 비례하여 삽입 속도가 빨라질 수 있다. 하지만 이중 피치 및 이중 나사(dual lead threaded screw)가 척추경 나사못의 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이중 나사 및 이중 피치 구조를 가지는 척추경 나사못을 개발하고 기존의 척추경 나사못과 함께 기계적 성능 시험을 수행하였다. 기계적 성능은 척추경 나사못의 주요 성능이라고 할 수 있는 고정력(pullout strength)과 구동 토크(driving torque)를 ASTM 규격[9]에 따라 수행하고 정량적으로 비교 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 척추경 나사못의 디자인(Design of Specimens)

본 연구에서는 그림 1와 같이 세 가지 다른 척추경 나사못을 설계하였다. 모든 척추경 나사못은 5.5 mm 외경과 30 mm 길이로 설계되었으며 티타늄 합금(Ti6Al4V)으로 제작하였다.

Type I(그림 1-a)은 가장 흔히 사용되는 단일 나사 및 단일 피치(single pitched) 형태이며, 새롭게 설계된 척추경 나사못의 결과를 비교하기 위한 대조군으로 설정하였다. 나사못의 피치는 2.4 mm이며, 코어(core)는 혼합형 구조(conical+cylindrical)로 설계하였다.

Type II(그림 1-b)는 이중 나사 및 단일 피치 형태이며, 나사못의 주행속도(driving speed)를 높이기 위해 설계하

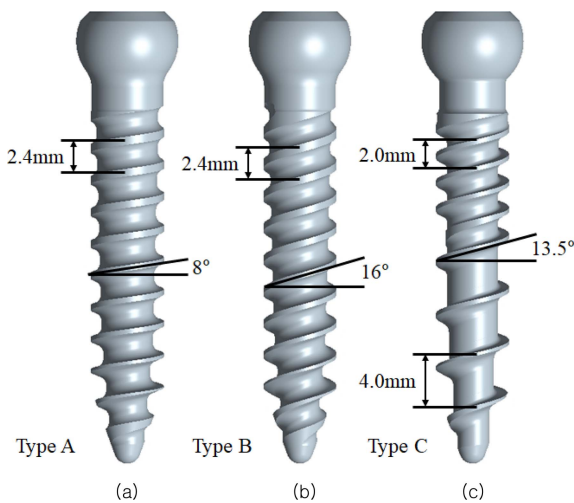


그림 1. 척추경 나사못의 디자인 요소 비교. (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C.

Fig. 1. Design factors of pedicle screws. (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C.

였다. 나사산의 모양(helix), 피치, 코어는 대조군(Type A)과 동일하며 헬리컬 각도는 16°로 2배 증가시켰다.

Type III(그림 1-c)는 이중 나사 및 이중 피치 형태이며, 나사못의 주행속도를 높이고 척추경의 해부학적 요소를 고려하여 고정력을 향상시키기 위한 의도로 설계하였다. 나사산의 코어는 대조군(Type A)과 동일하며, 헬리컬 각도는 13.5°이다. 원위부(distal)의 피치는 4 mm이며 척추경 나사못 삽입 시 척추의 해면골(cancellous bone)에 위치한다. 반면 근위부의 피치는 2 mm이며 척추경 나사못 삽입 시 척추의 치밀골(cortical bone)에 위치하게 된다.

척추경 나사못에 동일한 회전수를 적용하였을 때 삽입되는 길이를 그림 2에 나타냈으며 이중 피치 디자인과 척추골 사이의 관계를 그림 3에 나타내었다.

2. 기계적 성능 시험(Mechanical performance test)

(1) 일반 사항(General)

척추경 나사못의 고정력 및 구동 토크를 평가하기 위해 관련 시험 규격(ASTM F543-17)에 따라 기계적 성능 시험을 수행하였다[9]. 시험 블록은 ASTM F1839-08(2016)에서 규정하고 있는 정형외과용 표준 시험 매체인 Polyurethane(PU) foam 블록(Sawbones®, Solid foam, 20pcf)을 사용하였으며[10], 만능재료 시험기 (Bionix 858, MTS Systems Corp., MN, USA)를 이용하여 측정하였다.

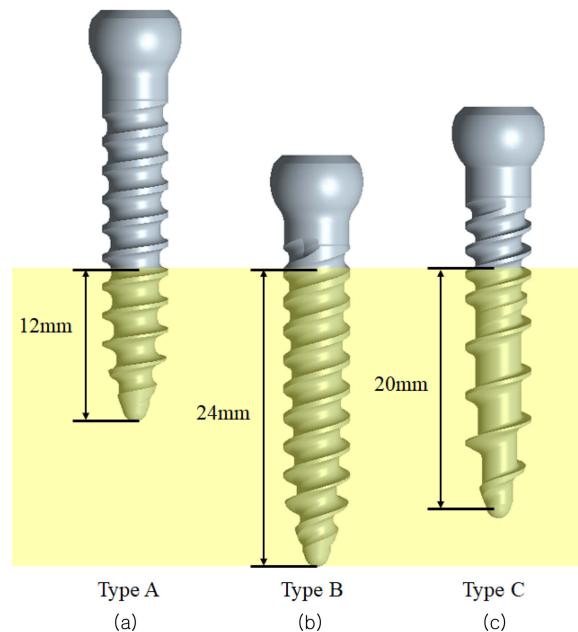


그림 2. 동일한 회전 수 일 때 척추경 나사못의 삽입 거리 비교. (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C.

Fig. 2. Comparing insertion distance of pedicle screws with the same number of revolutions. (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C.

(2) 고정력 시험(Pullout test)

시험 블록에 직경 3.2 mm의 파일럿 홀(pilot hole)을 만든 후, 척추경 나사못을 삽입하였다. 임상과 동일한 조건으로 척추경 나사못의 모든 나사산(thread)이 시험 블록에 삽입되도록 하였다. 시험 블록은 만능재료 시험기에 고정되었으며 척추경 나사못의 머리 부분이 시험 블록에서 강제 이탈되도록 그립(grip)을 이용하여 5 mm/min의 인장 속도를 적용하였다(그림 4-a). 하중(load)-변위(displacement) 데이터를 30 Hz 빈도로 획득하였으며 최대 하중 및 최대 하중이 나타나는 변위를 측정하였다. 총 6회 시험을 수행하여 평균 및 표준편차를 산출하였다.

(3) 구동 토크 시험(Driving torque test)

시험 블록에 직경 3.2 mm의 파일럿 홀(pilot hole)을 만든 후, 드라이버를 이용하여 분당 5회전의 속도로 척추경 나사못을 삽입하였다. 모든 나사산이 시험 블록에 삽입 될 때까지 진행한 후, 드라이버를 반대 방향으로 같은 속도로 회전시켜 척추경 나사못을 시험 블록에서 풀어 주었다(그림 4-b). 토크(torque)-각도(angle) 데이터를 30 Hz 빈도로 획득하였으며 최대 삽입 토크(maximum insertion torque) 및 최대 풀림 토크(maximum removal torque)를 측정하였다. 총 6회 시험을 수행하여 평균 및 표준편차를 산출하였다.

(4) 통계 분석(Statical analysis)

척추경 나사못의 디자인에 따른 그룹 간 유의한 차이가 있는지 여부를 확인하기 위해 일원배치 분산분석법(one-way ANOVA)을 적용하였으며, 95% 신뢰수준으로 검정하였다.

III. 결 과

1. 고정력 시험(Pullout test)

고정력 시험 결과를 표 1에 평균값과 표준 편차로 제시하

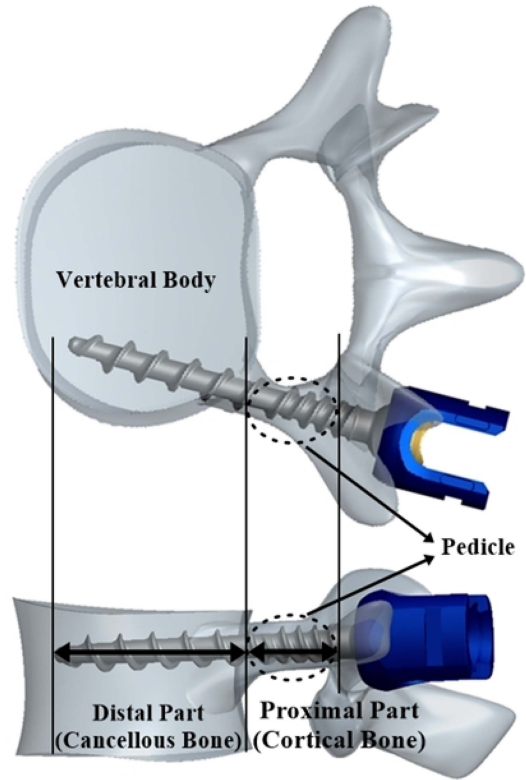


그림 3. 척추경 나사못의 근위부/원위부와 척추체의 관계도. Fig. 3. The relation between the proximal / distal part of the pedicle screw and the vertebral body.

였다. 척추경 나사못의 최대 고정력은 Type A, Type B, Type C 각각 1191 N, 1226 N, 1282 N으로 나타났다. Type B와 Type C는 대조군인 Type A에 비해 평균값이 각각 2.9%, 7.6% 증가하였다. 그러나 통계적으로 유의한 차이는 없었다($P>0.05$). 척추경 나사못의 최대 고정력이 나타나는 변위는 Type A, Type B, Type C 각각 0.85 mm, 0.89 mm, 0.90 mm이었다. Type B와 Type C는 대조군인 Type A에 비해 평균값이 각각 4.7%, 5.9% 증가하였으나,

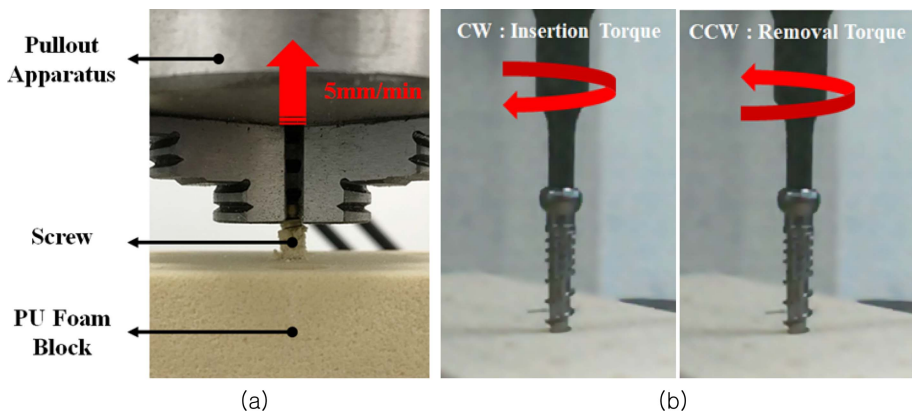


그림 4. 시험 후, 시료 (a) 고정력 시험 (b) 구동 토크 시험.

Fig. 4. Tested specimen. (a) Pullout test on PU foam block (20pcf) (b) Driving torque test on PU foam block (20pcf).

표 1. 척추경 나사못의 고정력 시험 결과.

Table 1. Results of pullout test.

		Results of pullout test		
		Type A	Type B	Type C
Pullout Strength (N)	Mean	1191	1226	1282
	S.D.	99	67	54
Pullout Displacement (mm)	Mean	0.85	0.89	0.90
	S.D.	0.14	0.10	0.07

표 2. 척추경 나사못의 구동 토크 시험 결과.

Table 2. Test results of driving torque test.

		Driving Torque Test Results		
		Type A	Type B	Type C
Insertion Torque (Nm)	Mean	1.68	2.46	2.39
	S.D.	0.02	0.13	0.16
Removal Torque (Nm)	Mean	1.45	1.80	1.84
	S.D.	0.03	0.04	0.13

통계적으로 유의한 차이는 없었다($P>0.05$).

2. 구동 토크 시험(Driving Torque Test)

구동 토크 시험 결과를 표 2에 평균값과 표준 편차로 제시하였고, 삽입 시 최대 토크와 풀림 시 최대 토크로 구분하였다. 삽입 시 최대 토크는 Type A, Type B, Type C 각각 1.68 Nm, 2.46 Nm, 2.39 Nm로 나타났다. Type B와 Type C는 대조군인 Type A에 비해 평균값이 각각 46.4%, 42.3% 증가하였으며 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($P<0.05$). 그러나 Type B와 Type C는 그룹 간 유의한 차이가 없었다($P>0.05$). 풀림 시 최대 토크는 Type A, Type B, Type C 각각 1.45 Nm, 1.80 Nm, 1.84 Nm이었다. Type B와 Type C는 대조군인 Type A에 비해 평균값이 각각 24.1%, 26.9% 증가하였으며 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으나($P<0.05$) Type B와 Type C는 그룹 간 유의한 차이가 없었다($P>0.05$).

IV. 고 찰

척추경 나사못은 기형, 퇴행성 질환, 종양 및 척추 골절의 치료를 위해 오랫동안 사용되어 왔다. 척추경 나사못은 견고한 고정력을 제공함으로써 척추 운동 세그먼트에 대한 3차원 제어를 보장한다[11]. 뼈에 삽입된 나사못은 시간이 지남에 따라 느슨해지거나 심지어 부러지기도 하며 고정시키고자 한 관절의 유합 전에 가관절증(pseudoarthrosis)을 유발하기도 한다. 이렇게 발생한 가관절증은 결국 임플란트

실패(implant failure)로 이어진다. 척추경 나사못의 임플란트 실패는 0.8%로 보고되기도 하였지만 일부 연구에서는 11%에 달하는 높은 비율을 보이기도 하였다[6]. 나사못의 뽑힘은 환자의 임상 추적에서 외과 의사가 직면하는 가장 흔한 문제 중 하나이다[12-14].

일반적으로 척추경 나사못의 전체 형상은 원통형이다. 나사못의 고정력은 나사못의 모양, 내경 및 외경, 나사산 모양(thread profile) 및 피치와 밀접한 관련이 있다. 원뿔형 나사못은 척추경의 해부학 구조와 고정력의 향상을 위해 설계되고 있다[5]. 원뿔형 나사못은 삽입이 진행 될수록 나사못을 감싸고 있는 뼈를 더 압박하고 이것은 고정력을 향상시킨다. 연구에 따르면 원뿔형 나사못은 원통형 나사못에 비해 고정력이 더 우수한 것으로 알려져 있다[5,15]. 나사못의 고정력을 향상시키는 주요 요인은 임플란트와 뼈의 접촉 면적, 나사산 수, 나사못의 외경이다. Kwok 등은 직경 5.0 mm 나사못보다 직경 6.0 mm 나사못이 47% 높은 고정력을 가진다고 하였다[16].

많은 연구자들은 가장 적합한 나사못의 유형을 찾기 위해 나사산과 관련된 설계 변수를 계속 변경하고 있다[1,7,17]. 척추경 나사못의 강성도(cranio-caudal stiffness)와 고정력은 척추경의 피질골(cortical bone)에 의해 제공된다고 알려져 있다. Brasilense 등은 이중 나사식 척추경 나사못을 표준 척추경 나사못과 비교하였다. 이 연구 결과에 따르면, 사체(cadaver)를 이용한 시험을 수행할 때 삽입 토크는 단일 나사보다 이중 나사일 경우 183% 증가하였다. 또한, 단일 나사 구조는 이중 나사 구조에 비해 고정력이 7% 낮게 나타났다[17].

최근에는 골유합을 향상시키기 위한 새로운 유형의 척추경 나사못이 설계되고 시험되었다[14,18]. Evans 등의 연구에서는 코어의 길이 방향 축에 수직인 구멍을 뚫거나 PMMA를 주입하여 골유합을 향상 시키고자 하였다[18]. 이 연구는 나사못의 코어에 구멍이 뚫린 나사못(drilled screw)과 기존 나사못(solid screw) 사이의 기계적 성능의 변화를 보는 것이었기 때문에 in vitro 시험만을 다루었다. 나사못의 뽑힘을 피하기 위한 몇 가지 기술에는 두껍거나 긴 나사못을 사용하는 것도 포함된다[15,19-20]. Polly 등은 임플란트 실패로 인한 재수술 시, 안정성을 다시 보장하기 위해 직경이 2 mm 더 큰 나사못을 사용하는 것을 추천하였다[21]. 그러나 척추경의 골절(pedicle fracture)을 피하면서 직경이 2 mm 더 큰 나사못을 삽입하기가 어렵기 때문에 직경이 1 mm 더 크고 길이가 5-10 mm 더 긴 나사못을 사용할 수 있다고 하였다[15,22].

본 연구에서 Type B는 나사산의 모양은 유지하되 헬리컬 각도를 변경하여 Type A 보다 삽입 속도를 빠르게 하였다. Type C는 나사산의 모양, 헬리컬 각도, 피치를 변경

하여 삽입 속도와 고정력을 향상시키고자 하였다. ASTM F543-17 규격은 나사산(thread)의 20 mm만 시험 블록에 삽입하도록 규정하고 있다[9]. 그러나 Type C의 디자인은 근위부와 원위부의 피치가 다른 이중 피치 나사이기 때문에 이것의 영향을 정량적으로 확인하기 위해 임상 환경과 동일하게 나사산의 모든 부분을 시험 블록에 삽입하여 실험하였다. 본 연구에서 새롭게 개발된 척추경 나사못(Type B, C)은 대조군에 비해 각각 2.9%, 7.6% 증가한 고정력을 보였지만, 유의한 차이는 없었다. Kim 등은 척추경 나사못의 고정력은 척추와 접촉하는 나사산 부분의 표면적을 일컫는 FOA(Flank Overlap Area)와 비례한다고 하였다[23-24]. 표 3과 같이 본 연구에서 사용된 척추경 나사못의 FOA는 대조군 대비 2% 이내로 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

본 연구의 성능 시험에는 정상적인 인간의 뼈를 모방한 PU foam 블록을 사용하였다. PU foam 블록은 실제 동물 또는 인간의 골밀도와 약간의 차이는 있지만, 밀도가 균일하고 조작성이 쉽기 때문에 생체 시편보다 그 결과를 더 정량적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 해부학적 요소를 고려하여 근위부와 원위부의 골밀도 차이를 재현할 수 없었기 때문에 추후 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. Yaman 등은 이중 나사 구조와 이중 피치 구조의 나사못을 이용하여 시험 블록에서 시험한 고정력 성능은 6~15% 로 크게 개선되지 않았지만 양의 척추(ovine vertebrae)를 사용한 시험 결과에서는 43~75% 증가하여 유의한 차이를 보여주었다. 또한 고정력은 근위부의 고정력이 전체 고정력에 더 많은 영향을 준다고 하였으며, 척추 뼈의 해부학적 구조 및 물성을 고려할 때 근위부의 촘촘한 피치는 전체 고정력을 높여 준다고 하였다[1].

고정력은 나사못의 크기, 나사못과 뼈의 접촉 면적, 뼈 구조, 척추경의 구조와 수술 기법에 영향을 받는다. 오래 전의 외과 의사들은 나사못의 깊이를 확인하기 위해 나사못을 수술 중에 꺼냈었다. 그러나 나사못을 꺼냈다가 다시 삽입하면 고정력이 감소한다[25]. 반면, Abshire 등은 나사못의 부분적 또는 전체 제거가 고정력에 영향을 미치지 않는다고 보고하였다[5]. 최근 가장 많이 사용하는 수술 기법은 나사못의 깊이를 확인하기 위해 Depth gauge가 표시된 pedicle finder(probe, tester) 등의 기구들을 먼저 사용하고 drill, tap과 같은 기구를 이용하여 나사못의 코어와 비슷하거나 작은 pilot hole을 만든 후 척추경 나사못을 삽입한다. 이러한 기구들을 사용하는 외과 의사들의 경우 척추경 나사못의 삽입 속도를 중요하게 여긴다. Type B와 Type C의 경우 이중 나사 구조를 적용하여 나사못의 주행 속도를 높여 도록 설계하였다. 수술 속도는 빨라지지만 일정한 속도로 나사못을 회전시킬 경우 단위 시간당 나사못의 접촉 면적이 증가하므로 마찰력에 의해 구동 토크 또한 증가하였다. 삽

표 3. 척추경 나사못의 나사산 부분 표면적 비교.

Table 3. Comparing of surface area of pedicle screws thread part.

	Type A	Type B	Type C
Contact Area (mm ²)	510	517	500

입 토크의 증가는 Brasiliense 등의 결과와 비슷한 경향성을 보였다[17]. 일반적으로 풀림 토크는 삽입 토크에 비례하여 증가하며 삽입 토크에 비해 약 20~30% 정도 낮은 값을 보여준다. 현재까지 구동 토크 중 삽입 토크에 대해 많은 연구자들이 결과를 발표하였지만, 아직 삽입 토크와 고정력의 상관관계는 완전히 밝혀지지 않았다. 그러나 높은 삽입 토크는 임플란트의 초기 안정성(early-stage stability)과 관련이 있다고 사료된다[26].

V. 결 론

본 연구에서는 실험을 통하여, 새롭게 설계된 척추경 나사못의 고정력 및 구동 토크를 기존의 척추경 나사못과 비교하였다. 헬리컬 각도를 변경하여 설계한 이중 나사 구조의 척추경 나사못은 수술 시, 기존의 단일 나사 구조의 척추경 나사못보다 2배 신속하게 삽입할 수 있는 장점이 있다. 고정력에 차이는 없었으며, 구동 토크는 증가하였다. 척추의 해부학적 요소를 고려한 이중 피치 구조와 수술 속도를 높일 수 있는 이중 나사 구조를 적용한 척추경 나사못은 기존의 단일 나사 척추경 나사못과 비교할 때 고정력에 차이는 없었으며, 삽입 속도와 풀림 토크 모두 증가하였다.

본 연구에서는 전체 밀도가 동일한 PU foam 블록만을 이용하여 모든 시험을 수행하였다. 추후에는 사람의 척추 구조와 같이 영역별로 다른 기계적 물성을 갖는 시험 블록이나 동물 척추 시편 등을 이용하여 시험을 보완한다면 임상 환경에 더 가까운 결과를 얻을 수 있을 것이라 기대된다.

참고 문헌

- [1] O. Yaman, T. Demir, A.K. Arslan, M.A. Iyidiker, T. Tolunay, N. Camuscu, M. Ulutas, "The comparison of pullout strengths of various pedicle screw designs on synthetic foams and ovine vertebrae," *Turk Neurosurg.*, vol. 25, no. 4, pp. 532-538, 2015.
- [2] C.S. Chen, W.J. Chen, C.K. Cheng, et al., "Failure analysis of broken pedicle screws on spinal instrumentation," *Medical Engineering and Physics*, vol. 27, pp. 487-496, 2005.
- [3] S. Vishnubhotla, W.B. McGarry, A.T. Mahar, D.E. Gelb, "A titanium expandable pedicle screw improves initial pullout strength as compared with standard pedicle screws," *Spine*, vol. 11, pp. 777-781, 2011.
- [4] S. Wan, W. Lei, Z. Wu, D. Liu, M. Gao, S. Fu, "Biomechanical and histological evaluation of an expandable pedicle screw in osteoporotic spine in sheep," *Eur Spine*, vol. 19, pp.

- 2122-2129, 2010.
- [5] B.B. Abshire, R.F. McLain, A. Valdevit, H.E. Kambic, "Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out," *Spine*, vol. 1, pp. 408-414, 2001.
- [6] C.C. Hsu, C.K. Chao, J.L. Wang, S.M. Hou, Y.T. Tsai, J. Lin, "Increase of pullout strength of spinal pedicle screws with conical core: Biomechanical tests and finite element analyses," *Orthopedic Research*, vol. 23, pp. 788-794, 2005.
- [7] C.A. Lill, E. Schneider, J. Goldhahn, A. Haslemann, F. Zeifang, "Mechanical performance of cylindrical and dual core pedicle screws in calf and human vertebrae," *Arch Orthop Trauma Surg.*, vol. 126, pp. 686-694, 2006.
- [8] V.M. Praveen, M.H. Sean, A.K.L. Michael, M.K. Tony, S.R. William, "Biomechanical evaluation of a double threaded pedicle screw in elderly vertebrae," *Journal of spinal disorders&techniques*, vol. 15, no. 1, pp.64-68, 2002.
- [9] ASTM Standards, F543-17, Standard Specification and Test Methods for Metallic Medical Bone Screws, 2017.
- [10] ASTM Standards, F1839-08(2016), Standard Specification for Rigid Polyurethane Foam for Use as a Standard Material for Testing Orthopaedic Devices and Instruments, 2016.
- [11] B.S. Myers, P.J. Belmont, W.J. Richardson, J.R. Yu, K.D. Harper, R.W. Nightingale, "The role of imaging and in situ biomechaical testing in assessing pedicle screw pull-out strength," *Spine*, vol. 21, pp. 1962-1968, 1996.
- [12] C.A. Dickman, R.G. Fessler, M. Macmillan, R.W. Haid, "Transpedicular screw-rod fixation of the lumbar spine: Operative technique and outcome in 104 cases," *J. Neurosurg.*, vol. 77, pp. 860-870, 1992.
- [13] K. Okuyama, E. Abe, T. Suzuki, Y. Tamura, M. Chiba, K. Sato, "Can insertional torque predict screw loosening and related failures? An in vivo study of pedicle screw fixation augmenting posterior lumbar interbody fusion," *Spine*, vol. 25, pp. 858-864, 2000.
- [14] S.M. Renner, T.H. Lim, W.J. Kim, L. Katolik, H.S. An, G.B. Andersson, "Augmentation of pedicle screw fixation strength using an injectable calcium phosphate cement as a function of injection timing and method," *Spine*, vol. 29, no. 11, pp. 212-216, 2004.
- [15] U. Talu, I. Kaya, F. Dikici, C. Sar, "Pedicle screw salvage: The effect of depth and diameter on pull-out strength: A biomechanical study," *Acta Orthop Traumatol Turc.*, vol. 34, pp. 300-307, 2000.
- [16] A.W.L. Kwok, J.A. Finkelstein, T. Woodside, T.C. Hearn, R.W. Hu, "Insertional torque and pull-out strengths of conical and cylindrical pedicle screws in cadaveric bone," *Spine*, vol. 21, pp. 2429-2434, 1996.
- [17] L.B. Brasiliense, B.C. Lazaro, P.M. Reyes, A.G. Newcomb, J.L. Turner, D.G. Crandall, N. R. Crawford, "Characteristics of immediate and fatigue strength of a dual-threaded pedicle screw in cadaveric spine," *Spine J*, vol. 13, no. 8, pp. 947-956, 2013.
- [18] S.L. Evans, C.M. Hunt, S. Ahuja, "Bone cement of bone substitute augmentation of pedicle screws improves pullout strength in posterior spinal fixation," *Material Science*, vol. 13, pp. 1143-1145, 2002.
- [19] T. Suzuki, E. Abe, K. Okuyama, K. Sato, "Improving the pullout strength of pedicle screws by screw coupling," *J Spinal Disord.*, vol. 14, pp. 399-403, 2001.
- [20] A.W. Turner, R.M. Gillies, M.J. Svehla, M. Saito, W.R. Walsh, "Hydroxyapatite composite resin cement augmentation of pedicle screw fixation," *Clin Orthop Relat Res.*, vol. 406, pp. 253-261, 2003.
- [21] D.W. Polly Jr, J.R. Orchowski, R.G. Ellenbogen, "Revision pedicle screws: Bigger, longer shims-what is best?," *Spine*, vol. 23, pp. 1374-1379, 1998.
- [22] R. Skinner, J. Maybee, E. Transfeldt, R. Venter, W. Chalmers, "Experimental pullout testing and comparison of variables in transpedicular screw fixation: A biomechanical study," *Spine*, vol. 15, pp. 195-201, 1990.
- [23] Y.Y. Kim, W.S. Choi, K.W. Rhyu, "Assessment of pedicle screw pullout strength based on various screw designs and bone densities," *Spine J*, vol. 12, pp. 164-168, 2012.
- [24] M.H. Krenn, W.P. Piotrowski, R. Penzkofer, "Influence of thread design on pedicle screw fixation," *J Neurosurg Spine*, vol. 9, pp. 90-95, 2008.
- [25] T.K. Daftari, W.C. Horton, W.C. Hutton, "Correlations between screw hole preparation, torque of insertion, and pullout strength for spinal screws," *J Spinal Disord.*, vol. 7, no. 2, pp. 139-145, 1994.
- [26] K. Mizuno, K. Shinomiya, O. Nakai, S. Shindo, K. Otani, "Intraoperative insertion torque of lumbar pedicle screw and postoperative radiographic evaluation: short-term observation," *J Orthop Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 137-144, 2005.