

Filtration Characteristics of H₂O-C₆H₁₂O₆ Solution at Cell Membrane Model of Kidney which Irradiated by High Energy X-Ray

In-Ho Ko,^{1,*} Jin-Dong Yeo²

¹Department of Radiological Technology, Cheju Halla University

²Department of Radiological Technology, Sarabol University

Received: February 25, 2020. Revised: April 23, 2020. Accepted: April 30, 2020

ABSTRACT

The filtration characteristics of H₂O-C₆H₁₂O₆ solution at cell membrane model in renal tubule which irradiated by high energy x-ray(linac 6MV) was investigated. The cell membrane model used in this experiment was a polysulfonated copolymerized membrane of m-phenylene-diamine(MPD) and trimesoyl chloride(TMC)-hexane. They were used to two cell membrane models(CM-1, CM-2). The cell membrane model composed of 0.5 wt% TMC-hexane solution(CM-2) had higher permeate flux(Jv) and rejection coefficient(R) than composed of 0.1 wt% TMC-hexane solution(CM-1). The permeate flux(Jv) and rejection coefficient(R) of H₂O-C₆H₁₂O₆ solution in two cell membrane models(CM-1, CM-2) were increased with increase of pressure drop and effective pressure difference. In this experiment range(pressure 1.5-4 MPa, temperature 36.5 °C), permeate flux(Jv) of H₂O solvent in irradiated membrane was found to be decreased about 20-30 times than non-irradiated membrane, permeate flux(Jv) and rejection coefficient(R) of H₂O-C₆H₁₂O₆ solution in irradiated membrane was found to be decreased about 2-13 times, about 4-6 times than non-irradiated membrane, respectively. The concentration increase of H₂O-C₆H₁₂O₆ solution at cell membrane model significantly was increased at rejection coefficient(R), was decreased at permeate flux(Jv). As the filtration of H₂O-C₆H₁₂O₆ solution in cell membrane model were abnormal, cell damages were appeared at cell.

Keywords: high energy x-ray, H₂O-C₆H₁₂O₆ solution, sulfonated copolymerized membrane(CM-1, CM-2)

I . INTRODUCTION

신장은 인체의 후 복막에 위치하고 있는 장기로서 피질과 수질, 신우로 기본적인 구조가 되어 있어 피질은 혈관이 풍부하고 세뇨관에서 오줌 생성이 되며 수질에서 오줌이 수집되고 신우를 통해서 요관으로 배설된다. 신장은 요관, 신장 동맥, 모세혈관, 신장 정맥, 신경, 지방조직 등 결합조직으로 구성되어 있으며 체액의 항상성 조절, 혈액량과 혈액의 전해질 조절, 산-염기 조절 등 생리적 대사 조절 기능을 지니고 있다. 신원(nephrons)에서 보우만 주머니가 둘러싸고 있는 사구체는 세뇨관에 모세

혈관이 감싸고 있어서 신장 동맥에서 모세혈관으로 동맥혈액이 이동하면서 영양분 중 간에서 생성된 요소, 물 등의 질소노폐물이 여과작용으로 오줌으로 배설하게 되고 다른 영양분들은 신장 정맥으로 이동하게 된다. 방사선을 인체의 신장에 조사하면 신장을 구성하는 신경, 혈관, 근육, 상피, 세뇨관 등의 각종 결합조직에 방사선이 통과하면서 물리·화학적 작용단계를 걸쳐서 최종적으로 생물학적 발현단계과정에서 급성장해와 만성장해로 나타낸다.^[1,2]

특히, 사구체 속에서 원형 모형의 세뇨관면적과 모세혈관의 혈류속도의 변화하면서 압력변화가 오

고 모세혈관의 혈액 속의 요소 등 질소노폐물이 근위세뇨관으로 이동하는 미세기공의 막 투과성 여과작용을 하고 원위세뇨관에서는 근위세뇨관에서 투과되어 나온 포도당 등 고분자 물질을 모세혈관을 통해서 미세기공의 막에서 역삼투작용으로 다시 재흡수 작용을 한다. 항 이뇨호르몬의 작용으로 동맥혈액의 이뇨작용을 방해하면서 오줌의 농도가 진해진다. 이러한 특징적인 생리적 대사과정에 이상이 생길 때 신장염, 신수증(hydronephrosis), 신부전(renal failure), 신장종양 등의 질병이 유발할 수가 있다. 인공신장투석기로 혈액의 여과작용을 함으로써 신부전을 치료할 수가 있어서 신장관련 질병치료가 향상되고 있다. 세뇨관의 상피세포막을 통한 용질 및 용액의 이동현상을 해석하기 위해서 막 이동 모델로 Kedem-Katchalsky model과 Pusch model을 이용하여 투과량과 용질배제도를 구할 수가 있다.^[3] 여기서 세뇨관의 상피세포막을 통해서 모세혈관으로 포도당과 같은 고분자의 이동은 생화학적으로 에너지인 ATP를 이용하여 능동수송으로 전달된다. 또한, 모세혈관의 혈액 속에 들어 있는 요소와 같은 용질은 고 농도에서 저 농도로 세뇨관의 상피세포막으로 이동하는 단순확산이며 수동수송으로 ATP가 사용되지 않는다. 세뇨관의 요소 함유량이 증가하면서 고농도 용액으로 변화되고 모세혈관의 혈액 속에 들어 있는 물 분자와 같은 용매는 삼투작용으로 세뇨관의 상피세포막을 통해서 이동하게 된다. 모세혈관과 세뇨관의 상피세포막 사이에서는 능동수송과 수동수송, 삼투현상이 발생하여 모세혈관의 혈액 속의 노폐물을 제거하여 배설한다.^[4]

Kedem-Katchalsky model은 막 이동 모델로서 모세혈관과 세뇨관의 상피세포막 사이에서 압력변화와 혈류속도의 변화로 유발되는 삼투현상과 투과특성을 나타내는 관계식으로서 아래와 같이 제시하였다.

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma \Delta \Pi) \quad (1)$$

$$J_s = (1 - \sigma)J_v C_s + \omega \Delta \Pi \quad (2)$$

$$\omega = (L_p/L_p - \sigma^2)L_p C_s \quad (3)$$

여기서

J_v : 총 부피 투과량

J_s : 막의 부피 투과량

ΔP : 양측 막의 압력차

L_p : 순수한 투과계수

C_s : 양측 막의 대수평균

$\Delta \Pi$: 양측 막의 삼투압차

σ : 반사계수

ω : 용질의 투과계수

상기 식은 막의 특성 변수인 L_p , σ , ω 에 의해서 결정된다. Kedem-Katchalsky model에서 총 부피 투과량의 역수($1/J_v$)와 용질 배제도의 역수($1/R$)사이의 선형관계를 Pusch가 유도한 모델의 식으로 아래와 같이 표현 할 수가 있다.

$$1/R = A + B(1/J_v) \quad (4)$$

$$R = 1 - (C_p/C_w) \quad (5)$$

여기서

C_w : 막의 표면 농도

C_p : 투과의 액체농도

상기 식(4)에서 상수 A, B를 Kedem-Katchalsky model을 통해서 아래와 같이 유도하여 구할 수가 있다.

$$A = 1/R_\infty = 1/\sigma \quad (6)$$

$$R = 1/R_\infty (L_p/L_p - R_\infty)L_p \Pi_f \quad (7)$$

여기서

Π_f : 공급액에서의 삼투압

R_{∞} : 무한 부피의 투과속도에 대한 용질 배제도

L_{π} : 막에서의 삼투도

균일한 막에서 비공질의 표면층이 용매와 용질에 의해서 용해될 때 화학적 전위차이가 발생하여 확산된다는 가정으로 용액 - 확산 모델을 Merten, Lonsdale, Riely가 제안했고 이 모델을 Pusch의 선형식으로 전개하면 아래와 같이 표현 할 수가 있다.

$$A = 1 \tag{7}$$

$$B = D_s K_s / \Delta X \tag{8}$$

여기서

D_s : 막 내부의 용질 확산계수

ΔX : 막의 두께

K_s : 막의 용질 용해도

신장세포의 방사선장해에 대한 실험적 연구는 현미경을 통한 조직 형태학적 연구보고가 대부분이며 모세혈관과 세뇨관 사이에서 발생하는 생리적 대사과정으로 혈액속의 노폐물을 신장세포가 여과하는 기능에 대한 방사선의 장해 연구가 미비한 실정이다.^[5]

이에 따라서 방사선이 조사된 신장의 세포막모델에서 혈액속의 노폐물이 여과되는 특성의 변화를 구명하기 위하여 신장세포막과 유사한 이온투과성막을 고분자로 제조한 후 이 생물 막에 방사선 조사 전, 후에 노폐물의 여과특성변화가 어떻게 변화하는가를 알아보기 위하여 실험을 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 실험재료

1.1 포도당 수용액 여과작용의 신장 세포막 모델의 구성

포도당수용액에서 압력 차이를 이용한 여과작용 특성을 측정할 수 있는 투과성 고분자막으로서 polysulfone지지막에다가 m-phenylene-diamine(MPD)

수용액을 혼합하여 침전시킨 후 유기성 용매인 trimesoyl chloride(TMC)를 hexane에 용해시킨 용액에 침적으로 계면중합이 발생하여 만든 고분자 복합막을 신장 세포 막 모델로 사용하였다. 고분자 복합막의 화학적 제조과정을 Fig. 1에 나타내었다.^[6]

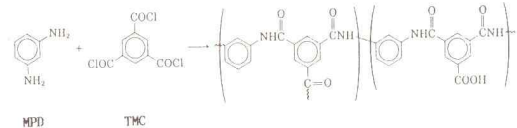


Fig. 1. Diagram of Chemical composition of composite membrane made by interfacial polymerization.

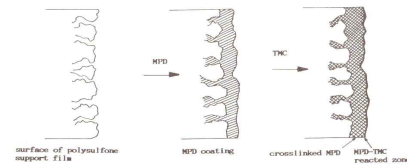


Fig. 2. Schematic diagram of composite membrane.

polysulfone 지지막에 m-phenylene-diamine(MPD) 수용액(1 wt%)과 0.1 wt% trimesoyl chloride(TMC)-Hexane 용액을 혼합해서 제조한 CM(composite membrane)-1과 m-phenylene-diamine(MPD) 수용액(1 wt%)과 0.5w t% trimesoyl chloride(TMC)-Hexane 용액을 혼합해서 제조한 CM(composite membrane)-2인 2가지의 고분자 복합막을 본 실험에 사용하였다. 고분자 복합막의 구조를 Fig. 2에 나타내었다.^[7]

1.2 포도당 수용액 여과작용의 신장 세포 모델의 구성

신장 세포(filter cell)의 재원은 세포막의 유효 면적은 30cm², 세포내부의 부피는 260cm³로 구성되어 있고 높은 내압성과 부식방지를 위해서 stainless steel 316을 사용하여 만든 회분세포(batch cell)에서 분사노즐(지름 =0.12cm)을 이용하여 여과 실험으로 인해서 발생하는 상부세포막의 농도의 분극을 최소화할 수가 있다. 하부세포막에 stainless steel net 5장을 설치해서 가압으로 인해 생기는 세포막의 손상을 방지 할 수가 있다.

1.3 실험기기

circulating heater(ACH-1, A-Line Co, Korea), stainless steel filter and cartridge filter(Yanaco Co., Japan), piston pump(GE, Co., U.S.A.), Feed tank, flow meter, wet-test meter, gas chromatography damper, 압력게이지, 시험세포, Linac 6MV X선 조사기(Clinac iX, Varian, California, USA)등을 사용했다.

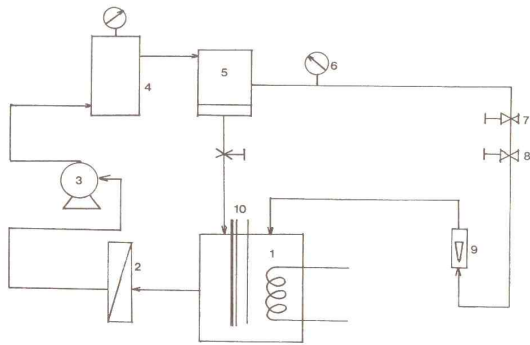


Fig. 3. Schematic diagram of filtration experimental system.(1. Feed tank, 2. Pre-filter, 3. Piston pump, 4. Damper, 5. Filter cell, 6. pressure gauge, 7. Relief valve, 8. Needle valve, 9. Flowmeter, 10. Temperature controller)

2. 실험 장치

본 실험에서는 방사선이 조사된 신장의 세포막 모델에서 오줌의 원노 구성성분 중 물과 포도당으로 혼합된 수용액에 대한 여과작용 특성의 변화에 어느 정도의 영향을 미치는가를 정량화하기 위하여 Fig. 3과 같은 실험장치를 제작하여 실험하였다.

3. 실험 방법

3.1. 포도당 수용액의 여과작용 장치

본 실험에서는 원료탱크에서 방출된 공급액을 pre-filter로 전 여과 처리하고 piston pump로 공급액의 압력을 증가시키고 needle valve로 압력조절을 하였다. 고압으로 인하여 발생하는 진동을 완화하기 위해서 damper를 사용했다. 일정한 압력의 공급액이 신장 세포막으로 유입되고 신장세포막모델을 투과한 수용액의 압력은 pressure gauge로 측정하고 투과량은 flowmeter로 각각 분석하였다. 이 때 투과한 속도는 측정된 투과물질의 질량에다가 밀도를

보정하여 구할 수가 있으며 원료용액과 투과용액의 농도분석으로 gas chromatography를 이용하였다.

3.2. 포도당 수용액의 여과 특성실험

신장세포막 모델에서 양단간 압력차의 변화에 따른 공급액의 투과량, 배제율의 변화는 일정한 온도, 농도 및 압력에서 정상상태에 도달 할 때 측정하였다. 투과량과 배제율은 용매인 물과 용질인 포도당의 혼합수용액 농도, 온도, 압력과 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)의 물리화학적 특성에 의해서 결정된다. 신장의 세포막모델의 온도는 36.5 °C로 고정한 후에 공급액의 온도는 20~21 °C로 고정하고 포도당용액의 농도범위를 1~2 wt%로 하고 조작압력범위를 1.5~4 MPa로 하며 각각 1 MPa 단위로 총 부피투과 플럭스와 용질의 배제율을 측정하였다. 세포막에서 순수 물 분자의 투과량을 일정한 온도로 20 °C로 하고 조작압력범위를 1.5~4 MPa로 하여 각각 1 MPa 단위로 압력의 변화에 따른 총 부피투과 플럭스를 통해서 측정된 후 순수투과 계수를 구할 수가 있다.

III. RESULT

1. 수용액의 여과특성

신장의 세포막모델을 사용하여 오줌의 원노 성분인 포도당 수용액을 단일액체(물)일 때와 혼합액체(포도당수용액)일 때 각각 압력차의 변화에 따른 배제율, 투과량을 알아보기 위하여 신장의 세포막 모델의 온도는 36.5 °C로 고정한 후에 공급액의 온도도 20~21 °C로 고정하고 조작압력범위를 1~4 MPa로 하며 각각 1 MPa 단위로 측정된 결과 압력차가 증가할 수록 물과 포도당 수용액의 투과도는 증가하였고 물과 포도당 수용액의 배제율도 증가하였다.

이는 포도당 수용액이 단일액체(물)일 때와 혼합액체(포도당수용액)일 때 각각 압력차의 변화가 신장 세포막에 의한 포도당 수용액의 여과투과성 전달의 변화를 줄 수 있는 에너지를 제공하였기 때문이다.

1.1 방사선을 조사하지 않은 신장세포막 model의 고정온도 36.5 °C에서 포도당 수용액의 여과 투과 특성

(1) 단일액체(물)의 순수투과분석

신장의 세포막모델에 대한 포도당수용액(혼합액체)의 여과투과 특성을 분석하기 전에 단일액체(물)에 대한 순수투과실험에서 압력차가 얼마나 영향을 끼치는가를 알아보았다.

Fig. 4에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 물 분자의 투과도 변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 $0.764 \times 10^{-4} \sim 2.028 \times 10^{-4}$ 과 $2.292 \times 10^{-4} \sim 8.112 \times 10^{-4}$ [cm/s]이며 CM-2가 CM-1보다 물 분자의 투과도가 4배정도 크다는 것을 알 수가 있으며 CM-1, CM-2 모두 압력차가 증가할수록 투과도가 증가함을 알 수가 있었다.

이는 신장세포막 모델에서 물 분자의 투과도가 CM-2가 CM-1보다 크다는 것은 신장세포의 여과기능이 CM-2가 CM-1보다 크다는 것을 나타내고 있었다.

(2) 혼합액체(포도당 수용액)의 여과작용에 대한 영향

신장의 세포막모델에 대한 1 wt% 혼합액체(포도당 수용액)의 여과투과 특성을 분석한 결과를 Fig. 5로 나타내었다.

Fig. 5에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 배제계수(R)변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 0.04 ~ 0.0778과 0.068 ~ 0.115 이며 압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 배제계수의 변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약 1.5배로 나타내었다.

압력차가 증가할수록 배제계수의 값은 증가하였다. 2 wt% 혼합액체(포도당 수용액)의 여과투과 특성을 분석한 결과를 Fig. 6로 나타내었다.

Fig. 6에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 배제계수(R)변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 0.043 ~ 0.079과 0.068

~ 0.125 이며 압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 배제계수의 변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약 1.5배로 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보는바와 같이 압력차가 증가 할수록 배제율이 증가하여 세노관내부로 투과액의 용질(포도당)농도는 감소하고 세노관 외부의 막상부의 용질(포도당)농도는 증가하여 결국에는 신장세포막을 용질(포도당)이 투과를 못하고 용매인 물의 투과도가 증가하는 것으로 사료된다. 이는 압력차가 클수록 분자량이 작은 물(용매) 분자가 분자량이 큰 포도당(용질)보다 신장 세포에 투과가 쉬어 짐을 알 수가 있었다.

Fig. 7에서 1 wt% 혼합액체(포도당수용액)의 여과투과 특성을 분석한 결과 유효압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당 수용액)의 총 부피투과 플럭스(J_v)변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 $0.053 \times 10^{-4} \sim 0.228 \times 10^{-4}$ 과 $0.71 \times 10^{-4} \sim 2.703 \times 10^{-4}$ [cm/s] 이며 유효압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 총 부피투과 플럭스(J_v)변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약 13배로 나타내었다.

유효압력차($\Delta P - \Delta \pi$)가 증가할 수 록 총 부피투과 플럭스(J_v)의 값은 증가하였다.

2 wt% 혼합액체(포도당수용액)의 여과투과 특성을 분석한 결과를 Fig. 8로 나타내었다.

Fig. 8에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 총 부피투과 플럭스(J_v)변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 $0.042 \times 10^{-4} \sim 0.191 \times 10^{-4}$ 과 $0.615 \times 10^{-4} \sim 2.483 \times 10^{-4}$ [cm/s] 이며 압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 총 부피투과 플럭스(J_v)의 변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약 13배로 나타내었다.

용액의 삼투압($\Delta \pi$)이 클수록 용질의 농도도 커지고 그에 따라서 유효압력차($\Delta P - \Delta \pi$)도 감소하는데 이는 총 부피투과 플럭스가 감소하는 요인으로 나타내었다.

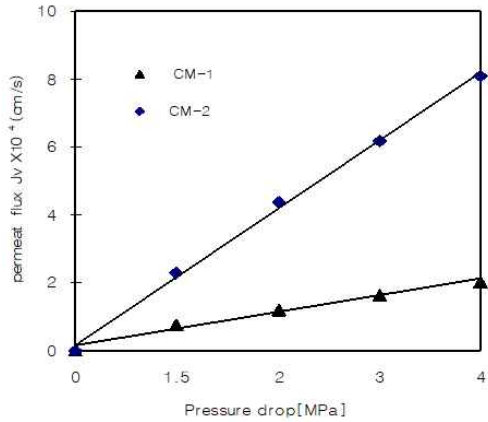


Fig. 4. Effect of pure water permeability by non-irradiation.

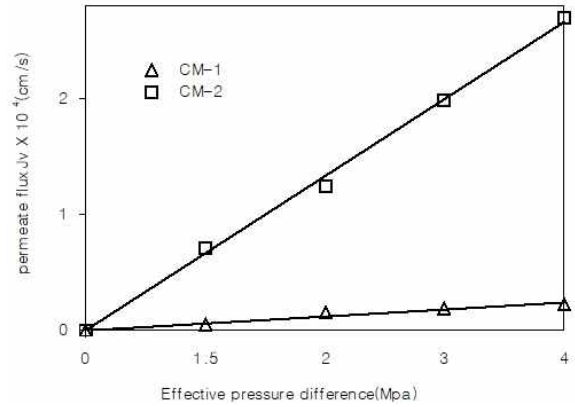


Fig. 7. Effect of effective pressure difference($\Delta P - \Delta \pi$) and J_v at 1 wt% glucose solution by non-irradiation.

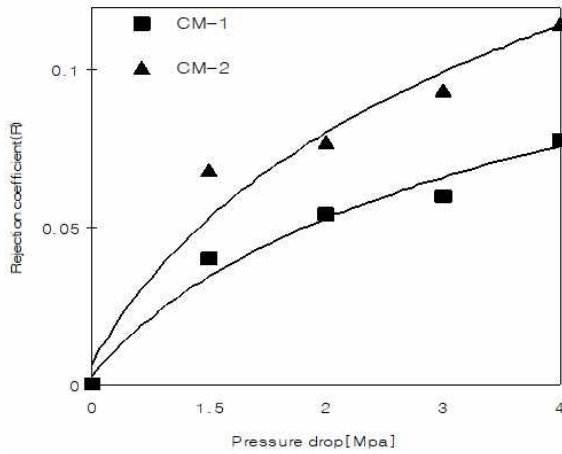


Fig. 5. Effect of pressure drop and Rejection at 1 wt% glucose solution by non-irradiation.

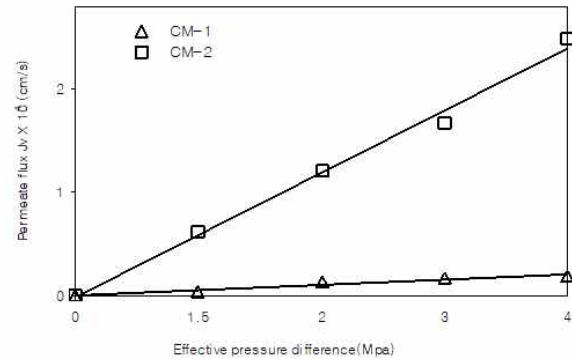


Fig. 8. Effect of effective pressure difference($\Delta P - \Delta \pi$) and J_v at 2 wt% glucose solution by non-irradiation.

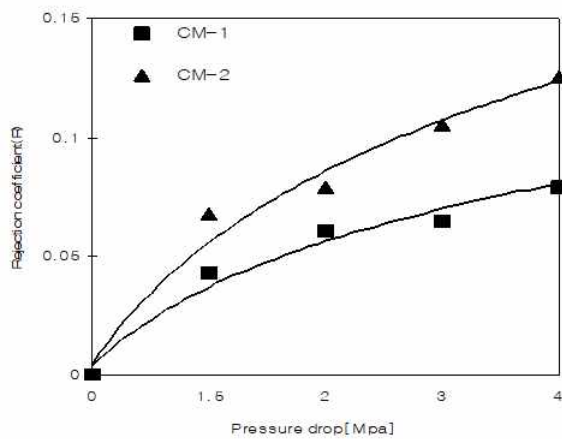


Fig. 6. Effect of pressure drop and Rejection at 2 wt% glucose solution by non-irradiation.

1.2 5 Gy로 조사한 신장세포막 model의 고정온도 36.5 °C에서 포도당 수용액의 여과투과 특성

(1) 단일액체(물)의 순수투과분석

5 Gy로 조사한 신장의 세포막모델에 대한 혼합액체(포도당 수용액)의 여과투과 특성을 분석하기 전에 단일액체(물)에 대한 순수투과실험에서 압력차가 얼마나 영향을 끼치는가를 알아보았다.

Fig. 9에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 물 분자의 투과도 변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 $0.025 \times 10^{-4} \sim 0.083 \times 10^{-4}$ 과 $0.113 \times 10^{-4} \sim 0.4 \times 10^{-4}$ [cm/s]이며 CM-2가 CM-1보다 물 분자의 투과도가 약 5배 정도 크다는 것을 알 수가 있으며

CM-1, CM-2 모두 압력차가 증가할수록 투과도가 증가함을 알 수가 있었다.

이는 신장세포막 모델에서 물 분자의 투과도가 CM-2가 CM-1보다 크다는 것은 신장세포의 여과기능이 CM-2가 CM-1보다 크다는 것을 나타내고 있었다.

(2) 혼합액체(수용액)의 여과작용에 대한 영향

5 Gy로 조사한 신장의 세포막모델에 대한 1 wt% 혼합액체(포도당수용액)의 여과특성을 분석한 결과를 Fig. 10으로 나타내었다.

Fig. 10에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 배제계수(R)변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 0.0064 ~ 0.0205과 0.021 ~ 0.039 이며 압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 배제계수의 변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약1.9배~3.3배로 나타내었다.

압력차가 증가할수록 배제계수의 값은 증가하였다. 2 wt% 혼합액체(포도당수용액)의 여과특성을 분석한 결과를 Fig. 6로 나타내었다. Fig. 11에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 배제계수(R)변화는 여과성고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 0.0135 ~ 0.0354과 0.021 ~ 0.055 이며 압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 배제계수의 변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약1.5배로 나타내었다. Fig. 10와 Fig. 11에서 보는 바와 같이 압력차가 증가할수록 배제율이 증가하여 세뇨관내부로 투과액의 용질(포도당) 농도는 감소하고 세뇨관 외부의 막상부의 용질(포도당) 농도는 증가하여 결국에는 신장세포막을 용질(포도당)이 투과를 못하고 용매인 물의 투과도가 증가하는 것으로 사료된다.

이는 압력차가 클수록 분자량이 작은 물(용매) 분자가 분자량이 큰 포도당(용질)보다 신장 세포에 투과가 쉬어 짐을 알 수가 있었다. Fig. 12에서 1 t% 혼합액체(포도당수용액)의 여과특성을 분석한 결과 유효압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 총 부피투과 플럭스(Jv)변화는

여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 $0.023 \times 10^{-4} \sim 0.083 \times 10^{-4}$ 과 $0.094 \times 10^{-4} \sim 0.358 \times 10^{-4}$ cm/s] 이며 유효압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 총 부피투과 플럭스(Jv)변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약 4배로 나타내었다. 유효압력차($\Delta P - \Delta \pi$)가 증가할수록 총 부피투과 플럭스(Jv)의 값은 증가하였다. 2 wt% 혼합액체(포도당수용액)의 여과특성 분석한 결과를 Fig. 13로 나타내었다.

Fig. 13에서 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 혼합액체(포도당수용액)의 총 부피투과 플럭스(Jv)변화는 여과성 고분자막(CM-1, CM-2)에서 각각 $0.022 \times 10^{-4} \sim 0.073 \times 10^{-4}$ 과 $0.06 \times 10^{-4} \sim 0.189 \times 10^{-4}$ [cm/s] 이며 압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 용매(물)에 대한 용질(포도당)의 총 부피투과 플럭스(Jv)의 변화를 알 수가 있었으며 CM-2가 CM-1보다 약 3배로 나타내었다.

용액의 삼투압($\Delta \pi$)이 클수록 용질의 농도도 커지고 그에 따라서 유효압력차($\Delta P - \Delta \pi$)도 감소하는데 이는 총 부피투과 플럭스가 감소하는 요인으로 나타내었다.

본 실험을 통해서 종합해 보면 신장의 세포막모델인 여과성 고분자막(CM-2)은 여과성 고분자막(CM-1)보다 여과기능이 높아짐을 알 수가 있는데 이는 CM-2이 CM-1보다 정상적으로 신장기능이 높아지거나 신체기능의 이상으로 다뇨 등으로 높아짐을 나타내는 것이다.

신장의 세포막모델에 대한 압력차(1.5~4 MPa)에 따른 물 분자의 투과도 변화는 여과성 고분자막(CM-1)에서 방사선을 조사할 때가 안 할 때보다 약 24~30배 정도 낮아짐을 알 수가 있었고 여과성 고분자막(CM-2)에서도 방사선을 조사할 때가 안 할 때보다 약 20배 정도 낮아짐을 알 수가 있었다.

이는 방사선조사로 물 분자의 투과도가 약 20 ~ 30배 정도 감소한다는 것으로 그 만큼 신장세포의 여과 기능을 저하시킴을 알 수가 있었다.

혼합액체(포도당수용액)의 여과특성을 분석한 결과 혼합액체(포도당수용액)의 압력차에 (1.5~4 MPa)의 변화에 따른 배제계수(R)에서는 방사선

을 조사할 때가 안 할 때보다 약 4 ~ 6배 정도 낮아짐을 알 수가 있었고 이는 방사선조사가 신장세포막의 액체여과를 감소시키기 때문이고 혼합액체(포도당수용액)의 유효압력차(1.5~4 MPa)의 변화에 따른 총 부피투과 플럭스계수(J_v)변화에서는 방사선을 조사할 때가 안 할 때보다 약 2 ~ 13배 정도 낮아짐을 알 수가 있다.

이는 방사선조사가 신장세포막의 액체여과를 감소시키기 때문에 액체가 세뇨관에 유입되는 것을 방해하여 방사선에 의한 신장장해를 증가하는 요인으로 작용한다고 볼 수가 있었다.

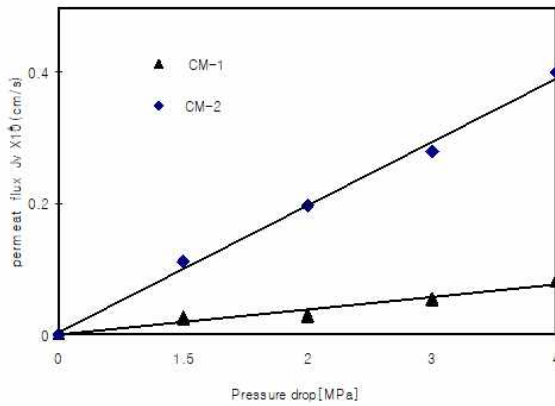


Fig. 9. Effect of pure water permeability by irradiation.

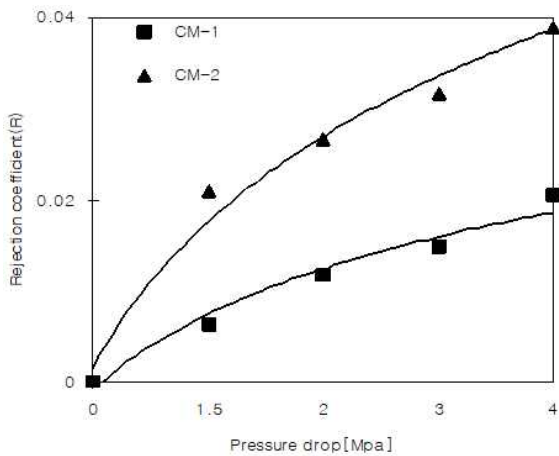


Fig. 10. Effect of pressure drop and Rejection at 1 wt% glucose solution by irradiation.

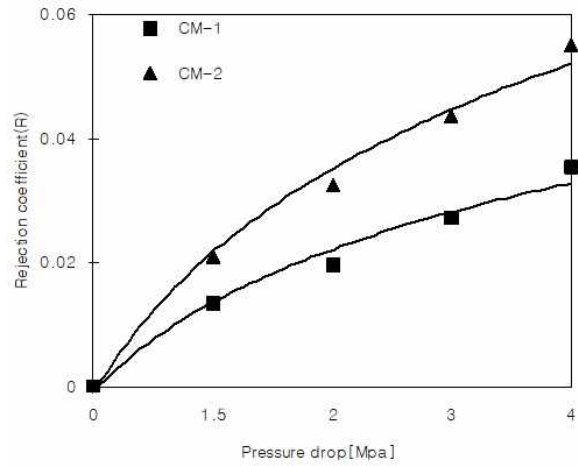


Fig. 11. Effect of pressure drop and Rejection at 2 wt% glucose solution by irradiation.

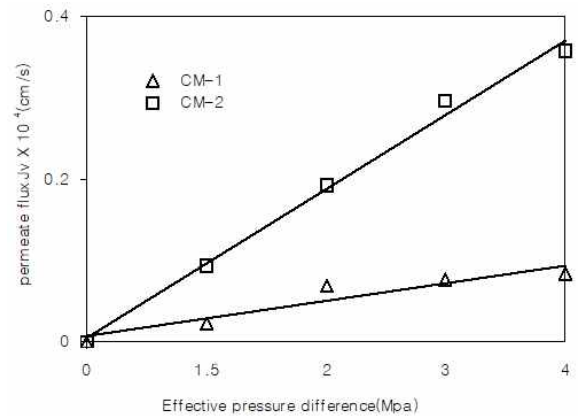


Fig. 12. Effect of effective pressure difference($\Delta P - \Delta \pi$) and J_v at 1 wt% glucose solution by irradiation.

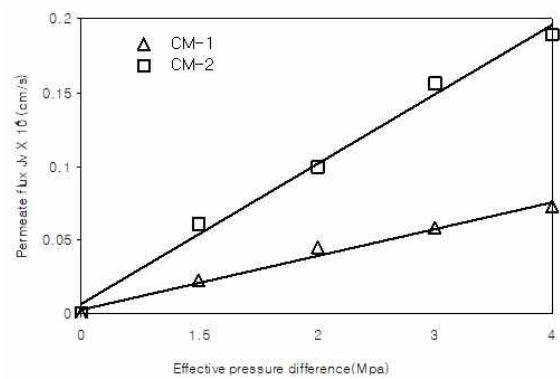


Fig. 13. Effect of effective pressure difference($\Delta P - \Delta \pi$) and J_v at 2 wt% glucose solution by irradiation.

IV. DISCUSSION

고분자막에 의한 혼합액체(용질과 용매)의 여과 공정은 작은 분자의 용매와 큰 분자의 용질사이의 압력의 차에 따라서 고분자막의 투과도와 배제율의 차이로 나타내고 그로 인하여 고분자막을 통과하는 혼합액체(용질과 용매)의 여과율의 차이로 나타내게 된다. 이것은 인지질과 단백질과 같은 생체 고분자로 구성된 세포막에서도 나타내어서 모세혈관과 접촉하고 있는 세뇨관의 세포막에서도 물/포도당의 압력차에 따른 투과도와 배제율의 차이를 생리적 대사로 적절히 조절하여 인체에서 필요한 영양분(단백질, 아미노산, 포도당 등, 무기물 등)을 세뇨관에서 재흡수로 얻고 불필요한 요소 등 질소 노폐물과 물을 오줌으로 배출함으로써 정상적인 신장세포로서의 역할을 할 것으로 사료된다.

신장의 세포막모델인 여과성고분자막(CM-1, CM-2)에서 혼합액체(포도당 수용액)의 여과기능을 구명하기 위해서는 이론적 및 실험적 접근 방법이 필요하며 인체의 체온인 36.5 °C로 고정온도로 하여 혼합액체(포도당 수용액)은 세뇨관과 모세혈관으로부터 생긴 압력차로 발생한 투과도와 배제율의 차로 포도당수용액의 여과작용특성에 대한 연구가 되고 있다.

Lee^[8]등은 polysulfone 재질의 평판막(MWCO=20,000)과 공중사형막(MWCO=30,000)을 사용하여 막 내전속도, 투과압력, 온도, PVA농도 등의 변화에 따른 한외여과를 살펴본 결과 polysulfone 재질의 막을 통해 PVA의 한외여과과정은 겔층형성에 따른 투과저항기전이 작용하였고 반면 공중사형막의 경우는 한계투과량 조건하에서 겔층의 모델예측을 할 수없는 상향 한계투과량 현상이 있다는 보고 Kim^[9]등은 혈액투석환자에서 MF-BIA를 이용하여 투석 전·후의 총채액량(TBW) 및 세포내액(ICW) 혹은 세포외액(ECW)의 변화를 측정된 결과 당뇨병성 혈액투석환자에서는 비당뇨군과는 달리 적은 수분 제거량 혹은 적정 건체중에 이르지 않은 상황에서 세포내 수분이 세포외로의 이동이 발생한다는 보고 Byun^[10]등은 한외여과막(MWCO, 5,000)으로 gelatin 및 bovine serum albumin(BSA)용액을 여과를

할 때 온도가 증가하면 gelatin 용액의 투과유속도 증가하였고 BSA용액은 60 °C에서 투과유속이 가장 높았고 30 ~ 50 °C 범위에서 온도의 영향을 안 받았고 투과압력 30 psi에서 농도가 증가 할수록 gelatin 및 bovine serum albumin(BSA)의 투과유속이 감소했다는 보고 Nam^[11]등은 폴리벤즈이미다졸의 용매저항성 나노여과막을 이용하여 투과도 실험을 분리막의 종류에 따라서 2~5 bar을 적용하여 물, 에탄올, 벤젠, N,N-dimethylacetamide(DMAc), n. methyl-2-pyrrolidone(NMD) 등 다섯 가지 용매에 의해서 실시한 결과 각각 초기플럭스는 6,500 L/m²·h(water, 2 bar), 720 L/m²·h(DMAc, 5 bar), 185 L/m²·h(benzene, 5 bar) 132 L/m²·h(NMD, 5 bar), 65 L/m²·h(ethanol, 5 bar)를 나타내었다는 연구보고가 있다. 본 실험은 polysulfone 지지막에다가 m-phenyl enediamine(MPD) 수용액을 혼합하여 침전시킨 후 유기성 용매인 trimesoyl chloride(TMC)를 hexane에 용해시킨 용액에 침적으로 발생한 계면중합의 고분자 복합막(CM-1, CM-2)을 신장 세포 막 모델로 사용하여 혼합액체(포도당 수용액)의 여과기능을 구명하기 위해서 혼합액체(포도당 수용액)의 압력차, 유효압력차의 변화에 따른 투과도, 배제율의 변화를 물/포도당 여과기능에 의한 수용액분자의 전달을 알아보는 실험이었다.^[12-14]

V. CONCLUSION

방사선을 조사한 신장 세뇨관의 고분자막(세포막 모델)은 방사선을 조사한 한 신장 세뇨관의 고분자막(세포막모델)보다 모세혈관속의 혼합액체(포도당 수용액)의 분자가 압력차, 유효압력차에 따른 총 부피투과 플럭스(Jv), 배제계수(R)의 차가 정상보다 낮게 발생하여 세뇨관 세포가 비정상적으로 나타내는 여과과정을 실험적 결과를 통해서 추론하게 되었다. 이러한 실험적 결과를 종합해 보면 방사선 5 Gy의 조사로 신장 세뇨관의 고분자막(세포막 모델)이 형태학적으로나 기능학적으로 변화를 가져와서 물/포도당 혼합액체(수용액)의 분자가 압력차, 유효압력차에 따른 투과도, 배제율의 차가 비정상적으로 발생하여 결국에는 세뇨관의 세포에 비정상적으로 수용액(용매와 용질)분자들이 여과 전달 되는 과정을 나타내었다.

이는 액체의 압력차가 세뇨관의 세포막을 여과 통과하는 차이를 나타내는 동력으로 작용하는데 방사선조사로 인해 세포막의 기능이 비정상적으로 되어서 신장 세포에 기능적 장애를 발생하여 다양한 형태의 세포장해로 인해서 신부전, 신장염 등을 발생할 것으로 사료된다.

Reference

- [1] F. H. Hirsch, "Differential Effects of Nephrotoxic Agents on Renal Transport and Metabolism by Use of In Vitro Techniques," *Environmental Health Perspectives*, Vol. 15, No. 1, pp. 88-99, 1976. <http://dx.doi.org/10.2307/3428391>
- [2] Y. K. Kim, Y. H. Kim, "Differential Effect of Ca²⁺ on Oxidant-Induced Lethal Cell Injury and Alterations of Membrane Functional Integrity in Renal Cortical Slices," *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 141, No. 2, pp. 607-616, 1996. <http://dx.doi.org/10.1006/taap.1996.0327>
- [3] K. Splegler, S. Kedem, "non equilibrium thermodynamic model on filter membrane by change of concentration and pressure of solvent and solute," *Chemical Engineering Progressive*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-11, 1963.
- [4] S. Weller, W. A. Steiner, "Filtration on pressure change in solution using polysulfone mixed membrane," *Chemical Engineering Progressive*, Vol. 46, No. 11, pp. 585, 1950.
- [5] H. C. Lee, J. Y. Park, "Advanced water treatment of high turbidity source by hybrid process of ceramic microfiltration and activated carbon adsorption," *Journal of Membrane Science*, Vol. 18, No. 3, pp. 191, 1996.
- [6] R. E. Kesting, *Synthetic Polymer Membranes*, 1st Ed., McGraw Hill Co., New York, pp. 87-88, 1977.
- [7] P. M. Bungay, *Synthetic Polymer Membranes: Science Engineering and Application*, 2nd Ed., D. Reidal Publishing Company., New York, pp. 234-236, 1985.
- [8] S. H. Lee, Y. C. Lee, "Ultrafiltration characteristics of poly(vinyl alcohol) solution and theoretical investigations," *Journal of Membrane Science*, Vol. 6, No. 4, pp. 203-212, 1996.
- [9] H. W. Kim, S. N. Jung, Y. S. Shin, D. C. Jin, "Changes of intracellular water by hemodialysis in diabetic and non-diabetic ESRD patients : analysis with MF-BIA," *Kidney Research and Clinical Practice*, Vol. 28, No. 6, pp. 603-609, 1996.
- [10] H. K. Byun, Y. J. Jeon, S. K. Kim, "Characteristics on the permeation of protein through membrane of ultrafiltration reactor," *Journal of Membrane Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 42-49, 1998.
- [11] S. Y. Nam, M. K. Jeon, "Preparation and characterization of organic solvent-resistant polybenzimidazole on membranes," *Applied Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 420-426, 2017.
- [12] H. Fugita, A. Kishimoto, K. Matsumoto, "characteristics of moving molecular in membrane," *Translation Faraday Society*, Vol. 56, No. 6, pp. 424, 1960.
- [13] S. A. Stern, S. M. Fang, H. L. Frisch, "free volume model for permeation changes on pressure change of gas," *Journal of Polymer Science*, Vol. 2, No. 10, pp. 201, 1972.
- [14] I. H. Ko, J. D. Yeo, "Separation permeation characteristics of N₂-O₂ gas in air at cell membrane model of skin which irradiated by high energy election," *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 13, No. 2, pp. 261-270, 2019. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.7742>

고에너지 엑스선을 조사한 신장의 세포막모델에서 포도당수용액 ($H_2O-C_6H_{12}O_6$)의 여과작용특성

고인호,^{1*} 여진동²

¹제주한라대학교 방사선과

²서라벌대학교 방사선과

요 약

본 논문에서는 고에너지 엑스선(6MV X선)을 조사한 세뇨관의 세포막 모델에서 오줌의 원료구성성분인 포도당 수용액($H_2O-C_6H_{12}O_6$)의 압력차에 따른 여과작용특성에 대하여 연구하였다. 이 실험에 사용한 세포막 모델은 polysulfone 지지막에다가 m-phenylene-diamine(MPD)과 trimesoyl chloride(TMC)- hexane을 계면중합으로 만들어진 여과성 고분자 복합막을 사용하였다. 0.5 wt% TMC- hexane 용액으로 만들어진 여과성막(CM-2)은 0.5 wt% TMC- hexane 용액으로 만들어진 여과성막(CM-1)보다도 총 부피투과플럭스(J_v)와 배제계수(R)가 매우 높다. 압력차(1.5~4MPa)와 36.5°C에서 방사선을 조사한 세뇨관의 고분자 막(세포막모델)은 포도당수용액($H_2O-C_6H_{12}O_6$)에서 총 부피투과플럭스(J_v)와 배제계수(R)가 비 조사된 세포막모델보다 각각 약 2 ~ 13배, 4 ~ 6배 정도 감소되었다. 세포막모델에서 포도당수용액($H_2O-C_6H_{12}O_6$)의 농도가 증가하면 배제계수(R)가 증가하고 총 부피투과플럭스(J_v)는 감소하였다. 결국 방사선조사로 인해서 세뇨관의 세포막에서 포도당수용액($H_2O-C_6H_{12}O_6$)의 여과기능이 비정상적으로 되어 세포장해가 발생하게 되었다고 사료됐다.

중심단어: 고에너지엑스선, $H_2O-C_6H_{12}O_6$ 수용액, 폴리술폰화 혼성중합막 (CM-1, CM-2)

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	고인호	제주한라대학교 방사선과	교수
(공동저자)	여진동	서라벌대학교 방사선과	교수
(교신저자)	고인호	제주한라대학교 방사선과	교수