

상(이미지)/회절도형 형성의 광학적 원리를 이해하기 위한 실험장치 제작

김진규, 정종만, 김문창, 최주형, 김윤중*
한국기초과학지원연구원 전자현미경연구부

An Experimental Device for Understanding the Optical Principles of Image / Diffraction Formation

Jin-Gyu Kim, Jong-Man Jeong, Mun-Chang Kim,
Joo-Hyoung Choi and Youn-Joong Kim*
Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute,
52 Eoeun-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-333, Korea
(Received August 17, 2007; Accepted September 20, 2007)

ABSTRACT

We have made an optical device to study the wave optics phenomena, such as image and diffraction pattern, constructive and destructive interference, by direct operation of laser beam and optical lenses. It consists of laser beam, goniometer, objective lens, intermediate lens, projection lens, CCD system, and computing system. As a result of the performance test, we were able to magnify samples up to 44 times with the resolution of about 5 μm . It is expected to help EM users understanding more easily principles of transmission electron microscopy (TEM).

Keywords : Laser, Wave optics, Image, Diffraction, TEM.

서 론

투과전자현미경(TEM)은 전자빔을 이용하여 관찰하고자 하는 시료의 이미지 및 회절의 신호를 받아 시료의 특성을 규명하는 분석 장비로서 현재 또는 미래의 핵심 연구 분야인 나노 소재 개발에 없어서는 안 되는 필수 장비로 인식되어지고 있다.

Fig. 1과 같이 TEM은 광학현미경과 같이 기본적으로

로 시료에 도달하는 전자빔(광원)을 집속시켜주는 집속렌즈, 시료에 대한 이미지의 초점을 조절하는 대물렌즈, 그리고 이미지를 확대하는 확대(접안)렌즈로 구성되어 있다. 이와 같이 TEM과 광학현미경은 사람의 눈으로 관찰이 불가능한 시료의 이미지를 확대하여 관찰이 가능하다는 점에서 공통점이 많다. 그러나, TEM은 광학현미경에 비해 빛 보다 짧은 파장을 가진 전자빔을 이용하기 때문에 시료에 대한 이미지를 고배율로 확대할 수 있고, 각각의 렌즈의 초점을 자유롭

* Correspondence should be addressed to Dr. Youn-Joong Kim, Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute, 52 Eoeun-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-333 Korea. Ph. : (042) 865-3596, FAX : (042) 865-3939, E-mail : y-jkim@kbsi.re.kr

게 조절할 수 있는 자기렌즈를 사용한다는 장점이 있다. 따라서 이미지를 얻을 수 있는 광학현미경과 달리, TEM은 대물렌즈와 확대렌즈 사이에 중간(조정)렌즈를 삽입하여 시료에 대한 회절과 이미지를 선택적으로 관찰할 수 있다(Williams & Carter, 1995; Kum et al., 1996; Lee, 2002).

그러나 TEM은 그 원리에서부터 결과의 분석에 이르기까지 대다수 연구자에게 생소하고 어렵다는 인식 때문에 신진인력의 양성에 큰 어려움이 있다. 이러한 어려움의 근본적인 이유는 TEM의 원리가 광학현미경의 원리와 대동소이함에도 불구하고, 내부적으로 전자빔이 시료와의 상호작용에 의해 일어나는 회절 현상과 이미지가 형성되는 과정에 대한 원리에 대하여 이해도가 부족하기 때문이다.

파동 광학에 대한 초창기의 실험실습은 이미 입증된 사실적 이론을 토대로 그려진 그림이나 좀 더 나아가 촛불이나 전구 등을 활용한 간단한 실험도구를

통하여 몇 가지 실험을 하는 것이 전부였다. 이러한 부적합한 자재를 이용한 불분명한 실험을 개선하고자 최근에는 학생들이 직접 눈으로 확인하며 쉽게 이해하도록 개발되어진 광학 실험 도구들이 이미 상업적으로 개발되어 있다(Koo, 1997a, b). 또한 파동광학에 의한 이미지와 회절의 관계를 결정학적 측면에서 이해를 높이기 위해 개발된 광학실험 장치 및 프로그램도 최근에 개발되고 있다(Dumas & Cura, 2005). 하지만, 이러한 실험 도구들조차도 이미지와 회절에 대한 상호관계에 대한 직접적인 변환 및 응용이 쉽지 않아서 그에 대한 이해도를 높이지 못하고 각각의 하나의 현상만을 이해하도록 되어 있으며, 대부분의 실험 장치들은 실험대 위에 가로로 놓여 있어 실제 연구에 응용하고 있는 TEM과 같이 위에서 아래로의 빔의 진행 방향에 따른 시료와의 반응에 따른 현상 이해에 부족함을 드러내고 있다.

본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고 실험자가

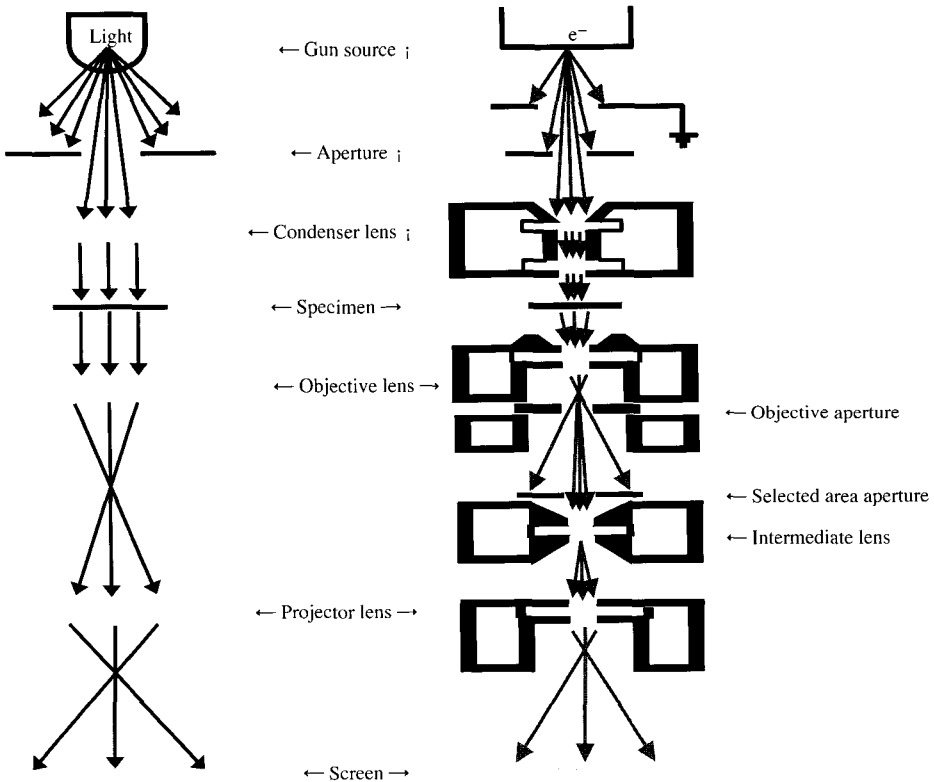


Fig. 1. Comparison of optical microscopy and transmission electron microscopy.

직접 각 부분을 조절하면서 여러 시료에 대한 이미지와 회절의 상호 관계를 쉽게 이해함으로써, TEM으로의 접근이 용이하도록 하기위해 개발한 실험 장치를 소개하고자 한다.

제작방법 및 특성

1. General composition

본 개발 장치는 실제 TEM의 원리를 쉽게 이해하도록 하기 위해 각각의 조리개와 렌즈 코일과 같은 불필요한 부분을 제거를 하고 꼭 필요한 렌즈 부분만을 가시화하고 단순화하여 광학현미경으로부터 TEM의 분석원리까지 접근이 용이하도록 하였다. Fig. 2의 장치의 전체적인 개략도에서 나타난 것처럼 본 장치는 위에서부터 레이저 빔, 시료대, 대물렌즈, 중간렌즈, 확대렌즈, 스크린, CCD system, 컴퓨터 순으로 이루어져 있다.

2. Gun part

광원으로 사용되는 레이저는 직진성과 단색성이 우

수하기 때문에 따로 collimator (시준기)와 monochromator (분광기)를 삽입하지 않았고, 파장대역은 일반적으로 사용되는 붉은색보다 파장이 짧고 가시화 좋은 녹색레이저($\lambda=530\sim 532\text{ nm}$, power=10 mW)를 사용하였다(Oh, 2005). 본 장치에 있어서, 광학현미경이나 TEM과 마찬가지로 가장 중요한 요소를 담당하는 부분은 레이저 빔의 정렬 장치이다. 레이저 빔의 정렬을 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 3개의 빔 정렬축을 두었다. 빔의 정렬을 위해서는 우선적으로, 전체 gun part의 이동을 통해 레이저 빔을 스크린의 중앙으로 이동한 후, 스크린에 레이저 빔의 반사를 위해 평면거울을 둔다. 그런 후에 3개의 빔 정렬축을 조절하여 반사된 레이저 빔이 입사된 레이저 빔과 정확히 일치하도록 하여 레이저 빔을 정렬할 수 있다. 마지막으로 레이저 빔의 정렬이 끝나면, 덮개를 이용하여 외부의 충격이나 기타 영향으로부터 레이저 빔의 정렬이 틀어지는 것을 방지하였다.

3. Sample stage and holder

Fig. 4에서 나타내 것처럼 시료홀더는 한 번에 6개의 시료가 장착될 수 있도록 제작되었고, 시료 그리드

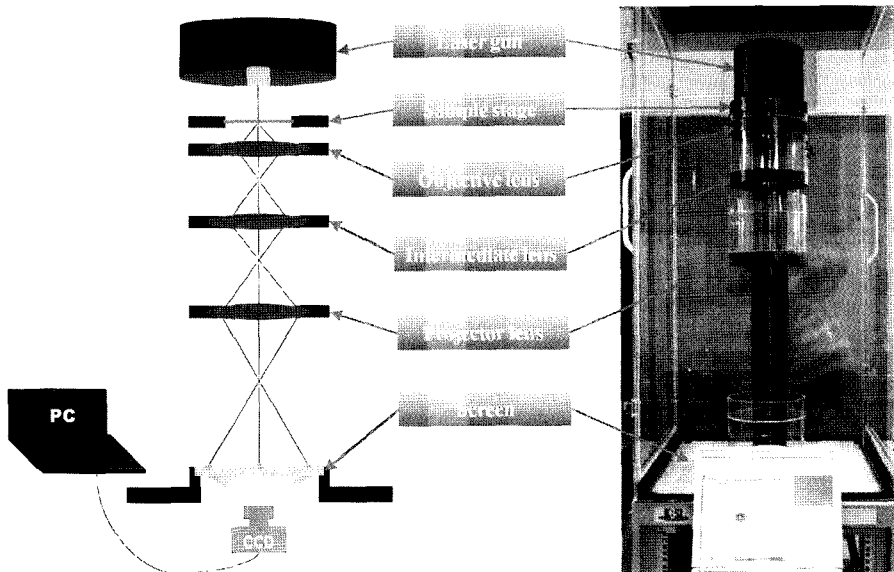


Fig. 2. Schematic drawing of an experimental device for image and diffraction observation using laser beam. It consists of laser gun, sample stage, objective lens, intermediate lens, projection lens, CCD system and computing analysis system.

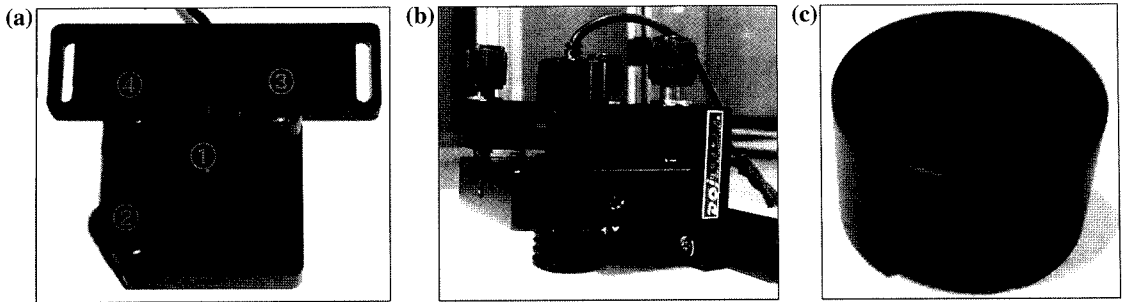


Fig. 3. Main features of gun part: (a) top-view of gun system that consists of ① laser gun, ② X-axis alignment controller, ③ Y-axis controller, and ④ Z-axis controller: (b) side-view of gun system: (c) gun cover.

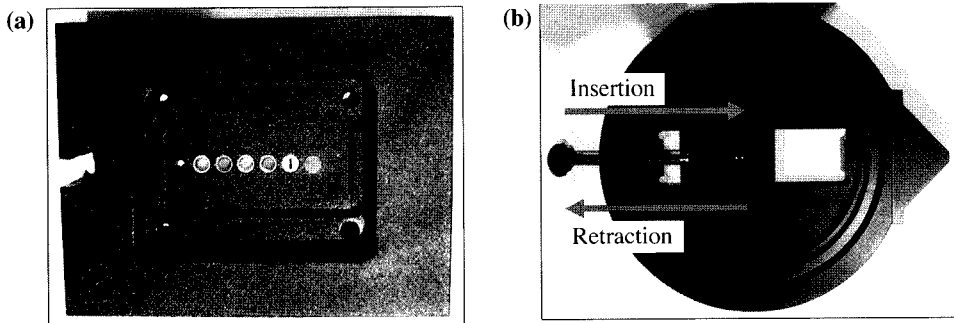


Fig. 4. (a) Six samples can be loaded at once in the sample holder. (b) The sample holder combined in the sample stage can be moved to the beam center by fine screw motion.

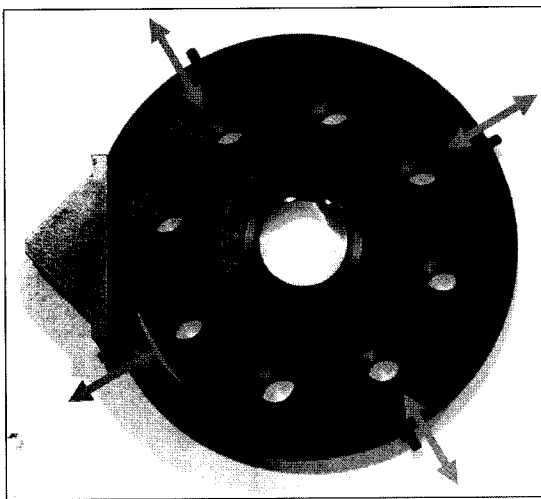


Fig. 5. The objective and projector lens have same configuration. Four fine screws are used to align the lens and the red arrows indicate the moving direction of the lens.

의 크기는 TEM에서 사용하는 것과 동일한 크기(3 mm)를 사용하도록 하였다. 이렇게 제작된 시료홀더는 시료대에 장착된 후, 미세나사 이동 봉의 조절에 의해 각각의 다른 종류의 시료를 레이저 빔의 중앙으로 이동시켜 여러 가지의 회절도형 및 이미지를 관찰할 수 있게 하였다.

4. Objective and projector lens

각 시료에 대한 이미지의 초점과 확대를 담당하는 대물렌즈와 확대렌즈는 Fig. 5에 나타내었다. 각각의 렌즈는 직경이 75 mm이고 초점거리가 50 mm로 동일하게 제작되었다. 렌즈 홀더에는 x-축, y-축 방향으로 렌즈를 이동시킬 수 있는 미세조절나사를 이용하여 시료를 통과한 회절 빔들이 스크린에 정확히 도달할 수 있도록 렌즈를 정렬을 할 수 있게 하였다. 또한 시

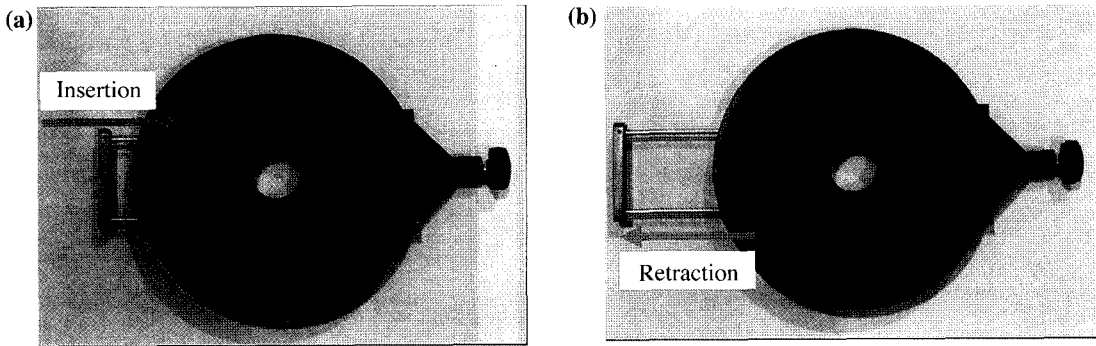


Fig. 6. Intermediate lens for selection of diffraction or image mode by lens insertion and retraction: (a) lens insertion: (b) lens retraction.

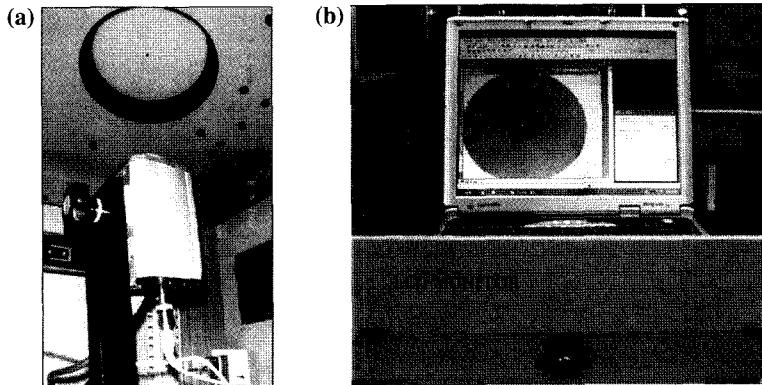


Fig. 7. (a) Images and diffraction patterns formed on screen are transferred to computer via CCD system. (b) Images and diffraction patterns displayed via CCD system can be saved for computer analysis.

료를 통과한 빔이 렌즈의 표면에 의해 반사되고 이러한 반사된 빔이 시료지지대에 의해 재 반사되어 불필요한 간섭을 일으켜 최종 스크린에서 얻어지는 결과물에 미치는 악영향을 배제하기 위해 무 반사 처리가 되어있는 코팅렌즈를 사용하였다.

5. Intermediate lens

중간렌즈는 광학현미경과 달리 TEM에서만 삽입되어있는 렌즈로서 사용자가 시료에 대한 이미지와 회절도형을 선택적으로 관찰할 수 있도록 도와주는 중요한 역할을 한다. TEM에서 사용되는 렌즈는 자기렌즈이기 때문에 렌즈에 가해지는 전류의 양을 조절하여 대물렌즈를 통과한 전자빔의 초점을 조절하여 스

크린에 이미지와 회절 도형을 형성하게 한다. 이에 반해서 광학현미경이나 본 장치에 사용되는 렌즈는 일반적인 광학렌즈이기 때문에 렌즈의 초점거리가 고정되어 있다(Fig. 6). 그러므로 대물렌즈와 확대렌즈 사이에서 물리적으로 렌즈 홀더를 이동시켜 원하는 위치에 고정시킨 후, 렌즈를 삽입 또는 제거하는 방식을 사용하여 이미지와 회절 도형을 형성하도록 하였다.

6. CCD and computer system

Fig. 7은 CCD system과 분석시스템에 대해 나타내었다. 시료를 통과한 레이저 빔은 각각의 렌즈를 통하여 최종적으로 스크린에 이미지와 회절도형으로 형성이 된다. 본 장치에서는 스크린에 형성된 자료의 관찰

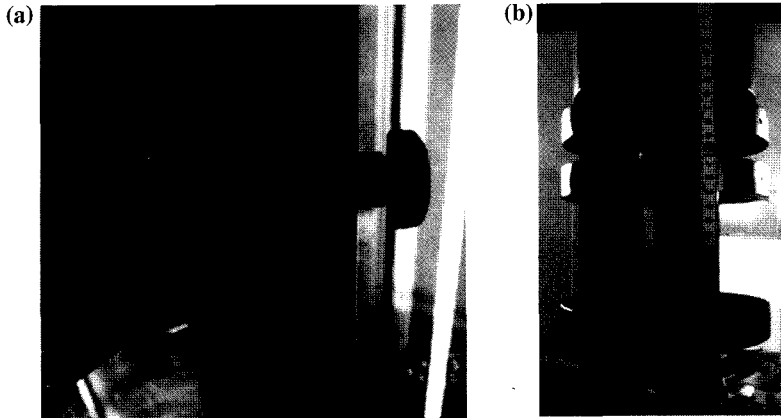


Fig. 8. Lens movement system for focusing images and diffraction patterns: (a) each lens holder can be moved along the column by lockup and lockout of the large screw: (b) each lens can be moved to the focusing point using a measuring tape.

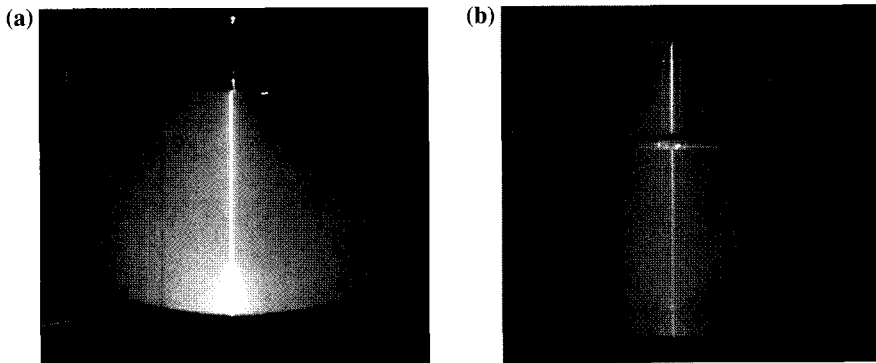


Fig. 9. Laser beam path by diffraction from objective lens to intermediate lens: (a) each diffraction beam is not observed because of its short traveling length: (b) diffraction beams pass through the intermediate lens are clearly observed.

에만 그치지 않고, 이를 CCD system을 통하여 컴퓨터로 전송하는 방식을 채택하여 실제 시료에 대한 분석이 가능하도록 하였다. 또한 CCD system은 외부단자를 통해 수동 조절이 가능하도록 외부 조절기를 컴퓨터 본체 옆에 설치하여 레이저 빔의 세기에 따른 강도, 배율, 초점 등을 세밀하게 조절하도록 하였다. 또한 CCD에 의해 획득된 자료를 computer의 이미지 캡처 프로그램을 이용하여 모니터에 출력되도록 하였으며, 출력된 자료는 차후 전문 분석을 위해 여러 형식의 포맷으로 저장될 수 있도록 하였다.

7. Column and lens holder movement system

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 column은 전체 부분을 고정 및 지지하기 위해 견고하게 제작되었으며, 가운데 부분에 홈을 내어 레일의 역할을 수행하도록 하였다. 각각의 렌즈 및 시료대는 상하로 움직인 후, 고정쇠를 이용하여 고정하고 이미지와 회절도형의 초점이 정확히 형성되도록 하였다. 또한 column 뒷단에는 줄자를 부착하여 렌즈의 초점거리의 측정 및 이동을 쉽게 알아볼 수 있도록 하였다.

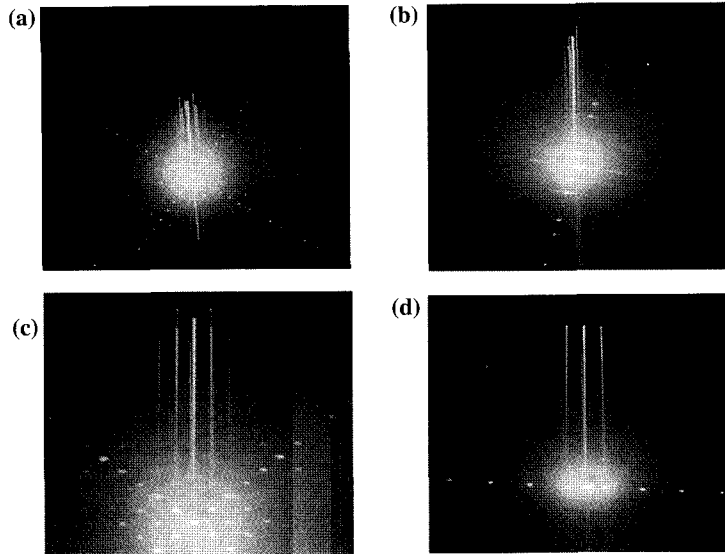


Fig. 10. Diffraction beams from various samples are observed more clearly after passing through the projector lens.

결과 및 고찰

1. Beam path visualization

본 장치의 개발 목적은 앞에 언급한 바와 같이 TEM의 원리에 대한 이해도를 높이는 동시에 간단한 시스템의 시료에 대한 분석 또한 가능하게 하는 것이다. 레이저 빔이 시료를 통과하면서 발생하는 회절현상을 이해하기 위해서는 빔의 진행 경로를 관찰하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서 각각의 렌즈 사이에 Fig. 9와 같이 약간의 현탁한 용액을 매질로 사용하면 빔의 경로를 관찰 할 수 있다.

Fig. 9(a)의 경우에는 시료의 바로 밑에 위치하고 있는 대물렌즈를 통과한 빔의 경로이다. 회절 빔들의 경로가 매우 짧기 때문에 아주 가까이에서 관찰하기 전에는 각각의 분리된 회절빔들을 관찰할 수 없으나, Fig. 9(b)와 같이 중간렌즈를 통과하여 빔의 경로가 적당히 길어지면 각각의 회절된 빔을 관찰 할 수가 있다. 이러한 경로를 거쳐 마지막 단계인 확대렌즈를 통과한 회절빔들은 더욱더 명확하게 관찰할 수 있다 (Fig. 10). 특히, Fig. 10(c)와 (d)과 같이 강도가 강한 회절빔들을 자세히 관찰하면 두개 혹은 그 이상의 빔이 보강간섭을 통해 하나의 빔을 형성하고 있는 과정

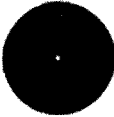





을 보여줄 수 있어 현장감 있는 교육이 될 수 있다고 사료된다.

2. Relationship between images and diffraction patterns from various samples.

레이저 빔이 시료와 상호작용하여 나타나는 회절현상을 좀 더 쉽게 이해하고자 한다면, 적절한 시료의 선택이 중요하다. 본 장치를 통한 실험에서는 아주 단순한 시료에서부터 복잡한 시료까지 단계적으로 삼입을 하여 시료의 이미지에 따른 회절도형을 관찰하여 보다 명확하게 실공간과 역공간의 개념을 이해하도록 하였다. Table 1에는 본 실험에서 사용한 시료들에 대한 형상과 사양을 정리해 놓았다. 첫 번째 시료인 단일 조리개 시료는 회절의 현상을 직접적으로 표현하기 위해서 사용되었으며, 2번과 3번의 1차원 격자 시료는 실공간과 역공간사이의 상호관계를 나타내기 위해서 사용되었다. 또한 4번에서 6번까지의 2차원 격자 시료는 다양한 형태로 이루어진 실공간의 규칙적인 배열에 대하여 역공간상에서의 회절도형을 관찰함으로써 실제 3차원적으로 구성된 시료에 대한 원자 배열을 분석하는데 응용할 수 있도록 하였다.

마지막으로 본 실험 장치를 이용하여 관찰한 6개의 각각의 시료에 대한 이미지와 회절도형에 대한 결과

Table 1. Summary of samples used for optical experiment

No.	Figure	Type	Pitch size (μm)	Hole size (μm)	Bar size (μm)
1		Single aperture	-	150	-
2		Single oval hole		2000 × 500	
3		Parallel bars	83	48	35
4		Rectangular bars	340/83	290/58	50/25
5		Square mesh	83	58	25
6		Hexagonal mesh	125	100	25

를 Fig. 11에 나타내었다. 먼저 본 장치에 사용된 대물렌즈와 확대렌즈에 의해 실제로 시료의 이미지가 확대되는 배율을 계산하였다. 대물렌즈와 확대렌즈를 통해 확대되는 전체 배율은 간단하게 다음과 같은 관계식으로부터 얻어낼 수 있다(Park, 2003).

$$M = \frac{y_0}{y_i} = \frac{V}{f}$$

여기에서 M은 배율을 나타내며, y_0 와 y_i 는 각각 실제 시료의 크기와 스크린에 상이 맺힌 크기이고, V와 f는 명시거리와 초점거리를 나타낸다. 전자현미경과 달리 광학렌즈는 초점거리가 고정되어 있으므로 총 명시거리를 구하거나, 시료와 최종 이미지의 크기를 구하면 고정된 배율을 구할 수 있다. 이에 따라 본 장치를 이용할 경우, 약 44배의 확대된 이미지를 획득할 수 있다는 것을 확인하였다. 윗 식에 의거하여 보다

확대된 이미지를 획득하고자 한다면, 초점거리가 짧은 렌즈를 사용하거나 명시거리를 길게 하기 위해서 경통의 길이를 늘이는 방법이 있으나, 광학현미경과 같이 초점 거리가 짧은 렌즈를 사용하는 것이 효과적인 방법이 될 것이다. 측정된 배율을 바탕으로 Fig. 11에 나타난 것처럼 실제 측정된 시료의 이미지(Fig. 11(a))와 회절도형(Fig. 11(b))의 상관관계에 대한 올바른 판단을 위해 우선 실제 관찰한 자료에 대한 스케일을 보정한 후, 시료의 이미지로부터 푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 수행하여 역공간(Fig. 11(c))을 계산하여 회절도형과 비교를 하였다. 이러한 역공간의 자료를 다시 역푸리에변환(IFFT: Inverse Fast Fourier transform)을 수행하여 실공간(Fig. 11(d))을 얻은 후, 실제 시료의 이미지와 비교를 하였다. 이를 통하여 실제 측정된 자료는 계산된 자료와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 분석된 자료로부터 본 장치를 이용할 경우, 시료에 따라 약 5 μm의 분해능을 획득할

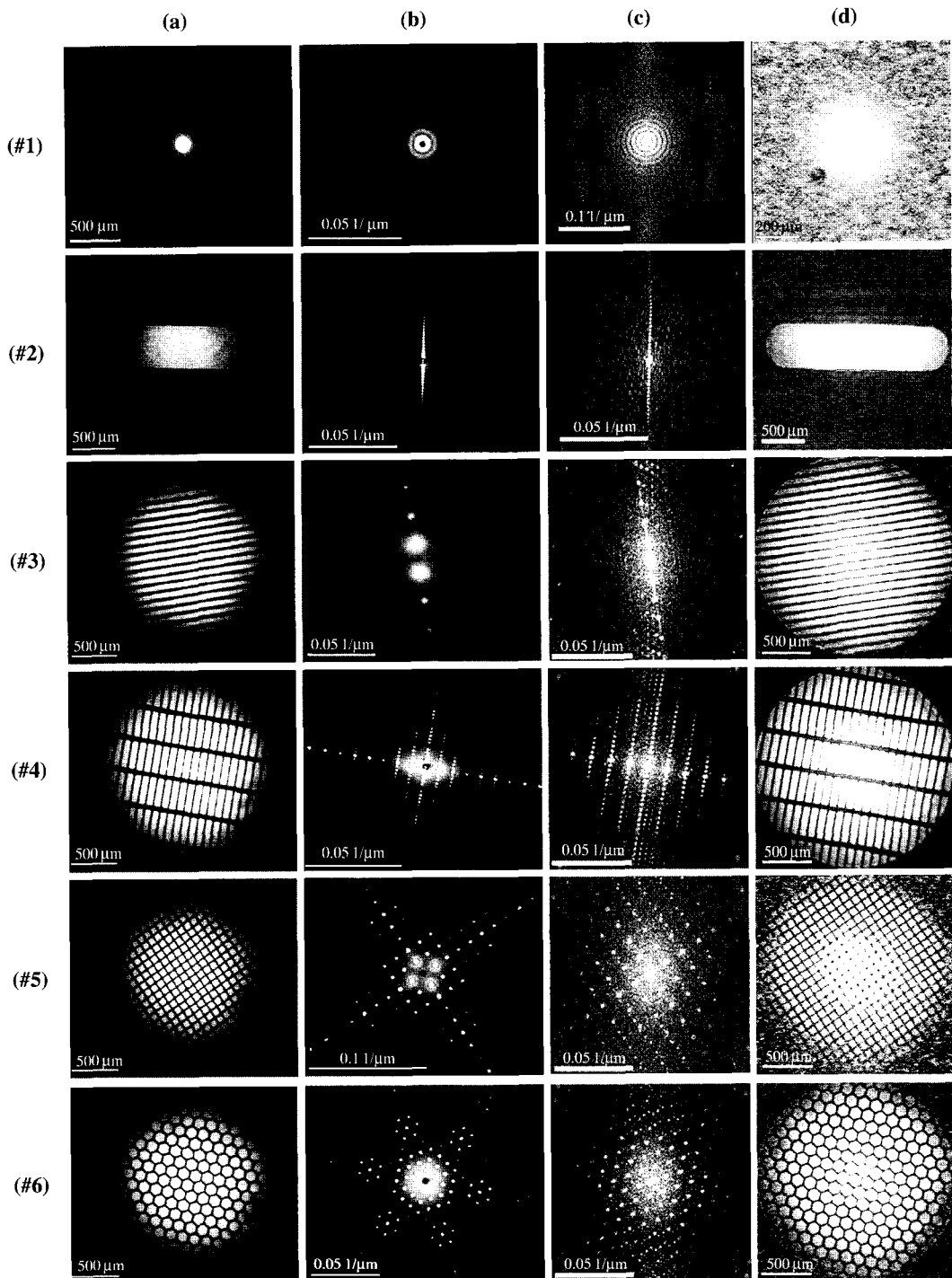


Fig. 11. Comparison of observed and calculated images and diffraction patterns for various samples: (a) and (b) are observed images and diffraction patterns by laser beam optical device, respectively: (c) and (d) are calculated FFT data and IFFT data of (a) and (c), respectively.

수 있음을 알 수 있었다.

또한 각각의 시료에 대해 살펴보면, 먼저 1번 시료의 회절도형은 레이저 빔이 시료의 조리개를 통과하면서 일어나는 전형적인 회절현상인 Airy rings를 보여주고 있다. 2번과 3번은 일반 교과과정에서 많이 다루고 있는 실험을 이용한 간섭현상을 보여 주고 있으며, 실제로 시료의 실험의 넓이는 2번이 3번의 시료보다 크지만, 회절도형내의 회절점의 간격은 3번이 오히려 넓어지는 것을 관찰할 수 있어, 실공간과 역공간이 서로 길이에 반비례하는 관계임을 보여주고 있다. 4번의 시료에서는 역공간을 나타내는 회절도형을 살펴보면, 2번과 3번에서 이미 알 수 있듯이 실공간의 실제 시료는 서로 길이가 다른 직사각형 모양의 격자무늬를 띠고 있음을 예측할 수 있다. 5번과 6번도 마찬가지로 회절도형과 시료의 이미지로부터 실공간과 역공간을 예측할 수 있다. 이처럼 본 장치를 이용하면 TEM과 마찬가지로 광학현미경에서는 관찰 할 수 없는 회절도형과 이미지를 동시에 관찰 할 수 있어, 광학실험 및 TEM의 원리를 이해하는데 보다 생동감 교육자재로 활용될 수 있으며, 실제 시료를 분석하는데 보조 장비로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 장치를 이용한 광학 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 장치를 이용한 광학 실험은 기존의 상업적으로 이용된 광학실험기에 비해 중간렌즈를 삽입하는 새로운 방식을 채택하여 시료의 이미지와 회절도형을 동시에 획득하여 비교할 수 있다는 장점이 있다.
- 2) 본 장치는 렌즈 사이에 매개체를 두어 시료를 통과한 빔의 경로를 추적하고, 가시화 할 수 있기 때문에 실험자가 보다 쉽게 시료와 레이저 빔의 상호작용을 이해할 수 있다.
- 3) 본 장치를 통한 실험자료는 CCD와 컴퓨터를 통하여 저장될 수 있고, 전문 해석 프로그램을 통하여 분석이 가능하기 때문에 보다 명확하게 실공간 및 역공간의 결정구조의 원리를 이해할 수 있고, 약 44배의 확대된 이미지로부터 최대 5 μm 의 분해능을 가지고 실제 시료를 분석할 수도 있다.

사 사

본 연구는 과학기술부가 주관하는 첨단 연구 분석장비(요소기술) 개발사업의 단위사업인 정밀 시편이동 요소기술 개발 과제(PG7053)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- Dumas P and Cura V: Teaching crystallography with a laser, two lens and Einstein's tongue. Acta Cryst. A61 : C122. 2005.
- Koo EH: 빛의 직진성 실험장치. KR 10-1997-0008473, 1997a.(Korean)
- Koo EH: 빛의 파동성 실험장치. KR 10-1997-0008474, 1997b.(Korean)
- Kum DW, Kim GH, Kim NJ, Kim DH, Kim YH, Park CG, Song SA, Lee BT, Lee YT, Lee JY, Lee HC, Lee HJ, Cho NH, Chun CH: 투과전자현미경 분석학-신소재 분석·평가. 청문각, 1-55. 1996. (Korean)
- Lee JY : 기초전자현미경. 대영사, 1-18. 2002.(Korean)
- Oh CH : 레이저과학. 두양사, 149pp. 2005. (Korean)
- Park MS : 기초광학기기실험. 상학당, 240pp. 2003. (Korean)
- Williams, DB and Carter, CB: Transmission Electron Microscopy-A Textbook for Materials Science. Plenum Press, New York and London, 729pp. 1995.

<국문초록>

본 장치는 실험자가 레이저 빔과 광학 렌즈를 조정하여 이미지 및 회절도형의 형성, 보강 및 소멸간섭과 같은 파동광학 현상을 이해하도록 제작된 실험 장치이다. 실험 장치는 광원으로 쓰이는 레이저 빔과 빔의 광축을 정렬하는 광원 부분과 시료대, 대물렌즈, 중간렌즈, 확대렌즈, CCD system, 컴퓨터, 그리고 렌즈를 상하 조절하는 경통 부분으로 구성된다. 본 장치를 통해서 다양한 회절격자의 이미지 및 회절도형을 최대 약 44배 확대할 수 있고, 최대 약 5 μm 의 분해능을 가지고 분석할 수 있다. 이 장치는 전자현미경 이용자들이 TEM의 원리를 보다 쉽게 이해하는데 도움을 주리라 기대한다.