폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성

오석영 · 전효택

서울대학교 자원공학과

1. 서 론

우리사회의 산업화와 도시화로 인한 고도의 물질문명의 발달과 국민생활의 향상은 각종 폐기물의 발생량을 증가시키며 그 처리에 대한 문제들을 던져주고 있다. 현재 우리 나라의 경우 폐기물의 약 89.2%가 여전히 매립에 의하여 처리되고 있고 과거에 운영되어 왔던 폐기물 매립지가 포화되어가고 있는 실정이므로 폐기물 매립지의 부지 선정과 위생 매립지(sanitary landfill)의 설계, 시공 및 관리는 중요 관심사항이 되고 있다. 또한 현재까지 우리 나라의 매립지는 1,000평 이하의 소규모로 단순투기방식으로 이루어졌으며 매립 종료 후 대부분 관리되지 않은 채 방치되어 있어 지하수 및 지표수와 주변 토양오염 문제를 심각히 야기하며 그 처분 방안은 더욱 중요한 관심사가 되고 있다. 한편, 폐기물 매립지는 대표적인 지하수계의 오염원으로서 날로 증가해 가고 있는 지하수 사용에 비추어볼때 지하수 오염 방지의 주 연구 대상이 되고 있다. 이 연구에서는 난지도 매립지와 화성 매립지를 연구대상으로하여 과거 불량 매립된 매립지 주변의 지하수 오염 수준과 각 오염물질들의 이동 특성을 파악하고 최적의 오염지시인자를 산출하여 매립이 종료되었거나 매립이 진행중인 매립지 주변의 지하수 오염을 효과적으로 감시(monitoring)하고 오염물질의 거동을 예측하는데 도움을 주고자 한다.

2. 시료채취

난지도 매립지 주변의 지하수 오염을 파악하기 위하여 건기인 3월말과 우기인 8월초 등 2회에 걸쳐 침출수, 지하수, 지표수 등 총 30개 시료를 채취하였으며 관측정에서는 bailor를 이용하여 수차례 물을 퍼낸 후 시료 채취를 하였다. 침출수 비교 대상 지역인 화성 매립지에서는 침출수는 침출수 차집시설을 이용하여 2개 시료, 지하수는 오염되지 않은 지하수 1개 시료와 매립지 주변에 설치된 관측정에서 2개 시료, 그리고 차집된 침출수를 처리하여 방류하는 처리수 등 건기와 우기에 걸쳐 총 11개 시료를 채취하였다. 김포 매립지에서는 건기의 1차에 침출수 1개 시료를 채취 하였다.

3. 침출수 및 지하수의 물리화학적 특성

1,2차 현장측정결과 침출수의 경우 앞선 문헌과 일치하게 pH는 7 이상의 중성 및 약알칼리를 보이고 있으며 산업폐기물 침출수인 화성 매립지의 침출수가 일반폐기물 침출수인 난지도 매립지나 김포 매립지의 침출수보다 낮은 pH 값을 보이고 있다. 대부분의 지하수 시료는 pH 6-8의 범위를 보이고 있었으며 침출수의 성분들이 희석되어 전기전도도가 낮아질수록 pH가 낮아지는 경향을 보인다. Eh의 경우 1차 현장 측정에서는 대부분의 시료에서 음의 값을 갖는 환원환경이었음을 관찰할 수 있었으며 특히 침출수는 -100mV 전후의 환원환경을 나타내며 난지도 매립지의 오염된 지하수 또한 -50mV 전후의 환원환경을 나타낸다. 난지도 매립지의 침출수의 경우 용출되어 오랜 시간이 지난 L-3을 제외하고는 31.7 - 39.0℃(1차), 40.1℃(2차)의 높은 온도를 특징적으로 나타낸다. 오염된 지하수도 19.5 - 25.2℃(1차), 25.0 -28.8℃(2차)의 상대적으로 높은 온도를 보였으며, 이에 반하여 오염되지 않은 지하수나 지표수의 경우 측정 당시의 상온과 비슷한 온도를 보임으로써 온도는 매립지 침출수에 의한 지하수 오염을 직접적으로 보여주는 좋은 물리적 특성으로 판단된다. 또한 침출수는 17,260 - 32,800(μS/cm)의 높은 전기전도도를 갖고 있으며 오염된 지하수에서는 1,092 - 8,620(μS/cm)로서 침출수 보다는 낮아졌지만 여전히 매우 높은 값을 보인다. 오염된 지표수(샛강)의 경우 657(μS/cm)의 값을 보이며 이는 오염되지 않은 배경 지하수의 396 - 455(μS/cm)보다 높은 전기전도도를 보임으로써 난지도 매립지의 침출수의 유입과 주변 가정용 폐수의 직접적인 영향이 있었다고 판단된다.

4. 일반폐기물 매립지와 산업 폐기물 매립지의 침출수 특성 비교

폐기물 매립지의 침출수는 매립된 폐기물에 직접적인 영향을 받으므로 일반폐기물 매립지의 침출수와 산업폐기물 매립지의 침출수는 성분에서 차이가 발생된다. 일반폐기물 매립지의 침출수인 난지도 매립지의 침출수, 김포 매립지의 침출수와 산업폐기물 매립지의 침출수인 화성 매립지 침출수들의 분석결과중 주성분 이온들을 당량비로 환산하여 Piper diagram에 도시하여 보았다(Fig. 1). 두 침출수 모두 양이온에서는 Na, K가 우세하며 음이온에서는 일반폐기물 매립지 침출수의 경우 HCO_3가, 산업폐기물 매립지 침출수의 경우 SO_4가 우세한 특징을 보이며 잘 구분된다. 이는 산업폐기물 매립지에서 실시되는 고형화 안정처리에서 기인한 SO_4의 부화와, 일반폐기물 매립지에서 보다 활발히 일어나는 생분해 과정과 SO4의 환원에서 기인되는 것으로 판단된다. 또한 분석결과를 종합한 Table 1을 보면 Ca, Mg, Na, Sr, Br 등은 산업폐기물 침출수에 높은 함량을 보이는데 고형화 처리과정에서 기인하거나 화성 매립지의 입지조건상 해수의 영향을 받은 것으로 판단되며, K, Cl은 두 침출수 모두 비슷한 함량치를 보인다. TOC와 HCO_3는 두 침출수 모두 부화되어 있으나 일반폐기물 매립지에서 보다 높은 함량을 보이는데 이는 일

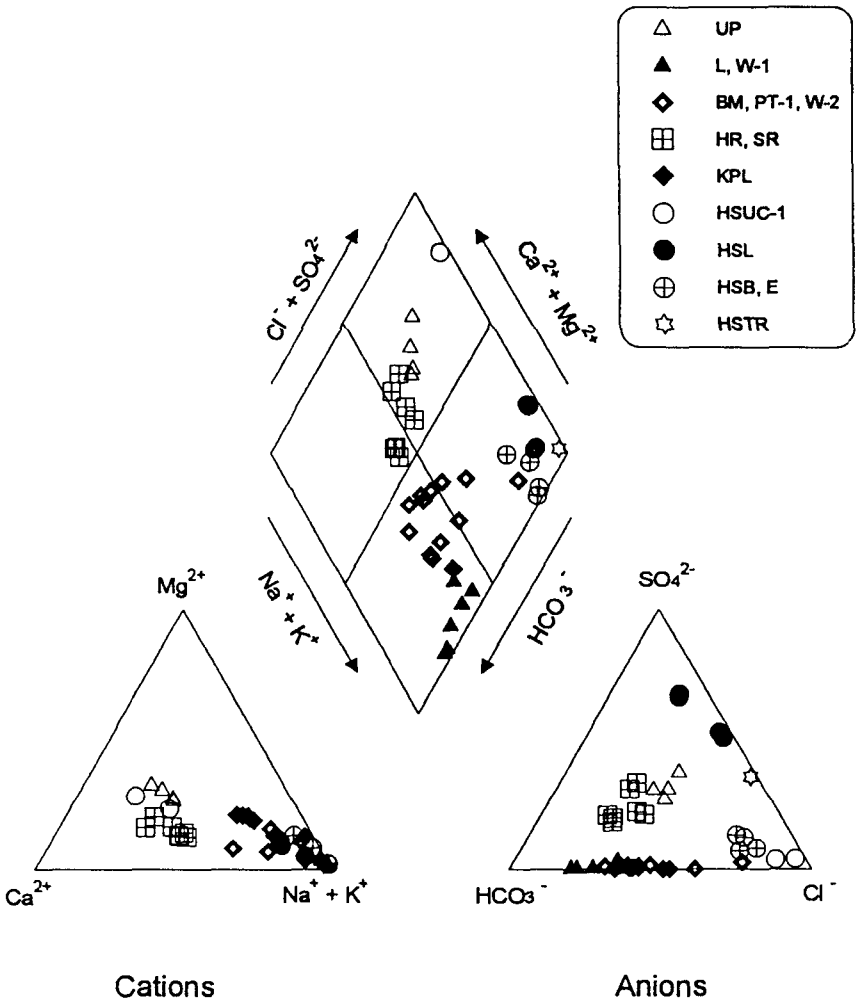

Fig.1 Chemical analyses of studied leachates and groundwaters represented as percentages of total equivalents per liter on the Piper diagram.

Table 1. TOC and ion concentration of leachates in MSW landfill and IW waste landfill(unit :mg/l).

Landfill season	Municipal solid waste (MSW) spring	summer	Industrial waste (IW) spring	summer
Ca	15.6 - 102.3	40.6 - 77.9	405.9 - 409.9	471.1 - 475.1
Mg	39.7 - 285.9	40.2 -47.0	192.6 - 194.4	219.8
Na	1760 - 2910	890 - 1665	5780 - 5920	3085 -3200
K	1059 - 1555	470 - 870	855 - 877	358 - 375
Mn	n.d. - 2.43	0.02 - 0.11	14.4	3.03 - 4.14
Fe	0.56 - 4.50	2.81 - 1.53	0.06	0.07
Li	0.55 - 14.5	0.77 - 9.9	0.48	0.16
Ba	0.13 - 0.41	0.16 - 0.82	0.04	0.08
Sr	0.14 - 0.86	0.37 - 0.40	1.54	1.59
Si	8.79 - 16.33	15.75 - 19.10	13.36	6.43
Al	0.79 - 5.37	3.43 - 6.40	10.25	15.14
B	1.71 - 2.80	2.12 - 3.27	4.57	6.13
Cd	n.d. - 0.02	n.d.	0.04	0.06
Co	0.07 - 0.11	n.d. - 0.05	1.15	0.37
Cr	n.d. - 2.18	n.d. - 0.38	0.31	0.06
Cu	n.d. - 0.03	n.d.	0.21	2.53 - 3.39
Ni	0.23 - 0.45	n.d.	23 - 28	8.8 - 11
Pb	n.d.	n.d. - 0.22	0.27 - 0.38	0.38 - 0.45
Zn	0.12 - 4.48	0.08	3.54	0.16 - 0.19
Cl	1474 - 2821	1801 - 3102	1978 - 2202	2904 - 3112
SO_4	3.2 - 130.1	42.1 - 225.7	7630 - 8814	4716 - 4839
HCO_3	6715 - 13058	5695 - 7526	1485 - 1545	447.5
NO_3	1.3 - 271.0	1.6 - 2.4	25.3 - 27.4	46.4 - 50.5
NO_2	n.d. - 73.9	n.d.	n.d.	n.d.
F	3.75 - 10.98	8.91 -16.21	6.65 - 8.26	12.34 - 12.91
Br	9.49 - 23.47	7.21 - 10.94	44.8 - 52.9	26.9 - 28.7
PO_4	0.84 - 16.49	n.d.	n.d.	n.d.
TOC	206 - 777	*	173	*

MSW : Nanjido, Kimpo landfill leachates
IW : Hwasung landfill leachate
n.d. : not detected
* : not analyzed

반폐기물 매립지가 유기물질의 함량이 상대적으로 높고 생분해가 활발히 일어나고 있는 것에서 기인된다고 사료된다. 또한 건설폐기물이 일부 매립된 난지도 매립지 침출수에서에서 Fe의 함량이 높고 특정유해폐기물이 매립된 화성 매립지에서는 Ni, Cu, Pb, Co, Cd 등의 중금속 원소들이 상대적으로 높은 함량을 보이는데 이 또한 매립된 폐기물의 특성을 직접적으로 반영하는 것이다..

5. 각 오염물질별 수평적 거동

앞서 연구된 유선망분석을 채택하여 난지도 매립지의 침출수가 '침출수 →침출수+지하수 →오염된 지표수'로 이동된다고 가정하고 오염되지 않은 지하수를 배경 수질로 하여 오염물질별 거동을 해석하였다. Piper diagram에 주성분 이온들의 당량비를 도시해본 결과 매립지내의 침출수는 희석작용과 지연작용으로 말미암아 매립지에서 이동될수록 Na, K, HCO_3의 함량비가 감소되고 Ca, Mg의 함량비가 증가하며 특히 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우에는 SO_4의 함량비가 오염되지 않은 지하수로 진화할수록 증가함을 특징적으로 보여준다. Na, K의 경우 침출수가 이동될수록 함량이 감소하며, Ca, Mg의 경우 침출수가 이동함에 따라 증가하는 경향을 보이다가 감소한다. Ca와 Sr, K와 Li는 침출수가 이동함에 따라 비슷한 거동의 경향을 보이는데 지구화학적 수반관계에서 기인된다고 판단된다. Fe는 매립지에서 멀어질수록 그 농도가 감소하여 지표수에서는 거의 발견되지 않는 것으로 보아 대부분 환원되어 2가의 양이온으로 존재한다고 판단되며, Mn은 오염된 지하수인 샛강이 오히려 부화된 것으로 나타나 샛강의 Mn은 매립지 침출수 뿐만 아니라 주변의 생활 폐수의 영향 또한 받은 것으로 판단된다. 또한 전자가를 띠지 않고 지하수에 존재하는 B, Al, Si의 경우도 침출수와 오염된 지하수에서 높은 함량을 나타내는데, B의 경우는 침출수가 매립지에서 이동될수록 점차적으로 감소하는 경향을 뚜렷이 보이나 Al, Si의 경우에는 지질매체에서의 주성분 원소이기 때문에 그 감소 경향이 대수층으로 유입된 침출수+지하수 단계에서는 뚜렷이 발견되지 못했으며 오염된 지표수인 샛강의 경우 오히려 배경 수질보다 낮은 함량값을 나타냈다. 음이온의 경우 생분해에 의해 형성된 HCO_3와 염의 용해에 의해 형성된 Cl이 침출수의 대부분을 형성하는데, Cl은 비반응 용질이므로 침출수가 이동할수록 희석에 의한 지연이 일어나는 것으로 판단되며, HCO_3의 경우 Cl의 농도 감소보다 보다 현저히 감소하여 희석작용과 더불어 침전에 의한 지연이 진행되고 있는 것으로 판단된다. 산화환원전위의 영향을 받는 SO_4는 일부 용출되어 산화된 침출수를 제외하면 매립지 주변에서 멀어질수록 증가되는 경향을 보임으로써 매립지 주변에 황환원대가 존재하고 있다고 판단되며, NO_3는 매립지의 환원환경으로 말미암아 침출수에서 침출수+지하수 단계로 이동될수록 감소되다가 지표환경으로 이동되면서 NH_4의 산화에 의하여 함량이 증가되는 것이 관찰되어 역시 매립지 주

변에 NO_3환원대가 존재하고 있다고 예상된다. 또한 F, Br은 농도는 Cl보다 낮지만 그 변화의 경향이 거의 일치하였다. 침출수에서 중금속 원소들의 함량은 Zn가 가장 높은 함량을 보이며 Cr, Ni, Cd의 함량이 일부 침출수 시료에서 발견된다. 침출수에 용해되어 있는 대부분의 중금속은 매립지 주변에 형성된 황환원대에서 sulphides형태로 침전되거나 Fe-Mn환원대에서 침전되거나 지질매체와의 흡착에 의하여 지연되는 것으로 사료되며 오염된 지표수인 샛강에서는 대부분의 중금속이 검출되지 않았다. TOC는 COD와 함께 유기오염물질의 거동을 대표할 수 있는 성분으로써 침출수에서 388-777(mg/l)의 높은 함량을 보이다가 침출수+지하수 단계에서 12.1-172.4(mg/l)로 급격히 감소하는 경향을 보이는 것으로 보아 매립지와 매립지 하부의 대수층에서 대부분의 생분해가 일어나 유기물질의 지연이 일어나는 것으로 판단된다.

비반응 용질인 Cl의 농도 변화와 비교하기 위하여 침출수에서의 ion/Cl 비가 일정하다고 가정하고 Cl로 표준화한 각 성분들의 값을 살펴본 결과, Ca, Mg의 경우Ca/Cl, Mg/Cl 비가 침출수+지하수 단계에서 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타나는 것으로 보아 침출수+지하수 단계에서 희석작용에 의한 농도 감소가 적고 오염운(contaminant plume)의 중심이 침출수+지하수 단계에 존재하는 것으로 판단되며 Na, K는 Cl보다 더 지연되고 있으며 K가 Na보다 지연이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 Li은 K와, Sr은 Ca와 지구화학적 수반관계로서 비슷한 거동을 보이며, Si/Cl, Al/Cl 이 침출수+지하수 단계에서 급격히 증가하는 것으로 보아 지질매체에서의 용해가 예상된다. B/Cl의 비는 약간의 증가 경향을 보이지만 거의 일정하여 B은 Cl과 같은 거동을 보인다고 판단되며 Fe는 급격히 감소되어 희석작용 이외의 침전 및 흡착에 의해 지연되는 것으로 판단된다.

6. 각 오염물질별 수직적 거동

BTMW(Bundle Type Monitoring Well)에서 심도별로 채취된 오염된 지하수의 수직적인 변화양상을 알아보았다. Na, K는 비반응용질인 Cl보다는 -17.5m 상부에서 급격히 감소하는 것으로 보아 지질매체로의 흡착에 의해서 상부에서 감소된후 하부로 갈수록 그 지연이 Cl과 같이 희석에 의해서 이루어짐이 관찰되며 BM-4(-22.0m)에서 BM-2(-34.5m) 부근에 오염운이 형성되어 있었다. Ca, Mg는 침출수에서보다 BM-4(-22.0m), BM-3(-28.5m)에서 오히려 증가되고 있는데 이는 착화합물의 형성을 통한 지연작용의 감소와 지질매체와의 이온교환작용을 통하여 용해된 결과로 사료되며 Na, K와 마찬가지로 BM-4(-22.0m)에서 BM-2(-34.5m) 부근에 오염운이 형성되어 있음이 관찰된다. TOC, HCO_3의 경우에는 BM-5(-17.5m)전에 급격히 감소하는 것으로 보아 유기물의 생분해와 침전작용이 -17.5m 상부에서 활발히 진행된다고 판단되며 역시 BM-4(-22.0m)에서 BM-2(-34.5m) 부근에 오염운이 형성되어 있는 것이 관찰된다. B, Al, Si,

F, Br도 주성분 양이온 원소들과 같이 BM-4(-22.0m)에서BM-2(-34.5m) 부근에 오염운이 형성되어 있음이 관찰되며 Sr 또한 Ca과 같은 경향을 보인다. NO_2는 BM-5(-17.5m)에서 부터 하부로 갈수록 증가하고 NO_3는 감소하는 것이 관찰되는데 NO_3의 환원에 의한 생분해가 촉진되는 NO_3-환원대가 매립지 하부에서 존재하는 것으로 예상되며 SO_4의 경우 BM-5(-17.5m)상부에서 급격히 감소하는 것으로 보아 NO_3-환원대 상부에 황환원대가 형성되어 있다고 예상된다.

7. WATEQ4F 분석을 통한 무기물들의 존재형태와 포화지수(S.I.)

현장측정된 물리적 특성과 화학분석된 값을 WATEQ4F에 입력하여 열역학적 평형상태를 가정한 양이온들의 species를 예상하였다. Ca, Mg의 경우 난지도 매립지 침출수의 경우 HCO_3와 착화합물을 주로 형성하여 존재하며 오염되지 않은 지하수로 진화할수록 2가의 양이온으로 존재하는 비값이 높아진다. 화성 매립지 침출수의 경우에는 2가의 양이온으로 존재하는 비값이 난지도 매립지 침출수보다 높으며 주로 SO_4, HCO_3와 착화합물을 형성한다. Na, K의 경우에는 착화합물을 형성하지 않고 1가의 양이온으로 대부분 존재하는데 지질매체와의 반응에 의한 지연이 2가의 양이온들보다는 낮지만 흡착에 의한 지연이 일어날 확률이 침출수에서 상대적으로 높아질 것이라고 판단된다. B, Si, Al의 경우에는 약산의 형태나 수산화물 형태로 전자가가 없거나 음의 전자가를 갖는 형태로 존재하고 있으며, 지질매체에 높은 함량을 보이지 않는 B의 경우 좋은 오염지시인자로의 역할을 할 수 있다고 예상된다. Fe, Mn의 경우도 대부분 2가의 양이온 보다는 착화합물을 형성하고 있으며 중금속원소의 대표적인 예인 Zn의 경우에도 침출수가 이동될수록 양이온의 함량비가 높아지는 것이 관찰됨으로써 중금속원소들의 흡착능력의 저하가 예상된다.

carbonates로의 침전을 알아보기 위하여 WATEQ4F를 통하여 carbonates중 반응이 빨리 진행되는 calcite($CaCO_3$)의 포화지수(S.I. : Saturation Index)의 변화를 살펴본 결과, WATEQ4F로 예측된 포화지수는 침출수(W-1) : 1.477, 침출수+지하수(PT-1) : 0.734, 오염된 지표수(SR) : -0.233 , 배경 지하수(UP-1) : -2.024 등으로 나타나 매립지에서의 Ca의 공급과 생분해에 의한 CO_3의 공급이 계속되면서 높은 pH값이 유지된다면 매립지 하부에서는 carbonates 형태의 침전에 의한 지연이 일어날 것으로 판단된다.

8. 오염지시인자와 오염기준으로의 접근

Contaminaion Factor를 주변 오염되지 않은 지하수를 배경값으로하여 각 성분들에 대하여 계산하였다. 계산 결과 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, Zn, HCO_3, Cl, F, Br, TOC 등이 매우 높은 대조를 보이고 산업폐기물 매립지인 화성 매립지 경우에

는 침출수를 대상으로 살펴보면 K, Na, Ca, Mg, B, SO_4, HCO_3, Cl, F, Br, TOC 등이 높은 대조를 보이고 있음이 관찰됨으로써 오염지시인자로서의 좋은 조건을 갖추고 있다. 특히 화성매립지의 경우 주변 관측정인 HSE에서도 K, Na, Ca, Mg, B, SO_4, HCO_3, Cl, F, Br 등이 높은 값을 보이지만 매립지 유기물의 유출을 직접적으로 반영하는 TOC의 경우 함량값이 나타나지 않아 침출수의 유출이라기 보다는 매립지 공사중에 고립된 해수의 영향이라고 사료된다. 또한, 인간의 건강에 직접적인 영향을 주는 주요 법적 규제 원소들을 음용수 기준(보건사회부령 제 871호)으로 접근해보면 난지도 매립지에서는 침출수와 오염된 지하수 일부에서 Cl, F, Fe, Mn 등이 기준을 넘고 있고 Cd, Cu, Zn, Pb 등의 중금속 원소들은 일부 침출수와 오염된 지하수를 제외하고는 예상과는 달리 음용수 기준을 많은 원소들이 넘지 못하였다. 특히 유선망 분석을 통해 난지도 매립지의 침출수의 영향을 받은 것으로 알려진 샛강에서는 Mn과 F가 수질기준을 넘고 있었을 뿐 중금속 원소들에 대한 오염은 그리 진행되지 않은 것으로 나타났다. 이는 난지도 침출수의 성분이 중금속의 함량이 매우 높지 않고 또한 유기물의 생분해와 희석, 침전, 흡착 등의 지연작용으로 말미암아 매립지에서의 이동이 제한 된 것에서 기인된 것으로 판단된다.

9. 결 론

① 폐기물 매립지에서 발생되는 침출수는 매립지내에서의 유기물의 생분해와 무기물의 용해에 의한 높은 온도와 전기전도도를 가지고 중성 및 알칼리의 환원환경으로 존재하고 있으며, 주성분원소로 Na, K, Ca, Mg, HCO_3, Cl 등이, 부성분원소로 Mn, Sr, Ba, Li, F, Br 등이 부화되어 있었고, 일반폐기물 매립지의 경우 Fe가, 산업폐기물 매립지인 경우에는 SO_4가 특징적으로 부화되어 있다.

② 화학분석, Cl 표준화과정, WATEQ4F 분석결과, 매립지에서 침출수가 이동하여 진화해 갈수록 K, Na, Li 등의 양이온은 희석작용과 흡착을 통하여 지연되고, HCO_3의 경우 희석작용과 침전에 의해서, Cl, F, Br 등은 희석작용에 의해 지연되며, Ca, Mg, Sr 등은 지질매체와의 이온교환작용을 통해서 매립지 주변에서 증가하다가 희석과 침전을 통하여 지연되는 등 각각 비슷한 오염운을 형성하며 거동한다.

③ 유기물질을 대표하는 TOC는 매립지 주변을 벗어나면서 급격히 감소하고 있는 것으로 보아 유기물질의 생분해는 매립지 내부와 근접 주변에서 일어나는 것으로 판단되며, 중금속 원소의 경우 매립지 주변의 황환원대와 Fe-Mn 환원대에서 대부분 침전되어 지연되는 것으로 판단된다.

④ Contamination Factor를 통한 오염지시인자의 도출 결과 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, Zn, HCO_3, Cl, F, Br, TOC 등이, 산업폐기물 매립지인 화성 매

립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, SO_4, HCO_3, Cl, F, Br, TOC 등이 높은 대조를 보이며 좋은 지시인자의 역할을 하고 있었으며 해수의 영향을 받은 지역에서는 TOC가 좋은 지시인자이다.