

매립지 토양의 전기적 전도특성 측정에 관한 연구

이재성 · 정민우 · 팽기정*

한국과학기술연구원 수질환경연구센터, *연세대학교 자연과학대학

1. 서 론

최근 급속한 경제성장에 따라 폐기물의 양이 계속 증가하고 있으나 이에 대응 하는 처리시설의 부족으로 각종 환경오염문제가 발생하고 있다. 이러한 현실에 대응하기 위해 폐기물의 발생량을 줄이며 재활용할 수 있는 제도적 방안이 연구·실천되어야 하며 발생된 폐기물에 대한 합리적인 처리방법이 개발되어야 한다. 폐기물의 처리는 폐기물을 신속하게 모아 감량화, 안정화, 무해화하는 것이 목적이므로 여러 가지 조건을 고려한 적절한 처리·처분과정을 필요로 한다. 현재 한국에서는 약 70% 정도를 매립에 의존하여 폐기물 처리를 담당하는 관계로 매립지의 건설, 유지, 관리가 첨예한 문제로 대두되고 있고 주민과의 마찰 및 민원이 끊이지 않아 매립지 관리가 중요사항으로 부각된지 오래다. 특히 침출수의 유출은 심한 악취뿐 아니라 심각한 지하수 오염을 야기시켜 생태계를 교란시킬 수 있는 잠재력이 있어 이에 대한 방지 및 관리에 만전을 기해야 환경재앙을 미리 예방할 수 있다. 이에 대한 관리 기법 중 하나로 침출수 차수막 설치나 벤토나이트를 활용해 침출수의 확산을 막은 후 이들의 성능이 유지되고 있는지 검지하는 시스템의 활용범위를 넓히고 있는 바, 현재 관련분야에 관한 연구가 일본과 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

매립지(landfill)는 적절한 위치 선정, 현황 조사, 폐기물의 종류, 주변 환경 등을 고려하여 시공하게 되는데 이 매립지에서 발생하는 침출수(leachate)는 매립지 내에 수분이 존재할 경우 발생하며 물의 유효도, 매립지 복토나 덮개의 상태, 폐기물의 상태, 매립지 기초토양의 조건 등에 따라 침출수 량이 결정된다. 여기서 물의 유효도는 물의 총 유입량을 말하며, 이에 영향을 미치는 인자로는 강수량, 지표

유입수량, 지하 유입수량 등을 들 수 있다.¹ 이러한 침출수의 발생은 주변 토양 오염의 원인이 되며 더 나아가서 지하수를 오염시킬 수 있으므로 심각한 환경 문제로 대두되고 있다.² 이에 세계 각국에서는 침출수 집·배수 시설,³ 누출검지 시스템,^{4,5} 처리시설^{6,7} 등을 사용하여 지하수 오염방지에 노력을 기울이고 있다. 이와 같은 침출수에 의한 지하수의 오염이나 공공수역의 오염 및 주변 환경에의 악영향을 방지하도록 하기 위해 매립지 시공시 차수막(liner)을 설치하도록 되어있다.

차수막은 매립지의 지형이나 지반 특성에 의하여 적합성이 높은 계획·설계를 하는 것이 중요하지만, 공통적으로 매립지의 지형이나 지반의 투수성 및 지하수 특성 등에 의해 매립지 내의 침출수가 외부로 누출되지 않는 구조로 설계한다.^{8,9} 차수막은 연직 차수막과 표면 차수막으로 분류할 수 있는데 연직차수막은 지중에 암반이나 점성토의 난투수층이 수평방향으로 퍼져있는 경우, 수지 또는 비스듬히 차수막을 시공하고 침출수나 지하수의 침투경로를 길게 하거나 난투수 지반까지 달하는 차수막에 의하여 매립지 내외의 물의 이동을 차단하는 것이고, 표면 차수막은 매립지 지반의 투수계수가 큰 경우에 채용되는 방법이다. 이와 같이 매립지의 지질과 투수계수를 고려하여 차수막을 시공하게 되는데 이러한 차수막이 파손되어 침출수가 매립지 하부 토양으로 누출될 경우를 모니터링(monitoring)하는 것이 침출수 누출검지시스템이다. 차수막이 파손되어 침출수가 지하수를 오염시킬 위험발생을 최소한으로 억제하기 위해서는 이와 같은 모니터링 시스템의 설치가 반드시 필요하다. 차수막으로 사용되는 차수 sheet는 전기적으로 높은 절연성을 나타내기 때문에 차수 sheet의 바깥쪽과 안쪽에는 고절연상태로 되어있다. 따라서 차수 sheet의 내측과 외측에 전압을 가하여도 전류는

거의 흐르지 않는다. 그러나, 차수 sheet가 파손된 경우는 파손부에 침출수나 흙이 들어가 전기적으로 전도상태가 되기 때문에 전류가 흐르게 된다. 차수 sheet에 발생한 파손의 유무와 그 위치는 이러한 변화를 파악하는 것으로 찾아낼 수 있다.

현재 사용하고 있는 차수막 파손 측정법으로는 매립지 하부의 배수공의 수질 변화를 측정하여 감지하는 지하수 수질측정법, 이중차수막간 배수층 수질검사로 누출 여부를 측정하는 이중차수막간 수질측정법, 이중차수막을 나누어 구획 설치한 배수관의 수질 변화에서 감지하는 이중 차수와 구획 배수방법, 강수량과 침출수량 아울러 증발량, 보유수 및 표면유출량의 관계로 감지하는 수량계산법, 지하수 배수관에 미량성분의 수질변화로 누출여부를 감지하는 극미량 tracer의 측정방법이 있고, 전기적인 측정방법으로 차수막 파손시 발생하는 전위분포의 변화를 이용하는 전위법, 차수막 파손시 전류 투과량의 변화로 파손유무를 측정하는 전류법, 전위와 비저항을 측정하여 수직방향 전류를 계산, 이용하는 전위-비저항법이 사용되고 있다. 미국이나 일본 등지에서는 침출수 누출검지 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며 여러 가지 방법에 의한 특허¹⁰⁻¹⁴도 출원되고 있으나 우리나라에서는 아직까지 개발이 미약한 실정이다.

이러한 방법을 누수위치 검출 가능성, 누수량 검출 가능성, 기존 매립지에의 적용 가능성을 평가하여 가장 적절한 전기적 측정방법을 활용하기 위한 침출수, 토양의 전기적 특성에 관하여 기술하였다.

2. 침출수 및 매립지 토양의 전기적 특성 측정

토양의 전기적 특성을 측정하기 위해 구리(Cu) 판과 아크릴(acryl)판으로 전도도 측정용 cell을 자체 제작한 후 토양에 여러 가지 이온을 첨가하여 전도도를 측정하였다. 자체 제작한 전도도 측정용 cell의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 전도도 측정은 (주)istek(Seoul, Korea)의 Model 460CP conductivity meter를 사용하여 10초 간격으로 수행하였다. 측정된 데이터의 저장은 RS232C interface cable을 이용하여 PC와 연결한 후 Hyperterminal 프로그램을

사용하였다.

토양은 한국과학기술연구원 공사장에서 채취한 후 표준체를 사용하여 20-60 mesh, 60-100 mesh, 100-150 mesh, >150 mesh로 분별하고 오븐에서 160°C로 24시간 이상 건조시켜 수분을 제거한 후 데시케이터에 보관하면서 사용하였다. 수분에 의한 전도도 변화 측정실험에서는 4 가지 토양을 모두 사용하였고 이온에 의한 전도도 변화 측정실험에서는 입자의 크기를 크게 나누어 20-60 mesh와 >150 mesh의 토양만을 사용하였다. 수분에 의한 토양의 전도도 변화를 측정하기 위해 건조된 토양에 탈이온수를 사용하여 수분함량이 5%, 10%가 되도록 시료를 실험실에서 조제하여 사용하였다. 여러 가지 양이온 및 음이온의 토양 중 전도도 변화를 측정하기 위해 침출수 내에 많이 존재하는 이온을 고려하여 NaCl (Junsei Chemical Co., Ltd., Japan), Na₂SO₄ (Kanto Chemical Co., Inc., Japan),

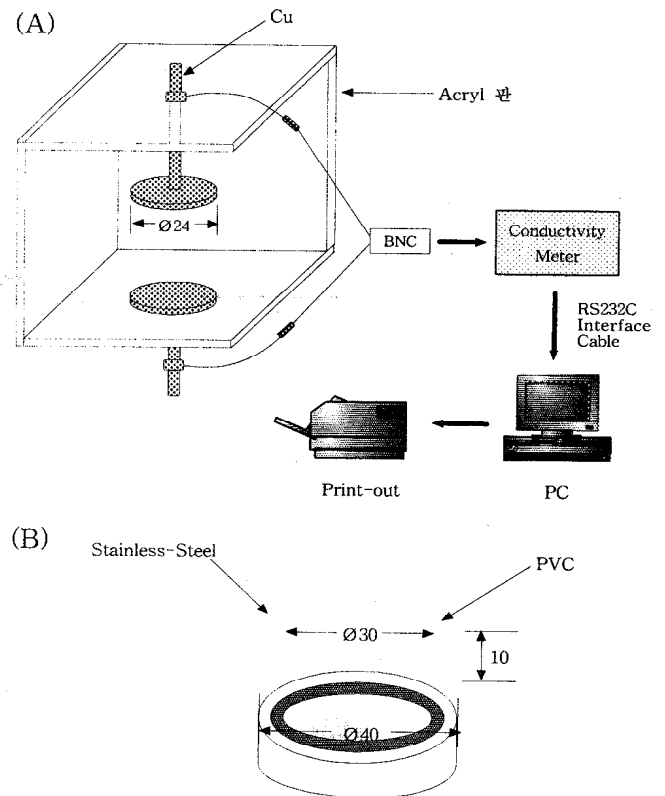


Fig. 1. Configuration of conducting cell for soil. (A) represents for schematic outlook of electrode at side part on detection cell (B) for soil conductivity.

K₂SO₄ (Kanto Chemical Co., Inc., Japan), CaCl₂ (Wako Pure Chemical Industries, Ltd., Japan), MgCl₂ · 6H₂O (Junsei Chemical Co., Ltd., Japan) 을 사용하였는데, 각 시료에 대해 0.1 M, 0.01 M, 0.001 M의 표준용액을 제조하고 이들이 토양중 5%가 되도록 첨가 혼합하여 자체 제작한 측정용 전지로 전도도의 변화를 측정하였다.

2.1. 전지계수의 결정

제작한 전도도 측정용 전지의 계수를 결정하기 위해 0.1M KCl 표준용액의 전도도를 전지로 측정하고 이중 신호가 안정화된 600초에서의 값을 기준값으로 하고 이 값과 문헌¹⁵에 보고된 당량 전도도 값을 $\mu\text{S/cm}$ 단위로 환산하여 비교 후 계수를 계산하였다. 이때 계산된 전지계수는 1/3.518 이었다. 결정된 계수를 사용하여 0.1M NaCl 용액에 대한 측정값(600초)을 보정 하였을 때, 문헌값과 4% (R.S.D., 5회 측정)의 오차범위에서 일치하는 결과를 나타내었다. 모든 전도도 측정값은 이 계수로 보정한 후 계산에 사용하여 토양의 전기전도적 특성을 예측하는데 활용하였다.

2.2. 이온의 종류에 따른 전도도 측정

침출수 중 존재가능한 양이온을 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, 음이온을 Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻로 선정하고 이들의 용액을 0.001M과 0.1M로 제조하여 각 용액에 대한 전도도를 전도도 측정용 전지를 사용하여 10초 간격으로 측정하였다. 측정에 사용한 용액은 NaCl, Na₂SO₄, NaNO₃, Na₂HPO₄ · 2H₂O, KCl, K₂SO₄, KNO₃, KH₂PO₄, CaCl₂, Ca(NO₃)₂, CaHPO₄ · 2H₂O, MgCl₂ · 6H₂O, MgSO₄, Fe(NO₃)₃ · 9H₂O의 14 가지 였다.

2.3. 수분함량 및 입자크기에 따른 전도도 변화 측정

20-60 mesh, 60-100 mesh, 100-150 mesh, >150 mesh의 토양에 대해 수분(deionized water)의 함량을 각각 5%와 10%가 되도록 소량첨가(spiking)

한 후 전도도 측정용 전지를 사용하여 10초 간격으로 전도도를 측정, 도식하였다. 입자크기가 작은 토양(>150 mesh)이 가장 높은 전도도값을 나타내었다. 이것은 입자가 작을수록 물분자가 토양표면에 더 고르게 흡착되어 전기의 흐름이 더 용이한 결과라고 사료된다. mesh별 수분함량 0%(바탕값), 5%, 10%에 대한 전도도를 측정하였다.

이때 입자가 큰 토양(20-60 mesh)의 경우, 전도도가 수분함유량에 비례(2배)하였으나 입자가 작은 토양(>150 mesh)의 경우는 측정값이 3배 정도가 되는 결과를 나타내었다. 이것은 입자에 의한 수분 분산효능이 입자가 작을수록 증가되어 전자회로의 분산 channelling 효과가 가속되기 때문이라 사료된다. 따라서 실험결과를 살펴볼 때 입자가 작을수록 전기전도도가 기하급수적으로 증가되나 투수 계수가 감소하여 현장에서는 상호보완적 관계가 되리라 판단된다. Table 1에 입자크기가 다른 각각의 토양에 대해 수분함량을 다르게 첨가하여 600초에서 측정한 전도도값을, Fig. 2에 이 결과를 바탕으로 한 토양의 크기와 전도도 측정값에 대한 도식 결과를 나타내었다.

Table 1. Conductivity values of each soil for different contents of water.

water contents	size	20-60 mesh	60-100 mesh	100-150 mesh	>150 mesh
0%		0.22	0.22	0.25	0.24
5%		44.7	56.6	60.4	78.4
10%		88.4	142	148	223

2.4. 조제한 시료의 수분함량 측정결과

건조된 토양 7 g에 수분을 5%, 10% 가해 제조한 시료의 수분함량을 확인하기 위해 Karl-Fisher(KF), TGA(Thermal Gravitic Analysis), Gravimetry (GM)를 이용하였다. KF와 TGA의 경우, 측정시 소량(KF:약 0.1 g, TGA:약 0.02 g)의 시료만 사용되므로 이론적인 값과는 상당한 차이를 보였으나 건조방법의 경우 시료전체의 무게감량을 측정하는 것이므로 비슷한 결과를 나타내었다. 따라서 실험에 사용한 시료제조법은 적합하다고 할 수 있다.

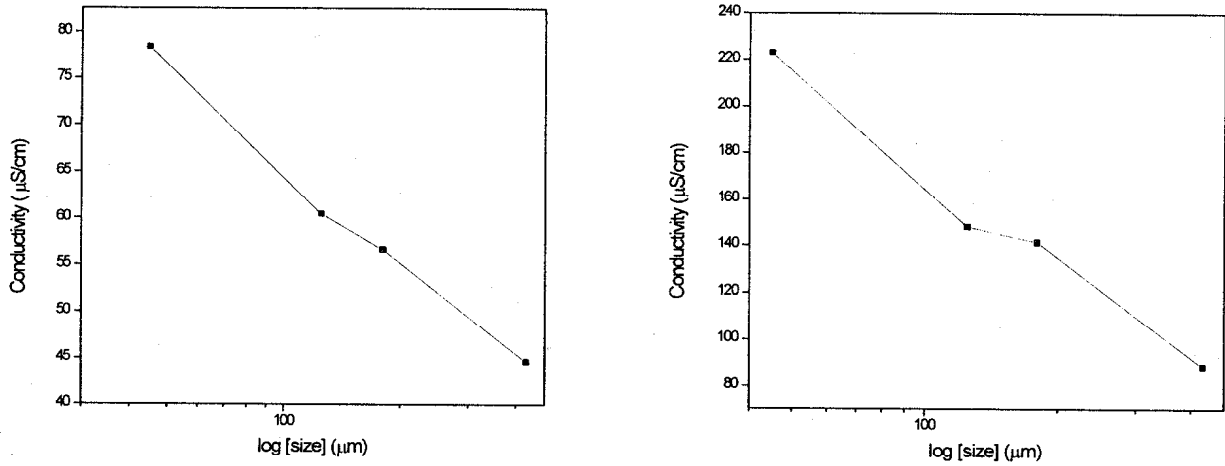


Fig. 2. Plot of particle size vs. conductivity for different water content. (A) 5% water content, (B) 10% water content

Table 2에 각 방법에 의한 측정결과를 나타내었다. 실험에서 사용한 조제토양은 오차를 줄이기 위해 전체에 일정량의 수분 및 이온의 양을 첨가한 후 잘 섞어서 즉시 측정에 사용하였다.

Table 2. Measurement of water content by various methods.

particle size	0%			5%			10%		
	KF	TGA	GM	KF	TGA	GM	KF	TGA	GM
20-60mesh	0	0.17	0.21	1.42	1.55	4.17	5.81	5.58	9.17
60-100mesh	0	0.41	0.32	2.11	0.47	4.31	7.01	4.61	9.29
100-150mesh	0	0.46	0.54	3.14	0.38	4.53	6.82	5.21	9.44
>150mesh	0.56	0.64	0.84	2.77	1.00	4.68	7.04	4.21	9.56

(3회 측정의 평균값)

2.5. 토양 중 이온의 종류 및 토양 입자크기에 따른 전도도 변화 측정

침출수 중에 많이 존재하는 양이온은 Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺이었고, 이들의 음이온으로 Cl⁻, SO₄²⁻가 많이 포함되어 있으므로 이들이 중심이 된 용액을 선택하고 이들에 대한 표준용액을 농도별(0.1 M, 0.01 M, 0.001 M)로 제조하여 20-60 mesh와 >150 mesh의 토양에 대해 용액들을 5%가 되도록 소량 첨가한 후 전도도 측정용 전지를 사용하여 전도도 변화를 10초 간격으로 측정하여 도식하였다.

이온성 성분을 포함한 경우, 탈이온수의 경우와

다르게 입자의 크기가 작을 수록(>150 mesh) 낮은 전도도값을 나타냈다. 입자가 작을수록 흡착에 의해 이온들의 효율적인 전자 channel 형성을 방해하여 전도도값이 작아진 것으로 보여진다.

2.6. 전기전도도 문헌 측정값에 의한 토양전기특성 유도식

전도도 측정 결과와 문헌에 보고된 측정값으로부터 다음과 같은 식을 구하였다.

$$C_M = C_B + kC_R$$

$$= k \frac{[\text{수분양}]^x}{[\text{size}]} + k' [\text{size}] C_R$$

위 식에서 C_M은 각 용액을 토양에 첨가했을 때의 농도별 전도도 측정값을 전지계수를 사용하여 환산한 결과이고 C_B는 증류수만을 첨가했을 때의 바탕값, C_R은 농도별 용액에 대한 문헌값(당량 전도도로부터 환산한 값)이다. 다시말해서 토양에 이온을 첨가해서 얻은 측정값은 순수한 물만을 첨가해서 측정한 바탕값에 이온의 당량 전도도 문헌값을 환산한 값에 특정한 계수(k)를 곱한 값을 더한 값이 된다. 측정의 일관성과 안정성을 유지하기 위하여 모든 측정값은 600초에서의 값을 사용하였다. 이 식에서 C_R과 C_M에 대해 도식하여 직선 최소자승법을 사용하면 직선의 기울기로부터 특정 파라미터인 k값을 구할 수 있고 이 값은 일정 수분함량 및 매질에서 이온들의 특징을 나타내는 고유한 값

이 된다. 또한 직선의 식으로부터 상관계수(r)값을 구하여 실험값과 문헌값인 예측값과의 일치도를 알아볼 수 있다. Fig. 3~5는 각 5%의 수분함유량을 갖는 여러 농도의 이온들에 의한 전기전도도를 제작한 cell로 측정하여 계산한 결과를 도식한 것이다.

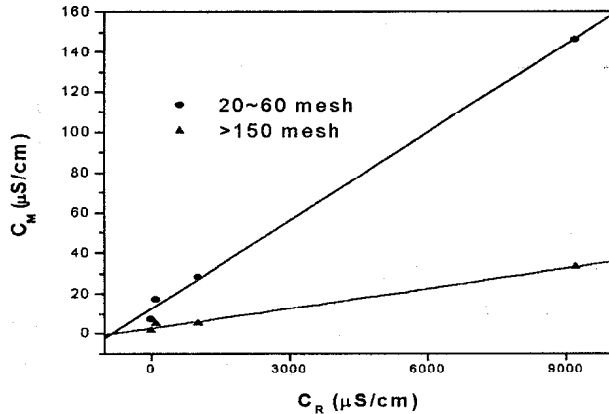


Fig. 3. Regression graph between measured soil total conductivity(CM) and reference value (CR) for equivalent conductivity at various concentrations of NaCl.

각 이온마다 고유한 k값을 나타내었으며 상관계수값도 대부분 0.99이상으로 좋은 직선성을 나타내었다. 따라서 이런 관계식을 활용하면 특정 토양에 있는 이온에 대한 전기적 특성을 적절히 계산할 수 있는 방법을 제시할 수 있다. 각 용액 중 이온 및 토양에 대한 회귀 방정식(regression equation)을 Table 3에 기술하였으며, 이로부터 계산된 특정 k값과 r값을 Table 4에 나타내었다.

3. 결 론

1. 매립지 토양의 전도도를 측정할 수 있는 장치를 제작하여 RS232C 케이블을 연결한 후 출력되는 데이터를 Hyper Terminal(IS Tech) 프로그램을 활용하여 실험에 이용하였다.
2. 조제토양의 수분함유량에 대한 측정을 중량법, Karl Fisher법, TGA법으로 검토한 결과 시료량 많은 중량법이 실제 조제시료의 예측값과 근접

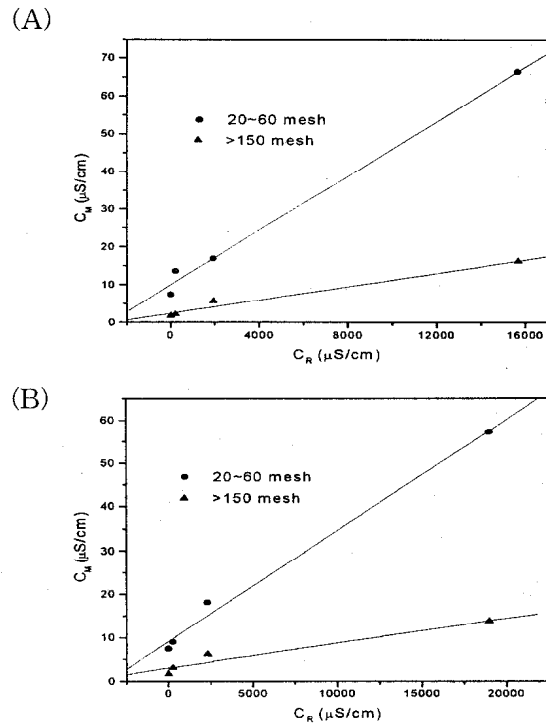


Fig. 4. Regression graph between measured soil total conductivity(CM) and reference value(CR) for equivalent conductivity at various concentrations of (A) Na₂SO₄ (B) K₂SO₄.

한 결과를 나타내었다(Table 3 참조).

3. 토양에서의 전도도는 온도가 일정한 경우 토양의 종류 및 상태, 토양입자의 크기, 수분함량, 함유이온의 종류, 함유이온의 농도에 따라 변화되었으며 이온의 영향을 계산하기 위한 실험결과 바탕값은 입자의 크기에 반비례하고 수분함유량에 비례하였으나, 이온농도의 영향에서는 토양입자 크기에 비례하고 이온의 문헌 측정값인 Specific Conductivity에 비례하는 결과를 얻었다.
4. 상기 관계를 침출수의 주요 이온인 NaCl, Na₂SO₄, K₂SO₄, CaCl₂, MgCl₂를 대상으로 실험한 결과 매립지의 가상 토양입자에 따른 토양-이온 특성 지표(k)값을 측정하였다. 20-60 mesh 토양은 NaCl, Na₂SO₄, K₂SO₄, CaCl₂, MgCl₂에 대하여 차례로 0.0146, 0.00360, 0.00255, 0.00528, 0.00713 이었고 그 상관계수는 모두 0.99 이상이었다.
5. 본 연구의 결과로 단순 차수막파손 또는 지하수의 침투를 포함한 침출수의 누출시 매립지의 토

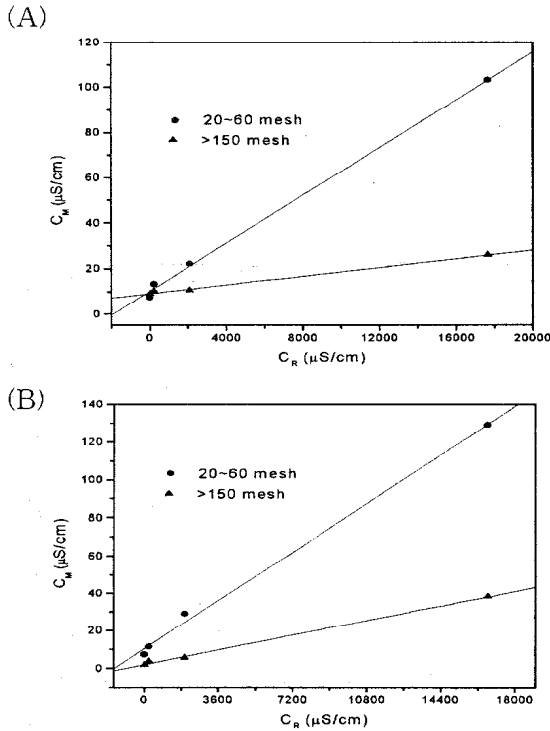


Fig. 5. Regression graph between measured soil total conductivity(CM) and reference value (CR) for equivalent conductivity at various concentrations of (A) CaCl₂ (B) MgCl₂.

양에 대한 전기적인 상태를 예측할 수 있는 기초를 제공하였다.

Table 3. Regression equations calculated with least square method.

	soil	regression equation
NaCl	20~60 mesh	$y = 0.0146x + 12.1$
	>150 mesh	$y = 0.00329x + 2.69$
Na ₂ SO ₄	20~60 mesh	$y = 0.00360x + 10.0$
	>150 mesh	$y = 0.000889x + 2.40$
K ₂ SO ₄	20~60 mesh	$y = 0.00255x + 9.17$
	>150 mesh	$y = 0.000564x + 3.08$
CaCl ₂	20~60 mesh	$y = 0.00528x + 10.1$
	>150 mesh	$y = 0.000961x + 9.08$
MgCl ₂	20~60 mesh	$y = 0.00713x + 10.5$
	>150 mesh	$y = 0.00217x + 1.98$

Table 4. Values of k and r for soil spiked with different solutions.

	soil	k	r
NaCl	20~60 mesh	0.0146	0.9986
	>150 mesh	0.00329	0.9953
Na ₂ SO ₄	20~60 mesh	0.00360	0.9966
	>150 mesh	0.000889	0.9887
K ₂ SO ₄	20~60 mesh	0.00255	0.9959
	>150 mesh	0.000564	0.9690
CaCl ₂	20~60 mesh	0.00528	0.9990
	>150 mesh	0.000961	0.9974
MgCl ₂	20~60 mesh	0.00713	0.9985
	>150 mesh	0.00217	0.9988

참 고 문 헌

1. J. O. Leckie, J. G. Pacey and C. Halvadakis, *ASCE*, **1979**, 105(E2-2), 337.
2. G. J. Farquhar, *Can. J. Civ. Eng.* **1989**, 16, 317.
3. J. P. Giroud and M. F. Houlihan, *Proceedings Sardinia 95, 5th Int. Landfill Symposium*, **1995**, 613.
4. C. C. White and R. D. Barker, *Ground Water Monitoring Remediation*, **1997**, 17, 153.
5. K. Arai, H. Arai, N. Yamazaki and M. Hatano, *5th Int. Conference on Geotextiles, Geomembrane and Related Products*, **1994**, 907.
6. M. Pirbazari, V. Ravindran and B. N. Badriyha, *Water Research*, **1996**, 30, 2691.
7. H. Timur and I. Ozturk, *Water Sci. Technol.* **1997**, 36, 501.
8. R. L. Peyton and P. R. J. Schroeder, *Environ. Eng.* **1990**, 116, 421.
9. M. A. Othman, R. Bonaparte and B. A. Gross, *Geotextiles and Geomembranes*, **1997**, 15, 289.
10. D. A. Boryta, M. N. Nabighian, U. S. Patent 4543525, 1985.
11. M. E. Converse, K. B. Glass and T. E. Owen, U. S. Patent 4725785, **1988**.
12. R. D. Golding, U. S. Patent 5076728, **1991**.
13. M. E. Henderson, U. S. Patent 5357202, **1994**.
14. W. D. Daily, D. L. Laine and E. F. Laine, U. S. Patent 5661406, **1997**.
15. J. A. Dean, *Lange's Handbook of Chemistry*, 14th ed.; McGraw-Hill: New York, 1992; Section 8.