

A Study on the Dose Assessment Methodology Using the Probabilistic Characteristics of TL Element Response

Dae-Hyung Cho, Jang-Jin Oh, Seung-Jae Han, Seong-Ho Na,
Won-Guk Hwang and Won-Keun Lee*
Korea Institute of Nuclear Safety, Kyung-Hee University*

확률분포 특성을 이용한 열형광선량계의 선량평가방법에 관한 연구

조대형 · 오장진 · 한승재 · 나성호 · 황원국* · 이원근*

한국원자력안전기술원, *경희대학교

(1998년 3월 12일 접수, 1998년 11월 11일 채택)

Abstract - Characteristics of element responses of Panasonic UD802 personnel dosimeters in the X, β , γ , γ/X , γ/β and γ /neutron mixed fields were assessed. A dose-response algorithm has been developed to decide the high probability of a radiation type and energy by using the distribution in all six ratios of the multi-element TLD. To calculate the 4-element response factors and ratios between the elements of the Panasonic TLDs in the X, β , and γ radiation fields, Panasonic's UD802 TLDs were irradiated with KINS's reference irradiation facility. In the photon radiation field, this study confirms that element-3 (E3) and element-4 (E4) of the Panasonic TLDs show energy dependent both in low- and intermediate-energy range, while element-1 (E1) and element-2 (E2) show little energy dependency in the entire whole range. The algorithm, which was developed in this study, was applied to the Panasonic personnel dosimetry system with UD716AGL reader and UD802 TLDs. Performance tests of the algorithm developed was conducted according to the standards and criteria recommended in the ANSI N13.11. The sum of biases and standard deviations was less than 0.232. The values of biases and standard deviations are distributed within a triangle of a lateral value of 0.3 in the ordinate and abscissa, With the above algorithm, Panasonic TLDs satisfactorily perform optimum dose assessment even under an abnormal response of the TLD elements to the energy imparted. This algorithm can be applied to a more rigorous dose assessment by distinguishing an unexpected dose from the planned dose for the most practical purposes, and is useful in conducting an effective personnel dose control program.

요약 - 개인피폭선량 평가용 열형광선량계인 UD802 선량계에 대한 X-선장, 감마선장, 베타선장 및 중성자선장의 순수선장과 X-선장/감마선장, 베타선장/감마선장 및 중성자장/감마선장의 혼합선장에서 반응특성을 조사하였으며 소자반응이 확률적으로 분포하는 성질을 이용한 개인피폭선량 평가 방법을 개발하였다. 선량계 특성조사를 위한 기준조사는 한국원자력안전기술원의 X-선장, 베타선장 및 감마선장을 이용하였으며 중성자선장은 미국 PNL에 의뢰하여 수행하였다. 특성조사 결과 광자선장에 대한 소자1과 소자2는 에너지에 대한 의존성이 매우 적어 선량당량의 계산시 매우 유용한 자료로 사용되어질 수 있으며 소자3과 소자4는 저에너지 및 중에너지의 광자선장에 대해 매우 민

감한 변화를 보이고 있다. 소자1/소자3 및 소자1/소자4의 반응비는 베타선장과 중성자선장에 대하여 에너지의존성이 큰 반응비를 나타내며, 소자3/소자2의 반응비는 중성자선장에 대해서만 1이하의 값을 나타내고 있다. 저에너지 및 중에너지 광자선장에 대한 에너지 분별은 소자3/소자2 및 소자3/소자4의 반응비로서 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 확률분포 분석법의 적용가능성을 보이기 위하여 Panasonic UD716AGL/UD802 판독시스템에 적용하여 ANSI N13.11-1993에 따른 성능검증을 수행하였다. 성능검증 결과 모든 범주에 대하여 성능지수,|BI+S가 최대 0.232의 성능이 확인되었다. 특히 일부 소자의 비정상적 반응에 대해서도 최적의 피폭선량평가를 수행하고 있음이 확인되었으며, 실험실에서 재현될 수 없는 실제 방사선작업 환경에서의 선량평가 수행시, 본 논문에서 제시한 선량평가방법을 적용할 경우 계획된 피폭과 예상하지 못한 방사선장에 대한 피폭을 구분할 수 있어 보다 심도 있는 피폭선량평가 및 방사선관리가 가능할 것으로 판단된다.

서론

방사선구역내에서 일상적인 업무를 수행하는 방사선작업종사자 및 기타의 업무 수행시 발생하는 방사선피폭으로 인한 개인피폭선량의 신뢰할 수 있는 평가는 방사선보호 분야에서 모든 자료의 분석이나 평가에 있어 근본이 되는 것으로 아무리 강조해도 지나치지 않을 것이다.

따라서 개인피폭선량평가의 정확성 확보 및 이에 대한 품질보증은 무엇보다 우선하여 기술의 자립이 이루어져야 하는 분야 중의 하나일 것이다. 이를 위하여 국내에서는 1992년 「개인선량 관독에 관한 기술기준」이 과학기술처고시 제92-15호 [1]로 공포되면서 같은 해 11월부터는 국내 관독기관에 대한 기술현황 분석과 실태조사를 시작하였으며 이 조사에서 도출된 내용을 기초로 1994년 원자력법의 개정과 함께 「개인선량 관독에 관한 기술기준」 [2] 및 「외부피폭선량 관독에 관한 품질보증계획서 작성기준」 [3]을 마련하여 관독기관에 대한 인.허가제도를 수립한 바 있다.

「개인선량 관독에 관한 기술기준」 중 관독기의 성능검사를 위하여 수행하고 있는 성능검증 프로그램의 품질보증을 위하여 한국원자력안전기술원에서는 성능검증용 관독시스템을 운영하고 있다. 이 시스템은 이미 미국에서 수행중인 국가 성능검증제도인 미국시험소인증 프로그램(NVLAP)과 미국에너지성 시험소인증 프로그램(DOELAP)에 참여하여 성능을 인증받은 바 있으며 IAEA 국제비교평가 프로그램에 참여하여 성능유지의 국제적인 기술 수준을 유지하고 있다[4].

그러나 현재 사용중인 선량평가방법은 성능검증 방사선장의 변화나 국제적인 선량환산인자의 재평가에 따른 환산인자의 변경시 전체적인 선량평가

방법의 개발이 요구되어 능동적인 대처에 어려움이 있다.

일반적으로 방사선피폭으로 인한 선량당량의 평가를 위하여 두 개 이상의 열형광물질 또는 필름을 사용하는 다중소자 선량계를 이용하고 있으며 방사선의 종류 및 에너지의 판별을 위하여 각각의 소자는 다양한 물질의 필터를 적절히 조합하여 구성하게 된다. 인체가 받게 되는 피폭선량의 평가는 선량계의 소자간의 반응비를 이용한 방사선의 종류 및 에너지를 판별하여 평가하는 방법을 사용하고 있다. 보편적으로 사용되고 있는 선량평가 방법은 평가하고자 하는 방사선장에 대하여 기준 조사를 수행하여 기준 조사된 방사선장의 반응과 동일한 반응을 일으키는 가를 하나 또는 둘의 소자간 반응비를 비교하여 평가하는 방법을 사용하고 있다.

이러한 평가방법의 단점으로는 기 선정된 방사선장에 대한 평가만이 가능하게 되어 실제의 방사선작업환경에 대한 평가에 한계를 갖게 되며, 특징적인 반응비 만을 사용함으로써 비정상적인 선량계의 반응에 대한 최적의 선량평가를 수행할 수 없게 된다.

또한 분석된 소자간 반응비를 유일한 값으로 사용함으로써, 일부 소자의 이상 반응시 전혀 다른 방사선 종류 및 에너지로 평가하게 되며, 관독환경의 변화나 관심의 대상이 되는 방사선장의 일부가 변화하는 경우에도 전 영역에 걸친 기준조사와 반응비의 분석을 통한 선량평가 방법이 개발되어져야 한다.

이러한 단점을 해결하기 위해서는 다음과 같은 특징을 갖는 선량평가방법이 개발되어져야 한다.

① 현행 성능검사시 다루어지지 못하고 있는 광자의 중에너지 구간에 대한 피폭선량 평가방법이

- 이루어져야 하며
- ② 분석 가능한 반응비 전체를 비교/평가할 수 있는 방법이 개발되어져야 하며
- ③ 방사선의 종류 및 에너지에 따른 선량계 반응인자와 선량환산인자는 독립적으로 다루어져야 하며
- ④ 방사선장의 변화나 판독시스템의 환경 변화시 기본 자료의 수정이나 보완이 가능하여야 한다.

본 연구에서는 방사선의 종류 및 에너지에 대한 소자반응인자 및 소자간의 반응비를 산출하여 모든 반응비에 대하여 비교/평가함으로써 최적의 선량평가를 수행할 수 있는 소자반응비 분포함수를 이용한 선량평가방법을 개발하였다. 이 선량평가 방법은 국내의 개인피폭선량평가 성능검증프로그램의 품질보증용 판독기 및 선량계로 사용하고 있는 Panasonic UD716AGL/UD802 선량평가 시스템에 적용하여 제시한 선량평가 방법의 적용 가능성 제시를 위한 성능검증을 수행하였다[5].

원리 및 방법

1. 소자반응비의 확률분포 특성을 이용한 선량평가방법

본 연구에서 개발한 소자반응비의 확률분포 특성을 비교/분석하는 선량평가 방법(이하 “확률분포 분석법”)은 기준조사된 선량계의 반응값 및 선량환산인자를 외부에서 입력하여 소자간 반응비 및 소자반응인자를 생성하도록 구성함으로써 방사선장이나 판독시스템의 변화시 선량평가 방법의 조정이 가능하도록 하였다. 또한 성능검증시 사용되는 방사선장에 대한 소자간 반응비를 이용하지 않고 국제표준기구(ISO)에서 계측기의 교정용으로 권고하고 있는 NS(Narrow Spectrum) Series X-선장[6]에 대한 소자반응값을 사용함으로써 실제 방사선작업 환경에서의 최적화된 선량평가를 구현할 수 있도록 하였다.

확률분포 분석법을 이용한 선량평가절차는 기본적으로 다음의 6단계로 구성되며 이에 대한 흐름도는 그림 1 같다.

- 1단계 : 소자의 반응값으로부터 소자간 반응비를 생성한다.
- 2단계 : 기준조사나 방사선작업환경에서 구해진 소자반응비 평균값 및 표준편차와 비교하여 분석하고자 하는 소자간의 반응비가 기설정된 소자반응비의 표준편차에 일정 배수 이내의 영역에 있는 방사선

장을 선별한다.

- 3단계 : 선별된 방사선장에서의 기타의 소자반응비에 대한 분석을 수행
- 4단계 : 생성가능한 모든 소자반응비 분석을 통해 분석된 입사 방사선장 중 가장 최적의 방사선장을 찾아낸다.
- 5단계 : 분석된 방사선장에서의 각 소자의 반응인자를 적용하여 조사량을 구한다.
- 6단계 : 조사량에 선량환산인자를 적용하여 피폭선량을 계산한다.

2. 소자반응인자 및 소자반응비

일정량의 방사선조사선량, E,에 대해 소자 반응값 $R_{i,j}$ 를 나타내는 선량계 j 의 i 소자에 의한 반응인자, $RSP_{i,j}$,는 식(1)로 구해지며 4개의 소자에 대한 소자간의 반응비는 기본적으로 두 개 소자반응을 이용하여 6개의 인자, 즉 PA=소자3/소자2, PB=소자1/소자2, PC=소자3/소자4, PD=소자4/소자2, PE=소자1/소자4 및 PF=소자1/소자3를 산출해 낼 수 있다.

$$RSP_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{E} \text{-----}(1)$$

배타선/감마선, X-선/감마선 및 중성자/감마선 대한 소자간 반응비의 생성을 실험적으로 구하기 위해서는 과다한 기준조사가 요구되어 본 연구에서는 순수 방사선장에 대하여 기준조사된 반응값의 평균값과 표준편차 값을 이용하여 조사선량의 비를 감마선 80%부터 20%까지 혼합되는 경우의 반응비를 정규분포상의 변수생성방법에 따라 생성하였다. 생성된 반응비의 적합성을 검토하기 위하여 30개의 선량계를 이용, 임의의 2개 X-선장에서 소자반응비를 생성하여 비교/검토하였다. 분석결과 변수생성방법에 의해 생성한 모든 소자반응비는 실험으로부터 얻은 소자반응비의 1 σ 범위내에 존재하고 있음이 확인되어 생성된 반응값은 본 연구에서 적용하고자 하는 알고리즘의 기초자료로서 활용하였다. 변수생성법으로 생성한 혼합장에서의 소자별 반응비에 대한 표준편차는 식(2)로부터 구해진다.

$$\sigma_p = P \sqrt{\left(\frac{\sigma_i}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_j}{R_j}\right)^2} \text{-----}(2)$$

여기서

P, σ_p : 반응비의 표준편차
 R_i, σ_i : 소자 i 의 평균 및 표준편차
 R_j, σ_j : 소자 j 의 평균 및 표준편차

3. 반응도 특성 실험

개발된 확률분포 분석법을 Panasonic사의 UD716AGL/UD802 시스템에 적용하였다. 사용한 UD716AGL 자동판독기의 가열장치 구조는 정확하고 안정된 열량의 공급을 위하여 그림2와 같은 적외선 램프에 의한 광가열방식을 채택하고 있으며, 선량계는 조사된 방사선의 반응면적을 크게 하기 위한 입자형태의 선량계를 개발하여 사용하고 있다. 개인방사선피폭선량 평가용으로 고안된 UD802 선량계는 표1과 같이 Li2B4O7:Cu와 CaSO4:Tm의 4개의 소자로 구성되어 있으며 각소자의 방사선 종류 및 에너지에 대한 민감도는 표2와 같다.

판독시스템의 특성조사에 앞서, 공급업체에서 요구하고 있는 판독기 및 선량계에 대한 열공급 최적화, 소자의 특성조사, 판독기 선형성조사 및 교정 등을 운영메뉴얼에 따라 수행하였다.

소자의 반응인자 및 반응비를 구하기 위한 X-선장, 감마선장 및 베타선장의 기준조사는 한국원자력안전기술원에 설치된 방사선발생장치를 이용하여 수행하였으며 중성자선장은 미국 PNL에 의뢰하여 수행하였다.

저에너지 광자선장, X-선장에 대한 기준조사는 계측기교정용 등을 위하여 ISO에서 권고하고 있는 ISO NS series의 13개 X-선장을 사용하여 전 에너지 구간에 대한 기준조사를 수행하였다. 고에너지 광자선장은 137Cs를 이용하였으며, 베타선장의 기준조사는 저에너지 영역의 Tl-204 및 고에너지 영역의 90Sr/90Y를 사용하였다[7]. 중성자선장은 moderated 252Cf, bare 252Cf 및 241AmBe 기준선장[8]에 대하여 미국 PNL에 기준조사를 의뢰하여 수행하였다[9]. 각 방사선장에 대하여 15개 이상의 선량계를 약 3mSv로 기준조사하였으며 기준조사 및 판독시 발생할 수 있는 오차를 포함하기 위하여 모든 기준조사는 3회 이상에 걸쳐 수행하였다. 조사된 선량계는 판독기의 운영절차에 따라 제어용선량계와 함께 24시간 경과 후 판독하였으며 ISO에서 권장하고 있는 PMMA 펜텀을 이용하였으며 조사조건은 ANSI N13.11-1993의 조건에 따랐다[10]. 본 연구에서 사용한 기준조사장의 특성 및 조건은 표3~표5와 같다.

4. 확률분포 분석법의 검증

개발한 확률분포 분석법을 검증하기 위하여 한국원자력연구소의 기준조사시설을 이용한 중성자선장을 제외한 표6의 7개 범주에 대하여 판독기관 성능검증시 적용하였던 품질보증용 선량계의 반응값에 대한 평가를 수행하였다.

성능기준은 미국의 「개인선량판독 성능시험기준」인 ANSI N13.11-1993을 참고로 하였다. 피폭선량평가의 성능은 식(3)에 따라 평가된다. 선량계 i 에 대한 성능지수, P_i 는 조사된 선량과 판독된 선량간의 차의 비로 다음 식으로 계산된다.

$$P_i = \frac{H_i^* - H_i}{H} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

여기서 H_i 는 판독된 선량당량이고 H_i^* 는 기준조사된 선량당량이다. 평균성능지수, 편중(Bias, B)는 성능지수의 평균치를 나타내며 식(4)와 같이 계산된다.

$$B \equiv \bar{P} = (1/n) \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

여기서 \bar{P} 는 성능지수의 평균치이며 n 은 성능시험 선량계의 수이다. 표준편차, S는 성능지수의 표준편차로 식(5)와 같다.

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \bar{P})^2}{(n-1)}} \quad (5)$$

어느 한 범주에서의 성능은 편중의 절대치와 표준편차의 합인 $|B|+S$ 로 나타내게 된다.

성능평가 결과는 판독기 제조사인 Panasonic사에서 제공하고 있는 ANSI N13.11-1983[11] 및 ANSI N13.11-1993 기준선장에 대하여 개발한 반응-선량평가 알고리즘에 동일한 반응값에 대한 평가를 수행하여 비교하였다.

결과 및 논의

방사선 조사선량에 대한 소자의 민감도를 나타내는 소자반응인자는 그림3과 같으며, 6개의 각 소자 간 반응비는 그림4~그림9와 같다. 소자1과 소자2의 반응은 광자선장에 대하여는 에너지에 대해 큰 변화는 나타나고 있지 않으나, 베타선장과 중성자선장에 대해서는 에너지의 함수이다. 소자3과 소자4의 반응은 광자선장에 대하여 에너지 의존성이 매우 커 광자에 의한 피폭선량 평가시 입사된 광자선 에너지의 판별에 매우 중요한 정보를 얻을 수 있다.

방사선장 종류의 식별을 위해 사용되어 질 수

있는 소자간의 반응비는 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째 광자선장 식별 및 에너지 판별의 기준이 되는 반응비 인자는 PA(소자3/소자2), PC(소자3/소자4) 및 PF(소자1/소자3)이다. PF가 1이하이며 PC가 1이상일 경우 광자선에 의한 조사일 확률이 매우 높다고 판단할 수 있다. 둘째 베타선장의 식별은 반응비 인자 PB(소자1/소자2), PE(소자1/소자4) 및 PF(소자1/소자3)이며 이는 저에너지의 X-선장에 대한 반응비와 혼동되어 판단하기가 쉽지 않으나 이들 인자를 동시에 비교/분석한다면 최적의 평가를 수행할 수 있을 것이다. 셋째 중성자선장에 대해 특별한 반응비를 나타내고 있는 인자는 PA(소자3/소자2), PD(소자4/소자2) 및 PE(소자1/소자4)로 PD 및 PE의 경우 중성자에 대하여 저에너지 X-선장이 입사한 경우와 흡사한 반응비를 나타내고 있으나 PA로서 중성자선장에 대한 반응 확률을 판별할 수 있다.

그밖의 소자간 반응비에 대한 특징적인 사항으로는

- 중성자선장 또는 중성자 혼합선장의 경우 소자3/소자2 반응비가 1이하의 반응을 보이고 있으며,
- 중성자선장의 경우 소자1/소자3 반응비가 1이상의 값을 보이고 있다.
- 베타선장이거나 저에너지의 광자선장에 대해서는 소자1/소자2의 반응비가 1 이상을 나타내고 있다.
- 광자선장의 에너지에 대한 식별을 위해서는 소자3/소자2, 소자3/소자4 및 소자1/소자3 반응비를 사용할 수 있다.

성능검증을 위하여 수행한 심부선량과 표층선량에 대한 성능비교는 그림10 및 그림11과 같으며 7개 시험범주에 대한 편중 및 표준편차의 분포는 그림12와 그림13과 같다. 그림10와 그림11에 나타난 바와 같이, 성능결과는 제조업체에서 제공하고 있는 알고리즘과 본 연구에서 개발한 선량평가방법 모두 성능기준을 만족하고 있다. 그러나 ANSI-1993 알고리즘의 경우 심부선량 및 표층선량 모두에서 다소 큰 값을 보이고 있다. 이는 모든 범주의 성능지수가 음의 값을 보이고 있으므로 이를 반영한 판독기의 교정으로 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 비해 ANSI-1983의 성능평가 결과가 우수하게 나타나고 있는 것은 시스템의 구축시 수차례에 걸친 알고리즘의 보완을 통하여 현재의 시스템 환경과 잘 일치하는 알고리즘으로 수정된 결과이다. 본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용한 결과는 전체적으로 약 10%의 다소 높은 표준편차

를 보이고 있는데, 이는 특정한 반응비 인자의 적용방법과는 달리 모든 인자의 확률분포를 비교/분석하면서 발생하는 피할 수 없는 알고리즘의 고유 오차로 분석된다.

결론

본 연구에서 개발한 다중소자 열형광선량계의 소자간 반응비의 확률분포를 이용한 선량평가방법을 Panasonic 사의 UD716AGL/UD802 판독시스템에 적용 결과, 기존의 선량평가 알고리즘과 유사한 성능을 나타내고 있으며 성능검증 프로그램의 성능기준을 만족하였다.

확률분포 분석법을 이용한 피폭선량평가지 성능검증에서 사용되는 방사선 종류 및 에너지 뿐만 아니라 전에너지 구간에 대해서 선량계로 판별할 수 있는 최선의 피폭선량평가가 가능하게 된다. 또한 방사선작업 환경의 변화, 판독시스템의 기능저하 또는 주요부품의 교체 등 판독환경의 변화 및 선량환산인자 등의 재평가로 인한 변동사항이 발생하였을 경우에 선량평가 알고리즘의 새로운 개발을 수행하지 않고도 관심 대상 방사선장에 대한 소자반응 자료 및 선량환산인자를 입력하여 선량평가에 필요한 반응비 및 선량환산인자를 재생성하는 과정으로 선량평가방법의 기본자료의 추가 또는 수정을 수행할 수 있다.

확률분포 분석법은 모든 다중소자 열형광선량계의 선량평가방법으로 사용이 가능하다. 특히 실험실에서 재현될 수 없는 실제 방사선작업 환경에서의 선량평가지 선량계의 반응값 및 선량환산인자를 입력한 후 이에 대한 가중치를 적용하므로써 계획된 피폭과 예상되지 않은 방사선장에 의한 피폭을 구분할 수 있어 보다 정확한 피폭선량평가가 가능하다.

참고문헌

1. 과기처, 개인선량판독에 관한 기술기준, 과학기술처고시 1992-15(1992).
2. 과기처, 개인선량판독에 관한 기술기준, 과학기술처고시 1996-6(1996).
3. 과기처, 개인선량판독에 관한 기술기준, 과학기술처고시 1996-7(1996).
4. 나성호 외, 방사선환경 안전성평가 기술개발, KINS/AR-282, 한국원자력안전기술원(1994).
5. Panasonic UD716AGL User's Manual
6. ISO : X and Gamma Reference Radiations

for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy, ISO/DIS-4037(1979).

7. ISO : Beta Radiation Calibrating Dosimeters and Dose-Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Beta-Radiation Energy, ISO/DIS 6980(1983).
8. ISO : Neutron Reference Radiations for Calibrating Neutron Measuring Devices Used for Radiation Protection Purpose and

for Determining Their Response as a Function of Neutron Energy, ISO/DIS 8529(1985).

9. R. Kim Paper, Personal communication, PNL(1997).
10. ANSI N13.11, American National Standard for Dosimetry-Personnel Dosimetry Performance-criteria for Testing(1993).
11. ANSI N13.11, American National Standard for Dosimetry-Personnel Dosimetry Performance-criteria for Testing(1983).

Table 1. Typical specifications of UD802 TL elements.

소자	구성 형태	조성물질	필터
#1	지름 : 3mm, 두께 : ~0.1mm (mono grain layer),	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	19mg/cm ² of Plastic
#2			320mg/cm ² of Plastic
#3	지지대 : carbon film, 상부막 : 10mg/cm ² of Teflon	CaSO ₄ :Tm	320mg/cm ² of Plastic
#4			220mg/cm ² of Plastic 800mg/cm ² of Lead

Table 2. Characteristics of neutron source in PNL.

source	Phantom Size,cm ³	Fixed Distance,cm	Mean Energy,MeV
Bare ²⁵² Cf	40x40x15	50	2.4
D ₂ O mod ²⁵² Cf			0.7
²⁴¹ AmBe			4.4

Table 3. Characteristics of neutron source in PNL.

source	Phantom Size,cm ³	Fixed Distance,cm	Mean Energy,MeV
Bare ²⁵² Cf	40x40x15	50	2.4
D ₂ O mod ²⁵² Cf			0.7
²⁴¹ AmBe			4.4

Table 4. Typical specifications of UD802 TL elements.

소자	구성 형태	조성물질	필터
#1	지름 : 3mm, 두께 : ~0.1mm (mono grain layer),	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	19mg/cm ² of Plastic
#2			320mg/cm ² of Plastic
#3	지지대 : carbon film, 상부막 : 10mg/cm ² of Teflon	CaSO ₄ :Tm	320mg/cm ² of Plastic
#4			220mg/cm ² of Plastic 800mg/cm ² of Lead

Table 5. Radiation Sensitivities for each element of the UD802 dosimeter.

Element	Beta		Photon		Neutron
	Low Energy	High Energy	Low Energy	High Energy	
#1	Low	Good	Good	Good	Thermal Only
#2	No	Low	Good	Good	Thermal Only
#3	No	Low	High	Good	No
#4	No	1%	50%	Good	No

Table 6. Typical specifications of UD802 TL elements.

소자	구성 형태	조성물질	필터
#1	지름 : 3mm, 두께 : ~0.1mm (mono grain layer), 지지대 : carbon film, 상부막 : 10mg/cm ² of Teflon	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	19mg/cm ² of Plastic
#2			320mg/cm ² of Plastic
#3		CaSO ₄ :Tm	320mg/cm ² of Plastic
#4			220mg/cm ² of Plastic 800mg/cm ² of Lead

Table 7. Characteristics of beta Nuclides recommended by ISO.

Nuclide	Half life(y)	E _{res} (MeV)	Filter Material and Dimensions
²⁰⁴ Tl	3.78	0.53	Φ 4cm,PTP foil, thickness 7mg/cm ² Φ 2.75cm,PTP foil, thickness 25mg/cm ²
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	28.5	1.80	Φ 2cm, 3cm, 5cm, PTP foil, thickness 7mg/cm ²

Table 8. Characteristics of narrow spectrum series in ISO 4037.

ISO Series	Tube Voltage,kV	HVL, mm	Mean Energy,keV
Narrow Spectrum	10	0.047Al	8
	15	0.14Al	12
	20	0.23Al	16
	25	0.66Al	20
	30	1.15Al	24
	40	0.084Cu	33
	60	0.24Cu	48
	80	0.58Cu	65
	100	1.11Cu	83
	150	2.36Cu	118
	200	3.99Cu	164
	250	5.19Cu	208
300	6.12Cu	250	

Table 9. Typical specifications of UD802 TL elements.

소자	구성 형태	조성물질	필터
#1	지름 : 3mm, 두께 : ~0.1mm (mono grain layer), 지지대 : carbon film, 상부막 : 10mg/cm ² of Teflon	Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu	19mg/cm ² of Plastic
#2			320mg/cm ² of Plastic
#3		CaSO ₄ :Tm	320mg/cm ² of Plastic
#4			220mg/cm ² of Plastic 800mg/cm ² of Lead

Table 10. Radiation Sensitivities for each element of the UD802 dosimeter.

Element	Beta		Photon		Neutron
	Low Energy	High Energy	Low Energy	High Energy	
#1	Low	Good	Good	Good	Thermal Only
#2	No	Low	Good	Good	Thermal Only
#3	No	Low	High	Good	No
#4	No	1%	50%	Good	No

Table 11. Characteristics of narrow spectrum series in ISO 4037.

ISO Series	Tube Voltage,kV	HVL, mm	Mean Energy,keV
Narrow Spectrum	10	0.047Al	8
	15	0.14Al	12
	20	0.23Al	16
	25	0.66Al	20
	30	1.15Al	24
	40	0.084Cu	33
	60	0.24Cu	48
	80	0.58Cu	65
	100	1.11Cu	83
	150	2.36Cu	118
	200	3.99Cu	164
	250	5.19Cu	208
300	6.12Cu	250	

Table 12. Characteristics of beta Nuclides recommended by ISO.

Nuclide	Half life(y)	E _{res} (MeV)	Filter Material and Dimensions
²⁰⁴ Tl	3.78	0.53	∅ 4cm,PTP foil, thickness 7mg/cm ² ∅ 2.75cm,PTP foil, thickness 25mg/cm ²
⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y	28.5	1.80	∅ 2cm, 3cm, 5cm, PTP foil, thickness 7mg/cm ²

Table 13. Performance test categories and irradiation range.

성능시험 범주	시험조사 범위
I. 사고선량, 저에너지 광자 M150	0.1 - 2 Sv
II. 사고선량, 고에너지 광자 ¹³⁷ Cs	0.1 - 1 Sv
III. 저에너지 광자 M30,M60,M100,M150,H150	0.3 - 100 mSv
IV. 고에너지 광자 ¹³⁷ Cs	0.3 - 100 mSv
V. 베타, ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, ¹²⁴ Tl	1.5 - 100 mSv
VI. 광자 혼합 방사선장, III 및 IV항의 혼합	0.5 - 50 mSv
VII. 베타-광자 혼합 방사선장, IV 및 V항의 혼합	2 - 50 mSv

Table 14. Characteristics of neutron source in PNL.

source	Phantom Size,cm ³	Fixed Distance,cm	Mean Energy,MeV
Bare ²⁵² Cf	40x40x15	50	2.4
D ₂ O mod ²⁵² Cf			0.7
²⁴¹ AmBe			4.4

Table 15. Performance test categories and irradiation range.

성능시험 범주	시험조사 범위
I. 사고선량, 저에너지 광자 M150	0.1 - 2 Sv
II. 사고선량, 고에너지 광자 ¹³⁷ Cs	0.1 - 1 Sv
III. 저에너지 광자 M30,M60,M100,M150,H150	0.3 - 100 mSv
IV. 고에너지 광자 ¹³⁷ Cs	0.3 - 100 mSv
V. 베타, ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y, ¹²⁴ Tl	1.5 - 100 mSv
VI. 광자 혼합 방사선장, III 및 IV항의 혼합	0.5 - 50 mSv
VII. 베타-광자 혼합 방사선장, IV 및 V항의 혼합	2 - 50 mSv

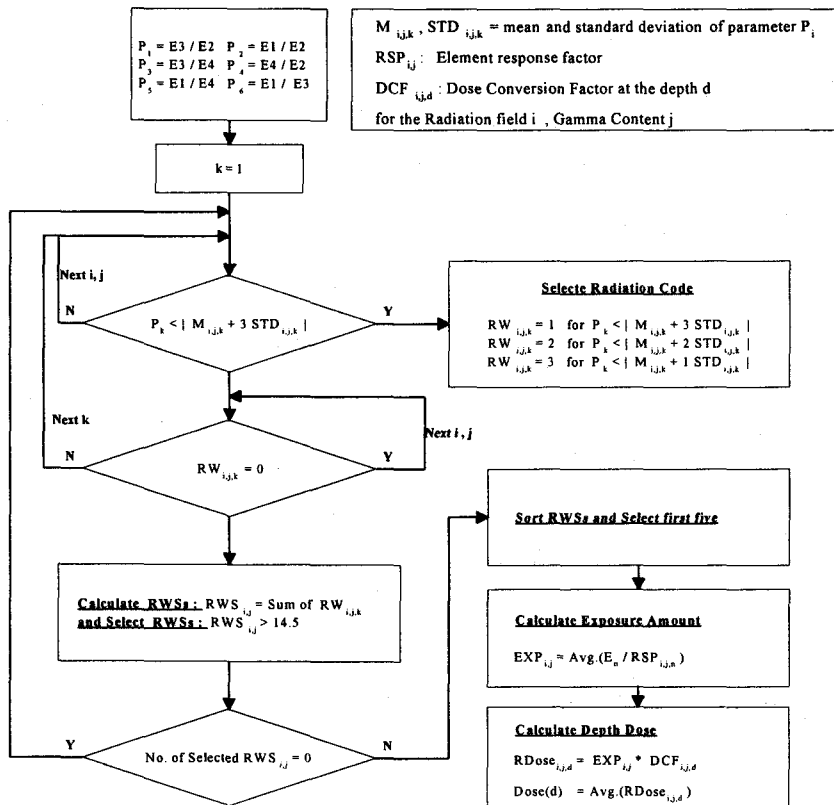
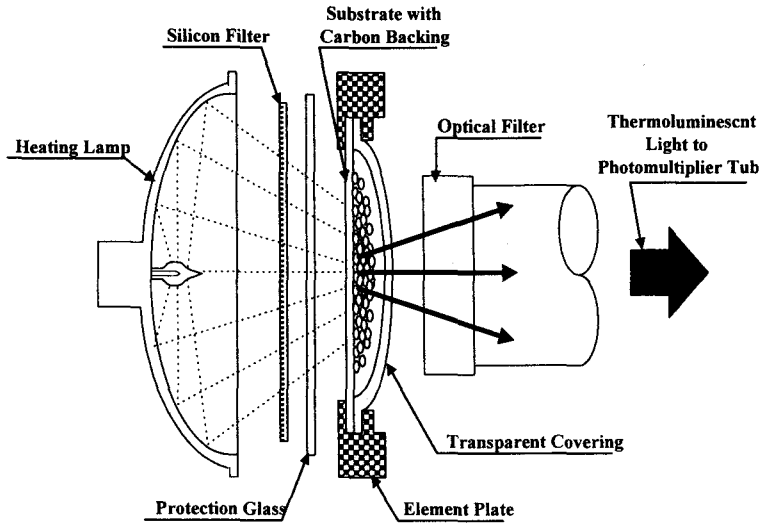


Fig. 1. Flow chart of the algorithm using probabilistic characteristics of TL element response.



Optical heating system used in Panasonic TLD Reader

Fig. 2. Optical heating system of UD716AGL.

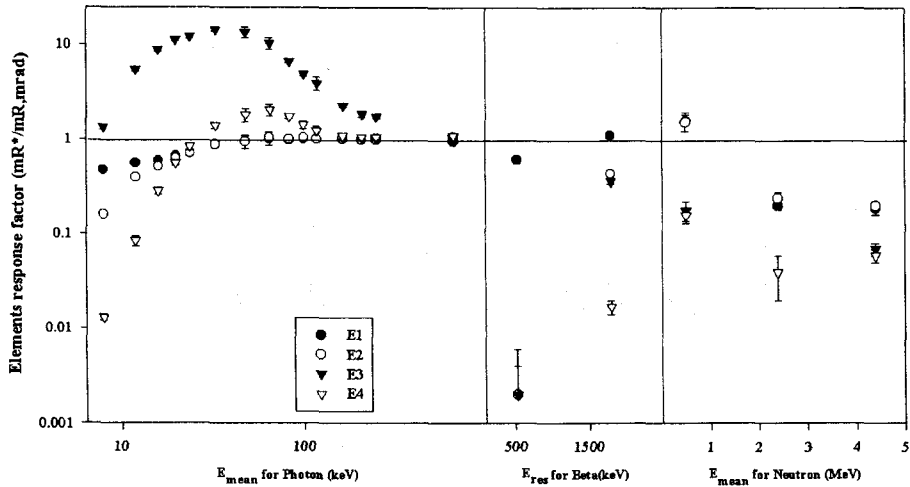


Fig. 3. Experimental results of the elements response, the response is presented by mR^* and irradiation unit is R or mrad, as a function of mean or residual maximum energy.

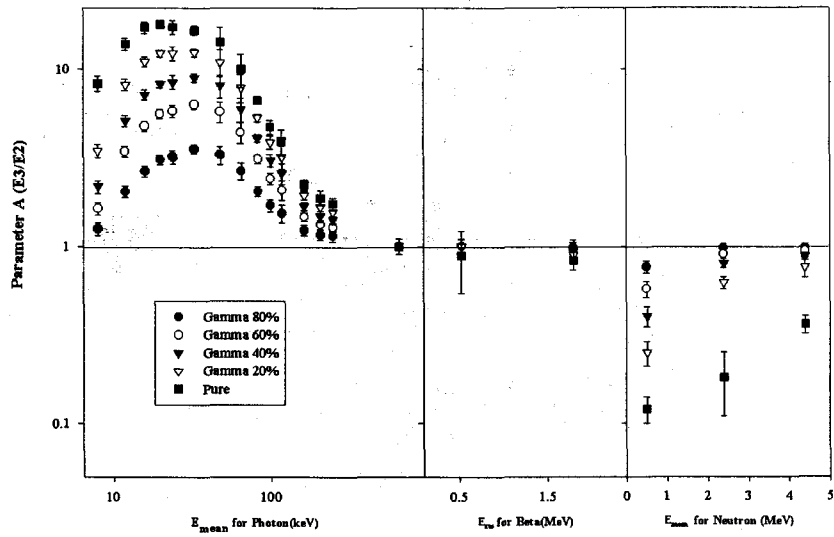


Fig. 4. Element response ratios for the mixed photon/gamma, beta/gamma and neutron/gamma radiation field for the Element 3 and Element 2 as a function of energy.

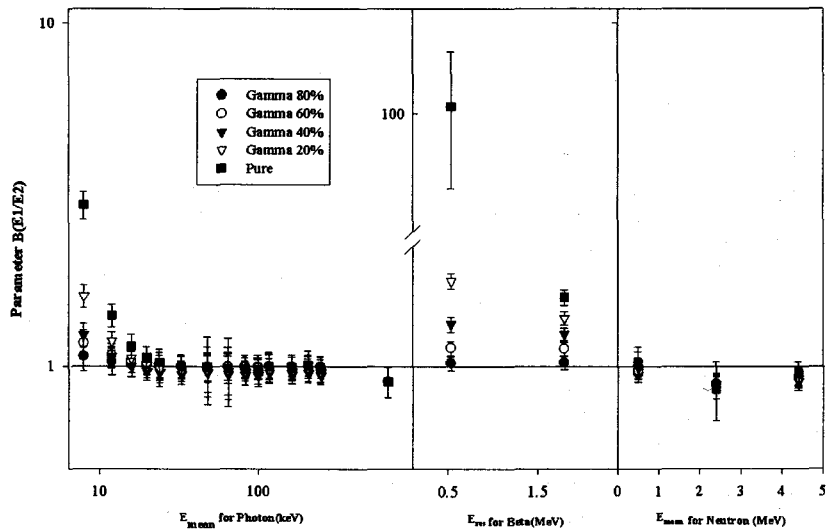


Fig. 5. Element response ratios for the mixed photon/gamma, beta/gamma and neutron/gamma radiation field for the Element 1 and Element 2 as a function of energy.

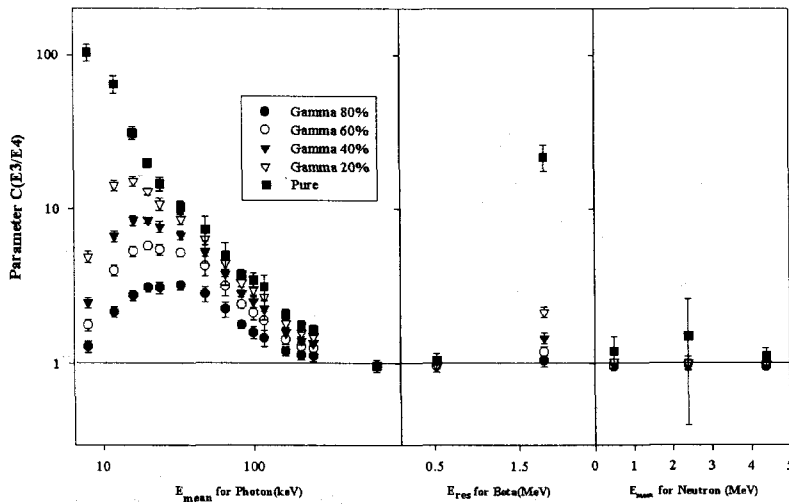


Fig. 6. Element response ratios for the mixed photon/gamma, beta/gamma and neutron/gamma radiation field for the Element 3 and Element 4 as a function of energy.

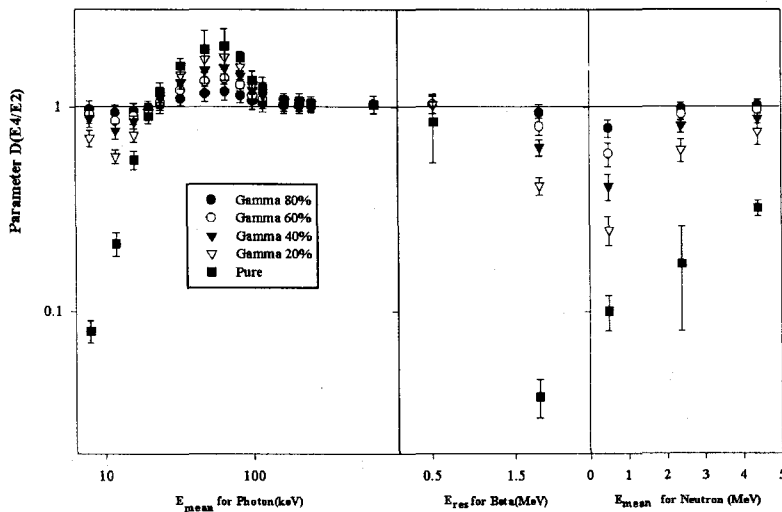


Fig. 7. Element response ratios for the mixed photon/gamma, beta/gamma and neutron/gamma radiation field for the Element 4 and Element 2 as a function of energy.

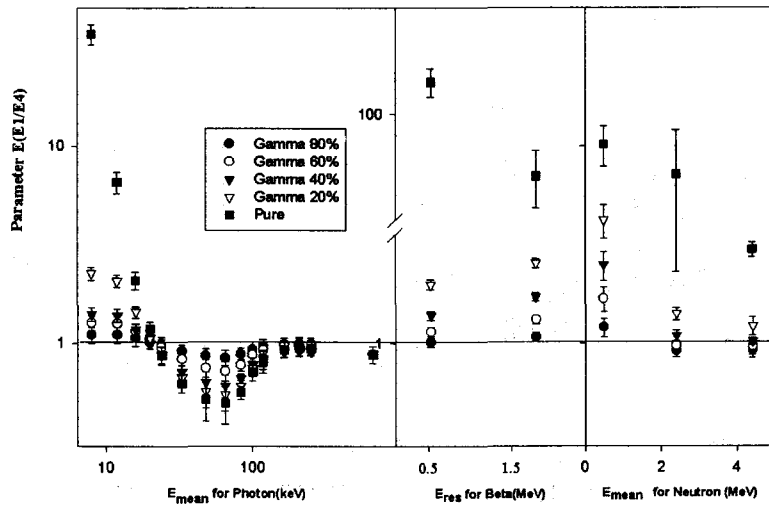


Fig. 8. Element response ratios for the mixed photon/gamma, beta/gamma and neutron/gamma radiation field for the Element 1 and Element 4 as a function of energy.

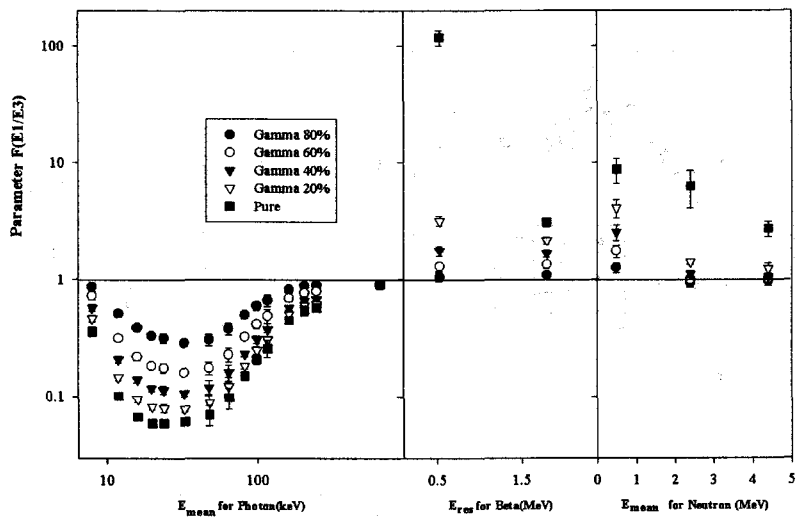


Fig. 9. Element response ratios for the mixed photon/gamma, beta/gamma and neutron/gamma radiation field for the Element 1 and Element 3 as a function of energy.

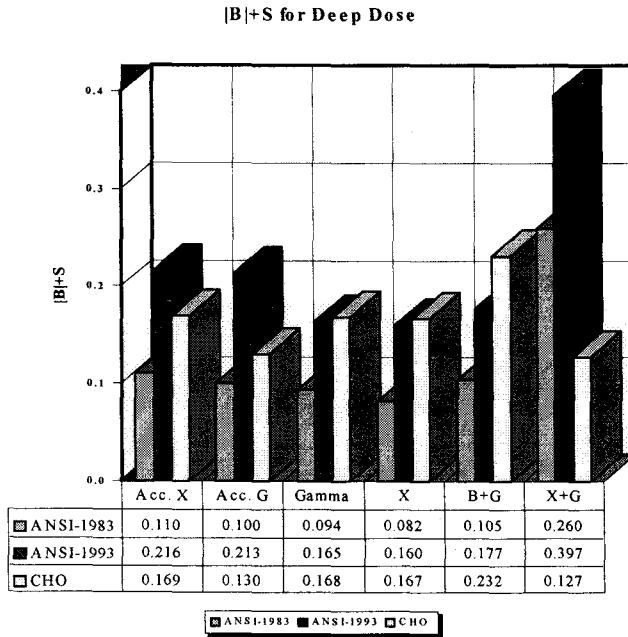


Fig. 10. Performance test result, |B|+S, Deep dose.

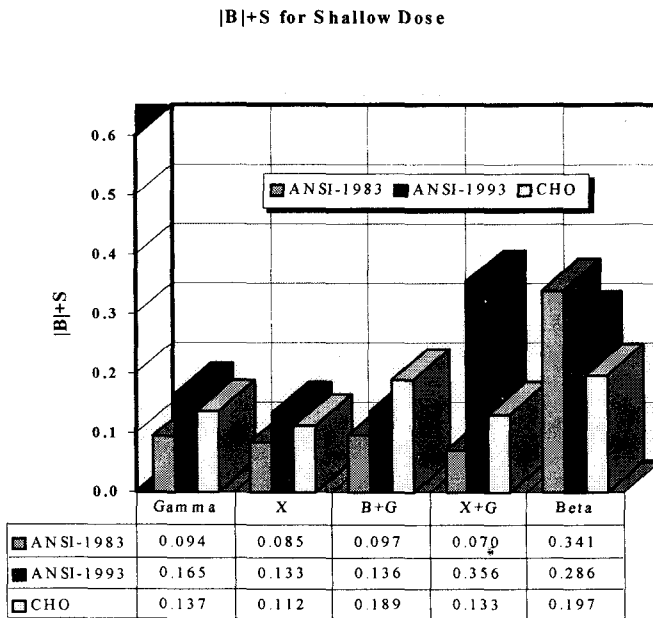


Fig. 11. Performance test result, |B|+S, Shallow dose.

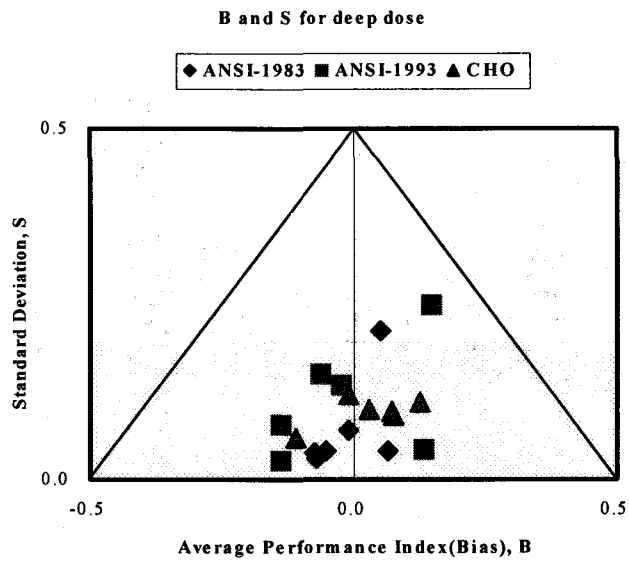


Fig. 12. Performance test result as a function of bias, B and standard deviation, S for deep dose.

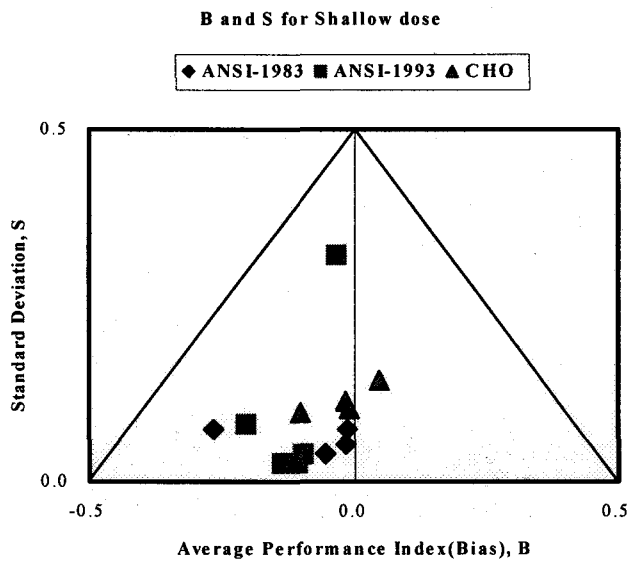


Fig. 13. Performance test result as a function of bias, B and standard deviation, S for shallow dose.