

터빈 로터 반사각에 따른 의료용 에어터빈 핸드피스 성능에 관한 수치 해석

이정호* · 이상도** · 김귀순***

Numerical Analysis on Performance of Dental Air Turbine Handpiece for Various Reflection Angles of Turbine Rotor

Jeong-ho Lee*, Sang-do Lee**, Kui-soon Kim***

Key Words : Dental air turbine handpiece(치과용 에어터빈 핸드피스), performance(성능), pressure(압력), flow(유동), turbine rotor(터빈 로터), reflection angle(반사각)

Abstract

Dental high-speed air turbine handpieces have been used as a dental cutting tool in clinical dentistry for over 50 years, yet little study has been reported on their flow and performance analysis. Therefore it is necessary to investigate turbine for the performance improvements of an air turbine handpiece. This paper presents pressure on turbine rotor and flow analysis in air turbine handpiece using CFD (computational fluid dynamics). Characteristics on each flow and pressure for four various reflection angles of turbine rotor are presented, and then performance change is analyzed about air turbine handpieces by CFD results.

1. 서론

의료용 고속 에어터빈 핸드피스는 치아를 절삭하는 도구로써 지난 1957년 소개된 이후로 현재까지 치의학 분야에 넓게 사용되어 왔다[1,2]. 이러한 핸드피스의 성능에 대한 연구는 간혹 있어왔지만, 그 수가 많지 않다. 그리고 현재 시중에 사용되고 있는 핸드피스들의 성능을 비교, 분석하는 정도에 그치고 있다[3]. 더욱이 국내에서는 일본, 독일 등의 나라에서 오랜 경험을 바탕으로 제작된 고가의 핸드피스 장비를 그대로 수입하여 사용하고 있고 핸드피스에 관한 연구는 전무한 실정이다. 이에 따라 의료용 핸드피스의 국산화를 위해서 핸드피스의 성능연구가 선행되어야 한다.

핸드피스의 터빈부분은 핸드피스가 작동하는 주요 구동부분으로 치아를 깎는 날을 고속으로 회전시켜주는 역할을 한다. 핸드피스의 터빈은 핸드피스와 연결된 공기유입장치에서 나온 압축된 공기에 의해 작동된다. 2bar 이상의 고압 공기가 터빈의 로터 부분에 힘을 작용하여 그 힘에 의해 회전된 터빈이 핸드피스의 구동축을 돌리며 치아를 깎게 되는 것이다. 일반적으로 모터를 사용하는 핸드피스가 3,000 ~ 40,000rpm범위에서 사용되는데 반해, 에어터빈 핸드피스는 압축된 공기를 이용함으로써 250,000rpm ~ 500,000rpm범위에서 작동할 수 있어 고속 핸드피스라고 불린다. 결국 핸드피스의 성능을 좌우하는 중요 요인 중 하나가 터빈의 특성이며, 터빈 로터의 형상에 따라 핸드피스 성능이 좌우될 수 있다. 그래서 이 논문에서는 터빈 로터에 따라 핸드피스의 성능이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

2. 사전 분석 및 수치계산방법

2.1 핸드피스 사전 분석

터빈은 핸드피스의 헤드 부분에 위치해 있는데 그 크기가 반지름 3.5 - 5.6mm 정도 이다[4]. 전체적인 터빈부의 치수는 현재 시중에 사용되는 있는 핸드피스 제품을 기본 모델로 하였다. Fig. 1의 (a)와 (b)에서 보이는 것이 헤드부분의 형상이며 내부의 터빈의 치수는 Table. 1과 같다.

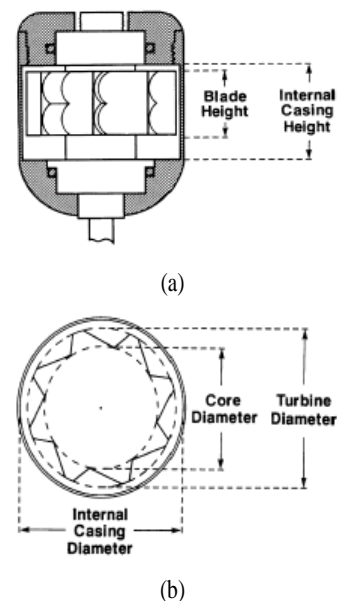


Fig. 1 Cross section of handpiece head : (a) perpendicular plane, (b) horizontal plan

* 부산대학교 항공우주공학과, aerohoya@pusan.ac.kr

** 부산대학교 항공우주공학과, sangdo@pusan.ac.kr

*** 부산대학교 항공우주공학과, kuskim@pusan.ac.kr

Table. 1 measurement of turbine

| 단위(mm) | | | | |
|----------------|----------------|-------------|---------------|---------------|
| Turbine radius | Turbine height | Core radius | Casing radius | Casing height |
| 4.5 | 2.6 | 3 | 4.6 | 4.4 |

대부분의 핸드피스 터빈은 유로의 형태상 유입된 공기에 의해 radial flow 방향으로 회전하게 된다. 이런 radial flow 방향의 회전은 수력학부분에서의 Pelton wheel의 운동 원리와 유사함을 보인다. Pelton wheel은 Fig. 2와 같은 형태로 유체의 힘을 이용하여 수력발전을 하는 시설이다. 물론 핸드피스가 Pelton wheel과 다르게 물이 아닌 공기를 이용한다는 면에서 비압축성 유체와 압축성 유체의 특성 차이를 보인다. Pelton wheel은 유입되는 유체에 의해 처음으로 부딪히는 bucket에서 대부분의 힘을 받아 토크를 발생시킨다.

$$F_B = 2\rho V_j A_j (V_j - V_B)(1 - \cos\Theta) \quad (1)$$

식. (1)은 Fig. 2와 같이 control volume을 잡았을 때 노즐부에서 나오는 유체에 의해 bucket에 발생하는 x방향의 힘을 나타내는 공식이다[5]. 여기서 ρ 는 유체의 밀도, V_j 는 유체의 속도, A_j 는 단면적, V_B 는 bucket의 회전속도, Θ 는 반사각이다. 식에서 보듯이 유체가 bucket, 즉 turbine rotor에 부딪혀 다시 되돌아 나오는 반사각에 의해 성능이 좌우됨을 알 수 있다. Pelton wheel의 반사각에 따른 성능변화가 핸드피스 터빈의 운동에도 비슷한 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

Table. 1의 전체적인 치수를 바탕으로 하여 Fig. 3과 같이 turbine rotor의 반사각을 90°-120°까지 변경하면서 설계를 하였다. 반사각이외의 다른 수치들은 고정하여 변경하지 않았기 때문에 초기 설계치수 내에서 로터의 두께를 고려한 반사각은 120°가 최대한도 각도가 되었다.

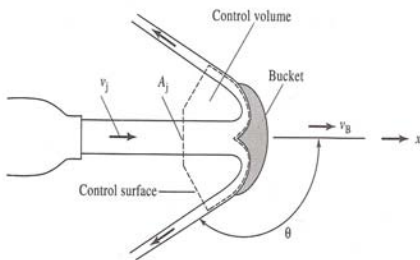


Fig. 2 Concept of Pelton wheel

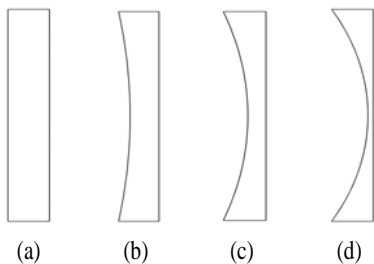


Fig. 3 Turbine rotor for reflection angles : (a) 90°, (b) 100°, (c) 110°, (d) 120°

2.2 수치적 계산 방법

현재 핸드피스 터빈의 형상은 제품에 따라 다양한 로터를 가지고 있다. 핸드피스 제조 회사에서 시행착오법으로 발전시킨 것이 대부분으로[4] 이에 대한 형상 분석이 필요하다. 다양한 로터 형상에 분석이 필요하므로 실제 실험이 아닌 전산해석을 이용한 해석의 필요성이 부각된다. 실제 실험을 통한 분석에는 터빈부의 형상이 일반적으로 쓰이는 터빈보다 아주 작기 때문에 발생하는 제작의 어려움, 공차의 영향으로 인해 결과 데이터가 고르지 못한 점, balancing 과정에서의 터빈 로터의 변형에 따른 문제점 등이 발생하기 때문이다. 전산해석을 이용하여 제작의 문제점 없이 쉽게 로터의 형상을 변화시켜 다양한 결과 데이터를 얻을 수가 있었다.

본 연구에서는 유한체적법(FVM)을 기반으로 개발된 상용 코드인 FINE μ Turbo를 이용하여 수치적 해석을 하였다. 수치해석을 하는데 있어서 있어 우선 터빈이 고정된 형태로 있다는 전제하에 정상상태 조건으로 계산하였다. 노즐로 들어오는 유동이 큰 간섭을 받지 않고 로터에 부딪힐 수 있도록 터빈각도를 고정하였다.

전체적인 계산에서는 Turbulent Navier-Stokes 방정식이 사용되었다. 수치적 기법에 있어서는 시간에 대해서 4차 explicit Runge-Kutta 적분법을 적용하였고, 공간에 대해서 중심차분법을 이용하였다. 또한, 수렴을 가속시키기 위해 3단계의 다중격자법(multigrid method)을 적용하였다. 난류모델로는 전체 계산시간 절약을 위해 Baldwin-Lomax 을 사용하였는데 이는 간단한 대수 모델로 유동의 박리나 와류의 발달을 부정확하게 예측할 수 있으나 전체적인 유동특성의 모사에는 큰 무리가 없을 것으로 판단되었다[7].

경계조건으로는 공기 유입부에 3bar의 전압력, 293K의 전온도, $V_x/|V|=1$ 의 유동각을 설정해주고 계산영역 출구에 대기압(1bar)의 정압력을 부여하였다.

Fig. 4에 보이는 것과 같이 터빈의 로터 수는 8개이며 윗부분이 압축공기의 유입구이며 아랫부분이 공기의 배출구이다. Fig. 5는 수치적 계산을 하는 핸드피스의 전체 그리드형상이며, 총 1,945,018 그리드 격자가 사용되었다

외곽 케이스 주변과 공기 유입로, 배출로 부분을 제외한 터빈 주위에 회전조건을 주어 0rpm과 30000rpm의 두 조건으로 계산을 실행하였다.

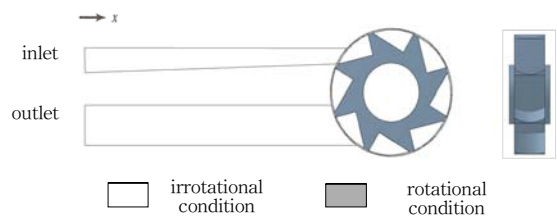


Fig. 4 Computation boundary condition of handpiece

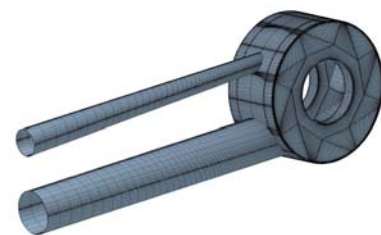


Fig. 5 Computation grid of handpiece

3. 결과 분석

3.1 로터에 걸리는 압력 측정

우선 로터를 회전시키지 않은 상태로 경계조건을 주고 수치적 계산을 하였다. FINE \mathcal{M} Turbo를 이용한 전산해석 후 반사각이 90°-120°로 변화하는데 따른 압축 공기에 의한 로터에 걸리는 정압력의 분포는 Fig. 6의 (a)-(d)와 같다. 그리고 로터 전체에 걸리는 정압력 평균은 Table. 2와 같다.

Fig. 6의 (a)에서 보면 로터의 반사각이 90°일 때 로터의 중앙 부분에서 높은 압력이 밀집되어 분포하는 현상이 보이는 반면 반사각이 커짐에 따라 압력이 높은 부분이 좌우로 넓게 분포되어 로터의 외곽 부분에서 정압력 값이 올라감을 알 수 있다. 이런 관점에서 보면 반사각이 90°일 때에는 노즐에서 나오는 유체가 로터 벽면에 부딪치자마자 바로 되돌아 나가는 것으로 볼 수 있다. 그에 반해 반사각이 커짐에 따라 더 많은 유체가 로터의 벽면을 타고 로터 외곽 쪽으로 흘러 빠져나가는 것으로 보인다. 이를 통해 반사각이 커짐에 따라 유입된 유체는 로터벽면을 타고 돌면서 로터를 더 많이 밀어주는 것으로 판단되었다.

또한, 90°각에서는 유동이 부딪혀 노즐 쪽으로 반사됨으로 인해 들어오는 유동에 간섭을 미쳐 유동이 로터에 운동량을 전달하는 것을 방해 할 것으로 예측되었다. Table. 2를 보면 로터의 평균 정압력이 90°에서 증가하여 110°정도에서 일정한 값을 보이는 데 이를 보아 110° 이상의 로터의 반사각에서는 유동이 로터 옆으로 빠져나가 유입되는 유동에 간섭이 줄어드는 것으로 볼 수 있다.

로터의 허브와 팁 부분에도 압력이 높은 부분이 나타난다. 이는 허브 쪽은 다른 로터에, 팁 쪽은 케이스 부분에 반사되어 유동이 로터 쪽으로 들어오는 것이다.

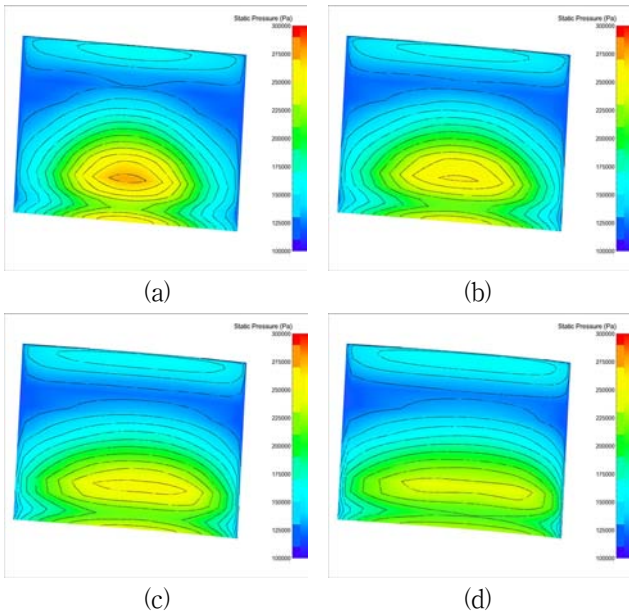


Fig. 6 Static pressure on turbine rotor at 0 rpm: (a) 90°, (b) 100°, (c) 110°, (d) 120°

Table. 2 Average static pressure at 0 rpm

| | 90° | 100° | 110° | 120° |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Average static pressure(pa) | 168579 | 170067 | 171016 | 170076 |

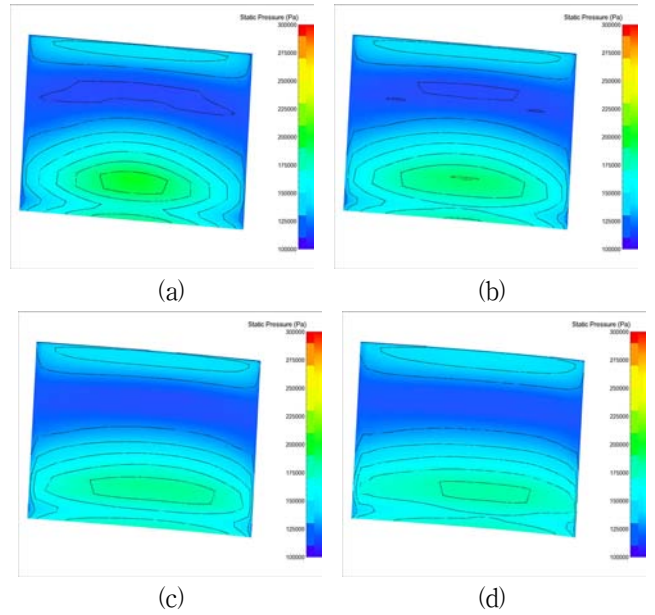


Fig. 7 Static pressure on turbine rotor at 300000 rpm: (a) 90°, (b) 100°, (c) 110°, (d) 120°

Table. 3 Average static pressure at 300000 rpm

| | 90° | 100° | 110° | 120° |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Average static pressure(pa) | 141573 | 142521 | 143048 | 143145 |

Fig. 7과 Table. 3은 300000rpm으로 회전할 때 로터의 압력 분포와 평균 압력 값을 나타낸 것이다. 전체적인 경향은 정지 상태일 때와 비슷한 것으로 보이며 회전에 필요한 에너지가 소비되었기 때문에 전체적으로 정압력 값이 줄어들었다.

3.2 노즐 출구부의 유동 분석

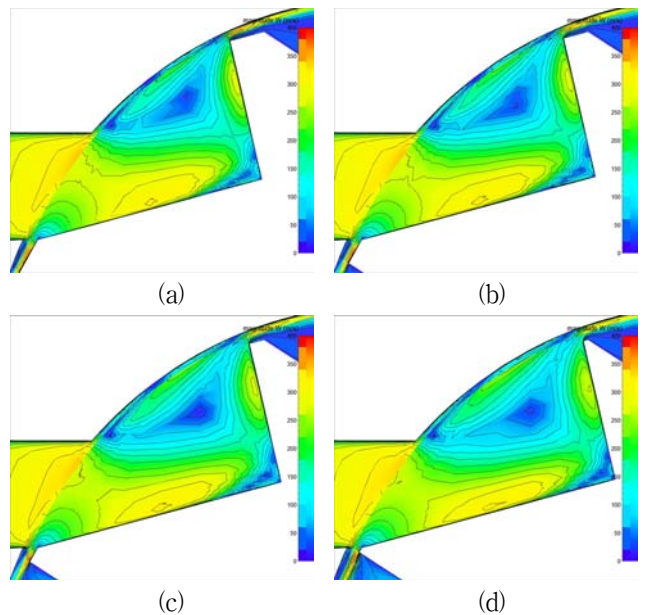


Fig. 8 Static pressure on turbine rotor at 0 rpm: (a) 90°, (b) 100°, (c) 110°, (d) 120°

Table. 4 Computation results at 3000000 rpm

| | 90° | 100° | 110° | 120° |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Average velocity x-coordinate (m/s) | 320.69 | 321.93 | 323.98 | 323.24 |
| Average density (kg/m ³) | 2.102 | 2.095 | 2.081 | 2.086 |

Fig. 8은 유입로를 지난 압축공기가 헤드부의 터빈으로 들어오는 노즐부분의 속도 분포이다. 그리고 Table. 4는 노즐부분의 x-방향 평균 속도와 평균 압력이다.

입사각이 증가하면서 평균 속도가 조금씩 증가함을 알 수 있다. 이는 입사각이 증가함에 따라 노즐과 로터 벽면과의 거리가 약간 증가하여 유속이 더 발달될 수 있기 때문이라고 여겨진다. 그러나 증가량은 미약하고 밀도의 변화를 보아서는 전체적인 유량은 동일하다. 결국 각도에 따라서 유동 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

이는 앞서 언급한 Pelton wheel이 비압축성 유체를 사용하는 데 반해 핸드피스도 압축성 유체를 사용하는 측면으로 보인다. 다시 말해, 속도 밀도가 고정되지 않고 계속 변화하는 점, 유로와 헤드내부의 형태에 대해서 영향을 많이 받는 점, 사용된 유체가 바로 버려지지 않고 배출구까지 나가는 동안에 터빈의 회전에 대해 주변에서 영향을 주는 점 등이 차이를 발생시킨다.

4. 결론

핸드피스의 대표적인 성능인 토크, rpm 등을 예측하기 위해 입사각에 대한 로터의 압력 분포와 노즐부의 유동 변화를 살펴봤을 때는 성능 변화가 크게 변화가 없는 것으로 보인다.

결론적으로 핸드피스의 성능을 증가시키기 위해서는 반사된 유동의 간섭 영향을 감소시키고 유체 운동량의 전달시간을 증가시키는 측면에서 터빈 로터가 110° 정도의 입사각만 가지면 될

것으로 판단된다.

핸드피스 생산의 국산화라는 측면에서 앞으로도 터빈 및 유로 형상에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이며, 수치 해석을 사용한 효율적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] J.E. Dyson, B.W. Darvell, "The development of the dental high speed air turbine handpiece-part1", Australian Dental Journal 38:1 (1993), pp. 49-58
- [2] J.E. Dyson, B.W. Darvell, "The development of the dental high speed air turbine handpiece-part2", Australian Dental Journal 38:2 (1993), pp. 131-143
- [3] J.E. Dyson, B.W. Darvell, "Flow and free running speed characterization of dental air turbine handpieces", Journal of Dentistry 27 (1999), pp. 456-477
- [4] J.E. Dyson, B.W. Darvell, "Aspect of the design of modern dental air turbine handpieces", Australian Dental Journal 38:6 (1993), pp. 456-470
- [5] J.A. Roberson, J.J. Cassidy, M.H. Chaudhry, Hydraulic engineering, 2nd edition
- [6] Y.A. Cengel, J.M. Cimbala, Fluid mechanics: fundamentals and applications
- [7] 노준구, 정은환, 이은석, 김진한, "프로즌 로터 기법을 이용한 부분흡입용 터빈 수치해석", 유체기계저널, 제7권, 제6호 (2004), pp. 15-20
- [8] 신봉근, 정수인, 김귀순, 이은석, "충동형 초음속 터빈 익렬의 설계 변수에 따른 익렬내 유동 특성에 관한 수치적 연구", 한국추진공학회지, 제8권, 제2호, pp. 62-72