

이온성 고분자를 이용한 나트륨 섭취 감소 효과

박세현 · 이영주* · 이종휘†

중앙대학교 화학신소재공학부, *세종대학교 생명공학부
(2013년 3월 5일 접수, 2013년 4월 12일 수정, 2013년 4월 13일 채택)

Effect of Ionic Polymers on Sodium Intake Reduction

Sehyun Park, YoungJoo Lee*, and Jonghwi Lee†

Department of Chemical Engineering and Materials Science, Chung-Ang University,
221 Heukseok-Dong, Dongjak-Gu, Seoul 156-756, Korea

*Department of Bioscience and Biotechnology, SeJong University, Kwangjin-Gu, Seoul 143-747, Korea

(Received March 5, 2013; Revised April 12, 2013; Accepted April 13, 2013)

초록: 염화나트륨은 우리 몸의 체액에 존재하며, 혈액 속에 약 0.9 wt%의 농도로 존재하여 삼투압을 유지하는 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 사람들이 섭취하는 소금의 양은 증가하는 추세이며, 과량 섭취로 인해 고혈압 등의 원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 생체적합성 이온성 고분자들의 특정 반대이온을 칼슘과 칼륨으로 치환시켜 나트륨 이온과의 이온교환을 통해 고분자에 나트륨이 흡착되어 대변으로 배출시킬 수 있는지를 *in vitro* 실험과 *in vivo* 실험을 통해 연구하였다. 조사된 고분자들 중 칼슘과 칼륨의 폴리스티렌설포산, 칼슘 치환된 카라기난과 타마린드가 우수한 나트륨 치환 능력을 보유하고 있음을 확인하였고, 체온과 인공위액 및 인공장액의 조건에서도 나트륨 치환능을 유지하는 것을 확인하였다. 이러한 고분자들의 난용성 특징을 통해 구강 내에서는 맛의 변화를 주지 않으면서 나트륨을 흡착해 배설하는 메커니즘을 나트륨 과다 섭취에 따른 문제 해결을 위해 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract: Sodium chloride is present in our body fluids, and the blood contains approximately 0.9 wt% salt, which plays an important role in maintaining the osmotic pressure. However, the amount of salt intake has consistently increased, and an excessive intake can be the cause of high blood pressure, etc. In this study, it was investigated *in vivo* and *in vitro* whether biocompatible ionic polymers with K or Ca ions can be replaced by Na ions through an ion exchange process to be excreted. Among the polymers, Ca-polystyrene sulfonate, K-polystyrene sulfonate, Ca-carrageenan, and Ca-tamarind had an excellent Na exchange ability in the body temperature, simulated gastric fluid and also simulated intestinal fluid. The mechanism of Na removal by absorption and excretion without changing food taste in the mouth through the insolubility properties of these polymers is expected to be a solution for the current problems related with excess sodium intake.

Keywords: sodium ion absorption, polymer, nature polymers, cation substitution.

서론

사람을 포함한 동물에게 있어 염화나트륨(NaCl)은 생리적으로 절대적으로 없어서는 안되는 중요한 물질이다. 염화나트륨은 우리 몸의 체액에 존재하며, 혈액 속에는 약 0.9%의 염분이 함유되어 있어 삼투압을 유지하는 중요한 역할을 하고 있다. 염화나트륨의 필요량은 보통 성인의 경우 하루 10~20 g이며, 땀을 많이 흘리는 여름철에는 20~30 g이 필요하다. 그러나 염화나트륨을 너무 많이 섭취하면 혈액 속의 염분 농도

가 증가해서 신체는 이 농도를 일정하게 유지하기 위해 많은 수분을 혈액 속으로 들여오기 때문에 고혈압증의 원인이 되기도 한다. 일본 보건복지부의 조사에 의하면 일본 사람들 평균 1975년 하루에 11.5 g, 1993년 하루에 12.8 g의 소금을 섭취한다고 한다. 사람들이 섭취하는 소금의 양은 증가하는 추세이고, 이렇게 많은 양을 과량 섭취하는 것은 고혈압과 위암의 원인이 되기도 한다.¹

고분자전해질(polyelectrolyte)은 고분자의 사슬 중에 해리기를 가지며, 용매에 녹아 해리되었을 때 양이온 또는 음이온을 띠는 고분자이온을 말한다. 이온교환수지는 고분자전해질로 제조되는데, 이 중 양이온교환수지는 난용성이며 해리되어 음이온으로 하전되어 있는 기능기와 정전기적으로 끌

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: leexx303@gmail.com

려있는 수소나 금속의 양이온으로 구성되어 있다. 많이 이용되는 양이온교환수지는 폴리스티렌(polystyrene, PS)에 설푼산염(sulfonate)기가 결합되어 있는 형태이다(polystyrene sulfonate, PSS). 이온교환은 정전기력의 차이에 의해 일어나며 이온교환수지가 흡착하는 이온의 선택성은 이온의 원자가 전자의 수가 많을수록 그리고 이온의 원자가전자의 수가 같은 경우는 원자의 크기가 큰 경우에 높아진다. 이러한 양이온치환성 고분자 또는 양이온교환수지는 양이온의 농도에 크게 의존한다. 농도가 높은 경우에는 이온의 흡착성이 낮은 물질이라도 흡착성이 높은 이온을 이온교환수지에서 해리시키고 흡착이 일어난다.^{2,3} 양이온교환수지는 용액 속의 특정 이온을 걸러내는 막^{4,9} 또는 이차전지를 구성하는 고분자 전해질로 널리 사용된다.¹⁰

양이온교환 특성을 가지는 고분자 물질을 염분 과다 섭취에 따른 부작용을 줄이기 위한 식품첨가물로 개발할 수 있을 것이라는 아직 조사된 바 없는 가정에서 본 연구는 시작되었다. 나트륨이 아닌 몸에 안전한 다른 금속염을 가지고 있는 고분자 전해질을 경구로 투여하는 식품첨가물 또는 약물로 활용하여, 신체 내의 나트륨과 양이온치환성 고분자의 금속염과 이온교환을 기대할 수 있다. 적절한 고분자 물질은 난용성이며 몸에 흡수되지 않아 신체 내의 나트륨을 치환한 후 대변으로 방출하게 되어야 하며, 인체에 무해하여야 하고, 아울러 효과적인 신체 내 나트륨의 농도를 줄이는 특성을 가져야 한다. 건조된 난용성 고분자인 경우 섭취 초기에 구강에서는 나트륨 치환이 많이 일어나지 않아 음식 맛에는 영향을 주지 않게 할 수 있을 것이다.

양이온 치환성 교환수지의 형태를 가지며, 생체에 이용가능한 천연 고분자로는 다양한 폴리사카라이드를 사용하였고, 합성 고분자로는 의약품으로 허가되어 있는 PSS를 나트륨이 아닌 칼슘 및 칼륨으로 치환하여 사용하였다. 본 연구에서는 이들 고분자의 나트륨 치환 능력을 다양한 조건에서 테스트 해보고 그 가능성을 연구해 보았다.

실 험

시약. Calcium PSS(Ca-PSS)는 Hangzhou Pharma & Chem. (중국)에서, κ -carrageenan은 FMC Biopolymer(미국), 푸코이단(fucoidan)은 해원 바이오테크(한국), tamarind gum은 태경농산(한국), Na-PSS(M_w 45000, 350000 g/mol)는 Sigma-Aldrich(미국), 에탄올은 삼전화학(한국), 염화칼슘(CaCl_2), 수산화나트륨(NaOH), 염화나트륨(NaCl), 염화칼륨(KCl), 인산칼륨(KH_2PO_4)는 덕산화학(한국), ICP standard solution Na, Ca, K 1000 ppm은 Kanto Chem.(일본)에서 구입하였다. 증류수는 2차 증류수를 사용하였으며 모든 물질은 정제 없이 사용하였다.

나트륨 치환성 고분자 제조. Ca-PSS를 K-PSS로 치환:

250 mL의 둥근 플라스크에 100 mL 증류수와 Ca-PSS의 칼슘 단량체 기준으로 50 mM인 2.03 g을 넣고 oil bath를 이용하여 70 °C에서 2시간 동안 교반시켰다. 교반시켜주면서 상온으로 온도를 낮춘 후 250 mM 염화칼륨 18.6 g을 첨가한다. 첨가 후 5시간 동안 교반을 유지시킨 후 dialysis membrane (cut off M_w 1000)을 이용하여 3일 동안 내부에 있는 칼슘 이온을 제거하고 에탄올로 침전시킨 뒤에 진공건조하여 K-PSS를 얻었다. Ca-PSS의 90%의 칼슘이 칼륨으로 치환된 것을 ICP 정량 분석을 통해 확인하였다.

Ca-Fucoidan 치환: 푸코이단은 다른 난용성 고분자와는 다르게 점도는 높으나 균일하게 녹는 물질이며, ICP를 이용하여 물질 내에 나트륨 함유량을 분석하였다. 분석한 결과 물질의 4.4%가 나트륨으로 이루어져 있었다. 이 고분자의 칼슘 치환 방법은 다음과 같다. 푸코이단 4 wt%를 70 °C 물중탕에 2시간 교반 후 실온으로 낮추고 무게 비 4배의 염화칼슘을 첨가한 후 5시간 동안 교반시켰다. 그 후에 dialysis membrane을 이용하여 3일 동안 내부에 있는 나트륨 이온을 제거하고 에탄올로 침전시킨 후에 진공 건조하여 Ca-fucoidan을 얻었다. 치환 전 후의 물질을 ICP를 이용하여 성분 분석한 결과, 푸코이단이 가지고 있던 전체 나트륨의 83.05%가 칼슘으로 치환된 것을 확인할 수 있었다.

Ca-carrageenan과 Ca-tamarind의 치환: 두 물질 다 동일하게 250 mL의 둥근 플라스크에 1 wt%의 시료와 100 mL의 증류수를 넣고 oil bath를 이용하여 70 °C로 맞춘 상태에서 2시간 동안 교반한다. 교반하면서 상온으로 맞춘 후 5 wt%의 염화칼슘을 첨가하였다. 첨가 후 5시간 동안 교반을 유지시킨 후 dialysis membrane(cut off M_w 1000)을 이용하여 3일 동안 내부에 있는 나트륨 이온을 제거하고 에탄올로 침전시킨 후 진공 건조하여 각각의 치환된 샘플을 얻었다.

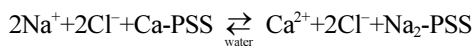
나트륨 치환성 고분자의 치환 특성 분석. 나트륨 치환성 고분자의 치환 특성을 분석하기 위해 치환 전후의 물질을 질산에 태워 ICP(inductively coupled plasma spectrometer, Ultima-2 Jobin Yvon, France)를 이용하여 정량 분석하였다. ICP standard solution을 이용하여 검량하였으며, pump speed는 20 mL/hr, nebulizer flow는 0.2 mL/hr, argon gas를 이용하였다.

Ca-PSS의 양에 따른 나트륨 치환 특성을 확인하기 위해 30 mL의 바이알에 20 mL의 0.1 M 농도인 염화나트륨 용액과 Ca-PSS의 양을 증가시켜 넣은 후 24시간 동안 교반하였다. 녹지 않은 난용성의 Ca-PSS를 기공크기가 1 μm 의 멤브레인 필터를 이용하여 걸러낸 후 용액만 취해 용액 내에 있는 나트륨 성분을 ICP를 이용하여 정량분석 하였다. 그리고 염화나트륨의 농도가 증가함에 따라 나트륨 치환율에 미치는 영향을 알아보기 위해 Ca-PSS의 양은 0.812 g으로 고정시킨 상태에서 10 mL 염화나트륨 용액의 농도를 증가시켰다. 그 다음 과정은 상기 언급한 것과 동일하게 진행하였다.

Ca-PSS의 calcium을 potassium으로 치환한 K-PSS 또한 나트륨 치환성을 가진다. 염화나트륨의 농도가 증가함에 따라 나트륨 치환율에 미치는 영향을 알아보기 위해 Ca-PSS와 동일하게 K-PSS의 양을 0.812 g으로 고정시킨 상태에서 10 mL의 염화나트륨 용액의 농도를 변화시켰다.

Ca-PSS, K-PSS와는 다르게 Ca-fucoidan은 난용성 물질이긴 하나 낮은 농도 조건에서는 점도가 있는 용액 상태로 존재한다. 이런 상태의 용액은 작은 기공을 갖는 멤브레인 필터를 이용하여 여과하는데 어려움이 있었다. 따라서 투석막을 이용하여 Ca-fucoidan이 나트륨 이온을 얼마나 흡착시킬 수 있는지를 알아보았다. 0.1 M 염화나트륨 용액 10 mL와 Ca-fucoidan 0.4 g을 교반한 후 dialysis membrane에 넣어준 뒤 이를 더 많은 부피의 증류수가 들어있는 용기에 넣어준다. Dialysis를 거쳐 멤브레인 안과 밖의 평형조건을 이루기 위해 용기를 완벽히 차단하여 증발을 막고, 400 rpm 조건에서 3일 동안 dialysis를 한다. 그 후 멤브레인 안과 밖의 나트륨 농도를 분석, 비교하여 나트륨을 얼마나 흡착시킬 수 있는지 분석하였다.

Ca-PSS의 평형상수. Ca-PSS의 평형식을 세워 나트륨 감소에 대한 실험결과와 일치하는지를 비교하였다. Ca-PSS의 경우 반응 수식은 다음과 같다.



그러므로 평형상수 K 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{Na}_2\text{-PSS}]}{[\text{Na}^+]^2[\text{Ca-PSS}]}, \quad K = \frac{\left(\frac{x_0 - x}{2}\right)^2}{x^2\left(y_0 - \frac{(x_0 - x)}{2}\right)}$$

위의 식에서 x_0 는 나트륨의 초기농도, x 는 교반 후 나트륨의 농도, y_0 는 Ca-PSS의 초기농도를 나타낸다. 평형상수 K 값은 나트륨의 치환이 이루어지는 반응방향인 $\text{Na}_2\text{-PSS}$ 가 높아짐에 따라 커지므로 K 값을 최대화시키는 것이 중요하다.

20 mL의 0.1 M 염화나트륨 용액 조건에서 Ca-PSS를 이용한 나트륨 감소 실험결과를 가지고 평형상수 값을 구하였으며, 다른 조건들에서도 평형상수 식을 따라 나트륨 흡수가 이루어지는지를 확인하였다. 즉, 위에서 얻은 K 값을 이용하여 다른 농도인 0.5 M과 1 M의 염화나트륨 용액 조건에서도 평형상수 식이 일치하는지를 확인하였다.

나트륨 치환성 고분자의 in vivo 테스트. 전체 나트륨 치환성 고분자에 대한 in vivo 실험은 혈액, 소변 및 대변의 성분 대해 ICP 정량분석을 하였다. 체중은 200 ± 10 g인 7주령 female rat으로 진행하였고 metabolic cage를 이용하였다. 실험 전 저녁부터 물은 주지 않았다. Control 군은 12 g의 사료와 물을 제공하였고, sodium군은 12 g의 사료와 물과 3 M의 NaCl 용액을 매일 경구투여 하였다. 각 나트륨 치환성 고분

자를 가한 군은 12 g의 사료와 1 g의 나트륨 치환성 고분자, 물 그리고 3 M의 염화나트륨 용액을 매일 경구투여 하였다. 소변과 대변은 매일 모아 분석하였으며, 혈액은 6일이 지난 후 분석하였다.

온도 및 pH에 따른 나트륨 치환성 고분자의 거동. 나트륨 치환성 고분자가 인체 내의 장액과 위액 같이 pH의 차이가 발생했을 때, 그리고 다른 온도 조건에서 나트륨 치환성에 어떤 영향을 미치는지를 확인하기 위해 인공장액과 인공위액을¹¹⁻¹⁵ 이용하여 20, 37 °C에서 나트륨 치환을 실험을 상기 기술한 동일한 방법으로 진행하였다.

결과 및 토론

나트륨 치환성 고분자의 나트륨 치환 특성분석. 본 연구에서는 양이온 치환능력이 있는 고분자인 PSS, 푸코이단, 카라기난, 타마린드 검 등을 이용하였으며 그 구조식은 Figure 1에 나타내었다. 첫번째로 Ca-PSS는 난용성이며 스티렌과 divinyl benzene과의 공중합체에 설포기를 결합시켜 칼슘형으로 한 양이온교환수지이며 전지의 고분자 전해질로 이용되는 폴리스티렌 설포산염의 형태를 가지고 있다. 두번째는 미역, 다시마 등의 갈조류에서 추출하여 얻은 점성 고분자 전해질인 푸코이단이다. 분자 중에 황산기를 가지고 있는 황산화부

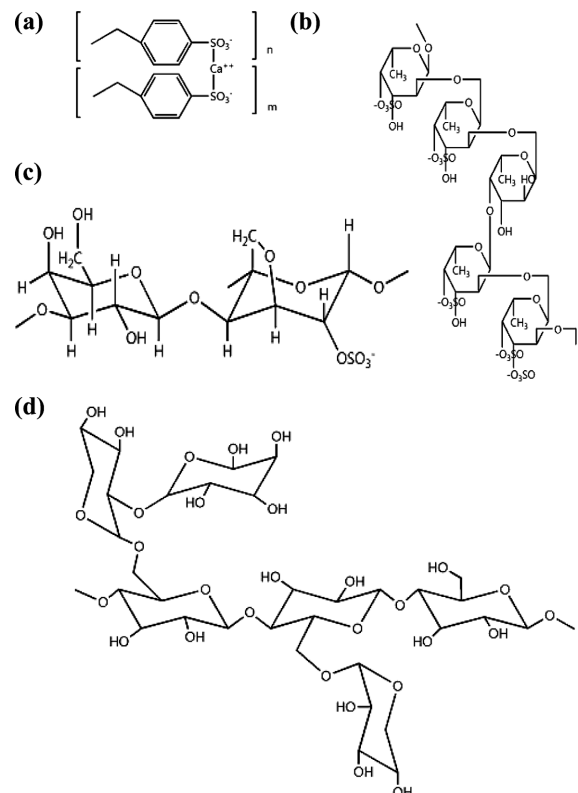


Figure 1. Structures of (a) Ca-PSS; (b) fucoidan; (c) κ -carrageenan; (d) tamarind gum.

코스로 되어 있으며, 혈중 콜레스테롤 수치를 낮추어 혈관 질환, 성인병 등의 예방과 항균 및 항바이러스 작용이 있다. 세 번째 카라기난은 홍조류에서 추출하여 얻은 다당류 혼합물로서 항산화 갈락탄으로 되어 있으며, 황산기의 수, 결합위치에 따라 kappa, iota, lambda로 구분된다. 이 중 칼륨과 칼슘으로 젤화가 가능한 κ -carrageenan을 사용하였다. 마지막으로 타마 린드 검은 다년생 콩과식물 종자의 배유를 온수나 열수 또는 알칼리성 수용액으로 추출하거나 또는 이를 β -galactosidase 효소로 처리한 것으로 주성분은 다당류이다. 상온에서 용해되는 것도 있으나 대부분 50~60 °C로 가열하여야만 용해되는 특성을 가진다.

Ca-PSS의 나트륨 치환율: Figure 2는 Ca-PSS의 양이 나트륨 치환 특성에 어떤 영향을 주는지를 알아본 것으로 Ca-PSS의 양이 증가함에 Ca-PSS의 Ca^{2+} 와 Na^{+} 의 이온교환이 일어나 나트륨의 농도가 감소하였다. 이를 통해 Ca-PSS가 뚜렷한 나트륨 치환성을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 다만 농도의 증가에 따라 나트륨 치환율이 다소 감소하여 0.15 g/mL 이상에서는 plateau를 보이는 것으로 파악된다.

Table 1은 나트륨 치환 특성에 대한 초기 염화나트륨의 농도의 영향에 대해 알아본 것이다. Ca-PSS의 동일한 양에서 염화나트륨의 농도가 증가할수록 나트륨 감소량은 증가했으며, 2 M 조건에서 58.5 mg의 나트륨 감소량을 보였다. Ca-PSS의 monomeric 분자량은 406 g/mol이며, 0.812 g의 Ca-PSS는 2 mmol이다. Ca는 Na와 달리 2가의 원소이므로 Ca-PSS 0.812 g의 모든 Ca이 Na^{+} 로 치환된다고 하면 이론적으로는 92.0 mg의 나트륨을 치환시킬 수 있다. 2 M 조건에서 감소한 양은 전체 치환할 수 있는 양의 63.6%에 해당하는 양으로 이는 기존의 이온치환 기술과 비교하였을 때 비교적 큰 효율을 갖는 것을 확인할 수 있다.¹

K-PSS의 나트륨 치환율: Ca-PSS의 경우와 마찬가지로 K-PSS의 동일한 양에서 염화나트륨의 농도가 증가할수록 나트륨

Table 1. Effect of Initial Concentration of NaCl Solution on Reduction of Sodium Concentration

Polymers	Polymer content (g/mL)	NaCl concentration (M)	[Na] reduction (mg/L)
Ca-PSS	0.08	0.1	450
		1	3770
		2	5850
K-PSS	0.08	0.1	1200
		1	4740
		2	5590

감소량은 증가했으며, 0.1 M의 조건에서는 Ca-PSS보다 K-PSS의 치환율이 거의 두 배 정도 높았다(Table 1). 그러나 1 M 조건에서는 차이가 매우 작아지며, 2 M 조건에서는 두 고분자 모두 거의 동일한 치환율을 보인다. 이는 PSS의 sulfonate 기와 Ca^{2+} 의 정전기력보다 K^{+} 의 정전기력이 약하기 때문에 낮은 농도에서는 K-PSS의 나트륨 치환율이 높게 나타나는 것이고, NaCl의 농도가 높은 경우에는 정전기력의 차이보다는 농도 구배에 더 의존하기에 동일한 감소율을 갖는 것으로 설명할 수 있다.^{3,16}

Ca-fucoidan의 나트륨 치환율: Dialysis 전 후의 멤브레인 내부의 농도는 각 2175와 276 mg/L이었으며, dialysis 후 멤브레인 외부 medium의 농도는 89.5 mg/L이었다. Dialysis 3 일을 거쳐 평형조건에 이르렀다고 가정하면 멤브레인 내부의 농도에서 medium의 농도를 제하여 흡착한 나트륨 이온 치환량을 계산할 수 있다. 0.1 M 염화나트륨 10 mL 조건에서 Ca-fucoidan 1 g당 나트륨 치환량은 467 mg이었다. 이 결과를 통해 Ca-PSS와 K-PSS에 비해 적은 양의 나트륨을 치환하나 Ca-fucoidan도 나트륨 흡착능력이 있음을 확인할 수 있다. 물론 고분자의 용해도 차이 때문에 나트륨 치환 실험의 조건이 상이하여 여기서 이들의 정확한 비교는 어렵다.

Ca-PSS의 평형상수. Ca-PSS를 이용한 나트륨 치환 실험을 0.1 M의 염화나트륨 용액 조건에서 3번 반복하여 구한 평형상수 K 의 평균값은 3.762×10^{-7} 이었다. 계산에는 앞에서 언급한 간단한 단일계 평형식을 기반으로 한 수식을 활용하였다. 얻은 평형상수 K 값을 가지고 Ca-PSS의 양에 따른 결과를 계산하여 얻은 이론적 그래프(Figure 3(a), (b), (c))와 실험을 통해 얻은 결과는 Ca-PSS양이 증가할수록 나트륨 감소량이 증가한다는 점에서 그 경향성은 일치하였다. 그러나 염화나트륨 용액의 초기농도 변화에 따른 실험결과에서는 초기농도의 영향이 이론적 그래프와 큰 차이를 보여주고 있다(Figure 3). 특히 0.5와 1.0 M에서의 결과는 평형식을 기반으로 한 예측과 매우 상이하여 평형식을 통해 나트륨 치환율을 예측하는 것은 매우 어려운 것으로 판단된다. 따라서 평형식을 조금 더 보완해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 특히 가장 큰 차이점은 본 치환시스템은 단일상(one phase)으로 구

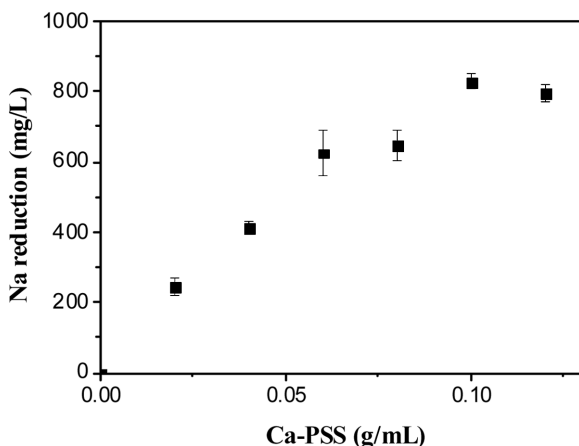


Figure 2. Effect of Ca-PSS content on Na reduction in 0.1 M NaCl solution.

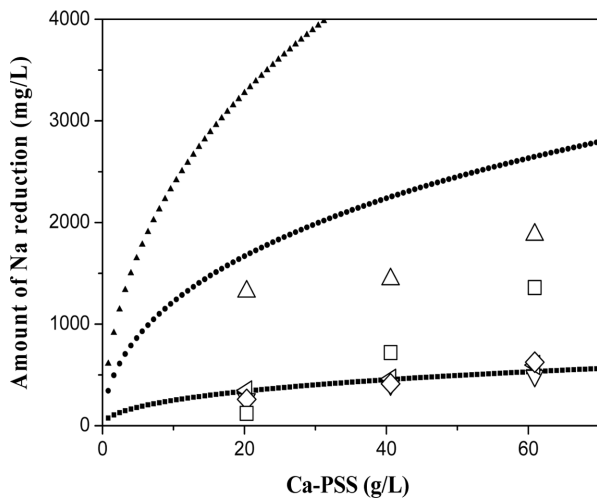


Figure 3. Effect of initial NaCl concentration on Na reduction (■ (a), ● (b), and ▲ (c) calculation results when $[NaCl] = 0.1, 0.5,$ and 1 M , respectively; ▽, ◁, and ◇ replicated experimental results when $[NaCl] = 0.1\text{ M}$; △, and □ experimental results when $[NaCl] = 0.5$ and 1 M , respectively).

성되어 있지 않고 난용성 고분자의 분산액으로 되어 있어, 향후 보완식의 경우 고분자 농축상(polymer-rich phase)의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

같은 맥락으로 염화나트륨 농도가 0.5에서 1.0 M로 늘면서 나트륨의 치환율이 두드러지게 증가하는 경향도 설명이 가능할 것으로 판단된다. 이는 단일상의 평형식으로부터는 설명할 수 없는 경향이나 불균일계에서는 각 phase들간의 평형을 고려하면 비선형적 비례관계도 얻어질 수 있다고 판단된다.

저분자 Ca-PSS 합성 및 나트륨 치환 특성분석. 합성에 이용한 PSS는 M_w 45000과 350000 g/mol로 이들의 분자량 차이가 나트륨 치환율에 미치는 영향을 분석하였다. 0.1 M 염화나트륨 10 mL를 이용하여 0.2 g의 고분자가 흡수하는 나트륨 치환율을 분석한 결과 분자량이 낮은 경우와 높은 경우 각각 $84(\pm 24)$ 와 $129(\pm 16)$ g/L의 나트륨 감소를 보였다. 결과적으로 분자량이 낮을수록 높은 나트륨 치환율을 보였다. 그러나 이 비교에서 저분자 PSS의 용해도가 상대적으로 높아 상기 설명한 푸코이단 경우와 유사하게 분자량에 의한 직접적인 나트륨 치환율의 차이로 판단하기 어려운 면이 있었다. 즉, 분자량이 낮아짐에 따라 용해도가 증가하여 여과시 거동이 350000 g/mol의 Ca-PSS와 차이가 있었으며, 이러한 용해도 차이가 상이한 나트륨 치환율의 한 원인을 제공했다고도 판단된다.

저분자 Ca-PSS의 경우 용해도가 높아 구강 섭취시 신속히 용해되어 구강내에서 이미 나트륨을 흡수하여 음식 맛에 영향을 줄 수도 있다고 판단된다. 이러한 경우에는 저분자 Ca-PSS 입자를 다른 소수성 고분자 물질로 encapsulation하는 방법을 통해 소화관까지 나트륨 흡수 없이 전달할 수 있을 것

으로 사료된다.

나트륨 치환성 고분자의 in vivo 테스트. Figure 4는 다양한 고분자 물질을 rat에 투입한 실험 결과를 나타내었다. 우선 혈액에서의 나트륨 농도는 3 M의 염화나트륨 용액을 경구투여한지 24시간이 지난 후의 혈액을 취하였기에 모든 군이 동일하였다. 신체의 항상성을 보여주는 결과로 소금의 섭취가 극단적이지 않고는 변화를 얻기 어려워 실험에 사용한 쥐들이 건강한 상태임을 확인할 수 있다.

Figure 4에서 소변의 결과는 6일의 결과를, 대변은 4일의 결과를 평균내어 나타내었다. 이들 데이터는 시간에 따른 데이터 중에서 전형적인 경향을 뚜렷하게 보였다. 3 M의 염화나트륨만을 첨가한 sodium군과 나트륨 치환성 고분자를 사료에 첨가하여 준 군과 비교를 하면 소변 내의 나트륨 농도가 확연히 감소한 것을 확인할 수 있다. 대변의 결과를 보면 나트륨 치환성 고분자를 섭취한 쥐들의 경우 대변 내의 나트륨 농도가 높은 것으로 보아 나트륨 치환성 고분자들은 인체에 흡수되지 않고 소화관 내에서 나트륨을 흡착한 후 대변으로 방출된 것으로 판단된다.

특히 Ca-carrageenan의 경우 거의 두 배에 가까운 대변 나트륨 농도를 보여 매우 효과적인 나트륨 치환을 추측할 수 있다. 아울러 Ca-tamarind, Ca-PSS, K-PSS 등도 뚜렷한 나트륨 치환 능력을 보여주고 있다. Figure 4에서 상대적으로 Ca-fucoidan의 치환율이 낮아보이는데, 이 결과는 상기 기술한 in vitro 나트륨 치환 실험의 결과와 일치하는 것이다.

온도 및 pH에 따른 나트륨 치환성 고분자의 특성. 인체 내의 장액과 위액 같이 pH의 차이가 발생했을 때 나트륨 치환성 고분자의 나트륨 치환 특성에 어떤 영향을 미치는지와 체온 조건에서는 어떤 영향을 미치는지를 확인하기 위해 인

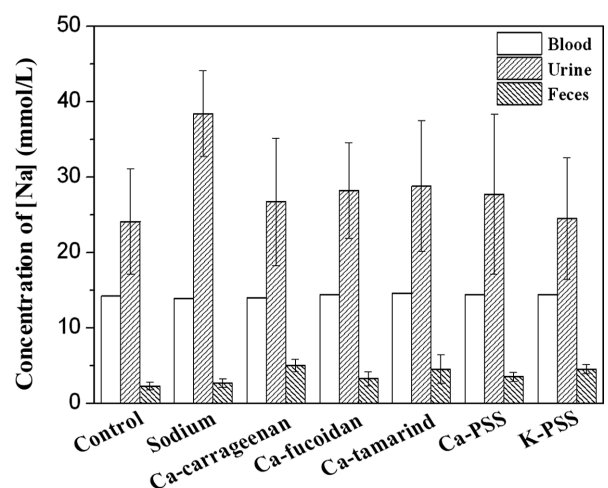


Figure 4. Na concentrations in blood, urine and feces when various polymers were taken. The control data was obtained without feeding sodium and a polymer, and the 'sodium' data was obtained with feeding sodium without a polymer.

Table 2. Effect of PH and Temperature on Na Absorption of Ca-PSS

Polymer	Polymer content (g/mL)	Medium	Temperature (°C)	[Na] reduction (mg/L)
Ca-PSS	0	Simulated gastric fluid	20	6320
			37	-
		Simulated intestinal fluid	20	3710
			37	-
	0.03	Simulated gastric fluid	20	5260
			37	5320
		Simulated intestinal fluid	20	2540
			37	2710
	0.05	Simulated gastric fluid	20	4870
			37	4910
		Simulated intestinal fluid	20	2320
			37	2350

공장액과 인공위액으로 상온과 체온인 25, 37°C에서 실험을 하였다(Table 2). 그 결과 비록 큰 차이는 아니지만 상온보다는 체온 조건에서 그리고 인공장액보다는 인공위액의 pH에서 조금 더 높은 나트륨 감소율을 보였다. 따라서 나트륨 치환성 고분자들은 장액과 위액의 pH와 체온에서도 치환능력을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다(Table 2). 이러한 결과는 이들 고분자들이 실제 신체 내에서 나트륨을 흡수하고 나트륨의 흡수를 감소시켜 다양한 나트륨 관련 질환을 예방할 수 있는 기능성 식품 첨가제로 개발 가능한 것을 보여준다.

결 론

본 연구에서 이온성 천연 폴리사카라이드 및 이온치환성 합성고분자를 나트륨 치환을 목적으로 생체에 적용할 수 있는지를 조사하였다. 이용 가능한 구조는 해리된 경우 음이온을 띠어 양이온을 치환할 수 있는 구조를 갖고 있어야 하는데, 예를 들어 황산기가 이에 속하며, 이러한 구조를 가지고 있으며 생체에 이용 가능한 천연고분자 및 합성고분자들을 조사하였다. 주로 난용성이며, 인체에 흡수되지 않는 양이온 치환성 고분자를 이용하여 치환되어 있는 금속염을 Na가 아닌 Ca와 K로 치환시켜준 후 이용하였다. 이온들의 정전기력의 차이와 이온들의 농도차이에 따라 이온교환이 일어나는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해 Ca와 K로 치환된 양이온성 고분자들이 나트륨을 치환할 수 있는 능력을 가지고 있음

을 확인하였다. 또한 *in vivo* 실험의 대변결과를 통해 생체 내의 나트륨을 양이온치환성 고분자들이 흡착하여 대변으로 배설되는 것 또한 확인하였다. 이들 나트륨 치환성을 갖는 고분자들이 체온과 위액, 장액의 pH에서도 동일한 나트륨 치환성을 가지는 것을 확인하였다. 이러한 경구투여 물질을 약물 또는 식품첨가물로 이용하여 소금을 많이 섭취하는 식습관을 갖는 사람들의 신체 내 나트륨의 농도를 낮추는 효과를 기대할 수 있다.

감사의 글: 본 연구과제는 농심그룹 율촌재단의 재원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Sato, T. Uehara, I. Yamaoka, K. Asagi, M. Kobayashi, and H. Kohri, US Patent 6369043 (2002).
2. R. Carini, M. G. Cesaris, G. Bellomo, and E. Albano, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **232**, 107(1997).
3. J. Ostrowska-Czubenko, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **1**, 4371 (1999).
4. S. M. Rithcie, K. E. Kissick, L. G. Bachas, S. K. Sikdar, C. Parikh, and D. Bhattacharyya, *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 3252 (2001).
5. J. M. Kim, S. K. Kim, G. T. Lim, B. R. Ryu, and K. C. Song, *Polymer(Korea)*, **13**, 493 (1989).
6. El-Sayed A. Hegazy, H. Kamal, N. Maziad, and A. M. Dessouki, *Nucl. Instrum. Meth.*, **151**, 386 (1999).
7. S. W. Cheon, J. H. Jun, and J. W. Rhim, *Membr. J.*, **13**, 191 (2003).
8. D. S. Kim, M. D. Guiver, T. I. Yun, S. Y. Nam, M. Y. Seo, S. J. Kim, H. S. Hwang, and J. W. Rhim, *J. Membr. Sci.*, **281**, 156 (2006).
9. B. S. Lee, S. K. Jung, and J. W. Rhim, *Polymer(Korea)*, **35**, 296(2011).
10. K. M. Mangold, C. Weidlich, J. Schuster, and K. Juttner, *J. Appl. Electrochem.*, **35**, 1293 (2005).
11. S. Lee, H. J. Kim, S. H. Chang, and J. Lee, *Soft Matter*, **9**, 472 (2013).
12. M. K. Lee, N.-O. Chung, and J. Lee, *Int. Pharm. Sci.*, **437**, 42 (2012).
13. H. R. Yoon and J. Lee, *Polymer(Korea)*, **36**, 455 (2012).
14. S. Hwang, B. K. Kwak, J. Lee, D. S. Kim, S. T. Chang, J. Park, and J. Lee, *Macromol. Res.*, **20**, 899 (2012).
15. H. Choi, M. K. Lee, and J. Lee, *J. Pharm. Sci.*, **101**, 2941 (2012).
16. Y. Fang, M. Rong, and L. He, *Biomed. Pharmacother.*, **52**, 459 (1998).