

## 합성조건에 따른 Polyacrylamide 수화 겔의 흐름변성 성질

김 남 정\*  
삼육대학교 화학과  
(2006. 9. 21 접수)

### Thixotropic Properties of Polyacrylamide Hydrogels with Various Synthetic Conditions

Nam Jeong Kim\*

Department of Chemistry, Sahmyook University, Seoul 139-742, Korea  
(Received September 21, 2006)

**요 약.** Polyacrylamide 수화 겔의 유변성질에 있어서 합성 조건과 수화 물 양의 영향이 연구되었다. cone-plate 레오메타를 사용하여 polyacrylamide 수화 겔의 비 뉴턴 유동 곡선을 얻었다. 이렇게 얻은 유동곡선에 유동에 대한 비뉴턴식을 적용하여 유변 파라메타를 계산하여 얻었다. polyacrylamide 수화 겔은 전단속도가 증가함에 따라 구조가 약해지는 흐름변성 현상을 나타낸다. 이들 유동성질은 유동단위의 특성과 유동 분절사이의 상호 관계에 의해서 나타나는 물질적인 성질이다.

**주제어:** 유변성질, 비 뉴턴 유동식, 흐름변성, Polyacrylamide 수화 겔

**ABSTRACT.** Influences of synthetic conditions and water content on rheological properties of polyacrylamide hydrogels were studied. The non-Newtonian flow curves of polyacrylamide hydrogels were obtained by using a cone-plate rheometer. The rheological parameters were obtained by applying non-Newtonian equation to the flow curves for polyacrylamide hydrogels. The polyacrylamide hydrogels are shear thinning under increasing shear rate modes which result in thixotropic behavior. These flow properties are controlled by the characteristics of flow units and the interaction among the flow segments.

**Keywords:** Rheological Properties, Non-newtonian Flow Equation, Thixotropy, Polyacrylamide Hydrogels

### 서 론

고분자 수화 겔은 수용액속에서 상당량의 수분을 흡수하여 팽윤되면서도 3차원 그물 구조를 그대로 유지하여 고분자 집합체의 형태를 그대로 유지할 수 있다. 그물구조를 갖는 고분자 수화 겔은 온도, 용매, pH 등의 환경 변화에 따라 팽윤으로 부피가 크게 증가하는 특성으로 여러 분야에서 활발한 연구가 수행되어 왔다. Omari 등<sup>1</sup>은 polyacrylamide 수화 마이크로 겔의 크기와 구조적인 특성을 광학적, 유변학적인 방법으로 연구하여 마이크로 겔의 유체역학적인 반경을

광산란법에 의해서 측정하고 고유전단점도로부터 추론하였다. Li 등<sup>2</sup>은 여러 acrylamide 공중합체에 몇 가지 계면활성제들을 부가하였을 때 점도의 변화를 유변학적인 측면에서 고찰하였다. Grattoni 등<sup>3</sup>은 그물망 polyacrylamide 수화 겔의 동역학적인 유변 특성과 투과성을 분석하였다. 제어 약품전달 체제에 마이크로 겔이 매우 유용하게 사용되며 에멀전 중합시 그물구조의 농도비를 조절함으로써 약품입자의 확산속도를 제어할 수 있다.<sup>4,6</sup> Tanaka는<sup>7,9</sup> polyacrylamide 등 여러 종류의 수화 겔의 주위 환경 변화에 따른 상변화 현상을 연구하였다. 고분자 수화 겔의 생의학적인 적용

을 결정하는데 있어서 역학적인 성질과 유변학적인 성질이 근래에 많이 연구되었다.<sup>10,12</sup> Komarskii 등<sup>13</sup> 은 polyacrylamide 수화 겔의 유변학적인 특성을 고분자의 3차원 구조를 결정하는 단량체 비와 그물구조 밀도의 함수로서 연구하였다.

이와 같이 고분자 물질의 유변학적인 성질은 합성 조건을 제시하고 그물구조 밀도 조절 등의 고분자 물질의 구조 연구에 매우 중요한 특성이다. 고분자 물질의 비 뉴턴 유동 특성은 dilatancy나 thixotropy로 구별할 수 있는데 dilatancy나 thixotropy 모두 시간인자에 영향을 받는 특징을 갖고 있다.<sup>14</sup> Ree-Eyring 이론에 근거하여 Bang 등<sup>15</sup> 은 dilatant 유동 방정식을 유도하여 제시하였고, 그것을 전분-물 서스펜션 계에 적용하였으며 shear에 따라 dilatancy로부터 thixotropy로의 유동 전환이 일어나는 것을 연구, 조사하여 실험적 결과와 이론적인 해석을 고찰하였다. 일반적으로 비 뉴턴 유동현상은 shear rate가 증가함에 따라 유동단위들의 구조가 형성되며 점도가 증가되는 dilatancy 현상과 구조가 깨져 점도가 감소하는 thixotropy현상으로 나눌 수 있는데, 콜로이드계의 유동단위들이 두 현상을 복합적으로 나타낸다. 이들 두 현상이 shear rate 증가에 따라 thixotropy로 반전되는 물질이 있으며 최근에 이러한 현상들을 이론적으로 규명한 바 있다. thixotropy현상<sup>16,17</sup> 은 페인트, 화장품, 잉크, 플라스틱 및 마요네즈 등에서 나타나는 시간 의존성 shear thinning현상이다. thixotropy현상에 대한 연구는 처음에는 비탄성 유동계에서 시작하였지만 지금은 고분자 용액과 같은 점탄성 유동계 뿐 아니라 점탄성 고체의 변형과 연관되어 연구가 발전되어 가고 있다.

본 연구에서는 절대반응속도의 활성화 이론을 불균일한 유동계에 적용시킨 일반화 된 점도식으로부터 thixotropy물질에 대한 유동 메커니즘을 제안하여 thixotropy 이론식을 유도하고 이 식을 여러 조건에서 합성한 수화 겔의 유동 현상에 적용하여 물성을 연구하였다. 가교 단량체의 양과 개사제의 양을 조절하여 여러 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 유변학적인 특성을 비 뉴턴 유동 방정식에 적용하여 연구하였다. 전단 속도가 증가함에 따라 thixotropy현상이 나타내는 것을 thixotropy 유동 방정식을 이용하여 유변학적인 parameter를 구하였고 이러한 유변학적인 parameter로부터 합성 조건에 따른 고분자물질의 점탄성 성질과 3차원 구조의 성질을 규명하였다. thixotropy

이론적인 유동 곡선은 유변학적인 parameter를 다시 thixotropy 유동 방정식에 대입함으로써 얻는다.

## 이 론

### 비 뉴턴 유동 방정식

Eyring의 방정식에 따르면 전단 속도는

$$\dot{S} = \left( \frac{\lambda}{\lambda_1} \right) 2k_i / \sinh(\alpha_i f_i) \quad (1)$$

이다. 여기서,  $k_i$ 는 flow unit중의  $i$ 번째 group에 속하는 한 개의 unit의 flow process에 대한 속도 상수이고,  $\alpha_i = (\lambda_2 \lambda_3) / 2 kT$ 이다. 또한,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  및  $\lambda$ 는 비슷한 분자 parameter이며, parameter와 삼입구 밖의 첨자  $i$ 는 그 값들이  $i$ 번째 group의 flow unit에 속함을 의미하는 것이다.

$i$ 번째 group에 속한 flow unit에 작용하는 힘은  $X_i f_i$ 이며, 따라서 전체 응력  $f$ 는

$$f = \sum_{i=1}^N X_i f_i \quad (2)$$

으로 나타내어지는데, 여기서  $X_i$ 는  $i$ 번째 group의 mole fraction이 된다. 이때, 식 (2)에 대해 식 (1)으로부터 정리한  $f_i$ 를 대입하면, 다음의 식이 얻어진다.

$$f = \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i}{\alpha_i} \right) \sinh^{-1}(\beta_i \dot{S}) \quad (3)$$

여기서,  $\beta = 1 / \{ (\lambda / \lambda_1) 2k_i \}$ 이 되는데, 그것은  $N$ 번째 group의 완화 시간을 의미하는 것이다.

### 뉴턴 유동 단위

식 (3)을 다시 써보면 다음과 같다.

$$f = \sum_{i=1}^N \frac{X_i \beta_i \dot{S} \sinh^{-1}(\beta_i \dot{S})}{\alpha_i \beta_i \dot{S}} \quad (4)$$

식 (4) 중 함수  $(\sinh^{-1} X) / X$ 는 다음과 같은 성질이 있다.

$$\lim_{\beta_i \dot{S} \rightarrow 0} \frac{\sinh^{-1}(\beta_i \dot{S})}{\beta_i \dot{S}} = 1 \quad (5)$$

이 특성으로 인하여  $\beta_i \dot{S} \ll 1$ 인 조건에 대한 flow unit 1은 Newtonian flow unit로서 역할을 한다. 때문에 Newtonian flow unit의 응력  $f_1$ 은

$$f = \left( \frac{X_1 \beta_1}{\alpha_1} \right) \dot{\gamma} \quad (6)$$

이다.

**변성흐름 비 뉴턴 유동단위**

전단 속도가 증가함에 따라 내부의 구조적 변화가 존재함이 가정될 수 있다. 그러한 구조적 변화가 일어난다면, shear에 의해 일(work)이 행해지는 것이다. 그 구조적 변화를 위해 필요한 일은 strain energy로서 W로 나타내지며, 그 strain energy는 다음 식으로 계산된다.

$$W = \int_0^{\dot{\gamma}} f dtS = \int_0^{\dot{\gamma}} GS dtS = G \frac{(\dot{\gamma} S)^2}{2k_f^2} = C_2 \dot{\gamma}^2 \quad (7)$$

여기서, G는 spring constant이고, S는 구조적 변화가 일어나는 molecular displacement로서,  $S = \gamma \dot{\gamma} / k_f$ 로 표현되며, 이때의  $\gamma$ 는 비례상수이다. 그런데 그때의 S에 대한 식은 전단 응력에 의해 행해진 단위 시간당 molecular 또는 granular displacement가 전단 속도에 직접적으로 비례한다는 가정으로부터 얻어진 것이다. Strain energy는 activation free energy에 대한 조건에서 disentanglement(앞으로는 D로 약칭)와 entanglement (앞으로는 E로 약칭)사이의 구조적 변화 과정에 따라 달라진다.

D→E라는 구조적 변화를 수반하는 flow process를 거치는 flow unit 2에 대해서, flow의 activation free energy는 구조 형성에 기인하는 strain energy( $C_2 \dot{\gamma}^2$ )만큼 증가하게 된다. 따라서 flow unit 2에 관한 속도상수  $k_2'$ 은

$$k_2' = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G^\ddagger + C_2 \dot{\gamma}^2}{RT}\right) = k_0 \exp\left(-\frac{C_2 \dot{\gamma}^2}{RT}\right) \quad (8)$$

으로 나타내지는데 여기서,  $k_0$ 는 constraint가 전혀 없을 때의 flow unit에 대한 속도상수이다.

그에 관해서 free energy diagram은 jumping process에 대하여 가정된 것으로서 activation energy가 constraint이 전혀 없을 때의 것에 비하여  $C_2 \dot{\gamma}^2$ 만큼 증가되었음을 보여준다.

그러므로 완화 시간  $\beta_2$ 는

$$\beta_2 = (\beta_2)_0 \exp\left(\frac{C_2 \dot{\gamma}^2}{RT}\right) \quad (9)$$

가 되고 여기서,

$$(\beta_2)_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda} \right) \frac{1}{2k_0} = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda} \right) \frac{h}{2kT} \exp\left(\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}\right) \quad (10)$$

이다. flow unit 2에 대해서 식 (3)을 다시 써보면, D→E와 같은 구조적 변화에 관한 전단 응력  $f_2$ 는 다음과 같이 나타내진다. 이 식을 thixotropy이론식으로 유동곡선에 적용하였다.

$$f_2 = \frac{X_2}{\alpha_2} \sinh^{-1} \left[ (\beta_2)_0 \dot{\gamma} \exp\left(\frac{C_2 \dot{\gamma}^2}{RT}\right) \right] \quad (11)$$

**실 험**

**시료 및 polyacrylamide 합성**

본 실험에서의 합성은 단량체로 acrylamide(YACURI사, CH<sub>2</sub>CHCONH<sub>2</sub>, 98%), N,N'-methylenebis-acrylamide(ACROS ORGANICS사, C<sub>7</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 96%)와 개시제로 benzoyl peroxide(FLUKA사, C<sub>14</sub>H<sub>16</sub>O<sub>4</sub>, mp 103~105 °C, 97%)시약을 사용하였다. 각각의 시약은 fourneck flask(250 ml)에 물과 함께 넣는다. 수분 이탈을 막기 위해 바세린을 바르고 parafilm 'M'을 이용하여 감싸 주었다. four neck 중 하나는 온도계 장착, 또 하나는 PROMIX PR-600(SIBATA사)를 장착, 또 다른 하나는 컨덴서를 장착하고 나머지는 봉한 후 맨틀로 가열하며 합성하였다.

합성 실험에서 여러 조건에서 합성된 polyacrylamide 수화 겔 물질을 프로그래밍된 viscometer(BOHLIN VISCO 88BV)를 이용하여 점탄성을 측정하였으며 소프트웨어로는 BOHLIN Reology AB(version 3.0)를 사용하였다. spindle은 speed switch 8, measuring system 1로 지정하여 사용하였다. 온도 조절을 위한 항온조는 BROOKFIELD사의 TC-500을 사용하였다.

**유동곡선 실험**

본 실험의 과정은 크게 합성과정, 점탄성 측정과정, 파라미터를 구하는 과정, 그리고 파라미터를 분석하는 과정으로 나눌 수 있다. 먼저 합성과정은 heating mantle을 장착한 250 four neck flask에 증류수 100 ml와 acrylamide 10 g, N,N'-methylenebisacrylamide 0.6% (acrylamide에 대한 wt%), benzoyl peroxide 0.01~1% (acrylamide에 대한 wt%)를 변화시켜가며 넣고 heating mantle을 100 °C 이상으로 가열함과 동시에 PROMIX

PR-600을 350 rpm으로 지정하여 합성하여 여러 종류의 polyacrylamide 수화 겔 시료를 제조한다. polyacrylamide는 여러 가지 합성조건에 따라 합성 되었으며, 여러 농도의 수화 겔로 만들어졌다. 즉 농도, 온도, benzoyl peroxide의 양, 그리고 N,N'-methylenebisacrylamide의 양에 따라 여러 물질로 합성하였다. 특히 농도의 조건은 polyacrylamide를 합성 후 methanol로 씻어주어 불순물들을 제거한 후 물질을 건조시키 말리고 0.1 g의 시료를 물의 양을 달리하여 농도를 조절하였다. benzoyl peroxide의 양과 N,N'-methylenebisacrylamide의 양을 조절하여 합성된 polyacrylamide 수화 겔을 합성조건, 온도, 농도에 따른 유동곡선을 얻었다. 합성 물질의 점탄성을 측정하기 위하여 BOHILIN Rheology AB(version 3.0) 소프트웨어와 연결된 BOHILIN VISCO 88BV viscometer의 컵에 10 ml 이하를 넣고 작동시켜 여러 종류의 시료의 진단 속도에 대한 진단응력 유동곡선을 얻었다.

## 결과 및 고찰

### Thixotropy 진단응력 곡선

BOHILIN VISCO 88BV rheometer로부터 얻은 유동곡선은 일정한 변형률로 진단 속도가 증가함에 따라 진단 응력 값이 변하는 정도를 보여주는 up-curve와 진단 속도가 감소함에 따라 진단 응력값이 변하는 정도를 보여주는 down-curve로 나타날 수 있으나 이론적인 식에 적용한 up-curve만을 나타내었다. 각 시료에 대한 여러 번의 유동 곡선을 얻었으며, 유동의 안정성이 가장 크면서 변성이 적게 일어난 두 번째 유동 곡선만을 그림에 나타냈다.

Fig. 1에 보인 것과 같이 여러 농도의 benzoyl peroxide initiators와 0.5% bisacrylamide 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 유동곡선은 thixotropy현상을 보이며 두 번째의 유동곡선은 에너지 감소 현상으로 진단응력이 감소되는 것으로 나타났다. bpo 농도가 0.3%일 때 가장 큰 진단응력을 갖게 되며 농도에 따른 진단속도에 대한 진단응력의 역전 현상이 일어나는 것은 선형고분자와 network고분자 간의 합성속도 비에 개시제가 크게 관여하는 것으로 사료된다. 여러 번의 합성조건에서 이러한 유동 경향을 보이고 있다. 반면 Fig. 2는 여러 농도의 benzoyl peroxide initiators와 0.6% bisacrylamide 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 유동곡선

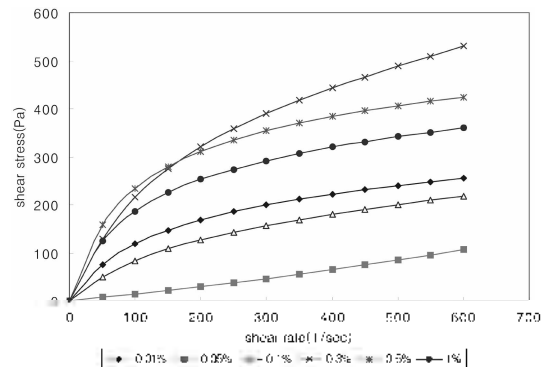


Fig. 1. The second flow curves of polyacrylamide hydrogel for the various concentration of benzoyl peroxide initiators and 0.5% bisacrylamide at 25 °C.

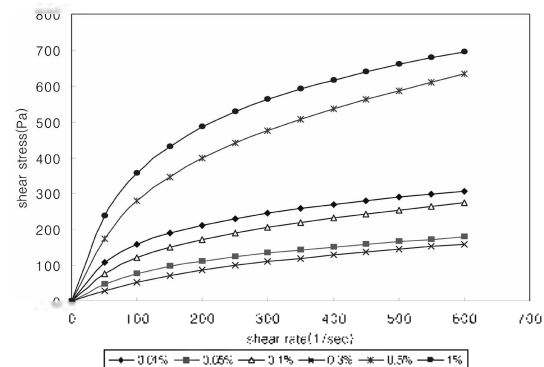


Fig. 2. The second flow curves of polyacrylamide hydrogel for the various concentration of benzoyl peroxide initiators and 0.6% bisacrylamide at 25 °C.

으로 1%의 bpo 농도에서 가장 큰 진단응력을 보이며 0.3% bpo에서는 낮은 진단응력을 보이고 있다. Fig. 3은 여러 농도의 benzoyl peroxide initiators와 0.7% bisacrylamide 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 유동곡선으로 같은 thixotropy현상을 보인 것으로 또다시 0.3%의 bpo농도 조건에서 가장 큰 thixotropy 진단응력을 나타내고 다른 농도에서 약간의 dilatancy 진단응력을 보이는 것은 매우 특이한 현상이다. 이것은 polyacrylamide 그물구조 합성에 bpo 개시제의 농도와 bisacrylamide 농도와의 매우 밀접한 상관관계가 있는 것으로 생각되어 지며, 그물구조를 형성하는 반응 속도론적인 측면에서 개시제의 농도가 증가한다고 해서 그물구조가 많이 형성되어 진단응력이 커지는 것이 아니라는 사실을 알게 되었고 여러 가지의

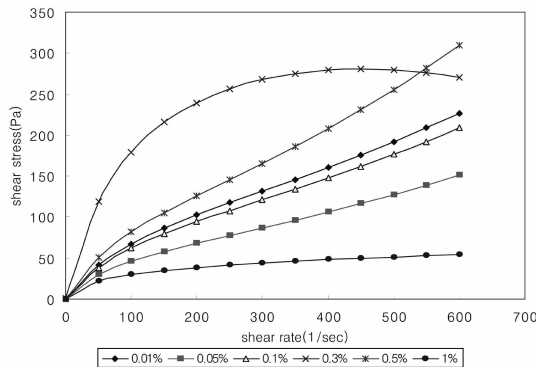


Fig. 3. The second flow curves of polyacrylamide hydrogel for the various concentration of benzoyl peroxide initiators and 0.7% bisacrylamide at 25°C.

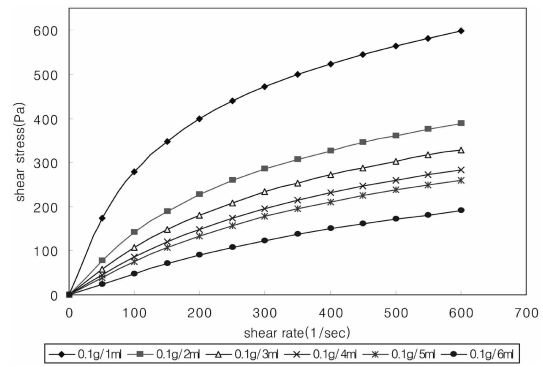


Fig. 5. The flow curves for the various concentration of polyacrylamide hydrogel for the 0.3% benzoyl peroxide initiators and 0.5% bisacrylamide at 25°C.

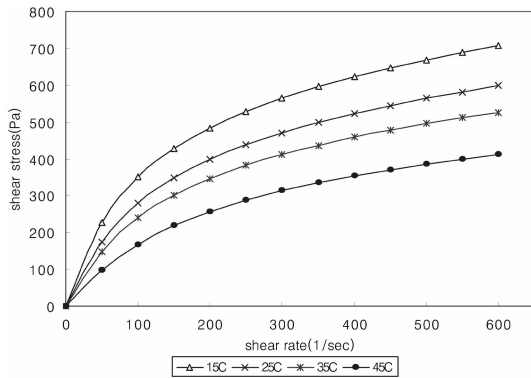


Fig. 4. The flow curves of polyacrylamide hydrogel for the 0.3% benzoyl peroxide initiators and 0.5% bisacrylamide at various temperatures.

침탄성 수화 겔을 합성하는데 bisacrylamide와 bpo의 농도를 식별하게 조절할 수 있었다. Fig. 4는 0.3%

benzoyl peroxide initiators와 0.5% bisacrylamide 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 여러 온도에 따른 유동곡선을 나타내며, 온도가 커질수록 진단용력이 낮아지어 유동현상이 커지는 것을 알 수 있었다. Fig. 5는 0.3% benzoyl peroxide initiators와 0.5% bisacrylamide 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 여러 농도에 따른 유동곡선을 나타낸 것으로 농도가 커질수록 침탄성이 커지는 일반 유동현상을 나타내고 있다.

각 유동현상에 대한 상관관계는 Table 1-2에 나타내었으며, 이 유동 파라미터로부터 각 합성 조건에서의 유동현상을 고찰할 수 있다. up-curve에 대한 값만을 취하여 고찰하여 실험에 의해 얻은 값에 근거하여 유동 파라미터 값을 구한 후, Ree-Eyring 유동방정식에 대입함으로써 이론적인 유동곡선을 구하였다. 같은 실험 재료에 여러 차례에 걸쳐 진단 속도를 증가

Table 1. The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor  $C_2$  and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for the first flow curves of the various polyacrylamide hydrogels at 25°C

bis (%)	Parameters	Variation of benzoyl peroxide(%)					
		0.01%	0.05%	0.1%	0.3%	0.5%	1%
0.5%	$(\beta_2)_0 \times 10^2$	3.652	0.388	1.75	2.25	2.75	2.27
	$C_2 \times 10^5$	0.117	2.883	0.755	0.035	0.275	0.375
	$X_2/\alpha_2$	51.84	35.75	45.23	180.40	132.52	145.46
0.6%	$(\beta_2)_0 \times 10^2$	4.262	2.245	1.940	1.042	5.46	5.45
	$C_2 \times 10^5$	0.104	2.442	0.646	0.342	-1.375	-4.17
	$X_2/\alpha_2$	58.8	47.6	48.3	25.3	223.6	247.5
0.7%	$(\beta_2)_0 \times 10^2$	2.424	2.046	2.420	9.620	3.542	2.783
	$C_2 \times 10^5$	3.450	4.582	5.424	-0.268	0.436	1.642
	$X_2/\alpha_2$	48.46	29.46	35.24	128.42	104.2	88.42

$(\beta_2)_0$  : sec,  $C_2$  : cal·sec<sup>2</sup>/mol,  $X_2/\alpha_2$  : N/m<sup>2</sup>

Table 2. The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor  $C_2$  and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for the second flow curves of the various polyacrylamide hydrogels at 25 °C

bis (%)	Parameters	Variation of benzoyl peroxidizer(%)					
		0.01%	0.05%	0.1%	0.3%	0.5%	1%
0.5%	$(\beta_2)_0 \cdot 10^2$	2.436	0.247	1.64	1.79	3.75	3.38
	$C_2 \cdot 10^3$	0.128	1.246	0.543	0.433	0.205	0.341
	$X_2/\alpha_2$	74.44	56.93	65.81	159.48	115.22	96.89
0.6%	$(\beta_2)_0 \cdot 10^2$	3.684	2.036	2.452	1.123	2.365	7.282
	$C_2 \cdot 10^3$	0.205	0.342	0.488	0.426	0.484	3.042
	$X_2/\alpha_2$	78.36	52.44	74.28	55.49	174.26	186.42
0.7%	$(\beta_2)_0 \cdot 10^2$	2.230	3.042	2.286	2.984	2.486	5.542
	$C_2 \cdot 10^3$	3.420	4.285	3.424	-1.426	5.054	2.48
	$X_2/\alpha_2$	42.24	24.25	38.40	100.32	47.54	12.35

$(\beta_2)_0$  : sec,  $C_2$  : cal·sec<sup>2</sup>/mol,  $X_2/\alpha_2$  : N/m<sup>2</sup>

사키면 횡수가 증가할수록 전단 응력이 급격히 작아지며 hysteresis loop 면적이 작아지는 것은 유동에 의하여 구조가 에너지 손실이 생겨서 유동에 대한 활성화 자유에너지를 작게 한다는 것으로 고찰할 수 있으며 결과로 보아 높은 온도에서 더 큰 에너지 감소를 나타내는 것을 알 수 있다.

#### 유변 파라메타

Table 1-2에는 두 번의 thixotropic 유동곡선에 이론적인 thixotropy 유동식을 적용시켜 유동 파라메타  $(\beta_2)_0$ , C 그리고  $X_2/\alpha_2$ 의 값을 수치로 나타냈다. C는 structure factor를 나타내고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 값은 유동에 크게 영향을 미치는 점성 파라메타이다.  $\alpha$ 는 고분자 내부 구조에 밀접한 관계를 갖는 구조 인자로 고려할 수 있으며 이 값으로부터 유동의 절대적인 factor인 hole volume  $V_h$ 를 얻을 수 있다.  $\alpha$ 가 크면 hole의 크기도 커져 molecular segment의 유동이 잘 일어날 것이다. 온도가 클수록 modulus 파라메타 값이 작아진다. 완화 시간  $\beta$ 는 유동현상이 클수록 작아지며 이 값으로 유동현상을 정량적으로 고찰할 수 있다. 두 번째 유동곡선에서 완화 시간  $\beta$ 값이 작아지는 것을 두 Table

Table 3. The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor  $C_2$  and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for the flow curves of the various temperatures of polyacrylamide hydrogels for the 0.3% benzoyl peroxide initiators and 0.5% bisacrylamide

Parameters	Variation of temperatures			
	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
$(\beta_2)_0 \cdot 10^2$	2.84	2.25	2.07	1.45
$C_2 \cdot 10^3$	0.054	0.035	0.024	0.020
$X_2/\alpha_2$	198.24	180.40	162.84	143.65

$(\beta_2)_0$  : sec,  $C_2$  : cal·sec<sup>2</sup>/mol,  $X_2/\alpha_2$  : N/m<sup>2</sup>

에서 비교하여 알 수 있다. 0.5% bisacrylamide 와 0.05% bpo 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 완화 시간  $\beta$ 값이 가장 작아서 유동이 가장 큰 것으로 나타났다. 0.6% bisacrylamide 와 0.5%와 1% bpo 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔과 0.7% bisacrylamide 와 0.3%bpo 조건에서 합성한 polyacrylamide 수화 겔의 structure factor C 값이 음의 값을 보이는 것으로 보아 이 조건에서는 구조 변형이 일어나 dilatancy 유동현상을 보이고 있는 것을 유동 파라메타 값으로부터 알 수 있다. 이러한 파라메타의 분석으로 볼 때 선

Table 4. The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor  $C_2$  and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for the flow curves of the various concentrations of polyacrylamide hydrogels for the 0.3% benzoyl peroxide initiators and 0.5% bisacrylamide

Parameters	Variation of concentration					
	0.1 g/1 ml	0.1 g/2 ml	0.1 g/3 ml	0.1 g/4 ml	0.1 g/5 ml	0.1 g/6 ml
$(\beta_2)_0 \cdot 10^2$	2.25	1.08	0.82	0.68	0.62	0.45
$C_2 \cdot 10^3$	0.035	0.024	0.021	0.016	0.012	0.010
$X_2/\alpha_2$	180.40	150.24	142.52	133.43	128.24	110.38

$(\beta_2)_0$  : sec,  $C_2$  : cal·sec<sup>2</sup>/mol,  $X_2/\alpha_2$  : N/m<sup>2</sup>

형 polyacrylamide와 그물구조 polyacrylamide의 합성에 있어서 개시제 bpo 농도와 bisacrylamide의 농도가 복합적인 상관관계를 가지고 있으며, 상관관계를 나타내는 유변 파라메타를 분석하여 여러 점탄성의 수화 겔을 합성하는 조건을 얻을 수 있다. 또한 온도가 커짐에 따라 완화 시간  $\beta$ 값이 작아져서 유동이 커지는 것을 Table 3에서 알 수 있으며, 농도가 작아짐에 따라 완화 시간  $\beta$ 값이 작아져서 유동이 커지는 것을 Table 4에서 알 수 있다.

인 용 문 헌

1. Omari, A.; Tabary, R.; Rousseau, D.; Calderon, F. L.; Monteil, J.; Chauveteau, G. *J. Colloid and Interface Sci.*, **2006**, *302*, 537.
2. Li, Y.; Kwak, Jan C. T. *Colloid Surf. A.*, **2003**, *225*, 169.
3. Grattoni, C. A.; Al-Sharji, H. H.; Yang, C.; Muggeridge, A. H.; Zimmerman, R. W. *J. Colloid and Interface Sci.*, **2001**, *240*, 601.
4. Omari, A.; Chauveteau, G.; Tabary, R. *Colloid Surf. A.* **2003**, *225*, 37.
5. Bikiaris, D. N.; Karayannidis, G. P. *Polym. Int.*, **2003**, *52*, 1230.
6. Ye, Q.; Zhang, Z.; Jia, H.; He, W.; Ge, X., *J. Colloid and Interface Sci.*, **2002**, *253*, 279.
7. Mafe S.; Manzanares J. A.; English A. E.; Tanaka, T. *Phys. Rev. Lett.*, **1997**, *79*, 3086.
8. Annaka, M.; Tanaka, T. *Nature*, **1992**, *355*, 430.
9. Annaka, M.; Berling, D.; Robert, J.; Tanaka, T. *Macromolecule*, **1993**, *26*, 3234.
10. Cohen, Y.; Ramon, O.; Kopelman, I. *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Physic.*, **1992**, *30*, 1055.
11. Lou, X.; Chirila, T. *J. Biomater. Appl.*, **1999**, *14*, 184.
12. Cicec, H.; Tuncel, A. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.*, **1998**, *36*, 527.
13. Samchenko, Yu. M.; Ul'berg, Z. R.; Komarskii, S. A.; et al. *Colloid Journal*. **2004**, *66*, 350.
14. Mewis, J.; Bleyser, R. de. *J. Colloid and Interface Sci.*, **1972**, *40*, 360.
15. Bang, J. H.; Kim, N. J.; Choi, S. W.; Kim, E. R.; Hahn, S. J. *Bull. Korean Chem. Soc.*, **1996**, *17*, 262.
16. Dennis Labo, *Cosmetics & Toiletries*, **1987**, *102*, 64.
17. Kuno, H.; Senna, M. *J. Colloid and Interface Sci.*, **1982**, *9*, 591.