

투고일 : 2013. 12. 17

심사일 : 2013. 12. 20

게재확정일 : 2014. 1. 14

니켈티타늄 전동파일의 파절과 임상적 예후

부산대학교 치의학전문대학원 치과보존학교실

김 현 철

ABSTRACT

Fracture of Nickel-Titanium Rotary Instruments and its Clinical Prognosis

Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Pusan National University
Hyeon-Cheol Kim, DDS, Ph.D

Nickel-Titanium(NiTi) rotary instruments have brought a big step toward "efficient" practice of endodontic procedure. The rotary files help clinicians to reduce their working time and also increase the clinical success rate with minimal procedural errors by stainless steel instruments. In spite of these advantages, NiTi instruments still have a few drawbacks including unpredictable fatigue fracture. Clinicians may reduce the potential risk of instruments fracture by following some clinical guidelines for rotary instruments. In some clinical cases of instruments fracture, we may try to remove the instruments' fragments or bypass the fragment to reach the apical canal. In some limited cases, the fractured instruments' fragments would not jeopardize the clinical prognosis of root canal treatment. However, it is impossible to be overemphasized that the fragment removal is more difficult than the prevention of fracture. Clinicians need to understand the fracture mechanisms and, in clinic, need to discard the used instruments timely.

Key words : Fracture, Prognosis, Root canal treatment, Nickel-Titanium instruments

Corresponding Author

Hyeon-Cheol Kim, DDS, PhD

Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Pusan National University

20, Geumo-ro, Mulgeum, Yangsan, Gyeongnam, 626-787, Korea

Tel: +82-55-360-5210, Fax: +82-55-360-5214, e-mail: golddent@pusan.ac.kr

I. 서론

1988년 스테인리스스틸 파일을 대체할 수 있는 유용한 재료로 초탄성(super-elasticity) 특징을 가진

니켈티타늄(Nickel-Titanium; NiTi) 합금으로 만들어진 파일이 소개된 이후 20여 년이 경과하는 동안 그 사용이 점진적으로 증가해 가고 있다.²⁾ 스테인리스스틸 파일을 능가하는 NiTi 파일의 다양한 효용성

을 지지하는 연구 결과가 많이 발표되고 있고, 이와 함께 많은 제조사들이 각기 고유의 특징과 장점을 주장하며 여러 가지 니켈티타늄 파일을 시판하고 있다^{3, 4)}. 국내에서도 최근 10년 그 사용이 폭발적으로 증가하는 추세라고 보여진다. 그러나, 임상에서의 사용이 증가함과 동시에, 사용 중 불가항력적으로 나타나는 파일의 파절 문제가 사용할 때마다 늘 함께하는 두려움과 고민거리가 되고 있다^{5, 6)}.

이 글에서는 NiTi 파일의 파절의 원인을 이해하고 그 예방방법을 알아본다. 아울러, 임상에서 원치 않게 일어난 파일의 파절에 대한 대처 방법과 예후에 대해 고찰해본다.

II. 본론

1. NiTi 파일의 장점

NiTi 파일의 장점으로 가장 먼저 나오는 것이 초탄성 특성을 바탕으로 하는 기구의 [1]유연성이다. 유연성이 우수함으로 인해 근관 성형에서 transportation / deviation, zipping, ledge 등이 확연히 덜 생긴다. 그리고, 전동 모터에 의한 [2]연속적인 회전(reaming motion) 역시 중요한 특성이다⁴⁾. 이는 유연성이 있다는 전제 조건이 성립되므로 가능한 것이

다. 만약 만곡 근관에서 유연하지 못한 기구를 연속으로 회전시키는 것은 zipping 등의 근관 이형성(aberration)을 더 많이 유발하는 직접적인 원인이 된다. 어쨌거나 전동 NiTi 파일의 연속회전에 의해 얻어지는 가장 큰 장점이 잔사의 효율적인 제거이다. 수기구를 사용하여 근관 확대를 하는 경우(특히 filing을 하는 경우)에는 많은 잔사가 근관으로부터 배출되지 못하고 여전히 근관 내에 머무르거나 심지어 근단공 너머로 정출되는 경우가 많기 때문이다. 이러한 두 가지 NiTi 전동 파일의 대표적인 장점은 슬루 합병증을 최소화하면서 치료의 성공률을 높이는 기본적인 원리가 된다.

2. NiTi 파일의 파절의 원인

그럼에도 불구하고 많은 술자가 부담을 느끼면서 적극적인 사용을 꺼려하는 것은 임상에서 간혹 급작스럽게 나타나는 파일의 파절 때문이다. NiTi 파일의 파절에 관한 연구는 여러 가지 상품을 이용하여 폭 넓게 진행되어 왔고, 그 결과 파절의 원인/원리에 대해서는 거의 밝혀진 듯하다^{4, 8-12)}. 요약하면, 그림 1A에서처럼 만곡이 심한 근관에서 파일이 회전하다가 특정 부위에서 피로가 집중되어 일어나는(반복 굴곡) 피로 파절이 그 한가지이고, 다른 한가지는 그림 1B에서처럼 좁고 석회화 된 근관에 딱 끼인 파일이 비틀림 힘(토



그림 1. 만곡 근관에서 피로 파절이 일어난 증례(A)와 좁고 석회화 된 근관에서 비틀림 파절이 일어난 증례(B).

크)를 과도하게 받아 부러지는 비틀림 파절의 경우이다. 그렇지만 근관 속에 부러져 남아 있는 파일을 방사선 사진으로 보고 파절의 원인을 둘 중에 한가지로 정하는 것은 근거가 없고 실제로 확인할 길은 없다. 그래서 그림 1의 증례들은 근관의 상황을 보고 유추를 한 것으로 보아야 한다. 정확한 파절의 이유를 보기 위해서는, 실험으로 파절을 유발하였을 경우나 파절된 기구를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰 하였을 때나 구분이 가능한 것이다(그림 2). 그리고 임상에서 일어나는 파절은 두 가지 양상이 모두 복합적으로 작용하여 나타난다고 보는 것이 더 옳다^{8, 9, 12)}.

3. NiTi 파일의 파절 예방방법

앞서 살펴본 두 가지 파절 양상을 이해한다면, 그 방지 방법 또한 명확해진다. 즉, 과도한 반복 피로가 일어나지 않도록 하고 과도한 비틀림 저항이 일어나

는 상황을 피하는 것이 술자가 할 일이라고 요약 할 수 있다.

그 첫 번째는 glide path의 형성이다. 거의 모든 NiTi 파일은 noncutting / passive tip을 갖고 있고, 또 다른 이름으로는 guiding tip이라고도 부른다. 그런데 이러한 tip은 이름(guiding tip)이 말하는 것처럼 근관을 잘 따라 미끄러져 들어갈 수 있는 기회를 제공하고 초탄성의 특성을 잘 이용(근관 변위의 최소화)할 수 있는 근거가 되기도 한다. 그러나 근관이 많이 좁아지거나 막힌 경우에는 파일이 근관 벽에 끼어 비틀림 저항이 갑자기 증가하거나, 반복적인 비틀림 하중의 누적으로 비틀림 파절이 일어날 수 있다. 따라서 근관이 개방되어 있는지, 파일이 들어갈 최소한의 공간이 있는지 확인하는 과정이 중요한 것이다. 이를 위해 #10 혹은 #15 크기의 파일이 들어가도록 미리 근관 형성을 하는 것, glide path의 형성을 권장하는 것이다. 간혹 더 큰 #20 크기의 파일을

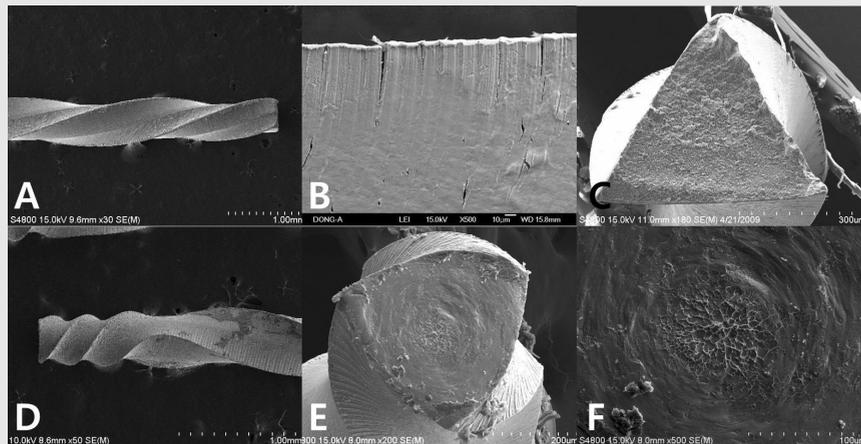


그림 2. 피로 파절로 구분되는 파절면의 전형적인 예(A, B, C)와 비틀림 파절의 전형적인 예(D, E, F). A. 피로 파절된 파일의 외형에서는 큰 변화를 관찰할 수 없다. 즉 파절이 일어나기 전에도 큰 변화가 없이 갑자기 부러진다는 것을 의미한다. B. 여러 번 반복 사용 후에 파절이 일어난 시편에서는 많은 micro crack이 발생하여 있음을 관찰할 수 있다. C. 피로 파절 양상이 미세한 시편에서는 crack의 기시부와 진행 방향을 예측할 수 있는 파절 단면을 관찰할 수 있고 파절이 일어날 때 마지막 순간에 파절이 끝나는 부분을 관찰할 수도 있다. D. 비틀림 파절이 일어난 시편의 경우에는 파일의 나선산이 반대로 꼬인 부분을 관찰할 수 있고, E. 비틀림 파절 시편의 단면에서는 동심원 모양의 마모(concentric circular abrasion) 부위가 관찰된다. F. 동심원의 가운데 부분에서는 긴 시간 하중을 받은 흔적인 섬유화 변성(Fibrous dimple) 부위를 관찰 할 수 있다.

이용하여 glide path를 형성하고 그 후에 전동 파일을 쓰는 임상가들을 볼 수 있다. 더 안전한 사용을 위해서 사전 작업을 많이 한다고 보여지지만, 필자는 #20 크기까지의 수기구 사용은 권장하지 않는다. 왜냐하면 많은 경우에서의 근관 내 ledge 형성이 수기구의 잘못된 사용에 의한 것이고 #20 크기도 상당히 뺏뺏하여 transportation등의 근관 이형성을 많이 만들기 때문이다. 오히려 PathFile이나 G-file 등의 glide path 형성을 위한 전용의 NiTi 파일을 사용하는 것이 훨씬 효율적이고 안전하다. 그 이유는 후에 설명한다.

다음으로 중요한 파절의 예방 방법은 적절한 속도와 파일에 일어나는 최대 토크를 제한/조절할 수 있는 전용 모터의 사용이다. 제조사에서는 250~350rpm, 혹은 제품에 따라서는 400~600rpm이나 그 이상의 권장 속도를 제시하고 있다(TF, Hyflex: 500rpm, BLX 600rpm). 이러한 속도는 근관 성형을 빨리 할 수 있게 하는 가장 기본 원리이기도 하다. 간혹 다른 파일에 비해 더 빠른 회전 속도를 권장하는 경우는 대부분 파일이 부드럽고 유연성이 더 좋은 경우에 해당한다. 그런데 이런 부드러운 파일들은 너무 속도를 낮추어 사용하는 경우, 빠른 회전 속도에 의해 증가할 수 있는 강성이 오히려 감소하여 삭제력이 떨어질 뿐만이 아니라, 좁은 근관에서는 파일이 늘어지거나(비틀림 변형) 부러지는 경우가 더 자주 생길 수도 있다. 즉 비틀림 파절의 가능성이 높아진다는 것이다. 이런 파일들은 대부분 속도를 빠르게 사용하는 대신 토크 한계가 다른 파일에 비해서는 낮게 설정하는 것이 좋다. 너무 토크를 높게 설정해두면 비틀림 파절이 잘 일어날 수 있기 때문이다. 최고 토크를 제조사 지시대로 맞추어 사용하는 것이 좋지만 제시되지 않은 제품들도 많이 존재한다.

근관 벽으로부터 파일의 저항을 줄이고 파절을 줄이기 위해 gel 형태의 윤활제(RCPprep, Glyde 등)를 사용하는 것을 권하기도 하지만, 실제 이러한 윤활제는 그런 효과가 거의 존재하지 않고 오히려 일부 파

일(ProFile)의 저항(torque)을 높인다고 보고되었다. 이런 윤활제보다는 NaOCl을 충분히 사용하는 것이 저항도 줄이고 근관계의 소독에도 분명히 도움이 된다¹⁵⁾.

속도나 토크의 설정은 모터에 지정하는 것이므로 사실은 술자가 파일을 다루는 행위가 아니다. 실제로는 파일을 근관 내로 적용하는 행위가 더 중요한데, 피로 파절을 감소시키기 위해서는 적당한 템포로 in-and-out pecking motion을 잘 하는 것이 중요하다. 만곡이 있는 근관에서 더욱 중요하고, 균일한 속도로 4~5mm 간격의 pecking motion을 하는 것이 최대 만곡 부위에 집중되는 응력을 고르게 분산시킬 수 있는 기본이 된다. 간혹 만곡 근관에서 최대 만곡 부위를 지나는 순간에는 파일을 진행시키는데 저항감이 느껴지고 이를 지나가려고 시도하는 동안 무리한 힘을 주지 않으려고 하다 보면 더 이상 근관장 길이 가까이 진행이 되지 않고 같은 길이에 머무르는 경우가 있다. 이런 경우에는 NiTi 파일임에도 불구하고 그 위치에서 ledge가 만들어질 수도 있다. 따라서 이런 순간 약간의 힘을 더 주어 그 저항부위를 지나쳐가려는 시도가 필요할 수도 있다. 그렇지만 이 때 힘이 과도한 경우는 순간 토크가 증가하여 파절이 일어날 수도 한다. 그래서 모터의 최대 토크의 설정이 중요한 것이다.

그런데 파일을 너무 오래 반복하여 재사용하는 경우에는 이런 주의사항들이나 사용방법도 파절 예방에 도움이 되지 않는다는 점을 명심하여야 한다. 물론 파일이 스테인리스스틸 파일에 비해 비싸고 한 치아에 한 개만이 청구되는 기형적인 보험제도 아래의 진료 환경이지만, 재사용을 제한함으로써 파절 빈도를 최소화할 수 있다는 것은 가장 분명한 예방 방법이 될 것이다. 필자는 철저히 사용횟수를 관리하고(물론 담당 위생사의 역할이다) 5~6회의 사용 횟수(근관 수)에 도달하면 폐기하도록 하고 있다. 이를 통해 지난 5년간 단 한 개의 파일도 파절되지 않았다. 필자가 미국 파견 근무를 마치고 돌아와 2년 정도 경과했을 즈음, 2011



그림 3. 필자가 파일을 소독하고 사용 회수를 표기하여 관리하는 예. 파일 스탠드(organizer)에 자주 사용하는 파일을 꽂아 사용하고, 사용한 횟수(근관 수)를 매번 추가하여 포장지에 표시한다. 간혹 과도한 사용이 진행된 경우는 그 횟수를 2회로 추가하거나 사용 즉시 폐기하기도 한다.

년 어느 날의 일이다. 필자가 외래 담당 위생사에게 “요즘 파일 부러지는 일이 참 없네요”라고 하였더니, 의아한 눈빛으로 “(당연하죠!) 제가 자주 바꾸는데 요?”라고 답을 한 것이 기억난다.

4. NiTi 파일의 파절의 처치 및 예후

앞서 설명한 여러 주의사항을 잘 지킴에도 불구하고 절대적으로 회피할 수 없는 것이 NiTi 파일의 파절이다. 대부분이 너무 오래 사용(재사용 포함) 하였거나 사용시에 과도한 힘을 준 경우라고 추정된다. 대학 병원으로 의뢰되어 오는 경우에 의뢰서에는 단순히 근관이 막혀있다(사실은 파절 기구로 막은 경우)고 의뢰 내용에 서술되어 있고 환자들은 그 사실을 모르는 경우가 대부분이다. 그러나, 필자의 병원에서는 의뢰되어 온 환자들에게 기구 파절편의 존재 여부를 알려주는 경우가 대부분(눈빛이 다른 환자는 제외)이다. 그 설명 내용은 이렇다. “기구는 생체 불활성 재료로 만들어져 있고 질환의 직접적인 원인이 되지 않습니다(사실, 치수 및 치근단 질환이 낫지 않을 수 있는 간접적

인 원인임을 말하지 못한다). 일단은 제거를 시도할 것이고, 제거가 되지 않으면 그 기구조각 주변으로 길을 만들어 소독을 하기도 하고, 부득이 제거가 불가능한 경우는 남겨두게 됩니다. 오히려 과도한 제거의 시도가 치아 뿌리를 상하게 하면 예후가 더 불량합니다. 그리고 남겨 둔 경우에, 혹 다른 증상이 있거나 지속적인 통증이 있으면 수술을 할 수도 있습니다”라고 설명한다. 덧붙여 기구 파절편의 존재가 치료 성공률에 그다지 큰 영향이 없다는 것을 Spili 등의 논문¹⁶⁾을 예로 들어 설명한다(표 1). 치료 결과에 영향을 미치는 것은 기구 파절편의 존재 여부보다는 치료 전 병소의 존재 여부가 더 중요하다고 설명하여 환자로 하여금 조금 안심하도록 한다.

환자에게 설명한 것처럼 실제로 파절편의 제거를 시도한다. 그러나 제거가 가능한 경우는 직선적으로 접근이 가능한 경우에 거의 한정된다고 보아야 한다. 현미경 아래에서 초음파 기구를 사용하여 파절편의 주변의 치근 상아질을 제거하고 파절편의 상부를 노출시켜야만 이후 제거 작업이 가능하기 때문이다. 그림 4A처럼 급격한 만곡 아래에서 파절된 경우는 제거가 안

표 1. 파절 기구와 술전 치근단 상태가 치유율에 미치는 영향(Spili, J Endod 2005)

	치아 수	완전치유	불완전치유	불확실	병소지속	치유율
기구의 파절						
No Lesion	63	62	0	0	1	98.4
Lesion	83	50	22	1	10	86.7
기구파절이 없는 경우						
No Lesion	62	60	0	0	2	96.8
Lesion	84	45	33	0	6	92.9
합	292	217	55	1	19	93.7

된다고 보는 것이 맞다. 근관 중앙부에 위치하거나 직선적인 위치에 파절편이 있어 접근이 가능한 경우에는 현미경과 초음파 기구로 제거를 할 수도 있다(그림 4B). 간혹 제거는 되지 않지만 파절편 주변으로 #8이나 #10 크기의 작은 기구가 들어가게(bypass)되면 그 주변으로 충분한 세척과정을 거치고 근관치료를 마무리할 수도 있다(그림 5A, B). 간혹, 우회조차 되지 않았지만 증상 완화 후 파절편 깊이까지 근관 충전하여 치료가 잘 마무리 되는 경우도 있다(그림 5C, D). 심지어 근단공 너머로 파절편이 존재하는 경우에도 잘

치유되는 것은 파절편 자체가 직접적인 원인이 아니라 는 것을 보여준다(그림 6). 물론 비외과적인 재치료로 파절편 제거나 환자의 주소를 해소하지 못한 경우에는 치근단 수술이나 의도적 재식을 해야 하는 경우도 많 이 있다.

다양한 처치 방법들과 그에 필요한 기구 재료들이 소개되고 있지만, 파절편을 제거하는 것은 때면 상 황에 따라 다른 방법이 필요하고 제거 여부도 그에 따라 좌우된다. 그러나 앞서 서술한 것처럼 제거를 하여야 만 치료 목적을 달성할 수 있는 것은 아니다. 파절편이

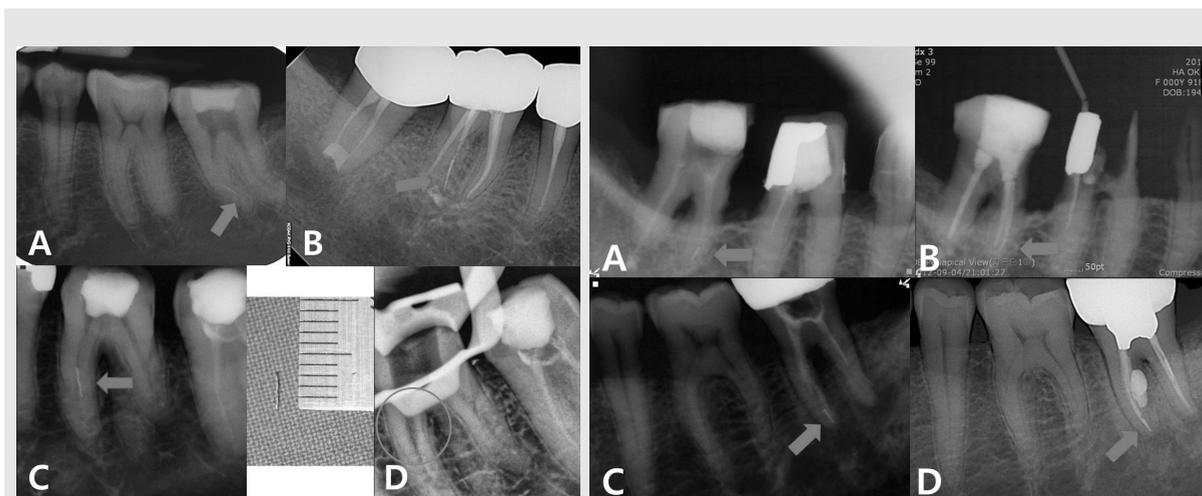


그림 4. 급격한 만곡 부위 아래에 기구 파절편이 있어 제거를 하지 못한 경우(A, B)와 비교적 직선부에 있는 파절편을 제거한 증례(C, D).

그림 5. 근심치근 근단부에 기구 파절이 있으나 제거하지 못하고 우회로를 확보하여 근관치료를 완료한 경우(A)와 BYPASS조차 되지 않았지만 파절편 상방까지 근관 충전하여 완료 한 경우(B).

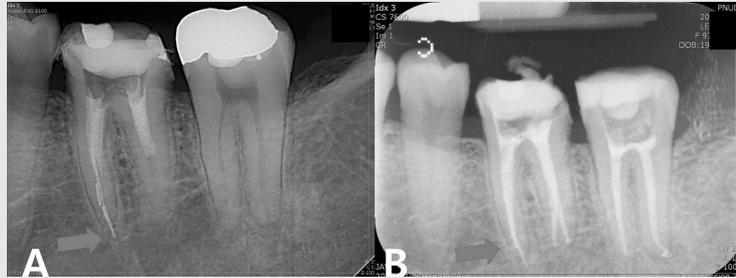


그림 6. 근심치근 근단공을 지나쳐서 파절이 일어난 경우에 제거하지 못하였지만 증상 완화 되어 근관치료를 완료한 경우.

존재한다고 하더라도 많은 증례에서 치료 결과가 양호할 수 있는 것은 NiTi 파일이 가진 중요한 특성에 의한 것이다. 즉 연속회전에 의해 잔사를 잘 배출한다는 것이 파절이 일어남에도 불구하고 그 예후가 좋을 수 있음을 설명한다. 순차적으로 여러 개의 파일을 사용하는 경우, 조기에 사용한 작은 파일이 근관장에 여러 번 도달하여 성형을 한 경우라면 일차적으로 잔사가 많이 배출되었을 것으로 기대할 수 있다. 즉 초기 파일의 사용이 중요하고, 그 전의 근관 감염 상태가 중요하다는 것이다. 근단부 근관이 감염되지 않았고 파일이 깨끗한 경우라면 파절에 의해 예후가 나빠질 가능성은 비교적 낮을 것으로 추정되고, 감염 근관인 경우라면 조기에 사용하는 파일이나 성형 초기에 일어난 파절보다는 여러 번 근관장까지 근관확대가 되고 세척이 이루어진 이후에 파절이 일어난 경우에 더 예후가 좋을 것이다.

앞서 glide path의 형성의 중요성을 언급하며, glide path 형성 전용의 NiTi 파일을 사용하는 것을 추천하였다. 이는 단순히 glide path의 형성을 위한 것이 아니라 연속 회전에 의한 효율적인 초기 잔사의 제거를 위한 목적을 갖고 있다. Glide path의 형성 과정을 통해 조기에 잔사가 제거되고 어느 정도 세척이 이루어진 후에라면 파절이 일어나더라도 그만큼 근관 내의 감염원/독성이 줄어들어 치유의 가능성이 높아질 수 있다는 것이다.

따라서 single file reciprocating system인 Reciproc의 경우 제조사에서는 glide path의 형성이 필요 없다는 주장을 하고 있으나(물론 #10이나 #15를 이용하여 근관장을 측정하여 근관의 개방성을 확인하는 것으로 glide path의 의미는 어느 정도 확보할 수 있다), 필자는 혹시 일어날 수 있는 파절을 염두에 두고 더 안전한 사용을 위해 glide path 형성용 파일을 먼저 사용하는 것을 권장한다. 더욱이 reciprocating system은 잔사의 정출 가능성을 약간의 (잠재적) 문제점으로 지적하고 있기에 더욱 그러하다^{17, 18)}. 미리 작은 glide path 형성용 파일을 사용함으로써 연속 회전을 통해 잔사를 제거해 둔 후라면 파절 가능성을 줄임과 동시에 잔사 정출양도 최소화할 수 있을 것이다.

Ⅲ. 결론

필자는 NiTi 파일의 유용성과 효율성은 아무리 강조하여도 지나침이 없다고 생각한다. 그러나 올바른 사용 방법이 전제가 되어야 함은 더욱 중요한 명제이다. 편리한 성형이 가능하면서 NiTi 파일의 너무 과도한 사용을 하는 경우도 있는데, 이는 근관이나 근단공을 손상시켜 치유를 지연시키거나 오히려 치근단 병소를 만들게 될 수도 있음을 알고 적절한 임상 적용이

전제되어야 한다. 아울러, 작은 크기의 NiTi 파일을 사용하여 glide path를 형성하고 초기에 충분히 감염 조직을 제거하는 것도 파절 가능성 감소 및 혹시 파절이 된 경우에서도 치유의 가능성을 높이는 방법이 된다는 점을 다시 한번 강조한다.

파절편이 제거되지 않더라도 잘 치유된 증례를 제시 하였지만, 이런 몇몇 예를 믿고 부러질 가능성을 배제

하고 사용하는 것은 아주 잘 못된 일이다. 앞서 서술한 것처럼 정확한 사용 방법과 제한된 사용 횟수(최소한의 반복사용)를 지키는 것만이 파일의 파절 빈도를 줄임과 동시에 술자 스스로 스트레스를 받는 길을 줄이는 유일한 방법이다. 분명한 것은 파절 기구를 제거하는 것이 파절을 예방하는 것보다 비교할 수 없을 정도로 더 어려운 일이라는 것이다.

참 고 문 헌

1. Walia HM, Brantley WA, Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod* 1988;14:346-51.
2. Thompson SA. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J* 2000;33:297-310.
3. Glosson CR, Haller RH, Dove SB, del Rio CE. A comparison of root canal preparations using NiTi hand, NiTi engine-driven, and K-Flex endodontic instruments. *J Endod* 1995;21:146-51.
4. Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod* 2004;30:559-67.
5. Parashos P, Messer HH. Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *J Endod* 2006;32:1031-43.
6. Tzanetakis GN, Kontakiotis EG, Maurikou DV, Marzelou MP. Prevalence and management of instrument fracture in the postgraduate endodontic program at the Dental School of Athens: a five-year retrospective clinical study. *J Endod* 2008;34:675-8.
7. Bahia MGA, Martins RC, Gonzalez BM, Buono VTL. 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.
8. Cheung GS, Oh SH, Ha JH, Kim SK, Park SH, Kim HC. Effect of torsional loading of nickel-titanium instruments on cyclic fatigue resistance. *J Endod* 2013;39:1593-7.
9. Kim HC, Cheung GSP, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Kang SI. Comparison of Forces Generated During Root Canal Shaping and Residual Stresses of Three Nickel-Titanium Rotary Files by Using a Three-Dimensional Finite-element Analysis. *J Endod* 2008;34:743-7.
10. Kim HC, Kim HJ, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Versluis A. Mechanical response of nickel-titanium instruments with different cross-sectional designs during shaping of simulated curved canals. *Int Endod J* 2009;42:593-602.

참 고 문 헌

11. Kim HC, Lee MH, Yum J, Versluis A, Lee CJ, Kim BM. Potential Relationship between Design of Nickel-Titanium Rotary Instruments and Vertical Root Fracture. *J Endod* 2010;36:1195-9.
12. Kim JY, Cheung GS, Park SH, Ko DC, Kim JW, Kim HC. Effect from cyclic fatigue of nickel-titanium rotary files on torsional resistance. *J Endod* 2012;38:527-30.
13. Kim TO, Cheung GSP, Lee JM, Kim BM, Hur B, Kim HC. Stress distribution of three NiTi rotary files under bending and torsional conditions using a mathematic analysis. *Int Endod J* 2009;42:14-21.
14. Park SY, Cheung GS, Yum J, Hur B, Park JK, Kim HC. Dynamic Torsional Resistance of Nickel-Titanium Rotary Instruments. *J Endod* 2010;36:1200-4.
15. Bössler C, Peters OA, Zehnder M. Impact of lubricant parameter on rotary instrument torque and force. *J Endod* 2007;33:280-3.
16. Spili P, Parashos P, Messer HH. The impact of instrument fracture on outcome of endodontic treatment. *J Endod* 2005;31:845-50.
17. Berutti E, Paolino DS, Chiandussi G, Alovise M, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D. Root canal anatomy preservation of WaveOne reciprocating files with or without glide path. *J Endod* 2012;38:101-4.
18. Bürklein S, Sch?fer E. Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems. *J Endod* 2012;38:850-2.