

방사성 물질의 해양누출 사고에 대한 체계적인 관리 시스템 구축방안*

서영상, 황재동, 한인성, 윤석현, 임월에

2011년 3월 발생한 해저지진으로 인해 일본 후쿠시마 제1원자력발전소의 사고가 발생하였다. 이로 인해 다량의 방사성물질이 해수 중으로 유입되었다. 후쿠시마 제1원자력발전소 사고 후 방사성물질은 전 세계적으로 문제화 되었다. 특히 우리나라는 일본과 인접하고 있어, 일본 후쿠시마 원자력발전소에서 누출된 방사성물질에 대해 우리나라민은 직접적인 피해를 걱정하였다. 방사성물질은 대기 및 해양을 통해 이동과 확산을 하며, 해양생물의 체내에 농축되기도 한다. 따라서 해양에서 해수 및 해양생물 시료를 채취할 수 있는 해양조사 체계 구축은 물론 우리나라 주변해역의 해류 흐름을 파악할 수 있는 위성자료의 데이터베이스화 및 해양의 해류에 대한 예측모델의 구축이 필요한 실정이다. 예측모델을 기반으로 본 연구에서는 해양에서 방사성 물질의 이동과 확산, 해양생물 체내 농축에 대한 종합적인 위기관리 시스템 구축방안을 제시한다.

주제어: 방사성물질, 위기관리, 해류, 위성, 수치모델, 방사성물질 체내농축

1. 서론

2011년 3월 13일, 일본 도호쿠 지방 태평양 앞바다에서 리히터 9.0의 강한 지진이 발생하였으며, 이 결과로 쓰나미가 발생하였다. 강한 지진과 쓰나미에 의해 후쿠시마 제1원자력발전소의 모든 원전이 정지되었다. 지진으로 송전탑이 붕괴되었으며, 송전탑의 붕괴로 인해 원자력발전소는 전력을 상실하게 되었다. 이 후 발생한 쓰나미에 의해 비상전원 및 냉각 시스템의 유실이 발생하여, 노심 냉각 장치 및 냉각수 순환 시스템이 작동을 중지 되었다. 이 과정에서 발생한 수소가 폭발하여 대기 중으로 방사성 물질이 누출되었으며, 원자로 냉각과정에서 다량의 방사성 오염수가 해양으로 누출되었다.

일본 후쿠시마 원자력발전소의 사고 직후 방사성물질에 대해 전 세계적인 이목이 집중되었으며, 방사성물질에 의한 2차 피해에 대해 국제적인 우려와 체계적인 위기관리의 필요성이 대두 되었다. 특히 구 소련의 체르노빌 원자력발전소 사고에 의한 방사성 물질에 대한 피해가 다시금 논의되기도 하였다.

일본과 인접한 우리나라에서도 일본 후쿠시마 원자력발전소의 사고에 따른 방사성물질의 유입에 대

* 본 연구는 국립수산과학원에서 수행 중인 “첨단 해양탐사 시스템 활용 한반도 주변 해양변동 조사 및 운영 (RP-2011-ME-063)” 의 연구의 일부 결과입니다.

한 우려가 나타났다. 먼저 바람에 의한 방사성물질의 이동으로 우리나라가 영향을 받을 것이라는 독일 기상청(www.dwd.de)의 발표가 있는 직후 우리나라 기상청에서는 계절풍에 의해 영향을 받지 않을 것이라는 발표를 하였으며, 그 후에도 해양을 통한 유입설이 제기되기도 하였다. 뿐만 아니라 수산물에 대한 오염 문제도 제기되어 수입 수산물에 대한 방사성 물질 검출 분석이 실시되었다.

국립수산과학원과 한국원자력안전기술원에서는 러시아 핵 폐기물의 동해 폐기 이후 방사능 오염 모니터링을 위해 우리나라 주변해역에 대해 해수 및 해양생물에 대해 방사성 물질의 농도를 조사하고 있다(한국원자력안전기술원, 2010). 이는 최근 일본의 원자력발전소의 사고까지 전제할 조사는 아니었다. 그러나 일본 후쿠시마 원자력발전소의 사고 이후 원자력 발전소의 사고에 대한 체계적인 위기 관리능력의 필요성이 높아졌다.

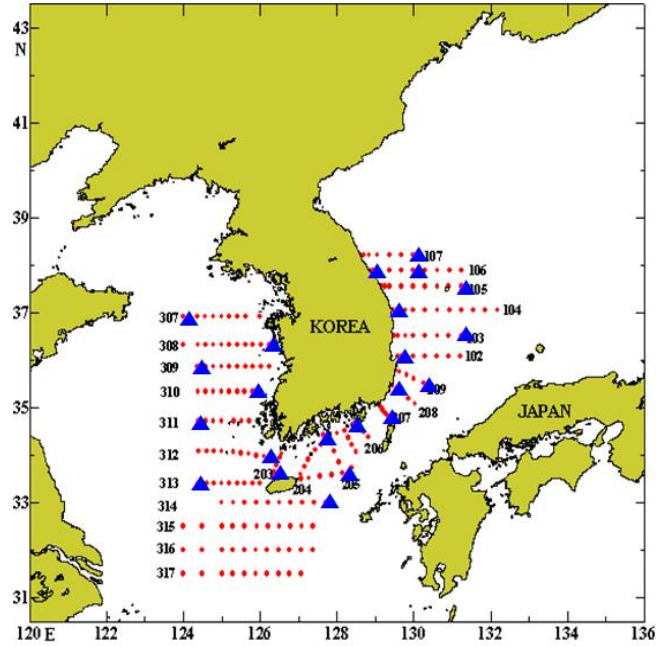
본 연구의 목적은 해양으로 유입된 방사성물질의 이동 및 확산 예상경로를 실시간적으로 파악할 수 있는 시스템을 구축하여 중국, 일본 및 대만 등 우리나라에 영향을 줄 수 있는 상황이 발생할 경우 방사성 물질의 실시간적인 이동 경로 예측 및 경로 상에 있는 조업어선을 파악하여 수산물의 안정성 확보 등 우리 국민의 안전에 신속히 대처할 수 있도록 하는 데 있다.

II. 방사성물질에 대한 해역 모니터링

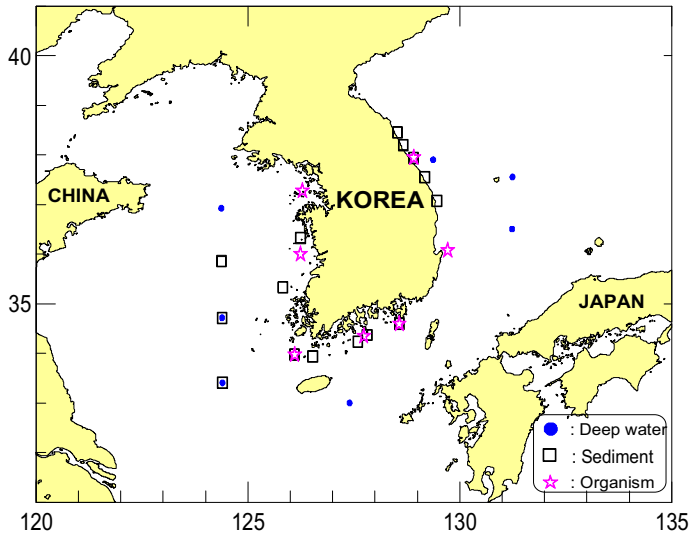
1. 우리나라 주변해역 모니터링

우리나라에서는 한국원자력안전기술원이 1994년부터 우리나라 주변해역에 대해 방사성 물질의 농도를 조사하였으며, 2005년부터 국립수산과학원과 공동으로 연 2회의 빈도를 가지고 수심별 해수, 해양생물, 해저퇴적물의 시료에 대해 방사능 농도, 동위원소비 조사 및 농축 및 추적 정도를 조사하고 있다(한국원자력안전기술원, 2008; 한국원자력안전기술원, 2009). 방사능 분석을 위한 해수, 해양생물 및 해저퇴적물과 같은 시료는 국립수산과학원에서 담당을 하며, 시료에 대한 분석은 한국원자력안전기술원에서 수행하고 있다. 해수는 <그림 1>에 나타난 정점에서, 해저퇴적물 및 생물 시료는 <그림 2>에 나타난 정점에서 확보하지만 생물시료는 어종에 따라 정점이 연도마다 조금씩 차이를 보인다.

2011년 3월 후쿠시마 원자력발전소의 사고 이후 우리나라해역으로의 방사성물질유입 가능성이나 우리나라 근해에서 생산되는 수산물에 대한 방사성물질 검출 등과 관련해서 방사성물질에 대한 우리나라 해역의 안전성 문제가 많이 제기 되었다. 이에 따라 국립수산과학원에서는 <그림 1>의 정점에서 통상 연 2회의 빈도로 확보하였던 방사성물질 분석에 필요한 시료를 일본 지진 발생으로 인한 원자력 발전소 사고 직후인 4월 이후에는 매달 확보하였으며, 이 시료들에 대해 한국원자력안전기술원에서 분석을 실시하였다.



<그림 1> 국립수산과학원 정선해양관측조사 정점(●) 및 방사능 시료(해수) 채수정점(▲)



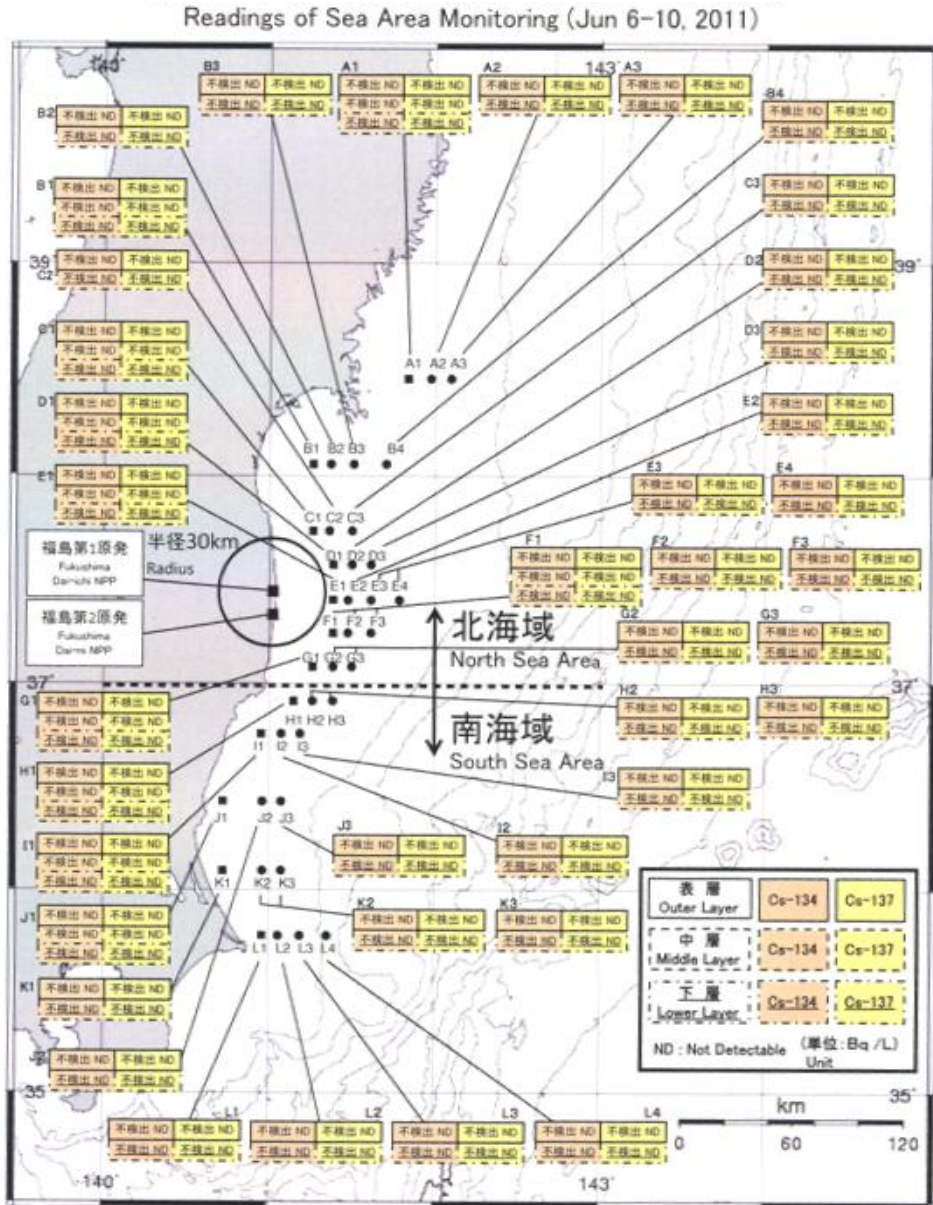
<그림 2> 수심별 해수, 해저퇴적물, 해양생물 조사정점

2. 일본 후쿠시마 원전 주변 해역모니터링

일본에서는 후쿠시마 원자력발전소 사고 후에 일본 문부과학성과 동경전력이 후쿠시마 원자력발전소 연안해역에서부터 근외해역까지 해수 중 방사성 물질의 농도를 측정하였다. 문부과학성에서는 해

역을 연안역과 근해역으로 구분하여 각각 15일 간격으로 모니터링을 수행 하고, 동경전력에서는 후쿠시마 원자력발전소 주변에 집중하여 모니터링을 수행하고 있다.

문부과학성의 해역 모니터링과 관련하여 2011년 6월 6일부터 6월 10일 동안 채수한 해수시료분석 결과 후쿠시마 원전 근위해역에서의 134Cs 및 137Cs은 검출되지 않았다(<그림 3>).

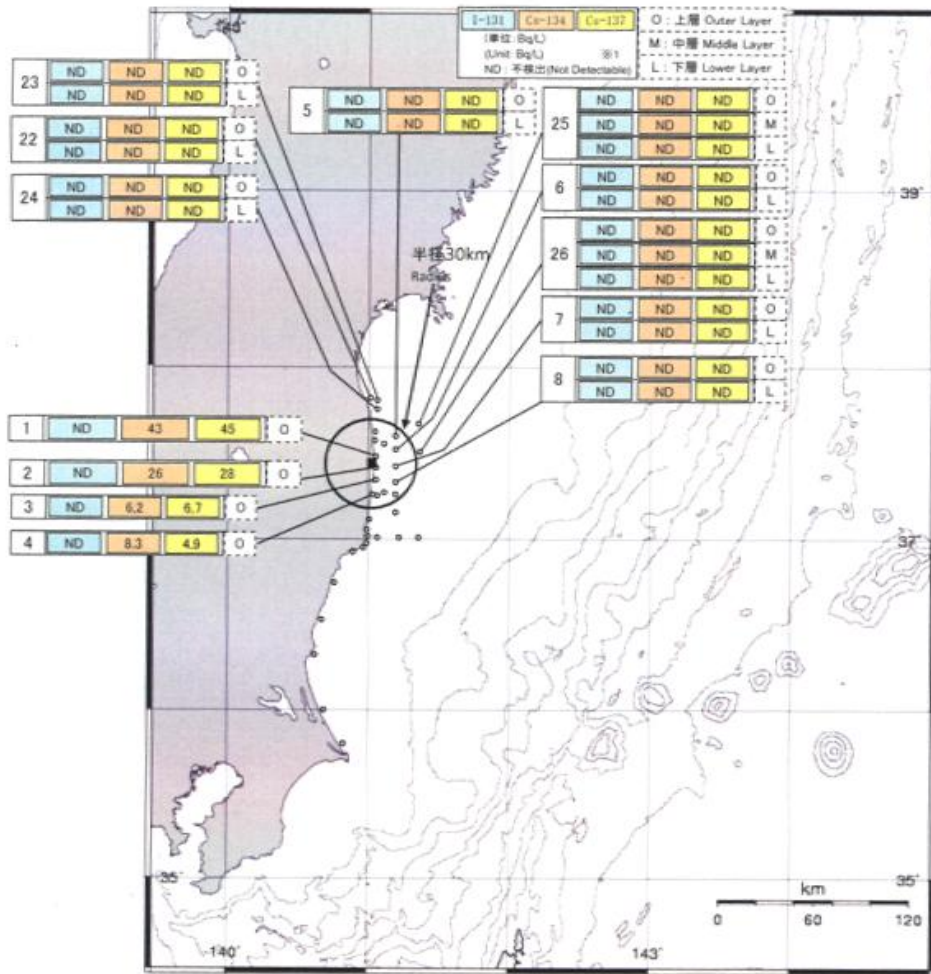


<그림 3> 후쿠시마 근해역 모니터링 결과 (2011.6.6-0)

※ 자료: 일본 문부과학성(2011).

동경전력에서 수행한 후쿠시마 원자력발전소 주변 해역 모니터링의 일환으로 2011년 6월 28일에 채수한 해수시료분석 결과 후쿠시마 원자력발전소 주변 연안을 따라 20Km 반경내에서 134Cs와 137Cs 이 검출 한계치 이상의 값을 보였으며, 5Km 반경 이내 두 정점에서 134Cs는 43Bq/L 및 26Bq/L, 137Cs은 45Bq/L 및 28Bq/L가 검출되었으나,131I은 후쿠시마 원자력 발전소 주변 연안역에서 검출되지 않았다(<그림 4>).

Distribution map of radioactivity concentration in the seawater around TEPCO Fukushima Dai-ichi NPP



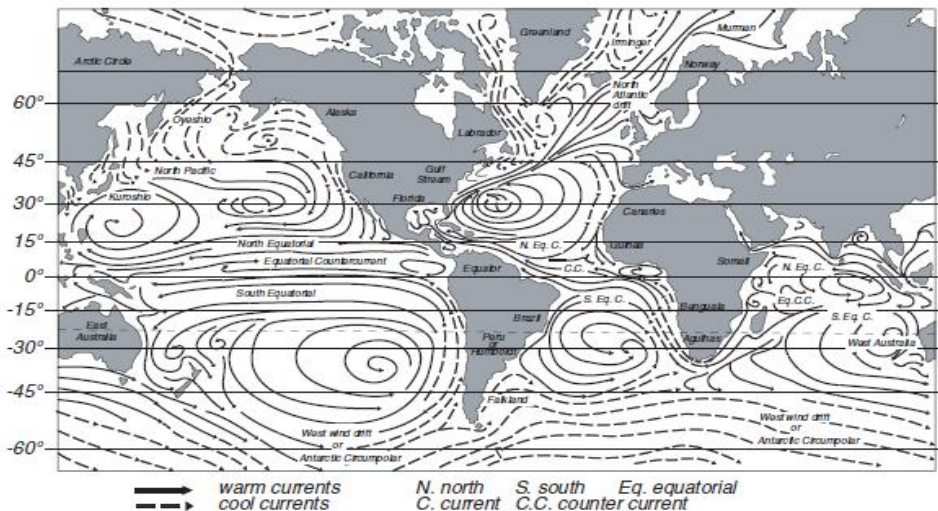
<그림 4> 일본 후쿠시마 연안해역 모니터링 결과 (2011.6.28)

※ 자료: 동경전력(2011).

3. 해수 중 물질수송

해양에는 일정한 방향성을 가지고 물이 이동하는 흐름이 있는데 이를 해류라 부른다. 표층해류의 발생원인은 주로 바다위에서 부는 바람이라고 알려져 있다(Pond and Pickard, 1983). <그림 5>는 Stewart(2006)에 의해 도식된 전지구 규모의 해류도이며, 북태평양상의 주요 해류를 잘 나타내었다. 또한 McNally, *et. al.*,(1983)이 위성추적 표류부이 자료를 이용하여 태평양의 해류를 설명하였다. 태평양상의 해류도를 보면 적도부근에서 북적도 반류(North Equatorial Counter Current)라고 불리는 서태평양에서 동태평양 방향으로 이동하는 해류가 있다. 그 위로 동태평양에서 서태평양쪽으로 이동하는 북적도 해류(North Equatorial Current)가 있다. 북적도 해류에 의해 물이 필리핀쪽으로 이동하게 되며, 필리핀 해역에서 북상하여 대만을 거쳐 일본을 지난 다음 동태평양으로 향하는 쿠로시오 해류(Kuroshio Current)가 있다. 따라서 우리나라는 물론 일본의 경우에는 쿠로시오 해류의 영향을 많이 받게 된다. 북서태평양 해역의 해양에 유입된 물질들은 대부분 쿠로시오 해류를 따라서 이동하게 된다.

따라서 태평양 전체의 해류도에 나타난 해류로부터 물질의 이동 경로 및 순환을 알 수 있다. 우리나라해역이나 일본해역에서 해수 중으로 유입된 물질은 먼저 쿠로시오 해류에 의해 동태평양으로 이동하게 된다. 동태평양의 미국 캘리포니아 부근에서 남하하는 캘리포니아 해류(California Current)를 만나게 되고 이 해류를 타고 적도로 이동한 후 다시 북적도 해류를 따라 서태평양으로 이동하게 된다. 그 후 필리핀 해역에서 북상하는 쿠로시오 해류를 따라 다시 우리나라 해역과 일본 해역으로 이동하게 된다.



〈그림 5〉 시간 평균된 전지구 규모의 해류 모식도

※ 자료: Stewart(2006).

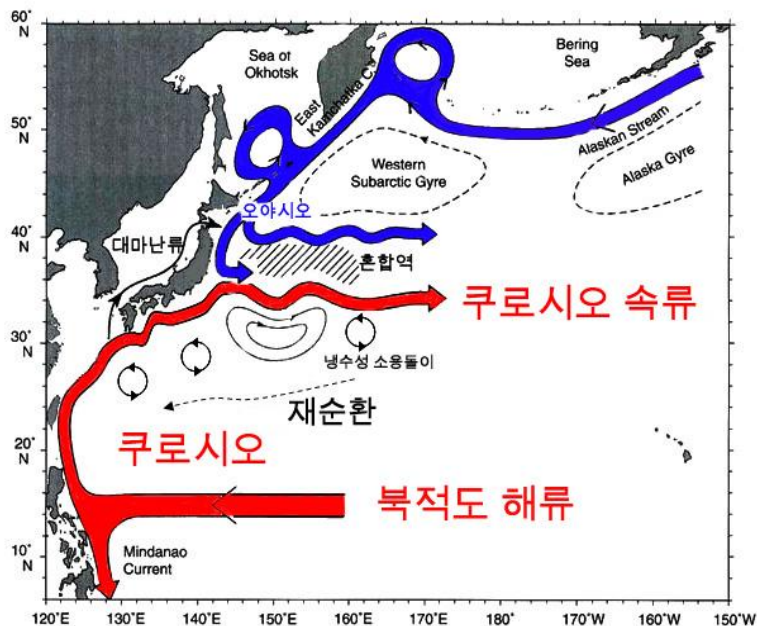
2011년 3월에 발생한 후쿠시마 원자력발전소 사고와 관련하여 후쿠시마 원자력 발전소 부근 해역에

방사성 물질이 검출됨에 따라 후쿠시마 발전소에서 상당한 방사성 물질이 해양으로 유입되었으리라 생각된다. 해양에 유입된 방사성 물질은 태평양 해류 시스템에 의해 먼저 미국쪽으로 이동하게 되며, 그 후 적도를 지나 다시 우리나라나 일본으로 이동하게 된다.

주요 방사성 물질 중 반감기가 짧은 요오드와 세슘 등은 해류를 타고 이동할 때 빨리 소멸되지만 반감기가 약 30년 이상 되는 세슘, 스트론튬, 플루토늄 등은 해류를 타고 다시 우리나라에 유입할 수 있는 가능성이 있다. 그러나 반감기가 긴 방사성 물질이라고 하더라도 해류를 타고 이동 중 침강이나 확산 등에 의해 그 농도가 희석되어 다시 우리나라 해역이나 일본해역에 도달시 검출이 되지 않거나 자연 상태에 있는 농도정도로 낮게 나타날 것으로 추정된다.

그러나 <그림 6>에서처럼 북서태평양 해역에서는 필리핀해역에서 북쪽으로 이동하는 따뜻한 해류인 쿠로시오 해류 이외에도 러시아 캄차카 해역에서 남쪽으로 이동하는 차가운 해류

인 오야시오 해류가 존재한다. Ebuchi and Hanawa(2001)에 의하면 서로 특성이 다른 두 해류가 만나서 쿠로시오 해류의 영향을 받는 일본 남부해역에 냉수성 소용돌이가 형성된다고 밝혔다. 따라서 일본 지바현 부근해역에서 쿠로시오해류와 오야시오 해류가 서로 만나서 동태평양으로 흘러가며, 이 과정에서 오야시오 해류의 차가운 물이 쿠로시오 해류의 영향을 받는 해역으로 이동하면서 냉수성 소용돌이를 형성시킨다. 냉수성 소용돌이는 반시계 방향으로 회전하며, 직경은 약 200~400km 정도이다. 형성된 냉수성 소용돌이는 쿠로시오 해류의 방향과는 달리 한반도 남측 먼바다 쪽인 서쪽으로 이동해 오며, 동중국해 해역에서 쿠로시오 본류와 다시 만나서 소멸 되는 것을 알 수 있다. 일본 남부해역에서 발생한 냉수성 소용돌이가 동중국해역에서 소멸되기까지 약 2년 정도의 시간이 소요된다.



<그림 6> 북서태평양해역에서 쿠로시오 및 오야시오 해류 모식도

후쿠시마 원자력발전소에서 해수 중으로 유입된 방사성물질이 만약 냉수성 소용돌이를 따라서 이동하게 된다면, 약 2년 후에 동중국해로 유입될 가능성이 있으나, 냉수성 소용돌이의 대부분은 강한 흐름인 쿠로시오 분류에 합류 재순환되기 때문에 우리나라 제주도과 일본 류슈 사이 해역으로 북상하여 우리나라에 직접적인 영향을 미칠 가능성은 매우 낮을 것이라 추정된다.

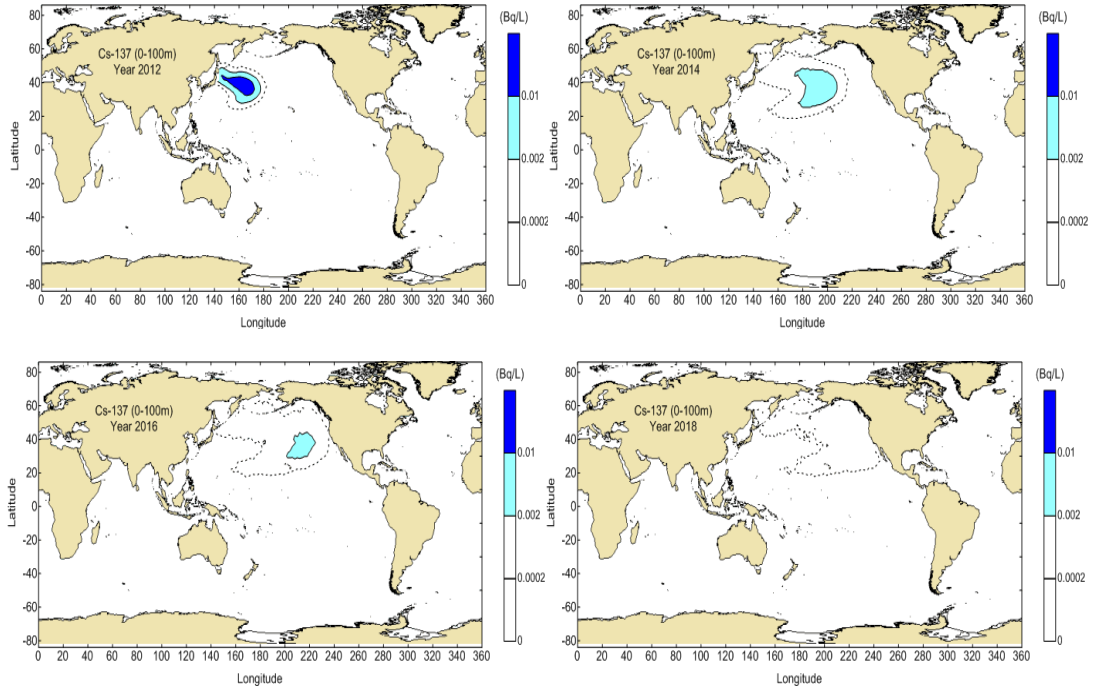
4. 일본에서 수행한 방사성 물질 확산예측

해수 중으로 유입된 방사성 물질은 해류를 타고 이동하게 되며, 따라서 방사성 물질의 발생지점에서 원거리에 있는 해역일지라도 해류의 영향을 받는 지역이라면 방사성 물질의 영향을 받을 수 있다.

일본 문부과학성에서는 일본 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 해수 중으로 유입된 방사성 물질에 대한 이동 및 확산을 예측하였다. 일본 문부과학성은 일본원자력연구개발기구(JAEA: Japan Atomic Energy Agency)가 개발한 LAMER(Long-term Assessment Model of Radionuclides in the Ocean) 모델을 적용하였는데, LAMER 모델은 경도 및 위도에 대한 공간해상도가 각각 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 이며, 연 평균한 3차원 유속장을 이용하여 1년 이상 장기적인 지구규모의 방사성 물질 확산을 예측하는 모델이다.

일본 문부과학성에서는 연 평균된 3차원 유속장을 이용하여 2011년 6월 6일에 발표된 ^{137}Cs 방출량 정보를 기초로 하여 예측계산을 수행하였으며, 예측계산에 대한 결과를 <그림 7>에 나타내었다. 예측 모델에 따르면, 후쿠시마 원자력발전소에서 누출된 ^{137}Cs 은 쿠로시오 해류 및 북태평양 해류에 의해 일본 연안역에서 태평양 동쪽으로 이동하면서, 북태평양 해역으로 확산되는 것을 알 수 있다. 누출 또는 방출된지 1년 후에 농도 0.01Bq/L 이상의 방사성 물질이 일본 지바현에서 미국 하와이 방향으로 이동 확산한 것으로 나타났다.

누출 또는 방출된지 3년 후에는 0.002Bq/L 이상의 농도가 주로 미국 하와이에서 북쪽 해역쪽으로 분포하는 것으로 나타났으나, 0.01Bq/L 이상의 농도분포는 보이지 않았다. 또한 일본해역에서는 검출되지 않거나 0.0002Bq/L 정도로 아주 약하게 나타났다. 5년 후의 결과를 보면 미국 하와이를 지나서 북쪽해역으로 0.002Bq/L 의 농도분포를 보였으며, 0.0002Bq/L 의 농도분포가 미국 서부해안에 도달한 것을 나타냈다. 또한 북태평양 북위 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 사이에서는 서쪽으로 이동한 것으로 나타났다. 7년 후의 결과를 보면 0.002Bq/L 이상의 농도분포는 더 이상 나타나지 않았으며, 대체로 북동태평양에서는 0.0002Bq/L 정도의 낮은 농도분포를 보였다. 북태평양 북위 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 사이에서는 5년의 결과와 비슷하게 서쪽으로 이동한 것으로 보이는 농도분포가 나타났다. 따라서 수치모델의 결과를 보면 일본 후쿠시마 원자력 발전소에서 해양으로 누출된 방사성물질은 우리나라에 영향을 주지 않는 것으로 생각되나, 수치모델에서 한 격자 간격의 공간해상도가 경위도로 약 $200\text{km} \times 220\text{km}$ 정도로 공간 세밀하지 못한 편이기 때문에 좀 더 정밀한 영향을 보려면 공간 해상도가 높은 수치모델의 결과가 필요하다.



<그림 7> 137Cs 농도 확산 분포 예측도 (좌상부터 1년후, 3년후, 5년후 및 7년후 분포)

5. 방사성 물질의 생물축적(세슘과 플루토늄)

해수 중으로 유입된 방사성 물질은 해류를 따라 이동도 하지만, 해양에 살고 있는 생물체에 농축될 수 있는 가능성이 있다. 육상생태계와 마찬가지로 해양생태계에서도 먹이사슬이 존재하며, 해양생태계의 먹이사슬은 식물플랑크톤에서 동물플랑크톤으로, 동물플랑크톤에서 소형어류(고등어, 꽂치, 오징어 등), 소형어류에서 대형 어류 및 포유류(참치 및 돌고래)로 연결된다. 해양생태계에서 먹이사슬을 거치면서 상위 영양단계로 올라갈수록 방사성 물질의 생물축적이 발생할 수 있다(Heldal, *et. al.*, 2003).

지금까지 우리나라 해역에서 채취한 해양생물 시료에 대해 한국원자력안전기술원에서 분석한 결과를 보면 인공적인 방사성 물질은 검출되지 않고 있다(한국원자력안전기술원, 2010). 그러나 Heldal, *et. al.*, (2003)에 의하면 바렌츠해와 노르웨이 해역에서 세슘 137Cs의 생물농축은 먹이생물인 단각류와 난바다곤쟁이류에서 0.03~0.06 Bq/kg인 반면, 청어, 고등어, 대구에서는 0.16~0.22 Bq/kg로 약 5배 정도 체내농축이 나타났으며, 최상위포식자인 돌고래류에서는 0.50 Bq/kg로 먹이생물에 비해 약 11배 정도 높게 나타났음을 알 수 있다. 세슘의 생물축적 농도는 낮은 수준이지만, 세슘의 생물축적은 해양 생태계에서 먹이망의 상위단계로 갈수록 뚜렷하게 나타나고 있으며, 해수 중 세슘 농도 증가에 따라 생물 체내에 축적된 양도 높아지고 있다.

발틱해에서 플루토늄(²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu)의 생물농축에 대한 Sakwarzec, *et. al.*,(2001)결과를 보면는 대구에서 2.35 mBq/kg인 반면, 대구의 먹이가 되는 sprat(작은 청어과 어류)에서는 0.33 mBq/kg로 먹

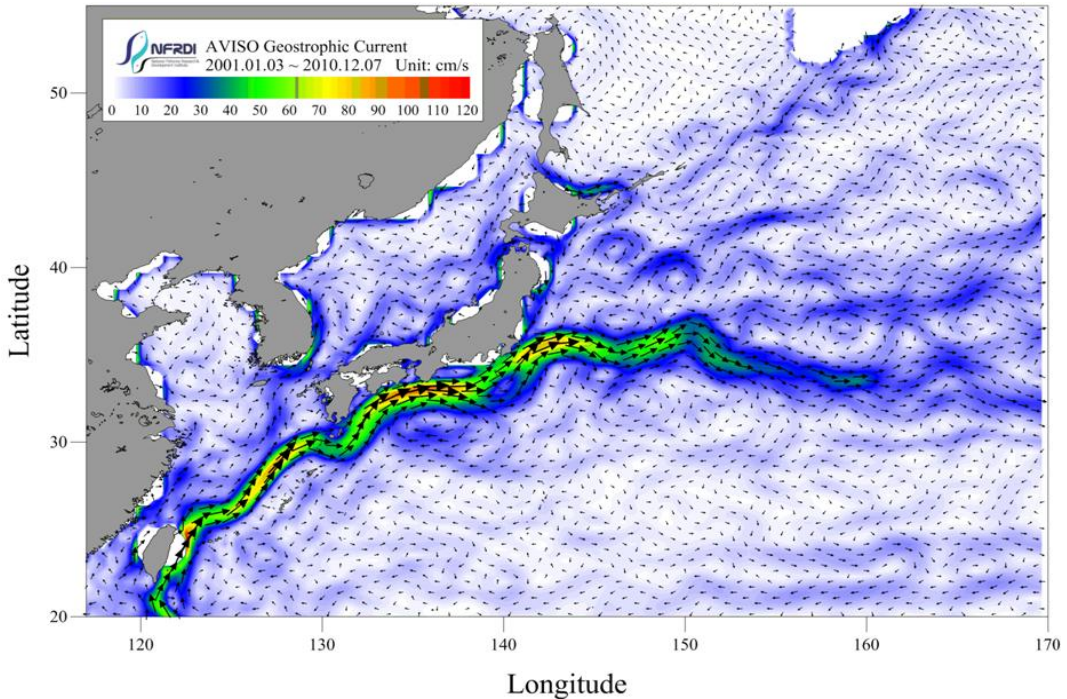
이사슬의 상위에 위치한 대구에서 약 7배 이상의 생물농축이 나타나고 있다. 1986년 발생한 체르노빌 원전 사고에 의해 발생한 플루토늄에 의한 생물축적이 10년이 지난 1997년 조사에서도 지속적으로 측정되고 있으며, 상위먹이단계로 갈수록 생물축적이 높게 나타나고 있다.

III. 인공위성자료의 실시간 활용

1. 인공위성을 사용한 해류 측정

해수 중으로 유입된 방사성물질의 이동 및 확산과 관련하여 해수의 흐름인 해류는 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 지금까지 방사성 물질의 이동 및 확산과 관련된 해류의 추정에 대해서는 수치모델을 수행한 후 그 결과의 제시를 통해서 이루어져 왔다. 수치모델의 경우 컴퓨터를 사용해서 일련의 물리방정식을 푸는 것이기 때문에 미래의 현상을 예측하는 부분에 있어서는 좋은 방법이 될 수 있으나, 현재의 상태를 구현하는 부분에 대해서는 시간이 다소 걸린다는 단점이 있다. 따라서 인공위성의 관측자료를 이용하여 준 실시간적으로 해류벡터 자료를 구하는 방법도 하나의 대안이 될 수 있다.

위성에서 관측한 자료 중 수온자료를 이용한 형태추적 방법(Feature Tracking Method)을 사용하여 해류를 구하는 방법을 사용하였으며(Hatakeyama, 1985), 김과 노(2000)는 위성에서 관측된 연속 표면 수온 자료에 대해 최대상관법을 적용하여 형태추적 방법에 대한 오차를 줄이는 시도를 하였다. 최근에는 해수면의 높이를 측정하는 위성자료를 사용하여 두 지점간의 높이 차이를 이용하여 해류를 구하는 방법도 사용되고 있다. <그림 8>은 2001년부터 2010년까지의 프랑스 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data)에서 제공하는 위성자료를 근거로 해수면 높이 차이를 사용해서 구한 북서태평양 해역의 해류벡터 모식도이다. 북서태평양 남쪽에서 유입되어 일본열도를 따라 북상하다 동쪽으로 흐르는 쿠로시오 해류가 비교적 잘 나타나 있으며, 일본 남동부 해역에서 형성된 냉수성 소용돌이의 흐름도 잘 나타나 있다.



<그림 8> 인공위성관측 해면고도차 자료를 이용한 북서태평양 해역의 해류벡터

IV. 결론

2011년 3월에 발생한 일본 도호쿠지방의 강한 지진은 일본뿐 만 아니라 우리에게 직접 및 간접영향과 경제 및 안정상의 문제로 위기관리 의식을 높혀주었다. 해저에서 발생한 지진으로 인해 일본 도호쿠지방은 지진 피해는 물론 2차로 발생한 쓰나미에 의해 피해가 많이 발생했다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 이번 지진과 쓰나미로 인해 원자력발전소에 문제가 발생했다는 것이며, 이로 인해 방사성 물질이 누출되었다는 것이다. 방사성 물질은 해류를 따라 태평양을 순환하게 되며, 생물에 축적될 수 있음을 알 수 있다. 다행히도 우리나라는 일본에서 누출된 방사성 물질이 직접적으로 유입되지 않기 때문에 단기적으로는 영향을 받지 않으리라 생각되지만, 장기적으로는 우리해역 해양생물의 안정상의 문제로 계속 모니터링을 할 필요가 있다.

또한 대만뿐 만 아니라 중국의 경제발전으로 인해 중국 연안역에 원자력발전소가 건설되고 있는데, 만약 중국에서 원자력발전소의 사고 발생 시 우리나라에 어떤 영향을 미칠 수 있는지를 사전에 파악할 필요가 있으리라 생각된다. 이를 위해 북서 태평양에 대한 보다 정밀한 해류분석 작업이 선행되어야 하며, 분석된 해류벡터에 대한 데이터베이스를 구축하여 사고 발생 시 방사성 물질이 어떤 경로로 유입되어 이동 확산되는지 신속하게 판단할 수 있어야 하겠다. 또한 지속적인 해양생물의 회유

(migration)와 생물농축(bio-accumulate)에 대한 분석을 통해 자연환경상태에서의 방사성 물질에 대한 농도를 측정하면, 사고 발생 시 얼마나 많은 양이 농축되는 지를 파악하게 쉬울 뿐만 아니라 오염해역을 빨리 알게 되기 때문에 먹거리에 대한 안정성 검증 차원에서 중요하다고 할 수 있다.

이를 위해서는, 한국근해역의 현장에서 해수의 채취 등 직접적인 해양조사 체제구축과 해류의 흐름을 준 실시간적으로 표출할 수 있는 위성 모니터링 기술체제 및 해양 해류예측 모델 구축을 통해 해양에서 방사능 오염 물질의 이동과 확산에 대한 위기관리시스템 구축이 본 연구의 결과를 토대로 제대로 정비될 수 있어야 하겠다. 특히 국립수산과학원에서 수행하는 한국근해 정선해양관측조사(NSO; Network of Serial Oceanographic Observations), 실시간 위성(NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration, MODIS; Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer 등) 관측자료를 수신하는 해양위성원격탐사시스템, 한국원자력안전기술원, 농림수산물부 검역검사본부, 기상청 등 국내 해양관측 기관들 간에 구체적인 대응 시나리오 하에 유기적 시스템이 작동될 수 있어야 한다.

참고문헌

- 김응, 노영재. 2000. 연속 위성화상자료상의 향상된 형태추적법을 이용한 유속추정기법. 대한원격탐사학회, 16(3): 199-209.
- 일본 문부과학성. 2011. 미야기현, 후쿠시마현, 이바라기현 근해의 해역모니터링 결과. 1-2.
- 일본 동경전력. 2011. 동경전력주식회사 후쿠시마 제1원자력발전소 주변의 해수 중의 방사능 농도분포. 1-2.
- 한국원자력안전기술원. 2008. 해양환경방사능조사. 대전: 한국원자력안전기술원.
- 한국원자력안전기술원. 2009. 해양환경방사능조사. 대전: 한국원자력안전기술원.
- 한국원자력안전기술원. 2010. 해양환경방사능조사. 대전: 한국원자력안전기술원.
- Ebuchi N. and K. Hanawa. 2001. Trajectory of Mesoscale Eddies in the Kuroshio Recirculation Region. *J. Oceanogr.* 57: 471-480.
- Hatakeyama Y., S. Tanaka, T. Sugimura and T. Nishimura. 1985. Surface currents around Hokkaido in the Late Fall of 1981 Obtained from Analysis of Satellite Images, *Oceanogr. Society of Japan* 41: 327-338.
- H. E. Heldal, L. Foy, P. Varskog. 2003. Bioaccumulation of ^{137}Cs in Pelagic Food Webs in the Norwegian and Barents Seas. *J. Environ. Radioact.* 65: 177-185.
- McNally, G. J., W. C. Patzert, A. D. Kirwan, Jr., and A. C. Vastano. 1983. The Near-surface Circulation of the North Pacific Using Satellite Tracked Drifting Buoys. *J. Geophys. Res.* 88: 7507-7518.

Pond S. and G. L. Pickard. 1983. *Introductory Dynamical Oceanography*. England: Pergamon Press Ltd.

Skwarzec, B., D. I. Struminska, A. Borylo. 2001. Bioaccumulation and Distribution of Plutonium in Fish from Gdansk Bay. *J. Environ. Radioact.* 55: 167-178.

Stewart, R. H. 2006. *Introduction To Physical Oceanography*. Texas A&M University.

徐榮祥: 부경대학교에서 이학박사학위를 취득하고(논문: 위성원격탐사에 의한 한반도 근해의 해양학적 특성, 2001), 현재 국립수산물품질관리원 수산해양종합정보과 과장으로 재직 중이다. 주요관심분야는 위성원격탐사(해양변동모니터링), 기후변화(해양기후변화와 수산자원변동) 등이다. 전문분야연구로 2011년 국토해양부의 “우리나라 해양생태계기반조사”, “해양생물표본조사사업”과 국립수산물품질관리원의 “수산업의 기후변화에 대한 영향연구 및 대응전략” 과제의 총괄책임을 맡고 있다. 최근에는 “기후변화와 해양생태계변동(2010)”, “해양정보관리(2010)”, “해양환경공학(2009)”, “서해(2010) 등 저서를 발간하였다. 해양 및 수산학회 등 학회에 65편 이상의 연구 논문을 게재하였다 (Simulation of Snowstorm over the Yellow Sea Using a Mesoscale Coupled Model, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 46(4), 437-452(2010), Year-to year and inter-decadal fluctuations in abundance of pelagic fish populations in relation to climate-induced ocean conditions, *J. Ecol. Field. Biol.*, 31(1): 45-67(2010)(ysshuh@nfrdi.go.kr).

黃才東: 부경대학교에서 이학박사학위를 2004년 취득(논문: 수치모델을 이용한 동중국해역에서의 저염분수 거동에 관한 연구)하였으며, 현재 국립수산물품질관리원 수산해양종합정보과에 근무 중이다. 주요 분야는 침단위성 해양정보 활용 시스템 운영을 통한 특이 해양정보 제공 및 한반도 인근해역의 해양변동 파악 및 예측 등이 있다. 장기관측된 자료를 이용해 우리나라 주변해역의 기후변동분석 등을 해양환경안전학회지 등에 게재하였다 (jdlhwang@nfrdi.go.kr).

韓仁盛: 일본 나가사키대학에서 이학박사 학위를 취득하고 (논문: Short Time Scale Water Exchange Processes between the Kuroshio and the Shelf Water in the East China Sea), 현재 국립수산물품질관리원 수산해양종합정보과 해양수산연구사로 재직 중이다. 주요 관심분야는 기후변화(해양변동, 적응대책), 위기관리(해양오염, 해양방재) 등이며, 전문분야 연구로 “해양수산분야 기후변화 적응 연구”를 통하여 농림수산식품부 등 국내의 “농림수산식품 및 해양분야 기후변화 적응대책”을 수립하고, 관련 저서 및 정책자료를 완성하였고 “기후변화와 해양생태계(2010)”의 저서를 발간하였고, 일본해양학회에 “Heat supply of Tsushima Warm Current in the East Sea (2003)” 및 “Spatiotemporal Characteristics of Interannual Temperature Variations in the Tsushima Strait (2010)” 등을 발표하였다(hanis@nfrdi.go.kr).

尹錫賢: 인하대학교에서 이학박사학위를 2004년 취득(논문: 경기만 동물플랑크톤 군집의 시공간적 분포와 요각류의 생산력 연구)하였으며, 현재 국립수산물품질관리원 수산해양종합정보과에서 해양수산연구사로 재직중이다. 주요 관심분야는 하구역 해양생태계 현황 및 변동 파악 연구, 동중국해 해양생태계 변동 및 기후변화에 따른 생태계 장기변동연구 등을 수행하고 있다. 2009년 “생태계가 살아있는 바다 서해-현황과 특성”이라는 서적을 발간하였으며, *Journal of Marine Science(SCI)*에 경기만 요각류의 생산력 연구 결과를 등재하였으며, 이 외에 한국해양학회지 및 해양환경안전학회지 등에 10여 편의 논문을 게재하였다(shyoun@nfrdi.go.kr).

林月愛: 부산대학교에서 이학박사 학위를 취득하고(논문: 한국 남해안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과

정에 관한 연구), 현재 국립수산물과학원 수산해양종합정보과 근무 중이다. 주요관심분야는 적조발생기작 및 적조생물의 생리생태연구 등이며, 전문분야 연구로 "독성플랑크톤 모니터링"을 통하여 국내의 유독성플랑크톤을 모니터링하여 이들이 생태계에 미치는 영향을 연구하고 있다(limwa@korea.kr).

투 고 일: 2011년 11월 03일

수 정 일: 2011년 11월 14일

게재확정일: 2011년 11월 20일

Integrative Crisis Management System for Controlling Radiation Leakage Accidents

Young Sang Suh, Jae Dong Hwang, In Seong Han, Seok Hyun Yoon, Wol Ae Lim

Highly radioactive materials have been released into the ocean at the Fukushima Nuclear Power Plant, following the Tohoku earthquake and tsunami on 11 March 2011. The Japanese leakage accident became one of the most serious global issues. It especially draws concern from Koreans who fear possible direct radiation exposure due to their geographic closeness and distrust Japanese government information on radiation. {According to a report published on 29 October 2011 by a French research institute, the pollution of the Pacific Ocean was probably 30 times bigger than the Tokyo Electric Power Company reported in May 2011.} Radioactive substances usually spread through air and oceans, and can be accumulated in marine life and eventually in human body. To minimize the potential radiation exposures and long-term effects on human health, we propose to design and establish an integrated crisis management system. Under this system, sea water and biological samples will be periodically and extensively collected to detect and identify spatial and ecological pathways of radioactivity. Together with data from satellites, the collected data will be utilized to forecast the magnitude and dispersion of radioactivity by developing a bio-physical coupling model that combines general oceanic circulation and ecological models.

Key words: radioactive substance, crisis management, ocean current, satellite remote sensing, Bio-physical coupling model, biomagnification