

Intercomparison Study of the Neutron Personnel Dosimeters

Bong-Hwan Kim, Jang-Lyul Kim and Si-Young Chang
Korea Atomic Energy Research Institute

중성자 개인선량계 상호비교

김봉환 · 김장렬 · 장시영

한국원자력연구소

Abstract : Domestic intercomparison study of the neutron personnel dosimeters was performed for the first time in Korea. Thirteen types of neutron dosimeters from twelve institutions took part in this intercomparison study and the D_2O moderated Cf-252 source of KAERI was used for irradiation. Eight of the fifteen dosimeters submitted by each participant were divided into two groups and each group was irradiated with different doses of the simulated mixed fields of neutron and gamma. The participants assessed their dosimeter reading in terms of the personal dose equivalent, $H_p(10)$, for both neutron and gamma dose. The ratio of the reported dose equivalent to the delivered dose equivalent for comparison between participants ranged from 0.55 to 1.34 for neutron, from 0.54 to 1.32 for gamma and from 0.75 to 1.20 for total dose. This intercomparison results show that all dosimeter processors, especially for neutron category, are able to pass the personnel dosimeter performance test which shall be enforced according to the ordinance of the MOST, No. 96-6.

key words : Intercomparison, Neutron Personnel Dosimeters, Personal Dose Equivalent, $H_p(10)$, D_2O Moderated ^{252}Cf Source, Performance Test,

요약 : 국내 최초로 중성자 개인선량계에 대한 상호비교측정시험이 수행되었다. 기준 방사선장으로 한국원자력연구소가 보유하고 있는 중수감속 ^{252}Cf 선원을 이용하였으며, 12개 관독기관의 선량계 13종이 상호비교시험에 참가하였다. 각 참가기관으로부터 컨트롤과 예비용을 포함하여 15개의 선량계를 제출받아, 이를 2개의 조사선량군으로 나누어 4개씩 총 8개의 선량계가 실제 조사되었다. 중성자, 감마 그리고 총선량의 항목으로 관독기관의 보고선량을 부여된 선량으로 나누어 선량계 판독결과를 비교한 결과, 각각에 대하여 그 비율이 0.55~1.34, 0.54~1.32, 0.75~1.20 의 분포를 갖는 것으로 나타났다. 관독기관의 자체 판독능력을 기준으로 할 때 전혀 문제가 없는 것은 아니나, 현재의 상호비교시험 결과로부터 알 수 있는 것은 향후 중성자분야에 대한 개인선량계 성능시험이 시행될 경우, 관독기관들이 모두 합격범위에 들 가능성이 높은 것으로 평가되었다.

중심어 : 상호비교시험, 중성자 개인선량계, 개인선량당량, 중수감속 ^{252}Cf 선원, 성능시험

서론

국내 개인선량계 판독기관의 판독능력 향상과 판독결과에 대한 신뢰성 확인을 위하여 개인선량계 판독에 관한 기술기준[1]이 마련된 이후, 국내 최초로 한국원자력연구소가 주관한 제 1차 개인선량계 상호비교시험[2]과 선량계 판독기관에 대한 규제사업으로 한국원자력안전기술원과 한국원자력연구소가 수행한 일련의 성능시험검사들이 있었다. 그러나 이들은 선량계시험을 위한 방사선조사분야가 중성자를 제외한 감마선, 엑스선, 그리고 베타선에 한정된 것이었다.

비록 중성자에 의한 피폭대상 집단이 소수이고, 그 집단선량 자체도 미미하지만 엄연히 무시할 수 없는 방사선피폭원으로 존재하며, 특히 국제방사선방호위원회의 1990년 권고[3]로 재평가 또는 새로 도입된 방사선가중인자와 하향조정된 선량한도 등의 변화된 방사선방호환경은 중성자 피폭선량의 측정과 평가에 보다 많은 노력을 기울이도록 요구하고 있는 실정이다.

중성자 측정기는 광범위한 에너지영역에 반응하여야 하고, 또 대부분 그 에너지 반응도가 급격하게 변화하기 때문에 한 종류의 측정기로 다양한 현장 중성자선장에 대한 선량측정과 평가는 불가능하다. 따라서 개인 피폭선량을 평가하기 위하여 에너지영역별로 반응도가 다른 복수의 측정기를 사용하거나 작업장별로 에너지스펙트럼을 계산 또는 측정하는 것이 일반적이다.

현재 열형광선량계만이 주요 중성자선량계로 사용되고 있으며, 원자력발전소에서는 참고목적으로 이와 함께 열중성자와 속중성자를 별도로 측정하기 위한 포켓선량계를 병용하고 있다. 이와 같이 한정된 측정기를 이용하여 피폭선량을 평가하고자 할 때, 작업장의 조건과 유사한 방사선장으로 측정시스템을 교정하는 것이 가장 중요하며, 또한 선량계의 교정과 판독결과를 해석하는 과정에서 높은 품질이 보증될 때 정확한 선량평가가 이루어 질 수 있다. 즉 모든 선량평가 작업에는 현장 방사선장의 특성이 고려되어야 하며, 이와 더불어 피폭선량의 측정 및 평가능력을 대내외적으로 확인하고 결과에 대한 신뢰성을 인정받기 위하여 일정한 기준에 의하여 이루어지는 선량계 성능시험 또는 상호비교시험 프로그램이 운영될 필요가 있다.

이에 따라 한국원자력연구소는 개인 중성자선량계 판독기관의 판독능력을 향상시키고 1998년 하반기 이후 실시될 성능시험에 활용될 기본 자료를 제공할 목적으로, 연구소가 보유하고 있는 기존 중성자선장을 이용하여 1997년 11월에서 1998년 3월에 걸쳐 국내 12개 판독기관의 개인 중성자선량계 13종에 대한 상호비교시험을 수행하였다.

재료 및 방법

참가기관과 선량계

Table 1. Dosimeter precessors and dosimeters participated in this intercomparison study

Participant*	Dosimeter model
Seoul Radiation Service Ltd.	Harshaw/Bicron 88xx/67xx & SRS owned model
Hanil Nuclear Co. Ltd	Panasonic UD809 & 802
Kori NPP No.1	Panasonic UD809 & 802
Kori NPP No.2	Harshaw/Bicron 88xx/67xx
Wolsung NPP No.1	Panasonic UD809 & 802
Wolsung NPP No.2	Harshaw/Bicron 88xx/67xx
Ulchin NPP No.1	Harshaw/Bicron 88xx/67xx
Ulchin NPP No.2	Harshaw/Bicron 88xx/67xx
Younggwang No.2	Panasonic UD809 & 802
Pohang Accelerator Laboratory	Teledyne 300
Korea Institute of Nuclear Safety	Panasonic UD809 & 802
Korea Atomic Energy Research Institute	Teledyne 300

* Numbers of participants is not related with the listing order of dosimeter processors in this table.

과학기술부로부터 자체판독기관과 전문판독기관으로 승인받거나 신청중에 있는 12개 기관이 상호비교시험에 참가하였으며, 10개의 자체판독기관중 7개 기관이 주요 중성자피폭원이 존재하는 원자력발전소였다. 참가기관과 해당 기관의 선량계 종류를 표 1에 나타내었다. 비교시험의 대상이 된 선량계는 모두 열형광선량계로 Panasonic, Harshaw, 그리고 Teledyne사의 제품이었으며, 판독결과의 비밀을 보장하기 위하여 각 참가기관에 고유 번호를 부여하여 비교결과를 처리하였다. 각 참가기관은 예비용 4개와 자연방사선 보정용 3개를 포함한 15개의 선량계를 제출하였으며, 실제 조사에는 8개의 선량계가 사용되었다.

기준 방사선장

선량계에 대한 기준 선량의 조사를 위하여 ANSI N13.11[4]과 ISO-8529[5]에서 제시하고 있는 기준 중성자선장의 하나인 중수감속 ²⁵²Cf 선원을 사용하였다. 중성자의 경우 선원으로부터 일정 거리가 떨어진 실제 기준 조사지점에서의 에너지 스펙트럼은 조사실내 구조물에 의하여 산란된 중성자의 영향으로 각 조사실마다 다르게 나타난다. 에너지에 따라 크게 변화하는 측정기의 반응도 때문에 이러한 조사실특성이 정확하게 파악되지 않을 경우 올바른 교정이 이루어질 수 없으며, 반드시 조사지점내 산란중성자의 기여분을 보정한 뒤에 기준 선량을 결정하여야 한다. 특히 중성자 측정기가 저에너지 중

성자에 민감하게 반응하는 경우 산란중성자의 영향은 더욱 커진다. 이번 상호비교시험에 참가한 모든 열형광선량계들이 특성상 변형된 알베도선량계 (Albedo Dosimeter)인 점을 고려한다면 각각의 선량계에 대하여 산란보정인자를 개별적으로 결정한 뒤, 중성자 조사시 이를 고려하여야 하겠지만 현실적으로 많은 어려움이 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 중성자스펙트로메타인 BMS (Bonner Multisphere Spectrometer)로 기준 조사지점에서 에너지 스펙트럼을 측정하고 [6], 이로 부터 산란중성자의 기여분을 결정된 뒤 이를 선량계조사에 적용하였다. 추가로 상호비교시험의 수행 이전에 각 참가희망기관이 기준 중성자선장과 감마선장에 대한 선량계의 반응특성을 파악할 수 있도록 하기 위하여 1회의 시험조사 기회를 제공하였다.

한국원자력연구소의 ²⁵²Cf 선원은 1992년 2월에 미국 표준과학원에서 교정받은 것으로, 비교시험이 추진되던 1997년 11월 25일 현재 4.462 x 10⁸ n/sec의 방출율을 기록하였다. 중수감속 ²⁵²Cf 선원으로부터 나오는 감마선량을 평가하기 위하여 ¹³⁷Cs 선원으로 교정한 GM 검출기를 사용하였으며, 그 결과 중성자선량에 대한 감마선량의 비율이 0.168로 결정되었다. 중성자에 대한 GM 검출기의 반응도는 약 1% 미만이며, 중수감속 ²⁵²Cf 선원에서 방출되는 감마선의 유효 에너지가 400 keV인 점을 고려한다면[7] 교정인자의 보정없이 ¹³⁷Cs 선원으로 교정한 GM 검출기로 감마선량을 측정할 수 있다. 표 2에 상호비

Table 2. Characteristics of the D₂O moderated ²⁵²Cf source of KAERI

Item	Data and method
Irradiation condition	D ₂ O mod. sphere : O.D. 32.3 cm with 0.53 mm Cd cover distance from center of sphere to phantom surface : 50 cm phantom : ISO water filled phantom (30 cm x 30 cm x 15 cm) Ratio of 9" to 3" remmeter measurement (9"/3") : 0.214
Neutron dose	neutron dose rate : 5.664 mSv/hr (reference date : 1997. 11. 25) neutron emission rate (Q = 4.4625 x 10 ⁸ n/sec @1997. 11. 25) neutron loss due to mod. sphere : 13.7 % (BMS measurement) contribution of scattered neutron : 16.74 % (BMS measurement) fluence to dose conversion coefficient : 110 pSv.cm ² [5]
Gamma dose	gamma dose rate : 0.949 mSv/hr (reference date : 1997. 11. 25) effective energy : ~400 keV (TLD measurement) [7] dose conversion coefficient : 1.301 Sv/Gy (ICRU-47) [8] (excluding the gamma dose of ¹³⁷ Cs)

교시험에 사용된 기준 중성자선장에 대한 선량 특성자료와 각종 인자를 결정하기 위하여 사용한 방법 등을 나타내었다.

중성자 선량환산인자와 팬텀 (모의피폭체)

중성자 선량환산인자는 대상 피폭체에 따라 다르기 때문에 선량계에 기준 선량을 조사할 경우 선량계가 부착된 팬텀의 종류에 따라 적절한 값의 적용이 필요하다. 지금까지는 개인선량계 성능시험용으로 ICRU-47[8]에서 권고하고 있는 PMMA (Poly Methane Meta Acrylate) 평판형 팬텀이 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 ICRU 조직등가팬텀과의 후방산란특성 차이를 최소화하기 위하여 ISO에서 권고하고 있는 물팬텀을 사용하는 추세이며, 특히 중성자의 경우에는 PMMA 팬텀보다는 물팬텀의 사용을 적극 권고하고 있다. 따라서 본 상호비교시험에서도 ISO water filled phantom을 사용하였다. 개인선량계의 조사시험에 ISO의 물팬텀을 사용할 경우, ICRP/ICRU joint task group에서 권고한 평판형 ICRU 조직팬텀과 중수감속 ²⁵²Cf 선장에 대한 선량환산인자를 사용할 수 있다[5,9]. 이번 상호비교시험에 사용한 팬텀, 조사조건, 선량환산인자 등을 표 2에 정리하였다.

선량계 조사와 기준 선량의 결정

산란중성자에 의한 영향을 최소화하기 위하여

중수감속구 중심에서 팬텀표면까지의 거리를 50 cm로 하여 조사지점을 결정하였으며, 팬텀에 동일 간격으로 4개의 선량계를 부착하여 동시에 조사하였다. 8개의 조사대상 선량계를 2군으로 나누어 중성자선량과 감마선량의 비율을 다르게 하였으며 참가기관간에 서로 중복되는 선량이 없도록 하였다.

조사지점에서의 기준 선량은 중성자선원의 중성자방출율과 선량환산인자, 중수감속구에 의한 중성자손실을 그리고 산란중성자보정분 등을 고려하여 다음과 같이 결정하였다.

$$Delivered\ Dose = \frac{Q}{4\pi d^2} \cdot EF \cdot CF_{scatt} \cdot H_p(10) \cdot T_{irrad}$$

Q : 중성자 방출율 (n/sec)

d : 조사거리 (50 cm)

EF : Cadmium 덮개가 있는 중수감속구를 빠져나오는 중성자의 비율 (0.863)

CF_{scatt} : 조사지점내 산란중성자에 대한 선량계 반응도 보정인자 (1.167)

H_p(10) : 선량환산인자 (110 pSv.cm²/n)

T_{irrad} : 조사시간 (sec)

중수감속구가 없을 때와 있을 때의 두 경우에 대하여 BMS로 측정하여 평가한 자유공간 (free filed) 스펙트럼[6]으로부터 중수감속구에 의한 중성자손실이 결정되었다. 감속구 유무에 따

Table 3. Delivered dose equivalents, Hp(10), to each participant's dosimeter

Participant No.	Dosimeter group 1			Dosimeter group 2		
	Neutron (mSv)	Gamma (mSv)	g/n*	Neutron (mSv)	Gamma (mSv)	g/n*
1	3.97	3.97	1	5.53	6.71	1.21
2	3.97	3.97	1	2.75	5.83	2.12
3	3.97	3.97	1	3.57	5.56	1.56
4	3.42	4.29	1.26	2.75	5.83	2.12
5	3.42	4.29	1.26	5.53	6.71	1.21
6	3.42	4.29	1.26	2.75	5.83	2.12
7	4.24	4.84	1.14	5.53	7.12	1.29
8	4.24	4.84	1.14	3.57	5.56	1.56
9	4.24	4.84	1.14	5.53	7.12	1.29
10	3.43	5.12	1.49	5.53	7.12	1.29
11	3.43	5.12	1.49	5.83	0.98	1.17
12	3.43	5.12	1.49	5.53	6.71	1.21
13	3.57	5.57	1.56	5.83	7.61	1.31

*g/n : Ratio of gamma dose to neutron dose

라 조사지점에서의 중성자 플루언스 비교를 통하여 결정된 손실율은 13.7% 이었다. 이 값은 미국 NIST의 중수감속구 (직경 ~30cm)에 대하여 Eisenhauer가 계산하여 권고한 값인 12%[10]와 비교할 때, 한국원자력연구소의 중수감속구가 32.3cm인 점을 고려하면 타당성이 있는 값이다. 대개의 중성자선장이 중성자와 감마선에 의한 혼합방사선장이기 때문에 비교시험에서도 중성자선장에 추가로 ^{137}Cs 선원으로 감마선조사를 더하여 참가기관으로 하여금 그 결과를 평가하도록 하였다. 표 3에 각 참가기관에 대한 조사선량과 중성자선량에 대한 감마선의 비율 등을 나타내었으며, 중성자선량에 대한 감마선량의 비율은 ^{137}Cs 선원으로 조절하였다.

결과 및 검토

참가기관의 선량계 판독결과를 중성자선량, 감마선량 그리고 전체선량으로 나누어 평가하여 그림 1, 2와 표 4에 정리하였다. 표 4에서 값이 1보다 클 경우는 조사선량에 비하여 과대평가하고 있다는 것을, 그리고 1보다 작을 경우 과소평가하고 있다는 것을 의미한다. 참가기관 1곳 (참가기관 13)은 선량을 표기할 때 단위환산에 착오를 일으킨 듯 지나치게 큰 값을 보고한 것으로 나타나 그림 1에서는 그 값을 제외하였다. 비교시험결과 참가기관의 선량계중 절반이 조사선량에 대하여 약 20% 정도 과소평가하고 있는

경향을 보이고 있는데, 이는 참가기관의 측정시스템에 적용되고 있는 교정인자가 ICRP-74 발간 이전의 중성자 선량환산인자를 사용하여 유도된 것이기 때문인 것으로 판단된다. ANSI N13.11에서 중수감속구 ^{252}Cf 선장에 적용하고 있는 선량환산인자는 ICRP-21의 자료를 기본으로 하여 계산된 것 (91 pSv.cm²)[4] 으로 본 상호 비교시험에 사용한 값 (110 pSv.cm²)[5] 과 비교할 때 약 18 % 과소평가되고 있다. 이를 고려하면, 각 참가기관에게 비교시험 이전에 시스템교정을 위한 시험조사의 기회를 주었음에도 불구하고 일부 참가기관이 수정된 교정인자를 사용하지 않고 있었음을 예상할 수 있다.

중성자에 비하여 그 편차는 크지 않으나 감마선량 역시 대부분의 참가기관이 과소평가하고 있는 것으로 나타났는데, 이 경향은 제 1차 개인선량계 상호비교[2]에서의 ^{137}Cs 선량의 경우와 비슷한 것이었다. 전체적으로 감마선량의 경우 판독결과는 우수한 것으로 나타났다.

참가번호 9의 경우, 전반적인 경향과 다르게 중성자선량을 과대평가하고 있는데 반하여 감마선량이 지나치게 과소평가되고 있다. 비록 총선량의 관점에서 볼 때 큰 편차가 발견되지 않는다 할 지라도 이러한 예는 선량평가 알고리즘의 재분석이 요구되는 경우라 할 수 있다. 참가번호 11은 감마선에 대하여 그리고 4와 12는 중성자선에 대하여 조사군별로 편차의 변화가 심한 경우로 개별 선량계에 대하여 일정한 품질이 유

Table 4. Ratio of each participant's reported dose equivalent to the delivered dose equivalent

Participant No.	Dosemeter group 1			Dosemeter group 2		
	Neutron	Gamma	Total	Neutron	Gamma	Total
1	1.031	0.928	0.980	1.033	0.918	0.970
2	0.893	1.045	0.969	1.080	1.131	1.115
3	0.726	0.972	0.849	0.738	0.986	0.889
4	1.025	0.787	0.893	0.545	0.863	0.754
5	0.811	0.963	0.895	0.852	0.986	0.925
6	0.719	0.859	0.797	0.743	0.858	0.821
7	0.756	0.900	0.833	0.810	0.932	0.879
8	0.780	0.920	0.855	0.784	0.897	0.853
9	1.166	0.593	0.860	1.235	0.540	0.844
10	0.759	0.944	0.870	0.779	0.950	0.875
11	1.031	1.319	1.203	1.052	1.011	1.046
12	1.336	0.994	1.131	1.099	0.976	1.031
13	9.069	9.314	9.218	9.091	9.169	9.135

지되지 않고 있다는 것을 보여준다. 참가번호 11의 경우는 중성자선에 대한 감마선의 조사비율이 조사군별로 극단적으로 변화 (1.493에서 0.168로) 한 경우로 혼합선장에서 선량계소자별 반응도가 상호 간섭되어 판독결과가 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있다. 선량계성능시험시 이 영향을 최소화하는 것이 필요하며, 수검자에게 이로 인한 불이익을 주지 않기 위하여 현재 권고되고 있는 중성자선대 감마선의 비율은 1/3에서 3/1 이다[11].

작업자에게 지급되어 판독되는 개인선량계가 일회성임을 감안하면 선량계 하나하나의 품질이 매우 중요하다. 선량계별 판독값만을 놓고 볼 때, 선량계 개개의 편차를 나타낸 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 상대오차가 2%~19%에 드는 것으로 나타났다.

1998년 하반기 이후 실시예정에 있는 중성자 개인선량계에 대한 성능시험결과를 예측하기 위하여, 표 5에 이번 상호비교시험결과를 자료로 하여 각 참가기관에 대한 평균성능지수(P_{ave}), 성능지수의 표준편차(S) 그리고 성능지표(Q)[1]를 정리하였다. 보고선량을 잘못 기재한 한 개 기관의 경우를 제외하고 모두 허용 성능기준에 들고 있으며, 감마선량항목에 대하여 선량계 조사 2군의 한 기관이 그 값을 약간 초과하였으나 평가선량을 총선량으로 할 경우 모두 허용 기준 값을 만족하고 있다.

결론

상향 조정된 중성자 선량환산인자의 차이에도 불구하고 기존의 선량평가 알고리즘을 사용한 선량계판독시스템은 $\pm 25\%$ 이내에서 현재 중성자 교정선장으로 사용하고 있는 중수감속 ^{252}Cf 선장에 대한 선량평가가 가능하다. 중성자만을 대상으로 할 때, 전혀 문제가 없는 것은 아니나 전체선량을 대상으로 하여 성능시험을 실시할 경우에 대부분의 판독기관이 성능시험기준에 들 것으로 판단된다. 특히 사전에 판독시스템에 대한 교정의 기회를 충분히 활용함과 동시에 선량 환산인자의 전환, 그리고 선량계 하나하나에 대한 품질관리를 철저히 한다면 더욱 우수한 결과를 낼 수 있을 것이다.

감사의 글

이번 중성자 개인선량계 상호비교시험에 참가하여 선량계판독과 자료제출에 적극 협조해 주신 고리원자력 1, 2 발전소, 월성원자력 1, 2 발전소, 울진원자력 1, 2 발전소, 영광원자력 2 발전소, 포항가속기연구소, 한일원자력(주), 서울방사선서비스(주), 한국원자력안전기술원, 그리고 한국원자력연구소의 선량계판독업무 담당자와 관계자 여러분께 심심한 감사의 뜻을 전합니다.

Table 5. Test results of each participant's dosimetry system according to the personnel dosimeter performance test criteria

Participant No.	Neutron dose			Total dose		
	Performance index[P]	Standard deviation[S]	Performance quotient [P + S]	Performance index[P]	Standard deviation[S]	Performance quotient [P + S]
1	0.032	0.069	0.101	-0.025	0.046	0.071
2	-0.014	0.133	0.147	0.042	0.084	0.126
3	-0.268	0.022	0.290	-0.131	0.023	0.154
4	-0.215	0.273	0.488	-0.177	0.115	0.291
5	-0.169	0.036	0.205	-0.089	0.022	0.111
6	-0.269	0.026	0.295	-0.191	0.015	0.206
7	-0.217	0.048	0.265	-0.144	0.034	0.179
8	-0.218	0.049	0.267	-0.146	0.027	0.173
9	0.200	0.135	0.336	-0.148	0.061	0.209
10	-0.231	0.029	0.260	-0.127	0.010	0.137
11	0.041	0.127	0.168	0.125	0.098	0.222
12	0.218	0.147	0.365	0.081	0.067	0.148
13	8.079	0.389	8.468	8.177	0.214	8.391

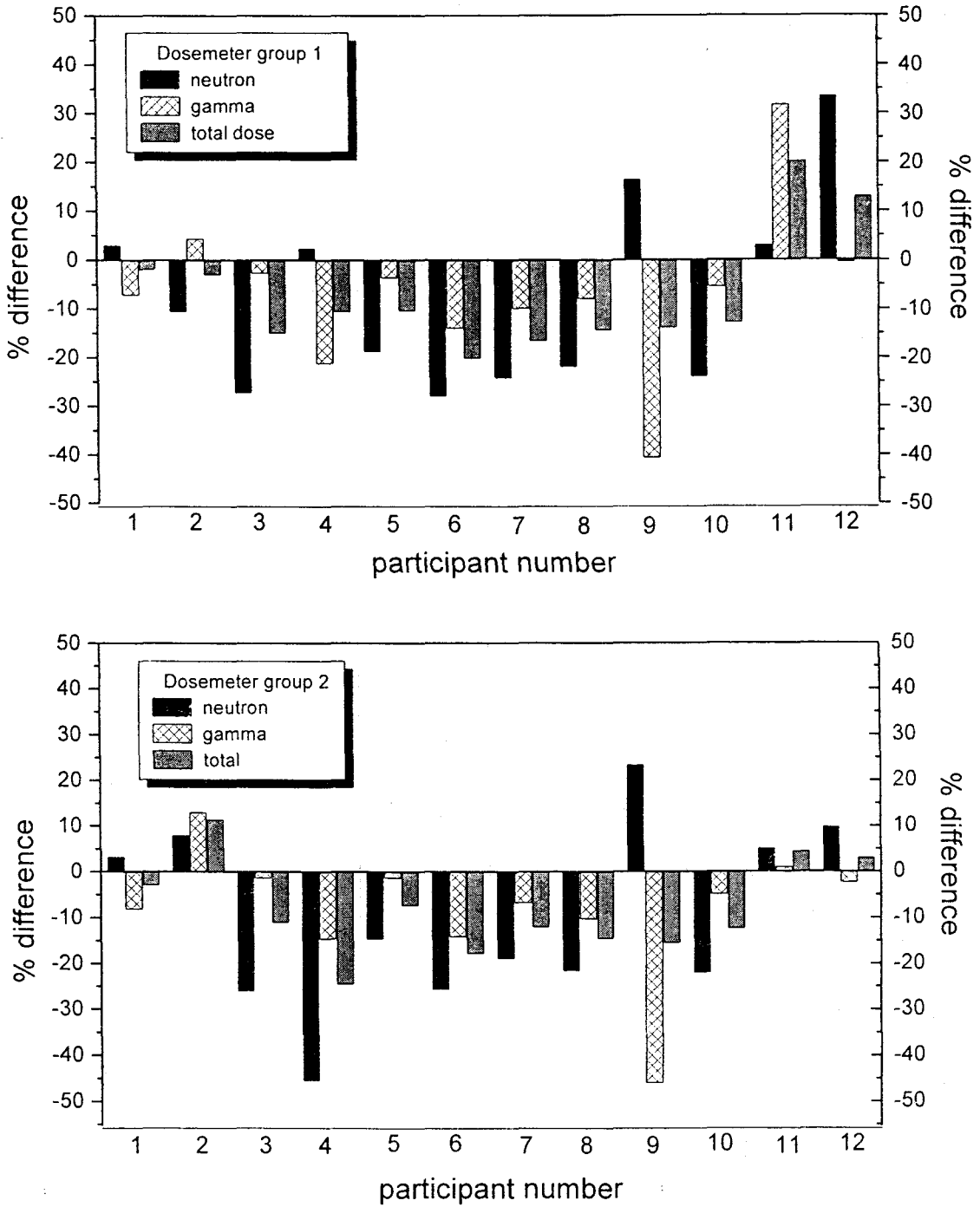


Fig. 1. Percentile difference between each participant's reported dose equivalent and the delivered dose equivalent of the dosimeter group 1 (up) and 2 (down)

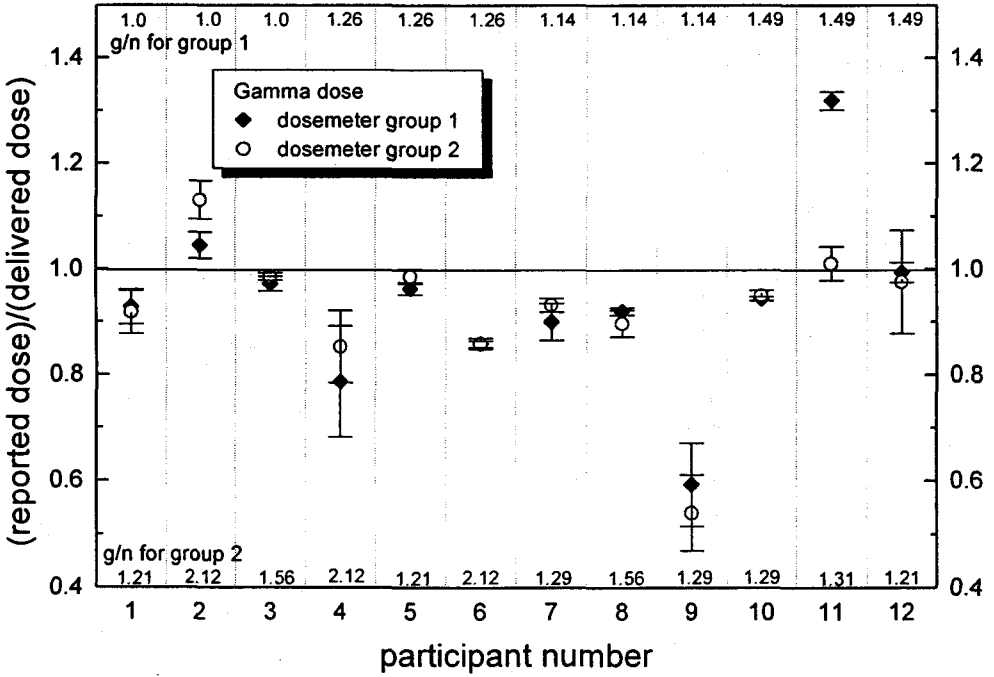
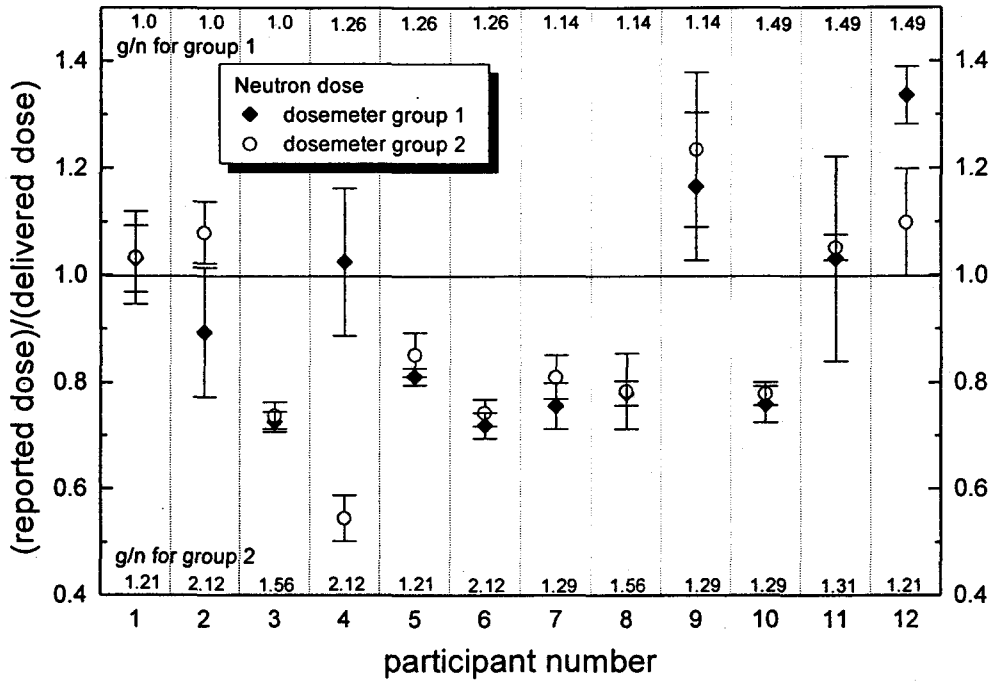


Fig. 2. Ratio of each participant's reported dose equivalent to the delivered dose equivalent with the representation of relative error in evaluating of neutron (up) and gamma (down) dose

참 고 문 헌

1. 과학기술처, 개인선량계 판독에 관한 기술기준, 과학기술처 고시 제 96-6호(1996).
2. 김장렬 등, 개인선량계 성능의 상호비교, 방사선 방어학회지, 21(3), 147-153(1996).
3. ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press(1990).
4. ANSI, American National Standard for Dosimetry Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing, ANSI N13.11(1993).
5. ISO, Reference Neutron Radiations : Calibration of Area and Personal Dosimeters and the Determination of Their Response as a Function of Neutron Energy and Angle of Incidence, Draft International Standard Version 2, ISO 8529-3(1996).
6. 장시영 외, 방사선방어 및 측정기술개발, 방사선 환경안전연구 보고서, KAERI/RR-1739/96, 63-76(1996).
7. J.C. McDonald et al., Measurements of Gamma-Ray Dose from a Moderated ^{252}Cf Source, NUREG/CR-2967, PNL-4590(1983).
8. ICRU, Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources - Part 3, ICRU Report 47, Bethesda, MD(1992).
9. ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Pergamon Press(1997).
10. C.M. Eisenhauer, Private Communication on Reviewing the NBS Special Publication 633 : Procedures for Calibrating Neutron Personnel Dosimeters., NIST(1995).
11. C.S. Sims, Modification of the Dosimeter Performance Standard ANSI N13.11, Ninth Panasonic TLD International Symposium (1990).