

# 螢光砂 제작 및 漂砂移動經路 追跡을 위한 현장실험

o정신택\* · 조홍연\*\* · 김창완\*\*\* · 박복옥\*\*\*\* · 이종국\*

## 1. 서론

연안해역에서 漂砂移動經路를 파악하기 위해서는 표사가 이동가능한 모든 지점에서 표사이동량 또는 조류(current) 및 농도를 측정하여야 한다. 표사이동량은 표사추적자(sand tracer), 초음파측정기(ultrasonic flux meter), 표사포획장치 등을 이용하여 측정할 수 있으며, 표사농도는 빛투과기, 표사채취기 등을 이용하여 측정할 수 있다<sup>(1),(4)</sup>. 따라서, 표사이동이 나방향으로 발생하는 해역에서의 표사이동경로 추적은 연구 및 과업의 목적, 비용, 노동력을 고려하여 효율적이고 적절한 관측방법을 우선적으로 선정하여야 한다. 해안구조물 특히 표사유입의 영향이 심각한 시설물이 위치한 지점으로 유입되는 표사의 기원을 파악하는 연구는 입자 하나 하나의 경로를 파악하여야 하므로 Eulerian 관점보다는 Lagrangian 관점에서 연구하는 방법이 타당할 것으로 사료된다<sup>(3)</sup>. Lagrangian 관점에서의 정성적·정량적인 표사이동경로 파악은 표시입자(marked grain)를 이용한 방법이 널리 사용되고 있다<sup>(2)</sup>. 즉 표사에 형광물질 또는 방사능물질로 염색한 표시입자를 연구대상 해역에 투입하여 이동경로를 추적하는 방법이 사용되고 있다. 그러나, 방사능물질은 취급에 제한이 따르고, 환경 위해성이 크기 때문에 주로 형광물질이 표시물질로 이용되고 있다. 반면, 형광물질(형광도료)은 대부분 수입에 의존하고 있기 때문에 고가의 형광도료 수입비용으로 인하여 형광사를 이용한 추정 방법은 기본적으로 많은 경비가 소요된다.

본 연구에서는 수입 형광도료에 비하여 매우 저렴한 형광안료와 有機溶劑(solvent)를 직접 구입하여, 경제적으로 형광도료 및 형광사를 제작하는 과정을 제시하고, 제작된 형광사를 영광원자력발전소 도수로(intake channel)로 유입되는 표사의 공급경로를 파악하기 위한 추적자(tracer)로 활용하는 현장실험을 수행하여, 본 연구에서 제작된 형광사의 현장 적용성 및 활용방안을 검토하였다.

## 2. 형광사 제작방법 및 경비

형광사 제작은 형광도료의 제작과정, 형광물질을 착색할 표사의 前處理 과정, 표사와 형광물질의 반죽(혼합)과정으로 구분할 수 있다(그림 1). 형광도료를 직접 구입하여 형광사를 제작할 경우에는 형광도료 제작과정이 생략되지만, 형광도료 구입비용이 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서 제시한 방법으로 형광사를 제작할 경우, 형광도료를 직접 수입하여 형광사를 제작하는 경우에 비하여 약 70% 정도의 경비절감효과를 기대할 수 있다.

---

\* 원광대학교 건축·도시·토목환경공학부 조교수  
\*\* 한국해양연구소 수자원연구실 선임연구원  
\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원  
\*\*\*\* 한국전력공사 월성원자력본부 건설소 토목부장  
\*\*\*\*\* 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

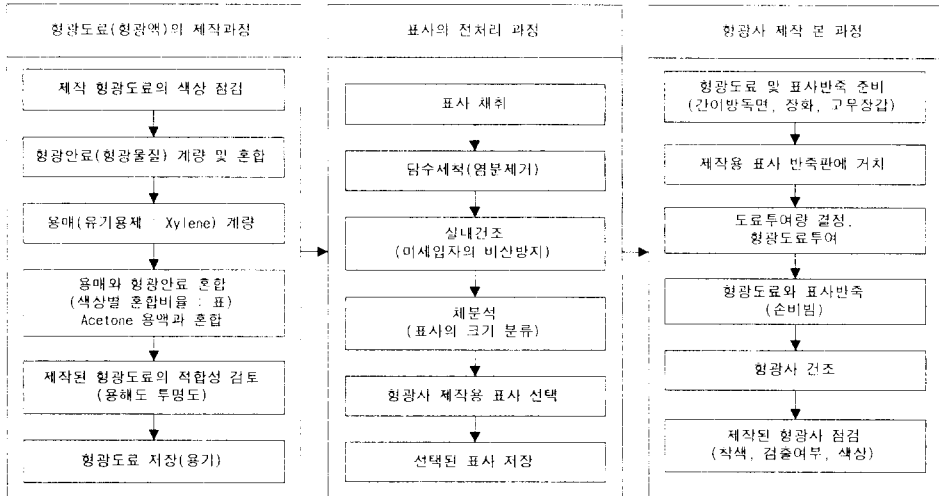


그림 1. 형광사 제작 과정 흐름도

## 2.1 형광도료의 제작과정

표사관측용으로 쓰이는 형광도료(액체)는 적색(rose), 녹색(green), 황색(yellow), 청색(blue; 조개 껍질과 구별이 곤란하여 형광사 색상으로 부적합<sup>1)</sup>) 등의 색상이 일반적이며, 대부분 수입에 의존하고 있다. 그러나, 형광도료의 수입가격이 15.0kg 당 600,000~700,000원 정도로 매우 비싸며, 유기용제가 포함되어 선박을 통한 배달만이 가능하기 때문에 구입기간이 상당히 소요된다. 따라서, 시간적·경제적인 여유가 부족한 경우에는 형광도료 수입에 의한 형광사 제작은 매우 곤란하다. 본 연구에서는 형광도료의 원료가 되는 형광안료(고체입자)를 영국(국내업체 仲介)에서 구입하여 형광도료를 직접 제작하였다. 수입한 안료는 장미색, 자홍색, 황색으로 형광도료에 비하여 매우 저렴하다(35,000원/kg; 1997년 당시 구입비용). 형광도료는 형광안료, 아세톤(acetone), 크실렌(xylene, 물감의 원료; 영어식으로는 자일린으로 발음되지만, 일반적으로 크실렌이라고 발음하기 때문에 본 논문에서는 편의상 크실렌으로 기술하였다) 등을 적절한 비율(중량비[%] = 형광안료 15~20% : 크실렌 10~15% : 아세톤 70~75%)로 혼합하여 제작하였으며, 다양한 색상의 도료를 만들기 위하여 형광안료비율을 색상별로 조정하였다(표 1). 본 연구에서는 15.0kg 형광도료 제작시 아세톤 11.0kg, 크실렌 1.5kg, 형광안료 2.5kg 혼합비율을 적용하였다. 특히, 오렌지-5, 오렌지-6색 제작시에는 퇴적물 시료에서의 검출을 용이하게 하기 위하여 형광물질의 휘도(輝度)를 증진시키는 螢光增白劑(brightener)를 사용하였다. 크실렌은 방향족 화합물 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylene) 계열에 포함되는 용매로 *m* 크실렌, *p* 크실렌, *o* 크실렌의 3종류가 있으며, 본 형광도료 제작시에는 일반적으로 사용되는 *m* 크실렌을 사용하였다.

*m* 크실렌은 용매로 널리 사용되며 화석연료에서 발견되고, 석유를 정제하여 얻을 수 있다. 반면, *o* 크실렌은 살균제(bactericides), 제초제(herbicides), 윤활유(lubricating oil)를 제작하기 위한 용매로 사용되며, *p* 크실렌은 휘발성 유기화합물로, 합성섬유(polyester fiber), 합성수지(polyester resin), 필름제작시 사용되는 TPA(terephthalic acid) 제조 및 제초제 제작시 용매로 사용된다.

표 1. 형광도료 제작을 위한 형광안료 및 용매의 비율

번호	형광도료색	형광안료량 (%)	용매량(%)	비중	흡수율(%)
1	장미색	장미색 : 70	30	2.611	
2	자홍색	자홍색 : 70	30	2.615	
3	황 색	황 색 : 70	30	2.597	
4	녹 색	황 색 : 60 청 색 : 10	30	2.594	
5	오렌지-5	장미색 : 30 자홍색 : 20 황 색 : 20	30	2.611	
6	오렌지-6	장미색 : 20 자홍색 : 20 황 색 : 30	30	2.592	
7	청 색	청 색 : 70	30	2.594	
-	천연사	-	-	2.609	0.72
평균	-	-	-	2.604	

## 2.2 표사의 전처리(pre-process) 과정

이동경로를 파악하고자하는 표사의 대표입경을 결정하여 현장에서 적절한 크기의 모래를 채취하거나 표준사(standard sediments)를 구입하여 형광사를 제작할 표사를 준비한다. 본 연구에서는 영광 원자력발전소 도수로 입구에 위치한 가마미 해수욕장의 모래를 채취하여 시료로 사용하였다. 채취된 표사는 형광도료의 착색을 용이하게 하기 위하여 점토질 및 염분을 제거하여야 한다<sup>(1)</sup>. 표사에 포함된 염분 및 점토질은 담수로 세척하여 제거하였으며, 세척한 표사는 실내에서 건조하였다. 본 연구를 수행한 겨울철에는 기온이 낮기 때문에 자연 건조할 경우에는 시간이 매우 많이 소요될 것으로 예상되어, 철판을 가열하여 건조하는 방법을 선택하였다. 또한 야외에서 건조할 경우, 飛散에 의한 미세입자의 이탈이 발생할 수 있기 때문에 야외건조는 바람이 없는 경우를 제외하고는 바람직하지 않다. 건조된 모래는 체분석(sieve analysis)을 실시하여 크기별로 구분하고, 원하는 입径의 표사를 선택하였다.

## 2.3 형광사 제작 과정

형광도료와 표사를 반죽할 때에는 주의할 사항이 있다. 소량의 형광사를 제작할 경우에는 문제가 되지 않을 수 있으나, 다량의 형광사를 제작할 경우에는 형광안료의 용매로 사용한 크실렌이 유독성 성분이기 때문에 반드시 간이 방독면을 착용하여야 한다. 크실렌 중독으로 인한 치명적인 해는 없지만 장기간 작업을 할 경우에는 현기증, 무기력증에 의한 마비증상이 수반될 수 있다<sup>(5)</sup>. 그리고, 확실하고 고른 착색을 위하여 손비빈 작업을 수행하여야 하며, 덩어리진 형광사는 분쇄한 후, 체분석을 재실시하여 원하는 입경을 유지하여야 한다. 형광사 제작을 위한 형광도료의 투여량(표사와 형광도료의 배합비 : 모래 1,000kg + 형광도료 80kg)은 사전에 소량의 형광사 제작작업을 수행하여 결정하였다. 형광도료와 표사가 충분히 착색하도록 반죽하고, 반죽된 표사를 건조하면 형광사는 완성된다. 형광사 제작시 소요되는 총 경비는 외국에서 도료를 수입하여 제작하는 경우는 4,000,000원, 국내에서 시판하는 도료를 구입하여 제작하는 경우 2,350,000원, 본 연구에서 제시한 형광안료를 수입하여 제작하는 경우에는 1,290,000원으로 추정되었다(표 2 참조). 외국에서 도료를 수

입하는 경우 국내에서 제작하는 경우보다 약 6배의 경비가 소요된다(수입비용 : 3,250,000원; 본 연구에서의 제작비용 : 540,000원). 한편 국내에서 직접 제작한 도료를 사용하여 형광사를 제작하는 경우에는 제작비의 약 50%를 인건비가 차지하여, 제작비중에서 인건비 비중이 상당하다는 것을 알 수 있다.

표 2. 형광사 제작비용 (제작량 1,000 kg 기준)

과 정	Case 1	Case 2	Case 3
<b>형광도료제작</b>			
형광도료 구입비	3,250,000	1,600,000	0
형광안료 구입비	0	0	420,000
Acetone 구입비	0	0	65,000
Xylene 구입비	0	0	5,000
인건비(1인1일)	0	0	50,000
<b>표사 전처리</b>			
인건비(2인3일)	300,000	300,000	300,000
연료비(건조비)	100,000	100,000	100,000
재료비(방독면, 장화)	50,000	50,000	50,000
<b>형광사 제작</b>			
인건비(2인3일)	300,000	300,000	300,000
제작비 총액(₩)	4,000,000	2,350,000	1,290,000
참고사항	투명도료, 착색양호, 비중변화 無	불투명 도료, 착색불량, 비중 변화	투명도료, 착색양호, 비중변화 無

(註) 형광사 1,000 kg 제작에 필요한 형광도료량 : 80 kg, 인건비 1인1일 : 50,000원

Case 1 : 외국(일본)에서 형광도료를 구입하여 형광사를 제작하는 경우

Case 2 : 국내에서 형광도료를 구입하여 형광사를 제작하는 경우

Case 3 : 형광안료를 구입하여 형광도료 및 형광사를 제작하는 경우

### 3. 형광사 투입에 의한 표사이동경로 추적

연안의 표사이동량 및 이동경로를 예측하기 위하여 표사추적자를 이용한 실험은 상당한 비용 및 노동(인건비), 전문적인 기술이 필요하기 때문에 실험실규모의 실험으로 제한되어 수행되는 경우가 많으며, 현장실험이 수행된 사례는 많지 않다<sup>(1),(6),(7)</sup>. 따라서, 보다 경제적이고, 효율적·효과적인 형광사 현장실험에 대한 방안이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

#### 3.1 형광사 제작 및 준비

본 형광사 실험은 영광 원자력발전소 도수로내로 유입되는 표사의 공급경로를 조사하는 것이 목적이다. 따라서, 형광사 제작을 위한 모래는 영광 원자력발전소에 인접한 가마미 해수욕장의 모

래를 사용하였다. 가마미 해수욕장의 모래를 80번체(0.18mm), 100번체(0.15mm)를 사용하여 체질을 한 후, 100번체에 남는 모래(대표입경 0.165mm)를 수집하여 실험을 수행하였다. 모래입자 165 $\mu$ m 크기의 침강속도<sup>(4)</sup>는 20 $^{\circ}$ C 조건에서 0.061(m/s)로 수심 10m 정도의 잔잔한 해역에서 약 3분 정도면 모두 침전된다고 볼 수 있다. 또한, 細砂에 형광도료를 착색할 경우 발생할 수 있는 비중의 변화를 점검하기 위하여 비중실험을 실시하였으나, 비중값의 변화는 무시할 만한 정도였다<sup>(7)</sup>. 형광사는 색상별로 각 1톤씩, 총 7톤을 제작하였으며, 각각의 형광사는 현장운반시 편의를 도모하기 위하여 40kg씩 나누어 비닐과 마대를 이용하여 포장하였다.

### 3.2 형광사 투입 및 채취

제작된 형광사는 영광 원자력 발전소 도수로의 표사유입경로를 파악하기 위하여 사용되었다. 일반적으로 형광사를 이용하여 표사이동 경로를 파악하기 위해서는 형광사 투입지점을 기준으로 16방위 방향에 대하여 일정한 간격으로 표사를 채취·분석하여야 한다. 그러나, 본 연구에서는 원자력 발전소 도수로 내로 유입되는 표사의 이동경로 파악이 목적이므로 도수로 위치를 기준으로 외부해역에 형광사를 1톤씩 7개지점에 색상을 달리하여 투입하였다. 형광사는 중력식 공급장치(gravity-fed tremie; 직경 20cm 크기의 원통형 비닐튜브)를 이용하여 해저에 직접 투입하였으며, 투입시기의 해상은 매우 정온한 상태를 유지하고 있었다. 일정한 시간이 경과한 후 GPS를 이용하여 정확한 위치로 이동하여 도수로 인근 지점에서 Grab 채취기(bucket type)를 이용하여 4회에 걸쳐 표사를 채취하였다. 저질시료는 1회당 약 150~200g 정도를 채취하여 비닐봉지에 보관하였다.

총 4회에 걸쳐서 채취하여 비닐에 보관하였던 시료는 100g씩 물체질하여 필을 제거하고, 건조로에서 건조하였다. 건조된 시료는 계수관에 얇게 편 후, 3600Å 자외선 램프(ultraviolet lamp)에 비추어 색상별로 計數하였다. 색상별로 검출된 형광사량을 파악하여 도수로로 유입되는 표사의 주된 이동경로를 파악하였다. 7종류의 형광사를 제작하여 투하하였으나, 청색은 조개껍질과 구별이 곤란하여 분석에서 제외하였다.

## 4. 결론

연안해역에서의 표사이동경로를 파악하기 위하여 사용되는 형광사의 경제적인 제작과정을 제시하였으며, 제작된 형광사를 이용하여 원자력발전소 도수로로의 표사유입경로파악을 위한 현장실험을 수행하였다. 형광안료와 유기용제를 직접 배합하여 형광도료를 제작하고, 전처리과정을 통하여 준비된 표사와 혼합하여 형광사를 제작하는 일련의 과정을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 방법에 의하면 기존의 방법에 비하여 약 70% 수준의 경비절감효과를 기대할 수 있다. 또한, 보다 다양한 색상의 형광도료를 제작할 수 있는 장점이 있는 것으로 파악되었다.

또한, 제작된 형광사를 영광 원자력발전소 도수로로 유입되는 표사의 공급원, 즉 연안표사의 이동양상을 파악하기 위하여 투입·채취하였다. 영광 해역은 북서계절풍에 의한 저층토사의 浮遊(resuspension)가 야기되며 조류에 의하여 유사(유사)의 이송 및 확산이 광범위하게 이루어져 도수로 인근을 통과하는 유사(유사)는 강한 유입유속에 의하여 도수로 내부로 유입되는 양상을 보이고 있다. 북서계절풍이 약한 경우에는 형광사 크기의 유사(유사)는 주로 소류사의 형태로 이동되는 것으로 파악되었다. 또한, 가마미 해수욕장에 투입된 형광사도 도수로로 유입되는 형상이 확인되었다.

그러나, 해수욕장 전면 해역의 경계지점인 간출암(干出岩) 외해쪽에서는 형광사가 검출되지 않은 것으로 보아, 해수욕장 전면 해역의 유사(유사)가 간출암을 넘어서 외해로 유출되는 경우는 별로 없는 것으로 판단된다. 그리고, 모든 형광사 투입지점으로부터 형광사가 유입된 것으로 나타나, 도수로로의 표사유입은 북서계절풍에 의한 표사의 부유·확산 → 조석에 의한 이동·확산 → 창조시 도수

로 유입되는 양상을 보이고 있으며, 인근 해역의 저층 표사가 모두 도수로로 유입되는 부유 표사의 공급원으로 파악되었다.

서해안과 같이 조석현상이 우세한 해역에서 형광사 실험을 실시하는 경우에는, 물리 해황을 사전에 파악하여 조사목적에 부합되는 潮時를 선정하여 형광사를 투입하여야 한다. 일반적으로는 고조와 저조시 2회 실시하는 것이 바람직하나, 이 경우 비용이 2배 이상 소요되고, 여러 색상의 형광사가 필요하다. 또한 첫 투하 후 2차 투하시까지는 많은 시간이 지나야 하므로 관측기간이 길어진다는 단점이 있다.

## 사사

본 연구 결과는 한국전력공사의 1997년도 “영광 원자력발전소 도수로 토사유입 저감방안 연구”의 일부분이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Horikawa, K. (1988). *Nearshore dynamics and coastal processes : Theory, measurement, and predictive models*, Univ. of Tokyo Press.
2. Kim, H.S. (1993). “Three-Dimensional Sediment Transport Model”, Ph. D. Dissertation, University of Liverpool, Liverpool, UK.
3. Okubo, A., Carter, H.K., Wilson, R.E., Sanderson, B.G., and Partch, E.N. (1982). “A Lagrangian and Eulerian diffusion study in the coastal surface layers”, *DOE/EV 10250-1*, Marine Science Research Center, State University of New York, Stony Brook, New York
4. van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, AQUA Publications.
5. 이수경, 하동명 (1997). “안전공학도와 소방인을 위한 최신 일반화학과 유기물질론”, 도서출판 의제.
6. 唯一綜合技術團(주) (1988). “竹邊港 埋沒防止對策 조사용역 보고서”, 포항지방해운항만청.
7. 한국건설기술연구원 (1997). “영광 원자력발전소 도수로 토사유입 저감방안 연구”, 한국전력공사.