

## 인삼세척기 최적설계를 위한 세척조의 내부유동해석 및 실험 연구

송 치 성

한국기계연구원

### An Analysis on Fluid Dynamics and Experiment in Washing Tank for Optimal Design of Ginseng Cleaner

C. S. Song

Korea Institute of Machinery & Materials

#### Abstract

Under the development of various vegetable & Ginseng cleaner, the internal flows of the cleaner tank were analyzed via numerical simulations and experimental measurements. According to the numerical flow simulations in the two-dimensional plane, the flow proved to be influenced much more by the nozzle angles and the most optimized angles were presented. Meanwhile, the experiments were conducted in the 1/2-scale cleaner model and the instantaneous and time-mean velocity distributions were presented quantitatively by a PIV (particle image velocimetry) measurements. The experimental results showed a symmetric large-scale vortex structure which affected the performance of the cleaning. Although the flow field did not reflect the real situation of mixing flow with Ginsengs, it would be helpful to the deeper understanding of the flow characteristics in vegetable cleaner.

Key words: PIV, vegetable cleaner, numerical simulation, nozzle angle, vortical structure

## 서 론

농수산물 중 인삼은 고부가가치의 상품으로 미세한 뿌리를 손상시키지 않고 세척하는 작업을 필요로 한다. 지금까지는 이러한 정세작업을 사람의 손으로 직접 수행하였기 때문에 많은 인력이 소요되며, 그로인해 막대한 인건비가 지출되고 있다. 따라서 이러한 세척과정을 자동화하기 위한 인삼세척기의 개발은 인삼의 부가가치를 높일 뿐 아니라 관련산업의 경제성을 높이는데 크게 기여할 것으로 예상된다.

인삼세척기의 개발과정에서 인삼의 세척효과를 높이기 위해서는 내부 유동 구조에 대한 해석이 필수적이다. 이전까지의 농수산물 세척기의 개발은 주로 시행착오법에 의한 인간의 감각에 의존하였다. 하지만 보통의 농산물과는 달리 인삼은 가는 뿌리가 서로 얽혀 있어 매우 까다로운 세척방식을 필요로 한다. 따라서

유동구조에 대한 체계적인 데이터베이스를 바탕으로 성능 향상을 도모해야 한다.

유동구조를 해석하는 방법은 크게 수치해석적 방법과 실험적 방법이 있다. 이 중 수치해석적 접근 방법은 실험에 따른 막대한 시간과 비용을 절감하면서도 어느 정도의 경향성은 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면, 실험적 방법은 실제 유동 현상을 그대로 반영할 수 있어 단순화된 모델을 이용하는 수치해석보다 정확하고 정량적인 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 두가지 방법을 모두 적용하여 인삼세척기의 개발에 필요한 유동 정보를 얻고자 한다.

우선, 수치해석적 방법에서는 실제 인삼세척기의 설계 모델에 대하여 유동방정식을 유한체적법으로 차분화하여 계산이 수행되었으며, 난류유동 해석을 위하여 수정된  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였다. 세척기 내부 유동에 가장 영향을 많이 주는 인자는 노즐의 배치 및 분사 각도이므로 수치해석을 통하여 최적화된 노즐의 분사각도를 제시하였다.

실험적 방법에서는 세척기의 1/2축적모델을 투명하

크릴로 제작하여 유동장을 형성시켰으며, 유동계측을 위하여 최근에 크게 각광을 받고 있는 PIV(particle image velocimetry, 입자영상유속계)를 적용하여 동시다점으로 속도를 정확하게 계측한 다음, 이 데이터를 활용하여 계측영역 내에서 유량변화에 따른 순간 및 시간평균 속도벡터 등을 정량적으로 도시하였다.

### 인삼세척기의 해석 모델

본 연구에서 해석 모델로 사용한 버블제트 방식의 인삼세척기는 양쪽에서 여러 열을 가진 노즐에서 강한 제트가 분사되어 와류를 형성시키고, 인삼이 세척되면서 이동할 수 있도록 중앙에서도 제트가 분사된다. Fig. 1은 노즐이 존재하는 위치에서 수직으로 절단한 2차원 단면의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 여기서 노즐 1, 2번은 동일한 각을 가지며 아래쪽으로 분사되며, 노즐 3, 4번은 마찬가지로 동일한 각을 가지지만 위쪽으로 분사되도록 하였다. 노즐 분사 각도를 같도록 한 이유는 양쪽이 상호 대칭을 이루기 때문이다. 각 노즐의 분사 각도  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 는 단면에 수직인 방향을  $0^\circ$ 로 하여 아래 방향으로 갈수록 증가한다. 또한 스프레이 각도  $\alpha$ 는 노즐에서 나오면서 퍼져나가는 각도를 말한다.

실험에 의한 유동장 해석은 실제 모델에 대한 1/2 축소 모델을 제작하여 이루어졌다. 그러나 수치해석은 이러한 3차원 모델을 그대로 적용하면 3차원 격자의 생성에 따른 엄청난 컴퓨터 메모리 용량과 계산시간을 필요로 하기 때문에 비용 및 효율면에서 현 단계에서는 적절하지 않다. 또한 본 연구의 세척기 모델에서 여러 열을 가진 노즐 배치는 각각의 노즐에서 볼 때 동일한 특성을 가지고 있으므로 한 개의 노즐 열에 대한 유동해석으로 대체될 수 있다. 따라서 이를 최대한 단순화하여 Fig. 1의 2차원 단면에서 유동으로 가정하였다.

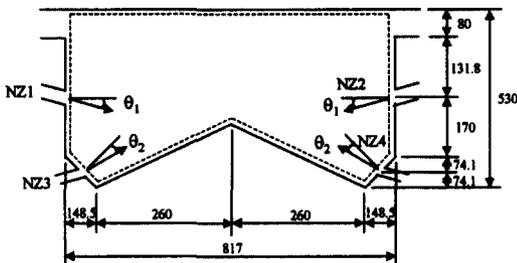


Fig. 1. Cross-sectional view of the cleaner tank. The unit is mm.

### 수치해석적 방법

#### 지배방정식 및 기본 알고리즘

인삼세척기 내부 유동은 비압축성으로 가정할 수 있고, 물의 온도 변화가 거의 없으므로 온도차이에 의한 유체 물성치들의 변화는 무시할 수 있다. 따라서 유체 유동을 지배하는 방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로 표현되며, 2차원 유동에 대하여는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \tag{2}$$

여기서  $x_i$ 는 직교 좌표계이고  $u_i$ 는 각 방향의 속도 성분을  $p$ 는 압력을 나타낸다. 기본방정식을 임의 형상의 공간에 대해 효과적으로 수치해석을 수행하기 위하여 경계면 밀착좌표계(body fitted coordinate system)를 사용하였다. 이 경우 좌표계는 비직교 좌표계가 되기 때문에 좌표계의 변환에 따라 변수와 지배방정식을 변환해야 하므로, 본 연구에서는 Karki(1986)에 의하여 사용된 일반 좌표계 상에서 공변 속도성분(covariant velocity component)을 사용하여 좌표를 변환하였다.

위의 지배방정식을 이산화하기 위하여 유한 체적법(finite volume method; FVM) (Patankar, 1980)을 사용하였으며, 격자계는 엇갈림 격자계(staggered grid system)를 사용하였다. 해를 구하는 순서는 다음과 같이 분리단계법(fractional step method) (Choi와 Moin, 1994)에 의하여 구하였다. 이 방법은 운동량 방정식으로부터 압력을 분리해 내므로써 해의 정확도를 유지 하면서 수렴성을 향상시킬 수 있다.

$$\frac{\rho(\hat{u}_i - u_i^n)}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\rho \hat{u}_i \hat{u}_j + \rho u_i^n u_j^n) - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} (\hat{u}_i + u_i^n) \right\} = -\frac{\partial p^n}{\partial x_i} \tag{3}$$

$$\frac{\rho(u_i^* - \hat{u}_i)}{\Delta t} = \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 p^{n+1}}{\partial x_i^2} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} \tag{5}$$

$$\frac{\rho(u_i^{n+1} - u_i^*)}{\Delta t} = -\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (6)$$

여기서  $\Delta t$ 는 계산시간 간격을 나타내고, 첨자  $n$ 은 현 단계,  $n+1$ 은 시간  $\Delta t$ 가 경과한 후의 계산하고자 하는 값을 의미하고, 상첨자  $\wedge$ 와  $*$ 는 계산시 중간과정에 나타나는 보정값들이다. 식 (3)은 비선형 운동량 방정식으로 이를 풀기 위해서는 뉴턴 반복계산법(Newton iterative method)이 사용되었다.

### 난류 유동의 해석

본 연구에서는 난류 유동을 해석하기 위하여 수정된  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 이는 운동에너지( $k$ )와 소산율( $\epsilon$ )에 관한 수송 방정식을 풀어서 국부의 난류 점성계수( $\nu_T$ )를 예측하는 것으로 식 (1)-(2)에서 주어진 지배방정식에 추가적으로 풀어야 하는 방정식들이며, 각각의  $k$ 와  $\epsilon$  방정식은 다음과 같다.

$$k_{,t} + uk_{,x} + vk_{,y} = \nabla \cdot \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \epsilon + G \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{,t} + u\epsilon_{,x} + v\epsilon_{,y} = \nabla \cdot \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \\ + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

$$G = \nu_T \left( \frac{\partial u_\tau}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

여기서  $G$ 는 생성항이고,  $u_\tau$ 는 마찰 속도이다. 각각의

상수는  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\epsilon=1.32$ ,  $C_\mu=0.09$ 로 주어진다.

### 경계 조건

속도장 해석에서 사용한 경계는 벽, 입구, 출구로 구성되어 있다. 벽에 대한 경계조건은 점착조건으로서 속도를 0으로 지정하였다. 출구는 대류 경계 조건을 사용하였으며, 이는 와류가 출구에서 영향을 받지 않고 그대로 빠져나가게 하는 조건이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_c \frac{\partial u_i}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

여기서  $n$ 은 경계면에 수직 방향을 나타내며,  $U_c$ 는 대류 속도로서 출구에서의 평균속도를 사용하였다. 그리고 노즐에서 들어오는 입구 유동은 주어진 노즐의 출구 속도 및 분사 각도에 의해 계산된 속도를 지정하였고, 노즐 단면에서의 속도 분포는 균일한 것으로 가정하였다. 또한 난류 유동장의 계산에 있어  $k-\epsilon$  방정식의 경계조건으로 벽함수(wall function)를 사용하였으며, 노즐에서 나오는 유동은 난류 강도를 지정하였다.

## 실험적 방법

### 실험 장치

Fig. 2는 세척기 실험을 위한 배치도를 보이고 있다. ①번은 모델세척기이며 투명아크릴 및 소형노즐 40개를 사용하여 4열 등간격 노즐배치를 이루도록 하였다. ②번은 순환펌프이며 세척구동수의 공급역할을 하도록 하였다. 실제에서는 고압용 왕복 동펌프 등이 사용될 수 있겠으나 이 실험에서는 편의상 가정용 소형펌프를 채택하였다. ③번은 유량을 계측하기 위한 디

- ① Vegetable cleaner
- ② Pump
- ③ Digital flow meter
- ④ Argon-ion laser
- ⑤ Lens
- ⑥ Hi-8mm camara
- ⑦ Monitor
- ⑧ Host computer
- ⑨ Printer

Fig. 2. Schematic arrangement of PIV system.

지털유량계이다. ④번은 argon-ion laser를 이용하여 sheet light를 형성하고 ⑥번의 Hi-8 mm 카메라에 의해 영상을 입력받았다.

세척기의 폭은 408.7 mm이며 스펙방향 길이는 550 mm이다. 좌우에 각 2열씩 10개의 분사노즐을 50 mm 씩 등간격으로 배치하였으며 바닥의 W자형 구조에는 각각 105 mm, 149.7 mm의 단을 두었다. 실제노즐에서는 노즐배치각도 및 분사각도 등을 자동으로 조절하여 제트 수류의 방향 및 크기를 조절할 수도 있으나, 이 모델 실험에서는 분사각도는 모두 지지판에 대하여 90도의 각도만을 유지하도록 하였다. 또한 노즐의 분사속도도 상하 모두 같게 하여 이 때의 유동특성을 유지할 수 있도록 하였다. 세척기내로 들어온 세척수는 상부의 오픈스페이스 격벽을 통하여 좌우로 오버플로우하도록 하였으며 실험상에서도 똑같은 조건을 유지하도록 외부수조의 수위를 조정하여 세척기 양쪽의 높이와 같도록 하였다. 노즐은 황동제 시판용의 직경 3 mm의 부속구를 사용하였으며 배관은 플렉서블 고무관을 채택하였다.

본 연구에서는 인삼세척기 정면에서 노즐과 노즐사이 유동장을 계측할 수 있도록 고안하였다.

Fig. 3은 실제의 실험장치모델을 보여주고 있다.

PIV용으로서 2차원의 광원을 제공하기 위한 출력 5W의 수냉식 아르곤 이온레이저로부터 나온 직진광을 2차원의 평면광으로 바꾸기 위해서 원통렌즈를 사용한다(홍석호 등, 1999). 그리고 이 렌즈를 관통한 조명은 직접 계측단면에 조사된다. 영상 처리과정에서 150.9 mm는 206 pixel에 해당하고 입자는 비중이 1.02로서 물과의 비중차가 작은 100미크론 전후의 PVC추적입자에 정전기 방지를 위해 계면 활성제를 소량 혼합하여 계측직전에 수조에 투입한 후 레이저의 산란광의 영향으

로 크게 빛나게 되며 이 움직임을 Hi-8 mm 카메라로 연속 입력하여 PIV용의 영상정보로서 기록하게 된다.

### PIV 계측 기법

본 가시화실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 주입시킨 다음에 적당한 조명을 제공한다(이영호, 1996). 계측영역의 영상을 테이프 매체상에 영구 보존하기 위하여 Hi-8 mm 캠코더에 저장하였다. 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리장치에 입력된다. 영상처리장치로는 이미지 그래픽(DT3155, 640×480 pixel, B&W)를 CPU(333 MHz)의 호스트 컴퓨터에 내장하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 DT3155보드는 영상기록매체로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 비트(bit)단위로 정의되는 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 전용의 소프트웨어(CACTUS'2000)를 이용하였다. Fig. 4는 유량이 27 l/min에서 계측영역내 배경영상을 나타낸 것이다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 반드시 전처리 과정이 필요하며 다양한 기법들이 소개된다. 이 과정으로 잡음 제거, 회전보정 등을 거친 다음, 2차화된 영상으로 탐색반경을 결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하여 상관영역을 설정한다.

전처리 과정 중에 가장 큰 비중을 차지하는 것은 잡음제거에 있어 큰 효과를 얻을 수 있는 배경제거(background elimination)이다. 이것은 계측영역에서 입자를 제외한 고정물체를 제거하여 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 것이다. 이를 위하여 연속된 50개의 원시영상의 계조치를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법을 택하였다. 영상을 기록할 때에는 유동장과 카메라 위치를 조정하여 수평을 유지하여야 하지만 대부분 카메라 축을 중심으로 약간의 회전각도를 갖게 된다. 따라서 기록된 영상은 전체적으로 회전된 상태이므로 회전된 각

Fig. 3. View of experimental model.

Fig. 4. Background image.

균을 뜻한다.

계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (12)$$

Fig. 5. Diagram of cross correlation method.

도만큼 모든 픽셀좌표를 변환하여야 한다. 따라서 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역 내에 직선윤곽선을 이용하여 Hi-8 mm 카메라의 위치에 대한 회절 보정을 행하였다. 전처리끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치 상호상관법을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다.

Fig. 5는 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상의 계조치에 대하여 식(12)와 같은 상호상관계수를 이용하여 최대 상관계수의 위치를 속도벡터의 종점좌표로 정하는 방법의 원리를 보여주고 있다. 단  $f_i, g_i$ 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하며 “-”는 평

전 계측영역에서 속도벡터의 격자수는  $40 \times 40$ 이고 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 6 pixel이다.

상관영역의 크기는  $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 이며 하나의 순간 유동장에 대한 처리시간은 1분정도 소유되었다. 시간평균 속도벡터를 얻기 위해서 50개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산출 평균하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러성분인 이상치를 판별하여 과오벡터를 제거하는 에러제거, 격자점 재배치, pixel 단위를 m/sec로 바꾸는

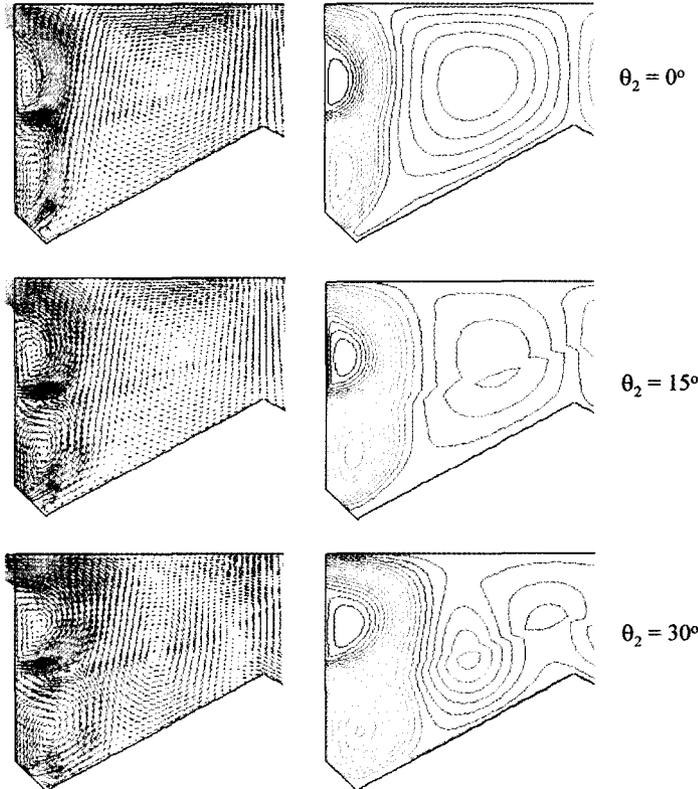


Fig. 6. Effect of the nozzle angle for  $\theta_1=0^\circ$ .

단위환산 등을 하였다. 에러에 인한 이상치는 속도 발산치에 의한 검출방법으로 자동에러처리를 한 후 대화형의 화면처리로 제거하였고 유효한 동일입자만으로 속도벡터를 구하였으며 제거된 벡터는 주위의 값으로부터 보간하여 도시하였다.

## 결과 및 고찰

### 수치해석을 통한 노즐 분사 각도의 최적화

노즐 분사 각도는 인삼세척기 내부 유동장에 가장 지배적인 영향을 미치는 요소로서 위쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_1$ 과 아래쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_2$ 를 각각 3가지로 변화시키면서 9개의 조합에 따른 유동장의 영향을 살펴보았다.

Fig. 6에서는 위쪽 노즐의 분사 각도를  $0^\circ$ 로 고정시키고 아래쪽 노즐의 분사 각도를  $0, 15, 30^\circ$ 로 변화시켰을 때 나타나는 유동 계산 결과를 나타내었다. 여기서 위에 있는 그림은 속도장의 결과를 보이며, 아래에 있는 그림은 같은 경우에 대한 유선을 나타내었다. 전체적인 유동 형태는 위쪽 노즐에서 나온 유동은 반시

계방향으로 돌면서 위로 선회하여 위쪽의 큰 와류를 형성하고 있고, 아래쪽 노즐에서 분사된 유동은 위쪽 노즐까지 반시계방향으로 회전하는 와류를 형성하고 있는 모습을 보인다. 또한 안쪽에서는 중심선에서 아래벽을 따라 노즐 출구 근처 형성된 와류까지 시계방향으로 회전하는 매우 큰 와류가 형성되었다. 그러나 내부에 있는 큰 순환 유동은 그 강도가 매우 작아 세척에는 부적합하다. 이러한 3개의 영역으로 이루어진 와류의 구조는 아래 그림에 나타나 있는 유선에서 분명하게 확인할 수 있다. 아래쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_2$ 가 증가할수록 노즐 부근의 강한 와류 영역이 점차 내부로 확대되어 감을 볼 수 있고  $\theta_2 = 30^\circ$ 에서는 전체영역의 거의 절반이 노즐에 의해 분사된 유동의 와류영역에 들어감을 볼 수 있다. 따라서 내부에 있는 와류의 강도도 증가하게 되고 세척 효과가 증대되는 결과를 가져온다. 결론적으로 아래쪽 노즐에서 분사되는 유동은 노즐 방향을 아래쪽 벽 방향으로 하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

위쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_1$ 을 증가시켜  $30^\circ$  일 때의 유동 형태를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6에서와 마찬가지로

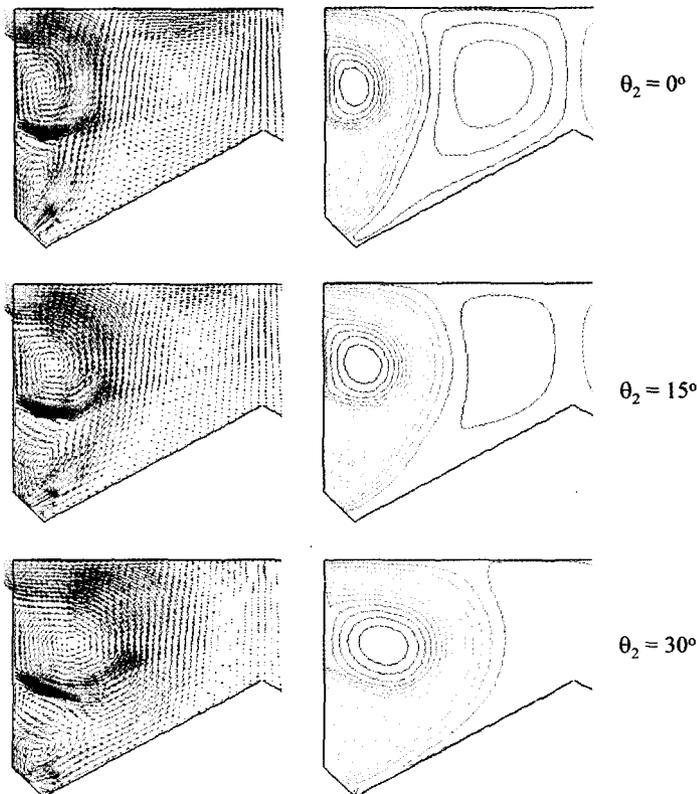


Fig. 7. Effect of the nozzle angle for  $\theta_1 = 30^\circ$ .

지로  $\theta_2$ 가 증가할수록 노즐에 의해 발생하는 와류가 내부로 깊숙히 침투함을 볼 수 있다. 특히  $\theta_2=30^\circ$ 인 경우는 아래쪽 노즐 출구 부근에서 두 개의 작은 와류가 형성되고 있고 내부에 있던 와류는 노즐 부근의 와류에 의해 밀려나 거의 형태를 감추고 있는 점이 특이하다. 두 개의 와류가 인접한 영역에서는 강한 전단응력이 작용하므로 세척에는 유리하게 작용하며, 이 경우와 같이 강한 와류들이 여러개로 분포하면서 회전을 할 때가 가장 좋은 세척유동의 형태이다. 단지 조금 미흡한 점은 위쪽 노즐에 의해 발생된 와류가 두 개 혹은 세 개의 와류로 나누어지고 더욱 더 내부로 확산되어야 세척 효과를 높일 수 있는데 그러지 못했다는 점이다.

Fig. 8은 위쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_1$ 을  $45^\circ$ 로 하고 아래쪽 노즐의 분사 각도를 변화시켰을 때의 유동 계산 결과이다. 이 경우는 내부에 있던 와류가 거의 사라지고 노즐 분사에 의한 와류가 전 영역에 걸쳐 지배적인 유동 형태를 갖고 있다. 노즐 분사에 의한 와류도 Fig. 6-7의 결과와는 달리 두 개 혹은 세 개로 나누어지지 않고 하나로 합쳐져 있음을 볼 수 있다.  $\theta_2$ 가 증가할수록 노즐에 의한 와류의 영역은 더욱 더

확대되어 중심선까지 도달한다. 이 경우 인삼은 큰 와류를 따라 순환을 하게 되지만 전단 유동에 의한 세척이 잘 이루어지지 않으므로 이상적인 유동 형태는 되지 못하는 것으로 판단된다. 특히 와류의 가운데에 위치하고 있는 인삼의 경우 항상 그 자리에서 맴돌게 되므로 세척이 거의 되지 않을 것으로 보인다.

결론적으로 이상의 계산결과를 조합해볼 때, 본 계산에서 가장 최적의 조건은 위쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_1$ 과 아래쪽 노즐의 분사 각도  $\theta_2$ 를 모두 수직 단면에 대해  $30^\circ$  방향으로 분사하는 것으로 판단되며, 보다 정밀한 설계를 위해서는 아래, 위쪽 노즐의 위치와 분사 각도를 동시에 조율하면서 최적의 유동형태를 만들어 내는 것이 필요하다. 그리고 노즐의 개수를 늘리면 작고 강한 와류를 여러 개 만들 수 있는 장점이 있는 반면 단가가 높아지므로 경제성을 고려하여야 할 것이다.

#### 실험을 통한 순간 및 시간평균 유동장

본 연구에서는 PIV기법을 이용하여 인삼세척기의 유동흐름을 가시화하였다. 계측단면은 세 종류의 유량에

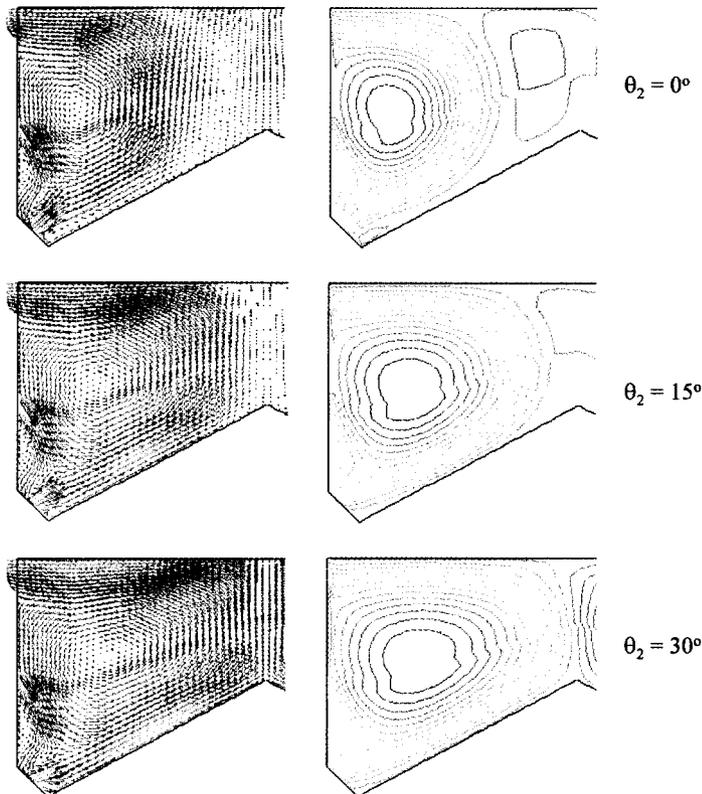


Fig. 8. Effect of the nozzle angle for  $\theta_1=45^\circ$ .

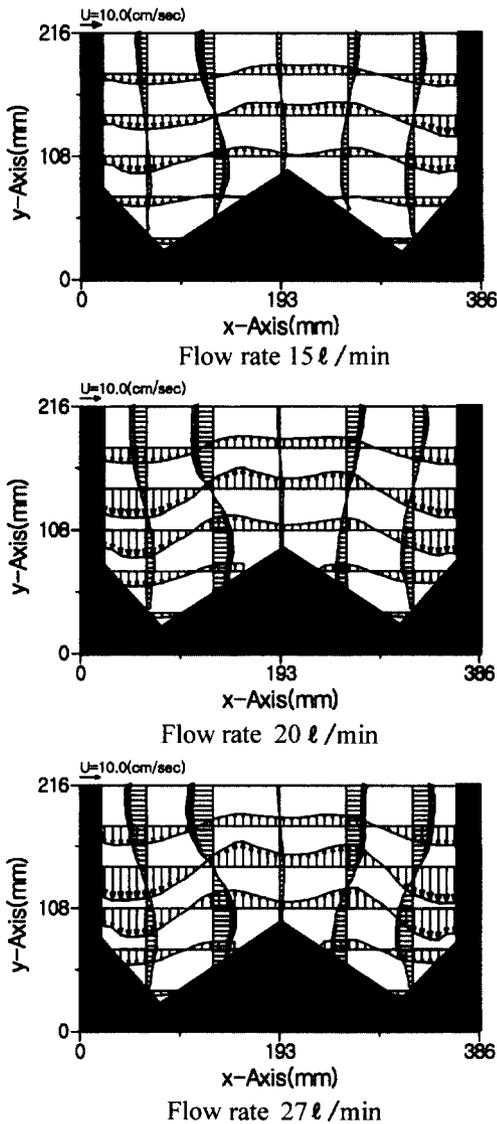


Fig. 9. Time-mean velocity profile distribution.

따라 노즐과 노즐사이를 선정하였다.

Fig. 9는 속도벡터의 데이터를 이용한 시간평균 속도프로파일이다. 몇 단면에서의 x, y방향의 속도 분포를 나타내고 있다. W자의 꼭지점을 경계로 하여 거의 대칭적인 속도분포를 나타내며, 전형적인 강제와류의 분포패턴을 보이고 있다.

Fig. 10은 각 유량에 있어서 순간속도벡터의 분포를 나타내고 있다. 유량 15 l/min에서는 그 값이 작은 관계로 보다 높은 유량의 경우와 비교하여 와류의 형상이 찌그러진 모양을 나타내고 있다. 그러나

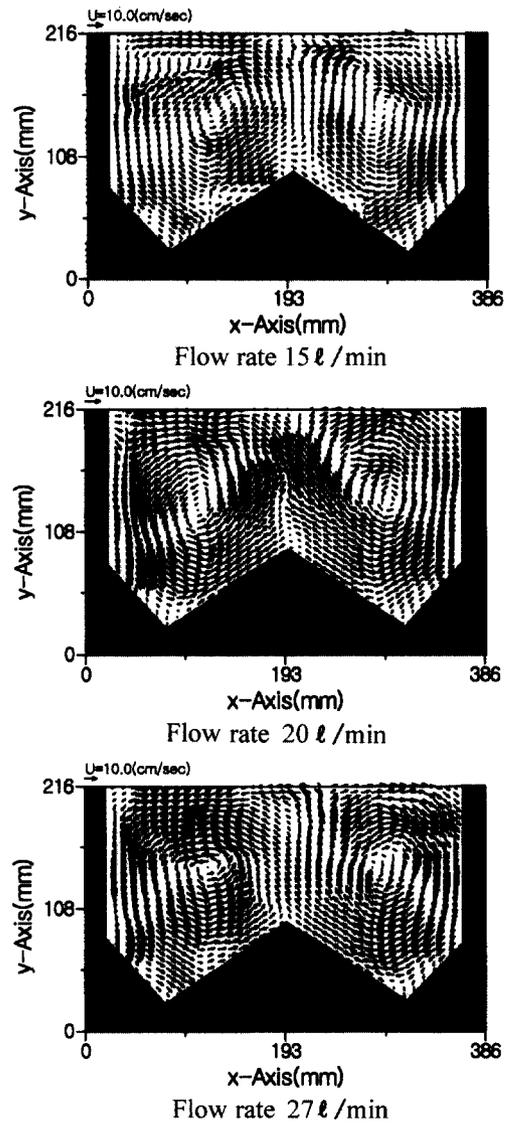


Fig. 10. Instantaneous velocity distribution.

다른 두 경우에서는 거의 원형에 가까운 와류의 형태를 유지하고 있으며 큰 차이가 나타나지 않고 있음을 알 수가 있다.

Fig. 11는 시간평균의 속도벡터분포이다. 앞의 순간속도벡터와 비교하여 유량마다 큰 차이가 없음을 알 수가 있다. 이것은 현재의 세척기 유동장의 고유한 특성중의 한가지로서 결국 이와 같은 반시계 방향의 단일와류가 같은 조건으로 존재하면서 유동장의 전체의 특성을 지배하고 있으며, 시간의존성 유동장 변화가 크게 나타날 수 없음을 예상하고 있다.

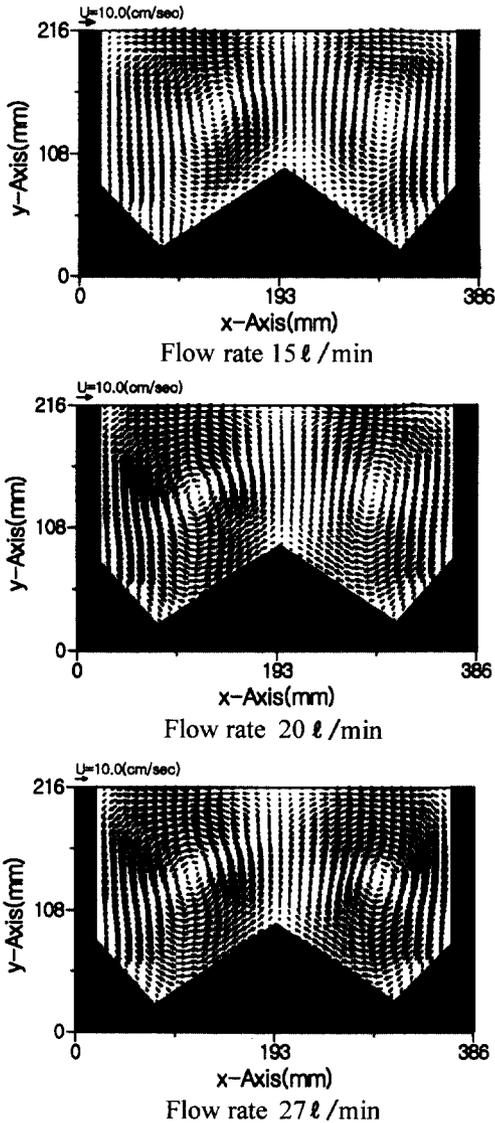


Fig. 11. Time-mean velocity distribution.

**결 론**

농산물중 수확된 인삼을 고부가가치의 상품으로 제조하기 위해서는 무인 및 자동작업과정에 의한 인삼 자동세척기의 개발이 필요하다. 이 경우에 세척노즐의 공간배치, 작동조건의 최적제어가 매우 중요하며, 이때의 다수의 세척노즐로부터의 제트류의 거동이 세척조 전체 유동장에 미치는 거시적인 특성의 해명이 우선적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석 및 실험적 접근을 통하여 세척조 내부유동의 특성에 대

한 해석을 수행하였다.

2차원 단면에서의 난류 유동에 대한 수치해석 결과, 노즐은 분사 각도에 따라 세척조 내부 유동이 상당히 다른 형태를 나타내고 있음을 확인하였고, 본 연구에서는 4개의 노즐로 구성된 세척기의 경우 각각의 노즐은 출구면에 대하여 아래로 30° 방향으로 분사하도록 하는 것이 세척에 가장 효과적임을 밝혔다.

PIV 계측을 통한 유동 실험에서는 세척기 내에는 대칭적인 거대구조의 와류가 상존하고 있으며, 이와 같은 반대회전방향의 수류가 인삼세척기의 세정능력을 크게 좌우할 것으로 예상하였다. 또한, 어느 경우이나 분사노즐에 의한 직진흐름이 노즐부착근방에서 보이지 않는 점이며, 이것은 노즐의 레이놀즈 수가 작아서 분사노즐 유동의 직진성이 없기 때문으로 보여지나, 오히려 인삼의 세척력에는 이와 같은 거대 구조의 단일 와류가 보다 효과적일 수도 있기 때문에 반드시 노즐 출구 속도를 크게 할 필요성이 없음을 나타내고 있다.

실제의 세척기에서는 세척완료된 인삼을 컨베이어로 들어올리기 위하여 직각방향으로도 분사노즐을 배치하여 인삼이 수중 이동이 가능하도록 하고 있으나 적절한 노즐 위치는 직각방향 속도벡터 분포와 연계하여 정하는 것이 보다 효과적일 수가 있음을 알 수가 있었다. 또한, 계측단면에서의 유동특성간에는 큰 차이가 없음으로서 유동장 전체의 특성은 크게 달라지지 않으며 2차원성이 강한 준정상유동이 지배적임을 알 수가 있었다.

**감사의 글**

본 연구는 농림기술개발연구센터에서 지원하는 농특연구과제의 연구비로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

**문 헌**

이영호. 1996. PIV의 분류 및 원리. *대한기계학회지* **36**(12): 1146-1162  
 홍석호, 서민식, 임유청, 최장운, 이영호. 1999. 영상강화 카메라를 이용한 가정용 냉장고의 PIV계측. *대한기계학회 추계학술대회 논문집 B* pp773-778  
 Choi, H. and P. Moin. 1994. Effects of the computational time step on numerical solutions of turbulent flow. *J. Comp. Phys.* **113**: 1-4  
 Karki, K.C. 1986. A calculation procedure for viscous flow at all speeds in complex geometries. Ph.D. Thesis, Univ. of Minnesota  
 Patankar, S.V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Co. pp52-54