

Paired Data를 이용한 물질수지 평가방법 분석

Analysis on the Material Balance Evaluation Methods using Paired Data

이병두

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

IAEA는 시설 운영자 및 사찰관의 측정시스템 불확실도, 측정시스템 편차 및 핵물질 전용여부를 파악하기 위한 방안 중의 하나로 물질수지평가(Material Balance Evaluation : MBE)를 실시하여 왔다. 물질수지평가를 위해서는 핵물질 재고변동보고서(ICR) 및 물자재고목록(PIL)과 같은 계량관리보고서, 사찰관의 화학분석(DA) 및 비파괴분석(NDA) 결과, 검증 중에 파악된 핵물질의 계층(Stratification) 자료 등이 이용된다. 본 논문은 국가 계량관리 검사결과를 이용하여 시설의 물질수지를 분석, 평가할 수 있도록 시설 운영자의 선언값과 사찰관의 측정 결과를 통계적으로 상호 비교하는 Paired Data Comparison 방법을 이용하여 측정시스템의 우발오차(random error)와 계통오차(systematic error)를 추정하는 방법과 추정된 측정오차들을 이용한 물질수지 평가방법 및 절차들을 분석하였다.

Abstract

IAEA has performed Material Balance Evaluation(MBE) to examine the measurement uncertainties, measurement bias and diversion of nuclear material. The results of destructive analysis(DA) and non destructive assay(NDA), accounting reports such as ICR and PIL, stratified data of nuclear material are used for the MBE. In this paper, the error estimation methods of random errors and systematic errors were analyzed and reviewed, and the procedures of material balance evaluation using estimated errors were described to perform the MBE of the facility using paired data between operator's declaration and inspector's measurement results.

1. 서 론

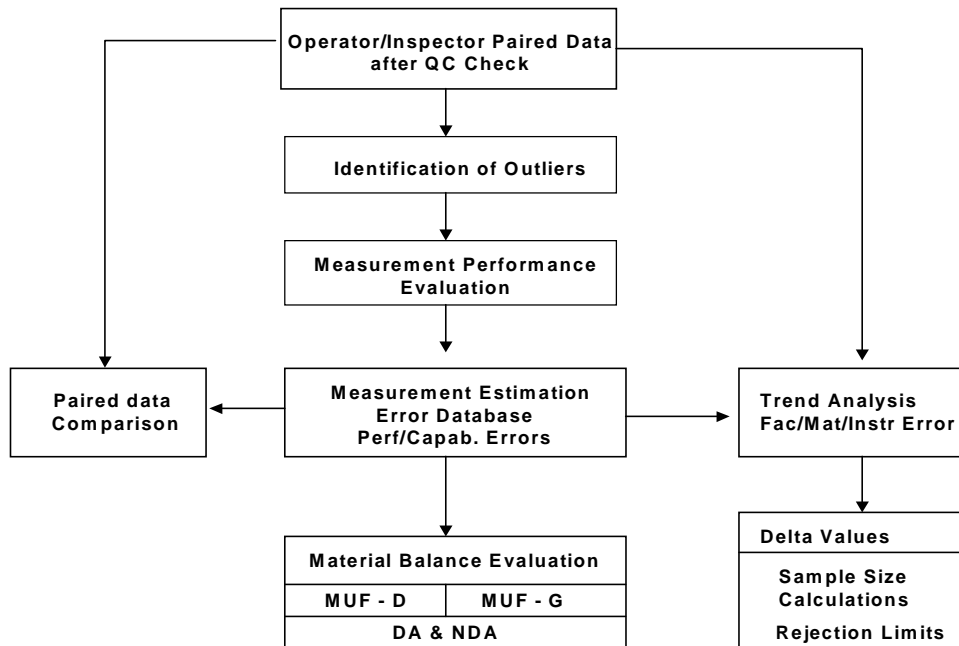
물질수지평가(Material Balance Evaluation)를 위해서는 핵물질 계층(stratum)별로 시설 운영자 및 사찰관의 측정시스템 불확실도 즉, 우발오차(Random error) 및 계통오차(systematic error)를 추정하여야 한다. IAEA가 측정시스템 불확실도를 추정하는 방법은 과거 계량자료부터 현재까지 시설 운영자의 선언값과 사찰관의 측정 결과를 통계적으로 상호 비교하는 Paired data

comparison 방법을 사용하고 있으며, 이와같은 방법으로 측정시스템 불확실도를 파악하는 것을 오차 추정(Error Estimation)이라한다. 시설 운영자의 선언값과 사찰관의 측정결과 간의 차이가 많은 자료들을 오차추정에서 제외시키기 위하여 오차 추정시 각 paired data의 outlier를 검사한다. Outlier에 해당되는 자료들은 오차추정에서 제외되지만 후에 물질수지평가시에는 포함되어 계산된다. 또한, 과거 계량자료가 불충분할 경우 International Target Value(ITV)를 이용한다.

Stratum별로 오차추정이 종료되면 시설운영자 및 사찰관의 측정시스템 각 각에 대한 random error 및 systematic error가 산출되며, 이들 결과들은 해당 MBA의 물질수지평가에 활용된다. Paired data를 이용한 오차추정부터 물질수지평가까지 개괄적 처리절차를 도시하면 그림 1과 같다.

물질수지평가에 대한 처리 절차는 먼저 operator-inspector의 관련있는 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 stratum별 우발오차 및 계통오차를 산출한다. 산출된 우발 및 계통오차는 사찰 중에 sample size 계산 및 측정오차 허용 한계치 설정 등에 이용되며, 최종적으로 물질수지기간 중의 물질수지 평가에 활용된다. Paired data를 이용하여 측정시스템의 오차추정(error estimation) 방법 및 물질수지평가에 대한 처리절차 및 과정들을 살펴보겠다.

그림 1. Paired Data를 이용한 물질수지평가 절차



2. Paired data의 Quality Check

물질수지평가를 위해서는 먼저 stratum별로 시설 운영자가 선언한 값과 해당 stratum에 대한 사찰관의 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 사찰 중에 채취한 모든 시료들은 subsample들로 분리되어 반복된 측정이 실시된 후 화학분석 결과가 분석소의 허용오차 내에 존재하는지를 검사한다. 만약 허용치를 초과할 경우에는 남아있는 다른 subsample을 측정하여 동일한 방법으로 검사한다. 이때에도 허용치를 초과할 경우에는 해당 stratum의 물질을 heterogeneous 물질로 선언한다. 허용치 범위내에 있는 물질들은 반복된 측정결과들의 평균 값을 갖고 operator data와 쌍을 이룬다.

3. Identification of Outliers

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. Outlier로 간주된 자료들은 오차추정(error estimation) 계산에는 포함되지 않지만 물질수지평가에는 outlier에 속한 data들도 포함되어 계산되고 있다.

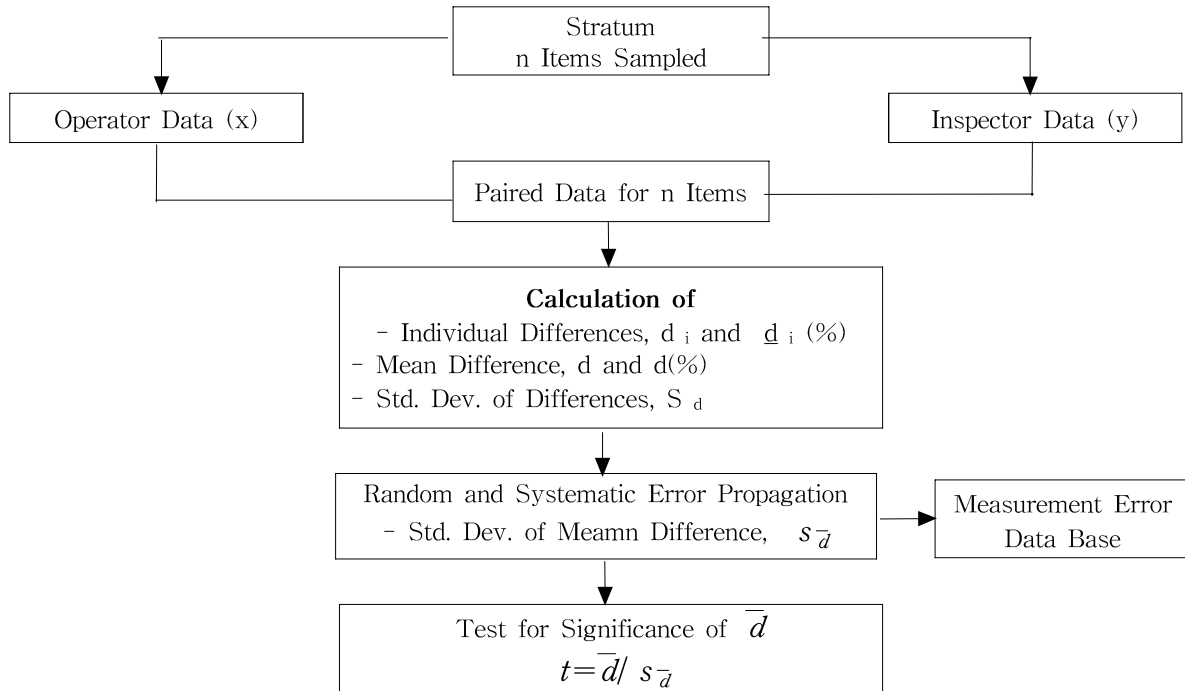
ITV는 안전조치에 종속된 핵물질들을 검증할 때 적용하는 측정, 분석기술의 신뢰성을 판단할 수 있도록 측정시 고려되는 측정시스템 불확실도를 기술하고 있다. ITV 값은 정상적인 조건하에서 잘 갖춰진 실험실 장비를 이용하여 얻어진다. ITV는 operator/inspector difference data들을 이용하여 얻을 수 있는 performance value 즉, 측정시스템의 random 및 systematic error들이 유용하지 않을 경우 물질수지평가의 통계적 추론을 얻기 위하여 대신 사용되고 있다.

4. Paired data Comparison

Operator와 inspector 자료는 stratification 방법에 따라 합쳐지며, 모든 stratum에 대해 paired

data의 comparison이 수행된다. Paired data를 평가는 절차 및 방법들을 살펴보면 그림 2와 같다.

그림 2. Operator-Inspector Paired data의 평가절차



각 stratum별 paired difference인 d_i 는 절대치과 상대치로 계산된다. Paired difference에 대한 계산은 농축도, 동위원소비, 총 중량, U 및 U235 총량 등과 시료채취된 모든 item에 대하여 수행된다. d_i 및 $d_i(\%)$ 은 $d_i = x_i - y_i$, $d_i(\%) = 100 \cdot \frac{(x_i - y_i)}{x_i}$ 와 같으며, 동일 stratum의 n item에서 관측된 d_i 의 평균산출은 $\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n}$, $\bar{d}(\%) = \frac{100\bar{d}}{\bar{x}}$ (where $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$)이다.

n개 difference d_i 에 대한 표준편차는 $s_d^2 = \frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{(n-1)}$ 이며, 주어진 사찰에 대하여 전체 우발오차의 추정치를 제공한다. 이때, outlier는 제외되지 않는다.

평균차이에 대한 표준편차는 $\delta(\bar{d}) = \sqrt{\frac{(\delta_{x'}^2 + \delta_{y'}^2)}{n} + (\delta_{xs}^2 + \delta_{ys}^2)}$ 와 같이 operator 및 inspector의 우발 및 계통오차 표준편차를 propagation(전파)하여 계산하며, difference의 표준편차를 구하기 위해서는 operator 및 inspector의 random/systematic error가 필요하다.

관측된 \bar{d} 가 zero로부터 많이 차이가 있는지 여부를 검사하기 위하여 자유도가 무한인 t-test 인 $t = \frac{\bar{d}}{\sigma(\bar{d})}$ 를 수행한다. t의 절대값이 크면 알려지지 않은 실제 \bar{d} 가 zero와 일치하지 않다는 의미로 이는 operator-inspector간 분석결과에 심각한 차이가 있음을 의미하는 것이다. IAEA는 $|t|$ 의 임계값으로 3을 채택하고 있으며, 이는 실제 평균 operator-inspector 차이(\bar{d})가 zero이면 $|t| < 3$ 이 되는 것으로 operator-inspector 간의 difference 발생확률이 0.003보다 적게 발생된다는 의미이다. t value의 유의성 검사결과가 $|t| > 3$ 이면 해당 stratum에 대하여 operator-inspector간에 심각한 차이가 있음을 의미한다.

5. 측정오차 (Measurement Error)

측정오차는 크게 우발오차와 계통오차로 구분할 수 있다. 우발오차는 측정의 반복성을 나타내며, 일련의 반복된 측정에 대하여 우발오차 결과는 true value 주변에 산포된다. 계통오차는 각각의 측정 결과들이 다른 결과와 일치성을 유지하고 있지만 true value로부터 차이가 있는 것을 의미한다.

한번 이상의 사찰로부터 수집된 사찰결과는 paired operator-inspector data 로 구성되어 오차 추정 계산에 사용된다. Paired operator-inspector data들은 outlier 여부를 검사하여 outlier에 해당되는 data들은 오차추정 계산에서 제외된다. Paired data를 이용하여 operator 및 inspector의 우발 및 계통오차(δ_{xy} , δ_{yx} , δ_{xs} , δ_{ys})를 계산하며, 이와 같이 산출된 오차들을 수행 값(performance value)이라 한다. 계산된 오차들은 paired-data의 비교 검사, 경향(trend) 분석 및 물질수지평가를 위하여 이용되며, 시료채취 갯수 결정 및 현장 측정결과의 rejection 한도설정 등에 사용되는 상대표준편차(이하 δ -value라 함) 계산에도 이용된다.

가. Random error estimation

Operator 및 inspector의 paired data에 Grubbs' method를 적용하여 operator-inspector의 random error를 추정하는 절차들을 살펴보겠다. 먼저, operator/inspector data의 각 값을 자연 대수(logarithm)로 변환한다. 자연 대수로 변환된 결과를 이용하여 group별 operator와 inspector의 평균, group별 측정수(m_g)를 구하다.

Grubbs' method의 operator 및 inspector variance 계산법을 적용하여 operator 및 inspector의

분산을 구한다. Random error에 대한 Grubbs' 추정치 계산방법은 $\sigma_{rj}^2 = \frac{\sum_{g=1}^G (m_g - 1) \cdot \sigma_{rgj}^2}{\sum_{g=1}^G (m_g - 1)}$; j =

1,2와 같으며, 이를 이용하여 σ_{r1}^2 과 σ_{r2}^2 를 계산한다. 여기에서 계산된 σ_{r1}^2 과 σ_{r2}^2 결과에 주의하여야 한다. Grubbs' 추정치 계산법을 이용하였을 경우 σ_{r1}^2 또는 σ_{r2}^2 의 결과값 중에서 음수 값을 갖는 경우 Grubbs' 추정치 계산법을 적용할 수 없다. 이와 같이 Grubbs' 추정치가 음수 값일 경우에는 CELEX(Constrained Expected Likelihood Estimator) 추정치 계산법을 사용하여야 한다.

CELEX 추정치 계산 방법으로 operator-inspector random error를 계산하기 위해서는 Grubbs' method에서 계산된 σ_{rj}^2 , V_{gj} 및 V_{g12} 결과가 이용된다.

나. Systematic error estimation 방법

계통오차(systematic error)의 추정은 독립된 사찰 간에 operator와 inspector 간의 상호 영향에 근거하여 추정한다. 독립된 사찰간의 변수처리는 Grubbs, DODGRU 및 CELEX 오차 추정법에 의해 산출된다. 계통오차의 계산도 처음에는 Grubbs 방법으로 시작한다. Grubbs의 평가치 중 하나가 음의 값을 가질 때에는 역시 CELEX 방법을 사용하여야 한다. 시설자와 사찰관의 측정값에 의한 통계오차의 분산은 다음과 같이 나타난다.

6. Delta Value (Relative Standard Deviation)

해당 물질수지구역의 과거 operator-inspector data 같은 계량관리자료(historical data)들을 이용한 stratum별 우발오차 및 계통오차 산출방법은 앞 장에서 기술된 오차추정방법에 의해 계산된다. Operator와 inspector의 각 stratum별 우발오차 및 계통오차는 측정방법 및 측정장비에 따라 각각 구분되어 계산된다. Stratum별 operator-inspector 오차들을 이용하여 측정방법별로 상대표준편차(relative standard deviation)를 구한다. Delta value는 상대표준편차를 나타내는 용어로 IAEA는 delta value를 이용하여 시료채취 수량 계산(sample size calculation) 및 측정결과의 오차 허용한계(reject limits) 설정 등에 이용한다. 만약 해당 시설에 대하여 충분한 historical data가 확보되지 않은 상태라면 International Target Value를 이용하여 delta value를 산출한다.

7. 물질수지평가(Material Balance Evaluation : MBE)

국제 원자력기구(IAEA)에서 핵물질 안전조치를 수행하는 목적은 핵 시설내의 핵물질 유의량

이 평화적인 용도가 아닌 다른 목적으로 전용되는 것을 조기에 파악하여 핵물질이 군사적 목적으로 이용되는 것을 저지하는데 있다. IAEA는 중량 취급시설에서 핵물질 유의량(M)의 전용여부 파악을 위하여 측정값들의 통계적 특성을 이용하는 물질수지평가 방법을 유용한 도구로 이용하여 왔다. MBE에 관련된 개념 및 방법은 전용경로, Stratification, 미계량물질(MUF), Difference 및 IMUF(MUF-D) 통계가 포함되어 있다.

가. 전용 경로

중량취급시설에서 물질수지기간중에 핵물질 유의량을 전용할 수 있는 경로를 살펴보면, 첫째 작업자 기록을 조작하지 않고 핵물질 유의량(M)을 전용하는 경우로서 전용된 양을 제조공정중에 발생하는 미계량 물질(Material Unaccounted For : MUF) 또는 반입, 반출량의 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.

나. Stratification

Stratification은 특정 기준에 따라 재고 또는 유통된 핵물질을 구분하는 것으로 구분 기준은 분석 및 측정방법, 물질기술코드(Material Description code), 평균 품목수, KMP, 농축도 및 U/Pu 량 등에 의해 구분된다. Stratification 구분기준이 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.

다. 미 계량물질(MUF) 평가

MUF는 핵연료 가공시설에서 장부재고와 실제재고의 차이를 나타내는 것으로 제조공정 중의 손실 또는 미측정된 재고량, 핵물질의 도난 또는 전용에 의한 재고부족, 측정시스템의 불확실도 등 여러 형태에 의해 발생하는 것으로 $MUF = PB + X - Y - PE$ (PB : 초기재고, X : 반입, Y : 반출, PE : 최종 재고) 로 구해진다. IAEA는 MUF양에 대한 평가를 핵물질 계량관리 측면뿐만 아니라 전용여부를 파악하는 중요한 지표로 간주하고 있다. MUF평가를 위해서는 시설이 제공하는 물자재고목록(PIL), 물질수지기간(MBP) 중에 발생한 재고변동보고서(ICR), 사찰관이 사찰활동 중에 채취한 핵물질의 분석결과 등이 필요하다.

핵연료가공시설에서 관측된 MUF는 측정오차에 의해 영향을 받고 있지만 실제 MUF는 측정오차의 영향을 배제한 양이기 때문에 실제 MUF와 관측된 MUF사이에는 측정오차의 영향만큼 차이

가 발생되므로 관측된 MUF는 실제 MUF의 확률변수(random variable)가 된다. 실제 MUF 양은 물질수지기간별로 핵연료제조량과 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 측정오차만을 고려한다. MUF 분산을 위하여 먼저 핵물질을 Strata로 분류한 후 각 stratum 별 핵물질 양, batch 수 및 item 수를 파악하고 측정시스템의 random 및 systematic 오차를 파악한다. 각 stratum별 error propagation 공식을 적용하여 분산을 계산한다. 이때 covariance는 대체적으로 인지하기 어렵고 상대적으로 작기 때문에 계산에서 제외시킨다. MUF 분산을 구하는 공식은 $Var(s) = X^2 \cdot (\frac{\delta_m^2}{n} + \delta_{so}^2)$ 이다.

X is the total element mass in the stratum

δ^o is the random error for operator

δ^s is the systematic error for operator

where **n** is the number of operator's measurements to estimate X

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

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

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

MUF의 통계적 유의성을 검사하는 방법으로 통계적 가설검정과 신뢰구간을 이용할 수 있다. 통계적 가설검정은 $H_0: Prob(obs.MUF > C | true.MUF=0) = \alpha$ 와 같이 true MUF 값이 zero인지 여부를 검사하는 것으로 임계값(critical value)은 $C = t_{(1-\alpha)} \times \sigma_{MUF}$ 와 같이 계산된다. 이때, α 는 1종 error를 범할 확률이며, H_0 가 기각되는 범위를 $MUF > 3 \times \sigma_{MUF}$ 로 정할 경우 $\alpha = 0.0013$ 또는 $(1-\alpha) = 0.9987$ 과 동일하다. 신뢰구간을 이용한 MUF 평가는 MUF, MUF 분산, true MUF를 이용하여 신뢰구간을 설정하는 것으로

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

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

과 함께 0 (zero)를 수평선상에 위치시킨 배열에 따라 아래의 예와 같이 검사하는 것이다.

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

상기 경우에서 case 3번이 가장 최적의 상황으로 true MUF가 zero와 통계적으로 상이하지 않음을 의미하며, 나머지의 경우들은 MUF 값이 통계적으로 유의함을 나타내고 있다. 신뢰구간을 이용한 평가방법을 예를 들어 설명하면 다음과 같으며, SRD(Shipper-Receiver Difference)도 MUF와 같은 방법으로 평가될 수 있다.

MUF	100	-100	100	-100
σ_{MUF}	50	50	33	33
trueMUF=0	y	y	n	n
MUF > 0	y	n	y	n
Odering	L-0-M-U	L-M-0-U	0-L-M-U	L-M-U-0

MUF 평가 절차에 대하여 예를 들어 기술하겠다. 어떤 핵연료 가공시설의 물자재고조사후 아래 표 1과 같이 stratum별 batch 수, item 수, 각 item의 평균 값 및 총 재고량이 결정되었고 δ_{ro} 와 δ_{so} 는 오차추정 또는 시설 측정시스템 불확실도에 의해 주어졌다고 가정한다.

표 1. 물질수지표

Mat. Bal. Comp.	Stratum	Number of batches	Number of items	x-avg kg of U-235	X kg of U-235	δ_{ro}	δ_{so}	Var[X] kg ² of U-235
PB	PD	150	1,500	2.0	3,000.0	0.0030	0.0025	56.8
	UF	300	300	50.0	15,000.0	0.0025	0.0020	904.7
	SC	800	800	1.0	800.0	0.0150	0.0100	64.2
	Total:	1,250	2,600		18,800.0			1,025.7
Increases	UF-	250	250	50.0	12,500.0	0.0025	0.0020	628.9
	PL-	100	2,000	0.5	1,000.0	0.0020	0.0020	4.0
	Total:	350	2,250		13,500.0			632.9
Decreases	FF	1,000	4,450	5.0	22,250.0	0.0020	0.0020	1,982.2
	WS	150	150	0.5	75.0	0.0700	0.0700	27.7
	Total	1,150	4,600		22,325.0			2,010.0
PE	FR	1,000	12,000	0.1	1,200.0	0.0020	0.0020	5.8
	PL	700	15,000	0.5	7,500.0	0.0020	0.0020	225.3
	SC	550	1,500	0.7	1,050.0	0.0150	0.0100	110.7
	Total	2,250	28,500		9,750.0			341.8
				MUF=	225.0		Var(MUF)=	4,010.4
				σ_{MUF}=	63.3			

Stratum별 분산을 구하는 공식을 이용하여 표에 있는 PB의 powder에 대하여 분산을 계산하면 $Var(s) = X^2 \cdot (\frac{\delta_m^2}{n} + \delta_{so}^2) = 3000^2 \cdot (\frac{0.003^2}{150} + 0.0025^2) = 56.8$ 이 된다. 이때 각 stratum에 대한 총 분산은 $Var[MUF] = \sum_{s=S} Var[I(s)] = 56.8 + 904.7 + \dots + 110.7 = 341.8$ 와 같이 계산되므로 MUF의 표준편차는 $\sigma_{MUF} = \sqrt{Var[MUF]} = \sqrt{4010.4} = 63.3$ 과 같이 계산된다. 계산된 결과를 근거로 H_0 의 기각범위를 $MUF > 3 \times \sigma_{MUF}$ 를 이용하여 $MUF = 225$, $\sigma_{MUF} = 63.3$ 에 대한 MUF 유의성을 평가해 보면 $MUF = 225 > 3 \times 63.3 = 189.9 = \sigma_{MUF}$ 이 되므로 MUF 양을 기각한다. 이는 true MUF가 zero보다 크고 관측된 MUF=225 kg이 operator의 측정오차로 설명할 수 없음을 나타내는 것이다. 만약, 예제의 MUF 양이 150 kg이라고 가정하여 평가를 하면, $MUF = 150 \text{ kg} < 3 \times 63.3 = 189.9 \text{ kg} = \sigma_{MUF}$ 이므로 true MUF는 zero보다 크지 않다는 결론이 나온다. 이는 MUF로의 전용가능성이 없고 측정시스템 오차에 문제가 없으며, 발생된 MUF 양은 시설 측정시스템의 오차에 기인된 것으로 간주할 수 있다.

라. 탐지확률

주어진 σ_{MUF} 에 대하여 1 SQ의 True MUF를 감지할 수 있는 확률을 살펴보겠다. 탐지할 수 없는 확률을 β 로 하면 β 를 공식은 다음과 같으므로 탐지확률은 $(1 - \beta)$ 로 정의된다.

$$\beta = Prob.(z < \frac{C_\alpha - trueMUF}{\sigma_{MUF}}) \quad \text{where } C_\alpha = t_{(1-\alpha)} \cdot \sigma_{MUF}$$

농축도가 20% 미만일 경우 (1 SQ=75kg의 U-235)이고, $\sigma_{MUF} = 63.3 \text{ kg-U235}$ 일 때, 1중 error를 범할 확률 α 에 따라 $t_{(1-\alpha)}$ 값과 $(1 - \beta)$ 값의 추이는 다음과 같다.

α %	$t_{(1-\alpha)}$	$(1 - \beta)$ %
0.13	3	3.5
2.5	2	20.7
5.0	1.65	32.3

IAEA에서는 $t_{(1-\alpha)}$ 를 3으로 사용하여 1 SQ의 trueMUF 탐지확률이 3.5 %밖에 되지 않는다. IAEA는 시설에서 MUF 평가를 실시할 경우 operator-inspector difference를 이용한 측정오차 산출이 아니고 실제 현장의 측정오차를 적용할 수 있기 때문에 $t_{(1-\alpha)}$ 를 3이 아닌 2로 적용할 것을 권고하고 있다. 또한, Safeguards criteria에 저농축우라늄의 가공시설에 대한 탐지확률을 50 %로

규정하고 있다. 50 %의 탐지확률을 미 탐지확률 β 에 적용하여 σ_{MUF} 를 계산하면 $\sigma_{MUF}=25$ kg-U235가 나온다.

마. 국제 표준 계량관리

σ_{MUF} 가 국제 표준 계량관리(σ_{IS})보다 작다면 시설 측정시스템 오차는 허용치 범위내에 있다. $\sigma_{IS}=A \cdot \delta_E$ 이며, 이때 A는 throughput 또는 최대 재고량 중에서 큰 값이다. 만약, $\delta_E=0.3\%$ 의 가공공장, $A=$ 총 반출량 $=22.325$ kg-U235일 경우 $\sigma_{IS}=A \cdot \delta_E=67$ kg-U235로 계산된다. 이는 $\sigma_{MUF}=63.3 < \sigma_{IS}=67$ 이 되므로 operator 측정시스템은 국제 표준 계량관리를 만족하고 있다고 말할 수 있다.

바. Shipper/Receiver Difference (SRD)

SRD는 국가 또는 타 시설로부터 반입된 물질을 검사한 결과 shipper's data와 상이할 경우 선언하는 값이다. 즉, SRD가 발생할 경우 SRD 계산은 $SRD(DI)=(\text{shipper's value}) - (\text{receiver's value})$ 이다. 만약 시설에서 SRD를 보고하지 않을 경우 SRD가 발생된 양이 MUF에 반영되므로 operator는 필히 SRD를 IAEA에 보고하여야 한다.

사. IMUF(Inspector Estimate of MUF)

핵물질의 partial defects 또는 bias defects를 감지하기 위하여 IAEA는 MUF의 양적 검증을 실시하고 있으며, 이 양적 검증은 IMUF와 D 통계를 사용한다. IMUF는 물질수지기간중 수행된 검증결과를 근거로 나타난 사찰관의 MUF 추정치이다. D 통계는 각 item별 운영자와 사찰관 측정 결과 간의 차이를 추정하는 값으로 $D = MUF - IMUF$ 로 정의된다. 주어진 stratum내의 item들이 조금씩 편차가 있다면 이들 bias의 검사 확률을 가장 크게할 수 있는 통계는 IMUF와 D 통계이다. σ_{MUF} 는 단지 시설 측정시스템의 불확실도에만 영향을 받으나 σ_D 는 시설 측정시스템과 함께 사찰관의 측정 불확실도에도 영향을 받는다. 그러나 σ_{IMUF} 는 사찰관 측정시스템의 불확실도에만 영향을 받고 있다.

검증결과를 해당 stratum에 반영시키는 Scaling factor에 대한 공식을 살펴보면 다음과 같다.

$$r_k = \frac{o(s)}{o(v_k)} \quad \text{Where } o(s) : \text{Operator declared stratum mass (stratum total)}$$

$o(v_k) : \text{Operator declared mass of substratum verified by the inspector using method k}$

측정장비(method) K로 측정된 x_j 의 양을 $y_j | k$ 로 하면 method k로 검증한 stratum에 대한

inspector 추정량 $\hat{i}(s|k)$ 를 구하는 공식은 $\hat{i}(s|k) = r_k \sum_{j=1}^{n_k} y_j | k$ 와 같다.

일반적으로 검증은 하나 이상의 검증방법을 적용하고 있기 때문에 유효한 검증 결과들을 이용하여 inspector 추정치를 계산하기 위해서는 stratum 총량 계산에 대한 사용된 검증방법 별로 weighting factor를 부여하여야 한다. Weighting factor를 부여한 후 inspector가 stratum별 추정량은 $i(s) = \sum_{k \in K} w_k \cdot \hat{i}(s|k)$ 와 같이 계산한다.

검증방법으로 DA와 NDA를 사용하였을 경우, DA와 NDA를 $k=\{1, 2\}$ 로 놓으면 weighting factor를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$w1 = \frac{Var[I(s|2)]}{\{VAR[I(s|1)]\} + \{Var[I(s|2)]\}}, \quad w2 = \frac{Var[I(s|1)]}{\{VAR[I(s|1)]\} + \{Var[I(s|2)]\}}$$

Weighting factor를 구하는 공식에서 사용된 variance 구하는 공식은 IMUF의 variance 구하는 공식에서 weighting factor를 제외한 것과 동일하다. Weighting factor 구하는 variance 공식은

$Var[I(s)] = \sum_{k \in K} r_k^2 \cdot [\sum_{j=1}^{n_k} (y_j | k)^2 \cdot \delta_{rk}^2 + (\sum_{j=1}^{n_k} y_j | k)^2 \cdot \delta_{sk}^2]$ 와 같으며, MUF에 대한 inspector 추정치를 계산하는 방법은 $IMUF = \sum_{s \in S} A_c \cdot I(s)$ 이다. 이때, $A_c = +1$ 이면 초기재고 및 반입을 나타내며, $A_c = -1$ 이면 말기재고 및 반출을 나타낸다.

아. IMUF 분산 계산

Inspector 추정 MUF가 통계적으로 zero와 동일한가 여부를 판단하기 위하여 IMUF 분산을 계산하여야 한다. σ_{IMUF} 의 추정은 σ_{MUF} 의 stratification 방법과 error propagation 공식을 적용하는 과정이 동일하다. Stratum 총량에 대한 inspector 추정 분산 즉, σ_{IMUF} 을 구하는 공식은

$$Var[I(s)] = \sum_{k \in K} w_k^2 \cdot r_k^2 \cdot [\sum_{j=1}^{n_k} (y_j | k)^2 \cdot \delta_{rk}^2 + (\sum_{j=1}^{n_k} y_j | k)^2 \cdot \delta_{sk}^2]$$

(Where δ_{rk} : Inspector random error for verification method k

δ_{sk} : Inspector systematic error for verification method k) 이며, MUF에

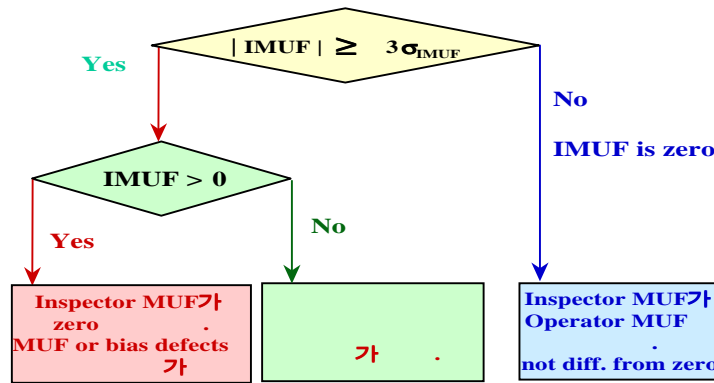
대한 inspector 추정 분산 및 표준편차는 $Var[IMUF] = \sum_{s \in S} Var[I(s)]$, $\sigma_{IMUF} = \sqrt{Var[IMUF]}$ 이다.

자. IMUF의 유의성 검사

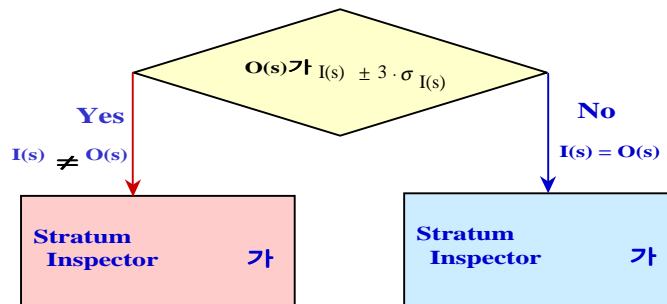
IMUF의 유의성 검사방법은 앞장에서 기술한 MUF의 t-test와 신뢰구간을 이용하는 검사방법과 동일하다. IMUF의 random variable이 평균 zero을 갖는 정규분포이고 σ_{IMUF} 가 표준편차라고 가정하면, $IMUF < t_{(1-\alpha)} \cdot \sigma_{IMUF}$ 은 IMUF가 zero로부터 많은 차이가 없기 때문에 검증된 물질수

지를 수락할 수 있다는 것을 나타낸다. 즉, 통계적으로 $H_0 : IMUF=0$ 를 수락한다는 의미다. IAEA의 물질수지 평가목적은 전용가능성 탐지와 측정 불확실도 파악하는데 있으므로 $(1-\alpha)=0.997$ 을 선택하여 양측 검증을 적용하며, 신뢰구간을 $IMUF \pm 3 \sigma_{IMUF}$ 으로 적용하고 있다.

IMUF가 $3 \sigma_{IMUF}$ 보다 작은 경우 가설인 $H_0 : IMUF=0$ 를 수락하므로 inspector MUF가 operator MUF와 차이가 없다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 IMUF가 $3 \sigma_{IMUF}$ 보다 큰 경우 전용가능성이 있거나 측정시스템에 문제가 있다는 결론이 난다. IMUF가 $3 \sigma_{IMUF}$ 보다 크고 IMUF가 zero보다 큰 경우는 MUF 또는 bias defect를 통한 전용가능성이 있는 것이고 IMUF가 $3 \sigma_{IMUF}$ 보다 크지만 IMUF가 zero보다 작은 경우는 operator 또는 inspector의 측정시스템 오차에 문제가 있는 것으로 나타난다. 이와 같은 관계들을 도시하면 다음과 같다.



상기에서는 시설내 전 stratum에 대한 IMUF 유의성 평가방법을 살펴보았다. 지금부터는 각 Stratum별 유의성을 검사하는 방법으로 $\omega = (\text{Stratum에 대한 Inspector 추정값} \pm 3 \sigma_{I(s)})$ 과 $O(s) = (\text{operator 선언값})$ 을 비교하여 $O(s)$ 가 ω 보다 클 경우 inspector 추정 값이 operator 선언 값과 다르다는 결론을 내린다. 이를 그림으로 도시하면 다음과 같다.



차. D의 정의

한 검증방법을 이용하여 검증한 결과의 operator-inspector difference를 구하는 공식은 $d(s | k) = o(s) - i(s | k)$ 와 같으며, 만약 stratum에 있는 핵물질이 homogenous하다면 상기 difference 공식은 $d(s | k) = r_k \cdot d(v_k)$ [where, $d(v_k) = \sum_{j=1}^{n_k} (x_j - y_j | k)$]와 같이 변형될 수 있다. 유용한 모든 검증방법에 의해 stratum total의 operator-inspector difference는 $D(s) = O(s) - I(s)$ where, $O(s) = \sum_{i=1}^N X_i$, and $I(s) = \sum_{k \in K} w_k \cdot I(s | k)$ 와 같이 계산된다. Bias에 따른 MUF 영향을 파악하기 위하여 D 통계는 다음과 같이 정의된다.

$$D = \sum_{s \in S} A_c \cdot D(s) \quad \text{where } A_c = +1 : \text{초기재고, 반입 } A_c = -1 : \text{말기재고, 반출}$$

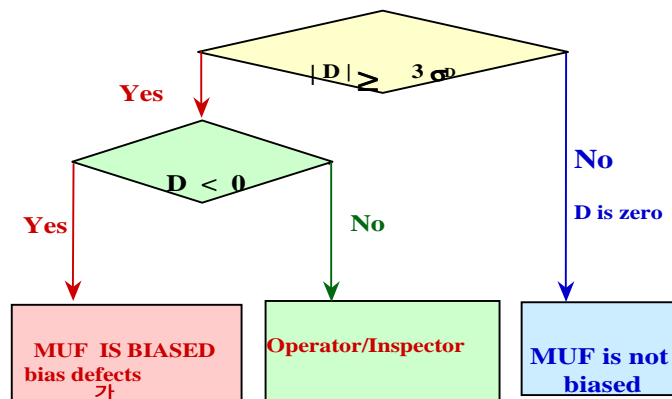
카. D 분산 계산

선언된 MUF에서 bias가 zero 인지 여부를 검사하기 위하여 D 분산 계산이 요구된다. D 분산 구하는 공식을 살펴보면, $Var[D(s)] = Var[O(s) - I(s)] = Var[\sum_{i=1}^N X_i - \sum_{k \in K} w_k \cdot I(s | k)]$ 또는

$$Var[D(s)] = \sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \delta_{no}^2 + (\sum_{i=1}^N x_i)^2 \cdot \delta_{so}^2 + \sum_{k \in K} W_k^2 \cdot r_k^2 \cdot [\sum_{j=1}^{n_k} (y_j | k)^2 \cdot \delta_{nk}^2 + (\sum_{j=1}^{n_k} y_j | k)^2 \cdot \delta_{sk}^2]$$

이다. D 분산과 표준편차는 $Var[D] = \sum_{s \in S} Var[D(s)]$, $\sigma_d = \sqrt{Var(D)}$ 가 된다.

D 분산과 표준편차를 이용한 유의성 검사는 관측된 MUF에 bias 유무를 검사하기 위해 사용된다. 검사 방법은 MUF 및 IMUF 검사 방법과 같이 $3\sigma_D$ 를 계산하여 D 값과 비교한다. D 값이 $3\sigma_D$ 값보다 작다면 MUF에 bias가 없는 것으로 평가한다. 그러나 D 값이 $3\sigma_D$ 값보다 큰 경우 MUF가 bias되어 bias defect를 통한 전용가능성이 있거나 operator 또는 inspector 측정시스템에 문제가 있는 것으로 나타난다. 이와 같은 관계를 도시하면 아래와 같으며, D 값과 $3\sigma_D$ 값의 비교 검사는 stratum 별로도 수행할 수 있다.



8. 결 론

IAEA는 시설 운영자 및 사찰관 간의 측정시스템 불확실도, 측정시스템 편차 및 핵물질 전용여부를 파악하기 위한 방안 중의 하나로 물질수지평가를 실시하여 왔다. 물질수지평가는 핵물질 계량관리 측면뿐만 아니라 전용여부를 파악하는 중요한 지표로 간주되어 왔으므로 국가 계량관리검사를 실시하고 있는 우리나라도 중량취급시설에 대한 물질수지를 평가하여야 할 것이다.

물질수지평가를 위해서는 핵물질 stratum별 시설 선언값과 사찰관의 측정값을 이용하여 시설 및 사찰관의 측정불확실도인 random 및 systematic error를 파악하여야 한다. Paired data를 이용한 측정불확실도 파악을 위해서는 stratum별 과거 계량관리자료들이 필요하지만 국가 계량관리 검사 이력이 많지 않은 우리나라는 충분한 계량관리이력을 확보치 않은 상태이다. 따라서 paired data를 이용한 측정불확실도 파악보다는 핵물질 형태 및 측정시스템별로 측정불확실도를 나타내고 있는 International Target Value를 이용한 후 국가 계량관리 검사결과가 확보되면 paired data를 이용하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. IAEA, Statistical Concepts & Techniques for IAEA Safeguards, Fifth Edition, IAEA, 1998.
2. E. Kuhn et al., Destructive Analysis and Evaluation Services for Nuclear Material Accountability verifications, IAEA, 1996.
3. IAEA, International Target Values 2000 for Measurement Uncertainties in Safeguarding Nuclear Materials, IAEA, 2000.
4. IAEA, ICAS Introductory Course on Agency Safeguards, Module 7, ICAS/40-7.1.5/1, IAEA.
5. IAEA, Statistical Analysis of Sample Data, IAEA, 1999
6. KAERI/TR-1554/2000, KAERI/TR-1600/2000 "물질수지평가기술개발(I) & (II)", 2000