2002 춘계학술대회 논문집
원자력학회

중량계수시설에서의 MUF 평가를 위한 ITV(International Target Value)활용

ITV for MUF Evaluation in Bulk Handling Facility

전 인, 박수진, 박완수, 안진수, 최영명
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

안전조치 검증면에서 ITV(International Target Value)는 산업용 핵물질에 적용하는 분석 기술의 신뢰성을 판단하는 측정시스템 불확실도이다. 따라서, 핵물질 계량관리 또는 안전조치 정책 목적을 달성하기 위한 평가 수단으로 시설 운영자나 이를 적용하는 기구의 참고자료로 ITV가 사용된다. 가장 최근에 수정된 ITV는 이전의 자료와 같은 형식으로 불확실도와 신뢰도를 향상시키고 과거 계량자료가 불충분하고 운영자와 사찰관의 자료가 서로 상이할 경우 통계적 분석을 위한 자료로 활용될 수 있다.

Abstract

The ITVs(International Target Value) are uncertainties to be considered in judging the reliability of analytical techniques applied to industrial nuclear and fissile material, which are subject to safeguards verification. The ITV are intended to be used by plant operators and safeguards organizations, as a reference of the quality of measurements achievable in nuclear material accountancy, and for planning purposes. The most recent standard conventions in representing uncertainty and reliability data have been considered, while maintaining a format that allows comparison with the previous releases of the ITV and can be used with benefit for statistical inferences regarding the significance of operator-inspector differences whenever valid performance values are not available.

1. 서 론

물질수지평가를 위해서는 각 stratum 별로 시설 운영자 및 사찰관의 측정시스템 불확실도 즉, 우발오차(Random Error) 및 계통오차(Systematic Error)를 추정하여야 한다. IAEA가 측정시스템 불확실도를 추정하는 방법은 과거 계량자료부터 현재까지 시설 운영자의 선언값과 사찰관의 측정 결과를 통계적으로 상호 비교하는 Paired data comparison 방법을 사용하고 있으며, 이와 같은 방법으로 측정시스템 불확실도를 파악하는 것을 오차 추정(Error Estimation)이라 한다. 시설 운영자의 선언값과 사찰관의 측정결과 간의 차이가 많은 자료들을 오차 추정에서 제외시키기 위하여 오차 추정시 각 paired data의 outlier를 검사한다. Outlier에 해당되는 자료들은 오차 추정에서 제외되지만 후에 물질수지평가시에는 포함되어 계산된다. 또한, 과거 계량자료가 불충분할

경우 international target value(ITV)를 이용한다.

Stratum 별로 오차 추정이 종료되면 시설 운영자 및 사찰관의 측정시스템 각각에 대한 random error 및 systematic error가 산출되며, 이들 결과들은 해당 MBA의 물질수지평가(Material Balance Evaluation)에 활용된다.

물질수지평가에 대한 처리 절차는 먼저 operator-inspector의 관련 있는 data를 stratum 형태에 따라 하나로 합쳐야 한다. 이와 같이 paired된 operator-inspector data에 대하여 quality 검사를 실시한 후 outlier에 해당되는 data를 추출한다. Paired data에 대하여 operator-inspector data를 통계적으로 비교 평가하는 작업을 통하여 각 stratum 별 우발오차 및 계통오차를 산출한다. 산출된 random error와 systematic error는 사찰중에 sample size 계산 및 측정오차 허용 한계치 설정 등에 이용되며, 최종적으로 물질수지기간 중의 물질수지 평가에 활용된다. 물질수지평가를 위해서는 먼저 stratum별로 시설 운영자(operator)가 선언한 값과 해당 stratum에 대한 사찰관(inspector)의 측정결과가 있어야 한다. 물자재고조사중에 사찰관은 stratum별 NDA 측정 또는 DA 시료를 채취한다. 사찰관이 수행한 NDA 또는 DA 분석 결과를 시설 운영자가 선언한 값과 비교하기 위해서는 해당 자료와 쌍(paired data)을 이뤄야 한다.

Paired data는 사찰년도, 사찰번호 및 측정장비 등을 이용하여 조합하며, paired data는 분석자료의 MBA code, 분석방법, 분석실 및 isotope 총량 등과 같은 data 유효성 검사, 동일 batch 그리고 Pu에 대해서는 시료채취일자로부터 decay-correction 등과 같은 quality control을 실시한다. 또한 사찰중에 채취한 모든 시료들은 sub-sample들로 분리되어 반복된 측정이 실시된 후 화학분석 결과가 분석소의 허용오차 내에 존재하는지를 검사한다. 만약 허용치를 초과할 경우에는 남아있는 다른 sub-sample을 측정하여 동일한 방법으로 검사한다. 이때에도 허용치를 초과할 경우에는 해당 stratum의 물질을 heterogeneous 물질로 선언한다. 허용치를 범위 내에 있는 물질들은 반복된 측정결과들의 평균값을 갖고 operator data와 쌍을 이룬다.

2. 본 론

2.1 Outlier의 정의

Outlier는 오차 추정시 측정실수 또는 운영자의 기록실수 등으로 기인된 자료들을 제외시키기 위한 것이다. Outlier에 대한 기준은 운영자 선언값과 사찰관 측정결과 간의 relative difference 값이 international target value(ITV)의 5배를 초과할 경우 이를 outlier로 간주한다.

ITV는 안전조치에 종속된 핵물질들을 검증할 때 적용하는 측정, 분석 기술의 신뢰성을 판단할 수 있도록 측정시 고려되는 측정시스템 불확실도를 기술하고 있다. 각 측정시스템의 ITV 값들은 정상적인 조건하에서 경험이 풍부한 실험실에서 잘 갖춰진 장비들에 의해 나타날 수 있는 실제 측정시스템의 불확실도이다. ITV는 operator-inspector difference data들을 이용하여 얻을 수 있는 performance value 즉, 측정시스템의 random 및 systematic error들이 유용하지 않을 경우 물질수지평가의 통계적 추론을 얻기 위하여 대신 사용되고 있다

Outlier로 판단된 자료들은 오차추정(error estimation) 계산시 제외된다. 그러나 물질수지 평가시에는 outlier에 속한 data들도 포함되어 계산되고 있다. Paired data의 relative difference를 구하는 공식은

$$d_i(\%) = \frac{x_i - y_i}{x_i} \times 100$$

여기서 xi : inspector 측정 값,
yi : operator 선언 값
과 같으며,

IAEA에서 outlier 여부를 판단하는 범위는

Outlier ∋ $di(\%) > 5 \times$ ITV 와 같이 계산된다.

2-2 사찰관 자료-운영자 자료의 비교

Operator(x)와 inspector(y) 자료는 stratification 방법에 따라 합쳐지며, paired data의 comparison은 모든 stratum에 대해 수행된다. 각 stratum 별 paired difference인 di는 절대치와 상대치로 계산된다. Paired difference에 대한 계산은 농축도, 동위원소비, 총 중량, U 및 U235 총량 등 관심 있는 변수와 시료 채취된 모든 item에 대하여 수행된다. di 및 di (%)에 대한 공식은

$d_i = x_i - y_i$, $\quad d_i(\%) = 100 \times \frac{(x_i - y_i)}{x_i}$ 와 같다.

동일 stratum의 n item에서 관측된 di 평균을 산출하는 방법은

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n}, \quad \bar{d}(\%) = \frac{100\bar{d}}{\bar{x}},$$

여기서 $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ 와 같다

n 개의 difference di에 대한 표준 편차는 주어진 사찰에 대하여 전체 우발오차의 추정치를 제공하고 outlier는 제외되지 않고,

$s_d^2 = \frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{(n-1)}$ 와 같이 구한다.

평균차이에 대한 표준편차는 다음 공식처럼 operator 및 inspector의 우발 및 계통오차 표준편차를 다음과 같이 propagation(전파)하여 계산한다.

$$\delta(\bar{d}) = \sqrt{\frac{(\delta_{xr}^2 + \delta_{yr}^2)}{n} + (\delta_{xs}^2 + \delta_{ys}^2)}$$

여기서 δ_{xr} : inspector random error의 표준편차
δ_{yr} : operator random error의 표준편차
δ_{xs} : inspector systematic error의 표준편차
δ_{ys} : operator systematic error의 표준편차

Measurement	Instrument	Uncertainty Component (% relative Standard Uncertainty)	
		u(random)	u(systematic)
Mass	LCBS[1)]	0.05	0.05
	EVAL[2)]	***0.05***	***0.05***
Volume	DIPT[3)]	0.30	0.20
Density	DIPT	0.30	0.20
	VTDM[4)]	< 0.05	< 0.05

표 1. ITV for Bulk and Density Measurements

1) Load-Cell Based Weighing System
2) Electronic Balance
3) Dip Tube
4) Vibrating Tube Density Meter

Material	Uncertainty Component (% Relative Standard Uncertainty)				Recommended Minimum Sample Size
	Concentration		U^{235} Abundance		
	u(r)	u(s)	u(r)	u(s)	
DUF_6	0.10	nd	1	nd	5 - 10 g
$HEUF_6$ & $LEUF_6$ & NUF_6	0.05	nd	0.10	nd	5 - 10 g
U-oxide Powder	***0.20***	nd	nd	nd	10 - 20 g
U-oxide Pellets	***< 0.05***	***< 0.05***	***< 0.05***	***< 0.05***	1 pellet
U Scrap (clean)	***1***	nd	***1***	nd	30 g
U Scrap (dirty)	***10***	nd	10	nd	2 x 30 g

표 2. ITV for Sampling Unc. for Elemental Conc.and U^{235} Abundance

Method	Material	Uncertainty Component (% rel. Std. Uncertainty)			
		U-Concentrate		Pu-Concentrate	
		u(r)	u(s)	u(r)	u(s)
GRAV	***U Oxides(pure)***,UF_6	***0.05***	***0.05***		
	Pu Oxide			0.05	0.05
TITR	***U Oxides***, UNH, UF_6	***0.1***	***0.1***		
	U Alloys	0.2	0.2		
	Pu Oxide, Pu Nit.			0.15	0.15
	MOX, U/Pu Nit.	0.1	0.1	0.2	0.2

* *GRAV : Gravimetry, TITR : Tritration*

표 3. ITV for Sampling Unc. for Elemental Conc. and U^{235} Abundance

Method	Material	Uncertainty Component (% rel. Std. Uncertainty)	
		u(r)	u(s)
LMCN	***LEU Oxides***	***0.3***	***0.3***
	HEU Oxides	0.2	0.2

* *LMCN : Laboratory Multichannel Analyzer, NaI-Detector*

표 4. ITV for U^{235} Abundance

2-3 상대 표준 편차

Operator와 inspector의 각 stratum별 우발오차 및 계통오차는 측정방법 및 측정장비에 따라 각각 구분되어 계산된다. Stratum별 operator-inspector 오차들을 이용하여 측정 방법별로 상대표준편차(relative standard deviation)를 구한다. Delta value는 상대표준편차를 나타내는 용어로 IAEA에서는 delta value를 이용하여 시료채취 수량계산(sample size calculation) 및 측정결과의 오차 허용한계(rejection limits) 설정 등에 이용한다. 만약 해당 시설에 대하여 충분한 historical data가 확보되지 않은 상태라면 International Target Value를 이용하여 delta value를 산출한다. Delta value를 산출하는 공식은 다음과 같다.

$$\text{Random} = \sqrt{\delta_{xr}^2 + \delta_{yr}^2}$$

$$\text{Systematic} = \sqrt{\delta_{xs}^2 + \delta_{ys}^2}$$

$$\text{Total} = \sqrt{(random)^2 + (systematic)^2}$$

2-4 물질수지 평가

중량취급시설에서 물질수지기간중에 핵물질 유의량을 전용할 수 있는 경로를 살펴보면 첫째, 작업자가 기록을 조작하지 않고 핵물질 유의량을 전용하는 경우로서 전용된 양을 재조공정중에 발생되는 미계량물질(Material Unaccounted For : MUF) 또는 반입, 반출양의 차이(Shipper/Receiver Difference : SRD)에 의해 발생된 것처럼 조작하는 방법과 둘째, 모집단 속의 결함제품의 수를 부분 또는 전체적으로 위조하는 방법으로 운영자가 선언한 양은 실제 양과 차이가 있지만 차이가 없는 것처럼 계량기록을 조작하여 핵물질을 전용하는 경우이다.

계층분류는 특정 기준에 따라 재고 또는 유통된 핵물질을 구분하는 것으로 구분 기준은 분석 및 측정ㅂㅇ법, 물질기술코드(Material Description Code), 평균 품목수, KMP, 농축도 및 U/Pu량 등에 의해 구분된다. 계층구분 기준이 설정되면 동일 기준으로 계속 적용되어야 하며, ICR 및 PIL의 자료를 구분하여 물질수지표(Material Balance Table : MBT)를 작성한다. MBT는 대체적으로 PB, X, Y 및 PE 순서로 작성된다.

MUF는 핵연료 가공시설에서 장부재고와 실재재고의 차이를 나타내는 것으로 제조공정 중의 손실 또는 미 측정된 재고량, 핵물질의 도난 또는 전용에 의한 재고부족, 측정시스템의 불확실도

등 여러 형태에 의해 발생되는 것으로 MUF = PB + X - Y - PE(PB : 초기재고, X : 반입, Y : 반출, PE : 말기재고)로 구해진다. 일반적으로 안전조치 입장에서는 MUF 양에 대한 평가를 핵물질 계량관리 측면뿐만 아니라 전용여부를 파악하는 중요한 지표로 간주하고 있다. MUF 평가를 위해서는 시설이 제공하는 물자재고목록(PIL), 물질수지기간(MBP) 중에 발생된 재고변동보고서(ICR), 사찰관이 사찰활동 중에 채취한 핵물질의 분석결과 등이 필요하다.

핵연료 가공시설에서 관측된 MUF는 측정오차에 의해 영향을 받고 있지만 실제 MUF는 측정오차의 영향을 배제한 양이기 때문에 실제 MUF와 관측된 MUF 사이에는 측정오차의 영향만큼 차이가 발생되므로 관측된 MUF는 실제 MUF의 확률변수(random variable)가 된다. 실제 MUF 양은 물질수지기간별로 핵연료 제조량과 작업환경의 변화에 영향을 받기 때문에 일정한 값을 갖지 못하게 되므로 실제 MUF의 확률변수인 관측 MUF를 평가하는 것은 실제 MUF를 평가하는 것과 동일하다.

MUF 분산은 MUF 양이 측정오차에 기인된 것인지 여부를 결정하기 위한 기준을 제공하는 것으로 순수 측정 오차만을 고려한다. MUF 분산을 위하여 먼저 핵물질을 계층으로 분류한 후 각 계층별 핵물질 양, batch 수 및 item수를 파악하고 측정 시스템의 random 및 systematic 오차를 파악한다. 각 계층별 error propagation 공식을 적용하여 분산을 계산한다. 이때 covariance는 대체적으로 인지하기 어렵고 상대적으로 작기 때문에 계산에서 제외시킨다. MUF 분산은 다음과 같이 구한다.

$$Var(s) = X^2 \cdot (\delta_{ro}^2 / n + \delta_{so}^2)$$

X *is the total element mass in the stratum*
δ_{ro} *is the random error for operator*
δ_{so} *is the systematic error for operator*
n *is the number of operator's measurements to estimate* X

해당 시설에 대한 총 분산은 각 계층 분산을 합한 것으로 총 분산 및 표준편차는 아래와 같이 정의 된다.

$$Var[MUF] = \sum_{s=S} Var[O(s)]$$

$$\delta MUF = \sqrt{Var[MUF]}$$

MUF의 통계적 유의성을 검사하는 방법으로 통계적 가설검정과 신뢰구간을 이용할 수 있다. 통계적 가설 검정은 true MUF 값이 zero인지 여부를 검사하는 것으로 임계값(critical value)은 C = t (1-α) × δ MUF 와 같이 계산된다. 이때, α는 1종 error를 범할 확률이며, 가설이 기각되는 범위를 MUF > 3 × δ MUF 로 정할 경우 α = 0.0013 또는 (1-α) = 0.9987과 동일하다. 신뢰구간을 이용한 MUF 평가는 MUF, MUF 분산, true MUF를 이용하여 신뢰구간을 설정하는 것으로

$$\text{Lower Limit L} = \text{MUF} - t_{(1-\frac{\alpha}{2})} \times \delta\, MUF$$

$$\text{Upper Limit U} = \text{MUF} + t_{(1-\frac{\alpha}{2})} \times \delta\, MUF$$

Case	Ordering	Description
1	0 L U	The true MUF is statistically significant.
2	L U 0	The true MUF is statistically significant. (This is a negative MUF, could indicate human errors or inadequate)
3	L 0 U	The true MUF is not statistically significant.

표 5 MUF 분포에 따른 평가

과 함께 0(zero)을 수평선상에 위치시킨 배열에 따라 아래의 예와 같이 검사하는 것이다.
표 5의 경우에서 case 3번이 가장 최적의 상황으로 true MUF가 zero와 통계적으로 상이하지 않음을 의미하며, 나머지의 경우들은 MUF 값이 통계적으로 유의함을 나타내고 있다.

3. 결 론

국제 원자력기구에서 핵물질 안전조치를 수행하는 목적은 핵 시설내의 핵물질 유의량이 평화적인 용도가 아닌 다른 목적으로 전용되는 것을 조기에 파악하여 핵물질이 군사적 목적으로 이용되는 것을 저지하는데 있다. IAEA는 중량 취급 시설에서 핵물질 유의량의 전용여부 파악을 위하여 측정값들의 통계적 특성을 이용하는 물질수지평가 방법을 유용한 도구로 이용하여 왔다. MBE(Material Balance Evaluation)에 관련된 개념 및 방법은 전용경로, stratification, 미계량물질(MUF) 및 IMUF(MUF-D) 통계가 포함되어 있다. 이러한 모든 미계량물질 평가시 과거 계량자료가 불충분한 우리나라의 경우 ITV를 활용하여 중량계수시설에서 MUF를 평가할 수 있다.

참고문헌

1. KAERI/TR-1600/2000, "물질수지평가 기술 개발(II)", 2000
2. STR-327, "International Target Values 2000 for Measurement Uncertainties in S/G.", 2000
3. KAERI/OT-735/2001, "MUF Evaluation S/W 개발을 위한 실무기술 협의† , 2001
4. IAEA, "Material Balance Evaluation(Draft)", 1999.
5. IAEA, "Statistical Analysis of Sample Data, IAEA, 1999
6. IAEA, " Statistical Concepts & Techniques for IAEA Safeguards, Fifth Edition, IAEA, 1998.