

비평면 자기분광계의 설계 및 성능 조사

김우영

경북대학교 물리학과

S. E. Williamson

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

(1997년 9월 23일 받음, 1997년 10월 7일 최종수정본 받음)

전자산란실험에서 핵반응평면 밖에서의 (e, e', p) 측정을 위한 자기분광계가 고안되었다. 이 자기분광계는 산란평면에서의 대칭축에 대한 방위각을 가진 네개의 분광계로 되어있다. 이 계기의 성능은 핵자 및 few body 핵계에서의 정밀측정을 위해 최적화되었다. 이 논문은 첫단계 작업으로 시제작된 한개의 자기분광계에 대한 이론-광학적 디자인과 그 계기를 사용하여 측정된 성능을 발표한다.

I. 서 론

전자산란실험에서 산란된 전자와 동시에 튀어나오는 하드론들을 산란평면 밖에서 측정하면, 산란단면적 안에 포함된 아주 작으면서도 대단히 중요한 성분에 대한 정보를 얻을 수 있다 [1]. 따라서 연속전자빔을 내는 가속기 연구소에서는 평면 밖에서 높은 모멘텀의 전하를 띤 입자들을 측정하기 위한 계획들이 시도되고 있다 [2]. 현재 MIT-Bates 가속기 연구소에서는 가벼운 핵을 정밀하게 측정할 수 있도록, 비평면에서의 검출기 시스템 (OOPS : Out-Of-Plane-Spectrometer) 이 개발되고 있다. 이 시스템은 산란평면에 위치한 대칭축 주위에서의 방위각으로 배열된 네개의 독립적인 자기분광계 및 그것들을 지탱해주는 구조물로 구성되어있다. 이 분광계는 전자산란실험에서 산란된 전자를 반응평면에서 측정하고, 그와 동시에 (e, e', p) 단면적을 네개의 평면 밖 각도에서 측정할 수 있도록 고안되었다. 네 각도에서의 동시측정은 상대적 동시 단면적에서의 비대칭성으로부터 핵의 구조에 대한 중요한 정보를 추출할 수 있게 한다 [3]. 이러한 비대칭성 측정방법은 절대적 산란 단면적을 추출하지 않아도 된다는 장점을 지니고 있다. 따라서 이 측정법은 제동오차의 크기를 상당히 줄일 수 있다.

이 논문에서는 비평면 분광계의 네개의 계기중 그 첫 번째 계기를 시제작한 이론-광학적 설계를 발표한다. 제2 장에서는 설계를 하는데 고려된 이론적 및 실험적 고찰이 적혀있다. 제3 장은 분광계의 광학적 설계에 대해 설명한

다. 제4 장은 그 제작된 분광계의 성능을 조사한 결과를 다룬다.

II. 검출기 설계에 대해 고려해야할 사항

전자산란에서의 동시측정반응 $A(e, e', x) B$ 의 운동학은 Fig. 1에 그려져있다. 산란된 전자는 가상적 광자를 모멘텀 전달방향 q 로 방출한다. 방출된 광자는 과녁핵에 모멘텀 q 와 에너지 ω 를 전달하면서 핵과 작용한다. 붕괴생성물 x 는 극성각 θ_{pq} 및 모멘텀 전달방향에 대한 방위각 ϕ_{pq} 에서 검출된다. 평면과동 어림셈 (PWIA)에 의하면, 편극 전자빔을 사용한 핵반응에 대한 단면적은 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$d\sigma_h = d\sigma_M \{ p_L f_L + p_T f_T + p_{LT} f_{LT} \cos \phi_{pq} + p_{TT} f_{TT} \cos 2\phi_{pq} + h p_{LT'} f_{LT'} \sin \phi_{pq} \} \quad (1)$$

식 (1)에서 $d\sigma_M$ 은 점전하로부터의 산란 단면적이며, p_a 는 역학적 인자이다. 전자빔의 나선성은 윗식에서 h 로 나타낸다. 핵구조에 대한 모든 정보는 이 반응함수 f_a 에 들어있는데, 이 구조함수는 핵전이 전류의 함수이다.

식 (1)에서 만약 검출기의 ϕ_{pq} 가 $\pi/4$ 의 정수배의 각도로 놓여져서 반응평면 밖에서 측정을 할 수 있다면, 동시에 측정하는 전자산란 단면적에서 f_{LT}, f_{TT} 및 $f_{LT'}$ 함수들을 추출할 수 있게 된다. 또한 $\pi/4$ 의 n 배의 측정값들로부터 구조함수에 비례한 비대칭성의 비를 구할 수 있

다 [3]. Fig. 2는 네개의 비평면 자기분광계들이 $\pi/2$ 의 n 배의 각도로 대칭을 이루며 “+” 형태를 나타낼 경우를 보여준다. Rosenbluth 분리방법을 사용하면, 4개의 비평면 자기분광계로부터 동시측정하는 전자산란에서 측정할 수 있는 모든 구조함수들을 분리해 낼 수 있다.

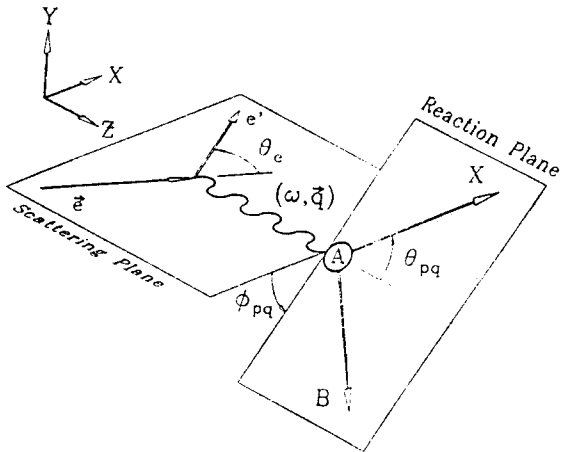


Fig. 1. Kinematic definitions for the $A(e, e' x) B$ reaction.

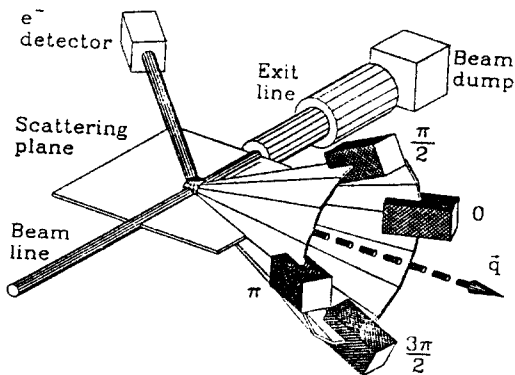


Fig. 2. Schematic representation of the experimental geometry in the “+” configuration.

MIT-Bates 가속기 연구소에서 측정하는데 사용될 자기 비평면 분광계들은 다음과 같은 이온 광학적 특성범위를 충족시켜야 한다.

- 1) 모멘텀 분해능 ; $< 1 \times 10^{-2}$
- 2) 각분해능 ; $\theta_{pq}, \phi_{pq} < 5 \text{ mrad}$

- 3) 각도 범위 ; $> \text{각 계기당 } 2 \text{ msr}$
- 4) 최대 모멘텀 ; $> 600 \text{ MeV}/c$

III. 광학적 디자인

제작비용을 고려하여, 쌍극자 자석과 사중극자 자석은 각각 Fermi 가속기 연구소 및 Brookhaven 연구소에서 제작된 잉여 자석을 사용하였다. 잉여자석의 모양에 따라, 쌍극자-사중극자 (DQ) 형태가 비평면에서 사용하는 데 가장 적합한 것으로 나타났다. 사중극자의 부피가 가장 크기 때문에, DQ 배열은 근접한 계기가 작은 θ_{pq} 각에서, 포개지는 각을 최소화 시킬 수 있다. 이러한 사항은 MIT-Bates 연구소의 실험동에 설치될 네개의 DQ 비평면 계기들의 집합체를 그린 Fig. 3에서 알 수 있다.

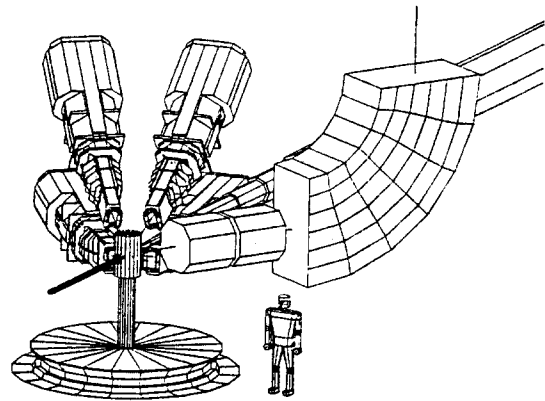


Fig. 3. Typical arrangement of cluster of four OOPS spectrometers with an in-plane electron spectrometer.

Table 1. Dipole magnet specifications.

Field strength	4.3 kG
Magnet length	48 in.
Cross section dimensions	10 in. \times 22 in.
Magnet effective length	51.52 in.
Magnet gap	3.25 in.
Coil aperture	12 in.
Field aperture	± 4.00 in.
Field quality ($\Delta B/B$ within 3 in.)	$\pm 10^{-4}$
Conductor current	711 A
Coil resistance	2388 lb

쌍극자 자석의 규격과 특성은 Table 1에 요약되어 있다. 이 쌍극자 자석은 옆면이 대단히 가늘어서 4개를 가까이 포갤 때, 대단히 유용하게 된다. 쌍극자 자석의 자장 특성은 2차원 프로그램 POISSON [4] 을 사용하여 조사되었다. Fig. 4에서 보듯이, 쌍극자 자석은 6.0 kG 에서 포화되기 시작한다. Fig. 5는 4.3 kG 및 8.0 kG 의 최고값에 대한 자장지도이다.

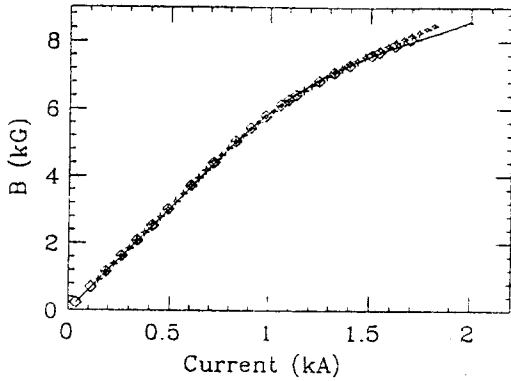


Fig. 4. The OOPS dipole magnet excitation curves. The diamond and star points represent measurements from two different dipole magnets. The solid curve represents 2-dimensional POISSON calculation.

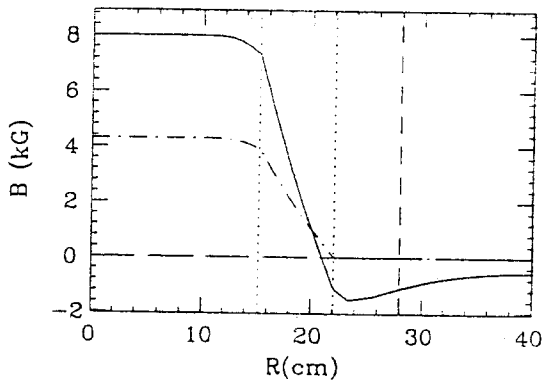


Fig. 5. Field maps for the dipole magnet calculated with POISSON. The solid and dashed-dot curves represent calculations at 8.0 and 4.3 kG, respectively. The dot, dashed and long-dashed curves represent the coil boundaries, the magnet boundary and the zero line, respectively.

사중극자 자석은 극점점에서 최대자장 11 kG 까지 이룰 수 있다. 사중극자 자석의 특성은 Table 2에 요약되어

있다. Fig. 6은 사중극자 자석의 들뜸 곡선을 측정한 결과를 보여준다.

Table 2. Quadrupole magnet specifications.

Field strength	11.0 kG
Magnet length	24 in.
Cross section dimensions	35 in. × 35 in.
Magnet bore	8.0 in.
Conductor current	500 A
Coil resistance	0.4 Ω
Magnet weight (approx.)	5800 lb

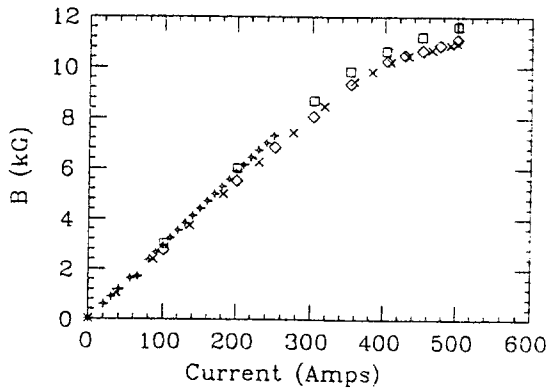


Fig. 6. The OOPS quadrupole magnet excitation curves. The diamond and square points represent measurements of two different quadrupole magnets by T_{20} collaboration. The star points and cross points represent measurements of two different quadrupole magnets by our group.

비평면 자기분광계의 광학적 설계는 자석의 부피 뿐만 아니라 모멘텀 분해능 등 여러가지 요인들에 의해 제한을 받는다. 입체각과 접근할 수 있는 각 θ_{pq} 사이의 각도를 절충하여, 1.4 m의 표류거리를 정했다. 이 거리에서 쌍극자 자석이 모멘텀에서 초점을 맞추게 된다.

두 자석간의 구부러진 각도를 달리하여 여러가지 DQ 배열을 시도해 보았다. 구부러진 각도를 크게 할수록, 최대모멘텀이 줄어들기는 하지만 모멘텀 분해능이 향상된다. 비평면 실험에 요구되는 분해능을 얻도록 적정한 타협점을 찾은 결과, 구부러진 각도 21.7° 에서 830 MeV/c 의 중앙 최대 모멘텀을 얻었다. 또한 구부러진 각도 29.0° 및 최대 모멘텀 625 MeV/c 에서는 고분해능 배열을 얻

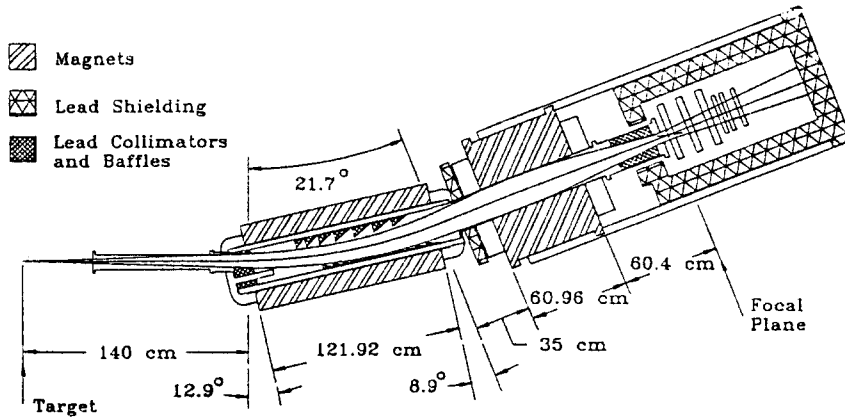


Fig. 7. A cross sectional elevation of the OOPS module.

계 되었고, 이 배열에 대해서도 조사되었다.

이 계기의 개념적 설계에는 TRANSPORT [5] 가 사용되었다. 초점면의 광학과 분광계의 모멘텀 및 각 acceptance를 최적화 시키는데는 RAYTRACE [6] 와 TURTLE [7] 이 사용되었다. 이 비평면 분광계의 높은 모멘텀 배열형의 단면적과 도면은 Fig. 7에 그려져 있다. 이 그림에는 조준기와 다른 장애물들이 광학적 시스템을 현실적으로 나타내기 위해 포함되었다. 분광계의 acceptance와 과녁의 효율은 TURTLE을 사용하여 조사되었다.

IV. 제작된 자기 분광계의 성능조사

(a) 효율 측정

Fig. 8은 비평면 자기분광계를 사용하여 측정한 모멘텀 효율과 모델 계산을 비교한 결과를 나타낸다. 측정된 점들은 중앙에서의 자장을 1로 환산하여 눈금환산하였다. 이 그림에서의 오차범위는 white 모멘텀 스펙트럼을 분광계에 보내고, 가장 후방의 검출기에 나타나는 사건들을 나눔으로써 얻은 TURTLE 계산치이다. 이 상대효율에서 볼때, 모멘텀 효율의 모양을 잘 이해한다고 할 수 있다. 분광계의 절대 틀맞춤은 3% 이내에서 파악되고 있다.

여기서 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{N[H(e, e' p)]}{N[H(e, e')]} \frac{Live[H(e, e')]}{Live[H(e, e' p)]} \quad (2)$$

식 (2)에서, 첫번째 항은 CH_2 과녁에 탄성산란한 수소 붕우리에서의 동시측정 계수와 전자 하나만 측정된

비율을 나타내고, 두번째 항은 실험중 계수기에 의해 측정된 실험시간의 비율을 나타낸다. 이 측정에서는 분광계의 자장을 변화시켜줌으로써, 효율을 $\delta p/p$ 의 함수로 본뜨기를 했다.

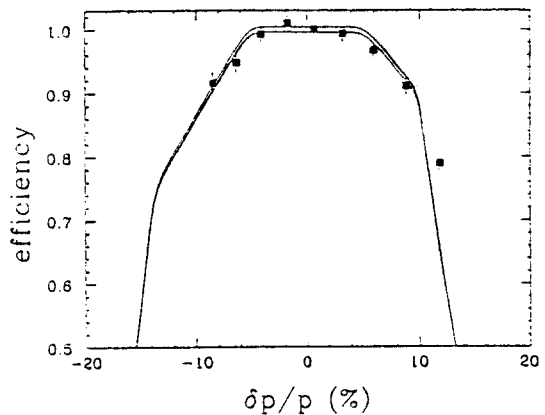


Fig. 8. The shape of the measured OOPS momentum efficiency profile with our model calculations. The points are measured efficiencies which are scaled to unity after the application of a calculated rate correction factor. The error band is the result of a TURTLE simulation.

(b) 모멘텀 분해능

핵자 및 중앙성자를 과녁으로 한 첫번째 비평면 실험들은 특별히 좋은 모멘텀 분해능을 요구하지 않는다. 이 실험에서는 모형들 부피에서 오는 제약과 비용들을 고려하여 모멘텀 분해능의 목표를 1%로 잡았다. 비평면

자기분광계의 고유의 모멘텀 분해능을 측정하기 위해, 탄소 필라멘트를 과녁으로 사용하였다. 일반적으로 모멘텀 분해능에 대한 오차는 분산하는 평면에서의 과녁에 대한 반응영역의 크기가 주된 요인이 된다.

이 측정에서는 탄소 필라멘트 과녁을 사용하여, 반응영역을 1 mm 정도로 제한했다. Fig. 9는 탄소 필라멘트 과녁을 사용한 비평면 자기 분광계의 모멘텀 분포를 나타낸다. 분해능의 FWHM은 탄소 필라멘트 과녁의 경우 0.45 % 이고, 초점 평면 영역에서 거의 변하지 않는다. 빔의 크기를 5.0 mm로 했을 때, 26 mg/cm²의 탄소 박막에서 0.75 %의 분해능을 측정했다. 탄소 필라멘트와 박막에 대한 측정에서 얻어진 분해능은 과녁 작용 규격, 빔의 에너지 분산, 과녁 체임버와 분광기의 진공 창문에서의 다중산란, 초점평면 좌표 측정에서의 오차등이 복합적으로 나타난다고 고려했을 때의 예측과 일치하게 나타난다. 또한 분광계의 진공 안쪽에 위치한 전방 조준기에 위치한 구멍 뚫린 sieve 슬릿의 위치에 대해 재구성하면, 300 MeV 전자에 대해 분광계는 1.5 mrad 보다 더 좋은 각 분해능을 보여주었다.

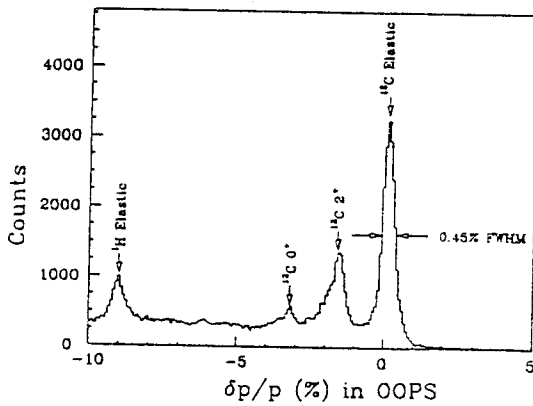


Fig. 9. The momentum resolution for OOPS is shown on a carbon filament target of diameter 1.0 mm.

V. 토 론

핵반응 평면 밖에서 ($e, e' p$) 동시측정을 할 수 있도록 네개의 자기 분광계를 설계하였고, 그중에서 분광계

한개를 시제품으로 제작하였다. 그 측정된 성능은 디자인 계수들과 잘 들어 맞았다. 성능조사에서, 0.5 % 보다 더 좋은 모멘텀 분해능을 얻었다.

분광계의 각분해능은 과녁 체임버와 분광계 전방 진동 창문에서의 다중산란에 의해 생겨난다. 이러한 진동창문이 없는 경우 과녁의 각 분해능은 1.5 mrad 정도 얻을 수 있다. 분광계의 모멘텀 효율의 모양은 모멘텀의 약 15 % 정도에서 계산된 모양과 일치한다.

감사의 글

이 연구는 과학재단 96년도 핵심과제 연구의 지원을 받아 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Boffi, C. Giusti and F. D. Pacati, Nucl. Phys. **A435**, 697 (1985).
- [2] C. N. Papanicolas, Proc. Top. conf. on Electronuclear Physics with Internal Targets, ed. R. G. Arnold (World Scientific) Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, CA, 1989 p. 132.
- [3] C. N. Papanicolas et al., Nucl. Phys. **A497**, 509c (1989).
- [4] Accelerator Theory and Simulation Group, AT-6, POISSON/SUPERFISH Group of Codes, Los Alamos, New Mexico, 1987, LAUR-87-115 and LA-UR-87-126.
- [5] K. L. Brown, D. C. Carey, C. Islin and F. Rothacker, TRANSPORT; A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems, Stanford Linear Accelerator Center (1991) SLAC-91, NAL-91 and CERN-73-16.
- [6] J. E. Spencer and H. A. Enge, Nucl. Inst. and Meth. **49**, 181 (1967).
- [7] D. C. Carley, TURTLE; A Computer Program for Simulating Charged Particle Beam Transport Systems, Fermi National Accelerator Laboratory (1978) NAL-64.

Design and Performance Test of the Out-Of-Plane Magnetic Spectrometer

W. Kim

Department of Physics, Kyungpook National University

S. E. Williamson

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

(Received 23 September 1997, in final form 7 October 1997)

A magnetic spectrometer was designed for out-of-plane coincidence ($e, e' p$) measurements in electron scattering. The spectrometer consists of four magnetic spectrometers with different polar angles about the symmetric axis in the scattering plane. The performance of the machine was optimized for the precision measurements of nucleons and few-body nuclei. This paper presents the ion-optical design and measured performance of one spectrometer which was constructed as a prototype.