https://doi.org/10.14368/jdras.2026.42.1.1
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Review Article

Comparative evaluation of passive ultrasonic irrigation, sonic irrigation, and manual dynamic agitation in endodontic treatment – systematic review

Minjung Kim*
Department of Conservative Dentistry, Dankook University College of Dentistry, Cheonan, Republic of Korea

The complexity of root canal anatomy necessitates effective root canal irrigation techniques to ensure thorough cleaning and disinfection. Dynamic irrigation methods, including manual agitation, sonic irrigation and passive ultrasonic irrigation, are easily implementable in everyday dental practice. However, their relative effectiveness remains controversial across studies. Therefore, this paper reviews recent relevant literature on the effectiveness of these irrigation methods with regards to bacterial reduction, pulpal tissue removal and smear layer elimination. The literature review encompasses studies from 2010 to June 2025, sourced from the PubMed database. Findings indicate that passive ultrasonic irrigation (PUI) and sonic irrigation (SI) show comparable effectiveness in microbial reduction and are superior to manual dynamic agitation (MA). While, low-frequency SI and MA showed comparable or superior performance to PUI in pulp tissue removal, the evidence for smear layer removal was inconsistent across studies. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2026;42(1):1-27)**

Key words: passive ultrasonic irrigation; sonic irrigation; manual dynamic agitation; root canal irrigation

서론

성공적인 근관치료의 핵심 요소 중 하나는 근관 성형과 세정을 통해 근관 내 오염원을 효과적으로 감소시키는 것이다.[1] 근관 성형과 세정은 근관 내 존재하는 오염된 연조직 및 경조직을 제거하고, 세척액과 근관 첩약제가 근단부까지 도달될 수 있도록 하며, 근관 충전을 용이하게 하는 형태를 만드는 과정이다. 그러나 근관 구조는 매우 복잡하여 근관 성형만으로는 근관 내 오염원을 충분히 제거하기 어렵다.[2] 특히 fin, isthmus, apical delta, dentin tubuli, 타원형 근관 및 불규칙한 근관 벽은 오염 제거를 더욱 어렵게 한다. 따라서 근관 세척, 즉 화학적 세척을 병행하여 잔존 오염원을 제거하는 추가적인 노력이 필요하다. 이를 위해 다양한 세척제 및 세척 기구들이 사용된다. 전통적인 세척 방법은 주사기를 이용해 세척액을 근관 내 주입하는 'conventional syringe irrigation' 방법이다. 그러나 해당 방법은 세척액의 흐름이 주로 laminar flow 형태로 형성되어 근관 내 정체 영역이 발생하고, vapor lock을 발생시켜 isthmus, lateral canal과 같은 복잡한 해부학적 구조까지 세척액이 효과적으로 작용하는데 한계가 있다.[3,4] 세척 효과는 세척액이 오염물과 직접 접촉, 세척액의 지속적인 교환 그리고 충분한 유체 전단력이 동반될 때 극대화된다.[5] 이러한 한계를 극복하기 위해 세척액의 물리적 움직임을 증가시키는 동적

*Correspondence to: Minjung Kim
Clinical Lecturer, Department of Conservative Dentistry, Dankook University College of Dentistry, Cheonan, 31116, Republic of Korea
Tel: +82-41-550-0241, Fax: +82-41-550-0117, E-mail: 12180285@dankook.ac.kr
Received: December 11, 2025/Last Revision: January 12, 2026/Accepted: January 23, 2026

Copyright© 2026 The Korean Academy of Stomatognathic Function and Occlusion.
©It is identical to Creative Commons Non-Commercial License.

세척(dynamic irrigation) 방법이 도입되었으며, 임상에서 간단히 적용할 수 있는 대표적인 방법으로는 manual dynamic agitation (MA), sonic irrigation (SI) 및 passive ultrasonic irrigation (PUI)이 있다.

MA는 근관내에 세척액을 주입한 후 적절한 크기의 거타퍼챠콘을 이용하여 약 1분간 100회 상하로 움직이는 방법이다. 이는 근관 내 유체역학적 효과를 유발하여 세척액의 교환을 촉진하고, conventional syringe irrigation 기법으로 도달하기 어려운 부위까지 세척액을 유입 시킬 수 있다. 해당 방법은 경제적이며, 특수한 장비가 필요 없다는 점에서 누구든 임상에서 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 술자가 직접 반복적인 기계적 움직임을 가해야 한다는 점에서 술식의 피로도가 높으며, 이러한 단점을 보완하기 위해 SI와 PUI와 같은 machine-assisted agitation device가 개발되었다.[6]

SI는 Tronstad 등에 의해 1985년 처음 소개되었으며, 1 - 6 kHz범위의 주파수로 진동한다.[7] 대표적인 기구로는 EndoActivator system (Dentsply Sirona, Charlotte, USA), Vibringe® (Vibringe B. V., Amsterdam, Netherlands) 및 EDDY® (VDW, Munich, Germany)가 있다. EndoActivator system는 0.16 - 0.19 kHz의 주파수 범위에서 작동하며, 최소 2,000 cpm에서 최대 10,000 cpm까지의 속도로 사용될 수 있다. 해당 기구는 유연하면서도 강도가 높은 폴리머 재질의 팁을 사용하여 근관 벽을 절삭하지 않는 것으로 알려져 있다.[6,8] Vibringe®는 conventional syringe irrigation과 SI가 결합된 기구로, 내부에 모터가 탑재되어 있다. Vibringe 주사기에 결착된 세척 바늘을 근관 내에 삽입한 후 손잡이의 버튼을 누르면, 0.15 kHz의 주파수로 진동하며 작동한다.[9] EDDY®는 air scaler에 결합하여 사용하는 팁으로 Endoactivator system과 유사한 폴리머 재질로 제작되었으며, 5 - 6 kHz의 고주파로 진동한다[10].

Ultrasonic irrigation (UI)은 Richman에 의해 처음 근관세척을 위한 도구로 소개되었으며, 25 - 30 kHz의 주파수로 진동한다.[11] 처음 소개된 UI 기구는 근관벽과 직접 접촉하며 사용되는 개념으로 제시되었다.[12] 그러나 UI 기구는 기구와 근관벽의 직접 접촉으로 인해 원치 않는 근관 상아질 삭제와 세척 효과 저하를 유발할 수 있어, Weller 등에 의해 비절삭형의 PUI 개념이 제시되었다.[13,14] PUI는 근관 벽과의 접촉을 최소화하도록 설계되며, 일반적으로 #10 - 20 크기의 파일이나 비절삭형 팁이 사용된다.[14] 대표적인 UI 기구로는 ProUltra PiezoFlow® (Dentsply Tulsa Dental Specialities, Oklahoma, USA)가 있으며, PUI 기구로는 UC-ONE® (Epdent, Gimpo, South Korea), Endoultra® (Vista Apex, Wisconsin, USA), Acteon® Irri-Safe™ (Acteon Groups, Mérignac, France) 가 있다. 최근에는 UI보다 PUI 제품들이 더 흔하게 출시되고 있다.

1980년대 이후 역동적 세척 방법에 관한 연구는 꾸준히 이루어져 왔으나, 사용된 기법과 기구의 종류에 따라 세척 효과에 대한 보고는 일관되지 않았다. 또한 대부분의 연구는 연구 수행 시점에 시판되던 기구와 재료를 기반으로 진행되었기 때문에, 연구 시점에 따라 서로 상충되는 결과가 보고되기도 했다. 근관 치료의 성공은 근관 내 잔존 오염원의 효과적인 제거와 밀접한 관련이 있으며, 특히 잔존 세균은 근관 치료 실패의 주요 원인으로 알려져 있다.[15] 더 나아가 잔존 치수조직과 유기물은 근관 내 세균의 증식을 촉진할 수 있으며,[15] 기계적 성형 과정에서 형성되는 도말층은 근관 내 약제 및 세척액의 침투를 저해하여 화학적 세척 효과를 감소시킬 수 있는 요인으로 작용한다.[16] 따라서, 성공적인 근관 치료를 위해서는 이들 오염원의 제거가 필수적이며, 근관내 미생물, 잔존 치수조직 및 도말층 제거 능력을 평가하는 것이 중요한 지표로 간주된다. 이러한 배경에 따라 최신의 연구 결과들을 종합하여 현재 사용 가능한 기구들을 중심으로 세척 효과를 재평가할 필요가 있으며, 이에 본 연구에서는 최근 발표된 문헌을 바탕으로 MA, SI 및 PUI의 세균, 치수조직 및 도말층 제거 효과를 비교, 고찰하고자 한다.

연구 재료 및 방법

본 연구에서는 PubMed 데이터베이스를 이용하여 2025년 7월 1일을 기준으로, 2010년 1월 부터 2025년 6월까지 출판된 문헌을 대상으로 검색을 수행하였다. 검색어는 “PUI AND manual agitation AND biofilm”, “PUI AND sonic AND biofilm”, “sonic AND manual agitation AND biofilm”, “PUI AND sonic AND manual agitation AND biofilm”, “PUI AND manual agitation AND pulp tissue”, “PUI AND sonic AND pulp tissue”, “sonic AND manual agitation AND pulp tissue”, “PUI AND sonic AND manual agitation AND pulp tissue”, “PUI AND manual agitation AND smear layer”, “PUI AND sonic AND smear layer”, “sonic AND manual agitation AND smear layer”, “PUI AND

sonic AND manual agitation AND smear layer"였다. 관련 문헌의 포괄적 수집을 위해 출판 연도 외의 추가적인 검색 제한은 설정하지 않았으며, 검색된 모든 문헌을 대상으로 조사를 진행하였다.

1차 스크리닝 단계에서는 제목과 초록을 검토하여 리뷰 논문을 제외하고 in vitro 및 ex vivo 연구만을 포함하였다. 또한, activation irrigant로서 상온의 saline, distilled water, sodium hypochlorite (NaOCl) 및 ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) 외의 다른 세척제를 사용하거나, 상기 세척제가 다른 물질과 혼합되어 사용된 경우는 제외하였다. Saline과 distilled water의 경우 근관 내에서 화학적으로 작용하는 세척액은 아니나, 세척액 활성화 기법의 물리적 효과를 평가하기 위해 포함하였다. 아울러 근관내 세균, 치수조직 또는 도말층 제거와 관련되지 않은 문헌, PUI, SI, MA 중 최소 두 가지 이상의 기법을 비교하지 않은 문헌, 그리고 영어 외의 언어로 출판된 논문은 제외하였다.

전문 검토 단계에서는 1차 선정된 문헌의 전문을 확보하여, 세부적 실험 조건을 검토하였으며, saline, distilled water, NaOCl 및 EDTA 외의 다른 세척제가 사용된 논문(예: Smear clear® 사용)을 최종적으로 제외하였다(Fig. 1).

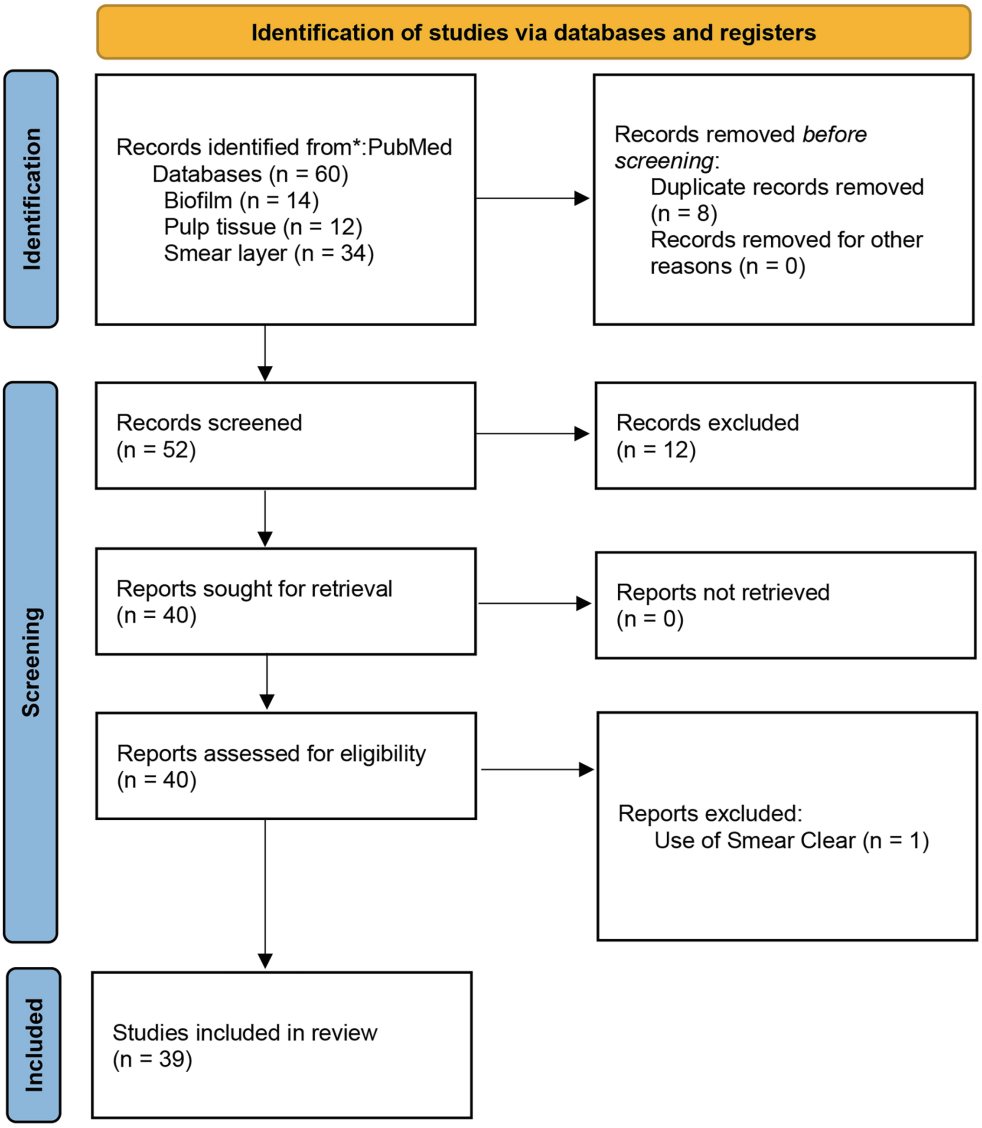

Fig. 1. The PRISMA flow diagram showing the database search process. Numbers of records screened and excluded, and studies included in the final analysis registered.

본 연구에 포함된 문헌에서 추출한 자료 항목은 저자, 발행 연도, 세척기구의 종류 및 제품명, 팁 사이즈, 삽입 깊이, 장비 설정, up-and-down movement 여부, 세척 시간, activation irrigant의 종류, 농도 및 용량, non-activated irrigant의 종류, 농도 및 용량, 샘플 종류, 근관 형태, 근관 크기, 평가방법 및 주요 결과였다.

세균 제거(Microbial reduction)

본 연구에서는 biofilm 제거와 관련하여 총 12편의 문헌이 포함되었다. 이 중 1편은 도말층 제거를 평가한 연구와 중복 포함되었다(Table 1).[17] 포함된 연구들은 주로 배양된 *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*) 또는 artificial biofilm 모델을 이용하여 근관 세척 효율을 평가하였다. 실험 모델로는 만곡이 없는 단근관 치아뿐만 아니라, 측방관 또는 isthmus가 재현된 다양한 만곡을 가진 3D 프린팅 근관 모형이 사용되었다. 모든 실험군에서 activation irrigant로는 상온의 NaOCl, EDTA 또는 증류수가 사용되었으며, 활성화 시간은 30 - 120초로 다양하였다. 대부분의 연구에서 성형된 근관 크기와 사용된 세척기구 팁 간의 차이는 #5 - 10 이내였다.

*E. faecalis*의 생존율(CFU counts) 을 평가한 연구들에서는 PUI와 SI 기법 간에 통계적으로 유의미한 차이가 관찰되지 않는 경향을 보였다.[18,19] 반면, 현미경적 분석(CLSM, SEM, TEM)연구들에서는 사용된 SI 기기의 주파수에 따라 상이한 결과가 보고되었다. 저주파 SI를 사용한 경우에는 PUI가 유의미하게 더 우수한 살균 효과를 보인 반면,[17,20] 고주파 SI (6 kHz)를 적용한 연구에서는 SI가 PUI 보다 더 효과적인 살균 효과를 나타냈다.[21] 잔존 artificial biofilm을 digital image analysis로 평가한 연구들에서는 고주파 SI가 PUI 및 MA 보다 유의미하게 우수한 세척 효율을 보였다.[22,23] 반면, 잔존 단백질량 또는 무게 변화를 정량적으로 측정한 연구들에서는 세척 기법 간 유의미한 차이는 관찰되지 않았다.[24,25]

Activation irrigant로 화학적 작용을 하는 NaOCl을 단독으로 사용하거나 EDTA와 병용한 연구들에서는 결과가 일관되지 않았으나,[18,21,26] 화학적 작용을 배제하고 물리적 효과만을 평가하기 위해 증류수를 사용한 연구들에서는 고주파 SI가 다른 세척 기법들보다 효과적임이 관찰되었다.[22,23] 활성화 시간에 따라 30초,[20,26-28] 60초[17-19,22,23,25] 및 60초 이상[21,24]으로 구분하여 비교, 분석한 결과, 각 군별로 상이한 결과들이 보고되어 활성화 시간과 세척 기법 간의 연관성은 도출하기 어려웠다.

SI의 경우 10,000 cpm의 저주파로 작동하는 Endo-activator system과 6 kHz의 고주파로 작동하는 KaVo-SONICflex에 결합된 EDDY tip이 사용되었는데, 저주파 SI 기구는 연구에 따라 다양한 결과를 보인 반면, 고주파 SI 기구는 대부분의 연구에서 PUI와 대등하거나 이를 능가하는 세척효율을 보였다.[21-23] 근관의 해부학적 복잡성은 세척 기법 간 차이에 유의미한 영향이 관찰되지 않았다.

치수 조직 제거(pulp tissue removal)

본 연구에서는 치수 조직 제거와 관련하여 총 4편의 문헌이 분석에 포함되었다(Table 2). 포함된 연구들에서는 치수조직을 재현하기 위해 인간 치수 조직 외에도 돼지 구개 점막, 소 치수 조직, hydrogel base의 인공 치수 등 다양한 대체 조직 모델이 사용되었다. 모든 연구에서 groove, isthmus 등 복잡한 근관 형태를 포함한 실험 모델이 적용되었다. 다양한 평가 방법들이 사용되었는데, 잔존 조직의 무게 변화를 정량적으로 평가한 연구들에서는 사용된 activation irrigant에 따라 세척 기법 간 통계적 차이가 관찰되었다. NaOCl을 사용한 경우에는 세척 기법 간 유의미한 차이가 관찰 되지 않았으나,[3,29] saline만 사용한 경우에는 SI가 PUI보다 유의미하게 더 높은 조직 제거 능력을 보였다.[29] 잔존 조직을 digital image analysis로 평가한 연구에서, 2025년 Gutierrez-Lopez 등은 세척 기법 간 통계적 차이가 없다고 보고하였으나,[30] 2016년 Neelakantan 등은 MA가 PUI 보다 더 우수한 조직 제거 효과를 보였다고 보고하였다.[31]

대부분의 연구에서는 NaOCl 단독 또는 EDTA와 병행하여 적용되었으며, 2016년 Neelakantan 등의 연구를 제외한 대부분의 문헌에서는 세척 기법간 유의미한 차이는 관찰되지 않았다.[3,29,30] 또한, 본 연구에 포함된 모든 문헌들에서는 활성화 시간이 서로 상이하게 설정되어 있어, 활성화 시간에 따른 세척 효과의 영향을 평가하기 어려웠다.

세균제거 실험과는 달리, 치수 조직 제거에 있어 고주파 SI 장비는 명확한 우위를 보이지 않았다.[3,30] 상대적으로 낮은 강도의 난류를 형성할 것으로 예상되는 저주파 SI와 MA기법이 PUI 보다 더 우수한 조직 제거 효과를 나타낸 점은 주목할 만하다.[29,31]

2017년 Conde 등,[3] 2024년 Koc 등[29]은 성형된 근관 크

기와 세척기구 팁 크기 간의 차이를 #20 - 25로 설정하여 팁이 근관내에서 loosely fitting 되도록 설계하였다. 반면, 2025년 Gutiérrez-López 등[30]은 근관 크기와 팁 크기 간 차이를 불과 #0 - 5로 제한하여 매우 타이트한 조건에서 실험을 수행하였다. 일관되지 않은 설정과 적은 연구 수로 인해 세척기구 사용시 잔존하는 근관 내 공간과 세척 기법 간의 일관된 상관관계는 확인하기 어려웠다.

도말층 제거(Smear layer removal)

도말층 제거와 관련하여 본 연구에서는 총 24편의 문헌이 최종적으로 분석에 포함되었다(Table 3). 모든 연구는 발치된 인간 치아를 실험 모델로 사용하였으며, 단근치의 원형 근관뿐만 아니라 5° - 40°까지 다양한 만곡도를 가진 치아도 포함되었다. 모든 실험군에서 NaOCl과 EDTA가 단독 또는 병용되어 activation irrigant로 사용되었으며, 활성화 시간은 대부분 60초였다. 모든 연구에서 주사 전자현미경(SEM, FESEM, ESEM)을 이용하여 잔존 도말층 양이 평가되었다.

다수의 연구에서는 근관을 치경부, 중앙부, 근단부 3부분으로 구분하거나, 치근단부에서 치관부방향으로 다양한 위치에서 도말층 제거 정도를 분석하였다. 다수의 연구에서 전체 근관 또는 치경부 및 중앙부에서는 PUI, SI, MA간 유의미한 효율 차이가 관찰되지 않았다.[17,32-43] 반면, 일부 연구에서는 근단부에서는 세척 기법간 차이가 없다고 하였으나, 치관부측에서는 저주파 SI가 PUI보다 유의미하게 우수한 도말층 제거 효과를 보였다고 보고하였다.[44-46]

Endoactivator와 같은 저주파 SI 장비는 다수의 연구에서 사용되었으며, 대부분의 연구에서 PUI와 대등하거나,[17,34,36,37,39,47] PUI 보다 우수한 도말층 제거 효과를 나타냈다.[48-50] 또한, 저주파 SI 기법은 MA 기법 보다도 우수한 도말층 제거 능력을 보였다.[47,48,51] 6 kHz 이상의 고주파 SI 장비는 대부분의 연구에서 PUI 및 다른 SI 기법과 대등한 도말층 제거 효과를 보였다.[35,38,39,43]

세척기구 팁과 근관벽 사이 공간이 #5 - 10 이내인 경우, PUI와 SI간 도말층 제거 효과는 대등하거나 SI가 유의미하게 우수한 결과를 보인 경우가 많았다.[34,36,38,46,48,50,52] 반면, 공간이 #15 이상인 경우에는 유사한 효과부터 상이한 결과까지 다양한 양상이 보고되었다.

모든 실험군에서 NaOCl과 EDTA가 단독 또는 병용되어 activation irrigant로 사용되었으며, 그 양, 농도 및 조합은 문헌마다 상이하였다. 본 연구에 포함된 문헌들에서 설정된 활성화 시간은 대부분 60초였으나, 최소 30초에서 최대 210초까지 다양하게 분포되어 있었다. 이러한 이질성으로 인해 세척액의 종류, 농도 및 사용량, 조합, 그리고 활성화 시간에 따른 세척 기법 간의 연관성은 평가하기 어려웠다.

앞서 언급된 바와 같이 다양한 만곡도를 가진 근관 모델이 사용되었으며, Schneider 분류에 따라 5°이하는 직선, 5°초과 20°이하를 중등도, 20°이상을 심한 만곡으로 구분하여 분석하였다.[53] 그 결과, 직선 근관 모델에서는 연구 간 결과가 상이하게 보고되었고,[32,34-37,39,40,44,47,49-51,54,55] 중등도 만곡을 가진 모델에서는 세척 기법 간 유의차가 관찰되지 않거나 PUI가 다른 세척 기법에 비해 낮은 세척 효과를 보였다.[38,45,52] 반면, 심한 만곡을 가진 모델에서는 대부분의 연구에서 PUI보다 낮은 주파수로 작동하는 기구들이 PUI 보다 우수한 세척효과를 나타내는 경향을 보였다.[33,41,43,46,48]

고찰

본 체계적 문헌 고찰에 포함된 연구들은 activation 방법에 따른 세균, 치수 조직 및 도말층 제거효율에 대해 다소 상반되거나 일관되지 않은 결과를 보였다. 이러한 경향은 기존의 유사한 주제를 다룬 체계적 문헌 고찰들의 결론과도 일치한다.[10,56]

PUI 관련 문헌들에서는 P5 Newtron, MiniEndo II, IrriSafe, Irri K 등 다양한 초음파 장비와 팁이 사용되었다. 이러한 PUI 장비들은 일반적으로 24-45 kHz의 주파수 범위에서 작동하며,[57,58] 기기 종류 및 설정에 따라 진폭과 출력이 다양하다. 이론적으로, PUI 팁의 진동은 acoustic streaming과 cavitation을 유발하여 물리적 세정력을 강화하는 것으로 알려져 있다.[13] Ahmad 등에 따르면, 근관 내에서 발생하는 유체 속도 및 전단 응력은 주파수, 진폭, 팁의 반경, 그리고 근관 크기에 의해 결정된다고 보고하였다(식 1, 2).[13]

(식 1) $Um = \omega\varepsilon_0 2/\alpha$

(식 2) $\tau = \eta\omega\varepsilon_0 2/\alpha\delta$

여기서 Um은 유체 속도, $\omega = 2\pi f$는 각주파수, ε_0는 진폭 크기, α는 팁의 반경, τ는 유체역학적 전단응력, η는 액체의 점도, δ는 boundary layer thickness를 의미한다.

이 수식들은 높은 주파수와 큰 진폭이 더 강력한 물리

적 세척력을 제공할 수 있음을 이론적으로 설명한다. 하지만, 실제 근관 내 환경은 공간이 제한된 구조로 세척기구 팁과 근관 벽 사이의 여유 공간에 따라 PUI 진동이 제한될 수 있다.[9] 특히, 팁이 근관 벽에 접촉하는 경우 진동 에너지가 급격히 소실되는 dampening effect가 발생하여, 설정된 출력이 실제 세척력으로 전환되지 못할 수 있다. 따라서 연구마다 보고된 PUI 효율 차이는 팁의 자유로운 진동 공간의 크기와 실험중 기구 팁과 근관벽간의 접촉 여부에 따라 상이한 결과로 나타났을 가능성이 있다.[3]

세척제의 종류와 activation 기법 간의 일관된 상관관계는 확인되지 않았으나, 특정 SI 기구 유형에 따른 경향성은 주목할 만하였다. Air-scaler 기반의 고주파 SI 장비인 Proxeo Air Scaler와 EDDY 팁의 조합은 다수의 연구에서 PUI와 대등하거나 더 우수한 항세균 효과를 보였다.[21-23] PUI는 Proxeo Air Scaler 보다 4배 높은 주파수로 작동하여 cavitation을 주요 기전으로 하는 반면, air scaler는 cavitation을 일으키지 않는 것으로 알려져 있다. 이는 주파수 자체가 세척 효율을 결정하는 유일한 인자가 아님을 시사한다.[10] Chu 등은 주파수 보다 팁의 진폭과 진동 형태가 세척 효과에 더 중요한 영향을 미칠 수 있다고 제언하였다.[10] 저주파 SI, 고주파 SI 및 PUI는 서로 다른 진동 형태와 진폭을 가졌다. 저주파 SI의 경우 주로 세로 방향의 진동을 발생시키며, 팁의 말단부에서만 제한적으로 관찰된다. 하지만, 해당 기구의 경우 다른 기구들에 비해 상대적으로 진폭이 큰 것으로 보고되었다.[6] PUI는 기구 팁 전반에 걸쳐 다수의 node와 antinode가 형성되면서 가로방향의 진동이 발생하고, 이에 따라 팁 주위로 뱀처럼 구불구불한 형태의 진동 양상을 보인다. PUI는 상대적으로 가장 적은 진폭을 가진 것으로 알려져 있다.[13] 반면, 고주파 SI인 EDDY 팁은 팁의 말단부에서 원형으로 진동하는 3차원적 진동 양상을 특징으로 하며, 큰 진폭을 갖는 것으로 보고되었다.[59] PUI와 SI와 다른 고주파 SI의 이러한 진동 특성과 근관 벽 접촉에도 상대적으로 적은 dampening을 유발하는 유연한 폴리머 재질의 팁과 함께 동일하게 제한된 근관 공간 내에서도 세척액을 효과적으로 교반 했을 가능성이 있다. 다만, 치수 조직 및 도말층 제거에 있어서는 상이한 결과들이 혼재되어 있어, 특정 기구의 효율성을 단정하기 위해서는 추가적인 검증이 필요하다.[32,35,38,39,43]

세균 제거와 관련하여, 대부분의 연구에서 MA는 SI 및 PUI 보다 상대적으로 낮은 효과를 보였다. 이는 MA 기법으로 생성되는 유체 흐름이 상대적으로 약하여, 세균막과 같은 견고한 구조물을 물리적으로 파괴하거나 박리시키는 데 한계가 있었기 때문으로 사료된다.[5] 그러나 치수 조직 및 도말층 제거에 있어서는 MA가 SI 또는 PUI와 대등하거나 오히려 우수한 결과를 보인 연구들도 존재하였다. 이는 이러한 오염원들이 세균과는 다른 물리적 작용 뿐만 아니라 세척액의 화학적 작용과 연관성이 있을 수 있음을 시사하며, activated irrigant 및 non-activated irrigant의 종류, 농도, 총량, 적용 시간, activation 유, 무 등 다양한 변수가 결과에 복합적으로 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

본 고찰의 한계점으로는, 분석된 모든 문헌이 in vitro 또는 ex vivo 연구라는 점이다. 실험실 환경은 실제 임상에서의 치근단 압력, 복잡한 근관 해부학적 변이, 그리고 환자 개별 요인을 완전히 재현하는데 있어 한계가 있다. 따라서 본 연구의 결과를 임상 상황에 그대로 일반화하는 데에는 주의가 필요하며, 향후에는 in vivo 연구 및 이를 추가적인 치계적 고찰을 통해 근거 축적이 요구된다. 또한, 사용된 기구의 종류, 출력 설정, 세척 시간, 세척액의 조성 및 농도, 실험 모델, 평가 방법 등 연구 간 방법론적 이질성이 컸으며, 강한 유체역학적 흐름을 형성하는 것으로 알려진 기구의 상, 하 반복 운동(up-and-down movement) 적용 여부 역시 연구마다 상이하였다.[6] 이러한 표준화되지 않은 실험 조건과 제한된 연구 수는 메타분석과 같은 정량적 통합 분석을 수행하는데 제약 요인으로 작용하였다.

결론

체계적 고찰을 통해 확인한 본 연구에 따르면, 세균 제거 측면에서는 전반적으로 SI와 PUI가 유사한 효과를 보였으며, MA는 상대적으로 낮은 효과 나타냈다. 반면, 치수 조직 제거에 있어서는 저주파 SI 및 MA가 PUI와 대등하거나 더 효과적인 결과를 보이기도 하였다. 도말층 제거의 경우, 실험 조건에 따라 상이한 결과가 보고되었다. 종합하면, 근관 세척 기법에서 단일 세척 기법은 다른 세척 방법에 비하여 우위성을 보이지 않았다.

ORCID

Minjung Kim https://orcid.org/0009-0003-5367-5183

References

1. El karim I, Kennedy J, Hussey D. The antimicrobial effects of root canal irrigation and medication. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2007;103:560-9.
2. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1984;58:589-99.
3. Conde AJ, Estevez R, Loroño G, Valencia de Pablo Ó, Rossi-Fedele G, Cisneros R. Effect of sonic and ultrasonic activation on organic tissue dissolution from simulated grooves in root canals using sodium hypochlorite and EDTA. Int Endod J 2017;50:976-82.
4. Boutsioukis C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Wesselink PR, van der Sluis LW. Evaluation of irrigant flow in the root canal using different needle types by an unsteady computational fluid dynamics model. J Endod 2010;36:875-9.
5. Boutsioukis C, Arias-Moliz MT. Present status and future directions - irrigants and irrigation methods. Int Endod J 2022;55 Suppl 3:588-612.
6. Gu LS, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR. Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices. J Endod 2009;35:791-804.
7. Tronstad L, Barnett F, Schwartzben L, Frasca P. Effectiveness and safety of a sonic vibratory endodontic instrument. Endod Dent Traumatol 1985;1:69-76.
8. Ruddle CJ. Endodontic disinfection: Tsunami irrigation. Saudi Endod J 2015;5:1-12.
9. Aricioglu B, Hatipoglu O. Comparison of calcium hydroxide removal activity of new sonic system vibringe and different irrigation systems. Int J Oral Dent Health 2019;5:092.
10. Chu X, Feng S, Zhou W, Xu S, Zeng X. Cleaning efficacy of EDDY versus ultrasonically-activated irrigation in root canals: a systematic review and meta-analysis. BMC Oral Health 2023;23:155.
11. Richman RJ. The use of ultrasonics in root canal therapy and root resection. Med Dent J 1957;12:12-8.
12. Martin H, Cunningham W. Endosonics - the ultrasonic synergistic system of endodontics. Endod Dent Traumatol 1985;1:201-6.
13. Ahmad M, Pitt Ford TJ, Crum LA. Ultrasonic debridement of root canals: acoustic streaming and its possible role. J Endod 1987;13:490-9.
14. Weller RN, Brady JM, Bernier WE. Efficacy of ultrasonic cleaning. J Endod 1980;6:740-3.
15. Siqueira JF Jr, Rôças IN. Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures. J Endod 2008;34:1291-301.e3.
16. Violich DR, Chandler NP. The smear layer in endodontics - a review. Int Endod J 2010;43:2-15.
17. Li Q, Zhang Q, Zou X, Yue L. Evaluation of four final irrigation protocols for cleaning root canal walls. Int J Oral Sci 2020;12:29.
18. Eneide C, Castagnola R, Martini C, Grande NM, Bugli F, Patini R, Cordaro M, Saguinetti M, Olivi G, Isola G, Marigo L. Antibiofilm Activity of Three Different Irrigation Techniques: An in Vitro Study. Antibiotics (Basel) 2019;8:112.
19. Nogueira L, Amaral G, Silva E, Tinoco J, Alves F, Sassone LM. Bacterial Reduction in Oval-Shaped Root Canals After Different Irrigant Agitation Methods. Eur Endod J 2021;6:110-6.
20. Mohmmed SA, Vianna ME, Penny MR, Hilton ST, Mordan N, Knowles JC. Confocal laser scanning, scanning electron, and transmission electron microscopy investigation of Enterococcus faecalis biofilm degradation using passive and active sodium hypochlorite irrigation within a simulated root canal model. Microbiologyopen 2017;6:e00455.
21. Bao P, Liu H, Yang L, Zhang L, Yang L, Xiao N, Shen J, Deng J, Shen Y. In vitro efficacy of Er:YAG laser-activated irrigation versus passive ultrasonic irrigation and sonic-powered irrigation for treating multispecies biofilms in artificial grooves and dentinal tubules: an SEM and CLSM study. BMC Oral Health 2024;24:261.
22. Donnermeyer D, Dust PC, Schäfer E, Bürklein S. Comparative Analysis of Irrigation Techniques for Cleaning Efficiency in Isthmus Structures. J Endod 2024;50:644-50.e1.
23. Donnermeyer D, Averkorn C, Bürklein S, Schäfer E. Cleaning Efficiency of Different Irrigation Techniques in Simulated Severely Curved Complex Root Canal Systems. J Endod 2023;49:1548-52.

24. Aydın U, Turan B, Çulha E, Baştürk Özer MN, Özdemir M. Comparison of the effectiveness of different ırrigation activation methods on biofilm removal in lateral canals - an ın vitro study. Acta Odontol Scand 2025;84:266-74.
25. Dönmez Özkan H, Metin K, Bakir ZB, Yiğit Özer S. A Novel Protein Testing Model to Assay the Efficacy of Multiple Irrigation Activation Techniques for Removal of Ex Vivo Biomolecular Film. Photomed Laser Surg 2018;36:493-8.
26. Mohmmed SA, Vianna ME, Penny MR, Hilton ST, Mordan NJ, Knowles JC. Investigations into in situ Enterococcus faecalis biofilm removal by passive and active sodium hypochlorite irrigation delivered into the lateral canal of a simulated root canal model. Int Endod J 2018;51:649-62.
27. Choudhury P, Raghu R, Shetty A, Santhosh L, Subhashini R, Nikhitha KL. Antibiofilm activity of sodium hypochlorite against enterococcus faecalis using four irrigant activation protocols. J Conserv Dent Endod 2024;27:724-9.
28. Mohmmed SA, Vianna ME, Penny MR, Hilton ST, Mordan N, Knowles JC. A novel experimental approach to investigate the effect of different agitation methods using sodium hypochlorite as an irrigant on the rate of bacterial biofilm removal from the wall of a simulated root canal model. Dent Mater 2016;32:1289-300.
29. Koc S, Er K, Hajguliyeva G, Osmanlı Z, Cabbarova L, Karayılmaz H. Pulp tissue dissolution capacities of different irrigation agitation techniques in artificial internal resorption cavities. Eur Oral Res 2024;58:64-9.
30. Gutiérrez-López E, Córdova-Saucedo KJ, Ramírez-Salomón M, Vega-Lizama E, Ortolani-Seltenerich PS, Malvicini G, Mendez S PM, Vieira GCS, Pérez AR. The effect of supplementary methods on root canal cleaning: a study using 3D-printed mandibular molar models. Odontology 2025;114:237-47.
31. Neelakantan P, Devaraj S, Jagannathan N. Histologic Assessment of Debridement of the Root Canal Isthmus of Mandibular Molars by Irrigant Activation Techniques Ex Vivo. J Endod 2016;42:1268-72.
32. Plotino G, Colangeli M, Özyürek T, DeDeus G, Panzetta C, Castagnola R, Grande NM, Marigo L. Evaluation of smear layer and debris removal by stepwise intraoperative activation (SIA) of sodium hypochlorite. Clin Oral Investig 2021;25:237-45.
33. Ahuja P, Nandini S, Ballal S, Velmurugan N. Effectiveness of four different final irrigation activation techniques on smear layer removal in curved root canals: a scanning electron microscopy study. J Dent (Tehran) 2014;11:1-9.
34. Gonçalves BFA, Reddy D, Machado R, Soares Júunior PC, Ignácio SA, Fernandes Couto DA, Frasquetti KS, Westphalen VPD, Carneiro E, da Silva Neto UX. Smear layer removal comparing conventional irrigation, passive ultrasonic irrigation, EndoActivator System, and a new sonic device (Perfect Clean System) by scanning electron microscopy: An ex vivo study. PLoS One 2024;19:e0314940.
35. Wigler R, Herteanu M, Wilchfort Y, Kfir A. Efficacy of Different Irrigant Activation Systems on Debris and Smear Layer Removal: A Scanning Electron Microscopy Evaluation. Int J Dent 2023;2023:9933524.
36. Mancini M, Cerroni L, Palopoli P, Olivi G, Olivi M, Buoni C, Cianconi L. FESEM evaluation of smear layer removal from conservatively shaped canals: laser activated irrigation (PIPS and SWEEPS) compared to sonic and passive ultrasonic activation-an ex vivo study. BMC Oral Health 2021;21:81.
37. Hachem CE, Nehme W, Kaloustian MK, Ghosn N, Daou M, Zogheib C, Karam M, Mhana R, Macaluso V, Kharouf N, Abou Chedid JC. The Effectiveness of Different Irrigation Techniques on Debris and Smear Layer Removal in Primary Mandibular Second Molars: An In Vitro Study. J Contemp Dent Pract 2022;23:1173-9.
38. Uslu G, Gündoğar M, Üngör M, Özyürek T, Erkan E, Keskin NB. Investigation of the effectiveness of sonic, ultrasonic and new laser-assisted irrigation activation methods on smear removal and tubular penetration. Lasers Med Sci 2023;38:30.
39. Urban K, Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S. Canal cleanliness using different irrigation activation systems: a SEM evaluation. Clin Oral Investig 2017;21:2681-7.
40. Karade P, Chopade R, Patil S, Hoshing U, Rao M,

Rane N, Chopade A, Kulkarni A. Efficiency of Different Endodontic Irrigation and Activation Systems in Removal of the Smear Layer: A Scanning Electron Microscopy Study. Iran Endod J 2017;12:414-8.

41. Caron G, Nham K, Bronnec F, Machtou P. Effectiveness of different final irrigant activation protocols on smear layer removal in curved canals. J Endod 2010;36:1361-6.
42. Yilmaz M, Yılmaz S, Dumanı A, Kuden C, Yoldas O. Effects of seven different irrigation techniques on debris and the smear layer: a scanning electron microscopy study. Niger J Clin Pract 2017;20:328-34.
43. Haupt F, Meinel M, Gunawardana A, Hülsmann M. Effectiveness of different activated irrigation techniques on debris and smear layer removal from curved root canals: a SEM evaluation. Aust Endod J 2020;46:40-6.
44. Mancini M, Cerroni L, Iorio L, Dall'Asta L, Cianconi L. FESEM evaluation of smear layer removal using different irrigant activation methods (EndoActivator, EndoVac, PUI and LAI). An in vitro study. Clin Oral Investig 2018;22:993-9.
45. Mancini M, Cerroni L, Iorio L, Armellin E, Conte G, Cianconi L. Smear layer removal and canal cleanliness using different irrigation systems (EndoActivator, EndoVac, and passive ultrasonic irrigation): field emission scanning electron microscopic evaluation in an in vitro study. J Endod 2013;39:1456-60.
46. Schiavotelo TCL, Coelho MS, Rasquin LC, Rocha DGP, Fontana CE, Bueno C. Ex-vivo Smear Layer Removal Efficacy of Two Activated Irrigation Techniques After Reciprocating Instrumentation in Curved Canals. Open Dent J 2017;11:512-9.
47. Çapar İD, Aydinbelge HA. Effectiveness of various irrigation activation protocols and the self-adjusting file system on smear layer and debris removal. Scanning 2014;36:640-7.
48. Khaord P, Amin A, Shah MB, Uthappa R, Raj N, Kachalia T, Kharod H. Effectiveness of different irrigation techniques on smear layer removal in apical thirds of mesial root canals of permanent mandibular first molar: A scanning electron microscopic study. J Conserv Dent 2015;18:321-6.
49. Jasrotia A, Bhagat K, Bhagat N, Bhagat RK. Comparison of Five Different Irrigation Techniques on Smear Layer Removal in Apical Thirds of Root Canals of Mandibular First Premolar: A Scanning Electron Microscopic Study. J Int Soc Prev Community Dent 2019;9:630-6.
50. Zhang SH, Gao ZR, Zhou YH, Tan L, Feng Y, Ye Q, Zhao J, Zhao YQ, Hu J, Chen Y, Liu Q, Aimee DM, Guo Y, Feng YZ. Comparison of Easydo Activator, ultrasonic and needle irrigation techniques on sealer penetration and smear layer removal in vitro. BMC Oral Health 2024;24:56.
51. Thapak G, Arya A, Grewal MS, Arora A. A Comparative Evaluation of Smear Layer Removal Using Erbium:YAG Laser-Activated Irrigation, Sonic Irrigation, and Manual Dynamic Irrigation: A Scanning Electron Microscope Study. J Laser Med Sci 2021;12:e22.
52. Mathew DM, Durvasulu A, Shanmugam S, Pradeepkumar AR. Evaluation of Different Agitation Techniques on Smear Layer Formation and Dentine Erosions- An In Vitro Study. Eur Endod J 2023;8:72-8.
53. Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1971;32:271-5.
54. Seven N, Cora S. Effectiveness of different irrigation systems in the presence of intracanal-separated file. Microsc Res Tech 2019;82:238-43.
55. Saber Sel D, Hashem AA. Efficacy of different final irrigation activation techniques on smear layer removal. J Endod 2011;37:1272-5.
56. Nagendrababu V, Jayaraman J, Suresh A, Kalyanasundaram S, Neelakantan P. Effectiveness of ultrasonically activated irrigation on root canal disinfection: a systematic review of in vitro studies. Clin Oral Investig 2018;22:655-70.
57. Dos Santos GNA, Silva-Sousa AC, Torres-Carrillo AJS, de Araujo Braz G, Alves TO, Lopes-Olhê FC, Silva-Sousa YTA, Mazzi-Chaves JF, Silva RG, Sousa-Neto MD. Frequency and performance analysis of polymer, steel, and titanium ultrasonic inserts in intracanal medication removal. J Endod 2025;51:1455-63.
58. Towler MR, Bushby AJ, Billington RW, Hill RG. A

preliminary comparison of the mechanical properties of chemically cured and ultrasonically cured glass ionomer cements, using nano-indentation techniques. Biomaterials 2001;22:1401-6.

59. Swimberghe RCD, De Clercq A, De Moor RJG, Meire MA. Efficacy of sonically, ultrasonically and laser-activated irrigation in removing a biofilm-mimicking hydrogel from an isthmus model. Int Endod J 2019;52:515-23.

Table 1. Data on biofilm removal

Author	Eneide et al.[18]		Nogueira et al.[19]		Bao et al.[21]	
Year	2019		2021		2024	
Method	PUI	SI	PUI	SI	PUI	SI
Device name	NR	SoniFlex	Piezo device	EndoActivator	P5 Newtron	Proxeo Air Scaler
Tip product (size)	Irri K (Size not reported)	Eddy (Size NR)	Irrisonic (#20/.01)	(#25/.04)	Acteo K-file (#25/.02)	EDDY (#20/.02)
Working length	wl - 1 mm		wl - 2 mm		wl - 1 mm	
Device setting	20%	NR	10%	10,000 cpm	level 4	6 khz
up-and-down movement	NR		NR	Amp. of 2 - 3 mm	NR	Amp. of 2 - 3 mm
Activation time	20 s × 3 (for each irrigant)		60 s		90 s	NR
Activation irrigant (volume)	5.25% NaOCl (6 ml) 17% EDTA (6 ml)		2.5% NaOCl (2 ml)		3% NaOCl (6 ml)	
None-activated irrigant after infection (volume)	Saline (2 ml)		17% EDTA (2 ml) 2.5% NaOCl (12 ml) 5% sodium thiosulfate (5 ml) Sterile saline (3 ml)		3% NaOCl (7 ml) Saline (2 ml) 17% EDTA (4 ml)	
Microorganism	*E. faecalis* 28-day biofilm		*E. faecalis* 30-day biofilm		Multispecies biofilm 4 weeks	
Sample Type	Single-rooted human teeth		Human mandibular incisors		Human premolars	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	No curvature		Oval shaped canal		· Curvature < 10° · Grooves (length 3 mm, width 0.2 mm, depth 0.8 mm) · Dentinal tubules	
Apical canal size	#25/.06		#25/.08		#35/.06	
Evaluation Method	CFU count brush sampling		CFU count		· SEM (Grooves) · CLSM (Dentinal tubules)	
Main Outcome	No significant difference between PUI and SI reported		No significant difference between PUI and SI reported		SI significantly outperformed PUI regarding biofilm removal in-and outside grooves and intratubular antibacterial efficacy	

Table 1. (Continued) Data on biofilm removal

Author	Aydın et al.[24]		Dömez Özkan et al.[25]			Choudhury et al.[27]	
Year	2025		2018			2024	
Method	PUI	SI	PUI	SI 1	SI 2	PUI	MA
Device name	EMS	Endo Activator	EMS	Endo Activator	Vibringe	Eighteeth Ultra X	GP cone
Tip product (size)	Woodpecker tip (0.7 mm)	(#25/.04)	ESI (#15/.02)	(#25/.04)	Size NR	NR	(#35/.02)
Working length	wl - 2 mm	wl - 3 mm	wl - 2 mm		NR	wl - 1 mm	wl
Device setting	level 6	NR	NR	10,000 cpm	NR	NR	50 stroke / 30 s
up-and-down movement	Amp. of 1 mm	NR	NR			NR	
Activation time	15 s × 4	30 s × 4	20 s × 3			30 s	
Activation irrigant (volume)	5% NaOCl (volume NR)		5.25% NaOCl (3 ml)			1% NaOCl (3 ml)	
None-activated irrigant after infection (volume)	5% NaOCl (20 ml)		None			2M sodium thiosulfate (5 ml)	
Microorganism	Hydrogel biofilm mimic		Ex vivo biomolecular film (type I collagen)			*E. faecalis* 21-day biofilm	
Sample Type	3D-printed PMMA Resin Replicas		Human mandibular premolars			Human mandibular premolars	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	· lateral canals (7, 14 mm from apex)		· No curvature · Single canal			· Single rooted	
Apical canal size	#30/.04		#30/.07			#35/.04	
Evaluation Method	· Weight difference · Stereomicroscope		Residual protein levels			CFU count	
Main Outcome	No significant difference in hydrogel removal between PUI and SI reported		No significant difference between SI1, SI2 and PUI reported			PUI achieved significantly higher bacterial reduction than MA	

Table 1. (Continued) Data on biofilm removal

Author	Donnermeyer et al.[22]			Mohmmed et al.[26]		
Year	2024			2018		
Method	PUI	SI 1	SI 2	PUI	SI	MA
Device name	NR	EndoActivator	KaVo SONICflex	P5 Newtron	EndoActivator	GP cone
Tip product (size)	Irri-S 21/25 (#25)	(#25/.04)	EDDY (#25/.04)	IrriSafe (#20/.02)	(#25/.04)	(#30/.02)
Working length	Deep as possible	wl - 1 mm	wl - 1 mm	wl - 2 mm		
Device setting	30 khz	166 hz	6 khz	level 7	High	50 stroke / 30 s
up-and-down movement	Amp. of 4 mm			NR	NR	Amp. of 3 - 5 mm
Activation time	20 s × 3			30 s		
Activation irrigant (volume)	Distilled water (9 ml)			2.5% NaOCl (9 ml)		
None-activated irrigant after infection (volume)	None			5% sodium thiosulfate (2 ml)		
Microorganism	Artificial biofilm (hydrogel)			*E. faecalis* 10 days biofilm		
Sample Type	3D-printed Replicas			3D-printed Replicas		
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	· Curvature 60°, radius 5 mm · 0.2 mm diameter lateral canals 2, 5 & 8 mm from apex · length 2.5 mm, height 0.4 mm, width 0.2 mm isthmus 5 & 8 mm from apex			· Straight single canal · 3 mm length, 0.3 mm width lateral canals, 3 mm from apex		
Apical canal size	#25/.06			#30/.06		
Evaluation Method	Digital image analysis			· Fluorescent microscopy · Image analysis · SEM		
Main Outcome	· Entire root canal: SI2 demonstrated significantly superior biofilm removal compared to the other methods, with no significant differences found among the remaining groups. · Main canal: SI2 showed significantly better results than MA, SI1, and PUI. Both, MA and SI1 demonstrated significantly greater biofilm removal compared to PUI · Lateral canal: SI2 showed significantly the highest biofilm removal, regardless of the lateral canals position. In the middle lateral canals, MA and PUI were significantly more effective than SI1, whereas in the coronal lateral canals, PUI performed significantly better than MA and SI1. · Isthmus: In coronal istmus, MA and SI2 performed significantly better than PUI and SI1. Conversely, in the apical isthmus, PUI demonstrated the significantly poorest results of among all groups.			PUI demonstrated significantly superior biofilm removal in lateral canals followed by SI and MA respectively.		

Table 1. (Continued) Data on biofilm removal

Author	Mohmmed et al.[20]			Mohmmed et al.[28]		
Year	2017			2016		
Method	PUI	SI	MA	PUI	SI	MA
Device name	P5 Newtron	EndoActivator	GP cone	P5 Newtron	EndoActivator	GP cone
Tip product (size)	IrriSafe (#20/.02)	(#25/.04)	(#30/.02)	IrriSafe (#20/.02)	(#25/.04)	(#30/.02)
Working length	wl - 2 mm			wl - 2 mm		
Device setting	level 7	High	50 stroke / 30 s	level 7	High	50 stroke / 30 s
up-and-down movement	NR	NR	Amp. 3 - 5 mm	NR	NR	Amp. of 3 - 5 mm
Activation time	30 s			30 s		
Activation irrigant (volume)	2.5% NaOCl (9 ml)			2.5% NaOCl (9 ml)		
None-activated irrigant after infection (volume)	5% sodium thiosulfate (2 ml)			None		
Microorganism	*E. faecalis* 10 days biofilm			*E. faecalis* 10 days biofilm		
Sample Type	3D-printed Replicas (apical 3 mm tested)			3D-printed Replicas		
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Straight single canal			Straight single canal		
Apical canal size	#30/.06			#30/.06		
Evaluation Method	· CLSM · SEM · TEM			Image analysis (residual biofilm %)		
Main Outcome	While PUI and SI demonstrated significantly better biofilm removal than MA in the CLSM analysis at 1 mm and TEM at 2 mm from the apex, PUI demonstrated significantly superior results, followed by SI and MA respectively in the SEM analysis and TEM at 1 mm level.			PUI demonstrated significantly greater bacterial removal than MA, but no significant differences were observed between PUI and SI, nor between SI and MA		

Table 1. (Continued) Data on biofilm removal

Author	Donnermeyer et al.[23]			Li et al.[17]	
Year	2023			2020	
Method	PUI	SI 1	SI 2	PUI	SI
Device name	IrriSafe	EndoActivator	KaVo SONICflex	Satelec Acteon	EndoActivator
Tip product (size)	Irri-S 21/25 (#25)	(#25/.04)	EDDY (#25/.04)	NR (#20)	(#25/.04)
Working length	Deep as possible	wl - 1 mm	wl - 1 mm	wl - 1 mm	
Device setting	NR			level 6/20	10,000 cpm
up-and-down movement	Amp. of 4 mm			Vertical movement given	NR
Activation time	20 s × 3			60 s	
Activation irrigant (volume)	Distilled water (9 ml)			5.25% NaOCl 17% EDTA Distilled water	
None-activated irrigant after infection (volume)	None			5.25% NaOCl (10 ml)	
Microorganism	Artificial biofilm (hydrogel)			*E. faecalis* 3 weeks biofilm	
Sample Type	3D-printed Replicas			Human premolars	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	· Curvature 60°, radius 5 mm · 0.2 mm diameter lateral canals 2, 5, 8 mm from apex			NR	
Apical canal size	#25/.06			#30/.06	
Evaluation Method	Digital image analysis			CLSM	
Main Outcome	SI2 significantly outperformed the other groups in the overall analysis, and this was consistently observed in the main canal and the apical lateral canal analysis. In the middle and coronal lateral canals, SI2 and PUI showed significantly greater efficacy compared to the remaining groups. No significant differences were found between MA and SI1.			PUI revealed significantly greater bacterial inhibition depth in the dentinal tubules compared to SI	

PUI: Passive ultrasonic irrigation; SI: Sonic irrigation; NR: Not reported; GP: gutta percha; Amp: Amplitude; CLSM:Confocal laser scanning microscope; SEM: Scanning emission microscope; TEM: Transmission electron microscope.

Table 2. Data on pulpal tissue removal

Author	Conde et al.[3]			Koç et al.[29]			
Year	2017			2024			
Method	PUI	SI 1	SI 2	PUI	SI	PUI	SI
Device name	P5 Newtron	ZA-55	Endo Activator	P5 Newtron	Endo Activator	P5 Newtron	Endo Activator
Tip product (size)	IrriSafe (#20)	EDDY (#20/.02)	(#25/.04)	IrriSafe (#25)	(#25/.04)	IrriSafe (#25)	(#25/.04)
Working length	wl - 2 mm			NR			
Device setting	level 4	Max	10,000 cpm	50%	10,000 cpm	50%	10,000 cpm
up-and-down movement	NR			NR			
Activation time	30 s × 2 NaOCl 30 s EDTA			20 s × 3 × 2	60 s × 2	20 s × 3 × 2	60 s × 2
Activation irrigant (volume)	2.5% NaOCl (6 ml) 17% EDTA (1 ml)			0.9% saline (5 ml)		2.5% NaOCl (5 ml)	
None-activated irrigant (volume)	2.5% NaOCl (6 ml)			Saline (5 ml)			
Tissue sample	Porcine palatal mucosa			Bovine pulp tissue			
Tooth sample Type	Human maxillary incisors			Human maxillary incisors			
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	· Artificial grooves (depth: 2 mm, width: 2 mm, height: 4 mm) · Porcine tissue placed in grooves			· Artificial grooves (depth: 0.8 mm, diameter: 1.6 mm) · Bovine tissue placed in grooves			
Canal size	#40/.06			#50/.06			
Evaluation Method	Tissue weight reduction			Tissue weight reduction			
Main Outcome	No significant difference in tissue removal efficacy observed between the activation groups			SI was significantly more effective in tissue removal than PUI		No significant difference observed between SI and PUI	

Table 2. (Continued) Data on pulpal tissue removal

Author	Neelakantan et al.[31]		Gutierrez-Lopez E et al.[30]		
Year	2016		2025		
Method	PUI	MA	PUI1	PUI2	SI
Device name	Suprasson P5	GP cone	Ultra X	Satelec	Not reported
Tip product (size)	IrriSafe (Size NR)	(#25/.08)	Ultra X tip (#20/.02)	Irrisafe (#25/.00)	EDDY (Size NR)
Working length	NR		wl - 1mm		
Device setting	level 3	Short push-pull stroke	NR	level 5	NR
up-and-down movement	NR		NR		
Activation time	90 s NaOCl 60 s EDTA 60 s distilled water	90 s NaOCl 120 s EDTA 60 s distilled water	60 s per canal		
Activation irrigant (volume)	3% NaOCl (10 ml) 17% EDTA (3 ml) distilled water (2 ml)		2.5% NaOCl (3 ml)		
None-activated irrigant (volume)	3% NaOCl (5 ml) Distilled water (3 ml)		2.5% NaOCl (3 ml)		
Tissue sample	Human pulp tissue		Hydrogel-based artificial pulp tissue		
Tooth sample Type	Human mandibular molars		3D-printed Resin Replicas (scans of natural teeth)		
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Natural isthmus at apical and middle of the roots		· Curvature < 20° · Vertucci type IV · Apical isthmus		
Canal size	#25/.08		#25/.04		
Evaluation Method	Digital image analysis		Digital image analysis		
Main Outcome	MA showed superior pulp tissue removal within isthmus at 1 mm and 3 mm from the apex compared to PUI, but no significant difference between was found at 5 mm level from the apex		No significant difference was found between the activation groups across all segments of the root canal (coronal, middle and apical)		

PUI: Passive ultrasonic irrigation; SI: Sonic irrigation; NR: Not reported; GP: gutta percha; Amp: Amplitude.

Table 3. Data on smear layer removal

Author	Mancini et al.[44]		Plotino et al.[32]					
Year	2017		2021					
Method	PUI	SI	PUI	SI 1	SI 2	PUI	SI 1	SI 2
			Conventional activation (CA)			Stepwise intraoperative activation (SIA)		
Device name	MiniEndo II	Endo Activator	NR	Endo Activator	Proxeo	NR	Endo Activator	Proxeo
Tip product (size)	IrriSafe (#15)	(#15/.02)	IrriSafe (#25)	(#25/.04)	EDDY (Size NR)	IrriSafe (#25)	(#25/.04)	EDDY (Size NR)
Working length	wl - 1 mm	wl - 2 mm	wl - 1 mm			wl - 1 mm		
Device setting	level 5	NR	30	1	NR	30	1	NR
up-and-down movement	NR		NR			NR		
Activation time	60 s		20 s × 3			20 s × 3		
Activated irrigant (volume)	5.25% NaOCl (5 ml)		5% NaOCl (3ml)					
None-activated irrigant (volume)	17% EDTA		5% NaOCl (1 ml)			17% EDTA (5 ml)	distilled water (5 ml)	
Tooth sample Type	Human mandibular premolars		Human single-rooted teeth					
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Curvature < 5°		· Curvature < 10° · Single round root canal					
Apical canal size	#40/.06		#40/.06					
Evaluation Method	FESEM		SEM			SEM		
Main Outcome	SI demonstrated significantly superior smear layer removal compared to PUI at 3 - 8 mm from the apex, whereas no significant difference was observed at the 1 mm level.		SI2 and PUI demonstrated significantly superior smear layer removal compared to SI1 in the apical and middle thirds, whereas no significant difference was observed in the coronal thirds between the groups.			In the apical thirds, SI2 and PUI removed significantly more smear layer than SI1. In the middle thirds, SI2 demonstrated significantly the highest efficacy, with no significant difference observed between SI1 and PUI. In the coronal thirds, no significant difference between the groups was found.		

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Gonçalves et al.[34]			Wigler et al.[35]			Mancini et al.[36]	
Year	2024			2023			2021	
Method	PUI	SI 1	SI 2	PUI1	PUI2	SI	PUI	SI
Device name	Jet Sonic	Endo Activator	Perfect Clean System	Satalec P5 Newtron	Satalec P5 Newtron	Proxeo	EndoUltra	Endo Activator
Tip product (size)	Irrisonic (#20/.01)	(#35/.04)	(#35/.04)	Endosonic PS (#25/.03)	IrriSafe (#25/.00)	EDDY (#25/.06)	NR (#15/.02)	(#15/.02)
Working length	wl - 1 mm			wl - 1 mm			wl - 2 mm	
Device setting	15%	NR	NR	30%	30%	6 kHz	40 kHz	10,000 cpm
up-and-down movement	NR			NR			Amp. of 2 - 3 mm	
Activation time	20 s × 9			20 s × 3			30 s × 2 NaOCl 30 s × 2 EDTA 30 s × 3 distilled water	
Activated irrigant (volume)	17% EDTA (22.5 ml)			4% NaOCl (6 ml)			5.25% NaOCl (10 ml) 17% EDTA (10 ml) Distilled water (15 ml)	
None-activated irrigant (volume)	2.5% NaOCl (22.5 ml)			4% NaOCl (1 ml) 17% EDTA (5 ml)			5.25% NaOCl (6 ml) Distilled water (30 ml) 17% EDTA (3 ml)	
Tooth sample Type	Human mandibular premolars			Human mandibular incisors			Human mandibular premolars	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Single root canal			· Single oval root canal · Curvature < 5°			· Single rooted · Curvature <5°	
Apical canal size	#40/.06			#40/.04			#25/.06	
Evaluation Method	SEM			SEM			FESEM	
Main Outcome	No sigificant difference was observed among the groups at 1, 5, 8 and 12 mm from the working length.			No sigificant difference between the groups were found across all the root segments (coronal, middle and apical).			No significant difference among the test groups was observed at any distance from the apex (1, 3, 5 and 8 mm).	

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Hachem et al.[37]		Uslu et al.[38]		Mancini et al.[45]	
Year	2022		2023		2013	
Method	PUI	SI	PUI	SI	PUI	SI
Device name	Ultra-X	EQ-S	Satalec P5 Newtron	Proxeo	MiniEndo II	EndoActivator
Tip product (size)	NR (#25/.02)	(#25/.02)	IrriSafe (#25)	EDDY (size NR)	K-file (#15/.02)	(#15/.02)
Working length	NR		wl - 2 mm	wl	wl - 1 mm	wl - 2 mm
Device setting	45 kHz	133/217 Hz	level 7	6 kHz	level 5	NR
up-and-down movement	NR		Amp. of 4 mm		NR	
Activation time	30 s		20 s × 3		60 s	
Activated irrigant (volume)	1% NaOCl (Not reported)		5.25% NaOCl (3 ml) 17% EDTA (3 ml)		5.25% NaOCl (5 ml)	
None-activated irrigant (volume)	1% NaOCl (12 ml) 17% EDTA (1 ml) Saline (3 ml)		5.25% NaOCl (15 ml)		5.25% NaOCl (18 ml) 17% EDTA (not reported) Distilled water (5 ml)	
Tooth sample Type	Human primary mandibular molars mesial root		Human mandibular molars		Human mandibular premolars	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Vertucci type IV		Curvature < 20°		Curvature < 20°	
Apical canal size	#30/.04		#30/.07		#40/.06	
Evaluation Method	SEM		SEM		FESEM	
Main Outcome	No significant difference was found between the test groups across all root segment (coronal, middle, apical).		No significant difference was observed among the experimental groups across all root canal thirds (coronal, middle, apical).		SI demonstrated significantly superior smear layer removal compared to PUI at 3, 5 and 8 mm from the apex, whereas no significant difference was observed at the 1 mm level.	

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Khaord et al.[48]			Schiavotelo et al.[46]		Haupt et al.[43]		
Year	2015			2017		2019		
Method	PUI	SI	MA	PUI	SI	PUI	SI 1	SI 2
Device name	NR	Endo Activator	GP cone	Satalec P5 Newtron XS	Endo Activator	Piezo Smart	Endo Activator	Proxeo
Tip product (size)	NR			IrriSafe (#25/.01)	(#25/.04)	K-file (#15/.02)	(#25/.04)	EDDY (size NR)
Working length	NR			wl - 2 mm		wl - 1 mm		
Device setting	NR	10,000 cpm	100 strokes/ min	level 10	10,000 cpm	30 kHz	10,000 cpm	5 kHz
up-and-down movement	NR			NR		NR		
Activation time	30 s NaOCl		60 s EDTA 30 s NaOCl	20 s × 3 NaOCl 20 s × 3 EDTA		20 s × 3		
Activated irrigant (volume)	3% NaOCl (3 ml)		3% NaOCl (3 ml) 17% EDTA (1 ml)	2.5% NaOCl (6 ml) 17% EDTA (3 ml)		3% NaOCl (6 ml)		
None-activated irrigant	3% NaOCl (12 ml) 17% EDTA (1 ml) Saline (6 ml)			2.5% NaOCl (12 ml)		3% NaOCl (14 ml)		
Tooth sample Type	Human mandibular first molars			Human maxillary molars		Human mandibular molars		
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Curvature > 20°			Curvature 20 - 40°		Curvature 20 - 40°		
Apical canal size	#20/.07			#25/.08		#40/.04		
Evaluation Method	SEM			SEM		SEM		
Main Outcome	SI demonstrated the highest smear layer removal efficacy, being significantly superior to PUI but comparable to MA. No significant difference was observed between PUI and MA.			At the middle and coronal thirds SI was significantly more effective than PUI, whereas no significant difference between the groups was found at the apical thirds.		In the coronal level, SI2 showed the highest efficiency followed by PUI and SI1, whereas PUI ranked highest followed by SI1 and SI2 in the apical level. However, these differences were not statistically significant.		

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Urban et al.[39]			Seven & Cora[54]					
Year	2017			2019					
Method	PUI	SI 1	SI 2	PUI	SI 1	SI 2	PUI	SI 1	SI 2
				No separated file			With separated file		
Device name	VDW Ultra	Endo Activator	NR	EMS Minimaster Piezon	Endo Activator	Vibringe	EMS Minimaster Piezon	Endo Activator	Vibringe
Tip product (size)	Irri S (#25)	(#25/.04)	EDDY (#25/.04)	NR	(#15/.02)	NR	NR	(#15/.02)	NR
Working length	wl - 1 mm			wl - 1 mm			1 mm coronal from the separated file		
Device setting	30%	166 Hz	6 kHz	level 5	10,000 cpm	150 Hz	level 5	10,000 cpm	150 Hz
up-and-down movement	NR			NR	Amp. of 2 - 3 mm	NR	NR	Amp. of 2 - 3 mm	NR
Activation time	30 s × 3			60 s NaOCl 60 s EDTA					
Activated irrigant (volume)	3% NaOCl (12 ml)			5% NaOCl (10 ml) 17% EDTA (10 ml)					
None-activated irrigant	3% NaOCl (2.5 ml)			5% NaOCl (12.5 ml) Distilled water (9 ml)					
Tooth sample Type	Human mandibular premolars			Human mandibular incisors					
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Round single canal			Single canal					
Apical canal size	#40/.06			#20/.07					
Evaluation Method	SEM			SEM					
Main Outcome	No significant difference between the groups was found across all the root segment.			At the apical 1 and 2 mm level, PUI demonstrated significantly superior compared to SI1 and SI2. At 3 mm, PUI and SI1 showed comparable efficacy, both being significantly superior to SI2.			SI1 was significantly more effective than PUI and SI2 at 2 and 3 mm levels, whereas no significant difference was found between the groups at the 1 mm level.		

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Zhang et al.[50]		Jasrotia et al.[49]		
Year	2024		2019		
Method	PUI	SI	PUI	SI	MA
Device name	NR	Easydo Activator	EndoUltra	EndoActivator	GP cone
Tip product (size)	DTE Endo File (#25/.04)	(#25.04)	NR		
Working length	wl - 1 mm		Not reported		
Device setting	28 ± 3 kHz	3 kHz	40 kHz	10,000 cpm	100 strokes/ min
up-and-down movement	NR		NR		
Activation time	15 s ×3		60 s EDTA		30 s NaOCl 60 s EDTA
Activated irrigant (volume)	3% NaOCl (1.5 ml)		17% EDTA (1ml)		3% NaOCl (not reported) 17% EDTA (1 ml)
None-activated irrigant	3% NaOCl (12 ml)		3% NaOCl (NR) 17% EDTA (1 ml) Saline (3 ml)		3% NaOCl (3 ml) 17% EDTA (1 ml)
Tooth sample Type	Human mandibular premolars		Human mandibular premolars		
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Single canal		Single root canal		
Apical canal size	#30/.06		#25/.06		
Evaluation Method	SEM		SEM		
Main Outcome	SI was significantly more effective than PUI.		The smear layer removal efficacy was highest in SI, followed by PUI and MA, with significant differences observed among the groups.		

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Li et al.[17]		Karade et al.[40]		Mathew et al.[52]		
Year	2020		2017		2023		
Method	PUI	SI	PUI	SI	PUI	SI	MA
Device name	Satelec Acteon	Endo Activator	EMS	Sonic MM1500	NR	Endo Activator	GP cone
Tip product (size)	NR	(#25/.04)	IrriSafte (#20)	NR (#15/.02)	NR (#20/.01)	(#25/.04)	(#30/.09)
Working length	wl - 1 mm		wl - 1 mm		wl - 1 mm		
Device setting	level 6/20	10,000 cpm	level 4	NR	level 1	10,000 cpm	100 strokes/ min
up-and-down movement	Vertical movement given	NR	NR		NR		
Activation time	60 s		60 s × 2 NaOCl 60 s EDTA		(20 s × 3) × 2 NaOCl 20 s × 3 EDTA		
Activated irrigant (volume)	5.25% NaOCl 17% EDTA Distilled water		5.25% NaOCl (10 ml) 17% EDTA (5 ml)		3% NaOCl (12 ml) 17% EDTA (6 ml)		
None-activated irrigant	5.25% NaOCl (10 ml)		5.25% NaOCl (25 ml) 0.9% Saline (5 ml)		3% NaOCl 17% EDTA Water Double distilled water (volume not reported for all the irrigant)		
Tooth sample Type	Human premolars		Human premolars		Human mandibular premolars		
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	NR		NR		· Curvature < 15° · Single root canal		
Apical canal size	#30/.06		#45/.05		#30/.09		
Evaluation Method	SEM		SEM		ESEM		
Main Outcome	Although SI demonstrated significantly superior smear layer removal i the apical third compared to PUI, no significant difference were observed in the coronal and middle thirds. Consequently, no significant difference was found overall between the groups.		No significant difference between the groups was found across all the root segment (coronal, middle and apical).		No significant differences were observed among the groups at the 1, 2, and 4 mm levels. However, at the 3 mm level, PUI demonstrated significantly inferior smear layer removal efficacy compared to SI and MA.		

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Saber & Hashem[55]		Çapar & Aydinbelge[47]			Ahuja et al.[33]	
Year	2011		2014			2014	
Method	PUI	MA	PUI	SI	MA	PUI	MA
Device name	Pmax XS	GP cone	Satalec P5 Newtron XS	Endo Activator	GP cone	Satelec P5 Newtron	GP cone
Tip product (size)	IrriSafe (#25/.00)	(#40/.06)	K-file (#15/.02)	(#25/.04)	(#40/.06)	IrriSafe (#20/.00)	(#35/.04)
Working length	wl - 1 mm		wl - 1 mm	wl - 2 mm	NR	wl - 1 mm	wl
Device setting	level 5	100 strokes/ min	level 6	10,000 cpm	100 strokes/ min	level 5	100 strokes/ min
up-and-down movement	NR		NR			NR	
Activation time	60 s NaOCl 60 s EDTA		60 s EDTA 60 s NaOCl			30 s × 2 NaOCl 30 s × 2 EDTA	
Activated irrigant (volume)	2.5% NaOCl (5 ml) 17% EDTA (5 ml)		5% NaOCl (10 ml) 17% EDTA (10 ml)			2.5% NaOCl (5 ml) 17% EDTA (5 ml)	
None-activated irrigant	2.5% NaOCl (4 ml) Distilled water (5 ml)		NR			2.5% NaOCl (6 ml)	
Tooth sample Type	Human mandibular premolars		Human maxillary lateral incisors			Human maxillary first molars (MB root)	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	· Straight · Single root canal		· Single root · Round canal			· Curvature 25 - 35° · Single canal	
Apical canal size	#40/.06		#40/.06			#35/.04	
Evaluation Method	SEM		SEM			SEM	
Main Outcome	MA was significantly more effective than PUI in the apical and coroal thirds, but results were comparable between the groups in the middle third.		In the apical third, PUI showed the highest numerical values followed by SI and MA, but no significant difference was found among the groups. In the middle and coronal third, SI and PUI demonstrated comparable efficacy, whereas MA showed significantly inferior smear layer removal.			While no statistically significance was observed between MA and PUI in the middle and coronal thirds, MA demonstrated significantly superior smear layer removal efficacy in the apical third.	

Table 3. (Continued) Data on smear layer removal

Author	Thapak et al.[51]		Caron et al.[41]		Yilmaz et al.[42]	
Year	2021		2010		2017	
Method	SI	MA	SI	MA	SI	MA
Device name	EndoActivator	GP cone	EndoActivator	GP cone	MM 1500 Sonic	GP cone
Tip product (size)	(#25/.04)	well fitting	(#25/.04 or #35/.04)	NR	Rispisonic file (#15)	NR
Working length	wl - 1 mm	Not reported	NR		wl - 1 mm	
Device setting	10,000 cpm	100 strokes/min	10 kHz	100 strokes/min	NR	100 strokes/min
up-and-down movement	NR		NR		NR	
Activation time	60 s		60 s EDTA 30 s NaOCl		60 s EDTA 120 s NaOCl	60 s EDTA 60 s NaOCl
Activated irrigant (volume)	NR		17% EDTA (1 ml) 3% NaOCl (3 ml)		17% EDTA (5 ml) 5.25% NaOCl (10 ml)	
None-activated irrigant	4% NaOCl (6 ml) 17% EDTA (3 ml) Saline (3 ml)		3% NaOCl (1 ml) Saline (3 ml)		5.25% NaOCl (16 ml) Saline (2 ml)	
Tooth sample Type	Human single rooted premolars		Human mandibular molars mesial root		Human maxillary central incisors	
Model complexity (curvature, isthmus, groove etc.)	Single canal		· Curvature > 20° · Vertucci type IV		Straight root	
Apical canal size	#30/.09		#20-30/.10		#50/.02	
Evaluation Method	SEM		SEM		SEM	
Main Outcome	SI demonstrated significantly superior smear layer efficacy compared to MA across all root canal thirds (coronal, middle and apical).		No statistically significant difference was detected between MA and SI in the apical and middle thirds of the root.		No significant difference between MA and SI was found acrossall the root canal segments (coronal, middle and apical).	

PUI: Passive ultrasonic irrigation; SI: Sonic irrigation; NR: Not reported; GP: Gutta percha; Amp: Amplitude; wl: Working length; SEM: Scanning electron microscope; FESEM: Field emission scanning electron microscope; ESEM: Emission scanning electron microscope.

근관 세척에서의 passive ultrasonic irrigation, sonic irrigation 및 manual dynamic agitation의 비교 – 체계적 문헌 고찰

김민정* 임상조교수
단국대학교 치과대학병원 치과보존과

복잡한 근관구조는 근관의 충분한 세정 및 소독을 위해 효과적인 근관세척 기법을 요한다. Manual dynamic agitation (MA), sonic irrigation (SI) 및 passive ultrasonic irrigation (PUI)과 같은 dynamic irrigation 방법은 임상에서 간단하게 적용할 수 있는 방법이다. 그러나, 이들의 상대적 효과는 연구 간 이견이 존재하여, 이에 본 연구는 최신 문헌들을 기반으로 앞서 언급한 3가지 근관세척 방법에 대한 세균, 치수조직 및 smear layer 제거 효과를 고찰하고자 한다. 본 고찰은 PubMed 데이터베이스를 기반으로 2010년부터 2025년 6월까지 발표된 연구들을 포함하였다. 분석결과, PUI와 SI는 세균 감소에 있어 유사한 수준의 효과를 보이며, MA 보다 우수한 것으로 나타났다. 반면, 치수조직 제거에 있어 저주파 SI 및 MA가 PUI와 대등하거나 더 효과적인 경향을 보였으며, smear layer 제거의 경우 상이한 결과들이 보고되었다.

(구강회복응용과학지 2026;42(1):1-27)

주요어: 수동적 초음파 세척법; 음파 세척법; 수동 교반(manual dyamic agitation); 근관세척

*교신저자: 김민정
(31116)충청남도 천안시 동남구 안서동 단대로 119 단국대학교치과대학병원 치과보존과
Tel: 041-550-0241 | Fax: 041-550-0117 | E-mail: 12180285@dankook.ac.kr
접수일: 2025년 12월 11일 | 수정일: 2026년 1월 12일 | 채택일: 2026년 1월 23일