

**원자력 연구기반 확충사업  
하나로 이용연구**

**ZnCoO에서의 수소매개 강자성 효과 연구**

A study of hydrogen mediated ferromagnetism in ZnCoO

부산대학교

과학기술부

# 제 출 문

교육 과학 기술부 장관 귀하

본 보고서를 “ZnCoO에서의 수소매개 강자성 효과 연구 에 관한 연구” 과제의  
보고서로 제출합니다.

2009. 6 . 30

주관연구기관명 : 부산대학교 산학협력단  
주관연구책임자 : 정 세 영  
연 구 원 : 이 승 훈  
" : 신 중 문  
" : ○ ○ ○  
협동연구기관명 : ○ ○ ○  
협동연구책임자 : ○ ○ ○

## 보고서 초록

과제관리번호	2008-01608	해당단계 연구기간	2008.4 ~ 2009.3	단계 구분	1/0
연구사업명	중 사업명	원자력 연구기반 확충사업			
	세부사업명	하나로 이용연구			
연구과제명	대 과제명				
	세부과제명	ZnCoO에서의 수소매개 강자성 효과 연구			
연구책임자	정 세 영	해당단계 참여연구원 수	총 : 3 명 내부 : 3 명 외부 :    명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업:        천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	21
<p>1. 본 연구에서 측정된 ZnCoO 나노분말 시료에서는 자성금속의 aggregation으로 인한 ferromagnetic secondary phase가 존재하지 않음을 확인하였다.</p> <p>2. 중성자 HRPD 측정결과를 Rietveld refine과 MEM 분석을 통해서 ZnCoO 자성반도체에서 수소의 위치를 정확하게 예측하고 이론적 모델을 확보하였다.</p> <p>3. 전이금속이 도핑된 반도체 내에서 수소의 위치 해석을 통해 강자성 스핀 정렬 특성과 수소의 강자성 매개 역할에 대한 심도 깊은 이해가 가능해졌다.</p> <p>4. 본과제의 수행으로 반도체에서 전이금속의 스핀정렬에 관한 연구결과를 국제학술회의 2회 발표와 국제 SCI 저널에 1편이 이미 출판되었으며 현재 2편의 논문이 투고될 예정이다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	수소효과, 묽은 자성 반도체, 강자성, 스핀정렬, 전이금속			
	영 어	Hydrogen effect, Diluted magnetic semiconductor, Ferromagnetism, spin ordering, transition metal			

# 요약문

## I. 제 목

ZnCoO에서의 수소매개 강자성 효과 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 강자성 수소매개 현상을 중성자 회절실험을 통해 증명하며 이는 자성반도체 연구에 새로운 응용성을 제시할 수 있다.
2. 수소매개-스핀정렬 현상에 대한 원천기술확보는 국가의 기술경쟁력을 높여줄 뿐만 아니라 향후 수소 저장 물질과 스핀소자의 원천기술 확보 측면에서도 중요하다.
3. 강자성 특성을 이용한 새로운 정보처리소자에 관한 연구는 개발자체가 응용과 산업화에 바로 접목 되어 있어서 그 부가가치는 매우 크다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 전이 금속이 첨가된 ZnCoO 자성반도체에서 수소 주입/주출과정에 따른 자성구조 및 결정구조확인
2. 수소매개 magnetic spin ordering의 온도의존성 연구
3. 전이금속 도핑과 자성반도체에서의 안정적인 수소위치 연구
4. 온도에 따른 강자성 spin ordering과 자기광학특성변화 연구

## IV. 연구개발결과

1. 강자성을 나타내는 ZnCoO:H 자성반도체에서 magnetic secondary phase가 존재하지 않는 것을 확인하고 강자성 스핀 정렬 현상이 수소 주입에 의해 나타나는 것을 확인하였다.
2. ZnCoO 자성반도체에서 수소 도핑에 따른 중성자 회절 pattern의 변화를 측정하고 Rietveld refine과 MEM 분석을 통해서 수소의 안정적인 위치를 확인하였다.
3. 전이금속이 도핑된 자성반도체에서 수소원자를 이용한 전이금속의 스핀정렬 원인과 응용가능성에 대한 실험적 증거를 확보하였다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

1. 자성반도체 물질에서 수소매개-스핀정렬현상의 연구는 기존의 스핀소자와 양자 스핀 특성을 활용하는 다양한 소재 개발에 응용할 수 있다.
2. 기존의 반도체 소자에 융합하여 신개념 소자인 spin-memory, spin-LED, optical switching 등의 차세대 정보통신 산업에 활용될 수 있다.

# Summary

## 1. Title

The hydrogen mediated ferromagnetism in ZnCoO

## 2. Purpose

- 1) We prove the hydrogen mediated ferromagnetism in transition metal ion doped semiconductor through the neutron HRPD experiment. This proposed research will provide much applicabilities to magnetic semiconductors
- 2) This research can provide the important original technology related with spintronic devices which is enable to enhance and to develop the competitive power of country.

## 3. Contents

- 1) The change of magnetic and crystal structure depending on the injection/ejection of hydrogen
- 2) The temperature dependence of the state of ferromagnetic spin-ordering
- 3) The stable position of hydrogen in magnetic semiconductor lattice matrix
- 4) The change of hydrogen mediation by temperature

## 4. Results

- 1) We found out the ferromagnetism can be obtained from the ZnCoO:H without any ferromagnetic secondary phases. Consequently, the ferromagnetic spin ordering can be mediated by hydrogen.
- 2) Through the neutron HRPD result, its Rietveld refinement method and MEM analysis, the most stable position of hydrogen was found out.
- 3) We could get an important experimental evidence that hydrogen mediate ferromagnetically spins of transition metal ions.

## 5. Expected Contributions

- 1) The new paradigm of hydrogen-mediated ferromagnetism would provide the much applicabilities for the spin-devices and quantum optic devices
- 2) The result can be used for the application of the spin-memory, spin-LED, optical switching.

# Contents

Section 1. Introduction	-----	7
Section 2. Present status of technological development in domestic and abroad	-----	9
Section 3. Research results and discussion	-----	10
Section 4. Achievement and contribution of the study to industry	-----	16
Section 5. Application of study results	-----	19
Section 6. New knowledges and information for the research topics	-----	20
Section 7. Reference	-----	21

## 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	7
제 2 장 국내외 기술개발 현황	9
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	16
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	19
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	20
제 7 장 참고문헌	21

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

반도체 기술의 한계는 1990년도 후반부터 본격적으로 이슈화 되었으며, 이를 극복하고 새로운 기능의 반도체를 개발하기 위해 많은 연구들이 수행되었다. 기존의 반도체 기술 한계를 극복하기 위하여 spintronics (스핀트로닉스)라는 새로운 연구 분야가 대두되었다. 스핀트로닉스는 전자들의 전하와 스핀의 특성을 결합하여 새로운 소자를 개발하기 위한 노력이다[1]. 이 중, 자성반도체 분야는 기존의 반도체에 스핀의 정보를 주입함으로써 스핀 편향 현상에 의한 정보 전달 및 연산 속도를 향상시키는데 목적이 있다[2].

다양한 반도체 중에서 산화 아연(ZnO)과 질화 갈륨(GaN)에 전이금속이 첨가될 경우, 강자성 현상이 상온에서도 나타날 수 있다는 이론적 계산결과가 발표되었다[3]. 그 중에서도 Co가 도핑된 ZnO는 대표적인 상온강자성 물질로 많은 연구가 되고 있다. Zn 자리에 치환된 Co의 스핀이 그사이에 위치하는 수소에 의해 강자성 특성을 나타냄을 본 연구진이 처음으로 보고하였다[4-5]. 이는 기존에 제기되었던 전도전하에 의한 스핀정렬이 아니라 외부의 수소 주입에 의해 나타나는 강자성의 존재를 보인 것이다. 이러한 실험결과는 그동안 많은 논쟁의 쟁점이 되었던 ZnCoO의 강자성의 기원에 대한 새로운 해석 제시라는 측면에서 중요하다.

지금까지 반도체 물질에서 수소에 의한 물성의 변화는 부분적으로 연구되어져 왔지만 수소에 의한 스핀정렬 효과는 현재 시작단계에 있다. 특히, 넓은 띠 반도체 내에서의 수소의 거동에 대한 중요성을 인지하고 선진 연구그룹을 중심으로 물질내부에서의 수소효과와 결합상태에 대한 연구가 시작되고 있다[6-9]. 중성자 회절실험은 물질의 구조적 자기적 특성을 연구하는 가장 우수한 방법으로 잘 알려져 있다[10]. 본 과제는 강자성 수소매개 현상을 중성자 회절실험을 통해 증명하며 이는 자성반도체 연구에 새로운 응용성을 제시할 수 있게 하는 중요한 연구라고 할 수 있다.

자성반도체의 가장 큰 응용부분은 MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory)을 비롯한 정보저장장치라고 판단된다. 앞으로 이 기술에 대한 수요와 이익을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 과거 전 세계적으로 자기 기억장치로 인한 기업의 수익이 1000억 달러가 넘는 것으로 추산되고 있을 정도다. 이 분야의 발전은 매년 10%의 성장률을 기록하고 있으며 자기 기억장치와 관련한 산업의 발전 속도를 MR(자기저항, magneto-resistance)의 예에서 확연히 알 수 있다. 1856년 처음으로 MR특성이 보고된 후 1980년 초반 미국 IBM사에서 연구를 시작하여 상업적으로 응용 가능한 제품이 개발되었다. 첫 번째 MR 센서는 잘 알려진 대로 컴퓨터의 하드디스크 드라이브의 헤드로 사용되었다. 그 후 GMR(거대자기저항, giant magneto-resistance) 특성이 발견된 후 10년 만에 급속히 기존의 MR 센서를 대체해 갔으며, 이러한 발전 경향은 계속되고 있다. 또한 차세대 휴대용 정보기기와 digital TV, 멀티미디어 서버 등 가전용 AV 시스템을 비롯하여 의료영상 등 각종 산업용 정보시스템에 이르기까지 모

든 정보 관련 산업 기기의 정보처리 및 저장장치로 활용될 수 있을 것이다.

또한 휴대폰, PDA, 노트북, 메모리 디스크 등의 휴대성과 기능성이 강화된 복합 통신단말기의 핵심적인 부품중의 하나가 비휘발성 메모리이다. 이들은 사용자의 요구에 따라 다양한 정보를 실시간으로 기록해야 하며 특별한 작동 없이 일반가전처럼 쉽게 끄고 켜는 것이 가능해야 한다. 현재 사용되고 있는 비휘발성 메모리의 발전이 우리의 사회적 전반에 끼치는 문화적인 중요성은 막대하다고 할 수 있다. 특히 생활가전이나 휴대폰들의 전자기기들에서 사용자 편의를 고려한 다양한 설정들이 저장 가능해지고 개인맞춤 서비스를 요구하고 있는 추세여서 이러한 고성능, 고효율의 비휘발성메모리 개발은 필수적이라 할 수 있다. 강자성을 이용한 정보관련 산업 기기의 정보처리 및 저장장치에 관한 연구는 개발자체가 응용과 산업화에 바로 접목되어 있어서 현대산업에 있어 그 가치는 매우 중요하다. 이러한 연구의 지원은 국가적인 부의 창출뿐만 아니라 국가의 위상을 높여 세계 속의 국가의 인지도를 높일 것으로 기대된다. 무엇보다도 이러한 연구는 새로운 연구 인력의 고용 창출로 이어질 수 있다. 이러한 현상은 차세대 반도체 물질의 등장으로 인하여 고용 창출이라는 사회, 문화적으로 큰 파급 효과를 미칠 것으로 생각된다. 이러한 원천기술확보는 국가의 기술경쟁력을 높여줄 뿐만 아니라 향후 최첨단 산업에서 우위를 차지할 수 있는 핵심사항이다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

중성자를 사용한 구조분석은 현재 응집물질 분야에서 가장 중요한 연구방법 중에 하나이며 Nature와 Science를 비롯한 세계유수의 저널에서도 비중 있게 다루고 있다. 현재 자성반도체 분야에서 중성자를 사용한 연구는 본연구실에서 주도적으로 수행되고 있으며 점점 그 중요성이 부각되고 있다. 특히 ZnCoO 물질의 경우 강자성의 근원과 관련한 많은 논란이 진행되고 있는데, 그 중 한 가지가 Co metal cluster에 의해서 유도된다는 연구 결과들이 보고되고 있다. 본 연구에서의 수소와 자성의 관련성을 증명하는 것은 아직 논란이 되고 있는 이 분야의 국내외 관련연구자들에게도 많은 파급효과를 가질 것으로 판단된다, 특히 본 연구결과에서 얻어진 측정된 결과는 현재 MEM 분석이 진행되고 있으며 이러한 결과는 기존의 분석법보다 좀 더 향상되고 좀 더 많은 정보를 제공한다. 국내에서도 MEM분석을 효율적으로 수행하는 곳이 아주 작고 기술도 아직 보편화 되지 않고 있다. 이러한 연구결과와 분석법은 다른 관련 연구자들에게도 많은 정보를 제공하고 연구의 효율성 증대에도 기여할 것이다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 최종 목표

- 묽은 자성 반도체내에서 수소효과로 인한 중성자 HRPD 회절의 변화를 분석함으로써 수소매개 강자성을 규명한다.
  - ZnO내에 cobalt 도핑량 5%, 10%의 결정구조 분석
  - 플라즈마에 의해 수소가 주입에 의한 강자성 분석
  - 수소가 제거된 시료의 회절 패턴 분석
  - 수소매개에 의한 효과를 온도에 따라 cobalt spin ordering 상태 분석
  - Co-H-Co의 강자성 기여도를 확인 및 분석

## 제 2 절 세부 실험 결과

### 1. 온도에 따른 magnetic spin ordering 상태 분석확인

2008년 52주기 HRPD 빔라인 이용에서, 본 연구실에서는 Sol-gel 법을 이용하여 Co가 5%, 10% 도핑된 ZnCoO 나노분말을 합성하였다. 이 분말에 플라즈마 공정을 통해 수소를 주입하여 총 4개의 시료에 대해 300K와 10K에서 중성자 회절실험을 수행하여 수소 주입과 온도에 따른 구조적 특성의 변화를 분석하였다. 본 실험에서 기존 2005년에 측정하였던 ZnCoO 시료에서 나타나지 않았던 패턴이 나타났는데, 분석에서는 이 패턴을 제외하고 분석을 수행하였다. (2008년 54주기 실험을 통하여 anomalous 패턴은 측정 홀더에서 나타난 것으로 확인되었다.) Co 도핑량이 5%, 10% 변화에도 중성자 회절 패턴에는 큰 변화는 보이지 않았으며 도핑량 증가에 따른 약간의 격자 상수의 변화를 보였다. 또한 온도에 따라서도 열적 변화에 따른 격자상수의 변화 외에 큰 변화는 발견되지 않았다. 한국 원자력 연구소의 최용남 박사와의 논의를 통하여 수소가 주입된 시료의 자성의 크기는 회절 패턴 분석에서 나타날 만큼 강한 자기 구조를 형성할 수 없기 때문에 중성자 회절 분석을 통한 스핀 배향 상태를 분석하는 것은 어려운 것으로 판단되었다. 본 회절 실험에서의 시료는 수소 처리 공정이 최적화가 되지 않은 상태에서 수행되었으며 측정 시간이 비교적 짧았기 때문에 회절 패턴이 깨끗하지 못하여 refinement를 수행하는데 어려움이 있었다. 이후 실험에서는 수소 처리 공정의 최적화와 긴 시간 동안의 측정을 통해 깨끗한 회절 패턴을 얻는데 주력하였다.

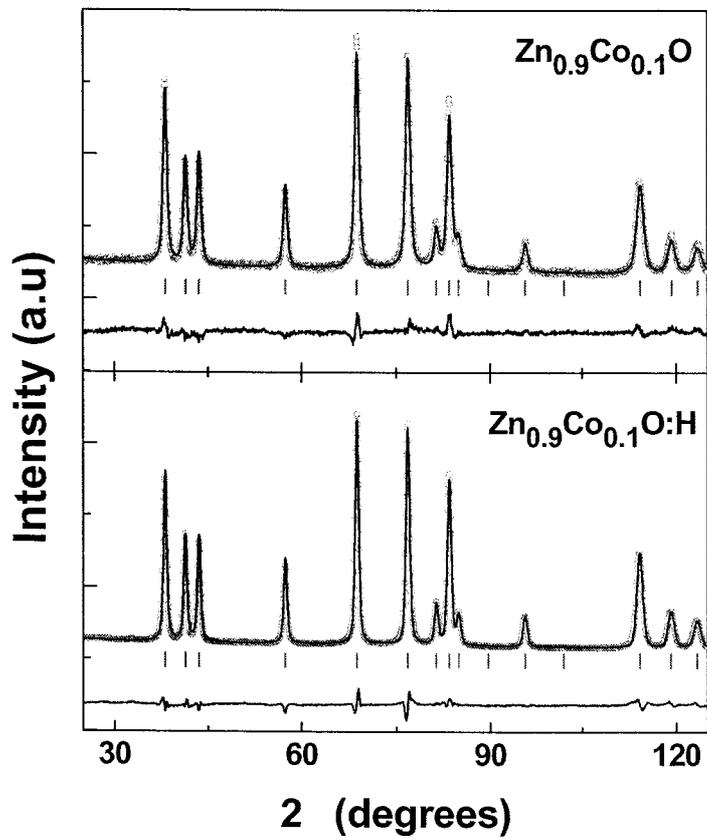
### 2. 수소 주입에 따른 전이 금속이 첨가된 ZnO 시료의 자성구조 및 결정구조확인

2008년 54주기 HRPD 빔라인 이용에서, 본 연구실에서는 Sol-gel 법으로 형성한 Co가 10% 도핑된 ZnCoO 나노 분말에 대해 중성자 회절 분석을 수행하였다. 52주기에서의 측정과 비교하여 측정 시간을 약 3배로 늘려 측정하였다. <그림 1>에서 보이는 바와 같이, 매우 깨끗한 회절 패턴을 얻을 수 있었으며 회절 패턴에서 강자성을 유도할 수 있는 Co metal, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 등의 이차상이 발견되지 않았다. 중성자 회절 실험과 병행하여 측정한 TEM 분석에서도 중성자 회절 결과와 마찬가지로 ZnO phase 외에 다른 이차상은 발견되지 않았으며, SQUID를 이용한 자기적 특성 분석에서도 강자성을 보이지 않았다. 같은 방법으로 제조된 ZnCoO 나노 분말에 플라즈마법을 이용하여 수소를 주입하고 이 분말에 대해 중성자 회절 분석을 시도하였다. 초기 분석에서는 H의 위치를 고려하지 않고 Rietveld refinement를 수행하였다. 수소 주입 후에도 수소 주입 전과 마찬가지로 모든 회절 패턴이 ZnO의 P63mc 구조의 대응 되는 것을 확인하였으며 수소 주입에 의해서 강자성을 유도 할 수 있는 그 어떤 이차상도 생성되지 않았다. 수소의 위치를 고려하지 않은 분석에서, 수소 주입 전, 후의 격자 상수는 각각  $a=3.25053(9)\text{\AA}$ ,  $c=5.20252(23)\text{\AA}$  와  $a=3.25123(4)\text{\AA}$  and  $c=5.20441(8)\text{\AA}$  로서 미세한 차이만이 확인되었으며, 수소 주입 후에도 뚜렷한 구조적인 변화는 관찰 되지 않았다.

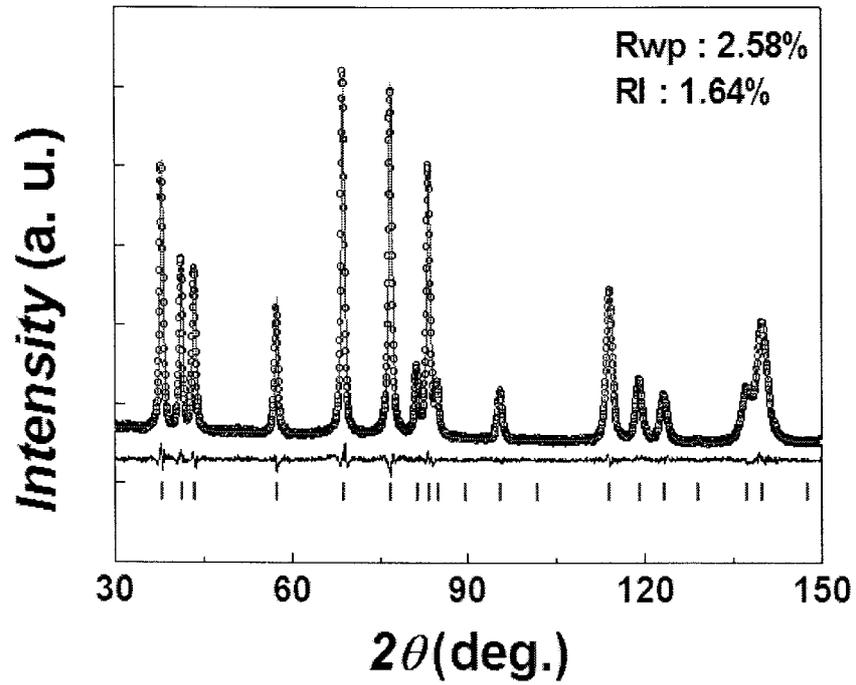
### 3. 전이금속 도핑과 안정적인 수소위치 연구

2008년 54주기에 측정된 수소가 주입된 ZnCoO의 회절 패턴에 대해 주도 면밀한 Rietveld refinement를 수행하고 이 결과를 토대로 Maximum Entropy Method (MEM) 분석을 시도하였다<그림 2>. 일반적인 구조 분석의 경우, Rietveld 방법을 이용하여 격자상수, 열적변수, 원자 위치등을 계산해 낼 수 있지만, 본 연구과제에서 수행하는 수소 불순물의 정확한 위치를 분석하는데 있어서는 한계가 있다. 하지만 MEM 분석법은 계가 최대의 엔트로피를 가지도록 핵 밀도를 분포시키고 이에 따른 회절 패턴을 계산하여 실험결과와 비교하여 미세한 불순물의 위치를 파악할 수 있고 이를 바탕으로 구조모델을 구현할 수 있는 분석법으로서, 본 연구 과제의 핵심인 수소의 정확한 위치와 그 기여도를 분석하는데 매우 유용하다. 그림 2에서 보이는 바와 같이, 수소의 기여를 포함하지 않은 Rietveld 분석법에서도 매우 낮은 R 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이를 이용한 MEM 분석에서 Iso-surface 값을 매우 낮은 값으로 설정할 경우 종래에 보이지 않던 새로운 핵 밀도 분포가 보이는 것을 확인 할 수 있는데, 이것이 기존에 이론적으로 보고된 ZnCoO 내의 안정한 수소의 위치와 거의 동일한 위치인 것으로 확인 되었다[4].

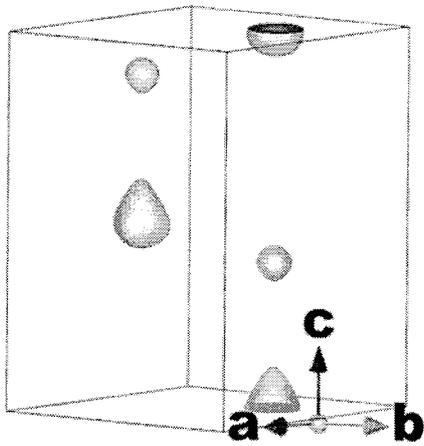
수소 처리 조건을 최적화 하여 수소 처리 전, 후의 자기적 특성을 분석한 결과, 그림 4 에서 보여주는 바와 같이 매우 강하게 강자성이 유도 된 것을 확인할 수 있었다. 중성자 측정을 통해서 수소 처리 조건을 변화 시켜서 수소 주입을 증가 시켰음에도 불구하고 자성은 유도 되지만 이차상이 발생하지 않는 것은 매우 경이로운 결과이다. 최근 보고 되고 있는 많은 결과에서 ZnCoO에서의 강자성이 나노 크기의 Co 이차상에 의해서 나온다는 연구 결과가 보고되고 있는데, 본 과제 수행을 통해서 ZnCoO에서의 강자성의 근원은 이차상이 아닌 수소 매개 효과에 의해서 나타난다는 부분을 서포팅 해줄 수 있는 중요한 연구 결과가 되었다. 또한 MEM 분석을 통해서 수소의 위치 분석과 그 기여도에 대한 분석이 잘 진행되고 있는 것으로 보아 좋은 결과를 가져올 수 있을 것으로 기대되어진다.



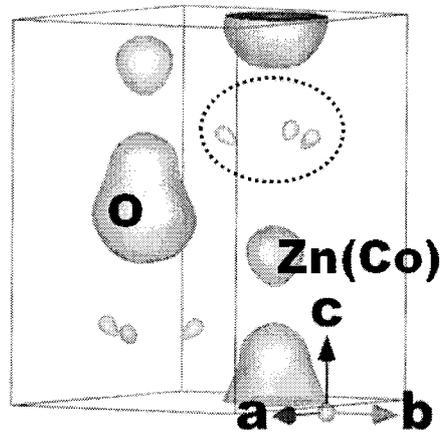
<그림 1> ZnCoO 나노 분말의 수소 주입 전,후의 중성자 회절 패턴과 Rietveld Refinement 분석 결과



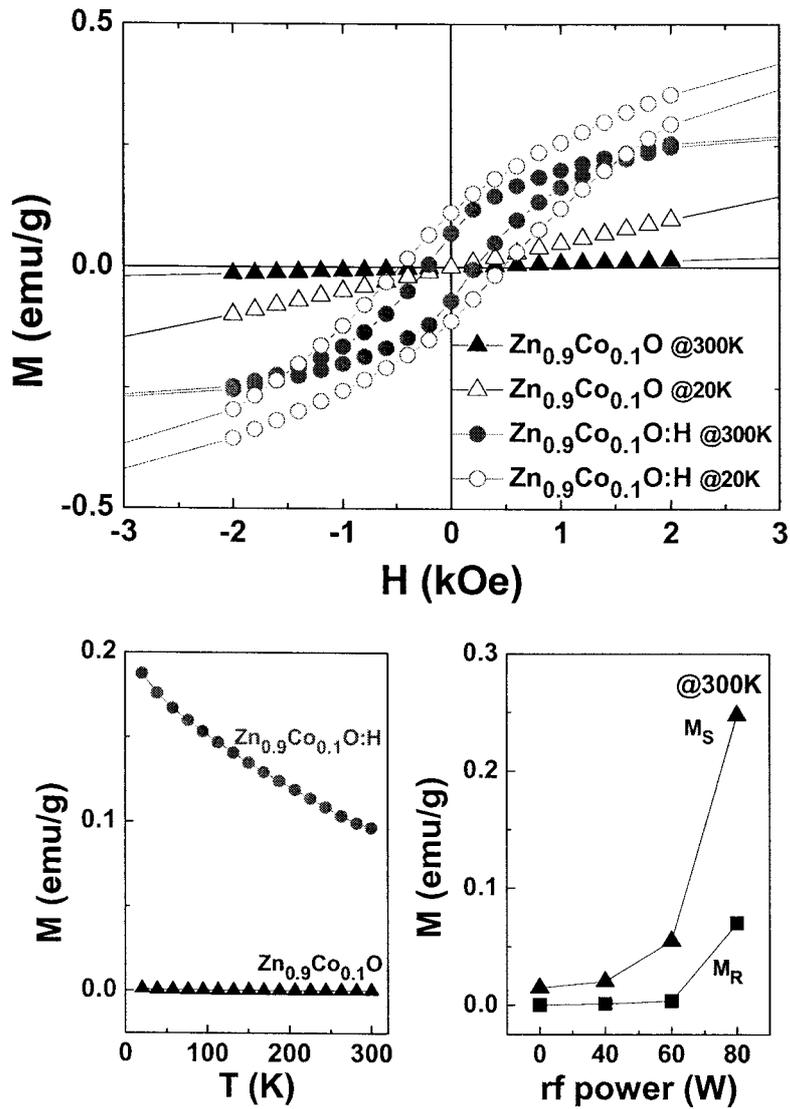
**Iso-surface :  $1e/\text{\AA}^3$**



**Iso-surface :  $10\mu e/\text{\AA}^3$**



<그림 2> 수소 처리된 ZnCoO 나노 분말에 대한 Rietveld Refinement와 MEM 분석 결과



<그림 3> 수소 주입에 의한 강자성 유도 : ZnCoO와 ZnCoO:H 나노 분말의 10K, 300K에서의 M-H 특성 곡선, M-T 특성 곡선 그리고 수소 처리 조건에 따른 M<sub>R</sub>, M<sub>S</sub> 값의 변화

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 목표 달성도

세부연구목표	주요 연구개발 실적	가중치 (%)	연구목표 달성도 (%)	비고
수소 주입/주출과정을 거친 전이 금속이 첨가된 ZnO 시료의 자성구조 및 결정구조확인	1. 해외 SCI 저널에 게재 (Appl. Phys. Lett <b>94</b> 212507) 2. 해외학회 발표 2건[미국]	30	50	
수소매개에 의한 효과를 온도에 따른 magnetic spin ordering 상태 분석	1. 해외학회 발표 1건[일본]	30	20	2차년도 과제 수행에서 자기장 하에서의 실험 예정
전이금속 도핑과 안정적인 수소위치 연구	1. 해외 SCI 저널에 투고 준비중 2. 국내학회 발표 3건	30	30	
온도에 따른 강자성 spin ordering 상태 확인	1. 국내 학회 발표 2건	20	10	2차년도 과제 수행에서 자기장 하에서의 실험 예정
총계		100	110	

## 제 2 절 세부 연구 실적

구분	논문명/특허명	게재지/학회명 (등록국가)	특기사항
논문	Reproducible manipulation of spin ordering in ZnCoO nanocrystals by hydrogen mediation	Appl. Phys. Lett. 94, 212507 (2009) (미국)	SCI
	Direct observation of hydrogen position in hydrogen mediated ferromagnetism of Zn <sub>0.9</sub> Co <sub>0.1</sub> O using deuterium : Neutron scattering study with MEM/Rietveld method	Nature Materials	(투고 준비중)
학술회의 발표	The inducement of ferromagnetism in ZnCoO nanocrystalline powder fabricated by sol gel method	53rd annual conference on Magnetism and Magnetic Materials, November 10-14, 2008 Austin, Texas, USA	
	The inducement of ferromagnetism in ZnCoO nanocrystalline powder	3rd Korean-Japanese-Chinese workshop, Oct. 30 (2008)	
	The Ferromagnetism in ZnCoO nanocrystals by hydrogen injection	제4회 강유전체연합심포지움 Feb. 8-10 (2009), 무주리조트, 한국	
	MEM/Rietveld 방법을 이용한 강자성 Zn <sub>0.9</sub> Co <sub>0.1</sub> O:H의 수소위치 연구	제4회 강유전체연합심포지움 Feb. 8-10 (2009), 무주리조트, 한국	
	The extrinsic origin of ferromagnetism in ZnMnO nanocrystals	제4회 강유전체연합심포지움 Feb. 8-10 (2009), 무주리조트, 한국	
	The condition for ferromagnetism in ZnCoO powder fabricated by sol-gel method	한국 춘계 물리 학회, Apr. 17-18 (2008), 대전컨벤션센터, 한국	
특허	수소치리를 통한 강자성 ZnCoO 분말의 제조방법 및 이 방법에 의해 제조된 강자성 ZnCoO분말 그리고 이를 이용한 레이저 프린트용 토너	특허 출원 (국내)	10-2008-0087163

### 제 3 절 연구 실적 요약

구 분	국 내	국 외
논문게재	0	1
논문발표	4	2
특허출원	1	0
특허등록	0	0
프로그램등록	0	0
기술이전	0	0

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 과제를 통해서 확보되는 수소매개 강자성에 정확한 규명은 스핀트로닉스 분야에서 매우 중요한 의미를 지닌다. 현재까지 논란이 되고 있는 ZnCoO에서의 자성특성을 수소매개강자성으로 설명함으로써 새로운 이론을 제시할 수 있게 된다. 그리고 DMS 물질에서 수소매개를 통한 스핀현상의 이해 확대는 기존의 스핀소자를 비롯한 나노, 바이오 소자 등의 제작에 많은 기여를 할 것이다. 특히 양자 소자 특성에 적합한 물질 개발은 스핀특성을 이용하는 자기장 감지 및 조절 양자소자 개발에 대한 기준으로 본과제의 결과를 최대한 활용할 수 있을 것이다. 또한 기존의 컴퓨터 보다 1000배 이상 빠른 연산 처리, booting 과정이 필요 없는 컴퓨터, 성능은 향상되고 노트북보다 상당히 작아진 컴퓨터 등 다양하다. 그리고 수소에 의한 자성의 조절 특성은 많은 기술적 응용성과 활용이 기대되는 신기술 이다.

현재, DRAM은 우리나라의 반도체의 수출을 주도하는 제품으로 세계적인 수준에 도달해 있는 가운데 반도체 부품이 생산된 이래 정보 저장 매체 및 기능성 반도체 소자의 시장규모는 계속 증가추세에 있다. 본 관제의 결과는 기존의 반도체 소자에 융합하여 형성되는 신 개념의 다중 물리량 제어방식의 융합소자인 spin-memory, spin-LED, optical switching 등과 같이 차세대 정보통신 산업에 활용될 수 있다. 또한 spintronics라는 분야, 비휘발성 정보 저장 매체, 양자구슬을 이용한 양자 컴퓨터, 발광, 광센서 소자 등의 전자기 광학 소자와 실용적인 첨단 소자의 개발에 필요한 기초지식과 정량적인 guide로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구가 성공적으로 수행되었을 때 파급효과는 돈으로 환산하는 것은 불가능하겠지만, 박막제조 기술이나 박막 물질 대한 지적 소유권, 수입할 때의 royalty 문제, 기술 수출의 효과 등을 생각할 수 있다. 또 이러한 기술이 정보통신 산업과 다가올 멀티미디어 사회의 주력 산업에 응용되었을 때 국가경쟁력 확보에 크게 기여할 것이다. 나노스케일에서의 자성에 대한 미시적인 기초연구는 기초과학의 발전은 물론 궁극적으로는 우리가 필요로 하는 특성을 가지는 물질을 인위적으로 디자인하고 device를 개발하는 데 필요한 이론적·실험적인 바탕으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

현재 스피트로닉스 분야는 선진국을 중심으로 날로 그 영향력이 커지고 있다. 특히 선두 연구 그룹에서는 기본적인 소자의 구조를 제작하고 스피의 기본적인 dynamics등을 측정하고 세계 유명 저널에 발표하고 있다.

## 제 7 장 참고문헌

- [1] H. Ohno, *Science* **281**, 951 (1998).
- [2] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, and S. von Molnar, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, and D. Treger, *Science* **294**, 1488 (2001).
- [3] K. Ueda, H. Tabata, and T. Kawai, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 988 (2001).
- [4] C. H. Park and D. J. Chadi, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 127204 (2005).
- [5] H.-J. Lee, C. H. Park, S. Y. Jeong, K.-J. Lee, C. R. Cho, M.-H. Jung and D. J. Chadi, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 062504 (2006).
- [6] C. G. Van De Walle, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1012 (2000).
- [7] A. Janotti and C. G. Van De Walle, *Nature Mater.* **6**, 44 (2007).
- [8] S. Y. Park, P. J. Kim, Y. P. Lee, S. W. Shin, T. H. Kim, J.-H. Kang, and J. Y. Rhee, *Adv. Mater.* **19**, 3496 (2007).
- [9] Seunghun Lee, Yong Chan Cho, Sung-Jin Kim, Chae Ryong Cho, Se-Young Jeong, Su Jae Kim, Jong Pil Kim, Yong Nam Choi and Jean Man Sur, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 212507 (2009).
- [10] H.-J. Lee, S. H. Choi, C. R. Cho, H. K. Kim, and S.-Y. Jeong, *Europhys. Lett.* **72**, 76 (2005).

## 주 의

1. 이 보고서는 교육과학기술부에서 시행한 원자력 연구기반 확충사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 교육과학기술부에서 시행한 원자력 연구기반 확충사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.