

## 중성자 이용 분석법의 소개

김만호

현대 과학에서 중성자가 쓰이는 분야는 점점 다양해지고 있으며, 아울러 중성자 과학(실험 이론 시뮬레이션)과 그 응용도 다 방면으로 진화해 나가고 있습니다. 따라서 이를 모두 소개하기는 불가능합니다. 본 지상 강좌에서는 일부 좁은 범위에 대한 깊은 토의보다는 중성자의 성질을 이해하는 것에 초점을 맞추어, 독자 스스로 응용 분야를 생각해볼 수 있게끔 하고자 합니다. 더 자세한 분석 방법은 중성자 산란 장비를 담당하고 계신 과학자들의 도움을 받는 것이 타당하다고 생각합니다[http://hanaro.kaeri.re.kr]. 대부분의 중성자 산란 시설에서 일하는 과학자들은 자기분야의 전문성을 갖고 있기에, 연구자들이 하고자 하는 실험의 타당성, 측정 및 결과 분석에 많은 도움을 받을 수 있습니다. 본 강좌에서는 중성자의 배경 및 성질을 중심으로 전개하겠습니다.

## 1. 중성자 과학의 배경

중성자는 1932년 영국의 러더포드(E. Rutherford) 실험실에서 연구하던 J. Chadwick에 의해서 발견되고 3년뒤 노벨 상을 수상합니다(별써 76년 전이군요). 재미 있는 사실은 중성자란 용어는 Chadwick이 처음 쓴 것이 아니고, Wolfgang Pauli가 처음 쓴 것 같습니다.<sup>1</sup> 그리고 독일의 Hans Falkenhagen도 독자적으로 중성자의 존재를 실험적으로 증명했으나, 발표를 하지 않은 상태였고, Chadwick이 노벨 상을 함께 받을 것을 제안했으나, 이를 겸손히 거절했다는 이야기도 있습니다. 그후 2차 세계대전이 일어나고, 미국에서 맨하탄 프로젝트의 일부로 테네시주 오크리지(당시 이름 클린턴)에서 플루토늄을 추출할 수 있는 시설(Y-12와 K-25)이 비밀리에 만들어 집니다. 이 프로젝트 때문에 많은 과학자, 기술자들이 이주해 오면서, 인구 수천의 고립된 시골 지역이 갑자기 수만의 인구가 생활하는, “오크리지”란 도시로 거듭나게 되며 이들 중 대부분이 본인이 무슨 일을 하는지 모르고 플루토늄 추출과정에 동참했습니다[오크리지는 유명한 국립공원 스모키 마운틴 근처에 자리 잡고 있고, 오크리지시 박물관에 이 당시의 모습을 잘 보여주는 자료들이 많이 있습니다]. 추출된 플루토늄(plutonium)은 로스 알라모스 국립연구소(Los Alamos National

Laboratory)에서 원자탄제작에 이용됩니다. 1943년에 노벨상 수상자인 Enrico Fermi주도하에서 흑연원자로(Graphite Reactor)가 오크리지에 건립되며 플루토늄 추출관련 연구를 합니다[북한이 갖고 있는 원자로도 플루토늄 추출에 적합한 흑연원자로인 것으로 알고 있습니다]. 이 원자로가 있던(X-10이라고 불리던) 시설에 지금 오크리지 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)가 위치해 있습니다. 일반 도로가 흑연원자로 옆을 바로 지나가므로 운전하면서 이를 볼 수 있었는데, 9/11 이후에는 이 길이 일반인에게 차단되었습니다. 밤에 이 길을 지날 때 시름들이 자주 불쑥 튀어 나오곤 하는 시골길입니다. 9/11이후, [비슷한 시기에 ORNL 관리가 미군수회사인 Rockheed Martin에서 테네시 주립대 / Battelle팀으로 이전되며] 새로운 관리팀에 의해 많은 공사가 있게 됩니다. ORNL 연구소 입구에 새로운 대형건물들이 들어서고 주위가 새롭게 단장 되었더군요. 흑연원자로에서 바로 “중성자(neutron)”가 나오는데, 이를 물질의 구조 분석에 이용할 생각을 한 과학자가 Ernest Wollan입니다. 이분은 사실 X-선이 전공이고 (X-선의 Compton 산란현상 발견자이고, 노벨상



김만호

1985 인하대 고분자공학(학사)  
 1987 인하대 고분자공학(석사)  
 1988~ 한국과학기술연구원(KIST), 기능성고분자, 연구원  
 1990  
 1991~ University of Tennessee, Materials Science & Engineering(박사)  
 1996~ Florida State University, Tallahassee (Post Doc.)  
 1998 Oak Ridge National Laboratory (Post Doc.)  
 1998~ 2001 Visiting Scholar, Oak Ridge National Laboratory  
 2002~ Instrument Scientist, National Institute of Standards of Technology, Center for Neutron Research, Gaithersburg & Faculty Research Associate, University of Maryland, College Park  
 2007 Visiting Scholar, Korea Atomic Energy Research Institute  
 2008~ 한국과학기술연구원(KIST), 재료기술연구본부, 선임연구원  
 현재

## Introduction to Neutron Characterization

한국과학기술연구원(KIST) 재료기술연구본부 (Man-Ho Kim, Korea Institute of Science and Technology(KIST), Materials Science and Technology Research Division, 39-1 Hawolgogdong, Sungbuggu, Seoul 136-791, Korea)  
 e-mail: man-hokim@kist.re.kr

수상자인 시카고 대학의 Author Compton 교수의 학생, 오크리지 원자로에서는 Health Physicist(방사선 안전 물리학자)로 일하였습니다. 중성자를 X-선과 같이 구조 분석에 이용하는데 흥미가 있어서 시카고 대학의 X-선 회절 장비를 갖고와 중성자용으로 수정하여 다양한 물질의 구조분석에 이용합니다. 이때가 1945년이고 다음해에 Clifford Shull(노벨상 수상자)이 Wollan과 함께 일하게 됩니다. 이 때의 연구 결과로 중성자가 X-선처럼 재료 구조분석에 이용될 수 있음을 찾아내게 되고 지금의 중성자 과학이 있기까지의 밑거름이 됩니다. 이 때의 공로로 1994년(50여년이 지나서)에 C. Shull [1955년 MIT로 옮김]은 캐나다의 Bertram Brockhouse와 공동으로 노벨상을 수상합니다. Bertram Brockhouse는 분자운동 분야에 중성자를 이용할 수 있는 길을 최초로 열었습니다. 그러나 Wollan은 이미 타계하여서 수상에서 제외됩니다[우리가 알 듯이 노벨상은 생존자에게만 수여되기 때문에]. Wollan과 Shull의 연구 결과 및 ORNL 원자로로 인해, 미국이 30여년간 중성자 과학 분야에서 선도적인 역할을 하게 합니다. 그러나 1970년대 초에 프랑스(Institut Laue-Langevin at Grenoble, ILL)에 대형 중성자 생성 시설이 유럽 차원에서 건립되고, 고성능의 냉중성자원, 중성자 산란 장치, 중성자 광학, 이용자 지원 제도와 다양한 중성자 산란 이론들을 발전 시킴에 따라, 중성자 과학은 이제 유럽쪽에서 그 주도권을 갖게 됩니다. 10여년 후인 1984년에 영국은 당시로는 세계 최고 성능의 가속기 펄스형 중성자 생성원을 옥스퍼드(ISIS)에 건설함으로써 미국은 중성자 과학에서 유럽에 더욱 뒤 처지게 됩니다[중성자는 원자로에서 농축우라늄의 핵분열 반응에서 생성하는 방법과, 가속기를 이용하여 가벼운 입자를 중성자를 많이 포함하고 있는 무거운 원소로 이루어진 목표물(텅스텐, 수은)에 충돌시켜, 핵을 파쇄하여 중성자를 생성시키는 방법이 있음]. 미국 과학 위원회는 이를 인식하고, 아르곤 국립 연구소(Argonne National Laboratory)에 가속기형 중성자 생성원을 건설하게 되며, 비슷한 시기에 미국 표준 연구소(National Institute of Science and Technology, NIST)에 고성능 원자로를 만들게 됩니다. NIST 원자로로는 미국 최초로 장광장의 중성자(냉중성자)를 생성할 수 있는 원자로입니다. NIST 중성자 시설에서 종사하는 많은 중성자 관련 과학자들은 학생을 포함한 일반 연구자들에게 서비스한다는 정신으로 중성자 이용을 지원했습니다. 실험 과제 타당성여부/실험/결과분석/논문 발표까지 할 수 있도록 중성자 이용자들을 지원/관리함으로써 이용자 수가 매년 큰 폭으로 증가하였습니다[이렇게 철저히 이용자 지원을 할 수 있었던 것은, 미정부에서 재정적으로 NIST 중성자 연구센터(CNR) 운영 자금을 지원해주고 있기 때문입니다]. 국내에서도 한국원자력연구원 하나로에 냉중성자 실험동을 건설중에 있으며, 다양한 실험장치들을 한국원자력연구원(KAERI) 하나로와 국내 대학/연구소 등이 협력하여 건설중에 있습니다[예, 수직 Reflectometer, 삼축분광장치(Triple axis spectroscopy), 40 m SANS, Bio-reflectometer, HR-SANS]. 이외에도 이미 열중성자 이용한 실험 장치를 보유하고 있습니다. 이들 장치의 소개는 생각하도록 하며, 자세한 것은 <http://hanaro.kaeri.re.kr>를 참조하면 도움이 되리라 생각합니다. KAERI의 중성자 산란 장치 담당 과학자들이나 국내 학계에 계신 전문가들에게 조언을 받으면 도움이 되리라 생각합니다.

중성자는 물리·화학·생물 등 과학 전반에서 중요하게 이용되고 있습니다. 고분자 분야에서도 일부 선두 과학자들은 중성자와 연관을

갖고 있습니다. 대표적인 과학자가 1991년도 물리학분야의 노벨상 수상자인 Pierre-Gille de Gennes[Scaling Concepts in Polymer Physics] 책에서 언급된 다양한 이론들은 중성자나 X-선의 사용을 필요로 하고 있습니다. 그외에도 고분자 용액/블렌드/바이오/나노 재료 등의 여러 분야에 이용되고 있습니다.

## 2. 중성자의 성질

중성자는 4가지의 성질(질량  $m=1.0087$  amu, spin  $1/2$ , 자기모멘트  $\mu_n=-1.9132$  nuclear magneton, 무전하)을 갖고 있으며, 이를 잘 알고 있으면, 중성자 과학을 이해하고 응용하는데 많은 도움이 됩니다. 우리가 잘 알고 있는 X-선 성질과 비교하면 쉽게 중성자를 이해할 수 있으리라 생각됩니다.

### 2.1 성질 1. (중성자는 전하가 없다)

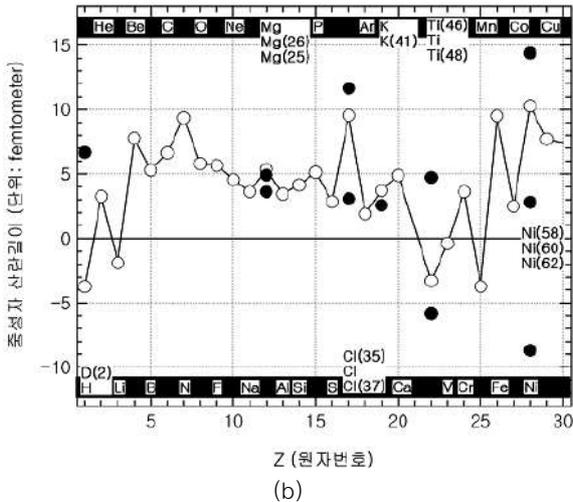
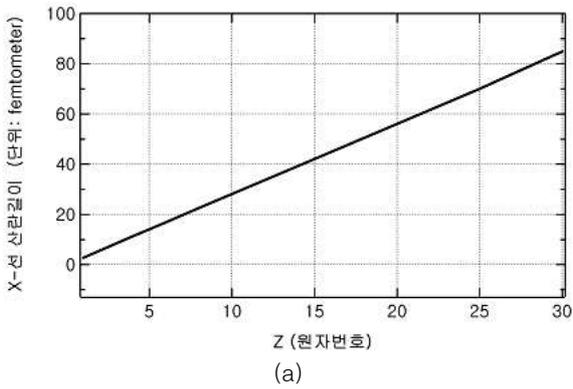
X-선은 전자기적 성질을 갖고 있습니다. 따라서 X-선은 전자를 좋아합니다. 원자주위의 전자들과 친화력이 있게 되어 전자구름으로부터 X-선 산란이 일어나게 됩니다. 이에 비해 중성자는 전기적으로 중성입니다. 전자를 좋아하지도 싫어하지도 않습니다. 중성자는 물질에 전자가 아무리 많아도 전자와 친화력이 없으므로, 전자와는 어떠한 접촉을 하지 않습니다[짜지지 않은 전자와 중성자간의 친화력에 의해서 생기는 자성 산란은 제외함. 여기서 전자는 고분자에서와 같이 결합되어 있는 분자들을 구성하고 있는 전자를 의미함]. 대신, 중성자는 원자핵을 좋아하여 중성자-핵 친화력이 있습니다. 중성자 산란은 중성자가 원자핵을 만날 때 일어나게 됩니다. 따라서 중성자는 원자핵을 볼 수 있고, X-선은 핵을 둘러 싸고 있는 전자(구름)를 볼 수 있습니다. 산란/회절 현상은 물질내에 이들 핵이나 전자들의 상대적인 위치를 알게 해줌으로 물질의 구조를 이해하게 해줍니다.

### 2.2 성질 2. (동위원소간 산란길이가 다르다)

중성자 과학자들이 많이 쓰는 용어 중에 중성자 산란길이라고 중성자 산란단면적이란 용어가 있습니다. 기호로는 산란길이는  $b$ , 산란단면적은  $\sigma$ 로 주로 표현합니다. 중성자 산란길이( $b$ )는 중성자와 원자핵간의 인력강도를 나타냅니다. 중성자와 원자핵이 좋아하는 정도로 이해하면 될 것 같고, 중성자 실험에서 아주 중요한 역할을 합니다. 중성자 산란단면적은 중성자가 물질과 만났을 때 물질내부의 원자핵을 맞출 확률입니다. 파장이 클수록 화살이 파장을 명중시키기 쉽듯이, 핵의 산란단면적이 클수록 중성자가 이 핵을 맞출 확률은 커집니다. 이 확률을 구형의 공간내에서 모두 고려하면, 산란단면적 제공에  $4\pi$ 를 곱해주는 식으로 요약됩니다. 산란에는 간섭산란  $\sigma_{coh}=4\pi\langle b \rangle^2$ 과 비간섭산란  $\sigma_{inc}=4\pi(\langle b^2 \rangle - \langle b \rangle^2)$ 이 있는데, 비간섭산란은 대부분의 전체 중성자산란에서 background가 됩니다.

중성자가 X-선과 다른 것 중의 하나가 바로 산란길이에 있습니다. 중성자는 동위원소간의 산란길이가 다양합니다. X-선의 산란길이가 원자수에 비례해서 증가하는데 비해 중성자의 산란길이( $b$ )는 무작위적으로 변합니다(그림 1). 예를 들어, 수소는 동위원소인 중수소와 산란길이( $b$ )에서 많은 차이가 있습니다. 수소(H)의  $b$ 는 음수인데 비해 중수소(D)는 양수의 값을 갖습니다. X-선의 산란길이는 전자반경에 원자번호를 곱해서 계산된 값이며, 중성자의 산란길이는 실험적으로 측정된 문헌 값입니다.

동위원소간의 산란길이가 틀리므로 이 둘을 적절히 혼합하여 산란



**그림 1.** 원자번호와 자연원소의 X-선 산란길이(위); 원자번호와 중성자 산란길이(아래), 자연원소(○)와 동위원소(●), 괄호는 동위원소의 질량으로 데이터의 순서대로 표시하였음(단위 femtometer=10<sup>-15</sup>m).

명암, 산란강도 등을 조절하는 것을 가능하게 해줍니다. (응용) 고분자 블렌드는 원하는 성질을 얻기 위해 두 고분자 물질을 혼합합니다. 문제는 두 고분자 물질이 균일하게 혼합되었는지 상분리 되었는지 알 필요가 있습니다. 이를 측정하기 위한 여러 가지 방법이 알려져 있습니다(예,  $T_g$  측정, 구름점 측정 등). 중성자 산란도 H와 동위원소 치환된 두 물질을 혼합하여, 물질의 혼합여부를 정량적으로 측정할 수 있습니다(예, 저밀도 폴리에틸렌과 중밀도 폴리에틸렌을 혼합할 경우, 두 물질간의 refractive index가 유사함으로 이들의 섞여 있는 정도를 육안(구름점 측정)으로 측정하기가 쉽지 않습니다. 그러나 폴리에틸렌에 수소를 동위원소(중수소)로 치환하여, H/D를 혼합하면, 상 분리시에는 각각의 상간의 중성자 명암이 생겨 이들의 구조를 중성자 소각산란 등으로 측정하는 것이 가능합니다. (문제는) 동위원소 치환된 물질을 따로 만들어야 되는 단점이 있지만, 자연적인 명암대조가 있는 경우 동위원소 치환없이 두 물질의 상변화를 측정할 수 있습니다. 중성자는 수소와 같은 가벼운 원소를 볼 수가 있습니다. 수소는 전자 하나를 갖고 있으므로, X-선과 같이 전자수에 의존하는 측정방법으로는 분자내 수소의 위치를 아는 것이 힘듭니다. 그러나 수소 중수소의 중성자 산란 면적은 X-선 전체 산란면적에 큼으로 중성자는 수소를 볼 수 있습니다. 특히 수소를 중수소로 치환하면, 탄성산란면적이 증가하여, 구조 분석에 유리하게 쓰입니다. 이는 분자내 수소 원

자의 위치나 운동 등을 측정할 수 있게 해줍니다. (응용) 수소를 포함하고 있는 분자의 화학구조를 아는데 이용할 수 있으며, 연료전지, 수소 저장물질, 금속하이드라이드의 연구에 유용하게 쓰입니다.

### 2.3 성질 3. (중성자는 작지만 자성의 성질이 있다)

중성자 입자는 스핀(1/2)을 갖고 있습니다. 이름에서 알 수 있듯이 스핀은 회전을 의미하고, 이는 각운동이 있다는 것을 의미합니다. 지구가 회전하면서 남극과 북극에 자석 극을 생기게 하는 것처럼, 중성자도 스핀 각 운동으로 인해 작지만 자기 모멘트를 갖고 있습니다. 이 작은 자성 모멘트를 갖고 있는 중성자가 철, 코발트, 니켈 등의 자성체와 간섭 산란을 일으켜, 자성체구조, 자성 모멘트 분포 등의 연구에 중성자를 독보적으로 이용하게 됩니다. 자성체를 이해하는데 중성자가 많은 공헌을 해왔습니다. 최근에 일부 방사선 X-선을 이용한 연구가 시도되고 있으나, 이 분야는 중성자로 연구하기에는 적합한 분야입니다

### 2.4 성질 4. (중성자는 물질에 의한 흡수 정도가 작다)

일반적으로 물질에 중성자가 흡수되는 정도는 극히 일부의 물질(Li, B, Cd, Gd)을 제외하고는 아주 작음으로 많은 양의 시료를 측정하는 것이 가능합니다. 이에 비해 전하를 띤 입자나 X-선은 흡수정도가 강함으로 적은 양의 시료가 필요합니다. 두꺼운 시료는 X-선을 대부분 흡수해버림으로 검출기로 측정이 안되게 됩니다. 중성자 흡수도가 낮음으로 시료 용기를 만드는데 선택의 폭이 넓습니다.

### 2.5 성질 5. 중성자는 투과력이 우수하다.

앞에서 중성자는 원자핵으로부터 산란이 일어난다(성질 1)고 했습니다. 그런데, 원자핵의 수(수밀도; 단위면적당 원자핵의 수)는 전자 수밀도에 비해 작습니다. 주기율표의 원자번호가 클수록 핵주위의 전자수는 증가합니다. (투과력) 전기적으로 전하를 갖고 있는 X-선은 이들 전자와의 친화력 때문에 전자가 많은 물질(예, 금속들)을 투과하기가 쉽지 않습니다. 그러나 가벼운 원소로 구성된 고분자의 경우에 X-선은 상대적으로 높은 투과율을 볼 수 있습니다. X-선은 얇은 시료가 적당하고, 고분자는 다소 두꺼운 시료도 측정 가능합니다.

금소와 같은 무거운 물질들은 전자를 많이 갖고 있으므로 X-선 투과율은 낮으나, 실제로 X-선회절/산란 등은 강하게 일어납니다.

### 2.6 성질 6. (중성자의 background는 산란길이의 분산에 의해서 생긴다).

중성자나 X-선은 물질의 구조 정보뿐만 아니라 background를 포함하고 있습니다. 그 근본은 다르지만, background는 물질의 구조 정보를 포함하지 않고 있는 경우라고 생각하면 될 것 같습니다. 전기적인 노이즈, 주변환경에 의한 background 이외에도 방사선(X-선 또는 중성자) 자체에서 오는 background가 있습니다. X-선의 대표적인 background는 Compton scattering입니다. X-선 산란전후 상의 변화가 생기고 물질의 구조와 관련된 간섭효과가 일어나지 않아 background로 측정됩니다. 소각회절/산란에서는 이 양은 무시할 정도로 작으나 산란각도를 증가시키에 따라 이 양은 점점 증가합니다. 특히 액체나 무정형의 구조를 원자 단위에서 측정하고자 할 경우 아주 고각(거의 X-선 장치의 한계)까지 측정해야 함으로 Compton scattering을 제거하는 것은 중요합니다. 일반적으로 액체나 무정형은 구조가 없는 것으로 알고 있으나, 원자 단위의 국부적인 구조를 갖고 있으며, 이와 같은 정보가 바로 background에 포함되어 있습니다.

중성자에서도 여러 원인으로부터 기인하는 background가 있는데 그 중에서 재료의 incoherence 비간섭산란으로 인해 생기는 back-

ground가 대표적입니다. 총 산란면적( $d\Sigma/d\Omega$ )은 중성자 산란길이의 분산(산란길이의 fluctuation)에만 비례합니다. 기호로 표현하면  $d\Sigma/d\Omega \sim \langle (b - \langle b \rangle)^2 \rangle$  (또는  $\langle b^2 \rangle - \langle b \rangle^2$ ) 음과 같습니다[산란 증폭(scattering amplitude)에서부터 유도되며, 유도과정은 생략 함].

### 2.7 성질 7. (중성자는 아주 낮은 에너지를 갖고 있다)

X-선은 강X-선(고에너지>10 keV)과 연X-선(저에너지<10 keV)으로 에너지 별로 구분하는 경우가 있습니다. 중성자도 필요시 열외중성자, 열중성자, 냉중성자, 초냉중성자 등으로 불려집니다. 이들의 구별은 중성자 파장으로 구별합니다. [참고로 파장은 에너지, 속도, 온도와 연관되어 있으므로, 에너지(중성자의 경우  $E(\text{meV}) = 80/\lambda^2 = kT$  속도 또는 온도로 구별해도 같은 의미입니다)]. 이 중에서 현재 실험에 이용되고 있는 중성자는 열중성자와 냉중성자입니다. 다소 임의적이지만, 파장이 4 Å(에너지 5 meV 이상) 보다 작으면 열중성자, 이보다 크면 냉중성자(에너지 5 meV 이하)로 구별합니다. 일반적으로 실험실에서 쓰이는(구리 타겟에서 생성된) X-선의 경우 약 9 keV의 에너지를 갖습니다. 이미 눈치챈 분도 있겠지만, 중성자와 X-선은 서로 다른 에너지 단위를 사용합니다. 중성자는 meV를 X-선은 keV로, 대략 100만배 정도 에너지 차이가 있음을 알 수 있습니다. 높은 에너지의 X-선으로 실험시 일부 시료에 영향(고분자 사슬의 분해나 단백질 구조 변화 등)을 줄 수 있으나, 중성자의 낮은 에너지는 시료의 구조나 운동에 거의 영향을 주지 않습니다. 중성자의 장점일 수 있겠습니다. 현재 한국 원자력연구원에 열중성자원이 있으며, 현재 냉중성자원을 건설중에 있으므로 국내 많은 과학자들에게 혜택을 주리라 기대합니다.

중성자의 에너지는 원자나 분자가 움직이는 시간과 유사함으로 적절한 에너지 범위를 갖는 중성자 분광 장치를 선택함으로 분자이완운동, 확산운동, 또는 여러 가지 진동운동 등을 측정하는데 이용될 수 있습니다. 중성자가 물질을 통과할때 물질내 원자나 분자에게 에너지를 주거나, 또는 이들로부터 에너지를 얻을 수 있습니다. 예를 들면, 많은 사람들이 움직이고 있는 복잡한 거리를 지나갈때 사람들과 부딪치게 됨으로 우리는 속도를 늦추게 됩니다(운동에너지를 잃어버렸다고 할 수 있습니다). 그러나 가끔은 뒷 사람에게 떠밀려서 앞으로 빠르게 움직일 때가 있습니다(에너지를 얻었다고 할 수 있습니다). 이처럼 중성자가 물질과 에너지 교환이 이뤄지는 현상을 중성자 비탄성 산란이라고 하는데, 이런 현상을 이용해서 원자/분자들의 운동을 측정할 수 있습니다. 관련 중성자 분광장치들에는 back scattering, Disk Chopper scattering, Fermi chopper scattering, spin echo spectroscopy, and Filter analyser spectroscopy 등이 개발되어 있습니다. 중성자와 물질 사이에 에너지 교환이 전혀 일어나지 않고 산란이 일어나는 현상을 탄성산란이라고 하며, 간섭현상이 더해져서 구조에 대한 정보를 갖게 됩니다. 낮은 에너지인 긴파장의 냉중성자는 짧은 파장의 열중성자보다 더 큰 구조를 볼 수 있게끔 해 줌으로 고분자와 같은 거대 분자를 연구하는데 유리합니다. 냉중성자와 열중성자와 서로 보완적인 역할을 합니다.

### 2.8 성질 8. (중성자의 유량은 작다)

중성자의 유량(Flux, 단위 면적 단위 시간당 중성자의 수)은 실험실의 작은 X-선에 비해서도 작음으로 측정시간이 오래걸린다는 단점이 있습니다. 따라서 중성자원을 보유하고 있거나 건설계획에 있는 세계 여러 나라들은 중성자 유량을 높이는데 많은 투자를 하고 있습니다. 미국의 파쇄중성자원(SNS)도 이러한 이유로 최근에 미국DOE

6개 국립연구소가 협력하여 오크리지 국립연구소에 건설했습니다.

## 3. 중성자를 이용해서 무엇을 측정할 수 있는가?

지금까지는 중성자와 X-선의 차이점을 알아 보았습니다. 중성자와 X-선의 대부분의 실험/분석방법은 거의 같습니다. 그럼 중성자의 독특한 성질을 이용하여 X-선과 구별되게 쓰일 수 있는 분야에 대해 살펴 보겠습니다. 중성자를 이용하는 분야는 일반적으로 크게 두 분야로 나눌 수 있습니다. 구조 분석(Cliff Shull)과 분자 운동(Bertmann Brookhouse)을 이용하는 방법입니다[그 외에 중성자 영상기술을 이용한 비파괴 검사법, 감마선 측정을 이용한 화학 성분 분석 등의 분야가 추가될 수 있습니다]. 이들 구조와 운동분야는 거의 모든 중성자 과학분야의 쌍두 마차라고 할 수 있고, 현재까지도 많은 중성자 과학 분야가 이 둘을 기초로 하고 있습니다.

(성질 1)과 (성질 2)를 이용하면 다음과 같은 응용분야를 생각해 볼 수 있습니다.

#### - 시료환경장치개발용 재질

중성자의 투과력이 우수하고, 중성자 산란단면적이 작은 알루미늄, 실리콘옥사이드 등은 시료용기를 만드는데 이용할 수 있습니다. 예를 들어 용액상에서 고분자의 구조를 연구할 경우 이 용액을 담은 용기가 필요 합니다. 석영(quartz) 유리는 중성자 산란단면적과 흡수면적이 작고 투과율(1 cm 두께의 경우 대략 투과율 93% 이상)이 우수함으로 중성자 산란용 액체 용기로 이용됩니다. 실리콘의 경우 진공챔버의 창으로 이용됩니다. 또한 복잡한 실험 장치에 알루미늄같은 재질이 많이 쓰입니다. X-선의 경우 캡틴, 마이카, 또는 beryllium가 이용될 수 있고, 고온 고압의 실험에는 사파이어로 시료 측정 용기를 만듭니다.

#### (성질 2를 응용)

앞에서 언급한 중성자 산란길이가 동위원소마다 불규칙하게 틀리다는 사실은 중성자를 X-선을 포함한 다른 분석 방법과 가장 구별되게 해주는 성질입니다. 응용 가능한 분야의 한 예를 살펴보겠습니다. 약물전달(drug delivery)계에서 약물은 주로 구형의 내부에 저장되어 있고, 약물이 밖으로 빠져나갈 수 있는 껍데기로 구성된 core-shell의 구조를 생각해 볼 수 있습니다(그림 2). 이 경우, 핵-껍데기가 물과 같은 matrix 등에 분산되어 있는 경우, 3상계(matrix, 내부(검정색), 그리고 외부(녹색))가 됩니다. 핵만의 크기 또는 모양을 알고 싶으면 물(H<sub>2</sub>O)과 중수(D<sub>2</sub>O)를 적당한 양으로 혼합하여, matrix 산란길이에 맞추면 핵만 검출기에 보이게 됩니다. 반대로 핵에 명암을 맞추면,

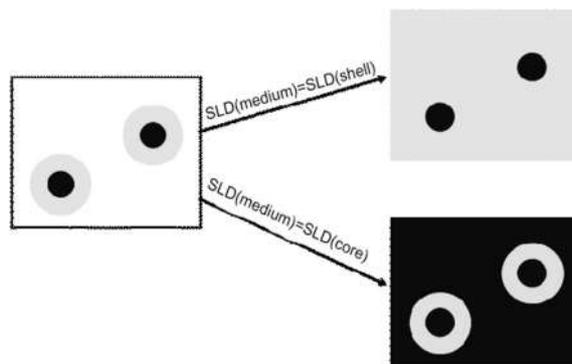
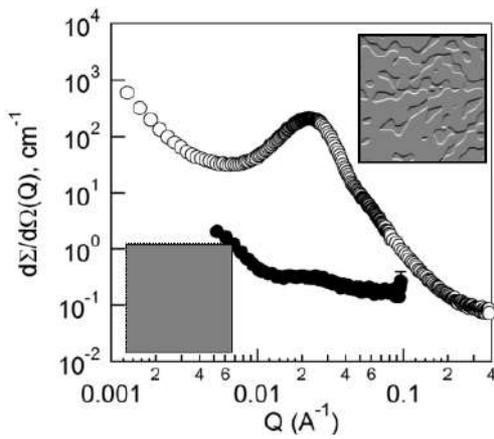


그림 2. 명암조절기술.



**그림 3.** 다공성 유리(예 Vycor)의 구조. 건조된 구조(위)와 명암이 일치된 수용액으로 채운 예(참고문헌, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **60**, 19 (2006) 으로부터 수정된 그림).

껍대기의 구조(크기, 두께, 모양 등)를 측정할 수 있습니다. 이를 명암 조절기술이라 합니다. 이 기술은 다공성 물질(멤브레인 등)의 열린기공/닫힌기공 등을 아는데도 유용하게 쓰일 수 있습니다.

기공이 열려있으면, matrix에 명암을 일치시킨 물/중수의 혼합액으로 다 채울 수 있으므로, 기공과 matrix 사이의 명암이 사라지게 됩

니다. **그림 3**의 실험결과는 혼합액서 대략 1000정도 측정치가 줄어드는 것을 보여줌으로, 다공성 유리인 바이코의 기공은 열려져 있음을 증명해줍니다.

#### 4. 결론

중성자와 X-선은 상호 보완적인 관계에 있습니다. 이 둘의 적절한 사용은 물질의 세계를 원자/분자에서 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있으며, 새로운 과학 분야의 개척에도 많은 공헌을 하리라 기대합니다. 국내에서도 이들 시설들(중성자 과학 연구를 위한 한국원자력연구원 하나로 시설과 X-선을 이용할 수 있는 포항 방사선 가속기 연구소)의 사용자 지원을 위한 인프라가 잘 갖추어져 있어서 국내 과학자들의 연구에 많은 도움을 주고 있으며, 중성자/X-선 이용자 그룹도 계속적으로 확대되고 있습니다. 이 강좌에서 언급된 부분은 중성자과학의 극히 일부입니다. 언급 안된 많은 부분은 해당 연구기관의 과학자들이나, 이들 기관의 홈페이지, 주기적으로 개최되고 있는 교육프로그램을 통해서 보충하셨으면 합니다.

**감사의 글 :** 본 분석총설을 쓰도록 격려해주신 KIST 유재웅 박사님께 감사드립니다.