

Personnel Dosimetry Performance Test

Seong ho Na, Seung jae Han, Dew hey Lee, Dae-Hyung Cho

Korea Institute of Nuclear Safety
19 Gusung-dong Yusung-gu, Taejon 305-338

(Received 21 September 1996; Accepted 28 October 1996)

개인방사선 피폭선량판독 성능시험

나성호, 한승재, 이두희, 조대형

한국원자력안전기술원

Abstract—This paper describes the methods and results of the personnel dosimetry performance tests which were been implemented for the first time in Korea in 1995. Seven categories, except the neutron category prescribed in the ANSI N13.11-1993, were adopted in the test. Fifteen types of dosimeters were participated by fourteen dosimeter processing institutes. A total of 129 dosimeters were selected to test—each type — 15 dosimeters for each of the seven categories and 24 for the controls. A total of 144 radiation categories were employed in the test and a total of 2560 (including 400 controls) dosimeters were submitted—7 categories for each type of the fifteen types dosimeters and 39 categories for the retest. The performance index in each category, sum of the absolute value of the bias and the standard deviation value of the performance quotient, was estimated by the use of delivered and processed dose equivalents according to the standard procedure. The performance in a given category was assessed as acceptable, for the deep and shallow dose equivalents (or the absorbed dose), if the performance index was less than 0.5. The test results showed 54% of the processors passed in the first test, 33% in the retest and 13% in the second retest.

Key words : performance test, personnel dosimetry processor, radiation category

요약 - 본 논문에서는 1995년에 시행된 우리 나라 최초의 개인선량판독 성능시험에 대한 방법 및 결과들을 기술하고 있다. 성능시험은 ANSI N13.11-1993의 방법중 중성자를 제외한 7개의 범주에 한하여 실시하였다. 시험에 참가한 개인선량계는 14개 판독기관으로 부터 15종류이었다. 한 종류 별로 총 129개의 선량계가 제출되었는데 이는 한 범주 별로 15개씩 7범주와, 24개의 컨트롤을 합한 것이다. 재시험을 포함한 총 시험범주 수는 144개 이었고 제출된 선량계 수는 컨트롤 400개를 포함하여 총 2560개 이었다. 이는 한 범주별로 15개씩 7개 범주와 15종류에 소요된 것과 재시험을 위한 39범주에 소요된 선량계 수를 합한 것이다. 절차서에 따라 결정된 각 범주의 성능지수는 판독선량과 부여선량으로 편중값의 절대치와 표준편차의 합으로 계산되었다. 만약 어느 범주의 심부 또는 표층 선량당량(흡수선량)의 성능지수가 0.5 미만일 경우에는 해당범주는 합격으로 평가되었다. 시험결과 첫 번째 성능시험에서 전 범주를 합격한 기관은 전체의 54%, 두 번째 시험에서는 전체의 33% 그리고 세 번째 시험에서는 전체의 13%로 나타났다.

중심단어 : 성능시험, 개인선량판독, 전신개인선량계, 성능시험범주

서론

국제방사선방호위원회(ICRP)의 1990년 권고는 방사선방호의 하부구조가 강화되는 것을 의미하며 하향된 선량한도는 개인방사선피폭선량(개인선량)의 중요성이 재 강조되는 계기가 되었다.

ICRP-1990년 권고를 계기로 우리 나라에서도 개인피폭선량 관독의 성능에 관한 강조성이 증대되었고 한국원자력안전기술원에서는 개인피폭선량 검증제도 구축을 위한 연구가 시작되었다.

본 논문에서는 중장기연구 과제를 수행하면서 추진한 개인선량계 성능시험의 방법과 결과를 기술하고자 한다.

1992년에는 「개인선량 관독에 관한 기술기준」이 과학기술처고시 제92-15호로 공포되면서 같은 해 11월부터는 국내관독 기관에 대한 기술현황 분석과 실태조사가 시작되었다[1]. 이 조사에서 도출된 과제와 관독의 품질개선에 필요한 시설 및 기술 항목들은 세부적으로 분석되어 연구계획에 반영되었고 전문기술이 요구되는 연구결과는 방문지도 또는 워크샵을 통하여 관독기관에 전달하였다. 관독기관의 알고리즘을 교정하거나 검증하기 위한 개인선량계의 방사선조사는 국가표준기관과 협조체제를 이룩함으로써 수행되었다.

이러한 연구결과를 기초하여 과학기술처에서는 그동안 규제근거가 부족하다고 지적되어왔던 전문관독기관들의 시설 및 품질에 관해서는 1994년 원자력법을 개정함으로써 규제근거를 마련하였고 1995년에는 「개인선량계 관독에 관한 기술기준」과 「외부피폭선량 관독에 관한 품질보증계획서 작성기준」을 마

련하여 관독기관에 대한 인·허가제도를 수립하였다 [2]. 인허가 세부절차는 현재 미국에서 시행중인 국가성능검사제도와 유사하도록 마련하였으며, 이 절차에 따라 국내최초로 1994년부터 국내 모든 관독기관에 대한 평가제도가 실시되었다 [3, 4, 5, 6]. 국내에서 수행된 평가제도는 관독의 질적 수준을 확인하기 위해 관독품질보증계획서의 이행능력을 평가하는 부분과 관독수준의 양적 평가를 위한 성능시험 부분으로 나누어졌다. 본 논문에서는 1995년에 수행된 성능시험 방법과 결과들을 기술하고자 하며 이때 참가한 관독기관은 모두 14개이었고 이들로부터 제출된 개인선량계는 15종류로써 전신선량을 측정하는데 사용되는 필름 및 열형광선량계(TLD)들이었다.

재료 및 방법

시험방법

성능시험범주는 8개로 구분되었으며 표1은 각각의 범주에 대한 방사선원의 종류, 부여되는 방사선량의 범위, 심부선량(Deep dose equivalent) 및 표층선량(Shallow dose equivalent) 각각에 대한 합격허용준위를 나타내고 있다. 범주 III 및 VI에서 나타내고 있는 기호와 숫자들은 X-선 질을 나타내는 빔에너지 특성코드를 나타내며 시험기관이 무작위로 선정하여 적용하는 것이다. 표1의 제3란에서 Hp(10)은 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정하는 심부선량(Deep dose equivalent)으로써 인체의 몸통 표면아래 10mm 깊이에서의 선량당량을 말한다 [7]. Hp(0.07)은 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정하는 표층선량(Shallow dose equiv-

Table 1. Test Categories, Irradiation Range, and Tolerance Levels

| 성능시험 범주 | 시험조사 범위 | 성능 기준 | |
|---|---------------|--------|----------|
| | | Hp(10) | Hs(0.07) |
| I. 사고 선량, 저에너지 광자 M150 | 0.1 - 2 Sv | 0.3 | - |
| II. 사고 선량, 고에너지 광자 ¹³⁷ Cs | 0.1 - 1 Sv | 0.3 | - |
| III. 저에너지 광자 M30, M60, M100, M150, H150 | 0.3 - 100 mSv | 0.5 | 0.5 |
| IV. 고에너지 광자, ¹³⁷ Cs | 0.3 - 100 mSv | 0.5 | - |
| V. 베타, ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, Tl ¹²⁴ | 1.5 - 100 mSv | - | 0.5 |
| VI. 광자 혼합 방사선장 III 및 IV 항의 혼합 | 0.5 - 50 mSv | 0.5 | 0.5 |
| VIII. 베타 - 광자 혼합 방사선장 IV 및 V 항의 혼합 | 2 - 50 mSv | 0.5 | 0.5 |
| VIII. 중성자 - 광자 혼합 방사선장 15cm D ₂ O ²⁵² Cf 및 ¹³⁷ Cs의 혼합 | 1.5 - 50 mSv | 0.5 | - |

alent)으로써 인체의 피부 표면아래 0.07mm 깊이에 있어서의 선량당량을 말한다. 성능시험에 제출되는 선량계는 판독기관이 종사자에게 지급하여 사용하고 있는 선량계 중에서 무작위로 선정하여야 한다.

성능시험에 참가한 개인선량계는 14개 기관으로부터 15 종류이었으며 한 종류별로 총129개의 선량계가 제출되었다. 이는 한 범주 별로 15개씩 7범주와 백그라운드 컨트롤용 15개, 필요시 조사중에 대체할 수 있는 여분용 9개에 해당하는 것이다. 총144개의 범주를 시험하는 동안 컨트롤 400개를 포함하여 총 2560개의 선량계가 제출되었으며 이는 15종류의 선량계가 7범주에 15개씩 제출된 것과 1차에 합격하지 못한 기관이 재시험을 치른 39범주에 해당하는 선량계 수를 합한 것이다. 선량계는 각 범주별로 5개씩 3회에 걸쳐 표1의 시험조사 범위에 따라 방사선량을 부여하였으며 방사선을 조사할 때는 30cm x 30cm x 15cm 크기의 PMMA 팬텀에 선량계를 부착하여 사용하였다. 모든 선량계의 방사선조사는 2차표준기관인 한국원자력연구소에서 수행하였으며 이번 시험에서는 중성자선장인 범주 VIII을 제외한 7개의 범주에 국한하였다. 조사된 선량계는 조사직후 판독기관에 반환되었고, 그 중에서 사고선량범주 I과 II에 관련된 것은 당해 범주를 표시하였다. 판독기관은 선량계를 받은 즉시 판독하여 그 결과를 한국원자력안전기술원에 제출하였다.

성능기준

성능기준은 미국의 「개인선량판독 성능시험기준」인 ANSI N13.11-1993을 참고로 하였다. 제출된 개인선량계에 부여된 방사선량은 해당되는 판독기관이 판독하였고 그 결과는 다음 식(1)에 따라 평가되었다. 식(1)에서 i번째 선량계에 대한 성능지수(P_i)는 부여선량과 판독된 선량간의 차의 비를 말하며 다음과 같이 수식으로 표시된다.

$$P_i = \frac{\widetilde{H}_i - H_i}{H_i} \quad i=1, 2, \dots, 15 \dots\dots\dots(1)$$

여기서 H_i 판독기관이 보고한 측정선량당량이고 \widetilde{H}_i 는 2차표준기관이 선량계에 부여한 선량당량이다. 평균성능지수, 편중(Bias, B)은 n=15개의 선량계에 대한 성능지수의 평균치를 말하며 다음의 식(2)에 따라 결정된다.

$$B = \bar{P} = (1/n) \sum_{i=1}^n P_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서 P는 성능지수의 평균치이며 n는 방사선량이 부여된 선량계의 수(=15)이다. 표준편차(S)는 성능지수의 표준편차를 말하며 다음의 식(3)에 따라 산출된다.

$$S = \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 / (n-1) \right]^{1/2} = (3)$$

주어진 범주에서의 성능은 편중(B)의 절대치와 표준편차의 합으로써 |B| + S 로 나타내며 표1에 명시된 성능기준은 심부선량 또는 표층선량의 허용준위 L의 상한치로서 이 값을 초과하지 않아야 적합한 것으로 분류하였다. 이를 수식으로 표시하면 다음 식(4)와 같다. 여기에서 L 값은 방사선방호 및 측정관련 국제기구에서 제시한 값과 현재의 측정기술의 한계성을 고려하여 정해진 값이다 [8, 9, 10].

$$|B| + S \leq L \dots\dots\dots(4)$$

여기서 L=0.3(사고선량 범주)

=0.5(사고선량을 제외한 기타범주)

|B| ≤ 0.35(사고선량을 제외한 기타범주)

S ≤ 0.35(사고선량을 제외한 기타범주)

판독기관이 보고한 판독결과와 각 범주별 식(4)에 의해 계산되었고 그 결과 L값이 표1의 성능기준을 만족시키지 못했을 경우에는 재시험을 실시하였다. 재시험 방법은 만족시키지 못한 범주가 1개인 경우에는 당해 범주와 그와 관련된 범주 1개를 추가하여 2개의 범주에 대해서 재시험을 실시하였으며 만족시키지 못한 범주가 2개 이상인 경우에는 모든 범주에 대해서 재시험을 치렀다.

결과 및 고찰

성능시험기간 중 총 14개의 선량계판독기관이 제출한 선량계는 15 종류이었으며 이들에게 적용된 총 시험범주 수는 144개이었다. 성능시험 결과는 첫 번째 성능시험에서 전 범주를 합격한 기관은 전체의 54%, 두 번째 시험에서는 전체의 33% 그리고 세 번째 시험에서는 전체의 13%로 나타났다. 이 결과를 고찰하면 적어도 세 번째 시험에서는 모든 판독기관이 합격하였으며 합격한 기관에 대한 범주별 평균성능은 표2와 같다. 표2에서 범주별 성능(|B| + S)의 평균은 0.1 - 0.2 범위의

Table 2. Average value of performance results obtained from the passed dosimetry processors.

| 성능시험범주 | 합격수/시험수 | 합격시험범주의 평균성능 |
|--------|---------|--------------|
| I | 15/19 | 0.163 |
| II | 14/19 | 0.111 |
| III d | 15/24 | 0.185 |
| III s | 15/24 | 0.199 |
| IV | 15/19 | 0.143 |
| V | 14/18 | 0.169 |
| VI d | 15/23 | 0.154 |
| VI s | 15/23 | 0.165 |
| VII d | 15/20 | 0.138 |
| VII s | 15/20 | 0.131 |

분포를 보이지만 저 에너지 광자의 범주인 III에서는 높은 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 1과 그림 2에서는 재시험을 포함한 판독기관의 성능분포를 표시하였다. 그림 1에는 고선량범주, I 및 II의 성능분포를 나타냈고 그림 2에는 고선량범주를 제외한 III 및 VII의 성능분포를 나타냈다. 그림 1 및 그림 2의 분포도를 살펴보면 대부분이 0 - 0.3 범위에 들어있어 성능기준과 관련된 식(4)를 잘 만족시키는 것으로 나타났으며 0.5를 벗어난 것들은 재시험 대상에 포함된 것이다. 그림 3 내지 그림 12는 7개 시험범주의 각각에 대하여 모든

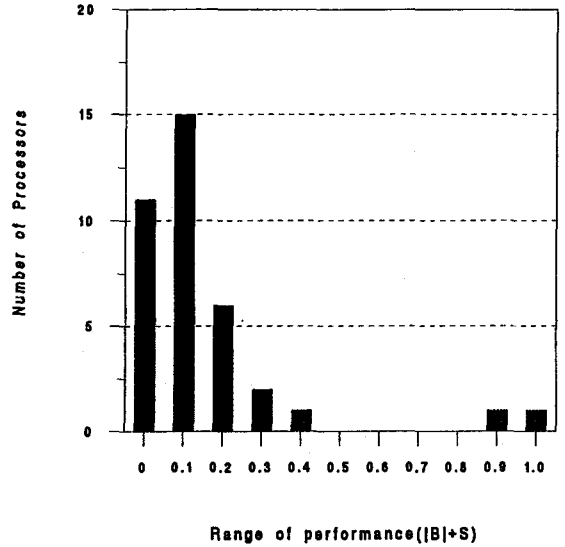


Fig. 1. Results of performance tests for test categories I and II of dosimetry processors.

참가기관의 편중(B)과 표준편차(S)의 분포를 나타냈으며 삼각형으로 나타나는 실선 안의 점들은 합격한 성능시험 결과를 표시하고 있다. 그림의 삼각형은 식(4)의 $|B| + S \leq L$ 에 의해 그려졌으며 어느 특정 범주에서 성능시험의 허용기준(L)을 만족시킨다는 것은 삼각형의 면적 내에 포함되는 것을 의미한다. 범주 III, VI 및 VII에서 평가되는 심부 및 표준선량당량에 대해서는 별도로 구분하여 그림 5와

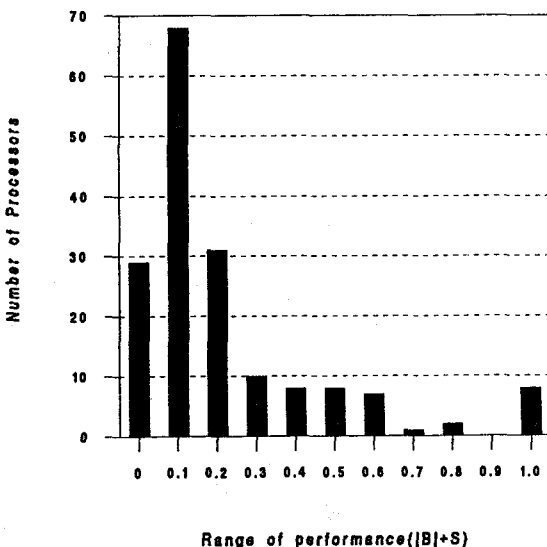


Fig. 2. Results of performance tests for test categories III through VII of dosimetry processors.

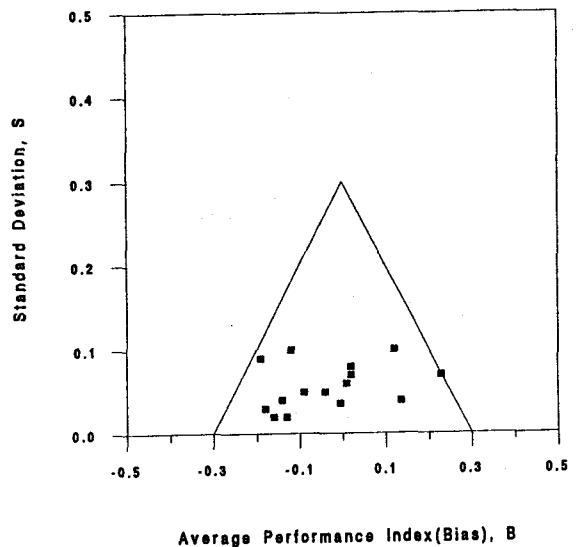


Fig. 3. Test Results for categories I, low energy photons, accident levels.

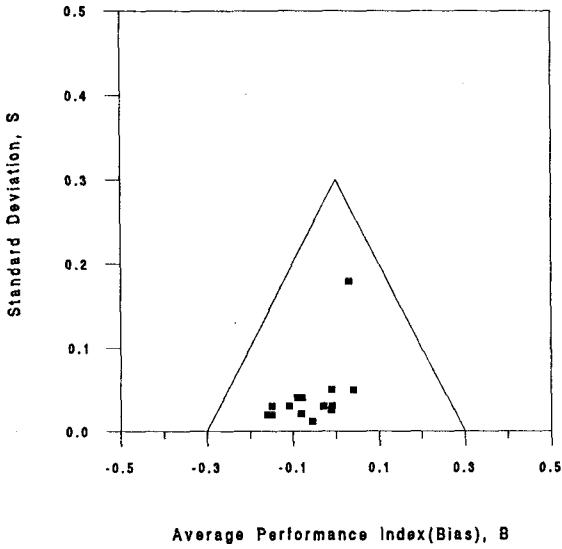


Fig. 4. Test Results for categories II, high energy photons, accident levels.

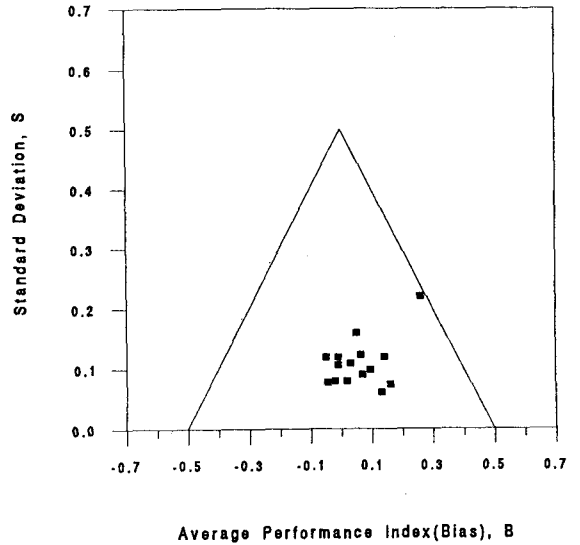


Fig. 5. Test Results for categories III, low energy photons, deep dose.

그림 6 그리고 그림 9 내지 그림 12에 각각 나타내었다.

그림 3의 경우는 고선량범주 I에 대한 시험 결과이며 편중(B)이 $-0.3 - 0.3$ 의 분포로 비교적 넓게 분포되어 있다. 이 범주의 분석결과 모두 허용기준에는 만족하지만 그림 3과 같이 허용기준선에 접근한 기관은 선량평가 알고리즘의 개선 또는 품질관리 개선이 요구되는 것으로 나타났다. 선량평가

자료를 분석한 결과는 고선량을 평가하기 위한 기초 자료로서 국가표준기관의 교정자료가 부족하였고 고선량평가 알고리즘에 대한 검증이 미흡한 것으로 나타났다. 그림 4의 경우는 고선량범주 II에 대한 시험 결과이다. 한 기관의 표준편차가 0.2로서 들출되어 보이지만 모두 좋은 분포를 보이고 있다. 그림 5와 6의 경우에는 저 에너지 광자를 포함하는 범주에서 모두 좋은 분포를 보이고 있지만 한 기관이 편

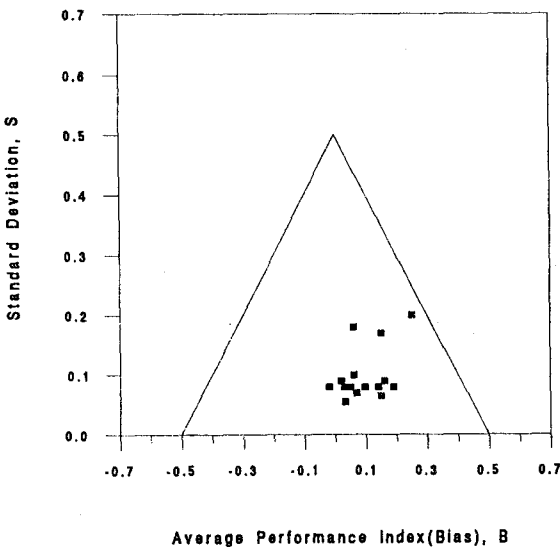


Fig. 6. Test Results for categories III, low energy photons, shallow dose.

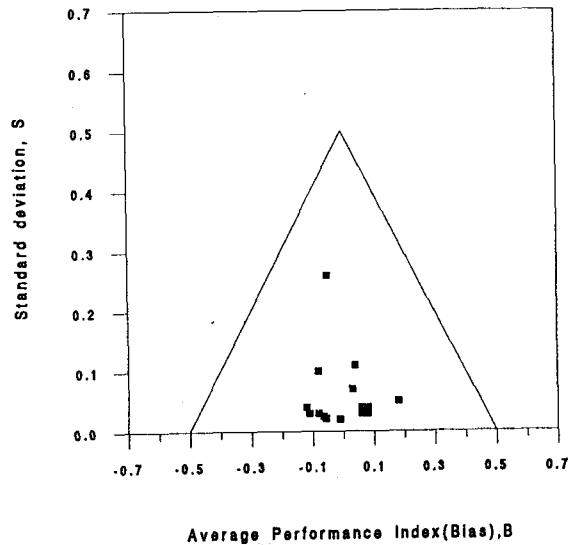


Fig. 7. Test Results for categories IV, high energy photons, deep dose.

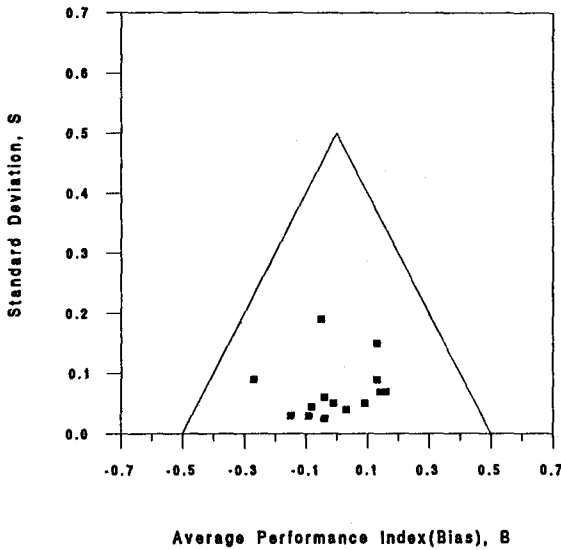


Fig. 8. Test Results for categories V, beta particles, shallow dose.

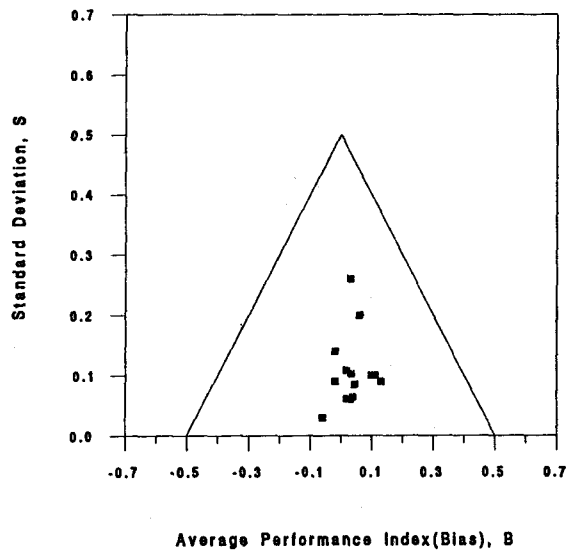


Fig. 9. Test Results for categories VI, photon mixture, deep dose.

중(B)값이 크기 때문에 성능이 좋지 않은 것으로 나타났다. 편중된 원인은 선량평가 알고리즘이 방사선의 선질을 잘못 판별하였을 가능성이 큰 것으로 판단된다. 그림 7내지 그림 11에서와 같이 표준편차가 들쭉날쭉한 것은 알고리즘의 선질 판별 과오와 품질보증 활동 부족이 대부분의 원인으로 판단되지만 이따금씩 큰 무작위변수(random variation)가 큰 오차를 유발시키고 있다는 것이 선량평가 알고리즘을 분

석한 결과 확인되었다.

그림 13과 그림 14는 7개 시험범주에서 허용기준을 벗어난 결과만을 모아서 B와 S의 분포로 표시하였다. 이 그림에서 편중과 표준편차가 $|B| + S \leq L$ 에 의해 둘러싸인 삼각형의 면적에서 벗어난 원인은 당해 범주에서 평가된 심부 및 표층 선량당량이 허용기준을 초과하였기 때문인 것으로 밝혀졌다. 그림 14에서 표층선량당량에 대한 결과들은 편중이

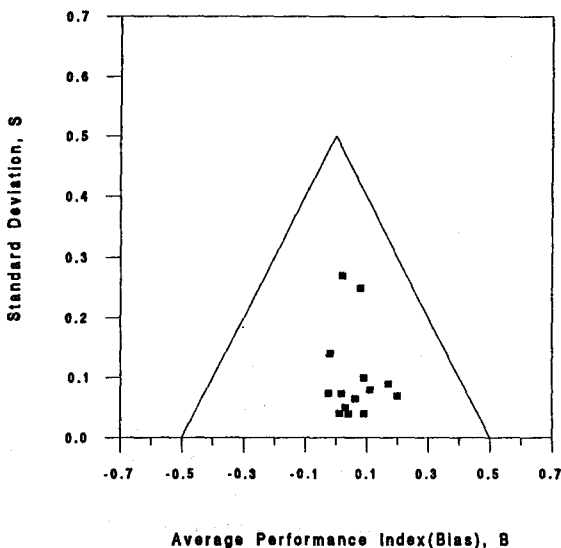


Fig. 10. Test Results for categories VI, photon mixture, shallow dose.

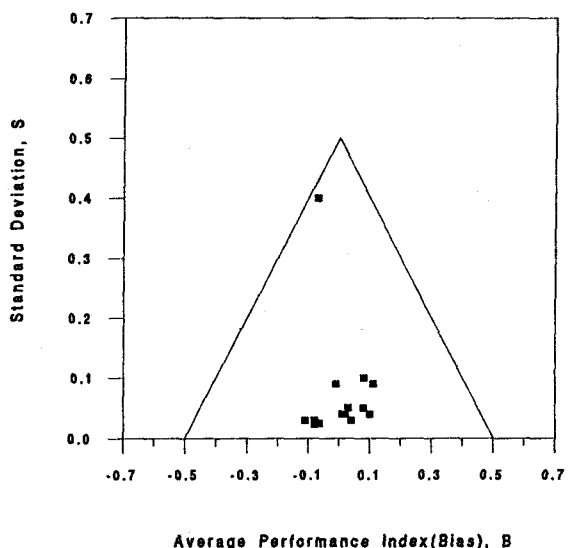


Fig. 11. Test Results for categories VII, photon and beta particle mixture, deep dose.

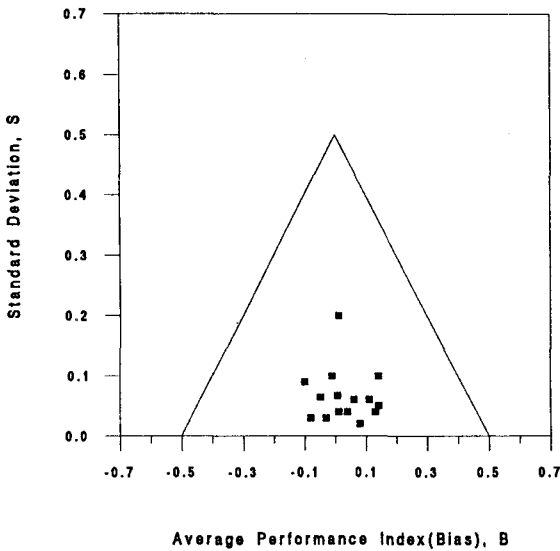


Fig. 12. Test Results for categories VII, photon and beta particle mixture, shallow dose.

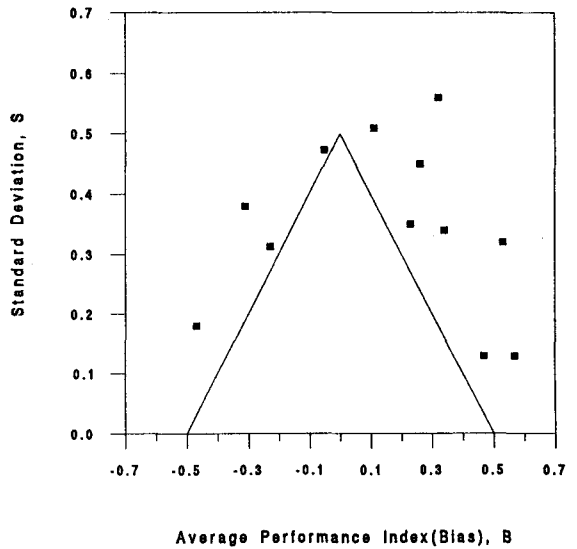


Fig. 13. Test Results of poor performance in deep dose.

양(Positive)의 방향으로 치우쳐 있고 표준편차도 상당히 어긋나 있는 것으로 나타났다.

기초적인 합격/불합격 특성 외에도 모든 참가자에 대한 자료는 각 범주마다 분석되었으며 그 결과를 종합해보면 다음과 같다.

(1) 평균성능지수 또는 편중 B

편중 B가 큰 이유는 판독된 결과의 편중을 나타낸다. 양(Positive)의 B 값은 판독기관의 판독결과

가 부여선량당량보다 높게 평가되는 것을 의미하며 음(Negative)의 B 값은 그 반대를 의미한다. 만일 B 값이 시스템오차에 의해 아주 높거나 또는 아주 낮으면 그것은 교정의 부적합 또는 선량계산 알고리즘의 오차를 의미한다.

(2) 표준편차, S

S 값이 큰 경우에는 부여선량당량을 판독하는 정밀성이 저하되고 있음을 의미한다. 이것은 P_i 값들이 돌출되어 있거나 판독되는 결과가 부여선량에 비하여 일관성이 떨어지고 있음을 의미한다.

(3) P_i 값들의 돌출

이것은 P_i 값들이 정규분포(Normal Distribution)를 하고 있다는 가정하에, 사무착오, 일관성 없는 처리공정, 불충분하거나 부정확한 선량평가 알고리즘, 저 선량당량치의 반응됨 또는 무작위사건(random event)에 기인하고 있음을 의미한다.

결 론

국내 처음으로 실시된 개인피폭선량판독 성능시험 결과는 매우 성공적인 것으로 판단된다. 시험에 참가한 판독기관중 54%가 1차 시험에 합격하였고 33%가 2차 시험에 합격하였으며 3차 시험까지는 모든 기관이 합격하였다. 시험에서 사용된 합격기준은 선진국 수준으로서 어느 특정범주에서 편중(B)의 절대치와 표준편차의 합($|B| + S$)을 계산했을 때 표 1에 명시된 성능기준을 초과하지 않아야 한다. 이

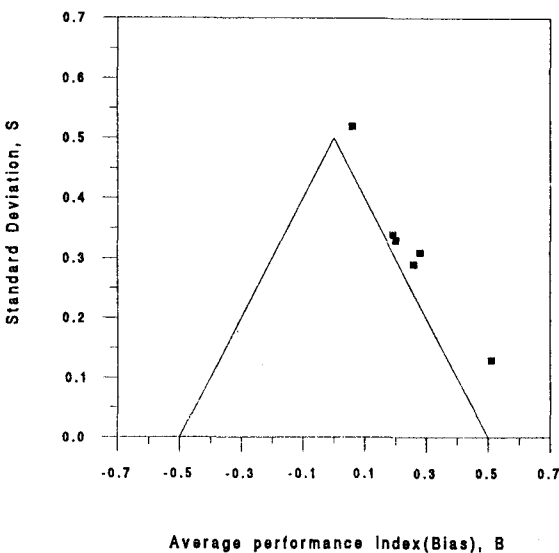


Fig. 14. Test Results of poor performance in shallow dose.

기준에 합격하기 위해서는 선량평가 알고리즘을 확보하는 것은 물론 이에 대한 검증이 필수적이라는 것이 제시협의 원인분석 결과 확인되었다. 품질관리 부족으로 개인선량계의 균질성이 떨어진 것도 제시협의 원인이 되었다. 품질관리 부족으로 개인선량계의 균질성이 떨어진 것도 제시협의 원인이 되었다. 또한 수작업 의존도가 높은 판독공정일수록 제시협 확률이 높은 것으로 조사되었다.

성능시험과 관련하여 수반된 것은 여러 가지가 있었지만 종사자들의 개인선량에 대한 정확성과 균질성이 향상된 것과 판독결과에 대한 신뢰성 및 품질이 보증될 수 있는 제도가 수립된 것은 많은 의미를 부여한다. 이러한 품질보증제도는 판독기관이 규제기관의 인정을 받고 사회적 신뢰를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 국가성능시험 제도의 목표는 만족된 품질을 계속 유지하게 하므로 정확하고 신뢰성 있는 방사선방호의 기본지표를 제공하는 것이다. 이를 위한 필수요건은 정부차원에서 시험되고 인정되어야 하는 성능시험제도와 품질보증제도인 것이 재확인되었다. 이번에 실시한 성능시험에서는 (1)개인선량 판독에 대하여 단일한 기준을 확보하여 적용함으로써 판독기관이 가지고 있는 문제점을 시정하는 기회가 마련되었고 (2)개인선량판독 제도개선을 위한 요건들을 도출함은 물론, (3)종사자의 개인선량을 정확하게 판독하는 토대를 마련함으로써 방사선방호를 효과적으로 관리할 수 있는 기반을 구축하였다.

앞으로 수행될 과제 중에서 선량계자체의 성능 및 기술은 지속적으로 연구하여야 할 것이며 성능시험 항목에 방향의존도가 평가가 추가될 경우에 대비한 선량계의 개선문제는 앞으로 해결해야 할 과제이다.

참고문헌

1. 과학기술처, 개인선량 판독에 관한 기술기준, 과학기술처고시 1992-15(1992)
2. 과학기술처, 원자력법, 법률 제4940호 (1995.1.1)
3. ANSI, *American National Standard for Dosimetry-Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing*, ANSI N13.11(1983)
4. ANSI, *American National Standard for Dosimetry-Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing*, ANSI N13.11(1993).
5. NVLAP, *National Voluntary Laboratory Accreditation Program Personnel Radiation Dosimetry*, NISTIR 89-4125(1985)
6. DOELAP, *Department of energy standard for the performance testing of personnel dosimetry system*. New York:DOE:DOE/EH-0027.
7. ICRU, *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources.*, Bethesda, MD, :ICRU Publications (1977)
8. ICRU 20, *Radiation Protection Instrumentation and Its Application*, (Bethesda, MD:ICRU Publications) (1970)
9. NCRP 57, *Instrumentation and Monitoring Methods for Radiation Protection*(1978)
10. ICRP 12, *General Principle of Monitoring for Radiation Protection of Workers*(1969)