

## 쌀의 저장중 수분이동에 의한 균열현상에 관한 연구

목철균 · 이상기

경원대학교 공과대학 식품생물공학과

### Cracking of Rice Caused by Moisture Migration during Storage

Chulkyoon Mok and Sang-Ki Lee

Department of Food and Bioengineering, Kyungwon University

#### Abstract

Cracking of rice caused by moisture migration during storage under different relative humidity conditions was investigated for the establishment of safe storage condition of rice. Rice was cracked when a large difference in equilibrium relative humidity ( $\Delta ERH$ ) between the rice and the environment was present. External and internal cracks were generated as the results of moisture desorption and adsorption, respectively. The external cracks by moisture desorption generated in all directions and shaped irregularly, while the internal cracks by moisture adsorption did in radial direction and showed a typical shape. The cracking trend could be analyzed by the Weibull function, and the cracking constant increased with  $\Delta ERH$ . The frequency of cracked rice increased linearly with  $\ln(\Delta ERH)$ . The critical crack-inducing  $\Delta ERH$  was 11.3~16.4% during desorption and 10.8~17.1% during adsorption. A diagram for the safe storage of rice was developed with respect to the initial moisture content and the water activity of rice.

Key words: rice, cracking, relative humidity, desorption, adsorption

#### 서 론

쌀은 우리의 주식이며 우리 나라 농업에서 가장 중요한 작물로서 농업소득의 44%, 농가소득의 23%를 점유하고 있을 뿐만 아니라 식량안보면에서 매우 중대한 위치를 차지하고 있다. 우리 나라에서의 쌀 유통체계는 10~11월에 벼를 수확하여 상온에서 연중 보관하면서 수요에 따라 도정하는 방식을 운영하며, 1991년부터 미곡종합처리장(RPC, Rice Processing Center)을 보급하기 시작하여 현재 220여개의 RPC를 운영중이나 생산량의 20%정도를 처리하고 있는 수준에 지나지 않아 유통 중 양곡손실이 크며 특히 고온 다습한 장마철과 하절기에 품질열화가 심각하다.

또한 도정한 쌀을 포대나 지대에 담아 유통하는데 쌀의 흡습성에 의하여 저장조건에 따라 건조한 환경 하에서의 탈습 및 다습한 환경 하에서의 흡습을 반복

적으로 거치게 된다. 이때 흡습 및 탈습 등 수분이동 방향에 따라 곡립 내부에서 위치별 수분함량의 차이가 생기며 수분함량의 극부적 증가 및 감소에 따라 각각 부피팽창 및 수축이 일어나고 이에 따른 응력이 발생하며, 발생한 응력의 크기가 쌀의 기계적 강도를 초과할 경우 균열이 발생하여 동할미가 된다<sup>(1-6)</sup>. 균열이 발생한 동할미는 저장, 처리, 유통 및 소비시 약한 충격에도 부서져 췌미가 되며 쌀의 상품가치를 저하시킬 뿐만 아니라 해충발생을 촉진하고, 효소반응속도를 증가시키며 지방질 산화를 가속화시켜 쌀의 품질을 급격히 저하시키며 취반 후 외관 열악, 이취 발생 및 조직감 변화를 수반하여 식미가 저하된다.

따라서 쌀의 저장중 수분이동 의한 동할미 발생에 관한 연구는 저장중 쌀의 균열방지 방법 확립 및 균열 방지를 위한 저장, 포장조건의 최적화를 위하여 필수적인 중요한 과제이다. 본 연구는 쌀의 수분이동에 따른 균열현상을 구명하고 균열을 발생시키는 임계조건을 산출하여 이를 토대로 쌀의 균열을 방지할 수 있는 저장조건을 제시함으로써 수확한 쌀의 효율적 이용을 도모하고자 수행되었다.

Corresponding author: Chulkyoon Mok, Department of Food and Bioengineering, College of Engineering, Kyungwon University, San 65 Bokjung-dong, Sujung-ku, Sungnam, Kyungki-do, 461-701, Korea

**재료 및 방법**

**쌀**

본 연구에서 사용한 쌀은 1997년에 충남 당진에서 재배한 추청쌀로서 대동물산(주) 종합미곡처리장에서 도정한 것이었다.

**쌀의 일반성분 분석**

쌀의 수분은 55°C에서 3시간 동안 예비 건조한 후 135°C에서 2시간 건조하여 측정하였으며, 회분, 단백질, 지방함량은 AACCB방법<sup>7)</sup>으로 분석하였다.

**상대습도 조절**

데시케이터 내의 상대습도는 과포화염용액을 사용하여 조절하였다. 즉 다양한 염을 사용하여 제조한 과포화염용액을 각각의 데시케이터의 바닥에 넣고 데시케이터의 뚜껑을 덮어 저온배양기(Model 815, Precision Scientific Co., U.S.A.)에 장치하고 온도를 25°C로 유지하여 다양한 상대습도를 갖는 환경을 조성하였다<sup>8)</sup>.

**수분활성 측정**

쌀의 수분활성은 수분활성측정기(Novasina Thermoconstanter TH200, Axair Ltd., Switzerland)를 사용하여 15, 25, 35°C에서의 수분활성을 측정하였다.

**등온흡습곡선**

쌀을 마찰식 분쇄기(Cyclotec 1093 sample mill, Tecator, Sweden)를 사용하여 분쇄한 후 동결건조기를 사용하여 압력 10 μmHg의 감압조건 하에서 10일간 상온 진공건조한 후 즉시 수분활성 측정 cell에 담아 상대습도를 조절된 데시케이터에 넣고 25°C에서 3일~3주간 흡습시킨 시료의 온도별 수분활성과 수분함량을 측정하여 등온흡습곡선을 작성하였다. 작성된 등온흡습곡선은 식(1)과 같이 G.A.B. (Guggenheim-Anderson-De Boer) 방정식<sup>9)</sup>을 사용하여 모델링하였다.

$$m = \frac{Aw}{A \cdot Aw^2 + B \cdot Aw + C} \quad (1)$$

여기서, m=수분함량(g water/g solid)

Aw=수분활성도

A, B, C=상수

**쌀의 수분활성 조절**

쌀을 polystyrene weighing dish에 얇게 깔고 상대습도를 조절한 데시케이터의 상부에 장치하여 25°C에서

4주간 방치하여 수분함량을 조절하였다. 수분함량이 조절된 쌀의 일부를 사용하여 수분활성을 측정하고 흡습 및 탈습에 따른 균열실험의 시료로 사용하였다.

**수분이동에 따른 쌀의 균열**

흡습 및 탈습환경에서 쌀의 균열발생을 Fig. 1과 같은 장치를 사용하여 조사하였다. 즉 미량검측기(Conway microdiffusion unit, model 6031-02, Sibata Co., Japan)의 외곽부에 Table 1의 과포화염용액을 넣고 수분활성이 조절된 쌀 25알을 내곽부에 넣은 후 즉시 뚜껑을 덮어 light box 위에 장착하고 25°C에서 다양한 상대습도에 노출된 시간에 따라 균열이 발생한 쌀의 개수를 계수하였다.

**균열의 미세구조**

흡습 및 탈습환경 하에서 발생한 균열의 구조를 CCD 카메라(Pico scopeman, Moritex Corp., Japan)를 사용하여 촬영하고 화상분석기(BMI plus, Version 1.0, (주)범미유니버스)를 사용하여 분석하였다.

**동할미 발생 모델**

다양한 상대습도 하에 노출된 시간에 따른 동할미

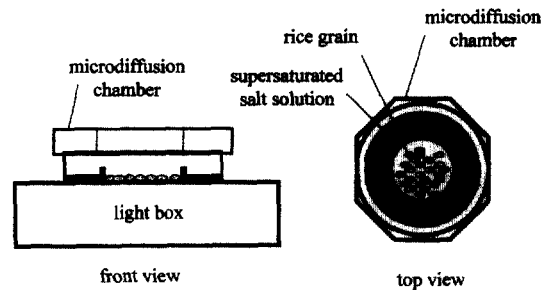


Fig. 1. Experimental set-up for cracking of rice under different RH conditions.

Table 1. Supersaturated salt solutions used and their relative humidities at 25°C

Salt solution	RH (%)
Potassium phosphate	93.5
Magnesium sulfate	89.0
Potassium chloride	84.3
Sodium chloride	75.3
Sodium chromate	64.5
Magnesium nitrate	52.9
Potassium carbonate	43.2
Magnesium chloride	32.8
Potassium acetate	22.5
Lithium chloride	11.3

발생율 식 (2)와 같이 Weibull 분배함수<sup>(10)</sup>에 의거하여 SAS를 사용하여 Gauss방법에 의한 비선형 회귀분석을 실시하였다<sup>(11)</sup>.

$$\frac{C - C_e}{C_0 - C_e} = \exp[-(A \cdot t)^n] \quad (2)$$

여기서, C=시간 t에서의 동할미 갯수  
 C<sub>0</sub>=초기 동할미 갯수  
 C<sub>e</sub>=최종 동할미 갯수  
 A=균열상수(min<sup>-1</sup>)  
 t=시간(min)  
 n=형상인자

**결과 및 고찰**

본 실험에 사용한 쌀의 수분함량은 13.36% (w.b.)이었고, 이는 건물기준으로 15.42% (d.b.)에 해당하였으며, 25°C에서의 수분활성도는 0.531이었다. 단백질 함량은 6.22%이었으며 회분은 0.35%, 지방은 1.36%이었다.

쌀의 등온흡습곡선은 Fig. 2와 같이 전형적인 sigmoid 형태의 흡습곡선을 나타내었으며 동일 수분함량에서는 온도가 높아질수록 수분활성이 증가하였다. 쌀의 등온흡습곡선을 식 (1)과 같이 G.A.B. (Guggenheim-Anderson-De Boer) 방정식<sup>(9)</sup>을 사용하여 모델링한 결과 온도별 변수 값은 Table 2와 같이 온도가 증가함에 따라 변수 A의 값은 감소하였고, 변수 B의 값은 증가

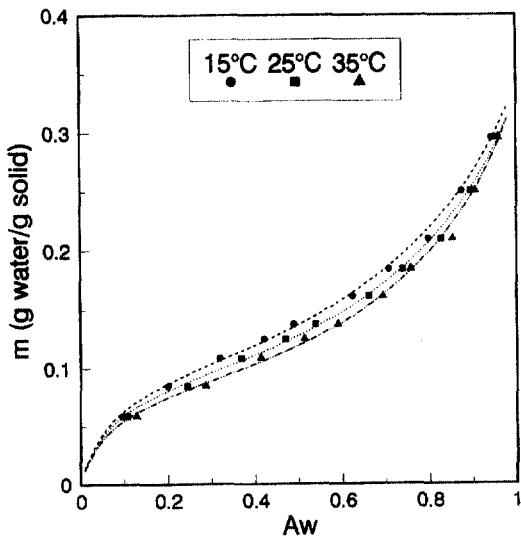


Fig. 2. Moisture adsorption isotherms of rice at different temperatures.

Table 2. Constants of the G.A.B. equation for adsorption isotherms of rice at different temperatures

Constants	Temperature (°C)		
	15	25	35
A	-7.3181	-8.2050	-9.2612
B	9.5484	10.4902	11.4912
C	0.7254	0.1793	0.7941

하였다.

과포화염용액을 사용하여 수분함량 및 수분활성을 조절한 쌀을 25°C에서 상대습도를 달리한 흡습 및 탈습환경하에 노출시켰을 때 발생하는 균열의 형상은 Fig. 3과 같았다. 쌀의 평형상대습도(ERH=100×Aw) 보다 낮은 상대습도 하에서는 탈습이 일어나며 이 때 발생하는 균열은 불규칙한 형상을 보였으며 균열은 쌀알의 표면에 발생하였다. 반면에 쌀의 평형상대습도보다 높은 상대습도 하에서는 흡습하며, 이 때 균열은 쌀알의 내부에 축과 수직방향의 방사상으로 발생하였으며 균열의 형상도 규칙적이었다.

쌀과 같이 흡습성 물체가 흡습환경에 노출되면 표면은 주위 환경으로부터 수분을 흡수하여 팽창하게되며 표면에 흡착된 수분은 물체의 표면에 압축응력을 발생시킨다. 표면의 압축응력에 대응하기 위하여 내부에는 인장응력이 발생하며, 인장응력이 물체의 인

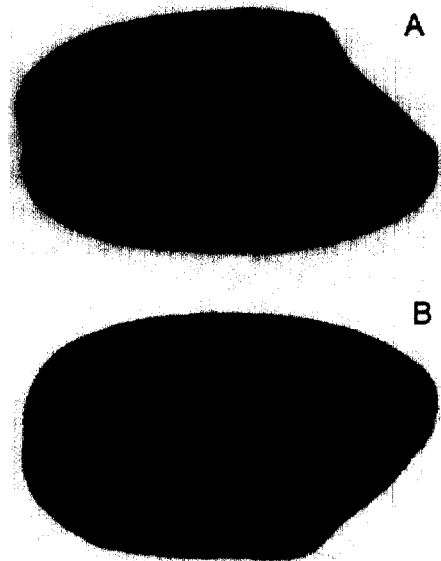


Fig. 3. Two types of cracks in rice. (A: external cracks caused by moisture desorption, B: internal cracks caused by moisture adsorption)

장강도보다 커질 경우 물체에 균열이 발생하며, 발생 부위는 인장응력이 발생하는 물체의 내부가 된다. 이에 반하여 탈습환경 하에서는 표면은 수분을 잃게되며 따라서 인장응력이 표면에 발생하여 균열은 표면에 생기는 것으로 알려져 있다<sup>(3,5,6,12)</sup>.

수분활성을 조절한 쌀을 각각의 상대습도 하에 노출시켰을 때 균열의 생성에 의하여 발생하는 동할미의 발생정도는 Table 3과 같이 쌀의 수분활성 또는 평형상대습도와 노출된 환경의 상대습도의 차이( $\Delta ERH$ )가 작을 때는 균열이 발생하지 않은 반면, 차이가 일정 수준 이상일 때는 균열이 발생하였다. 균열의 발생정도는 쌀의 평형상대습도와 환경의 상대습도의 차이가 클수록 심하게 나타났다.

수분활성 0.532로 조절한 쌀의 경우 탈습 환경 하에서의 노출시간별 균열발생은 각각 Fig. 4와 같이 상대습도 32.8%하에서는 20분 후부터 동할미가 발생하기 시작하여 85분 노출 후 52.0%의 동할미 발생을 보였으며 이후 동일한 수준을 유지하였다. 상대습도 22.5%에 노출된 경우는 10분 후부터 동할미가 발생하기 시작하였으며 90분 후에 최종 동할미 발생률 88.0%에 도달하였다. 반면에 상대습도 11.3%의 경우는 노출 5분 후부터 급격하게 균열이 발생하기 시작하여 20분 후에는 96%의 쌀에서, 40분 후에는 모든 쌀에서 균열이 발생하였다.

흡습 환경 하에서의 균열발생은 Fig. 5와 같이 상대습도 64.5% 이상에서 노출 후 10분 경과시 동할미 발생이 시작되어 55~120분 후에 최종 동할미 발생률에 도달하였다. 최종 동할미 발생률은 상대습도가 증가

Table 3. Degree of cracking of rice of different Aw under various RH conditions

RH (%)	Aw			
	0.353	0.460	0.532	0.660
11.3	+++++	+++++	+++++	+++++
22.5	+	+++	+++++	+++++
32.8	-	-	+++	+++++
43.2	-	-	-	+++++
52.9	+	-	-	+
64.5	+++	++	+	-
75.3	+++++	+++++	+++	-
84.3	+++++	+++++	+++++	+
89.0	+++++	+++++	+++++	+
93.5	+++++	+++++	+++++	++++

-: Not cracked  
 + : Less than 20% cracked  
 ++ : 20~40% cracked  
 +++ : 40~60% cracked  
 ++++ : 60~80% cracked  
 ++++: More than 80% cracked

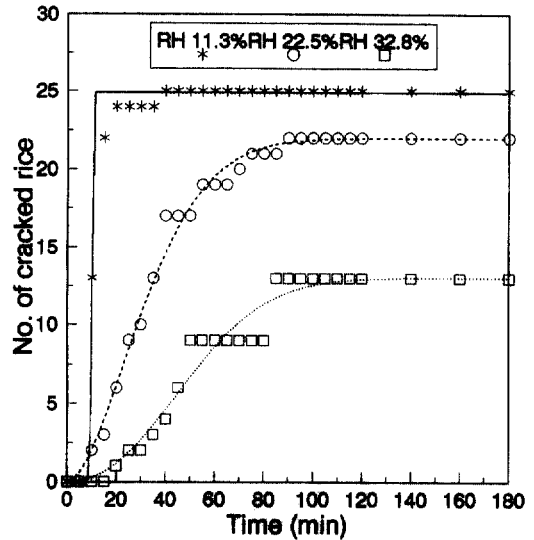


Fig. 4. Cracking of rice (Aw 0.532) under desorption conditions.

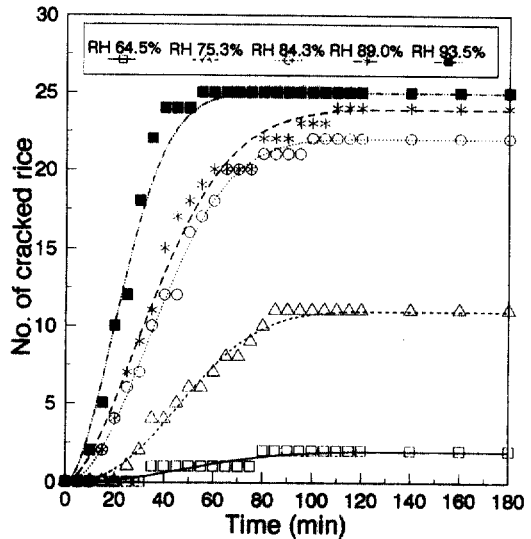


Fig. 5. Cracking of rice (Aw 0.532) under adsorption conditions.

할수록 높은 값을 보여 쌀의 평형상대습도와 노출 환경의 상대습도의 차이가 수분이동의 구동력으로 작용하며 구동력의 크기에 비례하여 쌀알의 내부에 발생하는 인장응력이 증가함을 시사하였다.

시간별 균열발생 패턴을 Weibull함수<sup>(10)</sup>에 의거하여 해석한 결과는 Fig. 6과 같이 Weibull함수는 쌀의 균열발생에 적합한 모델임을 확인하였으며 Gauss방법을 사용하여 구한 초기 수분활성 및 노출 환경의 상대습도별 Weibull함수의 상수 값은 Table 4와 같다.

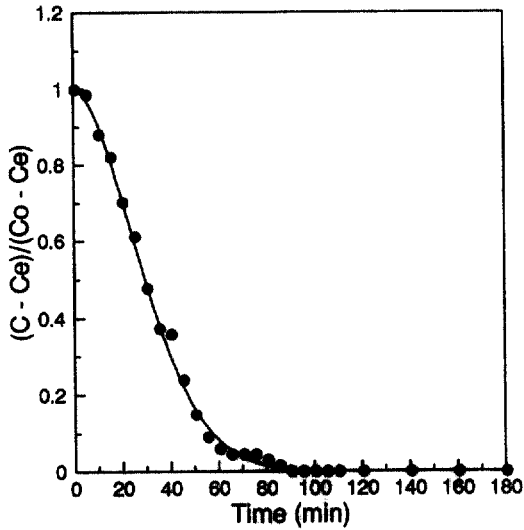


Fig. 6. Validity of the Weibull function for cracking of rice (Aw 0.532) during adsorption at RH 84.3%.

Table 4. Constants of the Weibull function describing cracking trend of rice of Aw 0.532

RH (%)	Crack types	Final percent of cracked rice (%)	Cracking constant (min <sup>-1</sup> )	Shape factor
11.3	external	100.0	0.1008	21.5939
22.5	external	88.0	0.0265	1.7145
32.8	external	52.0	0.0173	2.2036
43.2	-	0	-	-
52.9	-	0	-	-
64.5	internal	8.0	0.0159	2.2361
75.3	internal	44.0	0.0174	2.4298
84.3	internal	88.0	0.0218	2.0388
89.0	internal	96.0	0.0227	1.7618
93.5	internal	100.0	0.0352	1.8601

탈습 환경 하에서의 균열은 상대습도 32.8% 이하에서 쌀알의 외부에 발생하였고 상대습도가 낮을수록 높은 동할미 발생률을 보였다. 균열상수는 상대습도가 낮을수록 높은 값을 보였으며 형상인자는 상대습도 32.8%에서는 2.2036, 22.5%에서는 1.7145를 나타내었으나, 상대습도 11.3%에서는 21.5939로 매우 높게 나타나 균열발생이 일률적으로 급속하게 이루어졌음을 나타내었다.

흡습 환경 하에서의 균열발생은 상대습도 64.5% 이상에서 쌀알의 내부에 발생하였으며 상대습도가 증가할수록 동할미 발생률이 높아졌다. 균열상수는 상대습도가 증가함에 따라 높아지는 경향을 보였으며 형상인자는 1.7618~2.4298 범위의 값을 보였다.

저장 중 쌀에 균열을 발생시킬 수 있는 임계 구동력의 산출은 쌀의 균열 방지를 위하여 필수적인 자료이

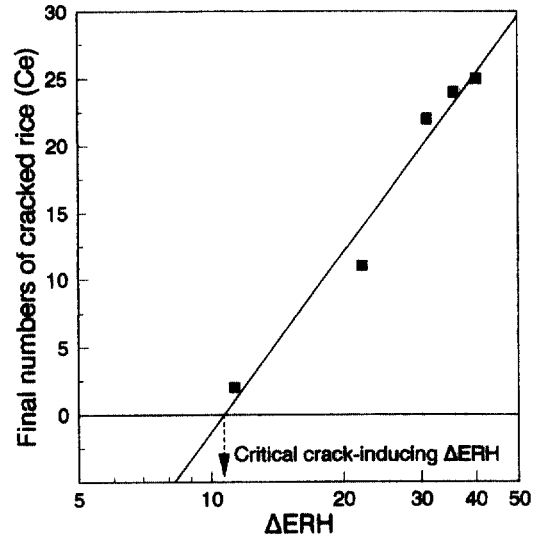


Fig. 7. Plots of final numbers of cracked rice against ln(ΔERH).

다. 수분이동에 의한 쌀의 균열발생을 유발하는 구동력은 저장환경의 상대습도와 쌀의 평형상대습도와의 차이이므로 ΔERH와 균열발생과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 동할미 발생은 ΔERH와 대수관계를 나타내었으며, 실험결과에 의하여 얻어진 직선을 연장하여 Ce=0인 선과의 교차점에 해당하는 ΔERH를 산출하여 임계 균열발생 상대습도차(critical crack-inducing ΔERH)로 정의하였다. 쌀의 수분활성도별 임계 균열발생 상대습도차와 이로부터 추정된 적정 저장 상대습도 범위를 Table 5에 나타내었다.

초기 수분활성 0.353인 쌀의 탈습 및 흡습시 균열을 발생시키는 임계 상대습도차는 각각 12.1% 및 17.1%이었으며, 따라서 균열발생을 방지할 수 있는 안전 저장 상대습도 범위는 23.2~52.5%로 추정되었다. 수분활성 0.460인 쌀의 임계 상대습도차는 흡습시 16.4%, 탈습시 14.3%로서 안전 저장 상대습도 범위는 29.6~60.3%이었다. 수분활성 0.532인 쌀은 흡습시 11.3%, 탈습시 10.8%의 임계 상대습도차를 보여 안전 저장

Table 5. Critical crack-inducing ERH gradient and safe RH range for rice storage

Aw of rice	Moisture content (% d.b.)	Critical crack-inducing ΔERH (%)		Safe RH range for storage (%)
		desorption	adsorption	
0.353	12.43	12.055	17.123	23.2~52.4
0.460	14.07	16.400	14.336	29.6~60.3
0.532	15.41	11.302	10.788	41.9~64.0
0.660	18.70	11.774	16.772	54.2~82.8

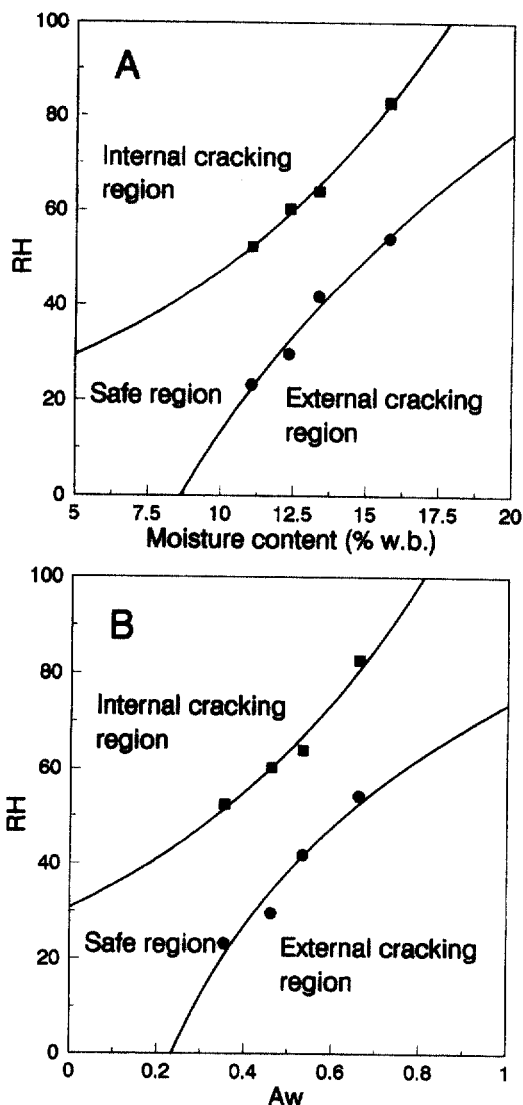


Fig. 8. Diagram of safe storage RH for rice of different moisture content (A) and Aw (B).

상대습도 범위는 41.9~64.0%로 추정되며, 수분활성 0.660인 경우는 흡습시 11.8%, 탈습시 16.8%의 임계 상대습도차를 보여 안전 저장 상대습도 범위는 54.2~82.8%로 예상되었다. 이상의 결과로부터 수분함량 및 수분활성도별 쌀의 균열발생을 수반하지 않는 안전 저장 상대습도를 나타낸 diagram을 Fig. 8에 나타내었다.

요 약

저장 중 쌀의 수분이동에 따른 균열현상을 구명하

고 균열을 발생시키는 임계조건을 산출하여 이를 토대로 쌀의 균열을 방지할 수 있는 저장조건을 확립하였다. 쌀의 평형상대습도와 노출된 환경의 상대습도의 차이( $\Delta ERH$ )가 적을 때는 균열이 발생하지 않은 반면, 그 차이가 임계치보다 클 때는 균열이 발생하였으며 균열의 발생정도는 쌀의 평형상대습도와 환경의 상대습도의 차이가 클수록 심하게 나타났다. 탈습환경 하에서는 불규칙한 형상의 균열이 쌀알의 외부에 발생하였으며 흡습환경 하에는 규칙적인 형상의 균열이 쌀알의 내부에 축방향과 수직방향으로 방사상으로 발생하였다. 노출시간별 균열발생 패턴을 Weibull 함수에 의거하여 해석한 결과,  $\Delta ERH$ 가 클수록 균열속도상수가 증가하였다. 동할미 발생률은  $\ln(\Delta ERH)$ 에 따라 직선적으로 증가하였으며, 임계 균열발생 상대습도차(critical crack-inducing  $\Delta ERH$ )는 탈습시 11.3~16.4%, 흡습시 10.8~17.1%의 값을 보였다. 실험결과를 토대로 수분함량 및 수분활성도 별 쌀의 안전저장 상대습도를 나타내는 diagram을 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

문 헌

1. Kunze, O.R. and Hall, C.W.: Relative humidity changes that cause brown rice to crack. *Trans. of the ASAE.*, 8, 396-399, 405 (1965)
2. Stermer, R.A.: Environmental conditions and stress cracks in milled rice. *Cereal Chem.*, 45, 365-373 (1968)
3. Kunze, O.R. and Choudhury, M.S.U.: Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. *Cereal Chem.*, 49, 684-696 (1972)
4. Yamaguchi, S., Yamazawa, S., Wakabayashi, K. and Hosono, H.: Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel. Part 2. A comparison between thermal and moisture stress, and an arrangement of rice cracking data on the Weibull probability paper (in Japanese). *J. Soc. Agric. Machin., Japan*, 42, 251-257 (1980)
5. Yamaguchi, S., Yamazawa, S., Wakabayashi, K. and Tachitani, T.: Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel. Part 4. A study on the mechanism of stress cracking in a rice kernel (in Japanese). *J. Soc. Agric. Machin., Japan*, 42, 507-513 (1981)
6. Kunze, O.R.: Physical properties of rice related to drying the grain. *Drying Technology*, 2(3), 369-387 (1983)
7. American Association of Cereal Chemists: *Approved Methods of the AACC*, 8th ed. American Association of

- Cereal Chemists, St. Paul, MN, U.S.A. (1983)
8. Greenspan, L.: Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J. Res. National Bureau Standards-A. Phys. Chem.*, **81A**(1), 89-96 (1977)
  9. Bizot, H.: Using the 'G.A.B.' model to construct sorption isotherms. In *Physical Properties of Foods*, Jowitt, R. et al. (Ed.), Applied Science Publishers, London, England. p.43-54 (1983)
  10. Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, **18**, 293-297 (1951)
  11. SAS Institute, Inc.: *SAS User's Guide: Statistics*, Version 5 edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, U.S.A. (1985)
  12. Mok, C.: Moisture sorption and cracking of spaghetti. *Food Sci. Industry*, **23**(3), 91-96 (1991)
- 

(1998년 11월 23일 접수)