

穀物の空氣選別에 관한 空氣動力學의 研究(II)⁺

— 垂直風銅을 利用한 穀物の 終末速度 測定 —

Aerodynamic Study on Pneumatic Separation of Grains(II)

— The Measurement of the Terminal Velocities of Grains —

李 鍾 瑚*, 趙 鏞 珍**, 金 滿 秀***

C. H. Lee, Y. J. Cho, M. S. Kim.

Summary

Aerodynamic property is the most important factor in designing the pneumatic separator and handling equipment for grains and seeds. Particularly the correct information about the terminal velocities of the corresponding grains and seeds is indispensable.

However, a few studies with relation to the terminal velocities of grains and seeds were conducted in this country, even though the terminal velocities of the domestic grains and seeds are required to design those equipments which can be used for the domestic grains and seeds having specific aerodynamic properties.

In this study, the terminal velocities for four varieties of barley and six varieties of paddy were investigated by means of two different methods, the suspension method and the drop method in an upward current of air.

For measuring the terminal velocities, the vertical wind tunnel which had been examined about the uniform air flow in the previous study was used.

In addition, the effect of the size of grains and the moisture content of grain kernel on the terminal velocity was examined.

The following conclusions were derived from the study :

1. The different terminal velocities of grains are resulted from the different measuring methods. The terminal velocity measured by the drop method is smaller than that by the suspension method. It is considered that the difference in the terminal velocities is caused by the difference in the projection area of grain which is faced to the air stream.
2. The terminal velocity of grain increases as the size and the moisture content of the kernel increase.
3. The linear regression equations for the terminal velocities of grains were derived in terms of the moisture content of grains by the variety of grains and the measuring method. Also, the linear regression equations for the terminal velocity, based on the weighted size of grains, were derived in terms of the moisture contents of grains.

⁺ 本 研究는 韓國科學財團의 研究費支援(1988-1989)으로 遂行되었음.

* 全北大學校 農科大學 農業機械學科

** 서울大學校 農科大學 農工學科

*** 忠南大學校 農科大學 農業機械工學科

1. 서 론

현재 세계 각국에서 생산되고 있는 1,639종의 곡물 선별기에 관한 정보를 분석한 바 있는 Chung등(1988) 및 FAO(1983)의 보고를 분석한 결과 이들 곡물선별기의 주요 선별요소는 공기선별장치(pneumatic separation system), 평면체(flat sieve), 회전체(cylindrical sieve) 및 인덴티드 실린더(indented cylinder) 등이었으며 대부분의 곡물선별기에는 공기선별장치가 설치되어 있음을 알 수가 있었다.

또한 우리나라에서 생산되고 있는 동력탈곡기, 콤바인, 곡물선별기, 석발기, 건조기등에도 1차선별, 2차선별 또는 배진을 위해 공기선별장치가 설치되어 있는 바 공기선별은 곡물선별작업에 있어서 가장 중요한 요소임을 알 수가 있다.

곡물의 공기선별은 오래전부터 시도되어 왔기 때문에 이에관한 연구도 상당히 많다. 그러나 곡물의 공기선별은 해당 곡물의 공기동력학적 제물성에 따라 달라지기 때문에 외국에서 재배되고 있는 곡물의 물성을 토대로 하여 개발된 각종 곡물선별기를 물성이 상이한 우리나라에서 생산되고 있는 곡물의 공기선별작업에 직선적으로 도입할 경우에는 많은 문제점이 야기될 수 있다.

현재까지 우리나라에서는 곡물을 비롯한 농산물의 공기동력학적 물성이나 특성에 관한 연구나 이들의 공기선별에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

그러나 곡물의 수확후 작업효율을 향상시키고 동시에 곡물의 품위를 제고시키기 위해서는 수확, 탈곡된 곡물중에 포함되어 있는 불순물을 철저히 선별해 낼 필요가 있는 바 이를 위해서는 곡물선별작업의 가장 기본적인 요소라고 할 수 있는 곡물의 공기선별에 관한 체계적인 연구가 수행되어야 할 것이다. 특히 곡물의 공기선별장치 및 이송장치의 설계를 위해 없어서는 안될 곡물의 종말속도에 관한 정보가 조속히 마련되어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 직경이 일정한 수직관을 갖은 수직풍동을 이용하여 4개 품종의 보리와 6개 품종의 벼를 공시하여 유동공기내에서 부유법과 낙하법으로 종말속도를 측정하고 곡물의 크기, 함수율 및 측정방법상의 차이가 곡물의 종말속도에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 수행되었다.

2. 문헌 개요

가. 국내의 연구동향

우리나라의 경우 곡물의 공기선별에 관한 연구는 지극히 미진한 상태인 바 이(1975)는 탈곡기의 성능 판정을 위해 탈곡물 공기선별장치를 고안하여 실험한 결과를 보고한 바 있으며, 김 등(1981)은 벼와 보리에 관한 물성을 측정하여 보고한 바 있다. 그러나 벼를 비롯한 곡물의 종말속도(terminal velocity)나 공기선별에 관한 실험적 및 이론적인 연구는 거의 없는 실정이며, 정(1987)만이 곡물의 종말속도를 실험적으로 측정하여 보고한 바 있다.

나. 국외의 연구동향

곡물의 공기선별원리는 곡립과 곡물속에 섞여 있는 불순물의 종말속도 차이를 이용하는 것이기 때문에 곡물의 종말속도를 실험적 또는 이론적으로 알아내기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 농산물의 공기동력학적 특성(aerodynamic property)은 원통내에서 낙하하는 입자의 가속율을 측정하거나 입자를 부유상태로 유지하기위해 필요한 공기속도를 측정하거나(Smith et al.) 혹은 고정자세에서의 입자의 항력(drag force)을 측정하고 이를 종말속도의 함수로 표시되는 항력 방정식에 대입하여 종말속도를 역산해 내는 방법등이 있다(Tsuchiya, 1981),

Bilanski(1962) 등은 밀을 비롯한 7종의 곡물 및 종자와 플라스틱구에 관한 종말속도를 측정하기 위해 소위 「변위-시간법(time-displacement technique)」을 이용하여 자유낙하하는 곡물의 종말속도를 실험적으로 구하였으며 다음과 같은 종말속도식을 유도한 바 있다.

$$V_t = [2mg / C_d A \rho]^{1/2}$$

여기서 V_t = 종말속도

A = 곡물입자의 투영면적

ρ = 공기의 밀도

C_d = 항력계수

m = 곡물입자의 질량

g = 중력가속도

Bilanski(1962) 등 이후 Keck(1965) 등도 Bilanski 등과 비슷한 방법에 따라 자유낙하하는 종자용 곡립의 항력과 종말속도를 측정하고 그 결과를 이론치와 비

교한 바 있다.

또한 Garrett(1965) 등은 공기중에서 자유낙하하는 곡물의 궤적을 카메라로 촬영하여 “변위-시간 기법”에 따라 종말속도와 항력계수를 구한 바 있다. Bilanski와 Lal(1965) 및 Menzies(1968) 등은 각각 밀짚과 알팔파(alfalfa) 줄기를 이용하여 수직풍동(vertical wind tunnel) 내에서의 탈곡물의 불안정한 동적거동(dynamic behavior)에 관하여 조사 연구한 결과 들기 한쪽에 마디(node)가 있는 경우 기류중에서 수직상태로 놓이기 때문에 공기동력학적 선별에 매우 유리하다고 보고한 바 있다.

Shellard와 Macmillan(1978) 역시 밀짚을 이용하여 실험한 결과 줄기마디가 한쪽 끝에 있는 밀짚이 중앙에 있거나 줄기마디가 없는 밀짚보다 높은 종말속도를 가지며 특히 이와 같은 현상은 밀짚 길이가 50mm 이상인 때에 현저하다고 보고한 바 있다.

또한 Kashayap(1966) 등은 기류중에서의 곡물의 2차원 운동에 관한 운동방정식을 세우고, 증분 개략법(incremental approximation)에 따라 이들 방정식의 해를 구하여 곡물의 운동궤적을 구명하였으며, 낙하높이와 수평이동거리, 기류의 방향과 수평이동거리, 송풍기 직경과 공기속도, 투영면적 및 질량과 항력간의 관계를 구명하여 보고한 바 있다.

Uhl과 Lamp(1966)은 흡입식 선별 시험장치를 이용하여 실험한 결과 콤파인의 스트로우워커(straw walker)에서 추출한 옥수수 속대부스리기(corn cob pieces)의 부유속도는 (suspension velocity)는 6.7-13.4m/s 범위인 반면 옥수수 줄기 부스리기(stalk pieces)의 종말속도는 속대부스리기의 종말속도보다 낮거나 높았다고 보고한 바 있다.

Kashayap(1966) 등은 공기이동 및 조절협회(AMCA)가 추천하는 송풍식 표준실험장치를 이용하여 벼와 검불의 공기선별에 필요한 공기속도를 측정 한 결과 직경 1.3 ft인 송풍기를 이용할 경우 최적공기속도는 800-1,300 ft/min(4.4-7.15 m/s) 범위라고 밝히고 낙하위치, 공급각도 등에 따라 공기속도는 달라진다고 보고한 바 있다.

또한 Hawk(1966) 등은 송풍식 실험장치를 통해 밀, 옥수수, 콩 등의 부유속도를 측정하고 부유속도를 종말속도라고 간주하였다.

여러 문헌에서는 선별 대상물의 공기동력학적 특성을 규정하기 위하여 여러 가지 계수(coefficient)들을 이용하고 있는 바 Shellard(1978) 등은 $C_d A$ 라는 값을 사용한 반면 Bilanski와 Lal(1965) 및 Hawk(1966) 등은 저항계수, k (resistance coefficient, $k = mg/v_i$)를 사용하였다. 그러나 Bilanski 등이 사용한 k 값과 Shellard 등이 사용한 $C_d A$ 값은 비례관계에 있는 것이다.

또한 Hawk(1966) 등은 Uhl(1964) 등, Bilanski and Lal(1965) 및 Bilanski(1966) 등에 의해서 제시된 밀, 옥수수, 콩에 관한 종말속도와 이들의 연구결과를 비교하였고, 종말속도와 항력계수간의 관계를 제시한 바 있다.

반면 Mueller(1967) 등은 송풍식 수평풍동을 이용한 흑색호두 공기선별 실험결과를 보고한 바 있다. 이들은 수평기류내에서의 호두의 수평, 수직방향에 대한 운동방정식을 유도하고 2계미분방정식으로 된 이들 운동방정식들의 해를 analog computer를 이용하여 구하여 좋은 호두와 불량한 호두의 이론적인 궤적을 구한 바 있으며 외관항력계수(apparent drag coefficient)와 결정항력계수(determined drag coefficient)의 관계를 도시한 바 있다.

Menzies(1968) 등은 원추형의 송풍식 수직풍동을 이용하여 알팔파 입자의 부유속도를 입자중량의 함수로 표시하고 레이놀드수(Reynold number) 및 입자의 직경-길이비(L/D)에 따른 항력계수의 변이와 L/D에 따른 저항계수(resistance coefficient)의 변이를 밝힌 바 있다.

또한 Kawakami(1972) 등과 Kawakami(1973)는 각각 송풍식 수직풍동과 흡입식 수직풍동을 이용하여 단일 세단목초의 항력계수, 부유속도를 구하고 세단목초의 기류중에서의 동적거동에 관하여 관찰하였으며 경축(stalk axis)과 기류방향에 따른 부유속도를 산정하기 위한 두개의 실험공식을 제시하였다. 이들은 직경-길이비(L/D)가 커질수록 항력계수도 커지며 L/D에 따라 세단목초의 동적거동은 크게 달라진다고 보고한 바 있다.

Farran과 Macmillan(1979)은 변속원심식 송풍기, 세 개의 스크린이 장치된 수평 디퓨징 풍동(diffusing tunnel), 송풍식 수직풍동, 공급량 조절장치, 슈트 등으로 구성된 실험장치를 이용하여 콤파인에 채용되어

있는 공기선별시스템의 성능과 투입방향, 공급량 및 공기 속도와와의 관계를 관찰한 결과 공급량 및 공기속도 뿐만 아니라 투입물의 기류에대한 상대적인 방향은 선별효율과 곡물손실의 중요한 요인임을 밝힌 바 있다.

또한 Suyama(1979) 등은 벼 등 4종의 곡립을 공시하여 단립(single grain)의 3축방향항력을 측정하고 3축방향의 항력계수와 종말속도를 구하였으며, 수직관내 상승 실험장치를 이용하여 상승기류 내에서의 곡립의 비행속도와 비행자세 등을 관찰한 결과를 보고한 바 있다.

또한, 이들은 곡립이 균립상태로 수직관내에서 수송될 때의 평균 상승속도를 측정하고 실측종말속도와 곡립-공기 혼합비 및 수직관내의 평균 풍속과의 관계를 나타내는 실험식을 제시한 바 있다(1980).

Casada(1980) 등은 수평풍동, 피실험물 고정장치 및 스트레인 측정장치 등을 이용하여 4종의 담배(burley tobacco plant)의 항력을 측정하고 이에 따라 항력계수를 계산하고 공기속도와 항력계수와의 관계를 제시한

바 있다.

Tsuchiya(1981) 등은 벼와 현미의 공기선별가능성을 검토하기 위하여 송풍식 수직풍동을 이용하여 자유자세와 고정자세에서의 벼와 현미의 부유속도를 측정하였으며 벼-현미 선별장치를 시작하여 수평기류에 의한 곡립의 비행거리와 낙하량 분포를 관찰하여 공기 선별의 한계를 조사 보고한 바 있다. 이들은 또 수평기류에 의한 수평, 수직방향의 곡립 비행거리와 비행속도를 산정하기 위한 이론식을 유도한 바 있다.

3. 재료 및 방법

가. 실험재료

실험에는 벼 6개 품종과 보리 4개 품종이 공시되었다. 실험에 사용된 곡물의 품종, 재배지, 수확일시 및 수확방법은 표1에 표시된 바와 같다. 수집된 곡물은 밀봉되어 -5℃로 냉장고에 보관되었다가 실험에 사용되었다.

Table 1. Grains used for the experiment

| variety | | Harvesting Place | Date | Harvesting Method |
|---------|------------------|------------------|-------------|--------------------------|
| Barley | Unknown | Iksan, Chonbuk | Jun. 11, 88 | Combine |
| | Kangbori | Iksan, Chonbuk | Jun. 11, 88 | Combine |
| | Baekdong (naked) | Imsil, Chonbuk | Jun. 8, 88 | Sickle & barley thresher |
| | Songhak (naked) | Imsil, Chonbuk | Jun. 19, 88 | Sickle & barley thresher |
| Paddy | Chilseong | Chonju, Chonbuk | Sep. 28, 88 | Sickle & hackler |
| | Dongjin | Chonju, Chonbuk | Oct. 5, 88 | Sickle & hackler |
| | Seomjin | Chonju, Chonbuk | Oct. 5, 88 | Sickle & hackler |
| | Akibare | Buan, Chonbuk | Oct. 4, 88 | Sickle & hackler |
| | Chucheong | Iri, Chonbuk | Oct. 4, 88 | Combine |
| | Daechong | Kimje, Chonbuk | Oct. 4, 88 | Combine |

나. 실험장치 및 방법

1) 함수율 측정

함수율 측정은 공기오븐법으로 ASAE Standards에 준해서 실시되었으며, 벼는 105℃로 24시간, 보리는 130℃로 20시간을 건조한 후 무게를 측정하여 함수율

로 환산 하였다.

2) 체분석 및 이물질 함유율 분석

수집된 곡물을 ASAE Standards에 준해서 체분석을 실시하였고 다시 보리는 3.35, 2.80, 2.36, 2.00 및 1.70 mm체로 크기를 분류하였으며 벼의 경우는 2.80과 2.00 mm체로 크기를 분류하였다.

3) 곡물의 함수율 수준 조절

종말속도를 함수율별로 측정하기 위하여 몇가지 수준으로 함수율을 조절하였다. 이를 위해서는 공시될 곡물을 자연공기로 건조시키면서 수시로 전기저항식 함수율 측정기를 이용하여 함수율을 측정하여 적정 함수율에 도달하면 실험에 공시하였다.

공시된 곡물은 실험직후 밀봉되어 다음 실험때까지 냉장고에 보관되었으며, 공기오븐법에 의해 함수율이 측정되었다.

4) 곡물의 종말속도 측정

곡물의 종말속도를 측정하기 위하여 그림1과 같은 실험용 풍동을 제작하였다. 풍동의 사양은 표2와 같다. 풍동은 수직관내에서의 유속 분포가 가능한한 균일하도록 제작되었으나 수직관 벽면 근처의 속도경계층을 유속이 균일한 구역과 분리하기 위해 곡물 지지용 스테인레스망 상면에 직경 100mm, 높이 13mm, 두께 0.6mm의 스테인레스링을 설치하였으며 유속이 비교적 균일한 링내에만 곡물을 배치하여 종말속도 측정에 이용하였다.

동압은 정밀마노메타(정밀도 : 약 0.25P_a)에 의해 4-6회씩 측정되었으며, 공기 속도는 식(1)에 의해 산출되었다. 식(1)에 포함된 공기밀도로 1.2kg/m³를 사용하였으며 관내의 정압이 2,500P_a 이하였기 때문에

정압은 무시되었다. 또한 기압은 1,000 mbar로 일정하다고 가정하였다.

$$V = 1.291 \sqrt{(T \cdot P_a / 289)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V : 공기속도(m/s)

T : 절대온도(K) T(K) = 273 + t(°C)

P_a : 동압(P_a)

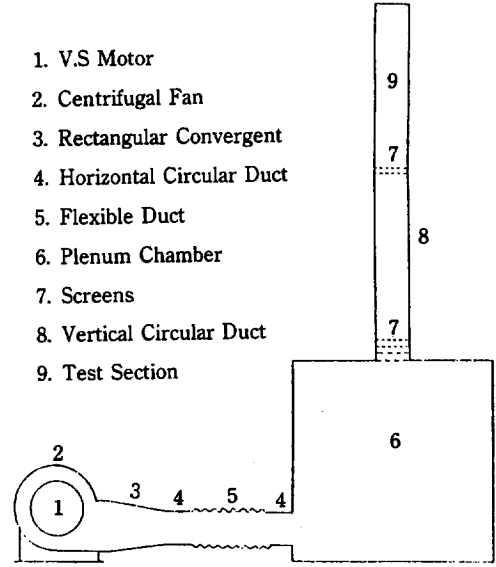


Fig. 1. Schematic diagram of wind tunnel

Table 2. Specifications of the vertical wind tunnel used for the experiment

| Elements | Specifications | Remarks |
|--------------|---|---------------------------|
| V.S Motor | 2.2kw, 150-1500 RPM | Controller : SCR Type |
| Fan | Max. 1720 RPM, 90 m ³ /min | Centifugal type |
| Convergent | Inlet : 152mm × 300mm Outlet : 115 mm × 190mm Length : 345 mm | |
| Duct I | Inner Dia : 188 mm length : 150 mm/EA | Horizontal Transparent |
| II | Inner Dia : 188mm Length : 2150 mm | Vertical Transparent |
| III | Inner Dia : 200 mm Length : 450 mm | Flexible |
| Screen | Large Aperture : 3 mm × 3mm Small Aperture : 1.5 mm × 1.5mm | |
| Test Section | 188 mm Dia. x 100 mm Length | |

4. 결과 및 고찰

가. 수집된 곡물의 크기 분석

곡물의 크기는 함수율에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 그러나 임의의 함수율 수준에서의 공시곡물의 크기 분포를 체분석을 통해 알아본 결과 크기 분포는 매우 다양하였다. 크기분포는 공기 선별과 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 수집된 곡물의 크기 분석

을 실시하고 그 결과를 표3에 나타내었다. 먼저 벼와 보리의 입자 분석을 ASAE Standard의 체분석 방법에 준해서 실시한 결과 수집된 곡물의 대부분이 3.35-1.70mm범위의 체에 의해 분류되었는 바 보리의 경우는 3.35, 2.80, 2.36, 2.00 및 1.70mm체에 의해 크기가 분류되었으며 벼의 경우에는 2.80mm와 2.00mm체에 의해 입자가 분류되었다. 표3에 표시된 수치는 체분석을 3회 반복 실시하여 각 체에 잔류한 곡물의 무게비의 평균치를 백분율로 나타낸 것이다.

Table. 3. Weight percentage of barley remained on the sieves with various openings

| Sieves(mm) | Weight percentage(%) | | | |
|------------|----------------------|----------|----------|---------|
| | Unknown | Kangbori | Baekdong | Songhak |
| 3.35 | 17.2 | 7.0 | 6.3 | 1.8 |
| 2.80 | 74.5 | 79.5 | 70.5 | 46.4 |
| 2.36 | 8.0 | 13.0 | 20.3 | 44.0 |
| 2.00 | 0.3 | 0.5 | 2.6 | 7.1 |
| 1.70 | — | — | 0.3 | 0.7 |
| Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| MC(% wb) | 25.56 | 16.50 | 24.84 | 17.46 |

Table. 4. Weight percentage of paddy remained on the sieves with various openings

| Sieves(mm) | Weight Percentage (%) | | | | | |
|------------|-----------------------|---------|---------|---------|-----------|----------|
| | Chilseong | Dongjin | Seomjin | Akibare | Chucheong | Daechong |
| 2.80 | 0.0 | 50.4 | 56.1 | 42.4 | 15.5 | 40.2 |
| 2.00 | 100.0 | 49.6 | 43.9 | 57.6 | 84.5 | 59.8 |
| Total | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| MC(% wb) | 24.32 | 27.16 | 25.84 | 26.22 | 21.88 | 22.13 |

표3 및 4에서 품종별 곡립의 크기 분포는 매우 상이함을 알 수 있는 바 곡물 공기선별기 설계시 곡립의 크기 분포가 고려되어야 한다는 사실을 알 수 있다. 표3에서 보는 바와 같이 보리의 경우 균일한 크기를 가

지는 곡물군 중에서 가장 큰 무게 백분율은 70-80% 정도로 나타난 반면, 벼의 경우에는 칠성벼를 제외하고는 2.80mm 체와 2.00mm 체에 잔류한 곡물의 무게 백분율은 서로 비슷한 수준이었다.

나. 곡물의 종말속도

1) 곡물의 종말속도 측정방법에 관한 고찰

곡물의 종말속도를 정확하게 측정하기 위해서는 일차적으로 수직관내의 유속분포가 균일한 풍동이 필요하다. 곡물의 종말속도를 비롯한 곡물의 공기역학적 특성을 측정하는 방법은 다음 3가지로 분류된다. 첫째 방법은 속도분포가 균일한 상승 기류를 이용하여 곡물이 일정한 높이의 부유상태에 놓이도록 공기속도를 조절한 후 이때의 공기속도를 측정하고 이것을 곡물의 종말속도라고 간주하는 방법이다.

둘째 방법은 고정 자세에서의 곡립의 항력(drag force)을 측정하고 이를 종말속도의 함수로 표시되는 항력방정식에 대입하여 종말속도를 역산해 내는 방법이다. 셋째 방법은 공기가 정지상태로 유지될 수 있는 구역내에서 곡립을 자유 낙하시켜 등속도 운동을 하는 순간을 포착하고 이때의 곡립의 낙하속도를 측정하는 방법이다.

그러나 두번째 방법에서는 곡립의 크기가 매우 작기 때문에 곡립의 항력을 측정하기가 매우 어려우며 특히 항력 측정시 센서의 loading error가 큰 문제점으로 대두될 수 있다.

또한 1차적인 측정치를 이용하여 종말속도를 방정식으로부터 산출해 내어야 하기 때문에 계산 과정에서 오차가 추가될 수 있다. 또한 세번째 방법에서는 우선 곡립과 같이 밀도가 크고 부피가 매우 작은 경우에는 측정장치의 규모가 반대해져 측정장치 제작비용이 문제점으로 대두될 수 있으며 곡립의 외형과 표면이 불규칙하여 낙하중 공기 저항이 수시로 달라지기 때문에 곡립의 낙하경로와 낙하시의 오리엔테이션이 일정하게 유지되기 어려운 단점이 있다. 그리고 Hamilton의 원리에 의해 낙하하는 곡립의 종말속도는 크게 나타날 수 있기 때문에 등방성이 아닌 곡립의 경우 이 방법에 의해 측정된 곡물의 종말속도는 실용성이 문제가 될 우려가 있다. 그러나 첫번째 방법은 다소의 측정 오차가 수반될 수도 있으나 곡물을 부유 상태로 유지할 수 있는 수직관 내의 상승 기류를 균일하게 할 수만 있다면 다른 방법들에 비해 비교적 정확하고 실용적인 종말속도에 관한 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 첫번째 방법은 수직관 내의 유속 분포를 이

상적인 균일 분포로 만들기 대단히 어렵고 비용이 많이 소요된다. 이것은 균일한 유속분포를 얻기 위해서는 송풍장치, 확산부, 정류부, 수축부등과 같은 풍동의 제반 구성요소들을 매우 정밀하게 제작하여야 하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 그림1에 보인 바와 같은 구성요소를 가지는 풍동을 제작하여 종말속도 측정에 이용하였다. 그림1과 같은 장치는 제작이 용이할 뿐만 아니라 제작 비용이 매우 저렴하다. 다만 수직관 내에서의 유속분포를 수직관의 전 단면에 걸쳐 완벽한 균일 분포가 되도록 하기는 매우 어렵기 때문에 곡립 지지망 상면에 비균일 분포 구역과 균일 분포 구역을 구분하기 위한 링을 설치하고 균일 분포 구역 즉 링 내부만을 종말속도 측정에 제한적으로 이용하였다.

그림2는 곡립 지지망 상면에 링을 설치한 상태에서 풍동의 수직관 내의 유속 분포를 예시한 것이며 수직관벽으로부터 20mm 정도 떨어진 관 안쪽의 유속분포는 균일함을 알 수가 있다.

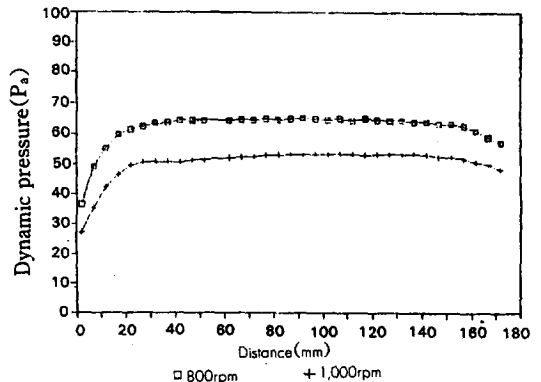


Fig. 2. Distribution of dynamic pressure in the vertical duct of the wind tunnel

곡물의 종말속도는 공기 선별에서 가장 중요한 인자 중의 하나로 인식되고 있으나 종속변수적인 의미를 지닌다. 종말속도는 이론적으로는 곡물의 무게, 부피, 형상, 투영면적 등 여러가지 곡물의 물성치와 관계가 있는 것으로 파악되고 있다.

한편 이러한 곡물의 제반 물성치는 곡물의 함수율과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 각각의 곡물에 대해 크기 분류를 선행하고 곡물의 크기별로 함수를 변화에 따른 곡물의 종말속

도를 측정하였다.

본 연구에서는 측정방법에 따른 차이를 알아보기 위해 종말속도를 두가지 방법으로 측정하였다, 첫째방법은 정지상태의 곡립을 유동 공기로 상승시켜 곡물이 일정한 높이의 부유상태가 되도록 유속을 조절한 후 유속을 측정하여 이 유속을 종말속도라고 간주하였으며, 둘째방법은 첫째방법을 통해 알아낸 종말 속도보다 훨씬 큰 유속으로 정지상태에 있는 곡립을 상승시켜 곡립이 수직관의 상단에 설치한 스테인레스망에 걸려 정지 상태에 있게 한 후 서서히 공기 속도를 감소시켜 곡립이 낙하는 순간의 유속을 측정하여 이 유속을 종말속도라고 간주하였다. 이와 같은 두 가지 방법 가운데 첫째방법에서는 곡립이 부유 상태에서 상승 기류와 힘이 평형을 이룰 때 이상적으로는 수직관 내의 모든 위치에서 종말속도가 동일할 것이나 현실적으로는 유속이 균일한 구역이라고 할 지라도 부유상태에 있는 곡립의 오리엔테이션의 변화에 따라 투영면적이 수시로 변화하기 때문에 곡립은 계속적으로 상승과 하강을

반복하게 되고 곡립의 상승 정도에 따라 종말속도는 어느정도 달라질 수 있다.

한편 둘째방법에서는 투영면적이 최대가 되는 상태에서 스테인레스망 하면에 정지해 있다가 유속이 감소됨에 따라 곡립은 낙하기 시작하므로 곡립의 모든 투영 방향에 대한 종말속도 중 가장 작은 값이 측정되게 된다.

표5는 대청벼의 경우 2.80mm체에 의해 분류된 곡립의 상승 높이별 공기 속도를 나타낸 것이다. 이 경우 곡립들은 정해진 높이까지 상승하면 그 상태를 계속적으로 유지하는 것이 아니고, 기류에 노출되는 표면적이 변함에 따라 하강과 상승을 반복하게 된다. 표5에서 보는 바와 같이 곡립의 상승 높이가 증가할수록 공기 속도도 증가하고 있다. 여기서 높이가 0cm인 경우란 곡립이 정지 상태에서 상승하려는 순간을 의미한다. 이 결과를 토대로 부유법을 통해 종말속도를 구하는 방법에서는 곡립이 약 1cm정도 상승할 때의 공기 속도를 그 곡립의 종말속도라고 간주하였다.

Table 5. An example of the terminal velocity of Daechung at different suspension heights

| H(cm) | TV(m/s) | SD | Remarks |
|-------|---------|-------|-------------------------------|
| 0 | 4.37 | 0.059 | Variety : Daecheong(Paddy) |
| 1 | 4.69 | 0.057 | Moisture Content : 14.19 % wb |
| 2 | 5.16 | 0.052 | |
| 3 | 5.61 | 0.063 | |

(Notes) H : suspension height, TV : terminal velocity, SD : standard deviation

2) 곡물의 크기 및 함수율에 따른 종말속도

표6에서 9는 보리 2개 품종과 벼 2개 품종에 대해 곡물을 크기별로 분류하고 크기별로 함수율에 따른 곡물의 종말속도 측정 결과를 나타낸 것이다. 이들 표에서 정상적인 상승(Regular Rise, RR)이란 대부분의 곡립들이 정지상태로부터 1cm정도 상승하는 순간을 의미하며, 정상적인 낙하(Regular Drop, RD)란 곡물이 종말속도 이상의 유속에 의해 상승되어 풍동의 수직관 상단에 설치된 스테인레스망 하에서 정지상태로 머물고 있던 곡립들의 대부분이 유속이 점차 감소함에 따라 낙하하는 순간을 의미한다.

표에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 크기군에서 곡립들의 종말속도는 함수율이 감소함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 정상적인 상승시와 정상적 낙하시의 종말속도를 비교해 보면 정상적 낙하시의 종말속도가 모든 경우에서 약간 작게 나타났다.

이것은 앞에서 고찰한 바와 같이 정상적 낙하시에는 대부분의 곡립이 여러방향에서의 투영면적중 가장 큰 투영면적을 갖는 상태로 유동 공기에 노출되기 때문이며 정상적 상승시에는 오리엔테이션이 변화함에 따라 투영면적도 수시로 변화하기 때문에 이때의 평균 투영면적이 정상적인 낙하시의 평균투영면적보다 작아지기 때문이라고 판단된다.

Table 6. Terminal velocities of kangbori(Barley) in accordance with size and moisture content

| Sieve size, mm (% of the oversized) | MC(% wb) | Terminal velocities(m/s) | | | |
|--|----------|--------------------------|-------|------|-------|
| | | RD | SD | RR | SD |
| 3.35 (7) | 16.50 | 5.39 | 0.065 | 6.01 | 0.081 |
| | 15.36 | 5.16 | 0.145 | 5.73 | 0.094 |
| | 14.07 | 4.90 | 0.173 | 5.30 | 0.114 |
| 2.80 (80) | 16.50 | 5.06 | 0.083 | 5.59 | 0.185 |
| | 15.36 | 4.81 | 0.120 | 5.31 | 0.102 |
| | 14.07 | 4.65 | 0.074 | 5.06 | 0.127 |
| 2.36 (13) | 16.50 | 4.54 | 0.106 | 5.11 | 0.239 |
| | 15.36 | 4.23 | 0.094 | 4.79 | 0.162 |
| | 14.07 | 4.17 | 0.170 | 4.53 | 0.109 |

Notes) RR : Regular Rise upto about 1 cm above the screen
 RD : Regular Drop
 SD : Standard Deviation

Table 7. Terminal velocities of Baekdong(Naked Barley) in accordance with size and moisture content

| Sieve size, mm (% of the oversized) | MC(% wb) | Terminal velocities(m/s) | | | |
|--|----------|--------------------------|-------|------|-------|
| | | RD | SD | RR | SD |
| 3.35 (6) | 24.84 | 5.46 | 0.069 | 6.75 | 0.135 |
| | 20.74 | 5.35 | 0.111 | 6.33 | 0.133 |
| | 16.35 | 5.16 | 0.172 | 5.94 | 0.119 |
| | 14.01 | 5.13 | 0.136 | 5.73 | 0.095 |
| 2.80 (70) | 24.84 | 5.01 | 0.065 | 5.99 | 0.156 |
| | 20.74 | 4.98 | 0.134 | 5.84 | 0.116 |
| | 16.35 | 4.77 | 0.080 | 5.59 | 0.160 |
| | 14.01 | 4.58 | 0.212 | 5.34 | 0.109 |
| 2.36 (24) | 24.84 | 4.45 | 0.094 | 5.06 | 0.151 |
| | 20.74 | 4.34 | 0.157 | 5.03 | 0.112 |
| | 16.35 | 4.20 | 0.114 | 4.90 | 0.254 |
| | 14.01 | 4.07 | 0.076 | 4.85 | 0.176 |

Table 8. Terminal velocities of Dongjin(Paddy) in accordance with size and moisture content

| Sieve size, mm (% of the oversized) | MC(% wb) | Terminal velocities(m/s) | | | |
|--|----------|--------------------------|-------|------|-------|
| | | RD | SD | RR | SD |
| 2.80 (50) | 27.16 | 4.29 | 0.087 | 4.99 | 0.091 |
| | 22.53 | 4.10 | 0.048 | 4.66 | 0.075 |
| | 18.29 | 4.03 | 0.041 | 4.53 | 0.093 |
| | 13.22 | 4.01 | 0.096 | 4.42 | 0.139 |
| 2.00 (50) | 27.16 | 4.20 | 0.091 | 4.77 | 0.088 |
| | 22.53 | 3.97 | 0.087 | 4.55 | 0.073 |
| | 18.29 | 3.94 | 0.085 | 4.44 | 0.103 |
| | 13.22 | 3.97 | 0.121 | 4.41 | 0.060 |

Table 9. Terminal velocities of Akibare(Paddy) in accordance with size and moisture content

| Sieve size, mm (% of the oversized) | MC(% wb) | Terminal velocities(m/s) | | | |
|--|----------|--------------------------|-------|------|-------|
| | | RD | SD | RR | SD |
| 2.80 (42) | 26.22 | 4.42 | 0.060 | 5.06 | 0.052 |
| | 22.03 | 4.20 | 0.049 | 4.90 | 0.063 |
| | 18.04 | 4.01 | 0.049 | 4.59 | 0.058 |
| | 13.38 | 3.95 | 0.042 | 4.45 | 0.079 |
| 2.00 (58) | 26.22 | 4.25 | 0.088 | 4.85 | 0.041 |
| | 22.03 | 4.14 | 0.063 | 4.75 | 0.106 |
| | 18.04 | 3.89 | 0.043 | 4.49 | 0.126 |
| | 13.38 | 3.88 | 0.050 | 4.40 | 0.154 |

3) 품종별 곡물의 평균 종말속도

표10과 11은 곡립의 크기별 분포 비율을 가중치로 하여 함수율에 따른 가중평균 종말속도를 나타낸 것이다. 표11에 표시된 종말속도와 본 연구에서와 동일한 벼 품종의 종말속도를 측정하여 보고한 바 있는 정(1987)의 결과를 비교한 결과, 표11에 표시된 추정벼의 종말속도는 정(1987)이 보고한 추정벼의 종말속도(6.7 m/s-7.4 m/s)의 65%내외에 불과한 것으로 나타났다. 정(1987)은 공기유동을 차단한 구역에서 곡립을 자유낙하시키는 방법을 이용하여 추정벼의 평균 종말속도를 구하였다.

이와 같이 두 경우에서의 평균 종말속도가 크게 차이가 나는 것은 주로 측정 방법상의 차이에 연유하는 것으로 판단된다. 즉 정(1987)의 측정 방법에서는 앞에서 고찰한 바와 같이 곡물이 자유 낙하할 때는 투영면적이

수시로 변화하여 공기저항을 적게 받으려는 경향을 가지며 낙하하기 때문에 낙하시의 평균 투영면적이 작아지게 되고 따라서 자연히 곡물의 종말속도는 큰 값을 갖게 될 것이다.

그러나 본 연구에서와 같이 곡물을 상승 기류에 의해 부상시킬 경우에는 투영면적이 가능한 크게 되는 오리엔테이션에서 부상이 시작될 것이기 때문에 1cm 정도의 높이로 부유상태에 있는 곡물의 평균 투영면적은 상대적으로 큰 값을 가지게 되고 이에 따라 종말속도는 상대적으로 작은 값을 가지게 될 것이다.

한편 표12와 13은 표10과 11의 결과를 이용하여 함수율 변화에 따른 곡물의 평균종말속도를 회귀식으로 나타낸 것이다. 일부 회귀식에서의 결정계수를 제외하고는 대부분의 경우 높은 결정계수를 나타내고 있으며 종말속도는 곡물의 함수율이 증가함에 따라 증가함을 알 수가 있다.

Table 10. Mean terminal velocities of barley varieties in accordance with moisture content

| Variety | MC(% wb) | TV(m/s) | | Variety | MC(% wb) | TV(m/s) | |
|----------|----------|---------|------|---------------------|----------|---------|------|
| | | RD | RR | | | RD | RR |
| Unknown | 25.56 | 4.80 | 5.34 | Kangbori (naked) | 16.50 | 5.02 | 5.56 |
| | 22.96 | 4.76 | 5.09 | | 15.36 | 4.76 | 5.27 |
| | 19.40 | 4.58 | 4.95 | | 14.07 | 4.61 | 5.01 |
| | 17.62 | 4.37 | 4.85 | | | | |
| | 14.28 | 4.32 | 4.75 | | | | |
| Baekdong | 24.84 | 4.90 | 5.81 | Songhak (naked) | 17.46 | 4.73 | 5.18 |
| | 20.74 | 4.85 | 5.68 | | 15.56 | 4.55 | 5.12 |
| | | | | | 13.87 | 4.38 | 4.91 |
| | 16.35 | 4.66 | 5.45 | | | | |
| | 14.01 | 4.49 | 5.25 | | | | |

Table 11. Mean terminal velocities of paddy varieties in accordance with moisture content

| Variety | MC(% wb) | TV(m/s) | | Variety | MC(% wb) | TV(m/s) | |
|-----------|----------|---------|------|-----------|----------|---------|------|
| | | RD | RR | | | RD | RR |
| Chilseong | 24.32 | 4.21 | 4.82 | Dongjin | 27.16 | 4.25 | 4.88 |
| | 22.11 | 4.09 | 4.71 | | 22.53 | 4.04 | 4.61 |
| | 16.38 | 3.95 | 4.47 | | 18.29 | 3.99 | 4.49 |
| | 12.22 | 3.86 | 4.36 | | 13.22 | 3.99 | 4.42 |
| Seomjin | 25.84 | 4.09 | 4.73 | Akibare | 26.22 | 4.32 | 4.94 |
| | 23.14 | 4.09 | 4.68 | | 22.03 | 4.17 | 4.81 |
| | 18.17 | 4.06 | 4.61 | | 18.04 | 3.94 | 4.53 |
| | 13.62 | 4.01 | 4.56 | | 13.38 | 3.91 | 4.42 |
| Chucheong | 21.88 | 4.18 | 4.75 | Daecheong | 22.13 | 4.30 | 4.96 |
| | 19.83 | 4.07 | 4.66 | | 14.19 | 4.14 | 4.64 |
| | 16.05 | 4.09 | 4.56 | | | | |

Table 12. Linear regression equations of mean terminal velocity of barley varieties in terms of moisture content

| Variety | Reg. eqs.(TV _d & TV _r : m/s, MC : % wb) | R ² |
|----------|---|----------------|
| Unknown | TV _d =3.61+0.0477MC | 0.932 |
| | TV _r =3.98+0.0507MC | 0.954 |
| Kangbori | TV _d =3.71+0.0178MC | 0.734 |
| | TV _r =3.94+0.0324MC | 0.905 |
| Baekdong | TV _d =4.01+0.0374MC | 0.915 |
| | TV _r =4.58+0.0508MC | 0.965 |
| Songhak | TV _d =2.11+0.152MC | 0.948 |
| | TV _r =3.91+0.0743MC | 0.886 |

Notes) TV_d : Terminal Velocity for the Regular Drop
 TV_r : Terminal Velocity for the Regular Rise

Table 13. Linear regression equations of mean terminal velocity of paddy varieties in terms of moisture content

| Variety | Reg. eqs.(TV _d & TV _r : m/s, MC : % wb) | R ² |
|-----------|---|----------------|
| Chilseong | TV _d =3.51+0.0276MC | 0.971 |
| | TV _r =3.87+0.0383MC | 0.988 |
| Dongjin | TV _d =3.71+0.0178MC | 0.774 |
| | TV _r =3.94+0.0324MC | 0.905 |
| Seomjin | TV _d =3.93+0.00667MC | 0.916 |
| | TV _r =4.37+0.0138MC | 0.990 |
| Akibare | TV _d =3.41+0.0340MC | 0.917 |
| | TV _r =3.82+0.00431MC | 0.961 |
| Chucheong | TV _d =3.87+0.0129MC | 0.421 |
| | TV _r =4.04+0.0318MC | 0.981 |

5. 요약 및 결론

공기선별은 곡물 및 종자선별장치의 중요한 요소중의 하나이기 때문에 대부분의 곡물 또는 종자선별장치에 채용되고 있다. 공기선별장치를 설계하기 위해서는 해당 곡물의 종말속도에 관한 정확한 정보가 필요하다. 그러나 아직까지 우리나라에서는 곡물의 종말속도에 관한 연구가 거의 수행되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구는 곡물의 공기선별에 관한 종합적인 기초자료를 마련하기 위한 연구의 일환으로 4개 품종의 보리와 6개 품종의 벼를 공시하고, 균일한 수직관내의 유속분포를 얻을 수 있도록 고안된 수직풍동을 이용하여 부유법과 낙하법으로 공시곡물의 종말속도를 측정하고 곡물의 크기 및 함수율이 곡물의 종말속도에 미치는 영향을 알아 보기 위해 수행되었으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 종말속도는 측정방법에 따라 약간의 차이를 보였으며 낙하법을 적용하여 측정된 값이 부유법을 적용하여 측정된 값보다 약간 작게 나타났다. 이것은 유동기류에 노출되는 곡물의 평균적인 투영면적의 차이에서 연유되는 것으로 파악되었다.
- 2) 종말속도는 곡물의 크기 및 함수율에 따라 약간의 차이를 나타냈으며 크기가 클수록, 함수율이 높을수록 큰 값을 나타냈다.
- 3) 곡물의 종말속도를 곡물별, 품종별, 측정방법별로 함수율에 관한 회귀식으로 나타냈다. 또한 품종별 평균 종말속도를 함수율에 관한 회귀식으로 표시하였다.

참고문헌

1. 김만수, 박종민, 함수율이 곡물의 크기, 표면적 및 체적에 미치는 영향 · 한국 농업기계학회지, 13(1) : 1-10(1988)
2. Bilanski, W. K., S. H. Collins and P. Chu. Aerodynamic Properties of Seed Grain : Their Behavior in Free Fall. *Agricultural Engineering*, 43(4) : 216-219(1962)
3. Bilanski, W.K. and R. Ral. Behavior of Threshed Materials in a Vertical Wind Tunnel. *Transactions of the ASAE*, 8(3) : 411-413, 416(1965)
4. Casada, J. H., L. R. Walton, and L. G. Wells. Wind Drag on Burley Tobacco Plants. *Transactions of the ASAE*, 23(10) : 189-191(1980)
5. Chuma, Y.S. Uchida and K.H.H. Shemsanga. Simultaneous Measurement of Size, Surface Area, and Volume of Grains and Soybeans. *Transactions of the ASAE*, 25(6) : 1752-1756(1982)
6. Chung, P. K. Measurement on the Mechanical Properties of Grain Using Microcomputer. M. S. Thesis, Seoul National University, Suwoen, Korea (1987)
7. FAO. World List of Seed Processing Equipment. FAO, Rome, Italy(1983)
8. Farran, I. G. and R. H. Macmillan. Grain-Chaff Separation in a vertical Air Stream. *J. agric. Engng Res.* 23(1) : 189-191(1979)
9. Garrett, R. E. and D. B. Brooker. Aerodynamic Drag of Farm Grains. *Transactions of the ASAE*, 8(1) : 49-52(1965)
10. Grochowinz, Josef. Machines for Cleaning and Sorting of Seeds(Chapter 3, pp.21-23). Translated from Polish by the FSPD of the NCSTEL, Supported by USDA and NSF(1972)
11. Harmond, J. E., N. R. Brandenburg, and L. A. Jensen. Physical Properties of Seed. *Transactions of the ASAE*, 8(1) : 30-32(1965)
12. Hawk, A. L., D. Brooker, and J. J. Cassidy. Aerodynamic Characteristics of Selected Farm Grains, *Transactions of the ASAE*, 9(1) : 48-51(1966)
13. Jiang, S., W. K. Bilanski and J. H. Lee. Analysis of the Separation of Straw and Chaff from Wheat by an Air Blast. *Canadian Agricultural Engineering*, 26(2) : 181-187(1985)
14. Kashayap, M. M. and A. C. Pandya. A Qualitative Theoretical Approach to the Problem of Winnowing. *J. agric. Engng Res.*, 10(4) : 348-354 (1966)
15. Kashayap, M. M. and A. C. Pandya. Air Velocity Requirement for Winnowing Operations. *J. agric. Engng Res.*, 11(1) : 24-32(1966)

16. Kawakami, K. Air Resistance of Chopped Forage (I) : Apparent Coefficient of Forage Stem Particles. J. of the JSAM, 34(2) : 175-180(1972)
17. Kawakami, K. Air Resistance of Chopped Forage (II) : Suspension Velocities and Behavior of Forage Stem Particles. J. of the JSAM, 35(1) : 75-79(1973)
18. Keck, H. and J. R. Goss. Determining Aerodynamic Drag and Terminal Velocities of Agronomic Seeds in Free Fall. Transactions of the ASAE, 8(4) : 553-554, 557(1965)
19. Kim, Man Soo and H. K. Koh. Physical Properties of Grain. J. of the KSAME, 6(1) : 73-82(1981)
20. Lee, S. K. Development of Method for Measuring the Grain Separating Performance of Threshers and its Application to the Newly Developed Throw-In Type Thresher. M. S Thesis, Seoul National University.
21. Menzies, D. and W. K. Bilanski. Aerodynamic Properties of Alfalfa Particles. Transactions of the ASAE, 11(6) : 829-831(1968)
22. Mohsenin N. N. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Golden and Breach Science Publishers, Inc., New York(1978)
23. Mueller, R. A., D. B. Brooker, and J. J. Cassidy. Aerodynamic Properties of Black Walnuts : Application in Separating Good from Bad Walnuts. Transactions of the ASAE, 10(1) : 57-61(1967)
24. Reed, W. B., G. C. Zoerb and F. W. Bigsby. A Laboratory Study of Grain-Straw Separation. Transaction of the ASAE, 17(3) : 452-460(1974)
25. Review of the State of the Art in Grain Cleaning. Volume I - IV (600 pages). Unpublished Research Report supported by the Federal Grain Inspection Service, USDA, Kansas State University, Manhattan, Kansas(1986)
26. Rumble, D. W. and J. H. Lee. Aerodynamic Separation in a Combine Shoe. Transactions of the ASAE, 13(1)6-8(1970)
27. Scotti, G. Mechanical Determination of Impurities (in French). Research Report Supported by Joint Group ICC and ISO. Published by Cereal Laboratory, ITCF, Paris, France(1985)
28. Shellard, J. E. and R. H. Macmillan. Aerodynamic Properties of Threshed Wheat Materials. J. Agric Engng. Res., 23 : 273-281(1978)
29. Smith, R. D. and R. L. Strohshine. Aerodynamic Separation of Cobes from Corn Harvest Residues. Transaction of the ASAE, 28(3) : 893-897, 902(1985)
30. Suyama, K. and H. Shimizu. Studies on the Terminal Velocity of Grains(I) : In Case of a Single Grain. J. of the JSAM, 42(2) : 263-269(1979)
31. Suyama, K., F. Sto, and H. Shimizu. Studies on the Terminal Velocities of Grains(II) : In Case of Grain Group. J. of the JSAM, 41(3) : 449-453(1980)
32. Takeuchi, R., Y. Ishii, and M. Iwai. Studies on the Shape of Pneumatic Grain Separations's Path (I). J. of the JSAM, 35(3) : 288-292(1973)
33. Tsuchiya, M., J. Kamide, and K. Ishiwada. Study on the Separation of Unhulled Rice and Brown Rice by Winnowing. J. of the JSAM, 43(3) : 433-442(1981)
34. Uhl, J. B. and B. J. Lamp. Pneumatic Separation of Grain and Straw. Transactions of the ASAE, 9(2) : 244-246(1966)
35. Wolfe, R. R. and C. G. Tatepo. Terminal Velocity of Chopped Forage Materials. Transactions of the ASAE, 15(2) : 137-138, 140(1972)
36. Zoerb, G. C. Instrumentation and Measurement Techniques for Determining Physical Properties of Farm Products. Transactions of the ASAE, 10(1) : 100-109, 113(1967)