

채소류 폐기물 처리시스템 개발 I

-공기방울 세척수조-

Development of Mechanical Treatment System for Vegetable Waste I-Washing Bath with Air Bubble-

김 상 현*

정회원

S.H. Kim

신 범 수*

정회원

B.S. Shin

박 청 룡*

정회원

C.Y. Park

1. 서론

세척수조는 채소류 폐기물을 사료화하는 과정에서 채소류 폐기물에 부착된 흙 등의 이물질을 세척하여 사료의 품위를 높이는 장치이다.

일반적으로 세척장치는 농산물 특히 채소류의 가공처리를 위하여, 전처리 단계로서, 흙 등의 이물질 분리와 소금에 절여진 채소류의 염분제거의 목적으로 사용되고 있다. 한국식품개발연구소에서는 김치 가공공장의 공정 자동화를 위하여 배추 세척기를 개발한 바 있으며 이것은 세척을 위해 고압의 물을 세척조 내로 투입시켜 물의 유동을 이용하여 배추를 배출구 쪽으로 이송시키며 또한 세척조 하부로부터 공기를 불어넣어 세척효과를 높이는 방식으로 되어있다. (박동, 1992)

수조 세척장치는 폐기된 농산 부산물을 가축의 사료로 활용하기 위해 사용되는 것으로 크고 작은 흙 등의 이물질과 금속물질 등 가축의 소화에 방해가 되는 이물질을 선별, 분리하고 세척 및 세척조내의 이송이 원활한 간단한 구조를 갖아야 한다. 따라서 본 연구의 수조세척장치는 수조하부에서 공기방울을 토출하여 물을 강제 순환시킴으로써 와류를 발생시켜 세척효과를 극대화 시킴과 동시에 공기 방울에 의해 밀려 올라오는 물의 힘으로 재료를 한쪽 방향으로 이송시킬 수 있어 공기방울만으로 세척 및 이송이 가능한 구조이다.

본연구의 목적은 공기방울 세척조의 이론적인 분석과 실험에 의한 적정 작동조건을 찾는 데 있다.

2. 공기방울 세척조의 이론적 분석

1) 공기방울 세척조의 이론적인 배경

수조하부에 공기 토출구를 설치하고 공기를 분출시키면, 공기와 물의 밀도 차이가 커서 공기의 부력에 의해 세척조내의 물은 유동하여 상승과 동시에 와류를 발생시킨다.

공기방울의 부력은 유체를 끌어올리는 힘이 되며 유체에 상향의 모멘텀을 가하게 된다. 실험결과 1.68m 깊이의 물 속에서 0.000472m³/s의 공기를 분출할 때 상승되는 물의 체적은 공기체적의 120배가됨을 보고한 바 있다(Baines, 1961; Baines et al, 1959).

Hussain(1976)등은 공기펌프에서 유체와 공기의 흐름을 그림1과 같이 중앙부의 공기핵과 외부의 유체흐름층으로 구분하여 유체의 유입현상을 설명하였다. 연구결과와 보고서에서 공기토출구의 표면으로부터의 깊이와 공기유량에 따라 유체의 유량이 증대하였으며 유체의 유량(M_l)은 공기의 유량(M_g)의 0.4지수배, $M_l \propto M_g^{0.4}$, 깊이의 1.4지수배, $M_l \propto L^{1.4}$,의 관계를 제시하여 일반식으로 다음과 같이 표시하였다.

$$M_l = C_1 M_g^{0.4} L^{1.4} \quad (1)$$

여기서, M_l 과 M_g 의 단위는 kg/s이고 L은 m, C_1 은 상수로 유체의 유입계수에 따라 365와 550으로 변화한다.

2) 공기방울 세척조의 이론적인 분석

실험실용 세척수조(김등, 1996)에 적용된 공기토출 파이프의 구멍을 통과한 공기의 유량을 측정된 결과 공기량은 공기압축기의 압력이 증가함에 따라 증대되었으며 일정한 압력에서 공기토출구의 크기에 따라 증가하는 경향을 보였으나 압력 변화의 효과에 비하여 작았다.

압력의 변화에 따라 유체의 유동량은 장치를 사용하여 정확히 측정하기가 어려우며 본 연구에서는 세척수조내의 유체의 유동형태를 비디오 카메라와 사진촬영을 통하여 구하였다. 토출 파이프에서 공기가 토출 되어 상승하는 현상을 살펴보면 구멍을 통하여 배출된 공기는 유체 내에서 공기 기동을 형성하지 못하고 토출후 일정량의 공기가 방울을 형성하면 부력에 의해 상승하므로 다음순간의 공기와 분리되어 일정길이의 간격을 갖고 공기방울이 연속적으로 형성되어 상승한다. 이때 공기방울 사이의 일정한 간격에 포함된 유체는 공기방울의 상승과 함께 상부로 이송된다. 실험수준의 공기의 압력이 1kg/cm²이상으로 높아서 수조하부에서 20cm정도 이상의 높이에서는 공기방울이 서로 잘게 나뉘어 혼합된 형태로 상승하며 유체의 상승속도는 비디오 카메라로 분석한 결과 1.2m/sec였다. 공기와 유체의 혼합체는 수면위로 솟아 올랐다가 양쪽으로 퍼져나가는 형상을 이룬다. 본 세척조는 공기방울에 의해 재료를 세척함과 동시에 한쪽방향으로 이송함을 목적으로 하기 때문에 첫 번째 공기배출 파이프는 출발벽면 하부에 부착하여 분출된 공기의 부력으로 유체를 출구방향으로 이송시키는 구조이며 공기와 유체의 수평방향으로의 유동형상은 사진촬영에 의해 구하였다. 분출되는 공기에 의해 유동되는 유체의 량은 공기분출후 일정시간동안 공기가 이송될 때 함께 움직인 유체의 량으로 정의 될 수 있으며 그림 2와 같이 유리수조의 옆면에서 공기의 분출에 의해 유체의 유동이 정상상태일 때 촬영한 사진을 판독하여 그 체적과 유동길이를 구할 수 있다. 공기가 토출 되어 상승후 옆으로 이송되어 소멸되는 시간은 0.67초 정도였으며 전체 유동된

공기 및 유체의 체적은 사진의 옆면의 공기 점유면적에 수조 폭을 고려하여 구할 수 있으므로 단위시간당의 공기 및 유체 유동량을 계산할 수 있다.

공기 및 유체의 총 유량을 공기압력 및 토출구의 직경에 따라 구한 결과는 표 1과 같다. 공기 및 유체의 총유동량은 압력에 따라 차이를 보였으며 공기토출구의 직경에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았다. 공기토출구의 직경에 따라 총유동량의 차이를 보이지 않은 결과는 토출된 공기의 유량이 토출구의 직경에 따라 큰 차이를 보이지 않은 결과(표 2)와 일치하며 공기유량에 따라 총유동량이 변화하는 문헌(Hussain, 1976)의 결과와 일치한다.

Hussain이 유도한 식을 기초로 공기유량에 따른 유체의 유동량을 식 (1)에 의해 구하기 위해 측정된 공기의 체적유량을 질량유량으로 환산하며, 이때 대기압에서 측정된 공기의 밀도를 0.4m깊이의 압력 하에서의 밀도로 환산하여 구하였다. 식 (1)의 C값은 550, 수조 깊이를 0.4m로 하여 계산된 유체의 질량유량을 부피로 환산하고 공기의 체적을 합하여 총 공기 및 유체의 유동량을 계산하였다. 계산 결과와 측정치의 오차는 평균적으로 1.24배의 차이를 보였으며 이러한 차이는 Hussain의 유도된 식이 토출구가 하나인 경우로, 본 실험장치의 다수 토출구인 경우와 차이가 있기 때문으로 판단되어 수정계수($C_2=1.24$)를 사용하였다. 계산결과와 측정치를 비교한 결과 R^2 가 0.97 이었다.

이상의 계산과정을 정리하면 다음과 같다.

측정치: 공기압축기의 압력 - 5kg/cm^2 공기토출구 직경 - 8mm
 공기토출구의 수 - 11개 공기토출구의 평균유속 - 27.7m/s

계산과정:

$$\text{대기압에서 공기토출량}(Q_g) = 27.7\text{m/s} * 5.5\text{cm}^2 = 15219 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\text{수조하단에서의 공기질량유량}(M_g) = Q_g * 1.26\text{kg/m}^3 = 0.019176 \text{ kg/sec}$$

$$\text{공기유동에 의한 유체질량유량}(M_l) = C_1 * M_g^{0.4} * L^{1.4} * C_2 = 38.874 \text{ kg/s}$$

$$\text{유체의 체적유량}(Q_l) = 38,874 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\text{총 유동체적유량}(Q_t) = Q_g + Q_l = 54,091 \text{ cm}^3/\text{s}$$

따라서, 수조의 물깊이와 토출 공기유량을 측정하면 공기 및 유체의 총유동량을 예측 할 수 있다.

3) 공기방울에 의한 세척 및 이송성능

공기방울을 이용하여 세척과 이송을 동시에 수행하기 위해서는 공기토출파이프를 수조 하부에 적절히 배치하여 이송과 동시에 유체의 와류에 의해 재료를 유동시켜서 세척하는 작업이 필요하다. 따라서 공기 토출파이프를 둘 이상 설치하여 첫 번째 파이프에서 토출된 공기의 힘으로 재료를 두 번째 파이프의 토출된 공기의 저항을 이기고 앞으로 진행시켜 그 과정에서 공기방울의 유동에 의해 재료를 세척 할 수 있는 방법이 요구된다.

공기 토출파이프 두개를 하나의 공기압축기에 T관으로 연결하여 대기압에서 공기유량을 측정한 결과는 표 3과 같다. 공기 토출파이프의 조합은 8mm-4mm와 8mm-1mm 이었으

며 표 3에서와 같이 공기유량의 분배비가 1.9:1 및 34:1로 공기토출구의 면적비인 4:1 및 64:1인 경우와 비교할 때 약 절반정도 크기의 비율을 보였다. 각 조합에서 측정된 공기의 유량을 기초로 유체의 유동량 및 총 공기유체 유동량을 계산할 수 있다. 총 공기유체의 유동량이 커지면 수조 표면에서 단위시간당 공기유체의 유동거리가 길어지며 따라서 재료의 이송속도가 빨라진다. 총 공기유체 유량과 공기유체의 수평 유동길이와의 상관관계를 사진 판독 자료에서 측정하여 다음과 같은 식을 구하였다($R^2 = 0.985$).

$$L_h = 0.028645 Q_t^{0.66267} \quad (2)$$

여기서, L_h = 유동길이(cm)

Q_t = 총 공기유체의 유량(cm^3/sec)

총 공기유체 유량은 그림 3과 같은 파이프 위치에 따라 두종류의 단면을 형성하며 공기토출구에서 수면까지는 삼각형을 이루고 수면에서는 한 변이 유동길이인 직사각형으로 가정할 수 있다. 따라서 삼각형의 꼭지각이 결정되면 그림 3의 유동높이도 계산되어진다. 삼각형의 꼭지각은 공기유량에 따라 변화하며 사진 판독자료에서 상관관계식을 다음과 같이 구하였다($R^2 = 0.989$).

$$Q_g = 118.4 \theta^2 - 41.7 \theta \quad (3)$$

여기서, Q_g = 공기토출 유량(cm^3/sec)

θ = 꼭지각 (deg)

그림 3의 형상은 공기방울을 이용하여 재료를 이송할 때 공기유체의 유량이 영향을 미치는 범위를 결정할 수 있는 모형이며, 설계된 공기토출 파이프의 공기유량이 측정되면 계산을 통해 모형이 결정된다.

수조 내에 두개의 공기토출파이프를 설치할 때 구멍 크기를 달리한 것은 공기토출 유량의 차이를 이용하여 첫 번째 파이프와 두 번째 파이프의 유체의 유동량을 조정하여 재료의 이송 및 세척정도를 달리 할 수 있다. 즉 첫 번째 파이프의 공기유량이 두 번째 파이프의 공기 유량보다 상대적으로 크면 두 번째 파이프의 유동저항을 적게 받으며 이송되는 반면 와류의 영향을 적게 받게된다. 그러나 두 파이프의 공기 토출유량의 차이가 적으면 이송이 원활치 않은 반면 와류에 의한 세척성능이 높아진다. 한편 첫 번째 파이프와 두 번째 파이프의 간격을 조정할 경우 공기토출유량에 의한 효과가 달라진다. 비록 두 파이프의 공기유량의 차이가 크지 않아도 두 파이프의 위치가 근접할 경우 첫 번째 파이프에 의한 유체의 유동력에 의해 재료는 두 번째파이프의 저항을 이기고 이송이 가능하다. 그러나 두 파이프의 공기유량 차이가 큰 경우에도 두 파이프의 간격이 일정한 길이 이상으로 떨어지면 두 번째 파이프의 공기유체의 유량에 의해 벽이 형성되어 재료의 이송이 어렵게된다.

3. 재료 및 방법

공기압축기를 공기방울 공급원으로 사용하여 공기토출 파이프 조합 8mm-4mm 및 8mm-1mm에 대하여 열선 풍속계를 사용하여 공기 유량을 측정하였고, 유리 수조에서 공기 방울에 의한 물의 유동에 대한 유선을 측정하였다. 유선 측정은 긴 막대에 길이 100mm의 실을 매달아 수조 벽면으로부터 약 100mm 정도 안쪽에서 실시하였으며 육안으로 확인하여 실이 구부러지는 방향을 기록지에 표시하였다.

4. 결과 및 고찰

실험에 사용된 8mm-4mm와 8mm-1mm 두 경우에 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 압력의 공기압축기에서 각 공기토출 파이프에 분배되어 토출된 공기유량을 표 3에 표시하였으며 동시에 계산된 유체의 체적, 공기유체의 총 유동량, 유동길이, 꼭지각 및 유동높이의 값도 표시하였다. 공기토출 파이프 조합 8mm-4mm일 때 유동길이는 32.8cm, 26.3cm이고 유동 높이는 17.1cm, 15.2cm로 두 유동형상이 서로 맞는 경우 파이프의 간격은 46cm이다. 이와 동일한 조건의 실험실 실험에서 파이프 간격이 30cm인 경우와 40cm인 경우의 수조내 유체의 유동을 관찰한 결과(그림 4) 30cm인 경우에는 수조 표면의 유체가 진행방향으로 이동되었으나 40cm 인 경우에는 첫 번째 파이프에 의해 분출된 공기유체가 두 번째 파이프의 공기유체 유동의 저항으로 인해 진행방향으로 이송되지 못하고 첫 번째 파이프 쪽으로 순환하는 현상을 볼 수 있다.

파이프 조합 8mm-1mm일 때 유동길이는 32.9cm, 11.1cm이고 유동높이는 17.2cm, 10.1cm로 두 유동형상이 맞는 경우 파이프의 간격은 38.5cm이다. 같은 조건에서 실험실 수조내의 유체의 유동을 관찰한 결과(그림 4) 30cm인 경우에는 표면의 유체가 진행방향으로 이동되었으나 40cm인 경우에는 표면에 저항력이 발생되었고 50cm 인 경우에는 표면의 유체가 첫 번째 파이프 쪽으로 순환되는 현상이 발생되었다. 8mm-4mm조합과 달리 8mm-1mm일 때 40mm인 경우에도 진행방향의 유동이 가능하였던 바는 유동높이의 차이가 컸기 때문인 것으로 판단되며 유동길이에 의한 이송가능 한계에 유동 높이의 차이도 동시에 고려됨이 필요하다.

유동높이에 수조의 폭을 곱하면 유동 단면이 계산되어 재료를 이송시키는 유동력을 산출할 수 있다. 8mm-4mm 일 때는 두 번째 파이프의 유동력은 첫 번째의 89%이나 8mm-1mm 인 경우에는 59%로 두 파이프 각각의 공기유체의 유동형상이 맞는 경우에도 유동력의 차이가 큰 경우에는 재료를 이송할 수 있는 파이프의 간격의 한계가 다소 커지며 유동력의 차이가 작은 경우에는 원활한 이송을 위해서는 유동형상이 맞는 위치보다 파이프 간격이 줄어들어야 함을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구의 수조세척장치는 수조하부에서 공기방울을 토출하여 물을 강제 순환 시킴으로써 와류를 발생시켜 세척효과를 극대화 시킴과 동시에 재료를 한쪽 방향으로 이송시킬 수 있어 공기방울만으로 세척 및 이송이 가능한 구조이다. 연구의 목적은 공기방울 세척조의 이론적인 분석과 실험에 의한 적정작동조건을 찾는 데 있다.

- 1) 공기방울을 이용하여 재료를 이송할 때 공기유체의 유량이 영향을 미치는 범위를 결정할 수 있는 모형이 개발되었으며 설계된 공기토출 파이프의 공기유량이 측정되면 계산을 통해 모형이 결정된다.
- 2) 수조 내에 두개의 공기토출파이프를 설치할 때 공기구멍의 크기와 파이프의 간격에 따라 재료의 이송 및 세척성능은 차이를 나타낸다.
- 3) 공기 토출파이프의 각 조합에서 재료의 이송성능 및 세척성능에 관한 적정 작동조건이 개발된 모델에 의해 설명되었으며 모델은 공기방울 세척조의 설계시 공기구멍의 크기 및 설치간격을 결정하는데 기초가 된다.

6. 참고문헌

Baines, W. 1961. The principles of operation of bubbling system. Proceedings Symposium on air bubbling, Ottawa, Canada

Balanin, V. V., B. S. Borokin and G. I. Melkonyan. 1970. Utilization of deep water heat in reservoirs for the maintenance of unfrozen water areas. Cold Regions Research and Engineering

Hussain, N.A. and B.S. Narang. 1984. Simplified analysis of air-bubble plumes in moderately stratified environments. ASME Journal of Heat Transfer, V.106, pp.543-551

Kobus, H. E. 1968. Analysis of the flow induced by air bubble systems. Coastal Engineering Conference, V.II

박재복 등. 1992. 주요 농산물 가공기계 개발에 관한 연구. 한국식품개발연구원 보고서

김상현 등. 1996. 채소류 폐기물 처리 시스템 개발. 농림부 농림특정연구사업 결과보고서

Table 1 Total flow of air and liquid

Dia.	Pres.		
	5kg/cm ²	3kg/cm ²	1kg/cm ²
8 mm	59,705	42,646	17,592
4 mm	55,973	42,646	22,389
2 mm	62,370	45,845	28,253
1 mm	46,911	30,918	15,992

Table 2 Air-flow rate from holes

Dia.	Pres.			
	1 kg/cm ²	2 kg/cm ²	3 kg/cm ²	5 kg/cm ²
8 mm	2,000	4,308	7,883	15,217
4 mm	1,978	3,266	6,992	14,310

Table 3 Air flow rate by air-pipe and flow shape of air-liquid mixture

Set of air-pipes	8mm-4mm		8mm-2mm		8mm-1mm		4mm-2mm	
	Airflow rate (cm ³ /sec)	9,350	4,909	13,200	1,464	9,405	276	5,225
Air-Liquid flow rate (cm ³ /sec)	41,334	29,626	49,700	17,000	41,464	8,091	30,595	15,916
Length of flow (L _n /cm)	32.8	26.3	37.1	18.2	32.9	11.1	26.9	17.4
Cone angle(deg)	9	6.6	11.0	3.6	9	1.6	6.8	3.5
Height of flow (cm)	17.2	15.3	18.2	12.8	17.2	10.1	15.4	12.4

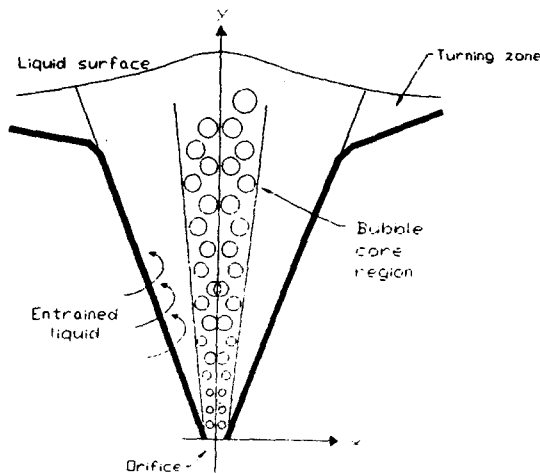


Fig. 1 Configuration of liquid jet induced by rising column of gas bubble

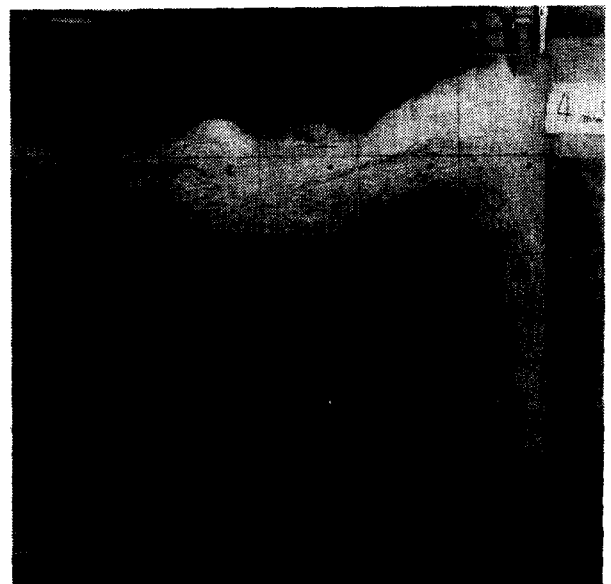


Fig. 2 Overall view of experimental washing bath

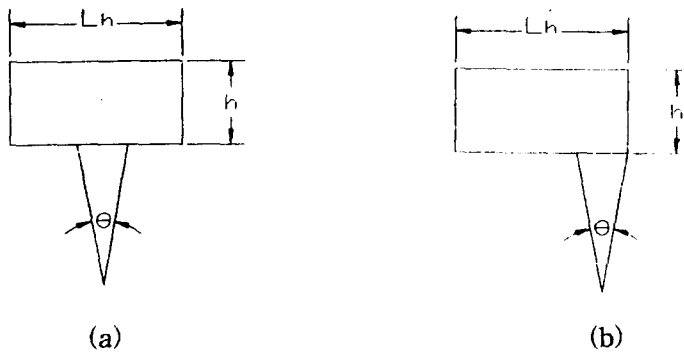
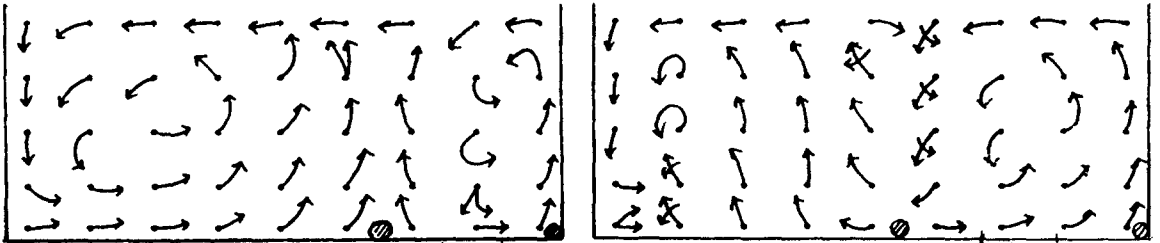
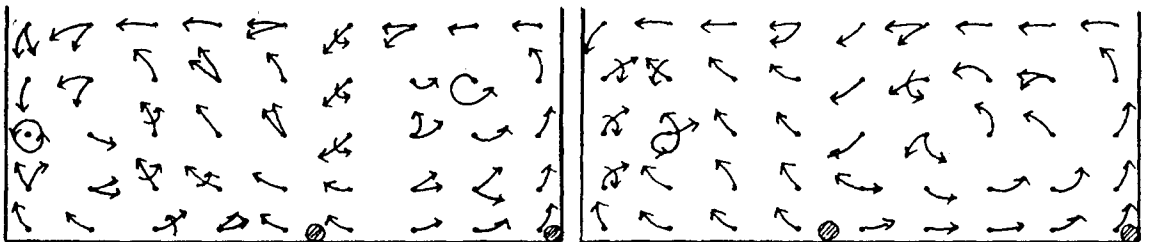


Fig. 3 Air-liquid flow shapes at two locations of air-pipes in washing bath; (a) middle, (b) wall



(a) 8mm-4mm, distance=300mm

(b) 8mm-4mm, distance=400mm



(c) 8mm-1mm, distance=400mm

(d) 8mm-1mm, distance=500mm

Fig. 4 Stream lines of air-liquid flow