

## 사용후핵연료 수송용기에 사용될 수지계 중성자 차폐재 제조 및 특성

조 수 행 · 도 재 범 · 노 성 기 · 도 춘 호\*

한국원자력연구소, \*순천대학교 고분자공학과  
(1996년 3월 18일 접수, 1996년 5월 6일 채택)

### Fabrication and Characteristics of Resin-Type Neutron Shielding Materials for Spent Fuel Shipping Cask

Soo-Haeng Cho, Jae-Bum Do, Seung-Gy Ro, and Chun-Ho Do\*

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon 305-353, Korea  
\*Dept. of Polymer Eng., Sunch'on Univ., Sunch'on 540-070, Korea  
(Received March 18, 1996, Accepted May 6, 1996)

**요 약 :** 사용후핵연료 수송용기 등에 사용되는 수지계 중성자 차폐재, KNS-115A, 115B 및 115C를 제조하였다. 기본물질은 에폭시수지이며, 첨가제로는 폴리프로필렌, 수산화알루미늄 및 탄화붕소이다. 이들 중성자 차폐재들은 유동성이 좋아 수송용기와 같은 복잡한 구조에 사용할 수 있다. 개발된 중성자 차폐재들의 차폐능, 연소특성, 난연성, 열적 및 역학적 성질 등을 평가하기 위해 여러 특성시험을 행하였다. 개발된 중성자 차폐재(수소원자 밀도,  $6.1 \sim 6.2 \times 10^{22}$ atoms/cm<sup>3</sup>) 들은 외국인 중성자 차폐재(NS-4-FR,  $6.0 \times 10^{22}$ atoms/cm<sup>3</sup>)보다 수소원자 밀도가 높아 차폐능이 우수할 것으로 예측되며, 조사된 제반 특성들은 열분해온도; 267~270°C, 열전도도; 0.62~0.72W/m·K, 연소특성; 800°C 이하, 평균연소시간; 5초 이하, 평균연소길이; 5mm 이하, 인장강도; 2.3 ~3.0kg/mm<sup>2</sup>, 압축강도; 5.3~13.3kg/mm<sup>2</sup>, 굴곡강도; 4.4~5.4kg/mm<sup>2</sup> 등을 나타냈다.

**Abstract:** Resin-type neutron shielding materials, KNS-115A, 115B and 115C have been fabricated to be used for spent fuel shipping cask. The base material is epoxy resin, and polypropylene, aluminium hydroxide and boron carbide are added. These shielding materials offer good fluidity at processing, which makes it possible to apply this resin shield to complicated geometric shapes such as shipping cask. Several measurements were made for the shielding materials to evaluate the shielding property, combustion characteristics, fire resistance, thermal and mechanical properties. The neutron shielding ability of the shielding materials is estimated to be better than that of foreign's shielding material, NS-4-FR, due to higher hydrogen atomic density. Other properties of the shielding materials are as follows: Onset temperatures; 267~270°C, thermal conductivities; 0.62~0.72W/m·K, combustion characteristics; <800°C, ATB(average time of burning); <5sec, AEB(average extent of burning); <5mm, tensile strengths; 2.3~3.0kg/mm<sup>2</sup>, compressive strengths; 5.3~13.3kg/mm<sup>2</sup>, flexural strengths; 4.4~5.4kg/mm<sup>2</sup>.

#### 1. 서 론

방사성물질의 수송 및 저장용기, 핵연료 재처리공

장, 원자로, 액체금속로, 싸이클로트론장치 등으로부터 발생되는 중성자는 에너지가 높고 투과력이 강하며, (n, γ)반응에 의한 2차 감마선을 발생시켜 인체

에 장애를 주기 때문에 중성자를 안전하게 차폐할 재료가 절실히 요망된다. 고속중성자는 거의 같은 질량의 수소원자와의 충돌에 의하여 에너지가 흡수되면서 효과적으로 감속되기 때문에 수소원자 밀도가 높은 고분자물질이 기본소재로 많이 사용되고 있다.

사용후핵연료 수송용기의 중성자 차폐재로서 물 혹은 물과 에틸렌글리콜과 같은 혼합물들을 사용할 때는 온도상승에 따른 부피팽창을 대비한 여분의 공간이 필요하다. 이 여분의 공간은 중성자 차폐효과를 고려하여 복잡한 구조로 만들어야 하므로 수송용기의 두께 및 무게는 증가하게 되고 수송용기의 용량이 감소되는 단점이 있다. 이러한 중성자 차폐재들의 단점을 보완하기 위해 최근에는 고분자물질 및 cermet 등의 중성자 차폐재들이 미국, 일본 등지에서 개발중에 있다[1-3]. 현재 물이나, 콘크리트, 고분자물질, cermet, 붕소합금, 그리고 금속수소화물 등이 사용장소 및 조건에 따라서 중성자 차폐재로서 사용되고 있다. 고분자물질의 기본소재에 열중성자 포획단면적이 큰 붕소 혹은 붕소화합물, 리튬화합물 등이 첨가되며, 또한 각종 성능향상제가 첨가되어 제조되는 중성자 차폐재는 그 종류가 매우 다양하다[4-9]. 고분자계 중성자 차폐재들은 가공성, 차폐능, 내방사선성, 열적 성질, 기계적 성질 등이 서로 다른 특성들을 가지며, 또한 제조 가격에 있어서도 차이가 많다[5-8].

본 연구에서는 기계적 및 전기적성질, 내약품성, 내후성 및 내부식성 등이 우수한 비스페놀A형 에폭시수지와 경화제에 폴리프로필렌, 수산화알루미늄, 탄화붕소 등의 첨가제를 혼합하여 중성자를 효과적으로 차단할 수 있는 중성자 차폐재를 제조하였으며, 이들의 경화전의 유동성, 차폐능, 열적 및 역학적 특성 등을 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험재료

본 실험에서 수지계 중성자 차폐재의 기본물질로는 기계적 및 전기적성질, 내약품성 그리고 내후성 등이 우수한 상온 경화용 액상 에폭시수지를, 첨가제로는 고속 중성자 감속에 매우 효과적인 수소원자 밀도가 높은 폴리프로필렌을, 난연제로는 수산화알루미늄을, 그리고 열중성자 흡수제로는 탄화붕소를 각각 사용하였다.

기본물질로 사용된 액상의 프리 폴리머인 에폭시수

지는 비스페놀A형인 4,4'-isopropylidene diphenol epichlorohydrine resin에 butyl glycidyl ether를 혼합하여 저점도화한 수지(YD-115, 국도화학(주))이다. 이는 점도(7~11poise/25°C)가 낮아 첨가제를 많이 넣을 수 있는 잇점을 가지고 있다. 경화제로는 fatty acid, polymerized acid 및 tetraethylene pentamine의 혼합물을 탈수축합에 의해 제조한 폴리아미도아민(G-A0533, 국도화학(주))과 폴리에테르디아민인 polyoxypropylenediamine(JEFFAMINE D-230)을 사용하였다. 소포제로는 BYK-Chemie GmbH의 BYK-055, BYK-057 및 BYK-066을 사용하였다. 중성자 차폐재의 수소원자 밀도를 증가시키기 위한 목적으로 사용된 폴리프로필렌은 호남정유에서 생산되는 입자 크기가 100~200mesh인 것을 사용하였다. 저속 혹은 열중성자에 대해 차폐효과가 큰 붕소화합물중에서 중성자 차폐재에 가장 많이 사용되는 탄화붕소(B<sub>4</sub>C)는 붕소함량이 많기 때문에 열중성자 포획단면적이 크고, 중성자 차폐시에 고준위의 2차 방사선이나 장수명 2차 부산물을 발생시키지 않는 등 중성자 흡수제로서 이상적인 특징을 많이 갖고 있다. 본 실험에서는 Union Carbide사의 325mesh의 구형인 B<sub>4</sub>C (TS-5071)을 사용하였다. 수산화알루미늄은 차폐재에 유독가스를 발생시키지 않으면서, 난연성을 부여하고 자기산화성을 촉진시키는 것으로 알려져 있으며[10], 결정수형으로 약 35%의 물을 함유하고 있다. 또한 수소를 함유하고 있어 고속중성자를 열중성자로 감속시키는 작용을 하는 수산화알루미늄은 일본 주우화학(주)에서 생산되는 100mesh의 구형인 CW-325LV를 사용하였다.

### 2.2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 중성자 차폐재 제조의 기본물질인 액상 에폭시수지와 경화제, 분말형태의 폴리프로필렌, 수산화알루미늄, 탄화붕소 등의 첨가제들을 균일하게 혼합하기 위하여 Dispermat VL-C형의 진공혼합기를 사용하였다. 혼합시의 혼합기의 내부온도는 상온, 압력은 2~4mbar, impeller disc 속도는 60~100rpm, 시료의 부피는 800cm<sup>3</sup>, 혼합시간은 25~30분으로 하였다.

Fig. 1의 흐름도에서 볼 수 있듯이 혼합시에는 정해진 무게비율로 각 시료들을 준비하여 액상의 프리 폴리머인 에폭시수지와 경화제를 당량비율로 혼합한 후, 소포제와 분말시료들을 진공혼합기에 넣어 일정

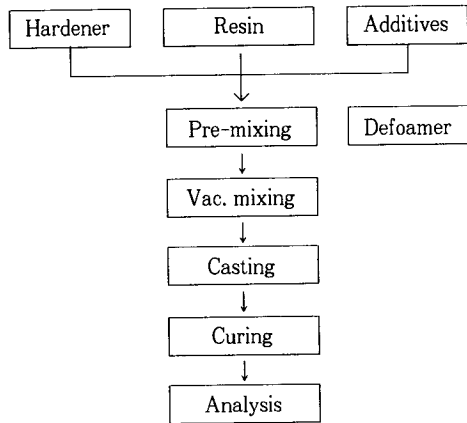


Fig. 1. Flow chart of specimen preparation.

Table 1. Composition of Shielding Materials

Shielding material	Composition(wt.%)				
	Resin	Hardener	Additive		
	YD-115	GA0633/D230	Polypropylene	Al(OH) <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> C
KNS-115A	27.5	10.5	-	60	2
KNS-115B	27.5	10.5	3	57	2
KNS-115C	27.5	10.5	5	55	2

시간 동안 진공하에 혼합하였다. 점도가 낮은 액상에 에폭시수지에 분말형의 첨가제를 넣고 혼합하면 액상과 분말의 계면에 기포들이 존재한다. 이들을 제거하기 위하여 에폭시수지의 무게분율로 0.5%~1.0%의 소포제를 넣고, 진공도 2~4mbar 내외의 진공혼합기 안에서 25~30분 동안 혼합하여 혼합물 내부의 기포를 제거하였다. 기포가 제거된 후 각종의 시편틀에 액상의 혼합물을 넣고 상온에서 경화시켜서 특성시험에 알맞는 시편을 제작하였다.

본 연구에서는 고속중성자, 저속 및 열중성자의 차폐효과에 관계되는 수소원자 밀도와 붕소원자 밀도, 가공성의 용이성 및 중성자 차폐재의 다른 특성을 고려하여 제조된 중성자 차폐재시편의 조성비를 Table 1에 나타난 바와 같이 조절하였다.

중성자 차폐재의 특성시험으로 난연성시험, 연소특성시험, 열안정성시험, 열전도도시험, 인장시험, 압축시험 및 굴곡시험 등을 행하였다. 난연성시험은 ASTM D635에 따라서 불꽃의 높이가 25mm인 분젠 버어너에서 30초간 연소 후 연소시간 및 연소길이를 측정하였으며, 시편의 크기는 나비, 두께가 각각 12.

5mm, 길이가 125mm이었다. 연소 특성시험은 ASTM E136에 따라서 수직 가열로 내부관 속을 통과하는 공기의 유속은 3m/min, 내부관 중앙의 온도가 800℃가 되도록 가열하여 최소한 15분 이상 유지한 후 시편을 가열로의 중앙에 놓고 30분간 시편의 내·외부온도를 측정하였으며, 시편의 크기는 38mm(W)×51mm(L)×38mm(T)이었다.

열안정성시험은 ASTM E537에 따라서 시료 10~15mg을 취하여 질소 유속 90ml/min, 가열속도 5℃/min, 상온에서 800℃까지 TG-DTA 측정을 하였다. 열전도도시험은 ASTM C177에 따라서 시편 상하에 접촉된 hot plate와 cold plate의 온도를 일정하게 유지하면서 hot plate에 유입되는 전기적 열량으로부터 시편의 열전도도를 계산하는 평판법(guarded-hot-plate method)에 의해 열전도도를 측정하였으며, 시편의 크기는 Ø200mm×12mm(T)이었다.

인장시험은 KS M3015에 따라서 Zwick Model 1446로 crosshead 속도를 5mm/min로 일정하게 유지하며 인장강도를 측정하였으며, 시편은 KS M3015의 규격에 의해 제작하였다. 압축시험은 KS M3015에 따라서 Zwick Model 1446로 시험속도를 1mm/min로 일정하게 유지하며 압축강도를 측정하였으며, 시편의 크기는 12.7mm(W)×12.7mm(L)×25.4mm(T)이었다. 굴곡시험은 KS M3015에 따라서 Zwick Model 1446로 시험속도를 2mm/min로 일정하게 유지하며 굴곡강도를 측정하였으며, 시편의 크기는 10mm(W)×80mm(L)×4mm(T)이었다.

원소 분석에서 수소, 탄소 및 질소 원소 분석은 CHN-1000 Elemental Analyzer(LECO Co.)로, 붕소 원소는 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer)로 분석하였다.

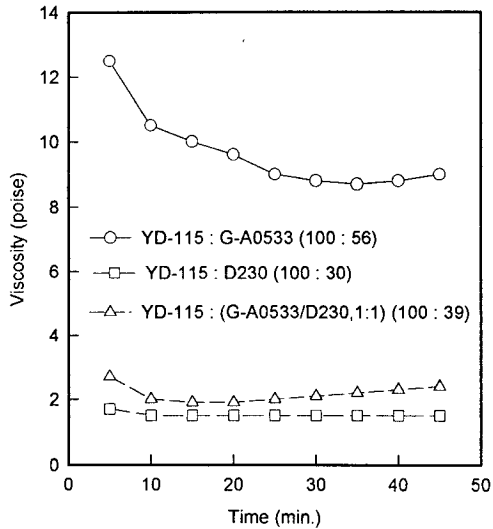
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 사용가능시간(pot life) 및 열분해온도

프리 폴리머인 에폭시수지, 경화제 및 첨가제를 충분히 혼합하면서 기포제거 및 시편제작시간을 고려하면 최소한 1시간 이상의 사용가능시간이 요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 저점도형의 에폭시수지에 폴리아미도아민 및 폴리에테르디아민의 경화제를 혼합하여 사용가능시간을 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 에폭시수지에 경화제인 폴리아미도아민과 폴리에테르디아민을 단독

**Table 2.** Pot Life and Thermal Decomposition Temperature of Resin and Hardener

Resin	Hardener	Mixing ratio (resin : hardener)	Pot life (min)	Onset temperature(°C)
YD-115	G-A0533	100:56	>60	<150
YD-115	D230	100:30	>60	205
YD-115	G-A0533: D230 (1:1)	100:39	>60	290



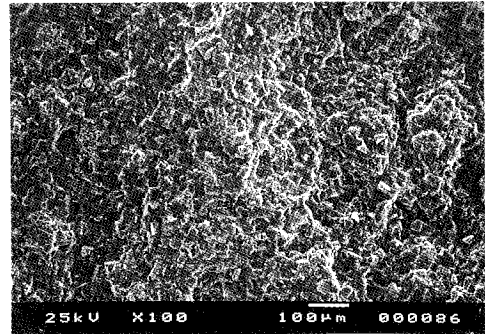
**Fig. 2.** Effects of hardener on the viscosity of epoxy resin.

으로 혼합할 때와 폴리아미도아민과 폴리에테르디아민을 1:1로 혼합한 경우 사용가능시간이 1시간 이상임을 알 수 있었다. 아울러 에폭시수지 경화물의 열분해온도를 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 에폭시수지에 경화제인 폴리아미도아민과 폴리에테르디아민을 단독으로 혼합하여 얻어진 각각의 경화체의 열분해온도는 이들 경화제를 1:1로 혼합하여 경화한 경우보다 열분해온도가 낮게 나타났다.

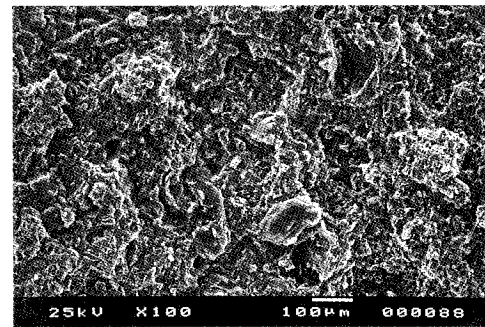
또한 경화제를 단독 혹은 혼합하여 프리 폴리머인 에폭시수지와 혼합 하였을 때의 점도를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 보면 경화제를 혼합할 경우 점도가 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사용가능시간, 열분해온도 및 점도 관계 등을 고려하여 경화제로는 폴리아미도아민과 폴리에테르디아민을 1:1로 혼합하여 사용하였다.

**Table 3.** Specific Gravities of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	KNS-115A	KNS-115B	KNS-115C
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.696	1.634	1.594
Standard deviation	2.58E-03	1.00E-03	1.66E-03



(a)



(b)

**Fig. 3.** Scanning Electron Micrograph of the fractured surfaces.

(a) KNS-115A (b) KNS-115B

### 3.2. 분산 상태

중성자 차폐재의 성능을 향상시키기 위하여 프리 폴리머인 에폭시수지, 경화제와 각종 첨가제를 첨가할때 분산상태를 정확히 측정하는 것이 중요하다. 일반적으로 광학현미경이나 전자현미경을 사용하여 분산상태와 기포를 확인하며, 또한 분산상태를 평가하기 위하여 비중값의 표준편차를 이용한다[11].

본 연구에서는 전자현미경에 의한 분산상태의 관찰

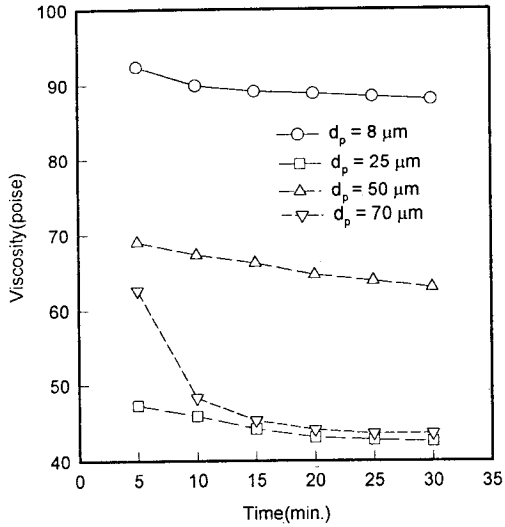


Fig. 4. Effects of particle size on the viscosity of epoxy resin (YD-115 : Al(OH)<sub>3</sub> = 40 : 60 (wt. %)).

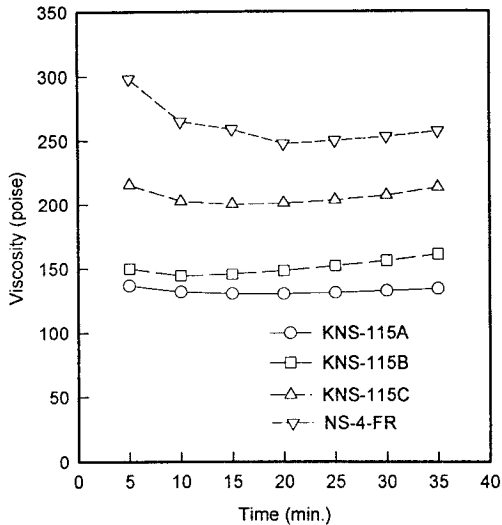


Fig. 5. Viscosity curves of the uncured shielding materials.

과 함께 각 차폐재에서 6개의 시편을 만들어 Electronic Densimeter, ED-120T에 의해 측정된 비중값의 표준편차로부터 전체적인 분산상태를 평가하였다. 전자현미경사진은 Fig. 3에 나타내었으며, 표준편차는 Table 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 첨가제의 분산상태가 양호한 것으로 판단되며,

Table 4. Chemical Composition of Shielding Materials

Element (wt. %)	Shielding material			
	KNS-115A	KNS-115B	KNS-115C	NS-4-FR[12]
Carbon	26.2	28.8	30.5	27.7
Hydrogen	6.0	6.3	6.5	6.0
Nitrogen	1.3	1.3	1.3	2.0
Oxygen	44.1	42.3	41.1	42.8
Aluminum	20.8	19.7	19.0	21.5
Boron	1.6	1.6	1.6	-
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.696	1.634	1.594	1.680

Table 3에서 보는 바와 같이 차폐재시편들의 표준편차는  $1.0 \times E-03 \sim 2.6 \times E-03$ 로 전체적인 분산상태는 양호한 것으로 판단된다.

### 3.3. 점도

중성자 차폐재를 수송용기와 같은 복잡한 구조물에 직접 주입한 후에 경화시키려면 액상의 혼합물은 어느 정도 이상의 유동성을 가져야한다. 따라서 중성자 차폐재의 성능을 향상시키기 위하여 첨가되는 첨가제의 양은 제한을 받게되므로 적절한 배합비율의 선택이 중요하게 된다. 특히 첨가제중에서 난연제인 수산화알루미늄의 배합비율이 가장 크기 때문에 수산화알루미늄을 첨가했을 때 점도가 낮으면 다른 첨가제를 어느 정도 첨가해도 유동성을 가지게 된다.

본 연구에서는 이와 같은 관계를 고려하여 입도가 다른 수산화알루미늄을 예폭수지에 첨가하여 점도를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 입도의 크기가 25 μm인 경우 점도가 제일 낮게 나타났다. KNS-115A, 115B 및 115C의 점도를 측정하여 미국 BISCO 사의 NS-4-FR의 점도와 함께 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 KNS-115A, 115B 및 115C는 NS-4-FR의 점도보다 낮게 나타났다. 이들 중성자 차폐재들은 점도가 낮기 때문에 첨가제를 더 첨가할 수 있어 차폐재의 성질을 더 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.4. 중성자 차폐는

중성자 감속효과가 매우 큰 수소원자와 열중성자 흡수단면적이 큰 붕소원자의 원자밀도 등이 중성자 차폐능과 밀접한 관계를 가지므로 중성자 차폐재의 원자밀도의 파악이 필요하다. 그리하여 제조된 중성자 차폐재인 KNS-115A, 115B 및 115C의 원자밀도

**Table 5.** Atomic Densities of Shielding Materials

Shielding material	Atomic density( $\times 10^{22}$ atoms/cm <sup>3</sup> )					
	C	H	N	O	Al	B
KNS-115A	2.23	6.05	0.09	2.82	0.79	0.15
KNS-115B	2.36	6.15	0.09	2.61	0.72	0.15
KNS-115C	2.44	6.20	0.09	2.47	0.68	0.14
NS-4-FR[12]	2.33	6.02	0.15	2.71	0.81	-

**Table 6.** Burning Test of Shielding Materials

Description	Shielding material			ATB	AEB
	KNS-115A	KNS-115B	KNS-115C		
ATB(sec)	<5	<5	<5		
AEB(mm)	<5	<5	<5		
Reference [13]	Reactor Experiments 201-1 (Boron-Polyethylene)			<5	<5
	Bisco Products NS-4-FR (Fire Resistant Shielding)			<5	<5
	Kobel Steel Type II(Ethylene Propylene Rubber)			345	75

를 Table 5에 나타내었다. 이 값들은 Table 4의 중성자 차폐재의 구성원소 분석 및 "Reactor Physics Constants" (ANL-5800)의 자료를 사용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. Table 5에서 보는 바와 같이 KNS-115A, 115B 및 115C인 차폐재들의 수소원자 밀도는 외국산 중성자 차폐재, NS-4-FR 보다 높아 중성자 차폐능이 다소 높을 것으로 판단된다.

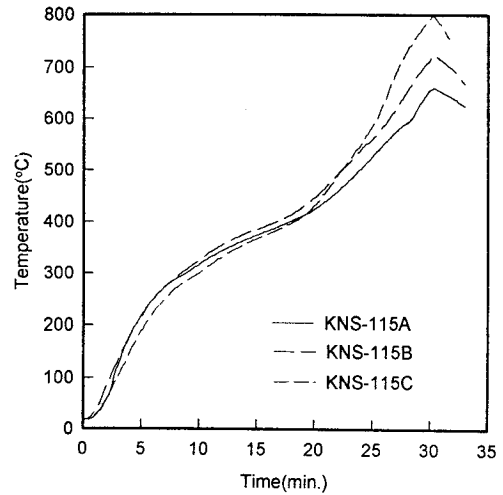
**3.5. 난연성**

제조된 중성자 차폐재인 KNS-115A, 115B 및 115C 시편들의 난연성 시험결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 보는 바와 같이 각 차폐재들의 평균연소길이가(average extent of burning, AEB)는 모두 5mm 이하였고, 평균연소시간(average time of burning, ATB)은 5초 이하였다. 한국공업규격 KS M3015, 열경화성 플라스틱 일반 시험방법에 따르면 연소길이가 25mm이하인 물질을 불연성물질, 그리고 25mm이상 100mm이하인 물질을 자기소화성 물질로 구분하고 있다. 따라서 Table 6에 나타난 수치들에서 알 수 있듯이 시험된 차폐재들은 모두 불연성 물질로 간주될 수 있었다. 제조된 시편들의 평균연소길이 및

**Table 7.** Combustion Characteristics of Shielding Materials

Shielding material	Surface T <sub>max</sub> (°C)	Interior T <sub>max</sub> (°C)	Surface T (°C) at 30min	Interior T (°C) at 30min	Weight Loss (%)
KNS-115A	867	661	867	657	49
KNS-115B	883	722	859	715	50
KNS-115C	914	798	872	792	56
Reference [13]	Interior Temp. at 30min(°C)		Weight Loss (%)		
	Bisco Products NS-1 (Silicone Sheet)		824*	36	
	Reactor Experiment 237 (Boro-Silicone)		847/916*	32/33	
	Kobe Steel Type I (Silicone Rubber)		>800	10	
	Bisco Products NS-4-FR (Fire Resistant Shielding)		541/504**	63/68	

\* continued to rise after removal from furnace  
 \*\* continued to rise after removal from furnace but peaked below 800°C



**Fig. 6.** Interior temperature response for shielding materials in a vertical tube furnace at 800°C.

평균연소시간은 외국에서 개발된 중성자 차폐재들과 거의 같게 나타났다.

**3.6. 연소특성**

미국 NRC 규정[15]에 의한 화재조건(800°C, 30

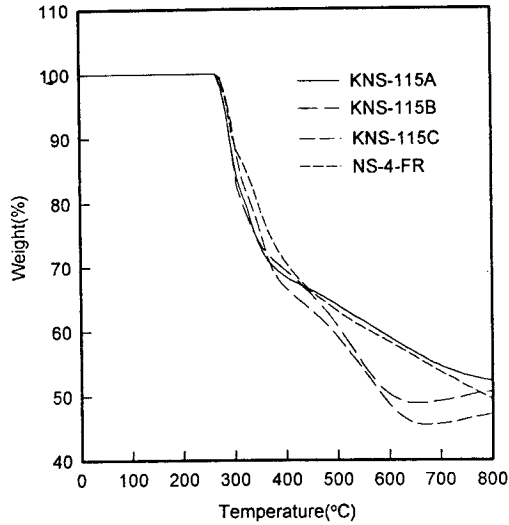


Fig. 7. TGA curves for epoxy resin based shielding materials.

본)에서 중성자 차폐재의 연소특성을 평가하기 위하여 중성자 차폐재 시편들의 800°C 분위기에서 시편이 나타내는 최고 내·외부온도, 30분일 때 시편의 내·외부온도 그리고 시험전후의 무게변화 등을 Table 7에 나타내었으며, 또한 시간에 따른 시편의 내부 온도변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 탄화붕소를 2wt.% 첨가시 폴리프로필렌은 5wt.%까지 800°C미만으로 나타났다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 점도가 낮아서 폴리프로필렌과 수산화알루미늄을 더 첨가할 수 있을 것으로 판단된다. Table 7에서 보는 바와 같이 중성자 차폐재 시편들의 내부 최고온도가 모두 800°C이하로 나타났으며, 외국산 중성자 차폐재의 연소 특성시험 결과보다 우수한 것으로 나타났다. 또한 연소 특성시험 전후의 시편의 무게변화는 49~56%로 나타났다. 본 연구에서 시제조한 에폭시수지계 중성자 차폐재는 연소 특성시험에서 내부 최고온도가 800°C이하로 나타났는데, 이는 화재사고시 열원으로 작용할 수 없다는 것을 의미한다.

3.7. 열안정성

제조된 중성자 차폐재인 KNS-115A, 115B 및 115C 시편들의 TG-DTA 분석결과를 Fig. 7과 Table 8에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이

Table 8. Thermal Stabilities of Shielding Materials

Description	Shielding Material		
	KNS-115A	KNS-115B	KNS-115C
Onset Temp.(°C)	267	269	270
Weight loss (%) at 800°C	47.9	51.2	54.5
Reference[13]	Onset Temp.(°C)		
	Reactor Experiments 201-1 (Boron-Polyethylene)		110
	Reactor Experiments 277 (Heat Resistant Shielding)		231
	Bisco Products NS-4-FR (Fire Resistant Shielding)		234
	Kobe Steel Type II(Ethylene Propylene Rubber)		263

Table 9. Thermal Conductivities of Shielding Materials

Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m·K)		
	KNS-115A	KNS-115B	KNS-115C
26	0.722	0.616	-
121	0.689	0.562	-
Reference [1, 12]	Kobe Steel Type II(Ethylene Propylene Rubber) : 0.179W/m·K		
	Bisco Products NS-4-FR(Fire Resistant Shielding) : 0.65W/m·K		

KNS-115A와 NS-4-FR의 열안정성 특성곡선은 유사하게 나타났다. Table 8에서 보는 바와 같이 중성자 차폐재들의 열분해 온도는 267~270°C로 나타났다. 사용후핵연료 수송용기의 정상 수송조건에서 중성자 차폐재 부분의 온도는 120°C 전후이므로 제조된 중성자 차폐재들이 모두 열적으로 안정하다는 것을 알 수 있다. Table 8에서 보는 바와 같이 이들 값들은 외국에서 개발된 차폐재들의 열분해온도와 거의 비슷하거나 보다 우수한 것으로 나타났다.

3.8. 열전도도

제조된 중성자 차폐재인 KNS-115A, 115B 및 115C 시편들의 열전도도측정결과를 Table 9에 나타내었다. Table 9에서 보는 바와 같이 KNS-115A의 열전도도값이 외국산 중성자 차폐재들보다 크게 나타났다. 또한 폴리프로필렌이 첨가된 KNS-115B의 열

Table 10. Mechanical Strengths of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	KNS-115A	KNS-115B	KNS-115C
Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	2.95	2.43	2.33
Compressive strength (kg/mm <sup>2</sup> )	13.33	10.61	5.31
Flexural strength (kg/mm <sup>2</sup> )	5.36	4.80	4.43
Reference[12]	Bisco Products NS-4-FR(Fire Resistant Shielding): ● Ultimate tensile strength : 2.99kg/mm <sup>2</sup> ● Ultimate compressive strength : 7.38kg/mm <sup>2</sup> ● Ultimate flexural strength : 5.34kg/mm <sup>2</sup>		

전도도값은 KNS-115A보다 작은 것으로 나타났다.

### 3.9. 역학적 특성

제조된 중성자 차폐재인 KNS-115A, 115B 및 115C 시편들의 역학적 특성 시험결과를 Table 10에 나타내었다. Table 10에서 보는 바와 같이 KNS-115A 시편의 압축강도는 NS-4-FR보다 크게 나타났으며, 인장강도와 굴곡강도는 거의 비슷하게 나타났다. 그러나 KNS-115B와 115C 시편의 인장강도와 굴곡강도는 NS-4-FR 보다 낮게 나타났다.

## 4. 결 론

중성자 차폐재 제조 및 특성시험 결과로 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 에폭시수지계 중성자차폐재는 수소원자 밀도가 외국산 차폐재보다 크게 나타나 중성자 차폐능이 우수할 것으로 판단된다.
2. 화재조건(800℃, 30분)에서의 에폭시수지계 중성자차폐재의 연소특성시험결과는 에폭시수지계 탄화붕소를 2wt.% 첨가시 폴리프로필렌을 5wt.% 까지 첨가한 중성자 차폐재의 시편내부 최고온도가 모두 800℃ 이하로 나타났다. 따라서 이들 중성자 차폐재

들은 화재사고시 연소에 의하여 수송용기 내부로 열 유입의 우려가 없어 수송용기에 사용될때 안전한 것으로 판단된다.

3. KNS-115A는 외국에서 사용후핵연료 수송용기 등에 중성자 차폐재로 사용되고 있는 NS-4-FR 차폐재의 역학적 성질 및 열적 성질보다 우수한 것으로 나타났다. 그러나 KNS-115B와 KNS-115C는 열전도도 및 역학적 성질에서는 NS-4-FR보다 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. J. Pyzik Aleksander and A. Aksay Ilhan, *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**, 775(1989).
2. K. A. Blakely, M. F. Gaffney, and P. T. B. Shaffer, *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **34**, 199(1980).
3. H. J. Rack, S. A. Dupree, and J. F. Smugeresky, SAND78-2317, 1979.
4. H. Taniuchi, T. Iida, F. Matsuda, and H. Nagahama, IAEA-SM-286/135 123(1987).
5. Japan Kokai Tokkyo Koho, JP 80119099, 1980.
6. T. Iida, H. Taniuchi, and K. Fujisawa, *RAM TRANS*, **2**, 79(1991).
7. M. Maeda, T. Nagaoka, K. Fujitani, and T. Sakaida, JP 86173198 A2, 1986.
8. H. Wilski, *Radiat. Phys. Chem.*, **29**, 1(1987).
9. Y. Morita, M. Hagiwara, and N. Kasai, *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 3569(1982).
10. Japan Kokai Tokkyo Koho, JP 82147095 A2, 1982.
11. T. H. Ferrigno, "Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics", ed. H. S. Katz and J. V. Milewski, 11, Van Nostrand Reinhold Company, New York(1978).
12. Technical Bulletin, Bisco Products, Inc., 1986.
13. R. H. Boonstra, GA-A19897, 1990.
14. J. B. Do, KAERI-NEMAC/RR-120/94, 1994.
15. "Packaging and Transportation of Radioactive Materials", Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, 1983.