

K3에 축적된 내부 응력이 피로 파절에 미치는 영향

김준영, 김진우, 조경모, 박세희*

강릉원주대학교 치과대학 치과보존학교실

Effect of internal stress on cyclic fatigue failure in K3

Jun-Young Kim, Jin-Woo Kim, Kyung-Mo Cho, Se-Hee Park*

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

Objectives: This study aimed to evaluate the relationship between the cyclic fatigue of a K3 file and internal stress intentionally induced until the activation of the auto-stop function of the torque-controlled motor. **Materials and Methods:** K3 (Sybron Endo) .04 and .06 taper, size 25, 30, 35, 40 and 45 were used in this study. To give the internal stress, the K3 files were put into the .02 taper Endo-Training-Bloc (Dentsply Maillefer) until the activation of the auto-stop function of the torque-controlled motor. The rotation speed was 300 rpm and torque value was 1.0 N·cm. K3 were grouped by the number of induced internal stress and randomly distributed to 4 experimental groups ($n = 10$, Stress 0 [control], Stress 1, Stress 2 and Stress 3). For measuring the cyclic fatigue failure, the K3 files were worked against a sloped glass block and time for file separation was recorded. Data was statistically analyzed. Statistical analyses were performed using two-way ANOVA and Duncan *post-hoc* test at $p < 0.05$ level. **Results:** Except .04 taper size 30 in Stress 1 group, there were statistically significant differences in time for file separation between control and all experimental groups. K3 with .04 taper showed higher cyclic fatigue resistance than those of .06 taper. **Conclusion:** In the limitation of this study, the cyclic fatigue of the K3 file was influenced by the accumulated internal stress from use until the auto-stop function was activated by the torque-controlled motor. Therefore, clinicians should avoid the reuse of the K3 file that has undergone auto-stops. (*Restor Dent Endod* 2012;37(2):74-78)

Received December 22, 2011;
 Revised February 6, 2012;
 Accepted February 12, 2012.

Kim JY, 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, 120 Daehang-ro, Gangneung, Korea 210-702
 TEL, +82-33-640-2760; FAX, +82-33-640-3103; E-mail, drendo@gwnu.ac.kr

Key words: Auto-stop; Cyclic fatigue failure; Internal stress; K3; Separation; Torsional stress

서론

회전식 니켈-티타늄 파일은 같은 크기의 스테인레스 스틸 파일에 비해 구부림(bending)이나 뒤틀림(torsion)에 2 - 3배의 탄성을 가지고 있어, 만곡된 근관에서도 근관 성형 전의 근관 형태를 유지하고 근관에 가해지는 힘을 최소화하여 작업장의 변화나 치근단공 변위(apical transportation)와 같은 문제점을 효과적으로 감소시킨다는 장점이 있다.¹⁻⁴ 그러나 초탄성의 특징에도 불구하고 회전식 니켈-티타늄 파일은 근관 치료 중 근관 내에서 파절이 일어날 수 있는 위험성이 항상 존재한다. 대부분의 스테인레스 스틸 파일이 과도한 토크에 의해 파절 되는데 반해 회전식 니켈-티타늄 파일의 파절은 비틀림(torsion)과 피로(fatigue)에 의해 일어난다.⁵ 기구의 일부가 좁고 만곡된 근관에 꽂힌 상태에서 전기

※This study was supported by research funding of 2011 year from Gangneung-Wonju National University Dental Hospital (2011-0089).

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

모터가 계속 회전하면 기구에 작용하는 비틀림 응력이 기구가 가진 최대 전단 응력을 넘어서게 되고 기구는 비틀림 파절(torsional fracture)을 일으킨다.⁶ 회전식 니켈-티타늄 파일의 주기적 피로 파절(cyclic fatigue fracture)은 최대 만곡 부위에서 신장력과 압축력의 반복으로 인해 발생한다.⁷ 피로 한 항복점(yield point) 이하에서 지속적인 응력을 받는 것을 의미하며, 주기적 피로 한 만곡된 근관에서 계속된 회전에 의해 생긴 파일의 물성 저하를 나타내기 위해 사용되어 왔다.⁸ 이러한 파절이 발생하는 데는 다양한 요인이 작용한다.⁵

파일 단면 형태가 기구의 뒤틀림과 굽힘 스트레스에 영향을 미칠 수 있으며 큰 단면적을 가질수록 더 큰 내부 응력(internal stress)이 축적될 수 있고, 축적된 응력의 확산은 표면 결함이 있는 경우 더 빠르게 진행될 수 있어 더 빠른 파절을 야기하게 된다.^{7,9} 임상에서 응력의 축적을 감지하기가 쉽지 않은데, Gambarini는 토크 조절 전기 모터(torque-controlled motor)를 사용할 경우 설정된 토크 이상의 힘이 기구에 부여되면 기구의 회전이 멈추거나(auto-stop), 반대로 회전하여(auto-reverse) 술자가 응력의 축적을 감지할 수 있고 기구에 부여되는 과도한 응력을 막아주기 때문에 기구의 파절 가능성을 낮춰준다고 보고하였다.¹⁰

회전식 니켈-티타늄 파일은 스테인레스 스틸 파일과는 달리 뒤틀림이나 구부러짐 등의 전구 증상 없이 파절이 일어난다.⁷ 즉, 외형적인 변형없이 내부 응력이 축적되어 기구의 수명이 단축될 수 있다.¹¹ 기구의 수명은 주기적 피로 파절 저항성으로 측정할 수 있으며, 미리 부여된 비틀림 응력이 주기적 피로 파절 저항성을 유의하게 감소시킨다는 보고가 있다.¹² 기구의 파절을 예방하고 수명을 증가시키기 위해 새로운 단면 형태를 갖는 회전식 니켈-티타늄 파일이 소개되고 있다. 제조사에 따르면 Positive rake angle을 가지는 K3 (Sybron Endo, Orange, CA, USA)는 길이에 따라 코어 직경(core diameter)이 달라짐으로써 기구의 유연성이 증가하고 세 개의 비대칭 radial land와 radial land relief를 가짐으로써 근관 벽으로부터 기구에 부여되는 응력을 효율적으로 분배하고 감소시킨다. 따라서 본 실험에서 토크 조절 전기 모터의 auto stop을 통해 비틀림에 의한 내부 응력을 의도적으로 부여한 다음, 이런 내부 응력이 K3의 주기적 피로 파절에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

연구 재료 및 방법

본 실험에 사용된 회전식 니켈-티타늄 파일은 21 mm 길이의 .04, .06 taper K3이며, 25, 30, 35, 40 그리고 45번의 다섯 가지 크기를 사용하였다. 전기 모터는 X-SMART (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland)를 사용하였다. 회전식 니켈-티타늄 파일에 내부 응력을 부여하기 위한 레진 모형 근관으로 .02 taper Endo-Training-Bloc (Dentsply Maillefer)을 사용하였다.

회전식 니켈-티타늄 파일을 임의로 10개씩 3개의 실험군으로 나누었으며 횡수를 달리하여 내부 응력을 부여하였다. 내부 응력을 부여하기 위한 전기 모터의 속도는 300 rpm, 토크 값은 1.0 N·cm, auto-stop으로 설정하였다. Endo-Training-Bloc을 바이스에 단단히 고정한 후, 파일에 가해지는 응력이 설정된 토크 값을 넘어서 회전이 멈출 때까지 K3 파일을 모형 근관에 일정한 힘으로 밀어 넣었다. 각각의 파일에 내부 응력을 부여할 때는 모두 새 모형 근관을 사용하였고, 모든 과정은 숙련된 한 사람의 임상이가 수행하였다. 각각의 실험군(n = 10)

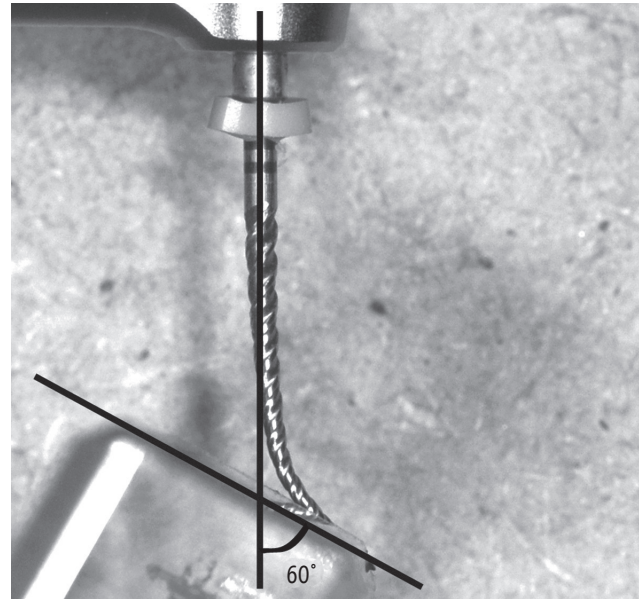


Figure 1. Representative image of cyclic fatigue test (inclined glass plane).

에 내부 응력을 1회에서 3회까지 부여하였으며(Stress 1군, Stress 2군, Stress 3군, 대조군(Stress 0군)에는 내부 응력을 부여하지 않았다. 내부 응력을 부여하는 과정에서 파절이나 변형이 일어난 파일은 피로 파절 측정에서 제외하였다.

피로 파절의 측정은 Li 등이 사용했던 경사진 면에 기구를 회전시키는 방법을 응용하였으며, 파일과 유리판이 이루는 각도는 60°로 설정하였다.¹³ 내부 응력을 부여한 회전식 니켈-티타늄 파일을 고정된 전기 모터에 장착하여 설정된 각도로 경사진 유리판과 접촉시켰다(Figure 1). 유리판과 접촉하는 회전식 니켈-티타늄 파일의 길이는 파일첨부터 약 3 mm이며, 파일이 회전하는 동안 파일의 변위를 막기 위해 유리판에 1 mm 깊이의 구를 형성하였다. 유리판과 파일의 마찰 부위에 윤활제를 도포하여 마찰력이 실험 결과에 미치는 영향을 최소화하였다. 회전하기 시작한 때부터 파일의 파절 시간을 기록하였다.

회전식 니켈-티타늄 파일이 파절된 후, 파절 단면과 측면을 전계 방출 주사 전자 현미경(Field emission scanning electron microscope, FE-SEM, SU-70, Hitachi, Tokyo, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 대조군을 포함한 모든 실험군의 파절 시간을 SPSS version 19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하여 two way ANOVA test로 비교 분석하였으며 Duncan test를 이용하여 95% 유의수준에서 사후 검정하였다.

결과

K3 각 크기에 따른 파절 시간의 평균과 표준 편차를 Table 1과 2에 나타내었다.

K3 .04 taper 30번(Stress 1군)을 제외한 모든 실험군에서 대조군과 비교할 때, 파절 시간이 유의하게 감소하였다. K3 .04 taper 파일의 K

Table 1. Time for file separation of K3 .04 taper

Group	#25		#30		#35		#40		#45	
	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)
Stress 0	10	445.49 ± 100.48 ^a	10	660.93 ± 81.60 ^a	10	954.21 ± 60.04 ^a	10	1254.44 ± 76.18 ^a	10	1157.71 ± 170.99 ^a
Stress 1	9	332.54 ± 92.90 ^b	10	670.69 ± 74.74 ^a	10	762.72 ± 116.69 ^b	10	782.90 ± 214.35 ^{b,c}	10	965.30 ± 61.36 ^b
Stress 2	10	339.38 ± 50.08 ^b	10	576.69 ± 103.61 ^b	10	644.92 ± 129.37 ^c	10	882.27 ± 139.30 ^b	10	753.94 ± 68.22 ^c
Stress 3	9	266.89 ± 74.72 ^b	9	513.15 ± 105.36 ^b	10	586.37 ± 143.62 ^c	10	701.91 ± 287.60 ^c	10	812.48 ± 68.83 ^c

Same superscripts shows no statistically significant difference in same size.

Stress 0 group was not induced internal stress, Stress 1 group was induced internal stress 1 time, Stress 2 was induced internal stress 2 times, and Stress 3 was induced internal stress 3times by activation of the auto-stop function of the torque-controlled motor.

Table 2. Time for file separation of K3 .06 taper

Group	#25		#30		#35		#40		#45	
	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)	No.	Mean (sec)
Stress 0	10	131.50 ± 31.80 ^a	10	204.30 ± 30.04 ^a	10	152.81 ± 42.42 ^a	10	152.78 ± 31.25 ^a	10	146.29 ± 51.86 ^a
Stress 1	10	87.44 ± 19.87 ^b	10	116.62 ± 22.43 ^b	10	76.79 ± 10.59 ^b	10	99.02 ± 13.09 ^b	10	98.13 ± 20.95 ^b
Stress 2	10	88.74 ± 7.18 ^b	10	101.45 ± 26.43 ^b	10	91.43 ± 18.51 ^b	10	103.60 ± 16.97 ^b	10	90.97 ± 7.37 ^b
Stress 3	10	95.72 ± 12.73 ^b	10	100.77 ± 12.14 ^b	10	81.18 ± 9.58 ^b	10	97.61 ± 9.34 ^b	10	84.97 ± 26.49 ^b

Same superscripts shows no statistically significant difference in same size.

Stress 0 group was not induced internal stress, Stress 1 group was induced internal stress 1 time, Stress 2 was induced internal stress 2 times, and Stress 3 was induced internal stress 3times by activation of the auto-stop function of the torque-controlled motor.

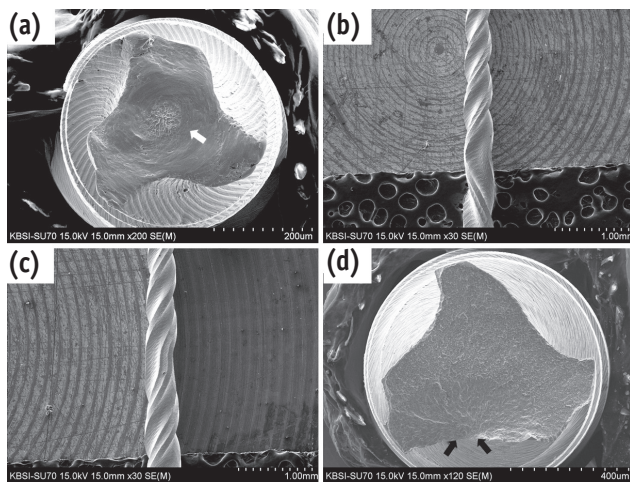


Figure 2. FE-SEM view of K3. (a) Torsional fracture of K3 .04/#25. Central dimples and circular abrasion mark (white arrow) (×200); (b) Torsional distortion of K3 .04/#25; (c) Torsional distortion of K3 .04/#30 (×30); (d) Cyclic fatigue fracture of K3 .04/#45. Radial striations linked at a point on the edge (black arrow) (×120). The surfaces of cyclic fatigue fracture in all experimental groups showed same patterns. FE-SEM, field emission scanning electron microscope.

기가 커질수록 파절 시간이 증가하였다. .06 taper의 모든 실험군에서 대조군에 비하여 파절 시간이 통계적으로 유의하게 감소하였으며 같은 크기를 가진 파일의 실험군 간의 유의한 차이는 관찰되지 않았다.

.04 taper 25번의 실험군 중 하나의 파일은 내부 응력을 가하는 중에 파절 되었으며 주사 전자현미경 분석에서 중앙 부위의 다수의 덩플을 보이는 연성 파괴와 주변 부위의 평탄한 면이 관찰되는 전형적인 비틀림 응력에 의한 파절 양상이 관찰되었다(Figure 2a). .04 taper 25 번과 30번의 실험군 중 각각 하나의 파일에서 내부 응력을 부여하는 과정 중 변형이 관찰되어 피로 파절 실험에서 제외하였다(Figures 2b and 2c).

파절 단면의 주사 전자현미경 분석 결과, 피로 파절 검사를 시행한 모든 군에서 비틀림 응력에 의한 파절 양상은 관찰되지 않고 균열의 급속한 진행을 나타내는 방사상의 선조와 넓은 면에 덩플을 보이는 주기적 피로 파절 양상만 관찰되었다(Figure 2d).

총괄 및 고안

회전식 니켈-티타늄 파일은 전구 증상 없이 파절이 일어나기 때문에 파일의 변형이나 표면 결함과 같은 파일의 외적인 모습으로 파절을 예측하기 힘들다.7 따라서 파일에 미리 부여된 비틀림 응력이 내부 응력으로 작용할 수 있을 것으로 생각되어 본 실험을 통해 비틀림 응력과 피로 파절 저항성의 관계를 연구하고자 했다. 예비 실험에서 auto-reverse로 설정하였을 때 파일이 반대 방향으로 회전하면서 오히려 너무 큰 응력이 파일 내에 작용하여 비틀림 파절을 겪었기 때문에 본 실험에서 비틀림 응력을 내부 응력으로 이용하기 위해 전기 모터의 auto-stop 기능을 이용하였다.

회전식 니켈-티타늄 파일을 회전시키길 때 일정한 속도와 토크 값의 유지를 위해 전기 모터를 사용하고 있다.¹⁴ 제조사에 따르면 K3를 임상적으로 사용할 때, 전기 모터의 속도는 300 rpm, 토크 값은 1.5 N·cm 이상으로 사용할 것을 추천하고 있다. 그러나 본 연구에서는 전기 모터의 속도는 300 rpm, 토크 값은 1.0 N·cm으로 설정하였다. 예비 실험에서 전기 모터의 속도는 300 rpm, 토크 값은 1.5 N·cm으로 내부 응력을 부여한 결과, 파일에 가해지는 과도한 응력으로 여러 파일이 파절되거나 변형되었다. 이러한 파절이나 변형은 내부 응력을 부여하고자 하는 본 연구의 목적에 맞지 않는 것으로 생각되어 변형이나 파절을 유발하지 않고 내부 응력만 부여할 수 있도록 1.0 N·cm으로 낮추어 설정하였다. 내부 응력을 부여하는 과정에서 .04 taper 25번에서 하나의 표본이 파절되었고 .04 taper 25번과 30번에서 각각 하나의 표본이 변형되었다. 작은 직경의 회전식 니켈-티타늄 파일이 비틀림 응력에 대한 저항성이 낮은 것으로 생각할 수 있으며, 이는 Melo 등의 연구 결과와 일치하였다.¹⁵ 주사 전자현미경 분석 결과, 비틀림 응력에 의해 파절된 기구의 단면은 중앙 부위에 딥플이 관찰되는 연성 파괴와 그 주변부로 동심원 상의 마찰 자국과 평탄한 면을 나타내는 전형적인 비틀림 파절 양상을 나타냈다(Figure 2a).

Endo-Training-Bloc을 이용하여 내부 응력을 부여했을 때 파일침으로부터 4 - 8 mm 부위에 레진 잔사가 가장 많이 묻어 나왔다. 이 부위에 가장 많은 내부 응력이 축적되었을 것으로 생각되므로 주기적 피로 파절 검사에서 파일이 유리판과 3 mm 접촉하게 하여 파일의 최대 만곡 부위를 파일침 4 - 8 mm 부위에 위치하도록 설정하였다.

회전식 니켈-티타늄 파일의 피로 파절을 측정하는 다양한 방법이 소개되어 왔다.¹⁶ Pruett 등은 초기의 회전식 니켈-티타늄 파일을 이용하여 만곡된 금속관에 파일이 금속관에 꽉 끼지 않게 하여 피로 파절을 측정하였다.^{7,17} 그러나 이러한 실험 설계는 보통 같은 크기의 관이 사용되기 때문에 작은 기구는 큰 기구보다 더 적게 변형 되고 만곡 반경은 더 크게 되어 큰 기구보다 작은 기구에서 더 긴 피로 수명이 나타날 것으로 사료된다.¹⁷ Haikeel 등은 grooved block-and-rod를 이용하여 스테인레스 스틸 기구의 피로 파절을 측정하였다.¹⁸ 그리고 이를 회전식 니켈-티타늄 파일에도 적용하였으나 연구에서 파일과 장치 간의 접촉 상태에 대해 언급하지 않았으며 매 실험마다 같은 위치에 기구를 위치시키는 등의 실험 조건을 동일하게 하기가 어려웠다.¹⁹ 오래 전부터 기계 공학에서 사용되는 피로 파절 검사법인 삼점굽힘(three point bending)에 의한 검사는 Cheung과 Darvell 에 의해 비교적 최근에 연구되었다.²⁰ 그러나 이러한 방법도 파일간의 서로 다른 휨 성질과 같은 파일이더라도 파일의 위치에 따라 다른 휨 성질을 갖게 되므로 정확한 만곡 궤도를 재현할 수 없는 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용한 경사진 유리판에서 파일을 회전시키는 방법은 비교적 장치 설계가 간단하며, 다른 측정 방법에 비해 마찰에 의한 기구의 손상을 줄일 수 있고 만곡 각도를 일정하게 재현할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단면적의 크기가 작은 기구는 큰 기구보다 유연하기 때문에 만곡 반경이 작아지고 더 큰 피로 응력이 부여될 수 있다.^{13,16} 그러한 만곡 반경 및 만곡 궤도의 차이를 줄이기 위하여 경사진 유리판에 1 mm 깊이의 구를 형성하여 기구가 유리판과 동일한 접촉 면적을 가지고 일정한 위치를 갖도록 하였다.

Melo 등은 K3를 이용하여 회전식 니켈-티타늄 파일의 특성을 연구하였는데, 파일의 직경과 단면적이 증가할수록 기구의 유연성이 유의하게 감소하였으며 이로 인해 기구의 피로 파절 저항성이 떨어질

수 있다고 보고하였다.¹⁵ 본 연구에서는 전체적으로 파일의 파절 시간은 .04 taper에서 길게 측정되었으며 이는 작은 파일 단면적으로 인한 유연성 증가에서 기인한 것으로 생각되며 기존의 연구들과 일치하였다.^{11,14} .06 taper의 모든 실험군에서 같은 크기를 가진 파일의 실험군 간의 유의한 차이는 관찰되지 않았다. 즉, .06 taper에서 내부 응력의 횡수가 중요한 것이 아니라 내부 응력을 받았는지, 안받았는지 결과에 중요한 영향을 미치는 것으로 생각된다.

Melo 등과 Schäfer 등은 회전식 니켈-티타늄 파일은 단면적 크기와 디자인에 따라서 물리적인 성질이 다르다고 보고하였다.^{15,21} 실제로 본 연구의 예비 실험에서 20번 크기의 파일은 다른 크기의 파일에 비하여 비틀림 저항성은 매우 낮게 측정되었으며 피로 파절 저항성은 매우 높게 측정되었다. 임상에서도 단면적의 크기가 작은 파일은 주기적 피로 파절이 발생하는 경우가 거의 없다.^{7,19,22} 따라서 본 연구에서도 20번 크기의 파일은 실험에서 제외하였다.

주기적 피로 파절 단면의 주사 전자현미경 분석 결과, 주기적 피로 파절 양상만 관찰되었고 실험군과 대조군의 파절 단면 양상은 유의한 차이가 관찰되지 않았다. 회전식 니켈-티타늄 파일 표면에 발생한 표면 결함이 파일의 균열 발생 및 진행에 영향을 주어 주기적 피로 파절 저항성을 낮출 수 있다.^{23,24} 따라서 본 연구에서 비틀림 응력이 가해졌을 때 표면 결함이 발생하여 주기적 피로 파절 저항성에 영향을 줄 수 있다고 생각하였으나, 대조군에 비하여 실험군에서 표면 결함이나 균열의 증가는 관찰할 수 없었다.

본 연구에서 비틀림 저항으로 인한 내부 응력이 피로 파절에 영향을 주는 것으로 관찰되었으며, 실제 임상에서 비틀림 파절과 피로 파절이 복합적으로 나타나는 경우가 많고 그 경계를 구분하는 것은 매우 어렵다. 따라서 파일의 파절을 막기 위해 두 가지 요인을 모두 고려해야 한다.

결론

의도적으로 K3에 서로 다른 횡수의 내부 응력을 부여한 후, 그 파일의 피로 파절을 측정함으로써 내부 응력과 피로 파절의 관계를 평가한 결과 근관 형성과정에서 auto-stop이 발생하였거나 근관 내에서 그에 상응하는 비틀림 응력이 부여되었다면 그 파일을 재사용하는데 있어서 주의해야 할 것으로 사료된다.

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 the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod* 1988;14:346-351.
2. Gambill JM, Alder M, del Rio CE. Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *J Endod* 1996;22:369-375.
3. Glossen 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* 1995;21:146-151.
4. Elliott LM, Curtis RV, Pitt Ford TR. Cutting pattern of

- nickel-titanium files using two preparation techniques. *Endod Dent Traumatol* 1998;14:10-15.
5. Cheung GSP. Instrument fracture: mechanisms, removal of fragments, and clinical outcomes. *Endodontic Topics* 2009;16:1-26.
 6. Kramkowski TR, Bahcall J. An *in vitro* comparison of torsional stress and cyclic fatigue resistance of ProFile GT and ProFile GT Series X rotary nickel-titanium files. *J Endod* 2009;35:404-407.
 7. Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL Jr. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 1997;23:77-85.
 8. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod* 2000;26:161-165.
 9. Kuhn G, Tavernier B, Jordan L. Influence of structure on nickel-titanium endodontic instruments failure. *J Endod* 2001;27:516-520.
 10. Gambarini G. Advantages and disadvantages of new torque-controlled endodontic motors and low-torque NiTi rotary instrumentation. *Aust Endod J* 2001;27:99-104.
 11. 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.
 12. Barbosa FO, Gomes JA, de Araújo MC. Fractographic analysis of K3 nickel-titanium rotary instruments submitted to different modes of mechanical loading. *J Endod* 2008;34:994-998.
 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. Park SH, Seo HW, Hong CU. An evaluation of rotational stability in endodontic electronic motors. *J Korean Acad Cons Dent* 2010;35:246-256.
 15. Melo MC, Pereira ES, Viana AC, Fonseca AM, Bueno VT, Bahia MG. Dimensional characterization and mechanical behaviour of K3 rotary instruments. *Int Endod J* 2008;41:329-338.
 16. 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.
 17. Bahia MG, Bueno VT. Decrease in the fatigue resistance of nickel-titanium rotary instruments after clinical use in curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005;100:249-255.
 18. Haïkel Y, Gasser P, Allemann C. Dynamic fracture of hybrid endodontic hand instruments compared with traditional files. *J Endod* 1991;17:217-220.
 19. Haïkel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 1999;25:434-440.
 20. Cheung GS, Darvell BW. Fatigue testing of a NiTi rotary instrument. Part 1: strain-life relationship. *Int Endod J* 2007;40:612-618.
 21. Schäfer E, Dzepina A, Danesh G. Bending properties of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2003;96:757-763.
 22. Ullmann CJ, Peters OA. Effect of cyclic fatigue on static fracture loads in ProTaper nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2005;31:183-186.
 23. Shin YM, Kim ES, Kim KM, Kum KY. Effect of surface defects and cross-sectional configuration on the fatigue fracture of NiTi rotary files under cyclic loading. *J Korean Acad Cons Dent* 2004;29:267-272.
 24. 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.