

# 동위원소기술을 이용한 하천현장 실험 소개



서 경 석 |

공학박사  
한국원자력연구원 책임연구원  
kssuh@kaeri.re.kr



정 성 희 |

한국원자력연구원 선임연구원  
shjung3@kaeri.re.kr

## 1. 서론

한국원자력연구원은 1995년부터 30 MW급의 연구용 원자로를 운영하여 오고 있다. 연구용 원자로 는 원자로에서 생성되는 중성자를 이용하여 다양한 분야의 연구를 하는 원자로이다. 한국원자력연구원이 보유한 연구용 원자로에는 다양한 부대시설이 포함되어 있는데, 이중 방사성 동위원소의 제조 및 활용기술 연구를 위하여 방사성 동위원소 생산시설이 건설되어 운영되고 있다. 물질에 중성자를 쏘이면 원자핵의 식구가 늘어 불안정해지는 경우가 많다. 불안정한 원자핵이 안정 상태로 갈 때 내는 에너지를 방사선(radiation)이라 하고, 방사선을 내는 원소를 방사성 동위원소(radioisotope)라고 한다. 방사성 동위원소를 이용한 연구는 암의 진단 및 치료,

우수 작물의 개발, 작물의 대사연구, 식품보존, 유해물질 제거, 산업공정의 진단과 최적화, 비파괴 검사 및 수자원 분야 등 매우 광범위하게 이용된다.

동위원소의 수자원 분야 활용은 방사성 동위원소를 추적자(tracer)로 이용하여 하천, 호수, 지하수, 연안역에서의 오염물 이동 해석, 댐의 안정성 분석, 해안선 변형 및 침식, 토사이동, 항만 준설 사업 등 다양한 분야에 이용되고 있다. 동위원소 추적자란 관심 대상인 어떤 물질이 시스템 내에서 이동하는 거동특성을 조사하기 위하여 인위적으로 넣어주는 물질로서, 추적 대상물질과 물리·화학적 거동은 같으면서도 대상물질과 구별되어 측정이 가능한 방사성 표지화합물을 말한다. 원자로에서 제조된 방사성 동위원소는 자연 상태에 존재하지 않는 인공 동위원소로 대상 시스템 내 소량의 주입으로도 높은 검출능력, 방사선의 높은 투과능력 및 대상 물질과의 동일한 물리적 거동을 갖음으로써 효과적인 결과를 얻을 수 있다.

## 2. 동위원소 종류와 감마선 계측기

방사성 동위원소를 이용한 기술은 의학, 생물학, 농학, 화학 등 기초분야의 물질 이동 및 대사 연구에 폭 넓게 활용되어 왔다. 근래에는 석유, 화학, 하수 처리시설 등의 대규모 장치 산업의 발달에 따른

산업 시설내 공정 진단에도 활용되고 있으며, 하천, 지하수, 호수, 해양 등의 수자원 분야에서 환경 평가를 위한 도구로 많이 활용되고 있다. 국제원자력기구(IAEA)에서는 각국에서 개발된 동위원소 추적자 기술의 활용 지침서로 "Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry"(IAEA, 1990)와 "Tracer Methods in Isotope Hydrology" (IAEA,1992) 등을 발간하였다.

수자원 분야에 주로 이용되는 방사성 동위원소는 감마선을 방출하는 단반감기 동위원소들로서, 감마선은 파장이 짧은 전자파로 투과력이 높아 두꺼운 콘크리트나 납 등에 의해서 차폐될 수 있다. 대형 장치산업 및 수자원 분야에 많이 이용되는 동위원소를 표 1에 나타내었다. 표 1에 나타난 동위원소들 중 대상 조건, 반감기, 방출 감마선 에너지 등에 의하여 동위원소를 선택하여 수자원 분야에 이용할 수 있다. 일반적으로 하천 실험의 경우 유속이 빠르고 하천 구간내 정체 수역이 없으며, 실험 구간이 짧은 경우에는 반감기가 상대적으로 짧은 Br-82(반감기 36시간)나 Tc-99m(반감기 6시간) 등이 많이 이용된다. 해빈 변형, 토사이동, 해양에서 오염물 거동 특성 파악을 위해서는 반감기가 상대적으로 긴 Cr-51(반감기 27일), Ir-192(반감기 74일), Sc-46(반감기 84일) 등이 이용될 수 있다.

방사성 동위원소 추적자 실험에서는 보다 많은 정보를 얻기 위해 많은 수의 방사선 계측기가 사용된다. 그림 1에 동위원소 추적자 실험에 사용하는 섬광 감마선 계측기의 외관모양을 나타내었다. 계측기 외부는 알루미늄으로 구성되어 있고, 내부는 섬광체(scintillator)와 광전자 증배관(photomultiplier tube)로 구성되어져 있다. 동위원소에서 방출되는 감마선을 계측하는 원리는 감마선이 섬광체에 충돌하면 섬광체에서는 빛을 내게 되는데 이들 광자의 수는 입사한 방사선의 에너지에 비례하게 된다. 섬광체에서 발생된 광자는 광전자 증배관 PM tube의 photo cathode에 도달한다. 여기서 광전효과에 의해 광전자가 발생되며 이들 광전자는 dynode를 거치면서 그 수가 증가되어 마지막 단에서 부의 극성을 갖는 전압펄스로 출력된다 (Knoll, 2000). 추적자실험을 위한 계측기의 구성은 계측부(PM tube & Crystal), peak height analysis 기능과 high voltage 공급장치를 포함한 방사선계측기, data logger 와 데이터 기록용 컴퓨터로 구성된다. 그림 2는 방사성 동위원소를 추적자 실험을 위한 계측 시스템 구성 예를 보여주기 위한 것으로 12개의 방사선계측기가 장착된 sub-rack과 1개의 data logger와 데이터 기록 및 제어용 PC로 구성되어 있다.

표 1. 추적자로 활용되는 방사성 동위원소

Isotope	Half-life	Radiation type, Energy(Mev)	Chemical form	To trace the phase
<sup>3</sup> H	12.6 yr	$\beta$ : 0.018(100%)	Tritiated water	Aqueous
<sup>24</sup> Na	15.0 hr	$\gamma$ : 2.75(100%)	Sodium carbonate	Aqueous
<sup>41</sup> Ar	110 mi	$\gamma$ : 1.29(100%)	Argon	Gas
<sup>46</sup> Sc	84.0 d	$\gamma$ : 1.84(100%)	Scandium oxide in glass matrix	Solid (particles)
<sup>79</sup> Kr	35.0 hr	$\gamma$ : 0.51(15%)	Krypton	Gas
<sup>82</sup> Br	36.0 hr	$\gamma$ : 0.55(70%)	Ammonium bromide	Aqueous Organic
<sup>85</sup> K	10.6 yr	$\gamma$ : 0.51(0.7%)	Krypton	Gas
<sup>99m</sup> Tc	6.0 hr	$\gamma$ : 0.14(90%)	Sodium pertechnate	Aqueous
<sup>131</sup> I	8.04 d	$\gamma$ : 0.36(80%)	K or Na iodide	Aqueous organic
<sup>140</sup> La	40.0 hr	$\gamma$ : 0.92(10%)	Lanthanum chloride	Solid (Adsorbed)
<sup>197</sup> Hg	2.7 d	$\gamma$ : 0.077(190%)	mercury metal	Mercury
<sup>198</sup> Au	2.7 d	$\gamma$ : 0.41(99%)	Chloroauric acid	Solid (Adsorbed)
<sup>203</sup> Hg	46.6 d	$\gamma$ : 0.28(86%)	mercury metal	Mercury



그림 1. 감마선 계측기

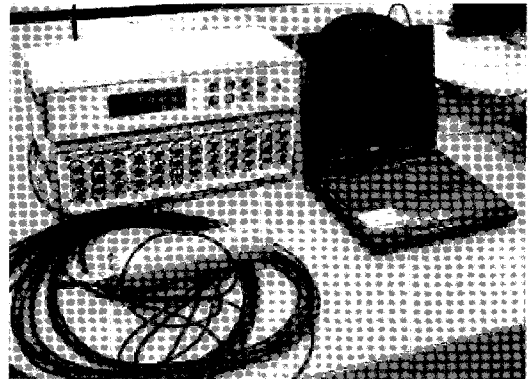


그림 2. 추적자실험을 위한 감마선계측장비 구성도

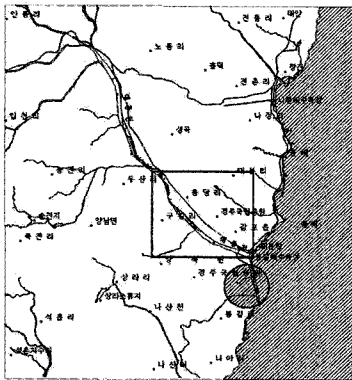


그림 3. 실험 주변 지형도

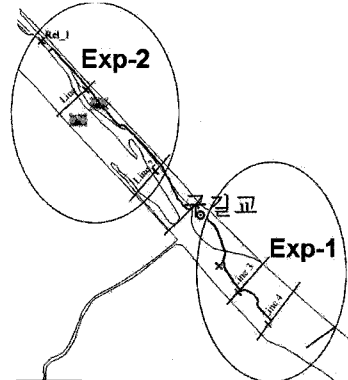


그림 4. 실험구간 방출점 및 측선 위치도

### 3. 동위원소를 이용한 하천현장 실험

단반감기 감마선 방출 동위원소를 이용한 하천 환경내 오염물의 거동특성을 파악하기 위하여 2008년 7월에 경상북도 경주시 일원의 지방 하천에서 동위원소를 이용한 하천 현장 실험을 수행하였다. 실험의 목적은 개발된 수치모델의 검증, 분산계수의 측정, 오염물 이동 시간 및 확산 범위 등을 조사하기 위해 수행되었다. 실험 대상 하천은 경주 방사성 폐기물 처분장이 건설 중인 주변 하천으로 처분장 건설에 대한 수문·지질학적 환경영향 평가가 기 수행되었지만 처분장 운영중 만일의 사고를 대비한 추가적 수리조사와 오염물 거동 특성 파악을 위하여 현장실험이 수행되었다. 그림 3에 현장 실험 하천 주변 지형도와 그림 4에 실험구간 계측기 선정 위치를 나타내었다. 동위원소를 이용한 현

장 실험전 GPS와 수심 측량기를 이용하여 하천 형상과 수심을 측량하였고, 동위원소 방출점과 방출률 및 계측기 위치 선정을 위하여 2차원 유속계인 Compact-EM과 FlowTracker를 이용하여 하천 유속을 측정하였다. 그림 5에 FlowTracker를 이용한 유속 측정과 그림 6에 하천을 가로질러 고정시킨 측선에 설치한 방사선 검출기를 나타내었다.

실험에는 방사성 동위원소인 Tc-99m을 추적자로 사용하였으며, 이를 투입하기 전 하루의 측선에 고정시킨 방사선 검출기로 시간에 따른 단위체적내 추적자의 농도 변화를 계측 기록을 시작하였다. 각 측선별로 하폭이 일정하지 않으므로 측선 1번부터 4번까지 하폭에 따라 7~8개를 설치하여 총 30개 지점에서 계측을 수행하였으며, 동위원소의 최대농도가 통과한 후 기저농도 수준으로 감소할 때까지 측정하였다. 기록된 데이터는 자연방사선에

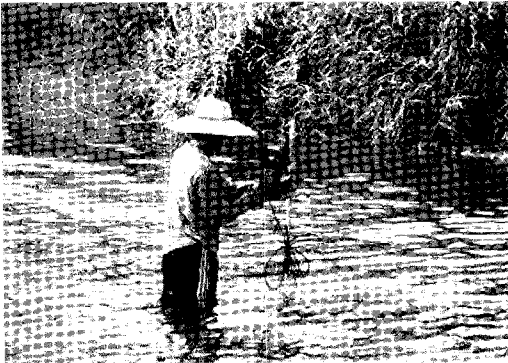


그림 5. 유속 측정

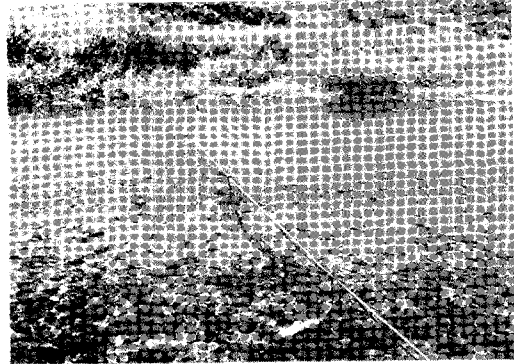


그림 6. 실험구간 계측기 배치도

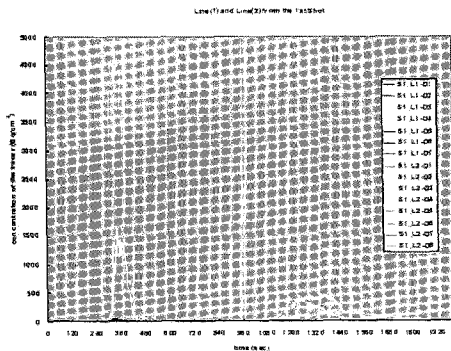


그림 7. Expt-1에서 동위원소 관측값

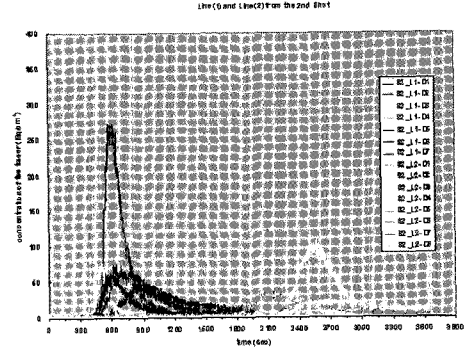


그림 8. Expt-2에서 동위원소 관측값

의한 영향을 배제시키고, 방사성 동위원소 고유의 반감기, 즉 최초 방사능의 양이 절반으로 감소하는데 소요되는 시간을 적용하여 Tc-99m의 투입과 계측시점 간의 자연감쇠에 따른 영향을 보정하였다. 또한, 계측된 데이터인 방사선 계수율은 결과분석에 활용하기 위하여 농도와와의 환산인자를 구하였다. 실험에 사용된 2×2 inch NaI(Tl) 섬광계수기(Eberline, SPA-3)의 수중에서 Tc-99m에 대한 계수율-농도 환산인자는 4.7 cps/Bq·cm<sup>-3</sup>으로 계산되었다. 실험에서 구한 계측데이터를 그림 7과 8에 나타내었다. 본 실험의 결과는 하천 수리유동 및 오염물 이동 수치모델의 검증 뿐 아니라 종방향 및 횡방향의 분산계수를 구하는데 이용되었다(Suh et al. 2009).

동위원소를 이용한 하천 현장실험은 임의로 수행할 수 있는 것이 아니라, 실험 수행 전·후에 걸쳐 원자력법 고시에 명시된 엄격한 절차에 의해 진행

하게 된다. 실험은 방사선작업 종사자 및 동위원소의 이동 허가를 받은 자만이 실험을 수행할 수 있으며 실험 전에 관련 규제기관에 방사선안전 분석보고서를 제출하여 허가를 취득한 이후에 가능하다.

#### 4. 결론

방사성 동위원소를 이용하여 하천내 수리유동 및 오염물 거동특성 해석을 위한 현장 실험에 대해 소개하였다. 동위원소를 이용한 하천 현장 실험은 인공 방사성 동위원소를 추적자로 이용하여 실시간의 양질의 자료를 취득할 수 있는 장점을 갖고 있다. 동위원소를 이용한 기술은 의학, 농업, 산업 및 환경 분야에 다양하게 접목되고 있으며 자연 상태에 존재하는 안정 동위원소의 분석에 의한 해석 뿐 아니라 자연 상태에 존재하지 않는 인공 동위원소를

이용하여 특정 대상 분야에서 현상 규명을 위한 유용한 도구이다. 특히 하천, 호수, 지하수, 연안 등의 수자원 분야에서 수리유동, 오염물 거동 해석, 수치모델의 검증 및 관련 계수의 산정시 매우 유용한 도구로 활용 될 수 있다. 또한 해빈 변형, 토사이동 및 최적 수로수심 유지를 위한 토사이동 현상 규명 등 대규모 사업시 사전·사후 변화 현상에 대한 평가 수단으로 활용 가능하여 보다 신뢰성 있는 자료의 생산 및 현상 규명 해석에 도움을 줄 수 있다. 물론 이러한 동위원소의 현장 실험에는 엄격한 원자력법 및 동위원소 이용 절차에 의해 진행하여야 하는데 이는 한국원자력연구원에서 보유한 기술과 인적 네트워크의 지원을 통하여 가능하리라 생각된다.

최근에 아랍에미레이트의 상업용 원전 건설과 요르단의 연구용 원자로 건설 사업수주 등을 통하여 우리나라의 원자력 산업이 세계적 기술 수준의 인정을 받고 있는 시점에서 동위원소의 생산과 활용 기술의 산업 및 환경 분야의 접목을 통하여 국가 산업 기술력 향상과 환경보존을 통하여 국민 삶의 질 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력 연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다. ☺

### 참고문헌

1. IAEA (1990). Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry
2. IAEA (1992). Tracer Methods in Isotope Hydrology
3. Knoll, G.F. (2000). Radiation Detection and Measurement.
4. Suh, K.S., Kim, K.C., Jung, S.H. and Lee, J.L. (2009). Determination of dispersion coefficients using radioisotope data in river environment. Applied Radiation and Isotopes.