

에폭시수지계 중성자 차폐재 제조 및 특성

조수형 · 김익수 · 도재범 · 노성기 · 박현수

한국원자력연구소

Fabrication and Characteristics of Epoxy Resin-Type Based Neutron Shielding Materials

Soo-Haeng Cho, Ik-Soo Kim, Jae-Bum Do, Seung-Gy Ro and Hyun-Soo Park

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon 305-353

(1998년 1월 12일 받음, 1998년 3월 20일 최종수정본 받음)

초 록 방사성물질의 수송 및 저장용기 등에 사용되는 에폭시수지계 중성자 차폐재, KNS-201, KNS-301 및 KNS-601을 제조하였다. 기본물질은 개질 및 수소 첨가된 비스페놀 A형 그리고 노블락형 에폭시수지이며, 첨가제로는 수산화알루미늄 및 탄화붕소이다. 이들 중성자 차폐재들은 경화전에 유동성이 좋아 방사성물질의 수송 및 저장용기와 같은 복잡한 구조에 사용할 수 있다. 개발된 중성자 차폐재들의 열적 및 역학적 성질 및 내방사선성 등을 평가하기 위해 여러 특성시험을 행하였다. 조사된 제반 특성들은 열분해온도; 257~280°C, 열전도도; 0.95~1.14W/m·K, 열팽창계수; 0.77~1.26x10⁻⁶°C⁻¹, 연소특성; 800°C 이하, 평균연소시간; 5초 이하, 평균연소길이; 5mm 이하, 인장강도; 2.5~3.2kg/mm², 압축강도; 13.2~15.2kg/mm², 굴곡강도; 5.2~6.4kg/mm² 등을 나타냈다. 전반적으로 개발된 중성자 차폐재들의 관련 특성들이 외국에서 사용되는 중성자 차폐재, NS-4-FR보다 우수한 것으로 나타났다. 또한 KNS-601의 내방사선성이 KNS-201과 KNS-301보다 우수한 것으로 나타났다.

Abstract New neutron shielding materials, KNS-201, KNS-301 and KNS-601 have been fabricated to be used for radioactive material shipping and storage cask. The base materials are a modified and a hydrogenated bisphenol-A type and novolac type epoxy resin, and aluminium hydroxide and boron carbide are added. These shielding materials offer good fluidity at processing, which makes it possible to form this resin shield into complicated geometric shapes such as radioactive material shipping and storage cask. Several measurements were made for the shielding materials to evaluate the thermal and mechanical properties and radiation resistance. The properties of the shielding materials are as follows: onset temperatures 257~280°C, thermal conductivities 0.95~1.14W/m·K, thermal expansion coefficients 0.77~1.26x10⁻⁶°C⁻¹, combustion characteristics < 800°C, ATB(average time of burning) < 5sec, AEB(average extent of burning) < 5mm, tensile strengths 2.5~3.2kg/mm², compressive strengths 13.2~15.2kg/mm², flexural strengths 5.2~6.4kg/mm². In general, the concerned properties of KNS-201, KNS-301 and KNS-601 were revealed to be better than those of NS-4-FR, foreign neutron shielding material. It is also observed that the radiation resistance of KNS-601 was better than those of KNS-201 and KNS-301.

1. 서 론

방사성물질의 수송 및 저장용기, 원자로 등으로부터 발생되는 중성자는 에너지가 높고 투과력이 강하며, (n, γ) 반응에 의한 2차 감마선을 발생시켜 인체에 장애를 주기 때문에 중성자를 안전하게 차폐할 재료가 요망된다.

현재 물, 물과 에틸렌글리콜과 같은 혼합물이나, 콘크리트, 고분자물질, cermet, 붕소합금 등이 사용조건에 따라서 중성자 차폐재로서 사용되고 있다. 액상의 단독 혹은 혼합물을 중성자 차폐재로서 사용할 때는 온도상승에 따른 부피팽창을 대비한 여분의 공간이 필요하다. 이 여분의 공간은 중성자 차폐효과를 고려하여 복잡한 구조로 만들어야 하므로 방사성물질의 수송 및 저장용기의 두께 및 무게는 증가하게 되고 용기의 용량(payload)이 감소되는 단점이 있다. 이러한 중성자 차폐재들의 단점을 보완하기 위해 최근에는 고분자물질 및 cermet 등의 중성자 차폐재들이 미국, 일본

등지에서 개발중에 있다.^{1~3)}

고속중성자는 거의 같은 질량의 수소원자와의 충돌에 의하여 에너지가 흡수되면서 효과적으로 감속되기 때문에 수소원자 밀도가 높은 고분자물질이 기본소재로 많이 사용되고 있다. 또한 열중성자에 대한 차폐효과를 크게 하기 위하여 고분자물질의 기본소재에 열중성자 포획단면적이 큰 붕소 혹은 붕소화합물, 리튬화합물 등이 첨가되며, 또한 각종 성능향상제가 첨가되어 제조되는 중성자 차폐재는 그 종류가 매우 다양하다.^{4~9)} 특히 고분자계 중성자 차폐재들은 가공성, 차폐능, 내방사선성, 열적 성질, 역학적 성질 등이 서로 다른 특성들을 가지며, 또한 제조 가격에 있어서도 차이가 많다.^{5~9)}

기계적 및 전기적성질, 내후성 및 내부식성 등이 우수한 비스페놀 A형 에폭시수지와 경화제에 수산화알루미늄, 탄화붕소 등의 첨가제를 혼합하여 중성자 차폐재를 제조하였으며, 특히 열적 특성 및 내방사선성 특성을 향상시키기 위

하여 반응성 및 내열성이 보다 우수한 노블락형 에폭시수지를 기본물질로 한 중성자 차폐재를 제조하여, 이들의 열적 및 역학적 특성, 내방사선성 등을 고찰하였다.

2. 실험

실험재료

본 실험에서 수지계 중성자 차폐재의 기본물질로는 상온 경화용 액상 에폭시수지를, 첨가제로는 난연제로 수산화알루미늄을, 그리고 열중성자 흡수재로는 탄화붕소를 각각 사용하였다.

기본물질로 사용된 액상의 프리 폴리머인 에폭시수지들은 비스페놀 A 형의 diglycidyl ether resin 을 alkyl

glycidyl ether ($R-O-CH_2\overset{\diagup}{O}\diagdown-CH_2$, $R=C_{12-14}$) 로 개질한 저점도형수지 (YD-114E, 국도화학(주)) 이고, 비스페놀 A 의 구조식에서 페닐기가 시크로헥산 고리로 된 수소 첨가된 비스페놀 A 형 에폭시수지 (ST-3000, 국도화학(주)) 이며, 또한 페놀-노블락형 에폭시수지 (YDPN-631, 국도화학(주)) 이다. 이들은 점도 (7~50poise at 25°C) 가 낮아 첨가제를 많이 넣을 수 있는 잇점을 가지고 있다. 경화제로는 fatty acid, polymerized acid 및 tetraethylene pentamine 의 혼합물을 탈수축합에 의해 제조한 폴리아미도아민 (G-A0533, 국도화학(주)) 과 폴리에테르디아민인 polyoxypropylene-diamine (JEFFAMINE D-230) 을 개질 및 수소 첨가된 비스페놀 A 형 에폭시수지에 그리고 변성 방향족 아민 경화제는 페놀-노블락형 에폭시수지에 사용하였다. 소포제로는 BYK-Chemie GmbH 의 BYK-066 을 사용하였다. 저속 혹은 열중성자에 대한 차폐효과를 크게 하기 위하여 붕소화합물중에서 열중성자 포획거시단면적이 크고, 중성자 차폐시에 고준위의 2차 방사선이나 장수명 2차 부산물을 발생시키지 않는 등 중성자 흡수재로서 이상적인 특징을 많이 갖고 있는 탄화붕소 (B₄C) (입자크기, 5~8 μ m) 를 첨가하였다. 또한 차폐재에 유독가스를 발생시키지 않으면서, 내연성을 부여하고 자기소화성을 촉진시키는 것으로 알려져 있고, 결정수형으로 약 35% 의 물을 함유하고 있어, 고속중성자를 열중성자로 감속시키는 작용을 하는 수산화알루미늄 (입자크기, 21 μ m) 을 첨가하였다.¹⁰⁾

실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 중성자 차폐재 제조의 기본 물질인 액상 에폭시수지와 경화제, 분말형태의 수산화알루미늄, 탄화붕소 등의 첨가제들을 균일하게 혼합하기 위하여 Dispermat VL-C형의 진공혼합기를 사용하였다. 혼합시

의 혼합기의 내부온도는 상온, 압력은 $2\sim 4\times 10^{-3}$ torr, impeller disc 속도는 60~100rpm, 시료의 부피는 800cm³, 혼합시간은 25~30분으로 하였다.

그림 1의 흐름도에서 볼 수 있듯이 혼합시에는 정해진 무게비율로 각 시료들을 준비하여 액상의 프리 폴리머인 에폭

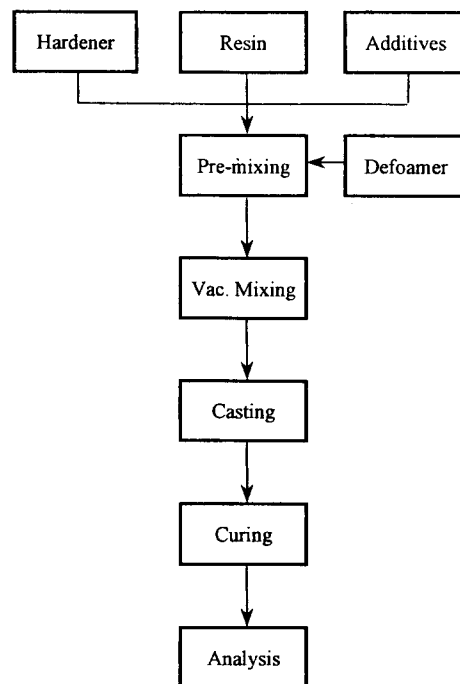


Fig. 1. Flow chart of specimen preparation.

시수지와 경화제를 당량비율로 혼합한 후, 소포제와 분말시료들을 진공혼합기에 넣어 일정시간 동안 진공하에 혼합하였다. 점도가 낮은 액상 에폭시수지에 분말형태의 첨가제를 넣고 혼합하면 액상과 분말의 계면에 기포들이 존재한다. 이들을 제거하기 위하여 에폭시수지의 무게분율로 0.5%~1.0%의 소포제를 넣고, 진공도 $2\sim 4\times 10^{-3}$ torr 내외의 진공혼합기 안에서 25~30분 동안 혼합하여 혼합물 내부의 기포를 제거하였다. 기포가 제거된 후 각종의 시편틀에 액상의 혼합물을 넣고 상온에서 경화시켜서 특성시험에 알맞은 시편을 제작하였다.

본 연구에서는 열안정성을 향상시킴과 동시에 우수한 내방사선성, 가공성의 용이 및 중성자 차폐재의 다른 특성을 고려하여 제조된 중성자 차폐재시편의 조성비율을 표 1에 나타내었다.

제조된 시편에 대한 방사선 조사실험은 대단위 조사시설

Table 1. Composition of shielding materials

Shielding material	Composition (wt.%)			
	Resin	Hardener	Additive	
			Al(OH) ₃	B ₄ C
KNS-201	27.5	10.5	59	3
KNS-301	27.5	10.5	59	3
KNS-601	26.5	13.5	57	3

의 방사선원(Co-60, 86,500 Ci)에 의한 고준위 감마선조사(high intensity gamma irradiation, (HIGI))에 의해 행하여졌으며, 방사선 조사시험을 위한 장치의 개요를 그림 2에 나타내었다. 시험에 사용한 조사선량은 0.1MGy, 0.5MGy 및 1.0MGy이고, 이들은 각각 평균조사선량 5kGy/h으로 20시간, 100시간 그리고 200시간 동안 조사하여 얻었다. 방사선 조사시 조사면적의 크기에 따른 조사선량의 편차를 줄이기 위하여 100mm(W)x360mm(L)x80mm(H) 크기의 상자에 시편들을 넣어 조사대 전면판과 8cm되는 거리에 평행하게 설치하여 조사하였다.

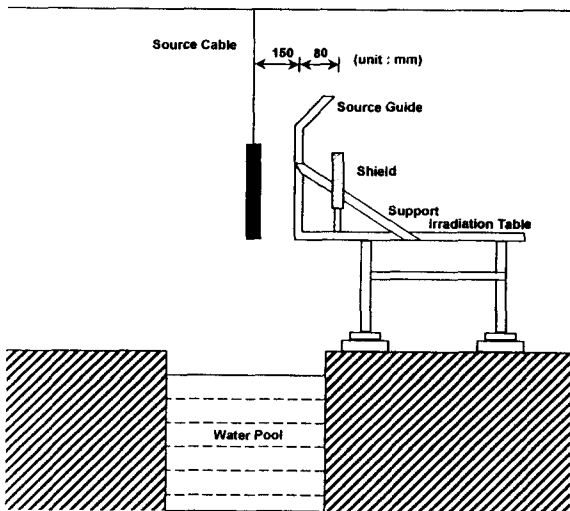


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

분석

중성자 차폐재의 특성시험으로 열적시험은 열안정성시험, 열전도도시험, 열팽창시험, 연소특성 및 내연성시험, 역학적시험은 인장시험, 압축시험 및 굴곡시험을 행하였다. 열안정성시험은 ASTM E537에 따라서 시료 10~15mg을 취하여 질소 유속 90ml/min, 가열속도 5°C/min, 상온에서 800°C까지 TGA 측정을 하였다. 열전도도시험은 ISO 8894-1에 따라서 hot wire method인 QTM-500(Kyoto Electronics)에 의해 열전도도를 측정하였으며, 시편의 크기는 50mm(W)x100mm(L)x10mm(T)이었다. 열팽창시험은 ASTM D696에 따라서 DuPont 2100 Thermal Analysis(TMA)에 의해 열팽창계수를 측정하였으며, 시편의 크기는 6mm(W)x6mm(L)x4mm(T)이었다. 연소특성시험은 ASTM E136에 따라서 수직 가열로 내부관 속을 통과하는 공기의 유속은 3m/min, 내부관 중앙의 온도가 800°C가 되도록 가열하여 최소한 15분 이상 유지한 후 시편을 가열로의 중앙에 놓고 30분간 시편의 내부온도를 측정하였으며, 시편의 크기는 38mm(W)x51mm(L)x38mm(T)이며, 내연성시험은 ASTM D635에 따라서 불꽃의 높이가 25mm인 분첸버어너에서 30초간 연소 후 연소시간 및 연소길이를 측정하였으며, 시편의 크기는 12.5mm(W)x125mm(L)x12.5mm(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)x12.7mm(L)x25.4mm(T)이었다. 굴곡시험은 KS M3015에 따라서 Zwick Model 1446로 시험속도를 2mm/min로 일정하게 유지하며 굴곡강도를 측정하였으며, 시편의 크기는 10mm(W)x80mm(L)x4mm(T)이었다.

3. 결과 및 고찰

열적 특성

열안정성

제조된 중성자 차폐재, KNS-201, KNS-301 및 KNS-601 시편들의 TGA 분석결과를 표 2와 그림 3에 나타내었다. 표 2에서 보는 바와 같이 중성자 차폐재 KNS-601의 열분해온도는 KNS-201과 KNS-301보다 높게 나타났다. 또한 그림 3에서 보는 바와 같이 중성자 차폐재들의 온도에 따른 무게변화는 KNS-601이 KNS-201와 KNS-301보다 적게 나타났다. 이는 노블락의 고리구조와 관능성도가 증대되어 온도에 대단한 안정성이 커지는 것으로 생각된다. 표 2에서 보는 바와 같이 중성자 차폐재들의 열분해 온도는 257~280°C로 나타났다. 이들 차폐재를 사용후 핵연료 수송용기에 적용할 경우, 정상 수송조건에서 중성자 차폐재 부분의 온도는 120°C 전후이므로 제조된 중성자 차폐재들이 모두 열적으로 안정하다는 것을 알 수 있다. 또한 이들 열분해온도는 외국에서 개발된 차폐재들의 열

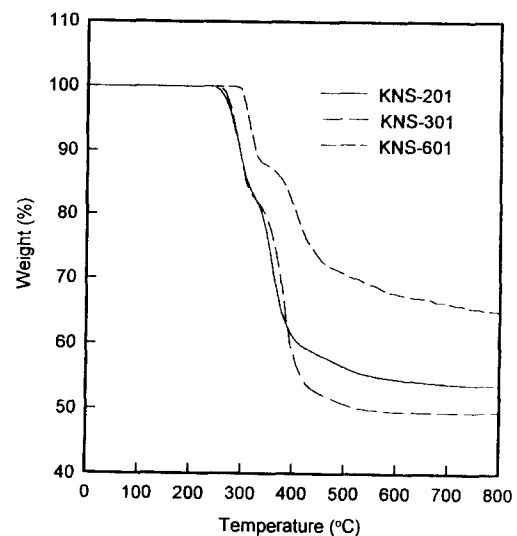


Fig. 3. TGA curves for epoxy resin based shielding materials.

Table 2. Thermal stabilities of shielding materials

Description	Shielding material		
	KNS-201	KNS-301	KNS-601
Onset temperature(°C)	257	263	280
Weight loss(%) at 800°C	46.4	50.4	35.0

분해온도와 거의 비슷하거나 보다 우수한 것으로 나타났다.¹⁰⁾
열전도도

제조된 중성자 차폐재, KNS-201, KNS-301 및 KNS-601 시편들의 열전도도측정 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 보는 바와 같이 KNS-601의 열전도도값이 다른 중성자 차폐재들보다 크게 나타났다. 또한 이들 중성자 차폐재들은 외국에서 사용후핵연료 수송용기에 널리 사용되는 중성자 차폐재, NS-4-FR의 열전도도값(0.65W/m·K)보다 크게 나타났다.^{10~11)}

Table 3. Thermal conductivities of shielding materials

Description	Shielding material		
	KNS-201	KNS-301	KNS-601
Thermal conductivity(W/m·K)	1.006	0.952	1.142

열치수 안정성

제조된 중성자 차폐재, KNS-201, KNS-301 및 KNS-601 시편들의 열팽창계수측정 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 보는 바와 같이 KNS-601의 열팽창계수값이 다른 중성자 차폐재들보다 낮게 나타났다. 이는 노블락의 고리구조가 비스페놀 A 구조식에서 페닐기가 시크로헥산 고리로 된 수소 첨가된 비스페놀 A형 에폭시수지보다 열적으로 안정한 때문으로 생각된다. 또한 이들 중성자 차폐재들의 열팽창계수값이 외국산 중성자 차폐재, NS-4-FR의 열팽창계수값(1.97x10⁻⁶°C⁻¹)보다 낮은 것으로 나타났다.¹¹⁾ 이는 이들 중성자 차폐재들의 열치수 안정성이 외국산 중성자 차폐재보다 우수한 것으로 판단된다.

Table 4. Thermal expansion coefficients of shielding materials

Description	Shielding material		
	KNS-201	KNS-301	KNS-601
Thermal expansion coefficient (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)(50~180°C)	1.259	1.215	0.767

내연성

제조된 중성자 차폐재인 KNS-201, KNS-301 및 KNS-601 시편들의 내연성 시험결과를 표 5에 나타내었다. 표 5에서 보는 바와 같이 각 차폐재들의 평균연소길이(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 25mm 이하인 물질을 불연성물질, 그리고 25mm 이상 100mm 이하인 물질을 자기소화성 물질로 구분하고 있다. 따라서 표 5에 나타난 수치들에서 알 수 있듯이 시험된 차폐재들은 모두 불연성 물질로 간주될 수 있었다. 제조된 시편들의 평균연소길이 및 평균연소시간은 외국에서 개발된 중성자 차폐재들과 거의 같게 나타났다.¹⁰⁾

Table 5. Burning test of shielding materials

Description	Shielding material		
	KNS-201	KNS-301	KNS-601
ATB(sec)	< 5	< 5	< 5
AEB(mm)	< 5	< 5	< 5

연소특성

미국 NRC 규정¹²⁾에 의한 화재조건(800°C, 30분)에서 중성자 차폐재의 연소특성을 평가하기 위하여 중성자 차폐재 시편들의 800°C 분위기에 서 시간에 따른 시편의 내부 온도변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 이들 중성자 차폐재들의 내부온도가 800°C 미만으로 나타났으며, 30분일 때 KNS-601 차폐재의 내부온도는 KNS-201과 KNS-301 차폐재보다 훨씬 낮게 나타났다. 이는 노블락형 에폭시수지계가 개질 비스페놀 A형 에폭시수지계보다 내열성이 우수함을 알 수 있었다. 그러나 이들 중성자 차폐재들의 경화전의 점도가 낮아 첨가제를 더 첨가할 수 있어 내부온도가 더 낮아질 것으로 판단된다. 또한 이들 중성자 차폐재들은 외국산 중성자 차폐재들의 연소 특성시험 결과보다 우수한 것으로 나타났다.¹⁰⁾ 더구나 중성자 차폐재들의 연소 특성시험에서 내부 최고온도가 800°C 이하로 나타났는데, 이는 화재사고시 열원으로 작용할 수 없다는 것을 의미한다.

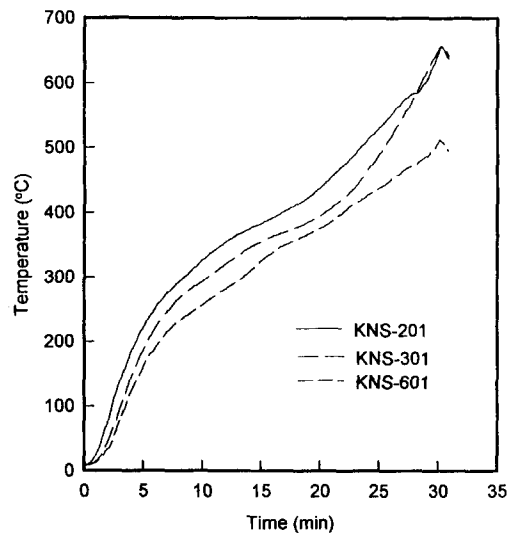


Fig. 4. Interior temperature response for shielding materials in a vertical tube furnace at 800°C.

역학적 특성

제조된 중성자 차폐재인 KNS-201, KNS-301 및 KNS-601 시편들의 역학적 특성 시험결과를 표 6에 나타내었다. 표 6에서 보는 바와 같이 개질 비스페놀 A형 에폭시수지계 중성자 차폐재가 노블락형 에폭시수지계 중성자 차폐재보다 전반적으로 역학적 성질이 우수함을 알 수 있었다. 또한 표 6에서 보는 바와 같이 KNS-201과 KNS-301 중성자 차폐재들의 역학적 성질이 NS-4-FR보다 우수한 것으로 나타났으나, KNS-601의 역학적 성질은 NS-4-FR

과 비슷하거나 조금 우수한 것으로 나타났다.

Table 6. Mechanical strengths of shielding materials

Description	Shielding material		
	KNS-201	KNS-301	KNS-601
Tensile strength (kg/mm ²)	3.19	2.74	2.48
Compressive strength (kg/mm ²)	13.16	15.22	14.67
Flexural strength (kg/mm ²)	6.42	6.12	5.24
Reference	Bisco Products NS-4-FR(Fire Resistant Shielding) ⁽¹⁾ : • Tensile strength: 2.99kg/mm ² • Compressive strength: 7.38kg/mm ² • Flexural strength: 5.34kg/mm ²		

내방사선성

고분자물질에 방사선을 조사하면 여러 가지 원자들의 자유라디칼 혹은 여기상태의 분자가 동시 다발적으로 생성되며, 중간체를 형성하는 다단계반응과 반응물질들 간에 여러 형태의 화학반응이 경쟁적으로 일어나 고분자물질의 화학구조가 변화하게 되며, 이로 인해 방사선의 조사는 고분자물질의 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 이런 영향들을 규명하기 위하여 평균 조사선량율이 5kGy/h인 고준위 방사선원을 사용하여 차폐재 시편에 방사선을 조사하였다. 또한 방사선조사에 의한 인장강도, 압축강도 및 굴곡강도의 시험결과 평균값의 편차는 0.6~9.2% 정도의 범위였다.

열안정성에 대한 영향

방사선 조사선량이 중성자 차폐재의 열안정성에 미치는 영향을 그림 5~7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 방사선 조사선량이 1.0MGy까지 증가함에 따라 이들 중성자 차폐재들의 열안정성에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 아울러 방사선 조사선량이 증가함에 따라

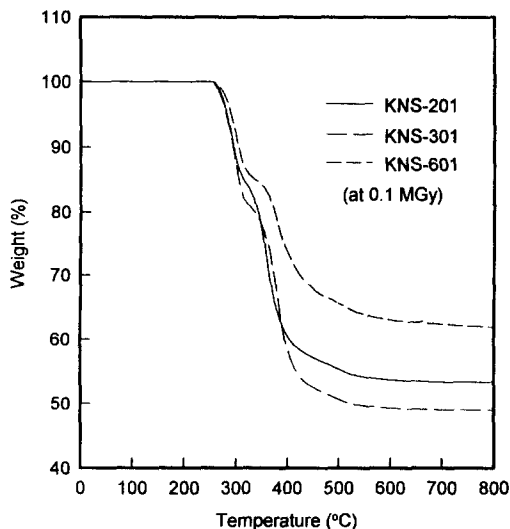


Fig. 5. Effects of radiation on TGA curves for epoxy resin based shielding materials.

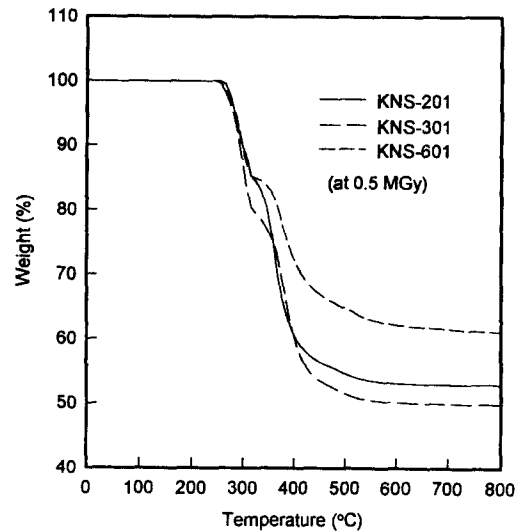


Fig. 6. Effects of radiation on TGA curves for epoxy resin based shielding materials.

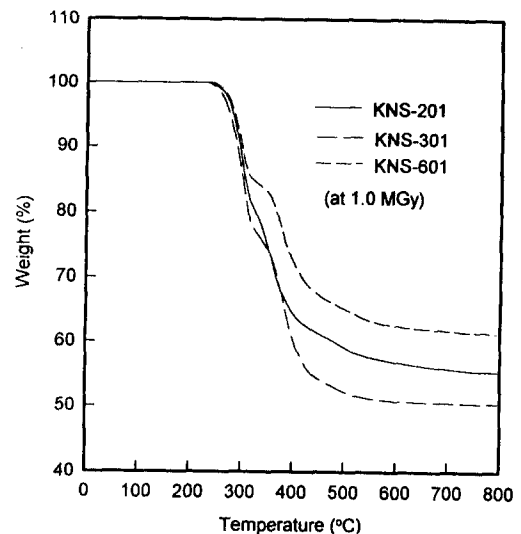


Fig. 7. Effects of radiation on TGA curves for epoxy resin based shielding materials.

KNS-601 중성자 차폐재는 KNS-201과 KNS-301 중성자 차폐재보다 열안정성이 더 우수함을 알 수 있었다.

열치수 안정성에 대한 영향

방사선 조사선량이 중성자 차폐재의 열치수 안정성에 미치는 영향을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 방사선 조사선량이 0.1MGy까지 증가함에 따라 KNS-201의 열팽창계수값이 감소하는 것으로 나타났으며, 반면에 KNS-601은 1.0MGy까지 증가함에 따라 열팽창계수값이 약간 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 KNS-301은 방사선 조사선량에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

인장강도에 대한 영향

일반적으로 고분자에 방사선을 조사하면 주쇄(main chain)의 절단, 측쇄(side chain)의 절단 및 분해기체의

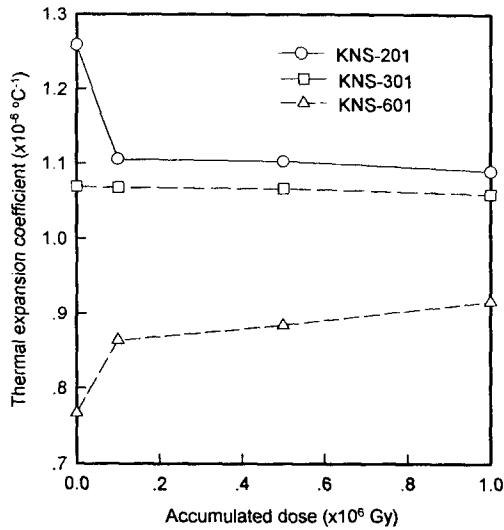


Fig. 8. Effects of radiation on thermal expansion of shielding materials.

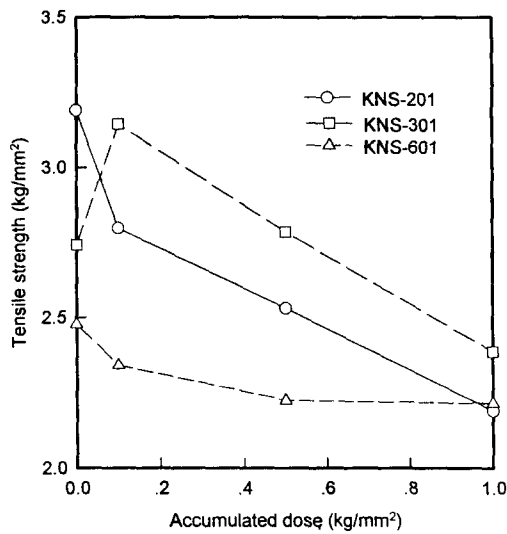


Fig. 9. Radiation-induced tensile strength of shielding materials.

발생과 불포화결합의 생성이 경쟁적으로 일어나며, 주쇄절단으로 생긴 말단의 자유라디칼은 서로 반응하여 불균등화 또는 재결합을 하며, 측쇄절단으로 생긴 자유라디칼은 서로 반응하여 절단 혹은 가교결합을 하게 되어¹³⁻¹⁴⁾ 분자의 구조가 바뀌게 된다. 따라서 방사선 조사선량이 중성자 차폐재의 인장강도에 영향을 미치게 되며, 이 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 보는 바와 같이 방사선 조사선량이 0.1MGy까지 증가함에 따라 KNS-301 중성자 차폐재의 인장강도는 증가하다가 0.1MGy 이상에서는 조사선량의 증가에 따라 인장강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 방사선 조사선량의 증가에 따라 초기의 인장강도값이 증가하는 이유는 주쇄의 절단보다는 측쇄에 생긴 자유라디칼간의 결합이 우세하여 인장강도가 큰 망상구조를 이루는 가교결합수가 증가하기 때문으로 해석할 수 있으며,¹²⁾ 또한

수지계와 분말형의 무기물질과의 계면에서 발생하는 내부 응력이 사슬(chain) 절단으로 완화된 것에 기인한 것으로 생각된다.¹⁵⁾ 그러나 방사선 조사선량이 0.1MGy 이상에서는 측쇄가교결합에 의한 인장강도의 증가효과보다는 주쇄라디칼이 첨가제에 의해 재결합을 하지 않고 불균등화반응으로 절단되는 반응이 활발해져 인장강도가 감소하는 것으로 생각된다. 반면 KNS-201과 KNS-601 중성자 차폐재는 방사선 조사선량의 증가에 따라 인장강도가 감소하는 것으로 나타났으나, KNS-601의 인장강도값의 변화폭이 KNS-201과 KNS-301보다 적게 나타났다. 이러한 결과로 노블락형 고리구조는 방사선 조사선량에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

압축강도에 대한 영향

방사선 조사선량이 중성자 차폐재의 압축강도에 미치는 영향을 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 방사선 조사선량이 증가함에 따라 수소 첨가된 에폭시 수지의 중성자 차폐재인 KNS-301의 압축강도는 방사선 조사선량에 약간 영향을 받는 것으로 나타났지만, 알킬 그리시딜 에테르로 개질된 에폭시수지 중성자 차폐재인 KNS-201은 방사선 조사선량의 증가에 따라 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 반면에 노블락형 에폭시수지 중성자 차폐재인 KNS-601은 방사선 조사선량에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

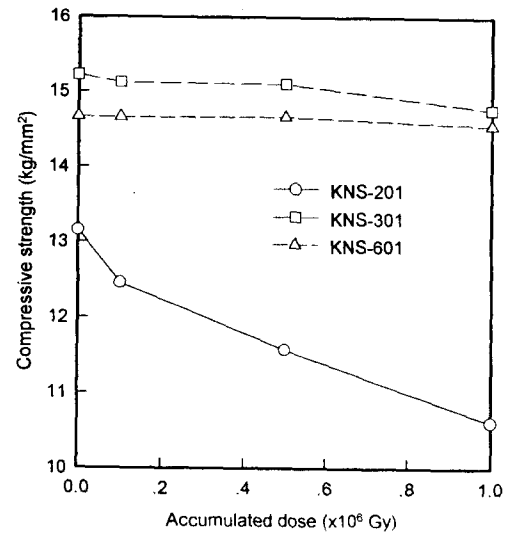


Fig. 10. Radiation-induced compressive strength of shielding materials.

굴곡강도에 대한 영향

방사선 조사선량이 중성자 차폐재의 굴곡강도에 미치는 영향을 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 보는 바와 같이 방사선 조사선량이 증가함에 따라 KNS-201 차폐재의 굴곡강도는 감소하는 경향을 나타내었으며, KNS-301 차폐재는 0.1MGy까지는 증가하는 경향을 나타내었으나, 0.1MGy 이상에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 반면에 KNS-601 차폐재는 0.5MGy까지는 증가하는 경향을 나타

내었으나, 0.5MGy 이상에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 전반적으로 KNS-201과 KNS-301 차폐재들의 굴곡 강도 변화폭이 KNS-601 차폐재보다 훨씬 크게 나타났다. 이는 KNS-601 차폐재가 방사선 조사선량에 크게 영향을 받지 않는 것으로 생각된다.

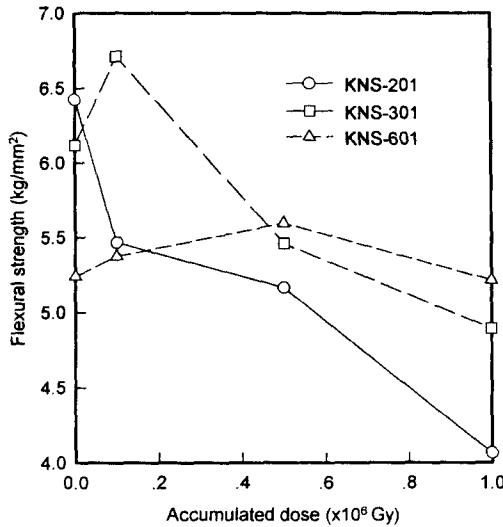


Fig. 11. Radiation-induced flexural strength of shielding materials.

4. 결 론

이상과 같은 본 연구의 결과 다음의 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

1) 페놀-노블락 에폭시수지를 기본물질로 하고 경화제로 변성 방향족아민으로 제조된 중성자 차폐재, KNS-601은 개질 및 수소 첨가된 비스페놀-A형 에폭시수지계 중성자 차폐재, KNS-201과 KNS-301보다 열적 특성이 우수한 것으로 나타났으며, 또한 이들 중성자 차폐재들은 외국산 중성자 차폐재, NS-4-FR보다 열적 특성이 우수한 것으로 나타났다.

2) KNS-201과 KNS-301 차폐재들은 KNS-601 차폐재보다 역학적 성질이 우수한 것으로 나타났으며, 또한 외국산 중성자 차폐재보다 우수한 것으로 나타났다.

3) 중성자 차폐재, KNS-601이 KNS-201과 KNS-

301 중성자 차폐재보다 열적 및 역학적 성질이 방사선 조사선량의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며, 이는 KNS-601 중성자 차폐재가 KNS-201과 KNS-301 중성자 차폐재보다 열적 및 역학적 성질에서 내방사선성이 우수함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. P. Aleksander and A. A. Ilhan, *J. Am. Ceram. Soc.*, **72** (5), 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. L. W. Dickson, AECL-9556 (1988)
6. T. Iida, H. Taniuchi and K. Fujisawa, RAMTRANS, **2**, 79 (1991)
7. C. B. Saunders, L. W. Dickson and A. Singh, AECL-9084 (1987)
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. S. H. Cho, J. B. Do, S. G. Ro and C. H. Do, *J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry*, **7** (3), 597 (1996)
11. Technical Bulletin, Bisco Products, Inc., (1986)
12. R. R. Burn and G. R. Blessing, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **39**, 429 (1981)
13. O. Sisman and W. W. Parkinson, "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Vol.II Shielding Materials, R.G. Jaegar and A.Hoenig, eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 294 (1975)
14. *Silicone and Its application*, Japan Toshiba, Co. Ltd. (1988)
15. K. S. Seo, R. E. Fornes, J. D. Memory and R. D. Gilbert, *Polymer Preprints*, **28** (1), 313 (1987)