

열처리 공정에 따른 생선단백질의 물성 연구

강병선 · 김병용 · 이재권*

경희대학교 식품가공학과, *경기대학교 식품가공학과

Rheological Studies of the Fish Protein upon the Thermal Processing

Byung-Sun Kang, Byung-Yong Kim and Jae-Kwun Lee

Department of Food Processing, Kyunghee University

*Department of Food Processing, Kyunggi University

Abstract

Changes in the rheological properties and the linear viscoelasticity of fish protein gel upon the thermal processing were studied by using mathematical models with stress-relaxation data. The linear viscoelasticity of surimi gel was observed in the range of the true strain 0.105~0.693 and cross-head speed 50~250 mm/min applied in this study. The results of the generalized Maxwell analysis showed that the magnitudes of elastic elements (E, E_c) were increased, but the viscous element (η) was decreased, as the cross-head speeds and strain levels were increased. Compared to the protein gel heated directly at 90°C without preheating, the protein gel pretreated at 4°C and 40°C showed the higher elastic modulus, but showed different trends in the viscous component, depending on the rheological model applied. Thus, the approaching methods and curve fitting of two mathematical models of stress-relaxation to describe the viscoelastic properties of fish protein gel were discussed.

Key words: viscoelasticity, stress-relaxation, fish protein, setting

서 론

생선살을 추출하여 물로 세척하고 탈수한 후 냉동방지를 첨가하여 성형한 surimi는 주로 소세지, 맛살류 등에 사용되는 준가공물질이다^(1,2).

Surimi는 대부분이 myofibrilla와 같은 염용성 단백질로 구성되어 있으며, 염을 첨가한 후 가열하면 연속적인 3차원적 망상구조의 단백질 겔을 형성하여 특이한 조직감을 지니게 된다⁽³⁾. 특히 0°C 부근의 저온에서 장시간 또는 40°C 부근의 고온에서 일정시간 가열한 후 90°C 이상에서 가열하는 2단 열처리 과정에 의해 형성된 생선단백질 겔은 직접 90°C에서 가열한 것보다도 더욱 강하고 탄성력이 뛰어난 조직을 얻을 수 있으며, 이를 "setting 현상"이라 한다⁽⁴⁾. 이와 같이 열처리 과정을 거쳐서 얻어진 단백질 겔은 점탄성 성질을 가지며, 그 값들은 조직의 강도변화의 지표로서 이용된다.

순간적으로 가해지거나 변화하는 힘에 대해서는 탄성적인 성질을 가지며, 시간의 변화에 대해 천천히 변화하거나 또는 변화하지 않는 일정한 힘에 대해서는 점성적인 성질을 갖는 특성을 점탄성(viscoelasticity)이라고 한다⁽⁵⁾. 식품의 점탄성에 관한 연구로는 soybean⁽⁶⁾, oval-

bumin⁽⁷⁾, whey protein⁽⁸⁾, 쌀전분⁽⁹⁾ 등 단백질 식품이나 탄수화물 식품에 많은 연구가 이루어지고 있으나, 생선 단백질의 경우에는 그 범위가 한정적이고 특히 조직변화의 예측에 관해서는 전무한 실정이다.

생선단백질 겔과 같은 고형 식품의 점탄성을 측정하는 기계적인 방법은 여러가지가 있으나, 시료에 일정한 변형(strain)을 주고, 그 변형을 일정하게 유지시키는데 필요한 응력의 변화를 시간의 함수로서 측정하는 응력완화 시험(stress relaxation test)이 있다⁽⁵⁾. 즉 응력완화곡선의 수량화 및 분석을 통해 식품조직형성의 구조적 특징⁽¹⁰⁾, 물성변화⁽¹¹⁾, 망상구조내의 가교결합 측정⁽¹²⁾ 등에 사용되어 왔다.

본 연구에서는 여러 setting처리에 의해 형성된 생선 단백질 겔의 응력완화현상을 조사하고, 물성학적 역학 모형에 의한 분석을 통하여 생선단백질 조직 변화의 물성학적 성질을 비교하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 연구에서는 명태류의 신선한 생선을 박 등⁽¹³⁾의 방법에 의해 만든 surimi를 이용했으며, 보존료로서 4%의 sorbitol과 4%의 sucrose를 첨가하여 섞은 후, -20°C로 급냉동하여 저장시키고 사용하였다.

Corresponding author: Byung-Sun Kang, Department of Food Processing, Kyung Hee University, Yongin, Kyunggi-do 449-701, Korea

단백질 겔의 제조

단백질 겔의 제조는 surimi 700g을 4℃에서 12시간 동안 해동시킨 후, silent cutter로 갈아서 3%(w/w) 소금을 첨가하여 섞은 후, sausage stuffer를 이용하여 stainless steel tube(길이 : 15 cm, 내경 : 1.6 cm)에 충전하여 항온조에서 열처리하였다. 열처리 조건으로는 4℃에서 24시간 저장후 90℃에서 15분 처리하는 저온 setting, 40℃에서 30분 가열 후 90℃에서 15분 처리하는 고온 setting을 행하였으며, 기준으로 90℃에서 15분 동안 전처리없이 직접 가열하여 겔을 제조하였다.

응력완화의 측정

열처리 조건에 따라 제조한 생선단백질의 응력완화현상을 측정하기 위해 Rheometer(Sun Co. CR-200D, Japan)를 이용하였다. 일정 크기(길이 : 2 cm, 반지름 : 0.82 cm)로 자른 겔을 10 kg load cell에 부착시키고, 정변형도(true strain) 0.105하에서 수직방향으로 일정한 압축속도(150 mm/min)로 이동하여 응력완화현상을 측정하였다. 순간응력과 시간에 따른 응력 감소는 chart speed 300 mm/min에서 30분간 기록하였으며 모든 측정은 실온에서 행하였으며, 측정 중 수분의 증발을 방지하기 위해 시료의 표면에 vaselin을 발랐다.

또한 점탄성 이론이 적용되어지는 선형성(linearity) 범위를 결정하기 위하여, 여러 압축속도(50~250 mm/min)하에서, 또한 변형도(0.105~0.693)를 변화시킨 조건에서 응력완화현상을 측정하였다.

응력완화곡선의 분석

생선단백질 겔과 같은 점탄성 물질의 수식적인 물성 변화는 탄성과 점성 성분을 결합한 여러 물성학적 모형으로 설명되어지는데⁽¹⁴⁾, 본 실험에서는 축차잔차법(successive residual method)⁽⁶⁾과 generalized Maxwell 모형을 단순화시킨 3요소 generalized Maxwell 모형을 이용하여 응력완화 곡선을 분석하였다⁽³⁾.

Maxwell모형은 물성의 특성을 시간별 응력 변화로서 나타내며, 그 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^m \sigma_i \exp(-t/\tau_i) \tag{1}$$

여기에서 $\sigma(t)$ 는 시간 t에서의 decaying stress이고, σ_i 와 τ_i 는 Maxwell 요소의 탄성과 완화 시간을 나타내는 상수이고, m은 exponential decay term이다.

축차잔차법에 의해 응력완화 곡선의 분석은 다음과 같은 4개의 Maxwell body가 조합된 generalized Maxwell 모형으로 나타내어 질 수 있다.

$$\sigma(t) = \sigma_1 e^{-t/T_1} + \sigma_2 e^{-t/T_2} + \sigma_3 e^{-t/T_3} + \sigma_4 e^{-t/T_4} \tag{2}$$

여기에서 σ_{1-4} 는 곡선의 직선부에서 외접선으로 그은 직선의 Y축 절편이며, T_{1-4} 는 이 외접선의 기울기로 구하여진다.

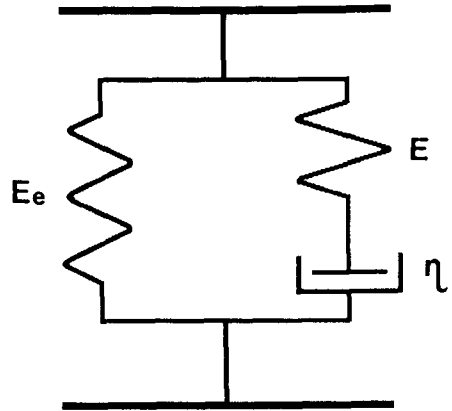


Fig. 1. Schematic of 3-element Maxwell model

응력완화 시험의 결과를 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 2개의 탄성성분(elastic element)과 1개의 점성성분(viscous element)으로 이루어진 3요소 generalized Maxwell 모형에 적용하여 가열처리 조건에 따른 탄성 및 점성 성분의 변화를 계산하며, 조직의 강도를 나타내기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다⁽³⁾.

$$\sigma(t) = \sigma_e + (\sigma_0 - \sigma_e) e^{-t/\tau} \tag{3}$$

여기에서 σ_e 는 평형응력, σ_0 은 초기응력이며 τ 는 응력완화시간으로서

$$\tau = (\eta/E) \tag{4}$$

으로 나타내어진다. η 는 점성성분을 나타내며, 탄성율(E)과 평형탄성율(E_e)는 각각 다음과 같이 나타내어진다.

$$E = (\sigma_0 - \sigma_e) / \epsilon_0 \tag{5}$$

$$E_e = \sigma_e / \epsilon_0 \tag{6}$$

압축률에 대한 선형성을 결정하기 위한 변형도는 정 변형도로 나타내었으며, 다음과 같은 방법에 의해 구하였다⁽¹⁵⁾.

$$\epsilon_{TR} = -\log_e(1 - \epsilon_{AP}) \tag{7}$$

여기에서 ϵ_{AP} 는 겔보기 변형도(apparent strain)이고, ϵ_{TR} 는 정변형도이다.

결과 및 고찰

변형도 및 압축속도에 대한 선형성의 측정

식품의 조직적 특성을 나타내기 위해서는 한종류 이상의 물성학적 모형을 사용하며, 변형도와 같은 여러가지 측정 조건을 달리하여 측정범위의 선형성(linearity)을 측정하여야 한다⁽¹⁶⁾. 시료의 점탄성에 압축변형이 미치는 영향 및 측정 조건의 결정을 위하여 90℃에서 15분간

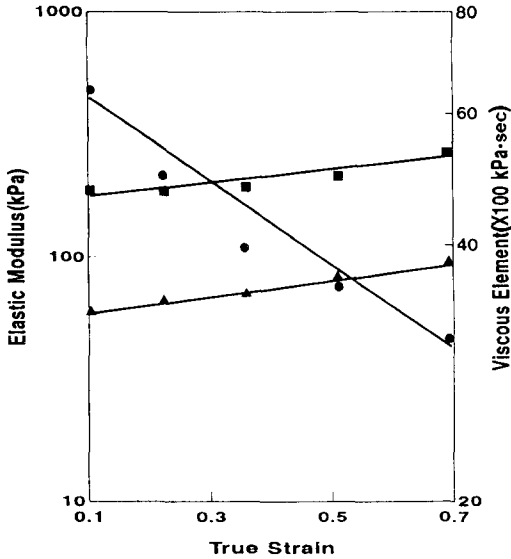


Fig. 2. Changes in rheological properties measured at various true strain levels at the constant cross-head speed (150 mm/min)

■—■; initial elastic modulus (E), ▲—▲; equilibrium elastic modulus (E_e), ●—●; viscous element (η)

가열하여 제조한 겔을 일정 압축속도(150 mm/min)에서 변형도를 달리하여 측정된 결과를 3요소 Maxwell모형을 이용하여 분석한 결과는 Fig.2와 같다. 시료에 가한 변형도가 증가할수록 초기순간응력은 24 kPa에서 180 kPa로, 탄성율(E)은 180 kPa에서 260 kPa로, 평형탄성율(E_e)은 60 kPa에서 95 kPa로 각각 증가하였으나, 응력완화시간은 36초에서 13초로, 점성성분은 6400 kPa·sec에서 3400 kPa·sec로 각각 감소하였으며, 이는 양생을 이용한 변 등⁽¹⁷⁾과 응력이 50%까지 완화되는 시간을 응력완화시간으로 분석한 Weinberg 등⁽¹⁸⁾과 상응하는 것으로 나타났다. 초기응력과 탄성율등이 변형도에 비례하여 높게 나타나는 것은 가열에 의해 형성된 단백질 망상구조의 탄성적 성질에 의한 것을 의미한다. 또한 식 (4)와 같이 점성성분과 탄성성분의 상대적 비율인 응력완화시간이 변형도의 증가와 반비례하게 감소한 것은 변형이 클수록 탄성성분이 점성성분보다 상대적인 변화가 많은 것을 의미한다. 각각의 압축속도에서 변형도를 변화하며 측정된 초기응력을 Fig.3에 나타내었다. 압축속도 150 mm/min에서 정변형도가 증가함에 따라 탄성율과 순간응력이 증가하고, 점성성분과 응력완화시간이 감소하는 경향은 다른 압축속도하에서도 정변형도가 증가함에 따라 같은 경향을 나타내었다. 각각의 압축속도에서 정변형도에 대한 초기응력과의 관계를 나타내는 상관계수(r)는 0.98로 나타났다. 이로서 surimi 겔에 있어서 정변형도 0.105에서 0.693의 범위는 변형도가 변화되어도 물리적 구조의 특징을 나타낼 수 있는 선형성(linearity)의 범위

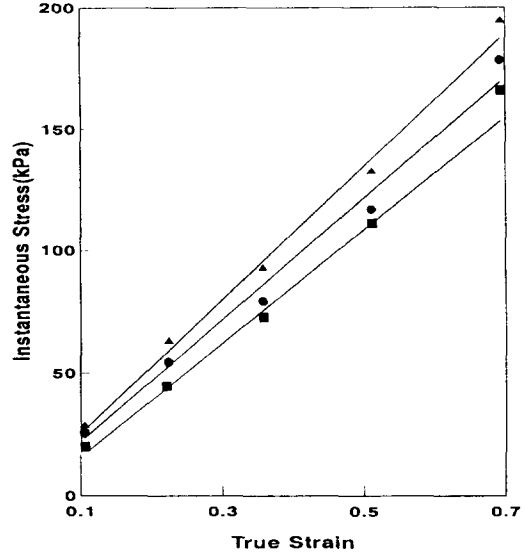


Fig. 3. Plots of the instantaneous stress with different cross-head speeds at various strain level

Cross-head speeds (mm/min): ■—■; 50, ●—●; 150, ▲—▲; 250

라고 고려될 수 있었다.

압축변형도와 마찬가지로 압축속도가 시료의 점탄성에 미치는 영향 및 측정 조건의 결정을 위하여 90°C에서 15분간 가열하여 제조한 겔을 일정 압축변형도(0.357)에서 압축속도를 달리하여 측정하였으며, 3요소 Maxwell모형을 이용하여 분석한 결과를 Fig.4에 나타내었다. 압축속도가 50 mm/min에서 250 mm/min로 증가함에 따라 초기응력은 16.5 kPa에서 24.3 kPa로, 탄성율은 116.9 kPa에서 194.8 kPa로 각각 증가하였으며, 평형탄성율은 50 kPa의 일정한 값을 나타내었으나, 점성 성분은 5,500 kPa·sec에서 3,800 kPa·sec로, 응력완화시간은 50초에서 20초로 감소하였다. 이는 동적 점탄성의 측정에서 탄성 성분(G')과 점성성분(G'')은 진동수 또는 시간의 경과에 대해서는 동일한 경향으로 증가 또는 감소되나, 온도나 첨가물 등의 내부구조 변화에 의해서는 상반된 결과를 나타낼 수 있으며⁽¹⁹⁾, 변형속도 또는 변형도가 증가하게 되면, 조직 결합의 균열속도가 증가하여, 점성성분이 감소한다고 보고한 변 등⁽¹⁷⁾의 결과와 같은 것으로 나타났다. 각각의 변형도에서 압축속도를 변화하여 측정된 초기 응력과 압축속도와의 관계를 Fig.5에 나타내었다. 각각의 변형도에서 압축속도가 증가할수록 초기순간응력은 증가하였으며, 압축속도와 초기응력과의 평균 상관계수는 0.95로서 비교적 높은 상관관계를 나타내었다.

응력완화에 의한 응력의 변화를 수학적으로 분석하여 모형화한 것은 선형적 점탄성 거동이 나타나는 범위내에서만 가능하며, 이 범위내에서 측정된 물성학적 결과는 내부구조에 대한 정보로서 사용이 가능함을 의미한다

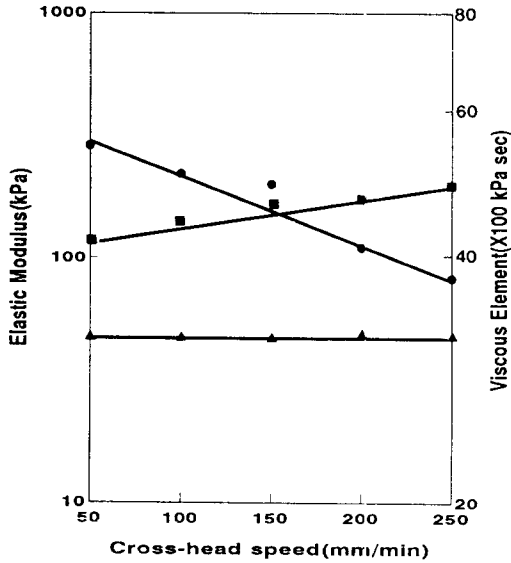


Fig. 4. Changes in rheological properties measured at various cross-head speeds at the constant strain level (0.357)

■—■; initial elastic modulus (E), ▲—▲; equilibrium elastic modulus (E_e), ●—●; viscous element (η)

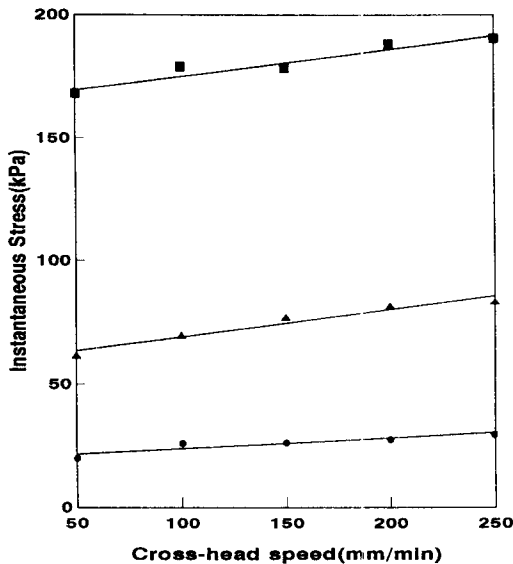


Fig. 5. Plots of the instantaneous stress with different strain levels at various cross-head speed

True strain levels; ●—●; 0.105, ▲—▲; 0.357, ■—■; 0.693

다^(20,21).

위와 같이 시료의 점탄성에 변형도와 압축속도가 미치는 영향을 측정된 결과(Fig. 2~5), 생선단백질 겔은 본 실험에 사용된 압축속도 50~250 mm/min, 정변형도

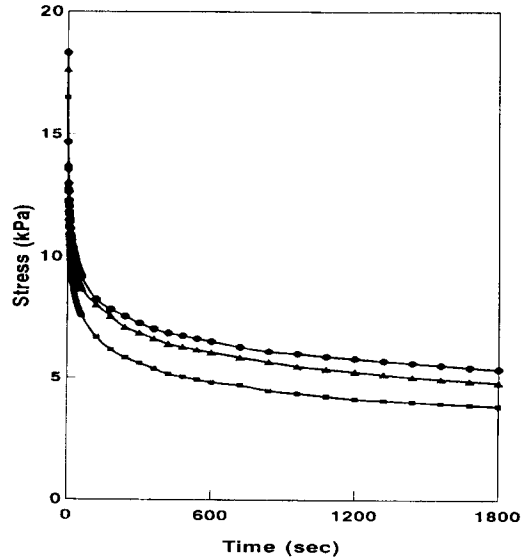


Fig. 6. Stress-relaxation curves of surimi gels made by different thermal processing; ■—■; 90°C, ▲—▲; 40°C/90°C, ●—●; 4°C/90°C

0.105~0.693의 측정 범위가 선형적 점탄성 영역으로 고려되었다. 열처리 조건에 따라 제조된 겔의 물성 측정을 선형적 점탄성 범위인 압축속도 150 mm/min, 정변형도 0.105에서 행하였으며, 이 조건하에서 행한 응력완화곡선의 분석은 축차잔차법과 3요소 Maxwell모형을 사용하였다.

열처리 조건의 변화에 의한 물성변화의 측정

40°C와 4°C의 setting 처리에 의해 형성된 겔의 응력완화곡선은 Fig. 6과 같다. 90°C에서 가열하여 만든 겔은 응력의 변화가 16.5 kPa에서 4 kPa로, 40°C에서 고온 setting한 겔은 17.6 kPa에서 4.8 kPa로, 4°C에서 저온 setting한 겔은 18.3 kPa에서 5.4 kPa로 응력이 변화하였다. 또한 90°C에서 가열하여 제조한 경우보다 setting에 의해 형성된 겔의 초기순간응력, 평형응력 및 시간 경과중의 응력 등 모든 응력이 높게 나타났다.

겔의 응력완화곡선을 Fig. 1과 같은 3요소 Maxwell모형을 식 (3)~(6)을 이용하여 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. 40°C, 4°C에서 setting한 겔의 탄성율(E)은 각각 128.3 kPa, 129.5 kPa로 90°C에서 가열한 경우(126.6 kPa)보다 높았다. 그러나, 응력완화시간은 setting한 겔이 90°C에 열처리한 경우보다 낮은 값을 보였으며, 식 (3)에 의해 구해진 점성율은 탄성율의 증가와는 반대로 90°C, 40°C, 4°C의 순으로 감소하였다. 이러한 응력의 증가의 원인을 40°C 근처에서 전처리시 단백질의 일부가 열변성이 일어나고, 변성된 단백질 분자들의 결합이 증가하게 되며, 4°C의 경우는 열에 의한 변성이 아닌 저온변성에 의해 겔의 강도가 증가하게 되는 겔 조직의

Table 1. Comparison of 3-element Maxwell model constants derived from stress-relaxation data of Surimi gels preheated with setting⁽¹⁾

Constants	90°C	40°C /90°C	4°C /90°C
Initial Stress(σ_0) ^a	16.5	17.6	18.3
Equilibrium Stress(σ_e)	3.8	4.8	5.4
Elastic Modulus(E) ^b	126.6	128.3	129.5
Equilibrium Elastic Modulus(E_e)	38.4	48.1	53.9
Viscous Element(η) ^c	3.49	3.46	3.44
Relaxation Time(τ) ^d	27.6	27	26.6

⁽¹⁾Each value is the mean of the triplicate measurement.
⁽²⁾Unit of a: kPa, b: kPa, c: $\times 10^3$ kPa·sec, d: sec

Table 2. Rheological constants in successive residual equation derived from stress-relaxation data of Surimi gels preheated with setting⁽¹⁾

Constants	90°C	40°C /90°C	4°C /90°C
σ_1 ^a	4.7	6.0	6.5
σ_2	2.6	2.5	2.4
σ_3	1.9	2.2	2.0
σ_4	7.3	7.1	7.4
τ_1 ^b	8450	8490	9570
τ_2	310	380	330
τ_3	59	48	55
τ_4	7	9	8
E_1 ^c	47.5	59.5	65.0
E_2	26.0	25.0	24.0
E_3	19.0	21.5	20.0
E_4	72.5	70.5	74.4
η_1 ^d	401.5	504.9	622.3
η_2	8.0	9.5	8.0
η_3	1.1	1.0	1.1
η_4	0.5	0.6	0.6

⁽¹⁾Each value is the mean of the triplicate measurement.
⁽²⁾Unit of a: kPa, b: sec, c: kPa, d: $\times 10^3$ kPa·sec

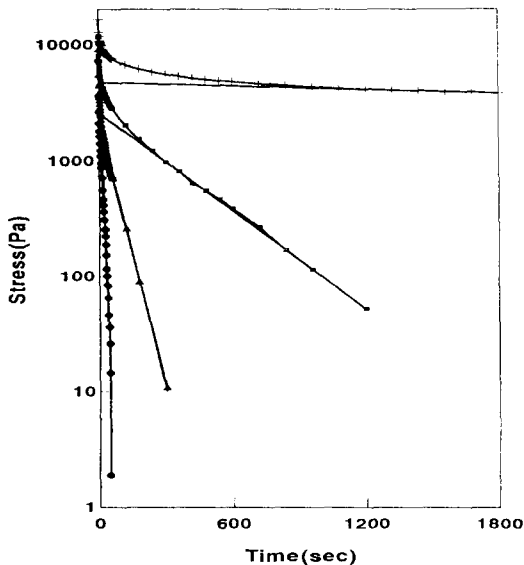


Fig. 7. Analysis of stress-relaxation curve of surimi gel heated at 90°C by the successive residual method: +; Original curve, ■-■; First residual curve, ▲-▲; Second residual curve, ●-●; Third residual curve

강화효과가 발생한다고 하였다⁽¹³⁾. 또한 90°C에서 직접 가열제조한 겔은 수분이 갇혀있는 작은 공동(pore)을 가진 조밀한 망상구조를 형성한다고 하였으며, 40°C에서 setting한 겔은 더욱 세밀하게 상호연결된 단백질 망상구조를 형성하며, 증가된 단백질의 망상구조의 밀도에 의해 겔 강도와 변형성 등이 증가한다고 하였다⁽²²⁾. 이는 40°C와 4°C의 setting 기작이 다르지만 겔을 형성하는 구조에 있어서, 90°C에서 가열하는 경우보다 큰 집성물이 있으며, 공동(cavity)이 거의 보이지 않았으며, 이러한 집성물의 증가와 공동의 감소가 겔강도의 증가를 일으킨다는 박 등⁽¹³⁾의 결과와 상응한다고 할 수 있다. 90°C에서 직접 가열 제조한 겔은 생선 근육 단백질의 섬유조직이 불완전하게 풀려진 상태에서 겔 조직이 형성되나, 40°C와 4°C의 setting 처리시에 근육 단백질의 섬유조

직이 매우 세밀하고 규칙적으로 풀려진 상태가 된 후, 90°C에서의 분가열 시에 단백질 망상구조가 형성되어 Table 1에서와 같이 응력과 탄성성분의 증가가 발생한다고 하였다⁽²³⁾. Torley 등⁽²⁴⁾과 Chan 등⁽²⁵⁾은 이러한 4°C에서 setting한 surimi 겔의 물성적 특성에 영향을 미치는 인자로서 myosin이 중요한 역할을 한다고 하였으며, Sano 등⁽²⁶⁾은 myosin 또는 paramyosin이 setting 중에 변성을 일으켜서 aggregation되고, 이 aggregation된 것을 90°C에서 가열하면 탄성과 강도가 증가된 겔이 형성되며, 특히 paramyosin의 농도가 높을수록 더욱 큰 영향을 준다고 보고하였다.

응력완화 현상을 분석하는 또다른 방법으로서 Fig. 7과 같이 축차잔차법을 이용하여 식 (2)로 분석한 결과는 Table 2와 같다. 열처리 조건이 변화되어도 surimi겔은 탄성율과 점성성분으로 이루어진 8요소 Maxwell모형으로 설명되어졌으며, 열처리 조건에 따라 탄성율과 점성성분이 동시에 증가하였고, 4°C에서 열처리한 겔의 탄성율(E_e)과 점성성분(η)이 65.0 kPa, 622.3×10^3 kPa·sec로 다른 열처리 조건에 의해 제조된 겔보다 높게 나타났다. 그러나 축차잔차법으로 분석한 결과와는 차이가 있음이 나타났다. 3요소 모형에서는 90°C보다 40°C와 4°C에서 열처리한 경우가 탄성율은 증가하고 점성성분은 감소하는 경향을 나타내었으나, 축차잔차법에 의해 분석된 결과는 탄성율과 점성성분이 동시에 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시료의 성질, 변형도, 압축속도등과 같은 측정 조건, 응력완화곡선의 유형 등에 의한 것이라 고려된다. 축차잔차법에 의해서 구해진 상수의 비교로서는 탄성이나 점성성분등과 같은 시료의 물성을 정확히 추정하기가 어

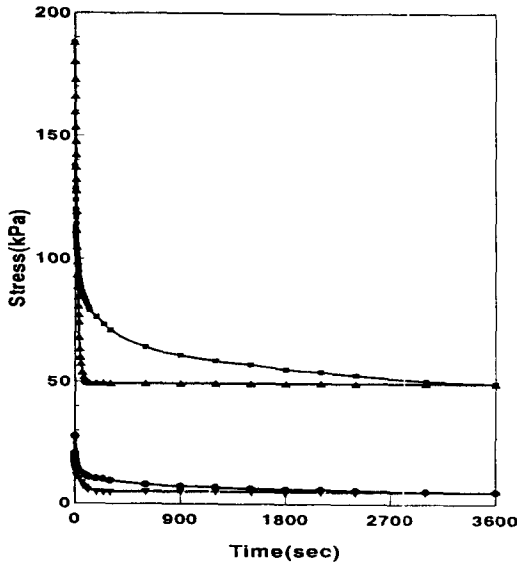


Fig. 8. Comparison of the original and the predicted stress-relaxation curve by the 3-element Maxwell model at true strain 0.103 and 0.693

Real curve: ■—■; 0.693, ●—●; 0.103; Predicted curve: ▲—▲; 0.693, 0.103

려졌지만 분석된 모형에 의한 응력완화곡선과 실제 응력곡선과의 상관계수는 $r=0.976$ 으로 매우 높게 나타났다. 그러나 3요소 Maxwell모형에 의한 응력완화곡선의 분석은 탄성과 점성성분을 비교적 정확히 분석할 수 있었으나, 실제 곡선과 모형에 의한 예상 곡선간의 상관계수는 $r=0.917$ 로 축차잔차법에 의해 구한 결과보다 낮은 것으로 나타났다.

이러한 곡선의 낮은 상호관계는 변형도를 조절함으로써 더욱 그 관계를 증가시킬 수 있었다(Fig. 8). 즉 정변형도를 0.693에서 0.105으로 낮추었을 때 그 상관관계가 양의 선형관계를 나타내며 증가함을 볼 수 있었다. 따라서 응력완화현상을 분석하는 방법에 있어서 3요소 Maxwell 모형이 축차잔차법보다 상대적으로 낮은 정확도를 나타낸다고 하여도, 수학적으로 단순하고, 겔 내부구조의 성질을 나타내기엔 충분하며, 모형의 상관도도 변형도를 조절함으로써 더욱 상승시킬 수 있으므로 식품의 물성을 추정하는 방법으로서 적합하다고 여겨진다.

요 약

응력완화 현상을 측정하여 생선단백질 겔의 선형적 점탄성과 열처리 공정에 따른 물성의 변화를 수식적 모델로 분석하였다. 생선단백질 겔은 정변형도 0.105~0.693, 압축속도 50~250 mm/min의 범위에서 선형적 점탄성을 나타내었으며, generalized Maxwell 모형에 의해 분석한 결과, 압축변형도와 압축속도가 증가함에

따라 가열에 의해 형성된 내부조직 중 탄성 성분의 증가와 점성성분의 감소현상을 보였다. 4℃와 40℃에서 전처리하여 90℃에서 제조한 겔은 전처리 없이 90℃에서 직접 열처리한 겔보다 탄성율(E) 및 평형탄성율(E_e)이 높았으나, 점성성분(η)은 적용된 모델에 따라서 그 값의 차이가 나타났다. 따라서 식품의 물성을 측정하는데 있어서 두 수학적 모델의 접근방법 및 정확도에 대하여 설명하였다.

감사의 글

본 연구는 1993년도 경희대학교 연구강의 지원비에 의하여 수행된 것으로서 이에 감사드립니다.

Nomenclature

- $\sigma(t)$: the decaying stress as a function of time (Pa)
 σ_0 : the initial stress (Pa)
 σ_e : the equilibrium stress (Pa)
 σ_i, τ_i : the constants, characteristics of the material derived from a Maxwellian model
 η : the viscous element (Pa·sec)
 ϵ_{AP} : the apparent strain, the deformation length (Δh)/the initial length(h_0)
 ϵ_{TR} : the true strain $-\log_e(1 - \epsilon_{AP})$
 E : the elastic axial compression modulus (Pa)
 E_e : the equilibrium elastic axial compression modulus (Pa)
 τ : the relaxation time (sec) η/E

문 헌

- Lee, C.M.: Surimi process technology. *Food Tech. Nov.*, 69(1984)
- Lee, C.M.: Surimi manufacturing and fabrication of surimi-based products. *Food Tech. March*, 115(1986)
- Hamann, D.D. and MacDonald, G.A.: Rheology and texture properties of surimi and surimi-based foods. In *Surimi Technology*, Lanier, T.C. and Lee, C.M.(ed), Marcel Dekker, New York, 429(1992)
- Lanier, T.C.: Functional properties of surimi. *Food Tech. March*, 107(1986)
- Mohsenin, N.N.: *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Sci. Pub., New York, 165(1986)
- Bikbov, T.M., Grinberg, V.Y., Schmandke, H. and Chaika, T.S.: A study on gelation of soybean solutions. *Colloid and Polymer Sci.*, 259, 536(1981)
- Grinberg, N.V., Bikbov, T.M., Grinberg, V.Y. and Tolstoguzov, V.B.: Thermotropic gelation of ovalbumin. *Colloid and Polymer Sci.*, 266, 52(1988)
- Katsuta, K., Rector, D.J. and Kinsella, J.E.: Viscoelastic properties of whey protein gels-Mechanical model and

- effects of protein concentration on creep. *J. Food Sci.*, **55**, 516(1990)
9. 홍석인, 김영숙, 최동원, 변유량 : 쌀전분젤의 creep특성. 한국식품과학회지, **24**, 165(1992)
 10. Peleg, M. and Normand, M.D.: Comparison of two methods for stress- relaxation data presentation of solid foods. *Rheol. Acta.*, **22**, 108(1983)
 11. Hamann, D.D.: Viscoelastic properties of surimi sea-food products., In *Viscoelastic Properties of Food*, Rao, M.A. and Steffe, J.F.(ed), Elsevier Sci. Pub.
 12. Ziegler, G.R. and Rizvi, S.S.H.: Determination of cross-link density in egg white gels from stress relaxation data. *J. Food Sci.*, **54**(1), 218(1989)
 13. 박성진, 김병용 : 생선단백질의 열안정성과 조직형성속도에 공정조건이 미치는 영향. 한국식품과학회지, **24**(5), 463(1992)
 14. Peleg, M.: Rheological models for solid foods., In *Food Process Engineering Vol. 1, Food Processing Systems*. Linko, P., Malkki, Y. and Olkku, J.(ed), Applied Science Publishers LTD, London, 250(1980)
 15. Peleg, M.: Operational conditions and the stress-strain relationship of solid foods-Theoretical evaluation. *J. Texture Studies*, **8**, 283(1977)
 16. Peleg, M.: Application of nonlinear phenomenological rheological models to solid food materials. *J. Texture Studies*, **15**, 1(1984)
 17. 변유량, 유주현, 전인선 : 양갱의 물성에 관한 연구. 한국식품과학회지, **10**(3), 344(1978)
 18. Weinberg, Z.G. and Angel, S.: Behavior of a formed fish product under the stress-relaxation test. *J. Food Sci.*, **50**, 589(1985)
 19. Hamann, D.D., Purkayasta, S. and Lanier, T.C.: Applications of thermal scanning rheology to the study of food gels. In *Thermal analysis of foods*, Harwalkar, V.R. and Ma, C.-Y.(ed.), Elsevier Science Publishers LTD., New York, 306(1990)
 20. Masi, P.: Characterization of history-dependent stress-relaxation behaviour of cheeses. *J. Texture Studies*, **19**, 373(1989)
 21. Sato, Y. and Nakayama, T.: Discussion of the binding quality of minced meats based on their rheological properties before and after heating. *J. Texture Studies*, **1**, 309(1970)
 22. Montejano, J.M., Hamann, D.D. and Lanier, T.C.: Thermally induced gelation of selected comminuted muscle systems-Rheological changes during processing, final strengths and microstructure. *J. Food Sci.*, **49**, 1496(1984)
 23. Niwa, E.: Chemistry of surimi gelation, In *Surimi Technology*, Lanier, T.C. and Lee, C.M.(ed), Marcel Dekker, New York, 389(1992)
 24. Torley, P.J., Ingram, J., Young, O.A. and Meyer-Rochow, V.B.: Salt-induced, low-temperature setting of Antarctic fish muscle proteins. *J. Food Sci.*, **56**(1), 251(1991)
 25. Chan, J.K., Gill, T.A. and Paulson, A.T.: Cross-linking of myosin heavy chains from Cod, Herring, and Siver Hake during thermal Setting. *J. Food Sci.*, **57**(4), 906(1992)
 26. Sano, T., Noguchi, S.F., Tsuchiya, T. and Matsumoto, J.J.: Effect of two-step heating on gel properties of a paramyosin-myosin system. *J. Food Sci.*, **54**(2), 481(1989)

(1993년 9월 6일 접수)