

주근단공의 조건에 따른 Root ZX의 정확성 평가

박신영, 이동균, 황호길*

조선대학교 치과대학 보존학교실

An evaluation of the accuracy of Root ZX according to the conditions of major apical foramen

Shin-Young Park, Dong-Kyun Lee, Ho-Keel Hwang*

Department of Conservative Dentistry, Chosun University School of Dentistry, Gwangju, Korea

Objectives: The purpose of this study was to assess the accuracy of Root ZX (J. Morita Corp.) according to the location of major foramen and open apex. **Materials and Methods:** 81 mandibular premolars with mature apices were selected. After access preparation, 27 teeth were instrumented to simulate open apices. 54 teeth were classified according to location of major foramen under surgical microscope (x16). The file was fixed at the location of apical constriction by Root ZX using glass ionomer cement. The apical 4 mm of the apex was exposed and photo was taken and the distance from file tip to the major foramen was measured by calibrating metal ruler on graph paper. The results were statistically analyzed using ANOVA and Scheffe test at $p < 0.05$ level. **Results:** Mean distance from file tip to major foramen was 0.308 mm in Tip foramen group (I), 0.519 mm in Lateral foramen group (II) and 0.932 mm in open apex group (III). Root ZX located apical constriction accurately within ± 0.5 mm in group I of 85.71%, in group II of 59.09%, and in group III of 33.33%. There was a statistically significant difference between group I and III ($p < 0.05$). **Conclusion:** Root ZX located apical constriction accurately regardless of location of major foramen. However, Root ZX couldn't find it in open apex. Clinicians have to use a combination of methods to determine an appropriate working length at open apex. It may be more successful than relying on just electronic apex locator. (*Restor Dent Endod* 2012;37(2):68-73)

Received October 14, 2011;
Revised November 7, 2011;
Accepted November 16, 2011.

Park SY, DDS, PhD student; Lee DK, DDS, PhD student; Hwang HK, DDS, PhD, Professor, Department of Conservative Dentistry, Chosun University School of Dentistry, Gwangju, Korea

*Correspondence to

Ho-Keel Hwang, DDS, PhD.
Professor, Department of Conservative Dentistry, Chosun University School of Dentistry, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju, Korea 501-825
TEL, +82-62-220-3840; FAX, +82-62-223-9064; E-mail, rootcanal@hanmail.net

Key words: Accuracy; Electronic apex locator; Major foramen; Open apex

서론

근관치료의 성공을 위해서는 감염된 치수조직의 완벽한 제거, 철저한 근관계의 세정과 형성 및 삼차원적인 근관충전이 이루어져야 하며, 이를 위해서는 정확한 근관장 설정이 필수적이다.¹ 이상적인 근관 내 기구조작과 근관충전의 한계는 근침협착부로 알려져 있으며, 근침협착부까지 근관장을 설정했을 때 근관계의 세정 및 형성이 쉽고 치근단 봉쇄를 더 쉽게 얻을 수 있으며 가장 적절한 창상치유가 일어날 수 있다.²

1942년 Suzuki가 개의 근관 내와 구강점막 사이의 전기저항이 일정함을 발견한 이래 1962년 Sunada가 치근침과 구강점막 사이에 6.5 kΩ의 직류저항을 나타낸다는 원리를 이용하여 최초의 전자 근관장 측정기를 개발하였다.^{3,4} 이러한 초창기 제품은 단순히 전기저항을 이용했기 때문에 근관 내에 습기나 혈액 등의 오염이 있을 때 저항이 급격하게 떨어져 많은 오차를 발생하였다. 이후 1991년 Kobayashi

※이 논문은 2007년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

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.

등이 두 개의 주파수를 사용했을 때 나타나는 두 개의 교류저항 (impedance)을 동시에 측정하여 얻어진 두 저항 값의 차이나 비율이 여러 전해질 용액에서 일정하다는 것을 실험적으로 증명하여 발표하였다.^{5,6} 파일이 근첨협착부에 가까워질수록 저항이 증가되다가 치주 인대와 같은 치주조직에 접촉 시 저항이 급격하게 감소되므로 이를 이용하여 근관 내 파일의 위치를 나타내도록 개발된 전자 근관장 측정기가 Root ZX이다. 기존에 전자 근관장 측정기의 정확성에 부정적 영향을 미치는 요인으로 지목되었던 근관 내 전해질, 수분 조건은 이러한 제3세대 전자 근관장 측정기의 개발로 해결되었다.⁵

치근단 형태에 대한 연구를 통해 방사선학적 근첨과 주근단공까지 평균거리가 0.5 mm, 주근단공에서 근첨협착부까지 평균거리가 0.5 mm이므로 방사선 사진상 근첨과 근첨협착부까지의 거리는 대략 1 mm로 간주할 수 있다.^{7,9} 그런데 주근단공이 치근 장축에서 편향되어 위치하는 측방 근단공을 갖는 치아에서 전자 근관장 측정기로 임의의 근관장을 설정하고 방사선 사진으로 확인하려고 하는 경우, 임상에서 흔히 근관장 방사선 사진이 '짧게' 보이는 경우가 있으며, 실제로 파일 끝과 근첨협착부간의 거리가 치근단에 위치한 주근단공과 어떠한 차이를 보이는지 의문을 갖게 된다.

또한 열린 근단공은 미성숙 치근단 뿐만 아니라 교정치료 또는 성숙 치근의 외흡수로 생길 수 있으며, 치근단공이 매우 크고 근첨협착부가 부족하여 근관치료 하기에 상당히 어렵다.¹⁰ 여러 문헌에서 치근단공의 크기가 클수록 전자 근관장 측정기의 정확성이 떨어진다고 보고되었으나, 열린 근단공에서의 전자 근관장 측정기의 정확성에 대한 연구는 많지 않다.¹¹⁻¹⁴

따라서 본 연구에서는 주근단공이 치근단 또는 측방에 위치할 경우와 열린 근단공을 갖는 경우에서 전자 근관장 측정기가 얼마나 정확한지를 평가해보고자 하였다.

연구 재료 및 방법

실험 재료

교정적 이유로 발치된 단관관의 하악 소구치 중에서 치근단공 형성이 완료되었고 치근단의 흡수나 치근 파절을 보이지 않는 총 81개를 실험대상으로 하였다. 발치된 치아는 방사선 사진 촬영을 통해 근관의 형태를 확인하였고 실험기간 동안 생리식염수에 보관하였다.

실험 방법

1) 실험 시편의 준비

실험치아는 원형의 다이아몬드 버(BR-41, Mani, Utsunomya Tochgi, Japan)를 이용하여 치수강을 개방하였으며, 교합면을 치아의 장축에 직각으로 삭제하고 근관의 입구로부터 치근단공으로의 개방성을 8번 크기의 K형 파일(Dentsply Maillefer, Balleigue, Switzerland)로 확인하였다. Gates-Glidden drill (Dentsply Maillefer)을 사용하여 치관부 근관형성을 시행하였으며 식염수로 근관을 세척하였다.

2) 실험군의 분류

54개의 치아를 16배의 수술용 현미경(OPMI Pico, Carl Zeiss Co., Oberkochen, Germany)하에서 주근단공의 위치에 따라 주근단공이 해

부학적 치근첨에 위치하는 치아를 그룹 I, 주근단공이 치근 장축에서 벗어나 위치하는 치아를 그룹 II로 하였으며, 27개의 치아는 열린 근단공을 재현하기 위해 인위적으로 열린 근단공의 형태를 만들어 그룹 III으로 분류하였다.

3) 열린 근단공 모델 제작

열린 근단공을 재현하기 위해 Hachmeister 등의 연구에서의 모델 제작 방법과 동일하게 치근단 2 mm를 평두열구상 버(FG 559, SSW, Lakewood, NJ, USA)로 절단한 뒤, 10번 크기의 K형 파일 끝이 절단된 치근면에 비치는 지점을 실제 길이로 설정하고, #2 Peeso Reamer (Dentsply Maillefer)로 실제길이까지 근관형성을 시행하였다.¹⁵ 그리고 치근단측으로 넓은 열린 근단공의 형태를 만들기 위해 .04 경사도의 50번 크기의 K3 파일(SybronEndo Inc., Orange, CA, USA)을 이용하여 cutting blade (D16)까지 역방향으로 형성한 뒤 방사선 사진을 촬영하고 식염수에 보관하였다(Figure 1).

4) 전자 근관장 측정

구강 밖에서 전자 근관장을 측정할 수 있는 실험모델을 고안하여 내부에는 전해질인 식염수를 채우고 치근을 볼 수 없도록 플라스틱 통의 외부를 겹겹 테이프로 감싼 후 구강 내와 유사한 조건으로 Root ZX를 사용하여 10번 크기의 K형 파일을 근관 내로 전진하여 계기판의 근첨에 도달한 후 근첨으로부터 제조사가 '근첨협착부'로 읽는 지점(0.5 Mark)에 위치시켜 러버스탑을 교합면에 고정하고, 파일을 광중합형 글래스 아이오노머 시멘트(GC Fuji II LC, GC Co, Tokyo, Japan)로 치아에 고정시키고, 광중합 되는 동안 동일한 지점을 가리키는 지 재확인하였다.¹⁶

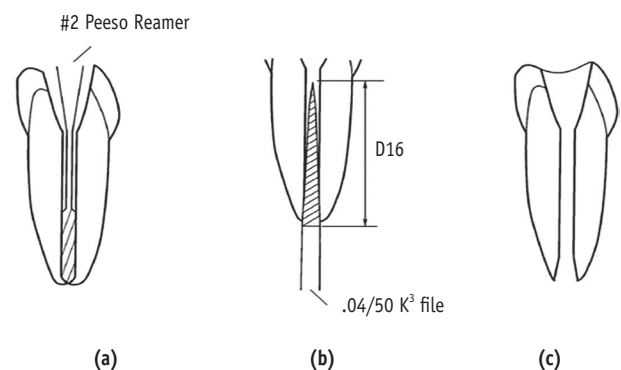


Figure 1. An open apex model. (a) The canals were instrumented with a #2 Peeso reamer to the actual length; (b) A divergent open apex was prepared by retrograde apical preparation with a .04/50 K3 file inserted to the length of the cutting blade; (c) Simulated open apex model.

5) 파일 고정 후 파일 끝에서 주근단공까지의 실제거리 측정

파일 끝에서 치근단공의 외연까지의 거리 측정을 위해 원형의 다이아몬드 버를 치근의 장축 방향으로 사용하여 25배의 수술용 현미경 하에서 치근단 4 mm의 치질을 파일 끝이 어느 정도 노출되도록 삭제하고 #15 blade로 잔존치질을 조심스럽게 삭제하여 파일 끝을 노출시켰다.¹⁶ 이 과정에서 파일의 위치 변화, 치근침의 손상으로 7개 시편이 제외되었다. Graph paper하에서 0.5 mm 간격의 metal ruler를 수평, 수직으로 고정한 뒤 치아를 위치시키고 25배의 수술용 현미경 하에서 사진을 촬영하고 거리를 측정하였다(Figures 2 - 4).

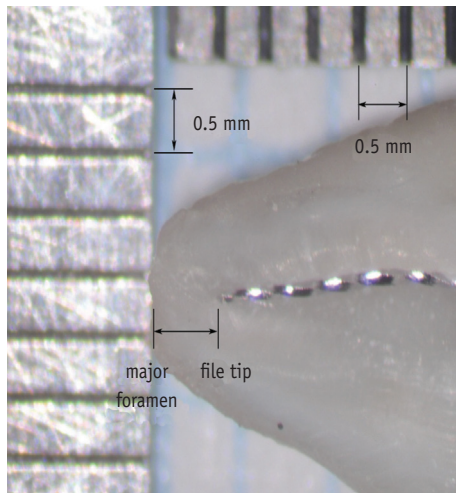


Figure 2. Tip foramen (group I), in which major foramen is located at the tip along the main axis of root. File was fixed in the position and the distance from file tip to major foramen was measured (x25).

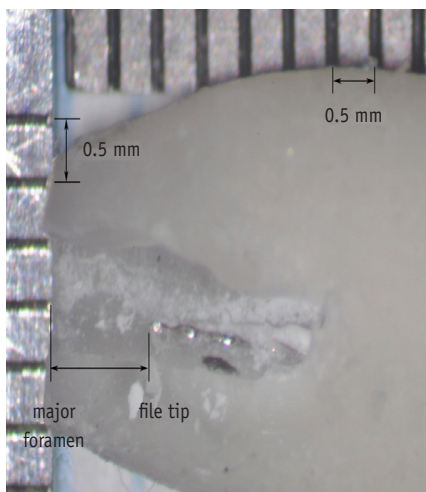


Figure 3. Lateral foramen (group II), in which major foramen deviates from the main axis of root. File was fixed in the position and the distance from file tip to major foramen was measured (x25).

통계분석

통계적 자료 분석은 그룹간의 평균 차이를 분석하기 위해 ANOVA test와 사후분석을 위해 Scheffe *post hoc* test를 이용하였다. 이상의 통계 분석은 통계 프로그램인 SPSS V14.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하였고 통계적 유의성 여부는 유의 수준 0.05를 기준으로 판단하였다.

결과

파일 끝에서 주근단공까지의 거리

총 81개의 표본 중 시편 제작 시 손상된 7개 표본은 통계 분석 시 제외하고, 그룹 I은 28개, 그룹 II는 22개, 그룹 III은 24개로 분류되었다. 파일 끝과 주근단공까지의 거리는 평균적으로 그룹 I은 0.308 mm, 그룹 II는 0.519 mm, 그룹 III은 0.932 mm를 보였다(Table 1).

통계 처리시 파일 첨과 주근단공간의 거리에 대해 그룹 간 비교를 하였을 때, 그룹 I과 그룹 III간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지만($p < 0.05$), 그룹 I과 그룹 II, 그룹 II와 그룹 III사이에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$).

주근단공으로부터 파일 끝의 위치 관계

± 0.5 mm 오차범위에서의 정확도는 그룹 I은 85.71%, 그룹 II는 59.09%, 그룹 III은 33.33%를 보였으며, ± 1.0 mm에서의 정확도는 그룹 I은 100%, 그룹 II는 86.36%, 그룹 III은 62.5%를 보였다(Table 2).

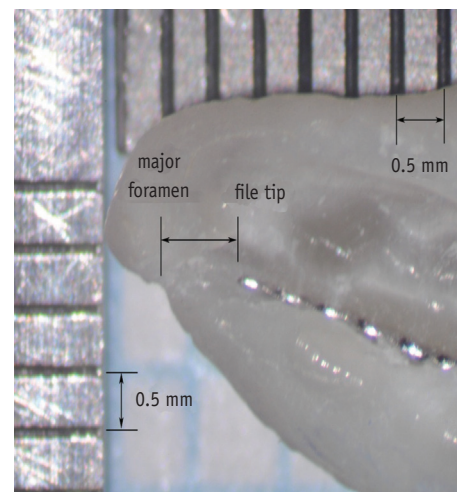


Figure 4. Simulated open apex (group III). File was fixed in the position and the distance from file tip to major foramen was measured (x25).

Table 1. Distance from file tip to major foramen (mm)

mm	No.	Minimum	Maximum	Mean	SD
Group I	28	0.05	0.71	0.308	0.192
* Group II	22	0.00	1.90	0.519	0.496
Group III	24	0.00	2.33	0.932	0.743

* A significant difference was found between group I and group III ($p < 0.05$).

SD, standard deviation.

Table 2. Position of file tip relative to major foramen

d (mm)	group I		group II		group III	
	n = 28	%	n = 22	%	n = 24	%
d < -0.5*	3	10.71	4	18.18	15	62.5
-0.5 ≤ d < 0*	19	67.86	7	31.81	7	29.17
0 ≤ d ≤ 0.5	5	17.86	6	27.27	1	4.17
d > 0.5	1	3.57	5	22.72	1	4.17

* Negative value indicates file tip short from major foramen.
d, distance from file tip to major foramen.

총괄 및 고안

치근단 부위의 근관 형태는 생리적이거나 병리적인 변화, 흡수 및 새로운 경조직 형성으로 인해 계속적으로 변형되므로 정확한 근관장을 설정하기는 임상적으로 어렵다.^{7,8,17} 부정확한 근관장으로 인해 과도한 기구조작을 하게 되는 경우, 기구나 충전 물질이 치근단을 벗어나 외부조직에 가해져 염증반응을 일으킬 수 있고, 불충분하게 기구조작되는 경우에는 잔존 치수로 인해 지연된 동통 반응을 일으킬 수 있어서 정확한 근관장을 설정하는 것이 근관치료의 성공 또는 실패를 좌우한다고 볼 수 있다.¹⁸

근관 치료 시 기구 조작과 충전의 한계점으로 제시되는 근첨협착부의 위치는 치근마다 다양하여 평균적으로 치근단공의 외측면으로부터 0.5 - 0.75 mm에 위치하는 것으로 알려져 있으며, Kuttler의 연구에 의하면 치근단 백악질의 침착으로 치근단공이 편향되어 위치하는 비율이 68 - 80%라고 하였고, 특히 구치부에서 치근단공이 편향되어 위치하는 비율이 전치부보다 높다고 하였다.^{8,9} 방사선 사진은 치근단공의 위치에 대한 정보를 제공하지 않으므로 임상가가 편향된 치근단공을 갖는 치아의 근관장을 결정하기 위해 방사선 사진을 촬영하는 경우, 실제보다 훨씬 짧게 기구가 위치하기 때문에 근관장 결정에 혼돈을 겪게 된다.¹⁹ 이에 치근단공의 위치가 전자근관장 측정 시 정확성에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 본 연구를 계획하였다.

또한 외상이나 우식, 그 외 다른 치수 병소에 의해 치근 성장이 불완전하게 되는 열린 근단공의 경우, 근관이 매우 크며, 얇고 취약한 치근 상아질 벽을 갖고, 발산형의 치근첨 구조를 가지므로 정확한 근관장을 설정하기 어렵다. 전자 근관장 측정기는 치근 흡수, 수평 치근 파절, 해부학적 구조물과의 중첩으로 방사선 사진상 관찰이 어려운 경우

와 같은 임상적 상황에서 근관치료를 유용한 도구로서 특히 치근이 미완성된 열린 근단공의 경우에서도 비교적 위치를 감지해 낸다고 하였다.²⁰⁻²² 이에 열린 근단공에서 전자 근관장 측정 시 정확성을 평가해 보는 것이 임상적으로 의의가 있으리라 생각되었다.

본 실험에서는 Kobayashi와 Suda가 제안한 생체 외 실험용 전자 근관장 측정기 실험 모델을 응용하여 전해액으로는 젤라틴 모델 대신 생리식염수를 이용하였다.^{23,24} 그 동안 전자 근관장 측정기의 정확도를 측정하는 방법으로는 방사선 사진 상의 길이와 측정값을 비교하거나, 발치 후 파일 끝과 근단공 사이의 거리를 실제로 계측하는 방법 등이 있으며, 대개 측정치의 평균과 표준편차를 구하고 측정치가 미리 정한 허용범위 내에 들어가는 백분율을 계산하여 정확도를 평가하게 되어, 본 실험에서도 이 방법을 이용하였다.²⁵ 여러 문헌에서 근첨협착부는 단지 조직학적인 지표이며 파일 끝은 근첨협착부의 유무와 관계없이 주근단공 주위에 위치하게 된다고 보고하였다.²⁶⁻²⁸ 본 실험에서도 치근단부를 삭제했을 때 근첨협착부를 정확하게 인지하거나 명확하게 찾아내기 힘들었다. 따라서 근관장 측정의 정확성을 평가하는 해부학적 기준점으로서 보다 관찰하기 용이한 주근단공을 선택하였고 주근단공에서 ± 0.5 mm를 임상적 오차범위로 간주하였다.¹⁴

열린 근단공의 형태를 재현하기 위해 본 실험에서는 2번 크기의 Peeso reamer로 얇은 치근 상아질 벽과 치근첨 근처에서 0.90 mm 직경의 근관을 만들었다. 또한 발산형의 근단공 형태를 재현하기 위해 .04 taper의 50번 크기의 K3 파일을 역방향으로 16 mm까지 기구조작하여 본 실험에서 열린 근단공의 형태인 발산형의 근첨을 재현하였다. 그룹 III의 평균적인 파일 침에서 주근단공까지의 거리는 평균 0.932 mm로 대략 1 mm로 측정되었다(Table 1). 열린 근단공의 경우 방사선학적 근첨 보다 2 mm 짧게 근관장을 설정하는 것이 추천되어지고 있어 본 실험 결과와 비교 시 대략 1 mm 차이가 난다. 근관의 직경을 의도적으로 1.02 mm까지 넓히고 10번 크기부터 100번 크기의 파일로 전자 근관장을 측정한 결과, 사용된 파일에 따라 대략 1 mm의 오차범위를 보였다는 연구를 참고할 때, 본 실험에서 10번 크기의 K형 파일을 사용하였기 때문에 1 mm의 차이를 보인 것으로 사료된다.²⁹

그 동안 Root ZX를 이용하여 여러 조건하에서의 정확성에 대한 연구가 많이 행해져 왔으며, 그 정확성은 75 - 97%로 연구방법에 따라 다소간의 차이를 보인다.^{10,30} 본 실험에서 주근단공의 위치에 따른 전자 근관장 측정값의 거리 차이는 있으나 통계학적으로 유의한 차이는 없었다. 또한 본 연구는 *in vitro*상의 연구인 반면, Pagavino 등은 주근단공이 측방에 위치한 그룹이 치근단에 위치한 그룹보다 전자 근관장 측정치의 오차가 컸다는 SEM 연구를 통해 전자 근관장 사용시 치근단공의 위치를 고려해야 한다고 하였고 Ding 등은 파일 끝과 치근단공간의 거리를 측정했을 때 주근단공이 측방에 위치한 그룹이 치근단에 위치한 그룹보다 유의하게 치근단공에 근접한다고 하였다.^{1,19} 그리고 이런 차이가 발생한 이유에 대해 근관의 교류저항이 저항, 전기 용량으로 구성된 복잡한 전기적 체계망이며, 근관의 저항이 근관 형태에 따라 다르다는 가능성을 제시하였다.^{31,32}

± 0.5 mm 임상적 오차범위에서 전자 근관장 측정기의 정확성은 치근단 근단공인 그룹 I은 85.71%, 측방 근단공인 그룹 II는 59.09%, 열린 근단공인 그룹 III은 33.33%로 평가되었고 특히 열린 근단공 그룹의 정확성이 매우 낮고 전자 근관장이 짧게 기록되었다. 이러한 이유로 나팔총 모양의 치근첨에서는 치수와 치주 조직간의 교류저항(impedance)이 명확하게 경계지어지지 않아서 전자 근관장의 정확성

이 떨어진다고 보고된 바 있다.³³ 여러 문헌에 의하면 치근단공의 크기가 전자 근관장 측정기의 정확도에 영향을 미치는 것으로 보고되는데, Saito 등은 0.62 mm, Huang 등은 0.40 mm 이상인 경우 정확성이 떨어진다고 하였고, 이번 연구에 사용된 열린 근단공의 경우에도 치근첨 부위 직경이 0.90 mm 이상이었기 때문에 정확성이 떨어진 것으로 사료되었다.^{34,35}

근관장의 측정 방법 중 방사선적 방법은 전통적으로 근관장 결정에 사용되어 왔다. 방사선 사진은 근관계의 해부학적 구조물과 질환의 존재 유무를 알려 주고, 근관장 결정의 초기 지침으로 사용될 수 있는 장점이 있다.³⁶ 그런데 편향된 치근단공을 갖거나 복잡한 근관 만곡을 갖는 경우에 3차원적 구조물을 2차원의 방사선 사진만으로 판단하기에는 한계가 있으며, 해부학적 구조물과 중첩될 수 있고, 치근단 부위의 정상적인 해부학적 변이 때문에 근관 길이를 과측정할 가능성이 있다. 특히 주근단공이 협측 또는 설측으로 위치하는 경우에는 다양한 각도에서 촬영할 지라도 방사선 사진만으로는 치근단공의 위치를 정확히 알아내기는 매우 어렵기 때문에 micro CT를 활용하는 등 추가적인 연구가 요구된다.

결론

본 연구 결과 주근단공의 위치가 전자 근관장 측정기의 정확도에 영향을 미치지 않았으나 전자 근관장 측정에는 물리적, 생물학적 측면이 전자근관장측정기의 능력에 영향을 미치므로, 앞으로 *in vivo*상의 연구가 필요할 것으로 생각되며, '근관장' 방사선 사진상 근관장이 짧게 보이는 경우, 전적으로 방사선 사진에만 의존하여 근관장을 조정한다면 과도한 기구조작이 될 가능성이 높으므로 방사선 사진을 참고하되 전자 근관장 측정기를 재측정하여 근관장을 결정하는 것이 방사선 노출량을 감소시키고 치료 시간을 단축시킬 수 있는 점에서 임상적으로 효과적이라 사료된다. 그리고 열린 근단공에서는 전자 근관장 측정기의 정확도가 낮으므로 임상가는 열린 근단공의 근관장을 결정할 때 전적으로 전자 근관장 측정기에 의존하기 보다는 방사선학적인 방법 등을 함께 사용하여 재확인하는 과정을 거쳐야 될 것으로 사료된다.

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

References

- Ding J, Gutmann JL, Fan B, Lu Y, Chen H. Investigation of apex locators and related morphological factors. *J Endod* 2010;36:1399-1403.
- Riccuci D, Langeland K. Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. a histological study. *Int Endod J* 1998;31: 394-409.
- Suzuki K. Experimental study on iontophoresis. *J Jpn Stomatol* 1942;16:411-417.
- Sunada I. New method for measuring the length of the root canal. *J Dent Res* 1962;41:375-387.
- Kobayashi C, Suda H. New electronic canal measuring device based on the ratio method. *J Endod* 1994;20: 111-114.
- Kobayashi C. Electronic canal length measurement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1995; 79:226-231.
- Green D. Stereomicroscopic study of 700 root apices of maxillary and mandibular posterior teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1960;13:728-733.
- Dummer PM, McGinn JH, Rees DG. The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *Int Endod J* 1984; 17:192-198.
- Kuttler Y. Microscopic investigation of root apices. *J Am Dent Assoc* 1955;50:544-552.
- Torabinejad M, Walton RE. Endodontics: principles and practice. 4th ed. Missouri: Saunders Elsevier; 2009. p29-34.
- Herrera M, Abalos C, Planas AJ, Llamas R. Influence of apical constriction diameter on Root ZX apex locator precision. *J Endod* 2007;33:995-998.
- Stein TJ, Corcoran JF, Zillich RM. Influence of the major and minor foramen diameters on apical electronic probe measurements. *J Endod* 1990;16:520-522.
- Fouad AF, Rivera EM, Krell KV. Accuracy of the Endex with variations in canal irrigants and foramen size. *J Endod* 1993;19:63-67.
- Huang L. An experimental study of the principle of electronic root canal measurement. *J Endod* 1987;13:60-64.
- Hachmeister DR, Schindler WG, Walker WA 3rd, Thomas DD. The sealing ability and retention characteristics of mineral trioxide aggregate in a model of apexification. *J Endod* 2002;28:386-390.
- Cho JH, Kum KY, Lee SJ. *In vitro* evaluation of accuracy and consistency of four different electronic apex locators. *J Korean Acad Cons Dent* 2006;31:390-397.
- Ponce EH, Vilar Fernández JA. The cemento-dentino-canal junction, the apical foramen, and the apical constriction: evaluation by optical microscopy. *J Endod* 2003;29:214-219.
- Sjögren U, Hägglund B, Sundqvist G, Wing K. Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *J Endod* 1990;16:498-504.
- Pagavino G, Pace R, Baccetti T. A SEM study of *in vivo* accuracy of the Root ZX electronic apex locator. *J Endod* 1998;24:438-441.
- Goldberg F, De Silvio AC, Manfré S, Nastri N. *In vitro* measurement accuracy of an electronic apex locator in teeth with simulated apical root resorption. *J Endod* 2002;28:461-463.
- Nguyen HQ, Kaufman AY, Komorowski RC, Friedman S. Electronic length measurement using small and large files in enlarged canals. *Int Endod J* 1996;29:359-364.
- Kim BH, Lee YK, Kim YS. A study on the accuracy of the ROOT-ZX in the canal with mechanically formed constriction. *J Korean Acad Cons Dent* 1999;24:628-632.
- Czerw RJ, Fulkerson MS, Donnelly JC. An *in vitro* test

- of a simplified model to demonstrate the operation of electronic root canal measuring devices. *J Endod* 1994;20:605-606.
24. Cho YL, Son WH, Hwang HK. An accuracy of the several electronic apex locators on the mesial root canal of the mandibular molar. *J Korean Acad Cons Dent* 2005;30:477-485.
25. Lee SJ, Nam KC, Kim YJ, Kim DW. Clinical accuracy of a new apex locator with an automatic compensation circuit. *J Endod* 2002;28:706-709.
26. Ounsi HF, Naaman A. *In vitro* evaluation of the reliability of the Root ZX electronic apex locator. *Int Endod J* 1999;32:120-123.
27. Mayeda DL, Simon JH, Aimar DF, Finley K. *In vivo* measurement accuracy in vital and necrotic canals with the Endex apex locator. *J Endod* 1993;19:545-548.
28. Herrera M, Abalos C, Planas AJ, Llamas R. Influence of apical constriction diameter on Root ZX apex locator precision. *J Endod* 2007;33:995-998.
29. Shabahang S, Goon WW, Gluskin AH. An *in vivo* evaluation of Root ZX electronic apex locator. *J Endod* 1996;22:616-618.
30. Tselnik M, Baumgartner JC, Marshall JG. An evaluation of root ZX and elements diagnostic apex locators. *J Endod* 2005;31:507-509.
31. Meredith N, Gulabivala K. Electrical impedance measurements of root canal length. *Endod Dent Traumatol* 1997;13:126-131.
32. Nekoofar MH, Ghandi MM, Hayes SJ, Dummer PM. The fundamental operating principles of electronic root canal length measurement devices. *Int Endod J* 2006;39:595-609.
33. Berman LH, Fleischman SB. Evaluation of the accuracy of the Neosono-D electronic apex locator. *J Endod* 1984;10:164-167.
34. Saito T, Yamashita Y. Electronic determination of root canal length by newly developed measuring device. Influences of the diameter of apical foramen, the size of K-file and the root canal irrigants. *Dent Jpn (Tokyo)* 1990;27:65-72.
35. Huang L. An experimental study of the principle of electronic root canal measurement. *J Endod* 1987;13:60-64.
36. ElAyouti A, Weiger R, Löst C. Frequency of overinstrumentation with an acceptable radiographic working length. *J Endod* 2001;27:49-52.