

Sucrose-NaCl- 물의 3성분 혼합액체의 점도에 관한 연구

오 명 숙

성심여자대학 식품영양학과

Viscosities of Ternary Mixtures of Sucrose-Sodium Chloride-Water

Myung-Suk Oh

Department of Food & Nutrition, Song Sim College for Women

Abstract

Correlations have been developed for estimating the viscosities of ternary mixtures of sucrose-sodium chloride-water over a temperature range of 10-40 °C and a concentration range of 1.0064-5.7037 molality sodium chloride and 0.3436-2.5966 molality sucrose. The viscosity data of sodium chloride and sucrose solutions have been fitted very well utilizing proposed polynomial equation, respectively and the temperature dependence analysis for sodium chloride and sucrose solutions showed that 1/T dependence is accurate. The experimental viscosity data for sucrose-sodium chloride-water mixtures were fitted to a five parameter polynomial with a goodness of fit approximating experimental error and it seems that there is no significant interaction between sodium chloride and sucrose solutions.

Key words: viscosity, ternary mixtures, correlation, polynomial.

서 론

혼합액체의 점성은 열전달, 질량전달, 유체의 흐름 등에 관한 많은 실제적 물체와 관련되나, 혼합액체의 점성을 체계적으로 연구한 논문은 많지 않다. 현재까지 혼합액체의 점도예측모델로는 각 구성액체의 점도로부터 계산되는 경험식이 몇 가지 발표되어 있다⁽¹⁻⁹⁾.

식품가공에서 NaCl 과 sucrose 혼합용액은 염장, 당장식품 외에 삼투건조⁽¹⁰⁾에도 이용되고 있으며, 이 때의 용질의 확산속도에는 혼합용액의 점도가 영향을 미친다. 따라서 NaCl- sucrose- 물의 3성분 혼합용액의 점도는 유체의 흐름과 직접 관련되는 것 외에 효율적인 삼투 농축을 위해서도 필요한 기초 data로 생각되어진다. 그런데 NaCl 용액⁽¹¹⁻¹⁵⁾ 및 sucrose 용액⁽¹⁶⁾의 각각의 점도측정 및 예측에 관한 연구는 보고되어 있으나, NaCl- sucrose- 물의 3성분 혼합액체의 점도에 관한 연구는 전혀 발표되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 NaCl- sucrose- 물의 3성분 혼합액체의 점도측정 및 예측모델의 결정을 그 목적으로 하였다.

Corresponding author: Myung-Suk Oh, Department of Food & Nutrition, Song Sim College for Women, 43-1, Yeogog-dong, Bucheon, Gyeonggi-do, 422-743

재료 및 방법

재료

NaCl, sucrose, 증류수를 정확히 칭량하여 중량 mol 농도로 시료용액을 제조하였다. 이 때의 농도는 NaCl 이 1.0064~5.7037 mol, sucrose 가 0.3436~2.5966 mol 의 범위에 있었고, 시약은 특급을 사용하였다.

점도측정

혼합액체의 점도는 Cannon-Fenske 점도계로, 밀도는 picnometer 로 측정하였다. 이 때의 온도는 실험에 사용한 점도계의 검정결과 10~40°C의 범위를 넘는 온도에서는 실험오차가 컸으므로 water bath 에 의해 10~40°C의 범위로 유지하였고, 점도(η)의 계산은 다음 식에 따랐다⁽¹⁷⁾.

$$\eta = \frac{R' \Delta P \pi \theta}{8LV} \quad (\text{단, } \Delta P = \rho gh) \quad (1)$$

실험에 사용한 점도계는 모든 측정온도에서 증류수, NaCl 용액, sucrose 용액으로 검정하였는데, 이 때의 average% error 는 1.55%였고, 데이터의 재현성을 나타내는 변이계수는 0.2% 이내였다.

모델식

NaCl-sucrose- 물의 3성분 혼합액체의 점도에측모 델로서 다음의 3차 다항식을 가정하였다.

$$\log \eta_r = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_1^2 + \beta_7 x_2^2 + \beta_8 x_1^2 x_2 + \beta_9 x_1 x_2^2 \quad (2)$$

식 (2)는 10개의 계수를 가지고 있으므로 다음 순서 로 계수를 결정하였다.

i) $x_1=0, x_2=0$
 $\log \eta_r = \beta_0 = 0 \quad (3)$

ii) $x_2=0$
 $\log \eta_r = \beta_1 x_1 + \beta_4 x_1^2 + \beta_8 x_1^3 \quad (4)$

iii) $x_1=0$
 $\log \eta_r = \beta_2 x_2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_7 x_2^3 \quad (5)$

iv) $\frac{\log \eta_r - (\beta_1 x_1 + \beta_4 x_1^2 + \beta_8 x_1^3 + \beta_2 x_2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_7 x_2^3)}{x_1 x_2}$
 $= \beta_3 + \beta_6 x_1 + \beta_9 x_2 \quad (6)$

식 (3)에서 β_0 는 0으로 결정되었고, 다른 계수들은 최소제곱법으로 결정하였다. 식 (4)의 계수 $\beta_1, \beta_4, \beta_8$ 및 식 (5)의 계수 $\beta_2, \beta_5, \beta_7$ 은 각각 기발표된 NaCl 용액의 점도치⁽¹⁸⁾와 sucrose 용액의 점도치⁽¹⁹⁾로 부터 구하였다. 식 (6)의 계수 $\beta_3, \beta_6, \beta_9$ 는 NaCl-sucrose- 물의 3성분 혼합액체의 점도의 실험치 로부터 구하였다.

온도범위는 10~40°C에서 실험을 하였으므로 각 계 수에 대한 온도의존성을 다음 식에 의해 구하였다.

$$\beta_i = a_i + \frac{b_i}{T} + \frac{c_i}{T^2} \quad (7)$$

그리고 위의 각 계수의 유의성 검정은 $p=0.05$ 에서 T test 로 실시하였다.

결과 및 고찰

온도범위 0~100°C의 NaCl 용액의 점도치로부터 식 (4)를 사용하여 구한 계수 $\beta_1, \beta_4, \beta_8$ 을 Table 1에 나타내었다. Table 1을 보면 β_1 값은 40, 80, 100°C에서 유의성이 없고, β_4, β_8 값과 비교해서 작으므로 생략하 여 식 (4)를 다음과 같이 나타내었다.

$$\log \eta_r = \beta_4 x_1^2 + \beta_8 x_1^3 \quad (8)$$

NaCl 용액의 점도치⁽¹⁸⁾를 식 (8)에 대입하여 구한 계수 β_4, β_8 을 Table 2에 나타내었다. Table 2를 보 면 NaCl 용액의 점도는 식 (8)로 상당히 잘 나타낼 수

Table 1. Values of various parameters for the Equation $\log \eta_r = \beta_1 x_1 + \beta_4 x_1^2 + \beta_8 x_1^3$

Temp. °C	β_1	β_4	β_8	Correlation Coefficient
0	0.0045	-0.0045 ^{n.s}	0.0215	0.99
10	0.0032	0.0127	0.0141	0.99
18	0.0048	0.0194	0.0110	1.00
25	0.0033	0.0278	0.0076	0.99
40	0.0012 ^{n.s}	0.0406	0.0024	0.99
60	0.0012	0.0496	-0.0015	0.99
80	0.0001 ^{n.s}	0.0555	-0.0040	0.99
100	0.0000 ^{n.s}	0.0578	-0.0050	0.99

n.s: not significant

Table 2. Values of various parameters for the Equation $\log \eta_r = \beta_4 x_1^2 + \beta_8 x_1^3$

Temp. °C	β_4	β_8	Correlation Coefficient
0	0.0084	0.0153	0.97
10	0.0211	0.0105	0.99
18	0.0320	0.0056	0.91
25	0.0361	0.0041	0.94
40	0.0434	0.0012	0.87
60	0.0525	-0.0027	0.99
80	0.0561	-0.0043	0.96
100	0.0577	-0.0049	0.99

있는 것을 알 수 있다. Ostroff 등⁽¹²⁾도 NaCl 용액의 점도를 NaCl의 mole fraction에 관한 다항식으로 나타 낼 수 있음을 보고한 바 있다. 그리고 온도의 상승에 따라서 β_4 값은 지속적으로 증가하고 β_8 값은 지속적으로 감소하므로, β_4, β_8 값에 대하여 식 (7)로 온도의존성을 나타내었다. 그 결과가 Table 3인데 식 (7)에 대한 상관계수가 0.99로 NaCl 용액의 계수 β_4, β_8 은 온도 의존성이 상당히 높은 것을 알 수 있다.

sucrose 용액의 계수 $\beta_2, \beta_5, \beta_7$ 은 온도 0~80°C의 범위에서 식 (5)로부터 구해졌으며, 그 결과가 Table 4에 나와있다. Table 4를 보면 Sucrose 용액의 경우 NaCl 용액보다 회귀식에 대한 상관이 더 높은 것을 알 수 있고, 온도의 변화에 따라서 계수가 어떤 경향을 가

Table 3. Regression coefficients of temperature correlation for β_4 and β_8

Parameter	a_i	b_i	c_i	Correlation Coefficient
β_4	-0.31	269.76	-50104.8	0.99
β_8	0.14	-107.51	20078.1	0.99

Table 4. Values of various parameters for the Equation $\log \eta_r = \beta_2 x_2 + \beta_3 x_2^2 + \beta_7 x_2^3$

Temp. °C	β_2	β_3	β_7	Correlation Coefficient
0	-0.0656	0.5269	-0.0058	1
10	-0.0649	0.5108	-0.0190	1
20	-0.0608	0.4900	-0.0277	1
30	-0.0573	0.4701	-0.0340	1
40	-0.0524	0.4498	-0.0383	1
50	-0.0475	0.4307	-0.0415	1
60	-0.0360	0.4060	-0.0422	1
70	-0.0368	0.3963	-0.0458	0.99
80	-0.0252	0.3741	-0.0455	0.99

Table 5. Regression coefficients of temperature correlation for β_2, β_3 and β_7

Parameter	a_i	b_i	c_i	Correlation Coefficient
β_2	0.63	-372.01	49726.55	0.98
β_3	-0.67	507.17	-49261.0	0.99
β_7	0.48	-361.50	62525.46	0.99

지고 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 $\beta_2, \beta_3, \beta_7$ 을 NaCl 용액의 경우와 마찬가지로 식 (7)로 온도의존성을 조사하여 Table 5에 나타내었다. Table 5를 보면 식 (7)에 대한 상관계수가 0.98 이상으로 sucrose 용액의 계수 $\beta_2, \beta_3, \beta_7$ 또한 온도의존성이 상당히 높은 것을 알 수 있다.

점도-온도 사이의 관계를 나타내는데 가장 잘 알려진 식은 다음의 Andrade form 이다⁽¹⁷⁾. $\eta = Ae^{B/T}$ (A, B는 계수)

Baikunth 등⁽¹⁶⁾은 Andrade form 을 약간 변형한 다음 식으로 sucrose 용액의 온도의존성을 잘 나타내었다. $\log \eta = \alpha + \beta/T + \gamma/T^2$ (α, β, γ 는 계수) 그러나上記 식은 (7)식에 비해 sucrose 용액의 농도별로 계수 α, β, γ 를 계산해야 하는 번거로움이 있다.

지금까지 식 (8)과 식 (5)로 NaCl 용액과 sucrose

Table 6. Values of various parameters for the Equation 6

Temp. °C	β_3	β_8	β_9	Correlation Coefficient
10	-0.0079	0.0071	-0.0021 ^{n.s.}	0.88
20	-0.0036 ^{n.s.}	0.0062	-0.0058	0.83
30	0.0050 ^{n.s.}	0.0032 ^{n.s.}	-0.0096	0.78
40	0.0094 ^{n.s.}	0.0008 ^{n.s.}	-0.0121	0.78

n.s.: not significant

용액의 점도에 관한 계수를 각각 구하였는데, 두 용액의 상호작용을 나타내는 계수 $\beta_3, \beta_8, \beta_9$ 는 식 (6)로 구할 수 있다. 온도 10~40°C의 범위에서 식 (6)에 NaCl-sucrose-물의 3성분 혼합액체의 점도 측정치와 식 (8), (5), (7)에서 구한 계수를 대입하여 구한 값을 Table 6에 나타내었다. Table 6을 보면 $\beta_3, \beta_8, \beta_9$ 값은 많은 경우 유의성이 없으며, (2)식으로 계산한 결과 3성분 혼합액체의 점도에 대한 기여가 대단히 작았다. 따라서 $\beta_3, \beta_8, \beta_9$ 는 생략할 수 있다. Byers 등⁽⁹⁾은 여러 혼합액체의 점도를 연구한 결과 유사한 화합물인 naphthalene, tetralin 혼합액체 사이에는 상호작용에 의한 점도상승이 거의 없고, 극성인 phenol, picoline 의 혼합액체 사이에는 상호작용에 의해 약한 결합이 생긴 결과 여분의 점도상승이 있다고 보고하였다. 본 연구의 결과에서는 비 ion 화물질인 sucrose와 ion 화물질인 NaCl 사이에는 상호작용이 거의 일어나지 않는다고 보여진다.

이상의 결과로 sucrose-NaCl-물의 3성분 혼합액체의 점도는 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\log \eta_r = \beta_2 x_2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_2^3 + \beta_7 x_2^3 \quad (9)$$

Table 7에 식 (9)의 계수값과 식 (9)로 계산한 점도값과 실험값 사이의 오차를 나타내었다. Table 7을 보면 오차범위가 상당히 작아서 식 (9)로 NaCl-Sucrose-물의 3성분 혼합액체의 점도예측이 평균오차 2% 이내로 가능하다는 것을 알 수 있다.

Table 7. Values of various parameters for the Equation $\log \eta_r = \beta_2 x_2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_2^3 + \beta_7 x_2^3$

Temp. °C	β_2	β_4	β_5	β_6	β_7	average % error	maximum error
10	-0.0649	0.0211	0.5108	0.0105	-0.0190	1.32	3.76
20	-0.0608	0.0312 ^{a)}	0.4900	0.0061 ^{a)}	-0.0277	1.29	4.54
30	-0.0573	0.0387 ^{a)}	0.4701	0.0031 ^{a)}	-0.0340	1.17	2.27
40	-0.0524	0.0434	0.4498	0.0012	-0.0383	1.88	3.42

^{a)} Predicted value from equation 7

요 약

sucrose-NaCl-물의 3성분 혼합액체의 점도를 예측하기 위한 모델을 결정하기 위하여 온도 10~40°C, NaCl 농도 1.0064~5.7037 mol, sucrose 농도 0.3436~2.5966 mol의 범위에서 점도 실험을 행한 결과 다음의 결과를 얻었다. NaCl 용액의 점도는 식 (8)로, sucrose 용액의 점도는 식 (5)로 나타낼 수 있었다. 또한 식 (8)과 (5)의 계수들은 강한 온도의존성을 가지고 있었고 식 (7)로 표현되었다. NaCl-sucrose-물의 3성분 혼합액체의 점도는 5개의 계수를 가진 다항식인 식 (9)로 상당히 정확하게 표현할 수 있었고, NaCl 용액과 sucrose 용액 사이에는 상호작용은 거의 없는 것으로 생각되었다.

기호설명

- a, b, c: β_i 의 온도의존성을 나타내는 계수
- g: 중력가속도 (m/s²)
- h: 관내 액체의 평균높이 (m)
- L: 모세관의 길이 (m)
- ΔP : 압력차이 (Pa)
- R: 모세관의 반경 (m)
- T: 온도 (K)
- V: 액체의 용적 (m³)
- X_i : 성분 i의 mol 농도의 제곱근 (mol/kg 물)^{1/2}
- X_1 : NaCl 용액의 mol 농도의 제곱근 (mol/kg 물)^{1/2}
- X_2 : sucrose 용액의 mol 농도의 제곱근 (mol/kg 물)^{1/2}
- β_i : 다항식의 계수
- θ : 시간 (s)
- η : 점도 (Pa·s)
- η_r : 상대점도 (-)
- ρ : 밀도 (m³/kg)

감사의 글

본 연구를 수행하는데 도움을 준 M. LeMaguer 교수 (Alberta 대학, Canada)께 감사를 드립니다.

문 헌

1. Kalidas, R. and Laddha, G.S.: Viscosity of ternary liquid mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 9(1), 142 (1964)
2. Mussche, M.J. and Verhoeve, L.A.: Viscosity of ten binary and one ternary mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 20(1), 46 (1975)
3. Aminabhavi, T.M., Patel, R.C., Bridger, K., Jayadevappa, E.S. and Prasad, B.R.: Viscosity studies of some binary liquid systems. *J. Chem. Eng. Data*, 27(2), 125 (1982)
4. Dizechi, M. and Marschall, E.: Viscosity of some binary and ternary liquid mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 27(3), 358 (1982)
5. Rauf, M.A., Stewart, G.H. and Farhataziz: Viscosities and densities of binary mixtures of 1-alkanols from 15 to 55 °C. *J. Chem. Eng. Data*, 28(3), 324 (1983)
6. Aucejo, A., Part, E., Medina, P. and Sancho-Tello, M.: Viscosity of some n-alkane/1-chloroalkane binary liquid mixtures. *J. Chem. Eng. Data*, 31(2), 143 (1986)
7. Celda, B., Gavara, R., Tejero, R. and Figueruelo, J.E.: Dynamic viscosities of n-alkanes and 2-butanone mixtures at 20 °C. *J. Chem. Eng. Data*, 32(1), 31 (1987)
8. Byers, C.H. and Williams, D.F.: Viscosities of pure polyaromatic hydrocarbones. *J. Chem. Eng. Data*, 32(3), 344 (1987)
9. Byers, C.H. and Williams, D.F.: Viscosities of binary and ternary mixtures of polyaromatic hydrocarbones. *J. Chem. Eng. Data*, 32(3), 349 (1987)
10. Islam, M.N. and Flink, J.N.: Dehydration of potato. II. Osmotic concentration and its effect on air drying behavior. *J. Food Tech.*, 17, 387 (1982)
11. Korosi, A. and Fabuss, B.M.: Viscosities of binary aqueous solutions of NaCl, KCl, Na₂SO₄ and MgSO₄ at concentrations and temperatures of interest in desalination processes. *J. Chem. Eng. Data*, 13(4), 548 (1968)
12. Ostroff, A.G., Snowden, B.S.Jr. and Woessner, D.E.: Viscosities of protonated and deuterated water solutions of alkali metal chlorides. *J. Phy. Chem.*, 73(8), 2784 (1969)
13. Kestin, J., Khalifa, H.E., Ro, S.T. and Wakeham, W.A.: Preliminary data on the pressure effect on the viscosity of sodium chloride-water solutions in the range 10-40 °C. *J. Chem. Eng. Data*, 22(2), 207 (1977)

14. Kestin, J., Khalifa, H.E., Abe, Y., Grimes, C.E., Sookiazian, H. and Wakeham, W.A.: Effect of pressure on the viscosity of aqueous NaCl solutions in the temperature range 20-150 °C. *J. Chem. Eng. Data*, 23(4), 328 (1978)
15. LeMaguer, M. and Biswal, R.N.: Some engineering properties of aqueous solutions of ethanol and sodium chloride for a dehydro-cooling process. In *Food engineering and process applications*, Elsevier Applied science publishers, London & New York, Vol. 1, p.151 (1986)
16. Mirsa, B.N. and Varshni, Y.P.: Viscosity-temperature relation for solutions. *J. Chem. Eng. Data*, 6(2), 194 (1961)
17. Johnson, J.F., Martin, J.R. and Porter, R.S.: Determination of Viscosity of Food Systems. In *Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials*, Ra, C.K. (ed), D. Reidel Publishing Co., Dordrecht-Holland, p.25 (1975)
18. International Critical Tables. No. 5, p.15 (1929)
19. Junk, W.R. and Pancoast, H.M.: *Handbook of Sugars*, AVI, Westport, p.48 (1973)

(1989년 11월 6일 접수)