

## 젤 식품의 물질전달공정 중 확산량 예측모델 및 확산계수

이원영 · 최용희

경북대학교 식품공학과

### Diffused Quantity Prediction Model and Diffusion Coefficient of Gel Food in the Mass Transfer Process

Won-Young Lee and Yong-Hee Choi

Department of Food Engineering, Kyungpook National University

#### Abstract

A capillary method was used to evaluate the properties of mass transfer process and diffusion coefficients in the gel food. Amaranth dye was selected as a diffusant material to visualize the degree of diffusion procedure easily. After contacting cylinder containing agar gel with amaranth dye solution for some hours, the gel was cut to five segments by 0.5 cm in length. The diffusant concentration from the segments were measured by the spectrophotometer at 523 nm. Prediction models for the diffused quantities in gel food were established by the regression program of SPSS package program. Generally, diffusion coefficient can be calculated by Fick's second law, however, it will be determined by using numerical analysis method more easily. Finally the diffusion coefficients in this research were calculated by arithmetic mean of the measured values. As raising gel agent concentration, the mean diffusion coefficient tended to decrease because the obstruction effect came to become significant.

Key words: gel food, prediction model, diffusion coefficient

#### 서 론

물질전달 현상은 어떤 임의의 두 지점간의 농도차에 의해 생기게 되는데 과일쥬스의 농축과정, 커피와 tea의 건조과정 등에서의 휘발성 향기성분과 aroma 등이 제거될 때 혹은 발효공정 중에서 영양성분, 당, 산소의 공급, 발효산물의 미생물 외부로의 이동 등 식품가공에서 유통에 이르기까지 단위공정 전반에 걸쳐 일어나는 중요한 현상이다<sup>(1)</sup>.

국내에서 식품에서의 물질전달 현상은 변<sup>(2)</sup>에 의한 배추에서의 소금의 확산과 강과 이<sup>(3)</sup>에 의한 의사 2성 분계에서의 확산에 대한 연구를 제외하고는 물질전달의 중요성과 응용성에 비하면 연구정도가 미흡하다 할 것이다.

물질전달 현상은 크게 고체, 액체, 기체, 반고체 등에서 확산으로 크게 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 gel에서의 물질전달 현상을 고찰해 보았다. Gel은 반고체로서 많은 pore를 가지고 있으며 현미경으로 관찰하면 실모양 같이 보이는데, 이것은 gel이 상당히 느슨하게 짜여져 있으며 광범위한 수소결합 형태의 다당류를 형

성하고 있음을 보여준다<sup>(4,5)</sup>.

대표적인 gel 형성물질로서는 agar, agarose, gelatin 등이 있으며 많은 유기 polymer가 다양한 형태의 gel로 존재한다. 이러한 gel의 확산계수를 예측하기 위해서는 비정상상태의 방법이 사용되며, gel구조의 특성을 밝힐 목적에서 사용되어 왔던 여러 장치들은 사용방법이 까다롭고 비용이 많이 든다는 점에서 새로운 확산계수 측정장치가 요구되어 왔으며 그 실험방법으로 capillary method를 사용하였다<sup>(6-9)</sup>.

이 방법은 gel column을 일정한 농도를 지닌 용액에 접해 두었을 때 각 단면으로부터 확산식에 맞는 정확한 해를 구할 수 있다는 점과 흔히 유체확산에서 생기는 대류에 의한 저항을 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 capillary method를 이용해서 일정온도, 일정압력 하에서 agar gel의 농도와 시간, 거리가 확산량에 미치는 영향을 model식으로 수립하고 수치해석적 방법에 따라 확산계수를 예측하여 미생물산업에서 효소의 담체 및 배지로 쓰이는 agar의 gel 특성을 밝혀 미생물산업의 공정 및 젤상 식품제조 공정상의 최적화에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

#### 재료 및 방법

##### 재료

본 실험에서는 agar(Junsei Co., Lot No. 9H1366)를

Corresponding author: Yong-Hee Choi, Department of Food Engineering, College of Agriculture, Kyungpook National University, Sankyuk-dong 1370, Pook-gu, Taegu 702-701, Korea

무게 단위로 1~4%까지 증류수에 녹여 사용하였으며, 확산물질로는 확산의 진행정도를 쉽게 파악할 수 있게 식품색소 적색 2호인 amaranth dye를 국내 식품 첨가물 회사인 B사로부터 구입해 0.05% 용액을 만들어 실험하였다.

#### 확산실험 장치

확산실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 직경이 1.2 cm, 길이가 9 cm의 표면이 투명한 주사기에 1 mm씩 정확하게 눈금을 새겨 plunger가 들어가는 반대부분인 주사기의 끝을 수직되게 절단하여 그라인더로 갈아 그 면을 매끄럽게하여 면도날을 이용한 gel의 절단을 정확하게 행할 수 있게 하였다. 확산물질은 확산물질이 확산해 들어감으로써 반대방향으로 확산되어 나오는 물에도 확산물질의 농도가 변하지않게 주사기에 부어넣는 agar용액의 양보다 상대적으로 훨씬 많은 용액을 담아 cylinder와 접해두었다.

#### Gel의 제조 및 확산물질 농도측정

Agar powder를 증류수에 녹여 slurry로 만든 다음 확산물질의 정확한 농도를 구하는데 방해가 될 수 있는 기포를 vacuum pump로 제거하여 밀봉한 후 water bath에서 98°C 이상의 온도로 2시간 동안 가열하면서 흔들어서 주어 용해된 agar가 용액속에 고르게 분포하도록 하였다.

주사기의 끝부분을 밀봉하고 agar용액을 피펫으로 일정량 용액을 취해 주사기 벽면을 따라 흘러 기포가 생기지 않게 주사기의 눈금이 5 cm가 되게 채웠다. Agar 용액이 담겨있는 주사기를 얼음물에 옮겨 단시간내에 굳힌 다음 봉하고 gel을 안정시키기 위해 12시간 동안 aging한 후 확산물질과 접해두었다.

확산이 일어난 agar gel을 0.5 cm 단위로 절단하여 10 개의 segment 중 확산이 진행된 5개의 segment를 test tube에 넣고 60°C의 water bath에 옮겨 1시간 동안 두어 gel속의 amaranth dye가 10 ml의 증류수 속으로 재확산되어 고르게 퍼질 수 있게한 후 spectrophotometer (Cecil Co., Model No. CE393) 523 nm에서 확산물질의 농도를 측정하였다.

#### 확산량 예측모델

본 연구에서는 종속변수인 확산량에 대하여 독립변수인 시간, 거리, agar농도와와 상관관계를 도출하여 함수 관계를 추정하고 SPSS통계 package 중 regression program을 이용하여 확산량 예측모델

(Diffusant concentration

= f(length, time, agar concentration))

식을 수립하였다.

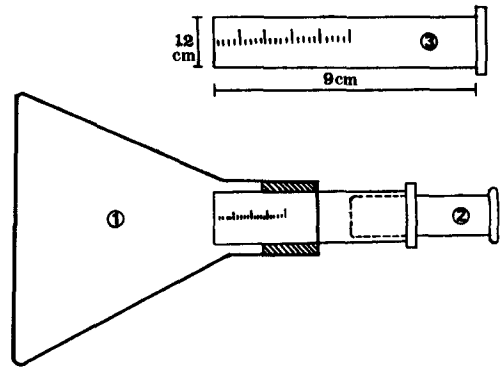


Fig. 1. Experimental apparatus used for diffusion process

1 : 250 ml flask, 2 : piston, 3 : scaled cylinder by 1 mm length

#### 확산계수

Giannakopoulos와 Guilbert<sup>(10)</sup>는 확산계수에 영향을 미치는 인자들을 온도, 점도, 확산물질 등이라고 밝히고 (1)의 식을 사용해 확산계수를 구하였고, Belton과 Willson<sup>(6)</sup> 및 Naesens 등<sup>(7)</sup>은 (2)식으로 확산계수를 계산하고 gel의 aging time은 확산계수에 영향을 주지 않는다고 보고한 바 있다.

Crutis와 Labuza<sup>(9)</sup>는 (3)식을 통해 확산계수를 계산하였다. 본 연구에서는 다층 slab에서 Δt만큼 시간이 경과했을 때 n번째 slab을 중심으로 n-1 slab과 n+1 slab과의 수치식 (4)식으로부터 기존의 방법보다 간편하게 확산계수를 구하고자 하였다.

$$C = -\frac{1}{2} \cdot \frac{C_0}{(\pi \cdot D \cdot T)^{1/2}} + \frac{1}{2} C_0 \quad (1)$$

$$C_{(x,t)} = \frac{C_0}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{X}{2(Dt)^{1/2}} \right) \quad (2)$$

$$D = -\frac{1/2t \int_0^{C_1} xdc}{\delta C / \delta X} \quad (3)$$

Rate in - Rate out = Rate of accumulation

$$\frac{D \cdot A \cdot (C_{n-1} - C_n)}{\Delta x} - \frac{D \cdot A \cdot (C_n - C_{n+1})}{\Delta x} = \frac{(A \cdot \Delta x) (C_{n+1} - C_{n-1})}{\Delta t} \quad (4)$$

여기서

X : Distance(mm)

C<sub>0</sub> : Initial concentration(g/l)

D : Diffusivity(mm<sup>2</sup>/sec)

T : Temperature(°C)

t : Time(sec)

n : Position of slab from center

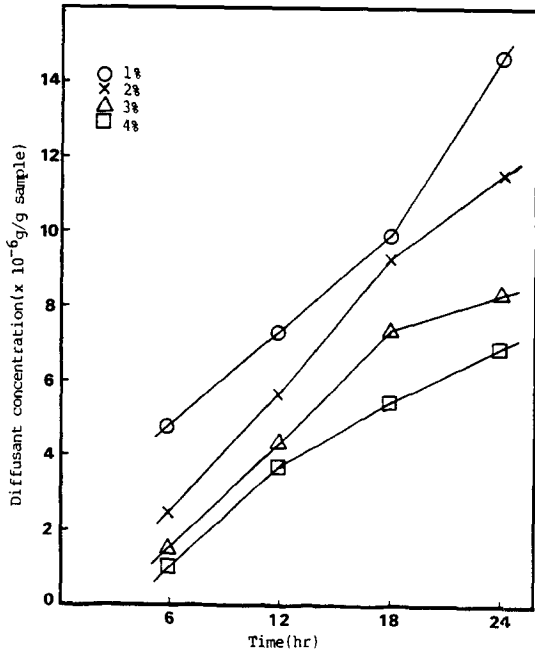


Fig. 2. Comparison of diffusant concentration of second slab and time at various agar concentrations

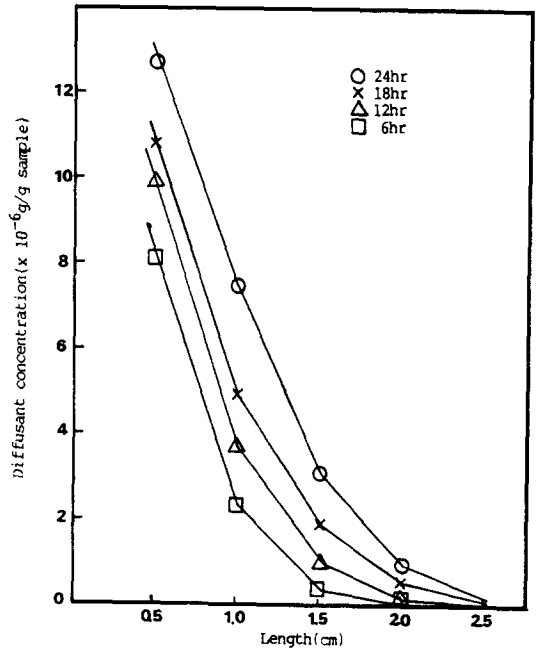


Fig. 3. Comparison of diffusant concentration and length at various time when agar concentration is 1%

결과 및 고찰

확산량

Fig. 2는 agar의 농도별로 2nd slab에서의 확산량과 확산시간과의 관계를 나타낸 것으로 각 농도마다 시간이 증가함에 따라 거의 선형적인 증가를 나타내고 있으며 agar의 농도가 낮을 수록 확산이 많이 일어나 확산정도에 가장 영향을 많이 주는 인자가 gel 형성물질임을 추정할 수 있었다.

Fig. 3은 agar 1%에서의 각 segment별로 확산물질의 농도와 확산거리와의 관계를 나타낸 것으로 확산거리가 증가함에 따라 확산량이 급격히 줄어들어 무한 slab에서의 확산과 유사한 경향을 보였으며 시간이 증가할 수록 직선에 가까워져 정상상태에 가까워짐을 볼 수 있었다.

확산물질의 농도와 확산거리의 모델

확산거리와 확산물질의 농도와의 함수관계를 추정하기 위해 이를 도식하고 예상되는 몇 가지 함수관계인 L, ln L, Exp L, L<sup>1/2</sup> 중에서 R-square 값이 가장 높게 나타나는 함수관계식을 채택하여 (5)의 식으로 나타냈다.

$$\ln(C) = A_1L + A_4 \quad (5)$$

C : Diffusant concentration ( $\times 10^{-6}$  g/l)

L : Distance (cm)

A<sub>1</sub>, A<sub>4</sub> : Coefficient values

위의 (5)식을 (6)식으로 변환하여 단순회귀분석을

통해 agar의 농도와 시간에 대한 model식의 coefficient values와 R-square 값을 Table 1에 나타내었다.

$$C = \text{Exp}(A_1L + A_4) \quad (6)$$

Table 1에 나타난 바와 같이 R-square 값이 4%의 6시간에서 값이 현저히 감소하는 이유는 3번째 segment에서 5번째 segment까지 확산농도의 변동이 일어나지 않아 ln(C)의 값이 일정한 값이되어 R-square 값이 현저하게 감소된 것으로 사료된다. 이 경우를 제외하고는 R-square 값이 0.94 이상의 model식을 수립할 수 있었으며 Fig. 4는 18시간일 때 확산농도와의 관계를 나타낸 것으로 0.5 cm일 때 직선이 모이는 이유는 첫번째 slab이 확산물질용액과 바로 접하고 있어 gel 농도에 따른 농도차가 크지 않는데다가 ln값을 취함에 따라 그 차이가 더욱 줄어든 때문이라 생각된다.

확산물질의 농도와 확산시간의 모델

확산농도와 시간과의 상호관계는 확산물질의 농도와 확산거리와의 model식에서 설명한 방법과 같은 방법으로 함수관계를 추정한 결과 (7)의 함수식이 가장 높은 R-square 값을 나타냈으며 이를 (8)식으로 다시 변환하여 단순회귀분석한 결과를 Table 2에 나타내었다.

$$\ln(C) = A_2\ln(t) + A_4 \quad (7)$$

t : Time (hr)

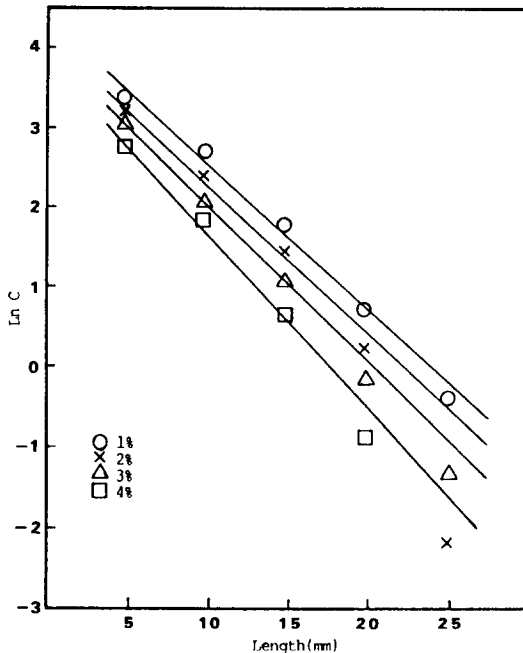
A<sub>2</sub> : Coefficient value

**Table 1. Coefficient values in the proposed model of the length depending on diffusant concentrations**

Agar (%)	Time (hr)	Coefficient values		R-square
		A <sub>1</sub>	A <sub>4</sub>	
1	06	-0.37850	5.00275	0.97752
	12	-0.34610	5.10885	0.97923
	18	-0.22578	4.45595	0.97875
	24	-0.21023	4.64755	0.95631
2	06	-0.30172	3.86424	0.93458
	12	-0.35642	5.00217	0.97102
	18	-0.24898	4.59062	0.97827
3	06	-0.25960	4.91144	0.94360
	12	-0.36299	4.17828	0.99205
	18	-0.33673	4.56319	0.97766
4	06	-0.26375	4.41919	0.99173
	12	-0.22753	4.35328	0.99718
	18	-0.2753	4.35328	0.99718
	24	-0.30981	2.98345	0.79860
4	06	-0.30981	2.98345	0.79860
	12	-0.32891	4.37681	0.99357
	18	-0.31032	4.69073	0.97204
	24	-0.28429	4.58299	0.97695

**Table 2. Coefficient values in the proposed model of the time depending on diffusant concentrations**

Agar (%)	Length (cm)	Coefficient values		R-square
		A <sub>2</sub>	A <sub>4</sub>	
1	2.5	3.79410	-12.84860	0.94037
	2.0	2.74508	-8.15520	0.88890
	1.5	1.60478	-3.35154	0.97081
	1.0	0.79941	0.06193	0.96712
	0.5	0.31014	2.22092	0.97451
2	2.5	1.08269	-5.43637	0.78908
	2.0	2.40880	-7.56464	0.84688
	1.5	1.98041	-4.75773	0.98670
	1.0	1.15691	-1.17389	0.99225
	0.5	0.28455	2.24035	0.93471
3	2.5	2.81884	-10.34033	1.00000
	2.0	1.84823	-6.22483	0.99217
	1.5	1.93074	-5.09720	0.96314
4	1.0	1.25961	-1.75015	0.97052
	0.5	0.41588	1.74304	0.94942
	2.5	2.81884	-10.54325	1.00000
	2.0	2.00781	-7.14430	0.97882
	1.5	3.17983	-9.02002	0.96217
1.0	1.33533	-2.19766	0.96345	
0.5	0.35012	1.72650	0.96552	



**Fig. 4. Relationship of diffusant concentration and length at various agar concentration when time is 18 hr**

$$C = \text{Exp}(A_4) \times t^{A_2} \tag{8}$$

Table 2에서 확산거리가 2.5 cm일 때 agar 농도가 2%일 때는 마지막 slab에서 확산물질의 농도구배가 충분히 발달하지 않아 R-square 값이 낮게 나타났으며 3%

및 4%일 때는 농도구배가 나타난 18시간과 24시간의 실험치들로부터 회귀분석을 실시되어 R-square 값이 1이 된 것으로 생각된다. Fig. 5는 확산거리 1.5 cm에서 Ln C와 Ln t와의 관계를 agar의 농도별로 나타낸 것이다.

**확산물질의 농도와 agar농도의 모델**

확산물질의 농도와 agar 농도와의 상호관계는 추정된 함수관계 중 R-square 값이 가장 높게 나타난 (9)식을 채택하고 (10)식으로 변환하여 회귀분석한 결과를 Table 3에 나타내었다.

$$\text{Ln}(C) = A_3 G^2 + A_4 \tag{9}$$

A<sub>3</sub> : Coefficient value

G : Agar concentration(g%)

$$C = \text{Exp}(A_3 G^2 + A_4) \tag{10}$$

Table 3에서와 같이 각 시간별로 2.5 cm의 R-square 값의 변동이 심한 이유는 Table 2에서 설명한 바와 같다. Fig. 6은 확산거리가 1.0 cm일 때 확산물질의 농도와 agar 농도와의 관계를 나타낸 것이다.

**확산물질농도와 agar농도, 시간의 모델**

Table 4는 확산물질의 농도와 세 변수 중 확산의 진행 정도에 가장 영향을 많이 미치는 인자인 agar 농도 및 시간을 독립변수로 하여 추정되는 함수관계식으로부터 이중회귀분석을 실시했을 때 가장 높은 R-square를 나타내는 (11)식을 채택하여 (12)식으로 변환하고 그

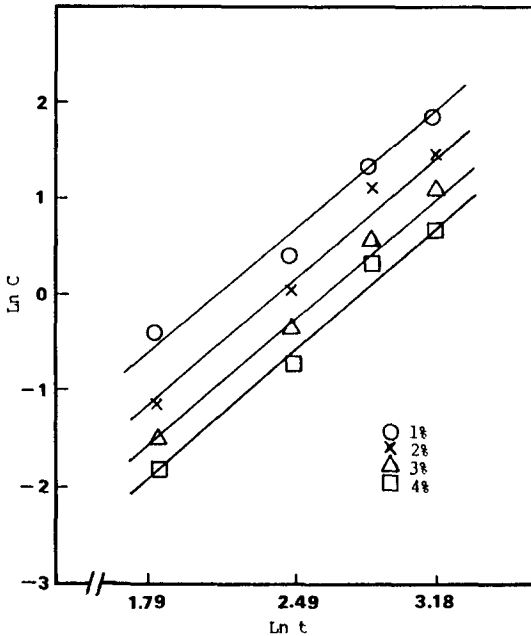


Fig. 5. Relationship of diffusant concentration and time at various agar concentration when length is 1.5 cm

Table 3. Coefficient values in the proposed model of the agar concentration depending on concentrations

Agar (%)	Length (cm)	Coefficient values		R-square
		A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	
06	2.5	-0.05776	-2.65493	1.00000
	2.0	-0.04567	-2.71672	0.74667
	1.5	-0.20307	-0.13204	0.94535
	1.0	-0.09073	1.41070	0.89259
	0.5	-0.03280	2.85228	0.95789
12	2.5	-	-	-
	2.0	0.00685	-2.33668	0.10714
	1.5	-0.77340	0.32489	0.83737
	1.0	-0.09073	1.95593	0.93769
	0.5	-0.02458	2.99023	0.97280
18	2.5	-0.13233	-1.31790	0.94241
	2.0	-0.08705	0.12095	0.84950
	1.5	-0.06581	1.35972	0.95277
	1.0	-0.06581	2.35890	0.99119
	0.5	-0.04054	3.10906	0.97027
24	2.5	-0.09563	-1.15148	0.55991
	2.0	-0.10552	0.72034	0.98856
	1.5	-0.07297	1.82446	0.96770
	1.0	-0.05154	2.67598	0.93985
	0.5	-0.02909	3.30455	0.91033

결과를 나타낸 것이다.

$$\text{Ln}(C) = A_2 \text{Ln}(t) + A_3 G^2 + A_4 \quad (11)$$

$$C = \text{Exp}(A_1 + A_3 G^2) \times t^{A_2} \quad (12)$$

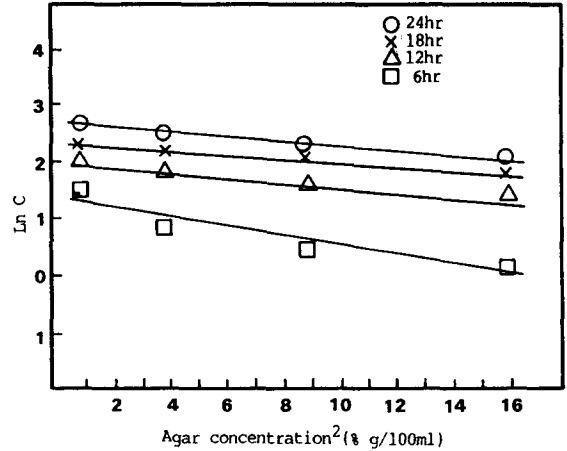


Fig. 6. Relationship of diffusant and agar concentration at various time when length is 1.0 cm

Table 4. Coefficient values in the proposed model of the length and time depending on concentrations

Length (cm)	Coefficient values			R-square
	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	
2.5	-0.07054	0.97716	-4.60870	0.56861
2.0	-0.05638	2.25566	-6.86617	0.89190
1.5	-0.10380	2.17394	-4.77815	0.91847
1.0	-0.05635	1.13782	-8.42330	0.94429
0.5	-0.02687	0.34017	2.18425	0.95975

Table 4에서 확산거리가 2.5 cm일 때 R-square 값이 낮아지는 이유는 Table 2에서 설명한 바와 같다.

확산량 예측모델

단순회귀와 이중회귀의 결과를 바탕으로 종속변수 확산농도에 대한 각 독립변수의 관계를 (13)식과 같이 두었으며 변환식 (14)로 다중회귀분석해 이들에 대한 coefficient values를 Table 5에 나타냈으며 R-square 값이 0.93 이상의 좋은 model식을 수립할 수 있었다.

$$\text{Ln}(C) = A_1 L + A_2 \text{Ln}(t) + A_3 G^2 + A_4 \quad (13)$$

$$C = \text{Exp}(A_1 + A_3 G^2 + A_4 L) \times t^{A_2} \quad (14)$$

확산계수

Gel에서의 확산에 고려하여야할 사항은 swelling 현상과 확산물질이 polymer matrix에 결합하는 binding effect이다. Swelling 현상은 gelatin에서의 확산과정에 생기는 현상으로 gelatin에 확산물질의 농도구배가 생기려면 495시간 이상의 시간이 필요한데 긴 확산시간 때문에 물의 확산이동이 확산물질의 이동을 대치하게 되어 swelling 현상이 일어나게 된다. 그러나 agar의 경우는

**Table 5. Coefficient values in the proposed model of the length, time and agar concentration depending on diffusant concentrations**

Coefficient values				R-square
A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	
1.41682	-0.28528	-0.06175	1.16880	0.93096

**Table 6. Diffusivities of amaranth dye in the agar gel**

Time difference (sec)	Diffusivity(cm <sup>2</sup> /sec)	
	2nd slab	3rd slab
21600	0.000003929	0.000002701
21600	0.000004477	0.000005934
21600	0.000010163	0.000008409
43200	0.000003972	0.000005257
43200	0.000006525	0.000006373
64800	0.000005210	0.000006494

**Table 7. Mean diffusivities of amaranth dye in the agar gel**

Agar (%)	Mean diffusivity (×10 <sup>-6</sup> cm <sup>2</sup> /sec)
1	5.787
2	5.086
3	4.365
4	3.910

농도구배가 생기는데 18~24시간이 걸려 물의 이동에 의한 swelling 현상은 무시될 수 있다고 보고된 바 있다<sup>6)</sup>.

Belton과 Willson<sup>6)</sup>은 확산계수의 실험을 통한 확산계수의 재현은 polymer에 대한 확산물질의 binding effect 때문에 어렵다 하고 그 경우를 둘로 나누어 설명하였다. 하나는 일반적인 경우에 해당하는 binding effect가 확산물질의 농도에 대하여 비선형적으로 나타나는 경우이고 다른 하나는 선형적인 경우이다. 그러나 agar gel에서 amaranth dye는 binding effect를 가지지 않는 다하였다. 따라서 본 논문에서는 agar gel에서의 amaranth dye의 확산을 swelling 현상과 binding effect를 무시하고 확산계수를 생각할 수 있었다.

시간 t에서 확산물질에 관한 n번째 slab에서의 수치 식인 (4)식을 D에 대해 정리하여 (16)에 나타냈다.

$$D = \frac{(t + \Delta t) C_n - C_{n-1}}{(C_{n+1} + C_{n-1} - 2C_n)} \cdot \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \quad (16)$$

A : Cross sectional area(cm<sup>2</sup>)

Δt : Difference of time(sec)

D : Diffusivity(cm<sup>2</sup>/sec)

Table 6은 agar 농도가 1%이고 Δt가 6시간, 12시간, 18시간일 때 예측된 D값을 나타냈으며 최종 D값은 Table 7에 이들의 산술평균값으로 나타냈다.

Table 7에 나타난 바와 같이 agar의 농도가 높아짐에 따라 평균확산계수값이 낮아지는 이유는 gel 형성물질의 농도가 높아짐에 따라 pore size가 작아져 obstruction effect가 커지기 때문인 것으로 사료된다.

## 요 약

Gel식품의 구조적 특성을 밝히는 일은 특수한 장치나 분석방법이 요구되어 왔으나 본 연구에서는 조작이 간편하고 확산식에 잘 맞는 농도의 해를 구할 수 있는 capillary method를 통해 확산량과 확산계수를 예측하였다. 확산량은 거리, 시간, agar% 농도를 독립변수로 하여 도시하고 추정된 몇 가지 함수식으로부터 SPSS 통계 package 중 regression program을 이용해 단순회귀시켜 R-square가 가장 높은 식을 채택하고 다시 각 독립변수에 대한 함수식을 이용해 다중회귀분석을 실시함으로써 최종 model식을 수립하였다. 기존의 확산계수 예측 방법은 Fick의 제 2법칙의 해식으로부터 예측되는 것이 일반적이었으나 그 식이 난해하고 시간이 많이 걸려 본 연구에서는 좀 더 간편한 방법으로 확산계수를 구하고자 수치해석적 방법에 따라 확산계수를 예측하였으며 그 산술평균을 확산계수 D값으로 나타내었다.

## 문 헌

- Geankoplis, C.J. : *Transport processes and unit operations*, 2nd ed. The Ohio State University, p.415(1983)
- 변유량 : 배추조직의 가열연화와 열처리 최적화 연구. 한국음식 문화연구원 논총, 1, 293(1988)
- 강안수, 이태희 : 유기 방향물질의 의사 2성분계 확산계수 제 1보. 설탕용액 중 Benzaldehyde의 확산계수. 한국식품과학회지, 14, 315(1982)
- Edwards, S.F., Lillfork, P.J. and Blanshard, J.M.V. : Gel and networks in practiced and theory. In *Food Structure and Behaviour*, Blanshard, J.M.V. and Lillford, P.(ed.), Academic Press, New York, p.1(1987)
- Clark, A.H. : The application of network theory to food systems. In *Food Structure and Behaviour*, Blanshard, J.M.V. and Lillford, P. (ed.), Academic Press, New York, p.13(1987)
- Belton, P.S. and Wilson, R.H. : An experimentally simple method for measuring diffusion in food gels. *J. Food Technol.*, 17, 531(1982)
- Naesens, W., Bresseleers, G. and Tobback, P. : A method for the determination of diffusion coefficients of food component in low and intermediate moisture systems. *J. Food Sci.*, 46, 1446(1981)
- Hendrickx, M., Vanden, A.C., Engels, D. and Tobback, P. : Diffusion of glucose in carageenan gels. *J. Food Sci.*, 51, 1544(1986)
- Crutis, B.G. and Labuza, T.P. : A dye diffusion techni-

- que to evaluate gel properties. *J. Food Sci.*, **44**, 1369 (1979)
10. Giannakopoulos, A. and Guilbert, S. : Determination of sorbic acid diffusivity in model food gels. *J. Food Technol.*, **21**, 339(1986)
  11. Crank, J. : *The mathematics of diffusion*, 2nd ed. Oxford University Press, London, p.44(1970)
  12. Hsu, K.H. : A diffusion model with a concentration dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. *J. Food Sci.*, **48**, 618(1983)
  13. Bressan, J.A., Carroad, P.A., Larry, M.R. and Dunkley, W.L. : Temperature dependent of effective diffusion coefficient for total solids during washing of cheese curd. *J. Food Sci.*, **46**, 1958(1981)
  14. Rodger, G., Hastings, R., Cryne, C. and Bailey, J. : Diffusion properties of salt and acetic acid into herring and their subsequent on the effect muscle tissue. *J. Food Sci.*, **49**, 714(1984)
  15. Bressan, J.A., Carroad, P.A., Larry, M.R. and Dunkley, W.L. : Temperature dependence of effective diffusion coefficient for total solids during washing of cheese curd. *J. Food Sci.*, **46**, 1958(1981)
  16. Stahl, R. and Loncin, M. : Prediction of diffusion in solid foodstuffs. *J. Food Proc. Preserv.*, **3**, 213(1979)
- 
- (1991년 1월 31일 접수)