

벼의 호흡 특성⁺

Respiration Characteristics of Rough Rice

김 동 철*

김 의 웅*

금 동 혁**

정회원

정회원

정회원

D. C. Kim

O. W. Kim

D. H. Keum

ABSTRACT

The objectives of this study were to evaluate respiration characteristics and develop empirical respiratory rate equations for short grain rough rice. The carbon dioxide concentrations generated from rough rice at four level temperatures(10, 20, 30, 40℃) and 4 level moisture contents(17.2, 21.5, 25.9, 31.6%, d.b.) were measured by gas chromatography.

The respiratory rates increased exponentially with grain temperature and also with moisture content. The relationship between respiratory rate and grain temperature fitted the Arrhenius' and Gore's equations very well.

Two empirical respiratory rate equations were presented as a function of grain temperature and moisture content. The values of determination coefficient for the developed respiratory rate equations were 0.999, and the result of t-test showed that there were no significant differences between predicted and measured respiratory rates on significance level of 1%. Therefore, it appeared that respiratory rates predicted by the respiratory rate equations agreed well with measured values.

An equation for predicting dry matter losses of rough rice during storage was presented by modifying the respiratory rate equations based on chemical reaction of decomposition of carbohydrate.

주요용어(Key Words): 벼(rough rice), 호흡속도(respiratory rate), 건물중량손실율(dry matter loss)

1. 서 론

수확 후 곡물의 손실량은 어떤 나라에서는 총생산량의 50%를 넘고 있는 것으로 보고되고 있으며, 손실의 대부분은 곤충, 미생물, 설치류 및 조류에 의한 것과 호흡에 의한 손실 등을 들 수 있다(Sauer, 1992). 지금까지 곡물의 저장시 품질유지를 위한 여

러 가지 방법이 검토되어 왔으며, 최근, 식량사정 및 가치관의 변화에 따라 쌀의 고품질화가 요망되고 있다. 저장시의 곡물의 품질열화를 방지하기 위해서는 생물체로서의 호흡작용에 의한 자기소화를 억제하고 생체로서의 활성을 유지할 필요가 있다. 따라서 곡물의 호흡특성은 최적 저장조건을 결정하기 위한 중요한 인자가 된다(後藤 등, 1993). 또한 건조시의

⁺ 본 연구는 농림수산개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 한국식품개발연구원 특수연구사업단 쌀 연구사업부

** 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

최적 온도를 산출하는 기준으로서 호흡특성이 주목 받고 있다(疋田 등, 1996).

호흡량의 측정방법은 크게 1) 배출되는 이산화탄소의 농도를 직접 측정하는 방법, 2) 소비되는 산소 농도를 직접 측정하는 방법, 3) 호흡에 의해 감소된 곡물의 중량을 측정하는 방법 등 3가지 방법이 있다. 또한, 측정형태에 따라 동적 및 정적인 방법으로 구분할 수 있다. 곡온을 일정하게 유지시킨 후 일정한 양의 공기를 공급하는 동적인 방법은 순간적인 값을 얻을 수 있어 함수율의 변화에 의한 오차가 없는 장점은 있지만 가스의 농도를 연속적으로 측정할 수 있는 장치가 필요한 단점이 있다. 한편, 곡물을 밀폐된 용기에 담아 일정기간 후에 생성되는 이산화탄소 농도를 측정하는 정적인 방법은 곡물 사이에 이산화탄소가 축적되어 일부 호흡이 저해되는 단점에도 불구하고 간편성 때문에 많이 이용되고 있다(村田 등, 1991).

지금까지 벼와 관련하여 호흡열량을 측정한 예는 그다지 많지 않다. 村田 등(1975)은 공기를 수산화칼륨 용액을 통과시켜 이산화탄소를 제거한 공기를 일정한 곡온의 벼층을 통과시켜 호흡에 의해 발생된 이산화탄소 농도를 측정하여 건물 단위중량당 호흡열량을 온도와 함수율에 대해 2차항의 Gore형의 식으로 나타내었다. 이 때 벼의 온도는 10~40℃, 함수율은 13.9~34.9%, w.b. 범위였다.

Seib 등(1980)은 저장온도 18~35℃, 함수율 15~23%, w.b., 저장기간 41~85일 범위에서 중립종 벼와 장립종 벼를 저장하는 동안에 발생하는 이산화탄소량을 측정하여 건물 중량손실율을 함수율, 저장온도 및 저장시간의 함수로 제시하였다.

村田 등(1991)은 벼 및 소맥 등의 호흡특성을 동적인 방법으로 측정하여 함수율에 대해 2차항, 온도에 대해 1차항의 Gore형의 식으로 나타내었다. 이 때 공기는 순도 99.9%의 산소만을 사용하였으며, 이산화탄소 농도가 안정되게 나타나는데 약 15분 정도가 소요되었다. 이 결과는 1976년의 결과와 다소 차이를 나타내었는데, 이는 품종의 차이와 고순도의 산소만을 공급한데 따른 산소장해에 기인한 것으로 보고하였다. 이를 보완하기 위하여 村田 등(1993)은 대기중에서 이산화탄소만을 제거하고, 소맥과 대맥에 대해 호흡특성을 조사하였다.

後藤 등(1993)은 정적인 방법을 이용하여 소맥, 대맥 및 벼의 호흡속도를 측정하였다. 곡립의 수분 함량은 12~27%, w.b. 범위였으며, 곡온은 5, 15, 25, 35℃의 4수준 이었다. 곡립의 호흡속도는 소비된 산소량을 측정하여 함수율과 온도의 관계식으로 나타내었다.

疋田 등(1996)은 일본산 벼 3개 품종에 대하여 정적인 방법을 이용하여 경시적인 가스농도를 가스크레마토그래피로 측정하였다. 온도조건 10~35℃에서 함수율을 일정하게 유지한 다음 함수율의 변화에 따라 호흡특성을 측정하였고, 온도조건을 25℃로 고정한 다음 15~40%, d.b.의 함수율 벼에 대한 호흡율을 측정하여 Arrhenius 및 Gore 식으로 표현하였다. 그러나 온도 10~35℃, 함수율 15~40%, d.b.의 전 범위에 대한 실험을 실시하지는 않았다.

河野 등(1996)은 함수율 19~35%, d.b.의 벼와 보리에 대해 온도 0~40℃의 범위에서 적외선 가스분석계로 호흡속도를 측정하여 함수율에 따른 호흡속도를 Arrhenius 식으로 나타내었다. 이 때 계수의 값을 함수율의 2차 다항식으로 나타내고 상수 값을 제시하였다.

한편, 정 등(1991)은 장립종 벼(Tebonnet variety)의 호흡특성을 정적인 방법으로 측정하였으며, 가스농도 측정에는 Aspirating pump(Model 400A, Kitagawa Inc.)을 이용하였으며, 수분 함량 12.5~27.0%, w.b., 공기온도 20, 27, 34℃에서 저장기간에 따른 호흡속도를 제시하였다.

현재 조사된 바로는 국내산 벼를 대상으로 호흡특성을 측정한 연구는 찾아 볼 수 없는 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 국내산 벼를 대상으로 정적인 방법을 이용하여 온도 및 함수율별 호흡특성을 구명하고, 곡물의 온도 및 함수율의 함수로 표시되는 호흡속도식을 개발하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 재 료

본 실험에 사용한 벼는 함수율 32.5%, d.b.의 중만생종인 동진벼로서 전남 장성군 진원면 진원 미곡종합처리장에서 '96년 10월 23일 구입하여 한국식품개

Table 1 Operating conditions of GC for analysis of gas produced from rough rice

Column	CTR-1 (Alltech)
Operation	30℃
Carrier gas	He
Detector	TCD
Injector temperature	60℃
Detector temperature	60℃

발연구원에서 정선한 다음, 음건하면서 함수율을 조정하여 공시하였다. 음건중 시간당 평균 건감율은 0.43%, d.b. 이었다.

나. 실험방법

저장조건은 온도를 10, 20, 30, 40℃의 4수준, 함수율은 17.2, 21.5, 25.9, 31.6%, d.b.의 4수준으로 하였다. 수분이 조절된 500g의 시료를 용량 1,800ml의 내열 유리로 제작한 용기에 넣고, 용기의 상부를 직경 1cm의 실리콘 마개가 부착된 두께 1cm의 아크릴 판으로 완전 밀봉하였다. 시료를 담은 호흡을 측정 용기는 일정온도가 유지되는 저온저장고에 저장하면서 일정시간 간격으로 가스 농도를 측정하였다.

가스 농도는 저장온도 1~5시간 간격으로 가스크로마토그래피(Shimadzu GC-14 APT, Shimadzu Co., Japan)을 사용하여 측정하였다. 가스크로마토그래피의 운전조건은 표 1과 같았으며, 가스 주입량은 2ml 였다. 한편, 함수율은 10g입자-135℃-24시간의 상압정온측정법으로 측정하였다.

1) RQ(呼吸商, Respiratory quotient)

호흡기질을 알 수 있는 RQ 즉, 호흡을 통해 생성되는 이산화탄소량과 소비되는 산소량의 물비는 다음 (1)식으로 구하였다.

$$RQ = \frac{\text{mole of } CO_2}{\text{mole of } O_2} = \frac{\text{ml of } CO_2}{\text{ml of } O_2} \dots\dots (1)$$

여기서 이산화탄소 생성량과 산소 소비량은 다음

(2)식으로 계산하였으며, 호흡을 측정용기에서 공간체적은 벼(Akibare)의 진밀도식(김, 1981)으로부터 구하였다.

$$D_g = \frac{C \times V}{100 \times W} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 D_g : CO₂의 생성량 및 O₂ 소모량(ml /kg dry matter)
 C : 가스크로마토그래피에서 측정된 O₂, CO₂ 농도(%)
 V : 호흡을 측정용기 공간체적 (ml)
 W : 시료의 건물중량 (kg)

2) 호흡량

호흡량은 (2)식과 이산화탄소의 밀도로부터 건물의 단위 중량당 이산화탄소의 발생량을 구한 다음, 측정 시간과의 관계로부터 호흡량을 구하였다.

$$D = D_g \times \rho_c \dots\dots\dots (3)$$

여기서 D : 단위 중량당 CO₂ 발생량(CO₂ mg/kg dry matter)
 ρ_c : CO₂ 밀도(mg/ml)

식 (3)에서 이산화탄소의 밀도는 10, 20, 30, 40℃에서 각각 1.906, 1.841, 1.780, 1.724 mg/ml (Kader, 1992)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 저장시간에 따른 호흡상(RQ)의 변화

호흡기질이 탄수화물인 경우 ATP의 생성을 위해 소모되는 산소량과 이 때 발생하는 이산화탄소량은 동등한 물비인 반면, 지질이나 유기산 등과 같은 기질일 경우 이 비율은 달라진다. 호흡을 통해 생성되는 이산화탄소량과 소비되는 산소량의 비를 나타내는 RQ의 값은 호기성호흡일 경우 0.7~1.3 범위이며, 1.3 이상일 때는 혐기성 호흡을 나타낸다. 기질의 측면에서 살펴보면 RQ가 1일 경우 기질은 탄수화물로

서 일반적으로 glucose나 fructose가 주로 사용되며, 때로는 hemicellulose 및 유기산 등이 기질이 되기도 한다(이 등, 1996).

표 2는 함수율 31.6%, d.b.의 벼를 30℃에서 저장 하면서 RQ 값을 측정 한 결과로서 이산화탄소 농도 17.7%까지는 RQ 값이 1.3 미만으로 혐기성 호흡을 나타내었다. 그러나 이산화탄소 농도 18.7%부터는 RQ 값이 1.3 이상을 나타내어 혐기성 호흡을 하고 있음을 알 수 있었으며, 이는 함수율 17.2~31.6% d.b.인 벼를 10~40℃로 저장한 다른 실험구에서도 유사한 결과를 나타내었다.

한편, 혐기성 호흡이 시작된 후에도 시간의 경과와 함께 이산화탄소 농도는 50% 정도까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 50% 근처에서는 거의 변화가 없었다. 이 때 산소 농도는 0.9% 정도로 거의 변화가 없었다.

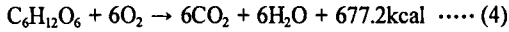
나. 호흡의 함수율 및 온도 의존성

벼의 호흡과정은 일련의 효소반응이지만 RQ 값이 거의 1의 값을 나타내므로 다음 (4)식으로 나타낼 수 있다.

Table 2 Respiratory quotients of rough rice with 31.6%, d.b. moisture content at storage temperature 30℃

Time (hr)	Concentration (%)		RQ value
	CO ₂	O ₂	
0.00	0.0937	20.4720	-
1.00	0.6108	20.0289	1.1670
2.00	1.1918	19.4079	0.9356
4.00	2.4616	17.9884	0.8945
5.00	3.1520	17.2207	0.8993
6.00	3.7393	16.5922	0.9344
7.00	4.3597	15.8624	0.8501
8.00	5.0121	15.1256	0.8855
9.00	5.5719	14.5293	0.9388
12.00	7.1957	12.7836	0.9302
15.00	9.0898	10.7296	0.9222
18.00	10.3510	9.3743	0.9306
23.00	12.4946	6.9450	0.8824
25.27	13.4331	6.0011	0.9943
27.37	14.1457	5.4063	1.1980
30.32	15.1644	4.1524	0.8124
33.20	15.8698	3.5640	1.1988
35.83	16.5194	2.9624	1.0798
38.55	16.9565	2.6081	1.2337
41.82	17.6968	1.9795	1.1777
45.62	18.6843	1.4048	1.7183*
51.60	19.3156	1.2428	2.4185*
54.33	19.6282	1.2031	7.8741*

* RQ > 1.3



식 (4)는 glucose와 산소를 기질로 하는 2차 효소반응으로 반응속도 즉, 호흡속도는 glucose와 산소농도의 곱에 비례하지만, 벼의 경우 반응속도에 비해 glucose의 함량은 충분하다고 가정할 수 있으므로 반응속도는 산소농도만에 의존하는 1차 반응이 된다. 본 연구에서 사용한 밀폐된 용기 내에서 호흡속도는 용기내의 산소농도에 의존하나 반응 초기단계에서 용기내 산소농도는 충분하므로 산소농도가 일정한 반응으로 볼 수 있다. 따라서 반응속도는 산소농도에는 관계 없으므로 반응속도는 식(5) 및 (6)과 같은 Arrhenius식 및 Gore 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = R_0 \exp(-a/T) \dots (5)$$

여기서 R : 호흡속도(CO₂ mg/hr kg dry matter)

R₀ : 벼 고유의 호흡계수(CO₂ mg/hr kg dry matter)

a : 벼 고유의 온도계수(K)

T : 벼의 온도(°C)

$$R = R_0 \exp(\beta t) \dots (6)$$

여기서 R₀ : 0°C의 호흡속도(CO₂ mg/hr kg dry matter)

β : 벼 고유의 온도계수(°C⁻¹)

t : 벼의 온도(°C)

그림 1과 2는 벼의 호흡속도를 Arrhenius 및 Gore 식에 적합시킨 결과로서, 함수율 17.2~31.6%, d.b.와 저장온도 10~40°C의 범위에서 두 식으로 잘 나타낼 수 있었다. 최소자승법으로 결정한 Arrhenius 및 Gore 식의 계수 값은 표 3과 같았다.

표 3의 R₀ 및 β 값은 함수율에 따라 차이가 있을 수 있었으며, 특히 Gore 식의 계수중 0°C에서의 호흡속도를 나타내는 R₀ 값은 함수율이 낮을수록 대단히 작아져 함수율 17.2%, d.b.에서는 거의 0에 가까운 값을 나타내었다.

河野 등(1996)의 보고에 의하면 함수율 25.4%, d.b.인 '94년산 히노히카리의 R₀ 및 a의 값은 각각 2.2864 × 10¹³, 8421.5로서, 본 연구에서 이와 유사한 함수율 25.9%, d.b.의 결과인 3.0905 × 10¹⁶, 10783.3에 비해 대단히 낮은 값을 나타내었다. 이 차이를 구체적으로 살펴보기 위하여 河野 등(1996)이 보고한 '94년산 히노히카리 20.8, 25.4%, d.b.의 실험데이터와, 疋田 등(1996)이 보고한 '91년산 나쓰히카리

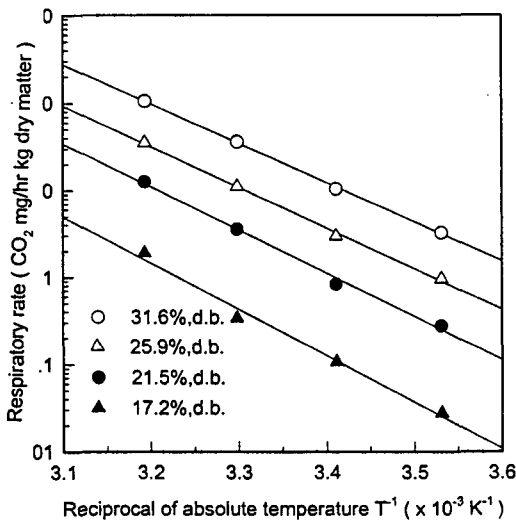


Fig. 1 Fitness of the relationship between temperature and respiratory rate of rough rice for the Arrhenius' equation.

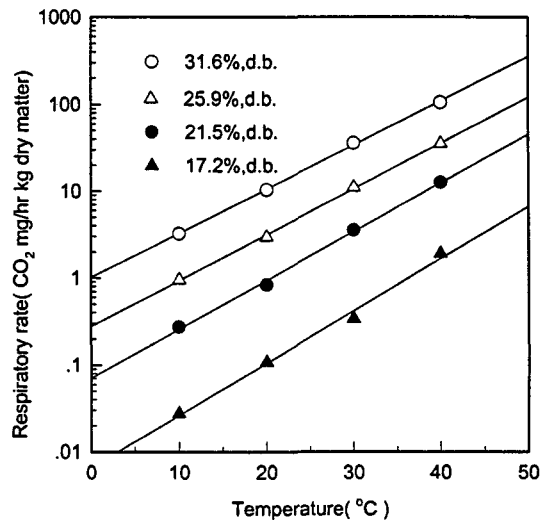


Fig. 2 Fitness of the relationship between temperature and respiration rate of rough rice for Gore's equation.

Table 3 Coefficients of the Arrhenius' and Gore's equation for rough rice

Moisture content (% , d.b.)		17.2	21.5	25.9	31.6
Arrhenius	R_a	1.5770×10^{17}	8.8754×10^{16}	3.0905×10^{16}	2.5756×10^{16}
	α	12,255.9	11,445.9	10,783.3	10,376.1
	r	0.989	0.995	0.998	0.999
Gore	R_o	0.00655	0.07058	0.27482	1.01072
	β	0.13856	0.12928	0.12172	0.11704
	r	0.999	0.999	0.998	0.993

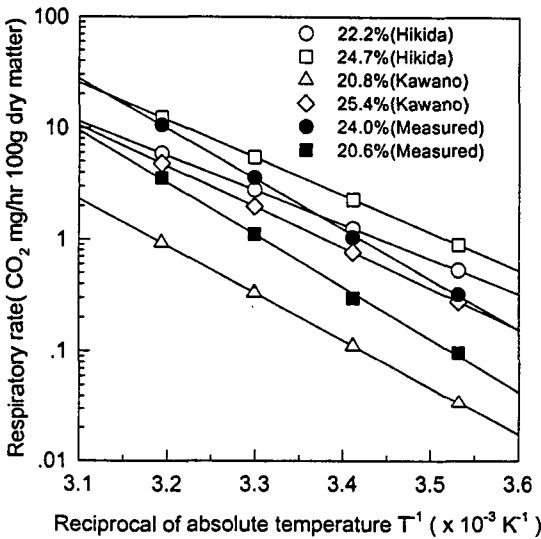


Fig. 3 Comparison of measured and referenced^{7,10} respiratory rates of rough rice.

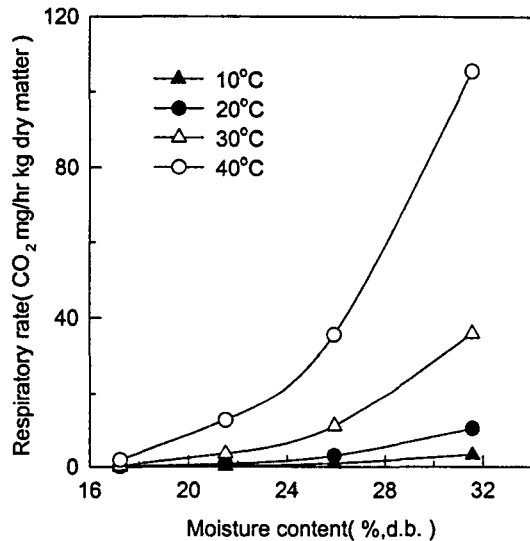


Fig. 4 Relationship between moisture contents and respiratory rates of rough rice.

22.2, 24.7%, d.b.의 실험데이터를 본 연구의 실험치와 비교한 결과 그림 3과 같았다. 그림 3에서 알 수 있듯이 비슷한 함수율에서도 호흡속도는 저장온도에 따라 다소 차이는 있지만 본 연구결과에 비해 河野 등(1996)의 결과는 낮은 값을 나타내었고, 疋田 등(1996)의 결과는 다소 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 차이는 품종의 차이, 생산지역 및 기후 등의 차이에서 기인한 것으로 판단되었다.

벼와 같은 종자의 호흡속도는 함수율에 크게 의존하는데, 세포조직과의 결합에 의해 구속되지 않는 자유수가 출현하기 시작하는 함수율은 23~25%, d.

b.이며, 그 이상의 함수율 영역에서는 자유수의 증가에 따라 호흡속도는 급격하게 증가하게 된다(疋田 등, 1996). 그림 4는 곡물의 온도 10, 20, 30, 40°C에서 함수율에 따른 호흡속도를 나타낸 것으로 疋田 등(1996)의 결과와 동일하게 함수율 25.9%, d.b. 이상에서 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있었다.

표 3 및 그림 1에서와 같이 Arrhenius 식의 R_a 와 α 의 값은 함수율의 함수임을 알 수 있다. 따라서 R_a 와 α 의 값을 함수율의 2차 함수로 가정하고, 다음 식(7)과 같이 벼의 호흡속도를 함수율과 온도의 함수로 나타내고, 실험치와 적합시켜 계수의 값을 결정

하였다.

$$R = (a + bM + cM^2) \exp\left(-\frac{d + eM + fM^2}{T}\right) \dots (7)$$

여기서, M : 함수율(% , d.b.)
 T : 벼의 온도(K)
 a, b, c, d, e, f : 계수

또한, 동일하게 Gore 식에서의 R_0 와 β 의 값을 각각 함수율의 2차 함수로 가정하고, 다음 식 (8)과 같이 벼의 호흡속도를 함수율과 온도의 함수로 나타내고, 실험치와 적합시켜 계수의 값을 결정하였다.

$$R = (g + hM + iM^2) \exp(jt + kMt + lM^2t) \dots (8)$$

t : 벼의 온도(°C)
 g, h, i, j, k, l : 계수

최소자승법으로 식 (7) 및 식 (8)의 계수를 결정한 결과는 표 4와 같았다. 이 때 결정계수는 각각 0.999, 0.999이었으며, t 검정 결과 실험치와 예측치간에는 1%의 유의수준에서 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 4 Constants in Equation (7) and (8)

a	9.9617421×10^{17}
b	-6.451326×10^{16}
c	1.1005771×10^{15}
d	18,183.170515
e	-457.9114417
f	6.6894676201
g	2.560669912
h	-0.276310788
i	7.415241×10^{-3}
j	0.577460313
k	$-3.2345437 \times 10^{-2}$
l	5.5687×10^{-4}

함수율 17.2~31.6%, d.b.와 저장온도 10~40°C의 범위에서 식 (7)에 의해 예측한 결과와 실험치를 비교한 결과는 그림 5와 같았다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 예측치와 실험치는 대단히 잘 일치하여 식 (7)은 함수율 17.2~31.6%, d.b., 저장온도 10~40°C 범위에서 벼의 호흡속도를 잘 나타내는 것으로 판단되었다. 또한, 동일 온도 및 함수율 범위에서 식 (7)과 식 (8)에 의한 예측치는 거의 일치하였다.

다. 건물중량 손실을

벼가 호흡할 때 건물인 탄수화물 1g이 분해하면 1.47g의 이산화탄소와 3.76kcal의 열이 발생되므로 벼의 저장중에 발생하는 이산화탄소량이나 열량을 측정하여 건물중량 손실율을 계산할 수 있다. 건물 1kg당 1kcal의 열이 발생할 때 1kg의 건물중에서 0.26596g 즉, 0.026598%의 탄수화물이 분해되는 것을 의미하고, 이산화탄소 1g이 생성될 때 1kg의 건물중에서 0.68182g 즉, 0.068182%의 탄수화물이 분해되는 것을 의미한다. 따라서 건물중량 손실율은 다음 (9)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$DML = \frac{0.068182 \times R}{1000} \dots (9)$$

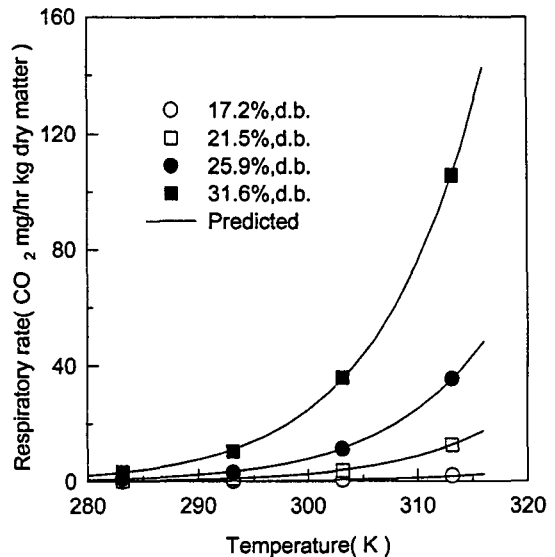


Fig. 5 Comparison of measured and predicted respiratory rates of rough rice.

여기서, DML : 시간당 건물중량 손실율(%)

참 고 문 헌

4. 결 론

본 연구는 벼의 함수율 및 온도별 호흡특성을 구명하고, 호흡속도식을 개발하기 위하여 수행되었다. 벼의 함수율은 17.2~31.6%, d.b. 범위에서 4수준, 온도는 10~40℃ 범위에서 4수준으로 하였다. 일정한 온도를 유지하는 밀폐된 용기내에 시료를 넣고 용기내의 이산화탄소 및 산소농도의 경시적 변화를 가스 크로마토그래피를 이용하여 측정하였다.

호흡속도 즉, 이산화탄소 발생율의 온도 및 함수율 의존성을 분석하고, 호흡속도와 온도 및 함수율의 관계식을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 벼는 이산화탄소의 농도가 17.7% 이하에서는 호기적호흡 특성을 나타내었으며, 18.7% 이상에서는 혐기적호흡 특성을 나타내었다.

2. 벼의 온도증가에 따른 호흡속도는 지수 함수적으로 증가하였으며, 함수율의 증가에 대해서도 동일하게 지수 함수적으로 증가하였다.

3. 벼의 온도와 호흡속도의 관계는 Arrhenius 및 Gore형의 식으로 잘 나타낼 수 있었으며, 4수준의 함수율에 대한 호흡계수와 온도계수를 결정하였다.

4. 곡물의 온도와 함수율의 함수로 나타낸 2개의 호흡속도식을 제시하였다. 이 호흡식들의 결정계수는 모두 0.999로 나타났으며, t 검정결과 1%의 유의수준에서 실험치와 예측치간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 개발한 호흡속도식은 벼의 호흡속도를 매우 잘 나타내는 것으로 판단되었다.

5. 벼의 호흡과정을 탄수화물이 분해되어 이산화탄소, 물 및 열이 발생하는 0차 효소반응으로 간주하고, 개발한 호흡속도식을 수정한 저장벼의 건물중량 손실율의 예측방정식을 제시하였다.

1. 이승구. 1996. 원예작물의 수확후 생리. p. 157, 성균사.
2. Sauer, D. B. 1992. Storage of cereal grains and their products. p. 283, A.A.C.C., Inc. Minnesota, USA.
3. Adel A. Kader. 1992. Postharvest technology of horticultural crops. p. 93, Univ. of California, USA.
4. 김만수. 1981. 곡물의 물리적 특성 및 열특성에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
5. 정중훈, 라리 알 버어마. 1991. 벼의 압력손실 및 호흡모델과 자동통풍에 관한 연구. 한국농업기계학회지 16(3):298-311.
6. 後藤清和, 三輪精博, 山田勝義. 1993. 穀粒の呼吸特性に関する研究. 日本農業機械學會誌 55(3):51-57.
7. 疋田慶夫, 韓 東海, 安部武美. 1996. 粃の呼吸速度に関する研究. 日本農業機械學會誌 58(2):25-30.
8. 村田 敏, 中馬 豊, 大塚寛治. 1976. 農産物貯藏庫の通氣と換氣に関する式. 日本農業機械學會誌 38(2):233-238.
9. 村田 敏, 河野俊夫, 伊賀上隆, 小出章二, 田中史彦. 1991. 禾穀類穀物の呼吸特性. 日本農業機械學會九州支部誌 40:61-65.
10. 村田 敏, 河野俊夫, 中野浩平, 喜田環樹, 田中史彦, 關 童司, 小出章二. 1993. 穀物の呼吸特性(第2報). 日本農業機械學會九州支部誌 42:61-67.
11. 河野俊夫, 中野浩平, 喜田環樹, 村田 敏, 内野敏剛, 井上眞一. 1996. 赤外線ガス分析計による粃・小麥の呼吸特性の測定. 日本農業機械學會誌 58(6):21-29.
12. Seib, P. A., H. B. Pfost, A. Sukabdi, and R. Burroughs. 1980. Spoilage of rough rice measured by evaluation of carbon dioxide. Paper presented at the regional grains post harvest workshop, Malaysia.