

KAERI/TR-1986/2001

# 에폭시 성형에 의한 중성자 차폐재 개발

**Development of Neutron Shielding Block by Epoxy Molding**

# KAERI

한국원자력연구소

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “에폭시 성형에 의한 중성자 차폐재 개발” 기술보고서로 제출합니다.

2001년 12월 일

과제명 : 중성자빔이용연구

주저자 : 한국원자력연구소 이창희

공저자 : 한국원자력연구소 박주현  
최병훈  
오화숙  
한영수

# 요 약 문

## I. 제 목

에폭시 성형에 의한 중성자 차폐재 개발

## II. 연구 개발의 목적 및 필요성

중성자 분광장치를 개발하는 과정에는 다양한 차폐재료와 이를 적절하게 조합하여 구사한 차폐체, 즉 차폐 구조물이 필요하다. 이들 차폐재들은 각 재료 특성에 따라 감마선을 차폐함은 물론 고속중성자부터 열중성자까지 넓은 스펙트럼의 중성자를 효율적으로 차폐해야 한다.

중성자 차폐의 기본적인 원리는 에너지가 낮을수록 흡수 단면적이 크므로 속중성자를 감속시켜 효과적으로 흡수, 즉 차폐하는 것이다. 속중성자를 수소 밀도가 높은 물질에 의해 감속시키면 열중성자로 바뀌는데, 이를 열중성자 흡수 단면적이 높은 붕소(boron, B), 카드뮴(cadmium, Cd), 가돌리늄(gadolinium, Gd) 등과 같은 원소를 함유한 물질을 이용하여 흡수하여 차폐한다.

알루미늄, 철재, 카드뮴(Cd), 납(Pb) 등의 금속재료와 polyethylene(PE), borated polyethylene(B-PE) 등 고분자 구조재와는 달리 비정형 구조물을 만들거나 복잡한 내부 공간의 충전, 한정된 부피에 차폐 성능을 최대한 높여 정밀 제어해야 할 경우 등 정교한 중성자 차폐장치나 구조물을 제작할 경우에는 현장에서 차폐체를 성형해야 하는 경우가 많다. 그간 오랫동안 여러 번의 시도에도 장기간 구조 안정성을 갖는 성형 방법을 기술적으로 만족스럽게 해결하지 못해 어려움을 겪었으나 이번에 epoxy 재료에 중성자 차폐재를 혼합, 성형하는 기법에 좋은 성과를 얻어 이를 기술보고서로 작성하게 되었다.

### III. 연구 개발의 내용 및 범위

- 에폭시 수지 성형 이론
- 선정한 에폭시의 물리, 화학적 특성
- 에폭시와 카드뮴 화합물 분말의 성형과 투과도 시험
- 에폭시와 Borax 분말의 성형과 투과도 시험
- 에폭시와 B<sub>4</sub>C 분말의 성형과 투과도 시험
- 폴리에틸렌과 카드뮴 화합물 분말의 성형과 투과도 시험

### IV. 연구 개발 결과

- 중성자 차폐재의 하나로서 에폭시 성형에 의한 차폐재를 개발하고, 정성적이지만 성형성과 물성에 미치는 여러 인자들의 효과를 파악할 수 있었다.
- 에폭시 성형 차폐재는 비정형의 차폐 구조나 내부 충전 등 기계 가공이 어렵거나 고비용이 드는 부분에 유용하고, 효율적인 차폐를 할 수 있다.
- 에폭시는 폴리에틸렌과 달리 속중성자 차폐, 즉 감속능(moderating power)은 수소 농도가 낮으므로 떨어지지만 작업 상황에 맞추어 성형이 가능하고 다양한 첨가물과 중성자 차폐재를 혼합, 성형할 수 있어 우수한 물성과 함께 높은 차폐 성능을 갖는 구조를 만들 수 있다. 따라서 이를 기존 PE, B-PE, Cd 등의 차폐 재료와 섞어 적절히 이용한다면 우수한 차폐 성능을 확보할 수 있다.
- 물리적으로는 에폭시와 B<sub>4</sub>C 분말을 혼합하는 것이 가장 유리하나 비용대비 효과면으로는 대부분의 경우 Borax로도 충분하다. 이때 굵은 가루 상태의 공업용 Borax 분말을 그대로 사용하여도 무방하나 성형할 때 기포

가 상대적으로 더 발생하므로 혼합 과정에 세심한 주의가 필요하다. 이를 낮추려면 성형 전에 진공 배기하여 사용하면 좋을 것이다. 에폭시 차폐재에 혼합할 수 있는 Borax의 한계량은 무게비로 약 50% 정도이다.

- Borax 함량 40~50%인 에폭시 차폐재는 Boron PE에 필적할 만한 우수한 차폐능을 가지나, 차폐 대상에 따라 방사선의 성격과 배경반사의 특성을 세심히 판단하여 다른 차폐재료와 조합하여 선택하는 것이 좋다.
- 성형물의 물리적 특성만으로는 국도 에폭시 원소재를 2차 가공한 동양 에폭시의 재료가 우수하나 2-3배 이상 고가이므로, 에폭시 주제로서는 국도 화학의 YD-127을, 경화제로는 G-0331을 사용하여 제작하는 것이 비용 대비 효과면에서 최적의 조건일 것으로 판단된다.
- 또한 CdS 화합물 상태의 적색 또는 황색의 안료는 대단히 우수한 착색 성능을 보이므로 외관의 미려함이나 재료 구분을 위한 안료로서 선택하는 것이 좋다. CdS는 PE에도 우수한 안료 착색 특성을 보이므로 1~3% 정도의 첨가로서 차폐 성능도 향상시키며 PE 백색 원소재 색에서 구분되는 적색을 만들 수 있어 재고 구분이나 재료 구분 면에서도 편리하게 이용할 수 있다.

## V. 연구 개발 결과의 활용 계획 및 건의 사항

에폭시 성형 차폐재 기술 개발 과정에서 습득한 지식과 현장 경험을 바탕으로 중성자 분광장치 차폐구조물, 중성자 빔 경로상의 여러 beam narrower, stopper, definer 등의 다양한 기구물 제작에 활용할 것이다. 특히 기계 가공이 어려운 곡면형이나 복잡한 면 구성을 갖는 차폐 구조물의 충전, 구조 성형을 통한 효율적인 제작에 활용한다.

습득한 기술의 첫번째 응용으로는 100mm W × 200mm H 크기의 위치 민감형 검출기(PSD) 차폐체 제작과 중성자 소각산란장치(SANS) 2차원 검출기 진공용기의 외부 벽차폐체 제작에 적용할 계획이다.

B<sub>4</sub>C, Borax, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CdS, BN 등 다양한 차폐재의 혼합 특성과 에폭시 성형물의 물성 구현, 안료 특성을 이용한 발색 등을 사용 목적과 조건에 맞게 체계적인 경험을 축적할 것이며, 경제적이며 효과적인 차폐체 제작에 지속적으로 활용될 것이다.

CdS의 적색 및 황색 안료 특성을 이용하여 HDPE(High Density PolyEthylene) 판재를 사출 성형할 때 적용하여 중성자 차폐재로 활용하며, 고밀도로 B<sub>4</sub>C가 함유되어 성형 후 기계 가공이 어려운 차폐체에 구멍이나 단면 등을 가공할 목적으로 Water Jet 가공법을 다음 단계로 시도하고자 한다. 또한 궁극적으로는 가장 효율적인 차폐재료의 하나인 Borated HDPE 제작을 전문적인 사출 성형 업체와 함께 시도하고자 한다.

# Summary

## I. Project Title

Development of Neutron Shielding Block by Epoxy Molding

## II. Objective and Importance of the Project

There are a lot of different kinds of neutron shielding materials and structures of their combinations for development of neutron spectrometers. These shielding materials are against gamma rays shielding and ones for neutrons from fast through epi-thermal to thermal neutrons. All of these should be combined for effective and efficient shielding.

The basic principle of neutron shielding is to moderate fast neutrons into low energy ones for easy and effective absorption because low energy neutrons have generally high absorption cross-section, i.e., a kind of shielding. Usually these fast, high energy neutrons are moderated by high hydrogen containing materials such as water, paraffin or polyethylene, and then the moderated neutrons, that is epi to thermal ones, are absorbed by materials containing boron, cadmium, gadolinium, etc. showing very high absorption cross-section.

Along the process of spectrometers construction or experimental arrangements, there are many times of difficult shielding requirements for not-strictly defined shapes, loading of internal volumes of complicated structures, very high shielding efficiency under limited volume or positions contrary to strict form of metallic structures of Al, irons and steels, Cd, Pb and engineering plastics of PolyEthylene(PE) or borated PE(B-PE). We have failed to make good neutron shielding block of epoxy for those kinds of purposes for a long time but in this year we could achieve shielding blocks of epoxy having good mechanical properties and got to know many technical tips. This report describes the trials of molding and its properties for neutron

shielding and mechanical properties with its related understanding.

### III. Scope and Content of the Project

- Simple introduction of epoxy Molding
- Physical and chemical properties of the selected commercial epoxy types
- Molding of epoxy and CdS and their transmission test
- Molding of epoxy and Borax and their transmission test
- Molding of epoxy and  $B_4C$  and their transmission test
- Molding of PE and CdS and their transmission test

### IV. Result of the Project

- We got to know the general guideline and recipe of epoxy molding for neutron shielding purpose, and several factors for their final properties were surveyed qualitatively.
- Epoxy shielding blocks can be used for poorly defined shapes, charging internal volumes, high-efficiency shielding and structures of not easy machining objects.
- Epoxy is less efficient than PE in fast neutron shielding capability due to its low hydrogen density. But good control of plasticity in any shapes, various mixing capability of powders for neutron absorbing materials, and quite good mechanical properties can be obtained. When we combine these epoxy blocks of neutron shielding materials with PE, B-PE, and Cd, etc., we would have very effective shielding capability and good economic cost-effectiveness.
- Epoxy with  $B_4C$  powder is superior to the one with borax in terms of shielding power but the epoxy with borax is more acceptable in most of cases economically. Industrial grade borax is of coarse-grain form, i.e., not so fine powder, but molding quality shows no dependency in powder phase. Usually coarse grain powders made more air bubble

during epoxy curing, but careful attention is needed for good looking in the epoxy blocks. Practically maximum content of mixing powders of borax and B<sub>4</sub>C, etc. would be 50 weight percent.

- 40~50% borax epoxy has better shielding properties than the B-PE but when we apply these shielding materials, we need to consider the required shielding level, radiation to be blocked and background properties.
- Based on the quality of the epoxy molding, Dongyang epoxy is much superior to Kukdo Epoxy because Kukdo is a primary supplier for the epoxy base materials and Dongyang is a secondary supplier improving properties of the primary materials. Of course Dongyang epoxy is much more expensive to Kukdo by 2-3 times higher. As for application under tight requirement, Dongyang would be preferred but Kukdo YD-127 and G0331 would be good in terms of cost effectiveness for most of cases.
- CdS has good neutron shielding properties and very nice property of colouring in red or yellow but is expensive, too. This compound would be good for colouring for PE, B-PE or epoxy blocks by just 0.5-3 weight percent content. Colouring is good for looking but also for inventory control for differences of these expensive shielding materials.

## V. Proposal for Application

We acquired the techniques for mixing of epoxy with neutron shielding materials such as B<sub>4</sub>C, Borax, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CdS, BN, etc. And these techniques would be applied for neutron shielding purposes for neutron spectrometers and experimental configurations such as shielding blocks, bricks, beam narrowers and stoppers, and various objects of irregular shapes.

As for its first applications, we will apply these for the detector

shielding structure of 100mm W × 200mm H dimension for residual stress instrument and for exterior wall shielding of the 2-D PSD chamber of the HANARO small angle neutron spectrometer.

We will apply the CdS for colouring PE or epoxy blocks and the CdS coloured PE could be fabricated only when HDPE(High Density PolyEthylene) were injection-molded in the company. As a separate project collaborating with a PE injection molding company, PE with boron materials for effective shielding of both fast and thermal neutrons for thick plates or bricks will be tried, which have been very expensive and should be ordered in big volumes of 2-30k USD quantity.

## 목 차

|   |    |
|---|----|
| 제 1 장 서 론 .....   | 13 |
| 제 2 장 에폭시 성형 이론 .....   | 15 |
| 제 1 절 에폭시 수지 .....  | 15 |
| 제 2 절 에폭시 수지의 경화 .....  | 16 |
| 1. 자동 경화반응 (-OH에 의한 경화).....                                  | 16 |
| 2. 아민류에 의한 경화.....  | 16 |
| 제 3 장 에폭시 차폐체 시료제작 및 차폐성능 평가.....                             | 18 |
| 제 1 절 서 론 .....   | 18 |
| 제 2 절 재 료 .....   | 19 |
| 제 3 절 시료제작 공정 및 차폐성능 평가 결과.....                               | 19 |
| 1. 동양에폭시 + 카드뮴 안료 (DE-Cd) .....                               | 19 |
| 2. 동양에폭시 / 국도에폭시 + Borax (DE-B/KE-B).....                     | 21 |
| 3. 국도에폭시 + Borax / B <sub>4</sub> C(KE-BC) / 카드뮴 안료(KE-Cd) .. | 21 |
| 4. 국도에폭시 + Borax.....   | 22 |
| 5. PE + CdS .....   | 24 |
| 6. 투과율 측정 방법 .....  | 24 |
| 제 4 절 고 찰.....  | 25 |
| 1. Borax를 분쇄하여 사용할 때의 이점 .....                                | 25 |
| 2. 차폐성능 대 가격 경쟁력이 가장 우수한 차폐재료 .....                           | 26 |
| 3. Borax의 함량과 작업용이성 및 차폐성능과의 관계.....                          | 27 |
| 4. 에폭시 주체와 경화제의 최적 조합.....                                    | 28 |
| 5. 카드뮴 함량과 차폐성능의 관계.....                                      | 30 |
| 6. 카드뮴 안료에 의한 착색 .....  | 31 |
| 제 5 절 요 약 .....   | 31 |
| 제 4 장 결 론.....  | 32 |
| 부록. Epoxy 성형 차폐 시험편 .....                                     | 33 |

## 표 목 차

|   |    |
|---|----|
| 표 1. 실험 재료.....   | 18 |
| 표 2. 동양에폭시 + 카드뮴 안료 (DE-Cd) 시료제작 및 중성자 투과율  | 20 |
| 표 3. 동양에폭시 / 국도에폭시 + Borax (DE-B/KE-B) 시료제작 및 중<br>성자 투과율 .....                       | 20 |
| 표 4. 국도에폭시 + Borax / B <sub>4</sub> C(KE-BC) / 카드뮴 안료(KE-Cd) 시료제<br>작 및 중성자 투과율 ..... | 22 |
| 표 5. 국도에폭시 + Borax 시료제작 및 방사선투과율 .....  | 23 |
| 표 6. PE + CdS 시료제작 및 중성자 투과율 .....  | 23 |

## 그림 목 차

|   |    |
|---|----|
| 그림 1. 에폭시기 .....                              | 15 |
| 그림 2. 에폭시 주제의 제법 .....                        | 15 |
| 그림 3. 자동경화반응 .....                            | 16 |
| 그림 4. 아민화합물과의 경화반응.....                       | 17 |
| 그림 5. Borax 분쇄유무와 차폐성능과의 관계 (시료두께 1.2cm)..... | 25 |
| 그림 6. Borax와 B <sub>4</sub> C의 차폐성능 비교 .....  | 26 |
| 그림 7. Borax 함량과 중성자 투과율과의 관계.....             | 27 |
| 그림 8. Boron PE와 에폭시 차폐체 시료의 차폐성능비교.....       | 29 |
| 그림 9. 카드뮴 함량과 차폐성능과의 관계 .....                 | 30 |

# 제 1 장 서 론

중성자 분광장치를 개발하는 과정에는 다양한 차폐재료와 이를 적절하게 조합하여 구사한 차폐체, 즉 차폐 구조물이 필요하다. 이들 차폐재들은 기본적으로는 원자로 방사선의 감마선을 차폐해야 하며, 고속중성자부터 열중성자까지 넓은 스펙트럼의 중성자를 효율적으로 차폐해야 한다.

감마선 차폐에는 익히 알고 있는 납(lead, Pb)과 같은 차폐재료가 있으나 분광장치의 차폐체는 차폐재로서의 기능과 함께 많은 경우 중성자 분광장치의 무거운 차폐체를 지지하기 위한 구조재로서의 기능도 동시에 해야 하는 경우가 많다. 이에 따라 수평공 선단부터 단색화 결정을 거쳐 시료대와 검출기까지 내려가면서 위치별, 목적별, 기능별로 중콘크리트(heavy concrete 3.5~5.3g/cc), 철재, 납구조물 및 납벽돌 등이 다양하게 구사된다.

중성자 차폐의 기본적인 원리는 저속 중성자일수록 흡수 단면적이 크므로 속중성자를 감속시켜 가면서 흡수하는 것이다. 속중성자를 물이나 파라핀, 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 같이 수소가 많은, 즉 수소 밀도가 높은 물질에 입사시키면 산란되면서 감속되어 흡수되기 쉬운 저속 중성자, 열중성자로 바뀌는데 이를 열중성자 흡수 단면적이 높은 붕소(boron, B), 카드뮴(cadmium, Cd), 가돌리늄(gadolinium, Gd) 등과 같은 원소를 함유한 물질을 이용하여 흡수함으로써 차폐한다.

이들은 중성자 흡수 재질로서 뿐만이 아니라 대부분의 경우 구조재로서도 기능을 해야 하는데 특히 PE는 훌륭한 구조재이며, PE에 붕소를 분산시킨 borated PE(B-PE)는 가공성, 차폐성, 외관의 미려함 등 여러 면에서 최적의 차폐 재료이다. Cd는 부드러운 금속재료이며 아연 제련과정의 부산물로 Pb와 함께 생산된다. 우리 나라에는 세계 최대의 아연 제련 업체인 고려아연이 있어 Cd, Pb를 쉽게 구할 수 있으나 현실적으로 이들이 공해 물질이어서 최근에는 이들을 후처리하여 일정 규격의 박판재나 봉상 재질로 만드는 국내 업체가 거의 없어 고려아연 등에서 일본, 독일 등 해외에 수출하거나 러시아 등에서 제조한 것을 고가에 수입하여야 한다.

분광장치를 개발할 경우에는 이들 고형체들이 여러모로 편리하고 한편으로는 국내 PE 산업의 생산량이 세계적이어서 쉽게 구할 수 있다. 그러나 우리의 경우 처럼 10~100mm 두께의 판재를 선반, 밀링, 구멍 뚫기 등 대형 기계 가공할 때에도 응력 변형이 적도록 적절한 열처리 공정을 거친 PE 판재 등은 국내 규격이 미흡하여 구매할 때마다 재질의 불균일성으로 어려움을 겪고 있다. B-PE(또는

Gd-PE) 등은 boron을 PE에 분산시키는 기술의 어려움으로 인하여 아직 국내 생산이 안되며, 해외에 주문 생산하는 관계로 고가이며 한번 주문에 최소 2-3만 불 이상의 고액 주문이 되어야 하는 어려움이 있다.

이들 알루미늄, 철재, 카드뮴(Cd), 납(Pb) 등의 금속재료와 PE, B-PE 등 고분자 구조재와는 달리 기계 가공을 하지 않거나 못하는 경우, 즉 비정형 구조물을 만들거나 복잡한 내부 공간의 충전, 한정된 부피에 차폐 성능을 최대한 높여 정밀 제어해야 할 경우 등 정교한 중성자 차폐장치나 구조물을 제작할 경우는 현장에서 차폐체 성형을 해야 하는 경우가 많이 있다. 그간 오랫동안 여러 번의 시도에도 장기간 안정성을 갖는 성형 방법을 기술적으로 만족스럽게 해결하지 못해 어려움을 겪었으나 이번에 epoxy 재료에 중성자 차폐재를 혼합, 성형하는 기법에 상당한 성과를 얻어 이를 기술보고서로 작성하게 되었다.

이번 기술 습득으로 높은 인건비에 의한 고가의 기계 가공을 하지 않고 비정형 부분, 임의 성형, 내부 공간 충전 등으로 처리할 수 있는 부분이 많아 차폐 구조물 제작 비용도 크게 절감할 뿐만 아니라 요구되는 차폐 성능을 적은 부피나 얇은 두께로 해결할 수 있어 구조물 설계에서부터 외관, 무게, 부피 등에서 보다 최적화된 분광장치를 개발하는데 도움이 될 것이다.

## 제 2 장 에폭시 성형 이론

### 제 1 절 에폭시 수지

분자의 화학구조 내에 에폭시기(그림 1)를 포함하는 물질을 총칭하여 에폭시 수지라고 명명한다. 에폭시 성형은 이들 에폭시 수지내의 에폭시기와 화학반응을 일으킬 수 있는 물질을 혼합한 후 장시간 방치하여 반응을 완결 시키는 것이다. 반응이 완결되면 성형물은 3차원의 망상구조를 형성하여 경화된다.

에폭시기를 포함하고 있는 에폭시 수지는 에폭시 주제라고 명명되고 이들과 반응을 일으키는 물질은 경화제라는 명칭으로 통용되고 있다. 대표적인 에폭시 주제는 그림 2와 같이 비스페놀A와 에피클로로히드린을 가성소다(NaOH)의 존재하에 가열하여 공업적으로 얻은 것이며, 현재 사용되는 에폭시 수지 중 80%를 차지한다. 비스페놀A 1몰에 대하여 에피클로로히드린을 5몰 이상 과량 사용하면 n=0의 액상 에폭시 주제가 얻어지고 에피클로로히드린의 몰수를 감소시키면 n값은 증가하여 황색의 고상 에폭시 주제가 된다.

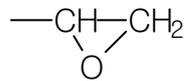


그림 1. 에폭시기

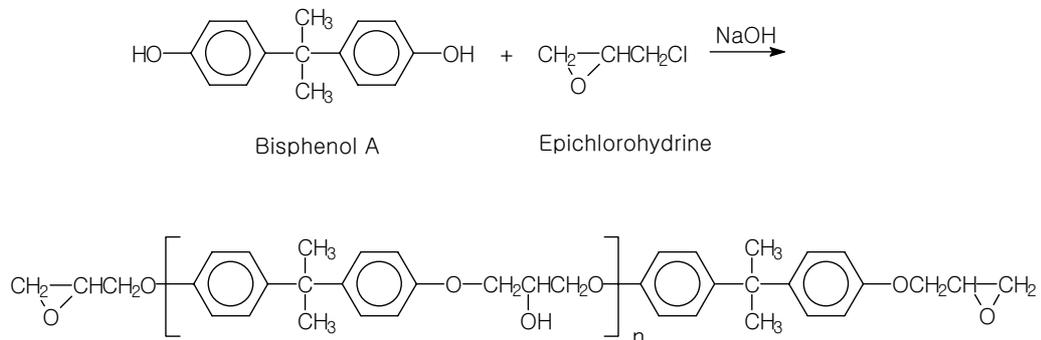


그림 2. 에폭시 주제의 제법

## 제 2 절 에폭시 수지의 경화

### 1. 자동 경화반응 (-OH에 의한 경화)

에폭시 주제는 그림 2의 구조식에서 나타나는 바와 같이 구조 내에 수산기를 포함한다. 따라서 에폭시 주제에 소량의 촉매를 첨가하면 그림 3과 같이 경화제 없이 자동적으로 경화반응이 진행하여 3차원 망상구조를 가지게 된다.

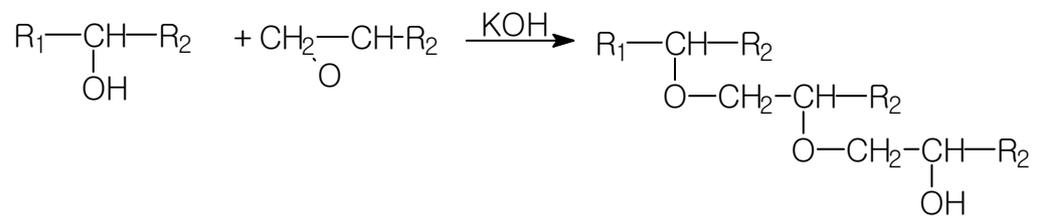


그림 3. 자동경화반응

### 2. 아민류에 의한 경화

에폭시 주제와 아민류의 화합물을 혼합하면 그림 4와 같은 화학반응에 의하여 3차원 망상구조를 형성하며 경화된다. 아민류의 화합물은 에폭시 경화제로 주로 사용되는 물질로서 그 사용량은 3차원화한 후에 경화물의 물성에 크게 영향을 준다. 에폭시 주제와 경화제의 혼합비 조절이 잘못되거나 혼합시 완전한 혼합이 이루어지지 않아 미반응물이 남으면 경화물은 연하게 된다.

에폭시 주제와 경화제의 혼합비는 경화제 중의 아민기에 결합되어 있는 활성 수소원자 한 개가 한 개의 에폭시기와 반응되도록 조절되어야 한다. 혼합비의 계산 예는 다음과 같다. 에폭시 값이라는 것은 에폭시 주제 100g중에 에폭시기가 몇 몰 존재하는가를 나타내는 값이다. 만일 에폭시 값이 0.3이고 디에틸트리아민(활성수소수 5, 분자량 103)을 경화제로 사용할 때에는  $(103/5) \times 0.3 = 6.18g$  이 에폭시 주제 100g에 대한 아민 경화제의 첨가량이 된다.





## 제 2 절 재 료

에폭시 수지는 국산 에폭시 제품 중 저가형 기본 재료로 사용되고 있는 국도화학 제품과 고가형 고성능 재료인 동양에폭시 제품을 이용하였다. 에폭시 성형시 혼합되는 방사선 차폐물질로는 저가이지만 Boron 함량이 적은 Borax, 고가이며 Boron 함량이 큰 B<sub>4</sub>C, 에폭시에 착색 효과를 부여하면서 방사선 차폐효과를 발휘하는 CdS를 각각 사용하였다. 각 재료의 명칭 및 특성은 표 1과 같다.

## 제 3 절 시료제작 공정 및 차폐성능 평가 결과

### 1. 동양에폭시 + 카드뮴 안료 (DE-Cd)

동양에폭시사의 주제/경화제에 카드뮴계 안료를 혼합하여 에폭시 차폐체 시료를 제작하였다. 각각의 혼합 무게비와 카드뮴 함량은 표 2와 같다. 카드뮴 안료는 모두 5wt%로 동일하게 조정하였다. DE-C0는 카드뮴이 혼합되지 않은 에폭시만으로 이루어진 성형물이며, 차후 카드뮴만의 효과를 계산하기 위해 기본재료로 제작되었다.

각각의 물질을 정량 후 혼합하였으며, 충분히 혼합한 후에 아크릴 성형용기에 주입하여 24시간 경화시켰다. 먼저 에폭시 주제와 경화제를 정량하여 용기에 넣고, 다음에 카드뮴 안료를 투입하였다. 혼합하여 성형틀에 부은 후 경화초기 2시간 동안은 발생하는 기포를 토치를 이용해서 수시로 제거하였다. 경화 후 아크릴 용기를 파쇄하여 결과물을 얻었다. Borax가 섞이지 않은 DE-Cd0는 아크릴 용기에서 분리시키기가 어려우므로 사전에 아크릴 용기에 그리드 등의 이형체를 도포한 후 성형용기로 사용하였다. 에폭시 재료와 카드뮴 화합물의 혼합비 계산 예는 다음과 같다.

*혼합비 계산 예 1)*

DE-Cd2

$$95X(\text{에폭시 무게}) / 1.2(\text{에폭시 비중}) + 5X(\text{카드뮴 무게}) / 4.8(\text{카드뮴 비중}) \\ = 4.2 \times 4.2 \times 3.14 \times 1.2 = 66.5 \text{ cm}^3$$

(성형 용기 체적 : 반지름 4.2, 두께 1.2cm 원판형) X = 0.83

따라서 에폭시 무게 = 95X = 78.8 g

에폭시 주제 : 경화제 = 10 : 3 = 60.6g : 18.2g

카드뮴 안료량 = 5X = 4.15g

카드뮴 함량 = [(4.15 × 0.847)/(78.5+ 4.15)] × 100=3.9%

\* 실험 공정상 계산치와 실제 혼합량은 다소 오차가 있을 수 있음.

표 2. 동양에폭시 + 카드뮴 안료 (DE-Cd) 시료제작 및 중성자 투과율  
(B : sample을 설치하지 않았을 때의 monitor count)

|        | 에폭시 주제 (g) | 에폭시 경화제 (g) | 카드뮴 레드 (g) | 카드뮴 옐로 (g) | 카드뮴 함량 (wt%) | M/150s (B=405,191) | 중성자 투과율 (%) |
|--------|------------|-------------|------------|------------|--------------|--------------------|-------------|
| DE-Cd0 | 62.0       | 18.5        | -          | -          | 0.0          | 155,637            | 38.4        |
| DE-Cd1 | 62.0       | 18.5        | -          | 4.2        | 3.9          | 31,987             | 7.9         |
| DE-Cd2 | 62.0       | 18.5        | 4.2        | -          | 3.9          | 32,057             | 7.9         |
| DE-Cd3 | 62.0       | 18.5        | 2.1        | 2.1        | 3.9          | 31,551             | 7.8         |

표 3. 동양에폭시 / 국도에폭시 + Borax (DE-B/KE-B) 시료제작 및 중성자 투과율  
(B : sample을 설치하지 않았을 때의 monitor count)

|       | 동양 주제 (kg) | 동양 경화제 (kg) | 국도에폭시 YD-128 & G-0331 (kg) | Borax 함량 (wt%) | Boron 함량 (wt%) | M/150s (B=405,191) | 중성자 투과율 (%) |
|-------|------------|-------------|----------------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------|
| DE-B1 | 3.1        | 0.9         | -                          | 50             | 3.4            | 1,737              | 0.4         |
| DE-B2 | 3.1        | 0.9         | -                          | 50             | 3.4            | 1,399              | 0.3         |
| KE-B7 | -          | -           | 4.0                        | 50             | 3.4            | 1,349              | 0.3         |

## 2. 동양에폭시 / 국도에폭시 + Borax (DE-B/KE-B)

에폭시에 Borax 화합물의 혼합 성능을 평가하기 위해서 동양에폭시와 국도 화학으로부터 구입한 에폭시에 Borax를 분말형태로 분쇄한 시료와 분쇄하지 않은 시료를 혼합하였다.

동양에폭시의 경우 주제와 경화제의 혼합비는 10:3이고 국도화학 제품의 경우는 7:3의 혼합비를 이용했다. Borax함량은 50wt%로 조절하였으며 DE-B1은 분쇄한 Borax를, DE-B2와 KE-B7는 분쇄하지 않은 Borax를 혼합한 것이다.

## 3. 국도에폭시 + Borax / B<sub>4</sub>C(KE-BC) / 카드뮴 안료(KE-Cd)

국도에폭시(주제 YD127, 경화제 G-0331)에 Borax와 카드뮴 안료를 각각 40wt% 혼합하여 에폭시 차폐체 샘플을 제작하였다. 각각의 혼합 무게비와 Boron 및 카드뮴 함량은 표 4와 같다.

특히 KE-B2샘플의 경우 에폭시와 Borax로 이루어진 성형물에 소량의 안료를 첨가했을 때 착색 정도를 판단하기 위하여 1 wt%의 카드뮴 안료가 첨가되었다. 그리고 KE-B0는 Borax가 혼합되지 않은 에폭시만으로 이루어진 성형물이며 차후 Borax만의 효과를 계산하기 위해 기본재료로 제작되었다. 혼합비 계산에는 다음과 같다.

혼합비 계산 예 2)

KE-B2

$$50X(\text{에폭시 무게}) / 1.2(\text{에폭시 비중}) + 50X(\text{Borax 무게}) / 1.6(\text{Borax 비중}) \\ = 4.2 \times 4.2 \times 3.14 \times 1.2 = 66.5 \text{ cm}^3$$

(성형 용기 체적 : 반지름 4.2, 두께 1.2cm 원판형) X = 0.912

따라서 에폭시 무게 = 50X = 45.6 g

에폭시 주제 : 경화제 = 7 : 3 = 31.9g : 13.5g

Borax량 = 50X = 45.6g

표 4. 국도에폭시 + Borax / B<sub>4</sub>C(KE-BC) / 카드뮴 안료(KE-Cd) 시료제작 및  
 증성자 투과율 (B : sample을 설치하지 않았을 때의 monitor count)

|       | 주제<br>YD127<br>(g) | 경화제<br>G0331<br>(g) | Borax<br>(g) | B <sub>4</sub> C<br>(g) | CdS<br>(g) | 함량<br>(wt%)      | M/150s<br>(B=<br>368,205) | 증성자<br>투과율<br>(%) |
|-------|--------------------|---------------------|--------------|-------------------------|------------|------------------|---------------------------|-------------------|
| KE-B0 | 57.1               | 24.5                | -            | -                       | -          | 0.0              | 29,230                    | 7.9               |
| KE-B1 | 32.6               | 14.0                | 46.6         | -                       | -          | B 7.4            | 1,390                     | 0.4               |
| KE-B2 | 32.6               | 14.0                | 46.6         | -                       | 0.93       | B 7.4<br>Cd 0.85 | 1,306                     | 0.35              |
| KE-BC | 38.6               | 16.6                | -            | 55.2                    | -          | B 39.0           | 610                       | 0.17              |
| KE-d1 | 49.0               | 21.0                | -            | -                       | 46.8       | Cd 31.2          | 1,117                     | 0.3               |

#### 4. 국도에폭시 + Borax

국도에폭시(주제 YD127, 경화제 G-A0432)에 Borax를 각각 25, 50, 60 wt% 혼합하여 에폭시 차폐체 샘플을 제작하였다. 각각의 혼합 무게비와 Boron 함량은 표5와 같다.

이 실험은 G-0331보다 점도가 낮은 G-A0432 경화제를 사용하여 작업 공정의 용이성을 평가함과 동시에 Borax의 혼합량을 변화시킴으로써 Boron 함량의 변화에 따른 차폐성능의 변화를 조사하고자 하는 목적으로 실시되었다. 혼합비 계산예는 아래와 같다.

혼합비 계산 예 3)

KE-B4

$$75X(\text{에폭시 무게}) / 1.2(\text{에폭시 비중}) + 25X(\text{Borax 무게}) / 1.6(\text{Borax 비중}) = 44.3 \text{ cm}^3$$

(성형 용기 체적 : 반지름 4.2, 두께 0.8cm 원판형), X = 0.57

따라서 에폭시 무게 = 75X = 42.5 g

에폭시 주제 : 경화제 = 7 : 3 = 29.8g : 12.8g

Borax량 = 25X = 14.3g

표 5. 국도에폭시 + Borax 시료제작 및 방사선투과율  
(B : sample을 설치하지 않았을 때의 monitor count)

|       | 에폭시 주제<br>YD127<br>(g) | 에폭시 경화제<br>G-A0432<br>(g) | Borax<br>(g) | Borax<br>함량<br>(wt%) | Boron<br>함량<br>(wt%) | M/150s<br>(B=368,205) | 중성자<br>투과율<br>(%) |
|-------|------------------------|---------------------------|--------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| KE-B4 | 33.6                   | 14.4                      | 16.0         | 25                   | 3.7                  | 22,635                | 6.1               |
| KE-B5 | 22.0                   | 9.4                       | 31.3         | 50                   | 7.4                  | 7,047                 | 1.9               |
| KE-B6 | 19.7                   | 8.5                       | 42.4         | 60                   | 8.9                  | 7,981                 | 2.2               |

표 6. PE + CdS 시료제작 및 중성자 투과율  
(B : sample을 설치하지 않았을 때의 monitor count)

|          | PE<br>(g) | CdS<br>(g) | CdS<br>(wt%) | Cd<br>(wt%) | M/150s<br>(B=265,583) | 투과율<br>(%) |
|----------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------------------|------------|
| PE-Cd0   | 15.76     | 0.00       | 0            | 0           | 66,135                | 24.9       |
| PE-Cd1   | 15.76     | 0.16       | 1            | 0.85        | 64,978                | 24.5       |
| PE-Cd3   | 15.76     | 0.49       | 3            | 2.54        | 55,808                | 21.1       |
| PE-Cd6   | 15.76     | 1.01       | 6            | 5.08        | 45,926                | 17.3       |
| PE-Cd10  | 15.76     | 1.76       | 10           | 8.47        | 41,703                | 15.7       |
| Boron PE |           |            |              |             | 9,237/405,191         | 2.3        |

## 5. PE + CdS

PE에 카드뮴 안료의 함량을 변화시켜가며 차폐체 샘플을 제작하였다. 실험은 우수한 방사선 차폐 물질(속중성자에 대한 감속제 기능을 하는)인 PE에 카드뮴 화합물을 첨가하였을 경우 방사선 차폐성능의 향상정도를 평가하기 위하여 실시되었다. 각각의 혼합비와 함량은 다음과 같다.

*혼합비 계산 예 4)*

PE-Cd6

(성형용기체적= $3 \times 3 \times 0.6 \times 3.14=16.96\text{cm}^3$  : 반지름 3cm, 두께 0.6cm 원판형)

PE 량 =  $16.96 \times 0.929 = 15.76\text{g}$ , CdS 량 :  $X/(X+ 15.76) = 0.06$

$X = 1.01\text{g}$

## 6. 투과율 측정 방법

투과율 측정은 ST2 수평공에 설치되어 있는 HRPD의 빔 출구에서 하였다. 단색기를 지나 monitor 검출기가 설치되어 있는 사이에 수동식 신속 셔터(quick shutter)가 있는데, 이 지역을 이용하여 epoxy 차폐체들을 설치하고, 모니터 값을 측정하였다. 직사각형 빔 단면적을 가지므로 아래 위를 Cd 판으로 가리고 시험 제작한 둥근 원판형의 epoxy 차폐체들로 충분히 가릴 수 있는 만큼만 남겨둔 채 직사 빔에서의 모니터 값을 기준으로 차폐체들을 설치하고 측정한 값을 투과도로 정의하였다.

실제로는 중성자 빔이  $1.83\text{\AA}$  단색 중성자 빔이고, 이 속에는 속중성자 성분이 상당하다는 것을 사전에 알고 있다. Epoxy 성형 차폐체를 쓰고자 하는 용도, 즉 속 및 열외 중성자가 많은 환경에서의 차폐라는 목적상 이 위치가 포괄적인 의미에서 투과도 측정에 적합하다고 판단하였다.

실제 사용하고자 하는 곳의 방사선과 사용하고자 하는 중성자 파장 범위, 사용 지역의 배경반사의 특성, 장치에 사용된 다른 차폐재와 차폐체 내부 구조와 물질 구성 등이 2차 방사선 등 차폐 설계에 중요하므로 이를 종합적으로 판단하여야 한다.

## 제 4 절 고 찰

### 1. Borax를 분쇄하여 사용할 때의 이점

Borax는 구입상태에서 입자 직경이 1mm 이상이므로 이 상태로 에폭시에 혼합할 때 기포발생 증가와 혼합성능 저하의 문제점이 있다. 따라서 이들 문제점과 차폐성능을 비교하여 최적의 작업공정을 도출하기 위한 실험을 실시하였다. 실험결과는 표3과 그림5에 나타냈다.

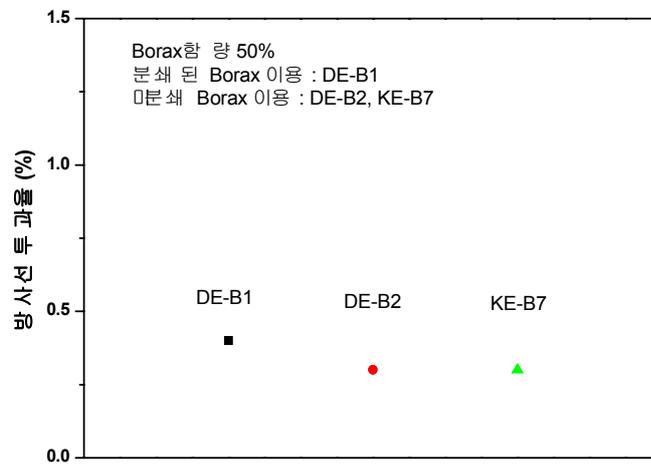


그림 5. Borax 분쇄유무와 차폐성능과의 관계 (시료두께 1.2cm)

실험 결과에 의하면 Borax를 분쇄하여 사용한 DE-B1의 경우 0.4%의 투과율을 보이고 분쇄하지 않고 사용한 DE-B2, KE-B7의 경우 0.3%의 투과율을 보이고 있다. 즉 Borax의 입자크기는 차폐성능에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 나타난다.

입자의 크기가 작을 경우 혼합과정에서 발생하는 기포의 양을 줄일 수 있는 이점이 있으나 작은 크기로 분쇄하는 과정에 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서 Borax는 구입한 상태 그대로 사용하는 것이 유리하다고 판단된다. 제작된 샘플 전반에 걸쳐 살펴볼 때 분쇄하지 않은 상태로 제작한 샘플은 성형물 내부에 기포가 잔류했다. 특히 국도화학제품을 사용할 경우 모든 경우에 있어서 기포발생이 확인되었다.

기포의 크기는 점도와 비례관계에 있어서 점도가 증가하고 Borax의 함량이 증가할수록 기포의 크기는 증가했다. 국도화학 제품을 사용할 경우 기포발생은 필연적일 것으로 보인다. 그러나 성형물의 물성은 문제 없이 사용 가능할 정도인 것으로 판단된다.

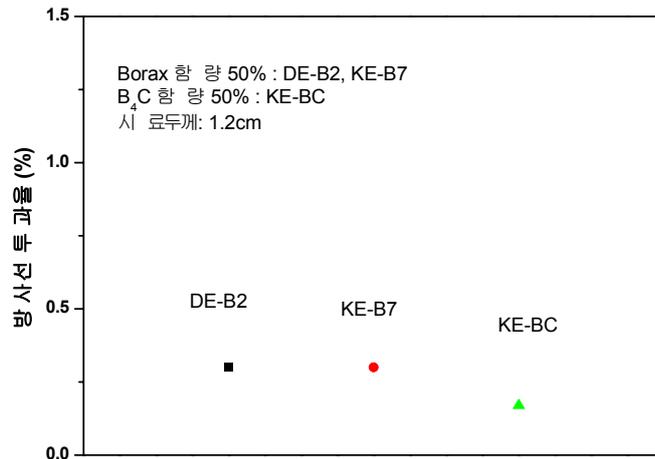


그림 6. Borax와 B<sub>4</sub>C의 차폐성능 비교

## 2. 차폐성능 대 가격 경쟁력이 가장 우수한 차폐재료

가격경쟁력의 면에서 고려해 볼 때 카드뮴 안료는 단가가 30,000₩/kg으로 매우 고가이므로 다량 혼합이 불가능하며 단지 차폐체에 착색 효과를 내기 위해서만 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 Borax와 B<sub>4</sub>C만을 대량 사용할 수 있는 차폐재료로서 고려할 수 있다.

이 두 재료의 차폐 성능은 표3과 표4를 이용하여 비교해 볼 수 있다. 표3의 DE-B2와 KE-B7은 각각 동양 에폭시와 국도화학 에폭시에 Borax를 50% 혼합한 것들이고, 0.3%의 투과율을 보이고 있다. 이와 비교하여 표4의 KE-BC는 국도화학 에폭시에 B<sub>4</sub>C를 50% 혼합한 것으로서 0.17%의 투과율을 보이고 있다. 즉 동일한 50% 함량으로 에폭시에 혼합되었을 때 Borax와 B<sub>4</sub>C는 차폐성능에서 현저한 차이는 보이지 않고 있다. 따라서 가장 저렴한 재료인 **Borax를 주 차폐 물질로 사용하는 것이 바람직하다.**

### 3. Borax의 함량과 작업용이성 및 차폐성능과의 관계

Borax의 함량과 작업 용이성의 관계는 사용되는 에폭시 재료의 점도와 밀접한 관계가 있으므로 여기서는 에폭시의 한계 투입 양만을 언급할 수 있다. 표5는 에폭시에 Borax의 양을 변화시켜가며 작업한 결과이다. 작업과정에서 Borax의 양이 50%를 초과하면 작업이 상당히 어려움을 발견하였다. 이 작업은 사용되는 에폭시 재료 중 가장 점도가 낮은 주제와 경화제의 조합을 이용하였다. 그런데도 불구하고 위와 같은 결과를 보인 것은 에폭시 차폐체에 혼합되는 Borax의 한계량은 50%정도임을 나타낸다.

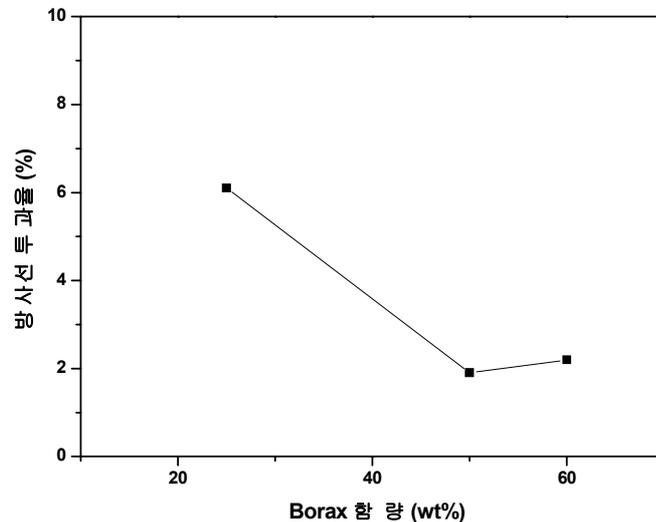


그림 7. Borax 함량과 중성자 투과율과의 관계

그림7는 표5를 도식화한 것이다. 그림7에서 볼 수 있듯이 Borax의 함량이 25%(KE-B4)에서 50%(KE-B5)로 증가하였을 때 투과율은 6.1%에서 1.9%로 세배정도 감소함을 알 수 있다. 반면 Borax의 함량이 50%에서 60%(KE-B6)로 증가하였을 때 투과율은 1.9%에서 2.2%로 증가하였다. 이는 원자로 flux의 변화나 샘플내 Borax분포의 불균일성, 샘플내 기포의 분포, 측정오차와 같은 실험적인 오차에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 이것은 한편으로는 Borax의 함량이 50%를 초과하면 작업에 어려움만 초래할 뿐 차폐성능에는 별다른 영향을 주지 않음을 보여주는 결과이기도 하다.

한편 KE-B5는 DE-B2 및 KE-B7과 동일하게 50%의 Borax가 함유된 샘플인데 투과율은 1.9%로서 DE-B2 와 KE-B7의 0.3%에 비해 높게 나타난다. 이

는 KE-B5의 샘플 두께가 0.75cm로 DE-B2 와 KE-B7의 두께 1.2cm에 비해 얇은 데서 기인한 결과이므로 KE-B5 샘플도 두께가 1.2cm일 경우 투과율이 1% 이하로 감소할 것으로 판단된다. 또한 표6에서 나타나는 두께 0.6cm Boron PE의 투과율 2.3%와 비교해볼 때 에폭시에 Borax를 50% 혼합한 샘플은 Boron PE에 필적할만한 우수한 차폐성능을 보유하고 있음을 알 수 있다. 결론적으로 두께 1~2cm, Borax 함량 40~50%인 에폭시 차폐체는 중성자 투과율을 1% 이하로 감소시킬 것으로 판단된다.

#### 4. 에폭시 주재와 경화제의 최적 조합

실제로 에폭시 차폐체를 제작하는데 있어서 고려해야 할 몇 가지 요인들을 고찰해보면 다음과 같다.

첫째, 차폐성능을 비교해보면 본 실험에서 사용된 동양 에폭시와 국도화학 에폭시 수지 제품(YD128/G-0331, YD127/G-0331) 모두 Borax 함량 50%일 때 중성자 투과율은 0.3~0.4%/1.2cm로 매우 우수했다. 그런데 Borax가 혼합되지 않은 순수한 에폭시 만으로 이루어진 샘플들을 비교해 보면 동양에폭시 제품인 표2의 DE-Cd0는 투과율이 38.4%이었고, 국도화학제품인 표4의 KE-B0는 7.9%이어서 현격한 차이가 있었다. 동양 에폭시 제품이 투과율이 높은 이유는 에폭시 재료의 특성(화학구조) 및 첨가제 (러버와 침상 충전제)의 영향으로 추측할 수 있으나 정확한 원인은 알 수 없다.

둘째, 가격경쟁력을 비교해보면 각 제품의 단가는 동양에폭시 제품의 경우 17,000W/kg이고 국도화학 제품은 3,500~3,700W/kg이므로 국도화학 제품의 가격이 4~5배 저렴하다.

셋째, 성형물의 물성을 비교해보면 동양 에폭시 제품을 사용한 샘플은 섭씨 80도에서 유지할 경우 약간의 유연성을 보이고 내충격성이 매우 우수한 것으로 나타난다. 반면 국도화학 제품의 경우 고온에서도 전혀 유연성을 보이지 않고 내충격성에 대해서는 정확히 판단할 수 없다. 현재 나타나는 물성으로는 차폐체로서 사용에 문제가 없는 것으로 판단되나 장기간 사용 시 크랙의 발생 가능성이 있는 등 장기간 물성을 확신할 수는 없다.

넷째, 작업 용이성을 고려해보면 동양 에폭시 제품의 경우 정확한 점도는 알려져 있지 않으나 주재는 대략 8,000~10,000cps, 경화제는 500~1,000cps의 점도를 가지는 것으로 판단되고 50%의 Borax를 혼합할 때에도 작업에 문제가 없는 것으로 나타난다.

국도화학 제품 중 주재인 YD128은 고점도로 작업이 용이하지 않으므로 보

다 점도가 낮은 YD-127을 주제로서 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 경화제는 중점도인 G-0331과 저점도인 G-A0432가 사용되었는데 G-A0432를 사용할 경우 점도가 너무 낮아서 50%의 Borax함량에서도 상 분리가 발생하는 것이 관찰되었다.

또한 G-A0432는 제품의 특성(화학구조)상 완전경화에 장시간을 요하고 주제와 경화제의 혼합비를 정확히 조절하지 않으면 성형물의 물성이 매우 약화되는 것이 관찰되었다. 그리고 경화된 성형물은 Hardness는 매우 우수하나 Toughness는 약해서 외부의 충격에 의해서 쉽게 파쇄되는 단점이 있는 것이 관찰되었다.

이와 비교하여 중점도인 G-0331은 YD-127 및 50% Borax와 혼합할 경우 혼합작업이 아주 용이한 것은 아니지만 경화된 성형물은 깨끗한 외관과 사용 가능한 물성을 보였다. 성형물의 표면은 아크릴 용기에 접촉했던 면은 아주 만족스러운 외관을 보인 반면 공기와 접촉한 면은 기포 흔적이 있는 등 다소 불만족스러웠다. 따라서 이 조합으로 성형할 때에는 초기 경화단계에서 토치로 기포를 제거해주는 공정을 세밀히 할 필요가 있다. 또한 성형물을 제작할 때에 공기와 접촉하는 면이 차후에 외부에서 보여지는 면이 되지 않도록 배려하는 것이 필요하다. 그리고 Borax를 혼합한 성형물은 성형틀과의 분리가 용이하므로 깨끗한 표면을 가진 성형물을 사용하고 그리즈 이외의 분사형 이형제를 사용하면 외관이 우수한 성형물을 제작할 수 있다.

결론적으로 차폐체 제작에 관련된 여러가지 요인을 고려해볼 때 주제로서는 국도화학의 YD-127을 경화제로는 국도화학의 G-0331을 사용하여 에폭시 차폐체를 제작하는 것이 최적의 조건일 것으로 판단된다.

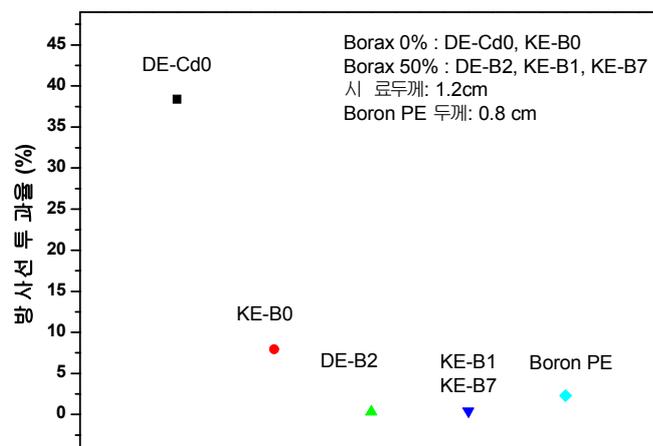


그림 8. Boron PE와 에폭시 차폐체 시료의 차폐성능비교

## 5. 카드뮴 함량과 차폐성능의 관계

표2의 DE-Cd와 표4의 KE-Cd는 에폭시에 각각 5%와 40%의 CdS를 혼합한 샘플이고 투과율은 각각 7.9%와 0.3%이었다. 이 결과에서 보여지는 바와 같이 우수한 차폐성능을 구현하기 위해서는 에폭시에 수 십%의 카드뮴 안료를 혼합해야 하는데 고가이므로 이는 바람직하지 않다.

표6은 PE에 카드뮴 안료를 혼합한 결과이고 카드뮴 함량이 증가할수록 투과율은 감소하는 경향을 보여준다. 반면에 성형물의 물성은 반비례하게 감소해서 CdS가 10%함유된 PE-Cd10의 경우 외부의 강한 충격에 의해 크랙이 발생할 정도이었다. 이와 유사하게 에폭시에 CdS를 40% 혼합한 KE-Cd의 경우는 외부의 충격에 쉽게 분쇄되는 결과를 보였다. 따라서 적절한 물성을 구현하며 혼합될 수 있는 카드뮴안료의 양은 10% 이하일 것으로 판단된다.

카드뮴 함량 10%이하의 범위에서 카드뮴 안료의 차폐효과는 우수하지는 않은 것으로 나타나고 투과율은 15~25%의 범위에 있다. 이는 샘플의 두께가 0.6cm로 비교적 얇은 원인도 있으나 같은 두께의 Boron PE의 투과율 2.3%와 비교할 때 현저하게 높은 수치인 것이 사실이다. 따라서 PE에 카드뮴 안료만을 혼합한 성형물을 차폐체로 사용하는 것은 권장할 만하지 않다.

그러나 표4의 KE-B1과 KE-B2의 비교에서 보여지듯이 카드뮴 안료를 미량 첨가하면 차폐성능이 향상됨과 동시에 착색의 효과를 나타낼 수 있으므로 착색제로서 미량 사용은 권장할 만하다.

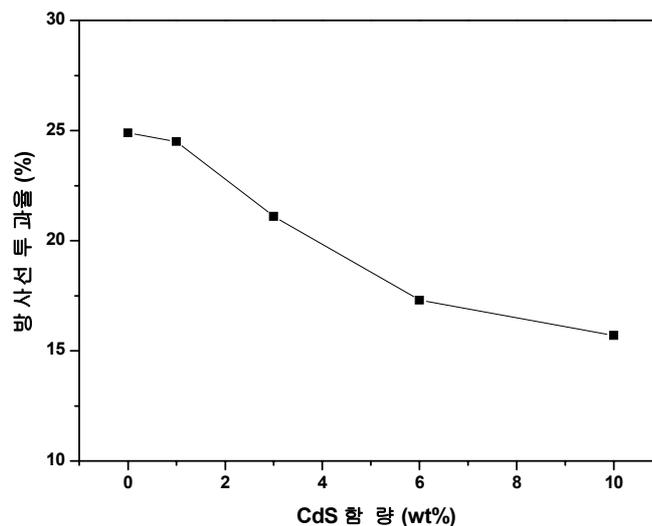


그림 9. 카드뮴 함량과 차폐성능과의 관계

## 6. 카드뮴 안료에 의한 착색

표4의 KE-B2는 에폭시에 Borax 50%를 혼합할 때 1%의 적색 카드뮴 안료를 혼합한 샘플이다. 이 경우 소량의 안료를 섞었음에도 불구하고 전체적으로 착색효과가 현저하게 나타났다. 이때 함유된 Borax의 영향으로 전체 표면이 적색으로 나타나지는 않고 적색과 백색의 작은 조각들이 혼합된 형태로 나타났다. Borax를 함유하지 않은 에폭시나 PE만의 성형물에 안료를 혼합하였을 때에는 1%의 미량에도 뚜렷하게 착색효과를 보였다.

## 제 5 절 요약

1. 에폭시 차폐체를 제작할 때에 Borax를 주 차폐물질로 사용하는 것이 바람직하며 구입한 상태 그대로 사용하는 것이 유리하다. 이 경우 에폭시 차폐체에 혼합되는 Borax의 한계량은 50%정도이다.
2. 두께 1~2cm, Borax 함량 40~50%인 에폭시 차폐체는 중성자 투과율을 1% 이하로 감소시킬 것으로 판단되며 이는 Boron PE에 필적할 만한 우수한 차폐 성능이다.
3. 에폭시 주체로서는 국도화학의 YD-127을 경화제로는 G-0331을 사용하여 에폭시 차폐체를 제작하는 것이 비용대비 효과면에서 최적의 조건일 것으로 판단된다.
4. 카드뮴 안료는 차폐재료보다는 착색제로서 사용하는 것이 바람직하다.

## 제 4 장 결 론

중성자 차폐재의 하나로서 에폭시 성형에 의한 차폐 재료를 개발하고, 그 결과를 자세히 기술하였다. 에폭시 성형 차폐재는 비정형의 차폐 구조나 내부 충전 등 기계 가공이 어렵거나 고비용이 드는 부분에 유용하고, 효율적인 차폐를 할 수 있다.

에폭시는 폴리에틸렌과 달리 속중성자 차폐에는 효율이 떨어지지만 현장에서나 작업 상황에 맞추어 성형이 가능하고 다양한 첨가물과 중성자 차폐재를 혼합, 성형할 수 있어 우수한 차폐 성능을 갖는 구조를 만들 수 있다. 따라서 이를 기존 PE, B-PE, Cd 등의 차폐 재료와 섞어 적절히 이용한다면 우수한 차폐 성능을 확보할 수 있을 것이다.

물리적으로는 에폭시와  $B_4C$  분말을 혼합하는 것이 가장 유리하나 비용대 효과면으로는 대부분의 경우 Borax로도 충분하다. 이 때 산업적 상태의 Borax는 25kg 포대 상태로 구입할 수 있는데 굵은 가루 상태의 Borax 분말을 그대로 사용하여도 대개는 무방하다. 그러나 기포가 상대적으로 많이 발생하므로 혼합시에 보다 더 노력이 필요하다. 또는 성형 전에 진공 배기하여 사용하면 좋을 것이다. 이 경우 에폭시 차폐체에 혼합되는 Borax의 한계량은 무게비로 50%정도이다.

두께 1~2cm, Borax 함량 40~50%인 에폭시 차폐체는 중성자 투과율을 5~1% 이하로 감소시킬 것으로 판단되며 이는 Boron PE에 필적할 만한 우수한 차폐 성능이다. 물론 사용하는 곳의 주 방사선의 성격과 배경반사의 특성을 세심히 판단하여 차폐재의 조합을 선택해야 한다.

성형물의 물리적 특성만으로는 국도 에폭시 원소재를 2차 가공한 동양 에폭시의 재료가 우수하나 2-3배 이상 고가이므로, 에폭시 주제로서는 국도화학의 YD-127을 경화제로는 G-0331을 사용하여 제작하는 것이 비용대비 효과면에서 최적의 조건일 것으로 판단된다. 또한 CdS 화합물 상태의 적색 또는 황색의 안료재는 대단히 우수한 착색 성능을 보이므로 외관의 미려함이나 구분을 위한 안료로서 선택하는 것이 좋다. 또한 CdS는 PE에도 우수한 안료 착색 특성을 보이므로 1~3% 정도의 첨가로서 차폐 성능도 향상시키며 PE 백색 원소재 색에서 구분되는 적색을 만들 수 있어 재고 구분이나 재료 구분 상으로도 이용할 수 있다.

## 부록. Epoxy 성형 차폐 시험편

### 1. 동양에폭시 + 카드뮴 안료



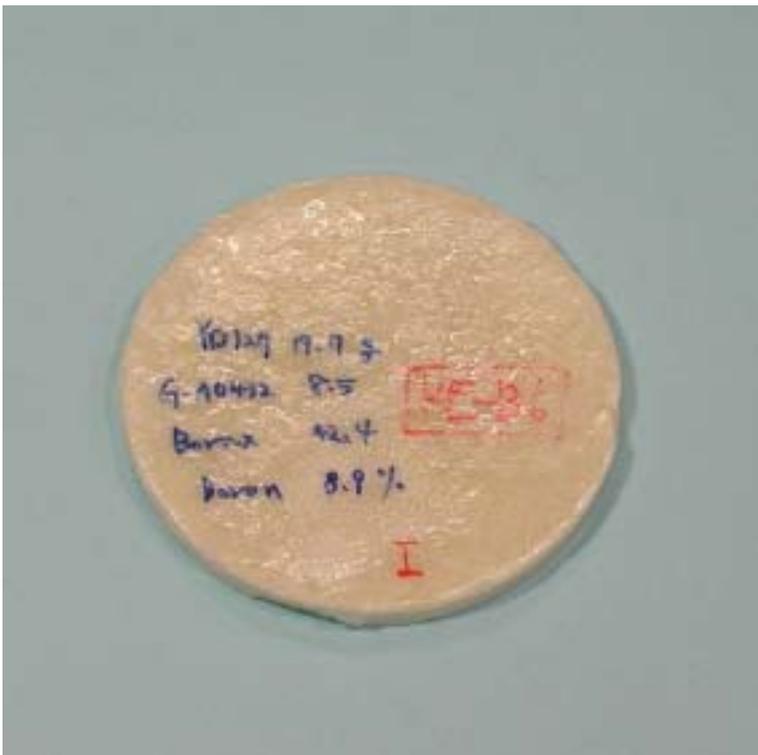
## 2. 동양 에폭시 / 국도 에폭시 + Borax



### 3. 국도에폭시 + Borax / B<sub>4</sub>C / 카드뮴 안료



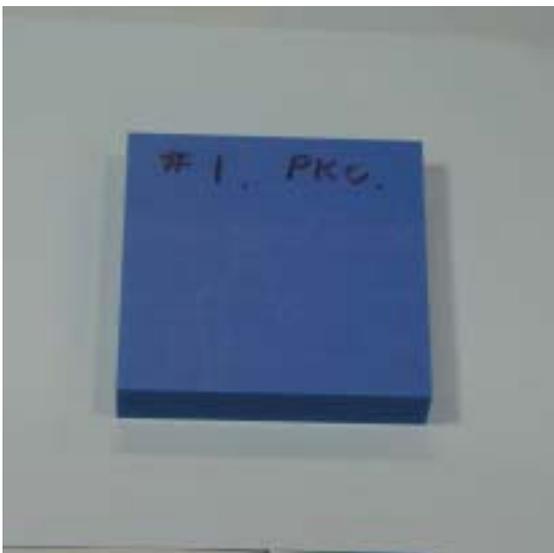
#### 4. 국도에폭시 + Borax



5. PE + CdS



6. PE plate



서 지 정 보 양 식

|  |                         |                               |                |            |                      |
|--|-------------------------|-------------------------------|----------------|------------|----------------------|
| <b>수행기관보고서번호</b>   | 위탁기관보고서번호               | 표준보고서번호                       | INIS 주제코드      |            |                      |
| KAERI/TR-1986/2001   |                         |                               |                |            |                      |
| <b>제목 / 부제</b>   |                         | 에폭시 성형에 의한 중성자 차폐재 개발         |                |            |                      |
| <b>연구책임자 및 부서명<br/>(AR,TR 등의 경우 주저자)</b>   |                         | 이창희 (하나로이용기술개발팀 중성자빔이용연구과제)   |                |            |                      |
| <b>연구자 및 부서명</b>   |                         | 박주현, 최병훈, 오화숙, 한영수            |                |            |                      |
| <b>출판지</b>   | 대전                      | <b>발행기관</b>                   | 한국원자력연구소       | <b>발행년</b> | 2001                 |
| <b>페이지</b>   | 39 p.                   | <b>도표</b>                     | 있음( V ), 없음( ) | <b>크기</b>  | 21X29cm <sup>2</sup> |
| <b>참고사항</b>  |                         |                               |                |            |                      |
| <b>비밀여부</b>  | 공개( V ), 대외비( ), __ 급비밀 |                               | <b>보고서종류</b>   | 기술보고서      |                      |
| <b>연구위탁기관</b>  |                         |                               | <b>계약번호</b>    |            |                      |
| <b>초록 (15-20줄내외)</b>   |                         |                               |                |            |                      |
| <p>알루미늄, 철재, 카드뮴(Cd), 납(Pb) 등의 금속재료와 PE, B-PE 등 고분자 구조재와는 달리 비정형 구조물을 만들거나 복잡한 내부 공간의 충전, 한정된 부피에 차폐 성능을 최대한 높여 정밀 제어해야 할 경우 등 정교한 중성자 차폐장치나 구조물을 제작할 경우에는 현장에서 차폐체를 성형해야 하는 경우가 많다. 그간 오랫동안 여러 번의 시도에도 장기간 구조 안정성을 갖는 성형 방법을 기술적으로 만족스럽게 해결하지 못해 어려움을 겪었으나 이번에 epoxy 재료에 중성자 차폐재를 혼합, 성형하는 기법에 상당한 성과를 얻어 이를 기술보고서로 작성하게 되었다.</p> <p>에폭시 성형 차폐재 기술 개발 과정에서 습득한 지식과 현장 경험을 바탕으로 중성자 분광장치 차폐구조물, 중성자 빔의 경로상의 여러 beam narrower, stopper, definer 등의 다양한 기구물 제작에 활용할 것이며 특히 기계 가공이 어려운 곡면형이나 복잡한 면 구성을 갖는 차폐 구조물의 충전, 제작을 통한 효율적인 제작에 활용한다.</p> |                         |                               |                |            |                      |
| <b>주제명 키워드<br/>(10단어내외)</b>  |                         | 중성자, 차폐재, 에폭시, 성형, 산란단면적, 투과율 |                |            |                      |

## BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

|  |   |                     |                   |
|--|---|---------------------|-------------------|
| Performing Org.<br>Report No.                      | Sponsoring Org.<br>Report No.   | Standard Report No. | INIS Subject Code |
| KAERI/TR-1986/2001                                 |   |                     |                   |
| Title / Subtitle                                   | Development of Neutron Shielding Block by Epoxy Molding   |                     |                   |
| Project Manager and Department<br>(or Main Author) | Lee, Chang-Hee (HANARO Utilization Development Team, Neutron Beam Application project)  |                     |                   |
| Researcher and Department                          | Juhyun Park, Byung-Hoon Choi, Hwasuk Oh, Young-Soo Han  |                     |                   |
| Publication Place                                  | Daejeon   | Publisher           | KAERI             |
| Page   | 39 p.   | Ill. & Tab.         | Yes( V ), No ( )  |
| Note   |   |                     |                   |
| Classified   | Open( V ), Restricted( ),<br>___ Class Document   | Report Type         | Technical Report  |
| Sponsoring Org.                                    |   | Contract No.        |                   |
| Abstract (15-20 Lines)                             | <p>Along the process of spectrometers construction or experimental arrangements, there are many times of difficult shielding requirements for not-strictly defined shapes, loading of internal volumes of complicated structures, very high shielding efficiency under limited volume or positions contrary to strict metallic structures of Al, Irons and steels, Cd, Pb and engineering plastics of PolyEthylene(PE) or borated PE(B-PE). We have failed to make good neutron shielding block of epoxy for those kinds of purposes for a long time but in this year we could achieve shielding blocks of epoxy having good mechanical properties and get to know many technical tips. This report describes the trials of Molding and its properties for neutron shielding and mechanical properties with its related understanding.</p> <p>We acquired the techniques for epoxy mixing of neutron shielding materials such as B4C, Borax, Gd2O3, CdS, BN, etc. And these techniques would be applied for neutron shielding purposes for neutron spectrometers and experimental configurations such as shielding blocks, bricks, beam narrowers and stoppers, and various objects of irregular shape.</p> |                     |                   |
| Subject Keywords<br>(About 10 words)               | neutron, shielding, epoxy, molding, crosssection, transmission  |                     |                   |