

김(*Pyropia yezoensis*)에서 분리한 포피란 효소가수분해물의 화학적 및 유동 특성

인서경 · 구재근*

군산대학교 식품생명공학과

Chemical Composition and Rheological Properties of Enzymatic Hydrolysate of Porphyrin Isolated from *Pyropia yezoensis*

Seo-kyoung In and Jae-Geun Koo*

Department of Food Science and Biotechnology, Kunsan National University, Kunsan 573-440, Korea

The chemical and rheological properties of natural and enzymatically hydrolyzed porphyrin isolated from *Pyropia yezoensis* were investigated. The enzymatic hydrolysate was prepared by hydrolysis of porphyrin using β -agarase followed by fractionation based on molecular weight (>300 kDa (Fr-1), 100-300 kDa (Fr-2), 10-100 kDa (Fr-3) and 1-10 kDa (Fr-4) using an ultrafiltration membrane. Each hydrolysate fraction consisted mainly of galactose (42.7-57.5%), 3,6-anhydro galactose (6.5-15.1%) and ester sulfate (8.6-14.1%). The sulfate content of the enzymatically hydrolyzed fractions decreased with an increase in molecular weight, whereas the 3,6-anhydro galactose content increased significantly. The rheological behavior of porphyrin and enzymatically hydrolyzed porphyrin solutions demonstrated a pseudoplastic behavior, which agrees with the Herschel-Bulkley model. The effect of temperature on the viscosity of the porphyrins and hydrolysate fractions were measured and modeled using the Arrhenius equation. The activation energy of the porphyrins and enzymatically hydrolyzed porphyrin (Fr-1) increased from 12.30 to 20.29 kJ/mol and 9.06 to 23.84 kJ/mol, respectively with increasing concentrations from 3% to 7%. These data indicate that the extent of the apparent viscosity of porphyrin and enzymatically hydrolyzed porphyrin are influenced by both temperature and concentration.

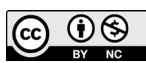
Key words: Porphyrin, Enzymatic hydrolyzed porphyrin, β -agarase, Herschel-Bulkley model, Activation energy

서론

국내에서 생산되는 해조류 중 주요 홍조류인 김(*Porphyra*)은 2011년에 약 31만 톤이 생산되었고 2013년에 약 35만 톤이 생산되어 매년 생산량이 늘어나고 있다(Korea Statistical Information service, 2013). 김에는 건물기준으로 25% 정도의 탄수화물이 함유되어 있는 데 주요 탄수화물로는 isofloridoside, floridoside 등의 유리당과 세포벽 구성 성분인 hemicellulose 그리고 세포간 충전 물질인 포피란이 있다. 이 중 포피란은 3,6-anhydro-L-galactose, D-galactose, ester sulfate, 6-O-methyl-D-galactose로 구성되어 있는 수용성 산성 다당이며(Peat et al., 1961; Su and Hassid, 1962) 건조 김의 10%

내외로 함유되어 있다. 또한 혈중 콜레스테롤 저하작용(Lee et al., 2010), 항산화 활성, 항종양 활성(Zhang et al., 2004; Yoshizawa et al., 1995; Osumi et al., 1998) 등 다양한 기능이 최근 보고되고 있어 기능성 식품 소재로서의 활용 가능성이 매우 높다. 그러나 포피란은 분자량이 매우 큰 고분자로 pH 7.0에서 100°C, 3시간 가열 추출하여 제조한 포피란의 경우 720 kDa의 고분자이다(Park et al., 1998). 일반적으로 고분자 다당류의 기능성은 다당을 구성하고 있는 화학적 조성, 결합 구조 특성과 더불어 분자량 크기에 따른 물성학적 특성까지도 밀접한 관련이 있다(Zhao et al., 2006; Im et al., 2005). 따라서 포피란을 이용하여 기능성뿐 아니라 가공 적성도 우수한 기능성 식품소재를 개발하기 위해서는 분자량 크기 별로 포피란을 제조하여 화학적,

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0058>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Kor J Fish Aquat Sci 48(1) 058-063, February 2015

Received 7 January 2015; Revised 4 February 2015; Accepted 5 February 2015

*Corresponding author: Tel: +82. 63. 469.1828 Fax: +82. 63. 469.7448

E-mail address: kseaweed@kunsan.ac.kr

물성학적 및 기능성에 대한 특성 조사가 필요하다.

본 연구에서는 저분자 포피란을 이용한 기능성 소재를 개발하기 위한 기초 자료를 얻기 위해 포피란을 β-agarase로 가수분해한 후 한외여과로 분자량 별로 분획하여 저분자 포피란의 화학적 및 물성학적 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

재료

실험에 사용한 김(*Pyropia yezoensis*)은 충남 서천군 소재 김양식장에서 2012년 3월에 채취한 후 민물로 수세, 건조(40℃), 분쇄한 후 냉동고(-18℃)에 보관해 두고 실험에 사용하였다.

실험방법

포피란 제조

포피란은 Koo et al. (2007)의 방법에 준하여 제조하였다. 즉 마른 김에 50배(v/w)의 증류수를 넣고 pH가 약산성(pH 4.0)이 되게 조절한 후 80℃에서 3시간 동안 추출, 여과, 농축하였다. 농축액에 3배(v/v)량의 에탄올을 첨가하고 원심분리(4,000 g, 15 min)하여 분리한 침전물을 50℃에서 건조하여 조포피란을 제조하였다. 조포피란을 100 mM potassium phosphate buffer (pH 6.0)에 녹인 후 Viscozyme (Novozyme)을 1% 첨가하여 35℃ 수욕상에서 1시간 동안 가수분해 한 후 연속적으로 Protamex (Novozyme)를 1% 첨가하여 35℃ 수욕상에서 1시간 동안 가수분해하였다. 100℃에서 30분간 가열한 후 원심분리(15,000 g, 15 min)하여 상층액을 분리한 후 3배(v/v)량의 에탄올을 첨가하고 원심분리(4,000 g, 15 min)하여 분리한 침전물을 50℃에서 건조하여 포피란을 제조하였다.

포피란 효소가수분해 분획물 제조

포피란에 β-agarase (Sigma-Aldrich Co., USA)를 가하여 실온에서 24시간 효소 가수분해하였다. 효소가수분해물을 분자량에 따라 분획하기 위해 molecular weight cut-off 10, 100, 300 KDa인 한외여과막(DIAFIO ultrafiltration membrane, Amicon, Division)을 사용하여 여과하여 분획한 후 동결 건조하여 분자량 별 분획물을 제조하였다(Fig. 1).

일반성분 분석

회분, 조단백질, 조지방은 AOAC법 (1990)에 따라 측정하였다. 수분은 105℃ 상압 건조법, 회분은 550℃ 회화법, 조단백질은 Kjeldhal법으로 측정하였다. 조지방은 Soxhlet법으로 측정하였고 탄수화물은 100-(수분+회분+조단백질+조지방)으로 나타내었다.

구성당 분석

구성당 분석은 Furneaux et al. (1990)의 방법에 따라 표준 시약(rhamnose, fucose, arabinose, ribose, galactose, 6-O-methyl-D-galactose, 3,6-anhydro galactose, xylose, mannose,

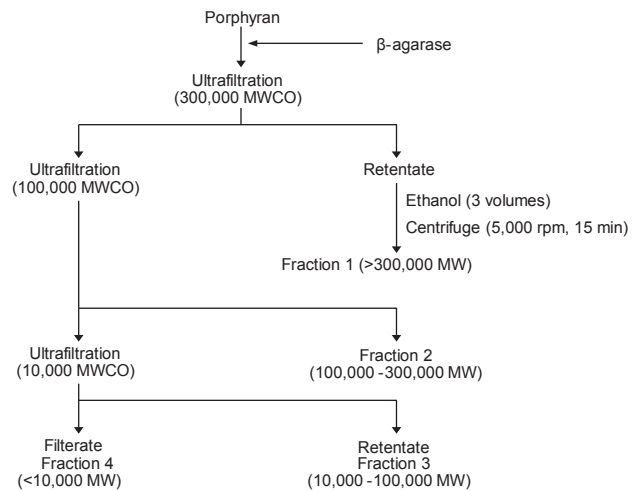


Fig. 1. Flowchart for the preparation of porphyran hydrolysates.

glucose)과 시료에 내부 표준물질(myo-inositol)을 넣어 각각 acetylation 유도체화 한 후 GC로 분석하였다. 구성당 GC 분석은 Hewlett Packard GC Model 6890과 FID (flame ionization detector) 검출기, 칼럼은 SP-2330 (0.25 mm I.D × 30 m, film thickness; 0.2 μm)을 사용하였다. 칼럼온도는 230℃이며 주입구와 검출기 온도는 모두 240℃로 하였다. 이동상은 He을 0.1 mL/min의 유속으로 하여 분석하였다. 시료의 구성당 함량은 표준시약의 검량선을 이용하여 산출하였다.

FT-IR 분석

FT-IR 분광분석은 6300FV+IRT5000 (Jasco, Japan)으로 포피란과 포피란 효소가수분해 분획물(Fraction 1, 2, 3, 4)을 ATR법(attenuated total reflection absorption spectroscopy, 감쇠 전 반사 흡수 분광법)으로 분석하였다.

점도 및 유동특성 측정

포피란과 포피란 효소가수분해 분획물의 점도는 점도계(HAAKE RotoVisco 1, Thermo Electron, Germany)를 이용하여 20℃에서 sensor PP60Ti (Radius 30 mm, Gap 1 mm)를 사용하여 측정하였다. 전단속도는 0-1500 1/s까지 변화시켰고, 측정온도는 22.5℃에서 측정하였다. 농도 변화에 따른 포피란과 포피란 효소가수분해 분획물의 유동 특성 값을 구하기 위해 포피란과 효소가수분해 분획물을 각각 3%, 5%, 7%, 10%로 제조하여 측정한 후 power law model 식(1)과 Herschel-Bulkley model 식(2)을 사용하여 점조성지수 K와 유동성지수 n을 구하였다.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \dots \dots \dots (1)$$

- τ : 전단응력 (Shear stress, Pa)
- K : 점조성 지수 (Consistency index, Pa.sⁿ)
- γ̇ : 전단 속도 (Shear rate, 1/s)
- n : 유동지수 (Flow behavior index)

$$\tau = C + K\dot{\gamma}^n \dots \dots \dots (2)$$

- τ : 전단응력 (Shear stress, Pa)
- C : 항복력 (yield stress, Pa)
- K : 점조성 지수(Consistency index, Pa.sⁿ)
- $\dot{\gamma}$: 전단 속도(Shear rate, 1/s)
- n : 유동 지수 (Flow behavior index)

활성화에너지 측정

포피란과 포피란 효소가수분해 분획물(Fraction 1)의 온도 변화(20, 30, 40, 50℃)에 따른 활성화 에너지값을 Arrhenius model (3)을 이용하여 구하였다(Rao and Anantheswaran , 1982).

$$\eta = K_0 \cdot \exp(E_a/RT) \dots \dots \dots (3)$$

- η : 겔보기 점도 (Apparent viscosity, Pa·s)
- K_0 : 상수 (Constant, Pa·s)
- E_a : 활성화에너지 (Activation energy of flow, J/ mol)
- R : 기체상수 (Gas constant, J/ mol K)
- T : 절대온도 (Absolute temperature, K)

결과 및 고찰

수율 및 구성성분

포피란과 포피란을 β-agarase로 가수분해한 효소가수분해물의 수율 및 구성성분은 Table 1과 같다. 포피란의 조성은 단백질 3.1%, 황산기 15.5%, rhamnose 1.0%, 6-O-methyl-galactose 1.6%, 3,6-anhydro galactose 9.9%, galactose 55.9%로 galactose, 3,6-anhydro galactose와 황산기를 합한 값이 81.3%를 차지하였다. Park and Koo (2008)는 조포피란을 cetylpyridinium chloride로 분리한 산성 분획물의 경우 galactose, 3,6-anhydro galactose, 황산기의 함량이 각각 47.1%, 12.7%, 14.3%로 이들 3종을 합한 값이 74.1%로 대부분을 차지한다고 보고하였는데 본 연구 결과와 유사함을 알 수 있다. 효소가수분해 분획물의 구성 성분도 galactose (42.7-57.5%), 3,6-anhydro galactose (6.5-

15.1%), ester sulfate (8.6-14.1%)가 대부분을 차지하였다. 수율과 황산기 함량은 분자량 300 KDa 이상인 fraction 1이 각각 54.8%와 14.4%로 가장 높았다. 반면에 3,6-anhydro galactose 함량은 fraction 1이 6.5%로 가장 낮고, fraction 4가 15.1%로 가장 높았다. 즉, 분자량이 큰 분획물일수록 6-sulfate galactose 함량이 높고, 3,6-anhydro galactose 함량은 낮아졌다. 이는 포피란에 함유되어 있는 주요 구성 성분인 6-sulfate galactose가 β-agarase의 활성을 저해하기 때문으로 여겨진다.

FT-IR 측정

포피란과 포피란 효소가수분해 분획물의 FT-IR spectrum은 Fig. 2와 같다. 포피란 및 분획물 모두 3,6-anhydro galactose (932 cm⁻¹)와 6-sulfate galactose (815 cm⁻¹) peak가 검출되었다. 또한 포피란의 주요 성분인 황산기는 1,210-1,260 cm⁻¹ (황산기의 O=S=O에 의한 진동 밴드) 파장에서 나타나는데 포피란 및 분획물 모두 1,220 cm⁻¹ 부근에서 peak가 검출되어 황산기가 존재함을 확인하였다.

점도 및 유동특성

포피란과 효소가수분해 분획물의 전단속도에 따른 전단응력 변화는 각각 Fig. 3, 4와 같다. 전단속도 800 1/s일 때 3%, 5%, 7%, 10%의 포피란 용액의 전단응력은 각각 4.46, 17.27, 42.08,

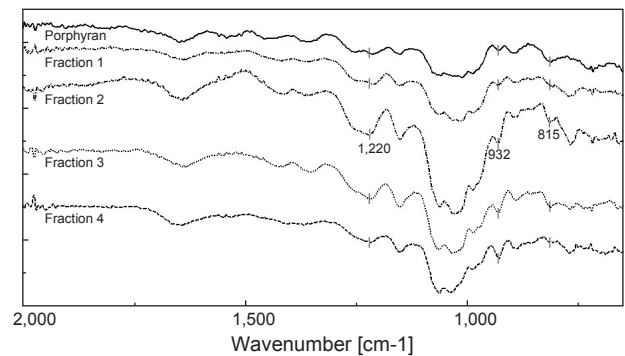


Fig. 2. FT-IR spectra of porphyran and its enzymatic hydrolysate fractions.

Table 1. Chemical composition of porphyran and enzymatic hydrolysate fractions (%)

	Yield	Protein	Sulfate	Rhm	3,6-An-Gal ⁶	6-Me-Gal ⁷	Gal
Porphyran	-	3.1 ± 0.1 ¹	15.5 ± 0.2 ¹	1.0	9.9	1.6	55.9
Fraction 1 ²	54.8	3.1 ± 0.1	14.4 ± 0.3	0.9	6.5	1.7	57.5
Fraction 2 ³	6.6	2.3 ± 0.1	11.3 ± 0.1	0.8	9.3	1.4	48.9
Fraction 3 ⁴	5.9	5.8 ± 0.1	13.5 ± 0.4	0.7	11.6	1.4	50.2
Fraction 4 ⁵	8.5	4.3 ± 0.4	8.6 ± 0.5	0.7	15.1	1.2	42.7

¹Values are mean ± standard deviation.

²>MW 300,000, ³MW 300,000-100,000, ⁴MW 100,000-10,000, ⁵<MW 10,000

⁶3,6-anhydrogalactose, ⁷6-O-methyl-galactose.

110.80 Pa로 농도 증가에 따라 증가하였으며 고농도인 10%에서 급격히 증가하였다. 효소가수분해 분획물인 fraction 1도 3%, 5%, 7%, 10% 용액의 전단응력이 각각 2.30, 5.26, 14.31, 25.80 Pa로 분획물의 농도 증가에 따라 전단응력이 증가하였으나 전체적으로 fraction 1의 전단응력이 포피란에 비해 낮았다. Koo et al. (1997)은 국내산 다시마, 미역포자엽, 톳, 모자반에서 추출한 fucoidan의 농도에 따른 유동 특성을 측정된 결과 전시로 모두 농도가 증가함에 따라 겔보기 점도가 급격히 증가한다고 보고하였는데 본 실험에서 포피란과 효소가수분해 분획물 모두 농도 증가에 따라 점도가 증가되는 동일한 경향을 나타내었다.

효소가수분해 분획물의 분자량 크기에 따른 전단응력 변화는 Fig. 5와 같다. 전단속도 800 1/s에서 fraction 1은 25.80 Pa, fraction 2는 3.35 Pa, fraction 3은 1.59 Pa 그리고 fraction 4는

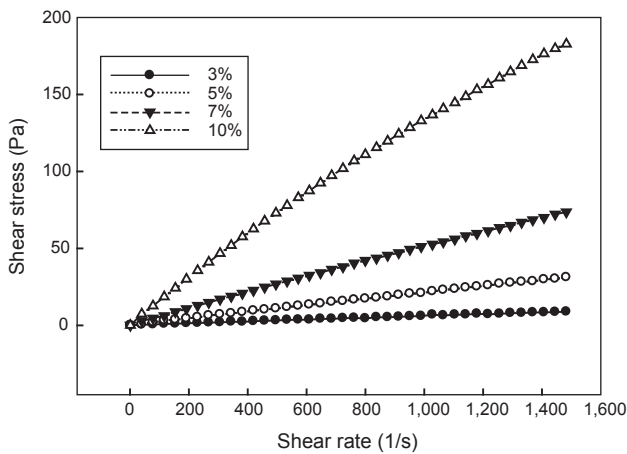


Fig. 3. Shear stress vs shear rate plot of different concentrations (3%, 5%, 7% and 10%) of porphyran solution at 20°C.

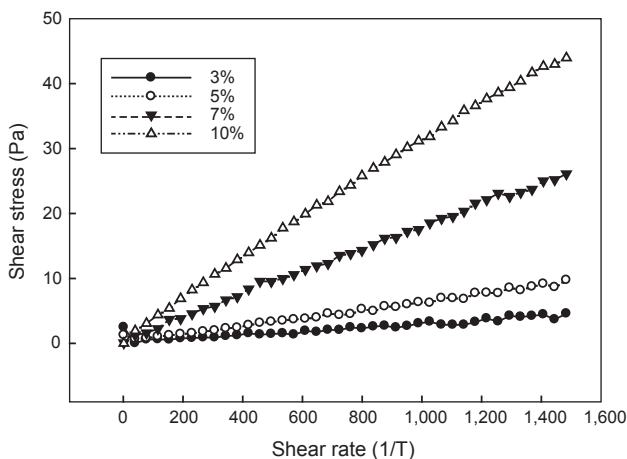


Fig. 4. Shear stress vs shear rate plot of different concentrations (3%, 5%, 7% and 10%) of fraction 1 solution at 20°C.

0.96 Pa로 분자량 감소에 따라 점도도 감소하였다. Koo et al. (2007)은 제단백 포피란의 점도 측정을 통해 포피란의 점도는 저분자화 될수록 점도가 저하하며 분자량 크기에 영향을 많이 받는다고 보고하였다. 또한 Song et al. (2007)도 알긴산과 카라기난에 감마선을 조사한 결과 조사선량이 증가할수록 분자량과 점도가 유의성 있게 감소한다고 보고하였는데 본 실험에서도 분자량 감소에 따라 점도가 저하하는 동일한 경향을 나타내었다.

포피란과 효소가수분해 분획물 fraction 1의 농도에 따른 유동 특성을 조사하기 위해 Power law model과 Herschel-Bulkley model을 이용하여 유동지수, 점조도 지수, 항복력을 구한 결과를 Table 2에 나타내었다. 결정계수(r^2)값의 경우 Herschel-Bulkley model은 포피란과 효소가수분해 분획물 모두 0.91-0.99로 높은 상관성을 나타내었다. 반면에 power law model은 포피란은 모든 농도에서 0.99로 높은 상관성을 나타내었으나 fraction 1은 0.85-0.99로 7-10%의 고농도에서는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 따라서 효소가수분해물의 유동 특성 값 분석에는 Herschel-Bulkley model이 적합하다고 생각된다. Herschel-Bulkley model로 구한 유동지수는 포피란과 fraction 모두 1 이하이며 항복력을 가지는 의가소성 유체 특성을 나타내었다. 점조도 지수는 포피란과 fraction 1은 각각 0.009-0.227과 0.0159-0.0659로 농도가 증가할수록 점조도 지수값이 증가하였다. 항복력은 3%와 5%의 낮은 농도에서는 포피란과 효소가수분해물인 fraction 1 모두 0.0145-0.0394로 거의 차이가 없었으나 7%와 10%의 농도에서는 포피란은 각각 0.1312와 0.7942 이고, fraction 1은 각각 0.0698과 0.0871로 포피란이 fraction 1에 비해 높은 값을 나타내었으며, 특히 10% 포피란이 높은 값을 나타내었다. 위의 결과로 미루어 볼 때 포피란과 효소가수분해물의 점조도 지수와 항복력 모두 농도가 높을수록 영향을 많이 받을 수 있다.

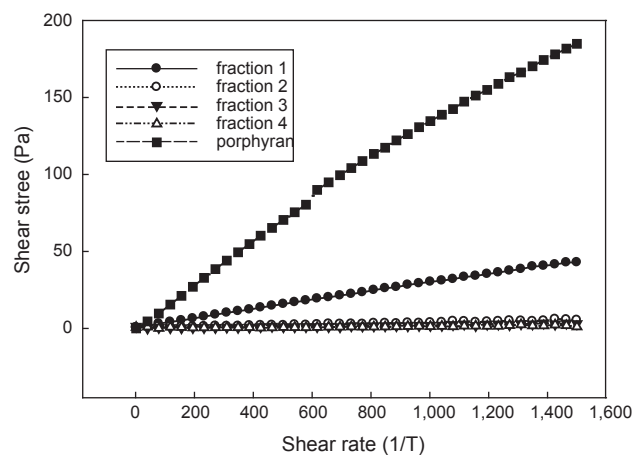


Fig. 5. Shear stress vs shear rate plot of porphyran and enzymatic hydrolysate fractions solution at 20°C.

Table 2. Rheological parameters for porphyran and its enzymatic hydrolysate fraction 1

Conc. (%)	Power law				Herschel-Bulkley			
	K ¹	n ²	R ²³	C ⁴	K ¹	n ²	R ²³	
Porphyran	3	0.0107	0.9177	0.9953	0.0202	0.0096	0.9322	0.9958
	5	0.0327	0.9386	0.9982	0.0145	0.0320	0.9615	0.9940
	7	0.0912	0.9155	0.9964	0.1312	0.0849	0.9155	0.9964
	10	0.2714	0.8969	0.9988	0.7942	0.2277	0.8969	0.9989
Fraction 1	3	0.0559	0.9092	0.9990	0.0333	0.0159	0.7470	0.9145
	5	0.0093	0.8544	0.9666	0.0394	0.0154	0.8678	0.9800
	7	0.0127	0.7244	0.8585	0.0698	0.0341	0.9061	0.9948
	10	0.0039	0.8313	0.8900	0.0871	0.0659	0.8899	0.9951

¹Consistency index (Pa.s). ²Flow behavior index. ³Deremination coefficient. ⁴Yield stress.

온도변화에 따른 점도 변화

활성화 에너지는 유체가 흐르기 위해 극복해야 할 장애 에너지를 의미하며 일반적으로 시료의 농도, 이온강도, 이화학적 특성 및 전단 응력에 따라 달라진다(Rincon et al., 2014). 포피란과 포피란 효소 가수분해 분획물(fraction 1)의 농도 별 온도에 대한 활성화 에너지의 영향을 알아보기 위해 전단속도 1,000 1/s에서 온도를 변화시키면서 농도(3, 5, 7%) 별로 겔보기 점도를 측정하였다(Fig. 6, 7). 포피란과 fraction 1 모두 직선성을 나타내었다. 겔보기 점도변화와 온도변화(1/T)에 따라 Arrhenius 식을 통해 구한 활성화 에너지는 Table 3과 같다. 결정계수(r²)값은 포피란은 0.64-0.88, fraction 1은 0.94-0.95로 농도가 높을수록 높았고, 전체적으로 포피란에 비해 fraction 1이 높았다. 농도에 따른 활성화 에너지값은 포피란의 농도가 3, 5, 7%로 증가함에 따라 각각 12.30, 17.27, 20.29 kJ/mole로 증가하였고 효소가 가수분해 분획물인 fraction 1도 각각 9.06, 11.60, 23.84 kJ/mole로 증가하였다. Paul et al. (2001)은 *Albizia lebbek* gum exudate의 1, 2, 3%의 활성화 에너지가 각각 15.9, 16.6, 17.2 kJ/

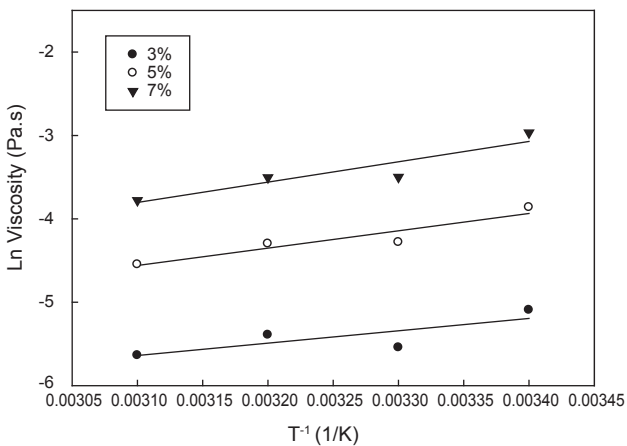


Fig. 6. The Arrhenius plot for apparent viscosity of the different concentrations of porphyran (3%, 5% and 7%).

mol으로 농도가 증가할수록 활성화 에너지가 증가한다고 보고하였다. 따라서 포피란과 fraction 1 모두 낮은 농도에서는 다당 간의 상호 작용의 세기가 약하고 점도에 미치는 온도의 영향이

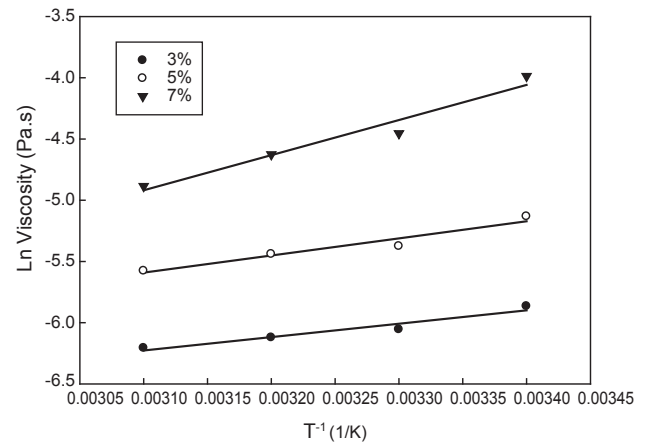


Fig. 7. The Arrhenius plot for apparent viscosity of the different concentrations (3%, 5% and 7%) of enzymatic hydrolysate fraction 1.

Table 3. Constants for Arrhenius model for porphyran and enzymatic hydrolysate fraction 1

	Concentration (%)	Ea (kJ/mol) ¹	K ₀ (Pa.s) ²	R ²³
Porphyran	3	12.30	3.63E-05	0.6453
	5	17.27	1.67E-05	0.8882
	7	20.29	1.15E-05	0.8603
Fraction 1	3	9.06	6.74E-05	0.9414
	5	11.60	4.93E-05	0.9415
	7	23.84	1.01E-06	0.9577

¹Activation energy of flow. ²Frequency factor. ³Deremination coefficient.

적으나 높은 농도(7%)에서는 다당간의 상호작용의 세기가 증가하고 온도가 겔보기 점도에 미치는 영향도 커짐을 알 수 있다.

사 사

이논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업연구사업임(No. 2011-0015008).

References

- AOAC. 1990. Official method of analysis of AOAC international. 16th. Ed.
- Furneaux RH, Miller IJ and Stevenson TT. 1990. Agaroids from New Zealand members of the *Gracilariaceae* (*Gracilarietes*, *Rhodophyta*) - a novel dimethylated agar. *Hydrobiologia* 204/205, 645-654.
- Im SA, Oh ST, Song SG, Kim MR, Kim DS, Woo SS, Jo TH, P YI and Lee CK. 2005. Identification of optimal molecular size of modified Aloe polysaccharides with maximum immunomodulatory activity. *International Immunopharmacol* 5, 271-279.
- Koo JG, Jo KS and Park JH. 1997. Rheological properties of fucoidans from *Laminaria religiosa*, sporophylls of *Undaria pinnatifida*, *Hizikia fusiforme* and *Sagassum fulvellum* in Korea. *J Kor Fish Soc* 30, 329-333.
- Koo JG, Park BC, Kim BG, Kim HA, Ryu CH and Kim SY. 2007. Chemical composition and rheological properties of deproteinated porphyran. *J Kor Fish Soc* 40, 1-7.
- Korea Statistical Information Service. 2013. Retrieved from <http://kosis.kr> on Sep 6, 2014.
- Lee JS, Lee MH and Koo JG. 2010. Effects of porphyran and insoluble dietary fiber isolated from laver, *Porphyra yezoensis* on lipid metabolism in rats fed high fat diet. *Kor J Food Nutr* 23, 562-569.
- Osumi Y, Kawai M, Amano H and Noda H. 1998. Antitumor activity of oligosaccharides derived from *Porphyra yezoensis* porphyran. *Nippon suisan gakkaiishi* 64, 847-853.
- Paula RCM, Santana SA and Rodrigues JF. 2001. Composition and rheological properties of *Albizia lebbek* gum exudates. *Carbohydr Polymers* 44, 133-139.
- Park JH and Koo JG. 2008. A simple purification method and chemical properties of porphyran from *Porphyran yezoensis*. *J Kor Fish Soc* 41, 409-413. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2008.41.6.409>.
- Park JH, Koo JG, Do JR, Yang CB and Woo SK. 1998. Effect of extraction temperature and pH on the chemical properties of crude porphyran extracted from *Porphyra yezoensis*. *J Korean Fish Soc* 31, 127-131.
- Peat S, Turvey JR and Rees DA 1961. Carbohydrates of the red alga, *Porphyra umbilicalis*. *J Chem Soc* 1590-1595. <http://dx.doi.org/10.1039/JR9610001590>.
- Rao MA and RC Anantheswaran. 1982. Rheology of fluids in food processing. *Food technol* 36, 116-126.
- Rincon F, Munoz J, Ramirez P, Galan H and Alfaro MC. 2014. Physicochemical and rheological characterization of *Prosopis juliflora* seed gum and aqueous dispersion. *Food Hydrocolloids* 35, 348-357.
- Song EJ, Lee SY, Kim KBWR, Park JG, Kim JH, Lee JW, Byun MW and Ahn DH. 2007. Effect of Gamma Irradiation on the Physical Properties of Alginic Acid and λ -Carrageenan. *J Kor Soc Food Sic Nutr* 36, 902-907.
- Su JC and Hassid WZ. 1962. Carbohydrates and nucleotides in the rotialga *Porphyra perforata*. *Biochem* 1, 468-474.
- Yoshizawa Y, Ametani A, Tsunehiro J, Nomura K, Itoh M, Fukui F, Kaminogawa S. 1995. Macrophage stimulation activity of the polysaccharide fraction from a marine alga (*Porphyra yezoensis*): structure-function relationships and improved solubility. *Biosci Biotechnol Biochem* 59, 1933-1937. <http://dx.doi.org/10.1271/bbb.59.1933>.
- Zhang Q, Li N, Liu X, Zhao Z, Li Z and Xu Z. 2004. The structure of a sulfated galactan from *porphyra haitanensis* and its in vivo antioxidant activity. *Carbohydrate Res* 339, 105-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carres.2003.09.015>.
- Zhao T, Zhang Q, Qi H, Zhang H, Niu X, Xu Z and Li Z. 2006. Degradation of porphyran from *Porphyra haitanensis* and the antioxidant activities of the degraded porphyrans with different molecular weight. *Intern JBiolog Macromol* 38, 45-50.