

## 방사성추적자의 산업적이용



진준하

한국원자력연구소  
방사성추적자 및 응용계측 이용기술  
과제책임자 / 책임연구원

추적자(追跡子, Tracer)는 물질의 움직임이 있는 곳에서 관심의 대상인 어떤 물질의 이동하는 경로, 체재시간, 속도, 혼합 등 제반 이동특성을 알아보기 위하여 인위적으로 넣어주는 물질이다. 실험대상에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 사용되는 추적자의 물리적, 화학적 성질이 대상물질과 같거나 매우 유사해야 함과 동시에 어떤 방법으로든 쉽게 검지할 수 있는 물질이어야 한다. 추적자로 주로 사용되어온 물질로는 육안으로도 추적이 가능한 형광염료, 화학적 분석이 가능한 각종 화합물과 방사선검출기로 추적할 수 있는 방사성동위원소 등이 있다. 이를 중 방사성동위원소를 추적자로 이용하는 것은 방사선의 투과력 등 고유의 특성을 이용하기 때문에 염료나 화학물질 등에 비해 여러가지 장점을 가지고 있다.

방사성동위원소추적자기술에서는 부득이한 경우를 제외하고는 감마선을 방출하는 방사성동위원소를 추적자로 사용한다. 감마선은 투과력이 높으므로 방사성동위원소를 극미량만 대상물질에 넣어주어도 용기의 바깥쪽에

서 그 움직임을 방사선검출기로 쉽게 추적할 수 있다. 따라서 다른 추적자의 경우에서처럼 시료를 채취하여 따로 분석하지 않고도 더 정확한 정보를 빠르고 쉽게 얻을 수 있다. 가능하면 대상물질 자체를 원자로에서 중성자 조사하여 방사화시키거나, 대상물질과 유사한 동위원소표지화합물을 만들어 추적자로 사용하기 때문에 그 거동이 대상물질과 일치하거나 거의 같다고 할 수 있다.

그동안 동위원소추적자기술은 화학, 생물, 농학, 의학 등 기초과학의 발전에도 크게 공헌하였으며, 근년에는 생산공정의 최적화나 자연환경의 효과적인 보존대책 등에 필요한 조사를 하는데 이 기술이 활용되어 현대 산업기술을 발전시키는데 크게 공헌하고 있다. 특히 산업적 동위원소추적자기술은 검사를 위해 산업시설의 가동을 중단하지 않고 정상 가동상태에서 많은 검사를 실시할 수 있다. 따라서 가동중단에 따른 막대한 경제적 손실을 걱정하지 않아도 될 뿐만 아니라, 다른 방법으로는 도저히 얻을 수 없는 시설가동중의 제반 중요정보를 정확하게 알아 낼 수 있는

등 많은 장점이 있다.

산업현장에서 추적자로 사용되는 방사성동위원소의 양은 대부분의 경우 수십 mCi이하로 매우 적은 양을 사용하므로 산업시설 근무자는 물론 추적자실험을 직접 실시하는 사람도 방사선에 의한 피해를 입을 가능성은 거의 없다. 더구나 사용되는 방사성동위원소의 반감기가 수 시간 내지 수십 시간 정도로 짧은 경우가 대부분이므로 어느 정도 시간이 경과하면 방사능이 소멸되어 없어지게 된다. 산업계에서는 방사성동위원소의 사용에 대해 막연한 두려움과 거부감 때문에 이와 같이 유용한 기술의 활용을 주저하는 경우가 종종 있는데 이는 기우일 뿐이다.

방사성추적자기술은 석유, 화학산업은 물론 시멘트, 자동차, 유리, 철강, 제지 등 거의 모든 산업분야에 활용될 수 있다. 이러한 여러 산업에서 사용되는 대표적인 동위원소추적자기술은 다음과 같다.

- 설비에 공급되는 원료물질 또는 냉각수 등의 유속측정
- 반응기에서의 원료 체재시간분포측정
- 복잡한 형상의 용기나 설비내를 유동하는 유체의 총량측정
- 지하 매설 송유관이나 송수관, 열교환기 등에서의 누설탐사
- 혼합기의 원료 혼합도 및 적정 혼합시간 측정
- 기계부품의 마모도 및 부식 측정
- 내부 퇴적물 측정, 파이프 막힘 위치탐사 등

## 1. 주요 동위원소 추적자기술

### 1) 유속측정기술

유속의 결정은 생산원가 및 제품의 품질에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 경제적 기술적 중요성이 매우 크다. 더구나 동위원소를

이용한 유속측정기술은 간단하면서도 정확도가 높으며, 다른 방법으로는 대체될 수 없기 때문에 여러 추적자기술들 중에서도 산업계의 수요가 가장 많은 기술이다. 이 기술은 시설에 장착된 유량계의 보정, 펌프의 효율 측정, 공정상의 energy balance 또는 mass balance 등을 연구하는 데 주로 활용된다.

세부기술들 중에서 Transit Time Method는 두 측정지점사이의 부피를 정확하게 알고 있을 때 사용될 수 있다. 파이프등 용기외부에 설치된 방사선계측기에 의해 상류에서 주입되어 계측기 앞을 통과하는 동위원소추적자를 검지할 수 있으므로 두 지점사이를 이동하는데 소요된 시간을 측정할 수 있다. 두 측정지점사이의 부피를 측정된 시간으로 나누면 유속을 얻을 수 있다. Transit Time Method 외에도 Continuous Dilution Method 및 Total Count Method 등이 있는데, 현장의 측정환경 및 실험목적에 따라 적당한 방법이 선택되어 사용된다.

### 2) 체재시간분포 측정기술

공정에서 필요한 생성물을 얻기 위해서는 반응기에 원료물질이 일정 시간이상 체류하여야 한다. 너무 빨리 빠져나오면 원하는 품질을 얻을 수 없고, 너무 늦으면 시설효율이 낮아질 뿐 아니라 에너지도 필요없이 많이 소모된다. 따라서 체재시간분포의 측정은 생산시설의 최적화를 위해 매우 중요하다.

반응기 전후에 각각 방사선검출기를 설치하고, 상류에 방사성추적자를 투입하여 각 검출기로부터 시간에 따른 방사선계측치를 기록하여 input peak 및 output peak를 얻는다. 이 두 피크의 면적중심들 사이의 시간차이가 평균체재시간이된다. 또 Perfect Mixers in Series Model 또는 Axial Dispersion Model 등 수학적 모델을 이용하여 Tank number나 Peclet Number 등 체재시간분포나 혼합특성

과 관련된 정보를 얻을 수 있다. 이러한 수치들은 공정을 진단하는데 뿐만 아니라 새로운 시스템을 설계하는데도 매우 중요한 정보가 된다.

### 3) 부피측정기술

정상적인 상태에서의 부피측정은 감마선 투과형 준위계나 중성자 후방산란 계측기술을 이용해 간단히 측정할 수 있다. 그러나 용기내에 불규칙적으로 고체침적물이 쌓여 있는 경우, 용기가 여러개의 작은 부분으로 이루어져 있는 경우 등 다른 방법으로는 측정이 곤란한 경우에는 추적자기술이 유용하게 이용된다.

이 기술은 동위원소 희석법을 사용한다. 즉, 동위원소의 양을 정확히 측정하고, 이를 대상용기에 넣어 농도가 균일해질 때까지 충분히 혼합시킨 다음, 적당량의 시료를 채취하여 방사선 계측한다. 이 계측치로부터 희석율을 얻어 용기내 대상 물질의 양을 알아낼 수 있다.

### 4) 혼합도 측정기술

혼합공정은 시간과 에너지가 많이 소요되는 경우가 많다. 혼합시간이 너무 짧으면 원하는 혼합도를 얻을 수 없고, 너무 길면 혼합기의 처리능력이 저하될 뿐 아니라 생산원가도 상승된다. 따라서 적정 혼합시간의 선정은 기술적 경제적인 면에서 매우 중요하다. 많은 수의 시료를 화학적 분석방법으로 그 성분을 분석하여 통계적 수치를 얻기는 매우 어렵거나 거의 불가능한 일이다. 그러나 동위원소를 사용하면 짧은 시간내에 적은 비용으로 최적 혼합시간을 최적화 할 수 있다.

혼합되는 성분중 하나를 원자로에 넣어 방사화시키거나, 방사성동위원소로 표지하여 혼합기에 넣고, 혼합기 외부에 설치된 방사선 검출기로 주입된 추적자의 거동을 관찰하므

로서 혼합 진행상황을 관찰할 수 있으며, 필요할 경우에는 시료를 채취하여 단순한 방사선 계측을 통해 혼합도를 추적할 수도 있다.

### 5) 누설 탐사기술

생산공정에서 누설이 발생되면 제품에 이 물질이 혼입되어 원하는 품질을 얻을 수 없을 뿐 아니라 원료와 에너지의 낭비를 초래 한다. 방사성추적자기술을 사용하면 시설 가동중에 검사를 실시하여 수리에 필요한 정보를 얻을 수 있으므로 수리를 위한 시설 가동 중단시간을 크게 감소 시킬 수 있어 막대한 경제적인 이득을 얻을 수 있다. 누설을 탐지하는 데는 유속 측정에 의한 방법, 체재시간 분포 측정에 의한 방법외에도 여러 가지 방법이 이용될 수 있다.

지하에 매립된 송유관에 누설이 발생되면 자원의 손실뿐 아니라, 자연환경을 훼손도 심각하나 일반적인 방법으로 누설 위치를 찾아내기는 쉽지않다. 방사성동위원소를 이용한 여러 방법중 가장 간단한 것은 관내에 동위원소가 희석된 용액을 주입하고 압력을 가하여, 누설된 방사능을 지표에서 검지하여 그 위치를 찾는방법이다. 관이 너무 깊이 묻혀있는 경우에는 지표에서 방사선이 검출되지 않아 이방법을 사용할 수 없다. 이럴때는 관내부로 Smart Pig라는 방사선검출기록장치를 통과시켜 누설위치를 찾기도 한다.

### 6) 마모도 측정기술

구동부위가 많은 자동차는 물론 산업시설에도 마모는 시설의 내구성 및 안전운전에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 그러나 대부분의 마모는 그 진행속도가 매우 느리기 때문에 일반적인 방법으로 마모속도를 측정하기는 용이하지않다. 특히 시설이나 장치에 설치된 상태에서 마모의 진행상황을 모니터하는 것은 거의 불가능하다. 동위원소기술을 이용

하면 이러한 실험들을 간단히 해낼 수 있다. 마모를 측정하고자 하는 부위에 가속된 양성자, 중수소, 헬륨 등을 조사하면 표면에 방사성동위원소가 생성된다. 이와 같은 하전입자들은 중성자선과는 달리 투과력이 매우 낮기 때문에 표면에 가까운 층에만 동위원소가 생성된다. 이들의 에너지를 적당히 선택하면 수십 내지 수백 미크론의 동위원소층을 얻을 수 있다. 이를 장치에 설치하고 가동하면서 외부에 설치된 방사선검출기로 동위원소가 마모되어 떨어져 나감에 따른 방사선계측치의 감소를 추적하므로서 마모의 진행상황을 on-line으로 모니터링할 수 있다.

#### 7) 증류탑 검사기술

석유 및 화학플랜트 등에 많이 설치되어 있는 증류탑에 이상이 생기면 전체플랜트의 기능에 심각한 영향을 미치므로 조기에 이상의 원인을 파악하고 적절한 대책을 강구해야 한다. 검사를 위해 시설가동을 중지하는 것은 막대한 경제적 손실을 가져오므로 가동중에 검사가 실시될 수 있어야 한다. 동위원소를 이용한 검사기술은 증류탑 외부에서 감마선의 투과력을 이용하여 검사하므로 시설가동 중에 간단하게 이상의 원인을 파악해 낼 수 있어, 여러 추적자기술들 중에서도 가장 자주 사용되고 있는 기술이다.

감마선을 방출하는 Co-60 또는 Cs-137과 같은 동위원소 밀봉선원을 증류탑의 한쪽에 매달고, 다른 한쪽에 방사선검출기를 같은 높이에 매달아서 증류탑을 투과한 방사선을 계측한다. 양측을 동시에 일정 거리 만큼씩 이동하면서 계측을 계속하면 증류탑의 density profile을 얻을 수 있다. 이를 정상상태일 때 얻은 density profile이나 설계도면과 비교하면 고장 부위 및 원인을 알아낼 수 있다.

#### 8) 부식 및 침적물 탐사기술

파이프내부에 고체물질이나 약스 등이 쌓이면 관의 이송능력이 저하되어 펌프에 과부하를 주게된다. 또 파이프 내부가 부식되면 누설이 발생되어 원료나 생산품이 손실될 수 있으며, 안전사고의 위험도 높아진다. 감마선 투과법을 사용하면 시설가동을 지속하면서도 이를 검사할 수 있다.

파이프의 양측에 적당한 감마선원과 방사선검출기를 일정거리가 유지되도록 프레임을 이용하여 지름방향으로 배치하고, 이를 움직여 가면서 계측한다. 침적물이 쌓여 있으면 계측수가 감소되고, 부식이 발생된 부위에서는 계측치가 증가되므로 이를 표준 파이프에서의 계측치와 비교하여 문제점이 있는 부위를 찾아낼 수 있다.

### 2. 국내의 방사성동위원소추적자 기술 이용

선진국에서는 20~30년전부터 방사성동위원소추적자기술의 산업적 이용이 활발하게 추진되어 특히 장치산업의 발전에 크게 기여했으며, 현재는 대부분의 기술이 상용화되어 추적자전문 용역회사에 의해 각종 검사가 수행되고 있다. 그러나 우리나라에서는 1988년 국제원자력기구(IAEA)의 전문가 지원을 받아 시멘트생산시설에서 실시한 실험이 국내 최초의 산업적이용 사례이다. 그 후 한국원자력연구소에 추적자연구그룹이 형성되어 추적자 관련 연구개발을 수행해 왔으며, 그 결과 지금은 상당한 기술개발이 이루어져 산업계에서 요청이 있는 경우 기술을 지원하고 있다. 그동안 추적자그룹이 수행한 국내 추적자기술의 대표적인 산업적 이용사례는 다음과 같다.

- 시멘트생산시설에서 시멘트원료가 Pre-calculator 및 Rotary Kiln에서 체재하는 시간분포를 측정하였다. 추적자로는 시

- 멘트원료 자체를 원자로에 넣어 중성자 조사하여 생성된 Na-24를 사용하였다.
- 용접봉 피복재는 여러가지 고체원료의 혼합물로 이루어져 있다. 피복재를 용접 봉에 입히기 전에 이 원료들을 충분히 혼합해 주어야 균일한 품질을 얻을 수 있는데, 혼합시간이 너무 길면 비중에 따른 분리가 일어날 뿐만 아니라 에너지도 낭비된다. 한 분말성분을 Tc-99m 동위원소로 표지하여 추적자로 사용하였으며, 이를 이용하여 현장에서 사용되고 있는 믹서의 최적 혼합시간을 측정하였다.
  - 직경 70cm이고, 온도가 약 600°C인 파이프내를 시속 약 300km의 고속으로 흐르는 기체원료의 유속을 약 20m의 파이프 구간을 이용하여 Peak-to-peak법에 의해 측정하였다. 이 실험에는 Ar-41을 추적자로 사용하였고, 특수하게 고안 제작된 고속 추적자주입기 및 data acquisition system이 이용되었다. 이 실험결과는 시설의 이상가동현상을 개선하는데 활용되었다.
  - 전자선을 이용한 배연 처리시설에 설치된 반응기의 처리효율을 평가하기 위해
- 이 반응기에서의 배연 체재시간분포를 Ar-41을 추적자로 사용하여 측정하였다. 이 실험 결과는 시설 설계를 개선하는데 활용되었다.
- 수돗물을 생산하는 정수장의 기능 최적화를 연구하기 위해 정수장 모형에서 물의 거동을 추적하는 실험을 수행하였다. 또 응집제에 의해 형성된 flock의 거동을 추적할 수 있는 기술도 개발하였다.
  - 파이프 내의 유속을 측정하여 플랜트에 설치되어 있는 기체 및 액체 유량계를 보정하였다.
  - 외국의 기술팀과 협력으로 종류탑검사를 실시하여, 이상의 원인과 그 위치를 파악하여 수리에 이용하였다. 현재는 원자력연구소 추적자팀에서 종류탑검사장치를 개발하여 자체의 검사능력을 갖추고 있다.
  - 외국의 기술팀과 협력으로 정유공장 크랙커의 성능을 평가하기 위한 대규모 실험을 실시하여 이상의 원인을 파악하였다. 이 실험에서 원료가스의 추적에는 Kr-85를, 고체촉매의 추적에는 La-140을 추적자로 이용하였다.



### 회원 여러분께 알립니다.

우리협회는 회원 여러분께 보다 나은 서비스를 제공하고자 노력하고 있습니다.  
귀 회원의 주소나 전화번호 등 제반사항에 변동이 있을 경우, 전화나 우편, FAX를 이용하여 협회로 신속하게 연락하여 주시기 바랍니다.

♣ 연락처 : 정보관리팀 최 윤 석 (TEL: 02-566-1092, FAX: 02-566-1094)

구 분	연락 요망 사항
단체 회원	기관명, 대표자, 방사선안전관리책임자, 주소, 전화번호 등
개인 회원	(우편물수취)주소, 전화번호, 소속직장 등