Journal of Radiation Industry 5 (4) : 337~345 (2011)

가축 사료 중 방사성 물질 허용 기준 설정에 관한 연구

이완로 · 지상윤[1] · 김진규 · 이윤종 · 박준철[1] · 문홍길[1] · 이주운*

한국원자력연구원 첨단방사선연구소
[1]농촌진흥청 국립축산과학원

Studies on the Establishment of Tolerance Level of Radioactive Compounds in Livestock Feeds

Wanno Lee, Sang-Yun Ji[1], Jin Kyu Kim, Yun-Jong Lee, Jun Cheol Park[1], Hong Kil Moon[1] and Ju-Woon Lee*

Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute
[1]*National Institute of Animal Science, RDA*

Abstract − **In order to provide an effective preparedness for a nuclear or radiological emergency happening in the domestic or neighborhood countries and to solve the vague fear of the people for the ingestion of radioactive livestock products, the establishment of national guideline level for radionuclides in feed is urgently necessary. This is because it is important to secure the safety and to manage the crisis in the agricultural, fishery and food sector by performing the effective safety control during and after nuclear incident. This study was performed to investigate the report cases of international organizations and foreign countries to set up a domestic control standard for managing radioactive substances that may be contaminated in animal feeds due to the nuclear power plant incident. In addition, an attempt was made to provide a useful reference that can help prepare a domestic control standard, using a coefficient that can consider the transfer into livestock through the intake of radioactive contaminated animal feeds. The standard radioisotopes investigated were confined to radioactive cesium ($^{137+134}$Cs) and iodine (^{131}I). Guideline level for the radionuclides was calculated by using the transfer coefficient factor and the maximum daily intake of animal feed provided by IAEA. For example, the maximum daily intake of animal feed was set as 25 kg d^{-1} for dairy cows, 10 kg d^{-1} for beef cattle, 3.0 kg d^{-1} for pigs and 0.15 kg d^{-1} for chickens. The result values for radioactive cesium were calculated as 8,696 Bq kg^{-1}, 4,545 Bq kg^{-1}, 1,667 Bq kg^{-1} and 2,469 Bq kg^{-1}, respectively. The results for radioactive iodine showed the ranges between 741 Bq kg^{-1} and 76,628 Bq kg^{-1}. These data can be utilized as a scientific reference for the preparation of a crisis management manual for the emergency control due to nuclear power plant accident in Korea and neighboring country. These results will contribute to establish the safe feed management system at national level as manual for responding the radioactive exposure of agricultural products and animal feeds, which are currently not established.**

Key words : Emergency situation of nuclear plant, Livestock feeds, Permitted levels of radionuclides

* Corresponding author: Ju-Woon Lee, Tel. +82-63-570-3204,
Fax. +82-63-570-3207, E-mail. sjwlee@kaeri.re.kr

서 론

2011년 3월 일본 동북부 지방 지진 해일에 이은 후쿠시마 원자력발전소(원전) 사고는 농수축산물과 식품뿐만이 아니라 가축이 이용하는 사료에도 방사성 물질 오염 공포를 자아냈다. 방사성 물질의 특성 상 섭취 후 수 주일에서 평생 동안 생체 내에 축적되게 되는데 가축으로부터 얻는 고기, 유, 란, 뼈 등에서도 발견되어진다(Codex 1989). 이들 방사성 물질의 식품으로의 전이는 자명한 사실이므로 주요 오염원인 사료와 음용수의 관리가 무엇보다 필요하다. 우리나라도 20기의 원전과 1기의 연구용 원자로를 보유하고 있어 방사성 물질 누출에 대한 잠재적인 위험에 노출되어 있다. 일본 후쿠시마 원전 방사성물질 누출 사고에서도 알 수 있듯이 일본산 농수축산물뿐만 아니라 우리나라 농축수산물에도 영향을 끼칠 수 있기 때문에 국내 원전의 안전성과 함께 주변국 원전의 안전성도 고려되어야 한다.

현재 정부는 국가 위기관리 매뉴얼 일제 정비계획에 따라 국내 및 인접국, 또는 교역대상국의 원전 사고 시 다양한 분야에서 방사성 물질 오염에 대한 관리 규정을 마련 중에 있다. 농축수산물 및 사료의 경우는 농림수산식품부에서 관리기준을 마련 중이다. 신선식품이나 가공식품의 부원료에 대한 방사성 물질 관리기준은 국제식품규격위원회(Codex)의 권고 기준과 기존 국내 기준을 준용하여 보완하면 개선된 관리규정을 확립할 수 있으나, 사료의 경우는 국제적으로 현재까지 통일된 기준이 없으며 후쿠시마 사고 후 이에 대한 연구 필요성이 제기되고 있다. 국내의 경우 관련 기준이 전혀 없어 축산물, 양식어류 등 사료 급여로 얻어지는 식량자원에 대한 국가 차원의 기준 제정 및 시행 등 대책 마련이 시급한 실정이다.

식품 등의 방사성 물질의 기준 설정 및 관리기준은 각 국마다 차이가 있지만, 대체적으로 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)와 국제방사선방호위원회(International Committee on Radiation Protection, ICRP)의 연구결과들을 바탕으로 한 권고기준을 준용하고 있다. 특히 ICRP의 권고 기준은 각 분야별 최신 연구 결과들의 검토를 통해 지속적인 개정판을 출판하고 있다.

따라서 본 단보에서는 국내에 아직 설정되어 있지 않은 사료의 방사성 물질 허용 기준 설정을 위한 기초자료를 제공하고자 IAEA, ICRP, Codex 등 국제기구와 외국 관련기관의 기준 등을 비교 분석하고, 가축의 방사능 기준치를 근거하여 전이계수(transfer factor or transfer coefficient)를 활용한 사료의 기준치 설정 방법을 제시하고자 한다.

본 론

1. 식품과 사료에 대한 국제기구 및 제외국의 관련 규정

1) 국제식품규격위원회

국제식품규격위원회(Codex)에서는 세계보건기구(World Health Organization, WHO 등과 공동으로 체르노빌 사고 후 방사능 오염 식품에 대한 국가 간 무역에서 마찰 및 분쟁 시 참고할 수 있는 권고안을 설정하였다(Codex CAC/GL-5, 1989). 2010년에는 국제방사선방호위원회(International Committee on Radiation Protection, ICRP)와 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 최신 자료와 전문가들의 조언을 종합하고 국가들의 의견을 반영하여 20개의 방사성 핵종을 4개 그룹으로 구분하여 식품의 방사능 오염 가이드라인을 개정하였다(Codex stan 193-1995, 1995). Codex에서는 식품을 대상으로 가이드라인을 설정하였으며, 사료 등에 대한 기준은 언급하지 않았지만 사료 등의 방사능 설정 시 기준과 참고자료가 될 수 있다고 사료된다. Table 1에서 Codex 부분은 20여개 핵종 중 방사성 요오드(^{131}I)와 세슘($^{137+134}$Cs)에 대한 설정 값을 보여주고 있다.

Codex의 가이드라인 설정 기본 개념은 방사성 핵종 섭취로 인해서 인체의 방사능 피폭이 일반인의 허용 유효선량인 1 mSv yr^{-1}를 넘지 않은 것을 기준으로 하였다. 네 개 그룹으로 나누어져 있는데 그룹 내에 방사성 핵종들은 총합을 해서 영향을 고려했으나, 그룹간의 핵종들은 그 영향을 고려하지 않았다. Codex에서 4개 그룹으로 나눈 것은 핵종들의 선량 환산계수(dose coefficient factor)를 고려해서 비슷한 것을 같은 그룹으로 묶었기 때문이다. 또한 성인과 유아의 경우 방사능의 민감도가 다르기 때문에 가이드라인을 다르게 설정하였다.

Codex 기준치는 과도한 무역규제 등 국제 마찰에 대비한 기본 자료이기 때문에 각 국가들은 Codex 기준을 참고는 하지만 똑같은 기준치를 적용하지 않는 국가들도 많이 있다(Table 1). Codex에서 적용하고 있는 가이드라인은 매우 보수적인 가정을 기초로 하고 있으며 이들 가이드라인을 넘어선다고 해서 일반인에 대한 우려가 즉각적으로 있는 것은 아니지만 잠재적인 건강위해를 평가할 필요가 있다는 것을 해당 당국은 경계해야 한다고 언급하고 있다.

Table 1. Permitted levels of radionuclides contaminated in food and agricultural commodities (unit : Bq kg^{-1})

Country	Iodine (^{131}I)				Cesium (^{134}Cs+^{137}Cs)				
	Drinking water	Milk, milk products	Vegetables	etc.	Drinking water	Milk, milk products	Vegetables	Grains	Husbandry & fishery products, etc.
Codex[1)]	100	100	100	100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Japan	300	300	2,000	Fish & shellfish: 2,000	200	200	500	500	500
Singapore	100	100	100	100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Thailand	100	100	100	100	500	500	500	500	500
Korea	300	150	300	300	370	370	370	370	370
China	–	33	160	Husbandry & fishery Products : 470 Grains : 190 Potatoes : 89	–	330	210	260	Meat, Fish & Crustacea : 800 Potatoes : 90
Hongkong	100	100	100	100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Taiwan	300	55	300	300	370	370	370	370	370
Philippines	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Vet Nam	100	100	100	100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Malaysia	100	100	100	100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
USA	170	170	170	170	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
EU	500	500	2,000	2,000	600	370	600	600	600

[1)]In Codex guideline, 100 of radio active Iodine indicates the sum of amounts of ^{90}Sr, ^{106}Ru, ^{129}I, ^{131}I and ^{235}U, and 1000 of radio active Cesium is the sum of amounts of ^{35}S, ^{60}Co, ^{89}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{144}Ce, ^{192}Ir.

Table 2. Generic action levels for foodstuffs suggested from IAEA Safety Standards

Radionuclide	Generic action level (kBq kg^{-1})
Foods destined for general consumption	
^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{131}I, ^{103}Ru, ^{106}Ru, ^{89}Sr	1
^{90}Sr	0.1
^{241}Am, ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{242}Pu	0.01
Milk, infant foods and drinkin water	
^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{103}Ru, ^{106}Ru, ^{89}Sr	1
^{131}I, ^{90}Sr	0.1
^{241}Am, ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{242}Pu	0.01

(IAEA SS NO. GS-R-2, IAEA 2002)

Table 3. Default radionuclide specific OILs for food, milk and water concentration by IAEA

Radionuclides	OIL (Bq kg^{-1})
^{131}I	3,000
^{134}Cs	1,000
^{137}Cs	2,000

2) 국제원자력기구

IAEA는 1985년 원자력사고나 방사선 비상에 대응하기 위해서 방사선 비상방재대책과 관련한 방사선 방호기준에 대한 지침과 개입준위의 수립 원칙을 제공하기 위해서 IAEA safety series NO. 72 (IAEA, 1985)를 발표하였다. 체르노빌 사고 후 국제적으로 널리 적용할 수 있는 일치된 국제적 개입준위의 필요성에 따라서 원자력 사고나 방사선 비상시 주민을 보고하기 위한 일반 개입준위 (Intervention Criteria)를 설정하였으며, 1993년에 IAEA safety series No. 109 (IAEA, 1994)를 발표하였다. 2002년에는 IAEA No. 109를 개정하여 IAEA safety standards No. GS-R-2 (IAEA, 2002)를 발간하였고 국가간 식품교류에 적용할 수 있는 조치를 설정하였다 (Table 2).

2011년 일본 후쿠시마 사고 후 IAEA Safety Standards No. GS-R-2의 자세한 부분은 IAEA No. GSG-2 (IAEA, 2011)로 언급하여 방사선 비상사태로부터 환경과 인간의 보호에 대해 규정하였다. 위 표준지침에서의 특징은 방사성 오염 물질 관리에서 환경 보호에 대한 개념이 도입되었다는 것이다. 또한 원전사고 발생 후 사고지역의 실측농도를 기초로 적절한 조치가 전개되는 상황에서 식품, 우유 및 물에 적용하는 기준에 운영 개입준위 (Operational Intervention Level, OIL)를 도입하여 설정하였다. 운영 개입준위 (OIL)를 살펴보면 비상 대응상황에서 총 알파 (5 Bq kg^{-1})와 총 베타 (100 Bq kg^{-1})가 기준치 이하인 경우에는 식품 섭취가 안전하고 기준치를 초과하면 다음 운영개입준위를 평가하도록 설정하였다. 원자력 사고나 방사선 비상시 대표 핵종인 요오드와 세슘의 경우 Table 3에서 나타낸 값보다 높으면 식품과 음용수의 섭취를 전면 중단하고 대체식수를 공급하도록 하였다. IAEA에의 경우를 살펴보면 최근 후쿠시마 사고 후 인간의 방사선 방호뿐만 아니라 환경의 방사선 방호도 중요하게 고려하고 있으나 축산 사료에 대한 기준치 설정은 아직 없는 실정이다. 다만 사료 등에 대한 기준을

Table 4. The values of transfer coefficient of radio active nuclei on the major husbandry products suggested by IAEA (unit : day l^{-1} or kg)

Product	Radio active nuclei	Calculation methods	Transfer coefficient
Milk (dairy cows)	^{137}Cs	Literature review	4.6×10^{-3}
	^{131}I	Literature review	5.4×10^{-3}
Beef	^{137}Cs	Simulation by modeling	2.2×10^{-2}
	^{131}I	Feeding test	6.7×10^{-3}
Pork	^{137}Cs	Simulation by modeling	2.0×10^{-1}
	^{131}I	Using radioisotope	4.1×10^{-2}
Poultry (Chicken)	^{137}Cs	Simulation by modeling	2.7
	^{131}I	Simulation by modeling	8.7×10^{-3}

설정할 수 있는 기초자료를 제시하고 있는데 IAEA technical reports series NO 364 (IAEA, 1994)에서 방사성 물질의 사료에서 축산물로의 전이에 따른 상관계수, 즉 전이계수를 설정하여 우유, 쇠고기, 돼지고기, 닭고기, 계란 등에 적용하고 있는데 이 자료는 장시간의 실험적 데이터와 이론적 배경을 토대로 설정하였다. 이를 개정하여 IAEA technical reports series NO 472 (IAEA, 2010)를 2010년에 발간하여 전이계수를 수정하였다(Table 4).

3) 국제방사선방호위원회

ICRP는 적절하게 방사선을 방호할 수 있도록 주로 기본원칙에 대한 지침을 제공하고 규제기관이나 해당국가의 관련조직에 대해 권고하는 기관으로 그 동안 많은 공식 자료를 제공하고 있다. 방사능기준 설정과 관련해서 중요한 ICRP 권고를 살펴보면 ICRP 26 (ICRP, 1977)으로 현재 방사선 방호 기준에서 활용하고 있는 일반인의 유효선량률을 5 mSv yr^{-1}로 정의한 것이 대표적인 사례이다. 이 기준은 아직까지 미국에서 적용되고 있으며, 이것을 근거로 해서 미국 식품의약품안전청 (Food and Drug Administration, FDA)과 원자력 규제기관에서 방사능 기준치를 설정하고 있다.

그 이후에 ICRP 60 (ICRP, 1991)로 개정되었는데 여러 가지 변화 중 일반인에 대한 유효 선량률이 1 mSv yr^{-1}로 강화된 것이다. 현재 미국을 제외한 대부분의 나라 즉 방사선 방호를 다루는 모든 국제표준과 국가 규정에 ICRP 60 권고를 바탕으로 하고 있다. 이 권고는 국제기본 안전표준(Basic Safety Standards, BSS)과 같은 국제표준, 여러 국제 노동협약, Codex 등 식품관련 기구, 그리고 유럽연합위원회 (European Committee, EC) 규약들의 기본이 지침이 되고 있다. 우리나라도 원자력 관련 모든 법령 등이 ICRP 60을 근거로 수립되었다.

2007년에는 새 권고기준인 ICRP 103 (ICRP, 2007)이 발간되어 많은 변화가 있었지만, 일반인의 유효 선량률은 그대로 ICRP 60을 따르고 있다. 다만 비인간종 즉 환경에 대한 방사선 방호에 대한 원칙들이 정해졌고 이것이 ICRP 60에서는 없는 추가된 내용이다. 현재 환경방호에 대한 기본적인 원칙이 정해져 있기 때문에 앞으로 많은 연구 자료들이 축적되면 추가적으로 자세한 언급이 있을 것으로 판단되며, 이를 위해서 각국들은 환경방호에 대해서 많은 연구들을 수행하고 있다.

ICRP에서는 사료 등에 대한 구체적인 기준치 등은 없으나 환경 방호의 대원칙 등이 수립되어 있기 때문에 앞으로 사료 등도 방사능 관리 대상에 포함될 수 있을 것이며, 사료 등에 대한 기준 설정 시 기본 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Table 5. Levels[1)] of Radionuclide on the husbandry animals recommended by European Commission Regulation (EURATOME) No.944/89

Animal	Concentration of cesium ($^{134}Cs+^{137}Cs$) (Bq kg^{-1})[1,2)]
Pig	1,250
Poultry, sheep, calf	2,500
Others	5,000

[1)]These levels were established with consideration on the effects of food in the maximum level permitted.
[2)]These levels are conducted to the final feed products used for the purpose of feeding to livestock.

4) 유럽연합

EU는 방사선 비상시 기준은 IAEA 기준치를 근거하여 적용하고 있으며 평상시는 Council of the European Union (EURATOM)의 권고 안으로 제정하여 적용하고 있다. 식품에 대한 종류와 사료에 대해서는 1989년에 적용하여 운영하고 있다 (EURATOM, 1989/2000). 보다 자세히 살펴보면 1982년 옥내대피, 소개 및 옥소 예방과 같은 긴급 보호조치의 도입이 고려될 때 사용되는 방사선 방호기준에 대하는 지침을 개발하였고, 1986년과 1989년에서는 그 동안의 보호조치에 대한 보고서를 개선하여 EU 권역안의 시장에서 거래되는 식품과 사료에 대한 조치를 위해 개입준위를 채택하였다(EURATOM 1990).

사료에 대한 방사성 물질 규제기준에서는 세슘을 관리핵종으로 한정하고 있으며, 식품보다 완화하여 방사능 기준치를 높게 설정하여 운영하고 있다(Table 5).

5) 일본

일본의 경우도 EU와 비슷한 구조를 가지고 있는데, 평상시와 비상시로 구분하여 규제하고 있다. 비상시에는 IAEA에 근거하여 자체적으로 개발한 규정을 적용하고 있으며, 평상시에는 수출입 식품에 대해서 세슘만 규제

Table 6. Permitted levels of Radionuclide in feed by Japanese government (Bq kg^{-1})

Animal	^{134}Cs+^{137}Cs	^{131}I
Dairy cow	300	70
Beef cattle	300	Products from the restrict area to prohibit export of agricultural commodities*
Others	5,000	

*The districts appear that levels of the tentative concentration (2,000 Bq kg^{-1}) of radioactive iodine do not exceeded in vegetables.

하고 있다. 일본은 사료에 대한 규제치를 명시하고 있으며 세슘뿐만 아니라 반감기가 짧아서 비교적 안전하게 관리될 수 있는 요오드에 대해서 명시하고 있다. 일본은 조사료 중 방사성 물질의 잠정 허용치를 Table 6과 같이 제정하여 적용하고 있다(일본원자력안전위원회 2002). 후쿠시마 사고 이후 기준을 보다 강화하려고 하고 있으며, 사료의 기준치도 방사성 세슘과 방사성 요오드 두 핵종에 대해서 관리하고 있으며, 유럽보다 보다 강화된 기준치를 정하고 있다.

6) 미국 및 기타국가

미국, 캐나다 등 북미국가나 아시아 국가들의 경우 원자력발전소가 있는 국가와 비 원자력발전국가로 구분할 수 있지만 일반 식품에 대한 기준치는 자체적으로 가지고 있거나 국제기준을 채택하고 있으나, 사료에 대한 기준치는 없는 것으로 보고되고 있다(Table 1).

미국의 경우, 원자력 비상시에는 국가방사선위원회(National Radiation Committee, NRC)의 규제 프로그램에 의해서 관리되고 있는데, 현재 사료에 대한 방사능 기준을 설정하고 있지는 않고 있다. 평상시에는 각 부처에서 관리대상에 따라서 독립적으로 관리되고 있는데 미국농무성(US Department of Agricule, USDA, 2010)는 Radiation Safety Program을 마련하여 방사능 누출 사고시 대응방안과 행동강령을 제시하고 있으며, 물 방사능 관리 등은 미국환경보호국(US Environment Protection Agency, USEPA)에서 원자력 사고 시 보호조치 및 조치에 관한 매뉴얼을 개발하여 운영 중에 있다(USEPA 1992, 2000). 또한 미국 FDA는 식품의 방사능 오염원을 과학적으로 관리하는 체계를 구축하고 식품 방사능 오염수준을 객관적으로 평가하는 체계를 마련하기 위한 노력의 일환으로 식사섭취 패턴 변화를 반영해 방사성 물질, 잔류농약, 산업 오염물질 등에 중점을 두고 총 식이조사(Total Diet Study, TDS 2003; USFDA 1998)를 실시하고 있다. 미국의 경우를 요약하면 비상시와 평상시로 구분이 되고 양쪽 다 사료에 대한 방사능 기준치는 없는 것으로 조사되었다.

7) 대한민국

우리나라는 식품의약품안전청 1989년도에 식품 중 방사능잠정허용기준을 마련하였으며, 후쿠시마 사고 후 영유아에 대한 방사성 요오드 기준이 추가되어 현재 식품 중 방사능기준을 설정하여 관리하고 있다(Table 1). 현재 식품의약품안전청을 중심으로 기준 규격을 현행보다 더 낮은 수준으로 설정하려고 준비 중이다. 그러나 사료에 대한 기준은 없는 형편이다.

2. 사료의 방사능 기준 설정 기준

후쿠시마 사고 후 사료 등에 대한 방사능 규제의 필요성은 제기되고 있으나, 현재 유럽과 일본을 제외한 대부분의 나라에서는 사료에 대한 방사능 기준치를 설정하지 않고 있다. 유럽의 경우는 세슘만을 기준으로 설정하고 있는데 돼지고기, 가금류 및 기타로 구분하여 설정하였다(Table 5). 예를 들면 EU 국가 중에서는 사람이 많이 먹는 돼지고기의 경우, 식품과 동일하게 1,250 Bq kg^{-1}을 설정하고 있으며, 그보다 적게 먹는 가금육, 양고기나 송아지 고기의 경우는 2,500 Bq kg^{-1}으로 설정하였고 자주먹지 않는 기타 고기류는 5,000 Bq kg^{-1}으로 식품 기준치보다 4배를 높게 설정하였다(EURATOM 1990).

사료에서 가축으로 전이를 고려하면 사람이 직접 섭취하는 식품 또는 가축보다는 사료의 방사능 기준치는 훨씬 높아질 것으로 판단된다. 다만 과학적인 기준치 설정보다는 매우 보수적으로 산출해서 사료의 방사성 물질이 모두 가축으로 전이된다고 가정하면 가축 또는 식품의 기준치를 그대로 사용할 수도 있다.

일본의 경우는 방사선 비상시이기 때문에 현재 적용하는 것은 원자력안전위원회의 방사선 비상규제에 근거해서 식품에 설정하였고, 사료에 대한 설정도 역시 자국의 섭취량 등을 고려해서 젖소용, 육우용, 기타 가축용 등으로 구분해서 설정하였다(Table 6). 젖소용과 육우용 사료의 세슘의 농도가 매일 섭취할 수 있는 음료수, 우유나 유제품보다는 높지만 채소류보다는 낮아서 매우 엄격하게 관리하고 있음을 알 수 있다. 요오드의 경우는 젖소용만을 설정하고 있는데 이는 우유 등을 생산하는 상황을 고려해서 매우 엄격하게 설정하였고, 요오드의 반감기를 고려했을 때 육우용 및 기타 가축용에 대해서는 기준치를 설정하지 않고 있다.

방사능 기준 설정에 기본이 되는 IAEA와 ICRP 권고 자료에서는 사료에 대한 방사능 기준을 설정하지 않고 있다. 다만 기준 설정을 위한 기초자료를 제시하고 있는데 사료를 섭취했을 때 가축에 전이되는 방사성 물질 정도를 자세히 언급하고 있다.

Table 7. Permitted levels of radionuclide in feed of the representative animals calculated by the application of transfer coefficient

Meat	Radionuclides	Transfer coefficient (d l^{-1} or kg)	Amount of intake (kg or l d^{-1})	Level in feed (Bq kg^{-1} or l)
Cow's milk	$^{137+134}Cs$	4.6×10^{-3}	25	8,696
	^{131}I	5.4×10^{-3}		741
Beef	$^{137+134}Cs$	2.2×10^{-2}	10	4,595
	^{131}I	6.7×10^{-3}		1,493
Pork	$^{137+134}Cs$	2.0×10^{-1}	3.0	1,667
	^{131}I	4.1×10^{-2}		813
Poultry (chickens)	$^{137+134}Cs$	2.7	0.15	2,469
	^{131}I	8.7×10^{-3}		76,628

앞으로 국제적으로 사료 등에 대한 규제 설정 등에 대한 많은 연구가 있을 것으로 판단되며 현재 제한된 자료 즉 국제기구, 유럽 및 일본 등의 사료 기준 설정을 근거하여 우리나라에서도 설정한다면 국제기구의 기본 자료를 토대로 설정하는 것이 방법이 타당하다고 할 수 있다. 즉 식품과 동일하게 관리하면 너무 엄격한 잣대가 될 것으로 판단되나 방사성 물질에 대한 국민들의 민감한 정서를 고려하면 전이계수를 이용한 기준치와 현재 식품의 기준치의 범위 내에서 설정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 원자력 사고 시 방출량과 환경에 전이되는 것으로 종합적으로 고려하고 현재 식품의 규제치를 살펴보면 사료에 대한 기준 설정은 세슘과 요오드만으로도 충분하다고 할 수 있으며, 또한 요오드의 경우 즉시 섭취하는 것만 고려하는 것도 하나의 방법이다. 다만 본 단문에서는 전반적으로 요오드 기준 설정 방법론을 IAEA 전이계수를 고려해 제시한다고 한다.

3. 사료에서 축산물로의 전이계수 적용

방사성 물질의 사료에서 축산물로의 전이계수 설정에 대한 연구는 실험, 현장조사 및 예측 모델 등으로 추정하여 설정하는데, Green 등(1993)의 보고에 의하면 우유는 60%, 양 제품 16%, 소고기 및 염소 제품과 나머지 축산물들은 5% 이하로 설정하였다. 대부분이 초식 가축에 대한 연구가 주종을 이루고 있는데, 이는 Chernobyl 원전 사고 시 낙진에 의한 사료 작물의 방사성 물질 오염 문제에 무게를 두고 있기 때문으로 사료된다(Green *et al.* 1993). 주요 축산물의 최대 전이계수 연구는 실험적 조건, 현장조사 및 문헌자료에 근거한 모델링 등으로 추정하고 있으나, 표준화된 수치는 아직까지 없다. 따라서 각 국은 IAEA에서 발표한 자료(IAEA 1994, 2010)를 참고하여 자국의 기준 마련에 활용하고 있다.

IAEA에서 제시한 전이계수(Transfer Coefficient)의 경우 F로 정의하는데 가축의 일일 방사성 핵종 섭취량에 대한 가식부 중 핵종 농도의 비로 정의한다. 즉 식-1로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathrm{F\,(D\,l^{-1}\ or\ kg)}=\frac{\text{가축 가식부중 핵종 농도 (Bq kg}^{-1}\text{ or Bq l}^{-1}\text{)}}{\text{가축의 1일 핵종 섭취량 (Bq d}^{-1}\text{)}} \quad \text{(식-1)}$$

위 식-1을 간단히 설명하면 가축이 방사능 오염된 사료를 통해서 방사성 핵종을 섭취하게 되는데 그 중에서 인간이 먹는 부위에 그 핵종이 침적되는 비율을 나타내는 것이다. 이 값은 핵종별로 또는 가축의 종류별로 달라질 수 있다. IAEA에서는 우유, 쇠고기, 돼지고기, 닭고기, 계란 등에 대해 문헌, 모델추정 및 실험을 통해서 제시하고 있으며, 이에 대한 연구가 지속적으로 이행되고 있다.

현재 사료에 대한 오염 가능한 핵종에 대한 전이계수 설정연구가 일부 수행되었으나 제도적 반영을 위한 기초자료로 활용하기에는 부족한 점이 있다. 대부분의 기준 핵종은 주로 위험도가 높은 방사성 세슘과 요오드에 한해 적용하고 있는데(ICRP 1991), 요오드의 경우 반감기가 8일 이하로 체내 축적량이 적고, 축종별 연구결과가 없어 별도로 정하지 않고 있다.

4. 전이계수 적용 사료의 방사능 기준 설정 방법

식-1에서 표현된 전이계수의 경우 단위가 무차원 상수가 아닌 단위 부피나 질량 당 일(d)로 표시하고 있다. 따라서 사료의 방사능 기준을 설정하기 위해서는 가축의 방사능 농도에 전이계수를 나누고, 국내 가축의 일일 섭취량 역시 나눠서 계산해야 한다(IAEA NO 374, 1994). 즉 사료의 방사능 기준은 아래와 같이 표현될 수 있다.

이를 이용해서 돼지고기용 사료에 대한 세슘의 방사능 기준은 식-2와 같이 산정될 수 있다.

$$\text{돼지고기용 사료 방사능 (Bq l}^{-1}\text{ or kg)} = \frac{\text{돼지고기 방사능 (Bq l}^{-1}\text{ or kg)}}{\text{전이계수 (d l}^{-1}\text{ or kg)}\times\text{돼지의 사료 섭취량 (kg or l d}^{-1}\text{)}} \quad \text{(식-2)}$$

$$\text{돼지고기용 사료 방사능 (Bq l}^{-1}\text{ or kg)} = \frac{1000}{0.20 \times 3.0}$$

$$= 1{,}667\ \text{Bq kg}^{-1} \quad \text{(식-3)}$$

식-2를 보면 인간이 섭취하는 돼지고기의 방사능 기준을 이용하여 전이계수와 돼지의 일일 섭취량을 이용하여 설정하였다.

식-3에서 이용한 값 중에서 돼지고기의 방사능은 Codex의 모든 식품의 방사능 기준(1000 Bq kg^{-1})을 적용했으며, 전이계수(0.24 d l^{-1})와 돼지고기의 사료 일일 섭취량(3.0 kg d^{-1}, 최대섭취량)은 IAEA 기준 값을 적용하여 산출할 수 있다(IAEA 1990).

식-3을 보면 돼지고기 용 사료의 방사능 기준안은 1,667 Bq kg^{-1}으로 계산되었고 이는 돼지고기의 방사능 기준치 1,000 Bq kg^{-1}보다 약 1.7배 높은 수치이다. 식-3을 이용하여 사료의 방사능 기준치를 설정할 때 중요한 변수는 전이계수와 가축의 사료의 섭취량이기 때문에 검증된 자료를 이용하는 것이 매우 중요하다.

5. 국내 사료의 방사능 기준 설정(안)

현재 국내의 경우 평상시 식품의 방사성 핵종 기준은 세슘과 요오드만으로 한정되어 있다. 또한 외국의 경우도 일부 국가에서 식품의 경우 방사성 요오드(^{131}I)와 세슘($^{137+134}$Cs) 이외의 핵종에 대한 기준치는 설정하고 있으나, 평상시에는 분석을 수행하지 않고 있다. 과거의 대형 원자력발전소 사고(체르노빌 및 후쿠시마)를 통해서 살펴보면 방사성 요오드(^{131}I)와 세슘($^{137+134}$Cs)가 가장 많이 방출되고 인체에 많은 영향을 준 것으로 평가되고 있다. 위와 같이 국내 식품 방사능 기준과의 조화 및 국제적인 자료를 종합했을 때 사료의 방사능 기준은 방사성 요오드(^{131}I)와 세슘($^{137+134}$Cs)으로 한정하는 것이 매우 타당하다고 판단된다. 추후에 국내의 식품 중 방사능 관련법이 개정되어 방사성 플루토늄($^{239+240}$Pu) 및 스트론튬(^{90}Sr) 등이 추가될 경우도 이에 대한 검토는 필요하지만 사료의 방사능 기준안은 두 핵종(세슘과 요오드)만으로 충분하다고 생각된다. 왜냐하면 실제로 체르노빌 사고 시 환경에서 방사성 스트론튬은 방사성 요오드에 비해서 1/176배로 낮게 방출되었고, 방사성 플루토늄은 1/293배로 더 낮게 검출되었기 때문이다(UNSCEAR 2008). 가축을 포함한 식품의 방사능 기준안이 있고 추가적으로 사료의 방사능 기준안을 설정하는 것이기 때문이다. 사료의 방사능 농도를 설정한 EU나 일본의 경우도 방사성 요오드(^{131}I)와 세슘($^{137+134}$Cs)만을 대상으로 기준을 가지고 있다.

사료의 기준 설정 방법은 여러 가지 있을 수 있으나 본 단보에서는 IAEA에서 사용한 전이계수를 이용하여 식-2를 근거로 해서 설정하는 간단한 방법론을 제시하였다. Table 7은 전이계수를 적용하여 일일 최대로 가축이 섭취하는 사료의 양을 기준으로 했을 때 사료 내 평균 최대 허용기준을 산출한 값을 보여주고 있다. 전이 계수를 이용해서 구한 사료의 방사선 설정값은 방사성 세슘($^{137+134}$Cs)의 경우 Codex에서 식품에서 제시한 1,000 Bq kg^{-1}보다 약 1.7배에서 8.7배 정도로 계산되었다. 즉 돼지고기용 사료의 경우는 약 1.7배로 가장 낮았고, 젖소의 경우가 8.7배로 가장 높았다. 젖소의 경우 사료 섭취량이 높았지만, 전이계수가 매우 낮아서 식품의 기준보다 높게 설정되었다. 방사성 요오드의 경우도 비슷한 결과를 얻었는데, Table 7에서 보면 Codex 설정치 100 Bq kg^{-1}보다 7.4배에서 약 766배 정도로 매우 넓은 범위를 보이고 있다. Table 7에서 보면 가축의 종류에 따라서 매우 다양한 범위를 보이고 있어, 사료의 방사능 기준을 설정하는데 여러 가지 방법론이 도출될 수 있다. 예를 들어 젖소용 사료는 8,696 Bq kg^{-1}이고 돼지고기용 사료는 1,667 Bq kg^{-1}으로 계산되었지만, 기준안을 정할 때는 혼란을 방지하기 위해 가장 보수적으로 모든 가축용 사료에 대해서 1,667 Bq kg^{-1}으로 택하고 숫자를 단순하게 하여 1,600 Bq kg^{-1}로 결정할 수 있다. 위와 같은 방법이 채택되면 매우 강화된 수준에서 기준치가 설정된다고 볼 수 있고 국민들의 방사능에 대한 정서를 고려하면 충분히 검토할 만 하다고 판단된다. 물론 이런 부분은 다양한 전문가들의 의견을 종합하여 국내 기준안 설정해야 할 것으로 판단되며, 본 논문에서 제시된 값들이 하나의 자료가 될 수 있을 것이다. 방사성 요오드의 경우도 Table 7에서 보면 741 Bq kg^{-1} ~ 76,628 Bq kg^{-1}에서 매우 넓은 범위를 보이고 있다. 따라서 방사성 세슘과 비슷하게 이중 가장 보수적인 값을 설정하는 것도 타당하다고 볼 수 있다.

전이계수를 이용하여 구한 값과 일본 및 유럽의 설정 기준을 참고했을 때 가축용 사료의 방사능 기준치는 세슘의 경우 Codex 식품의 기준치인 1,000 Bq kg^{-1}에서 1,667 Bq kg^{-1}의 범위(가장 보수적으로 계산된 결과: 돼지고기용 사료)에서 설정되는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 방사성 요오드의 경우도 위와 같은 기준으로 설정될 때 100 Bq kg^{-1}에서 741 Bq kg^{-1} 범위에서 결정될 수 있다. 방사성 요오드의 경우 반감기가 매우 짧아서 우유를 생산하는 젖소의 경우는 필요하지만 육우로 사용되는 것은 도축 및 유통과정을 고려했을 때 설정 필요성 검토가 필요한 부분이다. 여기에서 사용한 식품의 방사능 기준치는 Codex를 이용하여 사료를 방사능 기준치를 제시했으나, 국내법에 적용된 값들을 이용하면 달라질 수

있어 이에 대한 토의는 추후 필요할 것으로 판단된다. 또한 돼지고기용, 쇠고기용, 닭고기용 등으로 구분해서 기준치를 설정할지 아니면 하나로 통일하여 설정하는 문제도 추후에 검토되어야 할 부분으로 생각된다.

결 론

국내 및 인접국에서 발생할 수 있는 원전사고로 인한 방사능 누출 시 축산물 섭취에 따른 국민의 안심체계 구축을 위한 국가 수준의 안전한 사료 관리기준 확립이 필요한 실정이다. 이는 국내 원자력발전소, 연구시설의 방사능 누출과 인접국의 방사능 누출 사고 등에 대비하여 농수산식품에 대한 안전관리를 효과적으로 수행할 수 있도록 하여 농수산식품분야의 안전성을 확보하고 위기대응에 적절히 대처할 수 있기 때문이다. 본 단보에서는 국제기구 및 제외국의 사례 조사로 국내 및 인접국 원전사고 발생 시 사료에 오염될 수 있는 방사성 물질의 국내 관리기준 설정과 방사능 오염 사료 섭취에 따른 축산물로의 이행을 고려한 전이계수를 설정하여 국내 기준을 확립하는데 참고할 수 있는 자료를 제공하고자 하였다. 기준 핵종은 방사성 세슘과 요오드로 한정하였다. 전이계수는 IAEA 자료를 이용했으며, 일일 최대 사료 섭취량을 젖소는 25 kg d^{-1}, 육우(쇠고기)는 10 kg d^{-1}, 돼지고기 3.0 kg d^{-1}, 가금류(닭) 0.15 kg d^{-1}로 하였을 때, 방사성 세슘의 관리기준 값은 젖소용 사료의 경우 8,696 Bq kg^{-1}, 쇠고기 4,545 Bq kg^{-1}, 돼지고기 1,667 Bq kg^{-1} 가금류(닭) 2,469 Bq kg^{-1}으로 산출되었다. 방사성 요오드의 경우도 방사성 세슘과 비슷하게 다양한 범위에서 산출되었다. 이 결과들은 국내 및 주변국 원전 사고시 위기관리를 위한 위기대응 매뉴얼 작성을 위한 과학적 자료에 활용될 수 있다. 특히 현재 구축되어 있지 않은 농산물 및 사료의 방사능 누출 대응 매뉴얼 작성 시 기준 자료로 활용하여 국가 수준의 안전한 사료 관리시스템 확립에 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 농촌진흥청 국립축산과학원 용역연구의 일환으로 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

일본원자력안전위원회. 2002. 원자력시설 등 주변의 방재대책에 대하여.

Codex. 1989. Guideline levels for radionuclides in foods following accidental nuclear contamination for use in international trade.

Codex. 1995. General standard for contamination and toxins in food and feeds. CODEX Stan 193-1995.

Environmental Protection Agency (EPA). 2000. National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Final Rule.

EURATOME. 1989. Commission Regulation No.944/89 (http://ec.europa.eu).

EURATOME. 1990. Commission Regulation No.770/90 (http://ec.europa.eu).

EURATOME. 2000. Commission Regulation No.616/2000 (http://ec.europa.eu).

Green *et al.* 1993. Recommended transfer factors from feed to animal products.

IAEA. 1994. Safety series NO. 109. Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency. IAEA.

IAEA. 1994. Technical reports series No. 364. Handbook of parameters values for the prediction of radionuclide transfer in temperature environments. IAEA.

IAEA. 2002. Safety Standards series No. GS-R-2. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. IAEA.

IAEA. 2010. Technical reports series No. 472. Handbook of parameters values for the prediction of radionuclide transfer in temperature environments. IAEA.

IAEA. 2011. Safety Standards general safety guide No. GSG-2. Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. IAEA.

ICRP. 1977. Recommendations of the international commission on radiological protection ann. ICRP. publication 26.

ICRP. 1990. Recommendations of the international commission on radiological protection ann. ICRP. publication 60.

ICRP. 2007. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection ann. ICRP. publication 103.

ICRP. 2009. Education and Training in Radiological Protection for Diagnostic and Interventional Procedures, ICRP Publication 113.

UK Health Protection Agency. 2010. National Arrangements for Incidents involving Radioactivity, User's Handbook-2009 Edition.

USDA. 2010. Radiation Safety Program Overview. Radiation Safety Division Website.

USEPA. 1992. Manual of protective action guides and protective actions for nuclear incidents. EPA.

USFDA. 1998. Accidental Radioactive Contamination of Human Food and Animal Feeds:Recommendations for State and Local Agencies, Center for Devices andRadiological

Health and FDA.
USFDA. 2003. Structure of radionuclide analysis files (Total Diet Study). CSFAN.
UNSCEAR. 2008. Sources and effects of ionizing radiation. report to the general assembly with scientific annexes.

Manuscript Received: November 8, 2011
Revised: November 23, 2011
Revision Accepted: December 12, 2011