

유동해석을 통한 물 분사용 비데 노즐 설계

최 윤 석,^{*1} 양 승 용,¹ 진 성 월²

DESIGN OF WATER INJECTION NOZZLE OF BIDET WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Y.S. Choi,^{*1} S.S. Yang¹ and S.W. Jin²

An optimized bidet nozzle design to form the required swirl water jet is proposed with the help of numerical analysis. The bidet can do the cleaning process of human body by water injection and the speed/pressure/injection angle/magnitude of swirl intensity of water jet determine the cleaning capability and personal subjective feeling. The objective of this research is to design optimal water injection nozzle to make stable swirl intensity. The effect of individual design variables are analyzed from the basic design and the final design is deduced to make high performance water jet within the pre-determined operation conditions.

Key Words : 비데(Bidet), 노즐(Nozzle), 물 줄기(Water jet), 물 분사(Water injection), 전산유체역학(CFD), CFD-ACE+

1. 서 론

비데는 민감한 부분의 집중적인 세정 및 건조를 통한 부분 샤워 효과가 있으며, 세균감염예방, 정신건강 유지, 치질/변비 예방, 여성 암 예방, 임산부의 청결 및 혈액순환, 산후 회복 등의 효과가 있다. 비데의 세정작용은 물 분사를 통하여 이루어지며, 물줄기의 속도, 압력, 분사각도, 회전력에 따라 그 세정력과 체감효과가 달라진다. 따라서 목적으로 하는 형태의 물줄기를 얻기 위해서는 정확한 노즐 시스템의 설계와 함께 정확한 운전 조건의 결정이 매우 중요하다.

최근 비데의 사용이 급격히 증가하고 있으며, 그에 따라 다양한 소비자의 요구를 만족시키기 위한 제조사의 연구 개발 노력 또한 증가하고 있다. 소비자들의 다양한 취향을 만족시키기 위해서는 여러 가지 형태의 물 분사가 가능한 시스템의 개발이 필수적이며 각 제조사들은 저마다의 기술력과 경험으로 고유한 물 분사 시스템을 확보하고 있다. 일본 등 선진업체에 비해 그 출발이 늦었던 국내 비데 제조업체 또한 그 시장 확대를 위해 많은 노력을 경주하고 있으며, 그 일환

으로 본 연구에서는 안정된 회전성분을 갖는 수류를 형성하기 위한 물 분사 노즐의 개발을 그 목적으로 하고 있다.

현재 개발과정의 대부분을 실험적 기반에 의존하고 있는 비데 제조사들은 물 분사 노즐의 개발을 위한 설계과정에 많은 비용과 시간이 투입하고 있는 실정이다. 다양한 공업용 분사 노즐에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나[1,2], 비데 노즐에 관련된 연구는 진무한 실정이다. 따라서 내부 유동가시화와 정확한 수류 형성 원리의 파악을 위해 유동해석의 필요성이 대두 되었다. 본 연구에서는 비데 용 물 분사 노즐의 개발 과정에 유동해석을 도입하여 실험에 의한 개발과정에서 발생하는 비용과 시간을 절약하고, 실험만으로는 파악하기 힘든 미소 유로내의 유동현상을 가시화함으로써 목표 성능을 만족하는 설계변수를 도출하며 좀 더 체계적인 개발과정을 수립하고자 하였다.

상용 유한체적(finite volume) 수치해석 프로그램인 CFD-ACE+[3]를 이용한 유동해석을 통하여 초기 설계안의 문제점을 파악하였으며, 중간 설계변경 과정을 통하여 목표성능을 만족하기 위한 최종 설계안을 도출하였다. 그 과정에서 개별 설계변수의 영향을 파악하였으며 실험 결과와의 비교를 통해 성능 검증을 수행하였다.

접수일: 2007년 3월 26일, 심사완료일: 2007년 9월 11일.

1 정희원, (주)경원테크 AE연구소

2 웅진코웨이 주식회사 환경기술연구소

* Corresponding author, E-mail: yschoi@kw-tech.co.kr

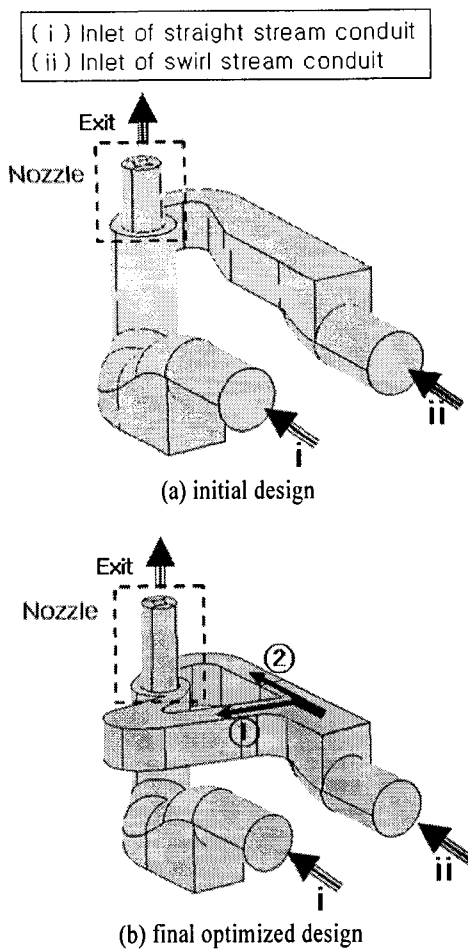


Fig. 1 Computational model

2. 수치해석 방법

2.1 수치해석 방법

CFD-ACE+[3] 를 이용하여 3차원 정상상태(steady state) 비압축성 유동해석을 수행하였으며, k-ε 모델을 사용하여 난류 효과를 고려하였다.

본 연구에서는 유로 및 노즐 내부 유동만을 해석 영역으로 하였다. 노즐로부터 분사된 물줄기의 형태는 노즐 끝단의 유동형태 외에 유량, 웨버 수 (weber number), 레이놀즈 수 (reynolds number) 등 많은 변수에 영향을 받는 복잡한 물리적 현상이므로[4,5] 분사된 물줄기 거동의 정확한 예측을 위해서는 자유계면이나 액적의 미립화(atomization) 해석 등 보다 정밀한 수치적 접근이 필요하다. 하지만 본 연구의 목표는 안정된 회전력을 갖는 분사 시스템 개발에 있으므로 순수한 유동 해석 적 접근만으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 실제 해석과 실험이 병행된 연구 과정 중에 노즐 끝단의 회전력이 증가 할수록 분사된 물줄기의 퍼짐 정도가 이에 비례

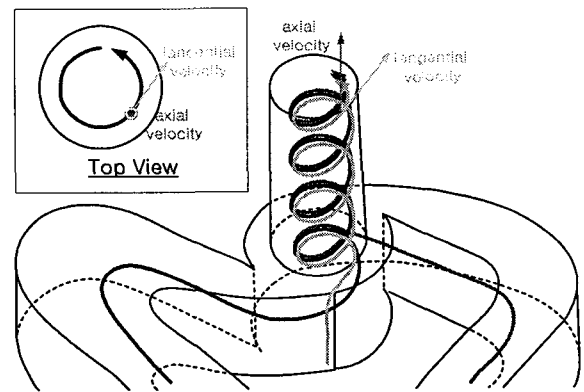


Fig. 2 Mechanism of swirl water jet formation

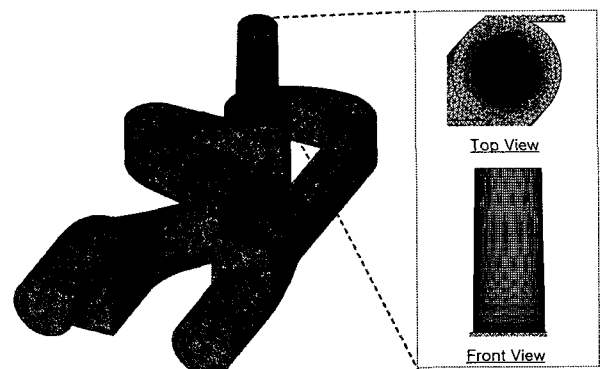


Fig. 3 Grid system

하여 증가하는 것을 확인하였으며, 따라서 물줄기의 분사형태는 노즐 끝단의 유동 상태에 많은 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 수치해석 모델

유동해석에 사용된 물 분사 시스템의 형상은 Fig. 1과 같다. 비데 시스템의 전체 유로 중 최종 수류의 형성에 영향을 미치는 후 단부 유로만을 해석모델로 설정하였다.

해석모델은 시스템 끝단의 물 분사 노즐과 회전수류를 형성하기 위한 직선 및 회전수류 유로로 형성되어 있다. 초기 설계안 (Fig. 1(a))은 각각 한 개씩의 직선 및 회전수류 유로로 형성되어 있었으나, 이러한 경우 노즐 끝단의 회전력이 일정하지 않고 한쪽으로 편심 되는 현상이 발생하여 정확한 수류의 제어가 어려운 단점이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 노즐에 대칭적으로 합류하는 두 개의 회전수류 유로를 가진 최종 설계안 (Fig. 1(b))을 도출하였다. 수류의 회전력을 조절하기 위해 직선수류를 형성하는 직선수류 유로와 회전수류를 형성하기 위한 두 개의 회전수류 유로로 분리하였으며, 이 두 유로를 흐르는 유체가 만나 합류한 후 노즐을 통해 외부로 분출된다.

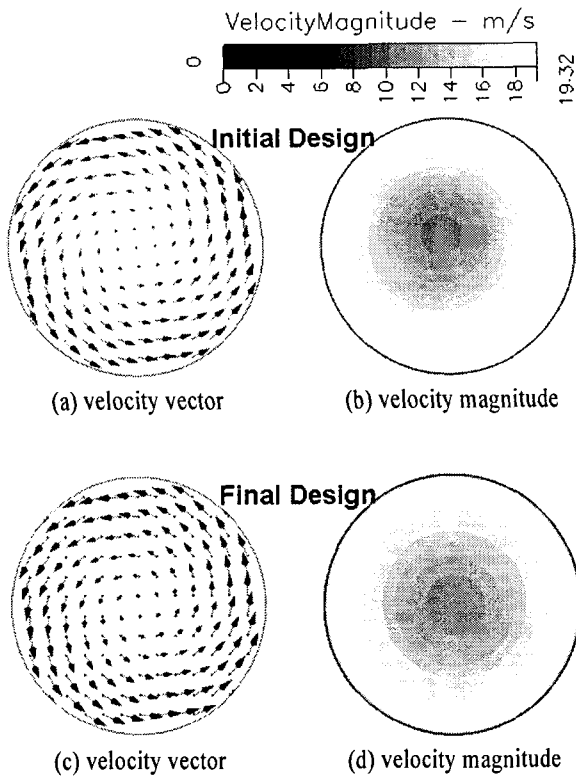


Fig. 4 Velocity distribution at the nozzle tip (Case 3 in Table 1)

수류에 회전력을 발생시키는 원리는 Fig. 2와 같다. 두 개로 분기된 회전수류 유로는 이와 수직으로 흐르는 직선수류 유로의 외곽부에 접선방향으로 합류한다. 회전수류 유로를 두 개로 분기한 이유는 앞서 언급했듯이 물 분사 노즐에 형성되는 회전강도를 대칭으로 형성되게 하기 위함이며, 직선수류 유로와 회전수류 유로에 흐르는 유체의 상대적 유량에 따라 회전력이 다른 다양한 물줄기가 발생한다.

상세 모델별로 다르나 대략 200백만 개 정도의 격자를 사용하였으며, 물 분사 노즐 부분은 정렬격자를, 나머지 유로 부분은 비 정렬격자를 사용하였다. Fig. 1(b)의 최종 설계안에 대해 사용한 해석 격자를 Fig. 3에 보였다.

2.3 수치해석 조건

물(water)의 표준상태 물성을 사용하여 해석하였으며, 모든 현상은 정상상태(steady state)로 가정하였다.

최종 설계안(Fig. 1(b))의 해석에 사용된 입구 경계조건은 Table 1 과 같고, 유동은 입구에서 완전 발달되었다고 가정하였다. 노즐 끝단의 출구 경계조건은 1기압의 일정압력 조건을 사용하였다. 직선수류 유로와 회전수류 유로에 흐르는 유량의 합계는 $1.58 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 그 상대적인 양으로부터 수류의 세부 특성을 조절하고자 하였다.

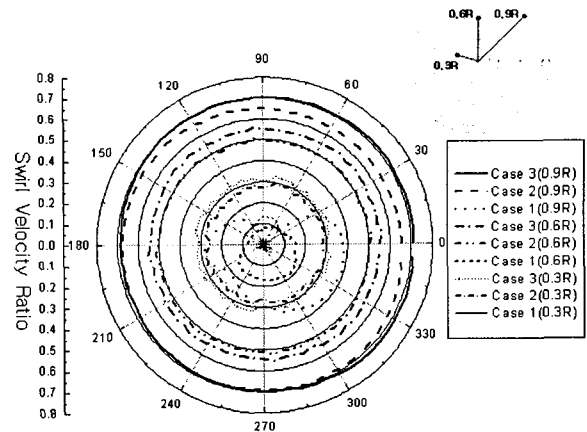


Fig. 5 Swirl velocity ratio at the nozzle tip

3. 수치해석 결과

3.1 노즐 끝단의 속도분포

Fig. 4(a), (b)는 Fig. 1(a) 모델의 해석 결과를, Fig. 4(c), (d)는 Fig. 1(b) 모델의 해석 결과를 보여주고 있으며, 각각 노즐 끝단의 속도벡터 및 분포를 나타낸다. 해석 시 Table 1의 Case 3에 해당하는 입구경계 조건을 사용하였다. 노즐 중심에서 방사상으로 퍼지며 회전하는 속도 벡터로부터 원하는 회전 수류가 얻어지고 있음을 알 수 있으며, 초기 설계안 (Fig. 1(a))에 비해 최종 설계안 (Fig. 1(b))의 노즐 끝단 회전력이 보다 일정하고 편심 정도가 개선되었음을 알 수 있다. 균일한 회전력을 갖도록 하기 위해 앞서 언급한 바와 같이 회전수류 유로를 좌, 우 두 개의 유로로 분기시켜 노즐에 대칭적으로 합류되도록 설계하였으며, 분기된 두 유로의 유동저항을 조절하여 각 유로에 비슷한 유량이 흐르게 하였다. Table 2에 Fig. 1(b)에 표시된 회전수류 유로 ①과 ②로 흐르는 유량을 case 별로 표시하였다. 회전수류 유로로 유입되는 유량이 증가할수록 유로 ①과 ②로 흐르는 유량의 차이가 증가하기는 하지만 거의 비슷한 유량비가 유지되고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Inlet boundary conditions

	Flow rate (m ³ /s)	
	straight stream conduit	swirl stream conduit
Case 1	9.17×10^{-6}	6.63×10^{-6}
Case 2	4.17×10^{-6}	1.16×10^{-5}
Case 3	2.50×10^{-6}	1.33×10^{-5}

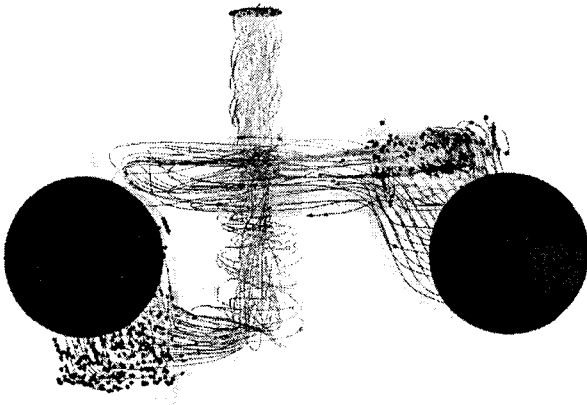


Fig. 6 Simulation result of streamline (Case 3 in Table 1)

3.2 노즐 끝단의 회전강도

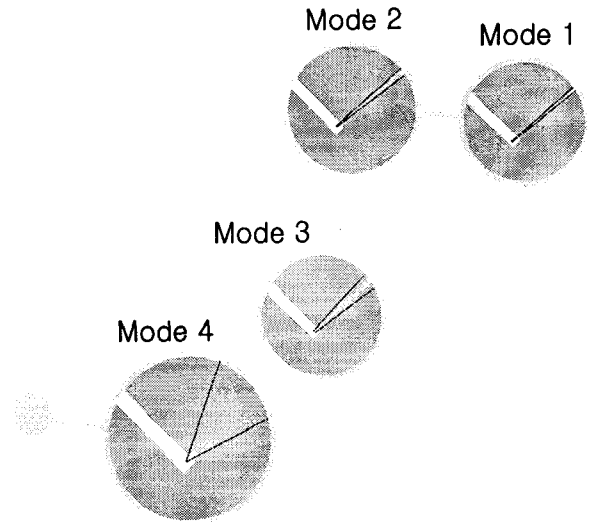
노즐 끝단의 회전강도를 정량적으로 비교하기 위해 접선방향 속도와 축 방향 속도의 비로 표시하였으며, 그 값은 아래와 같이 임의로 회전 속도 비(Swirl Velocity Ratio)라는 무차원 변수를 정의하여 사용하였다.

$$\text{회전속도비} = \frac{\text{접선방향속도}}{\text{축방향속도}} \quad (1)$$

Fig. 5에 노즐 끝 단면 동일 반경상의 회전 속도 비를 각도에 따라 표시하였다. 노즐 반경을 R 이라고 했을 때 0.3R, 0.6R, 0.9R 에 해당하는 원 둘레를 따라 회전 속도 비를 계산해보면 동일 반경 상에서 회전 속도 비가 매우 균일하다는 것을 알 수 있다. 노즐 외측으로 갈수록 회전 속도 비가 커지는 데 이것은 회전수류가 직선수류의 외곽에 접하여 합류되기 때문이다. 또한 회전수류 유로의 유량과 직선수류 유로의 유량 비가 커질수록 회전 속도 비가 커지는 것을 알 수 있다. 회전 속도 비는 노즐의 길이와 같은 설계 변수에도 많은 영향을 받는다. 노즐의 길이가 2mm 에서 3mm 로 증가되는 경우 Table 1의 Case 2 경계조건을 사용하여 해석한 결과, 노즐 끝단의 0.9R 에 해당하는 원 둘레를 따라 계산한 회전 속도

Table 2 Flow balance of swirl stream conduit

	Flow rate (m ³ /sec)		Flow balance ①:②
	①	②	
Case 1	3.30 × 10 ⁻⁶	3.33 × 10 ⁻⁶	1:1.01
Case 2	5.56 × 10 ⁻⁶	6.07 × 10 ⁻⁶	1:1.09
Case 3	6.33 × 10 ⁻⁶	6.97 × 10 ⁻⁶	1:1.10



	Ratio of flow rate	
	Straight stream	Swirl stream
Mode 1	3.75	1
Mode 2	1.19	1
Mode 3	0.76	1
Mode 4	0.43	1

Fig. 7 Water jet shape with different operation modes

비의 평균값이 노즐 길이가 2mm 와 3mm 인 경우 각각 0.78 와 0.69 로 계산되었으며, 이는 유동저항의 증가로 인해 회전 운동량이 감소한 결과로 분석된다. 실제 이러한 노즐 길이 조정 등을 통해 소비자의 감성을 세부적으로 만족시키기 위한 설계변경 과정이 수행되었다.

3.3 회전수류 형상

Fig. 6은 유동해석에 의해 계산된 유동장 내의 유선을 보여주고 있으며, 노즐 전체에 걸쳐 유체의 회전성분이 잘 형성되는 것을 알 수 있다. 유체의 회전력은 노즐 하부의 직선수류 유로에까지 미치고 있는데, 이는 회전수류 유로의 유량이 직선수류 유로의 유량보다 많아 직선수류 유로하부로 유동이 역류하기 때문이며 회전수류 유로의 유량이 많아질수록 그 역류정도는 심해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 실험에 의해 촬영한 비데의 물줄기 형상을 보여준다. Mode 1에서 Mode 4 로 갈수록 직선수류 대비 회전수류 유로의 유량이 많아지고 있으며 따라서 물줄기가 넓게 퍼

지는 것을 관찰 할 수 있다. 노즐 끝 단면의 회전력이 균일하므로 어느 쪽으로도 기울어지지 않은 대칭적 물줄기 형태를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구의 결과 노즐 끝 단면의 동일 반경 상에서 균일한 회전강도 분포를 갖는 물 분사용 비데 노즐 시스템 설계안을 도출하였다. 회전강도 분포를 균일하게 하기 위해 회전수류 유로를 두 개로 분기하였으며 분기된 두 유로의 유동저항을 조절하여 각 유로에 흐르는 유량이 대칭이 되도록 하였다. 모든 설계변수는 공학적 성능 뿐 아니라 소비자의 주관적 평가에도 영향을 주고 있었으며 그 일례로 소비자의 감성 테스트에서 문제로 지적되었던 회전강도를 최적화하기 위해 노즐 길이를 조절하였다. 직선수류 유로와 회전수류 유로로 흐르는 유량을 조절하여 다양한 세기와 퍼짐 정도를 가진 물줄기를 얻을 수 있었으며, 수치해석을 통해 개발된 물 분사 시스템은 실험적 검증을 통해 양산에 적용하였다[6]. 추후 노즐 끝단의 유동형태가 물줄기 형상에 미치는 영향을 수치적으로 연구할 예정에 있으며, 직선수류와 회전수류의 합류지점에서 발생하는 역류 현상을 개선하기 위한 연구도 병행하여 진행 할 예정이다.

참고문헌

- [1] 2000, 강완봉, 김덕줄, “2유체의 선회각도에 따른 분무의 유동특성,” 한국자동차공학회 2000년도 춘계학술대회, pp.50-56.
- [2] 2001, 최윤철, 정지원, 김덕줄, “액체의 물성치와 노즐의 형상 변화에 따른 압력스윙 노즐의 분무 특성,” 대한기계학회 논문집 B권, Vol.25, pp.1813-1820.
- [3] 2006, CFD-ACE+ module manual, ESI.
- [4] 1994, J.-P. Delplanque and W.A. Sirignano, "Boundary-Layer Stripping Effects on Droplet Transcritical Convective Vaporization," *Atomization and Sprays*, Vol.4, pp.325-349.
- [5] 1987, M. Pilch and C.A. Erdman, "Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of a Liquid Drop," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.13, pp.741-757.
- [6] 10-0655594-0000(특허등록번호), “가변수류가 가능한 비데기의 세정노즐-A Nozzle Structure of Bidet Swirling a Water Current at a Outlet.”