



마이크로 기포를 포함한 근관 세척 유동 형태의 수치해석 평가

김준현^a, 이찬우^b, 이인환^c, 성재용^{d,*}

Numerical Evaluation of Flow Pattern for Root Canal Irrigation Including Microbubbles

Joon Hyun Kim^a, Chan U Lee^b, Inwhan Lee^c, Jaeyong Sung^{d,*}^a NDT Research Center, Seoul National University of Science & Technology^b Undergraduate Student, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology^c B&L Biotech^d Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 September 2023
 Revised 26 September 2023
 Accepted 27 September 2023

Keywords:

Root canal
 Irrigation needle
 Endodontic treatment
 Air volume fraction
 Effective working length

ABSTRACT

This study has the initial purpose of pursuing the efficiency of endodontic treatment by applying microbubbles to a NaOCl cleaning solution. The effects of average apical pressure and wall shear stress were found to determine the cleaning quality of the root canal. Using a G-30 needle and a flow rate of 0.26 ml/s, met acceptance criteria in apical pressure. In the straight root canal shape, the side-vent type enhanced the smear layer removal area more effectively attributed to the wall shear stress. In curved root canals, the flat open type was beneficial in generating wall shear stress relative to the curvature of the curved canal. In the fluidity of the cleaning solution according to the bubble dissolution, a slight change appeared in the average apical pressure. Due to the G-30 needle's small size in bubble flow, it is imperative to adopt a new Reynolds number when applying microbubbles.

1. 서론

오늘날 치과 치료에서 치아의 세균 오염으로 인한 손상 정도에 따라 다양한 치료법이 적용된다. 손상 정도가 약한 경우 치아의 손상된 부분을 레진이나 금속 등의 생체 친화적인 재료로 치료하고 있으며, 손상이 심한 경우 임플란트 등을 사용하여 본래의 치아 기능을 대체하고 있다^[1]. 그러나 Fig. 1처럼 치아 내부에는 신경과 혈관이 풍부한 연조직인 치수(pulp)가 있으며 치수는 치아 뿌리(치근) 끝까지 뻗어 있다. 세균에 의해 치아우식증(충치)이 발생하여 이러한 치수 부분이 회복 불가능한 경우는 근관치료를 하게 된다^[2,3].

근관치료는 치아 내부의 감염된 치수 조직을 제거하고 대체 재료로 충전하는 치료 방법으로 치아 보존을 위한 수단이지만, 치근단공(apical foramen) 주위는 세척이 어려우며 이로 인해 미생물이 생존하고 있다. 또한 치근 쪽의 부근관(accessory canal)과 근관 벽쪽의 상아세관(dentinal tubule)에도 세균이 잔류할 가능성이 있으며, 치근으로부터 1/3 부위까지의 근관 세척(root canal irrigation)이 중요하다^[4]. 실제 치근 쪽 협착부의 오염 발생 빈도는 치근단에서 5 mm까지 17-50%로 보고되고 있으며, 치근단에서 3 mm까지의 부위에서 가장 유병률이 높다^[5].

세척 과정은 주사기를 사용하여 세척액을 근관 내로 압력을 주

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6398

E-mail address: jysung@seoultech.ac.kr (Jaeyong Sung).

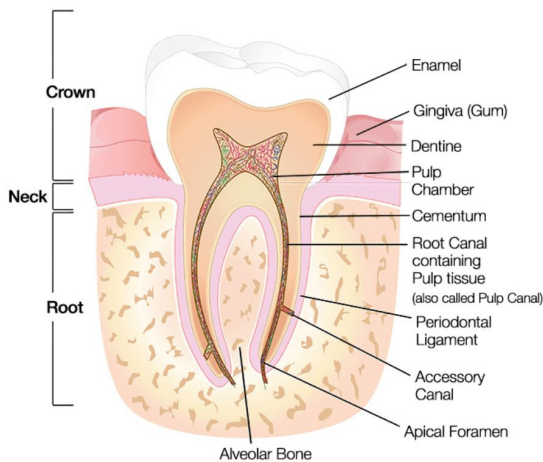


Fig. 1 Anatomy of teeth^[3]

어 주입하는 방식이 가장 많이 사용되고 있으나 부정확한 유량제어와 근관 내 바늘의 깊이에 따른 변수들이 복합되어 정밀성이 떨어지는 문제점이 있다. 무엇보다 세척액을 높은 압력으로 공급하여 치근단 하부가 개방되면 하부와 연결되어 있는 혈관(blood vessels) 쪽에 독성이 있는 차아염소산나트륨(Sodium Hypochlorite, NaOCl) 세척제가 유입되어 부작용 및 심각한 합병증을 유발할 수 있다. 기존의 근관치료의 방법은 다양한 약물의 상호 보완을 통하여 개선이 이루어지고 있으나 근본적으로 근관 내 협부 쪽을 완벽하게 세척(또는 살균)하지 못하고 있다. 최근에는 이러한 이유로 근관 시스템 내에서 기능적으로 세척 할 수 있도록 해주는 새로운 개념 및 장치들이 소개되고 있다. 대체로 단순 수작업에 의한 주사기만이 아닌 기계적 보조 수단으로 이루어지는 방법들이다. 예를 들면 주사기 작동 구조 및 바늘 팁 형상 개선, 마이크로 버블, 초음파, 플라즈마, 레이저 등을 이용하는 것이다^[6,7].

근관 세척 기술은 기계적인 요소(유동에 의한 액상의 침투와 조직의 잔해 제거를 위한 전단 작용)와 화학적인 요소(세균 살정, 도말층-smear layer 제거 용해)의 결합 작용이 치료 효과에 큰 영향을 미친다. 다양한 근관 형태에 대응하여 근관용 바늘(팁)과 세척액을 선택하여 사용하는 것이 현재까지의 주된 근관 치료 방법이다^[6,8]. 세척의 중요한 요인인 침투성을 증가시키기 위해 초음파나 마이크로 버블을 사용하는 연구와 바늘 팁에서의 세척액 공급 방식의 변화를 통한 효율적인 플러싱(flushing)에 관한 연구가 많이 이뤄지고 있다^[9]. 이러한 플러싱 효과를 실증적으로 검증하기 위해 실제 치아나 모형용을 사용하여 근관과 유사한 형태로 가공된 뒤 세균을 배양하고 세척 한 후 임상적으로 그 결과를 비교한다. 또한, 수치해석 및 PIV(particle image velocities) 유동 가시화를 통하여 세척액의 유동 패턴을 고찰하는 방법도 이용되고 있다^[10]. 대부분의 CFD 유동해석에서는 근관 모델에 증류수(distilled water)나 NaOCl과 같은 세척액이 플러싱 하는 과정에서 치근단 협부에 미

치는 압력, 주사기 바늘과 근관 벽 사이로 흐르면서 발생하는 전단 응력 그리고 주사기 팁 형상에 따른 영향을 고찰하였다^[11-13].

본 연구에서는 주사기를 통해 전달되는 기포를 함유하는 세척액(NaOCl 90% + air 10% in volume fraction)을 근관 내로 주입했을 때 나타나는 유동성을 중심으로 근관 세척 효과를 검토하고자 한다. 근관 형상 모델은 이전 연구^[11,12]를 따르며 바늘의 크기는 근관의 크기에 의한 ISO 기준을 적용한다. 근관 내 바늘 위치와 팁의 모양은 끝단 개방형(open end)와 옆면 배출형(side vent)으로 나누어 고찰한다. 기준 규격 바늘과 레이놀즈수를 기반으로 기포를 포함한 세척액의 근관 내 유동 흐름을 살펴본다. 그 결과를 바탕으로 근관 세척에 필요한 임계 수준을 논의하고 기포를 이용하는 근관 치료법에 대하여 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 근관 모델

근관의 기본 형태는 치수 부분의 조직을 근관용 파일(endo file)로 근관계 협착부까지 드릴링 작업으로 제거하여 나타나는 매우 가는 원뿔 형태의 해부학적 공간이다. 근관 모델은 근관 내부에 주사기 바늘(needle)을 일정 깊이 삽입한 형태를 대상으로 한다. 근관은 사람마다 형태가 조금씩 다르며 치아의 위치와 기능별로도 모양이 다르다. Fig. 2에서 제시되는 근관 모델은 동일한 파일로 가공된 직선형과 10° 정도로 끝단으로 휘어진 곡선형 모형의 2가지 모델을 비교하였다. 바늘 팁은 3가지 유형을 적용하였으며, 수평으로 평면 개방, 20° 사선으로 개방, 그리고 측면 개방된 것으로 3가지로 구분된다.

Fig. 3에 대표적으로 Fig. 2(a) A-1 모델을 대상으로 근관 형상과 바늘의 크기 및 삽입 위치에 대한 제원을 변수로 표시하였다. 모델의 세부적인 크기는 이미 많은 연구에서 채택하고 있는 근관 길이(L₁) 19 mm, 정점 직경(D₁) 0.45 mm, 상부 직경(D₂) 1.2 mm로 구성된다^[6,7]. 이는 일반적인 ISO 임상용 근관 기구 기준이다. 근관에 삽입되는 바늘의 크기는 Table 1에 나타낸 바와 같이 5가지 종류를 적용하였다. 바늘은 기본적으로 테이퍼진 원뿔관 형태이며, Gauge 번호가 클수록 바늘의 입출구 직경이 작아진다. 본 연구에서 기본적으로 적용된 바늘은 Gauge-30 (G-30)이며, 바늘의 외경, 내경, 길이는 각각 D₃ = 0.32 mm, D₄ = 0.196 mm, L_{needle} = 31 mm이다. 바늘 팁 위치는 협착부 정점 위치로부터 작동 길이(working length) L_w = 3 mm에 해당하는 근관 중심선에 놓인다.

2.2 수치해석 방법

Fig. 4는 Fig. 2(a)의 근관 내 유체가 흐르는 전체 영역과 단면

Sketch of root canal and syringe(needle)						
Tip type	(a) A-1	(b) A-2	(c) A-3	(d) B-1	(e) B-2	(f) B-3
Root canal type	straight	straight	straight	curvature 10°	curvature 10°	curvature 10°

Fig. 2 Canal irrigation and needle models: (a) and (d), open-ended flat; (b) and (e), taped open-ended; (c) and (f), side vented

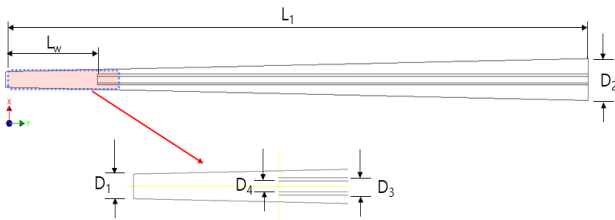


Fig. 3 Root canal model dimension of A-1(straight type)

Table 1 Endodontic irrigation needle gauge

	Gauge #	D ₃ (mm)	D ₄ (mm)	D ₂ (mm)	Re _{in}
Ⓐ	G-30	0.32	0.196	1.2	1413
Ⓑ	G-27	0.42	0.24	1.8	2012
Ⓒ	G-25	0.53	0.32	2.6	805
Ⓓ	G-23	0.64	0.42	3.5	1056
Ⓔ	G-20	0.92	0.60	5.0	503

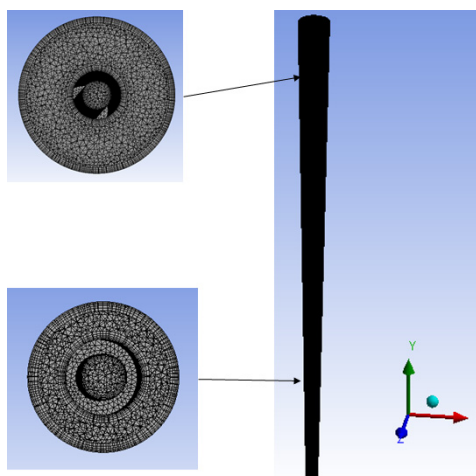


Fig. 4 The mesh for the computational domain of A-1(straight type)

격자 모양이다. 바늘의 두께 영역(고체)은 제외되었다. 유체영역은 높이 방향 기준으로 바늘 내부통로의 일부 영역, 바늘 팁 아래쪽 밀폐된 협착부 정점(apical stop)에서 작동 길이(working length) 까지 영역 그리고 근관 벽(canal wall)과 바늘 외경 사이에 존재하는 나머지 영역으로 구성된다. 유동해석을 위해 사용한 프로그램은 CFX 18.2이다. 기존 연구^[7,14]에서 미세 기포가 침투성을 증가시켜 치근 협착부(부근관, 상아세관 포함)에 잔존하는 세균을 살균하는 효과가 있다고 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 공기가 포함된 기포수를 작동유체로 사용하였으며, 이를 위해 volume of fluid(VOF) 2상 유동 해석 기법을 다음과 같이 적용하였다.

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \tag{1}$$

$$\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l \tag{2}$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} \tag{5}$$

여기서 식(1)은 각각 물질 전달을 위한 방법은 체적(V)에 대한 각 상의 체적이 차지하는 체적율($\alpha_i = V_i / V$, $i = l, g$)을 나타낸다. 아래 첨자 g와 l은 각각 기상과 액상을 뜻한다. 식(2)-(3)은 혼합 물성값인 밀도(ρ)와 점성(μ)을 각각 나타내고, 식(4)의 연속

Table 2 Conditions for numerical analysis

Parameters	Conditions
Analysis mode	Steady state
Fluid (NaOCl, air, 25°C)	
NaOCl	Density, 1.09 g/cm ³
	Viscosity, 0.0013 Pa · s
Turbulence model	<i>k-ε</i>
Inlet	Velocity: 8.6 m/s Volume fraction: NaOCl 0.9, air 0.1
Outlet	Pressure outlet (atmosphere)
Wall slip	Smooth

방정식과 식(5)의 운동방정식들에 활용된다. 2상 유동에서 초기에 존재하고 있는 액상이 기본적인 상이 되고 여기에 낮은 비율로 존재하는 공기가 부가적 상으로 *disperse flow*가 된다. 식(5)에서 \vec{F} 와 $\vec{\tau}$ 는 각각 외부적인 힘과 점성 응력 텐서이다.

Table 2에 해석조건, 물성값 및 경계조건 조건을 정리하여 나타내었다. 해석은 3-D 비압축성 정상상태 조건에서 수행되었다. 바늘 주입부에서의 레이놀즈수(Re_m)는 1413이며, 팁 토출 주변부에서의 레이놀즈수가 3244이므로 난류 유동을 위해 *k-ε* 난류 모델이 사용되었다. 경계조건으로 근관 벽은 미끄럼 방지 경계조건이 적용되었다. 또한, 상부 근관이 노출되는 지점과 동일한 주사

기 세관 수평 위치를 inlet으로, 노출되는 근관 최상부를 outlet으로 설정하였다. 입구 유속은 8.6 m/s로 일정하게 설정하였다. 이는 G-30 바늘을 통한 0.26 ml/s의 임상적인 사용량에 의한 irrigation 유속과 일치한다.

본 계산 모델의 격자수는 A-1 경우 258만개 node 수이며 수치 계산 수렴 조건은 10⁻⁴가 적용되었다. 격자 밀도에 따른 수치해석 신뢰성은 협착부 정점(apical stop)의 평균 압력의 수렴 상태로 판단하였다. 본 연구의 A-1 근관 형태에서 평균 정점 압력(100% 적용 액상의 경우 11.84 kPa, 90% 적용 액상의 경우 11.74 kPa)은 동일한 근관 모델에서의 기존연구^[8,15]와 비슷한 값을 가짐을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 근관 및 바늘 팁 형태에 따른 유동 특성

Fig. 5는 G-30 바늘을 적용하고 2가지 근관 모형(직선형, 끝단 10° 곡선형)과 3가지 바늘 팁 형상(수평 개방, 20° 사선 개방, 측면 개방)에 대해 근관 내부의 유동 특성을 보여주고 있다. 바늘 팁 위치는 공통으로 협착부 정점으로부터 수직으로 3 mm 떨어진 곳이며, 90% 체적율의 NaOCl을 적용하고 주입 속도는 같은 8.6 m/s로 주었을 때 팁 또는 근관 모양별로 다르게 형성되는 속도와

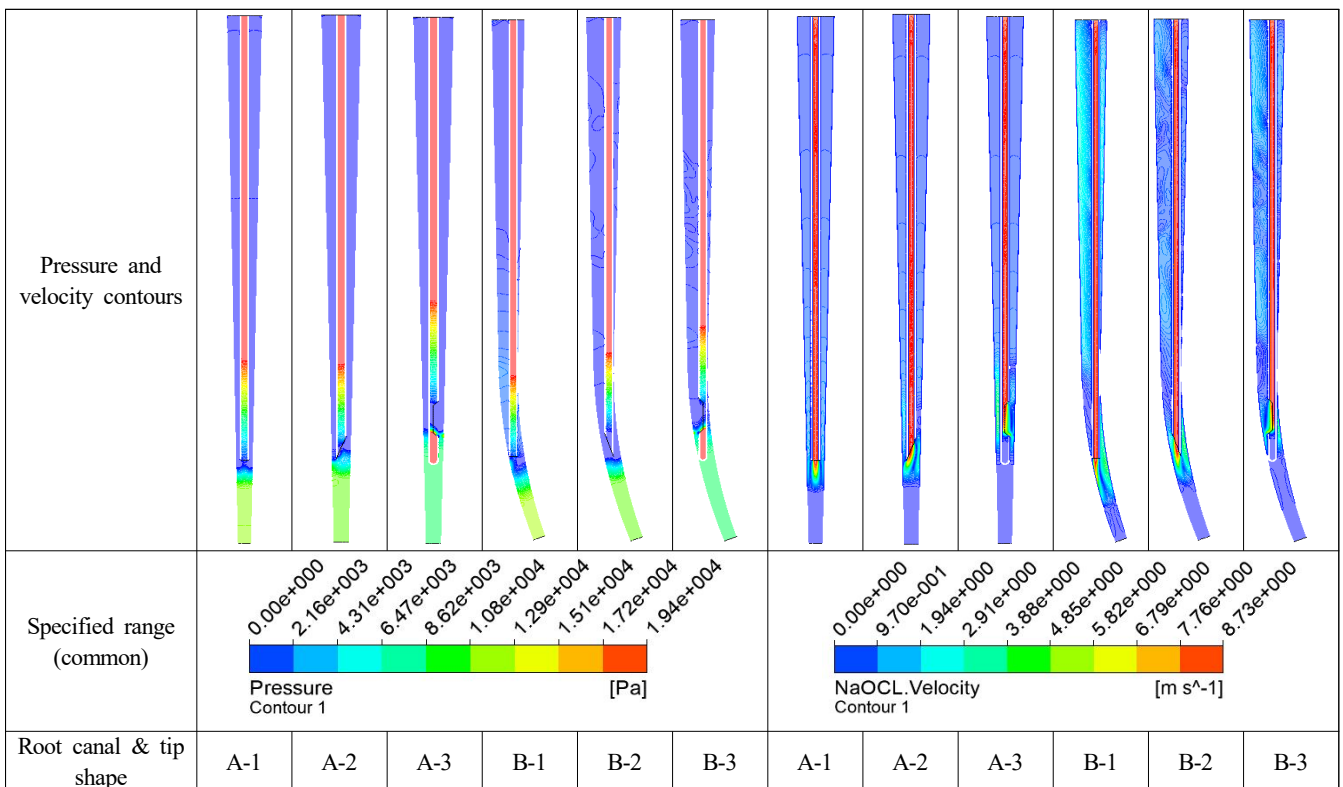


Fig. 5 Velocity and pressure distribution in the root canal when 8.6 m/s inlet speed and an initial 90% volume fraction of NaOCl (air 10%) are applied

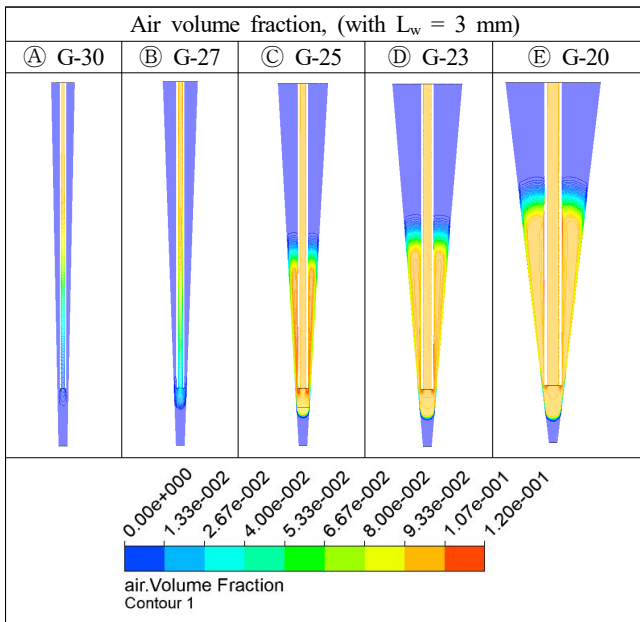


Fig. 6 Air volume fraction within root canal with an initial dissolved air(10% vol) and different Reynolds numbers in the working length zone of A-1 case

압력 분포이다. 그림에서 알 수 있듯이 해당 근관 공간(경사각)에 G-30을 사용하는 경우 바늘의 지름이 작아 근관 내 유동 흐름은 주로 토출이 이루어지는 팁의 개방부 주변에 집중되어 나타났고, 협착부 작동 길이 영역(working length zone) 내에서 vapor lock 이 나타나면서 세척액의 흐름이 더 이상 협착부 정점까지 충분히 진행되지 않는다. 다만, 수평 개방 팁을 사용하고 곡선형 근관에 적용하였을 경우(B-1) 관성력에 의해 유동이 협착부 정점에 더 다가가는 효과는 있다.

주된 발명의 온상지인 협착부 1/3 영역(0 ~ 6 mm)에 대한 세척 효율성을 위해 여러 방안이 제시되고 있고, 그중 하나가 마이크로 기포를 이용하여 침투성을 개선하는 것이다. 이를 위해 세관을 통하여 근관 내부로 진입하게 되는 미세 기포를 포함한 흐름의 경우를 고려해야 한다. Fig. 6은 직선형 근관에 10% 기포율을 가진 세척액을 Table 1과 같이 제원이 다른 바늘과 이에 호환되는 근관 모델을 사용하여 레이놀즈수를 달리 적용했을 때 3 mm 위치의 팁 주변부 작동 길이 전후 영역에서의 기포율 분포이다. G-30와 근관 규격 모델에 적용되는 0.26 ml/s 유량(레이놀즈수 1413)인 경우 바늘에 있는 세척액 속의 기포들이 G-30 바늘의 세관을 통과하면서 근관 내에서는 기포율이 크게 저하 되었다. 이는 세관에 발생하는 압력이 상승함에 따라 공기 용존에 필요한 기체 압력(vapor pressure)에 영향을 준 것으로 보인다. 이는 근관 직경이 점차 커지면서 해소되어 G-25 ~ G-20 경우에는 레이놀즈수 1000 이하에서도 충분히 근관 내 10% 기포율이 일정 근관 영역에서 유지됨을 알 수 있다.

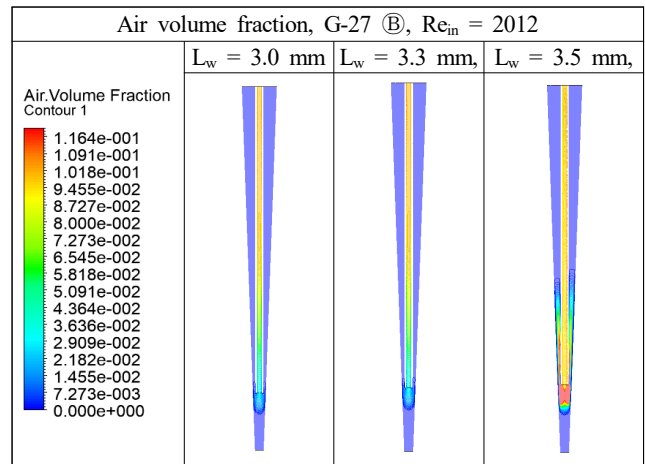


Fig. 7 Air volume fraction within root canal with an initial dissolved air(10% vol) and a Reynolds number of 2012 at different working lengths of Table 2 B case

Fig. 7은 G-27 B를 대상으로 팁의 위치를 관심 영역인 협착부 3 ~ 3.5 mm 이내로 접근시키고 레이놀즈수 2012($V_{in} = 10$ m/s)를 적용했을 때 근관 내 기포율에 대한 비교이다. 앞서 G-30 세관일 경우 기포가 포함된 세척액을 팁을 협착부 3 mm로 접근하여 공급했을 때 기포의 유동성에 크게 제한된 부분이 있었지만, G-27 세관에 레이놀즈수 2012를 적용한 경우에서도 기포율은 근관 내부에서 여전히 낮다. 이에 대하여 팁의 위치인 작동 길이(L_w)를 3.3 mm을 거쳐 3.5 mm까지 확대 적용했을 때 3.5 mm에서 기포율이 유지되었다. 이 조건에서는 레이놀즈수 1056을 적용할 때도 기포율이 확보되었다.

3.2 근관 내부 세척에 필요한 임계 수준

Table 3의 계산 결과는 협착부 치근단공이 개방되지 않도록 설정된 G-30 사용 조건에 근거하여 근관 모델 내부에 세척액을 주입할 때 정점에 미치는 평균 정점압력이다. 모델별로 협착부 정점에 작용하는 평균 정점압력이 대체로 10 kPa 수준을 상회하게 되고 이로 인해 유동은 아래 정점 쪽으로 더 이상 진행하지 못하고 역순환 되어 바늘과 근관 벽의 틈새를 따라 상부로 이동하면서 벽에 대한 세척 전단 작용을 한다. 여기서 팁의 위치를 정점 쪽으로 이동하거나 주입 속도에 의한 세척액 양을 늘리면 협착부 정점 가까이 세척액을 전달하는 효과가 증가하지만, 정점에서 허용 수준 이상의 압력을 받으면 정점 아래쪽 치근단공이 개방된다.

서론에서 밝혔듯이 정점으로부터 협착부 작동 길이 영역에서는 유동이 정체됨에 따라 세척이 어렵고 유병율이 높다. 그리고 G-30 사용 조건만으로는 기포율의 변화에 큰 차이가 없이 평균 정점압력이 형성되고 있으나 곡선형 근관에서는 기포의 존재로 인한 차이가 두드러지게 나타났다. 이는 이 근관 모양이나 바늘 팁의 개방 형태에 따라 치근 벽 쪽으로 작용하는 흐름이 집중되어 협착부 영

Table 3 Average pressure at the apical stop

Initial NaOCl volume fraction(%) in the needle	80	90	100
Root canal and tip type	Average apical pressure (kPa)		
A-1	11.65	11.74	11.84
A-2	11.04	11.07	11.09
A-3	9.19	9.25	9.33
B-1	11.05	12.46	14.35
B-2	9.86	10.97	12.16
B-3	9.45	9.57	10.71

역 내 진입이 상대적으로 용이하기 때문이다. Table 3의 결과를 보면 가장 높게 정점 쪽으로 영향을 주는 직선형 근관에서 수평 개방형의 경우 기포 사용에 따라 미미한 영향을 받지만, 최대 평균 정점압력 11.84 kPa를 그리고 곡선형 근관에서는 14.35 kPa까지 증가한 결과를 보여주고 있다. 이는 G-30을 적용하여 연구한 Li 등^[16]이 제시한 결과인 10 kPa 수준과 비교해도 유사한 결과이다. 여기서 임상학적으로 요구되는 정점 평균 정점압력 이내로 유지된다면 안전한 근관 세척을 수행할 수 있다.

근관 세척의 품질 향상의 직접적 수단은 근관 내의 적정 유동에 의한 근관 벽 전단 응력을 확보하는 것이다. 이를 위해서 가장 필요한 형상학적인 요인은 근관 파일에 의한 공간과 이 공간에 삽입되어 위치하는 바늘이다. 그리고 부가적인 요인으로 유량과 토출 방식이다. 여기서 중요한 점은 이러한 요인들을 적용하여 협착부 정점압력을 허용 수준 이하로 유지하면서 근관 벽에서 얻는 일정 이상의 전단응력을 얻는 부분이다. 근관 가공 시 발생하여 상아 세관을 덮고 있는 도말층은 기구를 사용하는 동안 상아질에 형성된 파편(debris)의 표면 축적물이다. 유기 성분과 무기 성분으로 구성되어 있으며 느슨하게 정착된 층과 깊고 단단히 정착된 층을 모두 형성하고 있어 이를 세척액으로 화학적과 물리적으로 동시에 제거하는 것이 필요하다.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (6)$$

벽 전단 응력은 식(6)과 같이 점도와 속도구배에 의존한다. 5.25% 농도의 NaOCl은 동적 점도가 물에 비해 현격히 떨어지므로 벽 전단 응력을 증가시키기 위해서는 근관 내부 벽에 집중되는 속도 증가가 필요하다. 근관 벽 가까이 속도 증가는 속도 구배의 증가를 의미하기 때문에 점성의 요인들이 잘 조합되어 사용되어야 한다.

Fig. 8은 G-30 사용에 의한 근관-팁 형상별 근관 벽에 작용하는 벽 전단응력 분포를 보여준다. 전체적으로 팁 토출구 주변으로 근관 벽 전단 응력이 집중되어 있으며, 각각의 형태별로 작동 길이 전후 영역에서 벽 전단 활성 영역을 표현하고 있다. 동일한 조건과

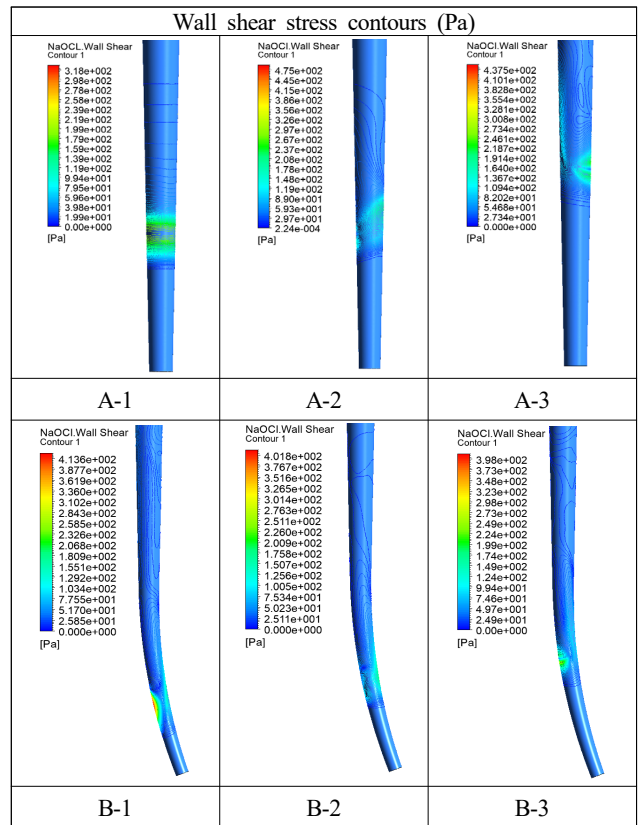
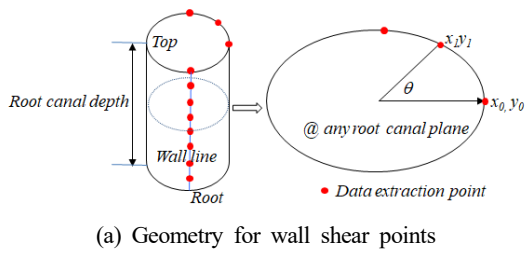


Fig. 8 Wall shear stress distribution at the wall of root canal when 8.6 m/s injection speed and 90% volume fraction of NaOCl (10% air volume fraction) are applied

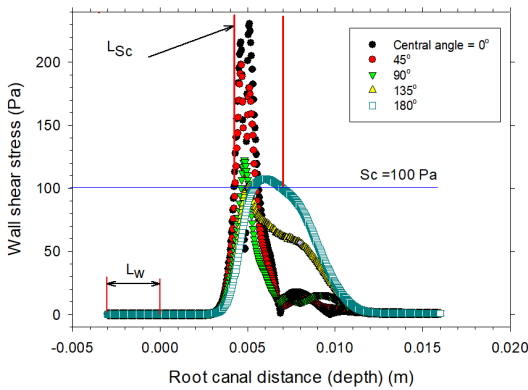
유량(0.26 ml/s)을 적용했지만 본 연구에서 채택한 모델들에서는 최대 벽 전단 응력은 약 318 Pa에서 475 Pa까지 차이를 보여주고 있다. 특히 A-3 형태의 근관과 팁을 사용하여 계산되는 벽 전단 응력은 최대 400 Pa 이상으로 계산된 Yu 등^[13]의 이전 연구 결과와도 유사하다. 결과적으로 벽 전단 응력의 증가는 세척 품질의 향상을 의미는 있으나 작동 길이 전후 영역 (0 ~ 6 mm)에 적용하는 비율이 높아야 한다.

최대 벽 전단 응력이 세척에 필요한 하나의 지표이지만 또한 위치별로 최소 벽 전단 응력이 적용하는 유효한 영역에 대한 고찰이 필요하다. Fig. 9(a)와 같이 기하학적으로 임의의 근관 평면에서 일정한 중심각(θ)에 의해 형성되는 벽의 원주 선상에 위치하는 점들(x_0, y_0), (x_1, y_1), ...을 정점에서 19 mm의 높이(깊이)까지 이르는 근관 벽의 line으로 각각 공유 연결하여 여기에 해당하는 중심각별로 line 데이터(wall shear stress)를 추출하였다. Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)는 각각 A-3와 B-1 모델을 근관 깊이에 따른 벽 전단 응력을 중심각(정면 뒤, 측면, 대각선 위치 등) 별로 표현했다. 여기서 근관 벽의 협착부 정점에서 최상부 위치까지 벽에 작용하는 벽 전단 응력의 적용 크기와 변화 추이를 각각 알 수 있다.

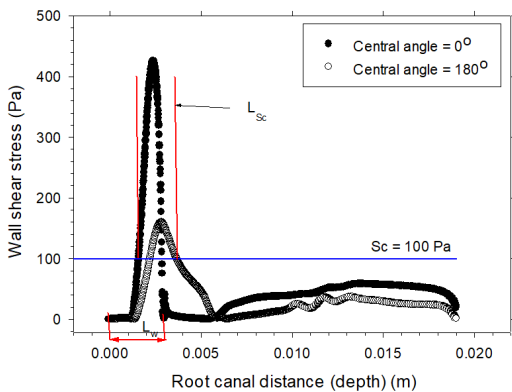
Fig. 9(b)에서 직선형 근관에 측면 배출형 바늘을 사용했을 때



(a) Geometry for wall shear points



(b) Side vent type (A-3)



(c) Flat open type (B-1)

Fig. 9 Effective working length by the wall shear stress in axial distance of straight and curvature canal types

중심각에 따라 나타나는 벽 전단 응력 결과를 이전 연구^[13]에서 제시한 임상적 요구 벽 전단 응력($Sc = 100 \text{ Pa}$)을 넘어서는 유효 영역인 L_{Sc} 를 보여주고 있다. A-3인 측면 배출형은 실질적으로 협착부 적용 영역($L_w = 3 \text{ mm}$)보다 도말층 집중 제거가 필요한 부분의 유효 벽 전단 응력 영역(L_{Sc})을 확보하기 위해 팁이 설계된다. 45° 간격의 중심각으로 절반의 원주 길이 내에서 해당하는 점을 대상으로 표현을 하고 있다. 직선형 근관에서 측면 배출형 팁은 아래의 면이 폐쇄되기 때문에 평균 정점압력을 낮추는 대신 유효 벽 전단 응력이 작용하는 범위를 넓힐 수 있는 유동 패턴의 효과를 가진다. 현재 측면 토출 위치가 팁의 끝단 작동 길이 수준보다 3 mm 더 높은 위치에 있다. 그리고 토출구 슬릿(slot)을 다양하게 설계함으로써 L_{Sc} 범위를 확대할 수 있다. 실제 A-3 형태에서도

측면 토출 후에 세척액의 일부가 등근 팁 외부 하단부를 타고 작동 길이 영역 안으로 순환하면서 진입하는 사례 연구도 있다^[13]. 이 경우는 팁의 작동 길이 위치를 무엇보다도 중요한 변수로 작용하기에 가능하다.

Fig. 9(c)는 같은 방식으로 곡면을 갖는 근관(B-1)에 적용했을 때 벽 전단 응력의 유효 영역인 L_{Sc} 를 추정하고 있다. 직선형 경우와는 달리 끝단이 10° 의 curvature로 이루어지는 곡선의 근관 벽에 존재하는 측면 라인을 중심각별로 모두 기하학적으로 설정이 곤란하여 팁 측면에서 근관 벽 정면으로 토출되는 방향(front side, 0°)과 반대 방향(back side, 180°)을 고려하였다. 팁을 곡관의 근관 내 정점으로부터 3 mm 까지 접근하는 작동 길이(L_w)를 가질 때 토출되는 유효 전단 영역(L_{Sc})은 절반 정도의 L_w 를 포함하는 것으로 분석되었다. 곡선형의 근관에서는 수평 개방형의 팁의 사용이 평균 정점압력을 크게 상승시키지 않으면서 최대 벽 전단 응력에서는 차이가 없이 유효 전단 영역을 L_w 쪽으로 포함하는 데 유리함을 알 수 있다. 여기서 근관의 형태에 따라 바늘의 팁 선택은 정점압력과 벽 전단 응력의 크기와 유효 전단 범위에 관여되어 사용 조건과 더불어 세척 과정에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 근관 세척/치료에서 3 mm 이내 작업 영역의 중요성을 고려한다면 레이놀즈수에 맞게 조정되어 반드시 유동은 작동 길이 영역에서 역순환되어 L_{Sc} 영역이 시작되어야 한다. 무엇보다도 기포 운명에 있어서 작동 길이 영역에의 운동성은 바늘의 세관 크기와 레이놀즈수에 매우 좌우되고 근관 내 세척에 있어서 절대적으로 필요한 요소여서 100% 세척액 적용 때와는 달리 새로운 관계 정립이 필요하다.

4. 결론

근관 치료에 가장 효과적인 화학적 작용 도구인 세척제 차아염소산나트륨(NaOCl) 5.25%에 마이크로 기포를 용존시킨 세척액 유동을 근관 모델에 적용하여 수치적으로 검토하기 위하여 국제기준에 부합되는 근관과 바늘 크기와 바늘 내 주입 유량에 의한 레이놀즈수를 기본으로 하여 결정되는 평균 정점압력과 벽 전단 응력 크기 및 영향을 분석하였다.

주입 레이놀즈수 1413과 G-30 바늘을 사용하는 경우 3 mm 떨어진 팁 토출 위치에서 협착부의 평균 정점압력 허용 기준을 충족하게 되면서 직선형 근관에서는 평면 개방형 및 사선 개방형 팁보다는 목적 설계된 측면 배출형 팁은 벽 전단 응력에 의한 도말층 제거 유효 전단 영역을 늘리는데 효율적인 것으로 해석되었다. 곡선형 근관에서는 곡관 curvature 정도에 따라 평면 개방형이 작동 길이 영역을 더 포함하는 유효 전단 영역을 가지는 부분도 있었다.

또한 기포의 용존 정도에 따른 세척액의 유동성 평가에서 평균





정점압력으로 나타나는 결과를 볼 때 미미한 변화가 존재하였다. 그러나 근관 내 체적율 기준으로 볼 때 규격 기준인 G-30 세관 바늘 적용은 버블 유동에 사용하기에는 조건으로는 미흡한 것으로 판단되어 마이크로 기포 적용 시에는 근관-팁에 따라 새로운 레이 놀즈수를 적용해야 한다.

후 기

이 연구는 2022년 한국연구재단 개인기초연구사업(기본연구) 과제번호 2022R1F1A1071016의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Yim, M. Y., 2021, viewed 17 July 2023, Healthcoach, To Save and Preserve as much as Possible ‘Natural Teeth’ that Cannot be Replaced, Healtip, <<http://www.healtip.co.kr/news/articleView.html?idxno=3000>>.
- [2] Chan, W.-S., Gulati, K., Peters, O. A., 2023, Advancing Nitinol: From Heat Treatment to Surface Functionalization for Nickel-Titanium (NiTi) Instruments in Endodontics, *Bioact. Mater.*, 22 91-111, <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.09.008>.
- [3] Beachside Complete Dental Care, 2020, viewed 7 March 2023, Anatomy of Teeth, <<https://beachsidedental.com.au/blog/anatomy-of-teeth/>>.
- [4] Lee, I. H., 2012, viewed 18 July 2023, Clinical Insight, Irrigation, Emerging as the Key to Success in Root Canal Treatment, DenfoLine, <<https://www.denfoLine.co.kr/news/articleView.html?idxno=6870>>.
- [5] Moon, H. -J., Hong, C. -U., 2012, Effects of Canal Enlargement and Irrigation Needle Depth on the Cleaning of the Root Canal System at 3 mm from the Apex, *Restor. Dent. Endod.*, 37:1 24-28, <https://doi.org/10.5395/rde.2012.37.1.24>.
- [6] Haapasalo, M., Shen, Y., Qian, W., Gao, Y., 2010, Irrigations in Endodontics, *Dent. Clin. North Am.*, 54:2 291-312, <https://doi.org/10.1016/j.cden.2009.12.001>.
- [7] Sung, G., Sung, J., Lee, M., 2016, Development and Performance Test of a Micro Bubble Irrigation System for Root Canal Cleaning of Tooth, *Journal of the Korean Society of Visualization*, 14:1 40-45, <https://doi.org/10.5407/JKSV.2016.14.1.040>.
- [8] Liu, L., Ye, W., Shen, C., Yao, H., Peng, Q., Cui, Y., Khoo, B. C., 2020, Numerical Investigation of Irrigant Flow Characteristics in Curved Root Canals with Computational Fluid Dynamics Method, *Eng. Appl. Comp. Fluid Mech.*, 14:1 989-1001, <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1792349>.
- [9] Zhou, N., Huang, Z., Yu, M., Deng, S., Fu, B., Jin, H., 2022, Influence of Needle Working Length and Root Canal Curvature on Irrigation: A Computational Fluid Dynamics Analysis Based on a Real Tooth, *BMC Oral Health*, 22:1 179, <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02205-2>.
- [10] Pereira, M. R., Silva, G., Semiao, V., Silverio, V., Martins, J. N. R., Pascoal-Faria, P., Alves, N., Dias, J. R., Ginjeira, A., 2022, Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics Model Using Micro-Particle Image Velocimetry of the Irrigation Flow in Confluent Canals, *Int. Endod. J.*, 55:12 1394-1403, <https://doi.org/10.1111/iej.13827>.
- [11] Boutsioukis, C., Gogos, C., Verhaagen, B., Versluis, M., Kastrinakis, E., Van Der Sluis, L. W. M., 2010, The Effect of Apical Preparation Size on Irrigant Flow in Root Canals Evaluated Using an Unsteady Computational Fluid Dynamics Model, *Int. Endod. J.*, 43:10 874-881, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2010.01761.x>.
- [12] Hu, S., Duan, L., Wan, Q., Wang, J., 2019, Evaluation of Needle Movement Effect on Root Canal Irrigation Using a Computational Fluid Dynamics Model, *Biomed. Eng. Online*, 18 52, <https://doi.org/10.1186/s12938-019-0679-5>.
- [13] Yu, M., Huang, Z., Zhou, N., Xu, Z., Deng, S., Jin, H., 2020, Effect of Inflow Temperature on Root Canal Irrigation: A Computational Fluid Dynamics Study, *Physics Fluids*, 32:8 081903, <https://doi.org/10.1063/5.0014737>.
- [14] Nam, S., Lee, H., Sung, J., 2019, Measurements of Shape Oscillations on a Micro Bubble Surface by Ultrasonic Excitations, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B.*, 43:8 591-598, <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2019.43.8.591>.
- [15] Bulgu, S., Yıldızeli, A., Çadırıcı, S., Yıldırım, S., 2022, Computational Investigation of the Tip Effects of Various Root Canal Needles on Irrigation Performance, *Essentials of Dentistry*, 1 30-37, <https://doi.org/10.5152/EssentDent.2021.21007>.
- [16] Li, P., Zhang, D., Xie, Y., Lan, J., 2013, Numerical Investigation of Root Canal Irrigation Adopting Innovative Needles with Dimple and Protrusion, *Acta of Bioengineering Biomechanics*, 15:1 43-50, <https://doi.org/10.5277/abb130106>.

	<p>Joon Hyun Kim Research Professor in NDT Research Center, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Tribology and Thermal Fluid. E-mail: joonk61@seoultech.ac.kr</p>
	<p>Chan U Lee Undergraduate Student in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Biomechanics and Fluid Dynamics. E-mail: chanw158256@gmail.com</p>
	<p>Inwhan Lee CEO, BNL Biotech. His research interest is Endodontic Treatment in Root Canal. E-mail: superendo@bnlbio.com</p>
	<p>Jaeyong Sung Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Flow Visualization. E-mail: jysung@seoultech.ac.kr</p>