

## RI 표지 인공모래를 이용한 연안 표사추적 장비개발 및 시범실험

### Development of Equipment and Radiotracer Experiment using RI labelled sand in the Coastal Zone

최병중, 정성희, 김종범, 진준하

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

산업공정의 가동 중 효율 및 문제점 진단을 위한 방사성동위원소 추적자 이용기술과 기반장비의 연구결과를 바탕으로 연안 해양에서 표사의 거동 추적실험을 위한 계측장비를 개발하였고, 동해안에 있는 해역을 선정하여 시범실험을 수행하였다. 이를 위하여 원자로에서 중성자 조사를 통하여 방사화되는 소량의 iridium을 포함하는 인공모래를 제조하여 사용하였다. 인공모래는 산화물 제조법으로 제조되었으며, 자연사(2.65)와 유사한 밀도(~2.6)를 갖도록 하였다. 방사화된 인공모래를 운반하고 실험 현장에서 해저에 투입할 수 있도록 전용 용기와 투입된 인공모래로부터 방출되는 방사선을 검출하기 위한 계측장비를 제작하였다. 또한, GPS로부터 수신되는 위치신호와 해저의 계측장비로부터 전송되는 방사선 계측신호를 동시에 수신할 수 있는 데이터 수집장치와 컴퓨터 응용프로그램을 제작하였다. 인공모래의 시간에 따른 분포의 변화를 측정하기 위하여 각 투입지점에 대하여 4회씩 추적실험을 성공적으로 수행하여 연안환경의 보존과 개발을 위한 중요한 역할의 가능성을 확인하였다.

#### Abstract

On the basis of the radiotracer technology and the related equipments which have been developed for its industrial application through the nuclear long-term research project, a radiotracer study on sediment transport was carried out as a part of the development of the radiotracer technology for a coastal marine environment. The crystalline material doped with iridium having a similar composition and density as those of the bedload sand collected from the

research area was produced by the oxide-route method. A radioisotope container was specially designed to inject the radiotracer from 1m above the sea bedload without radioactive contamination during the transport from the nuclear reactor at KAERI. The position data from the DGPS and the radiation measurement data are collected concurrently and stored by means of the application software programmed with the LabVIEW of the National Instrument. The position data is reprocessed to make it represent the real position of the radiation probe under water and not that of the DGPS antenna on board. In order to evaluate the influence of a breakwater on the deviation of the neighboring coastline, the time dependency of the spatial distribution of the sediment was studied in the area through three tracking measurements after the iridium glass was injected. This trial application showed the potential of the radiotracer technology as an important role for maintaining and developing the coastal marine environment in the future.

## 1. 서론

방사선 및 방사성동위원소를 이용한 다양한 기술이 의료, 농업, 공업 등 현대의 거의 모든 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다. 이 중에서도 방사성추적자 기술 및 방사선 응용계측기술의 공업적 이용은 정유, 화학, 철강, 시멘트, 제지 등 장치산업 분야와 건설, 전자 등 대부분의 공업분야 뿐만 아니라, 환경평가 및 공해의 추적 등에도 활용될 수 있다. 환경평가에 관련된 방사성추적자 기술은 연안역(coastal zone)에서의 해안선 변형과 관련된 표사이동(sediment transport) 및 연안수역에 설치된 수중확산관에서 방류되는 오염물질의 확산범위를 평가하는 데에도 활용될 수 있다.

방사성추적자를 이용한 표사이동 실험은 1960년대 한국원자력연구소에서 동해안의 몇 개 항을 대상으로 실험한 예가 있다. 양 등은 당시의 건설부의 의뢰를 받아 Co-60을 사용하여 묵호항(1965)과 후포항(1967) 내에서 발생하는 항만매물의 방지 대책을 수립하기 위해서, 방사제 건설을 위한 표사의 공급원과 유입방향 등을 정확히 파악하기 위한 조사를 실시하였다. 그리고 양(1969)은 포항종합제철공장에 맞춰 건설되는 포항신항의 외곽시설인 방파제, 방사제 및 항입구의 배치계획에 기초자료가 되는 조사업무중 하나로 방사성추적자를 이용하여 표사의 공급원 및 이동방향을 조사하였다.

외국의 경우에는 선진국인 프랑스, 호주, 폴란드 캐나다 등에서 방사성추적자를 이용한 표사이동 실험이 매우 활발히 이루어지고 있으며 연안부근에 설치된 수중확산관에서 배출되는 오염물질 확산범위를 평가하는 데에도 방사성추적자를 이용한 실험이 수행된 예가 많이 있다. 또한 인도, 베트남, 태국, 등의 개발도상국에서도 방사성추적자를 이용한 표사이동에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Cailot(1983)

은 방사성추적자를 이용한 표사이동 실험에 이용되는 추적자 종류에 따른 물리적인 특징을 나열하였으며, 정량적인 분석방법에 대해서 논의한 바가 있다. Owczarczyk 등(1989)은 수심 3m이내의 쇄파대 내에서 해빈류에 의한 표사이동 특성을 파악하기 위하여 지름 12m가 되도록 12개의 계측기를 원형으로 설치하여 정성적인 이동방향을 파악하였으며 이동속도를 정량적으로 정확히 구하였다. 또한, Owczarczyk 등(1998)은 방사성추적자로 Ir-192 glass를 사용하여 표사의 이동속도, 이동방향, 이동량을 정량적으로 평가하였다. 그리고 Pendharkar 등(1994)은 Sc-46 glass를 사용하여 Calcutta Port 항로에서 준설한 준설토의 최적의 투기위치를 조사하기 위한 실험을 창조류와 낙조류에 따라서 표사이동 특성을 정량적으로 규명하였다.

방사성동위원소 추적자를 이용하여 표사이동 실험을 하기 위해서 방사성동위원소가 표지된 인공모래를 제조하였고, 실험을 위한 장비를 개발하였으며 데이터 처리 방법을 연구하였다. 개발된 장비와 제조된 인공표지모래의 현장 적용성을 검토하기 위하여 동해안에 위치한 2곳을 대상으로 4회씩 계측실험을 성공적으로 수행하였다. 실험 결과데이터는 방사선 계측의 실제 위치를 계산하여 반영하고 방사성추적자의 자연감쇄 효과를 보정한 후 분석에 활용되었다.

## 2. 방사성동위원소 표지모래 제조

연안에서 사용되는 대표적인 방사성동위원소 추적자의 종류는 실험에 따라 Au-198( $T_{1/2}=2.7d$ ,  $\Gamma=0.41MeV$ ), Ir-192( $T_{1/2}=2.5m$ ,  $\Gamma=0.31, 0.47, 0.61MeV$ ), Sc-46( $T_{1/2}=2.8m$ ,  $\Gamma=0.88, 1.12MeV$ ) 등이 주로 사용되는데, 입경이 2mm이하인 극조립사(very coarse sand)보다 작은 표사를 대상으로 하는 추적실험에서는 Ir-192, Sc-46이 주로 사용되고 해양에서 방류되는 오염물질 확산에 관한 실험일 경우에는 Au-198이 사용된다. 본 실험에서는 방사성동위원소의 특성감마 에너지와 반감기를 고려하여 장시간 동안 좁은 해역에서 취급과 계측이 용이한 Ir을 방사성추적자로 선택하였다.

표지모래를 제조하는 방법은 건식방법인 oxide route와 습식방법인 sol-gel route의 두 가지 방법이 있는데, 본 실험에서는 Owczarczyk et al에 의해 제안된 건식방법인 oxide route 방법을 통해 Ir-192 glass를 제조하였으며, 화학적 성분과 비율(wt%)은  $SiO_2(48)$ ,  $Al_2O_3(19)$ ,  $CaO(17)$ ,  $MgO(6)$ ,  $TiO_2(5)$ ,  $Ir(0.3)$ 이다. 건식방법인 oxide route는 Ir이 포함된  $(NH_4)_2IrCl_6$ 을 액상화 형태인 슬러리로 만들어서 비이커에 넣고 교반기로 천천히 저어주면서 동시에 매우 약한 열을 가한다. 약 2~3시간 동안 교반 및 가열작업을 수행하여 수분을 제거한 후 alumina crucible에 옮겨 담아서 furnace에 넣고  $5^\circ C/min$ 로  $750^\circ C$ 까지 가열하여 한 시간 동안 calcination시킨다. 이것을 다시  $5^\circ C/min$ 로  $1500^\circ C$ 까지 가열하여 용해시키며  $1500^\circ C$ 에서 약 1~2시간 정도 유지하여 제조하였다.

Oxide route방법으로 만든 Ir-192 glass를 잘게 부순 모양은 그림 1과 같고 이것을 비중실험을 통해 나온 비중은 실제 모래의 비중( $\approx 2.65$ )과 비슷한 2.6이상이 나

왔다.



그림 1. 잘게 부순 Ir-192 glass

Ir-192 glass의 성분비를 알아보기 위해 2g의 샘플을 채취하여 Ir-192, Ir-194, Al-28, Ca-49, Mg-27, Ti-51을 분석대상 핵종으로 하여 방사화 분석을 하였다. 조사시간은 1분과 10분 조사의 두 가지로 조사하였으며, 열중성자속(heat neutron flux)는  $2.95 \times 10^{13} / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 이며 분석결과는 다음 표 1에 요약해 놓았다. 하지만 1분 조사한 결과와 10분 조사한 결과의 Ir 농도값의 차이가 2배로 나와서 시료를 5개 더 만들어서 1분 조사를 한 후 Ir함량의 균질도를 측정하였다. 균질도의 시험결과는 표 2와 같으며, #2의 농도값이 가장 컸다. 총 7번의 조사 결과, 시료의 무게를 고려한 가중치 부여한 Ir 농도 값의 평균은 0.31%였고 그냥 평균값은 0.29%로 나왔다. 이것은 제조방법상 oxide route 방법을 이용하면 완전한 mixing이 이루어지지 않아서 Ir glass의 비균질성(non-homogeneous)에 기인한 것으로 사료되며 균질성을 향상시키기 위해 sol-gel route에 의한 표지모래를 제조하기 위한 연구를 수행 중에 있다.

### 3 추적자 실험을 위한 계측장비

방사선을 검출하기 위한 센서로서 방사선 NaI 섬광검출기를 사용하며 이것은 감마선을 측정 가능한 전기적 신호로 바꾸어주는 장치이다. 방사선계측기는 검출기에서 보낸 신호를 받아서 방사선 수를 계수하는 시스템으로 그림 2과 같으며 계측기부와 계수기부로 나뉘어진다. 방사선 계측기는 방사선 검출부에 고전압을 공급함과 동시에 검출부로부터 나온 analogue pulse를 방사선 계수기가 인식할 수 있도록 TTL Pulse로 변환시켜 실시간 방사선량을 표시하는 회로이다. 추적자실험 전용 회로 구성에서는 이러한 기능들 중에서 방사선량을 표시하는 회로를 제외시켜 기존의 방사선 계측기에 비해 소형으로 모듈화시켜 추적자 실험현장 적용에 용이하도록 하였다. 또한, 방사선계수기 방사선 계측기에서 나온 TTL pulse를 각 채널 별로 계수하여 PC로 전송하는 기능을 하는 장치이다. 이장치는 PC에서 원하는 counting time을 지정할 수 있는데 최소 counting time은 0.01초이다.

표 1. 표지모래를 이용한 중성자 방사화분석 결과

핵종	반감기	초기방사능(Bq)	농도(%)	비 고
1분 조사(열중성자속: $2.95 \times 10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ )				
Al-28	2.24 M	1.095E+08	11.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ca-49	8.72 M	1.966E+05	11.7	CaO
Mg-27	9.46 M	1.547E+05	3.21	MgO
Ti-51	5.76 M	3.191E+05	3.27	TiO <sub>2</sub>
Cl-38	37.24 M	3.420E+04	0.15	
Ir-192	73.83 D	1.189E+04	0.24	
Ir-194	19.15 H	2.387E+05	0.25	
10분 조사(열중성자속: $2.95 \times 10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ )				
Ir-192	73.83 D	9.662E+04	0.45	
Ir-194	19.15 H	1.907E+05	0.48	

표 2. 표지모래의 균질도 평가(1분조사, 열중성자속:  $2.95 \times 10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ , 단위%)

핵종	#1	#2	#3	#4	#5
Ir-192	0.14	0.59	0.19	0.16	0.15
Ir-194	0.15	0.63	0.20	0.17	0.16



그림 2. 방사선 계측기

방사선 검출지점의 위치를 저장하기 위해서 미국 Trimble사에서 제작한 navigation용 GPS인 NT300D를 사용하였다. 본 GPS는 DGPS 기능을 내장하고 있으며 12 채널용 GPS 수신기와 듀얼 채널용 radiobeacon 수신기가 통합된 제품이며, GPS 수신기의 위치는 5Hz로 속도로 업데이트 되고 위치오차는 1m 이하의 정확도를 가지고 있다.

방사선 검출기를 해저바닥에 놓고 끌어야 하기 때문에 방사선 검출기의 내부에 있는 섬광체와 PM tube는 충격에 약하고 가벼워서 해저바닥에서 사용하기에는 부

적합하여 검출기를 보호하고 해저면에 닿은 상태로 유지하기 위해서 sled를 사용한다. 충격을 방지할 수 있으면서 검출효율을 최대화 할 수 있는 검출기 하우징(D=11cm, L=50cm)을 국내 실정에 맞게끔 자체적으로 설계하고 제작하였다(그림 3 참조). PM tube를 보호하는 본체는 stainless steel로 되어 있으며 1cm 두께의 납으로 차폐되어 있고 섬광체 부분은 방사선을 검출하는 부분이기 때문에 밀도를 최소화하기 위하여 플라스틱 재질로 설계하였다. 하우징 후미에 buoy를 달 수 있도록 rope를 연결하여 검출기 위치 쉽게 파악하고 검출기 회수가 용이하게 하였으며 가볍고 작아서 다루기가 용이하며 해저면에 닿는 부분이 가깝기 때문에 검출효율도 매우 높다.



그림 3. NaI(Tl) 섬광 검출기 하우징

추적자 투입을 위해 자체 설계 및 제작된 운반용기와 투입장치를 겸하는 장비를 그림 4와 같이 개발하였다. 투입장치는 본체와 상부 연결부, 하부 연결부로 세 부분으로 구성되어 있고 재질은 납으로 만들어졌으며 외경은 16cm이며 중앙에 추적자가 담겨져 있는 작은 유리병을 용기 중앙에 담을 수 있게 설계되었다.



그림 4. 추적자 운반용기를 겸한 투입장치

계수기에서 계수한 방사선수를 시간별 채널별로 실시간 표시하고 저장매체에 기록하기 위한 것으로 방사성 추적자 실험은 주로 현장에서 이루어지므로 휴대가 용이한 notebook computer를 사용한다. 그림 5는 National Instrument사의 그래픽 언

어인 LabVIEW를 사용하여 제작된 데이터 수집 및 위치 표시용 프로그램으로 GPS에서 수신되는 경·위도 좌표와 방사선 계측시스템으로부터 데이터를 통합하여 처리하고 매초마다 저장할 수 있으며, map mode에서는 실험영역을 미리 설정하여 선박이 지나간 경로를 화면상에 나타냄으로써 실험의 정확도를 높일 수 있게 하였다.

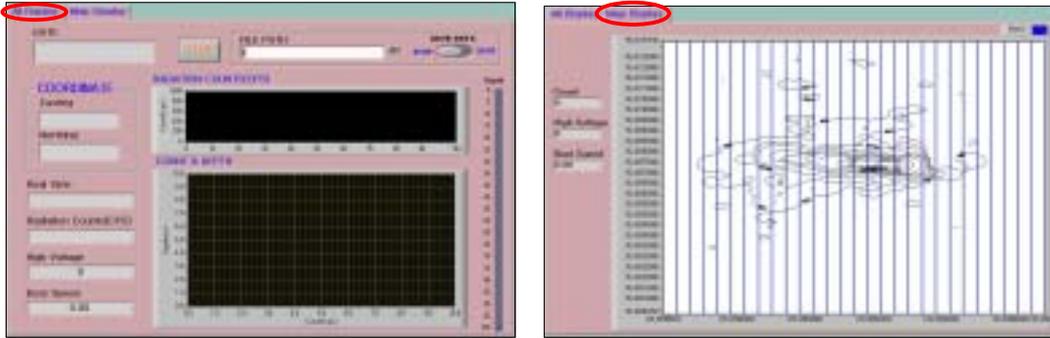


그림 5. 데이터 저장을 위한 응용 소프트웨어

#### 4. 현장 적용 실험

##### 4.1 추적자 투입

추적자는 조그만 유리병에 담겨져 있는 상태에서 운반용기를 이용하여 운반된다. 투입지점으로 운반된 추적자는 두 개의 구멍을 통해 유리병을 깬 후, 공기압을 밀어 넣을 수 있는 부분에 호스를 연결하여 바다에 넣고, 해저바닥에서 약 1~2 m 위치에서 공기압을 가하면 바닥이 빠지면서 추적자가 방출되는 방법으로 실험대상영역에 추적자를 투입할 수 있다(그림 6 참조). 실험대상해역은 동해안에 있는 해안으로 추적자 투입지점은 그림 7과 같이 2개 지점에 투입되었으며, 추적자의 투입량은 각 60g씩이며, 추적자의 activity는 0.5Ci였다. 추적자의 사용량과 입경분포는 표 3과 같다.

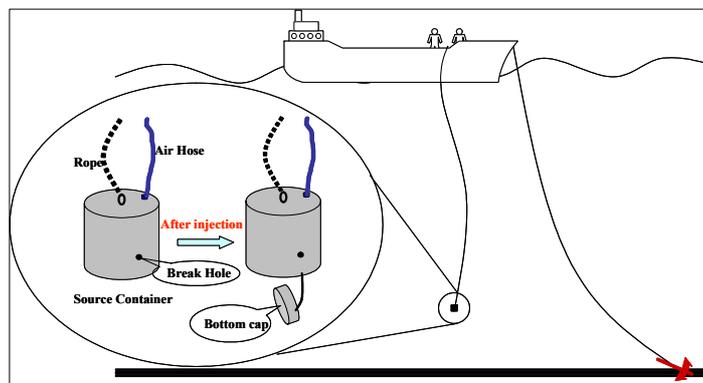


그림 6. 추적자 투입 모식도

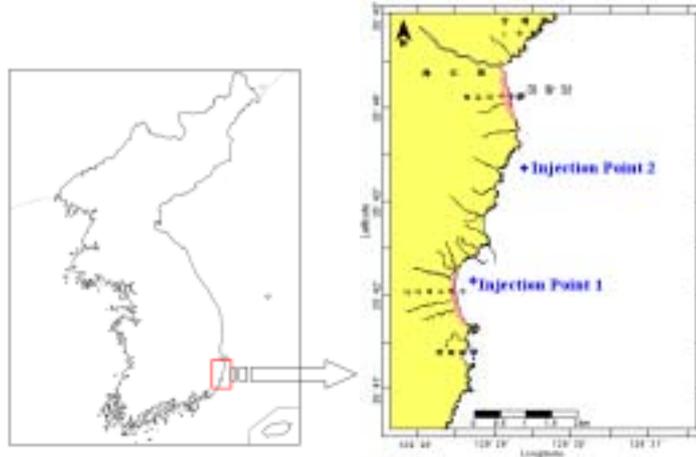


그림 7. 추적자 투입지점

표 3. 실험에 사용한 Ir-glass 입경분포

	grain size(mm)	weight percent(%)	weight(g)
Injection Point 1,2	0.850~0.425	50	30
	0.425~0.250	30	18
	0.250~0.150	20	12

#### 4.2 실험 방법

실험방법은 그림 8과 같이 선박에 GPS, Notebook Computer, Datalogger를 설치하고 wire로 연결된 검출기 하우징을 해저바닥에 놓고 견인하면서 방사능의 시간에 따라 공간적인 분포변화를 계측한다. 수신된 위치데이터는 선박의 위치이기 때문에 검출기의 위치로 보정을 해 주어야 한다. 초기 위치는 선박과 계측기는 일직선상에 있다고 가정하면, 수심과 케이블 길이를 알기 때문에 삼각함수로서 선박과 계측기의 직선거리를 알 수가 있다. 초기 선박의 위치를 알고 케이블 길이를 알고 있으면, 최초 계측기의 위치를 계산할 수가 있다. 그러나 선박이 진행하면서 정해진 항로를 벗어나서 선박과 계측기가 이루는 각도는 180°가 되지 않는 경우가 발생한다(그림 9 참조). 이런 경우에는 현재 선박의 위치와 이전의 계측기 위치를 이용하면 식 (1)의 방법으로 현재 계측기 위치를 구할 수 있다.

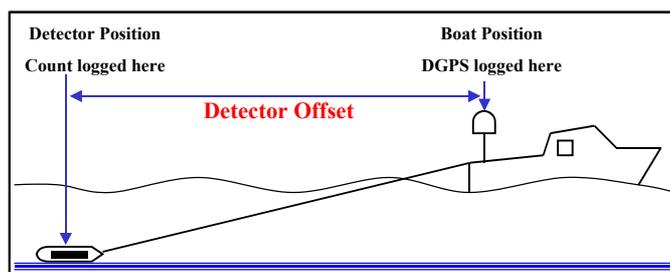


그림 8. 실험 모식도

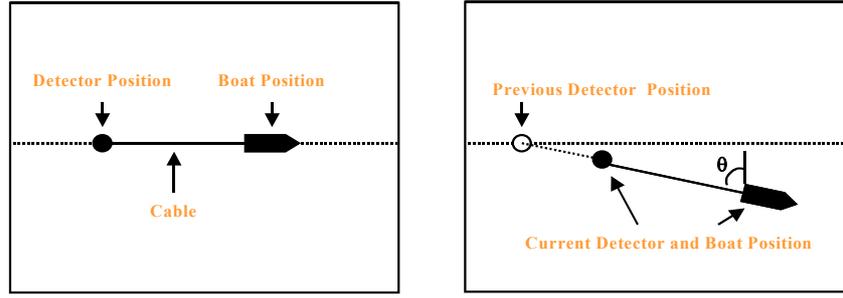


그림 9. 선박과 검출기 위치 보정 방법

$$\begin{aligned}
 E_{CD} &= E_{CB} - L_C \times \sin \theta \\
 N_{CD} &= N_{CB} - L_C \times \cos \theta \\
 \theta &= \tan^{-1} \left( \frac{|E_{CB} - E_{PD}|}{|N_{CB} - N_{PD}|} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $E_{CD}, N_{CD}$ 는 현재 detector 위치,  $E_{CB}, N_{CB}$ 는 현재의 선박 위치,  $E_{PD}, N_{PD}$  : 이전의 detector 위치이며  $L_C$ 는 Cable 길이이다.

#### 4.3 실험 결과

추적자는 5월 3일에 투입하였으며, 투입지점의 수심은 point1에서는 10m이고 point2에서는 15m이다. 실험은 추적자 투입 후 약 일주일 후에 추적하였으며, 총 4회에 걸쳐 실험을 수행하였다.

표 4. 1차 추적자 실험을 위한 투입위치 및 추적 일자

	투입위치	수심	투입 후 경과일			
			1st	2nd	3rd	4th
Point 1	Lat : 35°42'07.09"N Long: 129°28'42.82"E	10m	7일 후	18일 후	32일 후	66일 후
Point 2	Lat : 35°43'21.09"N Long: 129°29'25.00"E	15m	7일 후	18일 후	32일 후	66일 후

##### 4.3.1 Point 1

그림 10의 (a)~(d)는 투입지점 1에서의 시간에 따른 추적자의 공간적인 분포를 등방사능량(iso-count contour)으로 도시하였으며, 그림에서 좌표계는 GPS에서 수신된 WGS 84좌표계를 TM좌표로 변환하여 나타내었다. 실험은 일정한 시간간격으로 수행하였으며 투입지점 1에서 추적자는 해안방향으로 이동하고 있음을 확인하였다. 첫 번째 계측실험은 추적자 투입 후 7일 만에 수행하였으며, 이동양상은 해안방향으로 이동하고 있는 것을 알 수 있었으나, 좁은 분포영역으로 인해 최대 계측치를 얻지는 못하였다. 두 번째 계측실험은 18일만에 수행하였으며, 첫 번째 추적결과에 비해서 뚜렷한 이동은 없었으나 남북방향으로 좀 더 넓게 확산되었다. 세 번째

계측실험에서는 명확한 방향성이 나타났으며, 주 이동방향은 해안방향으로 이동하는 경향을 보였다. 그 이동은 추적자 투입지점에서 서쪽으로 약 150m까지 patch가 나타났으며, 남북의 확산은 약 80m까지 patch가 나타났다. 네 번째 계측실험에서는 세 번째 추적결과에 비하여 뚜렷한 이동정도는 나타나지 않았으나, 추적자 투입지점 북쪽에 계측치가 큰 값이 계측되었다. 이것은 그 부분의 해저지형이 암반으로 되어 있어서 그 방향으로 이동한 추적자가 움직이지 못하고 그 쪽에 뭉쳐있다고 사료된다.

#### 4.3.2 Point 2

그림 11의 (a)~(d)에 투입지점 2에서의 시간에 따른 추적자의 공간적 분포를 등방사능량으로 도시하였으며, 추적자 투입과 계측실험은 투입지점 1과 동일하다. 추적자의 주 이동방향은 남쪽이며, 해안과 평행하게 확산되는 양상을 보였다. 세 번째까지의 실험결과로, 추적자 투입지점으로부터 남쪽으로 최대 200m 까지 추적자의 patch가 나타났으며 동서방향으로의 추적자의 patch는 70m 가량 확산되었으며 네 번째 실험에서는 추적자의 분산에 의해 추적자의 patch가 좁게 나타났다.

## 7. 결 론

연안에서 표사의 거동을 추적하기 위하여 인공표지모래와 장비들을 개발하여 현장 적용실험에 성공적으로 활용하였으며, 실험결과를 분석하기 위한 데이터 처리방법도 연구하였다. 표사이동을 파악하기 위하여 방사성동위원소 추적자를 이용하여 동해안에 있는 2개 지점을 선정하여 추적자 실험을 수행하였으며, 사용된 추적자는 Ir-192가 포함된 표지모래였으며 oxide route에 의해 제조된 Ir-192가 비균질적이었기 때문에 균질도를 향상시키기 위해서 현재 sol-gel route에 의한 제조법의 연구를 수행 중에 있다.

시범실험을 통해 표사의 움직임에 대하여 정성적인 특성을 알 수 있었으며, 연안에서의 표사이동연구에 방사성 추적자 이용기술의 유용성과 우수성을 확인할 수 있었으며, 지속적인 연구개발을 통하여 항만 및 항로매몰 방지를 위한 기초적 연구와 준설토 투기에 의한 확산실험 등에도 적용가능 할 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

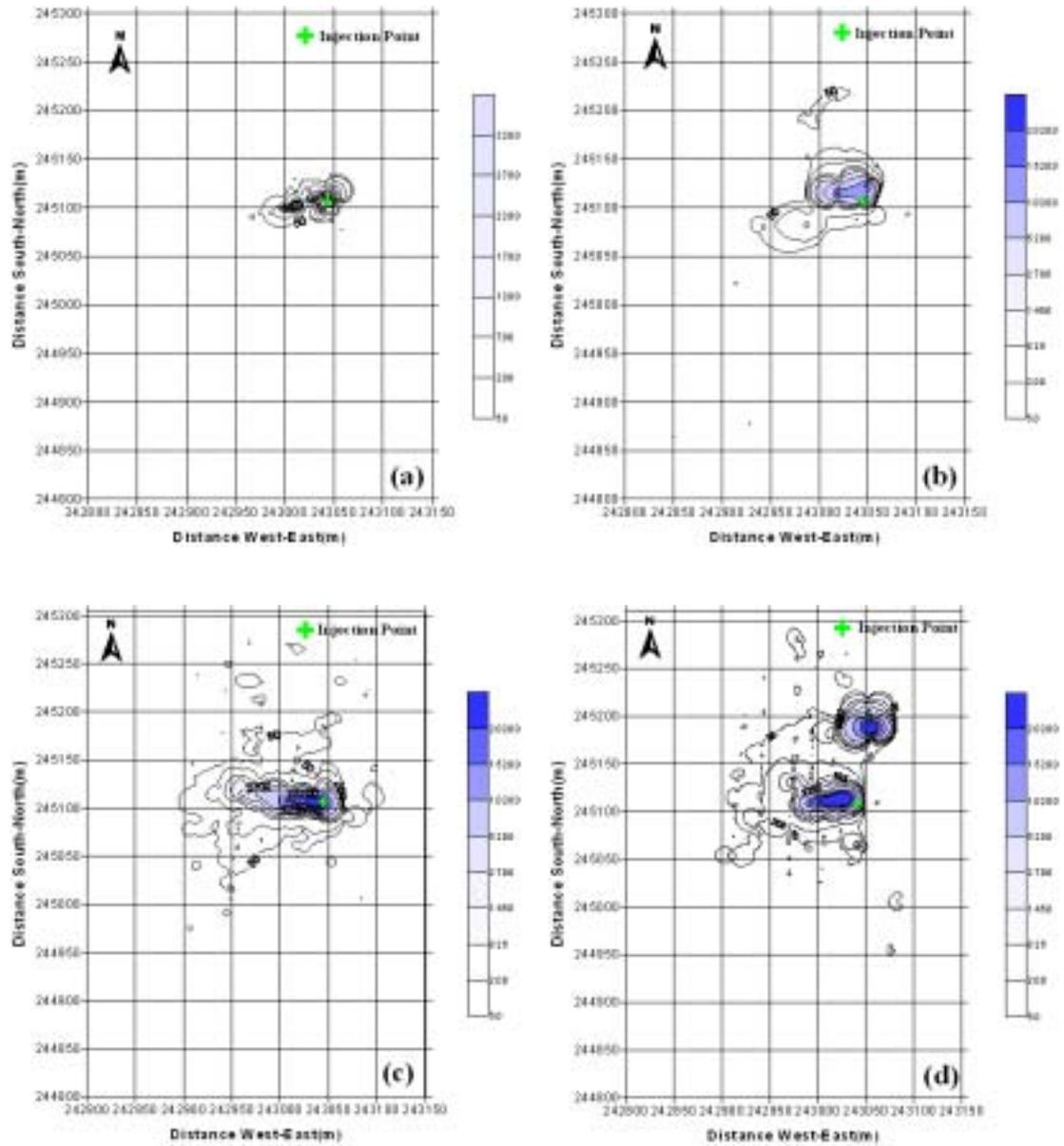


그림 10. 투입지점 1에서 시간경과에 따른 추적자의 공간적 분포

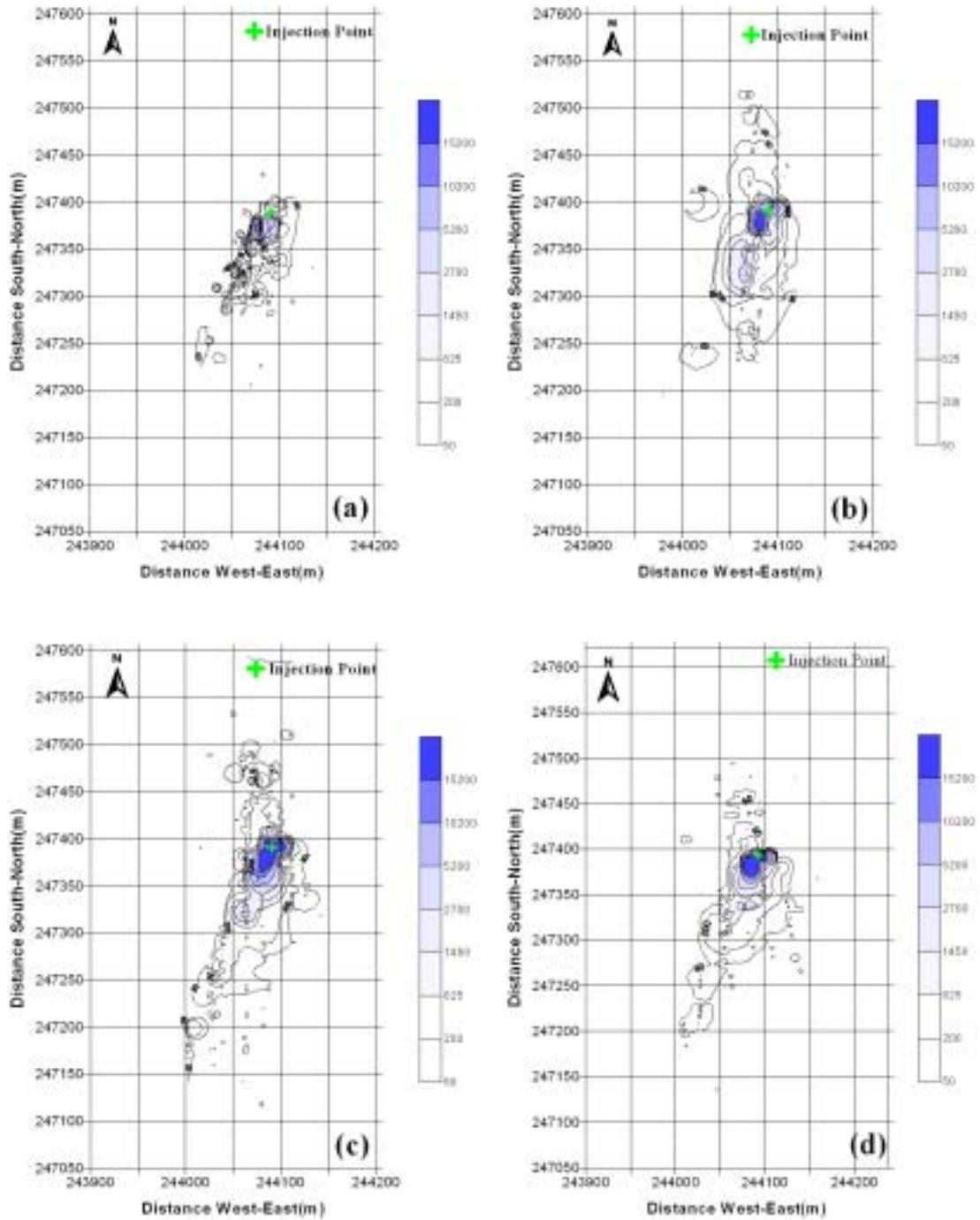


그림 11. 투입지점 2에서 시간경과에 따른 추적자의 공간적 분포

## 참 고 문 헌

1. “방사성 추적자 이용기술 개발” 한국원자력연구소, KAERI/RR-2353/2002 (2002)
2. 양경린, “방사성 동위원소를 이용한 영일만 해역표사 조사”, 한국해양학회지, Vol.4, No.1, p 9~16(1969)
3. 양경린, 류영수, “코발트-60을 이용한 묵호항 해역표사의 조사, 한국원자력연구소, KAERI-17, p 654~663(1967)
4. Caillot, A., Bedload transport, in Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, IAEA, Vienna, 1983, pp 103
5. 정성희, 진준하, 김종범, 최병중, “방사성동위원소 추적자 기술을 이용한 연안환경보전 기술현황분석 보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/AR-631/2002 (2002)
6. Owczarczyk A., Strzelecki M., Szpilowski S., Wierzchnicki R., Basinski, " New application of radioactive tracer method for the sediment movement measurements in the nearshore zone, Isotopenpraxis 25. 8, pp 330(1989)
7. 김종범, 진준하, 정성희, “방사성추적자 실험용 방사선계측기 개발 기술보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2258/2002 (2002)
8. A.S. Pendharkar, V.N. Yelgaonkar, H.J. Pant, U. Saravana Kumar, G.N. Mendhekar, S.V. Navada, "Radiotracer Application in Bedload Transport - Case Studies at CALCUTTA PORT",