

IAEA 사찰표본 할당계산법 비교연구

김현태
한국원자력연구소

요약

IAEA(International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구)에서는 사찰활동 수행시, 비복원추출을 기술하는 초기하분포(hypergeometric distribution) 대신 복원추출을 기술하는 이항분포(binomial distribution)를 사용하여 표본크기(sample size)를 계산하여 최대 3 가지 검증방법들에 할당한다. 본 연구에서는 사찰표본할당과 관련하여 PC 사용이 요구되는 반복할당법인 초기하할당법, 개선된 이항할당법, 그리고 표준할당법과 포켓계산기에서 사용가능한 근사할당법인 개선된 이항할당근사법과 표준이항할당근사법을 비교 검토하였다.

1. 서론

IAEA의 保障措置(safeguards) 목표는 核物質有意量의 轉用을 適時에 探知하는 것이다(timely detection of diversion of significant quantities of nuclear material)[1]. IAEA는 사찰대상 전체를 검사하는 경우도 있지만, 시간과 인력 그리고 비용의 제약으로 인하여 표본을 추출하여 검사하는 경우가 있다. 피사찰 측이 취할 수 있는 가능한 전용방법에 대응해야 하는 상황이므로 게임(game) 이론을 적용하여 표본추출계획을 수립한다[2]. 주어진 미탐지확률(non-detection probability, β)에 대하여 표본크기를 계산한다. IAEA는 β 에 해당하는 표본크기를 구하려고 노력하고 있다. 다양한 전용방법을 생각하는 경우에 해당하는 표본추출을 이항분포로 기술하는 것은 무리가 있다. 초기하분포를 이항분포로 근사할 수 있는 범위를 벗어나는 데에도 불구하고 이항근사식을 사용하는 것은 통계적 정확성에 문제가 있는 것이다[8]. 이때 계산된 표본크기로 미탐지확률을 계산하면 주어진 β 와는 차이가 나는 값이 계산된다. 본 연구는 IAEA 사찰에 관련되는 표본할당법들을 비교하였다.

2. 사찰표본추출계획

사찰활동은 모집단 중에 원래 선언된 것이 아닌 것 즉, 결함(defect)이 있을 때 이를 조기에 탐지하고자 하는 것이다. 여기서 결함이라고 하는 것은 모집단에 있던 요소 중에서 요소의 일부가 손상되었거나 다른 것으로 대체되었거나 없어진 것을 말한다. IAEA에서는 결함을 전체결함(gross defect), 부분결함(partial defect), 그리고 경미결함(bias defect)으로 구분한다. 피사찰 측에서 핵물질용 전용하고자 한다면 다양한 결함들을 고려하여 탐지확률이 가장 작아지는 방법을 택할 것이다. IAEA는 이러한 상황을 고려하여 표본추출계획을 세운다. IAEA가 적용하는 가설검정은 다음과 같다[1].

- H_0 : 모집단(stratum, 계층)에서 전용이 발생하지 않았다.
- H_1 : 모집단(stratum, 계층)에서 1 SQ의 전용이 발생했다.

1 SQ(Significant Quantity, 有意量)은 핵무기 1 개를 제조할 수 있는 핵물질 量이다. 특정 계층(stratum)에서의 1 SQ 전용여부에 대한 검증은 해당 시설에서의 1 SQ 전용여부에 대한 검증에 해당하고 나아가서는 해당 국가에 대한 1 SQ 전용여부에 대한 검증이라고 볼 수 있다[2]. 통계적으로 정확한 표본계산법은 초기하분포를 사용하는 방법이다. 사찰현장에서 초기하분포를 사용하기 어렵기 때문에 IAEA는 두가지 근사식이 유도되는 표준이항계산법(standard binomial method)에 기반을 표본크기 계산법을 개발하였다[3][4][5]. J.L. Jaech는 표준이항계산법 보다 초기하계산법에 더 근사한 개선된 이항계산법을 유도하였다[6]. 피사찰 측의 예상되는 전용방법에 대응하여 IAEA는 위의 결함 종류에 대한 최대 3 가지 검증방법을 사용하고 있다. 주어진 β 에 대해 계산된 표본크기를 이들 검증방법에 할당하는 방법에는 두가지가 있다. 첫째는 반복할당법으로서 PC(Personal Computer)가 필요하며 두번째 방식은 포켓 계산기로 계산가능한 근사할당법이다. 반복할당법에는 IAEA에서 개발한 표준이항할당법[3]과 이를 토대로 하여 TCNC(Technology Center for Nuclear Control, 원자력통계기술센터)에서 개발 중에 있는 초기하할당법[7][8][9]과 개선된 이항할당법이 있다. 근사할당법에는 IAEA에서 개발하여 사찰 현장에서 사용하고 있는 표준이항할당근사법(standard binomial approximation)[3]과 TCNC에서 연구 중인 개선된 이항할당근사법이 있다.

3. 초기하분포, 표준이항분포, 개선된 이항분포, 그리고 미탐지확률

3-1. 초기하분포

N 을 모집단의 크기, D 를 1 SQ에 해당하는 예상 결함수, n 을 표본크기라 할 때 표본에 d 개의 결함이 포함될 확률은 다음의 초기하분포로 나타내진다.

$$h(N, D, n, d) = \frac{\binom{D}{d} \binom{N-D}{n-d}}{\binom{N}{n}} \quad (1)$$

- 10 29 -

M 을 1SQ에 해당하는 무게, x 를 요소의 평균무게, γ 를 결함율이라고 하면 결함수는

$$D = m(\gamma) = \lceil M/\gamma x \rceil \quad (2)$$

이다. 여기서 $\lceil M/\gamma x \rceil$ 는 $M/\gamma x$ 를 절상한 자연수이다. 식(2)에서 결함수가 절상되어 계산되기 때문에 표본크기는 적게 계산된다. 식(1) 계산에 C/C++ 언어의 long double 이라는 데이터 형태를 사용했다[7]. Long double 에서 표현 가능한 부동소수의 범위는 10^{4932} 이다.

3-2. 표준이항분포

위의 초기하분포는 다음의 조건에서 이항분포로 근사된다[5].

$N > 50$, $f = nN \leq 0.10$, $D \leq n$ 일 때:

$$h(N, D, n, d) \approx b(D, p, d) = \binom{D}{d} f^d (1-f)^{D-d} \quad (3)$$

$N > 50$, $p = DN \leq 0.10$, $n \leq D$ 일 때:

$$h(N, D, n, d) \approx b(n, p, d) = \binom{n}{d} p^d (1-p)^{n-d} \quad (4)$$

3-3. 개선된 이항분포

초기하분포와 이항분포의 평균과 분산을 각각 등식으로 하여 아래의 값으로 기술되는 개선된 이항분포 형태를 사용한다[6].

$$p_1 = 1 - (N-n)(N-D)/(N(N-1)) \quad (5)$$

$$n_1 = n \cdot D / (N \cdot p_1)$$

3-4. 미탐지확률

결함을 결함이라고 판정할 확률을 q 라고 할 때, 미탐지확률은 각각 다음의 형태를 취한다.

초기하분포를 적용할 때:
$$\beta = \sum_{d=0}^{d=n} h(N, D, n, d)(1-q)^d \quad (6)$$

표준이항분포를 적용할 때:
$$\beta = (1-f \cdot q)^D = (1 - \frac{n}{N} q)^D \quad (7)$$

또는

$$\beta = (1-p \cdot q)^n = (1 - \frac{D}{N} q)^n \quad (8)$$

개선된 이항분포를 적용할 때[5]:
$$\beta = (1-p_1 \cdot q)^{n_1} \quad (9)$$

4. IAEA의 표준이항할당법[3]

IAEA는 피사찰 측의 전용방법에 대응하여 정밀도가 상이한 검증방법을 사용한다. IAEA의 방식은 식(7)에서 $q = 1$ 에서 전체결함을 탐지하기 위한 표본크기를 구한다. 사찰장비의 탐지성능을 고려하는 $q < 1$ 에 대하여 식(8)과 다음의 방식을 적용하여 부분결함과 경미결함에 대한 초기할당(initial allocation)을 구한다. 결함수가 $m(\gamma)$ 일 때의 표본크기는 식(8)에서

$$\eta_i = \frac{\ln(\beta)}{\ln(1 - \frac{m(\gamma_i)q_i}{N})} \quad (10)$$

이 된다. 여기서 q_i 는 i 번째 검증방법에서 결함을 결함이라고 판정할 확률로서

$$q_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi} u_2} \int_0^{\infty} e^{-x^2/2} dx \quad (11)$$

이며

$$u_i = \frac{3\delta_i - \gamma_i}{\delta_i(1 \pm \gamma_i)} \quad (12)$$

이다. δ 는 사찰장비의 상대표준편차(relative standard deviation)이며, - 부호는 overstatement 경우(PIV(Physical Inventory Verification), SD(Shipment Domestic), SF(Shipment Foreign) 계층)에 해당하고, + 부호는 understatement 경우(RD(Receipt Domestic), RF(Receipt Foreign) 계층)에 해당한다[1]. 식(10)에서 $m(\gamma)$ 가 최대일 때 η 는 최소값을 갖게 된다. 식(10), (11), (12)를 γ 에 대해 풀면 다음과 같다.

$$\frac{e^{-u_i^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \frac{(1 \pm 3\delta_i)}{\delta_i(1 \pm \gamma_i)^2} = \frac{1}{\gamma_i \sqrt{2\pi} u_i} \int_0^\infty e^{-x^2/2} dx \quad (13)$$

식(13)을 시행착오법으로 풀면 다음과 같다.

$$\text{Overstatement 경우: } \gamma_i = -0.002 + 4.259\delta_i - 3.24\delta_i^2 \quad (14)$$

$$\text{Understatement 경우: } \gamma_i = -0.002 + 4.284\delta_i - 1.508\delta_i^2 \quad (15)$$

초기 표본 할당을 계산하는 순서는 다음과 같다.

- ① 식(14), (15)에서 γ_2 를 계산한다.
- ② 식(2)에서 $[M/\gamma]$ 를 계산한다.
- ③ 식(11), (12)에서 q_2 를 계산한다.
- ④ 식(10)에서 두번째와 세번째 검증방법에 할당되는 표본크기인 n_2 를 계산한다.
- ⑤ 식(7)에서 전체 표본크기 n 을 구한 후, 첫번째 검증방법에 할당되는 표본크기인 $n_1 = n - n_2$ 를 계산한다.

세가지 검증방법을 적용하는 경우에는 위와 유사한 방법으로 $n_2 = n_2 - n_3$ 를 계산한다. 이상에서 구한 초기 표본할당크기로부터 다양한 크기의 결함에 대한 표본크기를 반복계산하여 β 에 근접한 표본할당을 계산한다. 식(7)에서 계산한 전체표본크기가 초기하분포에 의한 계산보다 크기 때문에 β 에 가장 근접한 표본할당이 아니다[9].

5. IAEA의 표준이항 할당근사법[3]

식(10)에서 $\gamma = \gamma/q_i$ 로 하고 γ 를 δ 의 간단한 함수로 표시할 수 있으면 η 계산이 간단해진다. IAEA는 포켓 계산기로 표본할당을 계산하기 위하여 초기 표본할당이 최종 표본할당과 같다는 가정을 하여 아래의 γ' 근사식들을 유도하였다.

$\delta \leq 0.15$ 일 때, overstatement 경우:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \max(\delta_2; 0.0075 - 0.0531\delta_1 + 2.3690\delta_1^2) \\ \gamma'_2 &= 4.737\Delta_2 - 5.490\Delta_2^2 \\ \Delta_3 &= \max(\delta_3; 0.331\delta_2) \\ \gamma'_3 &= 4.737\Delta_3 - 5.490\Delta_3^2 \end{aligned} \quad (16)$$

$\delta \leq 0.15$ 일 때, understatement 경우:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \max(\delta_2; 0.162\delta_1) \\ \gamma'_2 &= 4.802\Delta_2 + 4.470\Delta_2^2 \\ \Delta_3 &= \max(\delta_3; 0.208\delta_2) \\ \gamma'_3 &= 4.802\Delta_3 + 4.470\Delta_3^2 \end{aligned} \quad (17)$$

표1. Comparison between inspection sample size allocation algorithms

β	SQ	x	N	n	d1	d2	d3	ou	g2'	n2	g3'	n3	1.0 sba			1.0sb			1.0sba-1.0sb		
													s1	s2	s3	s1	s2	s3	dn	ad	rd
10	8	0.4	25	3	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	2	0	1	1	1	1	0	1.4	0.82
10	8	0.4	50	6	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	5	0	1	5	0	1	0	0.0	0.00
10	8	0.4	100	11	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	2	0.0465	1	9	1	1	9	1	1	0	0.0	0.00
10	8	0.4	200	22	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	5	0.0465	1	17	4	1	17	1	4	0	4.2	0.24
10	8	0.4	500	55	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	13	0.0465	2	42	11	2	42	6	7	0	7.1	0.16
10	8	0.4	25	3	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	2	0	1	2	0	1	0	0.0	0.00
10	8	0.4	50	6	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	5	0	1	5	0	1	0	0.0	0.00
10	8	0.4	100	11	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	10	0	1	10	0	1	0	0.0	0.00
10	8	0.4	200	22	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	3	0.0387	1	19	2	1	19	2	1	0	0.0	0.00
10	8	0.4	500	55	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	8	0.0387	1	47	7	1	47	7	1	0	0.0	0.00
10	75	1.0	100	4	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	3	0	1	2	1	1	0	1.4	0.58
10	75	1.0	200	7	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	6	0	1	6	0	1	0	0.0	0.00
10	75	1.0	500	16	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	3	0.0465	1	13	2	1	13	1	2	0	1.4	0.11
10	75	1.0	1000	31	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	6	0.0465	1	25	5	1	24	2	5	0	5.1	0.21
10	75	1.0	2000	61	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	14	0.0465	2	47	12	2	47	7	7	0	7.1	0.15
10	75	1.0	100	4	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	3	0	1	3	0	1	0	0.0	0.00
10	75	1.0	200	7	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	6	0	1	6	0	1	0	0.0	0.00
10	75	1.0	500	16	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	15	0	1	14	1	1	0	1.4	0.10
10	75	1.0	1000	31	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	4	0.0387	1	27	3	1	27	3	1	0	0.0	0.00
10	75	1.0	2000	61	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	8	0.0387	1	53	7	1	53	6	2	0	1.4	0.03
50	8	0.4	25	1	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	50	2	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	100	4	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	3	0	1	3	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	200	7	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	2	0.0465	1	5	1	1	5	1	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	500	18	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	4	0.0465	1	14	3	1	14	2	2	0	1.4	0.10
50	8	0.4	25	1	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	50	2	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	100	4	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	3	0	1	3	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	200	7	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	6	0	1	6	0	1	0	0.0	0.00
50	8	0.4	500	18	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	3	0.0387	1	15	2	1	16	1	1	0	1.4	0.09
50	75	1.0	100	1	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	200	2	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	500	5	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	4	0	1	4	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	1000	10	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	2	0.0465	1	8	1	1	8	1	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	2000	19	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	4	0.0465	1	15	3	1	14	2	3	0	2.4	0.17
50	75	1.0	100	1	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	200	2	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	500	5	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	4	0	1	4	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	1000	10	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	9	0	1	9	0	1	0	0.0	0.00
50	75	1.0	2000	19	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	3	0.0387	1	16	2	1	16	2	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	25	1	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	50	1	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	100	2	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	200	3	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	2	0	1	2	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	500	6	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	2	0.0465	1	4	1	1	4	1	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	25	1	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	50	1	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	100	2	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	200	3	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	2	0	1	2	0	1	0	0.0	0.00
80	8	0.4	500	6	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	5	0	1	5	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	100	1	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	200	1	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	500	2	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	1000	3	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	1	0.0465	1	2	0	1	2	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	2000	6	0.15	0.030	0.0080	o	0.235	2	0.0465	1	4	1	1	4	1	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	100	1	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	200	1	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	0	0	1	0	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	500	2	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	1	0	1	1	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	1000	3	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	2	0	1	2	0	1	0	0.0	0.00
80	75	1.0	2000	6	0.15	0.030	0.0080	u	0.148	1	0.0387	1	5	0	1	5	0	1	0	0.0	0.00
평균																			0.0	0.6	0.05
표준편차																			0.0	1.6	0.14

n: total sample size for 1.0sb d_i: relative standard deviation of *i*th verification method
ou: overstatement or understatement s_i: allocated sample size for *i*th verification method

0.99hy			0.99ib			0.99sb			0.99iba			0.99sba			0.99ib-0.99hy			0.99sb-0.99hy			0.99sba-0.99hy			0.99sba-0.99iba					
sl	s2	s3	sl	s2	s3	sl	s2	s3	sl	s2	s3	sl	s2	s3	sl	s2	s3	dn	ad	rd	dn	ad	rd	dn	ad	rd	dn	ad	rd
1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	2	0	1	0	0	0	0.00	1	1.0	0.71	1	1.0	0.71	1	1.7	1.22		
4	0	1	4	0	1	5	0	1	4	1	0	5	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.24	1	1.0	0.24	1	1.7	0.42			
8	1	1	8	1	1	9	1	1	8	0	2	9	1	1	0	0	0.00	1	1.0	0.12	1	1.0	0.12	1	1.7	0.21			
16	1	4	16	1	4	17	1	4	16	3	2	17	4	1	0	0	0.00	1	1.0	0.06	1	4.4	0.26	1	1.7	0.11			
40	6	8	40	6	8	42	6	7	41	11	2	42	11	2	0	0	0.00	1	2.2	0.05	1	8.1	0.20	1	1.0	0.02			
1	0	1	1	0	1	2	0	1	0	2	0	2	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.71	1	1.0	0.71	1	3.0	1.50			
4	0	1	4	0	1	5	0	1	3	2	0	5	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.24	1	1.0	0.24	1	3.0	0.83			
9	0	1	9	0	1	10	0	1	8	2	0	10	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.11	1	1.0	0.11	1	3.0	0.36			
18	2	1	18	2	1	19	2	1	18	1	2	19	2	1	0	0	0.00	1	1.0	0.06	1	1.0	0.06	1	1.7	0.10			
47	5	2	47	5	2	47	7	1	46	6	2	47	7	1	0	0	0.00	1	2.2	0.05	1	2.2	0.05	1	1.7	0.04			
1	0	1	1	0	1	2	1	1	1	1	0	3	0	1	0	0	0.00	2	1.4	1.00	2	2.0	1.41	2	2.4	1.73			
4	0	1	4	0	1	6	0	1	4	1	0	6	0	1	0	0	0.00	2	2.0	0.49	2	2.0	0.49	2	2.4	0.59			
12	1	2	12	1	2	13	1	2	12	1	2	13	2	1	0	0	0.00	1	1.0	0.08	1	1.7	0.14	1	1.7	0.14			
23	2	5	23	2	5	24	2	5	24	4	2	25	5	1	0	0	0.00	1	1.0	0.04	1	5.4	0.23	1	1.7	0.07			
46	7	7	46	7	7	48	7	7	46	12	2	48	12	2	0	0	0.00	2	2.0	0.04	2	7.3	0.16	2	2.0	0.04			
1	0	1	1	0	1	3	0	1	0	2	0	3	0	1	0	0	0.00	2	2.0	1.41	2	2.0	1.41	2	3.7	1.87			
4	0	1	4	0	1	6	0	1	3	2	0	6	0	1	0	0	0.00	2	2.0	0.49	2	2.0	0.49	2	3.7	1.04			
13	1	1	13	1	1	14	1	1	13	2	0	15	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.08	1	2.2	0.17	1	3.0	0.23			
26	3	1	26	3	1	27	3	1	26	2	2	27	3	1	0	0	0.00	1	1.0	0.04	1	1.0	0.04	1	1.7	0.07			
52	6	2	52	6	2	54	6	2	52	6	2	54	7	1	0	0	0.00	2	2.0	0.04	2	2.4	0.05	2	2.4	0.05			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.00			
3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
5	1	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1	5	1	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
13	2	2	13	2	2	14	2	2	13	3	1	14	3	1	0	0	0.00	1	1.0	0.08	1	1.7	0.13	1	1.0	0.07			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.00			
3	0	1	3	0	1	3	0	1	3	1	0	3	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	0.45			
6	0	1	6	0	1	6	0	1	6	0	1	6	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
14	2	1	14	2	1	16	1	1	14	2	1	15	2	1	0	0	0.00	1	2.2	0.16	1	1.0	0.07	1	1.0	0.07			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.00			
4	0	1	4	0	1	4	0	1	4	0	1	4	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
7	1	1	7	1	1	8	1	1	7	1	1	8	1	1	0	0	0.00	1	1.0	0.14	1	1.0	0.14	1	1.0	0.14			
14	2	3	14	2	3	14	2	3	15	3	1	15	3	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	2.4	0.17	0	0.0	0.00			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.00			
4	0	1	4	0	1	4	0	1	4	1	0	4	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	0.34			
8	0	1	8	0	1	9	0	1	8	0	1	9	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.12	1	1.0	0.12	1	1.0	0.12			
16	2	1	16	2	1	16	2	1	16	2	1	16	2	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
4	1	1	4	1	1	4	1	1	4	1	1	4	1	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.00			
2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
5	0	1	5	0	1	5	0	1	5	0	1	5	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
2	0	1	2	0	1	3	0	1	2	0	1	3	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.45	1	1.0	0.45	1	1.0	0.45			
4	1	1	4	1	1	5	1	1	4	1	1	5	1	1	0	0	0.00	1	1.0	0.24	1	1.0	0.24	1	1.0	0.24			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.00			
2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
5	0	1	5	0	1	5	0	1	5	0	1	5	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	1.4	1.41			
1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00	0	0.0	0.00			
2	0	1	2	0	1	3	0	1	2	0	1	3	0	1	0	0	0.00	1	1.0	0.45	1	1.0	0.45	1	1.0	0.45			
5	0	1	5	0	1	6	0	1																					

6. 초기하분포와 개선된 이항분포의 적용

기존의 표준이항할당법을 개선하기 위하여 TCNC는 두가지 방법을 시도하고 있다. 첫째는 통계적으로 정확하지만 PC를 사용해야 하는 초기하분포를 사용하는 방법이다. 표준이항분포할당에 적용한 할당방법을 초기하분포와 개선된 이항분포의 할당에 사용하였다. 둘째는 표준이항할당법 보다 초기하할당법에 근접한 값을 계산하면서 포켓 계산기에 적용가능한 개선된 이항할당근사법이다. IAEA에서 기본적으로 사용하고 있는 미탐지확률인 10%, 50%, 그리고 80%를 사용하여 표.1을 구하였다. 행 1.0sba에는 할당된 표본크기 s1, s2, s3가 계산되어 있으며 행 1.0sb에는 할당된 표본크기 s1, s2, s3가 계산되어있다. 이들을 각각 x_i, y_i 라고 할 때, 행 1.0sba-1.0sb에는 행 1.0sba와 행 1.0sb의 전체표본크기 차이 dn과 표본할당에 따른 절대 거리(absolute distance) ad, 그리고 상대 거리(relative distance) rd가 식(18), (19), (20)로 계산되어 3개의 행으로 나와있다.

$$dn = (x_1 + x_2 + x_3) - (y_1 + y_2 + y_3) \quad (18)$$

$$ad = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2} \quad (19)$$

$$rd = \frac{\sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2}}{\sqrt{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2}} \quad (20)$$

각각의 표본할당계산법에 대한 계산결과들이 행 0.99hy, 0.99ib, 0.99sb, 0.99iba, 0.99sba에 있으며 이들간의 전체표본크기 차이와 할당에 따른 절대거리, 상대거리가 해당 행에 있다. 행 1.0sba-1.0sb에 의하면 sba를 sb의 근사계산으로 보기에는 문제가 있음을 알 수 있다. 사찰현장에서 IAEA 사찰관들은 sba를 사용하고 있다. 행 0.99ib-0.99hy와 행 0.99sb-0.99hy를 비교하면 ib계산결과가 sb계산결과 보다 hy에 근접함을 알 수 있으며 표.1의 계산결과만을 비교하면 ib가 hy와 동일하게 할당하고 있으나 미탐지확률을 5%로하여 계산하면 일부 차이가 있다. iba에서 적용한 근사식은 식 (16), (17)이며, sba에서는 사용자가 2개의 검증방법 또는 3개의 검증방법을 정하고 할당계산을 수행하나, iba에서는 계산식에서 γ 값의 크기에 따라 표본할당을 2개 또는 3개의 검증방법에 대해 계산토록 했다.

7. 결론

표본할당과 관련하여 PC사용이 요구되는 3가지 반복할당법들과 포켓 계산기에서 계산가능한 2가지 근사할당법들을 비교 검토하였다. 계산결과에 의하면 IAEA가 개발한 표준이항할당법(sb)의 계산결과와 IAEA가 실제로 사용하고 있는 표준이항할당근사법(sba)의 계산결과 사이에 차이가 있다. 초기하분포에 의한 할당계산법(hy)을 개발하기 위해서는 차이에 대한 원인 규명을 수행할 필요가 있다. 현재 IAEA가 사용하고 있는 표준이항할당근사법보다 TCNC가 개발중인 개선된 이항분포를 사용한 할당근사법(iba)은 전체표본 크기에서 초기하분포계산에 근접한 결과를 보여주고 있으며 포켓 계산기에서 사용가능하기 때문에 개선된 이항근사법의 사용여부를 고려할 필요가 있다. 보장조치의 주요 지표인 미계량물질(MUF; Material Unaccounted For) 등의 통계치리에 정확성을 기하기 위해서는 표본크기에 대한 통계적 정확성이 요구된다. 따라서 포켓 계산기에서 사용가능한 개선된 이항근사식과 I-80386 이상의 CPU를 장착한 PC에서 사용할 수 있는 초기하할당법을 개발할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. IAEA, "Safeguards Criteria 1991-1995," IAEA Report 1990-11-21 (1994)
2. IAEA, "IAEA Safeguards: Statistical Concepts and Techniques," 4th rev. ed, IAEA document IAEA/SG/SCT/4 (1989)
3. J. L. Jaech and M. Russell, "Algorithm to Calculate Sample Sizes for Inspection Sampling Plans," IAEA STR-261, Rev. 1 (1991).
4. J. L. Jaech and M. Russell, "Follow up inspection sample sizes when defects are identified in the initial sample," IAEA STR-262, Rev.0 (1990)
5. V. K. Rohatgi, *Statistical Inference*, pp. 341-342, John Wiley & Sons, New York (1984)
6. J. L. Jaech, "An improved binomial approximation to the hypergeometric density function," *Journal of Nuclear Material Management*, 36-41 (1994).
7. 한국원자력연구소(서인석, 노성기, 안종성, 김현태), "초기하분포의 확률함수 계산," 한국정보산업연합회 프로그램 등록번호: 94-01-12-3470 (1994)
8. 한국원자력연구소(서인석, 박은호, 박완수, 김현태), "초기하분포와 이항분포에 의한 표본 크기, 오류 계산," 한국정보산업연합회 프로그램 등록번호: 94-01-12-3469 (1994)
9. 김현태, 박완수, 민경식, 박찬식, 박은호, "IAEA 사찰표본할당계산법에 의한 초기하분포 적용 연구," '95 춘계학술발표회(한국원자력학회) pp. 1093-1098