



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2020년 2월  
석사학위 논문

방사능 측정시  
MDA 변화 요인 분석

조선대학교 대학원  
원자력공학과  
홍석현

방사능 측정시  
MDA 변화 요인 분석

A Study an the Factors Influencing  
MDA in Radioactivity Measurement

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

홍 석 현

방사능 측정시  
MDA 변화 요인 분석

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

홍 석 현

## 홍석현의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수    정    운    관    (인)

위    원    조선대학교    교수    송    종    순    (인)

위    원    조선대학교    교수    이    경    진    (인)

2019년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

### I. 서 론

- 1. 연구의 필요성 ..... 1
- 2. 연구 배경 및 목적 ..... 2

### II. 연구목표 및 내용

- 1. 연구목표 ..... 2
- 2. 연구내용 ..... 3

### III. 연구결과 및 활용기대

- 1. 연구결과 ..... 34
- 2. 활용기대 ..... 41

### IV. 결론 ..... 42

### 참고문헌 ..... 43

## 표 목 차

표 1. 고시 제89-19호 식품중의 방사능 잠정 허용기준 .....	4
표 2. 131I, 134Cs, 137Cs 분석법에 대한 국외 자료 조사 .....	5
표 3. 국가별 식품 중 방사성 핵종 분석법 .....	6
표 4. 식품공전 방사능 시험법 .....	7
표 5. 본 연구에 사용된 식품종류 .....	8
표 6. 30%효율 CANBERRA HPGe MDA .....	9
표 7. 60%효율 CANBERRA HPGe MDA .....	9
표 8. 계측시간에 따른 MDA 수준 변화 .....	10
표 9. 1,800초부터 10,000초까지의 MDA 변화 .....	12
표 10. 10,000초부터 20,000초까지의 MDA 변화 .....	13
표 11. ORTEC HPGe MDA .....	14
표 12. CANBERRA HPGe MDA .....	14
표 13. 건조도에 따른 질량변화 .....	16
표 14. 수분보정에 따른 MDA 변화 .....	17
표 15. 수분보정 방법에 MDA 변화 .....	19
표 16. 갈치 시료의 MDA 산포도 .....	20
표 17. 고등어 시료의 MDA 산포도 .....	21
표 18. 고구마 시료의 MDA 산포도 .....	22
표 19. MDA 종류 Calculation Methods .....	23



표 20. 신뢰도 준위에 따른  $k$  값 및 Currie Constants  $C_1, C_2$  ..... 25  
 표 21. ROI Width ..... 28  
 표 22. MDA 모델에 따른 MDA 변화 (CANBERRA) ..... 29  
 표 23. 신뢰도준위(Confidence Level)에 따른 MDA 변화 ..... 30  
 표 24. 분석피크 폭(ROI Width) 변화에 따른 MDA 변화 ..... 31  
 표 25. 계측시간에 따른 현행 계측자료의 MDA 통계 분석 ..... 35  
 표 26. Cs-137 방사능 수준별 식품 위해도 평가 결과 ..... 40

## 그 림 목 차

그림 1. 현행 국외 식품 중 방사능 허용기준 .....	3
그림 2. 현행 국내 식품 중 방사능 허용기준 .....	5
그림 3. 계측시간에 따른 MDA 수준 변화 .....	10
그림 4. 1,800초부터 10,000초까지의 MDA 변화 .....	12
그림 5. 10,000초부터 20,000초까지의 MDA 변화 .....	13
그림 6. 건조도에 따른 질량변화 .....	16
그림 7. 수분보정에 따른 질량변화 .....	17
그림 8. 수분보정에 따른 MDA 변화 .....	19
그림 9. 갈치 시료의 MDA 산포도 .....	20
그림 10. 고등어 시료의 MDA 산포도 .....	21
그림 11. 고구마 시료의 MDA 산포도 .....	22
그림 12. Confidence Level of Currie MDA Calculation .....	25
그림 13. 분석피크 폭(ROI Width) .....	27
그림 14. MDA 모델에 따른 MDA 변화 (CANBERRA) .....	29
그림 15. 신뢰도준위(Confidence Level)에 따른 MDA 변화 .....	30
그림 16. 분석피크 폭(ROI Width) 변화에 따른 MDA 변화 .....	31
그림 17. MDA 모델 선택 (CANBERRA) .....	33
그림 18. 신뢰도인자(Confidence) 및 분석피크 폭(ROI Width) 선택 .....	33
그림 19. 전형적 HPGe(30% 효율) 감마분석기의 MDA와 계측시간 관계 ..	36

## ABSTRACT

### A Study on the Factors Influencing MDA in Radioactivity Measurement

Hong Suk-Hyun

Advisor : Prof. Lee Gueng-Jin, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

As a follow-up to the 2011 Fukushima accident in Japan, a number of efforts were made, including strengthening the permissible level of radioactivity, electronic systemization of record management, expansion of inspection items and inspection cases, and enhancement of expert education.

A total of 1,990, 168 kinds of test samples of agricultural products, marine products, livestock products, and processed products were investigated and statistical analysis was conducted on 17 organizations including food. All institutions used high purity germanium instruments and specimen pretreatment were using direct methods. Although there are no significant differences in MDA differences among food groups in all samples, agricultural and fishery products tend to be slightly higher than livestock and processed foods, and MDAs show a correlation between the density and sound of test specimens.

It was found that the increase in measurement time was useful for lowering the level of MDA, and that the same measurement efficiency, the same measurement time, and the spread of MDA to the same food were significant. This study found that the important cause of different MDAs for the same sample under the same measurement conditions is differences in the applied MDA analysis model, and proposed standardization of MDA calculation model as a way to improve this.

In this study, we analyzed the effects of these factors through detailed experiments, and presented a plan to standardize how MDAs can be effectively lowered through them and how they are calculated.

# 1. 서 론

## 1. 연구의 필요성

후쿠시마 원전 사고의 여파로 유통되는 식품 중 방사능 안전관리에 대한 필요성과 중요성이 어느 때보다도 고조되고 있는 실정이다. 아울러 향후 발생할 수 있는 방사선 관련 사고에 대한 대비책을 공고히 하는 것이 매우 필요한 시점이다.

국내에서는 식품의약품안전처가 유통되는 식품 중 방사능 안전관리를 위한 측정 및 검사 업무를 주관하고 있으며, 일정한 자격을 갖춘 검사기관들을 지정하여 이 업무를 수행하도록 하고 있다. 측정업무에 대한 종합적인 분석을 통해 향후 개선점을 제시하는 것이 식품 중 방사능 안전관리에 대한 국민적 공감과 신뢰를 확보하기 위해서도 매우 필요한 시점이라 할 수 있다.

국내에서 식품 중 방사능 분석을 위한 절차는 2008년에 식품의약품안전처 공전으로 제정되어 몇 차례의 단순한 개정을 거쳐 현재에 이르고 있다. 방사선 측정기술과 규제 기술은 과거 10년 동안 급속히 발전하였는바, 이러한 기술적 변화를 바탕으로 진보된 분석절차를 제시하는 것이 신뢰성 있고 안정감 있게 방사선 식품 중 방사능 안전관리를 수행하는 데에 필수적이라고 할 수 있다.

식품 수출입시 유통식품의 신선도를 유지하고, 원활한 업무 처리의 지원을 통해 유통을 개선하고, 통관상의 보관비용을 절감하며 식품 방사능 안전관리 업무의 신속성이 요구된다. 이와 동시에 식품의 안전성을 확고하게 보장할 수 있는 것이 매우 중요하다. 이 두 가지를 충족시킬 수 있는 식품 중 방사능 검사법 개선은 매우 시급하고 중요한 사안이다. 또한, 원전사고 등 방사선사고의 발생시 긴급 대응을 위한 방사능 검사법에 대해 국내 및 국제 기준에 부합한, 적정 최소검출가능농도(MDA)를 제시하기 위하여 현재의 기술적 수준을 과학적으로 검

토 연구하는 것이 필요하다.

## 2. 연구 배경 및 목적

식품 등 방사능 시험검사기관 17개 기관을 대상으로 농산물, 수산물, 축산물, 가공품 총 168종 1,990개의 검사 시료에 대하여, 감마선 방출 핵종 시험분석 현황을 조사하고 통계 분석을 수행하였다. 모든 기관에서 고순도게르마늄 계측기를 사용하고 시료 전처리는 직접법을 이용하고 있었다. 동일한 계측효율, 동일한 계측시간, 동일한 식품에 대한 MDA 퍼짐은 상당한 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 동일한 계측조건에서 동일한 시료에 대해 MDA가 상이한 중요한 원인은 적용하는 MDA 분석 모델의 차이임을 밝혀내고, 이에 대한 개선방안으로 MDA 산정 모델의 표준화 방안을 제시할 것이다.

# II. 연구목표 및 내용

## 1. 연구목표

식품 중 감마선 방출핵종 국내·외 국가별 허용 기준 현황을 조사하여  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  허용 기준치를 확인하고, 식품 중 감마선 방출핵종 국내·외 국가별 분석 방법 현황을 조사하여 1. 국가별, 식품 종류별 전처리방법 2. 국가별, 식품 종류별 측정요구시간 시료량 등 조사 3.  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  최소검출가능방사능(Minimum Detectable Activity, MDA) 제한치 기준 조사를 하고 식품 중 방사능 분석 관련 국제규격과 국내 식품 분석법 비교 검토를 할 것이다.

식품 중 방사능(감마핵종) 검사법 개선에는 대상핵종은  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  등이 있고, 측정시간, 식품 종류, 시료량, K-40 함량, MDA 등을 종합적으로 비교 분석을 하여 좀 더 개선된 검사법을 제시 할 것이며, 측정시간(1,800초~10,000초)에 따른 MDA와 검출한계 분석, 측정시간(10,000초~20,000초)을 실험 하며, MDA 산정

방식을 제시하여 최적의 MDA 검출방법을 제시할 것이다.

## 2. 연구내용

Cs-137의 허용기준은 미국의 경우 1,200Bq/kg이며, Codex는 1,000Bq/kg, EU는 200~500Bq/kg, 중국은 ~250Bq/kg, 일본의 경우 10~100Bq/kg의 허용기준을 적용하고 있다. EU의 경우, EU 자체허용기준은 200~500Bq/kg이지만 일본산 식품에 대해서는 일본 자체기준인 100Bq/kg로 강화된 허용기준을 적용하고 있다. 국가별로 서로 다른 허용기준을 적용하고 있지만, 일본과 우리나라의 허용기준이 100Bq/kg으로서 국제적으로 가장 엄격한 허용기준을 적용하고 있다. 아래의 그림은 식품의약품안전처 홈페이지에 나와 있는 현행 국외 식품 중 방사능 허용기준이다.

식품 중 방사능 국내 기준				식품 중 방사능 국제 기준					
<b>▶ 제외국 식품 중 방사능 기준 현황(요오드, 세슘)</b>									
국가	방사성요오드 <sup>131</sup> I (Bq/kg)				방사성세슘 <sup>134</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs (Bq/kg)				
	음료수	우유, 유제품	채소류 (뿌리 채소 등 제외)	기타	음료수	우유, 유제품	채소류	곡류	육류, 난류, 어류, 기타
일본	-	-	-	-	10	50	100	100	100
미국	170	170	170	170	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
중국	-	33	160	육류, 수산물:470 곡류:190 서류:89	-	330	210	260	육류, 수산물:800 서류:90
Codex	100	100	100	100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
EU	300	300	2,000	2,000	200	200	500	500	500
	영유아용 식품 100								
※ EU의 경우 일본산 수입제품에 대해서는 일본기준을 적용하고 있음									
<b>▶ 제외국 식품 중 방사능 기준 현황(플루토늄, 스트론튬)</b>									
국가	방사성 플루토늄 <sup>238</sup> Pu (Bq/kg)			방사성 스트론튬 <sup>90</sup> Sr (Bq/kg)					
	영유아식품, 우유 및 유제품	액체 식품	기타식품	영유아식품, 우유 및 유제품	액체 식품	기타식품			
미국	2	2	2	160	160	160			
Codex	1	10	10	100	100	100			
EU	1	20	80	75	125	750			
※ 일본산 수입식품의 경우 요오드 및 세슘이 기준치 이내로 검출되더라도, 수입자에게 '플루토늄, 스트론튬 등' 다른 방사능 핵종에 오염되지 않았음을 추가로 입증하도록 요구하고 있음.									

그림 1. 현행 국외 식품 중 방사능 허용기준

식품 중 방사능 국내 기준의 경우, 식약처 고시 제89-19호에 의해 최초로 방사능 허용잠정기준이 제시되었는바, Cs-137의 경우 370Bq/kg으로 허용기준이 제시

되었다. 2011년도에, 식약처 고시 제2011-41호에 의해 Cs-137의 경우 370Bq/kg으로 허용기준이 정식으로 고시되었다.

표 1. 고시 제89-19호 식품중의 방사능 잠정 허용기준

핵종	대상 식품	기준
131I	유 및 유 가공품	150(Bq/kg)
	기타식품	300(Bq/kg)
134Cs + 137Cs	모든 식품	370(Bq/kg)

요오드, 세슘 이외의 방사성핵종(플루토늄, 스트론튬 등)의 경우에 대해서는, 국제식품규격위원회(CAC : Codex Alimentarius Commission)의 규정을 준용하도록 하고 있다. 특히 일본에서의 후쿠시마 사고 이후에, 각국에서 일본산 식품에 대해 강화된 기준을 적용하고 있는데, 예를 들어 EU의 경우는 일본산 수입제품에 대해서 EU자체허용기준(200~500Bq/kg)보다 강화된 일본자체허용기준(100Bq/kg)을 적용하고 있다. 우리나라의 경우에도, 후쿠시마 사고에 따른 국민 불안감과 우려를 반영하여, Cs-137의 경우 100Bq/kg의 임시강화기준이 제시되어 현재에 이르고 있다. 아울러, 일본수입식품에 대해서는 수입업자에게 “플루토늄, 스트론튬 등” 다른 방사능 핵종에 오염되지 않았음을 추가로 확인하도록 요구하고 있다.



식품 중 방사능 국내 기준      식품 중 방사능 국제 기준

▶ 식품 중 방사능 기준

핵종	대상식품	기준(Bq/kg, L)
요오드 <sup>131</sup> I	영아용 조제식, 성장기용 조제식, 영·유아용 곡류 조제식, 기타 영·유아식, 영·유아용특수조제식품	100
	유 및 유가공품	100
	기타식품	300
세슘 <sup>134</sup> Cs+ <sup>137</sup> Cs	모든식품	370 → 100(임시강화기준)

※ 기준 및 규격이 정하여지지 아니한 유탄물질 등은 국제식품규격위원회(CAC : Codex Alimentarius Commission) 규정을 준용

그림 2. 현행 국내 식품 중 방사능 허용기준

문헌 및 인터넷 조사를 통해 <sup>131</sup>I, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs 분석법에 대한 국외 자료 조사를 분석하였다.

표 2. <sup>131</sup>I, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs 분석법에 대한 국외 자료 조사

분석기기	고순도게르마늄(HPGe) 분광 분석 방법
전처리 방법	직접법, 건조법, 회화법 등 동일
분석시간	짧게는 600초부터, 1,800초, 6,000초 등으로 다양 일본이나 영국의 경우는 측정시간 요건보다는 MDA 제한치를 준수하는 요건이 우선시 됨
분석 시료량	20mL~2,000mL까지 다양하게 제시 영국의 경우에는, 시료량을 특별히 정하지 않고 MDA 제한치를 충족시키는 조건하에 20mL~1,000mL 범위에서 자유롭게 선택
MDA 제한치	일본의 경우 허용기준의 1/10 이하 수준으로(Cs-137의 경우 10Bq/kg 이하에 해당) 요구하고 있으며, 영국의 경우는 10Bq/kg 이하가 되도록 요구

표 3. 국가별 식품 중 방사성 핵종 분석법

Classification	Korea	USA	Japan	UK
Analytical agency	Ministry of Food and Drug Safety	WEAC (Winchester Engineering Analytical Center) under FDA	Ministry of Health, Labour, and Welfare, and Japan Analytical Center in local governments	FSA (Food Standards Agency), CEFAS
Pre-treatment	Direct (living body) method, curing method, ashing technique Common			
Measurement time	1,800 seconds for the primary measurement (setting equivalent to an emergency) Re-measure for 10,000 seconds, if detected	600 seconds (in case of an emergency)/6,000 seconds	1,800 seconds (in case of an emergency), set the lower limit of detection to be lower than 1/10 of the standard	Each analytical agency to set the level of 10 Bq/kg for the minimum detectable activity
Sample volume	1,000 mL	400 mL	2,000 mL	Each analytical agency to set the level of 20 - 1,000 mL for the minimum detectable activity
Nuclide analyzed	I-131, Cs-134+137			
Remarks	Examination method of radioactivity in Korean Food Code	WEAC analytical methods in FDA	Methods for measurement of radioactivity by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Manual of measurement of radioactivity by Ministry of Health, Labour, and Welfare	UKAS(ISO17025) certification

국내의 식품 중 방사능시험법의 경우, 식품공전 상에 “고순도게르마늄 감마핵종분석기에 의한 시험법”에 기술되어 있다. 이 시험법은 적용범위, 분석원리, 장치, 전처리 및 검체 조제, 시험조작 등 시험을 위한 절차들이 대체적으로 적절하게 기술되어 있다.

표 4. 식품공전 방사능 시험법

	방사능 시험법 내용	세부내용
1	시험법 적용범위	핵종 확인 및 방사능 시험
2	분석원리	원리
3	장치	고순도게르마늄 검출기
4	검체 조제	직접법, 건조법, 회화법
5	시험조작	측정시간, 에너지대 범위, 교정 등

공전에는 계측시간이 10,000초 이상으로 지정되어 있다. 하지만, 2011년과 2012년도의 시달공문에서는 신속검사법(1,800초)을 우선 적용한 후, 방사능이 검출되는 경우 10,000초 확인 검사를 실시하도록 시정하고 있다. 조사결과 대부분의 국내의 방사능 검사기관에서 1,000mL의 시료 바이얼을 사용하는 것으로 나타났으며, 1,000mL 시료 바이얼로 계측시간별 MDA 변화실험을 진행 하였고, 직접법과 수분보정을 하여 MDA 변화실험을 진행하였다. 그리고 MDA 산정방식을 다르게 하여 MDA 변화실험을 진행 하였다.

식품 등 방사능 시험검사기관 17개 기관을 대상으로 감마선 방출핵종 시험분석 현황을 조사하고 통계 분석을 수행하였다. 농산물, 수산물, 축산물, 가공품 총 168종 1,990개의 검사시료에 대하여, 감마선 방출핵종 시험분석 현황을 조사하고 통계 분석을 수행하였다.

표 5. 본 연구에 사용된 식품종류

	종	시료 수	식품 종류
농산물	93	668	토마토, 표고버섯, 포도, 호박 등
수산물	58	919	오징어, 명태, 삼치, 새우, 김, 미역, 다시마 등
축산물	10	48	쇠고기, 돼지고기, 우유, 달걀 등
가공품	7	355	포장육, 두부, 수산가공품, 과자류 등
합계	168	1,990	

식품 등 방사능 시험검사기관 17개 기관들은 아래와 같은 조건으로 계측을 진행하고 있다.

- 계측기 : 고순도게르마늄 검출기(HPGe)
- 계측기 효율 : 대부분의 검사기관에서 60% 효율의 계측기를 사용하고 있고, 일부 기관(10% 이내)에서는 30% 효율의 계측기를 사용하고 있다.
- 전처리 방법 : 모든 검사기관에서 전처리 과정에서 직접법을 이용하고 있다.
- 계측 용기 : 1,000mL 마르벨리 비이커가 사용되고 있다.
- 시료 질량 : 시료의 종류 및 건조도에 따라서 시료별(0.15~1.65kg)로 다르게 나타났다.
- 계측 시간 : 대부분의 검사기관에서 신속검사 지침에 따라서 1,800초 검사를 시행한 후에, 방사능이 검출된 경우에는 10,000초의 확인검사를 시행하고 있다. 다만, 계측 효율이 30%로 낮은 계측기를 사용하는 경우에는 처음부터 10,000초를 검사하는 경우도 있다.
- 분석 방법 : 방사능 분석 프로그램으로는 CANBERRA사의 GENIE 2000 프로그램과 ORTEC사의 Gamma Vision-32 V6를 사용하고 있다.

MDA 변화에는 여러 가지 방법들이 있다. 계측기 효율 변화에 따른 MDA 변화, 계측시간의 변화에 따른 MDA 변화, 계측기 제조사에 따른 MDA 변화, 시료밀도 변화에 따른 MDA 변화, MDA 분석 방법에 따른 영향이 있다.

먼저 계측기 효율 변화에 따른 MDA 변화는 MDA를 저감하는데 매우 효과적이다. 하지만 비용이 많이드는 단점을 가지고 있다. 동일한 계측기제조사 모델에 대해, 효율이 30%, 60% 계측기로 동일 시료로 저밀도 시료, 고밀도 시료를 분석하였을 때, 1/2 정도 차이가 났다.

표 6. 30%효율 CANBERRA HPGe MDA

- 계측시간 : 1,800 sec
- 계측기효율 : 30%

CANBERRA HPGe - Currie MDA			
ROI Width	비고	Cs-137 MDA (Bq/kg)	
		(저밀도)	(고밀도)
±1.25 FWHM	Currie MDA	2.67	1.24

표 7. 60%효율 CANBERRA HPGe MDA

- 계측시간 : 1,800 sec
- 계측기효율 : 60%

CANBERRA HPGe - Currie MDA			
ROI Width	비고	Cs-137 MDA (Bq/kg)	
		(저밀도)	(고밀도)
±1.25 FWHM	Currie MDA	1.11	0.65

계측시간의 변화에 따른 MDA 분포도이다. 그림 3.과 표 8.에 동일한 계측 효율을 적용한 경우의 자료를 이용하여, 계측시간에 따른 MDA 변화를 분석한 결과를 제시하였다. 계측시간이 1,800초에서 10,000초로 증가됨에 따라서, 평균 MDA는 0.65Bq/kg에서 0.26Bq/kg으로 현저히 감소됨을 알 수 있다. 계측시간의 증가가 MDA에 수준을 낮추는 데에 유용함을 알 수 있다.

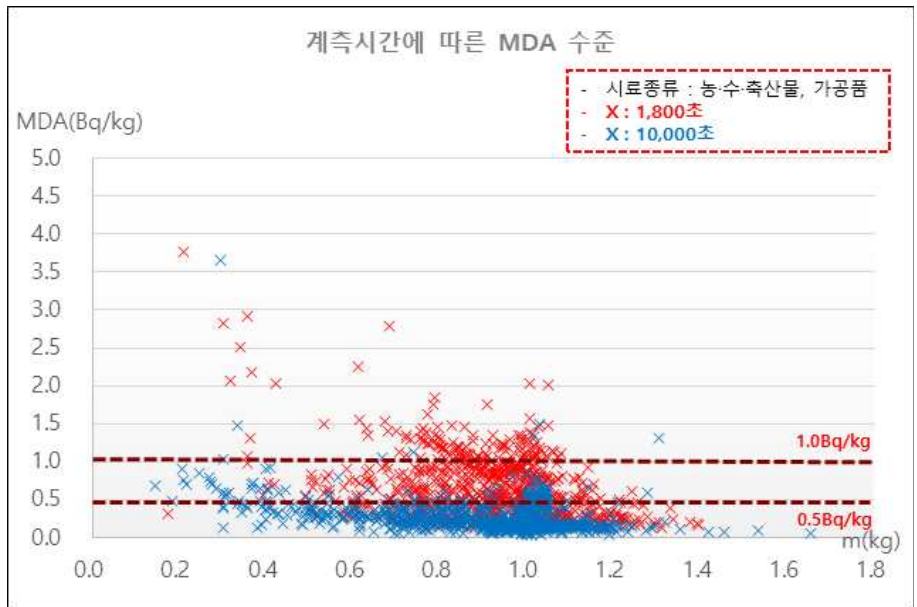


그림 3. 계측시간에 따른 MDA 수준 변화

표 8. 계측시간에 따른 MDA 수준 변화

계측시간 (sec)	시료개수	평균 MDA (Bq/kg)	0.5Bq/kg 초과율 (%)	1.0Bq/kg 초과율 (%)	10Bq/kg 초과율 (%)
1,800	786	0.65	53.8	17.2	0.0
10,000	1,079	0.26	8.5	0.7	0.0

아래의 그림 4.~그림 5.와 표 9.~표10.을 보면 계측시간을 증가시키는 것이 MDA를 줄이는데 효과적이기는 하지만, 시간을 크게 늘려도 MDA의 저감율은 제한적인 것을 확인하였다. 따라서 계측시간의 증가는 MDA를 부분적으로 저감하는데 유용한 수단임을 확인하였다. 추가적으로 계측시간의 증가로 식품 수출입 시 유통식품의 신선도 유지 및 통관상의 보관비용을 절감, 식품 방사능 안전관리 업무의 신속성에는 불합리적으로 보인다.

표 9. 1,800초부터 10,000초까지의 MDA 변화

시간 (sec)	Cs-137 MDA (Bq/kg)	
	(저밀도)	(고밀도)
1,800	1.11	0.65
3,000	0.98	0.49
4,000	0.87	0.39
5,000	0.74	0.35
6,000	0.66	0.32
7,000	0.65	0.28
8,000	0.60	0.27
9,000	0.56	0.26
10,000	0.53	0.24
시료량 (kg-sample)	0.418	0.896
비 고	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Currie MDA</li> <li>· 효율 60% CANBERRA 계측기</li> <li>· FWHM ±1.25</li> </ul>	

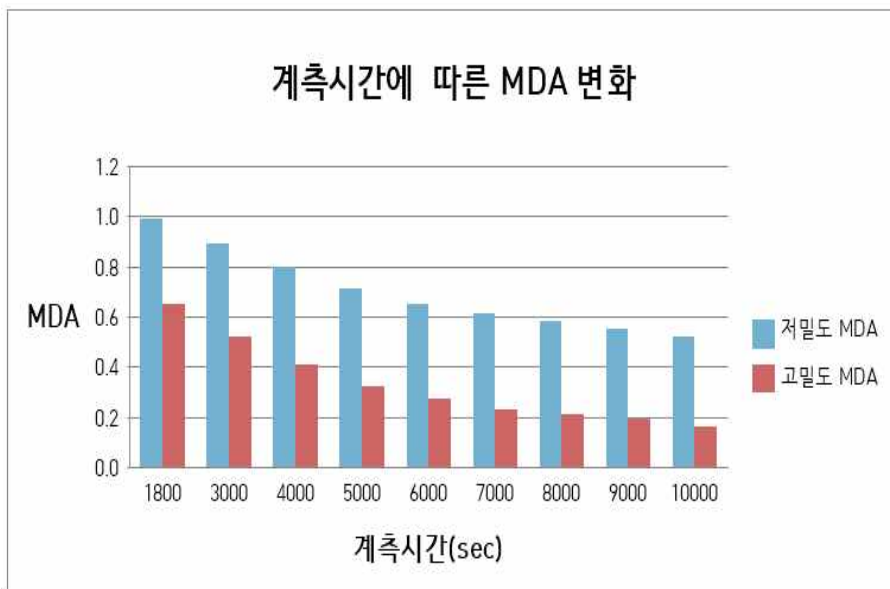


그림 4. 1,800초부터 10,000초까지의 MDA 변화



표 10. 10,000초부터 20,000초까지의 MDA 변화

시간 (sec)	Cs-137 MDA (Bq/kg-fresh)	
	고등어	다시마
10,000	0.469	0.559
11,000	0.447	0.524
12,000	0.425	0.498
13,000	0.410	0.470
14,000	0.390	0.445
15,000	0.375	0.428
16,000	0.361	0.411
17,000	0.352	0.400
18,000	0.344	0.388
19,000	0.343	0.373
20,000	0.330	0.358
시료량 (kg-fresh)	1.08	0.91
비 고	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Currie MDA</li> <li>· 효율 30% CANBERRA 계측기</li> <li>· FWHM ±1.25</li> </ul>	

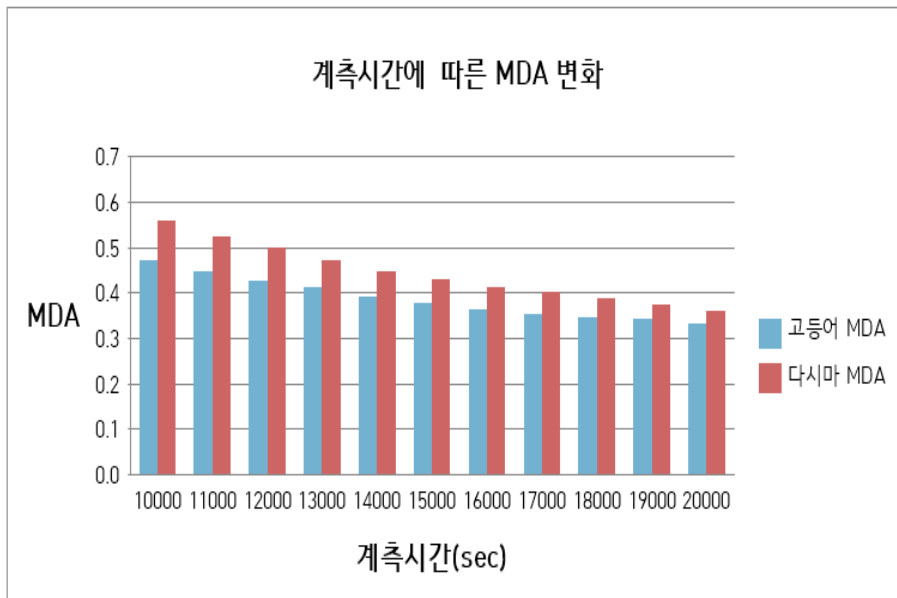


그림 5. 10,000초부터 20,000초까지의 MDA 변화

현재 식품 중 방사능 분석에 주로 사용되는 계측기 제조사는 ORTEC사와 CANBERRA 사이다. 이 두 회사는 각자 개발한 분석프로그램을 달리 사용하고 있다. 제조사에 따른 분석 결과의 차이를 실험을 통해 비교분석하였다. 표 11.과 표 12.의 실험을 통해 비교분석한 결과, 제조사에 따른 차이는 통계적으로 유의한 수준에 거의 없는 것으로 분석되었다.

표 11. ORTEC HPGe MDA

- 계측시간 : 1,800 sec
- 계측기효율 : 60%

ORTEC HPGe - NRC Reg. Guide 4.16			
Background	비교	Cs-137 MDA (Bq/kg)	
		(저밀도)	(고밀도)
Auto	Currie MDA	0.99	0.65

표 12. CANBERRA HPGe MDA

- 계측시간 : 1,800 sec
- 계측기효율 : 60%

CANBERRA HPGe - Currie MDA			
ROI Width	비교	Cs-137 MDA (Bq/kg)	
		(저밀도)	(고밀도)
±1.25 FWHM	Currie MDA	1.11	0.65

검사식품의 MDA는 검사질량과의 높은 상관관계를 보여주었다. 저밀도 시료 (0.4kg/L 이하)의 경우, 그림 6.과 표 13.에 제시한 바와 같이 MDA 평균값은 0.94Bq/kg이었고, 0.5Bq/kg 초과율은 56.9%, 1.0Bq/kg 초과율은 20.7%, 10Bq/kg 초과율은 0.0%인 것으로 분석되었다. 중밀도 시료(0.4kg/L ~ 0.7kg/L)의 경우, MDA 평균값은 0.48Bq/kg이었고, 0.5Bq/kg 초과율은 30.9%, 1.0Bq/kg 초과율은 5.7%, 10Bq/kg 초과율은 0.0%인 것으로 분석되었다. 고밀도 시료(0.7kg/L 이상)의 경우, MDA 평균값은 0.40Bq/kg이었고, 0.5Bq/kg 초과율은 25.6%, 1.0Bq/kg 초과율은 6.9%, 10Bq/kg 초과율은 0.0%인 것으로 분석되었다. 아래의 그림과 표는 시료의 밀도에 직접적인 영향을 주는 수분도 변화에 따른 MDA 변화 실험을 수행하였다.

시료의 유통 및 보관 상태에 따라 시료의 수분함유도는 달라지게 되며, 시료의 수분함유도에 따라, 시료별로 MDA 및 측정 방사능 수준이 매우 큰 변화를 보이므로, 일관성 있는 분석 결과를 얻기 위해서 수분 보정은 필요한 절차이다. 수분보정을 하지 않을 경우에, 동일한 시료에 대한 보관 상태나 유통 상태에 따라 서로 다른 방사능 분석치가 나오기 때문에, 분석의 재현성과 안정성을 위해서도 수분보정은 필요하다. 일반적으로 수분보정이 가능한 시료는 제한되어 있으며, 수분보정을 하기 위해 소요되는 시간도 길기 때문에, MDA가 매우 높은 수분 보정이 가능한 저밀도 시료를 대상으로만 수분보정을 할 수 있는 단점을 가지고 있다. 그리고 간단한 계산법으로 수분보정을 할수도 있지만 각 시료의 수분도를 체크해야 하기 때문에 실 연구에 사용하기에는 다소 부족한 부분이 있다.

생새우로부터 건조새우까지 수분도가 다른 새우시료를 이용하여 건조시간에 따른 시료질량과 수분보정질량(원 시료질량)의 변화를 측정하였다. 건조도가 클수록 1L 마르벨리비이커에 들어가는 시료의 순 질량은 감소하지만, 수분을 포함한 원 시료의 질량은 증가함을 알 수 있다.

표 13. 건조도에 따른 질량변화

	건조시간 (hr)	원시료량 (kg)	건조량 (kg)	시료질량 (kg-sample/1L)	수분보정질량 (kg-fresh/1L)
Sample 1 (생시료)	0	2.10	2.10	1.16	1.16
Sample 2 (건조시료)	3	2.23	1.89	1.09	1.29
Sample 3 (건조시료)	6	2.15	1.35	0.94	1.50
Sample 4 (건조시료)	9	2.11	1.10	0.89	1.71
Sample 5 (건조시료)	12	2.04	0.71	0.60	1.72

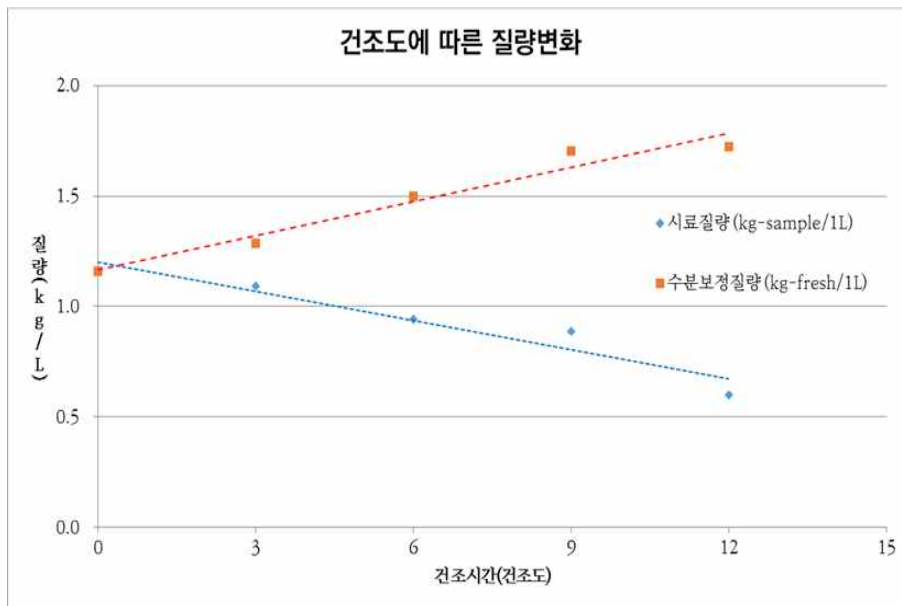


그림 6. 건조도에 따른 질량변화

건조도를 변화시킨 다른 새우시료를 계측기를 이용하여 측정한 후, 수분 미보정 MDA와 수분보정 MDA를 산출하였다. 그림 7.과 표 14.에 나타난 것처럼, 건조도가 큰 시료(마른 시료)의 경우, 수분 미보정한 결과와 수분 보정한 결과의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이 실험 결과를 통해 저밀도 시료에서는 수분 보정을 할 필요성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

표 14. 수분보정에 따른 MDA 변화

	샘플시료량 (kg-sample/1L)	수분보정샘플시료량 (kg-fresh/1L)	수분미보정 MDA (Bq/kg-sample/1L)	수분보정 MDA (Bq/kg-fresh/1L)
Sample 1 (생시료)	1.16	1.16	0.43	0.43
Sample 2 (건조시료)	1.09	1.29	0.50	0.42
Sample 3 (건조시료)	0.94	1.50	0.57	0.36
Sample 4 (건조시료)	0.89	1.71	0.68	0.35
Sample 5 (건조시료)	0.60	1.72	0.79	0.28

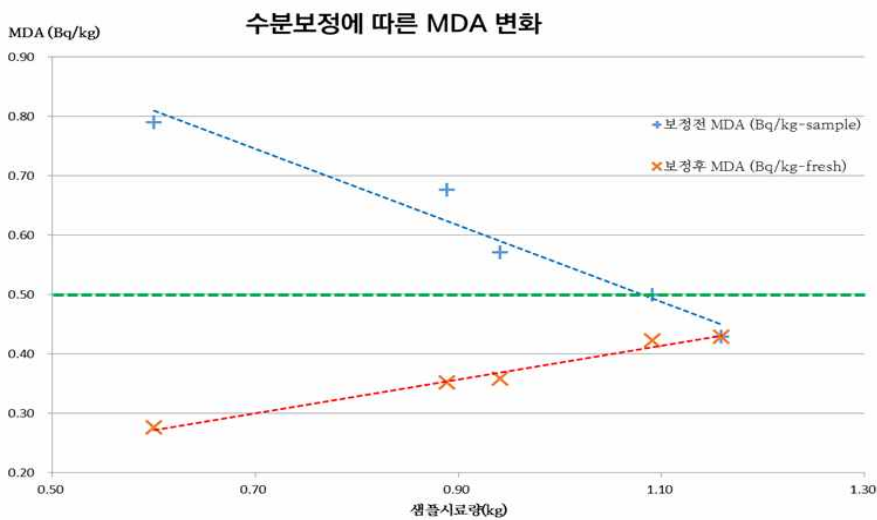


그림 7. 수분보정에 따른 질량변화

수분보정 대상시료 및 절차에 대해서는 공전에 다음과 같이 제시되어 있다.

9.1.1.4 수분을 원상태로 복원하여 섭취하는 식물

- 건조 버섯류, 건조 해조류, 조제분유 등 일반적으로 수분을 원상태로 복원하여 섭취하는 제품은 섭취시의 상태(제조사가 제시한 섭취방법)와 동일한 상태가 되도록 처리한 것을 시료로 한다. 다만, 원상태로 복원하지 않고 실험을 실시하는 경우에는 기준을 적용할 때 수분함량을 고려하여 환산적용 할 수 있다.

저밀도 시료에 대해 수분함량을 고려하여 환산적용 하는 수분보정을 위한 두 가지의 알고리즘을 다음과 같이 제시하였다.

○ 수분보정 알고리즘 1

- 샘플 시료량,  $M_{sample}$  (kg-sample/L)
- 샘플시료 수분함유율,  $W_{sample}$
- Fresh시료 수분함유율,  $W_{fresh}$
- 수분 보정된 샘플 시료량,  $M_{fresh}$  (kg-fresh/L)

$$M_{fresh} = M_{sample} \times \frac{(1 - W_{sample})}{(1 - W_{fresh})} \quad (1)$$

수분보정 알고리즘 1에서는 샘플시료와 Fresh시료의 수분함유율( $W_{sample}$ ,  $W_{fresh}$ ) 자료가 입력변수로 요구된다.

○ 수분보정 알고리즘 2

- 샘플시료의 부피를 측정 한 후에 동일한 부피의 생 시료 질량으로 대체하여 사용한다.

수분보정 알고리즘 2는 수분보정 알고리즘 1에 비해 정확도는 다소 떨어지지만, 입력 자료가 간단한 장점이 있다.

표 15.와 그림 8.에 수분보정 방법에 따른 MDA 변화 실험 결과를 나타내었다. 단순화된 수분보정방법인 알고리즘2가 보수적인 결과를 주는 것을 확인할 수 있다. 결론적으로 수분 보정은 저밀도 시료에서 올바른 MDA를 산정하는데 매우 효과적이며, 본 연구에서 제안한 알고리즘1과 알고리즘2가 적용될 수 있다.

표 15. 수분보정 방법에 MDA 변화

· 계측용기 : 1L 마르넬리 비이커

	시료질량 (kg-sample/1L)	수분보정질량 (kg-fresh/1L)	
		알고리즘 1 †	알고리즘 2 ‡
Sample 1 (생시료)	1.16	1.16	1.16
Sample 2 (건조시료)	1.09	1.29	1.16
Sample 3 (건조시료)	0.94	1.50	1.16
Sample 4 (건조시료)	0.89	1.71	1.16
Sample 5 (건조시료)	0.60	1.72	1.16

† 정확한 수분보정 방법

‡ 보수적 수분보정 방법

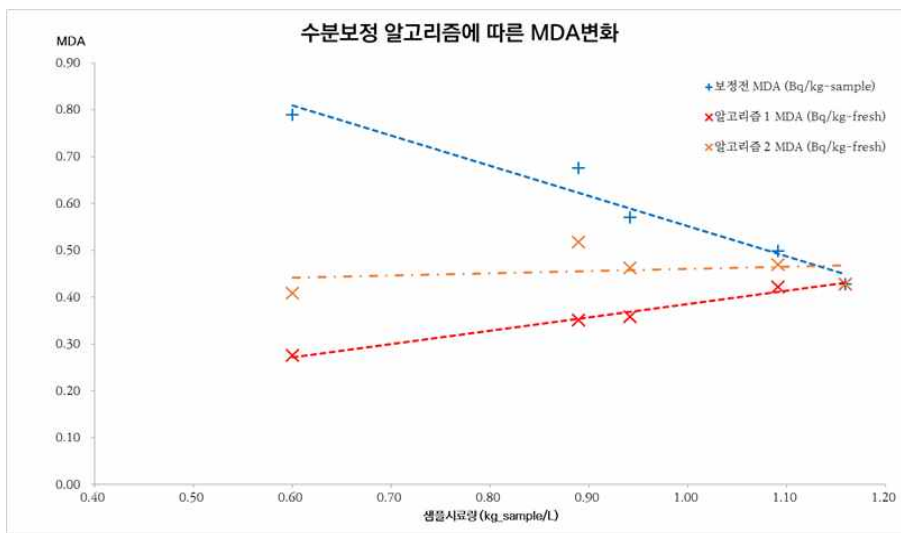


그림 8. 수분보정에 따른 MDA 변화

그리고 마지막으로 MDA 분석 방법에 따른 영향이 있다. 동일한 계측효율, 동일한 계측시간, 동일한 식품(갈치, 고등어, 고구마)에 대한 MDA 산포도를 분석하여 그림 9.~그림 10. 그리고 표 16.~표 18.에 나타내었다. 그림 9.~그림 10.. 그리고 표 16.~표 18.에 보인 것처럼, 동일한 계측효율, 동일한 계측시간, 동일한 식품(갈치, 고등어, 고구마)에 대한 MDA 퍼짐은 상당한 것으로 분석되었다. MDA의 산포의 분석에 가장 큰 영향을 끼치는 인자로 MDA 산정방식의 차이를 들 수가 있다. MDA는 선택되는 MDA 모델 종류, MDA 산정 시 사용되는 신뢰도준위, MDA 산정 시 사용되는 분석피크 폭(ROI Width)에 의해 영향을 받는다.

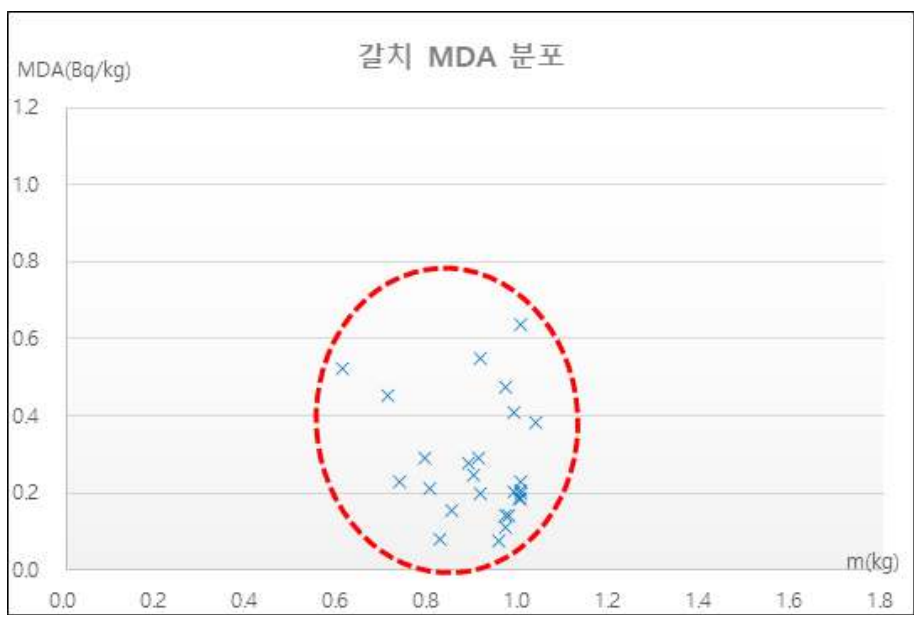


그림 9. 갈치 시료의 MDA 산포도

표 16. 갈치 시료의 MDA 산포도

시료개수	평균 MDA (Bq/kg)	표준편차 MDA (Bq/kg)
26	0.27	±0.15



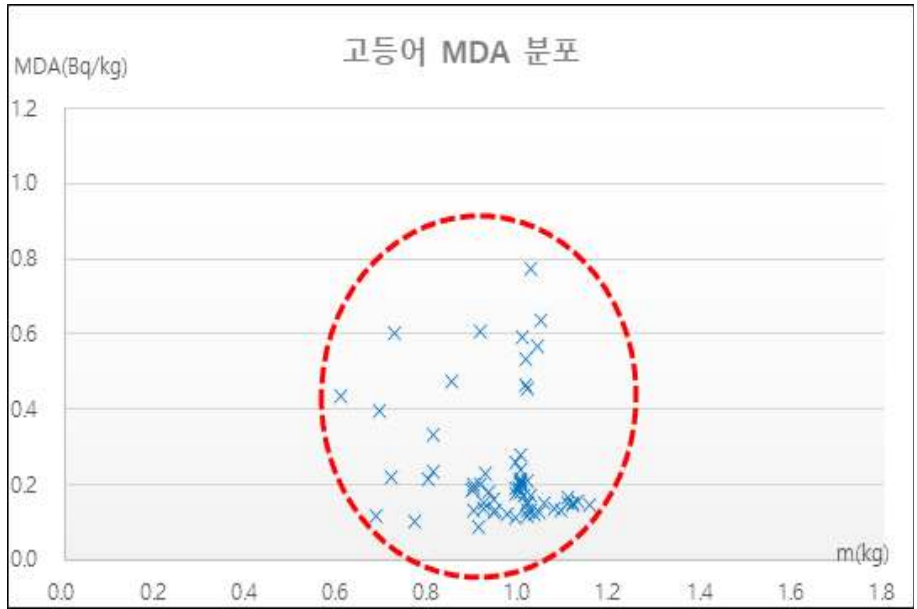


그림 10. 고등어 시료의 MDA 산포도

표 17. 고등어 시료의 MDA 산포도

시료개수	평균 MDA (Bq/kg)	표준편차 MDA (Bq/kg)
65	0.24	±0.16

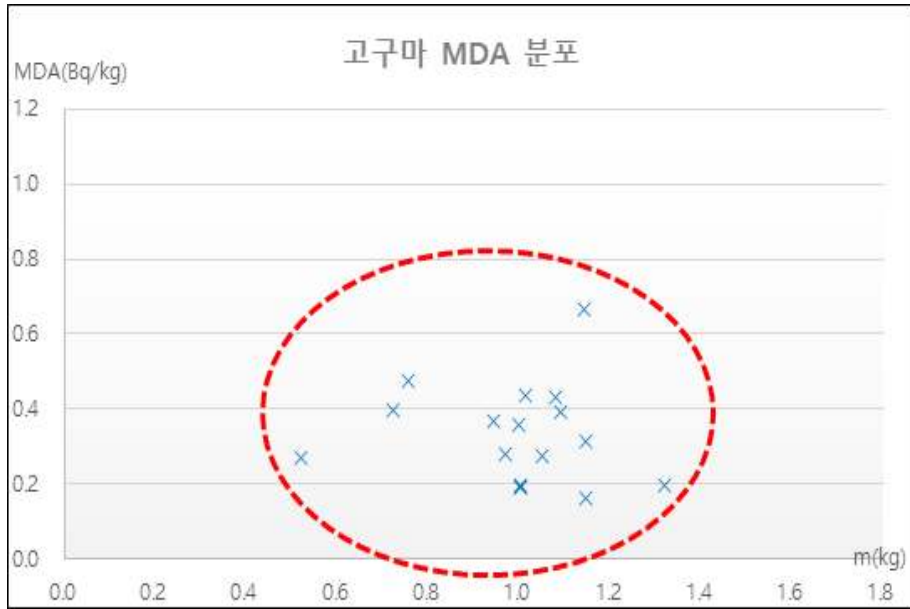


그림 11. 고구마 시료의 MDA 산포도

표 18. 고구마 시료의 MDA 산포도

시료개수	평균 MDA (Bq/kg)	표준편차 MDA (Bq/kg)
17	0.33	±0.18

상세한 실험을 통해서 이러한 인자에 대한 영향을 분석하고, 이를 통해 MDA를 효율적으로 낮출 수 있는 방법과 MDA를 산정하는 방식을 표준화하는 방안에 대해 제시하였다.

최소검출가능방사능(MDA)란, 계측시스템의 적정한도를 의미하는 지표로서, 다음과 같은 인자에 의해 결정된다.

- 백그라운드 계측 카운트
- 시료 계측시간
- 에너지별 계측효율
- 계측시료의 무게

MDA를 계측하는 모델로는 다양한 모델들이 존재한다. 표 26.에 여러 가지 모델 중에서 대표적인 모델을 정리하여 제시하였다. KTA는 독일규제기관에서 채택한 모델로서, Currie 모델의 상수 부분을 수정한 것이다. ISO11929 MDA 모델에서는 분석시스템과 분석 불확도를 포함하는 MDA 추정 모델이다. 이외에 계측기 프로그램 제작사에서 자체적으로 개발한 MDA 모델 등 다양한 모델이 존재한다.

표 19. MDA 종류 Calculation Methods

Method	설명	비고
Currie MDA	Standard method for estimating MDA - NRC Reg. Guide 4.16	$L_D = k^2 + 2k\sigma_0$
KTA MDA	Used for German Regulatory Compliance	$L_D = 2k^2 + 2k\sigma_0$
ISO11929 MDA	효율보정에 대한 Uncertainty 고려	
LLD	Blank sample or empty shield를 측정하는 경우	

국가 간, 또는 국내 검사기관간의 통일되고 일관된 측정 자료를 얻기 위해서는 MDA 예측 모델을 표준화하여 사용할 필요가 있다. 그렇지 아니한 경우, 동일한 시료에 대해서 기관별로 다른 분석 결과를 생산할 수 있기 때문이다.

최소검출가능방사능(MDA)을 예측하기 위한 가장 표준적인 모델로는 Currie MDA 모델이 있다. 이 모델은 미국 NRC에서 채택한 모델이며, 우리나라의 모든 연구소와 원자력규제기관에서도 이 모델을 채택하여 사용하고 있다. 따라서, 식약처의 식품방사능 안전관리 업무에서도 Currie MDA 모델을 표준모델로 지정하여 사용하는 것을 추천한다.

- Currie MDA 모델에는 신뢰도라는 인자와 분석피크 폭이라는 인자를 설정해 주어야 한다.
- Currie MDA 모델에는 신뢰도인자와 관련된 내용을 그림 12.에 도시하였다. 이때 LC는 핵종의 존재여부를 판단하는 임계준위가 되고, LD는 최소검출가능준위가 된다.

$$L_C = k\sigma_0 \quad (2)$$

$$L_D = k^2 + 2L_c = k^2 + 2k\sigma_0 \quad (3)$$

여기서,

$$\sigma_0 = \sqrt{2\sigma_B^2} \quad (\text{for unidentified peak})$$

$$= \sqrt{B^2 + \left(\frac{N}{2m}\right)^2 (B_1 + B_2)} \quad (\text{for identified peak})$$

- $k$  : 신뢰도 준위에 따라 표 26.에 주어진 Currie 상수,
- $\sigma_B$  : 백그라운드에 의한 표준편차(오차),
- $N$  : 그림 41.에 주어진 피이크 ROI의 채널수,
- $B, B_1, B_2$  : 그림 41.에 주어진 피이크 ROI에서의 백그라운드계수치이다.

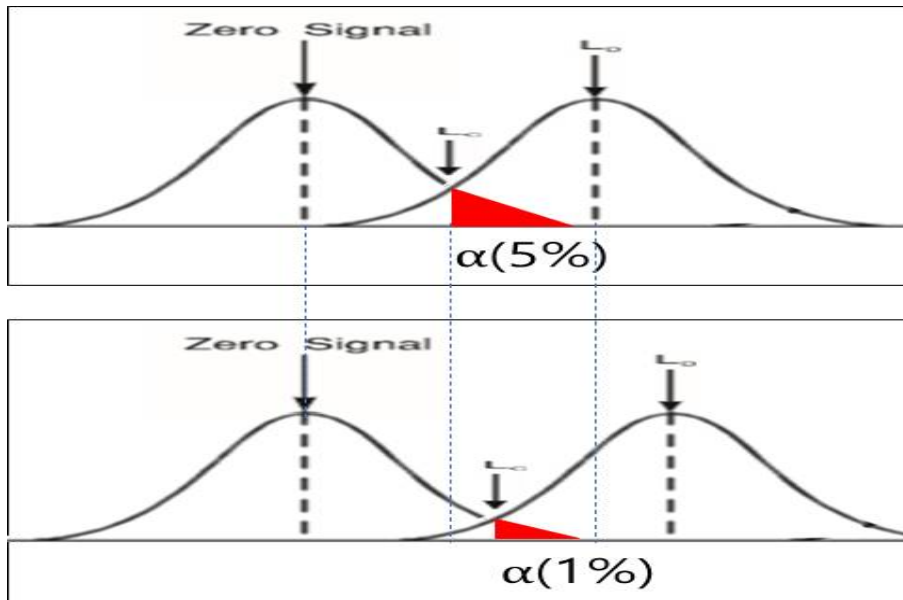


그림 12. Confidence Level of Currie MDA Calculation

- (3)식에서 식(2), 식(3)에서  $k$  값은 신뢰도 준위에 따라 표 20.처럼 통계적으로 결정되는 상수이다.

표 20. 신뢰도 준위에 따른  $k$  값 및 Currie Constants  $C_1, C_2$

Confidence Factor	Confidence level	$k$	$C_1(k^2)$	$C_2(2k)$
1%	99%	2.326	5.41	4.65
5%	95%	1.645	2.71	3.29
10%	90%	1.282	1.64	2.56

- MDA 산정을 위한 신뢰도 준위는 방사선 분석 시에 통상적으로 95% 신뢰도 준위를 사용하며, 이는 미국규제위원회에서 추천하는 신뢰도 준위이다.

- 95% 신뢰도 준위를 적용하면, (3)식으로 표현되는 최소검출가능준위  $L_0$ 는 다음과 같이 된다.

$$L_D = k^2 + 2k\sigma_0 \equiv C_1 + C_2\sigma_0 = 2.71 + 3.29\sigma_0 = 2.71 + 4.65\sqrt{B_1} \quad (3-1)$$

- (3)식이나 (3-1)식으로 주어지는 최소검출가능준위  $L_0$ 를 비방사능으로 변환하면, 다음과 같이 MDA 식이 유도된다.

$$MDA = \frac{L_D}{\epsilon \cdot Y \cdot T \cdot m} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (4)$$

여기서,

$\epsilon$  : 피이크 ROI에서의 검출 효율,

$Y$  : 방사선 방출 분율,

$T$  : 측정시간(sec),

$m$  : 시료질량(kg)이다.

- (4)식으로 주어지는 MDA식에 95% 신뢰도준위를 적용하면 다음과 같은 95% 신뢰도 Currie MDA 식을 유도할 수 있다.

$$95\% \text{ Confidence Currie MDA} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{N_{BKG}}}{\epsilon \times Y \times m \times t_m} \quad (5)$$

여기서,

$MDA$  : 최소검출가능방사능(Bq/kg),

$N_{BKG} = r_{BKG} \times t_m$  : 백그라운드계수치,

$Y$  : 방사선 방출 분율,

$r_{BKG}$  : 백그라운드계수율(counts/sec),

$t_m$  : 측정시간(sec),

$N_{BKG}$  : 백그라운드계수치(counts),

$m$  : 시료질량(kg)을 나타낸다.

- Currie MDA 모델에는 그림 42.에 나타낸, 분석피크 폭(ROI Width)이라는 인자를 설정해 주어야 한다. 분석피크 폭은 사용자가 선택하여 지정할 수도 있고, 경우에 따라서는 스펙트럼 분석 프로그램에서 자동적으로 설정되기도 한다.

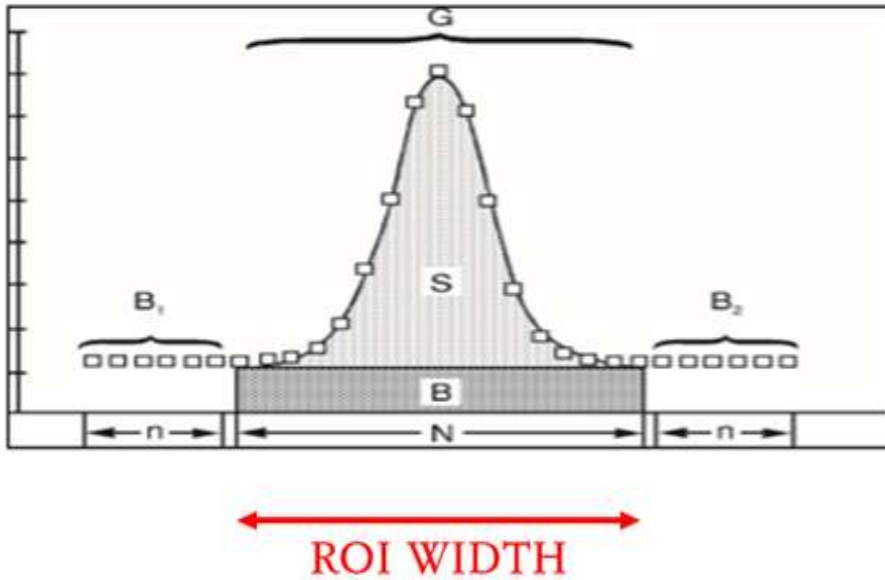


그림 13. 분석피크 폭(ROI Width)

- 일반적으로 분석피크 폭이 넓을수록, 원하는 핵종을 찾아내는 데에는 유리하다. 반면에 지나치게 넓은 분석피크 폭을 백그라운드 계수치의 증가에 의해 MDA가 증가하는 불리함이 발생한다.

- 표 21.에 나타난 것처럼, ISO11929에서는 분석피크 폭(ROI Width)을 일반적으로  $\pm 1.25$  FWHM으로 설정하도록 권고하고 있다.

표 21. ROI Width

ROI Width	비고
$\pm 0.6$ FWHM	ISO11929 <sup>13)</sup> “Dominant Background”
$\pm 0.8$ FWHM	Genie2000 <sup>14)</sup> “Minimum Value”
$\pm 1.25$ FWHM	ISO11929 <sup>13)</sup> “Otherwise”
$\pm 4.00$ FWHM	Genie2000 <sup>14)</sup> “Default Value”

- MDA 모델에 사용되는 인자들의 영향 분석이다. CANBERRA 분석프로그램에서, MDA 모델 선택에 따른 영향 분석실험결과를 표 22.와 그림 14.에 제시하였다. 실험 결과, Currie MDA 모델을 사용한 경우와 KTA MDA 모델을 사용한 경우 약 10% 정도의 MDA 차이가 발생하였다.



표 22. MDA 모델에 따른 MDA 변화 (CANBERRA)

Method	Cs-137 MDA (Bq/kg)	비고
<b>Currie MDA</b>	<b>0.472</b>	
KTA MDA	0.514	

- MDA Confidence Factor 5%  
 - ROI Width  $\pm 1.25$  FWHM  
 - MDA Constants Add Constant 2.71, Multiplier 3.29

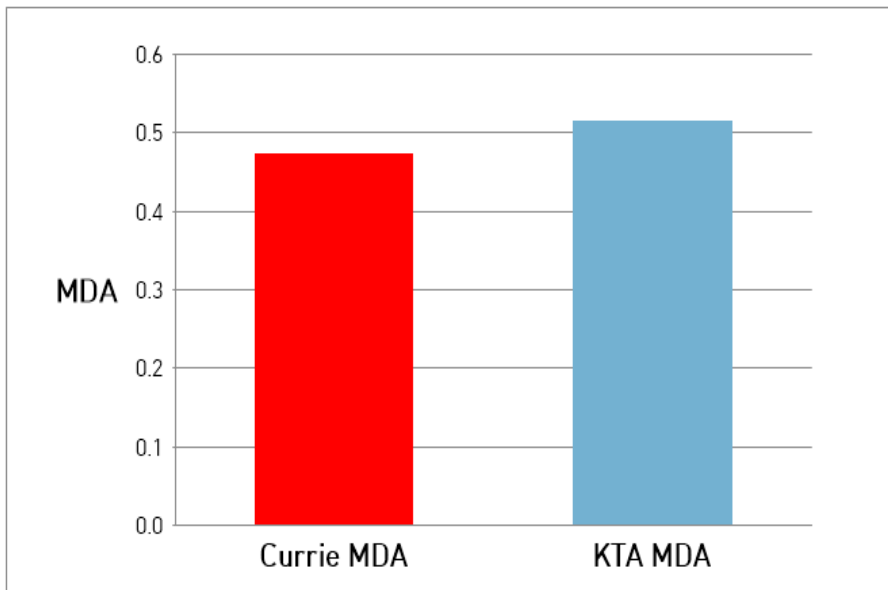


그림 14. MDA 모델에 따른 MDA 변화 (CANBERRA)

○ MDA 분석 시 선택하는 신뢰도준위(C Confidence Level)에 따른 MDA 변화 측정 실험 결과를 표 23.와 그림 15.에 나타내었다. 신뢰도수준(C Confidence Level)이 높아질수록 MDA는 커지는 것을 알 수 있다.

표 23. 신뢰도준위(C Confidence Level)에 따른 MDA 변화

Confidence Level(%)	90	<b>95</b>	99
Currie MDA Constants (Add Constant, Multiplier)	1.64, 2.56	<b>2.71, 3.29</b>	5.41, 4.65
Cs-137 MDA (Bq/kg)	0.466	<b>0.608</b>	0.884
ROI Width : ±2.25 FWHM			

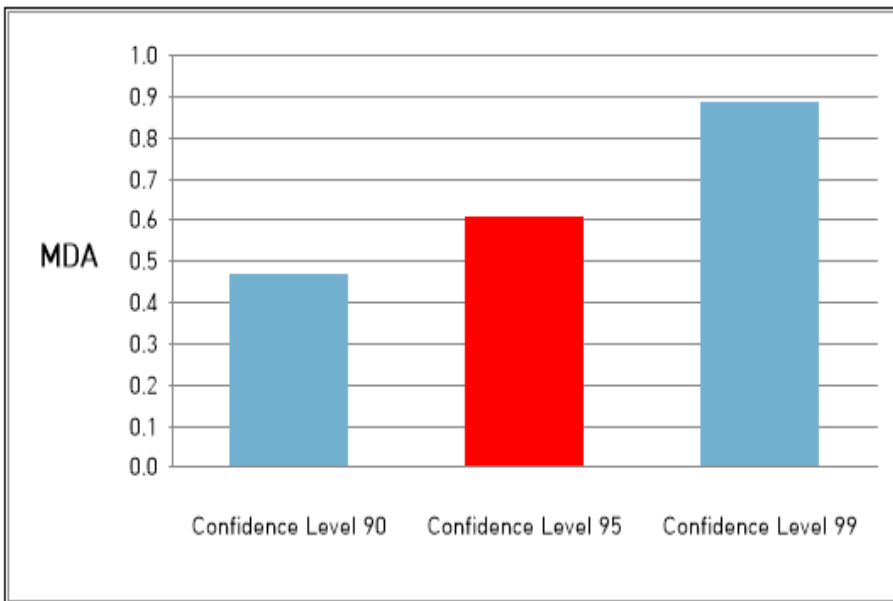


그림 15. 신뢰도준위(C Confidence Level)에 따른 MDA 변화

○ MDA 분석 시 선택하는 분석피크 폭(ROI Width) 변화에 따른 MDA 변화 측정 실험 결과를 표 24.와 그림 16.에 나타내었다. 분석피크 폭(ROI Width)이 넓어질수록 MDA는 커지는 것을 알 수 있다.

표 24. 분석피크 폭(ROI Width) 변화에 따른 MDA 변화

ROI Width	Cs-137 MDA (Bq/kg)	비고
±0.6 FWHM	-	ISO11929 “Dominant Background”
±0.8 FWHM	0.403	Genie2000 “Minimum Value”
±1.00 FWHM	0.455	-
±1.25 FWHM	0.472	ISO11929 “Otherwise”
±2.25 FWHM	0.608	Chosun University
<b>±4.00 FWHM</b>	<b>0.721</b>	<b>Genie2000</b> <b>“Default”</b>

MDA Confidence Factor 5% (Currie MDA Constants 2.71, 3.29)

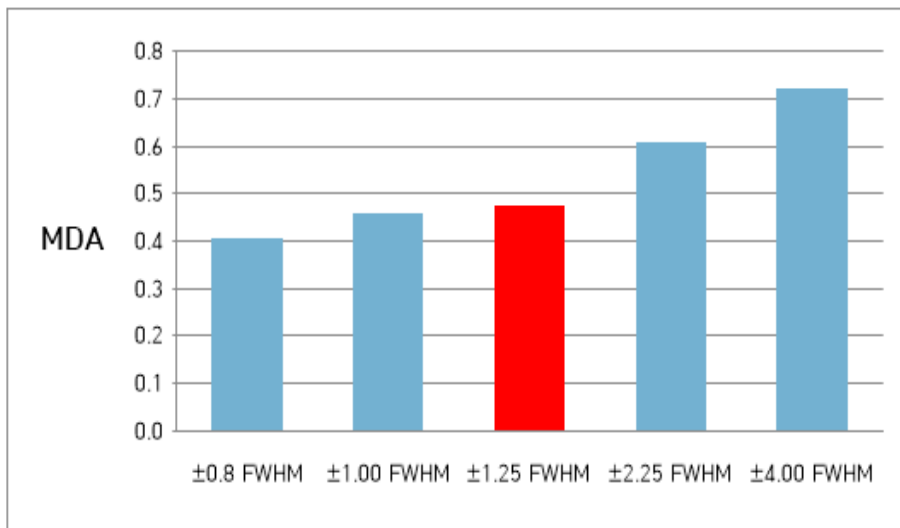


그림 16. 분석피크 폭(ROI Width) 변화에 따른 MDA 변화

결론적으로 MDA 산정 시에 사용하는 모델의 종류, 신뢰도준위(Certainty Level)의 크기, 분석피크 폭(ROI Width)은 MDA에 커다란 차이를 발생시키는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 국가 간, 또는 국내 검사기관간의 통일되고 일관된 측정 자료를 얻기 위해서는 MDA 예측 모델, 신뢰도준위, 분석피크 폭에 대해서 표준화를 할 필요가 매우 크다는 결론을 얻을 수 있었다. 측정기관별로 서로 다른 분석 인자를 사용하는 경우, 동일한 시료에 대해서 기관별로 다른 분석 결과를 생산할 수 있기 때문이다.

- MDA 산정 모델의 경우, 국내·외 측정기관에서 통용되는 Currie MDA 모델을 표준모델로 지정하는 것이 타당하다고 판단된다.
- MDA 산정 시 신뢰도 준위는 NRC나 국내 원자력규제기관에서 사용하고 있고, 방사능 분석 시 일반적으로 사용하는 95% 신뢰도준위를 표준 값으로 지정하는 것이 타당하다고 판단된다.
- 분석피크 폭은 ORTEC사의 경우 자동설정기능을 사용하고, CANBERRA사의 경우에는 사용자가 임의로 지정하도록 되어 있는데, 이 경우에는 ISO11929에서 추천하는  $\pm 1.25$  FWHM을 사용할 것이 타당하다고 판단된다.
- CANBERRA사의 GENIE™ 2000 Spectroscopy 프로그램에서 사용되는 MDA 선택 메뉴를 그림 17.에 나타내었고, 신뢰도인자(Certainty Level)와 분석피크 폭(ROI Width) 선택 메뉴를 그림 18.에 나타내었다.

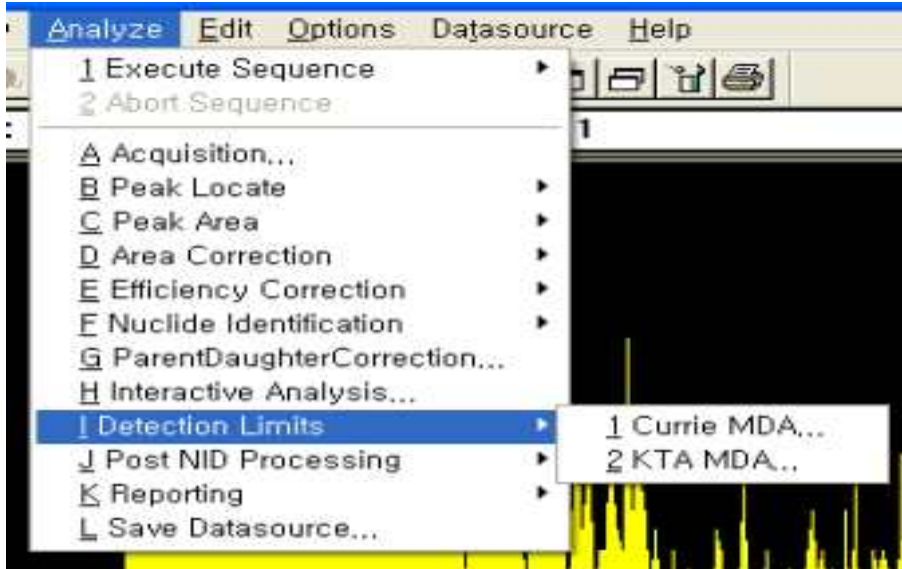


그림 17. MDA 모델 선택 (CANBERRA)

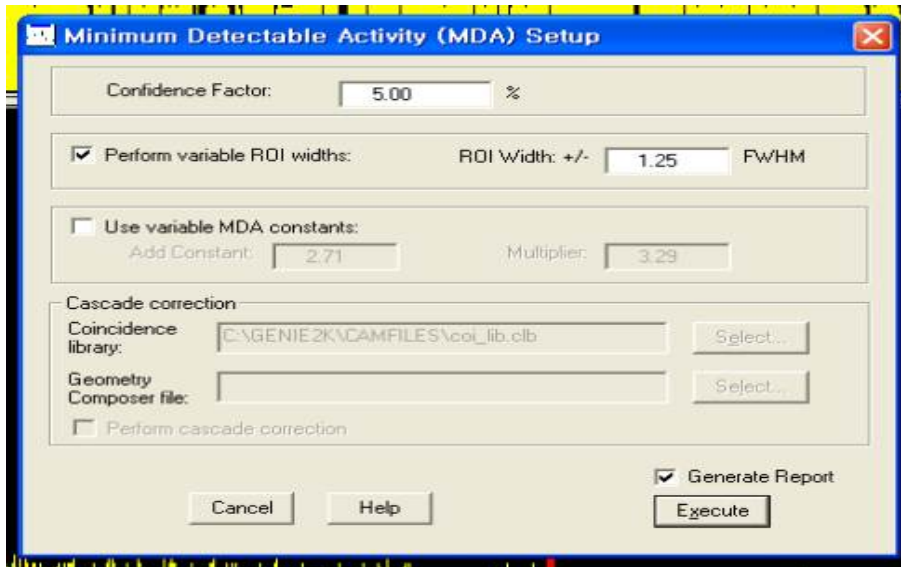


그림 18. 신뢰도인자(Confidence) 및 분석피크 폭(ROI Width) 선택



표 25. 계측시간에 따른 현행 계측자료의 MDA 통계 분석

condition <sup>1)</sup>		data statistical analysis					Remarks		
CASE	time(sec)	sample #	MDA(Bq/kg)			MDA over case(%)		merits (benefit)	demerits (weakness)
			min	mean	max				
Case 2	1,800 <sup>2)</sup>	786	0.122	0.650	6.131	1.0	17.2	짧은 계측시간으로 시료의 처리가 용이	평균 MDA가 0.65로 다소 높음
						0.5	53.8		
	10,000 <sup>3)</sup>	1079	0.036	0.263	3.659	1.0	0.7	평균 MDA가 0.26으로 비교적 낮음	신속한 시료처리의 어려움 발생
						0.5	8.5		

Note 1 : MDA 산정 모델은 각 기관별로 상이함

- 1,800초 계측시간의 경우, 1.0Bq/kg을 초과하는 경우가 17.2%이었고, 0.5Bq/kg을 초과하는 경우는 53.8%에 이르고 있다.
- 10,000초 계측시간의 경우, 1.0Bq/kg을 초과하는 경우가 0.7%이었고, 0.5Bq/kg을 초과하는 경우도 8.5%에 불과하였다.

- MDA 제한치 수준은 검사시간 및 절차에 영향을 주며, 검사 수수료에도 직접적인 영향을 준다. MDA와 검출 시간의 관계를 그림 19.에 제시하였다. MDA가 낮아질 경우, 요구되는 계측 시간은 지수적으로 증가됨을 알 수 있다. 낮은 MDA 수준에서는 계측시간의 증가를 통해 MDA를 낮추는 것은 한계가 있다는 것을 본 연구에서 수행한 실험의 결과에서도 확인할 수 있다

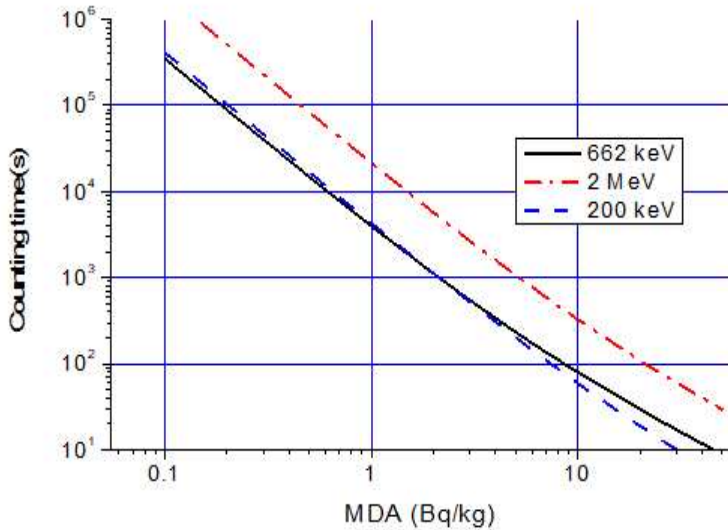


그림 19. 전형적 HPGe(30% 효율) 감마분석기의 MDA와 계측시간 관계

- 계측시간의 증가는 측정 MDA를 감소시키는 긍정적인 효과를 가져 온다.
- 반면에 계측시간의 증가는 통관처리 및 식품유통의 지연, 계측장비 및 인력의 확충 필요성을 가져오게 된다. 특히, 현재의 연간 식품방사능 처리 건수가 10,000건에 이르고 있는데, 방사선감시가 늘어날수록 이러한 부담은 가중될 것으로 보인다.

② 검체의 질량에 대한 개선 방안 고찰

- 검사에 사용되는 검체의 질량은 방사능분석 결과에 직접적인 영향을 준다.
- 검사에 사용되는 검체의 질량은 측정용기의 부피와 측정시료의 밀도의 곱은



로 표현된다.

- 현행의 검사에서 측정용기는 1L 부피의 마르넬리비이커가 표준적으로 사용되고 사용되고 있다. 측정용기의 부피를 변경하는 경우에는 효율보정이 다시 이루어져야 한다. 그래서 현행의 검사에서 1L 마르넬리비이커를 표준용기로 선정하여 사용하고 있으며, 이는 적절한 것이라고 판단된다.
  - 검체의 밀도는 검체의 질량에 영향을 주며, 방사능분석 결과에도 영향을 주는 것으로 나타났다. 아울러, 저밀도 시료에서 분석 MDA가 커지는 것이 앞절에서 분석된 바 있다.
  - 통상적인 시료는 밀도가 1kg/Bq의 수준이지만, 특이한 시료의 경우는 0.2kg/Bq 정도의 낮은 밀도를 보이고 있다.
  - 현행의 공전에서는 수분보정이 가능한 검체에 대해 수분보정을 하도록 규정하고 있다.
  - 건조한 저밀도 시료에 대해서는 수분보정을 통해 질량을 증가시킬 수 있다.
  - 하지만, 식품의 섭취방법이 정확히 정의되지 않는 검체의 경우에는 수분보정이 불가능하다.
  - 밀도가 낮은(예를 들어 밀도가 0.3kg/L 이하인) 검체에 대해서는 공전에 제시된 회화법을 적용하여, 측정에 사용되는 검체의 질량을 높이는 방법을 사용할 것을 권장한다.
- 검체의 질량변화에 대한 개선 방안은 간단한 산수만으로 개선이 가능하지만, 각 시료의 수분도 확인 및 회화법은 실험방법이 까다롭고 시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있어 시간에 영향을 받는 식품에서는 현 방법은 조금 맞지않다 라고 판단된다.

### ③ 계측기의 효율에 대한 고찰

- 현행 방사능 검사에 사용되는 계측기의 효율은 크게 30%, 60%의 2가지 종류가 사용되고 있다. 계측장비의 80%정도가 60% 효율의 계측기이며, 20% 정도는 30% 효율의 계측기이다.

- 높은 계측효율의 계측기는 계측시간을 단축시키고, 측정 MDA를 낮게 하는 효과가 있다.
- 고효율의 계측기를 사용하도록 하도록 권장하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

- 계측기의 효율에 대한 개선 방안은 가장 효과적이며 시간을 단축시킬수 있는 방법이다. 그러나 대부분 분석기관은 국가기관인데 계측기의 가격을 생각해 볼 때는 예산 및 검토를 맞추는게 쉽지 않을 것이라고 판단되어 각 분석기관에 맞지않다 라고 판단된다.

④ MDA 산정의 표준화 방안 고찰

- 식품의 방사능 안전성을 확보하기 위해서, 식약처는 식품 방사능 허용기준을 제정하고, 식품에 대한 방사능의 측정을 통해 이를 확인하고 있다.
- 다른 분야에서의 측정과 마찬가지로 방사능측정에서도 검출한계는 측정의 질을 가름하는 가장 중요한 변수중 하나이다. 방사능 분석에서 검출한계로 가장 많이 사용되는 것이 (4)식에 제시된 MDA 이다.
- 국내·외의 사례 조사 그리고 실험연구를 통해 MDA의 산정 방식을 표준화할 것을 제안하였다. MDA산정 모델의 경우, 국내·외 측정기관에서 통용되는 Currie MDA 모델을 표준모델로 지정하는 것이 타당하다고 판단되어 이를 추천한다. MDA 산정 시 신뢰도 준위는 방사능 분석 시 일반적으로 사용하는 95% 신뢰도준위를 표준값으로 지정하는 것이 타당하다고 판단되어 이를 추천한다. 즉, 식품 방사능 분석을 위한 검출한계로 (5)식에 제시된 95% 신뢰도의 Currie MDA 식을 지침으로 사용한 것을 추천한다.

$$MDA = \frac{L_D}{\epsilon \cdot Y \cdot T \cdot m} \text{ (Bq/kg)} \quad (4)$$

여기서,

$\epsilon$  : 피이크 ROI에서의 검출 효율,

$Y$  : 방사선 방출 분율,  
 $T$  : 측정시간(sec),  
 $m$  : 시료질량(kg)이다.

- (4)식으로 주어지는 MDA식에 95% 신뢰도준위를 적용하면 다음과 같은 95% 신뢰도 Currie MDA 식을 유도할 수 있다.

$$95\% \text{ Confidence Currie MDA} = \frac{2.71 + 4.65 \sqrt{N_{BKG}}}{\epsilon \times Y \times m \times t_m} \quad (5)$$

여기서,

$MDA$  : 최소검출가능방사능(Bq/kg),  
 $N_{BKG} = r_{BKG} \times t_m$  : 백그라운드계수치,  
 $Y$  : 방사선 방출 분율,  
 $r_{BKG}$  : 백그라운드계수율(counts/sec),  
 $t_m$  : 측정시간(sec),  
 $N_{BKG}$  : 백그라운드계수치(counts),  
 $m$  : 시료질량(kg)을 나타낸다.

본 연구 결과로 제안한, MDA 분석법 표준화, 측정시간 증가 방법은 모든 식품 시료의 방사능 분석법에 적용이 매우 쉬운 것으로 나타났다. 수분 보정의 경우, 보정효과는 매우 컸지만, 수분 보정을 적용할 수 있는 시료는 건조해조류, 건조버섯류에 국한되는 것으로 평가되었다. ISO11929에서 권고하는 분석피크 폭(ROI Width)을  $\pm 1.25$  FWHM으로 설정할 시 0.472Bq/kg으로 나왔으며,  $\pm 4.00$  FWHM으로 설정했을 때인 0.721Bq/kg 보다 낮게 나왔다. 미국규제위원회에서 추천하는 신뢰도 준위인 Confidence Level를 95%로 설정했을 경우, 0.608Bq/kg이 나왔으며, 99% 설정으로 나온 0.884Bq/kg보다 낮은 값이 나왔으며 피크 분석 폭(ROI Width)의 경우, 프로그램에 따라서 폭의 선택 방법이 달리 제시됨을 확인할 수 있었다.

Cs-137 방사능준위와 그에 따른 위해도 평가를 수행하였다. 방사능 오염식품에 의한 선량위해도는 다음 식으로 계산된다.

$$H(mSv/yr) = A(Bq/kg) \times U(kg/yr) \times DCF(mSv/Bq) \quad (A)식$$

여기서,

$H(mSv/yr)$  : 방사선 위험도를 나타내는 연간 피폭선량.

$A(Bq/kg)$  : 어떤 식품의 방사능오염도를 나타내는 비방사능,

$U(kg/yr)$  : 방사능으로 오염된 해당 식품의 연간 섭취량,

$DCF(mSv/Bq)$  : 방사능량을 피폭량으로 환산해주는 선량환산인자.

위 (A)식을 Cs-137으로 오염된 식품(예를 들어 고등어)에 적용한다.

-  $A(Bq/kg)$  : 0.5Bq/kg, 1.0Bq/kg, 100Bq/kg의 3가지 경우에 대해 평가

-  $U(kg/yr)$  : Cs-137으로 오염된 식품(예를 들어 고등어)를 매일 200g씩 1년 동안 꾸준히 섭취한다고 가정 (매우 보수적인 가정임)

$$U(kg/yr) = 0.2(kg/day) \times 365(day/yr) = 73(kg/yr)$$

-  $DCF(mSv/Bq)$  : 일반성인기준으로  $1.3 \times 10^{-5}(mSv/Bq)$  (국제방사선방호위원회, ICRP)

표 26. Cs-137 방사능 수준별 식품 위험도 평가 결과

방사능오염도 $A(Bq/kg)$	위험도 $H(mSv/yr)$	일반인선량한도 <sup>1)</sup> $(mSv/yr)$	비고
0.5	$4.7 \times 10^{-4}$	1	기준치의 1/2000 이하
1.0	$9.5 \times 10^{-4}$	1	기준치의 1/1000 이하
100	$9.5 \times 10^{-2}$	1	기준치의 1/10 이하

Note 1 : 일반인선량한도 1(mSv/yr)는 국제방호방호위원회(ICRP)에 의해 추천되는 값으로 국제적으로 통용되는 기준이다.

## 2. 활용기대

본 연구는 규제기준에 근거한 검사법으로 개선하여 기술적인 근거로 사용할 수 있다. 방사능 사고 대비 표준 검사법 마련 등 시험법 개선을 통해, 방사능 안전관리 강화 및 검사 결과의 신뢰성 향상에 기여 식품의 검사법 개선의 방법으로 MDA를 효율적으로 낮출 수 있으며, 시험분석업무에 대한 신뢰성 확보를 할 수 있다.

## IV. 결론

상당히 낮은 MDA 제한치 수준을 충족시키기 위해서는 ① 계측기 효율 증대, ② 복잡한 전처리 절차 채택, ③ 계측시간의 대폭 증대가 동시에 요구된다. 이럴 경우, 연간 측정해야 할 시료수를 소화하기 위해 계측 장비 및 검사요원이 대폭 확대되어야 하며, 검사경비 상승에 따른 검사수수료의 인상도 불가피해 진다. 아울러 긴 검사기간 동안, 식품의 유통이 제한됨으로서 식품의 안전한 유통관리에도 지장을 초래하게 된다.

감마핵종 시험법의 개선 방안으로 식품 방사능 MDA를 효율적으로 줄이기 위해서는 크게 검체의 질량, 계측기의 효율, MDA 산정 모델, 계측시간 4가지 방법이 있다. 검체의 질량은 수분보정이 가능한 검체는 공전의 규정에 따라 수분 보정 시행 권장, 밀도가 0.3kg/L 이하인 검체에 대해서는 공전에 제시된 회화법 적용 권장 및 건조시료에만 적용 가능하며, 각 시료의 수분도를 확인 하여야 한다. 계측기의 효율은 60% 효율의 계측기를 사용하면 효과적이지만 가격이 비싸서 구매가 쉽지 않으며, 계측시간의 변경 방법은 현재의 연간 식품방사능 처리 건수가 10,000건에 이르고 있는데, 방사선감시가 늘어날수록 이러한 부담은 가중될 것으로 보인다. 마지막으로 MDA 산정 모델은 프로그램내의 간단한 조작만으로 MDA를 효과적으로 낮출수 있으며, 그 방법 또한 간단하다. 국제적인 기준으로 하여 그 조건이 충족되고, 각 기관마다 분포가 줄어들어 신뢰도가 더 높다. 라는 장점이 있다.

## 참고문헌

- [1] 식품의약품안전처, 식품 중 방사능(감마핵종) 시험법 개선연구 (2019)
- [2] 식품의약품안전처 홈페이지, 현행 국외 식품 중 방사능 허용기준 (2019)
- [3] 식품안전나라 홈페이지, 고시 제89-19호 식품중의 방사능 잠정 허용기준 (2019)
- [4] 식품의약품안전처 홈페이지, 현행 국내 식품 중 방사능 허용기준 (2019)
- [5] 李兪勁, 영남대학교, 식품 중 방사성 물질의 실태와 안전관리 현황에 관한 연구 (2016) 13-86.
- [6] 식품공전 제7. 일반시험법\_9. 식품 중 유해물질\_9.9 방사능 (2017)
- [7] SOP NUMBER : WEAC.TD RN-1\_Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry An International Journal Dealing with All Aspects and Applications of Nuclear Chemistry (2005)
- [8] Ministry of health, Labour, and Welfare, Publication of Food Safety 0315 No. 4 and manual for measuring radioactivity of foods in case of emergency (March 15, 2012)
- [9] UKAS (ISO/IEC 17025)\_시험기관 및 교정기관의 자격에 대한 일반 요구사항, 초판 (1999)
- [10] 식품안전나라 홈페이지, 식품 중 방사성관련 식품공전 개정 이력 (2019)
- [12] SOP\_GOVP1200712012, 식품 중 방사능 분석 (2006)
- [13] GENIE™ 2000 Spectroscopy Software Customization Tools\_9233653E V3.0, (2013)., Operations\_9233652H V3.3, (2012).
- [14] GAMMA VISION MENU\_based on Gamma Vision®-32 V6 (A66-B32), (2010)
- [15] 이재기, 일본산 수입식품의 방사능 안전관리에 대한 합리적 개선 및 대국민 홍보방안 연구, 한양대학교 산학협력단, (2013) 74.
- [16] 원자력안전위원회 고시 제2017-17호 "원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향평가에 관한 규정" (2017)
- [17] 식품의약품안전처, 식품안전관리지침 국내 유통식품 방사능 안전관리 (2015)

- [19] 식품위생법 시행규칙 [별표 8], 식품공전 제 8. 검체의 채취 및 취급방법 (2012)
- [20] ‘공공수역 방사성물질 수준조사 계획 수립’, 한국표준과학연구원, (2014), P.19~20.
- [21] 식품위생법 시행규칙 [별표 8], 식품공전 제 8. 검체의 채취 및 취급방법, (2012)
- [22] KAERI/CR-314, Development of analytical methods and survey of radioactive contamination of foodstuffs (2008)
- [23] 식품의약품안전처, 국내·외 식품 등 기준규격 비교연구-국외 기준규격 정보 제공 체계 구축을 중심, B552995-005-2016-23-02 (2015)
- [24] 김태오, Study on the System and Issues of Food Safety Regulations in the US, (2008)
- [25] Gamma Vision® Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulator for Microsoft® Window® 7,8.1, and 10 Professional A66-BW Software User`s Manual Software Version 8.1 (2017)
- [26] KINS, 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가보고서 (2015)



