

왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 근관 형성 시 발생하는 회전력 및 수직력에 대한 평가**

유연지^{1,3}, 임범순^{2,3}, 김진우⁴, 백승호^{1,3}, 이인복^{1,3} *

서울대학교 치의학대학원 치과보존학교실¹, 치과생체재료과학교실², 치학연구소³, 강릉대학교 치과대학 치과보존학교실⁴

Assessment of torque and apical load during root canal preparation using reciprocating nickel-titanium files**

Yeon Jee Yoo^{1,3}, Bum-Soon Lim^{2,3}, Jin Woo Kim⁴, Seung Ho Baek^{1,3}, In Bog Lee^{1,3} *

Dept. of Conservative Dentistry¹, Dept. of Dental Biomaterials Science², School of Dentistry and Dental Research Institute³, Seoul National University, Seoul, Korea,

Dept. of Conservative Dentistry⁴, Kangneung National University, Kangneung, Korea.

(Received: Jan. 14, 2014; Revised: Mar. 17, 2014; Accepted: Mar. 17, 2014)

DOI : <http://dx.doi.org/10.14815/kjdm.2014.41.1.9>

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the torque and apical load generated during root canal preparation using reciprocating nickel-titanium (NiTi) files in reciprocating or continuous rotating motions. Twenty resin blocks with simulated L-shaped canal were pre-prepared and randomly assigned to four experimental groups for canal preparation: Group RPR, Reciproc R25 file in reciprocating motion; Group RPC, Reciproc R25 file in continuous rotating motion; Group WOR, WaveOne Primary file in reciprocating motion; Group WOC, WaveOne Primary file in continuous rotating motion. The apical load and torque generated during canal preparation were recorded using the laboratory-made load-torque measurement device, and analyzed with the torsional properties of the files. When the files were used in reciprocating motion, the number of pecking stroke, the peak apical load and peak reverse apical load were significantly higher ($p < 0.05$), whereas the peak torque was not significantly different ($p > 0.05$). The peak torque and peak reverse apical load in Reciproc R25 were significantly higher than in WaveOne Primary ($p < 0.05$). The peak torque and peak reverse apical load were positively correlated. The two NiTi files showed bi-phasic elastic deformation under torsional stress, and Reciproc R25 maintained elastic property to higher rotational angles compared to WaveOne Primary ($p < 0.05$). The torque values at yield point and maximum point, and toughness value under fracture point were not significantly different between the files ($p > 0.05$). In conclusion, the torque and apical load during canal preparation differed according to the files and rotating method. Within the limitations of the present study, Reciproc R25 showed significantly higher torque and reverse apical load in both reciprocating and continuous rotating motions, thus requires caution in clinical application.

Keywords: apical load, NiTi file, reciprocating motion, torque, yield point

서론

* 교신저자 : 110-744, 서울시 중로구 대학로 111, 서울대학교 치의학 대학원 치과보존학교실, 이인복

** 이 연구는 교육과학기술부의 한국연구재단의 지원(No. 2012R1A2A2A02010147)에 의해 이루어 졌음.

성공적인 근관 치료를 위해서는 근관의 원래 형태를 변화시키지 않으면서 근관 내 치수 잔사 및 감염 상아질을 제거하는 생역학적 근관 형성이 중요하다 (Schilder,

1974). 그러나 근관의 해부학적인 구조는 매우 복잡하며 대부분의 경우 다양한 위치에 만곡을 가지고 있어 근관의 기계적인 형성 중 ledge, zip, 천공, 근단공 전이 등이 발생하여 근관 치료의 예후를 불분명하게 할 수 있다 (Peters, 2004; Jafarzadeh와 Abbott, 2007). 이러한 측면에서 니켈-티타늄(Nickel-Titanium) 파일(file)은 초탄성 특성을 가지고 있어 만곡 근관에서도 연속 회전이 가능하며 근관의 중심을 잘 유지하면서도 적절한 경사도를 갖는 바람직한 근관 형성을 가능하게 하였다(Garip와 Gunday, 2001; Peters 등, 2001). 경제적 부담과 더불어 예측 불가능한 기구 파절과 같은 한계에도 불구하고 이를 극복하기 위해 새로운 니켈-티타늄 합금 소재를 이용한 다양한 디자인을 가진 제품들이 개발되고 있다.

최근 한 개의 니켈-티타늄 파일을 왕복회전으로 사용하여 전 근관계를 형성하는 방법이 소개되었고 (Yared, 2008), 경제적인 효용성과 임상적 편리함 때문에 관심이 집중되고 있다. 니켈-티타늄 파일을 왕복회전으로 사용할 경우 근관 형성 시간의 감소, centering ability의 향상과 더불어 피로 및 굴곡 파절 저항성이 증가되는 것이 여러 연구에서 확인되었다 (You 등, 2010; You 등, 2011; Berutti 등, 2012; Gambarini 등, 2012; Kim 등, 2012; Plotino 등, 2012). 현재 왕복회전식 니켈-티타늄 파일은 서로 다른 단면 형태를 가지는 Reciproc (VDW GmbH, Munich, Germany)과 WaveOne (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Switzerland) 두 가지가 출시되어 있다. 이와 같은 파일들은 한 개의 기구가 삭제해야 하는 치근 상아질의 양이 많은 점을 고려하여 능동적인 단면 형태를 가지지만 pitch에 변화를 주어 안전성을 도모하였고, 반시계 방향으로 회전하면서 근단부로 전진 및 상아질을 삭제하고 시계 방향으로 회전하면서 기구에 축적된 응력을 완화시켜 주도록 디자인되어 있다 (De-Deus 등, 2013; Pedulla 등, 2013). 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 사용하기 위해 고안된 엔진은 주기적으로 회전 방향을 바꾸면서 정해진 각도와 속도로 파일을 회전시키도록 설계되어 있다. 실제로 많은 임상가들이 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 사용하는 경우 진동을 느끼는 경우가 많은데, 이것은 엔진이 회전 방향을 바꿀 때 모터의 회전자에 관성력이 발생하는데 기인한다. 문제는 이 힘이 핸드피스와 파일을 통하여 술자 뿐만 아니라 근관 벽에 전해져 치아에 충격을 가해 환자에 불편감을 줄 수 있다는 것이다.

파일의 파절 가능성에 큰 영향을 미치고 환자의 불편감을 유발하는 요인은 파일과 근관 벽 사이에 발생하는 마찰력에 의한 회전력(torque)이다. 많은 연구자들이 한 방향으로만 회전하는 기존 파일들을 이용하여 근관 형성

시 치아에 작용하는 수직력(apical load)와 회전력의 상관관계에 대해 보고하였다. Blum 등이 직선 근관 형성 과정에서 발생하는 수직력과 회전력에 대해 보고한 이후 (Blum 등, 1999), Peters 등은 니켈-티타늄 파일을 사용한 만곡 근관 형성 과정을 대상으로 수직력과 회전력을 측정 한 바 있다 (Peters와 Barbakow, 2002). 최근 연구에서는 근관 형성 중 발생하는 회전력과 파일의 변위에 대해 3차원적으로 분석하였다 (Diop 등, 2009). 그러나 현재까지의 연구에서 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 근관 형성 시 치아에 발생하는 회전력에 대해서는 보고된 바가 없다. 그 이유는 기존의 연구에서 사용된 회전력 센서로는 빠르게 좌우로 진동하는 왕복회전식 파일에 의해 발생하는 회전력의 변화를 측정할 수 없기 때문이다.

이에 저자는 빠르게 변하는 회전력을 실시간으로 측정할 수 있는 새로운 회전력 센서를 제작하였다. 본 연구의 목적은 개발된 수직력-회전력 측정 장치를 이용하여, 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 왕복회전 또는 연속회전 운동으로 사용하여 근관 형성 시 치아에 작용하는 수직력과 회전력을 측정, 비교하고자 하였다. 귀무 가설은 “왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 왕복회전과 연속회전 운동으로 사용하는 경우 근관 형성 시 발생하는 수직력과 회전력은 차이가 없다”이다.

재료 및 방법

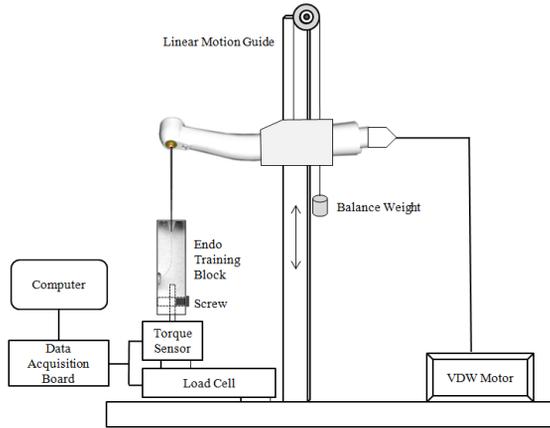
왕복회전식 니켈-티타늄 파일인 Reciproc R25 (VDW GmbH)과 WaveOne Primary (Dentsply Maillefer)을 이용하여 근관 형성 시 발생하는 수직력과 회전력, 그리고 파일 자체의 비틀림 저항(torsional resistance)을 측정하였다.

1. 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 근관 형성 시 발생하는 수직력과 회전력 측정

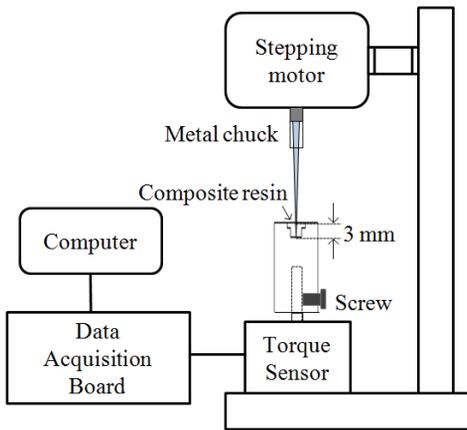
왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 만곡 근관 형성 시에 발생하는 수직력과 회전력을 측정하기 위한 장비는 새로 개발된 회전력 센서와 load cell, data acquisition board, 니켈-티타늄 파일 구동용 핸드피스, 그리고 데이터 처리 소프트웨어로 구성되었다(Fig. 1a).

Load cell 위에 장착된 회전력 센서를 파일 장축에 일치하도록 고정하고, ISO 15/0.02 taper 규격의 만곡 근관을 가지는 레진 블록(Endo Training Block, Ref A 0177, Dentsply Maillefer)을 나사로 회전력 센서에 견고하게 고정하였다. 핸드피스는 linear motion guide를 이용하여

수직으로 직선 운동만 가능하게 하였고 파일 tip의 위치가 회전력 센서에 장착된 레진 블록의 근관 입구에 일치하도록 하였다(Fig. 1a). Linear motion guide에 장착된 도르레와 균형 추를 이용하여 초기 상태에서 핸드피스 무게는 '0'이 되도록 하였다.



(a)



(b)

Figure 1. Schematic diagrams of the instruments. (a) Apical load-torque measurement instrument. (b) Angle - torque (torsional resistance) measurement instrument.

준비된 레진 블록 20 개는 근관 형성에 사용할 파일의 종류에 따라 무작위로 10 개씩 다음과 같이 두 그룹으로 나누었다. 각 그룹은 회전 방식에 따라 다시 두 subgroup으로 나누어 각 파일을 왕복회전 또는 연속회전으로 사용하여 예비 형성된 근관을 형성하였다.

Group RP: S-shape 단면 형태를 가지는 Reciproc R25 (ISO 25 tip, 8% apical taper).

Group RPR: Reciproc R25를 왕복회전으로 사용

Group RPC: Reciproc R25를 연속회전으로 사용

Group WO: Concave triangle 단면 형태를 가지는

WaveOne Primary (ISO 25 tip, 8% apical taper).

Group WOR: WaveOne Primary를 왕복회전으로 사용
 Group WOC: WaveOne Primary를 연속회전으로 사용
 제조사에서 권장하는 사용 방법에 따라 레진 블록은 Pathfile No. 1, 2, 3 (Dentsply Maillefer)를 이용하여 glide path 확보 및 예비 형성(pre-flaring)하였다. 근관 예비 형성 후 생리식염수를 이용하여 충분히 세척한 후 작업장 및 apical patency를 재확인하였다. 준비된 레진 블록은 3 mm 직경의 나사를 이용하여 회전력 센서에 견고하게 장착한 후, 근관 형성 시 순환을 위해 근관 내에 근관 세척액으로 생리식염수를 넣고 입구 부분에 RC-Prep (Premier Dental Products, Norristown, PA)을 채웠다.

근관 형성은 VDW SILVER 모터(VDW GmbH)를 이용하여 각 파일에 따라 다음과 같은 설정 하에 시행하였다: 왕복회전은 Reciproc R25은 "RECIPROC ALL" mode, WaveOne Primary는 "WAVEONE ALL" mode 하에서 사용하였으며, continuous rotating motion은 Reciproc R25과 WaveOne Primary를 각각 300 rpm, 350 rpm의 속도로 반시계 방향으로 연속회전하여 사용하였다. 임상에서와 유사하게 초당 약 0.5-1회의 pecking motion으로 핸드피스를 전진 및 후진시키며 각 파일이 근관장에 도달할 때까지 측정되는 수직력과 회전력을 data acquisition board (USB-6361, National Instrument, Austin, TX, USA)를 이용하여 1000 samples/s로 컴퓨터에 저장하였다.

각 레진 블록을 형성할 때마다 새 파일을 사용하였고 모든 근관 형성 과정은 근관 치료를 전공한 한 명의 술자에 의해 진행되었다.

2. 니켈-티타늄 파일의 비틀림 저항 측정

비틀림 저항 측정 장비는 step 모터, 회전력 센서, data acquisition board, 그리고 데이터 처리 소프트웨어로 구성되었다(Fig. 1b). Step 모터의 하방에는 파일을 장착할 수 있는 metal chuck이 위치하고, 회전력 센서에는 밀링하여 제작한 원통형 황동 몰드를 고정하였다. 몰드 상부에는 지름 5 mm, 깊이 3 mm의 원형 홈과 회전에 저항할 수 있도록 홈 양쪽에 key hole을 형성하였다.

파일의 tip이 회전력 센서에 고정된 황동 몰드 바닥에 닿도록 step 모터의 metal chuck에 파일의 shank를 고정하고 몰드의 홈 안에 복합레진(Z250, 3M ESPE, St. Paul, MN, USA)을 채워 넣고 광중합하여 파일의 근단부 3 mm를 회전력 센서에 견고하게 고정하였다. 제조사가 제공하는 사용 방법에 따라 두 가지 reciprocating 파일의 flute 방향을 고려하여 반시계 방향으로 회전시켰다. Step 모터는 1.8°/s의 일정한 속도로 회전시켰고 회전각(angle)에

따라 측정되는 회전력을 data acquisition board를 통해 컴퓨터에 저장하였다. 파일의 파절은 비틀림 회전각이 증가함에 따라 회전력이 증가하다가 급격하게 감소하여 '0'이 되는 것으로 확인하였다. 회전각-회전력 곡선으로부터 상변이점(phase transition point), 항복점(yield point), 최대점(maximum point)에서의 회전 각도 및 회전력을 기록하였고, 파절점(fracture point)까지 니켈-티타늄 파일이 흡수한 에너지인 인성(toughness)을 계산하였다.

3. 통계 분석

기록한 데이터는 Kolmogrov-Smirnov 테스트를 이용하여 데이터의 정규성을 분석한 후, SPSS 통계 프로그램을 이용하여(SPSS v19.0, IBM Corp, Somers, NY, USA) 이원배치분산분석(two way analysis of variance)과 사후분석(Duncan post hoc comparison test)으로 그룹간 차이를 비교하였다. 근관 형성 중 가하는 수직력과 근관 형성 중에 발생하는 회전력 및 reverse 수직력 사이의 상관관계(Pearson correlation analysis)를 분석하였다($\alpha=0.05$).

결 과

1. 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 근관 형성 시 발생하는 수직력과 회전력

근관 형성 과정에서 발생하는 수직력과 회전력의 시간에 따른 변화 곡선은 Figure 2와 같다. 각 pecking motion 시 수직력을 가하면 파일의 레진 블록에 작용하는 회전력이 순간적으로 증가하였다가 감소하였으며, 파일을 후진시키는 과정에서는 수직력과 반대 방향으로 reverse 수직력이 측정되었다가 다시 초기 상태로 회복되었다.

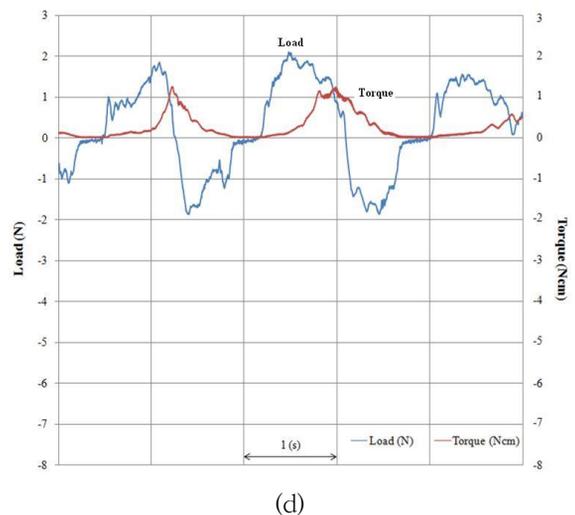
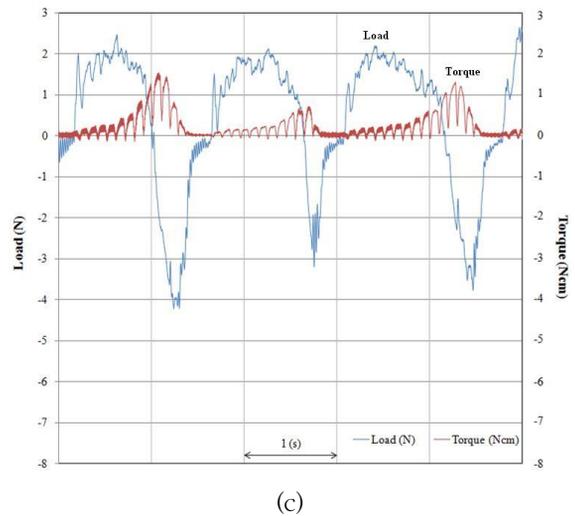
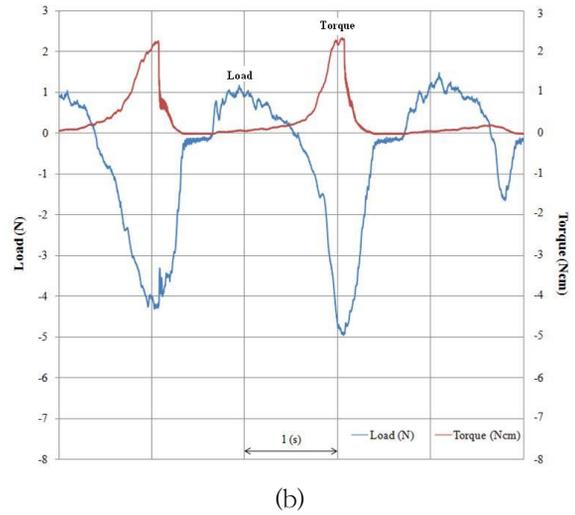
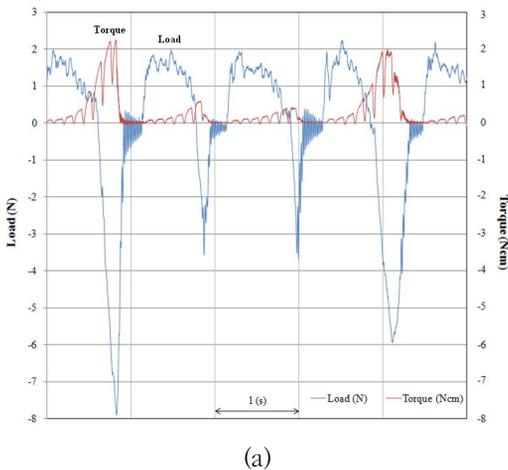


Figure 2. Representative apical load-torque curves vs. time during root canal preparation, (a) Reciproc R25 in reciprocating motion, (b) Reciproc R25 in continuous rotating motion, (c) WaveOne Primary in reciprocating motion, (d) WaveOne Primary in continuous rotating motion.

Table 1. Peak apical load, peak torque, peak reverse apical load, and time delay among them during root canal preparation

Files	Peak apical load (N)	Time delay (s)	Peak torque (Ncm)	Time delay (s)	Peak reverse load (N)
Group RPR	2.07 (0.28)	0.38 (0.09)	2.26 (0.35)	0.26 (0.02)	3.91 (1.77)
Group RPC	1.62 (0.19)	0.88 (0.07)	2.35 (0.47)	0.23 (0.05)	2.99 (1.14)
Group WOR	2.17 (0.25)	0.11 (0.04)	1.34 (0.23)	0.22 (0.11)	2.75 (0.91)
Group WOC	1.81 (0.21)	0.48 (0.12)	1.36 (0.30)	0.29 (0.19)	2.09 (0.68)

* Number in parenthesis is standard deviation.

근관장까지 근관 형성을 완료하는 데에는 각 파일을 왕복회전과 연속회전으로 사용하는 경우 Reciproc R25는 각각 14.16 ± 1.16 회와 8.60 ± 0.89 회, WaveOne Primary는 15.83 ± 1.83 회와 8.6 ± 1.14 회의 pecking motion이 필요하였고, 모든 경우에서 니켈-티타늄 파일의 파절은 발생하지 않았다. 시간-회전력 곡선에서 계산된 왕복회전 속도는 Reciproc R25는 평균 8.72 cycle/s, WaveOne Primary는 평균 10.40 cycle/s 였다.

이원배치분산분석 결과 pecking motion stroke 구간별로 수직력, 회전력, 그리고 reverse 수직력의 최대값은 파일의 종류와 회전 방식에 따라 유의한 차이를 나타냈다 (Table 1). 근관 형성 시 pecking motion에 의해 가해진 최대 수직력은 두 가지 파일 모두 왕복회전으로 사용할 때 유의하게 크게 측정되었으며($p < 0.001$) 파일의 종류에 따른 차이는 없었다($p > 0.05$). Active filing 시 레진 블록에 가해진 최대 회전력은 Reciproc R25에서 유의하게 크게 측정되었으며($p < 0.001$) 같은 파일에서 회전 방법에 따른 차이는 관찰되지 않았다($p > 0.05$). 최대 reverse 수직력은 Reciproc R25가 WaveOne Primary에 비해 유의하게 크게 측정되었으며($p < 0.001$) 각 파일을 왕복회전으로 사용할 때 연속 회전하는 경우에 비해 유의하게 크게 측정되었다($p < 0.05$) (Table 1, Fig. 3). 상관 분석 결과 근관 형성 중 발생하는 회전력과 reverse 수직력 사이에는 양의 상관 관계가 확인되었다($r_p = 0.320, p < 0.05$).

시간에 따른 수직력-회전력 곡선의 각 pecking motion stroke 구간에서 최대 수직력과 최대회전력, 최대 회전력 및 최대 reverse 수직력 사이에는 시간차가 관찰되었다 (Table 1, Fig. 2).

각 실험군에서 측정된 수직력과 회전력을 각각 X-Y 축에 도해한 결과는 Figure 4에 나타났다.

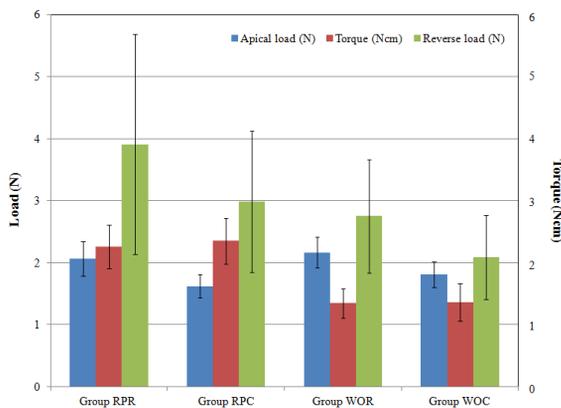
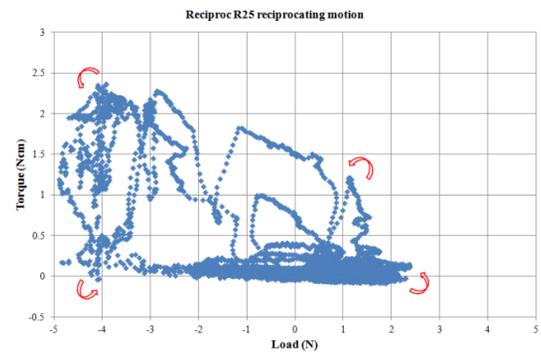
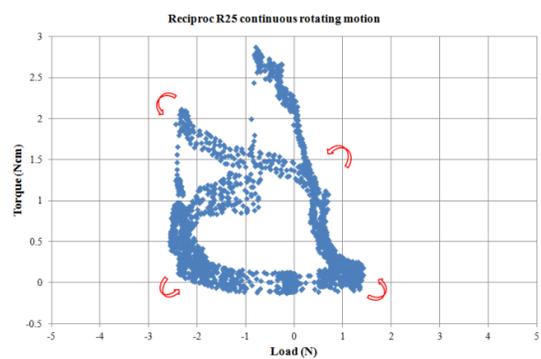


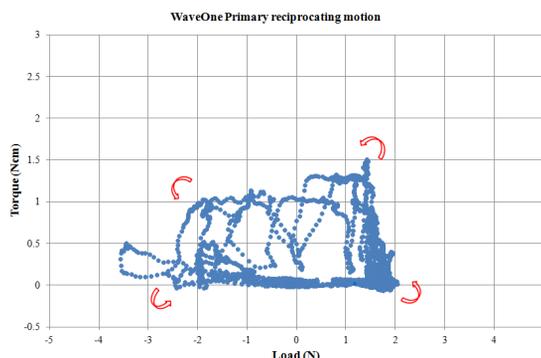
Figure 3. Apical loads, torques, and reverse apical loads of the two NiTi files during root canal preparation with reciprocating or continuous rotating motion.



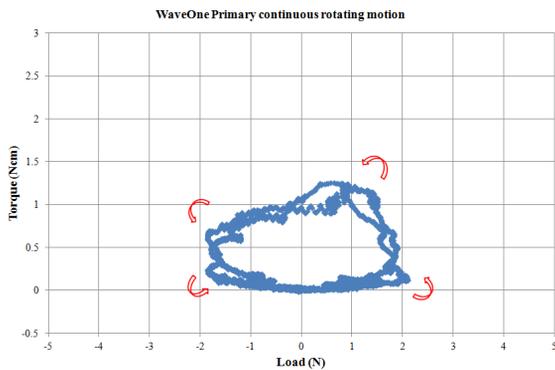
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4. Lissajous plots of the apical load and torque of NiTi files during root canal preparation.

(a) Reciproc R25 in reciprocating motion, (b) Reciproc R25 in continuous rotating motion, (c) WaveOne Primary in reciprocating motion, (d) WaveOne Primary in continuous rotating motion.

2. 니켈-티타늄 파일의 비틀림 저항

두 니켈-티타늄 파일은 비틀림 변형(torsional strain) 하에서 모두 제 1 탄성 변형 구간(elastic deformation phase 1) → 상변이점(phase transition point)→ 제 2 탄성 변형 구간(elastic deformation phase 2) → 항복점(yield point) → 최대점(maximum point) → 파절점(fracture point)의 과정을 가지는 bi-phasic elastic deformation을 나타냈다(Fig. 5).

각 파일의 상변이점, 항복점, 최대점에서의 회전각 및 회전력, 그리고 파절점에서의 인성은 Table 2와 같다. 상변이점에서 두 가지 파일의 회전각은 유의한 차이가 측정되지 않았으며($p > 0.05$), 항복점에서의 회전각은 Reciproc R25이 WaveOne Primary보다 유의하게 크게 측정되었다($p < 0.001$). 파절이 일어나기 전 최대점에서의 회전각 및 회전력, 그리고 파절될 때까지 파일에 저장된 에너지인 인성은 두 가지 파일에서 유의한 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$).

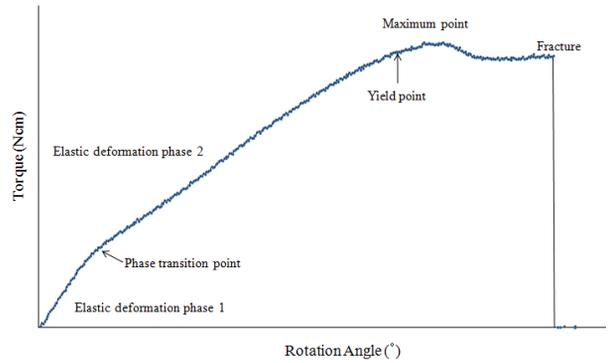


Figure 5. A representative rotation angle-torque curve of a NiTi file.

고찰

본 연구에서는 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용한 근관 형성 중 발생하는 수직력 및 회전력을 최초로 측정하였다. 근관 형성 중 발생하는 회전력을 측정하기 위해 이전의 연구에서 사용된 센서는 회전 변형(rotational strain)이 일어나야만 회전력을 측정할 수 있으며 센서 자체가 관성을 가져, 빠른 속도로 회전 방향이 변하는 왕복회전식 니켈-티타늄 파일의 회전력을 측정할 수 없었다(Blum 등, 1999; Peters와 Barbakow, 2002; Diop 등, 2009; Bardsley 등, 2011). 본 연구에서는 force rebalance transducer를 이용하여 관성의 영향을 근본적으로 배제하고 빠르게 진동하는 회전력의 변화를 실시간으로 측정할 수 있는 회전력 센서를 자체 제작하였다(Appendix). 또한 파일을 구동하기 위해 사용된 핸드피스는 linear motion guide를 이용하여 수직적인 상하 운동만 가능하도록 설계되어, 근관 형성 과정에서 치아에 가해질 수 있는 측방력을 배제하고 수직 성분의 힘만 작용하도록 하여 보다 균일한 회전력이 발생하도록 하였다.

이 실험에서 사용한 VDW 모터의 사용설명서에 따르면 WaveOne과 Reciproc은 서로 다른 속도 및 각도로 회전

Table 2. Torsional resistance of NiTi files. Angle-torque values at phase transition point, yield point, and maximum point, and toughness of NiTi files.

	Phase transition point		Yield point		Maximum point		Toughness (° Ncm)
	Angle (°)	Torque (Ncm)	Angle (°)	Torque (Ncm)	Angle (°)	Torque (Ncm)	
Reciproc R25	36.90 (1.83) ^a	0.42 (0.05) ^a	238.05 (13.52) ^a	1.56 (0.13) ^a	247.88 (19.82) ^a	1.58 (0.15) ^a	Reciproc R25 (71.77) ^a
WaveOne Primary	35.03 (1.32) ^a	0.46 (0.10) ^a	203.25 (3.33) ^b	1.50 (0.22) ^a	254.93 (37.98) ^a	1.64 (0.27) ^a	WaveOne Primary (75.27) ^a

* Mean values with the same superscripts in column are not significantly different ($p > 0.05$).

* Number in parenthesis is standard deviation.

하도록 설정되어 있다(Reciproc은 300 rpm으로 150°CCW와 30°CW; WaveOne은 350 rpm으로 170°CCW와 50°CW). 이들 파일의 전진과 후진 방향의 회전각을 고려하여 계산한 왕복회전 진동수는 Reciproc mode에서 10 cycle/s, WaveOne mode에서 9.55 cycle/s이나, 이번 연구에서 얻은 데이터를 기준으로 측정한 왕복회전 진동수는 Reciproc R25에서 평균 8.72 cycle/s, WaveOne Primary이 평균 10.40 cycle/s로 다소의 차이가 확인되었다. 이것은 왕복회전 전용 엔진은 작동 기전의 자체적인 한계 또는 관성의 영향으로 연속적인 회전 방향 전환 및 가속, 감속이 용이하지 않은 데에 기인하는 것으로 생각되며, 회전각 및 속도에 대한 정확한 향후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

시간-수직력 곡선에서 pecking motion stroke 중 active 수직력을 가한 시간은 각 stroke 당 0.5-1 초 정도로, 이 기간 동안 파일은 근관벽을 파고들어 근관에 회전력을 형성하고, 향후 0.4-0.6 초 동안 release되면서 파일에 집중되었던 응력이 해소됨과 동시에 파일의 삭제 날 사이에 끼어있던 삭제편이 근관 밖으로 나오게 된다. 따라서 연속회전하는 파일에서 이와 같은 주기적인 pecking motion은 기구에 과도한 비틀림 응력이 가해지는 것을 방지할 수 있다. 연속 회전 방식으로 근관을 형성하는 경우 왕복회전에 비해 적은 수의 pecking motion으로 근관 형성을 마무리할 수 있었고 가해지는 수직력은 작게 측정되었는데, 이는 능동적인 형태의 삭제 날을 가지는 파일을 사용하여 연속회전 시 왕복회전 보다 삭제 효율이 더 좋아 screw-in 효과를 억제하기 위해 술자가 무의식적으로 수직력을 줄이는 임상적인 상황이 반영된 것으로 생각된다. 향후 수직력을 조정할 수 있는 핸드피스 구동 장비를 추가한 실험이 필요할 것이다.

왕복회전식 니켈-티타늄 파일의 경우 active 수직력을 가하는 중 반시계 방향으로 회전하면서 적극적인 삭제 동작이 일어난 후 삭제력이 작용하지 않는 시계 방향으로 회전하여 비틀림 응력의 집중을 더 효과적으로 예방해 줄 수 있을 것이다. 이번 연구에서 시간에 따른 수직력-회전력 변화의 측정 결과 Blum 등의 연구에서와 같이 (Blum 등, 1999) 근단부로 힘을 가한 후 약간의 시간차를 두고 형성중인 레진 블록에 최대 회전력이 측정되었으며, 그 후에 최대 reverse 수직력이 측정되었다. 이는 임상에서 술자가 pecking motion으로 근관 형성할 때 파일을 후진시키는 도중에도 screw-in 효과에 의해 파일이 근관 벽에 끌리는 힘을 촉감으로 느끼는 상황이 그대로 반영된 결과로 볼 수 있겠다. 이는 근관 형성 중 발생하는 회전력과 reverse 수직력은 파일과 근관 벽 사이의 마찰 또는

screw-in effect의 결과임을 보여준다. Screw-in effect는 니켈-티타늄 파일의 flute의 pitch와 삭제 날의 형태에 영향을 받으며 (Diemer와 Calas, 2004), 니켈-티타늄 파일의 크기와 taper, radial land의 유무 등도 관련되어 나타난다 (Ha와 Park, 2012). 이번 실험에서 사용한 두 가지 파일은 모두 같은 tip size와 taper를 가지지만, 종적 횡단면 형태를 보면 두 가지 왕복회전식 니켈-티타늄 파일 모두 불균일한 flute pitch를 가진다. 주목할 점은 이와 같은 왕복회전 동작의 원리와 파일의 종적인 단면 형태에도 불구하고 두 가지 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용하여 근관 형성 시 과도한 reverse 수직력, 즉 screw-in effect가 나타나는 것이 관찰되었다는 것이다. 두 종류의 파일 모두 최대 reverse 수직력은 최대 수직력 보다 큰 값을 나타냈고, 최대 회전력과 양의 상관 관계를 보였으며($r_p=0.320$), Reciproc R25에서 WaveOne Primary 보다 크게 측정되었다. 근관의 glide path 확보 및 예비 형성을 조금 더 충분하게 해준다면 이와 같은 screw-in effect를 줄일 수 있을 것으로 예상되나 이 경우 single 파일 technique의 장점은 기대할 수 없다. 물론 실제 치아보다 정도가 낮은 레진 블록을 사용한 결과 screw-in effect가 과장되어 나타날 가능성도 배제할 수는 없으나 임상에서 이러한 위험성을 염두에 두어야 하며, 보다 정확한 평가를 위해 사람 치아를 이용한 후속 연구가 필요할 것으로 생각된다.

비틀림 저항 측정에서는 ISO 3630-1(2008)에서 제시하는 측정 방법인 금속 chuck으로 3 mm level을 고정하여 측정하는 경우 파일을 고정하는 금속 chuck 자체의 힘으로 파일 단면의 변형이 일어나 비틀림 저항에 변화를 줄 수 있기 때문에 금속 chuck 대신 복합레진에 파일의 근단부 5 mm를 포매하여 측정하는 방법이 제시되었다 (Park 등, 2010; Yum 등, 2011; Kim 등, 2012). 이번 연구에서는 임상에서와 더 유사한 조건으로, 3 mm 수준에서 각 파일의 flute에 복합레진이 긴밀하고 균일하게 접촉되도록 포매시켜 비틀림 저항을 측정하였으며 그 결과 Peters와 Barbakow가 제시한 니켈-티타늄 합금의 전형적인 회전각-회전력 곡선과 같이 bi-phasic elastic deformation 양상이 관찰되었다 (Peters와 Barbakow, 2002).

임상에서 니켈-티타늄 파일이 안전하게 사용될 수 있는 범위는 파일의 삭제 날 풀림이 일어나기 시작하는 항복점 이내의 각도로 회전할 때이다. 그러나 니켈-티타늄 합금으로 제작한 파일은 재료 자체의 특성으로 진성 항복점을 정확하게 정의하기가 어렵다. Figure 5에서와 같이 니켈-티타늄 파일은 제 1 및 제 2 탄성 변형 구간을 거쳐 소성 변형 구간으로 이행하는데, 상변이점을 지나 항복점에

서의 회전력을 초과하는 응력은 이를 제거한 후에도 미세 잔류 응력을 유발할 수 있다(Bauschinger effect) (Orgéas와 Favier, 1998). 이번 연구에서 근관 형성 과정 중 Reciproc R25는 항복점에서의 회전력을 초과하는 최대 회전력이 빈번하게 측정되었다. 이 파일을 이용하는 경우 발생하는 예측 불가능한 회전력 및 screw-in effect는 니켈-티타늄 파일에 축적된 미세 잔류 응력을 증폭시켜 파일의 비틀림 및 피로 저항을 감소시켜 파절 위험을 증가시킬 뿐만 아니라, 이때 발생하는 회전력이 치근벽에 전달되어 근관 치료 중 타진 또는 축진에 민감한 치아에 자극이 되어 환자에게 불편감을 줄 수 있다. 반면 WaveOne Primary는 항복점에서의 회전력에 근접한 범위 이내에서 전 근관 형성이 가능하여 그 상대적 안전성이 확인되었다. 이와 같은 차이는 두 파일의 단면적의 넓이 및 파일 삭제 날의 디자인 차이에서 기인하였을 가능성이 크다. 최근 Burklein 등 (Burklein 등, 2013)은 서로 다른 니켈-티타늄 파일을 이용하여 근관 형성한 치근의 횡단면을 관찰한 결과 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용하는 경우 치근단 부위에 유의하게 많은 균열이 발생한다고 보고하였는데, 이것은 본 연구 결과 확인된 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 사용하는 경우 발생할 수 있는 예측 불가능한 회전력 및 reverse 수직력의 위험성과 일맥상통하는 결과라고 할 수 있다.

근관 형성 과정에서 수직력과 회전력의 역동적인 관계를 도해하기 위해 본 연구에서는 두 요인을 X-Y 축에 직접 도해하였다(Fig. 4). 그 결과 수직력과 회전력은 pecking motion의 전진-후퇴 동작에 따라 위상차를 가지는 리사주 곡선(Lissajous figure)의 형태를 나타내었다. 리사주 곡선은 Figure 2과 같은 시간 영역(time domain)의 그래프와 달리, 여러 pecking cycles에서 이루어지는 수직력과 회전력의 관계를 한 번에 보여주며, 곡선의 면적 및 X-Y 사분면 내의 위치에 따라 파일의 임상적인 사용 안정성을 보여줄 수 있는 효과적인 도구라고 할 수 있겠다. 치아가 받는 힘이 클수록 리사주 곡선의 면적이 증가하며, 곡선 모양의 불균일성은 두 가지 변수의 진동 특성을 나타내준다. 즉 회전력과 reverse 수직력이 큰 X-Y 평면의 좌상단의 영역에 곡선이 위치할수록 사용 시 주의를 요한다고 할 수 있다.

본 연구에서 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 왕복회전으로 근관을 형성할 때 연속회전과 비교하여 치아에 걸리는 최대 회전력의 차이는 없었으나 더 큰 최대 reverse 수직력을 보였고 screw-in effect의 위험성이 확인되어 귀무 가설은 기각되었다. 이번 연구 결과로 미루어 두 가지 왕복회전식 니켈-티타늄 파일 중 Reciproc의 임상적인 사

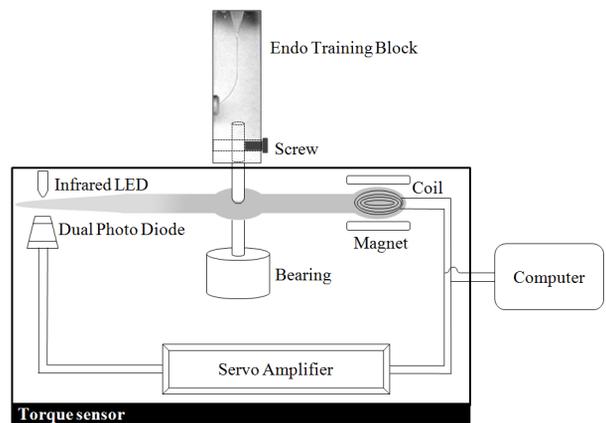
용 시 각별한 주의가 필요한 것으로 보이며, 왕복회전식 니켈-티타늄 파일들의 임상적인 안정성을 고려하여 적절한 단면적 디자인 및 적정 회전 속도에 대한 합의가 필요한 것으로 생각된다. 향후 실제 사람 치아를 이용한 근관 형성 과정을 대상으로 한 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 연속회전(continuous rotating motion)과 왕복회전(reciprocating motion)으로 사용하여 근관을 형성할 때 발생하는 수직력(apical load)과 회전력(torque)을 측정하였다.

왕복회전식 니켈-티타늄 파일을 이용하여 근관을 형성하는 경우 발생하는 회전력 및 수직력은 파일의 종류 및 회전 방법에 따라 차이가 있었다. Reciproc R25와 WaveOne Primary 두 파일 모두 왕복회전으로 사용하는 경우 더 큰 수직력과 reverse 수직력이 측정되었다. 두 파일 중 Reciproc R25가 연속회전 및 왕복회전 모두에서 WaveOne Primary에 비해 유의하게 더 큰 회전력 및 reverse 수직력을 유발하였다.

Appendix



Torque sensor에 연결된 레진 블록에 회전력이 발생하면, torque sensor의 arm이 null position에서 변위되어 적외선 light-emitting diode (LED)로부터 dual photo diode에 도달하는 광량이 변하게 된다. 이와 같은 광량의 변화가 dual photo diode에 의해 감지되면 electrical voltage output을 발생시키고 servo amplifier가 actuator coil에 전류를 흘려 전자기력에 의해 arm을 원래 위치로 되돌아가도록 하는 피드백 기전이 즉시 작동된다. 따라서

torque sensor의 arm은 항상 null position에 위치하게 되고 센서는 변위 없이 회전력을 선형적으로 측정할 수 있게 된다. Coil에 흐르는 전류는 회전력의 크기에 비례하며, 이는 연속적인 전압 신호로 변환되어 실시간으로 컴퓨터에 저장된다.

참 고 문 헌

- Bardsley S, Peters CI, Peters OA (2011). The effect of three rotational speed settings on torque and apical force with vortex rotary instruments in vitro. *J Endod* 37:860-864.
- Berutti E, Paolino DS, Chiandussi G *et al.* (2012). Root canal anatomy preservation of WaveOne reciprocating files with or without glide path. *J Endod* 38:101-104.
- Blum JY, Cohen A, Machtou P, Micallef JP (1999). Analysis of forces developed during mechanical preparation of extracted teeth using Profile NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 32:24-31.
- Burklein S, Tsotsis P, Schafer E (2013). Incidence of dentinal defects after root canal preparation: reciprocating versus rotary instrumentation. *J Endod* 39:501-504.
- De-Deus G, Arruda TE, Souza EM *et al.* (2013). The ability of the Reciproc R25 instrument to reach the full root canal working length without a glide path. *Int Endod J* 46:993-998.
- Diemer F, Calas P (2004). Effect of pitch length on the behavior of rotary triple helix root canal instruments. *J Endod* 30:716-718.
- Diop A, Maurel N, Oiknine M, Patoor E, Machtou P (2009). A novel platform for in vitro analysis of torque, forces, and three-dimensional file displacements during root canal preparations: application to Pro-Taper rotary files. *J Endod* 35:568-572.
- Gambarini G, Gergi R, Naaman A, Osta N, Al Sudani D (2012). Cyclic fatigue analysis of twisted file rotary NiTi instruments used in reciprocating motion. *Int Endod J* 45:802-806.
- Garip Y, Gunday M (2001). 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.
- Ha JH, Park SS (2012). Influence of glide path on the screw-in effect and torque of nickel-titanium rotary files in simulated resin root canals. *Restor Dent Endod* 37:215-219.
- Jafarzadeh H, Abbott PV (2007). Ledge formation: review of a great challenge in endodontics. *J Endod* 33:1155-1162.
- Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, Lee W (2012). Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod* 38:541-544.
- Orgéas L, Favier D (1998). Stress-induced martensitic transformation of a NiTi alloy in isothermal shear, tension and compression. *Acta Materialia* 46:5579-5591.
- Park SY, Cheung GS, Yum J, Hur B, Park JK, Kim HC (2010). Dynamic torsional resistance of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 36:1200-1204.
- Pedulla E, Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Rapisarda E (2013). Influence of continuous or reciprocating motion on cyclic fatigue resistance of 4 different nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 39:258-261.
- Peters OA (2004). Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod* 30:559-567.
- Peters OA, Barbakow F (2002). Dynamic torque and apical forces of ProFile.04 rotary instruments during preparation of curved canals. *Int Endod J* 35:379-389.
- Peters OA, Schonenberger K, Laib A (2001). Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 34:221-230.
- Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G (2012). Cyclic fatigue of Reciproc and WaveOne reciprocating instruments. *Int Endod J* 45:614-618.
- Schilder H (1974). Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 18:269-296.
- Yared G (2008). Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J* 41:339-344.
- You SY, Bae KS, Baek SH, Kum KY, Shon WJ, Lee W

(2010). Lifespan of one nickel-titanium rotary file with reciprocating motion in curved root canals. *J Endod* 36:1991-1994.

You SY, Kim HC, Bae KS, Baek SH, Kum KY, Lee W (2011). Shaping ability of reciprocating motion in curved root canals: a comparative study with micro-computed tomography. *J Endod* 37:1296-1300.

Yum J, Cheung GS, Park JK, Hur B, Kim HC (2011). Torsional strength and toughness of nickel-titanium rotary files. *J Endod* 37:382-386.