

세가지 니켈 티타늄 파일의 휨과 비틀림 조건에서의 응력 분포에 관한 3차원 유한요소 연구

김태오¹ · 이찬주² · 김병민² · 박정길¹ · 허 복¹ · 김현철^{1*}

¹부산대학교 치의학전문대학원 치과보존학교실, ²부산대학교 공과대학 기계공학부

ABSTRACT

STRESS DISTRIBUTION OF THREE NITI ROTARY FILES UNDER BENDING AND TORSIONAL CONDITIONS USING 3-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS

Tae-Oh Kim¹, Chan-Joo Lee², Byung-Min Kim², Jeong-Kil Park¹,
Bock Hur¹, Hyeon-Cheol Kim^{1*}

¹Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry ²Division of Precision Manufacturing Systems,
Pusan National University, Busan, Korea

Flexibility and fracture properties determine the performance of NiTi rotary instruments. The purpose of this study was to evaluate how geometrical differences between three NiTi instruments affect the deformation and stress distributions under bending and torsional conditions using finite element analysis.

Three NiTi files (ProFile .06 / #30, F3 of ProTaper and ProTaper Universal) were scanned using a Micro-CT. The obtained structural geometries were meshed with linear, eight-noded hexahedral elements. The mechanical behavior (deformation and von Mises equivalent stress) of the three endodontic instruments were analyzed under four bending and rotational conditions using ABAQUS finite element analysis software. The nonlinear mechanical behavior of the NiTi was taken into account.

The U-shaped cross sectional geometry of ProFile showed the highest flexibility of the three file models. The ProTaper, which has a convex triangular cross-section, was the most stiff file model. For the same deflection, the ProTaper required more force to reach the same deflection as the other models, and needed more torque than other models for the same amount of rotation. The highest von Mises stress value was found at the groove area in the cross-section of the ProTaper Universal.

Under torsion, all files showed highest stresses at their groove area. The ProFile showed highest von Mises stress value under the same torsional moment while the ProTaper Universal showed the highest value under same rotational angle. [J Kor Acad Cons Dent 33(4):323-331, 2008]

Key words: Stress, NiTi rotary instrument, Cross-section, Bending, Torsion, Finite element analysis

- Received 2008.4.7., revised 2008.5.13., accepted 2008.5.15.-

* Corresponding Author: **Hyeon-Cheol Kim**

Department of Conservative Dentistry,
School of Dentistry, Pusan National University,
1-10, Ami-Dong, Seo-Gu, Busan, 602-739, Korea
Tel: 82-51-240-7978
E-mail: golddent@pusan.ac.kr

I . 서 . 론

니켈 티타늄 (NiTi) 합금으로 만들어진 근관치료 기구는 스테인레스스틸 (SS) 합금으로 만들어진 기구들의 단점을

극복하기 위해 만들어졌다¹⁾. NiTi 기구는 동일한 크기의 SS 기구에 비해 2~3배 높은 탄성 유연성을 갖고 비틀림 파절에 대한 저항성이 높다²⁻⁵⁾. NiTi 기구는 근관형성을 더욱 쉽고 빠르게 도와주고, 만곡 근관에서도 원래의 근관 만곡을 최대한 유지하면서 근관 충전이 용이한 잘 경사진 모양으로 확대할 수 있도록 도와 준다²⁻⁶⁾.

다양한 전동 NiTi 파일이 시판되고 있으며, 각 파일에 따라 고유한 rake angles과 radial lands를 갖고 있고 하나의 파일에서는 일정한 경사도의 블레이드 샤프트를 갖는 형태가 일반적이다⁶⁻⁸⁾. ProFile (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)은 U-형의 단면과 3개의 대칭적인 radial lands 및 음의 rake angle을 갖는 대표적 수동적 기구로써, 이는 다른 시스템에 비해 근관 중심을 잘 유지하고 탄성이 좋기 때문에 만곡도가 큰 근관에서 마무리 성형을 하기에 좋다고 보고되고 있다⁹⁻¹¹⁾.

또 다른 시스템으로, ProTaper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)는 파일의 경사도가 점차 변하는 샤프트 형태를 가진 것이 특징적이다^{12,13)}. ProTaper의 삼각형 단면 구조는 상아질과 파일 간의 접촉 면적을 감소시킴으로써 삭제 효율이 더 좋다고 보고되었다¹³⁾. 그러나, 과도한 삭제력에 의해 근관의 중심이동, 근관 이형성, 근관의 과도한 직선화 등이 야기된다는 문제점도 지속적으로 연구 보고되었다¹⁴⁻¹⁶⁾.

최근에 이러한 문제점을 극복하기 위하여 단면 모양을 달리한 새로운 ProTaper system인 ProTaper Universal (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)이 시판되었다. ProTaper Universal의 F2와 F3 및 그 이상의 크기 파일에서는 U-형의 단면 구조를 도입하여 유연성을 증가시키려고 하였다.

임상적으로, NiTi 파일은 근관 내에서 파절될 수 있는 잠재 위험성을 갖는다. NiTi 전동 파일은 근관치료 중 어떠한 시각적인 영구 변형 양상이 없이 탄성 한계 내에서 파절이 일어날 수 있으며, 이러한 예상치 못한 파절은 임상가나 학자 모두에게 상당한 관심사가 되고 있다^{17,18)}.

전동 NiTi 파일의 파절은 비틀림이나 휨에 의한 피로 파절로 주로 발생한다¹⁹⁾. 이러한 파절 발생에 있어, 구조체의 휨이나 비틀림 특성이 그 단면 구조에 의해 직접적 영향을 받게 되므로 매우 중요하게 고려되어야 한다^{20,21)}.

이 연구에서는 3차원 유한 요소 연구를 통해 휨과 비틀림 조건하에서 세가지 NiTi 기구 (ProFile, ProTaper 및 ProTaper Universal)의 변형 및 응력 분포를 비교 분석하였다.

II. 실험 방법

NiTi 전동 파일의 모형 설계

마이크로 CT 스캐너 (HMX, X-Tek Group, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 세 가지 NiTi 파일 (ProFile .06/#30, ProTaper F3 및 ProTaper Universal F3) (Figure 1)을 매 2 μm마다 스캔하여 실제 크기와 형태를 획득하였다. 3차원 모형 형성 프로그램 (IDEAS11 NX: UGS, Plano, TX, USA)을 이용하여 앞서 얻은 자료의 잡음을 없애고 파일의 침부나 날카로운 변연 등을 미세 수정하였다 (Figure 1).

여덟 개의 결절 및 선형으로 이루어진 육면체 요소를 이용하여 각 파일의 3차원 메쉬 이미지를 만들었다. 최종 ProFile 모형은 16318개의 결절과 11880개의 요소로 만들어졌고, ProTaper는 9017개의 결절과 7560개의 요소, 그리고 ProTaper Universal은 10668개의 결절과 8964개의 요소로 구성되었다 (Figure 2). 파일의 길이에 대한 수직 방향으로의 절단면을 z-축으로 선택하였다.

NiTi 기구의 기계적 특성

NiTi 합금의 비선형적 기계적 특성을 수학적 해석에 반영하였다²²⁾. Figure 3은 상 변화의 비선형적 요소를 나타내는 stress-strain curve이다. 이 곡선은 네 가지 단계를 가지는데, OA구간은 오스테나이트 (austenite)의 탄성 변형 구간, AB구간은 응력 기원 마르텐사이트 (martensite) 변성에 의한 약 4% 변형까지의 의사 탄성-고원 변형 (pseudoelastic-plateau deformation) 구간, BC구간은 약 8%까지의 마르텐사이트 지향 탄성 변형 구간, 그리고 CD구간은 상변화된 마르텐사이트에서의 소성 변형 구간이다. 변위 운동에 의한 소성 변형은 회복이 불가능하지만, 탄성 및 상변화 변형은 회복이 가능하다²²⁾.

Figure 3의 점선은 본 유한 요소 연구에 사용한 stress-strain curve이다. 초기 Young's modulus는 36 GPa로, Poisson's ratio는 0.3으로 유지하였다. 첫 번째 상 변화의 시작과 끝 임계치는 각각 504 MPa와 755 MPa로 하였다.

재현 실험 조건

ABAQUS V6.5-1 (SIMULIA, Providence, RI, USA) 프로그램을 이용하여 다양한 조건 (Figure 4) 하에서 세 가지 유한 요소 모형의 기계적 결과를 수학적으로 해석하고 Von Mises 값으로 응력 분포를 결정하였다.

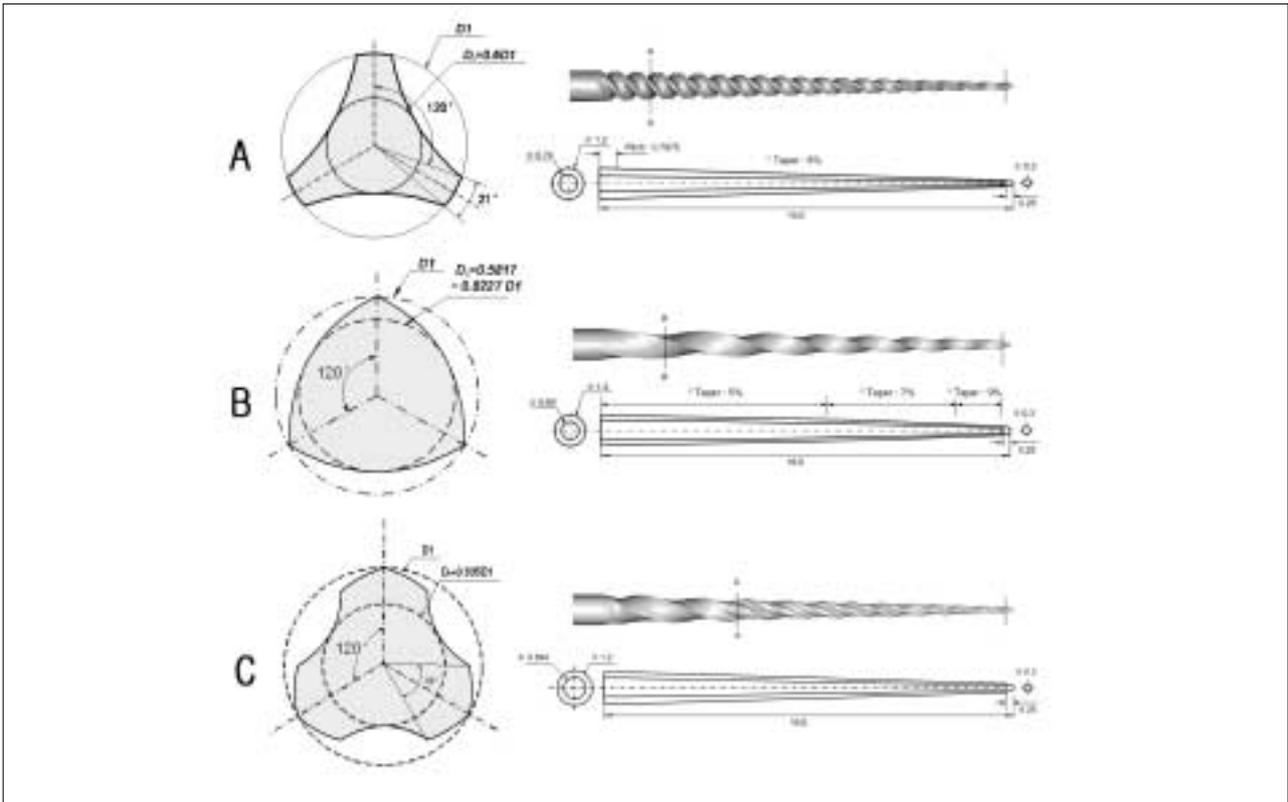


Figure 1. Cross-sectional and longitudinal geometry of three NiTi files. A: ProFile .06 / #30, B: ProTaper F3, C: ProTaper Universal F3.



Figure 2. Final FE models of three NiTi files used in this study: A: ProFile .06 / #30, B: ProTaper F3, C: ProTaper Universal F3.

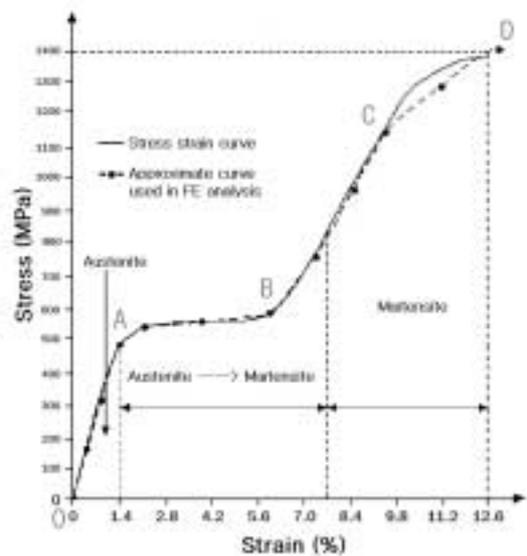


Figure 3. The stress-strain curve of the NiTi material^[22].

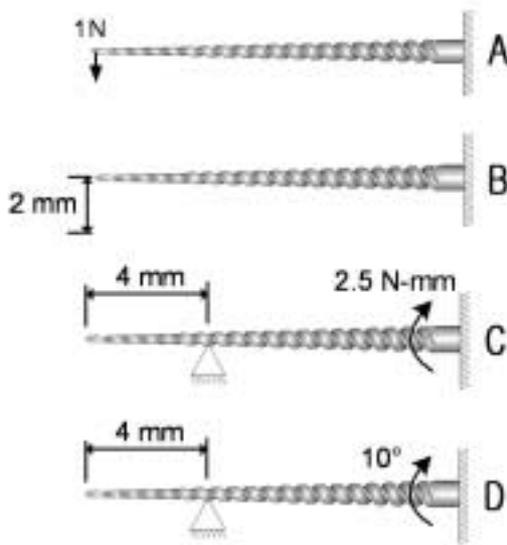


Figure 4. Simulated conditions used in this study: A: The simulated condition of free-end loading of 1 N, B: The simulated condition of same bending distance, C: The torsional condition of 2.5 Nmm with 4 mm fixation, D: The same rotational condition of 10° with 4 mm fixation.

각 모형은 샤프트의 끝에서 구속되었으며 네 가지 하중 조건은 동일 휨 하중, 일정 휨량, 고정 비틀림 응력, 그리고 일정한 비틀림 양을 준 것이다 (Figure 4). 첫 번째 조건 (Figure 4A)은 각 NiTi 파일의 침부에 1 N의 정하중을 가한 상태에서 휨량을 측정하여 특징적인 휨 유연성 (휨 변형/휨력)을 알고자 함이다. 두 번째 응력 조건은 파일 침부에 하중을 가하여 2 mm를 굽힌 것이다 (Figure 4B). 세 번째와 네 번째 하중 조건에서는 파일의 침부에서 4 mm 부위를 구속하고 고정된 샤프트에 2.5 Nmm의 비틀림 응력을 가하거나 (Figure 4C) 10°의 회전량을 부여한 것이다 (Figure 4D).

Ⅲ. 실험 결과

Table 1에 세가지 NiTi 파일과 네 가지 하중 조건에 대한 변형 및 최대 von Mises stress 값을 요약하였다. 모형이 고정된 부위는 응력 비교에서 제외하였다.

휨 조건 하에서의 응력 분포 비교

파일 침부에 1 N의 정하중이 가해졌을 때, ProFile은 4.59 mm, ProTaper는 2.46 mm, 그리고 ProTaper Universal은 3.05 mm 아래로 휘었다 (Figure 5). 결과적으로, 세 모델의 하중에 대한 휨 유연성은 각각 4.59, 2.46, 그리고 3.05 mm/N이다. 최대 von Mises 응력 값은

Table 1. Calculated deformation and maximum von Mises equivalent stress results for three NiTi rotary instruments under four loading conditions. Location of the bending deformation was at the tip of the file, the maximum stress concentration locations were measured from file tip

NiTi instrument		Bending		Torsion	
		1 N	2 mm	2.5 Nmm	10°
ProFile .06 / #30	deformation/rotation	4.59 mm	-	0.995°	-
	bending force/torque	-	0.44 N	-	25.1 N
	maximum stress (MPa)	577 MPa	275 MPa	455 MPa	333 MPa
	location (mm)	8.38 mm	8.38 mm	-	-
ProTaper F3	Deformation/rotation	2.46 mm	-	0.691°	-
	bending force/torque	-	0.81 N	-	36.1 N
	maximum stress (MPa)	349 MPa	350 MPa	350 MPa	359 MPa
	location (mm)	3.68 mm	3.68 mm	-	-
ProTaper Universal F3	Deformation/rotation	3.05 mm	-	0.826°	-
	bending force/torque	-	0.66 N	-	30.2 N
	maximum stress (MPa)	547 MPa	387 MPa	384 MPa	388 MPa
	location (mm)	3.55 mm	3.55 mm	-	-

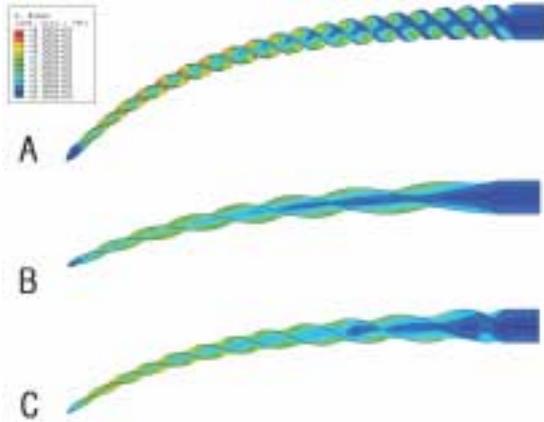


Figure 5. The deflection and stress distribution under the free-end loading. A: ProFile .06 / #30, B: ProTaper F3, C: ProTaper Universal F3.

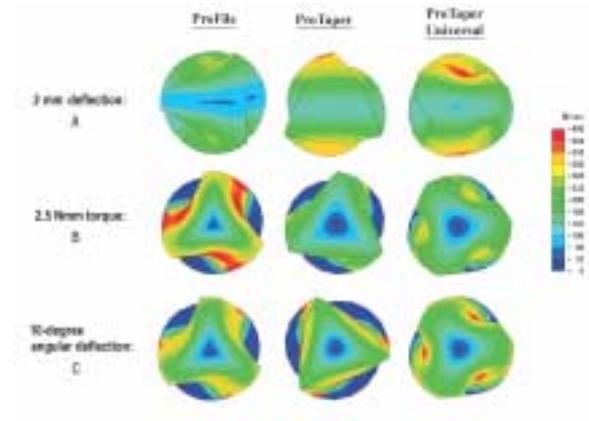


Figure 6. Horizontal row A shows the von Mises stress distribution under the condition of 2 mm deflection. Row B shows the von Mises stress distribution under the condition of 2.5 Nmm torsional moments. Row C shows the von Mises stress distribution under the condition of same rotational angle.

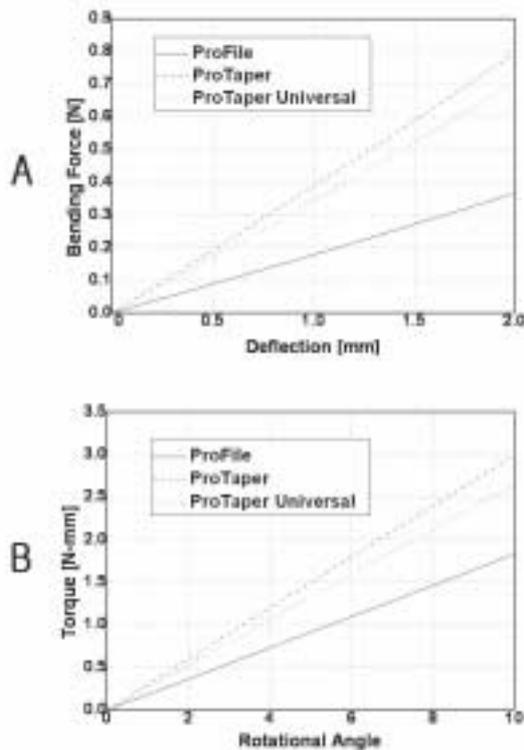


Figure 7. Graph A showing the bending moment needed to deflect. Graph B showing the torque required to rotate the file under the restrained condition.

ProFile의 8.38 mm 위치에서 577 MPa, ProTaper의 3.68 mm 위치에서 349 MPa, 그리고 ProTaper Universal의 3.55 mm 위치에서 547 MPa이었다 (Table 1) (Figure 6A).

파일의 첨부를 2 mm 하방으로 굽히기 위해서는 ProTaper가 가장 높은 힘 (0.81 N)을 필요로 한 반면, ProTaper Universal과 ProFile은 각각 0.66 N과 0.44 N의 힘을 필요로 하였다 (Figure 7A). 따라서 휨 저항력 (bending stiffness values)은 각각 0.41, 0.33, 그리고 0.22 N/mm에 해당된다. 이 들 값은 상호 반비례 관계를 보인다. ProTaper Universal의 홈 부위에서 387 MPa의 가장 높은 von Mises stress 값을 나타냈으며, ProTaper와 ProFile은 각각 350 MPa과 275 MPa이었다 (Figure 6A). 이 최고 응력 값들이 나타나는 파일에서의 위치는 앞선 정하중 조건에서의 각 파일의 길이에서의 위치와 동일 하다.

비틀림 조건 하에서의 응력 분포 비교

각 모형에 2.5 Nmm의 비틀림 응력이 주어졌을 때, ProTaper가 350 MPa의 von Mises stress로 제일 적은 응력을 나타냈으며, ProTaper Universal은 384 MPa, ProFile이 455 MPa로 가장 높은 응력을 나타냈다 (Figure 6B). 이때 뒤틀린 각은 ProTaper, ProTaper Universal, ProFile 순으로 0.691, 0.826, 0.995°이었다 (Table 1).

파일을 시계 방향으로 10° 뒤틀기 위해서 필요한 힘은 Figure 7B에 나타났다. ProFile, ProTaper, 및 ProTaper

Universal에 대한 비틀림 저항력은 차례로 2.51, 3.61, 3.02 Nmm/degree로 ProTaper가 다른 파일에 비해 더 큰 힘을 필요로 하였다. ProFile은 333 MPa, ProTaper는 359 MPa, 그리고 ProTaper Universal이 가장 높은 388 MPa의 응력 집중을 홈 부위에 나타냈다 (Figure 6C).

IV. 총괄 및 고찰

최근 십수년간, NiTi 파일에 대한 관심이 상당히 증가하고 임상에서 널리 사용되고 있다. 동시에 SS 기구에 비해 상대적으로 많은 NiTi 기구의 파절에 대한 우려도 제기되며 이러한 위험성에 대한 많은 연구가 진행되고 있다²³⁻²⁵.

NiTi 전동 기구는 연속적으로 회전하면서 한 방향으로 지속적인 비틀림을 받기 때문에 수동 기구와는 완전히 다른 응력 집중 양상을 보인다. 전단 (비틀림) 응력은 근관의 크기나 삭제할 상아질의 강도, 윤활제의 사용 여부에 따라 다양하게 나타나지만, 기구의 응력 분포에는 그 횡단면의 형태가 가장 중요한 요소가 된다^{20,23,26-28}.

NiTi 기구의 파절에 관한 연구는 주로 임상이나 재현 실험 이후에 SEM 관찰을 통해 이루어져 왔다. 이러한 방법은 휘거나 회전하는 동안의 응력에 대해서는 파악하기가 어려웠다^{17,29-33}.

ProTaper와 ProFile에 관한 유한 요소 연구에서는, ProTaper는 근관 성형의 초기에 상부 근관을 확대하기에 적합하고 반면 ProFile은 마무리 성형 단계의 큰 근관에서 더 적절하다고 추천하였다²⁰. Turpin 등³⁴은 boundary integral method를 사용하여 두 가지 횡단면 구조 (ProFile과 Hero)에 의한 휨과 비틀림에 대한 응력을 연구하였으며 마찬가지로 서로 다른 구조를 가진 기구는 다른 과정에 사용되어야 한다고 제안하였다. 그러나, 두 가지 연구 모두에서 원통형 모양의 모형을 사용하고 실제 파일의 경사도는 모형 제작에 고려하지 않았다. 최근에 Xu 등³⁵도 유한요소분석을 통해 횡단면 구조가 근관 치료용 파일의 기계적 움직임에 미치는 영향을 조사하였으나 이 또한 실제 형상을 그대로 반영하지는 못한 채 횡단면만을 단일 변수로 하여 비틀림 조건에 대한 연구를 진행한 것으로 파악된다.

이 연구에서는 세가지 종류의 NiTi파일을 스캔하여 실제 형상을 얻어 유한 요소 연구에 사용하고 임상에서의 상황을 조건으로 재연하였다. 파일의 끝부분에 하중을 가하여 기구의 휨 강성 (flexural rigidity)를 평가하였고, 이는 소재의 탄성 계수를 반영하며 관성모멘트 (moment of inertia)에 의해 정해진다³⁶. 이 연구 결과에서 ProFile이 다른 시스템에 비해 더 큰 휨량을 보인 것은 휨 강성이 적다는 것을 말하고 이는 높은 유연성을 가짐을 의미한다. 세가지 파일 모두 원자재의 물성이 동일한 것으로 조건을 부여하였으므로,

다양한 휨 강성의 차이는 다른 구조로부터 기인된 것이다. ProFile과 달리 ProTaper가 가장 높은 휨 강성을 나타냈고, 휨량이 적었으며 동일 하중 (1 N) 조건에서는 가장 적은 응력 집중을 보였다. Berutti 등²⁰도 역시 ProTaper가 ProFile에 비해 유사한 하중에서는 낮은 응력을 보이고 응력 분산이 더 잘 되었다고 보고하였다. 그러나, 임상에서는 가해지는 휨력은 외부로부터 정해지는 것이 아니고 사용 중 근관 내 상황에 의해 다양하게 변하게 되는 것이므로 동일 휨량에 의한 상황을 추가하였다 (Figure 4B).

동일한 휨량 조건 하에서는 ProFile에 비해 ProTaper와 ProTaper Universal이 더 높은 응력이 발생하였으며, ProTaper에서는 삭제할 부위에 응력이 집중되었고 ProTaper Universal에서는 단면에서 추가된 구조인 홈 부위에 집중되었다. 이는 삼각 단면을 가진 보 (beam)의 휨 역학에서 추정할 수 있다. 즉 일반적으로 휨량 혹은 굽힘량은 휨력에 비례하고 단면계수에 반비례한다³⁶. 기구의 강직성과 횡단면 면적과의 관계는 많은 연구에서 제안되었다^{32,37-39}. ProTaper와 ProTaper Universal이 유사한 길이 방향의 외형을 갖지만, ProTaper Universal의 볼록한 삼각 단면에서 변에 추가된 홈 부위는 이차관성모멘트 (second moment of inertia)를 효과적으로 감소시키는 역할을 하였지만, 반대로 응력 집중을 가져오는 역할도 하게 되었다.

비틀림 강성은 적용된 비틀림 힘과 극관성모멘트 (polar moment of inertia)에 비례하는 데 이 연구에서는 비틀림 양으로 평가하였다. ProTaper가 가장 높은 강성을 보였으며 ProFile이 가장 낮았다. 그러나, 굽힘량이 근관의 만곡에 의해 지배를 받는 것과는 달리, 삭제 과정에서 상아질에 대한 저항과 접촉 때문에 전동 기구에서의 전단 응력이 발생된다. 따라서, 동일량의 회전각 (Figure 6C)을 이용한 평가보다는 유사한 비틀림 모멘트 (Figure 6B) 하에서 응력 분포를 검사하는 것이 더욱 논리적이다. 이러한 상황에서는 ProFile이 ProTaper보다 더 큰 응력을 받게 되고, 이는 Turpin 등³⁴, Berutti 등²⁰ 및 Xu 등³⁵의 결과와 잘 일치한다.

U-형 삭제날의 아래쪽(홈 부위)으로 비틀림 응력의 집중이 관찰되었는데, 이는 ProTaper의 경우에서보다 훨씬 높았으며, 이러한 부위에 SIM transformation (Stress-induced martensitic transformation; 응력 기원 마르텐사이트 변화)과 변성된 마르텐사이트의 소성변형 가능성이 더 높다. 이는 임상에서 사용하는 ProFile이 ProTaper나 다른 종류의 NiTi 파일에 비해 파절이 있건 없건 간에 나사선 풀림 현상으로 많이 폐기 되는 것을 잘 설명해준다^{8,31,40}. NiTi기구를 사용하기 전에 근관을 #15 혹은 #20 크기까지 확대하는 것은 파일의 비틀림 응력을 감소시키는데 도움이

되고 전단 파절의 가능성을 감소시키는 방법이 된다²⁶⁾.

재료가 동일하고 크기가 같으면 기구의 반력 (reaction force)은 작동 시 하중에 대한 작업 부의 형태에 의해 결정된다. 횡단면 모양, 삭제날의 깊이, 내부 직경의 굽기, 외곽 부 형태의 크기 등이 응력 분포에 영향을 미치는 요소이고 이는 극관성모멘트와 이차관성모멘트의 크기를 결정한다. 원래의 ProTaper 단면에 U-형의 홈을 추가한 형태로 ProTaper Universal을 만든 것은 홈의 아래 부분에 응력이 집중되는 결과를 초래하여 유연성은 증가되었지만 비틀림력에 약하게 되었다.

회전이나 굽힘에 의한 기구의 파절 가능성이 우려될 때 이는 서로 다른 요소가 작용되는 것이 명확하다³⁰⁾. 아주 유연한 성질을 가지면서도 휨력이나 비틀림에 모두 잘 견딜 수 있는 시스템은 없다. 그러므로 임상가들은 NiTi 전동 기구를 사용함에 있어 일반적인 주의 사항을 잘 따라야 함은 물론이고 이들 파일의 파절이나 내구성에 영향을 미치는 구조적 특성을 잘 이해하여야 한다. 안전한 사용을 위해, 근관치료 교육자들은 적절한 감독하에 실습과정을 행하여 전동 파일을 다루는 데 능숙해질 필요가 있음을 강조하여야 한다^{41,42)}.

파일의 구조와 응력 분포, 피로 파절, 미세 현미경하 결합 등의 관련성을 검증하기 위한 부가적인 연구가 또 다른 방법에 의해서도 진행될 필요가 있다.

V. 결 론

다양한 횡단면 구조를 가진 세가지 NiTi 파일 (ProFile, ProTaper 및 ProTaper Universal)의 삼차원 유한요소모형을 이용하여 휨과 비틀림 조건에서 응력 분포를 조사하였다. 이 실험 조건에서는 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

1. U-형의 단면 형태를 가진 ProFile이 가장 높은 유연성을 나타냈고, 볼록한 삼각 단면을 가진 ProTaper가 가장 높은 휨 강성을 나타냈다. 동일량의 휨량을 얻기 위해 ProTaper가 가장 많은 힘을 필요로 하였으며, 이때 가장 높은 응력은 ProTaper Universal의 구 부위에서 나타났다.
2. 비틀림 력 하에서는 모든 파일의 구 부위에 응력이 집중되었다. ProTaper가 가장 높은 비틀림 강성을 보였고 ProFile이 가장 낮았으며, 동일한 비틀림 모멘트 하에서는 ProFile의 구 부위에 가장 높은 응력이 집중되었으나, 동일량의 회전각이 주어졌을 때는 ProTaper Universal의 구 부위에서 최대 응력이 관찰되었다.

참고문헌

1. Walia H, Brantley WA, Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod* 14:346-351, 1988.

2. Glosson CR, Haller RH, Dove SB, del Rio CE. A comparison of root canal preparations using Ni-Ti hand, Ni-Ti engine-driven, and K-Flex endodontic instruments. *J Endod* 21:146-151, 1995.
3. Schäfer E, Schulz-Bongert U, Tulus G. Comparison of hand stainless steel and nickel titanium rotary instrumentation: a clinical study. *J Endod* 30:432-435, 2004.
4. Chen JL, Messer HH. A comparison of stainless steel hand and rotary nickel-titanium instrumentation using a silicone impression technique. *Aust Dent J* 47:12-20, 2002.
5. Garip Y, Gunday M. The use of computed tomography when comparing nickel-titanium and stainless steel files during preparation of simulated curved canals. *Int Endod J* 34:452-457, 2001.
6. Schäfer E. Shaping ability of Hero 642 rotary nickel-titanium instruments and stainless steel hand K-Flexfiles in simulated curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 92:215-220, 2001.
7. Hata G, Uemura M, Kato AS, Imura N, Novo NF, Toda T. A comparison of shaping ability using ProFile, GT file, and Flex-R endodontic instruments in simulated canals. *J Endod* 28:316-321, 2002.
8. Ankrum MT, Hartwell GR, Trutt JE. K3 Endo, ProTaper, and ProFile systems: breakage and distortion in severely curved root of molars. *J Endod* 30:234-237, 2004.
9. Kim HC, Park JK, Hur B. Relative efficacy of three Ni-Ti file systems used by undergraduates. *J Kor Acad Cons Dent* 30:38-48, 2005.
10. Walsch H. The hybrid concept of nickel-titanium rotary instrumentation. *Dent Clin North Am* 48:183-202, 2004.
11. Park SH, Cho KM, Kim JW. The Efficiency of the Ni-Ti Rotary files in Curved Simulated Canals Shaped by Novice Operators. *J Kor Acad Cons Dent* 28:146-155, 2003.
12. Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Beullens M, Wevers M, Van Meerbeek B, Lambrechts P. Progressive versus constant tapered shaft design using NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 36:288-295, 2003.
13. Clauder T, Baumann MA. ProTaper NT system. *Dent Clin North Am* 48:87-111, 2004.
14. Calberson FL, Deroose CA, Hommez GM, De Moor RJ. Shaping ability of ProTaper nickel-titanium files in simulated resin root canals. *Int Endod J* 37:613-623, 2004.
15. Yun HH, Kim SK. A comparison of the shaping abilities of 4 nickel-titanium rotary instruments in simulated root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 95:228-233, 2003.
16. Schäfer E, Vlassis M. Comparative investigation of two rotary nickel-titanium instruments: ProTaper versus RaCe. Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J* 37:229-238, 2004.
17. Grande NM, Plotino G, Pecci R, Bedini R, Malagnino VA, Somma F. Cyclic fatigue resistance and three-dimensional analysis of instruments from two nickel-titanium rotary systems. *Int Endod J* 39:755-763, 2006.
18. Martín B, Zelada G, Varela P, Bahillo JG, Magán F, Ahn S, Rodríguez C. Factors influencing the fracture of

- nickel-titanium rotary instruments. *Int Endod J* 36:262-266, 2003.
19. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod* 26:161-165, 2000.
 20. Berutti E, Chiandussi G, Gaviglio I, Ibba A. Comparative analysis of torsional and bending stresses in two mathematical models of nickel-titanium rotary instruments: ProTaper versus ProFile. *J Endod* 29:15-19, 2003.
 21. Camps JJ, Pertot WJ, Levallois B. Relationship between file size and stiffness of nickel titanium instruments. *Endod Dent Traumatol* 11:270-273, 1995.
 22. Wang GZ. A finite element analysis of evolution of stress-strain and martensite transformation in front of a notch in shape memory alloy NiTi. *Mater Sci Eng A* 460-461:383-391, 2007.
 23. Tripi TR, Bonaccorso A, Condorelli GG. Cyclic fatigue of different nickel-titanium endodontic rotary instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Radiol Endod* 102:e106-114, 2006.
 24. Best S, Watson P, Pilliar R., Kulkarni GJK, Yared G. Torsional fatigue and endurance limit of a size 30.06 ProFile rotary instrument. *Int Endod J* 37:370-373, 2004.
 25. Plotino G, Grande NM, Sorci E, Malagnino VA, Somma F. Influence of a brushing working motion on the fatigue life of NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 40:45-51, 2007.
 26. Hübscher W, Barbakow F, Peters OA. Root canal preparation with FlexMaster: assessment of torque and force in relation to canal anatomy. *Int Endod J* 36:883-890, 2003.
 27. Peters OA, Peters CI, Schonenberger K, Barbakow F. ProTaper rotary root canal preparation: assessment of torque and force in relation to canal anatomy. *Int Endod J* 36:93-99, 2003.
 28. Boessler C, Peters OA, Zehnder M. Impact of lubricant parameters on rotary instrument torque and force. *J Endod* 33:280-283, 2007.
 29. Shen Y, Bian Z, Cheung GS, Peng B. Analysis of defects in ProTaper hand-operated instruments after clinical use. *J Endod* 33:287-290, 2007.
 30. Lopes HP, Moreira EJ, Elias CN, de Almeida RA, Neves MS. Cyclic fatigue of ProTaper instruments. *J Endod* 33:55-57, 2007.
 31. Yao JH, Schwartz SA, Beeson TJ. Cyclic fatigue of three types of rotary nickel-titanium files in a dynamic model. *J Endod* 32:55-57, 2006.
 32. Ullmann CJ, Peters OA. Effect of cyclic fatigue on static fracture loads in ProTaper nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 31:183-186, 2005.
 33. Cheung GS, Peng B, Bian Z, Shen Y, Darvell BW. Defects in ProTaper S1 instruments after clinical use: fractographic examination. *Int Endod J* 38:802-809, 2005.
 34. Turpin YL, Chagneau F, Vulcain JM. Impact of two theoretical cross-sections on torsional and bending stresses of nickel-titanium root canal instrument models. *J Endod* 26:414-417, 2000.
 35. Xu X, Eng M, Zheng Y, Eng D. Comparative study of torsional and bending properties for six models of nickel-titanium root canal instruments with different cross-sections. *J Endod* 32:372-375, 2006.
 36. Timoshenko SP, Goodier JN. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, 1970.
 37. Schäfer E, Dzepina A, Danesh G. Bending properties of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 96:757-763, 2003.
 38. Haikel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 25:434-440, 1999.
 39. Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after clinical use. *Int Endod J* 33:204-207, 2000.
 40. Shen Y, Cheung GS, Bian Z, Peng B. Comparison of defects in ProFile and ProTaper systems after clinical use. *J Endod* 32:61-65, 2006.
 41. Mandel E, Adib-Yazdi M, Benhamou LM, Lachkar T, Mesgouez C, Sobel M. Rotary Ni-Ti profile systems for preparing curved canals in resin blocks: influence of operator on instrument breakage. *Int Endod J* 32:436-443, 1999.
 42. Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Influence of rotational speed, torque and operator's proficiency on ProFile failures. *Int Endod J* 34:47-53, 2001.

국문초록

세가지 니켈 티타늄 파일의 휨과 비틀림 조건에서의 응력 분포에 관한 3차원 유한요소 연구

김태오¹ · 이찬주² · 김병민² · 박정길¹ · 허 복¹ · 김현철^{1*}

¹부산대학교 치의학전문대학원 치과보존학교실, ²부산대학교 공과대학 기계공학부

이 연구의 목적은 세가지 니켈-티타늄 파일의 휨과 회전 조건 하에서의 응력 분포를 유한요소 모형을 이용하여 비교하는 것이다.

ProFile .06/#30, ProTaper와 ProTaper Universal의 F3파일을 마이크로컴퓨터 단층촬영을 하고 reverse engineering을 통하여 세 니켈 티타늄 파일의 구조를 얻고 삼차원 유한요소모형을 제작하였다. 니켈 티타늄 합금의 비선형적인 물리적 성질을 반영하고 ABAQUS 프로그램을 이용하여 휨과 회전 조건 하에서의 기계적인 움직임을 수학적으로 예측 분석하였다.

U-형태의 단면 구조를 가진 ProFile이 모형 가운데 가장 좋은 휨 성질을 나타냈다. 동일한 휨량 조건에서는 볼록한 삼각형 단면의 ProTaper가 다른 모형보다 많은 힘을 필요로 하였으며, 반면에 가장 높은 von Mises 응력은 ProTaper Universal의 단면에서 움푹 파인 부위에 집중되었다.

ProFile 모형은 동일한 크기의 회전력에 대해 가장 큰 응력 집중을 U-형 구 부위에 나타냈다. ProTaper 모형은 다른 모형에 비해 동일량을 비틀기 위해 더 많은 힘을 필요로 하였으며, 반면에, 동량의 비틀림에서는 가장 높은 von Mises 응력이 ProTaper Universal의 단면에서 움푹 파인 부위에 집중되었다.

주요어: 응력, 니켈-티타늄 파일, 횡단면 구조, 휨, 비틀림, 유한요소