

2002 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

하나로 NTD 조사공에서의 중성자속 측정

Measurements of Neutron Flux in NTD Irradiation Hole of HANARO

김명섭 · 박상준 · 임경환 · 이상익 · 황승렬 · 전병진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 NTD 조사공에서 조사 장치를 설치한 후 중성자속을 측정하였다. Si 단결정에 Au wire를 붙여 NTD 조사공에서 조사시켰으며, 원자로 출력은 10 kW, 조사 시간은 약 3시간이었다. 조사 후 Au wire의 방사능을 감마 scanning 방법으로 측정하여 중성자속 분포를 결정하였다. 제작된 조사통을 그대로 이용하여 측정한 경우, 중성자속 분포는 가운데 부분이 낮고 가장자리가 높게 측정되었으며, 위쪽이 아래쪽보다 높았다. 측정값 사이의 차이는 7 %이내였다. 이에 따라 조사 장치의 중성자 스크린에 Al wire를 감고 측정을 다시 수행하였으며, 중성자 조사량을 ± 2.5 %이내로 균일화 할 수 있었다. 또한 조사통 내부의 물 층 두께에 따른 조사량 변화 경향을 조사하였으며, 3 mm의 물층 두께 차이에 의해 최대 5.5 %의 조사량 차이가 발생하였다. 결론적으로, 현재 제작된 조사 장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

The neutron flux is measured in the HANARO NTD irradiation hole after installing the irradiation facility. The Au wires attached to the Si single crystals are irradiated in the NTD irradiation hole, and the reactor power is 10 kW, and

the irradiation time is about 3 hrs. The radioactivity of irradiated Au wire is measured by gamma scanning method, and the neutron flux distribution is determined. In the measurements with the original irradiation tube, the neutron flux near the center of irradiated area is lower than that of edge, and the flux of upper region is higher than that of lower region. The deviation between the measurements is within 7 %. So, the Al wire is wound round the neutron screen, and the flux is measured again. The neutron irradiation can be flattened within ± 2.5 %. Also, the variation of neutron irradiation according to the thickness of water gap inside of irradiation tube is investigated, and the maximum difference of 5.5 % is occurred from the thickness of water gap of 3 mm. Conclusively, it is confirmed that the NTD service can be performed using the present irradiation facility.

1. 서 론

중성자 변환 도핑(Neutron Transmutation Doping, NTD)은 고순도의 반도체에 중성자를 조사시켜 n-형 반도체를 얻는 방법이다. NTD는 비저항의 균일도가 매우 높은 반도체를 생산할 수 있기 때문에, 원자료를 이용해야 한다는 제약 조건에도 불구하고, 반도체 산업에서 고유의 영역을 확보하고 있다.

하나로에는 NTD를 위한 2개의 조사공이 있으며 이를 이용한 NTD 연구가 진행되어 왔다[1-4]. NTD 기술의 핵심은 중성자 조사량을 균일하게 유지하여 Si 단결정의 비저항 균일도를 높이는 것이다. 따라서 하나로에서는 NTD 조사공내의 중성자속 분포를 계산 및 측정을 통하여 확인하였으며, 이를 바탕으로, 중성자속 분포를 균일화할 수 있는 중성자 스크린을 설계, 제작하였다[5]. 이에 따라, 제작된 스크린을 이용하여 NTD 조사공에서 Si 단결정이 있는 상태에서 중성자속을 측정하여 그 분포를 확인하면 목표 비저항 균일도의 만족 여부를 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 NTD 조사공에 조사 장치 및 Si 단결정이 설치되어 있는 상태에서 중성자속 분포를 측정하여 중성자 조사량의 균일화 정도를 확인하였다.

2. 실 험

설계, 제작이 완료된 NTD 조사 장치를 하나로 NTD 공에 설치한 후 Si 단결정이 조사 장치 내에 있는 상태에서 중성자속 분포 측정을 수행하였다. 중성자속 분포를 확인하여 조사 균일도가 만족스럽지 못하면 중성자 스크린을 개선해야 하며, 이러한 수정을 하기 위해서는 중성자 스크린의 방사능 준위가 충분히 낮아야 한다.

따라서 중성자속 분포 측정은 영출력에서 수행하였다.

실험에 사용된 Si 단결정은 길이가 47.9~53.2 mm인 Si 단결정 12개 1 set와 길이가 315.5, 302.5 mm인 단결정 2개 1set이다. 길이가 약 5 cm인 단결정의 직경은 126.1 ± 0.2 mm이며, 12개 토막의 전체 길이는 61.7 cm로서 설계에서 가정한 60 cm보다 약간 길었다. 이 단결정 set를 설치하는 경우에는 조사통 중간에 설치되는 Bi 판을 기준으로 하여 아래쪽에는 31.2 cm, 위쪽에는 30.5 cm가 놓이도록 하였다. 길이가 약 30 cm인 단결정의 직경은 125 mm로서 조사 장치 설계시 가정한 $126.1 \pm 0.2 \sim 127.2 \pm 0.3$ mm보다 작다. 또한 길이가 302.5 mm인 단결정은 수직도가 좋지 않아 측면의 편차가 최대 3.4 mm였다.

측정 사항은 단결정 길이 방향의 중성자속 분포 및 조사량 측정용 시료가 설치되는 Bi 디스크에서의 중성자속이다. 단결정 반경 방향으로의 중성자속 분포는 변화가 적기 때문에 측정에서 제외하였다.

중성자속 측정용 방사화 시료로는 영출력 실험에서 충분한 방사능을 얻을 수 있도록 Au wire를 사용하였으며, 각 단결정의 측면에 길이 방향으로 알루미늄 테이프를 이용하여 설치하였다. 또한 상부, 중앙, 하부에 놓이는 Bi 판에는 Au wire를 설치하여 절대 중성자속을 구하였다. 측정 실험은 3회 실시하였으며, 실험시 NTD2 조사공에 가장 큰 영향을 미치는 IP3 조사공에는 물이 채워진 상태였고, LH 조사공에는 빈 Al 마개가 설치되어 있었으나 이 마개에는 누설 징후가 있으며, 이곳에 어느 정도의 물이 채워져 있는지는 아직 알 수 없다.

1차 실험에서는 설계된 조사통을 그대로 사용하였으며, 길이 5 cm인 단결정 12개의 표면에 축 방향으로 한 개씩 Au wire를 붙이고, 단결정을 통에 넣을 때는 wire가 한 방향에 놓이도록 하였다. 조사 높이는 조사통의 중심이 노심 중심에서 49 mm 아래에 놓이도록 하였다(조사통 중심 위치 : -49 mm). 제어봉 위치가 250~350 mm일 때는 이 위치가 최적의 것으로 계산되었다[5]. 원자로 출력은 10 kW이었고, 조사 시간은 3시간, 조사시의 제어봉 위치는 298.0 mm이었다. 조사된 Au wire의 방사능은 NaI 계측기로 scanning 측정하였으며, 측정 슬릿 폭은 4 mm였다.

2차 측정에서도 1차 측정과 마찬가지로 길이 5 cm인 단결정 12개를 이용하였다. 1차 측정 결과를 바탕으로 중성자속 균일도를 개선하기 위해 조사통 중앙 부분에 외경 1.2 mm의 알루미늄 wire를 감았으며, 1차 실험 때보다 조사통을 2 mm를 올려서 조사시켰다(조사통 중심 위치 : -47 mm). 원자로 출력은 10 kW, 조사 시간은 2시간 20분이었으며, 조사시의 제어봉 위치는 299.8 mm이었다. 각 단결정을 조사통에 설치할 때 1차 시험과는 달리 Au wire가 놓이는 방향을 일정하게 맞추지 않았다. 그런데 조사 도중에 구동 장치의 회전이 일시 정지하였다. Wire의 방사능 scanning에는 Au의 방사능이 충분하므로 HPGe 계측기를 사용하였으며, 측정 슬릿

폭은 마찬가지로 4 mm였다.

3차 실험에서는 길이가 약 30 cm인 두 단결정을 조사시켰다. 이 단결정 가운데 한 개는 수직도가 좋지 않았으므로 조사통 내부에 위치시키면 한쪽으로 기울어져 단결정과 조사통사이의 물 층 두께가 달라지게 된다. 이 경우 물 층의 두께가 가장 큰 곳은 약 3 mm가 된다. 이에 따라 물 층의 두께에 따른 중성자 조사량 변화 경향을 조사하기 위하여 각 단결정이 가장 많이 기울어진 양쪽과 그 중간에 각 한 개씩 모두 3개의 Au wire를 설치하였다. 또한 2차 시험 결과를 바탕으로 2차 실험에서 1.2 mm Al wire를 감았던 부분에 이번에는 직경 1.8 mm의 Al wire를 감았다. 조사 위치는 2차 시험과 같이 -47 mm로 하였다. 원자로 출력은 10 kW, 조사 시간은 3시간이었으며, 조사시의 제어봉 위치는 269.4 mm였다. 각 실험 후 Bi 판에 설치되었던 Au wire는 표준선원으로 검정된 HPGe 절대 측정 계통을 이용하여 절대 측정 후 중성자속을 결정하였다.

3. 분석 및 결과

설계된 조사통을 그대로 사용하고, 길이가 약 5 cm인 단결정 12개의 표면에 측 방향으로 Au wire를 붙인 후 NTD2 조사공에서 조사시켜 Au wire의 포화 방사능을 NaI 계측기로 scanning한 결과는 그림 1과 같다. 그림에서 각 측정값은 전체 평균값으로 규격화하였다. 그림의 x-축은 원자로 노심의 중심 높이를 0으로 하여 측정값의 위치를 나타낸 것이다. 측정값의 통계 오차는 1.0 %이내이다.

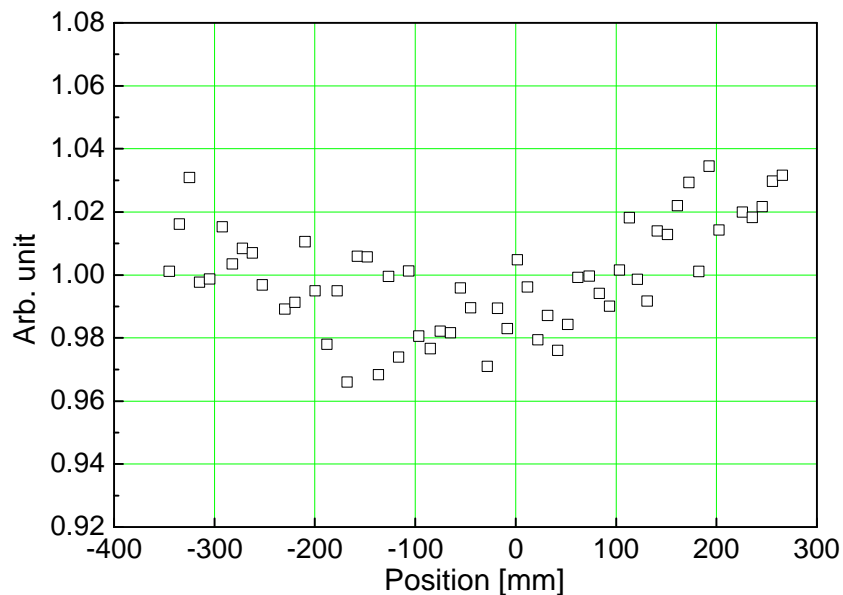


그림 1. NTD2 조사공에서 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과.

그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 측정값은 가운데 부분이 낮고 가장자리가 약간 높다. 또한 위쪽이 아래쪽보다 약간 높으며, 전체 측정값사이의 차이는 7 %이내이다. MCNP 계산으로 예측한 결과는 가운데가 약간 높았다[5]. 이러한 차이가 발생한 것은 핵연료의 연소 효과를 작게 고려했기 때문이라고 생각된다. MCNP는 연소된 핵연료를 취급하지 못하므로 모두 새 연료로 가정하고 계산한다. 핵연료의 연소는 노심의 중심부에서 상대적으로 빨리 진행되기 때문에 MCNP 계산으로 모든 부분에서 동일한 중성자속을 갖도록 중성자 스크린을 설계하면 아래와 위 부분의 중성자속이 높아진다. 따라서 계산에 의한 설계 단계에서는 가운데 부분이 가장자리에 비하여 중성자속이 약 3 % 높도록 설계하였다. 그러나 측정에서는 3~4 % 낮게 나타났다. 즉 중성자속 분포 예측에서 계산과 측정 사이에는 6~7 %의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이 현상에 대해서는 보다 확실한 결과를 얻기 위하여 현재 모의 계산을 수행하고 있다.

MCNP 계산을 통한 조사통 설계에서는 상하 중성자속이 서로 대칭이 되도록 하였는데 전체 단결정의 길이가 설계 기준치인 60 cm보다 1.7 cm 더 긴데도 불구하고 위쪽 끝 부분에서의 중성자속이 아래쪽 끝 부분보다 약간 높다.

이러한 결과를 바탕으로 중성자 스크린의 가운데 부분에서 물의 양을 약간 줄이고, 단결정을 약간 더 올려서 조사시키면 조사 균일도가 향상될 것으로 추정하였다. 즉 가운데 부분에 Al wire를 감으면 Al wire가 물을 대체하여 중성자속이 약간 높아질 것이며, 조사통을 약간 올리면 중성자속이 대칭이 될 것으로 기대하였다. 이에 따라 조사통의 가운데 부분에 외경 1.2 mm의 Al wire를 감았으며, 조사 위치도 1차 시험 때보다 2 mm를 올려서 -47 mm로 하여 2차 조사 시험을 수행하였으며, 그림 2는 측정된 Au wire의 방사능을 HPGe 계측기로 scanning한 결과이다.

그림에서 측정 결과가 불연속적인 양상을 보이는 것은 조사 도중 조사통의 회전이 잠시 멈추었기 때문이다. 하나로 NTD2 조사공은 노심 바깥으로부터 약 35 cm 떨어져 있으므로 원통형 Si 크리스탈의 노심에 가까운 쪽은 중성자속이 높고 노심에서 멀리 떨어져 있는 부분의 중성자속은 낮다. Al ingot으로 모의 실험을 수행하였을 때 ingot 반경 방향의 최대값과 최소값의 차이는 약 30 %였다[5]. 이러한 차이를 상쇄하기 위하여 조사통을 회전시킨다. 따라서 조사 시간이 200분인 경우, 20분간 정지하였다면 각 토막별로 최대 3%의 차이가 발생할 수 있다. 위 그림에서 측정값이 낮은 5개의 Au wire 측정값을 2~3 % 증가시키면 전반적으로 연결이 잘 되는 분포를 나타내었다. 따라서 회전이 정지한 시간은 전체 조사 시간의 약 10 %로 추정할 수 있다. 그러나 이렇게 보정을 한 후의 조사량 분포도 가운데 부분이 가장자리보다 약간 낮은 경향성을 나타냈으며, 상하 분포의 대칭성은 우수하였다.

회전이 멈추지 않았다면 $\pm 1.5\%$ 이내의 조사 균일도를 가질 것으로 추정되었다.

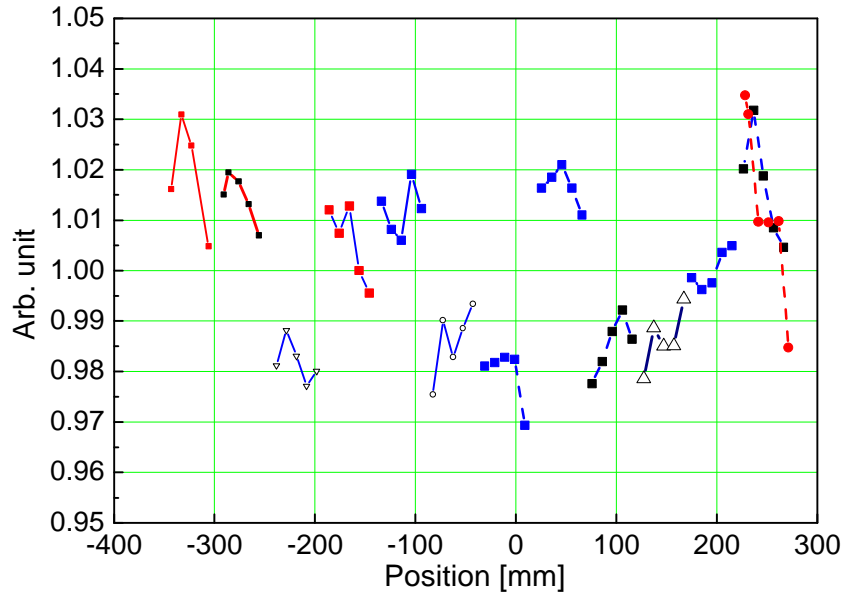


그림 2. 조사통에 1.2 mm Al wire를 감고 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과(조사 위치 : -47 cm).

3차 실험에서는 길이가 약 30 cm인 두 단결정에 3개의 Au wire를 설치하여 조사 실험을 수행하였으며, 2차 실험에서 1.2 mm Al wire를 감았던 부분에 직경 1.8 mm의 Al wire를 감았다. 조사 위치는 2차 실험과 같이 -47 mm로 하였다.

그림 3은 3차 실험 결과이며, 그림에서 ‘U’는 상부에 설치된 Au wire의 측정 결과이고, ‘L’은 하부에 설치된 Au wire 측정 결과이다. 또한, ‘O’는 Bi 판에 설치한 Au wire의 방사능을 절대 측정한 결과이며, 이렇게 구한 중성자속은 표 1과 같다. 또한 그림 4는 3개 wire의 측정값을 평균(단결정이 기울어진 양 끝의 값은 가중치로 0.5를 사용하고 중간값은 1을 사용)한 결과를 나타낸 것이다.

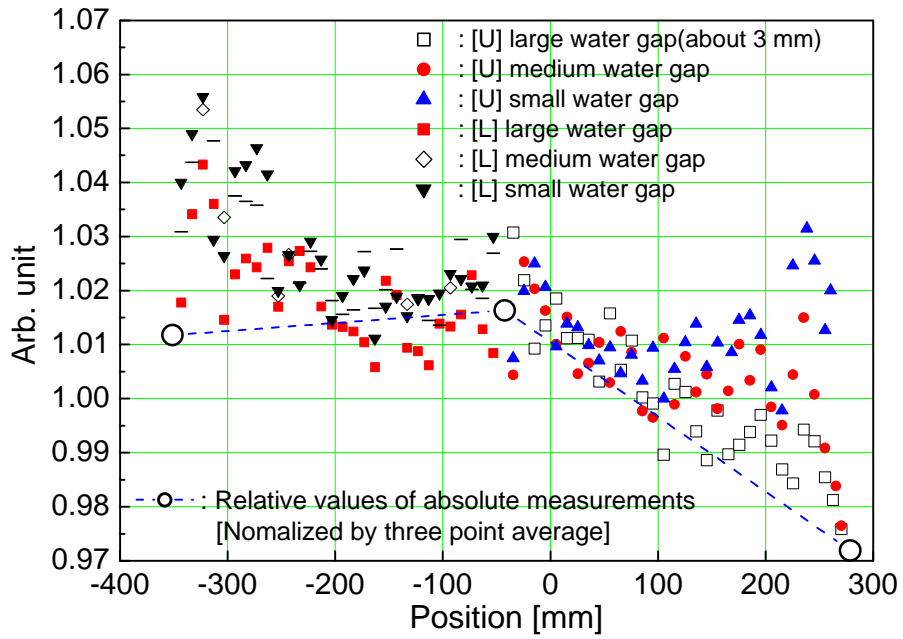


그림 3. 조사통에 1.8 mm Al wire를 감고, 30 cm Si 단결정 2개에 붙여 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과(조사 위치 : -47 cm).

표 1. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속.

위 치	중성자속 [n/cm ² sec]	상대값
278.86	1.42832×10^{10}	0.95630
-42.46	1.49359×10^{10}	1
-351	1.48693×10^{10}	0.99554

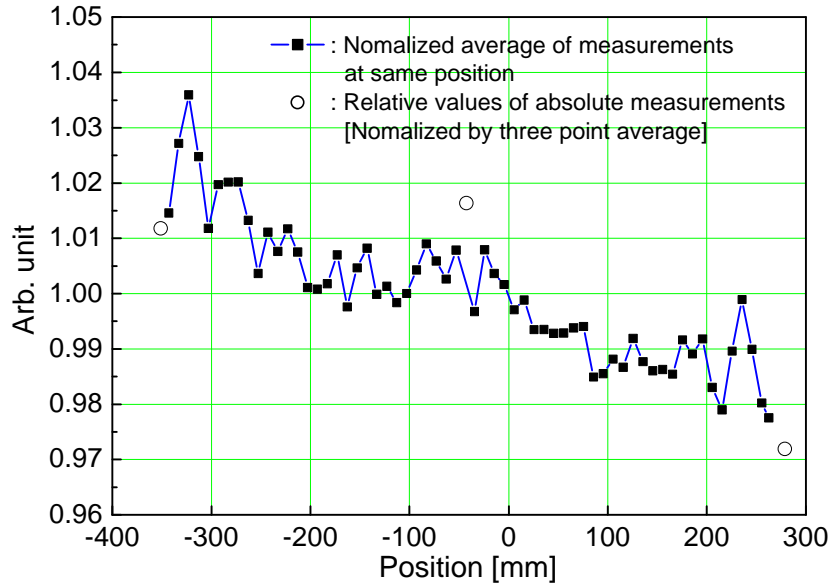


그림 4. 세 위치에 붙인 Au wire 측정값을 가중 평균한 결과.

아래쪽 단결정은 수직도가 그리 나쁘지 않으므로 조사통 내의 중앙에 잘 위치해서 각 wire 위치에서의 물이 차지하는 부분이 비슷하기 때문에 3개의 측정값이 비슷하게 나타났다. 그러나 위쪽 단결정은 수직도가 좋지 않기 때문에 조사통 내부에서 비스듬히 기울어 놓이게 된다. 따라서 물이 차지하는 부분의 차이가 크며, 이에 따라 세 측정값의 차이가 크며, 위로 올라갈수록 그 차이가 뚜렷하다. 조사통 내부의 3 mm의 물층 두께 차이에 의해 최대 5.5 %의 조사량 차이가 발생하였다.

그림 4로부터 Bi disk에 설치한 Au wire의 방사능 가운데 중간 것은 전체적인 경향성에서 약간 벗어나지만 양 가장자리의 2개는 전체 경향성과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 이번 측정 결과는 1차 측정과는 달리 아래가 높고 위가 낮은 경향성이 뚜렷하였다. 그러나 측방향 측정값들의 차이는 $\pm 2.5\%$ 이내였다. 이번에 실험에 이용한 단결정들은 직경과 길이 및 수직도 등의 조건이 하나로의 NTD 조사 기준에 크게 벗어난 단결정이었다. 이러한 경우의 단결정 조사시에도 중성자 조사량을 $\pm 2.5\%$ 이내로 유지할 수 있었으므로 현재 제작된 조사 장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

하나로 NTD 조사공에서 조사 장치를 설치한 후 중성자속을 측정하였다. 제작된 조사통을 그대로 이용하여 측정한 경우, 중성자속 분포는 가운데 부분이 낮고 가장

자리가 높았으며, 측정값 사이의 차이는 7 %이내였다. 이에 따라 중성자 스크린에 Al wire를 감고 측정을 다시 수행하였으며, 중성자 조사량을 ± 2.5 % 이내로 균일화 할 수 있었다. 또한 조사통 내부의 물층 두께에 따른 조사량 변화 경향을 확인하였다. 따라서 현재 제작된 조사 장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 김현준 외, “중성자 변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발”, KAERI/RR-797/88, 한국원자력연구소, 1989.
2. 김현준 외, “중성자 빔 이용 재료 물성 연구”, KAERI/RR-1533/94, 한국원자력연구소, 1995.
3. 전병진 외, “NTD-Si의 방사능 예측”, 2000추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2000. 10.
4. 전병진 외, “하나로에서의 NTD 방안 분석”, 2000추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2000. 10.
5. 송영동 외, “하나로에서의 NTD 실현을 위한 조사 장치의 최적화 설계”, 2001추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2001. 10.