

## 생활폐기물 매립장 침출수의 삼중수소 분포

박순달\* · 김정석 · 조기수 · 김종구 · 김원호

한국원자력연구소 원자력화학연구부  
(2004. 2. 25 접수, 2004. 3. 26 승인)

### Tritium Distribution in Leachates from Domestic Solid Waste Landfills

Soon Dal Park\*, Jung Suk Kim, Kih Soo Joe, Jong Gu Kim and Won Ho Kim

Nuclear Chemistry Research Team, KAERI,  
P.O. Box 105, Yuseong, Taejon, 305-600, Korea  
(Received Feb. 25, 2004, Accepted Mar. 26, 2004)

**요 약 :** 생활폐기물을 매립, 처리하는 위생매립장에서 발생된 침출수의 삼중수소 분포 특성을 조사하기 위해 침출원수, 처리수 및 메탄가스응축수의 삼중수소 농도를 측정하였다. 또한 침출수 및 처리수의 콜로이드 크기에 따른 삼중수소의 용존특성을 조사하였다. 침출수의 주요 무기물 오염성분은 Na, K, Ca, Mg, 암모니아성 질소 및 염소이온이었다. 연구대상 매립장중 2개 매립장을 제외한 나머지 매립장의 침출수에서 환경준위보다 수십 내지 수백 배 이상 높은 농도의 삼중수소가 검출되었으며, 조사기간중 침출수의 평균 삼중수소 농도분포는 17 ~ 1196 TU 였다. 메탄가스응축수 및 침출수 처리공정을 거친 처리수에서도 침출수와 비슷한 수준의 삼중수소가 검출되었다. 이와 같은 삼중수소의 농도는 삼중수소의 음용수 기준에 비해 약 100배 이상 낮은 수준임을 확인할 수 있었다. 침출수중 삼중수소는 대부분 0.45  $\mu\text{m}$  이하의 용해성 콜로이드에 분포되어 있었으나, 일부는 0.45  $\mu\text{m}$  이상의 콜로이드에 분포되어 있는 것으로 추정되었다. 침출수의 삼중수소와 총유기성탄소가 상대적으로 높은 상관성을 나타내었다. 그러나 침출수의 삼중수소 농도는 매립장의 규모, 수문학적 특성 및 매립연령 등과 특별한 상관성이 없는 것으로 나타났다.

**Abstract :** It is for the purpose of investigating the tritium distribution in the leachates, the raw and treated leachates and the condensates of the methane gas, which have occurred from domestic solid waste landfills. Also it aims to measure the tritium distribution level on the colloid size of the leachates, the raw and treated leachates. It was found that the major inorganic contaminants of the leachates were Na, K, Ca, Mg,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{Cl}^-$ . The mean tritium level of the raw leachates of the investigated 13 landfill sites for 6 months was 17 ~ 1196 TU. It corresponded to a several scores or hundreds of magnitude

★ Corresponding author  
Phone : +82+(0)42-868-2442 Fax : (0)42-868-8148  
E-mail : nsdpark@kaeri.re.kr

higher value than that of the normal environmental sample level except for two landfill sites. Also such a high concentration of the tritium was found in the treated leachates and methane gas condensates as well. Nevertheless it is important to emphasize that the tritium level which was found in this research is about 100 times lower than the tritium limit for the drinking water quality. And most of the tritium existed in the dissolved colloid of the leachate of which the colloid size is below  $0.45 \mu\text{m}$ . Also, according to the tritium analysis results of the leachates after filtration with  $0.45 \mu\text{m}$  membrane filter for some landfills, it is likely that some tritium of the leachate would be distributed in a colloid size over  $0.45 \mu\text{m}$ . In general the relationship between the tritium and other contaminants in the raw leachate was low, but it was relatively high between the tritium and TOC. However, the tritium content in the leachate had no meaningful relationship with the scale, hydrological characteristics and age of the landfill.

**Key words** : domestic solid waste, sanitary landfill, raw leachate, treated leachate, condensate of methane gas, tritium

## 1. 서 론

2001년 현재 우리나라의 생활폐기물 발생량은 약 48000톤/일이며, 인구 1인당 1일 배출량은 약 1.01 kg이다. 생활폐기물의 조성은 음식쓰레기 39%, 종이류 23%, 플라스틱류 12%로 음식쓰레기가 가장 높은 비율을 차지한다. 우리나라의 생활폐기물처리는 매립 43%, 소각 14%, 재활용 43%로 생활폐기물 발생량의 40% 이상을 매립처리에 의존하고 있다. 2001년 현재 전국적으로 286개소의 매립장에서 생활폐기물을 처리하고 있다.<sup>1</sup> 폐기물을 매립처리하는 매립장에서는 폐기물의 분해, 용출과정에서 고농도로 오염된 침출수와 악취가 발생된다. 따라서 생활폐기물의 매립처리에 따른 이차오염을 방지하기 위해서는 생활폐기물매립장의 철저한 관리가 요구된다.

침출수의 조성은 매립폐기물의 종류, 매립연령, 매립장의 수문학적 특성 및 매립방법 등에 따라 다르며 같은 매립장에서도 폐기물의 분해단계에 따라 다른 특성을 가진다. 생활폐기물 매립장의 침출수에서는 생물학적산소요구량, 화학적산소요구량 총유기탄소 등 고농도의 오염성분이 검출되며, 폐기물의 분해단계에 따라 pH 및 침출수의 생분해도가 달라진다. 그러나 무기물성분은 폐기물의 분해단계에 따라 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 생활폐기물 매립장 침출수의 주요 무기물 성분은 Na, K, Ca, Mg, 암모니아성 질소 및 염소이온이며, 아질산 및 질산 이온은 거의 검출되지 않는다. 이와 같은 침출수의 특성은 생활폐기물매립장에

매립되는 폐기물의 특성을 나타낸다.<sup>2,3,4,5,6</sup> 따라서 폐기물매립장에서 발생된 침출수의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 매립 폐기물의 조성일 것이다.

생활폐기물매립장에는 사용이 끝난 여러 가지의 소비용품 및 생활용품들이 매립되고 있다. 이러한 용품들은 종류가 많고 방출량이 불분명하여 정확한 통계자료가 없는 실정이다. 생활폐기물매립장 침출수에서 빗물의 삼중수소 분포 농도로는 설명할 수 없는 높은 농도의 삼중수소가 검출되었다는 보고가 있다.<sup>7,8,9</sup> 생활폐기물 매립장에 매립되는 폐기물중 삼중수소 오염원이 존재하지 않는다면 매립장 침출수의 삼중수소는 매립장이 위치한 지역의 빗물중 삼중수소 농도와 깊은 상관성이 있을 것이다.

삼중수소는 대기권 상층부에서 고에너지의 감마선과 산소 혹은 질소 원자들간의 반응에 의해서 자연적으로 생성되는 환경동위원소이다. 이렇게 자연적으로 생성된 삼중수소는 산화되어 HTO 형태로 지구의 수문학적 순환에 들어오게 된다. 우주선의 자연반응에 의해 생성된 삼중수소에 의한 빗물중 삼중수소 농도는 3 ~ 10 TU 정도인 것으로 보고되어 있다. 삼중수소의 인공적생성 원으로는 대기권 핵폭발실험, 삼중수소를 이용한 여러 가지 과학기술 활동과 소비용품 및 생활용품 등이 있다. 1952년 이후 대기권에서의 핵폭발실험에 의해 자연중 삼중수소 농도는 급격히 증가되어 1960년대에는 빗물중 삼중수소 농도가 10,000 TU를 기록한 바도 있다. 그러나 핵실험이 금지된 1980년 이후 대기중 삼중수소의 양이 자연생성 수준으로 감소되었다.<sup>7,8,10</sup>

따라서 삼중수소의 가장 중요한 인공적 오염원으로는 인간활동에 의한 삼중수소 응용과 삼중수소를 함유한 소비성용품 및 생활용품일 것이다. 2003년 현재 우리나라의 삼중수소 사용현황에 의하면 군수산업체에서 야광용, 의료기관에서 생화학검사용, 연구기관에서 추적자용 등으로 사용하고 있다. 이들 기관에서 사용하고 있는 삼중수소의 양은 전체 관리대상 방사성물질의 약 10% 이하로 보고되어 있다. 이들 기관에서 사용되고 있는 삼중수소는 방사성물질로써 관리되고 있으므로 사용량 및 폐기물량을 추적할 수 있다.<sup>11</sup> 따라서 이러한 활동에서 발생된 폐기물이 일반 생활폐기물매립장에 반입될 수는 없을 것이다.

소비성용품 및 생활용품에서의 삼중수소 이용은 야광시계, 나침반, 전화다이얼 액정표시판 등의 야광용품 및 삼중수소기체광원 [Gaseous Tritium Light Sources (GTLS)] 및 삼중수소기체발광장치 [(Gaseous Tritium Light Device (GTLD)] 등이 있다. GTLS 및 GTLD 등은 비상구안내등, 탄광안내등 비행기착륙유도등 등에 사용된다. 야광용 물품에 사용되는 야광페인트에서 삼중수소는 polystyrene과 중합체로 혼합되어 발광물질인 ZnS, CdS 등을 여기시켜 자체발광을 일으킨다. 삼중수소는 GTLS, GTLD 등에서 HT의 기체형태로 유리관에 봉입되어 발광체를 여기시켜 빛을 발생시킨다.<sup>7,8,10,12,13,14</sup> 이와 같은 소비성용품 및 생활용품은 사용이 끝난후 생활폐기물과 함께 폐기되기 때문에 이들에 의한 삼중수소 폐기량을 정확히 확인 할 수 없는 실정이다.

야광페인트를 사용하는 손목시계, 패종시계 등은 최고 280 MBq/device, 가스형태의 삼중수소광원 (GTLS)을 사용하고 있는 시계는 최고 7.5 GBq/device의 삼중수소를 함유하고 있는 것으로 보고되어 있다. 이들 삼중수소를 함유한 소비성용품들은 사용이 끝난 다음 폐기물로 매립되거나 소각될 것이다. GTLD를 조사한 결과 2 ~ 10%만이 삼중수소 기체로 존재하며 나머지는 파쇄 되어 침출수에 용해되기 쉬운 형태로 존재하였다. GTLD 1개가 생활폐기물매립장의 폐기물에 섞여 있다면, 10년 동안 100톤/일의 침출수를 발생시키는 매립장 침출수의 삼중수소를 10000 TU까지 높일 수 있다고 한다. 또한 삼중수소를 함유한 생활용품을 소각처리시 수 10<sup>18</sup>Bq에 해당되는 양의 삼중수소가 직접 대기순환계로 방출될 수 있다는 보고가 있다.<sup>7,9,10,14</sup>

삼중수소의 오염원에 관계없이 보건학적인 의미에서 삼중수소의 인체에 대한 위험도는 크지 않은 것으로 인

식되고 있다. 세계보건기구 (WHO)의 음용수 기준 설정에서 삼중수소에 대한 규제치는 없으며, 전배타방사능으로 규제하고 있다. 이 기준과 성인의 1일 물 섭취량을 근거로 계산하면 음용수중 삼중수소의 규제치는 100000 TU 이상이 된다고 한다.<sup>7,8</sup> 그러나 생활폐기물 매립장 침출수의 삼중수소 분포에 관한 연구는 생활폐기물로부터 방출되는 삼중수소 오염원의 추정과 해석에 중요한 자료를 제공 할 것이다. 또한 물의 구성원자인 삼중수소의 보존적인 특성은 침출수 처리공정의 운영 지표로 이용될 수 있으며, 침출수중 삼중수소 분포 자료는 매립장 주위 지하수, 지표수에 대한 침출수의 영향을 밝힐 수 있는 추적자로서 중요한 도구가 될 수 있을 것이다.<sup>8,9,10</sup>

물의 삼중수소에 관한 주요 연구분야는 삼중수소를 추적자로 사용한 빗물, 지표수 및 지하수의 유동연구 및 환경방사선 감시를 위한 환경시료의 삼중수소분포 등이다.<sup>10,15,17</sup> 폐기물 매립장 침출수의 삼중수소에 관한 연구는 매립장에 따른 침출수의 삼중수소 분포특성, 삼중수소 오염원 규명, 삼중수소와 일반환경오염성분의 상관성, 폐기물의 분해 메카니즘에 따른 삼중수소 분포 특성 및 매립장 침출수의 주위 환경영향 등에 관련되어 진행되고 있다.<sup>7,8,9</sup> 우리나라에서는 아직 생활폐기물매립장 침출수의 삼중수소분포 특성에 관한 체계적인 연구결과가 발표된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 생활쓰레기를 매립처리하는 1개 대도시 광역위생매립장과 12개 중소도시 위생매립장에서 발생된 침출수의 오염물질 용존특성, 침출수, 처리수 및 메탄가스용출수의 삼중수소 분포특성 및 삼중수소와 일반 환경오염물질들간의 상관성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시료채취 및 처리

인구 150만명의 1개 대도시 광역위생매립장과 인구 3 ~ 60만명의 12개 중소도시 위생매립장을 선정하여 6개월간 월 3회 씩 침출수 및 처리수를 각각 약 10 리터 씩 채취하였다. 시료를 실험실로 옮긴 후 pH, 전도도 등은 바로 측정하고 금속 분석용 시료는 염산을 가하여 pH 1 이하로 만들어 냉장고에 보관하였다가 가능한 빨리 분석 하였다. 음이온 및 삼중수소는 산처리 없이 냉장고에 보관하여 분석하였다. 콜로이드 크기에 따른 삼중수소 분포특성을 조사하기 위해 여과하지 않은 침출수 시료와 침출수 시료를 Whatman #42 여과지로 여과

한 후 그 여액을 공극 크기 0.45  $\mu\text{m}$ , 직경 47 mm의 cellulose nitrate 재질 여과막을 사용하여 진공펌프로 흡인여과한 여액을 사용하였다.

## 2.2. 환경오염성분 측정

생물학적산소요구량 [(biological oxygen demand(BOD)), 화학적산소요구량 [(chemical oxygen demand(COD)), 금속성분 및 음이온 성분 등의 일반 환경오염성분 분석은 환경오염공정시험법 절차에 따라 측정하였으며 COD 측정에는 중크롬산칼륨법을 적용하였다. 총유기탄소 [(total organic carbon(TOC)] 분석에는 연소 적외선흡수법의 ASTRO 2001 SYSTEM 분석기를 사용하였으며 음이온분석에는 Dionex DX-100 이온크로마토그래피를 사용하였다. 또한 금속성분 분석에는 JOBIN YVON JY38PLUS의 유도결합프라스마 방출분광분석기를 사용하였다.

## 2.3. 삼중수소분석

예비실험결과 침출수의 삼중수소는 침출수를 농축하지 않고 직접 증류하여 측정할 수 있는 수준이었다. 따라서 본 연구에서는 직접증류계측법으로 침출수의 삼중수소를 분석하였다. 둥근 플라스크에 침출수 50 mL를 취하여  $\text{KMnO}_4$ 와  $\text{Na}_2\text{O}_2$ 를 소량 첨가하여 증류한 후 증류액 10 mL를 20 mL 테프론 용기에 분취하고 cocktail 용액 (Ultima Gold LLT Scintillator) 10 mL와 혼합하여 물증탕한 후 냉암소에 하루동안 방치한 다음 계측하였다. 삼중수소 측정에는 액체섬광계수기 (liquid scintillation counter: Model LKB 1220 Quantulus)를 사용하였으며, 소광 보정용 표준시료를 제조하여 소광에 의한 영향을 보정하기 위해 외부선원비법을 이용한 standard quenching parameter (SQP) 값과 시료의 값을 비교하여 오차가 5% 이하인가를 확인한 후 측정결과를 삼중수소 방사능 농도분석에 이용하였다. 측정은 1일간 방치된 삼중수소 시료를 액체섬광계수기를 사용하여 시료당 50분씩 10회 계측하였다. 생활폐기물 매립장의 침출수 처리시설로 처리한 처리수와 일부 매립장에서 채취한 메탄가스 응축수도 침출수와 같은 방법으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 침출수의 오염특성

본 연구에서 조사한 13개 위생매립장 침출수의 일반

환경오염특성을 Table 1 ~ 3에 나타내었다. Table 1 ~ 3에서 보는 바와 같이 BOD, COD 농도가 높고 pH는 중성 내지 약알칼리성을 나타내었으며 주요 금속 오염성분은 Na, K, Ca, Mg이었다. 또한 무기물성분으로 암모니아성 질소와 염소 이온이 높은 농도로 검출되었으나 질산성질소 및 아질산성 질소는 거의 검출되지 않았다. 매립장에 따라 침출수의 오염강도가 크게 변하였으며 같은 매립장에서도 시료 채취 시점에 따라 오염물질의 농도가 크게 변하는 특성을 보였다.

Table 1. Analysis results of the raw leachates for domestic solid waste landfills

Site	pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	Conductivity (mS/cm)
A	7.52	4601	582	14.3
B	7.93	3898	682	10.21
C	7.42	2373	371	4.71
D	7.68	3372	659	15.51
E	7.68	4038	385	10.47
F	8.33	117	43	4.06
G	8.29	1840	342	17.45
H	7.36	649	64	8.37
I	7.98	322	123	2.44
J	7.52	753	45	5.53
K	7.98	492	86	8.48
L	7.98	4109	1058	15.69
M	8.11	179	125	1.80

Table 1. Analysis results of the raw leachates for domestic solid waste landfills(continued)

Site	TOC (mg/L)	Alkalinity (mg/L)	SS (mg/L)	TP (mg/L)	$\text{NH}_4^+$ (mg/L)
A	4647	8035	824	14	1740
B	3322	4523	815	10.58	860
C	2138	2199	323	9.87	504
D	3562	5306	1910	12.88	1462
E	1715	6125	2350	10.24	168
F	198	1250	905	1.25	347
G	1490	10113	2320	8.45	1075
H	465	3713	270	1.28	
I	920		190		185
J	1570	1743	240	7.94	470
K	2430	2905	150	9.16	689
L	4690	3757	1790	11.30	1176
M	430	621	110	5.63	28

Table 2. Major metal compositions of the raw leachates for domestic solid waste landfills(mg/L)

Site	Na	K	Ca	Mg
A	1707	1123	146	156
B	1445	892	41	178
C	380	250	155	54
D	1957	1239	194	187
E	2470	1345	107	157
F	411	321	45	72
G	1117	712	297	142
H	1528	968	179	118
I	1040	647	88	105
J	346	226	143	47
K	1582	1395	450	116
L	550	436	87	79
M	179	89	109	37

Table 3. Anion composition of the raw leachates for domestic solid waste landfills(mg/L)

Site	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
A	94	1800	36	1.5	41
B	83	2156		3.0	6.35
C	35.8	257	23		21.2
D	113	3070	ND*	2.1	56
E		2478			15
F	ND*	653	1.4	1.8	7.5
G	144	1294	120	ND*	80
H	1.2	1620	38	2600	70
I	0.4	1490	ND*	2.6	5.72
J	12.5	458	ND*	ND*	8.4
K	130	1431	ND*	ND*	90
L	0.2	667	ND*	ND*	11
M	5	132	ND*	ND*	2

ND\*: Not Detected

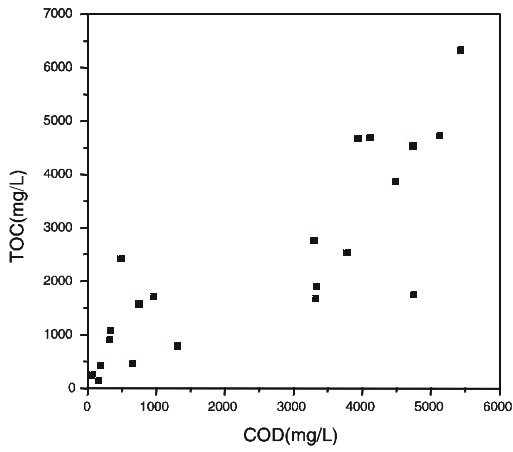
침출수의 pH는 폐기물의 생화학적 분해상태, 알칼리도 및 외부 유입수에 의한 희석정도에 따라 영향을 받는다. 유기산의 발생이 높은 매립초기 폐기물 침출수의 pH는 3 이하로 떨어질 수도 있다. 그러나 메탄발효단계에서는 침출수의 pH가 7 ~ 8의 중성 내지 약알칼리성을 나타낸다.<sup>18</sup> 본 연구대상 매립장 침출수의 pH는 7.36 ~ 8.33 으로 매립장의 폐기물분해상태는 메탄 발효단계에

있는 것으로 사료된다. 매립장 침출수의 BOD, COD 분석결과 침출수의 생분해도는 약 20% 이하였다 침출수의 금속성분 농도는 폐기물조성 이외에도 침출수의 유기물농도, pH 및 탄산이온과의 착물생성도 등에 따른 함수인데 pH가 낮아짐에 따라 증가하고 탄산이온의 증가에 따라 감소한다.<sup>2,3,4</sup> 그러나 침출수의 조성은 매립 폐기물의 조성에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 생활폐기물매립장 침출수의 조성은 생활쓰레기의 약 40%가 음식물쓰레기라는 특성을 나타내는 것이다<sup>1</sup>. 음식물쓰레기로부터 발생하는 Na, K, Ca, Mg 등은 용해되기 쉬운 금속염의 형태로 존재할 것이며, 침출수의 전기전도도는 주로 Na, K, Ca, Mg 및 Cl 등에 기인한다.<sup>2,3,4,5,6,18</sup>

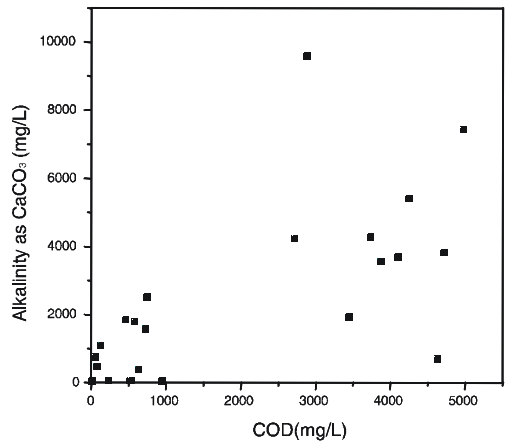
본 연구대상 매립장에서 측정된 침출수 오염성분간의 상관성을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 침출수에 존재하는 오염성분간의 상관성은 낮은 것으로 나타났으며, 전기전도도와 Cl<sup>-</sup>가 상대적으로 높은 상관성을 보였다. 전기전도도는 용액시료중 이온성 용해물질의 총량을 나타내는 지표이다. 또한 염소이온은 침출수의 음이온 성분중 가장 높은 농도를 보이는 데, 이것은 주로 생활쓰레기중 음식물쓰레기의 용출에 의한 것이다.<sup>2,3,4,5,6</sup>

### 3.2. 침출수의 삼중수소분포

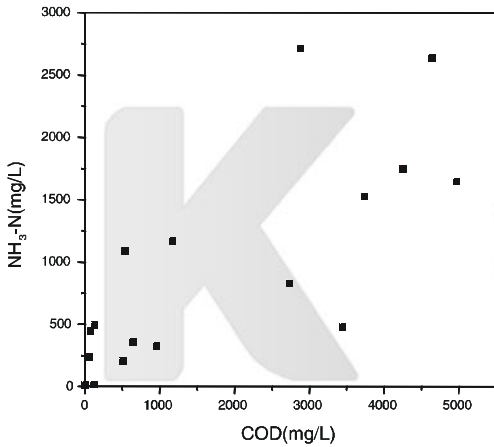
Table 4에 13개 위생매립장에서 6 개월 동안 매월 3회씩 18회 측정된 삼중수소의 평균값을 나타내었다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 13 개 위생매립장에서 발생된 침출수의 삼중수소 농도 분포범위는 평균 17 ~ 1196 TU였다. 삼중수소의 농도변화 범위는 9 ~ 66%로 일반 환경오염성분의 농도변화와 마찬가지로 매우 컸다. 본 연구에서 6개월간 측정된 전체 매립장 침출수의 평균 삼중수소 분포농도는 384±381 TU였다. 연구대상 매립장중 J 매립장 침출수가 1196 TU로 가장 높은 삼중수소 분포를 나타내었으며, 6 개월간 측정 시료에 따른 농도변화는 약 15%로 삼중수소의 농도변화가 비교적 낮았다. 이 도시는 인구 약 6 만명의 농촌형 도시로 다른 연구대상 매립장들에 비해 특별한 삼중수소 오염원은 알려져 있지 않다. 삼중수소 농도가 환경준위 수준으로 낮은 곳은 I, M 2개 매립장으로 각각 17, 20 TU가 검출되었다 I 매립장 침출수의 삼중수소 농도는 감시정 시료와 마찬가지로 17 TU가 검출되었다. 이 두 매립장이 위치한 도시의 인구와 생활환경도 J 매립장과 유사하다. 연구대상 매립장중 두 번째로 삼



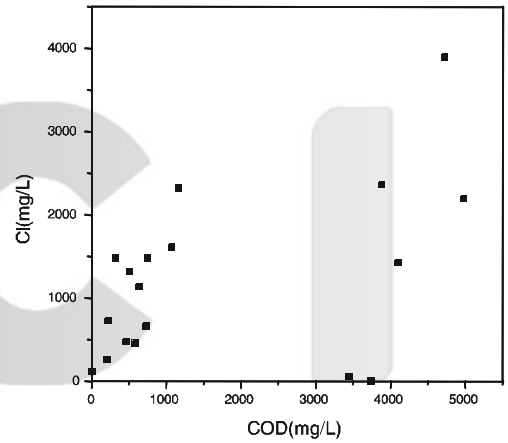
(a)



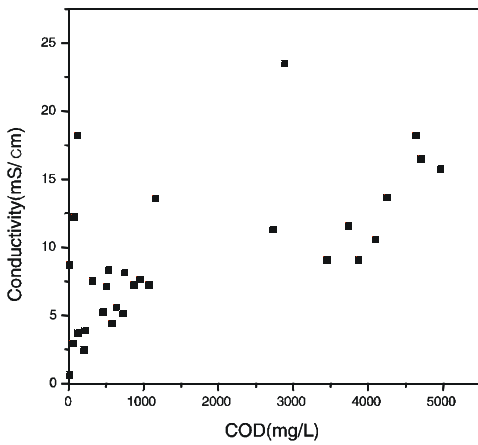
(b)



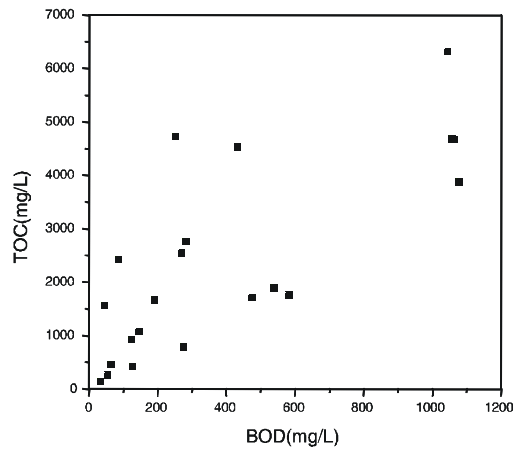
(c)



(d)



(e)



(f)

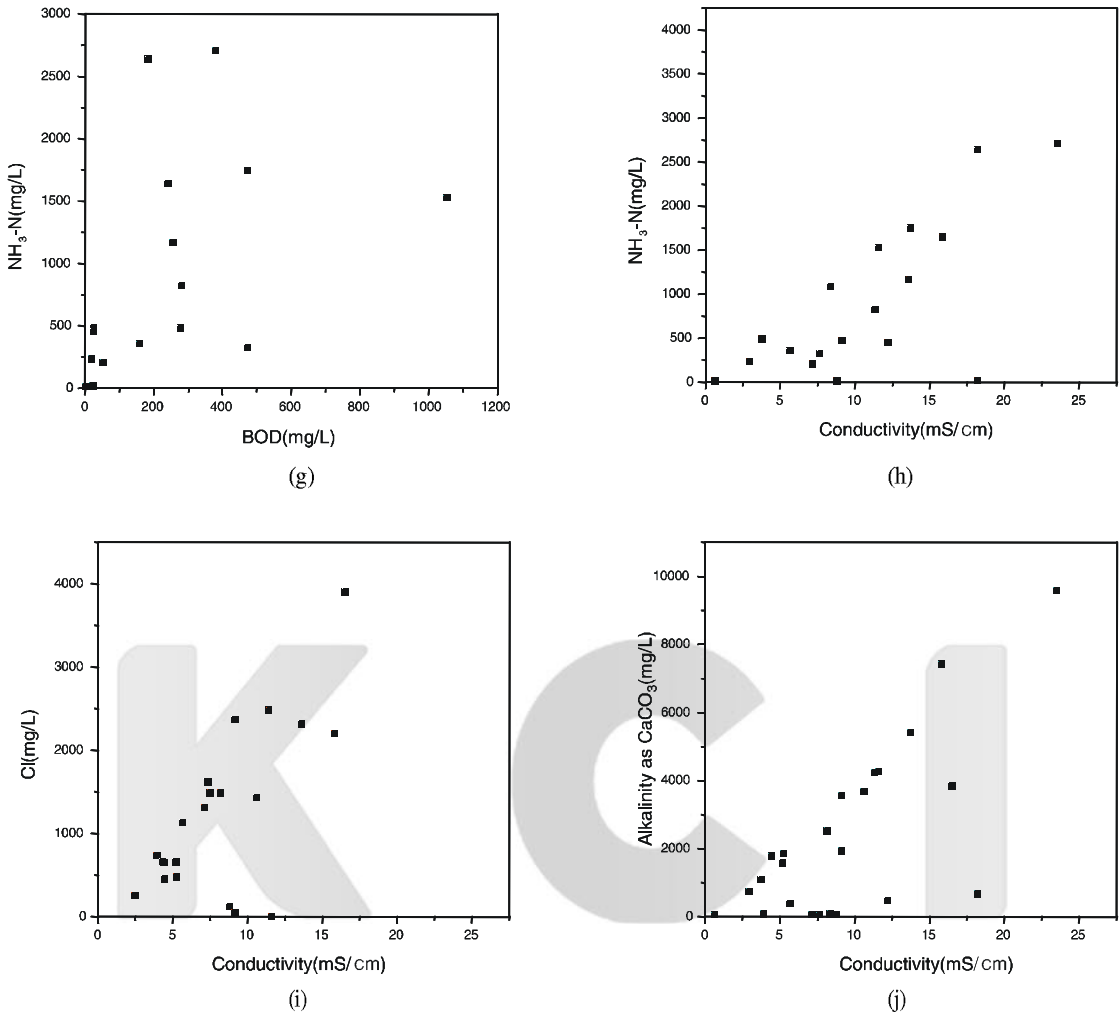


Fig. 1. Relationship between the contaminants for the raw leachates.

중수소가 높게 검출된 A 매립장 침출수의 평균 삼중수소 농도는 837 TU였으며 측정기간중 삼중수소의 농도 변화는 약 45%였다. 이 도시는 인구 약 150 만명의 대도시에서 발생된 생활폐기물을 매립처리하는 위생매립장으로 침출수의 처리는 고도처리공법인 역삼투막 공정을 도입하고 있다.

생활폐기물 매립장에서 발생된 침출수의 삼중수소 분포에 관한 연구 예는 그리 많지 않다. Robinson 등이 영국의 30개 생활쓰레기매립장 침출수의 삼중수소를 분석한 결과 평균 삼중수소농도가 7714 TU 검출되었으며, 30개 시료중 200 TU 정도인 시료가 2개, 1000 TU 이상이 18개, 그리고 7개 시료는 10000 TU 이상이었

다.<sup>7</sup> 이외에도 생활쓰레기를 매립하는 매립장 침출수중 삼중수소 농도가 환경준위 보다 수십 ~ 수백 배 높게 검출되었다는 연구보고가 있다.<sup>8,9</sup>

2001년도 우리나라의 일반환경중 삼중수소 측정결과에 의하면 빗물 1.64 ~ 32.33 TU, 음용수 13.08 ~ 36.17 TU, 해수 0.86 ~ 3.08 TU의 분포를 나타내었다 A 매립장에서 약 5 km 떨어진 지역에서 채취한 지하수의 삼중수소는 5.88 ~ 8.92 TU의 분포를 보였다<sup>17</sup> 매립장 침출수의 삼중수소 농도가 환경준위에 해당하는 매립장은 I, M 이었으며 나머지 매립장들은 모두 환경준위에 비해 수십 ~ 수백 배 높은 수준을 나타내었다. 연구결과 매립장 침출수의 삼중수소 분포준위는 매립장 및 도

시의 규모와 환경중 삼중수소 분포준위와는 상관없으며, 생활폐기물매립장에 반입되는 소비성용품이나 생활용품중 불분명한 삼중수소오염원이 존재하는 것으로 추정된다.

Table 4. Average tritium level of the raw leachates for domestic solid waste landfills

Site	Tritium (TU)
A	837
B	289
C	130
D	463
E	138
F	233
G	156
H	138
I	17
J	1196
K	482
L	577
M	20

3.3. 침출수의 종류에 따른 삼중수소분포

Fig. 2에 9개 매립장에 대한 침출수와 처리수의 삼중수소 측정결과를 나타내었다. C 매립장의 경우 침출수와 처리수의 삼중수소 농도가 같은 것으로 나타났지만 나머지 매립장에서는 침출수와 처리수의 농도가 약간 차이를 알 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 침출수에 대한 처리수의 삼중수소 농도는 -57 ~ +16% 범위로 높거나 낮게 나타났다. 침출수에 비해 처리수의 삼중수소 농도가 높은 곳은 A, L 2 개 매립장이며 낮은 곳은 D, E, F, G 4 개 매립장이었다.

침출수 고도처리공정을 도입한 A 매립장 침출수의 BOD, COD 및 기타 오염물질의 처리효율은 약 90%이었다. 그러나 삼중수소는 침출수에 비해 처리수가 오히려 높은 값을 보이는 경우도 있었다. HTO의 형태로 물에 용존되어 있는 삼중수소는 침출수 처리시설에 의해 제거 될 수 없다. 따라서 다른 요인이 작용하지 않는다면 침출수와 처리수의 삼중수소 농도는 같아야 할 것이다. 그러나 같은 시각에 채취한 침출수와 처리수는 매립장의 여러 가지 요인에 의해 다를 수 있을 것이다. 이러한 요인으로는 침출수의 발생량, 처리시설로의 유입량, 침출수의 처리에 따른 공정유입수와 손실수 및 처리공

정에서의 침출수 체류시간 등을 들 수 있다. 따라서 침출수와 처리수의 삼중수소 농도 분포는 침출수 처리시설 운영의 참고자료로 활용 될 수 있을 것이다. 특히 처리수의 삼중수소 농도가 침출수에 비해 크게 낮다면 침출수 처리시설의 정상가동여부를 확인 할 필요가 있다.

콜로이드 크기에 따른 삼중수소 분포를 조사하기 위해 침출수와 처리수를 여과하지 않은 것과 각각의 시료를 공극크기 0.45 μm 막여과지로 여과한 여액에 대해 삼중수소를 측정하였다. Fig. 2에 9 개 매립장 침출수 및 처리수와 이들을 공극크기 0.45 μm 막여과지로 여과한 여액 시료의 삼중수소 측정결과를 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 침출수의 경우 0.45 μm 이하 용해성분율에 함유된 삼중수소의 농도가 고형물질을 포함한 침출수에 비해 약 85 ~ 101% 였으며, 처리수는 88 ~ 102%를 나타내었다. 따라서 대부분의 삼중수소가 0.45 μm 이하 용해성 콜로이드에 존재한다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 C, D 매립장 침출수에서는 총삼중수소의 85 ~ 89%가 0.45 μm 이하 용해성 콜로이드에 분포되어 있었다. 따라서 C, D 매립장 침출수의 총삼중수소중 일부는 콜로이드 크기 0.45 μm 이상에 분포되어 있을 것으로 예측된다. 이와 같은 결과로 보아 매립장에 매립되는 폐기물의 삼중수소 오염원에 따라 삼중수소의 용존상태가 다를 수 있을 것으로 사료된다.

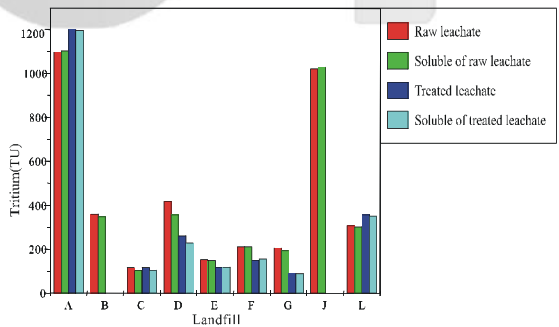


Fig. 2. Tritium level of the total, not filtered, and soluble, filtrate of pore size 0.45 μm membrane filter, for the raw leachates and treated leachates.

생활폐기물매립장에 매립되는 폐기물중 삼중수소 오염원은 사용이 끝난 GTLS, GTLD, 야광시계, 액정표시판, 전화기다이얼판 등의 생활용품 및 소비성용품에 기인한다. GTLS와 GTLD 등에서 삼중수소는 HT의 기체형태로 유리관에 봉입 되어 있다. Robinson 등이 GTLD를



조사한 결과 2 ~ 10% 만이 삼중수소 기체로 존재하며 나머지는 침출수에 용해되어 HTO로 존재 하는 것으로 확인되었다. 삼중수소를 사용한 야광페인트에서 삼중수소는 polystyrene과 중합체로 존재한다 Hackley 등에 의하면 생활폐기물매립장 침출수의 주요 삼중수소 오염원은 생활용품 혹은 소비성용품에 사용된 발광페인트라고 한다. 이들 발광페인트류는 쉽게 생분해될 수 있는 삼중수소화된 탄화수소를 함유한다. 이와 같은 삼중수소화된 탄화수소류는 침출수에 용해되어 침출수의 삼중수소 농도를 증가시키는 요인이 된다.<sup>7,8,13,14</sup> 매립장에 반입된 폐기물중 삼중수소 오염원이 GTLS, GTLD 등이라면 이 속에 내장되어 있는 HT가 산화되어 HTO 형태로 침출수에 용존 되어 있을 것이다. 그러나 폐기물중 삼중수소 오염원이 삼중수소 중합체를 사용한 야광페인트 종류라면 야광페인트의 생분해도와 삼중수소화된 중합체의 침출수에 대한 용해도에 따라 삼중수소의 용존형태가 달라질 것이다.

**3.4. 메탄가스응축수의 삼중수소분포**

본 연구대상 매립장중 메탄가스 응축수를 채취할 수 있는 4개 매립장에 대해 침출수와 메탄가스 응축수의 삼중수소와 일반오염성분을 측정하였다. 침출수는 침출수처리시설의 유입구에서 채취하였으며, 메탄가스응축수는 침출수 집수구에 설치한 메탄가스 배출구의 응축수를 채취하였다. Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 메탄가스 응축수는 중성 내지 약알카리성을 나타내며, 암모니아성 질소의 농도가 가장 높아 침출수의 약 35 ~ 54% 수준이었고, 전도도는 침출수에 비해 약 15 ~ 31%로 나타났다. 또한 메탄가스응축수중 COD, BOD는 침출수에 비해 각각 4 ~ 9%, 5 ~ 9%를 나타내었다. 휘발성이 높은 암모니아성 질소는 메탄가스응축수에 높은 농도로 용존 되어 있다는 것을 알 수 있다. 삼중수소는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 메탄가스 응축수의 삼중수소 농도가 침출수의 약 88 ~ 99% 범위에 있었다. 따라서 메탄가스 응축수에서도 침출수와 마찬가지로 환경준위의 삼중수소 분포농도로는 해석할 수 없는 높은 농도의 삼중수소가 존재함을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과로 보아 침출수중 삼중수소는 대부분 수용성 혹은 HTO 형태로 존재하며 0.45  $\mu\text{m}$  이상의 콜로이드에 약간의 삼중수소가 용존 되어 있을 것으로 추정된다. 따라서 향후 매립장 침출수중 삼중수소의 용존 형태에 대한 연구는 의미가 있을 것으로 사료된다.

Table 5. Analysis results of the raw leachates and the methane gas condensates for domestic solid waste landfills

Sample	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	pH	Conductivity (ms/cm)	
A	Raw leachate	3940	1065	890	8.05	8.76
	Condensate	166	55	482	7.87	2.72
B	Raw leachate	4736	430	2639	7.10	18.2
	Condensate	440	25	1435	7.02	4.62
C	Raw leachate	5428	1044	1646	7.65	16.5
	Condensate	431	58	569	7.11	2.46
J	Raw leachate	735	33	490	7.63	5.88
	Condensate	60	3	253	6.92	1.70

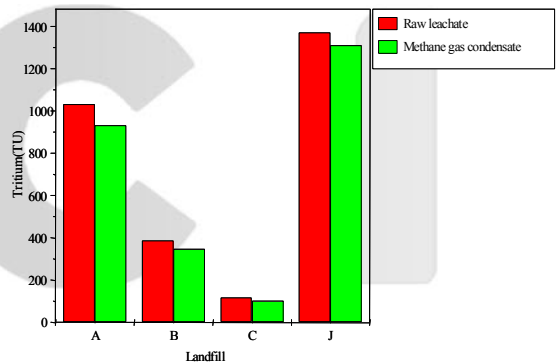
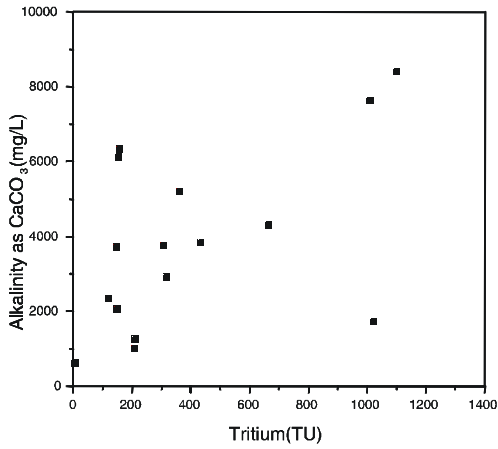
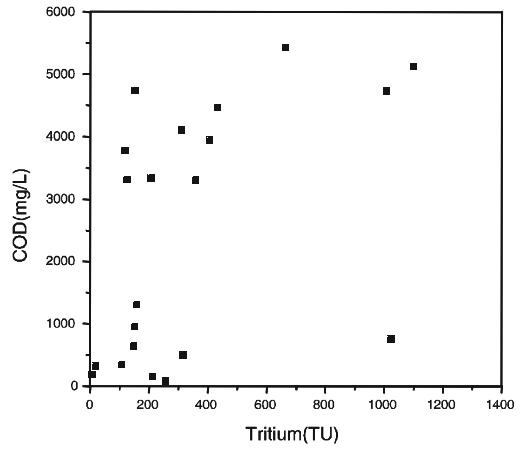


Fig. 3. Tritium level of the raw leachates and condensates of the methane gas for domestic solid waste landfills.

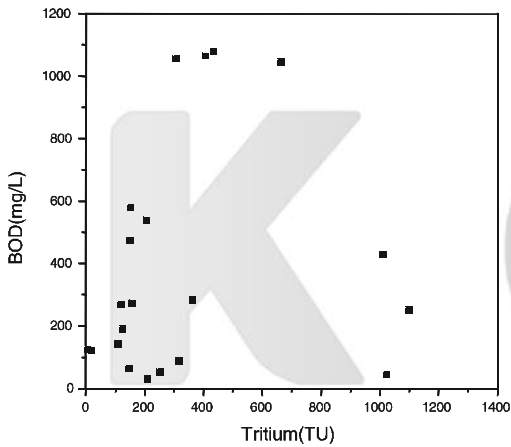
Robinson 등이 영국의 생활폐기물매립장 침출수를 조사한 바에 의하면 가스응축수중 평균 삼중수소 농도는 7620 TU로 침출수의 평균 삼중수소 농도 7714 TU와 비슷하였다. 또한 Coleman등이 조사한 바에 의하면 메탄가스중 삼중수소 농도가 160 ~ 2800 TU 이었다.<sup>7,8,19</sup> 따라서 침출수의 높은 삼중수소 분포는 분명히 매립폐기물에 기인한다는 것을 의미한다. 왜냐하면 메탄가스는 매립된 폐기물의 분해에 의해 생성되며, 기체의 특성상 시료의 균질도가 높기 때문에 메탄가스 응축수의 삼중수소 농도를 매립장의 평균적인 삼중수소 분포농도로 해석할 수 있기 때문이다.



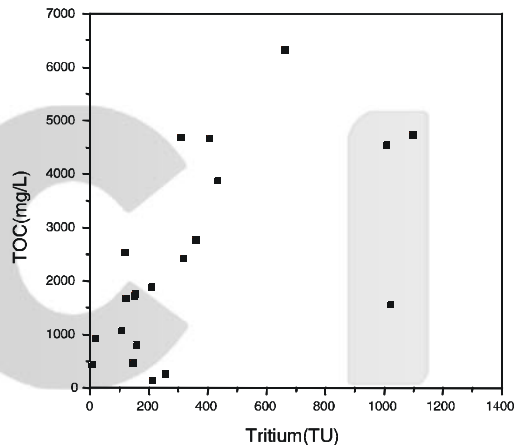
(a)



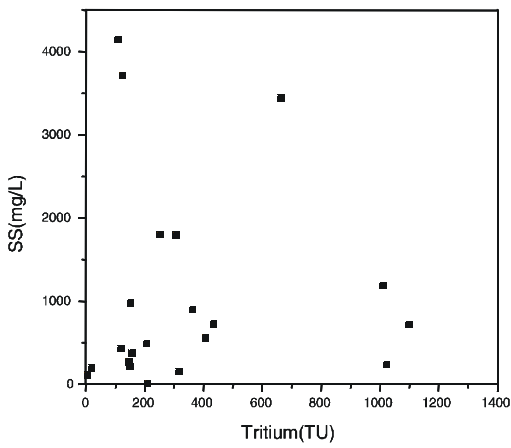
(b)



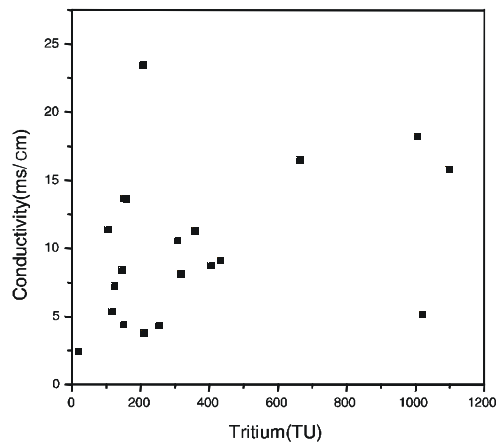
(c)



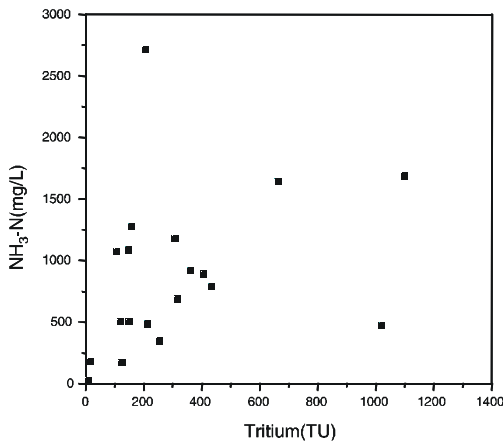
(d)



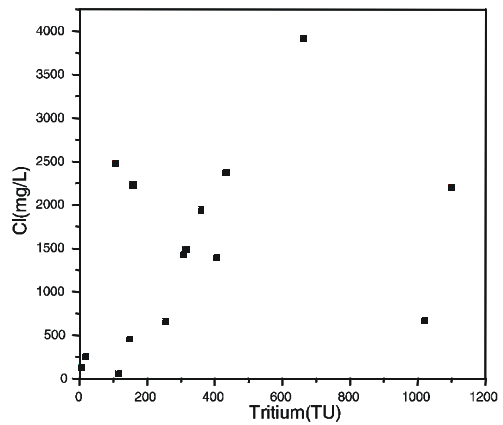
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 4. Relationship between the tritium and contaminants for the raw leachates.

### 3.5. 삼중수소와 일반 환경오염물질의 상관성

그림 4에 삼중수소와 몇 가지 오염성분간의 상관성을 도시하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 삼중수소와 일반 환경오염 성분과의 상관성은 낮은 것으로 나타났다. Robinson 등이 조사한 바에 의하면 삼중수소 농도가 염소이온 및 암모니아성 질소 농도와 상대적으로 좋은 상관성을 보였으며, 침출수의 희석효과를 제거하였다<sup>7</sup>. 본 연구에서는 삼중수소와 TOC가 상대적으로 높은 상관성을 나타내었다. 또한 BOD, COD의 삼중수소와의 상관성을 보면 COD가 BOD보다 상대적으로 높은 상관성을 보였으며 전기전도도와 삼중수소의 상관성은 낮았다. GTLS, GTLD 등의 삼중수소 광원에서 삼중수소는 HT의 기체로 존재하며, 야광페인트류에는 polystyrene 등과 같은 고분자물질과 중합체의 형태로 존재한다. 폐기물매립장에서 GTLS, GTLD 등에 존재하는 HT는 폐기물의 처분과정에서 HT 기체로 휘발되거나 물에 녹아 HTO 형태로 용해되어 있을 것이다. 그러나 삼중수소를 사용한 야광페인트류의 폐기물은 삼중수소화된 고분자물질의 침출수에 대한 용해정도에 따라 삼중수소의 존재형태가 달라질 수 있을 것이다.<sup>13,14</sup> 또한 침출수의 삼중수소 농도는 매립장의 규모, 지리적 위치 침출수 처리시설의 종류 및 폐기물의 매립연령 등과 분명한 상관성이 없는 것 같다.

## 4. 결 론

본 연구대상 위생매립장 침출수의 BOD, COD 및 일반 환경오염성분은 농도분포 범위가 넓고 같은 매립장에서 농도의 변화가 매우 큰 전형적인 침출수의 특성을 보였다. 침출수의 주요 금속성분은 Na, K, Ca, Mg 이었으며, 음이온은 염소이온이 가장 높게 검출되었다. 13개 위생매립장 침출수의 삼중수소 농도분포는 평균 17 ~ 1196 TU였다. 침출수를 처리한 처리수와 메탄가스 응축수에서도 환경준위에 비해 수십 내지 수백배 이상 높은 농도의 삼중수소가 검출되었다. 침출수중 삼중수소는 대부분 0.45 μm 이하의 용해성 콜로이드에 분포되어 있었으나 일부 매립장에서는 0.45 μm 이상의 콜로이드에서도 삼중수소가 용존되어 있는 것으로 조사되었다. 삼중수소와 TOC가 상대적으로 높은 상관성을 나타내었으나 침출수의 삼중수소 농도는 매립장의 규모, 수문학적 특성 및 매립연령 등과 특별한 상관성이 없는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 환경부, "2001 전국폐기물발생 및 처리현황," 4(2002).
2. V. Gunneries, P. R. Anderson and T. M. Holsen, *Environ. Sci. & Technol.*, **27**, 1381(1993).
3. S. D. Park, K. S. Joe, S. H. Han and H. S. Kim, *Environ. Technol.*, **20**, 419(1999).
4. S. D. Park, K. S. Joe, S. H. Han, T. Y. Eom and H. S. Kim, *Environ Technol*, **20**, 443(1999).
5. S. D. Park, K. S. Joe, J. P. Lee, J. H. Park, H. S. Kim, *J. Kor. Environ Eng*, **22**(9), 1683(2000).
6. S. D. Park, K. S. Joe, J. P. Lee, J. H. Park and H. S. Kim, *J. Kor Environ. Eng.*, **24**(2), 311(2002).
7. H. D. Robinson and J. R. Gronow. *J. Insti. Water & Environ. Mang.*, **10**(6), 391(1996).
8. K. C. Hackley, C. L. Liu and D. D. Coleman, *Ground Water*, **34**(5), 827(1996).
9. B. Th. Verhagen, M. J. Butler, M. Levin and A. B. Fourie, "Tritium in Waste as a Tracer of Landfill Leachate in Surface and Ground Water in South Africa," IAEA-SM-361/22p, 146, IAEA, Vienna(1999).
10. Y. K. Koh, D. S. Bae, C. S. Kim, G. Y. Kim, *J. Kor. Soc. Ground Water Environ.*, **6**(3), 126 (1999).
11. Ministry of Science and Technology, "Statistics on Radiation Protection in Korea 2003," 21 ~ 33 (2003).
12. B. S. Bowerman and Czagkowski, "Determination of the Chemical Form of Tritium in Self-luminous Signs," NUREG/CR-5574(1990).
13. H. Rahimi, N. Rahimi and F. Ashtiani, *Nukleonika*, **39**(4), 129(1994).
14. J. V. Sawant and K. Rudran, *Bull. Rad. Protec.*, **18**(1 & 2), 179(1995).
15. K. Rozanski, R. Gonfiantini and L. Araguas-Araguas, *J. Phy. G: Nuc. Part Phy.*, **17**,523(1991).
16. C. J. Kim, Y. W. Cho, M. J. Han and C. K. Pak, *J. Kor. Asso. Rad. Protec.*, **17**(2), 25(1992).
17. Korea Institute of Nuclear Safety, "Tritium Analysis in Environmental Samples around Nuclear Power Plants and Nationwide Surveillance of Radionuclides in Smoe Environmental Samples," KINS/HR-285, Vol 3, 65(2001).
18. G. Tchobanoglous, H. Theisen and S. Vigil, "Integrated solid waste management," International Editions, 417, McGRAW-HILL Inc., Singapore, 1993.
19. D. D. Coleman, C. L. Liu, K. C. Hackley and L. J. Benson, "Identification of landfill methane using carbon and hydrogen isotope analysis. *Proceedings of 6th International Madison Waste Conference, Municipal & Industrial Waste*," Dept. Engin. Profe. Develop., Univ. of Wisconsin-Madison, pp 303(1993).