

많은 브래그 각을 정밀정렬하여 쓸 수 있는 진공 X-선 구면결정 분광기

I. 개발과정

(1) 개발동기 및 배경

X-선 결정 분광기는 x-선을 이용하는 실험 및 응용분야에서 가장 널리 사용하는 보편적인 실험 장치이다. 예를 들면, 높은 에너지 x-선이 많이 방출되는 플라즈마 핵융합 실험장치에서 가장 중요한 측정변수인 이온 및 전자온도는 x-선 결정 분광기가 오랫동안 사용되어져 왔고, 기술 또한 괄목할 만한 발전을 이룩해왔다. 하지만, x-선 강도가 상대적으로 낮은 플라즈마 장치에서의 응용, 한 종류 이상의 브래그(Bragg) 각에 대한 측정 및 2차원적인 x-선 이미지를 측정하는데는 기존의 x-선 결정분광기를 이용하는데 어려움이 있었다. 즉, 기존의 x-선 결정 분광기는 원통형으로 밴딩된 결정(cylindrically-bent crystal) 표면에서 브래그 산란하는 x-선을 1 차원 멀티 와이어 프로포셔널 카운터(multiwire proportional counter) 검출기에 분광함으로써 1 차원적인 정보를 얻는데 사용되어져왔다. 또한, 고온의 핵융합 실험장치에서 발생하는 x-선 강도는 충분히 크고 주로 사용되는 브래그 각이 미리 정해지므로 한가지 브래그 각에 대한 x-선 측정을 위한 시스템을 대부분 구성한다. 분광기구성에 있어서는 검출기를 론란원(Rowland circle)상의 접선방향

으로 정교하게 위치시키는데 벨로즈(bellows)를 주로 이용하였다.

따라서, 기존의 x-선 결정 분광기는, 첫 번째로, 한 종류이상의 브래그 각에 대한 측정이 필요할 때 구성하고 있는 시스템을 새로운 브래그 각에 맞도록 광학적으로 정밀하게 정렬하는데는 많은 노력과 심각한 문제점이 있었다. 두 번째로, 약한 강도 및 긴 파장의 x-선이 발생하는 경우 검출기가 진공용기 안에 놓여있도록 해야하는 분광기 구성이 매우 어렵다. 또한, 그렇게 구성하더라도 브래그 각이 바뀌면 벨로즈를 이용하여 검출기를 론란원 상의 접선방향으로 정밀정렬 시키는데 어려운 문제점이 있었다. 세 번째로, 원통형으로 밴딩된 결정을 사용하고 1차원적인 멀티 와이어 프로포셔널 카운터를 검출기로 사용하기 때문에 2차원적인 x-선 이미지를 측정할 수 없었다.

그러므로 상기와 같은 기존의 분광기가 갖는 문제점을 해결하기 위하여 지속적인 연구를 하게 되었고, 진공 상태에서 고진공도를 유지하면서 회전 가능한 포트 및 진공용기를 제작하여 낮은 에너지 영역의 x-선이 발생하는 실험에서 많은 브래그 각을 측정 할 수 있는 진공용 결정 분광기를 개발 할 수 있는 기반을 마련하였다. 또한, 구면으로 밴딩된 결정(spherically-bent crystal)과 2차원 검출기를 이용하여 2차원적인 x-선 이

미지를 측정 할 수 있게되었다. 이러한 연구결과 는 결론적으로 낮은 에너지의 x-선 측정은 물론 많은 브래그 각을 정밀정렬하여 쓸 수 있는 진공 x-선 구면 결정분광기를 발명하게 된 직접적인 동기가 되었다고 본다.

(2) 발명자의 공헌도

발명자 이상곤 박사는 한국기초과학지원연구 원에 1996년부터 지금까지 근무하면서 플라즈마 진단장치 연구개발 및 국내최대 플라즈마 장치인 한빛 자기미러장치 (Hanbit magnetic mirror device)에서 많은 실험을 수행해 왔으며, 세계에서 최초로 건설하는 대형 차세대 초전도 핵융합 토카막장치 (KSTAR)를 운전하는데 필요한 부 대장치인 x-선 및 전자기적 진단분야에서 활발한 연구개발을 수행해오고 있다. 지금 운전 중에 있는 한빛 자기미러장치는 토카막장치에 비하면 낮은 온도와 밀도를 가지는 플라즈마가 발생되므로 낮은 에너지의 x-선이 방출되기 때문에 기존의 결정 분광기를 이용하기가 무척 어렵다. 따라서, 상술한 진공 x-선 구면 결정분광기를 제작하게 되었으며, 이는 미러장치를 위해서는 세계 최초로 개발을 한 것이다. 또한, 제작한 진공 x-선 구 면 결정분광기를 캘리브레이션(calibration) 하는 과정에서 선 집속된 x-선 튜브를 추가적으로 발명하여 미국 특허 출원 (출원일: 2000년 10월 25일) 하였으며, 등록이 허가되었다 (제 09/697 616호, 등록허가일: 2002년 3월 25일). 캘리브레 이션 실험 과정에서 얻은 중요한 결과들은 국외 유명 학술저널지에 다수 게재되어서 실험을 주도 한 이상곤 책임연구원은 2001년도 한국기초과학 지원연구원에서 수상하는 가장 영예로운 상인 논문상 대상을 받았다. 이 외에도 x-선 결정 분광기 의 핵심부품인 결정의 반사율(integrated reflectivity) 측정에 관한 새로운 방법을 연구하여 미

국 특허 출원 중에 있다. 이 기술은 x-선 크리스 탈로그래피(crystallography)에서는 필수적인 것으로 연구계 와 산업계에 널리 사용하는 x-선 회절 (XRD), 천문우주학, 재료공학 등 많은 분 야에서 응용 할 수 있을 것이라 예상된다. 특히, 한국기초과학지원연구원은 기초학문을 연구 및 지원하는 연구원의 특징상 특허 출원은 학술저널 지에 기고하는 횟수에 비하면 매우 저조하였으나, 이상곤 책임연구원의 활발한 발명활동으로 인하여 기초과학연구분야에서도 우수한 발명을 할 수 있는 가능성을 보였으며 발명 분위기고취 및 직 무발명의 중요성을 재인식하는 계기가 되었다고 본다.

(3) 기술동향파악

산업계에서 주로 사용하는 상업화된 x-선 결정 분광기는 대단히 고가의 장비이며 론란원의 지름 이 50 cm 미만의 소형장치가 대부분이다. 연구 계에서 사용하는 x-선 결정 분광기는 각기 다른 분야에서 많이 사용된다. 예를 들어 플라즈마 응 용 분야를 보면, 핵융합 토카막 장치가 미래 대체 에너지로 주목을 받으면서 가장 중요한 측정 변 수인 플라즈마 이온온도를 측정하기 위하여 1979 년부터 미국 프린스턴 플라즈마 물리연구소에서 사용하기 시작하였다. 이 경우 요한 (Johann) 분 광기를 이용하며 론란원의 지름은 수 미터가 된 다. 따라서, 상업화된 분광기를 이용하기보다는 측정 목적에 맞도록 장기간에 걸쳐 제작하는 것 이 보편적 이었다. 요한 분광기의 경우 슬릿 (slit)이 필요하지 않기 때문에 쓰루풋 (throughput)이 매우 높고 분광분해능이 아주 우수하다. 그후 세계 여러 나라에서 많은수의 대형 핵융합 토카막장치가 개발되면서 x-선 결정 분광기는 오랫동안 사용되어져 왔고, 현저한 기술발전을 이 룩해왔다. 이때까지의 대부분 분광기는 플라즈마

단면적의 한 부분만을 분광하여 이온온도를 측정할 수 있었다. 이온온도 분포를 보기 위해서는 많은 수의 분광기를 제작하여 설치할 수밖에 없었으며 이는 많은 예산, 시간 및 공간적 제약을 안고 있었다. 최근에는 차세대 개념인 x-선 이미지를 측정하여 이론적으로는 무한대의 사이트라인(sightlines)을 보기 때문에 한 시스템으로도 이온온도 분포를 측정할 수 있게 되었으나, 아직까지 개발이 완료되어 실험을 한 예는 없다. 2차원적인 이미지를 측정하는 x-선 결정 분광기의 핵심부품은 구면으로 밴딩된 결정과 2차원적인 검출기에 있다. 구면으로 밴딩된 결정은 결정의 크기가 커지면 제작하기 어려운 기술적인 난제가 있으나, 점진적으로 기술이 발달하고 있다. 2차원 검출기의 대표적인 예는 CCD 카메라와 2차원 멀티 와이어 프로포셔널 카운터이다. CCD 카메라의 경우는 x-선에 민감한 CCP 칩(chip)이 많이 개발되고 있다. 2차원 멀티 와이어 프로포셔널 카운터는 CCD 카메라에 비하여 공간적 분해능은 좋지 않으나 대면적으로 개발할 수 있는 장점이 있다. 분광기 제작은 상술한 두 가지 핵심부품과 진공용기가 조합된 것이다. 상술한 내용은 플라즈마와 같이 특정분야 경우의 예를 들었지만, 그 응용은 반드시 상술한 분야에만 국한되지 않고 x-선 결정 분광기가 이용되는 다른 많은 분야에서도 비슷하게 적용된다.

(4) 연구개발계획 수립

본 발명의 x-선 구면 결정분광기 연구개발계획은 1997년 미국 프린스턴 플라즈마 물리연구소와 공동연구를 진행하면서 수립하였다. 먼저, 한국에서 운영중인 대형 플라즈마 미러장치인 한빛에서 2차원적인 x-선 이미지 측정용 결정 분광기를 설계하였다. 한빛장치와 같이 낮은 에너지 x-선 측정실험에서는 검출기가 진공용기 안에 위치하

는데 용이한 진공용 CCD 카메라를 이용하기로 하고, 향후 KSTAR 토카막 같이 높은 에너지 x-선 측정실험에서는 대면적 2차원 멀티 와이어 프로포셔널 카운터를 사용하기로 하였다. 두 경우 모두 진공 용기는 고진공 환경에서도 회전이 가능하여 많은 브래그 각을 측정할 수 있도록 하였다. 먼저, 제작하려는 결정분광기용 진공용기를 실제 크기보다 축소된 작은 견본을 만들어서 검증을하기로 하였다. 견본으로 제작한 장치에서 여러 가지 물리적 및 공학적 검증이 끝나면, 검증 때 발생한 문제점을 해결하고 추가적으로 요구되는 성능을 감안하여 본 제품을 제작하기로 계획을 세웠다.

(5) 연구개발과정

연구개발과정은 개념설계, 상세설계, 본 제품 제작 및 캘리브레이션 실험으로 진행되었으며 개발과정에 대한 상세 내용은 아래와 같이 서술된다. 개념설계는 측정하고자하는 변수에 따른 결정(crystal)선택 및 브래그 각의 범위, 그리고 분광기의 분광분해능을 계산하고 (그림 1)과 같이 전체 구성도를 설계하였다. 상세설계는 (그림 2)와 (그림 3)과 같이 많은 브래그 각을 측정하기 위한 진공용기의 구조를 제작이 가능한 상세 도면을 준비하였으며, 사용할 검출기를 선택하였다. 본 제품제작은 상세 설계된 도면대로 (그림 4)와 (그림 5)처럼 진공용기를 제작하고, 구면으로 밴딩된 결정 및 검출기를 구매하였다. (그림 6)은 전체 분광기가 조립 완료된 모습을 보여준다. 구면으로 밴딩된 결정과 검출기는 상업적으로 잘 개발되어 있기 때문에 실험목적에 가장 적절한 것을 선택하여 구매를 하면 된다.

(그림 7)은 제작된 분광기를 캘리브레이션 하기 위하여 추가적으로 개발된 선 집속된 x-선 튜브를 보여준다.

II. 권리화 과정

(1) 국내의 특허 출원 및 등록현황

본 건과 관련한 전체 분광기 시스템은 국내 특허 출원 및 등록 (특허 제 0328118 호) 되었다. 개발된 분광기 시스템을 캘리브레이션 하기 위하여 추가로 개발된 선 집속된 x-선 튜브는 한국 및 미국에 특허 출원하였으며, 미국에 출원한 특허는 등록(제 09/697616 호) 되었다. 개발된 분광기의 핵심부품인 결정 (crystal)의 반사율 측정에 관한 기술은 현재 미국 특허 출원 중에 있다.

(2) 분쟁의 유무

본 특허는 새로운 개념을 바탕으로 한 x-선 결정 분광기 연구개발 수행 중에 부산물로 창출된 고 부가가치를 지닌 것으로 분쟁이 발생 할 소지가 아주 희박하다고 본다.

(3) 사내 직무발명 보상 규정상 등급 및 보상금액

한국기초과학지원연구원은 정부 출연 연구원으로 국가적 차원에서 중요한 기초과학과 관련한 과제 및 고급 지원업무를 수행해오고 있다. 신중 기술을 개발하여 이익을 창출하는 기업과는 달라서 발명을 주 업무로 하고 있지 않다. 그러나, 지식기반을 주 업무로 하기 때문에 업무중 고 부가가치를 지닌 직무 발명이 발생할 수 있기 때문에 직무 발명 규정을 최근에 도입했다. 본 건은 중요한 발명으로 분류되었으며, 본 건에 대하여는 아직까지는 특별한 보상을 받은 적은 없으나, 연말에 우수직원 포상 규정에 따라 적절한 포상이 예상된다.

(4) 권리화 진척도

본 건은 분광기 시스템 전체를 하나의 새로운

기술로 특허가 등록되었다. 앞으로 각 세부 시스템에서 기존의 기술이 아닌 독창성을 발굴하여 특허화 하려는 노력이 진행 중에 있다. 이미 미국에 특허 등록된 캘리브레이션을 위한 선 집속된 x-선 튜브 개발 과 특허 출원 중에 있는 결정의 반사율 측정 기술이 좋은 예가 된다. 또한, 한국과 미국뿐만 아니라 일본 및 유럽에도 출원할 예정이다.

III. 기술성

(1) 독창성과 개량성

본 건은 다양한 브래그 각에 대하여 측정가능하도록 진공용 포트가 회전이 가능하며, 이차원 검출기를 이용하여 이차원적인 x-선 상을 얻을 수 있으며, 광학적으로 정밀하게 른란원 상의 접선방향으로 정렬이 가능하도록 검출기가 회전이 되게 구성되어진 것을 특징으로 하는 많은 브래그 각을 정밀정렬하여 쓸 수 있는 진공 x-선 구면 결정 분광기로서 다음과 같은 기술성을 가진다.

결정이 위치하는 진공용기의 포트가 진공도를 유지하면서 회전할 수 있도록 (그림 8)과 같이 진공용기 포트 시창구의 O-링 위에 이 시창구보다 더 큰 회전체를 부착하며, 이 회전체에 텀이어가 설치된 가이드 레일을 부착하여 회전체가 원하는 각에 정확하고 쉽게 회전이 가능하도록 구성되어 있다.

CCD 카메라를 검출기로 이용할 경우, 대부분 CCD 카메라는 CCD칩 부분만 진공용으로 사용할 수 있도록 설계된다. 따라서, 이 경우 (그림 5)와 같이 두 개의 진공용 용기가 이용되어서 반달 모양인 안쪽용기 바깥표면의 포트에 CCD 카메라가 부착되어서 CCD 카메라의 CCD칩은 진공에 노출되고 그 외의 CCD 카메라 부분은 공기 중에 노출되고 바깥용기는 진공을 유지하며, 또

한, CCD 카메라가 부착된 안쪽 진공용기는 워머 및 워휠을 이용하여 원하는 각을 정확하고 쉽게 회전이 가능하도록 구성되어있다.

그러므로 본 발명은 다양한 브래그 각에 대하여 분광기 시스템의 응용이 가능하며, 진공 분광기 시스템이므로 x-선이 진행되는 동안 강도의 손실이 없으므로 약한 x-선 측정이 가능하고, 구면으로 밴딩된 결정과 이차원 검출기를 이용함으로써 2차원적인 x-선 이미지를 측정하기 때문에 이 분야 연구에 획기적인 공헌을 할 수 있으며, 또한, 10⁻⁷ Torr의 고진공도를 유지하면서 회전할 수 있도록 설계된 진공용기는 분광기 외에도 진공용기를 이용하는 다른 산업적 응용에도 많은 이용이 기대 된다.

(2) 독점력

본 발명과 같이 진공 중에 회전이 가능한 포트와 진공용기를 가진 분광기는 많은 브래그 각을 정밀정렬하여 쓸 수 있으며, 구면으로 밴딩된 결정과 2차원적인 검출기를 이용하여 2차원적인 이미지 측정용 분광기는 독창적인 우수한 기술이며, 낮은 x-선 에너지 측정을 위해서는 최초로 개발하였기 때문에 독점력을 가질 수 있다고 본다.

(3) 지속력

진공 중에 회전이 가능한 진공용기는 O-링의 수명이 중요한 변수이며, 테프론 코팅된 제품을 사용하면 수명을 획기적으로 연장할 수 있다. 따라서, 정상적으로 사용할 경우 10년 정도 예상되며, 만약, O-링에 문제가 발생할 경우 교체하는 것은 아주 쉬운 작업이다.

VI. 실용성

(1) 생산실시 여부

선행품인 견본 제작경험 및 본 제품 제작을 통하여 분광기 설계 및 제작 기술은 모두 확보하고 있으나, 생산실시에 대한 구체적인 계획은 차후에 검토 할 예정이다.

(2) 주변기술의 필요성

구면으로 밴딩된 결정과 이차원적인 검출기는 오랫동안 개발되어 상업화가 잘되어 있기 때문에 적절한 제품으로 구매를 하면 된다고 본다. 그 외에 별도의 주변기술은 필요 없다.

(3) 국내기술 실시가능 여부 및 파급효과

본 발명에서 확보하고 있는 진공용기에 관한 기술은 모든 기술을 자체 개발하였고 캘리브레이션을 통하여 성능을 충분히 검증하였기 때문에 국내기술 실시가 가능하다고 본다. 또한, 진공용기 산업에 미치는 파급효과는 클 것이다.

V. 경제성

(1) 생산성

선행 견본품 제작 및 본 제품을 제작할 때 생산성과 원가를 고려하여 제품 공정의 간소화를 병행하여 검토했으므로 생산성이 높을 것이라 생각 된다.

(2) 생산비 절감

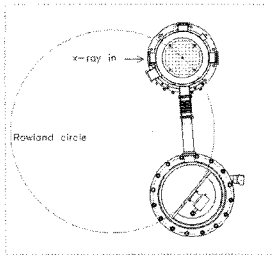
순수 국내기술을 이용하여 개발되었기 때문에 대 외국 특허료 지불이 필요 없다. 따라서, 당연히 생산비는 절감된다고 본다.

(3) 시장규모

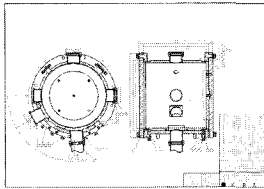
개발한 분광기 자체뿐만 아니라 진공 중 회전이 필요한 진공용기를 이용하는 시장에 적용한다면 시장 규모는 대단히 크다고 할 수 있다.

(4) 수입대체 효과

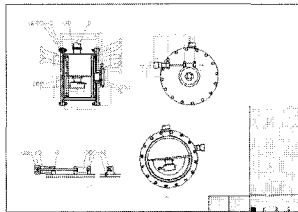
분광기는 대략 1대 당 2~3억을 능가하는 고가의 장비이다. 이를 수입하지 않고 직접 제작하여서 얻는 수입대체 효과는 대단히 크다고 할 수 있다.



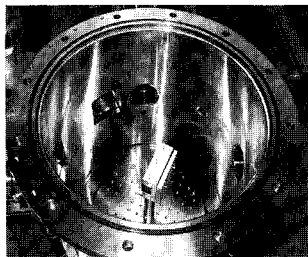
(그림 1) 개념 설계된 x-선 구면 결정 분광기



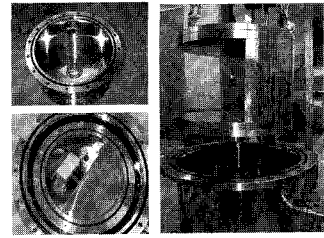
(그림 2) 고진공 상태에서 진공용기에 붙은 포트가 회전이 가능한 진공용기



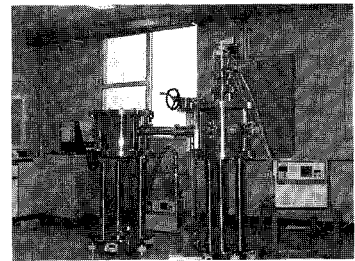
(그림 3) 고진공 상태에서 진공용기안에 위치한 반달모양의 진공용기가 회전이 가능한 진공용기



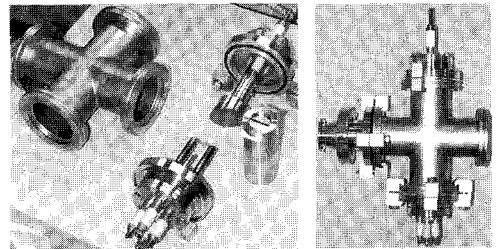
(그림 4) 제작된 고진공 상태에서 진공용기에 붙은 포트가 회전이 가능한 진공용기. 결정이 진공용기 중앙에 위치하는 모습을 볼 수 있다



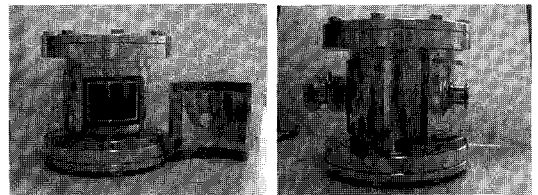
(그림 5) 고진공 상태에서 진공용기안에 위치한 반달모양의 진공용기가 회전이 가능한 진공용기. 두 개의 진공용기가 조립되는 모습 및 CCD 카메라가 부착된 모습을 보여준다



(그림 6) 제작 완료된 전체 분광기 모습. 진공 실험을 위한 장비들이 준비되었다



(그림 7) 제작된 x-선 결정 분광기를 캘리브레이션 하기 위하여 추가적으로 개발된 선 집속된 x-선 튜브



(그림 8) 본 제품 제작하기 전에 시험 제작한 고진공하에서 진공포트가 회전 할 수 있는 진공용기

발특2002/12