

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.1.029>

ISSN 1226-4873

인공추간판 슬라이딩 코어의 곡률반경 변화가 종판의 접촉압력에 미치는 영향

김 철 웅^{*†}

* 고려대학교 공학기술연구소 / (주)트리플씨메디칼

Effect of the Radius of Curvature on the Contact Pressure Applied to the Endplate of the Sliding Core in an Artificial Intervertebral Disc

Cheol-Woong Kim^{*†}

* RITE, Korea University / Triple-C Medical Corp.

(Received June 20, 2011 ; Revised October 21, 2011 ; Accepted October 21, 2011)

Key Words: Artificial Intervertebral Disc(인공추간판), Ultra-high Molecular Weight Polyethylene(초고분자량 폴리에틸렌, UHMWPE), Coefficient of Friction(마찰계수), Sliding Core(슬라이딩코어), Endplate(종판), Transverse Crack(측부균열)

초록: 척추관 협착증은 감압술과 융합술 그리고 인공추간판 치환술 등이 있으며, 2000년대 중반부터는 인공추간판 치환술이 널리 시술되고 있다. 인공추간판의 연구는 추간판의 자유도 및 추체의 굴곡-신전, 측굴전, 축회전에 대한 해석이 핵심기술이지만, 시술 후 수년이 경과하여 발생하는 피로파손이 새롭게 큰 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 인공추간판 연구는 슬라이딩 코어의 피로특성 및 내구성 향상에 집중되어야 한다. 본 연구에서는 세계적으로 가장 많이 사용되는 인공추간판 제품(SB Charité III)을 기초로 유한요소모델을 제작하고, 슬라이딩 코어의 곡률반경과 마찰계수의 변화가 von-Mises 응력과 접촉압력에 미치는 영향을 평가하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 새로운 인공추간판 모델들 (Model-I, -II, -III)을 제안하고 일정수명 후 발생할 수 있는 슬라이딩 코어의 피로파손 거동에 대해 SB Charité III의 결과와 비교·평가하였다.

Abstract: The treatments for spinal canal stenosis are radicular cyst removal, spine fusion, and implantation of an artificial intervertebral disc. Artificial intervertebral discs have been most widely used since the mid-2000s. The study of artificial intervertebral discs has been focused on the analysis of the axial rotation, lateral bending, the degrees of freedom of the disc, and flexion-extension of the vertebral body. The issue of fatigue failure years after the surgery has arisen as a new problem. Hence, study of artificial intervertebral discs must be focused on the fatigue failure properties and increased durability of the sliding core. A finite element model based on an in the artificial intervertebral disc (SB Charité III) was produced, and the influence of the radius of curvature and the change in the coefficient of friction of the sliding core on the von-Mises stress and contact pressure was evaluated. Based on the results, new artificial intervertebral disc models (Models-I, -II, and -III) were proposed, and the fatigue failure behavior of the sliding core after a certain period of time was compared with the results for SB Charité III.

1. 서 론

척추질환 중 퇴행성 변화 및 신경 압박으로 인한 요통, 하지 동통을 동반하는 척추관 협착증은 발생빈도가 점차 증가하고 있다. 이러한 척추관 협착증은 감압술과 융합술 그리고 인공추간판 치환술 등이 있으며, 2000년대 중반부터는 인공추간

판 치환술이 널리 시술되고 있다. 인공추간판 치환술은 기존의 척추융합술과 달리 굴곡-신전 (flexion-extension) 운동이 가능한 진보된 시술법이다. 인공추간판의 연구는 추간판의 자유도 및 추체의 굴곡-신전, 측굴전(lateral bending), 축회전(axial rotation)에 대한 해석이 핵심기술이지만, 시술 후 수년이 경과하여 발생하는 피로파손이 새롭게 큰 문제점으로 대두되고 있다. 구체적으로 살펴보면, 슬라이딩 코어의 피로파손 및 내구성에 대한 한계성이 새로운 문제점으로 등장하였고, 이

† Corresponding Author, woong25@korea.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

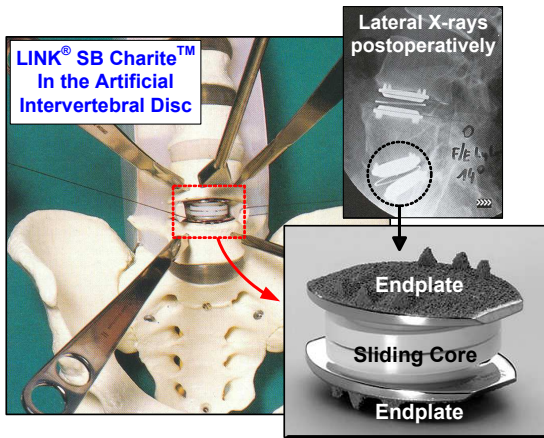


Fig. 1 Commercial product of artificial intervertebral disc (SB Charité III)

는 반복적인 굴곡-신전운동이 야기하는 슬라이딩 코어(sliding core)의 응력집중, 마멸, 구조적 변형 등에 대한 연구의 필요성을 증가시키고 있는 실정이다.^(1,2) 따라서 인공추간판 연구는 슬라이딩 코어의 피로특성 및 내구성 향상에 집중되어야 한다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 세계적으로 가장 많이 사용되는 Johnson & Johnson, Depuy Spine Co.의 인공추간판 제품(SB Charité III)을 기초로 유한요소모델을 제작하고, 슬라이딩 코어의 곡률반경(ρ)과 마찰계수(μ)의 변화가 von-Mises 응력과 접촉압력에 미치는 영향을 평가하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 새로운 인공추간판 모델들(Model-I,-II,-III)을 제안하고 일정수명 후 발생할 수 있는 슬라이딩 코어의 피로파손 거동에 대해 SB Charité III의 결과와 비교·평가하였다. 그 결과가 가장 효과적인 응력분포를 나타내는 슬라이딩 코어 모델을 선정할 수 있었다.

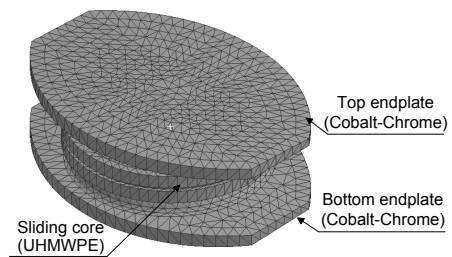
2. 인공추간판의 유한요소해석

2.1 인공추간판의 구속조건 확립

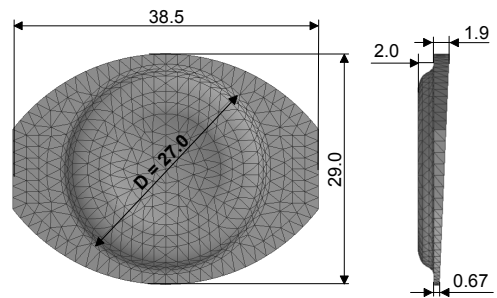
요추는 시상면에서 관찰되는 lumbar vertebral lordosis와 thoracic vertebral kyphosis가 결합된 곡선으로 이루어져 있다.⁽³⁾ 따라서 요추 L5와 천추 S1이 이루는(L5-S1) lumbosacral joint angle(LSJA)과 L1-L5가 이루는 lumbar lordosis angle(LLA)이 인공추간판 모델의 경계조건에 적용되었다. 특히 인공추간판이 실제로 가장 많이 적용되는 L4-L5의 요추곡률각은 L1-S1 사이의 각 분절 추간판의 경

Table 1 Material properties of artificial intervertebral disc (SB Charité III)

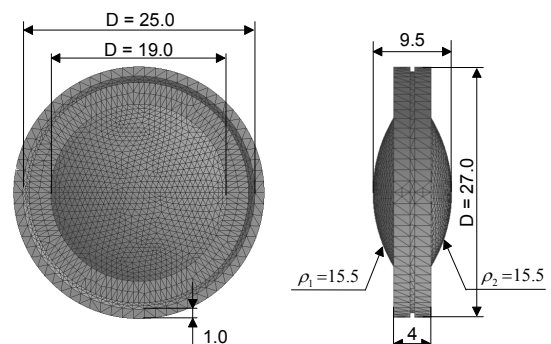
Component material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield Stress (MPa)	Density (g/cm ³)
UHMWPE (sliding core)	0.5	0.40	22	0.94
Co-Cr alloy (endplate)	200	0.29	690	9.20



(a) Schematic ISO view of artificial intervertebral disc



(b) Top & bottom endplate of artificial intervertebral disc



(c) Sliding Core of artificial intervertebral disc

Fig. 2 Geometries of SB Charité III artificial intervertebral disc used in the simulation

사각이 일정함⁽⁴⁾을 감안하여 적용되었다. 또한, 요추곡률선(lordosis)은 중단면에서 L1 상부면과 천추 상부면 선벡터의 내적의 적을 통해 56°를 구할 수 있었다. 이 값은 정상인의 좌위에 해당하는 평균

50° 내외와는 근접하고, 직립시의 평균 70° 내외보다는 낮았다.⁽⁵⁾ 또한 Dolan 등⁽⁶⁾의 결과인 직립시 54~60°의 범위에 포함됨을 확인할 수 있었다. 한편 인공추간판은 기구학적 관점에서 회전 중심이 고정되어 있는 반구속 개념(semi-constraint concept)과 회전 중심이 움직일 수 있는 비구속 개념(un-constraint concept)으로 구분할 수 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 코어와 하판이 완전결합되고 요추운동 발생시 상판과 코어상면만이 접촉운동을 하는 반구속 개념을 도입하였다.

2.2 인공추간판의 유한요소해석 방법

본 연구에서는 세계적으로 가장 많이 시술되는 SB Charité III 인공추간판 제품을 기초로 유한요소 모델링을 수행하였다. Fig. 2는 SB Charité III 제품의 개발자료 및 Kim 등⁽⁸⁾의 연구결과를 기초로 본 연구에서 수행할 곡률반경 변화, 마찰계수 영향, 접촉응력 등을 정확히 평가할 수 있도록 모델링한 결과이다. 인공추간판은 크게 상하부 종판과 슬라이딩 코어로 구성되어 있다. 상부종판(top endplate)과 하부종판(bottom endplate)은 상호 대칭적 구조를 이루며 슬라이딩 코어를 중간에 삽입한 형태이다. 슬라이딩 코어는 척추체의 모션에 따라 상하부 종판의 모션변화가 용이하도록 설계되었다. 상하부 종판 재질은 Co-Cr 합금이며, 슬라이딩

코어의 재질은 초고분자량 폴리에틸렌(Ultra-high Molecular Weight Polyethylene, 이하 UHMWPE)이다. ANSYS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였고 Table 1에 제시된 물성⁽⁹⁾을 적용하였다. 요소망은 삼각형 사면체 요소를 사용하여 슬라이딩 코어를 생성하였다. SB Charité III 유한요소모델은 하부종판과 슬라이딩 코어 상부를 target body로 하였고, 상부종판과 슬라이딩 코어 하부를 표면접촉 요소로 설정하였다. UHMWPE의 마찰계수^(10,11)는 0.07~0.11이고, 이를 슬라이딩 코어의 von-Mises 응력과 접촉압력 해석에 적용하였다. 본 연구에서는 피로파손에 효율적인 응력분포를 갖는 슬라이딩 코어를 설계하기 위해 다양한 곡률반경(ρ)을 제안하고 해석에 적용하였다. 이에 대해서는 다음 장에서 상세히 언급하였다.

3. 슬라이딩 코어의 곡률반경 변화에 따른 유한요소해석 결과

3.1 곡률반경이 슬라이딩 코어에 미치는 영향

Fig. 3(a),(i)에서 SB Charité III ρ 은 $\rho_1=\rho_2=15.5$ mm이고, Model-I,-II는 각각 $\rho_1=\rho_2=14$ mm, $\rho_1=\rho_2=17$ mm, Model-III은 $\rho_1=14$ mm, $\rho_2=17$ mm로 곡률반경을 변화시켜 유한요소모델을 제작하였다. Fig. 3(a),(b) 모두 슬라이딩 코어는 고정되어 있지 않고 상하부 종판운동에 따라 상호작용을 한다. 본 연

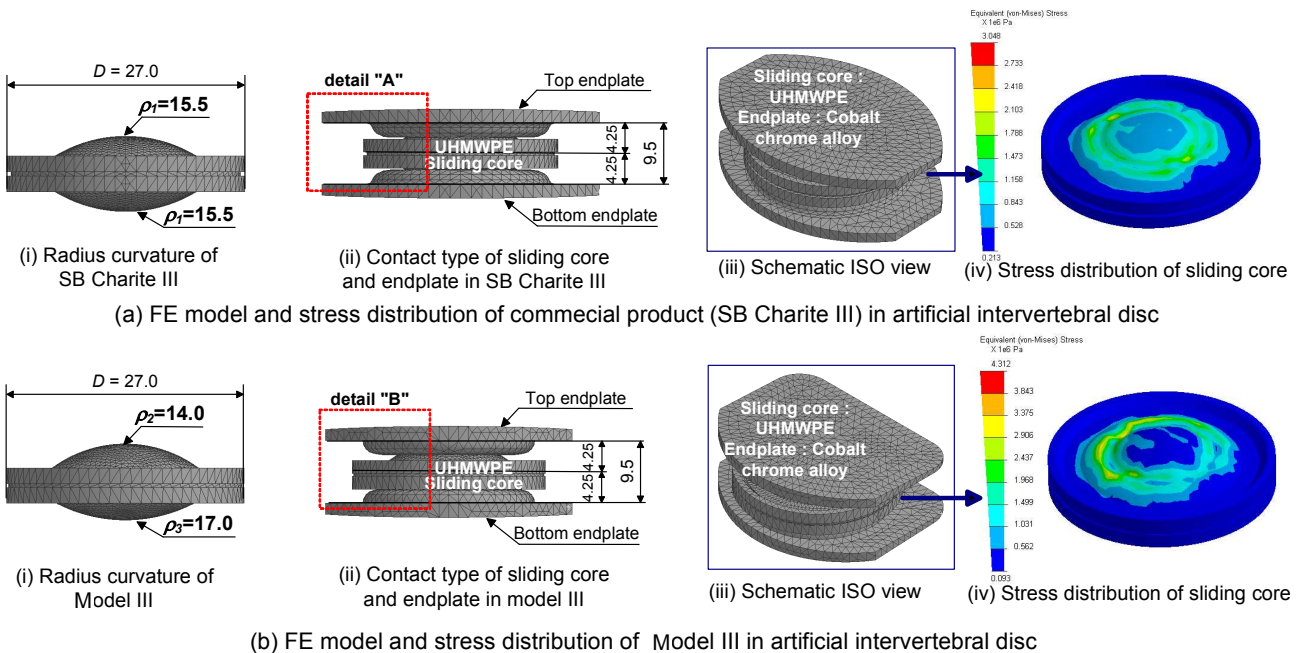


Fig. 3 FE model and stress distribution of SB Charite III versus Model III in artificial intervertebral disc

구에서는 Fig. 3(a)를 바탕으로 슬라이딩 코어의 곡률반경을 상하면 비대칭으로 변화시켜 Fig. 3(b)와 같은 새로운 모델을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 Fig. 3(b)의 경우는 코어 상하부의 굴곡 회전량을 조절하여 적절한 운동량을 발생시키도록 설계하였다. Fig. 3(a)에서 (i)는 슬라이딩 코어의 곡률반경, (ii)는 종판과 슬라이딩 코어의 결합형태,

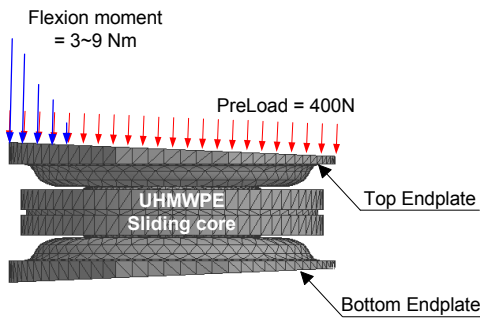
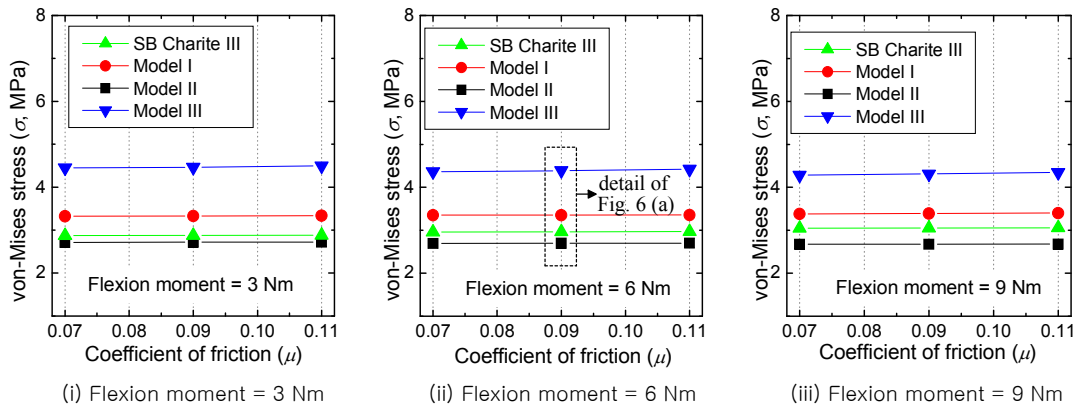
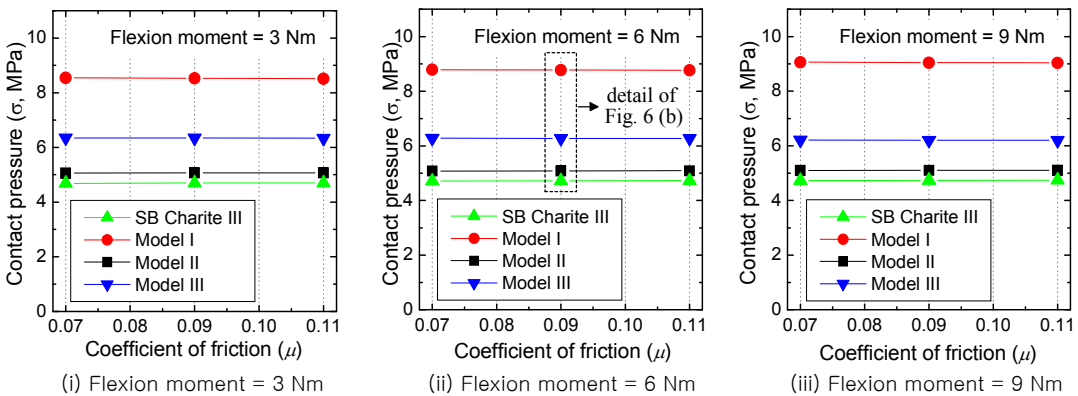


Fig. 4 Loading conditions and FE model of artificial intervertebral disc

(iii)은 3차원형태, (iv)는 슬라이딩 코어에 작용하는 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(a),(ii)와 Fig. 3(b),(ii)에 제시한 detail "A"와 "B"를 비교해보면 본 연구에서 제안한 새로운 모델의 굴곡량이 더 증가될 수 있음을 확인할 수 있다. 인공추간판은 슬라이딩 코어를 중심으로 종판의 운동범위가 결정되고 슬라이딩 코어의 곡률반경에 따라 순간중심이 변화하므로 곡률반경을 중심으로 응력분포를 해석하여야한다. Fig. 3(a),(b)의 (iv)는 SB Charité III와 Model-III에 9Nm의 굴곡모멘트가 작용하였을 때 슬라이딩 코어에 작용하는 von-Mises 응력의 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제안한 슬라이딩 코어의 응력분포(Fig. 3(b),(iv))를 살펴보면 SB Charité III의 슬라이딩 코어(Fig. 3(a),(iv))와 달리 코어 심부의 응력값이 매우 낮게 분포됨을 알 수 있다. 이는 지속적인 굴곡모멘트에 의한 측부균열 (transverse crack)의 개시 및 전파를 획기적으로 방지할 수 있는 효과적인 응력분포를 제공할 것이라 판단한다. 한편, Fig. 4와 같이 SB Charité III와



(a) Variation of von-Mises stress and coefficient of friction under various flexion moment



(b) Variation of contact pressure and coefficient of friction under various flexion moment

Fig. 5 Relationship among von-Mises stress, contact pressure and coefficient of friction under various flexion moment

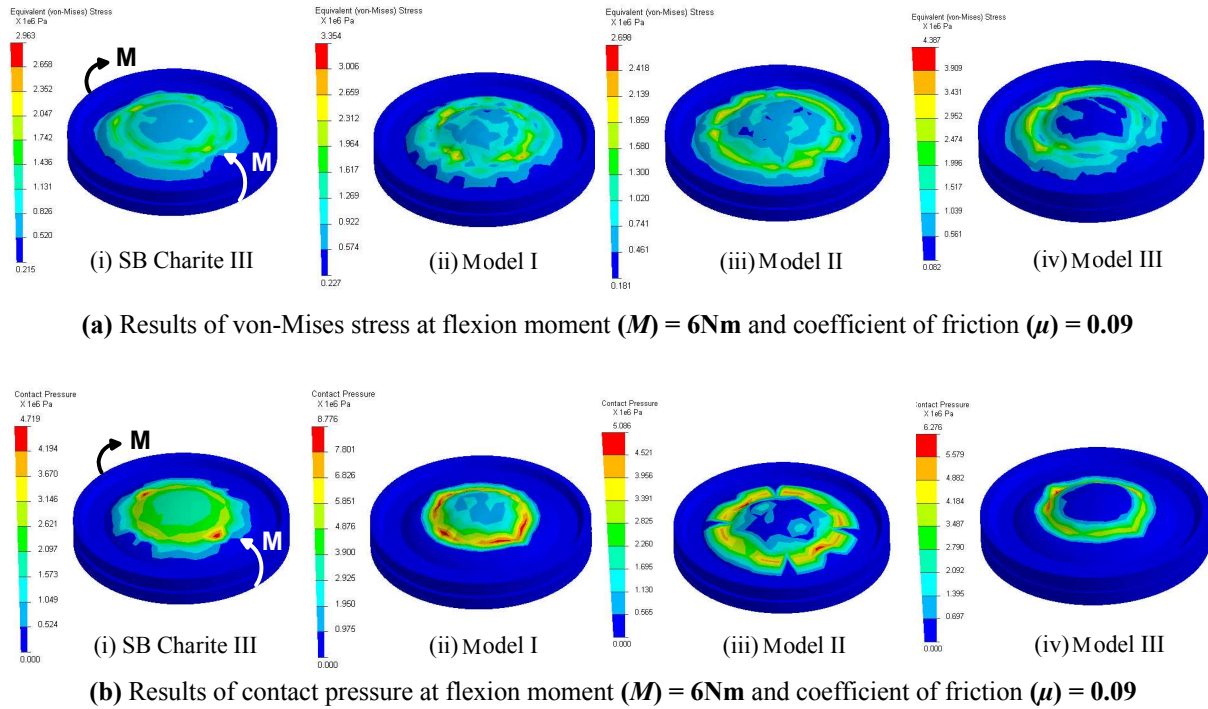


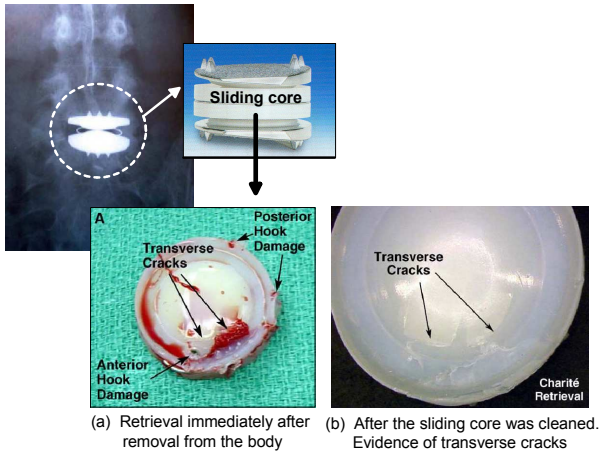
Fig. 6 Stress distribution and contact pressure of SB Charite III versus NEW models (Model I, Model II, Model III)

Model-I,-II,-III의 상부 종판에 작용하는 수직압축하중은 400N의 균일분포하중을 적용하였고, 굴곡모멘트는 3, 6, 9Nm를 적용하였다.^(8,12) 하부의 종판은 x, y, z축 방향을 고정하여 척추체 하부구조에 융합하는 역할을 한다.

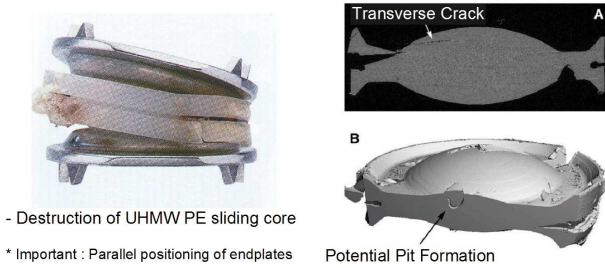
3.2 곡률반경, 접촉압력과 von-Mises 응력 관계

본 절에서는 곡률반경과 마찰계수의 변화가 슬라이딩 코어의 von-Mises 응력에 미치는 결과를 분석하였다. SB Charité III 제품과 본 연구에서 제안한 세 가지 모델(Model-I,-II,-III)에 대해 Fig. 5(a)는 von-Mises 응력과 마찰계수의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 접촉압력과 마찰계수의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5(a),(b) 모두 굴곡모멘트는 동일하게 3, 6, 9Nm를 적용한 결과이다. Fig. 5(a)를 통해서 SB Charité III와 본 연구에서 제안한 세 가지 모델의 von-Mises 응력분포는 굴곡모멘트의 증가에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정함을 알 수 있다. 또한, Fig. 5(b)의 경우에도 접촉압력은 굴곡모멘트의 증가에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 5에서 마찰계수에 따른 응력변화가 비교적 미미한 이유는 전단력/슬라이딩 등의 발생조건을 생략했기 때문

이다. 즉 본 연구에서 적용한 L4-L5의 압축하중/굴곡모멘트 외에도 lumbar lordosis angle point, lumbosacral joint angle point, sacral inclination angle point, sacrohorizontal angle point, lumbosacral angle point 등을 작용점으로 하는 전단력/슬라이딩이 동시에 발생하여 마찰계수에 따른 응력변화가 매우 복잡하게 발생한다. 그러나 일반적인 계산법에 의한 전단력/슬라이딩 계산시 요추형태의 단순화⁽¹³⁾ (시상면 기준 : L1, L2=사다리꼴, L3=직사각형(L), L4=정사각형, L5=직사각형(LT))에 의한 오차, 피험자간의 추체 작용점의 상이성에 따른 오차 등에 의한 전단력/슬라이딩 등의 변화는 일정한 결과를 도출하기에 많은 변수가 포함되므로 본 연구결과의 일관성을 위하여 배제하였다. 그러나 SB Charité III와 세 가지 모델 사이에는 일정한 관계성이 나타났다. 즉, SB Charité III의 평균 von-Mises 응력이 2.95MPa인데 비해 Model-II의 평균 von-Mises 응력은 2.70MPa으로 약간 저하하였다. 그러나 Model-I은 3.35MPa의 평균 von-Mises 응력이 나타나서 약 1.13배의 von-Mises 응력 증가가 나타났다. 한편, Model-III의 평균 von-Mises 응력은 4.38MPa로 SB Charité III의 평균 von-Mises 응력에 비해 무려 1.5배의 증가가 나타났다.



(a) Transverse crack and hook damage of SB Charité III



(b) Cut a 3-D reconstruction, illustrating potential pit of SB Charité III

Fig. 7 Transverse crack of artificial intervertebral disc at flexion-extension moment (SB Charité III)⁽²⁾

3.3 접촉압력과 측부균열의 관계

접촉압력과 마찰계수의 관계에서는 von-Mises 응력과 마찰계수의 관계와 전혀 다른 결과를 나타냈다. 구체적으로 살펴보면, SB Charité III의 평균접촉응력이 4.71MPa로 가장 낮은 값을 나타냈고, Model-II는 5.08MPa, Model-III는 6.27MPa, Model-I은 8.77MPa의 순으로 증가되었음을 알 수 있다. 이상의 결과를 살펴보면 von-Mises 응력과 접촉압력의 매우 상반된 결과가 나타나서 본 연구에서 제안한 세가지 모델이 SB Charité III에 비해 오히려 내구성이 저하되는 기계적 특성을 보유하고 있는 것으로 판단될 수 있다. 그러나 Fig. 5와 Fig. 6을 비교하면 다른 결과를 얻을 수 있다. Fig. 6은 본 연구에서 가장 평균적인 결과를 나타낸 Fig. 5(a),(ii)와 Fig. 5(b),(ii)의 조건에서 굴곡모멘트 6Nm 일 때의 응력분포를 나타낸 것이다. 구체적으로 살펴보면, Fig. 5(b)에서 가장 낮은 접촉압력을 나타냈던 SB Charité III의 경우, Fig. 6(b),(i)에서는 굴곡

모멘트 작용방향 영향을 크게 받아 종관 후크와 직접 접촉하는 슬라이딩 코어 단면적 감소부에 압력이 집중되고, 이로 인해 급격한 응력집중을 유발하게 된다. 그 결과로 인공추간판 시술 후 장시간 지속적인 굴곡모멘트를 받게 되면 Fig. 7에 제시된 사례와 같은 치명적인 결과를 유발하게 된다. Fig. 7(a),(b)는 Fig. 6(b),(i) SB Charité III의 실제 파손사례로써 종관 후크의 응력집중 영향으로 반복적인 굴곡모멘트가 측부균열의 생성 및 전파를 야기시킨 사례이다.⁽²⁾ 본 연구에서 제안된 모델들 (Model-I,-II,-III)의 경우, 접촉압력 값은 SB Charité III에 비해 다소 높으나 Fig. 6(b),(ii)~(iv)에 제시된 바와 같이 응력집중을 효과적으로 분산시킬 수 있는 곡률반경 구조를 보유함으로써 Fig. 7과 같은 측부균열의 생성을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 슬라이딩 코어의 곡률반경은 상부가 $\rho_1=14\text{mm}$, 하부가 $\rho_2=17\text{mm}$ 일 때, 반복적인 굴곡모멘트에 대해 효과적으로 피로손상을 방지할 수 있는 곡률반경 조건임을 확인할 수 있었고, 이러한 결과는 Model-III의 조건과 정확히 일치함을 알 수 있다. 종합해보면, Fig. 5(a),(b)에서 슬라이딩 코어의 곡률반경의 변화가 von-Mises 응력과 접촉압력에는 일정한 영향을 미치지 않지만, 마찰계수 값에는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 6(a),(b)를 살펴보면 von-Mises 응력분포 및 접촉압력분포 모두 Model-III의 경우가 가장 응력집중을 최소화하여 피로파손을 효과적으로 방지할 수 있는 곡률반경 조건임을 응력분포의 비교를 통해 확인할 수 있다. 그러나 이상의 연구 결과는 유한요소해석을 바탕으로 수행되었기 때문에 한계성이 있는 결과들이다. 따라서 차기 연구에서는 제안된 모델을 직접 제작하고 사체실험(cadaver test)을 통해 척추체에 삽입하여 피로시험을 통한 검증을 수행한 후 본 유한요소해석 결과와 비교·평가할 예정이다.

4. 결 론

(1) SB Charité III 및 세 가지 제안 모델(Model-I,-II,-III)의 von-Mises 응력과 마찰계수의 관계는 일정한 관계성이 나타났다. 즉, SB Charité III의 평균 von-Mises 응력이 2.95MPa인데 비해 Model-II의 평균 von-Mises 응력은 2.70MPa으로 약간 저하된 경향이 나타났다. 그러나 Model-I은 3.35MPa의 평균

von-Mises 응력이 나타나서 약 1.13배의 von-Mises 응력 증가가 나타났다. 한편, Model-III의 평균 von-Mises 응력은 4.38MPa로 SB Charité III의 평균 von-Mises 응력에 비해 1.5배의 증가가 나타났다.

(2) 접촉압력과 마찰계수의 관계에서는 von-Mises 응력과 마찰계수의 관계가 전혀 다른 결과를 나타냈다. SB Charité III의 평균접촉응력이 4.71MPa로 가장 낮은 값을 나타냈고, Model-II는 5.08MPa, Model-III는 6.27MPa, Model-I은 8.77MPa의 순으로 증가되었음을 알 수 있다.

(3) 가장 낮은 접촉압력을 나타냈던 SB Charité III의 경우, 굴곡모멘트 작용방향의 영향을 크게 받아 종관 후크와 직접 접촉하는 슬라이딩 코어 단면적 감소부에 압력이 집중되고, 이로 인해 급격한 응력집중을 유발하게 된다. 그 결과로 인공추간판 시술 후 장시간 지속적인 굴곡모멘트를 받게 되면 치명적인 피로파손을 유발하게 된다.

(4) 본 연구에서 제안된 모델들(Model-I,-II,-III)의 경우, 접촉압력 값은 SB Charité III에 비해 다소 높으나 응력집중을 효과적으로 분산시킬 수 있는 곡률반경으로 인해 측부균열의 생성을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 Model-III 과 같이 슬라이딩 코어의 곡률반경 상부가 $\rho_1 = 14\text{mm}$, 하부가 $\rho_2 = 17\text{mm}$ 일 때, 반복적인 굴곡모멘트에 대해 효과적으로 피로손상을 방지할 수 있는 곡률반경 조건임을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0073587)

참고문헌

(1) Kleuver, D. E., Oner, F. C., and Jacobs, W. C. H., 2003, "Total Disc Replacement for Chronic Low Backpain: Background and Systematic Review of the Literature," *Eur. Spine J.*, Vol.12, pp.108~116.

(2) Steven M. Kurtz, John Pelozo, Ryan Siskey and Marta L. Villarraga, 2005, "Analysis of a Retrieved Polyethylene Total Disc Replacement Component," *The spine journal* 5, pp.344~350.

(3) Wiltse L. L., Winter R. B., 1983, "Terminology and Meaurement of Spondylolisthesis," *The Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol.65, No.6, pp. 768~772.

(4) D. J. Choi, D. K. Ahn, S. Lee, K. Y. Park, Y. W. Jun and K. S. Kim, 2007, "Operative Treatment of Delayed Collapse of Osteoporotic Vertebral Fracture with Claudication, -Transpedicular Bone Graft and Pedicle Screw Fixation-," *Journal of Korean Spine Surg.*, Vol.14, No.2, pp.73~78.

(5) N. H. Kim, S. H. Moon, H.M. Lee and D.H. Kim, 1998, "Spinal Dimensions and Shape Variation in Koreans Radiographic Quantitative Morphometry," *Journal of Korean Orthopaedics*, Vol.33, pp. 1611~1619.

(6) Dolan P., Adams M. A., 2001, "Nonlinear Stress Analysis of the Whole Lumbar Spine in Torsion-Mechanics of Facet Articulation," *Spine*, Vol.27, pp.289~299.

(7) W. M. Park, J. W. Joo, K. S. Kim, K. S. Lee and Y. H. Kim, 2009, "Biomechanical Characteristics of Cervical Spine After Total Disc Replacement," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 7, pp. 637~644.

(8) Kim, Y. E., Yun, S. S., and Jung, S. K., 2006, "Biomechanical Analysis of the Implanted Constrained and Unconstrained ICR Types of Artificial Disc using FE Model," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp.176~182.

(9) Cho, C. H., Cho, Y. K., Choi, J. B., Lee, T. S., and Choi, K., 1998, "A Biomechanical Study on the Tibial Components Under Dynamic Loading," *Spring Conference of the KSME(A)*, pp.368~373.

(10) Samyn, P., Van Schepdael, L., Leendertz, J. S., Gerber, A., Van Paepegem, W., De Baets, P., and Degrieck, J., 2006, "Large-Scale Friction and Wear Tests on a Hybrid UHMWPE-Pad/Primer Coating Combination used as Bearing Element in an Extremely High-Loaded Ball-Joint," *Tribology International* 39, pp.796~811.

(11) Cho, H. J., Wei, W. J., Kao, H. C., and Cheng, C. K., 2004, "Wear Behavior of UHMWPE Sliding on Artificial Hip Arthroplasty Materials," *Materials Chemistry and Physics* 88, pp.9~16.

(12) Jun Yao, Sergio R. Turteltaub, and Paul Ducheyne, 2006, "A Three-dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Tissue Engineered Intervertebral Discs Under Complex Loads," *Biomaterials* 27, pp.377~387.

(13) Bogduk, N., Twomey, L. T., 1997, "Clinical Anatomy of the Lumbar Spine and Sacrum," *Churchill Livingston*.