

근관확대 및 세척 주사바늘의 근관 내 위치가 치근단 3 mm 부위의 근관 세정에 미치는 영향

문호진^{1*}, 홍찬의²

¹단국대학교 조직재생공학 연구소

²플란트치과병원 치과보존과

Effects of canal enlargement and irrigation needle depth on the cleaning of the root canal system at 3 mm from the apex

Ho-Jin Moon^{1*}, Chan-Ui Hong²

¹Biomaterials & Tissue Engineering Lab., Dankook University, Cheonan, Korea

²Department of Conservative Dentistry, Plant Dental Hospital, Daejeon, Korea

Objectives: The aim of this study was to test the hypothesis, that the effectiveness of irrigation in removing smear layer in the apical third of root canal system is dependent on the depth of placement of the irrigation needle into the root canal and the enlargement size of the canal. **Materials and Methods:** Eighty sound human lower incisors were divided into eight groups according to the enlargement size (#25, #30, #35 and #40) and the needle penetration depth (3 mm from working length, WL-3 mm and 9 mm from working length, WL-9 mm). Each canal was enlarged to working length with Profile.06 Rotary Ni-Ti files and irrigated with 5.25% NaOCl. Then, each canal received a final irrigation with 3 mL of 3% EDTA for 4 min, followed by 5 mL of 5.25% NaOCl at different level (WL-3 mm and WL-9 mm) from working length. Each specimen was prepared for the scanning electron microscope (SEM). Photographs of the 3mm area from the apical constriction of each canal with a magnification of x250, x500, x1,000, x2,500 were taken for the final evaluation. **Results:** Removal of smear layer in WL-3 mm group showed a significantly different effect when the canal was enlarged to larger than #30. There was a significant difference in removing apical smear layer between the needle penetration depth of WL-3 mm and WL-9 mm. **Conclusions:** Removal of smear layer from the apical portion of root canals was effectively accomplished with apical instrumentation to #35/40 06 taper file and 3 mm needle penetration from the working length. (*Restor Dent Endod* 2012;37(1):24-28)

Key words: Apical instrumentation; Periapical periodontitis; Root canal therapy; Scanning electron microscopy; Smear layer

Received December 9, 2011;
Last Revision January 16, 2011;
Accepted January 19, 2011.

¹Moon HJ, DDS, MSD, Researcher,
Biomaterials & Tissue Engineering
Lab., Dankook University, Cheonan,
Korea

²Hong CU, DDS, MSD, PhD,
President, Department of
Conservative Dentistry, Plant Dental
Hospital, Daejeon, Korea

***Correspondence to**
Ho-Jin Moon, DDS, MSD.
Researcher, Biomaterials & Tissue
Engineering Lab., Dankook
University, Sinbu-dong, Dongnam-
gu, Cheonan, Korea 330-716
TEL, +82-10-2062-5288; FAX, +82-
41-553-5288; E-mail, alkydes@
dankook.ac.kr

서론

근관치료의 주된 목적은 근관계의 감염을 제거하고 재감염을 방지하는 것이다.¹ 이를 위하여 근관계는 잔존 유기물이 세정되어야 하며, 3차원적인 밀폐를 얻기 위해 성형되어야 한다.² 하지만 근관형태 및 크기에 있어 수많은 변이가 존재하여 세정과 성형의 과정을 어렵게 한다.³ 특히 근관계의 해부학적 구조로 인해 치료의 난관으로 작용하는 부위는 치근단 3 mm 부위인데, 이 위치에는 수많은 부근관, 흡수부위, 치수석, 불규칙한 2차 상아질, 적은 수의 상아세관, 미세한 세관의 가지 등이 집중적으로 존재한다. 이러한 근단부의 형태는 그 복잡한 구조로 인하여 접근이 어렵고 결과적으로 세척액의 효과를 감소시켜 성공적인 치료를 어렵게 한다.⁴

근관 내의 기구작업 시 근관 내에 유기조직과 무기질이 혼합된 도말층(smear layer)이 형성되어 세

균의 증식 장소가 되고 상아세관 내 소독제와 침약의 침투를 방해한다. 효과적인 근관치료를 위하여 도말층을 제거하는 화학적인 세척이 이루어지고 있다. 차아염소산 나트륨 용액은 현재 근관치료에서 가장 많이 사용되고 있으며 유기조직 및 세균을 제거하는데 효과가 있다.^{5,6} 또한 칼슘 치환제인 EDTA (Ethylene Diamine Tetra-acetic Acid)는 도말층의 제거에 유용하게 사용되는데, 차아염소산 나트륨 용액과의 복합적인 사용으로 잔존 치수조직, 도말층, 전상아질(Predentin)을 제거한다.⁷ 또한 도말층은 미생물의 부착을 증가시키므로 EDTA를 활용한 근관세척은 근관치료 후 재감염의 기회를 감소시켜 줄 수 있다.⁸

치근단부까지 세척제가 침투하는 데에는 근관의 크기, 세척바늘의 굵기, 또한 세척바늘의 깊이 등 많은 요소들이 영향을 미친다. Chow는 과량의 불용성입자를 채운 모의근관세척 실험에서 세척효과는 바늘 끝에서 멀어질수록 그 효과가 떨어짐을 보고하였다.⁹ Abou-Rass는 근관 내에 적용된 방사선 불투과성 조영제를 여러 가지 방법으로 세척하는 실험을 통해 세척효과는 근단부로 세척액을 전달하는 바늘의 위치가 중요한 역할을 하며 작은 직경의 바늘이 세척 효과가 뛰어남을 밝혀내었다.¹⁰ Kahn은 다양하게 성형한 레진 블록 상의 식염료를 다양한 직경의 바늘로 세척하는 실험을 통하여 근관 확대와 세척바늘의 직경이 세척효과에 영향을 미침을 확인하였다.¹¹ 이런 연구들은 세척바늘의 위치가 근관내부의 물리적인 세척에 영향을 미친다는 결과를 보여주고 있다. 이 연구들은 세척액으로 콜로이드액이나 조영제, 식염료 등을 사용한 모의실험으로 실제의 근관치료에서 감염을 제거하기 위한 세척결과를 정확히 반영하지 못한다는 한계를 안고 있다. Sedgley는 세척바늘의 침투 깊이를 달리하여 실제 세균의 감소를 확인하였으며 깊은 위치에 바늘이 위치할 경우 세균을 제거하는 능력이 뛰어남을 보고한 바 있다.¹² 몇몇 연구들은 깊은 바늘 깊이를 갖는 실험 모델을 확립하기 위해 #60에 이르는 치근단 확대를 시행하여 실제 빈번하게 시행되는 근관치료를 대표하기 어려울 때가 있다.^{9,12} Boutsioukis 등이 Computational fluid dynamic model을 이용한 작은 근단부 확대, 주사바늘의 깊이 및 주사바늘의 형태에 따른 연구를 통해 치근단 확대가 세척의 효율을 높이며 주사바늘의 깊이 보다는 치근단에서 적절한 유체의 와류가 더 중요함을 결론지었다.¹³⁻¹⁶

본 연구는 주사전자 현미경(SEM, Scanning electron microscope)을 이용하여 치근단 근관의 도말층을 제거하는데 있어 세척액의 침투 깊이와 각기 다른 근관형성 정도가 서로 어떤 영향을 미치는가에 대해서 알아보고자 하였다.

연구 재료 및 방법

실험재료

최근 발거된 하악 절치 중 치근단이 완성되어 있는 건전한 치아 80개를 실험치아로 선택하였다. 근관 세척제로 5.25% NaOCl 용액(Duksan pure chemical Co., Ansan, Korea)과 3% EDTA 용액(pH 9, Smear Clean, Nippon Shika Yakuhin Co., Yamanashi, Japan) 그리고 생리식염수(Daihan Co., Ansan, Korea)를 사용하였다. 세척 바늘로는 30 gauge needle (Max-I-Probe, Dentsply International, York, PA, USA)를 이용하였다.

시편준비

#10 K-file을 이용하여 작업장을 측정하고 #10 K-file, #15 K-file, #20 ProFile (Dentsply International) 파일로 초기 근관형성을 하였다. 그 후 80개 실험치아의 근관와동을 개방한 다음 무작위로 20개 치아씩 4개 군으로 나눈 다음 각각 #25, #30, #35, #40 ProFile로 작업장까지 근관을 확대하였다. 매 기구 작업마다 5.25% NaOCl로 근관을 세척하였다. 각 군은 다시 10개 치아씩 나뉘어 치근단 작업장으로부터 3 mm, 9 mm 두 위치에서 최종세척을 시행하는 군으로 분류하였다.

최종 근관세척 시 근단공 밖으로 세척액의 누출을 막기 위해 각 시편의 근첨부를 green compound (Kerr, Orange, CA, USA)로 폐쇄하였다. 모든 세척에는 30 gauge needle에 rubber stop을 장착하여 정확한 위치에서 다음과 같은 순서로 적용하였다. 우선 5.25% NaOCl 용액을 5 mL 용량으로 20분간 적용하였다. 3% EDTA 용액을 4분간 적용하였으며, 첫 1분간은 1 mL의 EDTA를 적용 후 근관 내의 세척액을 주사기로 제거한 다음, 다시 2 mL의 EDTA를 적용하고 #20 file로 근관벽을 향한 교반을 시행한 다음 3분간 기다렸다가 다시 5 mL의 5.25% NaOCl을 5분간 적용하였다. 최종적으로 5 mL의 증류수로 근관을 세정하고 paper point로 근관을 건조하였으며 green compound를 제거한 다음 주사전자현미경 관찰 시까지 생리식염수에 보관하였다.

SEM 관찰

실험치아의 근원심부 치근에 disk를 이용하여 홈을 형성한 다음, 각 치근은 chisel을 통해 근원심 방향으로 횡절단하였다. 절단된 각 시편을 2% glutaraldehyde (PBS buffer, 0.1M, pH 7.2, SIGMA Co., St. Louis, MO, USA)로 4℃에서 최소한 24시간 고정 후, Na cacodylate 완충액(0.1M, pH 7.2, SIGMA Co)으로 3회 세척하였다. 그 후 증가되는 농도(30%, 50%, 70%, 90%, 95%, 100%)의 에틸 알콜(Ethyl Alcohol Anhydrous, Carlo Erba, Italy)에 10분씩 처리하였고 건조기에서 최소 1일 건조한 다음, aluminium stub에 carbon tape으로 시편을 고정하였다. 전도성을 위해 aqueous conductive silver liquid (ProSciTech Co., Kirwan, Australia)로 시편과 stub 사이를 칠해주었으며 ion sputter (E-1010, Hitachi Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 10 mA에서 120초 씩 3회 gold-palladium으로 코팅하였다.

모든 시편은 SEM (S-3000H, Hitachi Co., Tokyo, Japan)을 이용하여 치근단 협착부(apical constriction)로부터 3 mm의 위치를 확인하고 그 부위의 x250, x500, x1,000, x2,500 사진을 촬영하였다. Lendini의 smear layer score (Table 1)를 이용하여 본 실험과 무관한 3명의 보존과 전공의가 각 시편 사진에 대한 도말층 지수를 각각 맹검법으로 채점하였다.¹⁷

통계분석

근관확대 간의 유의성을 검증하기 위해 Kruskal-Wallis test를 시행하고, 세척 깊이 간의 유의성을 검증하기 위해 Mann-Whitney U test를 시행하였다. 각 통계방법은 95%의 유의 수준을 사용하였다.

Table 1. Smear layer score

Score	Condition of smear layer
0	no smear layer, dentinal tubuli open
1	small amount of smear layer. some dentinal tubuli open
2	homegenous smear layer covering the root canal wall, only few dentinal tubuli open
3	complete root canal wall covered by a homogenous smear layer, no dentinal tubuli open
4	heavy, nonhomogenous smear layer covering the complete root canal wall

This table was adopted from Lendini, M. (2005) The effect of high-frequency electrical pulses on organic tissue in root canals. *Int Endod J*, 38, 534.

결과

근단부 근관확대 정도 및 세척깊이에 따른 도말층 제거 정도는 Table 2와 같다.

세척바늘이 작업장으로부터 3 mm 짧은 부위까지 위치된 경우에는 근단부 근관확대가 증가할수록 도말층 제거효과가 증가되는 양상을 보이고 있으나, 세척바늘이 작업장으로부터 9 mm 짧게 삽입된 경우에

는 별다른 효과차이를 보이고 있지 않다. 또한 세척바늘이 작업장에서 3 mm 짧은 부위까지 삽입된 경우가 작업장으로부터 9 mm 짧게 삽입된 경우보다 도말층 제거효과가 높게 나타났다(Figures 1 and 2).

Table 3은 근단부 근관확대 차이에 따른 도말층 제거효과를 분석한 결과로, #25까지 확대한 군은 #35 군부터, 또한 #30 군은 #35 군부터 유의한 차이가 있었으며($p < 0.05$), #25 군과 #30 군, #35 군과 #40 군 간에는 유의한 차이를 발견할 수 없었다.

Table 2. Score of remaining smear layer according to instrumentation size and needle position from the apex in mm scale (mean \pm SD, $n = 10$)

	Size of instrumentation			
	#25	#30	#35	#40
Depth of needle tip				
WL-3 mm	3.3 \pm 0.6	3.3 \pm 0.6	2.5 \pm 0.4	1.9 \pm 0.6
WL-9 mm	3.5 \pm 0.6	3.6 \pm 0.4	3 \pm 0.6	2.8 \pm 0.5

WL-3 mm, Needle position is 3 mm from the apex; WL-9 mm, Needle position is 9 mm from the apex.

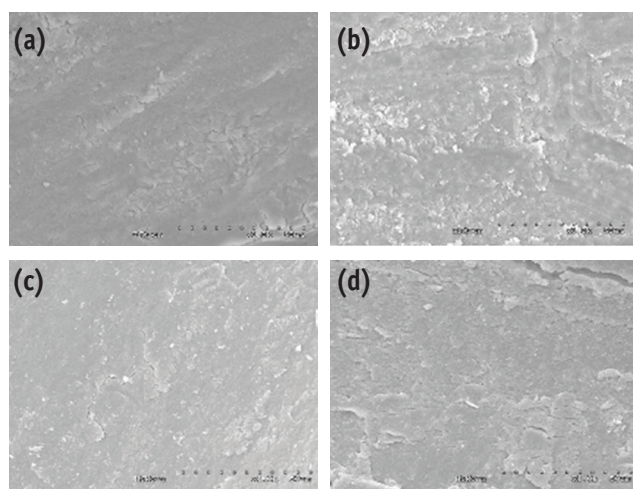


Figure 1. Representative photograph in the WL-3 mm groups. (a) #25, WL-3 mm; (b) #30, WL-3 mm; (c) #35, WL-3 mm; (d) #40, WL-3 mm. (a) and (b) presence of the smear layer on the surface, x1,000; (c) presence of debris in the dentinal tubules, x1,000; (d) removal of the smear layer from the surface, x1,000.

Table 3. The statistic analysis among instrument size

	#25	#30	#35	#40
#25				
#30	$p = 0.445$			
#35	$p = 0.009$	$p = 0.009$		
#40	$p = 0.015$	$p = 0.006$	$p = 0.383$	

WL-3 mm, Needle position is 3 mm from the apex; WL-9 mm, Needle position is 9 mm from the apex.

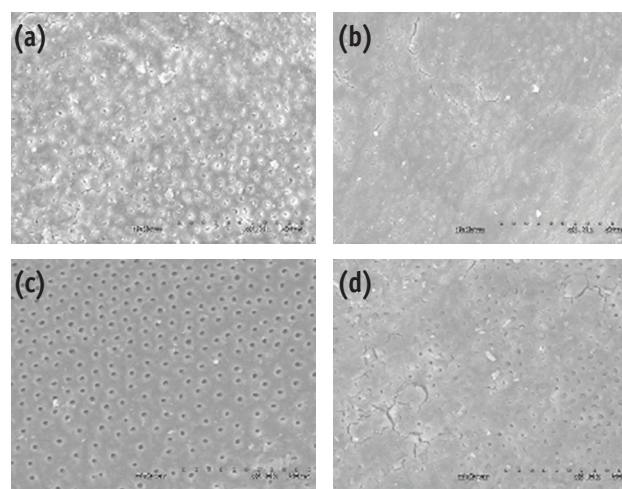


Figure 2. Representative photograph in the WL-9 mm groups. (a) #25, WL-9 mm; (b) #30, WL-9 mm; (c) #35, WL-9 mm; (d) #40, WL-9 mm. (a) and (b) smear layer is not removed, and tubule apertures are totally obliterated, x1,000; (c) smear layer is thin as evidenced by crack over tubule aperture, x1,000; (d) dentinal tubules are exposed, but some are blocked by smear layer, x1,000.

총괄 및 고안

근관 세척액은 근관 내에 적용된 이후 시간이 지남에 따라 그 효과가 떨어진다. 차아염소산 나트륨 용액은 근관 내에서 시간에 따라 유효 염소농도가 감소되어 항세균 효과의 감소를 보이며 산화, 환원능력의 감소로 유기물질 분해 능력이 떨어지게 된다.^{5,6} EDTA 또한 근관 내에서 탈회기 진행됨에 따라 세척액 내에 수소이온이 증가하게 되고 이로 인해 낮아진 pH는 탈회능력을 감소시키는 자가정체효과(self-limiting effect)를 갖고 있다.¹⁸ 따라서 충분한 양의 세척액이 적용되기 용이하도록 근관이 성형되며 주기적인 세척액의 교환이 이루어진다. 하지만 치근침에서 근관입구에 이르는 근관성형의 형태는 근단부를 향할수록 그 내부의 용적이 감소한다. 따라서 근관 내부에 적용된 세척액의 양은 치근단부로 향할수록 그 양이 적어지게 되고 이에 따라 세척액의 효과가 떨어지게 된다. 본 실험 결과, 치근단 확대가 증가할수록 대부분의 군은 도말층이 많이 제거된 것을 확인할 수 있었다. 이는 증가된 근단부의 용적이 더 많은 세척액을 받아들일 수 있었기 때문으로 생각된다. 하지만 #25군과 #30군은 유의성 있는 차이가 존재하지 않았는데, 이는 치근단 1/3 근관의 체적이 작았고 따라서 유효한 세척액이 더 이상의 도말층을 제거할 수 없었던 것으로 생각된다.

근관으로 세척액을 전달하기 위해 바늘을 갖는 시린지가 전통적으로 사용되었다. 임상에서 흔히 사용되는 다섯 가지 세척바늘은 21G, 23G, 25G, 27G, 30G 로 각각의 외경은 0.8 mm, 0.6 mm, 0.5 mm, 0.4 mm, 0.3 mm이며 내경은 0.490 mm, 0.317 mm, 0.232 mm, 0.184 mm, 0.133 mm이다.¹³ 본 연구의 예비 실험에서는 네 가지 세척바늘(30G, 27G, 25G, 23G)을 선택하여 실험치아 성형 후 각 치아의 근관에 최대한 적용되는 needle tip의 위치를 기록하고 최대 침투깊이와 평균 침투깊이를 얻었다. #25 집단에서, 30 gauge 세척바늘의 최대 적합부(근관장으로부터 평균 1.5 mm, 최대 2 mm)와 23 gauge 세척바늘의 최대 적합부(근관장으로부터 평균 6.5 mm, 최대 7.6 mm)에 관한 결과를 확인하였다. 이를 토대로 본 실험에서는 세척바늘이 침투될 위치를 3 mm, 9 mm로 설정하였고 일관된 세척액의 적용을 위해 모든 세척액은 침단이 측방개구형태 (closed-end and single side-openings)인 30G 주사바늘을 사용하였다.

한편, Boutsoukis 등은 Computational Fluid Dynamics Model을 이용한 모의실험 결과 측방개구형태를 갖는 30G 세척바늘의 세척액 교환효과가 바늘 끝으로부터 1 - 1.5 mm 위치에 한정되어 있다고 보고하였다.¹⁴ Gulabivala 등은 이처럼 바늘 끝에서 제한된 거리만큼은 와류가 형성되어 새로운 세척액이 교환되지만 그 이상의 위치에서 세척액의 교환은 주로 확산에 의존하기 때문에 상대적으로 오랜 시간이 소모된다고 하였다.¹⁹ 실험결과를 살펴보면 세척 바늘이 작업장에서 WL-3 mm 군의 경우 WL-9 mm 군보다 통계적으로 우수한 효과를 보였는데, 이는 유효한 능력을 갖는 새로운 세척제의 교환이 WL-3 mm 군에서 더욱 활발히 이루어져 근단부의 도말층을 제거할 수 있는 더 많은 기회가 주어졌기 때문으로 생각된다.

또한 치근단 확대가 서로 다른 WL-3 mm 군 간에서는 도말층 제거 능력이 서로 유의성 있는 차이를 보였지만 WL-9 mm 군 간의 차이가 없었다는 것은 주목할 만한 사실이다. WL-3 mm와 WL-9 mm 세척군의 의미가 각각 30G, 23G 세척바늘의 평균 및 최대 침투 깊이를 반영한 결과라는 점을 다시 한번 상기해 볼 때, 임상에서 23G 정도의 굵은 세척바늘을 사용한 근관세척은 치근단 1/3 근관 부위에 불량한 세척효

과를 보임을 유추할 수 있다. 본 실험에서 근관확대의 정도와 세척바늘의 침투 깊이의 두 변수는 Kahn의 연구와는 달리 서로 상호관계가 존재하지 않았는데, Kahn의 연구에서는 세척바늘이 가능한 깊이 위치되었으나 본 실험에서는 작업장으로부터 특정한 위치, 즉 WL-3 mm 및 WL-9 mm 군으로 나누어 설정한 것이 그 원인이 아닌 사료된다.¹¹

현재 근관 내의 도말층을 제거하는 데에는 근관을 10 mL의 17% EDTA 처리 후 10 mL의 2.5 - 5.25% 차아염소산 나트륨 용액으로 처리하는 것이 가장 효과적인 방법으로 받아들여지고 있다.²⁰ 17% EDTA가 도말층의 제거에 효과적이기는 하지만, 칼슘치환의 효과는 근관벽의 세관을 과하게 개방시켜 관상상아질을 완전히 파괴시키는 경우도 있다.²¹ 또한 Torabinejad 등은 17% EDTA의 사용이 근관의 치관부 1/3, 중간 1/3에서 과다한 부식을 야기함을 보고한 바 있다.²² 이러한 EDTA의 과다한 상아질 침식은 EDTA의 농도를 낮춤으로서 해결될 수 있다.²¹ 하지만 낮은 농도에서는 치환반응이 진행될수록 누적되는 수소이온으로 인하여 산성환경이 조성되고 이로 인해 치환반응이 정체된다.¹⁸ 이런 자가정체반응을 막기 위해 알칼리성 pH 9로 적정된 EDTA는 과도한 탈회없이 도말층을 제거할 수 있으며, sealer와 근관벽간의 접촉각을 보다 줄이고 15% EDTA 만큼이나 근관약제의 세관 내 침투가 가능하다.²³ 본 실험에서는 우치를 사용한 Nakashima의 연구 모델에 의해 pH 9로 적정된 3%의 EDTA를 선택하였으며 치근부 3 mm에 바늘이 적용되고 #40으로 확대된 인간 치아를 통한 예비 실험을 통해 변형된 EDTA 세척의 조건을 잡고자 하였다.²³ 예비실험의 결과로 통상적으로 사용되는 적용시간보다 긴 4분이 설정되었으며 첫 1분 적용 뒤 잔류된 차아염소산 나트륨 용액과 EDTA의 반응을 중단시키기 위한 시도로써 세척액이 제거되고 이후 3분의 EDTA 수용액을 다시 적용하였다. 또한 EDTA가 잔류되어 상아세관을 더욱 확장시킬 가능성을 줄이기 위해 최종적으로 차아염소산 나트륨 수용액으로 다시 한번 세척하였다. 하지만 예비실험에서 확인된 세척 모델은 보다 작은 치근단 확대가 이루어진 본 실험에서 근단부의 도말층을 충분하게 제거하지 못했으며 이것이 농도에 의한 결과인지는 각 농도 간의 추가적인 비교 연구로 확인이 필요할 것으로 판단된다.

치근단 1/3 근관에 대한 기구작업에 대해 다양한 견해가 존재한다. Schilder는 근관의 형태가 근관입구에서 큰 직경을 갖고 근단 협착부에서 가장 작은 직경을 갖도록 점진적으로 taper가 줄어들어야 한다고 하였다.² 하지만 이 작업법은 열연화충전법을 위해 고안되었고 근관계의 이상적인 감염제거를 위해 개발되지는 않았다.¹ Ram은 방사선 조영제 세척실험을 통하여 최대한의 세척을 이루기 위해서는 #40 까지 확대되어야 한다고 결론지었다.²⁴ Orstavik 등은 치근단 치주염이 있는 치아에서 #45 크기로 작업하였을 경우 치료 전에 비해 세균의 증식이 10배나 감소되었다고 주장하였다.²⁵ 하지만 근관치료의 성공에 대한 장기적인 연구들로부터 근단부의 확대 정도와 성공률이 비례하지 않음을 확인할 수 있다.^{26,27} 본 연구에서 치근단 확대의 크기가 증가하면서 더 많은 도말층이 제거되는 결과를 확인하였으나 오직 #30 군에서 #35 군으로 확대하는 과정만이 유의성 있는 차이를 보였다.

결론

본 연구의 결과를 통해 근단부의 확대 정도가 크거나 주사바늘의 위치가 깊게 삽입될수록 치근단 3 mm의 세척 효과가 우수하였음을 확인하였다. 향후 효과적인 근관세척에 영향을 미치는 다른 인자에 대한

더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

1. Baugh D, Wallace J. The role of apical instrumentation in root canal treatment: a review of the literature. *J Endod* 2005;31:333-340.
2. Schilder H. Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 1974;18:269-296.
3. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1984;58:589-599.
4. Verma P, Love RM. A Micro CT study of the mesiobuccal root canal morphology of the maxillary first molar tooth. *Int Endod J* 2011;44:210-217.
5. Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod* 2006;32:389-398.
6. Rutala WA, Weber DJ. Uses of inorganic hypochlorite (bleach) in health-care facilities. *Clin Microbiol Rev* 1997;10:597-610.
7. Bystrom A, Sundqvist G. The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J* 1985;18:35-40.
8. Yang SE, Bae KS. SEM study on the anaerobic bacterial adhesion to the dentin of root canal. *J Korean Acad Cons Dent* 2001;26:350-359.
9. Chow TW. Mechanical effectiveness of root canal irrigation. *J Endod* 1983;9:475-479.
10. Abou-Rass M, Piccinino MV. The effectiveness of four clinical irrigation methods on the removal of root canal debris. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982;54:323-328.
11. Kahn FH, Rosenberg PA, Gliksberg J. An *in vitro* evaluation of the irrigating characteristics of ultrasonic and subsonic handpieces and irrigating needles and probes. *J Endod* 1995;21:277-280.
12. Sedgley CM, Nagel AC, Hall D, Applegate B. Influence of irrigant needle depth in removing bioluminescent bacteria inoculated into instrumented root canals using real-time imaging *in vitro*. *Int Endod J* 2005;38:97-104.
13. Boutsoukakis C, Lambrianidis T, Vasiliadis L. Clinical relevance of standardization of endodontic irrigation needle dimensions according to the ISO 9,626:1991 and 9,626:1991/Amd 1:2001 specification. *Int Endod J* 2007;40:700-706.
14. Boutsoukakis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E. Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a computational fluid dynamics study. *Int Endod J* 2009;42:144-155.
15. Boutsoukakis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E, Bekiaroglou P. Measurement of pressure and flow rates during irrigation of a root canal *ex vivo* with three endodontic needles. *Int Endod J* 2007;40:504-513.
16. Boutsoukakis C, Gogos C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Van der Sluis LW. The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady computational fluid dynamics model. *Int Endod J* 2010;43:874-881.
17. Lendini M, Alemanno E, Migliaretti G, Berutti E. The effect of high-frequency electrical pulses on organic tissue in root canals. *Int Endod J* 2005;38:531-538.
18. Calvo Pérez V, Medina Cárdenas ME, Sánchez Planells U. The possible role of pH changes during EDTA demineralization of teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1989;68:220-222.
19. Gulabivala K, Ng YL, Gilbertson M, Eames I. The fluid mechanics of root canal irrigation. *Physiol Meas* 2010;31:R49-84.
20. Aktener BO, Bilkay U. Smear layer removal with different concentrations of EDTA-ethylenediamine mixtures. *J Endod* 1993;19:228-231.
21. Perez F, Rouqueyrol-Pourcel N. Effect of a low-concentration EDTA solution on root canal walls: a scanning electron microscopic study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005;99:383-387.
22. Torabinejad M, Khademi AA, Babagoli J, Cho Y, Johnson WB, Bozhilov K, Kim J, Shabahang S. A new solution for the removal of the smear layer. *J Endod* 2003;29:170-175.
23. Nakashima K, Terata R. Effect of pH modified EDTA solution to the properties of dentin. *J Endod* 2005;31:47-49.
24. Ram Z. Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1977;44:306-312.
25. Orstavik D, Kerekes K, Molven O. Effects of extensive apical reaming and calcium hydroxide dressing on bacterial infection during treatment of apical periodontitis: a pilot study. *Int Endod J* 1991;24:1-7.
26. Hoskinson SE, Ng YL, Hoskinson AE, Moles DR, Gulabivala K. A retrospective comparison of outcome of root canal treatment using two different protocols. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002;93:705-715.
27. Kerekes K, Tronstad L. Long-term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. *J Endod* 1979;5:83-90.