

전동식 니켈 티타늄 파일의 표면 결함 및 단면 형태가 반복응력 하에서 피로 파열에 미치는 영향

신유미¹ · 김의성¹ · 김광만² · 금기연^{1*}

¹연세대학교 치과대학 보존과, ²치과 생체재료학교실

ABSTRACT

EFFECT OF SURFACE DEFECTS AND CROSS-SECTIONAL CONFIGURATION ON THE FATIGUE FRACTURE OF NITI ROTARY FILES UNDER CYCLIC LOADING

Yu-Mi Shin¹, Eui-Sung Kim¹, Kwang-Man Kim², Kee-Yeon Kum^{1*}

¹Department of Conservative Dentistry, ²Dental Materials, Yonsei University

The purpose of this in vitro study was to evaluate the effect of surface defects and cross-sectional configuration of NiTi rotary files on the fatigue life under cyclic loading. Three NiTi rotary files (K3™, ProFile®, and HERO 642®) with #30/.04 taper were evaluated. Each rotary file was divided into 2 subgroups: control (no surface defects) and experimental group (artificial surface defects). A total of six groups of each 10 were tested. The NiTi rotary files were rotated at 300rpm using the apparatus which simulated curved canal (40 degree of curvature) until they fracture. The number of cycles to fracture was calculated and the fractured surfaces were observed with a scanning electron microscope. The data were analyzed statistically. The results showed that experimental groups with surface defects had lower number of cycles to fracture than control group but there was only a statistical significance between control and experimental group in the K3™ (p<0.05). There was no strong correlation between the cross-sectional configuration area and fracture resistance under experimental conditions. Several of fractured files demonstrated characteristic patterns of brittle fracture consistent with the propagation of pre-existing cracks.

This data indicate that surface defects of NiTi rotary files may significantly decrease fatigue life and it may be one possible factor for early fracture of NiTi rotary files in clinical practice. [J Kor Acad Cons Dent 29(3):267-272, 2004]

Key words : Surface defect, Cross-sectional configuration, Cyclic fatigue, Brittle fracture, Ductile fracture, NiTi rotary files

I . 서 론

* Corresponding author: **Kee-Yeon Kum**

Department of Endodontics, Youngdong Severance Hospital
College of Dentistry, Yonsei University
Dokok-Dong, Kangnam-Gu, 146-92, Seoul, 135-270, Korea
Tel: 82-2-3497-3566 Fax: 82-2-3463-0551
Email: kum6139@yumc.yonsei.ac.kr

니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일은 NiTi 합금의 특성상 스테인리스 강 파일보다 유연하고 탄성한계가 높기 때문에 치근단 전이나 ledge 등 근관의 변형을 최소화할 수 있으며, 내구성이 강하고 비틀림 힘에 대한 파열 저항성이 높아 만곡 근관에서 효율적으로 사용할 수 있다¹⁾.

※ 본 연구는 2003 년도 연세 학술 연구비의 부분 지원을 받아 이루어진 연구임

그러나 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일은 육안으로 관찰할 수 있는 구부러짐이나 풀림 등의 소성변형 없이 기구의 탄성한계 내에서 갑작스럽게 파절되는 경우가 있는데, 만곡 근관 내에서 기구가 회전하는 동안 만곡의 안쪽에는 압축응력이 만곡의 바깥쪽에는 인장응력이 주기적으로 가해짐으로써 표면에 미세 파절과 균열이 발생하고 전파되어 결국 피로파절을 일으키기 때문이다²⁾.

Mize¹⁾는 반복응력을 받은 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 주사 전자 현미경 (SEM)으로 관찰한 결과 균열이 형성되면서 파절이 진행되는 것을 발견하였고, Pruett²⁾와 Haikel³⁾은 반복응력 하에서 파절된 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 주사 전자 현미경으로 관찰 시 연성파절 양상을 나타낸다고 보고하였다. Kuhn⁴⁾등은 사용하지 않은 NiTi 파일을 구부러져 응력을 받게 한 상태에서 주사 전자 현미경으로 관찰한 결과 기계 가공 과정에서 발생한 균열, 미세 결함, 굽힘 자국 및 불균질성 등을 발견하였다.

Karn⁵⁾은 표면결함을 갖는 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 산화 알루미늄 마모제가 들어있는 tumbler에 넣고 회전시켜 표면결함을 제거함으로써 파절 저항성이 증가함을 보고하였다. 이처럼 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일의 표면결함은 균열의 핵으로 작용할 수 있고 특히 만곡 근관 내에서 반복적인 응력의 작용은 조기 파절을 일으키는 원인이 될 수 있다.

니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 이용한 이전의 피로파절에 대한 연구들은 파일의 직경이나 경사도 (taper), 단면 형태 및 회전 속도 등이 피로파절에 큰 영향을 미친다고 보고 되고 있다^{1-3,6)}. 특히 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일의 단면 형태, 즉 횡단면적은 비틀림, 굽힘 등의 물리적 성질을 직접적으로 결정하기 때문에 매우 중요한 요인으로 작용할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 주사 전자 현미경을 이용하여 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일의 표면결함이 반복응력 하에

서 파일의 조기 파절을 일으킬 수 있는지 알아보고, 또한 파일의 단면 형태가 반복응력 하에서 피로파절에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위한 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료

가. 전동식 NiTi 파일

ProFile[®] (Maillefer, Dentsply, Ballaigues, Switzerland), HERO 642[®] (MicroMega, Besancon, France), K3[™] (SybronEndo, CA, USA) 세 가지 종류의 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 사용하였다. 각각의 파일은 길이 21mm의 #30/.04 taper를 선택하였다 (Figure 1). 각 파일에서의 횡단면의 단면적 (cross sectional configuration area)은 먼저 파일을 투명 레진을 이용하여 매몰한 후 파일 끝 5mm 부위를 microtome (ISOMET[™], Buehler, Illinois, USA)을 이용하여 절단한 후 주사 전자 현미경 (HITACHI, Tokyo, Japan) 하에서 150 배율로 단면을 촬영하였다. 촬영된 단면상은 스캔 후 Scion Image software program (NIH)을 이용하여 core의 단면적 (mm²)을 계산하였다.

나. 실험군의 분류

실험군은 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일 표면에 인위적으로 표면결함을 만든 군으로 K3[™], ProFile[®] 및 HERO 642[®] 파일 각각 10개씩 총 30개의 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 엔진구동형 핸드피스 (Anthogyr instrument, Sallanches, France, 16:1 감속) 에 연결하여 300rpm으로 회전시키면서 고정된 다이아몬드 디스크와 접촉시켜서 파일 끝 5 mm 이내에 표면결함을 형성하였다. 대조군은 200배로 확대한 현미경 상에서 파일 끝 5 mm 이내의 삭제

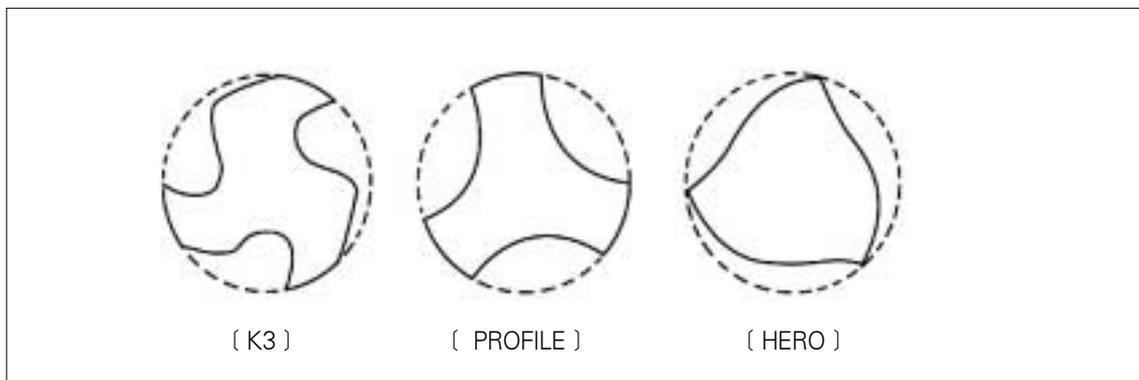


Figure 1. Cross-sectional configuration of K3[™], ProFile[®], and HERO 642[®].

Table 1. Study Design of control and experimental groups.

Group	Control (No surface defect)	Experiment (Surface defects)	Sample No.
K3™	#30/.04	#30/.04	10
ProFile®	#30/.04	#30/.04	10
HERO 642®	#30/.04	#30/.04	10

**Figure 2.** The apparatus developed for fracturing NiTi rotary files under cyclic loading (Schneider's curvature: 40°).

날 부위에 결함이 없는 군으로 K3™, ProFile® 및 HERO 642® 파일 각각 10개씩 총 30개를 사용하였다 (Table 1).

2. 실험 장치의 설계 및 파절 회전수 측정

금속판에 파일 끝 5 mm 부위에서 Schneider 만곡도로 40°의 만곡을 이루도록 금속 핀을 고정시켰다. 각 금속 핀의 표면에는 파일이 금속판에 수평을 이루고 회전 시 흔들리지 않도록 수평으로 홈을 형성하였다 (Figure 2). 엔진 구동형 핸드피스 지지대를 이용하여 금속판에 고정한 후 니켈 티타늄 (NiTi) 전동식 파일을 핸드피스에 끼우고 금속 핀 사이에 위치시켰다. 엔진 구동형 핸드피스를 전기 모터 (Nm uP-1500 motor, Nouvag Co., Switzerland)에 연결하고 300rpm으로 회전시켜서 파일이 파절될 때까지 초시계를 이용하여 파절 시간을 측정하고, 분당 회전수 (rpm)을 이용하여 파절 회전수를 계산하였다.

3. 주사 전자 현미경을 이용한 파절 단면의 분석

실험군과 대조군에서 각 군당 5개씩 임의로 선택하여 파절 단면을 S-800 주사 전자 현미경 (HITACHI, Tokyo, Japan)으로 관찰하였다. 먼저 전체 파절면을 저배율 (150배)로 관찰하여 파절이 시작되는 지점 (기시점)을 확인하고,

이 부위를 다시 고배율 (500배, 1000배)로 관찰하여 취성과 절, 피로균열 성장, 연성과파절 등 파절면의 특징을 확인하였다.

4. 통계 분석

파절 회전수에 대한 평균값과 표준편차를 토대로 각 파일에서 실험군과 대조군 간의 통계학적 유의성은 Wilcoxon Rank Sum Test를 사용하여 검증하였고, 단면 형태가 다른 3 파일과 파절 저항성과의 유의성은 Kruskal-Wallis Test를 사용하여 95 % 수준에서 검증하였다.

Ⅲ. 실험 결과

1. 파절 회전수

실험군과 대조군 총 60개 파일의 파절 시간을 측정하고, 파절 회전수를 계산하여 기록하였다. 통계 분석 결과 표면 결함을 갖는 실험군이 대조군에 비해 전반적으로 낮은 파절 회전수를 기록하였으며, 특히 K3™ 파일 군은 표면결함을 유발시킨 실험군이 대조군에 비해 유의성 있는 낮은 파절 회전수를 나타냈다 (Table 2, $p < 0.05$). 파일의 단면 형태 (단면적의 크기)와 측정된 파절 회전수와의 비교 시 실험군과 대조군 모두에서 단면적이 제일 큰 K3™ 파일에서 통계적으로 유의성 있게 낮은 파절 회전수를 나타냈다 (Table 3, $p < 0.05$).

2. 주사 전자 현미경을 이용한 파절 단면의 분석

실험군의 파일표면을 주사 전자 현미경으로 관찰 시 큰 홈, 스크래치, 결함 부위 등이 관찰되었다 (Figure 3). 저배율에서 관찰된 파절 단면의 양상은 취성과파절로 시작하여 연성과파절로 이행되는 양상이 뚜렷히 나타났다. 취성과파절 부위를 고배율로 보면 표면에서 발생한 홈이나 하방의 표면 손상 부위에서 파절이 시작되어 취성 파절의 특징인 빗살무늬를 나타내고, 여기에서 미세공 (microvoid)이 유입된 양상을 보이는 연성 파절로 이행되는 형태를 보였다 (Figures 4~7).

Table 2. Mean number of cycles to fracture and statistical comparison between control and experimental group of each file system.

Group	Control	Experiment	Statistical difference
	Mean ± SD	Mean ± SD	
K3™	255 ± 48	198 ± 54	S
ProFile®	429 ± 71	388 ± 99	NS
HERO 642®	393 ± 29	360 ± 80	NS

S: Statistically significant at $p < 0.05$ (Wilcoxon Rank Sum Test). NS: Non-significant
 Number of cycles to fracture = Time to fracture (sec) × 5 (300 rpm = 300 cycles/min)

Table 3. Statistical comparison between the number of cycles to fracture and the cross sectional configuration area at 5 mm level.

Group	Cross-sectional area(mm ²)	Control (Mean ± SD)	Experimental (Mean ± SD)	Statistical significance
K3™	0.401 ± 0.008	255 ± 48	198 ± 54	†
ProFile®	0.382 ± 0.004	429 ± 71	388 ± 99	
HERO 642®	0.399 ± 0.008	393 ± 29	360 ± 80	

† Statistically significant between cross sectional area (D₅) and number of cycles to fracture (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)



Figure 3. A SEM image of surface defect (arrow) of K3™ (experimental group, ×150).

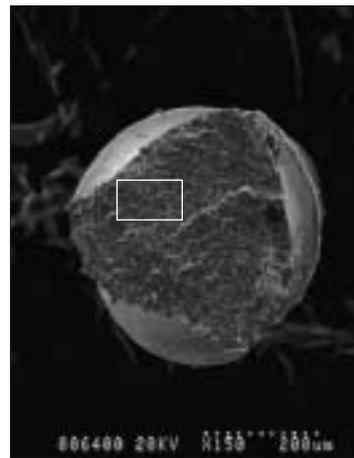


Figure 4. A SEM image of the fractured surface of HERO 642® file after cyclic loading: a control group (×150).

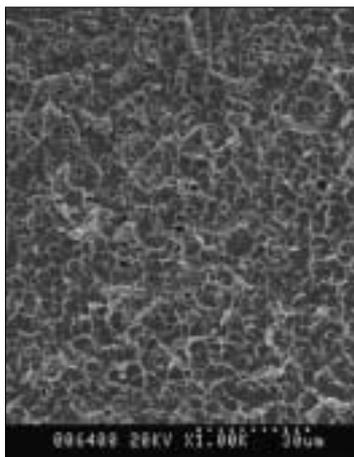


Figure 5. A higher magnification view of the rectangular area shown in Figure 4. Ultimate ductile fracture region that are typically characterized with microvoid formation and dimpling are seen (×1000).

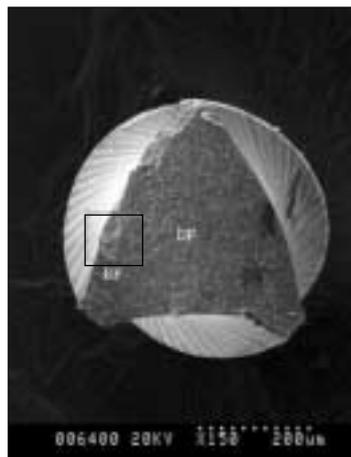


Figure 6. A SEM image of the fractured surface of ProFile® after cyclic loading (experimental group, ×150): The left square area shows a region of brittle fracture (BF) which transit to ultimate ductile failure (DF).

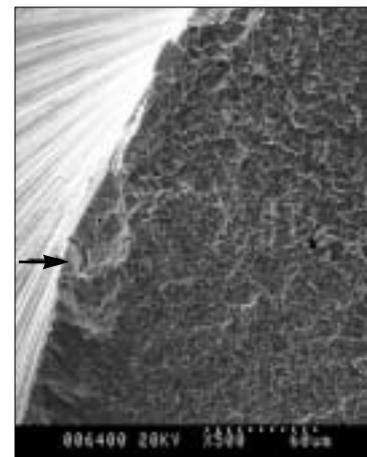


Figure 7. A higher magnification view of brittle fracture (BF) area shown in Figure 6. A region of brittle fracture is shown originating from the pre-existing surface defects (×500).

IV. 총괄 및 고찰

Karn⁵⁾은 임상 사용 중 파절된 11개의 전동식 ProFile[®]과 Quantec[®] 파일의 파절 단면을 SEM으로 관찰한 결과 다수의 단면에서 기계 가공 과정에서 존재했던 표면의 균열이 전파되어 발생하는 취성파절의 양상을 보고하였다. 그는 이러한 표면 결함이 파절에 미치는 영향을 평가하기 위해서 NiTi 파일을 산화 알루미늄 마모제와 함께 회전시켜 표면 결함을 제거한 후 굽힘, 비틀림 응력을 가하였을 때 파절 저항성이 상대적으로 증가함을 보고하였다. 그는 이러한 표면 결함을 제거한 파일은 전반적으로 표면 결함의 크기가 작게 나타났고, 이것이 파절 회전수를 증가시킨 요인이라고 보고하였다.

본 실험에서는 반대로 실제 임상에서 전동식 NiTi 파일의 반복 사용에 따른 삭제날의 마모로 인해 표면 결함이 존재하는 경우 반복 응력의 부여 후 피로 파절에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 실험 결과 측정된 파절 회전수는 표면 결함을 유발시킨 실험군에서 대조군에 비해 일관되게 낮은 파절 회전수를 보였으며, 특히 K3[™] 파일 군에서는 두 군간에 통계학적으로 유의성이 있는 낮은 파절 회전수를 나타냈다. 그러나 표면 결함의 깊이나 위치가 일정하지 않았기 때문에 실험 군내에서의 파절 회전수는 다양한 값으로 나타났다.

10000번의 회전이하에서 어떤 물질의 파절이 일어나는 것을 저회전 피로 (low-cycle fatigue)라고 하는데, 본 실험에서는 실험군과 대조군 모두에서 파절 회전수가 500회 이하로 나타났다. 이렇게 적은 회전에서 기구의 파절이 일어나는 것은 재료에 탄성 한계 이상의 응력이 가해졌거나 혹은 기존에 존재했던 표면결함 때문에 반복 응력이 가해졌을 때 피로 균열 성장 단계의 90% 이상을 차지하는 기시 단계가 짧아진 것이 원인이 될 수 있다⁶⁾. 그러나 본 실험상에서는 탄성 한계 이상의 응력이 가해졌기 보다는 후자의 원인에 의해 저회전 피로가 일어난 것으로 사료된다. 특히 이러한 표면결함 부위가 최대 만곡 부위와 중첩될 경우에는 균열의 진행이 촉진되어 더 빨리 파절되는 결과를 나타낼 수 있다.

Turpin⁷⁾ 등은 서로 다른 단면 형태를 갖는 NiTi 파일을 3차원적으로 재구성하여 분석한 결과 triple helix 단면이 triple U 단면보다 단면적이 30%정도 커 유연성은 떨어지지만 굽힘이나 비틀림 저항성은 2배정도 강하다고 하였다. 또한 triple helix는 응력이 균등하게 분배되기 때문에 파절 저항성이 강하지만 triple U 단면은 응력이 삭제날 부위에 집중되기 때문에 파절에 취약하다고 하였다. 한편 본 실험에서 사용된 3 가지 파일의 치근단 5 mm level (D₅)에서 측정된 단면적은 K3[™] (0.403) 및 HERO 642[®] (0.399), 파일이 ProFile[®] (0.382) 보다 약 30% 정도 크게 측정되

었다. 따라서 이론적으로는 횡단면적이 제일 큰 K3[™] 파일에서 파절 저항성이 가장 크게 나타나야 하지만 오히려 횡단면적의 크기에 반비례한 결과로 나타났다. 따라서 본 연구 결과만으로 볼 때 만곡 근관 내에서 전동식 NiTi 의 파절 역학에 관여하는 요인 가운데 파일의 횡단면적은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 그러나 본 실험 조건은 응력이 최대 만곡 부위인 파일 끝 5mm 이내에만 집중되고 파일의 나머지 부위는 응력을 받지 않는 상태였기 때문에 Turpin⁷⁾의 결과와 직접 비교하기는 어렵고 또한 실제 임상에서는 파일의 flute design에 따라 근관 내에서 형성되는 상아질 잔사의 배출 정도가 각기 다르기 때문에 이들 변수가 파절에 큰 영향을 미칠 수 있음을⁸⁾ 고려해야 할 것이다. 따라서 추 후 실제 임상 조건과 같은 표준화된 상태에서 파절 역학에 관한 실험이 계속되어야 할 것으로 사료된다.

한편 주사 전자 현미경 상에서 관찰된 파절 단면의 양상은 실험군과 대조군이 크게 다르지 않았으며 취성파절로 시작하여 연성파절로 이행되는 소견을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 연성파절은 재료가 충분히 소성변형을 일으켜 외부형상이 변화된 후 발생하는 파절로 파절 단면상에서는 특징적으로 분화구 모양의 미세공 (microvoid)이 유합된 형태로 관찰되었다. 한편 취성파절 부위를 고배율로 보면 피로에 의한 균열이 진행되어 생기는 피로 줄무늬 (fatigue striation)가 관찰되었는데, 이것은 균열이 성장하면서 전파와 중단의 과정이 반복되기 때문으로 사료된다.

금속의 피로 균열의 성장 단계는 특징적으로 균열의 기시, 전파, 연성 파절의 3단계로 나타나는데⁹⁾, 연구 결과 1단계 기시 부위는 항상 파일 표면에 존재했던 손상 부위와 연관되어 나타났다. 한편 본 실험에서 파절 회전수를 기록하기 위해 사용된 측정 장치는 파일이 pecking motion 이 아닌 고정된 위치에서 연속적으로 회전시켜 반복 응력을 주었기 때문에 실제 임상처럼 만곡 근관 내에서 파일이 받는 응력을 정확히 재현할 수는 없지만 간단하게 NiTi 파일의 피로 파절을 평가하는데 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 향 후 파일의 pecking motion 을 재현하면서 피로파절을 평가할 수 있는 실험 장치의 개발이 필요하리라 사료된다.

결론적으로 NiTi 파일의 표면 결함이 진행되어 발생한 균열과 반복 피로에 의한 균열을 독립적으로 구별하기는 어렵지만 파절 기시점으로 작용하여 파절에 중요한 역할을 하고 임상 사용 시 파일의 초기 파절의 한 원인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 주사 전자 현미경 (SEM)을 통해서 전동식 니켈 티타늄 (NiTi) 파일의 표면 결함이 반복 응력 하에서 파일의 초기 파절의 원인이 될 수 있는지, 또한 NiTi 파일의

단면 형태가 반복 응력 하에서 피로파절에 영향을 미치는지 알아보기 위한 것이다. #30/.04 크기의 K3™, ProFile®, HERO 642® 세 종류의 전동식 NiTi 파일을 사용하였고, 실험군에는 파일 끝 5 mm 이내에 인위적으로 표면 결함을 유발시켰다. 40 도의 만곡을 재현시킨 실험 장치에 파일을 고정 후 300 rpm으로 회전시켜 파절 회전수를 측정하였고, 파절 단면은 주사 전자 현미경으로 파절 양상을 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 표면 결함을 갖는 실험군이 대조군에 비해 일관되게 낮은 파절 회전수를 나타 내었으며, 특히 K3™ 파일에서는 두 군간에 유의성 있는 차이를 나타냈다 ($p < 0.05$).
2. 파절 단면을 주사 전자 현미경으로 관찰한 결과 취성파절로 시작하여 연성파절로 이행되는 양상이 뚜렷하게 알 수 있었다.
3. 단면 형태 (단면적)에 따른 파절 저항성을 비교했을 때 단면적이 큰 K3™ 파일에서 실험군 및 대조군 모두 가장 낮은 파절 회전수를 나타냈다 ($p < 0.05$).

본 실험 조건 하에서 전동식 NiTi 파일의 횡단면적은 파절 저항에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났으며, 오히려 기계 가공 과정이나 반복 사용 중에 발생할 수 있는 표면의 결함이 피로파절로 진행될 수 있음을 알 수 있었고, 이러한 표면 결함은 NiTi 파일의 임상 사용 시 조기 파절의 원인 중 하나가 될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Mize SB, Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL. Effect to sterilization on cyclic fatigue of rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 24(12):843-847, 1998.
2. Pruett JP, Clement DJ, and Carnes DL. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 23(2):77-85, 1997.
3. 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(6):434-440, 1999.
4. Kuhn G, Tavernier B, and Jordan L. Influence of structure on Nickel-Titanium endodontic instrument failure. *J Endod* 27(8):516-520, 2001.
5. Karn T. Fractographic analysis of experimentally separated NiTi rotary files. MS Thesis, University of Connecticut, 2003.
6. Li UM, Lee BS, Shih CT, Lan WH, Lin CP. Cyclic fatigue of endodontic nickel-titanium rotary instruments: static and dynamic tests. *J Endod* 28(6):448-451, 2002.
7. 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(7):414-417, 2000.
8. Jeon IS, Spangberg LSW, Yoon TC, Kazemi RB, Kum KY. Smear layer production of three NiTi rotary reamers in straight root canals. A SEM study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol and Endodon.* 96(5):601-607, 2003.