

인공 대수층내에서 발생하는 해수침투의 지화학적 분석 및 병원성 지표 미생물의 사멸 특성

이소정 · 박헌주 · 성은혜 · 소명호 · 김창균[†]

인하대학교 환경공학과

(2007년 9월 4일 접수, 2008년 3월 10일 채택)

Geochemical Analysis and Fates of Pathogenic Indicating Bacteria on Seawater Intrusion in a Sand Box Model

So-Jung Lee · Hun-Ju Park · Eun-Hae Sung · Myung-Ho So · Chang-Gyun Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Inha University

ABSTRACT : In this study, seawater intrusion was assessed employing a kind of biological parameters such as *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* while lab-prepared reclaimed water was recharged to prevent seawater intrusion. Chemical factors indicating seawater intrusion such as Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ and specific conductivity were also simultaneously investigated where an ion exchange between a matrix in artificial aquifer and cations in solution was estimated. Both *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* were shown to be very sensitive against degree of salinity during saline water intrusion. *Enterococcus faecalis* more strongly resisted against salinity than that of *Escherichia coli*. The ratio of *Enterococcus faecalis* divided by *E. coli* in the process of seawater intrusion increased up to more than 50~100 times in 18 hours whereas *E. coli* was died off more than 90% during pumping and recharge rate kept at 10 mL/min. However, when the rates of both recharge and pumping was kept at 5 mL/min, *Enterococcus faecalis* / *Escherichia coli* was sustained in the range of 2.5~5.0, while *Escherichia coli* showed diminished death rate. Chemical factors such as Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ and specific conductivity showed more than 0.9 of high correlation each other well explaining the degree of seawater intrusion. The degree of ion exchange between artificial aquifer and saline water can be efficiently interpreted by both minus ΔNa , ΔMg variation and positive ΔCa variation.

Key Words : Seawater Intrusion, Artificial Recharge, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*

요약 : 본 연구에서는 해수침투를 방지하기 위해 실험실에서 제조한 하수 방류수를 이용하였으며, 각각의 함양 및 양수 조건에 따른 해수침투 진행 과정을 지표미생물인 *Escherichia coli*와 *Enterococcus faecalis*를 이용하여 평가하였다. 해수침투의 대표적인 화학적 지표인자인 Cl⁻와 Ca²⁺, Mg²⁺ 및 비전도도값 등은 해수에 의해 인공 대수층내의 지질매체와 양이온간의 이온 교환이 발생하는 수조 내에서 동시에 분석되었다. 지표 생물로 이용된 *Escherichia coli*와 *Enterococcus faecalis* 모두 해수침투에 따라 증가하는 염분 농도에 민감하게 반응하였으며, *Enterococcus faecalis*의 경우 *Escherichia coli* 보다 염분 농도에 더 큰 저항을 보였다. 시간에 따른 *Enterococcus faecalis* / *Escherichia coli* 값은 함양과 양수가 10 mL/min으로 동일할 경우에는 *E. coli* 초기 주입 농도가 90% 이상의 사멸을 보이는 18시간 이후에 50~100배 이상으로 증가하였다. 그러나 함양과 양수가 5 mL/min의 경우에는 *E. coli*의 완만한 사멸율로 인해 운전 시간 내내 2.5~5.0 사이의 일정한 비를 유지하였다. 또한 본 연구에서 분석된 염소 이온과 비전도도, Ca²⁺ 및 Mg²⁺농도는 서로간에 0.9 이상의 높은 상관관계를 나타내었으며, 인공 해수가 인공 대수층내로 침투되면서 일어나는 양이온 교환 반응의 진행 여부는 음의 ΔNa , ΔMg 값과 양의 ΔCa 의 관측을 통해 효과적으로 확인할 수 있었다.

주제어 : 해수침투, 인공 함양수, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*

1. 서론

해수침투는 전 세계적으로 연안 및 도서지역에서 발생하는 주요 지하수 오염원 중 하나로서 일반적으로 과도한 지하수 개발에 의해 진행된다. 해수침투가 발생되면 원활한 지하수 공급이 제한되고 해수에 연안 대수층이 장기간 노출되어 그 지역의 생물종 및 지질매체의 화학적 조성이

변하게 된다. 연간 1~5 m의 느린 속도로 이동하는 지하수의 특성상 이러한 피해는 쉽게 눈에 띄지 않고 서서히 진행되며 정화 및 오염방지에도 상당한 어려움이 뒤따른다.¹⁾ 따라서 지하수의 의존도가 높은 연안 및 도서지역의 철저한 수질 모니터링이 요구되며, 이미 오염된 지역에는 각 대수층별 수리 지질학적 조건에 알맞은 해수침투 방지 대책을 적용하여야 한다.

우리나라의 경우, 서-남해의 일부 연안지역 및 제주도에 서 해수침투가 보고되었으며, 국내의 일부 전문 기관에 의해 부분적으로 염수의 침투에 대한 조사 및 방지 기술 개

[†] Corresponding author
E-mail: cgk@inha.ac.kr
Tel: 032-860-7561

Fax: 032-865-1425

발이 추진되고 있다.²⁾ 하지만 미국이나 호주 등 국외의 사례처럼 장기적으로 관측망 모니터링을 통한 해수침투의 확산 예측 및 해수에 노출된 대수층의 복원 등의 체계적인 연구가 수행되지는 못하고 있다. 따라서 해수침투 발생 지역의 수리 지질, 지구화학 특성의 전반적인 이해와 국가적 차원의 지속적인 관심이 요구되고 있다.

본 연구에서는 해안 대수층 내에서 발생하는 해수침투 지역을 모사한 인공 대수층을 이용하여 지구-화학적 분석 이외에 대수층의 함양에 이용되는 인공 하수 방류수내의 잔류 병원성 미생물의 거동 특성도 함께 평가하였다. 해수 침투의 방지방안 중 하나인 하수 방류수의 함양정 주입을 통해 염수의 침투를 방지하는 인공 재충진 방안이 본 연구에 적용되었으며, 주입된 하수 방류수는 인천 S하수처리장의 하수 방류수의 이온 분석 결과를 토대로 제조된 인공 함양수를 사용하였다. 또한 본 연구에서는 하수 방류수의 재이용과 관련하여 지하수원으로서 적합성 여부를 제고하기 위해 Cabelli³⁾ 등의 연구를 통해 건강 위해도와의 양호한 양(陽)의 관계가 이미 확인된 지표 미생물인 *Escherichia coli*(ATCC 11775)와 *Enterococcus faecalis*(ATCC 19433)를 사용하여 양수 및 함양 조건에 따른 이들의 거동을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 인공 수조의 구성

길이 120 cm, 높이 100 cm, 폭 20 cm 크기의 아크릴 재질의 인공 수조를 제작하였다. 수조의 좌, 우로는 10 cm 너비의 담수와 염수의 유입부가 위치하며, 각각의 유입부와 모래가 채워지는 공간은 SUS wire 50 mesh 및 PP wire 120 mesh판을 경계로 구분하였다. 모형 수조의 윗부분은 대기에 개방된 상태이며, 수조 내부는 인공 대수층을 모사하기 위해 공극률(porosity) 0.37의 주문진사 모래로 충전하였다(Fig. 1). 위의 모래에 대한 물리, 화학적 특성은 강⁵⁾의 선행연구에 의하여 상세히 정의되었다.

일정 수두의 담수로 채워진 수조내로 염수의 침투를 유도하기 위해 수위조절장치(constant head valve)를 통해 염수가 일정 유량으로 주입되도록 조절하였다.⁴⁾ 즉 peristaltic pump(CP -7518, Cole-Parmer, USA)를 수위 조절장치에 연결하여 인공 염수를 3 mL/min의 일정 속도로 염수 유입부를 통하여 sand box 내로 유입시켰다. 한편 담수(수돗물)와 염수를 일정 수두로 유지시키면서 다양하게 함양과 양수량을 변화시켰으며, 일정 시간 간격으로 시료를 채취하였다. 함양관과 양수관은 지하수의 수평적 흐름의 모사 및 수조 깊이에 따른 균등한 양수와 함양이 이루어지도록 관을 따라 1 cm 간격으로 지름 1 mm의 구멍을 뚫어 제작하였다. 제작된 함양관과 양수관은 실험 개시 이전에 Fig. 1과 같이 함양관은 1번과 2번의 시료 채취 지점 중앙에, 양수관은 2번과 3번 시료 채취 지점 중앙에 설치하였다.

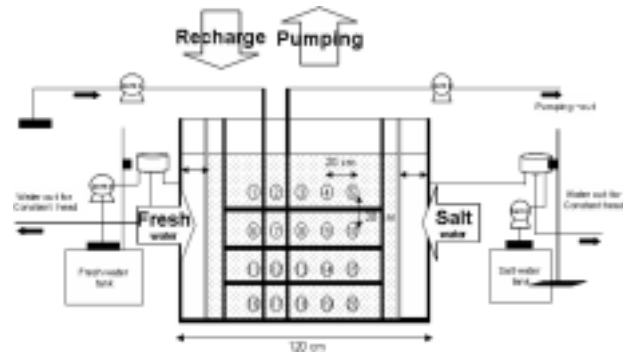


Fig. 1. Schematic diagram of the sand box reactor.

주입 미생물인 *E. coli* 및 *Enterococcus faecalis*는 각각 500 mL에 해당하는 Nutrient 액체 배지(Beef extract 1.5 g, Peptone 2.5 g, 멸균초순수 0.5 L)와 Brain Heart Infusion 액체 배지(Calf brains, infusion from, 200.0~3.85 g Beef heart, infusion from, 250.0~4.9 g Bacto proteose peptone, 5.0 g Bacto dextrose, 1.0 g NaCl, 2.5 g Na₂HPO₄, 1.25 g 멸균초순수, 0.5 L)에 일정 시간 배양하여 전 수조내에 골고루 혼합될 수 있도록 하였으며, 염수에서의 미생물의 생존은 자외선이나 포식자에 의한 섭식 등 여러 요인에 의해 영향을 받으므로 운전 시간 내에 수조로 유입되는 자외선은 반응기를 에워싸는 차양막을 이용하여 차단하였다.

2.2. 인공 수조의 운전

강⁵⁾ 등의 선행 연구에 의해 결정된 최적의 해수 침투 완화 조건에 해당하는 함양 및 양수 조건을 기준으로 실험을 수행하였다(Table 1). 또한 해수침투는 계절과 무관하게 발생하나, 미생물은 온도에 민감하게 반응하므로 *E. coli*에 대해서는 각각의 온도에 따른 실험을 수행하였다. 각 지표 미생물을 이용한 실험은 Table 1과 같이 Bitton 등의 실험 결과를 바탕으로 *E. coli*(ATCC 11775)의 경우 18시간, *Enterococcus faecalis*(ATCC 19433)의 경우 60시간 동안 실험을 수행하였다.^{6~10)} 이와 같이 실험 시간이

Table 1. The operation condition of the sand box reactor

Indicator organism	Operation time	Water temp.(°C)	Flow velocity(ml/min)						
			Recharge	Extraction	Fresh water	Saline water			
<i>Escherichia coli</i>	18 hrs	26.5~27.0	5	5	3	3			
			10	5					
		6.0~6.5	5	5					
			10	10					
		Tidal Effect							
		<i>Enterococcus faecalis</i>	60 hrs	6.0~6.5			5	5	3
5	10								
10	10								

다른 것은 두 실험 대상 미생물의 성장주기가 서로 상이하기 때문이다.

2.3. 시료 채취 및 분석방법

실험 시간에 따른 각각의 지표 미생물별 시료채취는 *E. coli*의 경우 3시간 간격으로 행해졌으며, *Enterococcus faecalis*의 경우 12시간 간격으로 이루어졌다. 시료 채취는 50 mL의 centrifuge tube(Corning Incorporated, USA)를 사용하여 수조의 앞면 총 20여개 지점에 설치된 시료 채취구를 이용하여 동시에 채수되었다. 채수된 시료에서 *E. coli*를 계수하기 위해 본 실험에서는 수질환경보존법 제 8조의 배출 허용기준에서 규정한 대장균균수 계수 방법인 평판 집락시험방법¹¹⁾적용하였으며, *Enterococcus faecalis* 분석 대상 시료는 1985년 U. S. EPA에서 공표한 Original Enterococci Method¹²⁾(Method 1106.1, Membrane Filtration Technique)에 준하여 계수하였다. 적용된 시료량과 100배, 1,000배, 10,000배의 희석배수에 따른 균수를 계수하여 각 시료당 균수를 도출하였다. 비전도도 및 온도는 전기전도도 측정계(Conductivity Meter, Model 30, YSI, USA)를 사용하여 분석하였다. 또한 양이온 및 음이온 분석을 위해 0.45 μm membrane filter로 전처리 한 후 분석 시료로 이용하였다. 여과한 시료 중 양이온 분석을 위하여 일정량의 시료에 1% 농도의 HNO₃용액을 첨가하여 채수 용기 표면에서 발생하는 음이온과의 complexion 감소 및 용존이온의 침전 및 미생물의 성장과 산화를 방지하였으며, 분석 전까지 4℃에서 냉장 보관하였다. 주요 용존 양이온의 정량 분석은 Varian사의 유도결합플라즈마 방출분광분석장치(ICP, Liberty Series II, USA)를 이용하였고, 용존 음이온은 영인과학의 이온크로마토그래피(IC, Water 432 Conductivity Detector, Korea)를 이용하여 분석하였다.

2.4. 염소 이온을 이용한 양이온 교환 반응의 정량

해수 침투 지역에서 발생하는 대수층내 염수 및 담수간의 이온 교환 반응은 Cl⁻ 농도 측정과 더불어 식 (1)~(3)에 의하여 결정되었다.¹³⁾ 우선 해수 침투에 따른 인공수조 내 시간에 따른 시료의 Cl⁻ 농도 그리고 해수 및 담수원의 각 염소이온 농도를 바탕으로 한 식 (1)을 이용하여 *f_{sea}*를 산출하였다. 또한 식 (2)와 (3)을 이용하여 해수침투에 따른 특정 양이온에 대한 시료의 상대적인 농도 변화(Δ*m_i*)를 계산하였다.

$$f_{sea} = (m_{Cl-sample} - m_{Cl-fresh}) / (m_{Cl-sea} - m_{Cl-fresh}) \quad (1)$$

$$m_{i,mix} = f_{sea} \times m_{i,sea} + (1 - f_{sea}) \times m_{i,fresh} \quad (2)$$

$$\Delta m_i = m_{i,sample} - m_{i,mix} \quad (3)$$

여기서, *f_{sea}* : Fraction of seawater
m_{Cl-sample} : Cl⁻ concentration of sample

m_{Cl-sea}, *m_{Cl-fresh}* : Concentration in seawater and freshwater of the Cl⁻

m_{i,mix} : Conservative mixing concentration for other dissolved species

m_{i,sea}, *m_{i,fresh}* : Concentration in seawater and freshwater of the species i

Δ*m_i* : The enrichment or depletion of the species I

2.5. 미생물의 사멸율 분석

해수 침투 방지를 위하여 적정량의 하수방류수를 함양할 경우 방류수에 잔류하는 병원성 미생물이 어떻게 거동하는가를 평가하였다.^{3,6~10,14)} 이를 위하여 일정한 시간 간격으로 시료를 채수하여 각 시료에 대한 생균수를 계수하였다. Chick's Law는 각 시간별 생균수를 기준으로 시간에 따른 미생물의 사멸속도를 정의한 것으로 식(4)과 같이 표현된다.¹⁴⁾ 즉 식 (4)를 이용하여 시간에 따른 미생물의 사멸율을 산정하였다. 본 연구에서는 모래에 대한 박테리아의 부착으로 인한 미생물 농도감소량은 고려하진 않았다.

$$\text{Log}(N_t / N_0) = - Kt \quad (4)$$

N_t : Number of bacteria after time t

N₀ : Number of bacteria at time 0

t : Time

K : Die-off rate(time⁻¹)

3. 결과 및 고찰

3.1. 비전도도의 거동 특성 분석 결과

해수침투에 따른 담수/염수 경계면 변화는 Golden Soft사의 Surfer8를 이용하여 나타내었다. Surfer8는 Golden Software INC에서 제작한 3D 그래픽 프로그램으로 본 연구에서는 Surfer8를 이용하여 2차원 평면에 등비전도도선을 작성하는 데 이용하였다. 해수침투 발생 지역 범위를 산정하기 위하여 실험 시간 18시간까지는 1,000 μs/cm 이상의 비전도도가 차지하는 면적점유율을 기준으로 침투범위를 계산하였으며, 실험시간이 60시간까지 증가할 경우에는 2,000 μs/cm 이상의 비전도도가 차지하는 면적점유율을 기준으로 하여 시간에 따른 해수침투 면적 점유 증가율을 비교하였다. Fig. 2 및 3은 각각 18시간 및 60시간까지 해수침투에 따른 비전도도의 면적 점유증가율 변화를 나타낸 것이다. 침투 증가율 변화는 양수 및 함양 조건에 따라 다양한 양상을 나타내었다. 함양 속도를 5 mL/min으로 고정하고 양수를 5 mL/min 및 10 mL/min로 달리한 경우 시간 경과에 따른 1,000 μs/cm 이상의 비전도도가 차지하는 면적 점유율을 기준으로 염수침투 특성을 평가하였다. 양수가 10 mL/min인 경우, 실험 개시 9시간 이후에는 1,000 μs/cm 이상의 염수침투 면적 점유율은 5%, 18시간 이후에는 27%로 증가하였다. 동일 함양 조건에서 양수가 5 mL/

min로 감소한 경우 9시간 및 18시간 이후 그 면적 점유율이 각각 12%에서 33%로 증가하여 10 mL/min의 양수 조건보다 염수 침투 증가폭이 낮았다. 한편, 양수를 10 mL/min로 실험시간 60시간까지 지속한 경우 2,000 $\mu\text{s/cm}$ 이상의 비전도도를 나타내는 면적 점유율은 84%로 증가하였으며, 5 mL/min 양수의 경우 64%까지 증가하였다. 즉, 양수가 두 배 증가하더라도 염수 침투 정도는 정비례적으로 증가하지는 않지만 그 염수침투 정도는 더욱 심화되는 것으로 나타났다. 이는 김¹⁵⁾ 등이 양수가 증가할수록 담수대 쪽으로 염수/담수의 경계면 이동 속도가 증가하여 해수침투가 심화된다는 연구 결과와 유사하였다.

또한 동일 양수조건에서 함양 속도를 5에서 10 mL/min

으로 증가시켜 주었을 경우에는 1,000 $\mu\text{s/cm}$ 이상의 비전도도가 차지하는 면적점유율이 실험 개시 9시간 이후에 5%, 25%에서 12시간 경과후에는 14%, 45%로 각각 증가하였다. 이러한 결과는 함양수로 인한 비전도도의 증가에 기인한 것으로 여겨진다. 즉 비전도도는 총용존고형물질과 비례관계를 나타내므로 해수의 혼입 이외, 인위적 오염에 의해서도 증가하는 경향이 있다. 그러나 운전 시간을 60시간으로 증가시켜 주었을 경우에는 함양이 5 mL/min, 양수가 10 mL/min에서 2,000 $\mu\text{s/cm}$ 이상의 비전도도가 차지하는 면적점유율이 25%에서 30%로 소폭 증가하였으며 동일 양수 조건에서 함양이 10 mL/min으로 증가한 경우에는 비전도도의 확산 변화는 무시할 정도로 작았다.

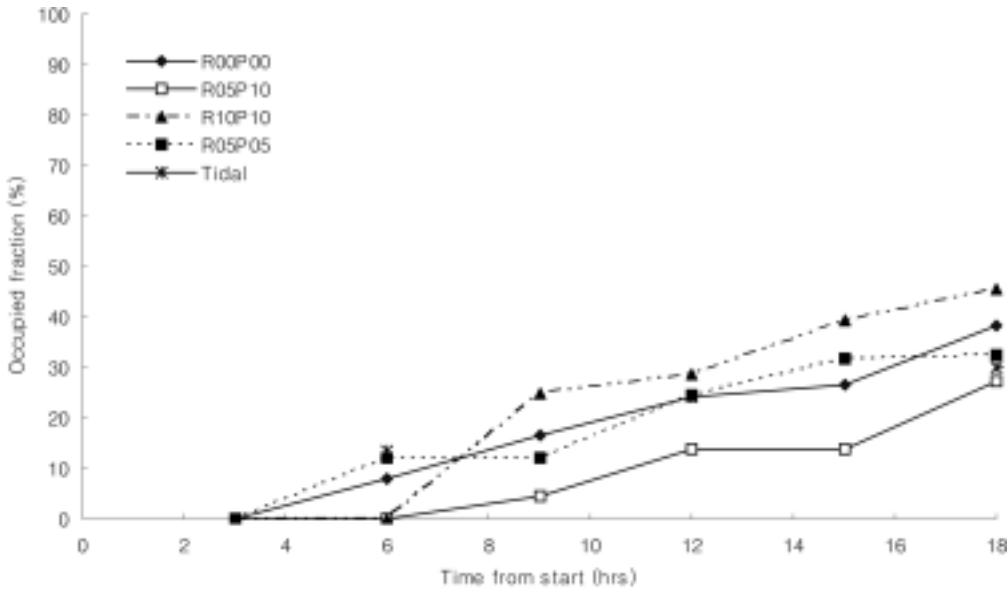


Fig. 2. Variation of areal fraction(%) showing more than 1,000 $\mu\text{s/cm}$ according to various recharge and pumping rates(18 hrs). (R; Recharge, P; Pumping, Tidal; Tidal effect, e.g., R05P10, recharge 5 mL/min, pumping 10 mL/min)

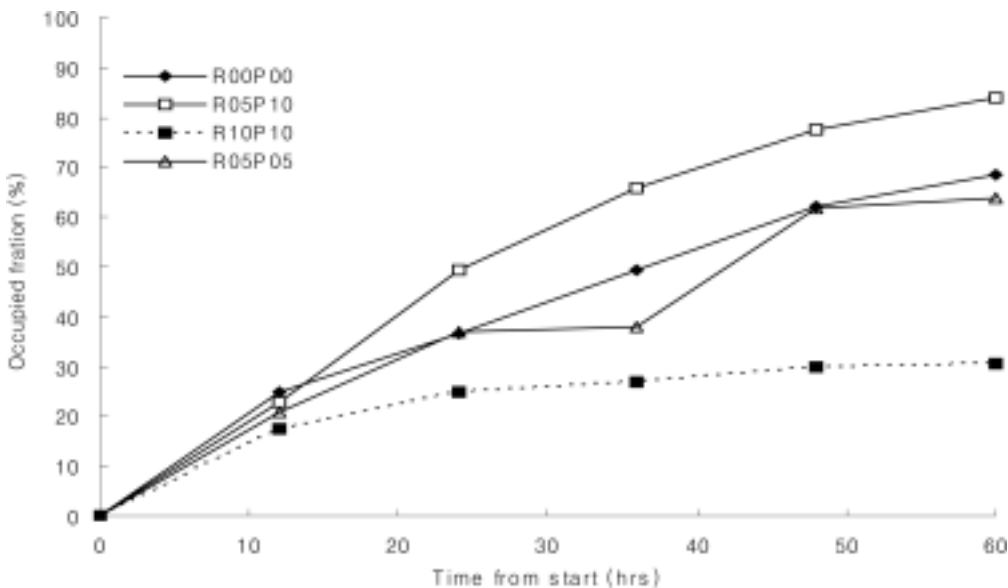


Fig. 3. Variation of areal fraction(%) showing more than 2,000 $\mu\text{s/cm}$ according to various recharge and pumping rates(60 hrs). (R; Recharge, P; Pumping)

Table 2. Correlation coefficients and data taken from analysis of water samples

	Ca	K	Mg	Na	Cl	NO ₃	SO ₄	SC
Ca	1							
K	0.49	1						
Mg	0.98	0.53	1					
Na	0.76	0.66	0.68	1				
Cl	0.99	0.54	0.99	0.74	1			
NO ₃	0.94	0.44	0.98	0.58	0.95	1		
SO ₄	0.36	0.36	0.27	0.51	0.46	0.38	1	
SC	0.95	0.63	0.95	0.77	0.98	0.90	0.62	1

3.2. 해수침투 지표인자간의 상관관계 및 이온 교환 반응의 상대적인 정량 분석

Na⁺, Sr²⁺, Mg²⁺ 및 SO₄²⁻와 Cl⁻ 등이 해수에 의한 염수화를 평가할 수 있는 주요 수질 이온으로 Taylor 등에 의해 보고되었다.¹⁶⁾ 본 실험에서 분석한 이온은 Taylor 등에 의해 제시된 이온이외에 칼슘, 질산염 및 칼륨 이온을 추가하였으며, 비전도도 값과 위의 용존 이온과의 상관성을 파악하기 위해 Table 2와 같이 각각의 상관계수를 도출하였다.

해수의 대표적인 성분으로 알려진 염소이온은 일반적으로 산화·환원 반응성이 크지 않기 때문에, 해수의 거동에 따라 민감하게 유동하게 되어 해수침투를 보여주는 주요 지표인자로 알려져 있다.¹⁷⁾ 본 실험의 경우 염소이온과 양호한 상관성을 보이는 성분은 비전도도와 Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻로 모두 0.9 이상의 높은 상관계수를 나타내었다. 그러나 대부분의 시료에서 NO₃⁻가 불검출 되었으므로 NO₃⁻와의 상관성을 평가하기 위해서는 더 많은 추가 연구가 요구된다. Cl⁻와 Na⁺는 약 0.74의 양호한 상관관계를 나타낸 반면, SO₄²⁻와 K⁺의 경우 0.5 이하의 낮은 상관관계를 나타내었다. 또한 Fig. 4와 5는 본 실험에서 사용된 인공 해수와 담수의 Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺의 농도를 기준으로 이론적인 Mixing Line을 도시한 것으로 이를 통하여 해수침투에 따른 시료의 염수 혼합 정도를 판단할 수 있었다. 특정 시료의 혼합비가 Mixing Line에 근접한다는 것은 해당 시료가 인공 해수와 유사한 조성을 갖는 것을 의미하는 것으로, Fig. 4와 5 모두 해수침투가 진행됨에 따라 각 시료의 조성비가 Mixing Line에서 점차 멀어지는 경향을 나타내었다. 즉 염소 이온의 농도가 증가함에 따라 Na⁺성분은 Mixing Line보다 감소하는 반면, Ca²⁺성분은 Mixing Line에 비해 오히려 크게 증가하였다. 이는 해수침투가 진행됨에 따라 해수 중 함유되어 있던 Na⁺ 성분은 인공 대수층에 이온교환되어 흡착되는 반면 인공대수층의 지질 구성 성분 중 하나인 Ca²⁺이온은 비례적으로 수중으로 탈착되어 그 농도가 증가하였기 때문으로 여겨진다. 이와 같이 해수 침투 과정에서 기수(brackish water)와 지질 매체 사이에서 발생하는 양이온 교환반응²⁰⁾ 생성 정도를 정확히 파악하기 위해 양이온 교환 반응의 변동성 계측 인자인 ΔNa⁺, ΔCa²⁺ 및 ΔMg²⁺를 Fig. 6에 나타내었다.

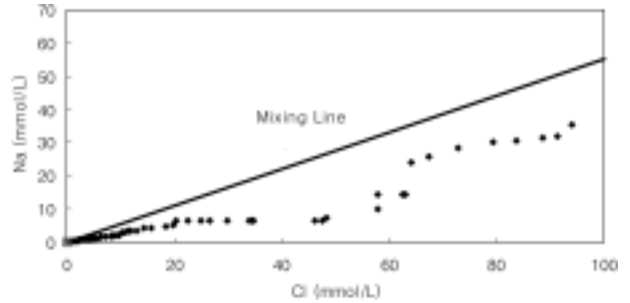


Fig. 4. The relationships between Cl⁻ and Na⁺ concentrations during seawater intrusion.

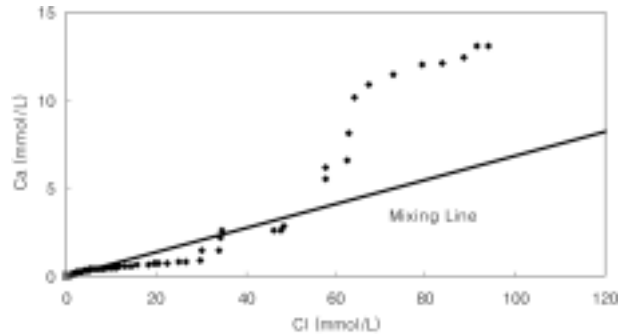


Fig. 5. The relationships between Cl⁻ and Ca²⁺ concentrations during seawater intrusion.

Δm_i 은 각 시료의 용존 이온에 대한 양의 상대적인 증감을 표현한 값으로 양의 값이면 용존 이온의 과잉을 음의 값이면 용존 이온의 결핍 상태를 나타내는 것이다. Richter와 Kreitler¹⁸⁾는 해수 침투에 따라 Carbonate hardness 안정 영역이 Noncarbonate hardness 지역으로 이행되는 과정에서 지질매체가 Na로 포화되는 이온 교환 반응이 발생하는 것으로 보고하였는데 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 음의 Δm_{Na} 값으로 미루어 이와 유사한 반응이 발생하였다는 것을 유추해 볼 수 있다. 또한 함양과 양수가 10 mL/min일 때가 5 mL/min일 때에 비해 더 낮은 Δm_{Na} 값을 나타내는 것으로 미루어 더 많은 양의 나트륨 이온이 인공 대수층의 지질 매체 표면으로 흡착되어 제거되는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 Mg²⁺이온도 Na⁺이온과 함께 운전 시간 내내 음의 값을 나타낸 반면, Ca²⁺이온은 양의 값을 나타내었다. 이는 Martine (2005)이 덴마크의 해안 대수층에서 시료 채취 지점이 바다와 맞닿은 지역에 근접할수록 음의 ΔNa , ΔMg 값과 양의 ΔCa 를 관측된 것과 유사한 분석결과로서 해수에 의한 이온 교환이 발생된 것을 의미한다.¹³⁾ Fig. 6(c)는 지질매체에서 칼슘 이온이 해리되어 수중 농도가 증가하는 것을 의미하며 이는 ΔCa 값은 실험 개시 6시간까지 거의 증가하지 않다가 그 이후에 서서히 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 Ca의 수중 농도는 증가하는 반면 Na 혹은 Mg 이온의 수중 농도가 감소하는 것은 Na 혹은 Mg이온과 지질매체와의 흡착력이 Ca의 그것에 비하여 높기 때문으로 판단되었다.

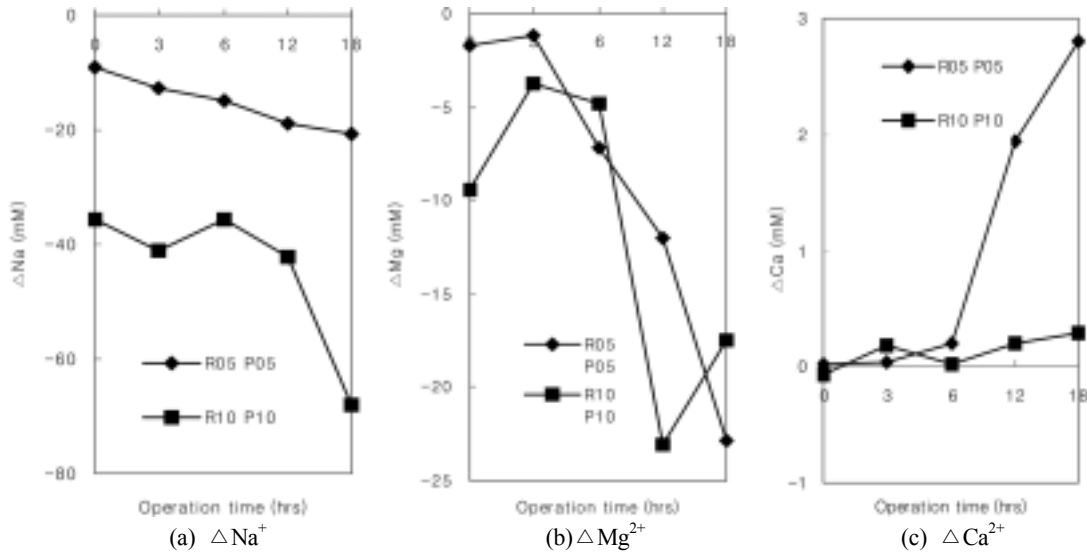


Fig. 6. Variation of Δm_i relative to different pumping and recharge rates(R; Recharge, P; Pumping).

3.3. 해수침투에 따른 *E. coli* 및 *Enterococcus faecalis*의 거동 특성 파악

Fig. 7, 8 및 9는 해수침투에 따른 사멸 속도를 Chick's Law 공식을 적용하여 지점별로 나타낸 것이다. 실험 결과, 동일 실험 조건하에서도 지점마다 각기 다른 사멸 속도가 나타났다. 즉 미생물은 주변 환경에 민감하게 영향

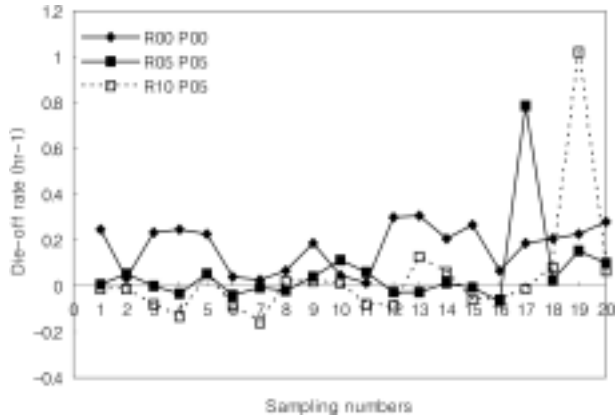


Fig. 7. Die-off rate of *Escherichia coli* through the sampling points in summer(R; Recharge, P; Pumping).

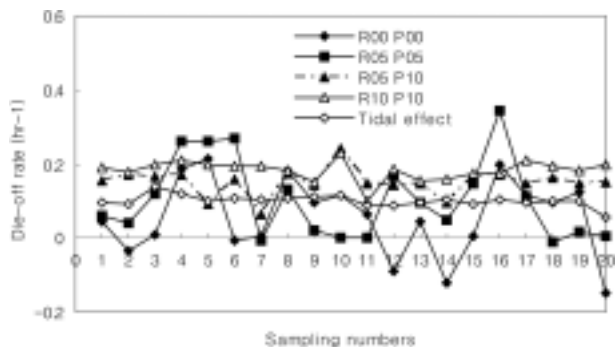


Fig. 8. Die-off rate of *Escherichia coli* through the sampling points in winter(R; Recharge, P; Pumping).

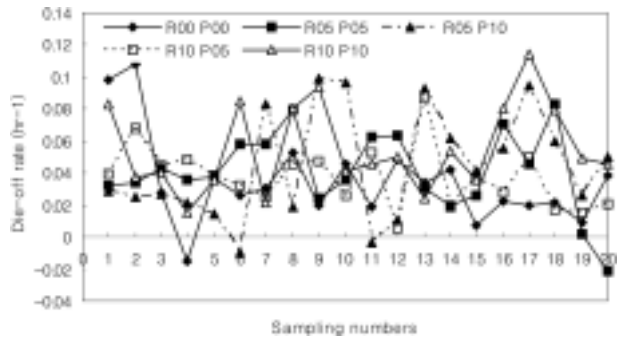


Fig. 9. *Enterococcus faecalis*' die-off rate through the sampling points in winter(R; Recharge, P; Pumping).

을 받는 개체로서 동일 실험 조건이더라도 인공 수조의 지점별로 수조의 환경이 유동적인 상태에 있다는 것을 의미한다. 그리고 몇몇 지점에서는 음의 사멸속도를 보였는데, 이는 미생물의 성장으로 인한 개체수의 증가가 아니라 그 지점 주위에 생긴 유동적인 흐름에 의해 순간적으로 많은 양의 미생물이 포함된 시료가 채취되어 발생한 것으로 보인다. *Enterococcus faecalis*도 *E. coli*와 마찬가지로 지점별로 상이한 사멸속도를 보였으며 지점별 변동 폭은 *E. coli*보다 크게 나타났다.

Fig. 10은 각 지점별 *Enterococcus faecalis*와 *E. coli*의 사멸을 평균값을 나타낸 것으로 *E. coli*의 경우에는 여름(26.5°C)과 겨울(6.5°C)로 구분하여 사멸율을 평가하였다. 먼저 계절별 *E. coli*의 사멸을 변동을 살펴보았을 때 가장 눈에 띄는 것은 함양량이 증가할수록 여름에 수행한 실험에서는 사멸속도가 감소하는 반면에 겨울에 수행한 실험에서는 사멸속도가 증가하였다. 이는 *E. coli*는 Cl⁻이온에 민감하게 반응한다고 보고된 바 있는데, 여름에 수행한 실험에서는 함양량이 증가할수록 용존 Cl⁻이온 농도가 감소되어 *E. coli*의 사멸을 역시 비례적으로 감소된 것이라고 판단되었다.¹⁹⁾ 반면에 겨울에 수행한 실험은 함양량이 증가함에 따라 사멸속도도 함께 증가하였는데, 낮은 온도의

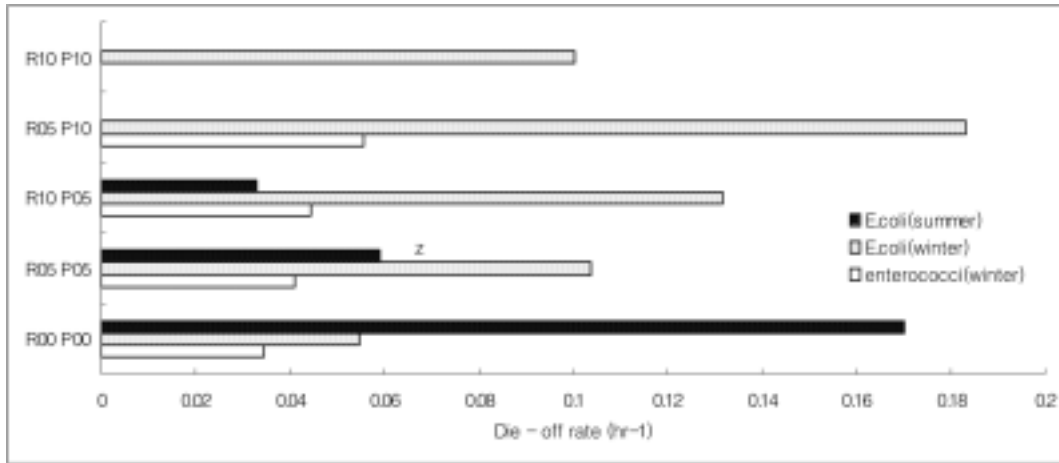


Fig. 10. Variation of mean value of bacterial die-off rate according to *E. coli* and *Enterococcus faecalis*. [Standard deviation, R10P10: 0.002, R05P10: *E.coli*(winter, 0.003), enterococci(winter, 0.001), R10P05: *E.coli*(summer, 0.001), *E.coli*(winter, 0.002), enterococci(winter, 0.001), R05P05: *E.coli*(summer, 0.0015), *E.coli*(winter, 0.001), enterococci(winter, 0.002), R00P00: *E.coli*(summer, 0.003), *E.coli*(winter, 0.001), enterococci(winter, 0.001)]

함양수가 지속적으로 수조내로 주입되어 *E. coli*의 사멸을 가속화 시켰다고 여겨진다. 겨울에 수행한 실험 중에 함양과 양수가 10 mL/min일 때 가장 높은 사멸속도를 나타냈으며, 무함양 무양수 조건일 때 가장 낮은 값의 사멸속도를 보였다.

*Enterococcus faecalis*의 평균 사멸율은 모든 함양 및 양수 조건에서 *E. coli*에 비해 1/2~1/4 정도 낮은 사멸속도를 보였다. 또한 *E. coli*와 같이 무함양 무양수 조건에서 가장 작은 사멸속도를 나타냈으며, 함양과 양수가 10 mL/min인 조건에서 가장 높은 사멸속도를 보였다.

한편 해수침투 발생지역은 담수와 해수가 맞닿는 장소로서 복잡한 생태환경이 존재한다. 따라서 본 실험에서는 두 개 미생물군이 동시에 공존할 경우를 가정하여 시간에 따른 *Enterococcus faecalis* / *E. coli* 비율변화를 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 함양 및 양수가 모두 10 mL/min로 유지될 때, 실험 개시 6시간과 12시간 이후의 *Enterococcus faecalis* / *E. coli*는 거의 유사한 값을 보였지만 18시간 이후에는 이전 시간대에 비해 50~

100배 정도의 급격한 증가세를 보였다. 이는 18시간 이후에 *E. coli*의 급격한 사멸에 기인한 것으로 보여진다. 그러나 함양과 양수가 5 mL/min의 경우 다른 조건과는 달리 운전 시간 내내 거의 일정한 비를 유지하였는데, 이는 각 미생물의 주입량이 거의 일정하다고 가정하였을 때 *E. coli*가 다른 조건들에 비해 절대적인 사멸량이 극히 미비하였다는 것을 예상할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 해수침투 및 함양에 따른 인공 대수층의 지구 화학적 특성을 평가하였으며, 이와 더불어 지표 생물로 *Enterococcus faecalis* 및 *E. coli*를 이용하여 인공 수조내에서 염수의 침투에 따른 미생물의 거동 특성도 규명하였다.

1) 함양 속도 증가에 따른 해수침투 면적 점유율 속도의 감소 및 양수 속도 증가에 따른 해수 침투 면적 점유율 증가는 인공 수조가 18시간으로 운전될 때보다 60시간으로 운전할 경우 더욱 뚜렷하게 나타났다.

2) 해수침투에 따른 수중 이온 분석 결과 염소 이온과 비전도도, Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 NO_3^- 농도간에 모두 0.9 이상의 높은 상관계수를 보였으며, 동일 조건에서 음의 ΔNa , ΔMg 값과 양의 ΔCa 이 관측된 것으로 보아 해수에 의한 이온 교환이 활발하게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

3) *Enterococcus faecalis* 및 *E. coli* 모두 염분농도에 민감하게 반응하였으며, *Enterococcus faecalis*가 *E. coli*에 비해 염분농도에 대한 저항력이 크게 나타났다.

4) 해수침투에 따른 *Enterococcus faecalis* / *E. coli*의 변화특성을 살펴본 결과, 양수와 함양이 10 mL/min로 동일한 조건에서 *E. coli*가 초기 주입 농도의 90% 이상의 사멸을 보이는 18시간 이후에 *Enterococcus faecalis* / *E. coli*의

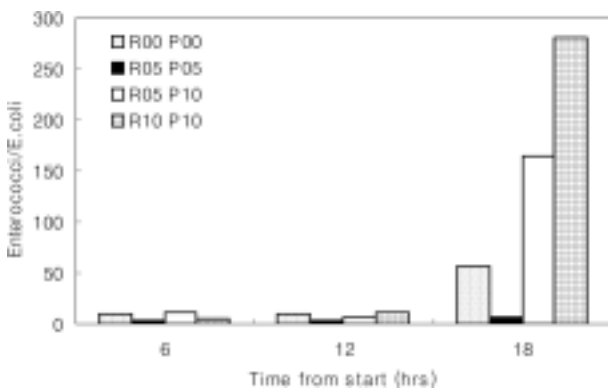


Fig. 11. Temporal variation of *Enterococcus faecalis* / *E. coli* with various recharge and pumping rates(R; Recharge, P; Pumping).

값이 50~100배 이상으로 증가하였다. 그러나 함양과 양수가 5 mL/min의 경우에는 E.coli의 완만한 사멸율로 인해 운전 시간 내내 2.5~5.0 사이의 일정한 비를 유지하였다. 이로 여타의 조건에 비해 염분 침투의 피해가 적었음을 유추할 수 있다. 이는 앞서 행한 화학적 분석중에서 ΔNa 의 값을 통해 알 수 있듯이 함양과 양수가 5 mL/min 때의 조건이 함양과 양수가 10 mL/min의 조건에 비해 적은 양의 나트륨 이온이 탈착되었다는 것과 유사한 결과이다. 이로 해수침투의 진행정도의 파악을 위해서 각기 다른 속도로 해수에 저항을 보이는 지표생물을 이용한 *Enterococcus faecalis* / *E. coli*의 적용은 지화화학적 분석과 더불어 민감한 해수침투의 지표에 적합하다고 고려되며, *Enterococcus faecalis* 및 *E. coli*는 하수 방류수 현장 적용시 지하수의 식수 및 용수로의 사용 가능성을 판단할 때 건강 위해도와 연관되어 유용한 지표로 사용될 것이라 여겨진다.

사 사

이 논문은 한국학술진흥재단의 지역대학 우수과학자 지원사업으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Thornton, S. F., David N. Lerner, D. N., and Davison, R. M., Groundwater Monitoring, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 960~974(2002).
2. 이상규, 김세준, 김용욱, 김인기, 김동권, 김현대, 박인화, 신제현, 신현모, 이명중, 이원석, 이태섭, 지세정, 전재화, 허대기, 황세호, 황인걸, 함학수, 장호완, 윤성택, 해수침투 평가·예측 및 방지기술 개발, 한국지질자원연구원, pp. 27~29, 198~199(2003).
3. U. S. Environmental Protection Agency, Ambient Water Quality Criteria for Bacteria, U. S. Environmental Protection Agency, Washington DC(1986).
4. Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 421~426, 137~140(1994).
5. 강정옥, 이소정, 김창균, “인공 하수처리장 주입과 양수 방식에 따른 인공 대수층의 해수침투 평가,” 대한환경공학회지, **28**(6), 603~612(2006).
6. Bitton, G., Farrah, S. R., Ruskin, R. H., Butner, J., and Chou, Y. J., “Survival of pathogenic and indicator organic in groundwater,” *Ground Water*, **21**, 405~410(1983).
7. Hanes, N. B. and Fragala, R., “Effect of seawater concentration on the survival of indicator bacteria,” *J. Water Pollut. Control Fed.*, **39**, 97~102(1967).
8. Keswick, B. H., Gerba, C.P., Secor, S. L., and Cech, I., “Survival of enteric viruses and indicator bacteria in groundwater,” *J. Environ. Sci. Health*, **A17**(6), 903~912(1982).
9. McFeters, G. A. and Stuart, D. J., “Comparative survival of indicator bacteria and enteric pathogens in well water,” *Appl. Microbiol.*, **27**, 823~829(1974).
10. Omura, T., Onuma, M., and Hashimoto, Y., “Viability and adaptability of *E. coli* and enterococcus group to salt water with high concentration of sodium chloride,” *Water Sci. Technol.*, **14**, 115~126(1982).
11. 환경부, 수질오염공정시험방법 (2004).
12. U. S. Environmental Protection Agency, Improved Enumeration Methods for the Recreational Water Quality Indicators: Enterococci and *Escherichia coli*, Office of Science and Technology, Washington, D. C.(2000).
13. Andersen, M. S., Jakobsen, V. N. R. and Postma, D., “Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer,” *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, **69**(16), 3979~3994(2005).
14. Alkan, U., Elliott, D. J., Evison, L. M., “Survival of enteric bacteria in relation to simulated solar radiation and other environmental factors in marine water,” *Water Res.*, **29**(9), 2071~2081(1995).
15. Kim, D. J., Ha, H. C., and On, H. S., “Monitoring of seawater intrusion in unconfined physical aquifer model using Time Domain Reflectometry,” *The J. Eng. Geology*, **13**(1), 17~27(2003).
16. Taylor, S. R. and Malennan, S. M., The Continental Crust, Its Composition and Evolution, Blackwell Scientific Pub., Oxford, England, pp. 312~313(1985).
17. 김종민, 정원화, 정현미, 원성민, “해양으로 배출된 하수 처리수의 총대장균군의 활성 평가,” *J. Kor. Soc. on Water Qual.*, **23**(1), 12~18(2007).
18. Richter, B. C. and Keitler, C. W., Geochemical Techniques for Identifying Sources Groundwater Salination, C. K. Smoley, pp. 258~259(1983).
19. Cabelli, V. J., “Microbial indicator system for assessing water quality,” *Antonie van Leeuwenhoek*, **48**, 613(1982).
20. Chapelle F. H. and Knobel L. L., “Aqueous geochemistry and the exchangeable cation composition of glauconite in the Aquia Aquifer, Maryland,” *Ground water*, **21**, 343~352(1983).