

김치포장의 압력 및 부피 변화에 영향을 미치는 인자의 분석

이동선[†] · 최홍식* · 박완수**

경남대학교 식품공학과

*부산대학교 식품영양학과

**한국식품개발연구원

Analysis of Variables Influencing the Pressure Build-up and Volume Expansion of *Kimchi* Package

Dong-Sun Lee[†], Hong-Sik Cheigh* and Wan-Soo Park**

Dept. of Food Engineering, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea

*Dept. of Food Science and Nutrition, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Korea Food Research Institute, Seongnam 463-420, Korea

Abstract

A mathematical model was established for estimating changes in pressure and volume of permeable *kimchi* packages. The model comprises the CO₂ gas production from *kimchi* and permeation of O₂, CO₂ and N₂ through the permeable film or sheet. Using the developed model, the effects of various packaging variables on the pressure and volume changes were analyzed for rigid and flexible packages of *kimchi* (3% salt content) at 15°C, and then effect of storage temperature was also looked into. In case of rigid pack of 400g, using the plastic sheet of high CO₂ permeability and initial vacuumizing can help to relieve the problem of pressure build-up. The lower fill weight can further reduce the pressure, but will result in higher packaging cost. For the flexible package of 3 kg, highly permeable films such as low density polyethylene(LDPE) and polypropylene can reduce the volume expansion. Higher ratio of CO₂ permeability to O₂ and N₂ permeabilities are effective in reducing the volume expansion. Increased surface area cannot contribute to reduction of volume expansion for highly permeable flexible packages of *kimchi*. For the impermeable packages, pressure and volume at over-ripening stage (acidity 1.0%) increase with decreased temperature, while those at optimum ripening stage(acidity 0.6%) change little with temperature. Pressure of permeable rigid LDPE package increases with temperature at any ripening stage, and temperature affects the volume of flexible LDPE package very slightly. Experimental verification of the present results and package design with economical consideration are needed as a next step for practical application.

Key words: *kimchi*, CO₂ production, permeable package, pressure, volume

서 론

공장에서 생산되는 김치는 일반적으로 여러 재료를 혼합한 다음 바로 포장되어 유통되므로, 저장 및 유통 과정 중에 유산발효가 계속적으로 진행되며 발효에 의하여 생성되는 CO₂에 의하여 강성용기의 경우 압력이 발생하고 유연포장의 경우 부피가 팽창하게 된다(1,2). 이러한 압력발생이나 부피팽창은 소비자에게 수용될 수 없는 외관을 만들 뿐만 아니라 심한 경우 용기의 누설이나 파손을 가져오게 되므로 포장김치의 품질유지를

위해서 적절히 제어되어야 할 필요가 있다.

김치포장용기에서 압력발생 및 부피팽창을 유발하는 CO₂ 가스는 이러한 부정적인 면을 갖는 반면 김치 액즙에 녹아 시원하고 상큼한 맛을 내는 역할을 하기 때문에(3) 포장내에서 완전히 제거하는 것은 바람직하지 못하다. 포장된 김치에서 저장 중 CO₂ 가스가 발생되는 동시에 포장내부의 기체조성은 포장필름이나 용기를 통하여 포장외부의 환경조건과 상호작용을 하게 된다. 따라서 김치포장의 압력과 부피의 변화는 포장된 김치로부터의 CO₂ 가스 발생과 포장재를 통한 기체의

[†]To whom all correspondence should be addressed

투과, 저장온도 등에 영향을 받게 된다. 압력발생과 부피팽창의 문제를 해결하면서 적절한 양의 CO₂를 함유하는 김치포장의 설계를 위해서는 이러한 여러 변수에 따른 압력발생과 부피변화를 이해하는 것이 선행되어야 한다.

이를 위해서 본 연구에서는 김치포장의 압력발생과 부피팽창이 제어가능한 여러 변수에 의하여 어떻게 영향을 받는지를 분석하고자 하였다. 김치로부터의 CO₂ 발생과, 김치포장과 외부환경과의 기체투과에 대한 관계를 수학적인 모델로 정립하고, 이를 이용하여 현실적으로 가능한 여러 변수가 압력생성과 부피팽창에 미치는 영향을 분석하였다. 이로부터 압력과 부피의 변화를 심하게 유발시키지 않는 포장 및 저장 조건을 제시하고자 하였다.

이론 및 방법

김치발효로부터의 CO₂ 발생과 포장을 통한 기체투과에 대한 수학적 모델을 확립하고 이로부터 computer simulation에 의하여 강성용기포장 및 유연포장에서 다양한 포장 및 저장조건에 대하여 압력발생 및 부피팽창을 계산하여 예측하였다. 김치로부터의 CO₂ 발생과 총산의 변화에 대한 모델로 Lee 등(4)의 것을 이용하였다. 즉, 김치발효로부터의 CO₂ 발생은 다음 식 (1)과 (2)에 의하여 표현되었다.

$$R_{CO_2} = \exp(-0.495S + 53.265) \cdot \exp(110100/RT) \quad (1)$$

$$R_{CO_2} = \exp(-0.325S + 41.935) \cdot \exp(86800/RT) \quad (2)$$

여기서 R_{CO₂}는 CO₂ 발생속도(mg/kg day), S는 염도(%), R은 기체상수 (8.314 J/K mol), T는 온도(K)이다.

김치의 총산이 0.5~0.6%인 경우는 식 (1)과 (2)에 의해 얻어지는 값의 내삽치를 취하게 된다.

그리고 포장재를 통한 N₂, O₂, CO₂의 투과는 Fick의 법칙에 따라 다음 식 (3)에 의하여 얻어진다(5).

$$T_i = P_{fi} A (P_{i,out} - P_{i,in}) \quad (3)$$

여기서 T_i는 필름이나 시트를 통한 i 기체의 투과속도 (mg/day), P_{fi}는 i 기체의 투과도(mg/day m² atm), A는 필름이나 시트의 표면적(m²), P_{i,out}는 외기에서의 i 기체 분압(atm), P_{i,in}는 포장내에서의 i 기체의 분압(atm)이다. Table 1에서는 본 연구의 분석에서 사용된 여러 포장필름에 대한 15°C에서의 투과도 값을 보여주

Table 1. Gas permeabilities of plastic polymers to O₂, CO₂ and N₂ at 15°C

Plastic	Permeability (cc μm/m ² day atm)		
	O ₂	CO ₂	N ₂ ¹⁾
Low density polyethylene ²⁾ (LDPE)	109,880	506,284	33,660
Polypropylene(PP)	74,485	397,339	21,244
Polyethylene terephthalate (PET)	1,443	4,774	289
Nylon laminated multilayer film(nylon/PE)	1,611	5,578	322

¹⁾N₂ permeabilities of PET and nylon laminated film were assumed as 1/5 of those to O₂.

²⁾For LDPE, the permeabilities of O₂, CO₂ and N₂ at other temperatures were estimated using Arrhenius equation with respective activation energies of 42.6, 38.9 and 49.3 kJ/mol.

고 있다. Table 1의 투과도 값은 단위 μm의 두께에 해당된 값을 문헌(6,7)으로부터 얻은 값이며 식 (3)에 적용시키기 위해서는 해당 두께로 나누어주고 이상기체상태방정식에 의하여 cc단위를 mg단위로 바꾸어주면 된다. 또한 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET)와 nylon/폴리에틸렌(polyethylene, PE) 적층 필름의 질소 투과도는 해당 데이터를 찾을 수 없어서 산소투과도 값의 1/5로 가정하였다(5). 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene, LDPE)에 대해서 다른 온도에서의 투과도 값은 활성화에너지 값을 이용하여 Arrhenius방정식에 의하여 계산할 수 있다(5,6). 시간 t에서 포장내의 CO₂ 기체에 대한 물질수지의 관계로부터 다음 식 (4)가 얻어진다.

$$\int_0^t R_{CO_2} W dt + \int_0^t T_{CO_2} dt = \left(\frac{P_{CO_2} \times V_F \times M_{CO_2} \times 100000}{RT} \right) + (\zeta_{CO_2} \times P_{CO_2} \times \rho_L \times W) \quad (4)$$

여기서 W는 김치의 무게(kg)이고, V_F는 포장내 자유용적(ml), M_{CO₂}는 CO₂의 분자량(kg/mol), P_{CO₂}는 CO₂ 가스의 분압(bar), ζ_{CO₂}는 Henry의 상수(mg/ml bar), ρ_L는 단위중량당 김치의 액즙부피(ml/kg)이다.

즉, 식 (4)에서는 김치로부터 생산된 CO₂에서 포장필름을 통하여 투과되어 나간 양을 빼면 이가 포장내에 축적된 양이며, 이는 포장의 헤드스페이스와 김치액즙에 평형을 유지한 상태로 존재하여 분압 P_{CO₂}를 형성시키게 된다.

ζ_{CO₂}의 값은 염도와 온도 등의 함수로서 Rammert와 Paderson(8)에 따르면 염분용액에 대해서 식 (5)로 나

타낼 수 있다.

$$\zeta_{CO_2} = 3.43764 - 0.014P_{CO_2} - 0.12723\theta + 2.8256 \times 10^{-3}\theta^2 - 3.3597 \times 10^{-5}\theta^3 + 1.5933 \times 10^{-7}\theta^4 - (0.47231 - 0.02988\theta + 1.1605 \times 10^{-3}\theta^2 - 2.2510 \times 10^{-5}\theta^3 + 1.5933 \times 10^{-7}\theta^4) \times (C_{NaCl}/27) \quad (5)$$

여기서 θ 는 온도($^{\circ}C$), C_{NaCl} 는 염도(g/L)이다.

그리고 O_2 , N_2 에 대해서는 김치 액즙에 용해된 양을 무시하여 식 (6)의 관계가 성립된다.

$$V_F \times C_{i,o} + \int_0^t T_i dt = \left(\frac{P_i \times V_F \times M_i \times 100000}{RT} \right) \quad (6)$$

여기서 $C_{i,o}$ 는 포장내에 있는 i 기체의 초기농도 (mg/ml), P_i 는 i 기체의 분압(bar), M_i 는 i 기체의 분자량(kg/mol)이다. 위의 식 (4) 및 (6)을 풀면 CO_2 , O_2 , N_2 의 분압을 구할 수 있으며 전체 압력은 이들 분압을 더하면 얻을 수 있다(식 (7)).

$$P_T = P_{O_2} + P_{CO_2} + P_{N_2} \quad (7)$$

유연포장의 부피 계산을 위해서는 짧은 시간 Δt 동안 V_F 가 일정한 것으로 가정하고 시간 t 에서의 P_{O_2} , P_{CO_2} 및 P_{N_2} 를 얻은 다음, 1 기압에서 해당되는 각 기체의 부피, V_i 를 다음 식 (8)에 의하여 얻는다.

$$V_i = (P_i/1.01325) \times V_F \quad (8)$$

이렇게 얻은 각 기체의 1 기압에 기준한 부피를 더하여 전체 헤드스페이스의 부피 V_F 를 얻게 된다(식 (9)).

$$V_F = V_{O_2} + V_{CO_2} + V_{N_2} \quad (9)$$

이렇게 얻은 V_F 의 조건에서 같은 흐름의 계산을(식 (4) 및 식 (6)) 반복하여 각 기체의 분압을 다시 계산하고, 이로부터 식 (8)과 (9)를 한번 더 이용하여 Δt 시간 이후의 안정된 헤드스페이스의 용적값을 얻을 수 있다. 전체포장의 부피는 V_F 에 곱한 김치의 부피를 더하여 구할 수 있으나, 본 분석에서는 자유용적 V_F 를 얻고 이에 미치는 여러 인자의 영향을 분석하였다.

김치발효 중의 총산 증가는 Lee와 Lee(9)의 모델을 수정한 다음 식 (10)~(15)의 관계를(4) 적분하여 예측되었고, 김치의 초기 총산은 0.2%로 가정하였다.

$[LA] \leq 0.8\%$ 의 범위에서는

$$\frac{d[LA]}{dt} = V_c \quad (10)$$

$$V_c = C_1 \exp\left(\frac{-124063}{RT}\right) \quad (11)$$

$$\ln C_1 = -0.374S + 50.39 \quad (12)$$

$[LA] \geq 0.8\%$ 일 때는

$$\frac{d[LA]}{dt} = -Q[LA] + P \quad (13)$$

$$Q = C_2 \exp\left(\frac{-85100}{RT}\right) \quad (14)$$

$$\ln C_2 = -0.098S + 33.99 \quad (15)$$

여기서 $[LA]$ 는 총산의 농도(%)이고, V_c , C_1 , C_2 , Q , P 는 염도 및 온도에 따라 결정되는 상수이다.

김치의 일반적인 유통조건과 기한이 $10^{\circ}C$ 부근에서 약 10일인 것을 감안하여 본 분석에서는 이보다 높은 온도조건에서 장시간의 유통조건을 고려하여 여러 변수의 정량적 영향을 살펴보고자 하였다. 온도의 영향을 분석한 경우를 제외하고는 염도 3%의 김치를 $15^{\circ}C$ 에서 15일의 저장기간 동안 얻어지는 압력과 부피의 변화를 검토 분석하였다. 이러한 조건에서 압력과 부피의 변화를 억제하거나 완만하게 하는 포장조건은 현실적인 적용에서 의미를 갖는 것으로 생각하였다. 그리고 대표적인 포장조건으로는 강성용기포장에 대해서는 400g 단위의 김치용기(용적 545ml, 자유용적 128.9ml)로서 투과필름시트부분이 직경 10cm \times 높이 5.4cm(표면적 $0.0248m^2$)의 측면과 바닥으로 구성된 경우를 설정하였고, 유연포장에 대해서는 3kg 단위로 필름 크기 29.7 \times 34.0cm에 밀봉된 경우를 설정하였다. 위의 방정식 (1)~(15)의 과정을 Fortran으로 프로그래밍하여 개인용 컴퓨터에서 계산을 수행하였다.

결과 및 고찰

$15^{\circ}C$ 에서 강성 김치포장용기의 압력변화

Fig. 1에서는 시중에서 많이 유통되는 400g 단위의 유리용기에 포장된 염도 3%의 김치를 $15^{\circ}C$ 에서 15일간 저장하는 동안 얻어지는 압력발생을 나타내었다. $15^{\circ}C$ 에서 15일간 저장하면 김치의 총산은 1.15%에 도달하여 산패에 이른 것으로 예측된다. 따라서 적절한 포장조건에 의하여 이 기간 동안 압력이 1 기압보다 아주 높지 않은 수준으로 유지된다면 이 포장은 현실적인 유통에 무리가 없는 것으로 평가된다.

기체투과도가 0인 유리병포장의 경우 통상적인 포장과 같이 상압인 1기압(1.01bar)상태로 포장하면 저장 15일 후에 2.18bar에 이르러 상당한 압력증가가 유발됨을 확인할 수 있다(Fig. 1). 압력발생은 총산 0.5~0.6%에 이르기까지 빨랐고 그 이후는 상대적으로 완만하여지는데, 이는 김치가 익는 초기의 이 기간에 CO_2

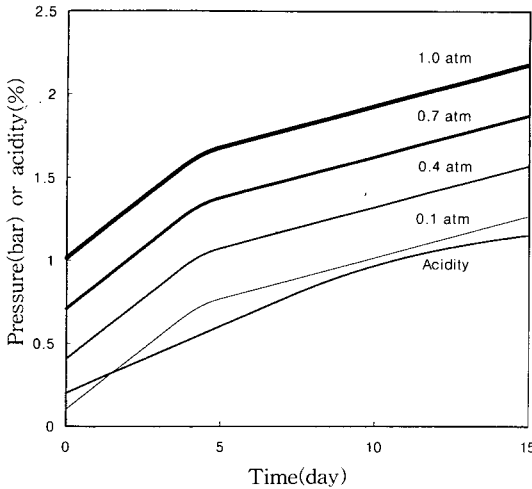


Fig. 1. Pressure build-up inside rigid glass jar kimchi packages at 15°C, which were vacuumized initially with different degrees.
 Fill weight: 400g; volume: 545ml; free volume: 128.9 ml; surface area: 0.0248m².

생성이 왕성한 것에 기인한다(4,10). 초기에 병내부를 진공포장함에 의하여 압력발생을 낮추어줄 수 있는 것으로 분석되며, 그 감소정도는 초기에 부여하는 진공도만큼인 것으로 나타난다. 즉, 초기 진공도를 0.4 기압 (0.41 bar) 정도로 유지하면 상압포장에 비해 약 0.61 bar가 낮은 1.57 bar를 발생시키는 것으로 분석된다. 현실적으로 진공포장만에 의하여 저장 15일 동안 유리병 포장의 압력을 1기압 이하로 유지시키는 것은 불가능하고, 0.1 기압의 진공도로 포장했을 때 1.27 bar를 얻을 수 있었다. 570 mmHg로 진공포장한 김치를 15°C 이상의 온도에 저장한 경우, 저장초기 이후에는 진공이 소멸되는 현상이 확인된 바 있다(11).

그리고 충전량을 감소시키면 얼마간의 압력발생은 완화시킬 수 있는 것으로 나타났으나 이는 포장의 부가적인 비용상승을 동반시킬 것이다(Fig. 2). 즉, 초기 상압에서 충전량이 400g에서 300g으로 감소되도록 포장하면 저장 15일에 유리병포장의 압력은 2.18 bar에서 0.31 bar가 낮아진 1.87 bar를 발생시키게 되며, 이는 초기 압력을 0.7 기압의 조건에서 포장한 효과와 비슷하다.

진공포장의 적용에 의하여 얻을 수 있는 압력상승의 완화에 제한이 있음으로 인하여, 기체투과성이 있는 플라스틱 용기포장에 의하여 이를 해결할 수 있는지를 모색하였다. 두께 500µm의 PET로 포장재질을 바꾸었을 때를 Fig. 1의 유리병에 대해서 비교하면, 압력하강 효과가 거의 없는 반면에, 500µm의 LDPE 및 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 시트로 된 포장은 압력하강

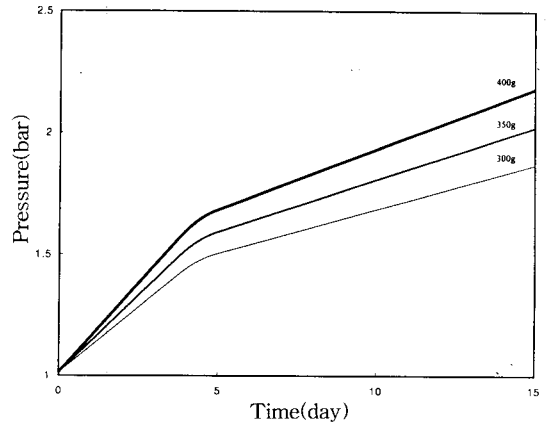


Fig. 2. Effect of fill weight on total pressure inside rigid glass jar kimchi package at 15°C.
 Volume: 545ml; surface area: 0.0248m².

효과를 가져서 상압포장의 경우 저장 15일 후에 각각 1.75 bar와 1.83 bar를 형성시켜서 유리병 포장의 2.18 bar에 비해서 상당히 낮아질 수 있는 것으로 분석되었다(Fig. 3). 이러한 압력하강의 효과는 LDPE 및 PP의 포장시트벽면을 통한 CO₂의 투과에 기인하며, N₂ 및 O₂의 투과는 크게 영향을 미치지 못하고 따라서 포장내에 N₂ 및 O₂의 분압도 비교적 일정한 상태로 유지되는 것으로 나타났다(테이타 생략).

현실적으로 압력발생을 완화시키는 강성용기 포장을 얻기 위해서 초기 진공상태의 포장, 충전량의 감소, 고투과성 플라스틱 시트의 사용 등이 부분적인 효과는 있으나, 이들 중 하나의 수단만으로는 15°C에서 15일 저장하는 동안 압력을 1기압 이내로 유지시키는 데에는 어려움이 있었다. 따라서 이러한 가능한 제어수단

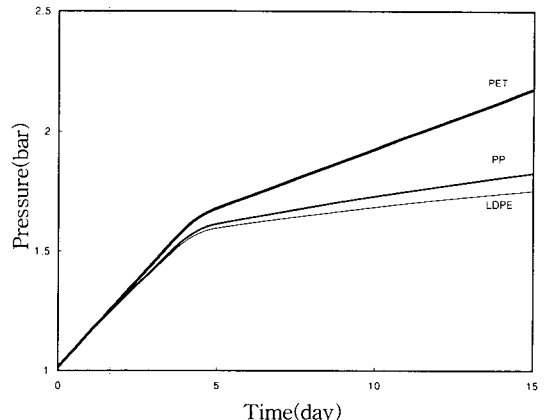


Fig. 3. Pressure build-up vs. packaging materials (500 µm thick) for packages of 400g kimchi at 15°C.
 Volume: 545ml; free volume: 128.9ml; surface area: 0.0248m².

을 함께 병용하는 것이 효과가 있을 것으로 생각되어 가능한 제어변수의 몇 가지 조합에 대하여 simulation을 실시하였으며, 그 결과가 Table 2에 제시되어 있으며, 400g단위의 LDPE 포장에 대해서 초기 압력을 0.2 기압의 진공조건으로 유지시킨 경우에 각 기체의 분압 및 전체압력을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 초기 진공에 의하여 질소와 산소의 분압이 낮게 유지된 관계로 인하여 외부로부터 포장내부의 방향으로 이들 기체의 투과가 진행되고 이로 인하여 이들 기체분압이 약간 증가하고 있으나 상대적으로 낮은 이들 기체의 투과도로 인하여 큰 변화는 없었다. 김치발효로부터 CO₂의 생산에 의해서 저장 5일경까지는 그 분압이 계속 상승하지만, LDPE의 높은 CO₂ 투과도와 포장내외간의 증가된 기체분압의 차로 얻어진 CO₂ 투과로 인하여 그 이후 CO₂ 분압은 비교적 완만히 증가하여 저장 15일 후에도 0.74 bar에 머무는 수준에 있었다.

김치의 CO₂ 생산모델을 이용하여 투과성 김치포장에 대한 압력완화의 가능성을 검토한 결과, CO₂ 투과도가 높은 시트와 초기 진공포장의 적용에 의하여 압력완화의 목적을 얻을 수 있으며, 추가적으로 충전량을 줄

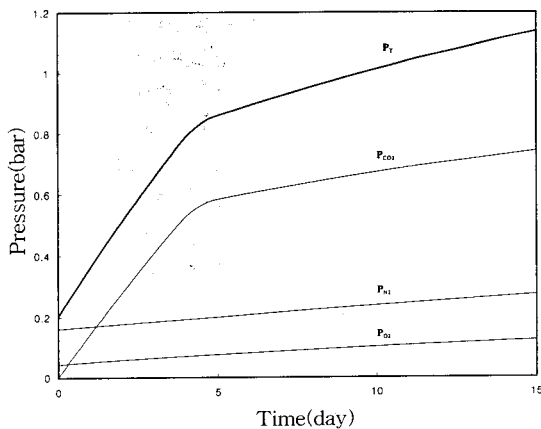


Fig. 4. Changes in total pressure and partial pressures of O₂, CO₂ and N₂ for 500µm LDPE rigid pack initially vacuumized at 0.2 atm and stored at 15°C. Volume: 545ml; free volume: 128.9ml; surface area: 0.0248m².

임에 의하여 압력발생을 제어할 수 있었다.

15°C에서 유연포장김치의 부피변화

3kg 단위로 필름 크기 29.7×34.0cm에 밀봉된 김치 포장을 15°C에 저장한 경우에 대해서 예측된 부피 팽창을 보면 기체투과도가 낮으면서 현재 많이 이용되는 nylon/PE(두께 30µm) 포장의 경우 시간에 따라 지속적으로 부피팽창이 심하게 진행되어 15일 후에 1646ml에 달하여(Fig. 5(A)), AI 적층필름과 같이 투과도 0인 비투과성포장의 1893ml와 크게 차이를 보여주지 않았다. 반면에 투과도가 높은 100µm 두께의 LDPE 필름 및 PP 필름으로 포장된 경우는 부피 팽창이 비교적 완만한 수준에 머물고 있음을(15일 후에 LDPE포장에서 547 ml, PP포장에서 505ml) 보여주었다(Fig. 5(B) & 5(C)). 부피 팽창의 속도는 강성용기포장에서와 같이 김치로부터의 CO₂ 생성속도에 의한 영향으로 모든 포장에서 총산 0.5~0.6%에 이르기까지 발효초기에 빠르며, 이후에는 상대적으로 완만하여지며, LDPE필름 및 PP필름의 포장에서는 이러한 현상이 더욱 현저하였다. Nylon/PE 포장에서는 낮은 기체투과도로 인하여 포장내 N₂와 O₂부피는 비교적 변화가 없으나 김치발효로부터 발생된 CO₂의 부피(1기압 기준)가 지속적으로 증가됨에 따라 부피팽창이 이루어졌으며, 이는 투과도 0인 밀폐포장의 경우와 크게 다르지 않았다. 이 포장에서는 포장내 기체농도로 볼 때 저장기간에 따라 부피증가가 이루어지는 것으로 인하여 N₂와 O₂ 농도는 감소하고, CO₂ 농도는 총산 0.5~0.6%에 이르기까지 급속하게 증가하고 그 이후는 완만하게 변화했다.

이에 비해서 LDPE 및 PP의 포장(두께 100µm)에서의 현저히 낮은 부피팽창은 필름을 통한 CO₂의 높은 투과에 기인하는 것으로 나타나며, 따라서 CO₂의 부피는 총산 0.5~0.6%에 이르기까지 최대로 증가한 후, 발효 후반부에 완만히 감소한다(Fig. 5(B) & 5(C)). 이는 발효초기에 CO₂의 발생이 왕성하여 부피의 팽창이 빠르나 포장내 CO₂ 농도가 높아지면서 식 (3)으로 나타난 CO₂ 투과가 증가함과 아울러 후반부에는 김치로부터 생성되는 CO₂량이 작아짐으로 생긴 결과이다. 그리

Table 2. Some packaging conditions designed to avoid severe pressure build-up inside the kimchi packages stored at 15°C

Package type	Fill weight (g)	Initial vacuumized pressure (atm)	Pressure after 15 days at 15°C (bar)
Glass jar	300	0.2	1.05
Glass jar	350	0.1	1.11
LDPE(500µm)	350	0.3	1.07
LDPE(500µm)	400	0.2	1.14

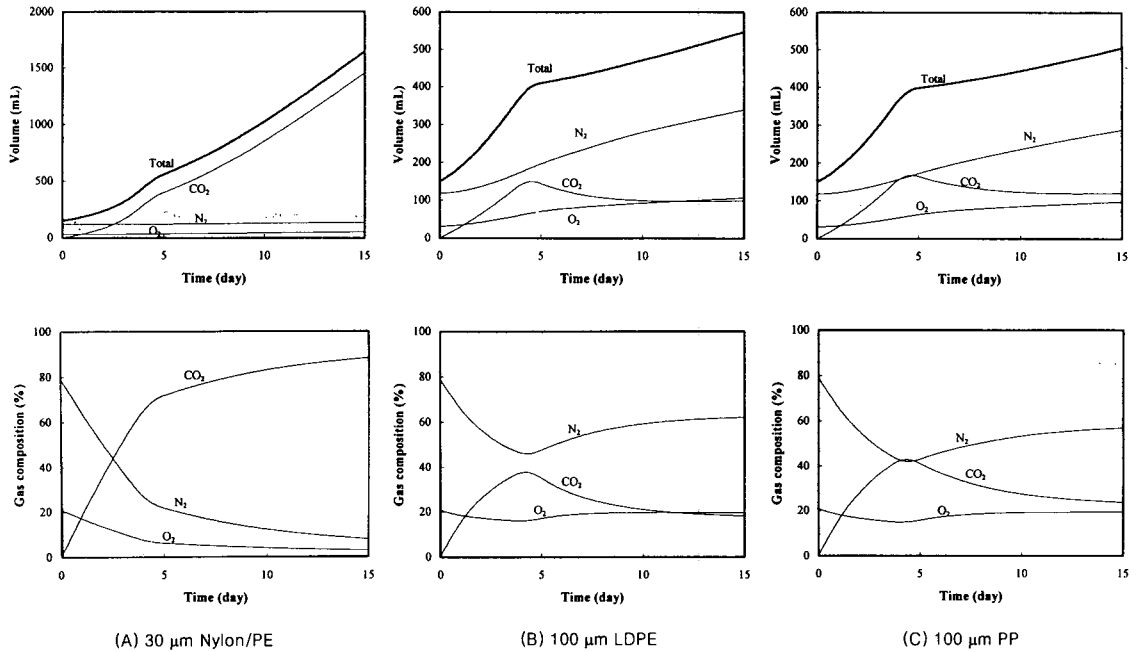


Fig. 5. Changes in total headspace volume and volume of each gas for the flexible *kimchi* packages at 15°C. Fill weight: 3kg; initial free volume: 150ml; surface area: 0.2020m².

고 시간에 따른 부피의 팽창으로 포장내에서 N₂와 O₂의 농도가 낮아지면서 외부와 내부의 농도차로 인하여 이들 기체의 투과유입이 진행되고 부피는 지속적으로 증가하게 된다. CO₂의 발생과 기체들의 투과로 인한 부피변화로 인하여 시간에 따른 기체조성의 변화에 있어서는 N₂와 O₂ 농도는 감소 후 다시 증가하고 CO₂ 농도는 증가하여 최대점에 도달한 후 다시 감소하는 것으로 분석되었다(Fig. 5(B) & 5(C)). 이와 비슷한 결과로서 20°C에 저장된 500g 단위의 100μm LDPE 김치포장에서 O₂ 농도는 감소한 후 다시 증가하고 CO₂ 농도는 최대점에 이른 후 감소하는 기체조성의 변화가 Park 등(12)에 의하여 보고된 바 있다.

LDPE 필름이 PP 필름에 비해서 O₂, CO₂, N₂에 대해서 기체투과도가 높지만(Table 1), 전자의 부피팽창이 후자의 것보다 높은 점이 특이하다. 김치의 투과성 유연포장에서는 그 기체조성의 변화로 인하여(Fig. 5), CO₂는 포장외부로 배출되고, N₂와 O₂는 포장내부로 유입되는 상황을 형성시키게 된다. 이로 인해 N₂와 O₂의 투과도에 비해 CO₂의 투과도가 높은 PP 필름이 상대적으로 CO₂의 배출은 많이 하면서 N₂와 O₂의 유입은 억제하게 되는 것으로 판단된다. LDPE와 PP와 같은 고기체투과도의 필름에 의한 김치포장에서는 부피팽창에 N₂와 O₂의 유입이 큰 역할을 하기 때문에, 포장의 표면적을 증가시키는 것은 CO₂의 투과유출을 증가시

키면서 한편으로는 이들 기체의 유입을 증가시키므로 그 효과가 상쇄되어 부피팽창을 완화시키는 데 기여하지 않았다(테이타 생략). 기체투과도의 절대적인 값이 유연포장김치의 부피변화에 결정적인 영향을 주지만 N₂와 O₂의 투과도에 대한 CO₂ 투과도비가 그 부피팽창에 큰 영향을 줄 수 있으며, 이는 앞으로 유연포장김치의 포장설계에 큰 의미를 가지는 것으로 생각된다. 즉, 고분자 공학적 기술에 의하여 N₂와 O₂의 투과도에 대한 CO₂ 투과도비를 크게 한 플라스틱 필름이 개발되어 김치포장에 사용될 수 있다면, 어느 정도 부피팽창의 문제를 해결할 수 있을 것으로 전망된다. 예로서 폴리부타디엔계 필름은 O₂에 대한 CO₂의 투과도비가 9.2 부근인 것으로 보고되고 있다(7).

유연포장의 경우는 진공포장의 부분적인 적용에 의하여 초기 부피의 조절이 가능한데, 초기 자유용적이 작은 김치포장이 부피가 작으나, 초기로부터의 절대적 부피 증가량은 초기부피에 관계없이 비슷하게 나타났다(Fig. 6). 따라서 김치 유연포장의 저장 중에 얻어지는 부피는 진공포장에 의해 초기의 자유용적을 줄임으로써 감소시킬 수 있을 것이다.

김치로부터의 CO₂ 생산모델을 유연포장에 적용하면, LDPE 및 PP와 같은 기체투과성이 큰 플라스틱 필름에 의하여 부피팽창을 줄일 수 있으며, 특히 N₂와 O₂에 비해 CO₂의 투과가 큰 필름이 이에 효과적이었다.

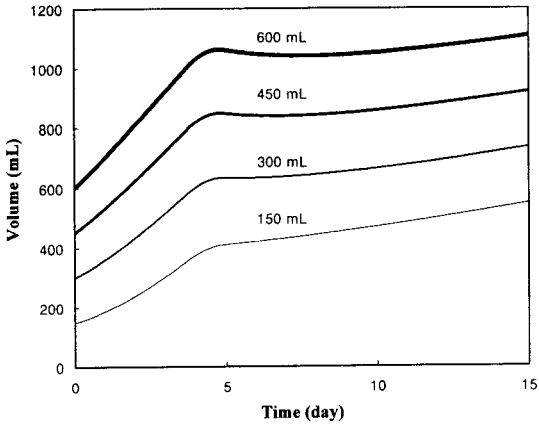


Fig. 6. Effect of initial free volume on the headspace volume changes of the flexible LDPE(100µm thickness) kimchi package of 3kg at 15°C. Surface area: 0.2020m².

이 경우 포장표면적의 증가는 부피팽창의 억제에 기여하지 못하며, 진공포장에 의하여 자유용적의 감소는 절대적인 팽창부피의 정도를 감소시킬 수 있었다.

온도의 영향

온도가 압력발생과 부피팽창에 미치는 영향을 보기 위하여 각 온도에서 김치의 숙성과 과숙에 이르는 시간을 계산하고 이러한 시간에서 용기나 봉지에서 압력과 부피를 계산하였다(Fig. 7). 김치의 적숙상태로는 일반적으로 총산 0.6% 정도로 수용되며, 과숙된 상태로는 총산 1.0% 부근으로 인정되고 있어서(13,14), 이러한 조건까지 도달되는 시간을 계산하였다. 투과도가 0인 경우의 비투과성 포장에 대해서, 과숙상태(총산 1.0%)에서 얻어지는 강성용기의 압력과 유연포장의 부피는 저온에서 현저히 높으며, 적숙상태(총산 0.6%)에서는 온도의 영향이 경미하고 저온에서 오히려 낮은 압력과 부피를 보였다. 이는 저온에서 김치가 과숙에 이르기에는 아주 오랜 시간이 소요되며(Fig. 7(A)), 이 기간 동안에도 낮지만 지속적으로 CO₂의 발생이 진행됨에 기인하는 것으로 해석된다. 반면에 적숙상태까지는 산생성의 속도와 CO₂의 발생에 미치는 온도의 영향이 비슷하며, 이로 인하여 적숙된 상태에 이른 김치의 비투과성 포장의 압력이나 부피는 온도에 크게 영향을 받지 아니한 것으로 나타난다.

투과성인 LDPE의 유연포장에서는 적숙 및 과숙의 상태 모두에 대해서 부피에 미치는 온도의 영향은 아주 작으며, LDPE의 성형용기포장에서는 온도증가에 따라 압력은 약간 높아졌다. 김치의 투과성 포장에서는 CO₂의 발생과 기체투과 사이의 정상상태적인 관계가 이

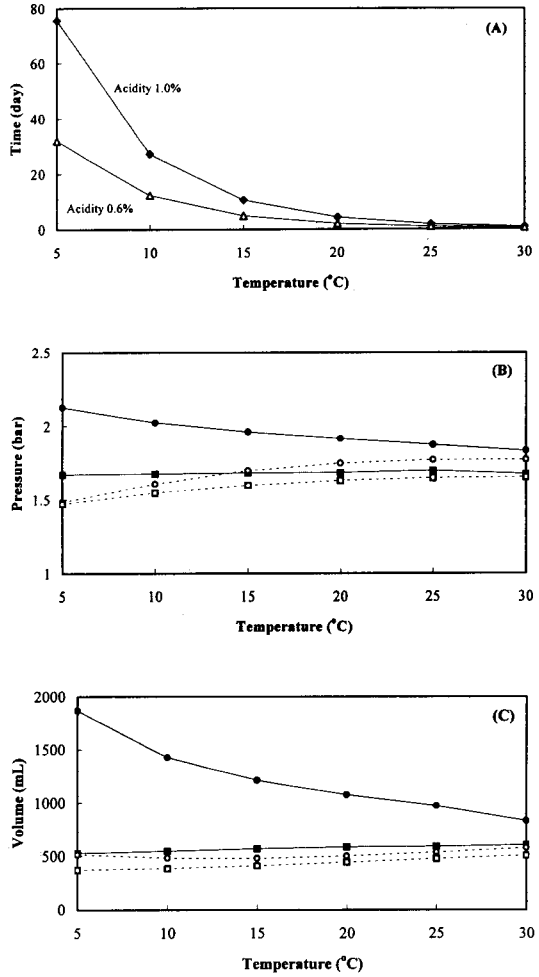


Fig. 7. (A) Times to reach optimum and over ripening stages of 0.6% and 1.0% acidities, (B) estimated pressures of 400g rigid package, and (C) estimated headspace volumes of 3kg flexible packages for kimchi(3% salt content) at different temperatures.

Thicknesses of LDPE for rigid and flexible packages are 500 and 100µm, respectively. For other conditions refer to Figs. 1 and 5. ●: with acidity of 1.0% for impermeable package; ■: with acidity of 0.6% for impermeable package; ○: with acidity of 1.0% for LDPE packages; □: with acidity of 0.6% for LDPE package.

루어지지 않으며 지속적으로 기체분압이나 조성의 변화가 일어나므로(Fig. 4 & 5), 이들의 관계를 단순하게 분석하는 것은 어렵다. 온도에 따라 달라지는 발효소요 기간 동안에 이루어지는 CO₂의 발생이 포장내에 동적인 기체조성의 변화를 유발하면서 기체투과속도가 영향을 받으며, 이는 다시 기체조성, 부피변화, 압력변화에 영향을 미치게 된다. 이러한 과정으로 인하여 CO₂의 발생과 기체투과의 온도의존성에 의해 포장의 부피와

압력의 변화는 온도에 따라서 달라지는 것으로 생각된다. LDPE의 기체투과도의 온도의존성을 나타내는 활성화에너지는 38.9~49.3 kJ/mol인 반면에(Table 1), 김치의 산도증가의 활성화에너지는 85.1~124.1 kJ/mol 이고(식 (11)과 (14)), CO₂ 발생의 활성화에너지는 86.8~110.1 kJ/mol인 점을(식 (1)과 (2)) 고려한다면, 온도의 증가는 기체투과속도에 비해 산도증가와 CO₂ 발생속도를 크게 증가시키는 역할을 할 것으로 생각된다. Fig. 7의 LDPE 포장에 대한 압력과 부피의 변화도 이러한 상호작용의 결과로 해석된다.

김치를 유리병이나 AI 저충필름봉지와 같은 비투과성 밀폐포장에 포장하여 저장유통하는 경우 유통기한을 넘겨 과속된 상태까지 이른다면 저온에서의 유통이 오히려 더 많은 압력발생이나 부피증가를 유발할 것이다. 반면에 적속된 상태로 저장유통한다면, 이들에 미치는 온도의 영향을 크지 않을 것이다. 그리고 고기체투과성 필름으로 포장된 김치에 대해서는 같은 속성도에 기준할 때, 온도에 관계없이 비교적 압력발생이나 부피변화는 일정하여서 온도 이외의 포장변수를 고려하는 것이 더욱 중요한 것으로 판단된다.

위에서 김치포장에서 압력발생이나 부피팽창에 미치는 여러 요인의 영향을 분석하였으며 이는 몇 가지의 가정에 기초하여 예측된 것이다. 즉, 위에서 제시된 김치로부터의 CO₂ 발생 모델은 포장환경에 무관하며, 포장필름의 기체투과도는 일정하다고 가정한 것이다. 예를 들면 김치의 발효속도는 진공포장에 의해 약간 지연시킬 수 있다는 보고(11)가 있다. 강성용기포장의 경우는 부피가 일정한 것으로 가정하고 유연포장의 경우는 포장필름의 모든 표면적으로 기체가 투과되는 것으로 가정하였다. 실제의 포장조건에서는 플라스틱 성형용기에서는 진공의 도입이나 압력의 발생에 따라 용기의 부피가 얼마간 변할 수 있으며, 유연포장에서는 포장과 포장의 접촉에 의하여 실제 공기와의 기체투과를 위한 유효면적이 감소될 수 있다. 또, 비록 액체식품을 포장한 경우에 액체와 접촉한 필름을 통한 기체투과에 대해서 식 (3)이 성립되는 것으로 인정되고 있지만(15), 필름과 액체접촉면에서의 상평형이 이러한 가정과 다를 가능성이 있다. 이러한 모든 면에서 압력발생이나 부피팽창을 완화시키는 포장조건을 실험적으로 구현하면서 확인할 필요가 있으며, 다음의 연구과제로 진행 중에 있다.

요 약

김치의 강성용기포장과 유연포장에 대해서 CO₂ 발

생과 투과성 필름을 통한 O₂, CO₂, N₂의 투과를 포함시킨 수학적 모델을 확립하고 여러 조건에 따른 압력 및 부피의 변화를 예측하였다. 염도 3%인 김치를 15°C에서 저장시에 여러 변수가 포장의 압력이나 부피에 미치는 영향을 살펴본 다음, 온도가 적속 및 과속상태인 김치의 포장에서 압력과 부피에 미치는 영향을 분석하였다. 400g 단위의 강성용기에 대해서 CO₂ 투과도가 높은 시트와 초기 진공포장의 적용에 의하여 압력완화의 목적을 얻을 수 있으며, 추가적으로 충전량을 작게 하면 압력발생을 줄일 수 있었다. 3kg 단위의 유연포장에 대해서 LDPE 및 PP와 같은 기체투과성이 큰 플라스틱 필름에 의하여 부피팽창을 줄일 수 있으며, 특히 N₂와 O₂에 비해 CO₂의 투과가 큰 필름이 이에 효과적이었다. 기체투과도가 큰 유연포장의 표면적을 증가시킴에 의해서 부피팽창을 줄이는 효과는 거의 없었다. 비투과성 강성용기 및 유연포장에서 과속상태에서 (총산 1.0%) 얻어지는 압력과 부피는 저온일수록 증가하였으나, 적속상태에서는 (총산 0.6%) 온도의 영향은 아주 경미하였다. LDPE의 투과성 강성용기포장에서 모든 속성단계에서 얻어지는 압력은 온도증가에 따라 약간 증가하였으며, 유연봉지에서는 온도의 영향이 미미하였다. 이러한 예측을 이용하여 현실적으로 가능한 포장 및 저장조건을 설계하고 이를 실험적으로 확인하는 것이 다음 단계로서 필요하다.

감사의 글

본 연구는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

문 헌

- Hong, S. I., Park, J. S. and Park, N. H. : Relationships between fermentative gas pressure and quality changes of packaged *kimchi* at different temperatures (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **26**, 770-775(1994)
- Hong, S. I., Park, J. S. and Park, N. H. : Quality changes of commercial *kimchi* products by different packaging methods (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **27**, 112-118(1995)
- Lee, S. R. : *Korean fermented foods* (in Korean). Ewha Womans University Press, Seoul, p.141-192(1986)
- Lee, D. S., Kwon, H. R. and Ha, J. U. : Estimation of pressure and volume changes for packages of *kimchi*, a Korean fermented vegetable. *Packaging Technol. Sci.*, **10**, 15-32(1997)
- Robertson, G. L. : *Food packaging*. Marcel Dekker, New York, pp.73-110(1993)

6. Yasuda, H. and Stannett, V. : Permeability coefficient. In "Polymer handbook" Brandrup, J. and Immergut, E. H.(eds.), John Wiley & Sons, New York, pp.III-229 ~III-240(1975)
7. Exama, A., Arul, J., Lenki, R. W., Lee, L. Z. and To-upin, C. : Suitability of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *J. Food Sci.*, **58**, 1365-1370(1993)
8. Rammert, M. and Paderson, M. H. P. : Die Löslichkeit von Kohlendioxid in Getränken. *Brauwelt*, **131**, 488-499(1991)
9. Lee, K. S. and Lee, D. S. : A kinetic model for lactic acid production in *kimchi*, a Korean fermented vegetable dish. *J. Ferment. Bioeng.*, **75**, 392-394(1993)
10. Lee, Y. J. and Chun, J. K. : Development of pressure monitoring system and pressure changes during *kimchi* fermentation (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **22**, 686-689(1990)
11. Shin, D. H., Kim, M. S., Han, J. S. and Lim, D. K. : Changes of chemical composition and microflora in bottled vacuum packed *kimchi* during storage at different temperature (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **28**, 127-136(1996)
12. Park, W. P., Ahn, D. S. and Lee, D. S. : Comparison of quality characteristics of whole and sliced *kimchi* at different fermentation temperatures (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **29**, 784-789(1997)
13. Mheen, T. I. and Kwon, T. W. : Effect of temperature and salt concentration on *kimchi* fermentation. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **16**, 443-450(1984)
14. Lee, Y. H. and Yang, I. W. : Studies on the packaging and preservation of *kimchi* (in Korean). *J. Korean Agri. Chem. Soc.*, **13**, 207-218(1970)
15. Kim, J. N. and Harte, B. R. : Shelf life prediction model and experimental validation of a packaged liquid food system. *Foods and Biotechnology*, **5**, 310-315(1996)

(1999년 1월 9일 접수)