

내부 응력이 .06 taper ProFile의 피로 파절에 미치는 영향

정혜림, 김진우, 조경모, 박세희*

강릉원주대학교 치과대학 치과보
존학교실

Effect of internal stress on cyclic fatigue failure in .06 taper ProFile

Hye-Rim Jung, Jin-Woo Kim, Kyung-Mo Cho, Se-Hee Park*

Department of Conservative Dentistry, Gangneung-Wonju National University School of Dentistry, Gangneung, Korea

Objectives: The purpose of this study was to evaluate the relation between intentionally induced internal stress and cyclic fatigue failure of .06 taper ProFile. **Materials and Methods:** Length 25 mm, .06 taper ProFile (Dentsply Maillefer), and size 20, 25, 30, 35 and 40 were used in this study. To give the internal stress, the rotary NiTi files were put into the .02 taper, Endo-Training-Bloc (Dentsply Maillefer) until auto-stop by torque controlled motor. Rotary NiTi files were grouped by the number of induced internal stress and randomly distributed among one control group and three experimental groups ($n = 10$, Stress 0 [control], Stress 1, Stress 2 and Stress 3). For cyclic fatigue measurement, time for separation of the rotary NiTi files was recorded. The fractured surfaces were observed by field emission scanning electron microscope (FE-SEM, SU-70, Hitachi). The time for separation was statistically analyzed using two-way ANOVA and *post-hoc* Scheffe test at 95% level. **Results:** In .06 taper ProFile size 20, 25, 30, 35 and 40, there were statistically significant difference on time for separation between control group and the other groups ($p < 0.05$). **Conclusion:** In the limitation of this study, cyclic fatigue failure of .06 taper ProFile is influenced by internal stress accumulated in the files. (*Restor Dent Endod* 2012;37(2):79-83)

Key words: Auto-reverse; Auto-stop; Cyclic fatigue failure; Internal stress; Separation; .06 taper ProFile

Received December 20, 2011;
Revised February 15, 2012;
Accepted February 24, 2012.

Jung HR, DDS, MSD, Resident;
Kim JW, DDS, PhD, Professor;
Cho KM, DDS, PhD, Associate
Professor; Park SH, DDS, PhD,
Assistant Professor, Department of
Conservative Dentistry, Gangneung-
Wonju National University School of
Dentistry, Gangneung, Korea

*Correspondence to

Se-Hee Park, DDS, PhD.
Assistant Professor, Department of
Conservative Dentistry, Gangneung-
Wonju National University School of
Dentistry, Gangneung Daehangno
120, Gangneung, Korea 210-702
TEL, +82-33-640-2760; FAX, +82-
33-640-3103; E-mail, drendo@
gwnu.ac.kr

서론

회전식 니켈-티타늄 파일은 기존의 스테인리스 스틸 파일에 비해 높은 유연성을 가지고 있어, 근관 성형 시 근단공 부위에서 근단공의 위치 변화를 최소화 하고 근관의 본래의 형태와 위치를 유지할 수 있다.¹⁻³ 그리고 파일의 형태가 보다 큰 기울기를 가지고 있어 근관 성형을 위해 필요한 파일의 수가 줄어들기 때문에 치료 시간을 단축할 수 있다.⁴

그러나 회전식 니켈-티타늄 파일의 많은 장점에도 불구하고, 파일의 근관 내 파절은 근관계에서 세 정액의 도달을 막고 효과적인 세균 제거를 방해하여 근관 치료의 실패를 야기할 수 있다.⁵ 여러 임상 연구에 따르면 회전식 니켈-티타늄 파일의 파절 발생 빈도는 0.35 - 3.70% 로 보고되고 있으며,⁶ 파절의 발생 기전은 비틀림 파절(torsional failure)과 피로 파절(cyclic fatigue failure)의 두 가지이다.^{7,8} 비틀림 파절이란 기구의 끝이나 일부분이 근관 내에 끼였을 때 그 부위는 회전하지 않는 반면, shank 부위

는 계속 회전함으로써 파일에 가해지는 토크가 탄성한계를 넘었을 때 발생하는 파절이다. 그리고 피로 파절이란 만곡된 근관을 형성하는 과정에서 니켈-티타늄 파일을 회전시킴으로써 만곡 부위에서 인장-압축 응력이 반복적으로 가해지면서 합금 내에 피로가 쌓여 일어나는 파절이다.^{9,10}

회전식 니켈-티타늄 파일을 회전시킬 때 일정한 속도와 토크 값의 유지를 위해 전기 모터를 사용한다.¹¹ 이러한 전기 모터에는 비틀림 응력(torsional stress)에 의한 파절을 방지하기 위하여 파일에 설정된 값 이상의 토크가 걸린 경우 원래의 회전 방향과 반대로 파일을 회전시키는 auto-reverse 또는 auto-stop을 포함하기도 한다. 그러나 이러한 auto-reverse 기능이 오히려 파일 내부에 응력을 축적시켜 파일의 수명을 감소시킨다고 보고되고 있으나,¹² 비틀림 응력에 의해 축적된 내부 응력과 피로 파절과의 관계에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구에서는 의도적으로 유발시킨 auto-stop으로 회전식 니켈-티타늄 파일에 내부 응력을 부여한 후, 그 파일의 피로 파절을 측정하여 내부 응력과 피로 파절의 관계를 평가하고자 하였다.

연구 재료 및 방법

본 실험에서 사용한 회전식 니켈-티타늄 파일은 25 mm 길이의 .06 taper ProFile (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)이며 20, 25, 30, 35 그리고 40번의 다섯 가지 크기를 사용하였다. 전기 모터는 X-SMART (Dentsply Maillefer)를 사용하였다. 회전식 니켈-티타늄 파일에 내부 응력을 부여하기 위한 레진 모형 근관으로 .02 taper Endo-Training-Bloc (Dentsply Maillefer)을 사용하였고, 각각의 파일에 내부 응력을 부여 할 때는 모두 새 모형 근관을 사용하였다.

회전식 니켈-티타늄 파일을 임의로 10개씩 나누어, 각 실험군에 따라 횟수를 달리하여 내부 응력을 부여하였다. 내부 응력을 부여하기 위한 방법으로 고정된 Endo-Training-Bloc에 니켈-티타늄 파일을 설정 값 이상의 토크가 걸려 파일이 멈출 때까지 일정한 속도로 밀어 넣었다. 이 때 전기 모터는 속도 300 rpm, 토크 값 2.0 N·cm, auto-stop으로 설정하였다. 내부 응력 조건을 가능한 한 일정하게 반복 재현하기 위하여 한명의 실험자에 의해 실험이 진행되었다. 회전식 니켈-티타늄 파일에 내부 응력을 1회에서 3회까지 부여하였으며(Stress 1, Stress 2, Stress 3), 대조군인 Stress 0 군에는 내부 응력을 부여하지 않았다($n = 10$). 내부 응력을 부여하는 과정에서 파절이 일어난 파일은 피로 파절 측정에서 제외하였다.

피로 파절 측정 방법으로는 Li 등이 사용한 경사면(inclined plane) 방법을 응용하여 이용하였다.¹³ 내부 응력이 부여된 각각의 회전식 니켈-티타늄 파일들을 전기 모터와 유리판을 바이스에 고정하여 파일이 60°의 각도로 경사진 유리판에 일정 길이만큼 접촉하도록 한 후 (Figure 1), 회전하기 시작한 때부터 파일이 부러질 때까지의 시간을 기록하였다. 유리판에는 1 mm 깊이의 구를 형성함으로써 파일이 회전하는 동안 유리판의 일정 부위에서만 회전하도록 하였고, 회전 부위에 윤활제를 도포하여 파일과 유리판 사이의 마찰을 최소화하였다. 유리판과 회전 시 접촉하는 니켈-티타늄 파일의 길이는 4 mm 이었으며, 니켈-티타늄 파일의 만곡 각도는 Schneider 법으로 40.5°이었다.¹⁴ 회전식 니켈-티타늄 파일이 파절된 후, 그 파절 단면은 전계 방출 주사 전자 현미경(Field emission scanning electron microscope [FE-SEM], SU-70, Hitachi, Tokyo, Japan)을 이용하여 관찰하였다.

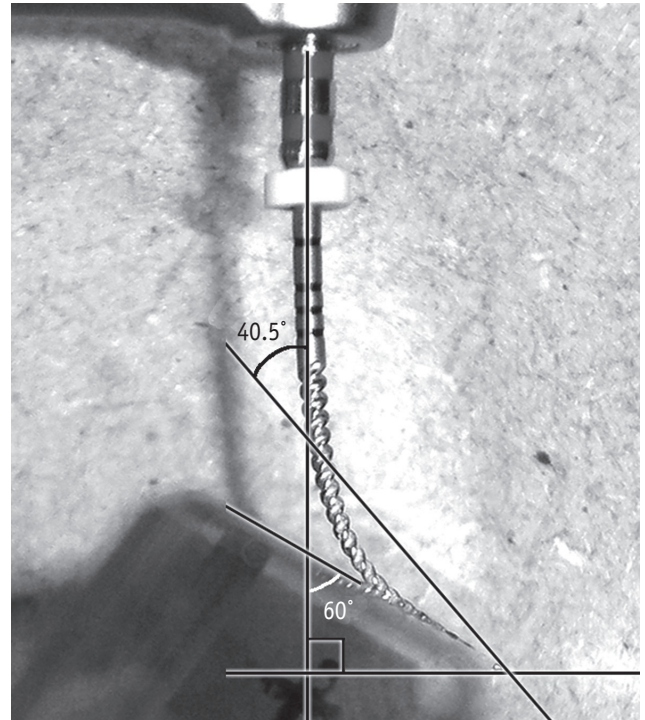


Figure 1. Representative image of cyclic fatigue testing using inclined glass plane.

대조군을 포함한 모든 실험군에서 측정된 파절 되는데 걸린 시간을 SPSS version 18.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하여 95% 유의수준에서 two way ANOVA test로 비교 분석하였으며 Scheffe test를 이용하여 사후 검정하였다.

결과

.06 taper ProFile의 각 크기와 부여한 응력의 횟수에 따라 파절 되는데 걸리는 시간의 평균과 표준 편차를 Table 1에 나타내었다. 실험에서 파절 되는데 걸리는 시간이 가장 길게 나타난 구간은 35번 파일에서 stress를 부여하지 않은 경우로 평균 1005.14초의 시간이 걸렸으며, 가장 짧게 나타난 구간은 30번 파일에서 stress를 2회 부여한 경우로 평균 115.81초의 시간이 걸렸다($p < 0.0001$). 파일의 크기가 20번과 25번인 경우, stress를 3회 부여한 경우 대조군(Stress 0)에 비해 파절 되는데 걸리는 시간이 유의하게 감소하였다. 30번, 35번 및 40번 크기에서 파일에 stress를 1회에서 3회까지 부여한 실험군에서 파절 되는데 걸리는 시간은 대조군에 비해 유의하게 감소하였다. 이 실험에서 각각의 실험군(Stress 1, Stress 2 and Stress 3) 사이에서는 유의한 차이가 관찰되지 않았다(Table 1).

Stress를 부여하지 않은 대조군 내에서 35번과 40번의 경우 20, 25 및 30번에 비해 파절되는데 걸리는 시간이 유의하게 증가하였다. Stress가 1, 2회 부여된 경우 각각 20번과 30번, 30번과 35번, 35번과

Table 1. Time for separation of .06 taper ProFile

Group	#20		#25		#30		#35		#40	
	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)
Stress 0	10	183.71 ± 41.82 ^a	10	197.51 ± 30.48 ^a	10	147.32 ± 8.32 ^a	10	1005.14 ± 88.58 ^a	10	948.46 ± 165.87 ^a
Stress 1	10	189.55 ± 28.45 ^a	10	174.34 ± 54.48 ^{a,b}	10	127.47 ± 7.10 ^b	10	406.88 ± 62.51 ^b	10	760.05 ± 119.04 ^b
Stress 2	9	170.00 ± 30.56 ^{a,b}	10	155.63 ± 10.34 ^{a,b}	10	115.81 ± 4.74 ^b	10	344.69 ± 48.80 ^b	10	764.31 ± 234.34 ^b
Stress 3	9	141.25 ± 27.25 ^b	9	135.24 ± 17.56 ^b	10	127.43 ± 10.18 ^b	10	376.30 ± 80.24 ^b	10	799.01 ± 25.47 ^b

Same superscripts shows no statistically significant difference in same size.

Stress0, Stress1, Stress2 and Stress3 are grouped by the number of induced internal stress.

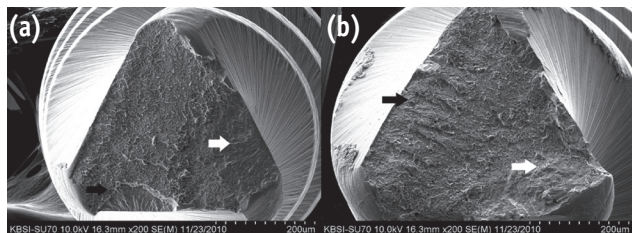


Figure 2. FE-SEM micrographs of separated surface of .06 taper ProFile. The surfaces in all experimental groups showed same patterns of cyclic fatigue fracture. There is no circular abrasion mark which is feature of surface of torsional fracture. (a) #30 Stress 3 group (x200); (b) #35 Stress 3 group (x200). Black arrow, initiation zone; white arrow, overload zone. FE-SEM, Field emission scanning electron microscope.

40번 사이에서 유의한 차이가 관찰되었다. Stress가 3회 부여된 경우 35번과 40번에서 나머지 크기의 파일에 비해 파절되는데 걸리는 시간이 유의하게 증가하였다. 20번, 25번 및 30번에서 파절되는데 걸리는 시간은 가해진 stress의 횟수와 관계없이 35번과 40번 크기에 비해 짧게 나타났다.

파절 단면의 주사 전자현미경 분석 결과 모든 크기의 니켈-티타늄 파일 내의 모든 군에서 비틀림 응력에 의한 파절 경향은 관찰되지 않고 지속적인 회전에 의한 피로 파절 양상만 관찰되었다(Figure 2).

총괄 및 고안

Berutti 등의 연구에서 auto-reverse에 의해 내부 응력이 발생하였다고 하였으나, 본 실험에서는 전기 모터를 auto-stop으로 설정하여 회전식 니켈-티타늄 파일에 내부 응력을 부여하였다.¹² 이는 예비 실험에서 auto-reverse로 설정하였을 때 파일이 반대 방향으로 회전하면서 오히려 더 큰 응력이 파일 내에 작용하여 비틀림 파절을 겪었기 때문이며, 파절이 일어나지 않는 경우에도 실험자가 설정된 토크 값이 파일에 가해진 토크 값과 같아지는 순간을 인지하기가 어려워 각 파일마다 비교적 일정한 내부 응력을 부여하는 것이 쉽지 않았기 때문이다. Auto-reverse는 auto-stop 이후 반대로 회전하는 연속적인 동작이기 때문에 두 가지를 완전히 분리하여 생각할 수 없으며, 전기 모터에서

설정된 토크에 도달한 시점에서 파일이 멈추는 auto-stop으로 설정함이 본 실험에 더욱 적절하다고 할 수 있다.

회전식 니켈-티타늄 파일의 피로 파절을 측정하는 다양한 방법이 소개되어 왔다.¹⁵ 피로 파절은 근관의 형태, 즉 만곡 각도와 만곡 반지름에 의해 영향 받는다. 즉, 만곡 각도가 커지거나, 만곡 반지름이 작아질수록 기구의 수명은 짧아진다.⁶ 본 연구에서 사용한 경사진 유리 판에서 파일을 회전시키는 방법은 비교적 간단하게 피로 파절을 측정할 수 있으며, 다른 측정 방법에 비해 마찰에 의한 기구의 손상을 줄일 수 있다. 그러나 이 방법은 근관의 만곡 각도는 재현할 수 있으나, 만곡 반지름을 재현할 수 없다는 한계가 있다.^{13,15}

본 실험의 결과에서 모든 크기의 파일에서 내부 응력을 받은 경우, 대조군에 비하여 파절에 걸리는 시간이 감소하였다. 모든 크기의 .06 taper ProFile에서 auto-stop이 단 1회만 작용하더라도 파절 되는데 걸리는 시간이 유의성 있게 감소하였으나, 실험군 간에 파절 되는데 걸리는 시간은 유의성 있는 차이가 나타나지 않았다. 따라서 모든 크기의 .06 taper ProFile에서 auto-stop 또는 auto-reverse가 1회만 작용하더라도 그 파일을 가능한 재사용하지 않는 것이 좋다. 그리고 내부응력을 부여하는 과정에서 20번에서 2개, 25번에서 1개의 파일이 레진 모형 근관 내에서 파절되었는데, 이는 작은 직경의 회전식 니켈-티타늄 파일이 비틀림 응력에 대해 취약하기 때문이라고 볼 수 있다. 20번, 25번 및 30번에서 파절되는데 걸리는 시간은 가해진 stress의 횟수와 관계없이 35번과 40번 크기에 비해 짧게 나타났는데, 이는 30번 이하의 작은 크기의 파일이 피로 파절에 대한 저항성이 낮은 것으로 해석할 수 있다. 본 실험에서 서로 다른 크기 간의 파절되는데 걸리는 시간을 분석한 결과, 35번과 40번의 경우 그 시간이 유의하게 증가하였다. 이는 ProFile의 경우 parallel core를 절삭하여 제작하는데, core가 굵어질수록 피로 파절이 일어날 때까지 더 많이 회전할 수 있는 것으로 생각할 수 있다. 반면 크기가 작은 20번, 25번 그리고 30번 파일의 경우 파절되는데 걸리는 시간이 유의한 차이는 관찰되지 않았는데, 이는 core의 굵기가 가는 경우 비틀림 응력에 취약하여 이미 core에 내부 응력이 축적되어 지속적인 회전에 의한 피로 파절보다는 auto-stop에 의한 내부 응력이 더 크게 영향을 끼친 것으로 생각할 수 있다.

Auto-stop이 발생하면 파일에 비틀림 응력이 가해진다. 이 실험의 결과를 통해 회전식 니켈-티타늄 파일이 파절이 일어나지 않았더라도 이러한 비틀림 응력이 파일 내부에 어떠한 손상을 주어 파일의 수명을 감소시키는 결과를 가져온 것으로 생각할 수 있다. 그리고 기존의 많은 연구에서 비틀림 파절과 피로 파절은 분리되어 연구되어 온 것과 달리,^{6,13,15} 실제 임상에서 두 가지 파절 양상이 복합적으로 나타나는 경우가 더욱 많을 것이다. 여러 연구에서 만곡 근관에서 파일이 진

행하는 동안, 즉 굽힘 응력이 작용하는 동안 파일의 비틀림 응력에 대한 저항성이 감소하는 결과가 나왔다.^{16,17} 또한 Lee 등은 회전식 니켈-티타늄 파일 표면에 발생한 표면 결함이 파일의 피로 파절에 영향을 미친다고 하였는데, 본 실험에서 비틀림 응력이 가해질 때 표면 결함이 발생하였을 수도 있다고 생각한다.¹⁸ 실제 임상에서는 실험과 같이 auto-stop이 빈번하게 일어나지 않는다. 회전식 니켈-티타늄 파일을 사용함에 있어서 glide path의 형성이 선행되어야 하며, crown-down 방법에서 근관의 치관부를 미리 넓힘(preflaring)으로써 비틀림 응력이 가능한 일어나지 않도록 하기 때문이다. Berutti 등은 치관부를 미리 넓힌 경우 회전식 니켈-티타늄 파일의 파절이 감소한다고 하였다.¹² 또 Yared 등은 토크 값이 크더라도 숙련된 술자가 사용시 파일의 파절은 거의 일어나지 않는다고 하였다.^{19,20} 그러므로 회전식 니켈-티타늄 파일 사용시 비틀림 응력이 가해지지 않도록 glide path를 형성하고 치관부를 미리 넓혀 주어야 하며, 치관단 방향으로 무리한 힘을 가하지 않아야 한다.

본 실험에서 사용한 회전식 니켈 티타늄 파일인 ProFile의 단면은 radial land, triple-U 그리고 parallel core의 세 가지 특징을 가지고 있다. Core의 평행한 특징으로 ProFile은 다른 파일에 비해 높은 유연성을 보이며, 근관 내 변이를 최소화 할 수 있다. 그러나 이러한 특성 때문에 ProFile이 ProTaper (Dentsply Maillefer)에 비해 비틀림 응력에 더욱 취약하다는 연구 결과도 발표되었다.²¹⁻²³ 이에 후속 연구로서 ProTaper와 같은 tapered core를 갖는 파일에 대한 연구가 필요할 것으로 사료되며, 이는 회전식 니켈-티타늄 파일에서 core의 형태가 미치는 영향에 관한 분석을 가능하게 할 것이다. 주사 전자 현미경 관찰 결과에서 순수한 비틀림 응력에 의한 파절 양상인 circular abrasion 형태는 관찰되지 않았으며 모든 파일에서 피로 파절의 형태만 관찰되었다. 이것은 니켈-티타늄 파일이 본 실험에서 인위적으로 부여한 비틀림 응력이 파일에 영향을 주지 못하였다고 보다는 최종적인 파일의 파절 원인이 지속적인 회전에 의한 피로 파절이기 때문인 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 가정한 내부 응력은 현미경적으로 관찰 가능한 변화는 아니며, 니켈-티타늄 합금 내부의 구조적인 변화로 정의 내리는 것이 타당할 것이다.

결론

본 연구는 의도적으로 유발시킨 auto-stop으로 회전식 니켈-티타늄 파일에 내부 응력을 부여한 후, 그 파일의 피로 파절을 측정함으로써 내부 응력과 피로 파절의 관계를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 회전식 니켈-티타늄 파일은 토크 조절성 전기 모터에서 발생한 auto-stop에 의해 내부 응력이 축적된다. 그리고 이러한 내부 응력은 파일의 피로 파절에 영향을 주며, 파일의 수명을 감소시킴을 알 수 있다. 그러므로 임상가들은 토크 조절성 전기 모터와 회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 근관 형성 과정에서 auto-reverse 또는 auto-stop이 발생하였다면 그 파일은 가능한 재사용하지 않는 것이 좋다.

Conflict of Interest: No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H. An initial investigation of bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod* 1988;14:346-351.
2. Ayar LR, Love RM. Shaping ability of ProFile and K3 rotary Ni-Ti instruments when used in a variable tip sequence in simulated curved root canals. *Int Endod J* 2004;37:593-601.
3. Al-Sudani D, Al-Shahrani S. A comparison of the canal centering ability of ProFile, K3 and RaCe Nickel Titanium rotary systems. *J Endod* 2006;32:1198-1201.
4. Canalda-Sahli C, Brau-Aguadé E, Berástegui-Jimeno E. A comparison of bending and torsional properties of K-files manufactured with different metallic alloys. *Int Endod J* 1996;29:185-189.
5. Haapasalo M, Udnæs T, Endal U. Persistent, recurrent, and acquired infection of the root canal system post-treatment. *Endod Topics* 2003;6:29-56.
6. Parashos P, Messer HH. Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *J Endod* 2006;32:1031-1043.
7. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod* 2000;26:161-165.
8. Ullmann CJ, Peters OA. Effect of cyclic fatigue on static fracture loads in ProTaper nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2005;31:183-186.
9. Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod* 2004;30:559-567.
10. Parashos P, Gordon I, Messer HH. Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *J Endod* 2004;30:722-725.
11. Park SH, Seo HW, Hong CU. An evaluation of rotational stability in endodontic electronic motors. *J Korean Acad Cons Dent* 2010;35:246-256.
12. Berutti E, Negro AR, Lendini M, Pasqualini D. Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *J Endod* 2004;30:228-230.
13. Li UM, Lee BS, Shih CT, Lan WH, Lin CP. Cyclic fatigue of endodontic nickel titanium rotary instruments: static and dynamic tests. *J Endod* 2002;28:448-451.
14. Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1971;32:271-275.
15. Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2009;35:1469-1476.
16. Bahia MG, Martins RC, Gonzalez BM, Bueno VT. Physical and mechanical characterization and the influence of cyclic loading on the behaviour of nickel-titanium wires employed in the manufacture of rotary endodontic instruments. *Int Endod J* 2005;38:795-801.
17. Yared G, Kulkarni GK, Ghossayn F. An *in vitro* study

- of the torsional properties of new and used K3 instruments. *Int Endod J* 2003;36:764-769.
18. Lee JK, Kim ES, Kang MW, Kum KY. The effect of surface defects on the cyclic fatigue fracture of HEROShaper Ni-Ti rotary files in a dynamic model: a fractographic analysis. *J Korean Acad Cons Dent* 2007;32:130-137.
 19. Yared GM, Dagher FE, Machtou P, Kulkarni GK. Influence of rotational speed, torque and operator proficiency on failure of Greater Taper files. *Int Endod J* 2002;35:7-12.
 20. Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Influence of rotational speed, torque and operator's proficiency on ProFile failures. *Int Endod J* 2001;34:47-53.
 21. Kim TO, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Hur B, Kim HC. Stress distribution of three NiTi rotary files under bending and torsional conditions using 3-dimensional finite element analysis. *J Korean Acad Cons Dent* 2008;33:323-331.
 22. Camps JJ, Pertot WJ. Machining efficiency of nickel-titanium K-type files in a linear motion. *Int Endod J* 1995;28:279-284.
 23. 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* 2003;29:15-19.