Journal of Radiation Industry 8(2) : 123~132(2014)

후쿠시마 사고로 해양으로 누출된 ^{137}Cs에 의한 인체 위해도 평가

민병일 · 이백근 · 서경석 · 박기현*

한국원자력연구원 원자력환경안전연구부

Health Risk Assessment due to ^{137}Cs Released into Ocean from the Severe Accident of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants

Byung Il Min, Baek Gun Lee, Kyung Suk Suh and Kihyun Park*

Nuclear Environmental Safety Research Division,
Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract - After the nuclear accident of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants (FDNPPs) on 11 March 2011, a large amount of radioactive materials has been released into the atmosphere and the ocean. A compartment model is used to evaluate the circulation characteristics and the spatiotemporal concentration distributions of radionuclides in the ocean. In the comparison with observed concentrations of ^{137}Cs in seawater, calculated concentrations by the compartment model were well agreed with them. On the basis of these results, we performed evaluation of the effective dose and the cancer risk. In the early stage of the accident, the effective doses from ingestion of the seafood near the Fukushima region were much higher than 1 mSv which is the value of the annual effective dose limit to individual recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). However, the effective doses by ingestion of the seafood decreased below 1 mSv as distance from the FDNPPs increased and time passed. In addition, it was estimated that the cancer risks by intake of the contaminated marine products were less than natural occurrence probability of cancer. Consequently, it was inferred that the health risk due to the ^{137}Cs was low after since mid-term period of the accident.

Key words : Fukushima accident, Compartment model, Effective dose, Cancer risk, ^{137}Cs

서 론

후쿠시마 원전 사고로 해양으로 누출된 방사성물질에 의해 인근 해역이 크게 오염되었다. 해양 오염은 주로 방사성물질로 오염된 냉각수가 바다로 직접 방출되거나, 대기 중으로 누출된 방사성물질이 태평양 방향으로 이동하면서 해수면에 침적하면서 발생하였다. 한편으로는 일부 육지에 침적된 방사성물질이 강수에 의해 지표수나 지하수를 통해 유입되기도 하였다. 전체적으로는 사

* Corresponding author: Kihyun Park, Tel. +82-42-868-2606, Fax. +82-42-868-8942, E-mail. khpark77@kaeri.re.kr

고 초기 2011년 3월 12일~22일까지는 대기 침적에 의한 해양오염의 영향이 더 컸으리라 추정되지만, 2011년 3월 중순부터 원전으로부터 오염수가 해양으로 직접 방출된 데 따른 영향이 두드러졌다. 방사능 오염수는 3월 21일 발전소 부근 연안에서 처음 관측되었고, 3월 25일~30일 사이에는 인근 해역에서 ^{131}I과 ^{137}Cs의 농도가 높게 측정되었을 뿐만 아니라 계속 증가하였다. 오염수의 직접적인 해양 누출은 대부분 지진에 의해 발생한 구조물의 균열이나 부주의 때문이었다.

후쿠시마 원전 사고 초기에는 대기 중으로 누출된 방사성핵종 호흡에 의한 내부흡입 (inhalation), 지상퇴적에 의한 외부노출 (groundshine), 공기 중 방사성물질에 의한 외부노출 (cloudshine)에 주로 영향을 받았다. 이후 해양 및 육상으로 확산된 방사성핵종의 침적에 의하여 생태계 먹이사슬을 통한 방사성핵종의 내부섭취 (ingestion)가 중요한 영향을 미쳤다 (WHO 2012, 2013).

본 연구에서는 해양으로 누출된 방사성물질이 수산물 섭취를 통해 인간에 주는 영향을 평가하기 위하여 해류 특성 분석과 구획 모델링 연구를 수행하여 그 영향을 분석하고 평가하였다. 현재에도 태평양 방향으로 확산되면서 해양 생태계에 영향을 줄 수 있는 ^{137}Cs (반감기 30년)을 선정하였다 (Buesseler 2012).

일부 지역에서 관측된 자료를 바탕으로 구획모델을 이용하여 산정한 2011년~2013년까지의 ^{137}Cs의 해수농도를 이용하여 해산물 섭취로 인한 유효선량 및 암발생률을 평가하였다. 추정한 유효선량을 일반인 연간 개인선량한도 값과 비교하였으며 암 위해도 평가는 유효선량에 시버트 (Sv)당 암발생률을 곱해줌으로써 추정하였다.

유효선량평가는 외부피폭과 내부피폭을 모두 고려해야 하지만 본 논문에서는 오염된 수산물 섭취로 인한 내부피폭에 대해서만 평가하였고 보수적인 해석을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 해양 순환 특성

후쿠시마 원전 사고 후 해양으로 누출된 방사성물질의 확산특성을 평가하기 위하여 다수의 연구가 진행되었는데 (Kawamura *et al*. 2011; Estournel *et al*. 2013; Min *et al*. 2013), 방사성물질은 후쿠시마 주변 해역에서 북쪽에서 내려오는 오야시오 해류와 남쪽에서 진행하는 쿠로시오 해류가 동경만 부근에서 합류되어 태평양 방향으로 이동한다 (Fig. 1).

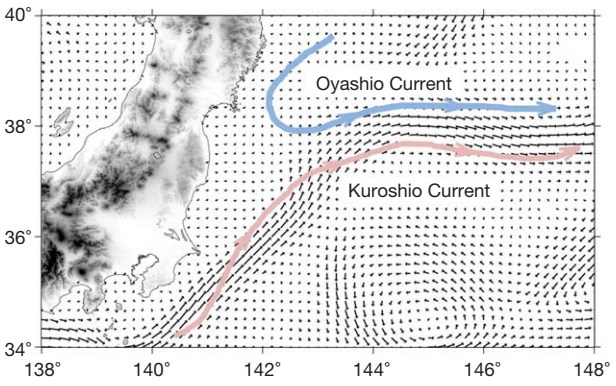

Fig. 1. Schematic diagram of ocean currents near the coastal area of the Fukushima.

후쿠시마 해역의 순환 해석은 일본 해양연구원의 Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2 (JCOPE2)와 미국 National Ocean Partership Program에서 제공하는 HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)의 해류자료가 일반적으로 많이 이용되는데, 본 연구에서는 일본의 JCOPE2 자료를 이용하여 해역의 유동 특성을 분석하였다. JCOPE2 순환자료 (Miyazawa *et al*. 2009)는 수평분해능 약 9 km, 수직으로 23개의 연직층을 구성하여 매일 해류자료를 생산하고 있다. Fig. 2에 2011년 3월 12일부터 5월 말까지 JCOPE2의 해양 순환자료를 나타내었다. 2011년 3월 12일에는 후쿠시마 원전 남쪽방향에 뚜렷한 쿠로시오 해류가, 북쪽에서 남향하는 약한 오야시오 해류가 보인다. 3월 26일의 해류도를 살펴보면 원전의 동쪽방향에 반시계 방향의 와류가 나타난다. 후쿠시마 주변 해역의 해류도를 분석하여 보면 후쿠시마에서 누출된 방사성물질은 남쪽을 향하는 약한 오야시오 해류에 의하여 남쪽방향으로 이동한 후 상대적으로 흐름이 큰 쿠로시오 해류를 만나 태평양 방향으로 이동함을 추론 할 수 있다.

2. 구획모델

구획모델 (compartment model)은 시스템 (호수, 하천, 해양 등) 내의 미리 구분된 각 구획 간에 물질 또는 에너지의 수송을 설명하기 위한 수학적인 모델이다. 이 모델은 다음과 같은 가정을 가지고 있다. 1) 각 구획에 들어온 물질 또는 에너지는 순간적으로 구획 전체에 잘 혼합된다. 2) 각 구획은 시간의 흐름에 따른 부피 변화가 없다. 3) 물질 또는 에너지의 교환율은 각 구획의 농도에 상대적이다.

하나의 구획모델을 단순화하면 Fig. 3과 같다. 하나의 구획에는 물질 또는 에너지의 출입 링크와 구획 내부의 농도, 부피 등이 정의 된다. 구획 내부의 계산 변수는 다

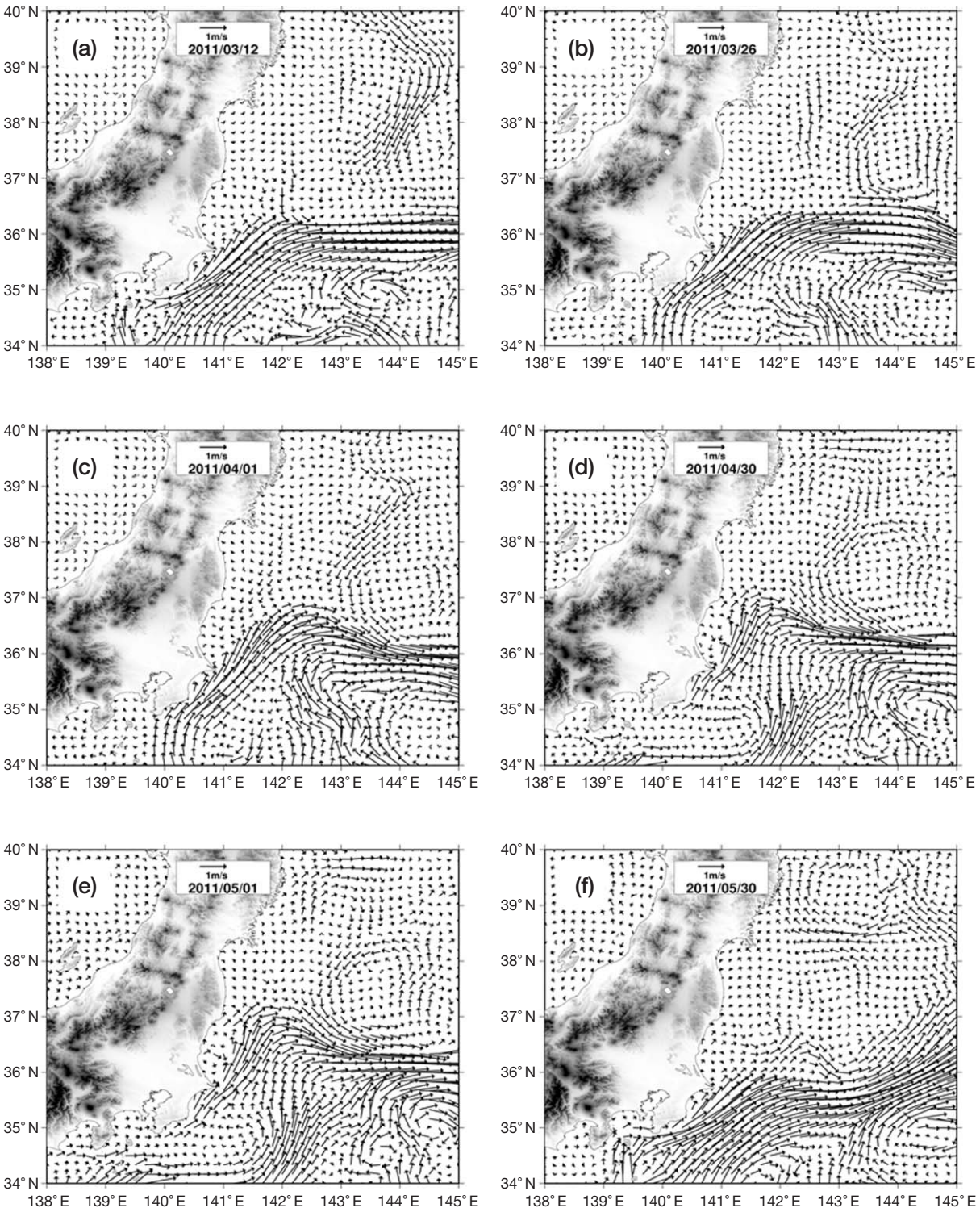

Fig. 2. Daily averaged oceanic current fields near the Fukushima coastal area, produced by the JCOPE2 model from March 12 to May 30, 2011.

음과 같이 수학적으로 표현이 가능하다.

$$
\begin{aligned}
C_1 &= (C_1 V_1 k_{11} + C_2 V_2 k_{12} + \ldots + C_n V_n k_{1n} + S_{in})/V_1 \\
C_2 &= (C_1 V_1 k_{21} + C_2 V_2 k_{22} + \ldots + C_n V_n k_{2n})/V_2 \\
&\vdots \\
C_n &= (C_1 V_1 k_{n1} + C_2 V_2 k_{n2} + \ldots + C_n V_n k_{nn} + S_{out})/V_n
\end{aligned} \tag{1}
$$

여기서 C는 각 구획내의 농도, V는 체적, S_{in}는 구획내 유입되는 선원항, S_{out}은 구획을 빠져나가는 방출량이고, k는 각 구획간의 링크(link)를 따르는 전달 계수에 해당한다. 전달 계수를 좀더 상세화하면, 유속에 의한 이송, 난류에 의한 확산, 체류 시간 등의 함수로 표현이 가능하게 되지만, 본 논문에서는 단순하게 구획간의 전달 계수 형태로만 적용하며, 이는 시간에 따라 변화가 없는 것으로 가정한다. 이송, 확산의 경우 계절별, 외력의 유무에 따라 크게 바뀔 수 있지만, 2011년 3월부터 2014년 3월까지 이러한 시간에 따른 전달 계수의 변화는 크지 않다고 가정하고 구획모델을 정의하였다.

Fig. 4에 후쿠시마 원전 반경 20 km 내측을 5개의 구획(a, b, c, d, e로 명칭)과 함께 각 구획에 위치한 관측위치를 표기하였다. 각 구획과 관측자료는 전달 계수의 선정을 위해 사용되었다.

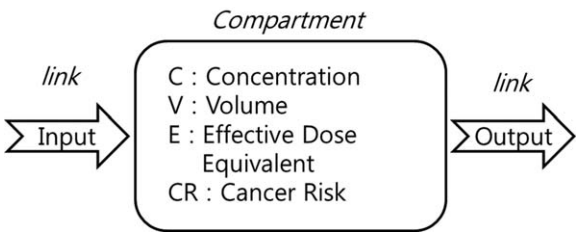

Fig. 3. Scheme of the compartment model.

3. 연간 유효선량 및 암발생률 평가

해산물 섭취에 의한 연간 유효선량은 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며 (WHO 2012)

$$E_i^{ing} = \sum_f F_f \sum_m A_m C_{mf} de_{mi}^{ing} \quad (2)$$

여기서, m은 퇴적 (침적)된 방사능 핵종의 수, f는 음식군의 수, F_f는 연간음식섭취량 (kg year^{-1}), A_m은 해수의 방사성핵종농도 (Bq kg^{-1} or Bq m^{-3}), C_{mf}는 방사성핵종별 농축계수 (무차원), 그리고 de_{mi}^{ing}은 유효섭취선량계수 (Sv Bq^{-1})이다.

수산물 연간 섭취량은 세계보건기구 (World Health Organization; WHO)의 자료에 근거하여 2012년 성인을 기준으로 29.2 kg을 본 논문에서 사용하였다 (WHO 2006, 2012). 그리고, 해수중 ^{137}Cs의 농도는 일본 문부과학성 (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology; MEXT)과 동경전력 (Tokyo Electric Power Company; TEPCO)의 자료를 이용하였다.

Table 1. Concentration factors for some marine products recommended by the IAEA (IAEA 2004)

Nuclide	Fish	Molluscs	Macroalgae
^{137}Cs	100	60	50

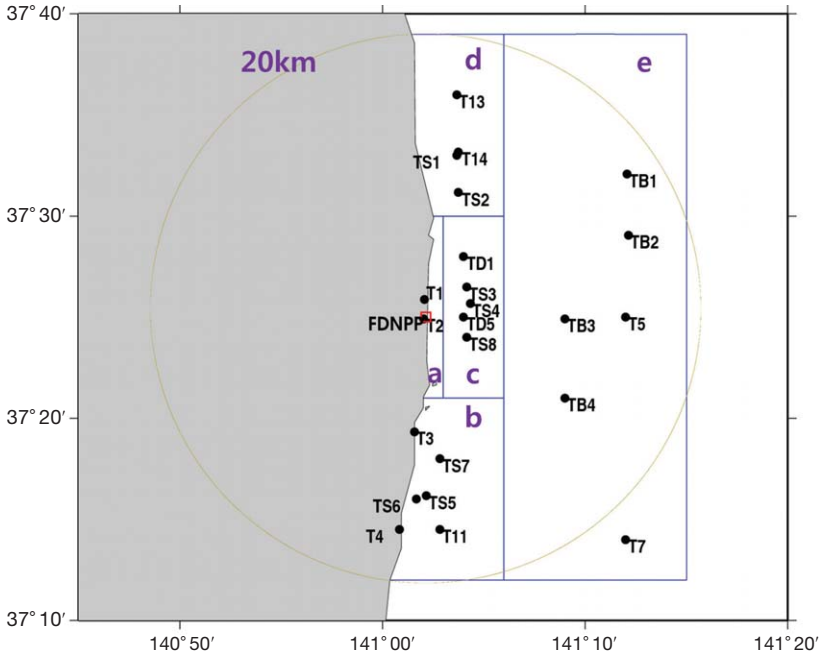

Fig. 4. Partitions of compartments and locations of observation sites, within a radius of 20 km from the FDNPP. Small red rectangle indicates the location of the FDNPP.

Table 2. Effective dose coefficients (*de*) for ingestion of ^{137}Cs for members of the public recommended by the ICRP (ICRP 2012)

Age	Infant	1 year	5 years	10 years	15 years	Adult
de (Sv Bq^{-1})	2.1×10^{-8}	1.2×10^{-8}	9.6×10^{-9}	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.3×10^{-8}

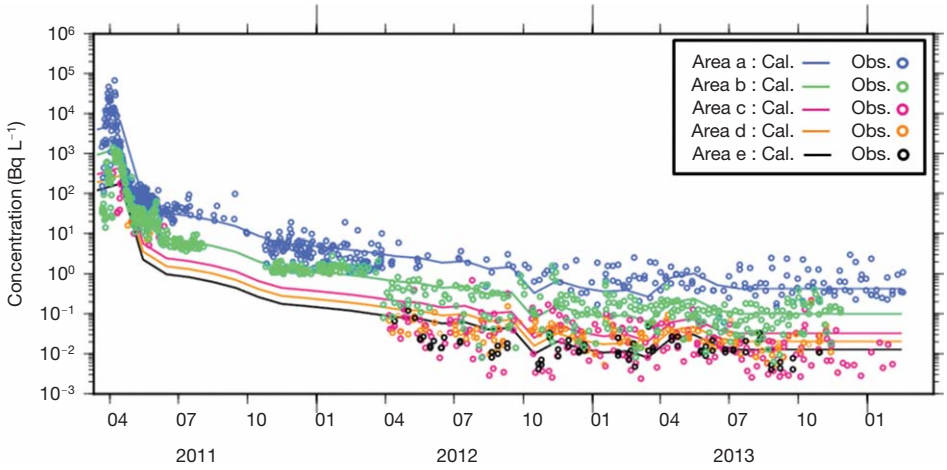

Fig. 5. Comparison of calculated seawater concentrations of ^{137}Cs with observed values within a radius of 20 km from the FDNPP.

농축계수는 식 (3)과 같이 나타내며 무차원이고 해수의 농도를 체적단위로 나타낼 때는 L kg^{-1}의 단위를 가진다 (IAEA 2004).

$$\text{CF (무차원)} = \frac{\text{유기체의 단위질량당 농도 (kg kg}^{-1}\text{ or Bq kg}^{-1}\text{, 습윤 질량)}}{\text{해수의 단위질량당 농도 (kg kg}^{-1}\text{ or Bq kg}^{-1}\text{)}} \quad (3)$$

본 논문에서는 Table 1에 주어진 국제원자력기구의 권고값을 사용하였다 (IAEA 2004).

유효섭취선량계수는 Table 2에 주어진 것처럼 국제방사선방호위원회에서 제시한 일반인에 대한 연령별 선량계수를 이용하였다 (ICRP 2012). 본 연구에서는 성인을 기준으로 유효선량을 평가하였는데, 암발생률은 유효선량 1 Sv당 5% 정도로 1 mSv일 때는 0.05%에 해당하며 (ICRP 2007), 10,000명당 암 발생수는 0.5건에 해당한다.

결과 및 논의

1. 구획모델 적용 및 결과

후쿠시마 원전 반경 20 km 내측 구역 (Fig. 4)은 발전소 인근에서 오야시오와 쿠로시오 해류가 만나 발전소 동남측 해상에서 시계방향의 큰 와류를 형성하며, 연안을 따라 남측으로 이동하다가 다시 발전소 북측으로 흐름이 치우치다가 동쪽 태평양을 향해 흐름이 뻗어나가게 된다. 따라서 관측자료의 농도 분포를 보게 되면 발전소 인근이 가장 높으며, 그다음 남측, 북측, 동측 순으로 농도가 확산되어 점점 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 본 논문에서 구획을 나눌때도 이러한 공간적인 흐름을 고려하여, 구획을 구분하였으며, Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 공간적인 농도 분포의 경사와 계산된 농도가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

후쿠시마 원자력 발전소 20 km 내측의 경우에는 최대 수심 분포가 150 m 정도를 보이고 있다. 각 구획의 부피는 General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) 30초 간격 격자 수심을 사용하여 산출하였다. 구획별 ^{137}Cs 농도를 평가하기 위한 교환율 산정은 2012년 10월부터 2013년 1월 사이의 관측농도를 기반으로 평가되었다. 이 기간은 관측자료의 최소 관측치 정확도가 높아진 2012년 4월 이후이며, 관측 농도의 분포가 구획별 매우 균질하다. 산정된 교환율은 2011년 3월부터 2014년 3월까지 적용되어 전체적으로 관측자료와 계산 결과가 비교되어 있다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 계산 결과는 관측자료와 잘 일치하고 있다.

구획을 나눈 5개의 영역은 c 구역을 제외하면 전체적으로 농도의 경사가 완만하게 보이며, 이 농도의 경사는 2011년 3월 초기 사고 발생시부터 현재까지 지속적으로 유지되고 있다. 계산을 위한 방출량은 한국원자력연구원의 '후쿠시마 사고의 환경 및 보건영향 평가' 기술보고

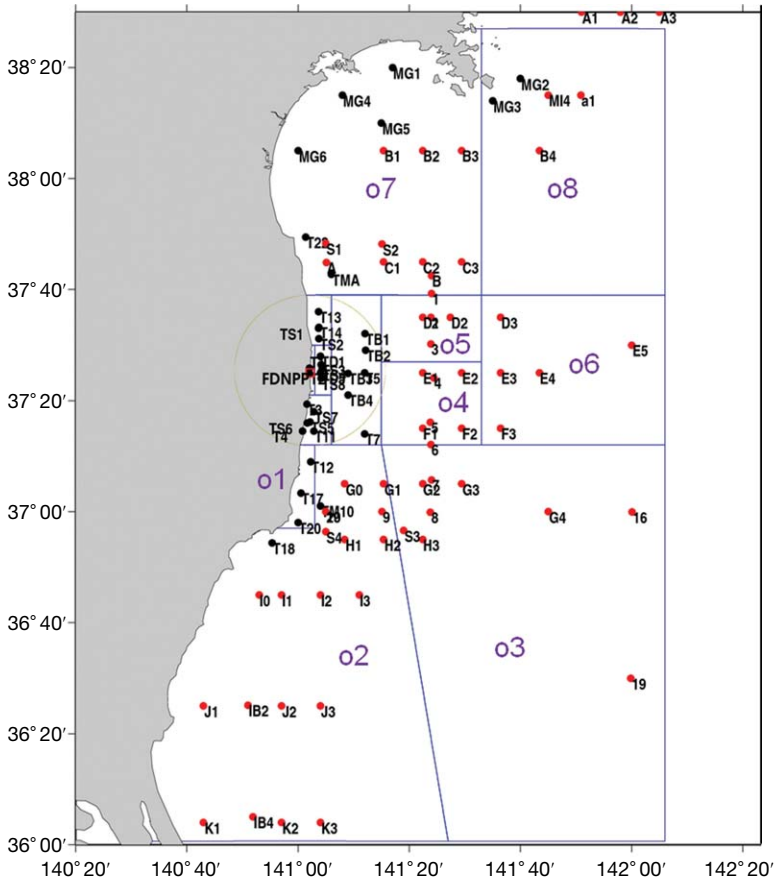

Fig. 6. Compartments and observation-site locations of outer sea of 20 km radius from the FDNPP. Location of the FDNPP is designated by small red rectangle.

서에서 평가된 ^{137}Cs의 방출항을 적용하였다 (한국원자력연구원 2013). 이 보고서에도 서술되어 있지만, 사고초기의 방사성물질의 해양누출로 인한 해수중 농도 경사와 현재 (2014년 3월)까지 관측된 해수중의 농도 경사는 공간적으로 아주 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 여전히 매우 적은 양이지만 지속적으로 확인되지 않은 경로를 통해 방사성물질이 배출되고 있다는 것을 추론할 수 있다.

구획모델을 이용하여 유효선량을 평가하기 위해 해양에서의 ^{137}Cs의 평균농도를 산정하였다. 이 구획모델로 구획 c, d, e와 같이 사건 초기 (2011년 3월～2012년 4월) 농도를 관측하지 못한 구역에 대해서도 시간적으로 연속적인 유효선량을 평가할수 있으며, 관측자료의 시간적 밀도가 높지 않아 평균적인 농도의 신뢰도가 낮은 단점을 해소할 수 있다.

Fig. 6은 후쿠시마 반경 20 km 외측의 관측자료를 기반으로 구획을 나눈 경계와 구획내의 관측 위치를 보여준다. 동경전력에서 관측한 자료의 경우 'T'로 시작하게 되며 이중 미야기현 근처의 관측자료는 'MG'라고 명시되어 있다. 일본 문부과학성에서 관측한 자료의 경우는 붉은색 원형 심볼로 표기하였다.

후쿠시마 원전 반경 20 km 외측의 경우는 관측자료가 관측 사이트당 월 1개를 유지하는 곳이 거의 없다. 따라서 각각의 관측 사이트로부터 특성을 분석하기란 매우 어려운 작업이 된다. 구획 모델의 계산에 있어서, 교환율만을 고려하기 때문에 체류시간과 같은 시간의 흐름에 따른 영향을 반영하기가 어렵다. 따라서 원전으로부터 거리가 먼 o2, o3, o6, o7, o8 등의 경우 이전달의 농도의 일부를 반영하여 계산하였다. 대체적으로 반경 5 km 내 (구획 a, c)의 농도에 비해 1/10～1/100 사이를 보이고 있다 (Fig. 7). 이 중 상대적으로 높은 관측값을 보이는 구역이 o1과 o7으로 연안을 따라 남에서 북으로 흐르는 쿠로시오 해류가 오야시오 해류에 비해 상대적으로 더 강하게 작용하여 북측으로 많은 방사성물질이 이송되는 경향을 보이고 있다.

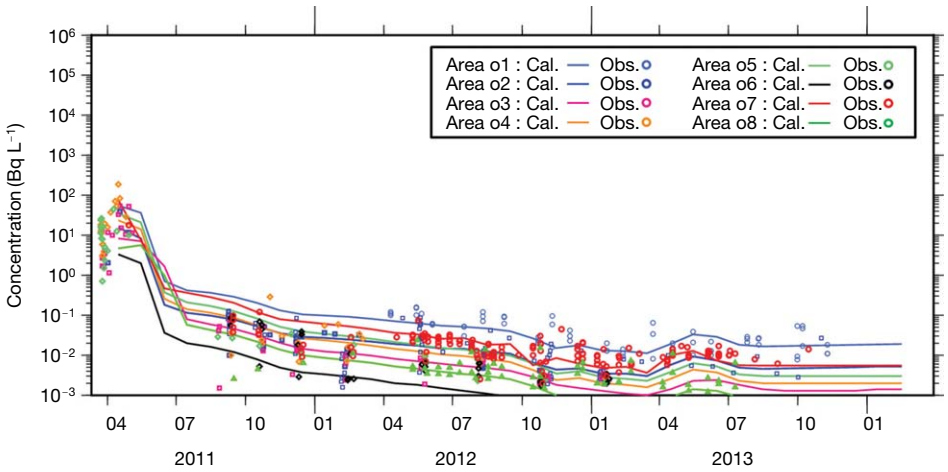

Fig. 7. Calculated oceanic ^{137}Cs concentrations from the compartment model outside 20 km radius from the FDNPP with observed seawater concentrations.

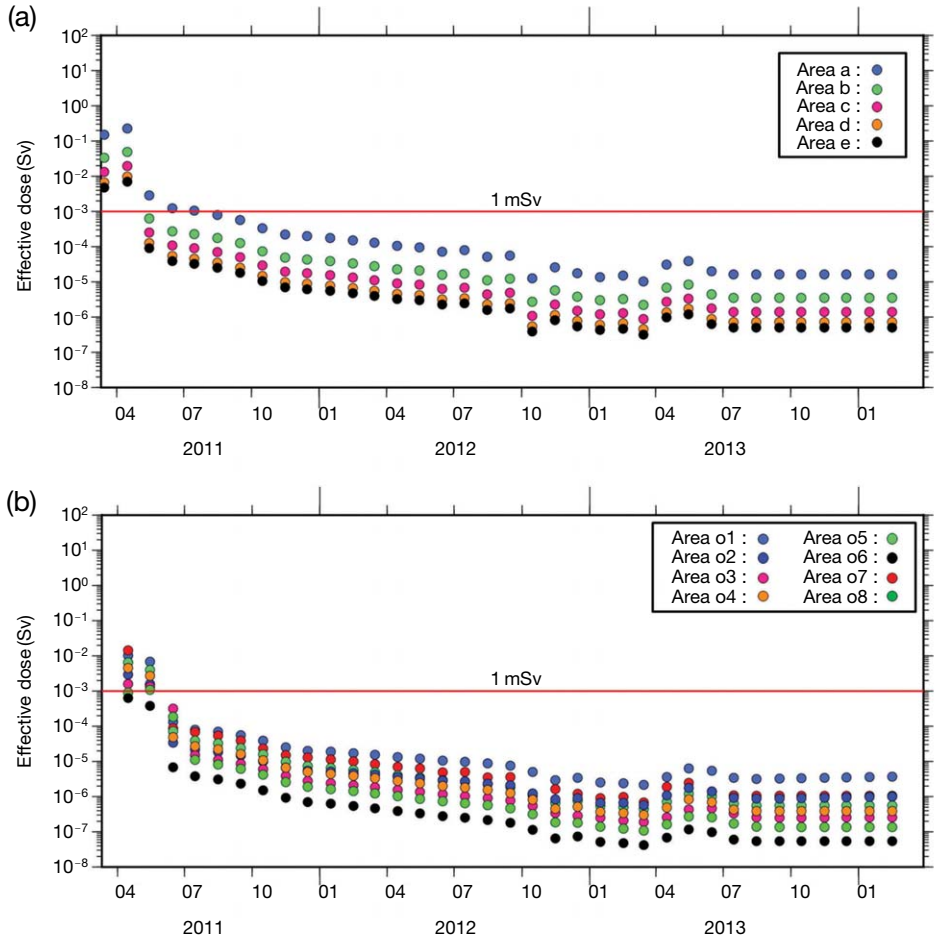

Fig. 8. Effective doses by ingestion of seafoods obtained from the observed seawater ^{137}Cs concentrations (a) within a radius of 20 km from the FDNPP, (b) outer sea of 20 km radius from the FDNPP. Red solid line indicates 1 mSv, the value of the annual effective dose limit to individual recommended by the ICRP.

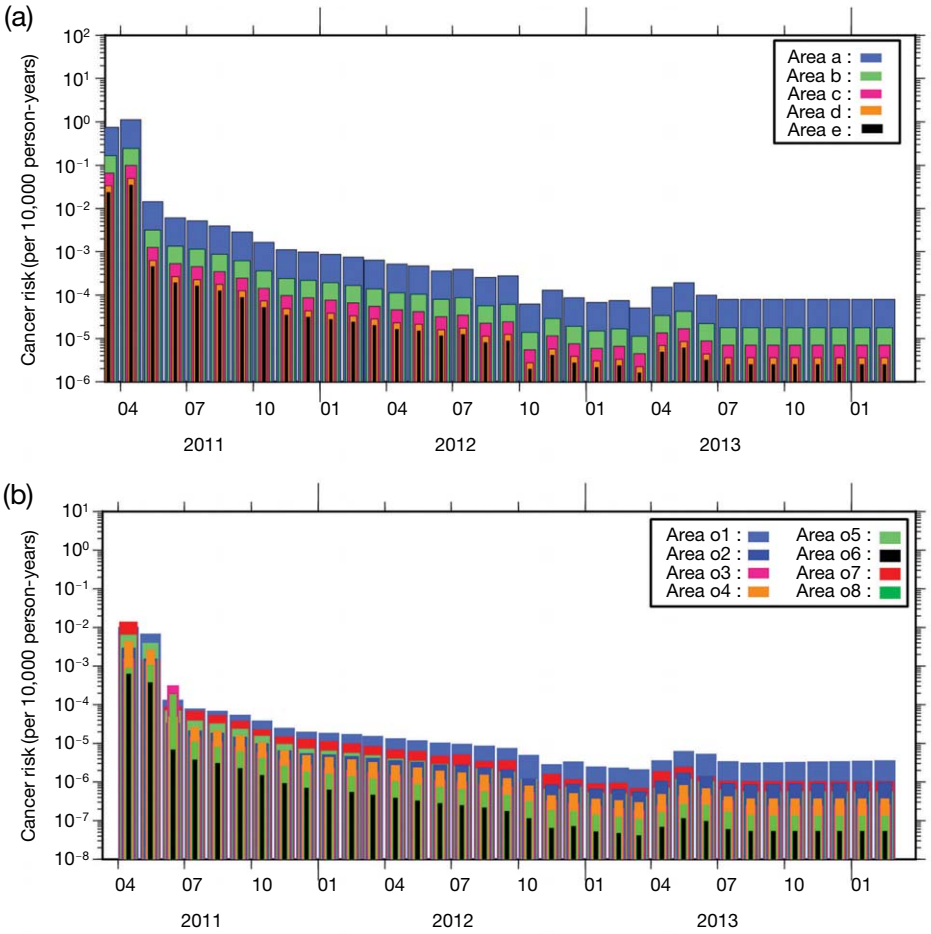

Fig. 9. Evaluated cancer risks from calculated oceanic ^{137}Cs concentrations by the compartment model (a) within a radius of 20 km from the FDNPP, (b) outer sea of 20 km radius from the FDNPP.

2. 유효선량평가 및 구획모델을 이용한 암발생률 산정

일본 문부과학성 및 동경전력에서 2011년 3월~2013년 9월 사이에 조사한 해수중 ^{137}Cs 농도자료를 바탕으로 구획모델을 이용해 유효선량을 평가하였다(Fig. 8). 해수중 ^{137}Cs 농도에 따라 해산물 섭취로 인한 연간 유효선량은 사고 초기인 2011년 3월~2011년 6월 동안 고농도의 ^{137}Cs이 인근 해양으로 누출된 결과 일반인에 대해 국제방사선방호위원회에서 제시한 연간 개인선량한도인 1 mSv를 크게 초과하는 것으로 나타났다. 하지만, 나머지 기간은 1 mSv 이하로 추정되었으며 세계보건기구 보고서(WHO 2012)와 유사한 평가결과를 보인다.

Fig. 9a는 후쿠시마 원전 반경 20 km 내측에서 구획모델을 이용하여 계산된 해수중 농도를 사용해 1 Sv당 5%의 암발생률이 증가한다는 보고(ICRP 2007)를 기반으로 암발생률을 계산한 결과다. 사고 초기(2011년 3월~4월)의 후쿠시마 인근에서 잡은 생선을 먹을 경우 약 0.01% 정도의 암발생 확률이 증가하는 결과를 보인다. 그 외의 지역에서는 0.001% 정도 이하로 대한민국의 자연적인 암발생 확률(2011년 기준, 21만 8천 17건, 전체인구대비 0.4%)보다 매우 낮은 수준이다. 또한 2012년부터는 0.0001%를 보여 이 지역에서 잡힌 수산물 섭취로 인한 암발생률은 자연적인 암발생률에 비해 매우 낮은 수준으로 평가된다.

Fig. 9b는 후쿠시마 원전 반경 20 km 외측의 계산된 해수중 농도를 사용해 암발생률을 계산한 결과다. 사고초기인 2011년 3월과 4월만 o1, o3, o5 구역 등에서 만명당 0.01명의 암발생률(백만명당 1명)을 보이며, 이후로는 약 1억명당 1명~10억명당 1명의 암발생률을 보이고 있다. 현재는 후쿠시마 반경 5 km 내측 지역에서 잡히는 생선을 섭취하더라도 천만명당 1명의 암발생률을 보이며, 그 외의 지역에 대해서는 1억명당 1명 이하의 암발생률을 보이는 것으로 평가된다.

결 론

본 연구에서는 구획모델을 이용하여 후쿠시마 원전사고로 해양으로 누출된 방사성핵종 ^{137}Cs의 확산특성을 분석하고 주변 해역에서 관측한 농도와 비교하였다. 또한 구획모델을 통해 계산된 해수중 농도를 적용해 이 지역에서 잡히는 해산물 섭취를 통한 연간유효선량과 암발생률을 평가하였다.

구획모델을 적용하여 후쿠시마 인근해역의 ^{137}Cs의 해수중 농도를 산정하여 관측자료와 비교한 결과 잘 일치하는 것으로 보이며 시간적으로 연속성을 갖기 어려운 관측자료의 단점을 훌륭히 보완 할 수 있는 수단으로 판단된다.

사고 중반이후 평가된 연간유효선량은 0.01 mSv 정도로 인체에 미치는 위해한 영향은 없는 것으로 생각된다. 암발생률을 평가한 결과 또한 가장 암발생률이 높은 후쿠시마 원자력 발전소 인근 5 km 내의 사고 초기를 기준으로 보수적으로 평가하더라도 자연적인 암발생률에 비해 매우 작은 값을 보였다. 결론적으로, 사고 중기 이후 해산물 섭취로 인한 인체 위해도는 매우 낮은 것으로 평가된다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부와 원자력안전위원회의 재원으로 한국연구재단과 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제번호: 2012M2A8A4025912 및 2012M5A1A1029210).

참 고 문 헌

한국원자력연구원. 2013. 후쿠시마 사고의 환경 및 보건영향 평가. KAERI/TR-5231/2013.

Buesseler KO, Jayne SR, Fisher NS, Rypina II, Baumann H, Baumann Z, Breier CF, Douglass EM, George J, Macdonald AM, Miyamoto H, Nishikawa J, Pike SM and Yoshida S. 2012. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **109**:5984-5988.

Estournel C, Bosc E, Bocquet M, Ulses C, Marsaleix P, Winiarek V, Osvath I, Nguyen C, Duhaut T, Lyard F, Michaud H and Auclair F. 2012. Assessment of the amount of cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *J. Geophys. Res*. **117**:C11014.

GEBCO. The GEBCO_08 Grid, version 20090202. (http://www.gebco.net, accessed 25 May 2014).

IAEA. 2004. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment. Technical Reports Series. No. 422. Vienna. International Atomic Energy Agency.

ICRP. 2006. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimisation of radiological protection - broadening the process. ICRP Publication 101. *Ann. ICRP* **36**(3).

ICRP. 2007. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2/4).

ICRP. 2012. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. *Ann. ICRP* **41**(S1).

IRSN. 2012. Fukushima, one year later - initial analysis of the accident and its consequences. IRSN/DG/2012-003. French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety.

Kawamura H, Kobayashi T, Furuno A, In T, Ishikawa Y, Nakayama T, Shima S and Awaji T. 2011. Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of I-131 and Cs-137 discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant disaster. *J. Nuc. Sci. Tech.* **48**(11): 1349-1356.

Kobayashi T, Nagai H, Chino M and Kawamura H. 2013. Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. *J. Nuc. Sci. Tech.* **50**(3):255-264.

MAFF. 2014. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries. (http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html, accessed 10 May 2014).

MEXT. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. (http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/276/list-1.html, accessed 10 May 2014).

Min BI, Periáñez R, Kim IG and Suh KS. 2013. Marine dispersion assessment of ^{137}Cs released from the Fukushima nuclear accident. *Mar. Pollut. Bull.* **72**:22-33.

Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, Tamura H, Ambe D, Lee JS, Okuno A, Yoshinari H, Setou T and Komatsu K. 2009. Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *J. Oceanogr.* **65**: 737-756.

TEPCO. Tokyo Electric Power Company. (http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/smp/index-j.html, accessed 10 May 2014).

Tsumume D, Tsubono T, Aoyama M and Hirose K. 2012. Distribution of oceanic Cs-137 from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J. Environ. Radioact.* **111**:100-108.

WHO. 2006. Global environment monitoring system. Food con-

tamination monitoring and assessment programme. GEMS /Food consumption cluster diets. Geneva. World Health Organization. (http://www.who.int/foodsafety/chem/gems /en/index1.html, accessed 13 May 2014).

WHO. 2012. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. Geneva. World Health Organization.

WHO. 2013. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami: based on a preliminary dose estimation. Geneva. World Health Organization.

Manuscript Received: June 16, 2014
Revised: September 30, 2014
Revision Accepted: September 30, 2014