



실리콘고무계 중성자 차폐재 개발

Development of Silicone Rubber-Type
Neutron Shielding Material

한국원자력연구소

KAERI/TR-864/97

실리콘고무계 중성자 차폐재 개발

Development of Silicone Rubber-Type
Neutron Shielding Material

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 “사용후핵연료 차세대 관리공정개발“과제의 기술보고서로 제출합니다.

1997. 6. 15.

주연구자 : 도 재 범(사용후핵연료 관리이용기술개발팀)

연구자 : 조 수 행(")

김 익 수(")

오 승 철(")

홍 순 석(")

노 성 기(")

정 덕 연(연구지원본부 행정부 인사관리실)

감수위원 : 유 재 형

요 약 문

본 연구의 목적은 방사성물질의 수송용기 및 저장용기 또는 방사성물질 취급시설에서 사용될 차폐성능 및 안전성이 우수한 중성자 차폐재를 개발하는 데 있다. 방사성물질의 저장용기나 수송용기 또는 원자로나 방사성물질 취급시설에서 나오는 방사선은 인체에 중대한 장애를 줄 수 있으므로 방사선을 인체가 받을 수 있는 허용량 이하로 안전하게 차폐하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 방사성물질의 수송 및 저장용기 등에 사용되는 실리콘 고무계 중성자 차폐재, DC-70, DC-49 및 HR-39를 제조하였다. 기본물질은 액상 실리콘고무이며, 첨가제로는 폴리프로필렌, 수산화알루미늄 및 탄화붕소이다. 이들 중성자 차폐재들은 경화전에 유동성이 좋아 방사성물질의 수송 및 저장용기와 같은 복잡한 구조에 사용할 수 있다. 개발된 중성자 차폐재들의 중성자 차폐능, 내열성, 연소특성, 내방사선성, 열적 및 역학적 성질 등을 평가하기 위해 여러 특성시험을 행하였다. 조사된 제반 특성들은 거시적 제거단면적; $0.10 \sim 0.13 \text{ cm}^{-1}$, 평균연소시간; 5초 이하 (DC-70, 19초), 평균연소길이; 5 mm 이하, 연소특성; $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상, 열분해 온도; $153 \sim 233 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 열전도도; $0.59 \sim 1.32 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 열팽창계수; $1.52 \sim 2.08 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 인장강도; $0.14 \sim 0.24 \text{ kg/mm}^2$, 압축강도; $0.60 \sim 0.77 \text{ kg/mm}^2$, 경도; $70.5 \sim 80.9 \text{ kg/mm}^2$ 등을 나타냈다. 아울러 방사선조사선량의 증가에 따라 DC-70, DC-49 차폐재의 인장강도는 증가하였으나, HR-39 차폐재의 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 조사선량의 증가에 따라 DC-70, DC-49, HR-39 차폐재들의 압축강도, 경도, 비중 등이

증가하는 경향을 나타내었으며, 방사선조사선량에 따른 차폐재의 무게와 수 소함량은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop highly effective neutron shielding materials for the shipping and storage cask of radioactive materials or in the nuclear/radiation facilities. Because the exposure to radiation in the nuclear facilities can be fatal to human, it is important to reduce the radiation dose level to a tolerable level.

In this study, silicone rubber-type neutron shielding materials, DC-70, DC-49 and HR-39 have been fabricated to be used for radioactive material shipping and storage cask. The base material is silicone rubber, 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 radioactive material shipping and storage cask. Several measurements were made for the shielding materials to evaluate the shielding property, fire resistance, combustion characteristics, radiation resistance, thermal and mechanical properties. The properties of the shielding materials are as follows: macroscopic removal cross section; $0.10 \sim 0.13 \text{ cm}^{-1}$, ATB(average time of burning); $< 5 \text{ sec}$ (DC-70, 19 sec), AEB(average extent of burning); $< 5 \text{ mm}$, Combustion characteristics; $> 800 \text{ }^\circ\text{C}$, Onset temperatures; $153 \sim 233 \text{ }^\circ\text{C}$, thermal conductivities; $0.59 \sim 1.32 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, thermal expansion

coefficients; $1.52 \sim 2.08 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, tensile strengths; $0.14 \sim 0.24 \text{ kg/mm}^2$, compressive strengths; $0.60 \sim 0.77 \text{ kg/mm}^2$, hardness: $70.5 \sim 80.9 \text{ kg/mm}^2$. As the radiation dose increased, the tensile strength of shielding materials of DC-70 and DC-49 increased, however, that of HR-39 decreased. The compressive strength and hardness of shielding materials of DC-70, DC-49 and HR-39 increased with an increase in the radiation dose on them. The amount of radiation dose (10^6 Gy) on the materials of DC-70, DC-49, and HR-39 did not result in a measurable loss of weight and hydrogen content of them.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 실험	3
제 1 절 실험재료	3
1. 액상 실리콘고무	3
2. 폴리프로필렌	4
3. 수산화알루미늄	4
4. 탄화붕소	5
제 2 절 실험장치 및 방법	5
제 3 절 중성자 차폐재 특성시험	8
1. 중성자 차폐능시험	8
2. 내연성 시험	13
3. 연소특성 시험	13
4. 내방사선성 시험	14
5. 열적 특성시험	14
6. 역학적 특성시험	15
7. 화학 분석	16

제 3 장	결과 및 고찰	18
제 1 절	유동적 특성	18
제 2 절	중성자 차폐능 특성	19
1.	원자밀도	19
2.	거시적 중성자 반응단면적	21
3.	중성자 선량을 대 감마선량의 비	25
4.	수송용기 KSC-7에 대한 차폐해석	26
제 3 절	내연성	27
제 4 절	연소특성	28
제 5 절	내방사선성	31
1.	인장강도에 대한 영향	31
2.	압축강도 및 경도에 대한 영향	34
3.	비중에 미치는 영향	38
4.	수소함량 변화에 미치는 영향	40
제 6 절	열적 특성	40
1.	열안정성	40
2.	열전도도	44
3.	열팽창계수	44
4.	열건전성	45

제 7 절 역학적 특성	54
제 4 장 결 론	55
참고문헌	57

표 목 차

Table 1. Composition of shielding materials	6
Table 2. Chemical composition of shielding materials	13
Table 3. Specific gravity of shielding materials	18
Table 4. Atomic densities of shielding materials	21
Table 5. Macroscopic cross sections of shielding materials, both the calculated and the measured for the D ₂ O moderated source(average neutron energy : 0.524 MeV, thickness : 25 mm)	24
Table 6. Macroscopic cross sections of shielding materials, both the calculated and the measured for the unmoderated source(average neutron energy : 2.01 MeV, thickness : 25 mm)	25
Table 7. Maximum dose rates for KSC-7 cask under normal transport	27
Table 8. Burning test of shielding materials	28
Table 9. Combustion characteristics of shielding materials	30
Table 10. Effects of radiation on weights of shielding materials	40
Table 11. Thermal stabilities of shielding materials	42
Table 12. Thermal conductivities of shielding materials	44
Table 13. Thermal expansion coefficients of shielding materials	45
Table 14. Initial condition of parameter(k_0) and activation energy(E_A) of neutron shielding materials	52

Table 15. Estimation of thermal degradation(weight loss(%)) ······	54
Table 16. Mechanical strengths of shielding materials ······	55

그 립 목 차

Fig. 1. Flow chart of specimen preparation	7
Fig. 2. Viscosity curves of uncured shielding materials	20
Fig. 3. Neutron dose equivalent rate attenuation for shielding materials as a function of thickness for the D ₂ O moderated Cf-252 neutrons	22
Fig. 4. Neutron dose equivalent rate attenuation for shielding materials as a function of thickness for the unmoderated Cf-252 neutrons	23
Fig. 5. Interior temperature response for shielding materials in a vertical tube furnace at 800 °C	29
Fig. 6. Radiation-induced tensile strength of shielding materials	32
Fig. 7. Radiation-induced compressive strength of shielding materials	35
Fig. 8. Radiation-induced hardness of shielding materials	36
Fig. 9. Force-displacement curves for shielding materials	37
Fig. 10. Effects of radiation on specific gravities of shielding materials	39
Fig. 11. Effects of radiation on hydrogen content of shielding materials	41
Fig. 12. TGA curves for silicone rubber based shielding materials ..	43
Fig. 13. Effect of heating time on mechanical properties at 130 °C ..	46
Fig. 14. Effect of heating time on mechanical properties at 150 °C ..	48

Fig. 15. Effects of heating time on the weight loss of shielding materials ((a) 130 °C, (b) 150 °C)	50
Fig. 16. Estimation of thermal degradation at (○) 130 °C, (□) 150 °C	51
Fig. 17. Effects of heating time on the hydrogen content of shielding materials ((a) 130 °C, (b) 150 °C)	53

제 1 장 서 론

방사성물질의 수송/저장용기, 핵연료 재처리공장, 원자로, 액체금속로, 싸이클로트론장치 혹은 방사성동위원소 등으로 부터 발생하는 중성자는 에너지가 높고 투과력이 강하며, (n, γ) 반응에 의한 2차 감마선을 발생시키므로 인체에 장애를 줄 수 있고 원자력시설의 구조재나 기기의 손상 및 방사화를 초래할 수 있기 때문에 중성자를 안전하게 차폐할 재료가 절실히 요구된다.

현재 물이나, 콘크리트, 고분자물질, cermet, 붕소합금, 그리고 금속수산화물 등이 사용장소 및 조건에 따라서 중성자 차폐재로서 사용되고 있으며, 중성자중 고속중성자는 거의 같은 질량의 수소원자와의 충돌에 의하여 에너지가 흡수되면서 효과적으로 감속되기 때문에 수소원자 밀도가 큰 물질이 고속중성자의 차폐에 효과적이라 할 수 있다. 따라서 수소원자수 밀도가 높은 고분자물질이 기본소재로 많이 사용되고 있다. 이들은 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등과 같은 열가소성수지, 불포화폴리에스테르수지, 페놀수지, 에폭시수지 등과 같은 열경화성수지, 모노올레핀공중합고무, 실리콘고무 등과 같은 고무 등의 고분자물질로 그 종류가 매우 다양하며, 이들 혹은 이들의 고분자혼합물의 기본소재에 열중성자 포획단면적이 큰 붕소 혹은 붕소화합물, 리튬화합물 등이 첨가되며, 또한 각종 성능향상제가 첨가되어 제조되는 중성자 차폐재는 그 종류가 매우 다양하다[1-6]. 많은 종류의 고분자계 중성자 차폐재들은 가공성, 차폐능, 내방사선성, 열적 성질, 기계적 성질 및 내후성 등이 서로 다른 특성들을 가지며, 또한 제조 가격에 있어서도 차이가 많다[2-5].

사용후 핵연료 수송용기의 중성자 차폐재로서 물 혹은 물과 에틸렌글리콜과 같은 혼합물들을 사용할 때는 온도증가에 따른 부피팽창을 고려하여

여분의 공간이 필요하며, 이 여분의 공간은 중성자 차폐효과를 고려하여 복잡한 구조로 만들어야 하며 또한 사고시에는 모두 유출되어 버릴 우려가 있는 단점이 있다. 이러한 중성자 차폐재들의 단점을 보완하기 위해 최근에는 고분자물질 및 cermet 등의 중성자 차폐재들이 미국, 일본 등지에서 개발중에 있다[7-9].

본 연구에서는 고무계 고분자물질을 기본으로 하여 이들의 장점을 살리면서 내열 및 내연성이 우수한 중성자 차폐재를 국내에서 생산되거나 쉽게 구입할 수 있는 원료를 이용하여 개발하고자 하였다. 이를 위해 내열성, 내연성이 우수한 액상 실리콘고무를 기본물질로 하고 여기에 폴리프로필렌, 수산화알루미늄, 탄화붕소 등의 첨가제를 혼합하여 중성자 차폐재를 제조하여, 경화전의 유동성, 열적 및 역학적 특성, 내방사선성 및 중성자 차폐능 등을 고찰하였다.

제 2 장 실험

제 1 절 실험재료

수지계 중성자 차폐재의 기본물질(matrix material)로는 내열성 및 난연성이 우수한 상온 경화용 액상 실리콘 고무와 기계적성질이 우수한 에폭시 수지를 사용하였다. 중성자 차폐재로서의 특성 향상을 위한 각종 첨가제로는 고속 중성자 감속에 매우 효과적인 수소원자수 밀도가 높은 폴리프로필렌, 난연제로 수산화알루미늄, 중성자 흡수제로 탄화붕소를 사용하였다.

1. 액상 실리콘 고무

실리콘 고무는 합수소계 고분자물질중에서 내열성 및 난연성이 가장 우수한 재료중의 하나로 알려져 있으며, 경화전에는 액체상이기 때문에 그 유동성을 이용하여 수송용기의 내부구조와 같은 복잡한 형상의 주형이 가능하다. 실리콘(silicone)은 유기기가 결합되어 있는 규소가 실록산결합(Si-O-Si)에 의해 연결되어 생긴 폴리머이며, 또한 실리콘 고무는 망상구조의 분자로 되어있으며, 그물 결합점(가교점)의 수는 통상 수백개의 R_2SiO 마다 한개씩 포함된 느슨한 구조로 되어 있다[10]. 이와 같은 구조에서는 분자사슬이 상호 이동할 수 없게 되기 때문에 유동성은 없어지나 오히려 분자의 자유도는 크게 되어 신축성이 생겨 고무의 성상을 나타낸다.

본 연구에서 중성자 차폐재의 기본물질(matrix material)로 사용한 액상 실리콘 고무는 미국 Dow Corning사의 Sylgard 170 및 국내 해룡 실리콘(주)의 HR-NS-120이다[11]. 해룡 실리콘(주)의 HR-NS-120은 특별주문에 의하여 제조된 것으로 일반적인 액상 실리콘 고무보다 보강제인 실리카

를 적게 첨가하여 기계적 강도는 떨어지나 첨가제를 많이 첨가할 수 있는 이점이 있다. 이들은 모두 주제(base, part A)와 경화제(hardener, part B)의 2성분으로 나누어 공급되는 부가형 2성분형 액상 실리콘 고무로서 사용직전에 양자를 혼합하여 사용한다. 주제와 경화제의 무게비율(또는 부피비율)이 1 : 1 로 완전 혼합된 액상 실리콘 고무는 상온에서도 완전히 경화가 되며, 가열하면 보다 빠르게 경화된다.

2. 폴리프로필렌

중성자는 거의 같은 질량의 수소원자와의 충돌에 의하여 에너지가 흡수되어 효과적으로 감속되기 때문에 수소원자수 밀도가 높은 물질이 중성자의 차폐에 효과적이다. 폴리프로필렌의 첨가량은 수소원자수 밀도를 향상시키기 위해서는 많을수록 좋으나 첨가량이 증가하면 내연성이 저하되므로 요구되는 차폐재의 특성에 따라 적당한 비율로 첨가량을 결정해야 한다. 본 연구에 사용한 폴리프로필렌은 호남정유에서 생산되는 입자크기가 100 ~ 200 mesh인 것을 사용하였다[11].

3. 수산화알루미늄

수산화알루미늄은 차폐재에 유독가스를 발생시키지 않으며, 난연성을 부여하고, 자기소화성을 촉진시키는 것으로 알려져 있다[4]. 또한 수산화알루미늄은 실리콘고무 이상으로 고속중성자를 열중성자로 감속시키는 작용도 한다. 수산화알루미늄의 배합비율이 너무 적으면 차폐재의 자기소화성이 나빠고, 너무 많으면 점도가 증가되어 시공성 및 취급에 문제가 있으므로 사용목적에 따라 최적 배합비율을 찾아야 한다. 본 연구에 사용한 수산화알루미늄은 일본경금속(주) 및 일본주우화학(주)에서 생산되는 입자크기가 100 ~ 325 mesh인 것을 사용하였다[11].

4. 탄화붕소(B₄C)

붕소는 저속 혹은 열중성자에 대한 차폐효과가 크기 때문에 종래부터 중성자 차폐재로서 수소원자수 밀도가 높은 폴리에틸렌 등에 붕소 혹은 붕소화합물과 혼합 또는 병용되어 사용되어 왔다. 중성자 차폐능은 일반적으로 수소원자 혹은 붕소원자의 밀도에 비례하고 그 화합물의 구조에는 영향을 받지 않는 특징이 있다. 수소원자는 고속 및 중속의 중성자에 대한 차폐능이 우수하고, 붕소원자는 수소에 의하여 감속된 저속 및 열중성자를 흡수하는 역할을 하기 때문에 혼합하여 사용할 필요가 있으며, 혼합물의 중성자 차폐능을 높이기 위해서는 각 구성 성분 중의 각각의 원자수 밀도를 높게 하는 것이 바람직하다. 탄화붕소는 붕소화합물중에서 중성자 차폐재에 가장 많이 사용되는 것으로 붕소함량이 많기 때문에 열중성자 포획거시단면적이 크고, 중성자 차폐시에 고준위의 2차 방사선이나 장수명 2차 부산물을 발생시키지 않는 등 중성자 흡수재로서 이상적인 특징을 많이 갖고 있다. 또한 밀도가 적으면서 녹는점이 높고(2450 ℃), 화학적으로 안정함 등 여러가지 장점이 있다. 그러나 충격에 약하다는 단점이 있으므로 고분자물질 등과 결합된 형태로 사용되는 것이 바람직하다. 본 연구에 사용한 탄화붕소는 Union Carbide사에서 생산되는 입자크기가 325 mesh인 것을 사용하였다 [11].

제 2 절 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 중성자차폐재 제조의 기본물질인 액상 실리콘고무와 분말형태의 폴리프로필렌, 수산화알루미늄, 탄화붕소 등의 첨가제들을 균일하게 혼합하기 위하여 Rheodrive 5000 에 의해 rotor 가 구동되며 가열 및 냉각장치에 의해 자동으로 온도를 조절하여 일정한 온도에서 혼

합할 수 있는 HAAKE Rheomix 600 을 사용하였다. 혼합기의 rotor 는 가장 좋은 혼합도를 나타내는 것으로 알려진 sigma 형을 사용하였다. 혼합시의 조건은 혼합기의 내부온도 및 압력은 상온, 대기압, rotor의 회전속도는 60 rpm, 시료의 부피는 60 ~ 80 cm³, 혼합시간은 10 ~ 15 분 이었다. 실험방법은 Fig. 1 의 흐름도에서 볼 수 있듯이 혼합시에는 정해진 무게비율로 각 시료들을 준비하여 액상 실리콘고무의 주체와 경화제를 같은 무게비율로 혼합한 후, 분말시료들을 혼합기에 넣어 일정시간 동안 혼합하였다. 액상 실리콘고무는 점도가 높은 액체상의 물질이며 여기에 무기물질인 분말형의 첨가제를 넣고 혼합하면 액상과 분말의 계면에 아주 작은 기포들이 많이 존재하게 되므로 이를 제거하기 위해서 진공도 10 mbar 내외의 진공데시케이터 안에서 15 ~ 20 분 동안 두어 혼합물 내부의 기포를 완전히 제거하였다. 기포가 제거된 후 특성시험에 알맞는 시편을 제작하기 위해 각종의 시편틀에 액체혼합물을 투입한 후 75℃ 의 오븐속에서 30 ~ 40 분 동안 경화시켰다. 본 연구에서는 고속증성자, 저속 및 열증성자의 차폐효과에 관계되는 수소원자밀도와 붕소원자밀도, 가공성의 용이 및 증성자 차폐재의 다른 특성을 고려하여 제조된 세 종류의 증성자 차폐재시편의 조성비는 Table 1 에 나타내었다.

Table 1. Composition of Shielding Materials

Shielding material	Composition (wt.%)			
	Silicone	Al(OH) ₃	B ₄ C	Polypropylene
DC-70	70	18	2	10
DC-49	49	49	2	-
HR-39	39	59	2	-

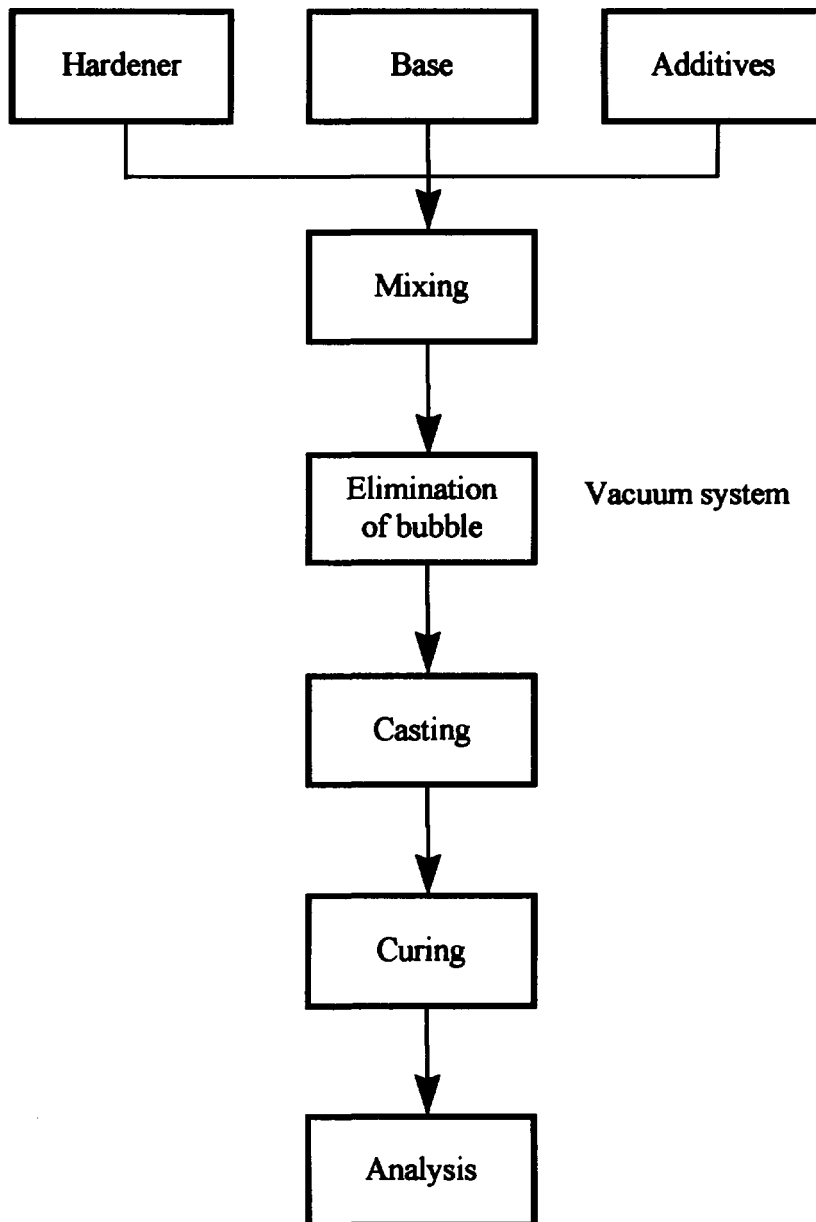


Fig. 1. Flow chart of specimen preparation

제 3 절 중성자 차폐재 특성시험

여러종류의 중성자 차폐재의 성질을 비교하고 또 적당한 차폐재를 선택해서 유용하게 사용하기 위해서는 여러가지 특성치가 필요하다. 일반적 고분자물질이나 열경화성 플라스틱 등의 시험법은 KS 및 ASTM, JIS 등에 규정되어 있으나 중성자 차폐재에 대한 시험방법은 아직까지 확립된 방법이 없으며, 미국 및 일본 등지에서도 일반적인 표준시험 방법에 따르고 있다. 따라서 여기서는 중성자 차폐재로서 갖추어야 할 기본특성인 중성자 차폐능, 내연성, 연소특성, 내방사선성, 열적특성 및 역학적 특성들의 시험법에 대하여 기술하였다.

1. 중성자 차폐능시험

중성자 차폐재의 차폐능시험은 자발적핵분열중성자선원(spontaneous fission neutron source)인 Californium-252에 의해 행해졌으며[11], 중성자선원의 강도는 1.01×10^9 n/s이고 시편의 크기는 300mm(W) x 300mm(H) x 25mm(T)이고 중성자 선원과 계측기 사이의 거리는 50 cm, 차폐재와 계측기 사이의 거리는 15 cm이다. Polyethylene cylinder로 된 9" remmeter(Eberline Co.)로 중성자 선량율을 측정하였고 감마선량율은 reference ionization chamber로 측정하였다. 실험장치에서 보는 바와 같이 레이저빔(laser beam)에 의하여 중심선이 정렬되었다면 1차원 방정식으로 취급할 수 있다. Cf-252 중성자선원의 중심점을 $x = 0$ 으로 하고, $\phi_0(x)$ 는 x 지점에 차폐재가 없을 때의 중성자 선속밀도(neutron fluence rate), $\phi_i(x)$ 는 x 지점에 차폐재 i 가 놓여 있을 때의 중성자 선속밀도를 나타낸다. 차폐재의 구성 핵종의 원자수 밀도(atomic density)를 N , 전 미시적 반응단면적(total microscopic cross section)을 σ_t , 두께를 T 라 하면, 차폐재에 의한

중성자 선속밀도 감소율은 다음 식(1)로 표시된다.

$$\frac{\phi_i(x)}{\phi_o(x)} = \exp(-N * \sigma_t * T) = \exp(-\Sigma_t * T) \quad (1)$$

식(1)에서 첨자 t는 전 거시적 반응단면적(total macroscopic cross section)을 표시하고, 이 Σ_t 는 차폐재 내부에서의 중성자 반응확률이라는 물리적 의미를 갖는다. 중성자 차폐 실무에서는 이 Σ_t 대신에 거시적 제거단면적(macroscopic removal cross section) Σ_R 를 사용하는데, 그 유도 과정이 다를 뿐 어떤 중성자 차폐재의 차폐성능을 나타내는 단면적으로서의 그 의미가 동일하다[7].

중성자 차폐재의 중성자 차폐성능실험은 중성자 계측기의 유효 선량당량률(effective dose equivalent rate)의 측정을 통하여 행하였다. 중성자 선속밀도 $\phi_o(x)$ 로 부터 ICRU Report 39에서 권고하고 있는 $H^*(10)$ /hour의 계산은 다음 식(2)으로 표시된다[12].

$$D(x) = \frac{B \cdot F_i \cdot E_F}{4 \pi x^2} * (1 + AS * x^2) * H^*(10) / \phi \quad (2)$$

여기서, B = Cf-252 중성자 선원의 방출율(emission rate),

1.01E+9 [neutrons/sec] ($\pm 2.0\%$) ('94. 10월 12일 현재)

F_i = 비등방성 교정인자(anisotropy calibration factor),

1.061 \pm 0.5%

E_F = 이탈인자(escape factor), 비감속 선원(bare source): $E_F=1$,

중수감속 선원(D₂O moderated source): $E_F=0.893(\pm 0.5\%)$

AS = 9" remmeter(Eberline Co.,USA)에 대한 산란보정인자

(scattering correction factor)의 계수,

비감속 선원: $AS=1.52E-5[\text{per cm}^2]$,

중수감속 선원: $AS=1.13E-5[\text{per cm}^2]$.

$H^*(10)/\phi$ = 선속밀도 대 선량당량 환산인자,

비감속 선원: $H^*(10)/\phi=336.7[\text{pSv.cm}^2]$,

중수감속 선원: $H^*(10)/\phi=96.99[\text{pSv.cm}^2]$

기준 중성자장이 확립된 중성자 교정실내에서 조사시험을 통하여 측정되는 중성자 차폐재의 거시적 반응단면적은 유효 선량당량율의 감소율로서 평가되며 다음 식(3)로 표시된다.

$$\frac{D_i(x)}{D_o(x)} = \exp(-\Sigma_t * T) \quad (3)$$

여기서, $D_o(x)$ = 선원과 계측기 사이에 차폐재가 없을 때의 중성자 선량당량율

$D_i(x)$ = 선원과 계측기 사이에 차폐재 i 가 있을 때의 중성자 선량당량율

한편, 중성자 차폐재의 차폐능은 식(4)에 의해 구해지는 거시적 제거단면적 (macroscopic removal cross section, Σ_R)으로 비교한다[7].

$$D_o / D_i = \exp(-\Sigma_R * T) \quad (4)$$

여기서, Σ_R 는 거시적 제거단면적(cm^{-1}), T 는 차폐재의 두께(cm)를 나타낸다.

중성자 차폐재의 차폐능시험은 중성자 교정실에서 중수감속 Cf-252

선원 중성자(평균에너지, 0.524 MeV) 및 비감속 Cf-252 선원 중성자(평균에너지, 2.01 MeV)에 의해 확립된 기준 중성자장에서 행하였다. 중성자 선원과 계측기사이의 거리가 50cm, 차폐재와 계측기사이의 거리가 15 cm로 배열하였다. 이는 중성자 교정실내의 산란 기여분을 최소화하고, 국제기준의 중성자 조사시험 조건을 만족시키기 위함이다[13]. 실험에서 중성자 차폐재가 있을 때와 없을 때에 대하여 각각 10회 측정하였고, 각각의 상대 표준편차를 구하였다. 이론적 산정은 Los Alamos National Laboratory (LANL)에서 개발한 Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code (MCNP)[14]를 사용하여 수행하였다. Cf-252 자발핵분열 중성자에 대한 중성자교정실내에서의 중성자방출율, 에너지스펙트럼, 비등방성, 선속밀도 대 선량당량 환산인자 등을 규명하여 기준 중성자장(Reference Neutron Fields)을 확립하였다[8]. 순수 맥스웰 분포로부터 Cf-252 선원밀봉과 중수감속구가 선량당량값에 미치는 영향이 평가되었고[15], 이 스펙트럼들이 입력자료로 사용되었다. 연속에너지 ENDF/B-V 중성자 및 감마선 생산 단면적 라이브러리인 BMCCS1을 사용하였다[14]. 관심이 되는 물리적인 양이 중성자선량이므로 광자나 2차 유도감마선(neutron-induced photon)에 대하여서는 수송을 수행하지 않았다. 본 연구에서 관심이 되는 양은 어느 특정 지점에서의 에너지중속 중성자 선속밀도이다. 모델링은 3차원으로 구성하였고 선속밀도는 Fluence Tallies를 사용하여 계산하였다. 이와같은 복잡한 기하학적 조건에서 통계적 오차(Statistical Error)를 최소화 하기 위하여 Point Detectors (Last-flight Estimators)를 사용하였는데, 이는 중성자교정실 내의 교정용 벤치 축을 중심으로 하여 적절한 대칭성이 성립되기 때문이다. 계산된 중성자 선속밀도는 54 에너지군으로 분류하였으며, 선원중성자는 단일 선속밀도로 정규화된다. 이 Energy Groups는 ISO Standard 8529에서 보고된 중수감속 Cf-252 선원중성자 스펙트럼에 대한 52 Group Structure를 포함한 것

인데, 이는 IAEA Report 180[13]에 부합하기 위한 것이다. 여기에 추가되는 2개의 Energy Groups는 $0.001\text{E}-6$ MeV와 $0.0414\text{E}-6$ MeV 사이, 그리고 0.02 MeV와 0.04 MeV 사이의 본래의 에너지군을 둘로 나눈 것이다. 이러한 Group Structure가 본 연구의 모든 몬테카를로 계산에 적용되었다.

실험적 산정에서와 동일하게 실제 조건을 모델링하였다. 선원 중심과 계측기 중심 사이의 거리는 50 cm이고, 차폐재의 앞면과 계측기 중심 사이의 거리는 15 cm이다. 중성자 조사시험에서 선원 중심과 계측기 중심사이의 최소 거리는 50 cm이므로 실험적 산정과 이론적 산정에서 이 거리를 채택한 것인데, 이는 선원, 차폐재 그리고 계측기로 이어지는 실험장치의 구성에서 차폐재가 있을 때와 없을 때의 중성자 산란 기여분의 차이는 충분히 가까운 거리에서는 무시할 수 있기 때문이다. 표준상태 공기의 구성원소는 75.48% 의 N, 23.1% 의 O, 그리고 1.32% 의 Ar이고, 밀도는 1.293×10^{-3} g/cm³이다. 중성자 차폐재 DC-70, DC-49 및 HR-39에 대한 화학구성원소는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Chemical Composition of Shielding Materials

Element (wt.%)	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Hydrogen	5.2	4.0	4.6
Carbon	21.2	9.0	9.1
Boron	1.6	1.6	1.6
Oxygen	37.4	48.6	48.5
Aluminum	6.2	16.9	20.3
Silicon	28.4	19.9	15.9
Density (g/cm ³)	1.387	1.737	1.678

2. 내연성 시험

중성자 차폐재의 내연성시험[11]은 ASTM D635에 따라서 불꽃의 높이가 25 mm인 분젠버어너에서 30 초간 연소 후 연소시간 및 길이를 측정하였으며, 시편의 크기는 나비, 두께가 각각 12.5 mm, 길이가 125 mm이었다.

3. 연소특성 시험

중성자 차폐재의 연소특성시험[11]은 ASTM E136에 따라서 수직 가열로의 내부관 속을 통과하는 공기의 유속은 3 m/min, 내부관 중앙의 온도가 800 ℃가 되도록 가열하여 최소한 15 분 이상 유지한 후 시편을 가열로의 중앙에 놓고 30 분간 시편의 내·외부온도를 측정하였으며, 시편의 크기는 38 mm(W) x 51 mm(L) x 38 mm(T)이었다.

4. 내방사선성 시험

중성자 차폐재의 방사선 조사실험은 대단위 조사시설의 방사선원 (Co-60, 86,500 Ci)에 의한 고준위 감마선조사(high intensity gamma irradiation(HIGI))에 의해 행하였다[11]. 시험에 사용한 조사선량은 0.05 MGy, 0.5 MGy 및 1.0 MGy이고, 이들은 각각 평균조사선량 5 kGy/h으로 10시간, 100시간 그리고 200시간 동안 조사하여 얻었다. 조사시 조사면적의 크기에 따른 조사선량의 편차를 줄이기 위하여 100 mm(W) x 360 mm(L) x 80 mm(T) 크기의 상자에 시편을 넣어 조사대 전면판과 8 cm 되는 거리에 평행하게 설치하여 조사하였다. 방사선 조사후 인장강도, 압축강도, 경도, 비중 및 차폐재의 주요 구성원소(H)의 변화를 측정하였다.

5. 열적 특성시험

가. 열안정성 시험

중성자 차폐재의 열안정성시험[11]은 ASTM E537에 따라서 시료 20 ~30 mg을 취하여 platinum pan에 넣고 질소를 90 ml/min의 유량으로 흘려보내면서 10 °C/min의 가열속도로 가열하고 온도는 상온에서 800 °C까지 TGA 측정을 하였다.

나. 열전도도 시험

중성자 차폐재의 열전도도시험[11]은 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 크

기는 $\phi 200$ mm x 12 mm(T)이었다.

다. 열팽창시험

중성자 차폐재의 열팽창시험[11]은 ASTM D696에 따라서 DuPont 2100 Thermal Analysis(TMA)에 의해 50 ~ 210 °C 범위에서 열팽창계수를 측정하였으며, 시편의 크기는 6 mm(W) x 6 mm(L) x 4 mm(T)이었다.

라. 열건전성시험

중성자 차폐재의 열건전성시험[16]은 고무노화시험기에서 130 °C, 150 °C 고온분위기하에 6 rpm 속도로 회전시키며, 5, 10, 20, 50, 100일 경과 후의 무게감량, 인장강도 및 경도를 측정하였으며, 시편의 크기는 12.7 mm(W) x 50 mm(L) x 12.7 mm(T)이었다.

6. 역학적 특성시험

가. 인장 시험

중성자 차폐재의 인장시험[11]은 KS M6518에 따라서 Zwick Model 1446로 crosshead 속도를 500 mm/min로 일정하게 유지하며 인장강도를 측정하였으며, 시편은 KS M6518의 규격에 의해 제작하였다.

나. 압축 시험

중성자 차폐재의 압축시험[11]은 KS M6518에 따라서 MTS 25 ton 용량의 만능재료시험기를 사용하였으며 시험속도는 2 mm/min 로 일정하게 유지하여 압축강도를 측정하였으며, 시편의 크기는 38 mm(W) x 51 mm(L) x 38 mm(T)이었다.

다. 경도 시험

중성자 차폐재의 경도시험[11]은 KS M6518에 따라서 Rex Durometer Model 1000인 스프링식 경도시험기(shore A 경도시험기)로 경도를 측정하였으며, 시편의 크기는 $\phi 29 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm(T)}$ 이었다.

7. 화학 분석

가. FT-IR 스펙트럼

FT-IR 스펙트럼은 NICOLET Model 800을 사용하여, 경화시키기 전의 액상의 실리콘고무의 주제와 경화제를 KBr window에 발라서 FT-IR 스펙트럼을 측정하였다.

나. 원소 분석

(1) 수소, 탄소, 질소 원소 분석

수소, 탄소, 질소원소 분석은 CHN-1000 Elemental Analyzer (LECO Co.)로 행하였다.

(2) 붕소, 아연 원소 분석

붕소와 아연원소분석은 시료 약 0.1g을 취하여 진한 질산 5 ml 와 진한 염산 5 ml를 가하여 녹인 다음 50 ml로 맞추었다. 본 용액을 붕소는 208.959 nm, 아연은 213.856 nm에서 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer)로 측정하였다.

(3) 실리콘 원소 분석

실리콘고무중의 실리콘 분석은 시료 약 0.1 g을 취하여 분쇄한

후 백금 crucible에 옮겨 진한 황산을 가하고 hot plate 상에서 가열 분해시킨다. 이것을 furnace에서 950 ℃로 2 시간 동안 가열한 후 무게를 측정하고, 진한 황산과 불산(HF)을 가하고 hot plate 상에서 가열하여 실리콘을 SiF₄로 날려 보낸 후 다시 furnace에서 950 ℃로 2 시간 가열한 후 무게를 측정하여 무게차에 의해서 실리콘원소를 분석하였다.

제 3 장 결과 및 고찰

제 1 절 유동적 특성

중성자 차폐재의 성능을 향상시키기 위하여 액상 실리콘 고무에 각종 첨가제를 첨가할때 분산상태를 확인하여야 한다. 일반적으로 광학현미경이나 전자현미경을 사용하여 분산상태를 확인하고 있으나 혼합시료의 단편적인 면 밖에 관찰하지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 전자현미경에 의한 분산상태의 관찰[11]과 함께 차폐재시편에서 10개의 샘플을 취하여 측정 한 비중값의 표준편차로부터 전체적인 분산상태를 평가하였다. 표준편차는 Table 3에 나타내었으며, 시편들의 표준편차는 $1.6 \times E-03 \sim 5.5 \times E-03$ 로 전체적인 분산상태는 상당히 양호한 것으로 판단된다.

Table 3. Specific Gravity of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Density (g/cm ³)	1.387	1.737	1.678
Standard deviation	4.129×10^{-3}	5.506×10^{-3}	1.583×10^{-3}

또한 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 받게됨으로 적절한 배합비율의 선택이 중요하게 된다. 특히 첨

가제중에서 난연제인 수산화알루미늄의 배합비율이 가장 크기 때문에 수산화알루미늄을 첨가했을 때 점도가 낮으면 다른 첨가제를 어느 정도 첨가해도 유동성을 가지게 된다. 본 연구에서는 DC-70, DC-49 및 HR-39 차폐재의 점도를 측정하여 미국 Bisco products사 NS-4-FR의 점도와 함께 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 DC-70과 HR-39는 NS-4-FR의 점도보다 다소 낮고 DC-49는 점도가 높게 나타났으나 어느 정도 유동성을 지녀 주형시 어려움이 없는 것으로 나타났다.

제 2 절 중성자 차폐능 특성

1. 원자밀도

중성자 감속효과가 매우 큰 수소원자와 열중성자 흡수단면적이 큰 붕소 원자의 원자밀도등이 중성자 차폐능에 밀접한 관계가 있으므로 중성자 차폐재 DC-70, DC-49 및 HR-39의 원자밀도를 Table 4에 나타내었다. 이는 Table 2의 중성자 차폐재의 화학구성원소 분석 및 "Reactor Physics Constants" (ANL-5800, 1963)의 자료를 사용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 또한 이것은 식(3)에 의하여 각 구성원소에 따른 미시적 반응단면적을 산정할 수 있는 기본자료가 된다.

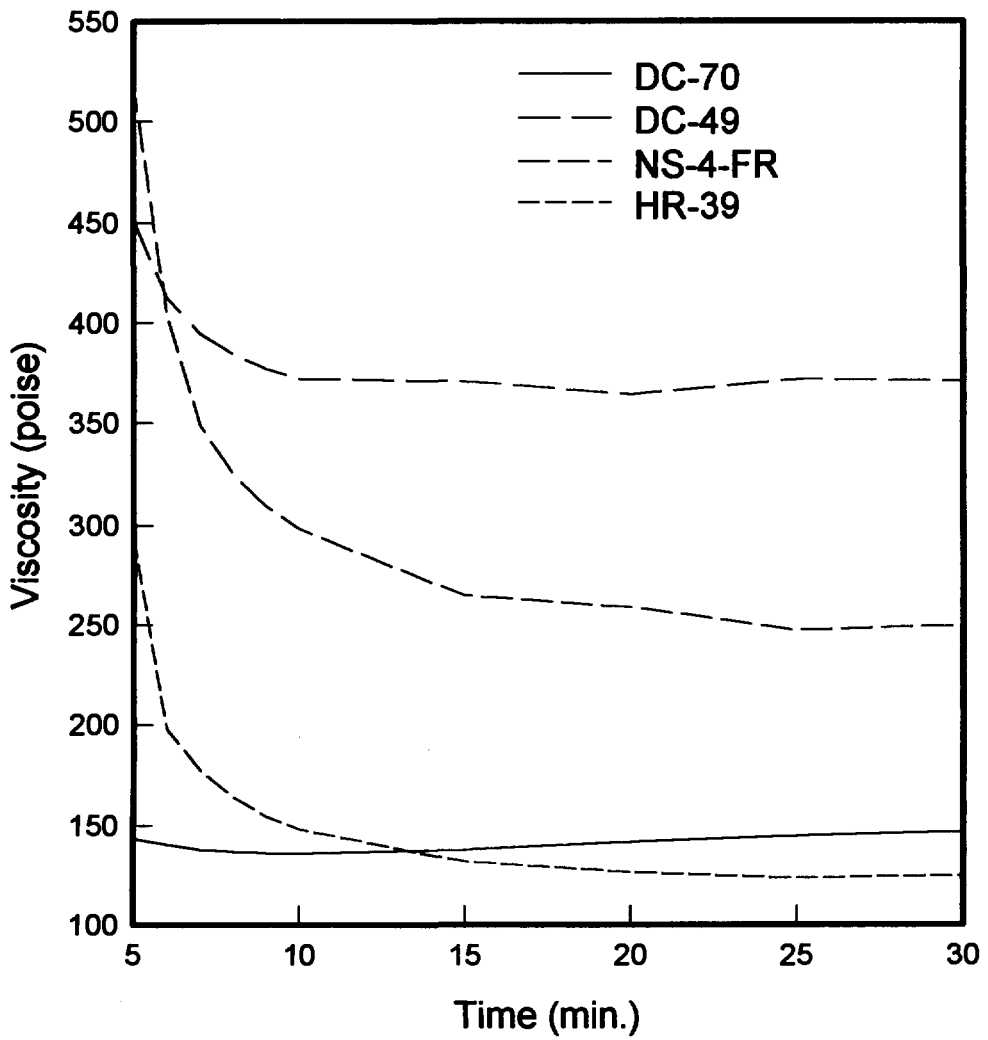


Fig. 2. Viscosity curves of uncured shielding materials.

Table 4. Atomic Densities of Shielding Materials

Shielding material	Atomic density ($\times 10^{22}$ atoms/cm ³)					
	C	H	O	B	Al	Si
DC-70	1.47	4.31	1.95	0.12	0.19	0.84
DC-49	0.78	4.14	3.17	0.15	0.65	0.74
HR-39	0.77	4.63	3.10	0.15	0.76	0.57
Type I[7]	-	5.50	-	0.04	-	-

2. 거시적 중성자 반응단면적

9" Remmeter 반응함수는 그 정확성으로 인하여 널리 사용되고 있는 Hankins[17]가 평가한 것을 사용하였고, 단위 몬테카를로 계산에서 통계적 오차를 0.5% 이하로 달성하기 위하여 각 계산에서 700,000 개의 이력수를 부여하였다. 중성자 차폐재 DC-70, DC-49 및 HR-39 에 대하여 비감속 및 중수감속 Cf-252 선원중성자 각각에 대하여 중성자 차폐성능시험 및 MCNP Monte Carlo 코드를 사용하여 차폐재의 두께, 0.8 cm, 1.6 cm, 2.5 cm, 3.3 cm 및 4.1 cm에 따른 중성자 선량당량율의 변화를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 비감속 Cf-252 선원중성자와 중수감속 Cf-252 선원중성자에서의 중성자 차폐능의 크기는 HR-39, DC-49, DC-70 순으로 낮게 나타났으며, 이는 중성자 감속효과가 매우 큰 수소원자와 열중성자 흡수단면적이 큰 붕소원자의 원자밀도가 클수록 중성자 차폐능이 증가한 것으로 해석할 수 있다.

중성자 차폐재 HR-39 의 두께가 3 cm 일때 거시적 반응단면적의 측정 값은 0.14 cm^{-1} 이다. 이는 두께가 3 cm인 실리콘고무계 중성자 차폐재인

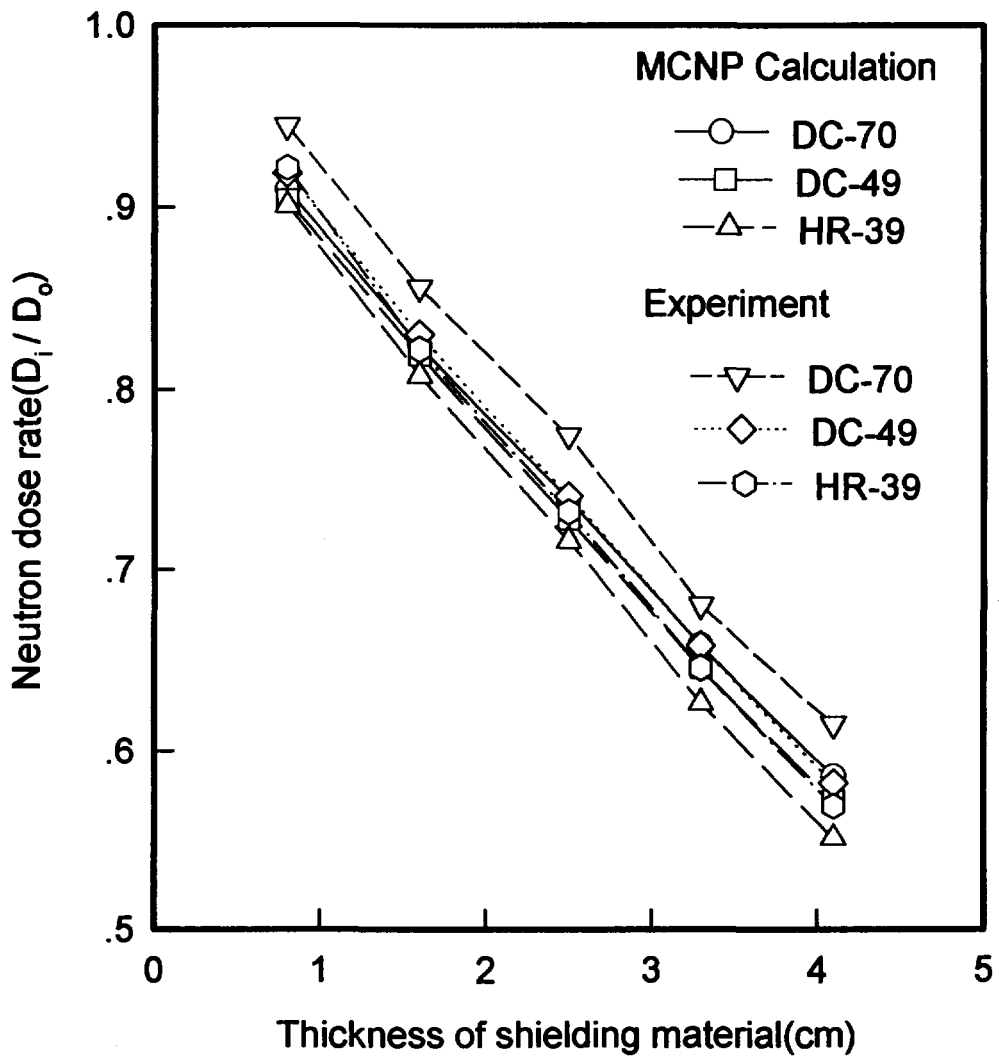


Fig. 3. Neutron dose equivalent rate attenuation for shielding materials as a function of thickness for the D_2O moderated Cf-252 neutrons.

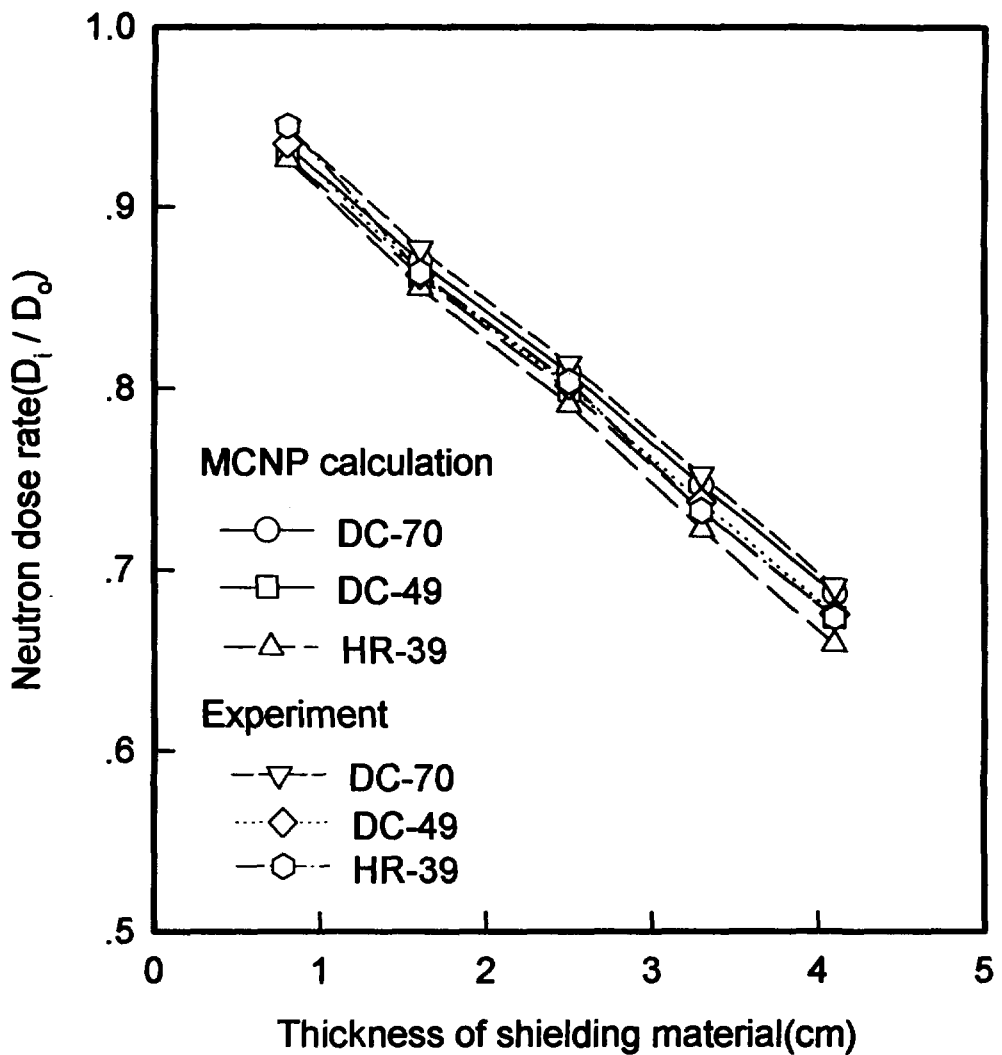


Fig. 4. Neutron dose equivalent rate attenuation for shielding materials as a function of thickness for the unmoderated Cf-252 neutrons.

Type I shield[7]의 거시적 반응단면적 0.14 cm^{-1} 과 같다. 그러나 DC-70 과 DC-49의 거시적 반응단면적은 0.13 cm^{-1} 로 조금 낮게 나타났다.

중성자 선량을 변화에 근거하여 각각의 거시적 중성자 반응단면적을 구하였고, 상대 표준편차를 계산하였다. 산정한 결과를 실험값과 함께 중수감속 및 비감속 Cf-252 선원중성자 각각에 대하여 Table 5와 Table 6에 나타내었다. 한편 실험값과 계산값 차이를 고찰하기 위하여 측정값 대 계산값의 비를 구하여 Table 5와 Table 6에 나타내었다. 중성자 측정이 상대적으로 그 편차가 큰 것을 감안하면, 실험적 산정 단면적과 이론적 산정 단면적이 상대 표준편차의 범위 내에서 전반적으로 일치함을 알 수 있다. 따라서 앞으로 MCNP Monte Carlo 방법으로 수송용기의 중성자 차폐재의 최적두께를 도출함으로써 수송용기의 무게 감소 및 수송용량의 증가등을 기대할 수 있다.

Table 5. Macroscopic Cross Sections of Shielding Materials, both the Calculated and the Measured for the D₂O Moderated Source (Average Neutron Energy : 0.524 MeV, Thickness : 25 mm)

Shielding material	Macroscopic cross sections(cm^{-1})		
	Measured	MCNP calculated	M/C
DC-70	0.102($\pm 5.3\%$)	0.121($\pm 2.1\%$)	0.85
DC-49	0.120($\pm 5.4\%$)	0.127($\pm 2.0\%$)	0.95
HR-39	0.125($\pm 4.3\%$)	0.134($\pm 2.3\%$)	0.93

Table 6. Macroscopic Cross Sections of Shielding Materials, both the Calculated and the Measured for the Unmoderated Source (Average Neutron Energy : 2.01 MeV, Thickness : 25 mm)

Shielding material	Macroscopic cross sections(cm ⁻¹)		
	Measured	MCNP calculated	M/C
DC-70	0.082(±5.3%)	0.086(±2.1%)	0.96
DC-49	0.088(±5.4%)	0.092(±2.0%)	0.97
HR-39	0.087(±4.3%)	0.096(±2.3%)	0.91

3. 중성자 선량을 대 감마선량의 비

중성자 차폐재에 입사되는 중성자는 낮은 질량수의 원자핵과 충돌하여 열중성자화 된다. 이 열중성자는 한편으로 수소원자핵과 (n, γ)반응을 하여 고에너지 감마선을 방출한다. 어떤 특별한 조건에서 중성자 차폐재의 두께가 매우 클 경우에는 이 2차 유도 감마선 선량이 중성자 선량보다 크게 나타날 수 있다. 따라서 중성자 차폐재의 차폐능 평가에서는 이 2차 유도 감마선의 거동을 반드시 고려하여야 한다. 중성자 차폐능 평가와 병행하여 비감속 Cf-252 중성자선원의 감마선(최대빈도 에너지, 550 keV)을 사용하여 중성자 차폐성능시험과 동일한 두께에 대하여 감마선 차폐시험도 행하였으며, 이 측정값을 가지고 중성자 선량을 대 감마 선량의 비를 계산한 결과는 DC-70: 5.40%, DC-49: 5.32%, HR-39: 5.30%으로 나타났다.

4. 수송용기 KSC-7에 대한 차폐해석

중성자 차폐재, DC-70, DC-49 그리고 HR-39를 KSC-7 사용후핵연료 수송용기에 사용할 경우의 차폐해석 결과를 Table 7에 나타내었다. KSC-7 수송용기 방사선원 계산에 사용된 설계기준 핵연료는 고연소도 핵연료에 해당되는 PWR 17 x 17 배열 집합체로 초기농축도 4.2 w/o를 가지고 40.0 MW/MTU의 specific power로서 원자로에서 50,000 MWD/MTU의 연소도로 조사된 후 발전소내 사용후핵연료 저장조에서 1.5년 동안의 냉각기간을 가진 사용후핵연료로 기준하였다. 차폐해석은 KSC-7 수송용기의 정상수송 조건에서 수행하였으며 수송용기는 사용후 핵연료를 전용적재하고 내부 장전통은 물이 없는 공냉식이다[18]. 수송용기의 반경방향의 최대 방사선량을 1 차원 차폐계산코드인 ANISN 코드로 수송용기의 옆표면과 옆표면으로부터 1 m 및 2 m 지점에서 선량을 계산하였다. 수송용기의 정상수송조건에서 최대 방사선량을 허용기준치는 국내 과학기술처고시 제 85-8호 제 22조, IAEA safety series No. 6 para.465 그리고 미국의 10 CFR 71.47에서 전용적재인 경우 차량 및 수송용기의 표면에서 2 mSv/h, 용기표면으로부터 2 m 거리에서 0.1 mSv/h로 규정하고 있다. Table 7에서 보는 바와 같이 이들 차폐재들을 수송용기에 적용할 경우 모두 이 규제치를 만족하는 것으로 나타났다.

Table 7. Maximum Dose Rates for KSC-7 Cask under Normal Transport

Shielding material	Dose rate (mSv/h)			
	Source	Cask surface	1 m from the cask surface	2 m from the cask surface
DC-70	Neutron	0.193	0.059	0.037
	Gamma-ray	0.232	0.073	0.046
	Total	0.425	0.132	0.083
DC-49	Neutron	0.172	0.052	0.032
	Gamma-ray	0.186	0.059	0.038
	Total	0.358	0.111	0.070
HR-39	Neutron	0.139	0.043	0.027
	Gamma-ray	0.191	0.061	0.038
	Total	0.330	0.104	0.065
Limit value		2.0	-	0.100

제 3 절 내연성

액상 실리콘고무와 각종 첨가제들을 일정한 비율로 혼합하여 만든 차폐재시편들의 내연성 시험결과를 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 보는 바와 같이 각 차폐재들의 평균연소길이(AEB)는 모두 5 mm 이하였고, 평균연소시간(ATB)은 대부분 5초 이하였다. 한국공업규격 KS M3015, 열경화성 플라스틱 일반 시험방법에 따르면 연소길이 25 mm 이하인 물질을 불연성, 25 mm 이상 100 mm 이하인 물질을 자기소화성 물질로 구분하고 있다. Table 8에서 나타난 수치들에서 알 수있듯이 시험된 차폐재들은 모두 불연

성 물질로 간주할 수 있다. 이같이 모두 불연성으로 나타난 것은 모든 시편들의 기본물질이 내연성이 우수한 실리콘고무이기 때문으로 판단된다. 또한 시험제조한 시편들의 대부분이 평균연소시간이 5초 이하인데, DC-70의 평균연소시간은 약 20초이다. DC-70은 폴리프로필렌이 첨가된 것으로 폴리프로필렌첨가에 의한 내연성의 저하로 볼 수 있다. 시험제조한 시편들의 평균연소길이 및 평균연소시간은 외국에서 개발된 중성자 차폐재들과 거의 비슷하게 나타났다.

Table 8. Burning Test of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
ATB (sec)	19	<5	<5
AEB (mm)	<5	<5	<5
Reference[19]	Reactor Experiments 237(Boro-Silicone)	ATB <5	AEB <5
	Bisco Products NS-1(Silicone Sheet)	<5	<5
	Kobe Steel Type I(Silicone Rubber)	<5	<5

제 4 절 연소특성

미국 NRC 규정[20]에 의한 화재조건(800℃, 30 분)에서 중성자 차폐재의 연소특성을 평가하기 위하여 중성자 차폐재 시편들의 800℃ 분위기에서 시편이 나타내는 최고 내·외부온도, 30분일 때 시편의 내·외부온도 그리고 시험전후의 무게변화 등을 Table 9에 나타내었다. 또한 시간에 따른 시편의 내부온도변화를 Fig. 5에 나타내었다. Table 9에서 보는 바와 같이 시편들

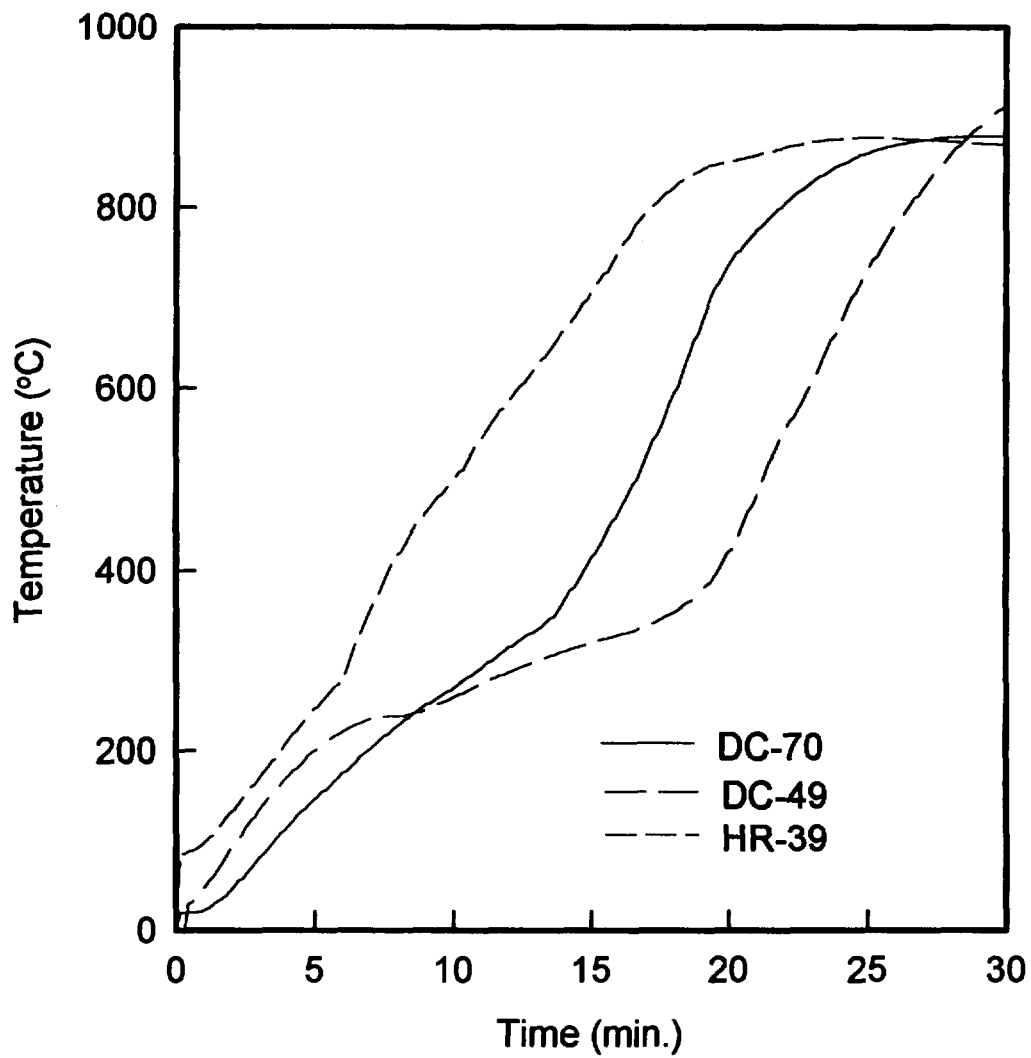


Fig. 5. Interior temperature response for shielding materials in a vertical tube furnace at 800°C.

의 내부최고온도가 모두 800 ℃ 이상을 나타내었으며, 외국산 실리콘고무계 중성자 차폐재의 연소특성 시험결과와 비슷하게 나타났다. 이는 시편내부에서 일어나는 반응이 발열반응이기 때문으로 판단된다. 연소특성시험전후의 시편의 무게변화는 20 ~ 30 % 정도였다.

Table 9. Combustion Characteristics of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Surface T _{max} (℃)	875	885	923
Interior T _{max} (℃)	878	913	876
Surface T(℃) at 30 min.	839	835	769
Interior T(℃) at 30 min.	878	913	869
Weight loss(%)	31.9	27.2	19.6
Reference[19]		Interior temp. at 30 min.(℃)	Weight loss(%)
	Bisco Products NS-1	824*	36
	Reactor Experiment 237	847/916*	32/33
	Kobe Steel Type I	> 800	10
	* continued to rise after removal from furnace		

본 연구에서 시제조한 실리콘고무계 차폐재나 외국산의 실리콘고무계 차폐재는 다 같이 연소특성시험에서 내부최고온도가 800 ℃이상으로 나타나고 있는데, 이것은 화재사고시 열원으로 작용할 수있다는 것을 의미하므로 수송용기의 중성자 차폐재로서 단점이 될 수있다.

제 5 절 내방사선성

고분자물질에 방사선을 조사하면 여러가지 원자핵의 자유라디칼 혹은 여기상태의 분자가 동시 다발적으로 생성되며, 중간체를 형성하는 다단계반응과 반응물질들 간에 여러형태의 화학반응이 경쟁적으로 일어나 고분자물질의 화학구조가 변화하게 되며, 이로 인해 방사선의 조사는 고분자물질의 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구의 실험에서는 이 영향들을 규명하기 위하여 평균조사선량을 5 kGy/h인 HIGI 를 사용하여 차폐재 시편에 방사선을 조사하였다. 또한 방사선조사에 의한 인장강도 및 압축강도의 실험결과 평균값의 편차는 0.4% ~ 6.4% 정도의 범위였다.

1. 인장강도에 대한 영향

일반적으로 폴리머에 방사선을 조사하면 주쇄(main chain)의 절단, 측쇄(side chain)의 절단 및 분해가스의 발생과 불포화결합의 생성이 경쟁적으로 일어나며, 주쇄절단으로 생긴 말단의 자유라디칼은 서로 반응하여 불균등화 또는 재결합을 하며, 측쇄절단으로 생긴 자유라디칼은 서로 반응하여 절단 혹은 가교결합을 하게 된다[10,21]. 따라서 방사선조사선량이 차폐재 시편의 인장강도에 영향을 미치게 되는데 이를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 방사선의 조사선량을 1.0 MGy까지 증가시켰을 때, DC-70 차폐재의 인장강도는 점차적으로 약간씩 증가하는 경향을 보이고, DC-49 차폐재는 조사선량의 증가에 따라 인장강도가 처음에는 약간 감소하다가 다시 약간 증가하는 경향을 보였으나, HR-39 차폐재의 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 방사선 조사선량의 증가에 따라 차폐재의 인장강도가 증가하는 이유는 주쇄의 절단보다는 측쇄에 생긴 자유라디칼간의 결합

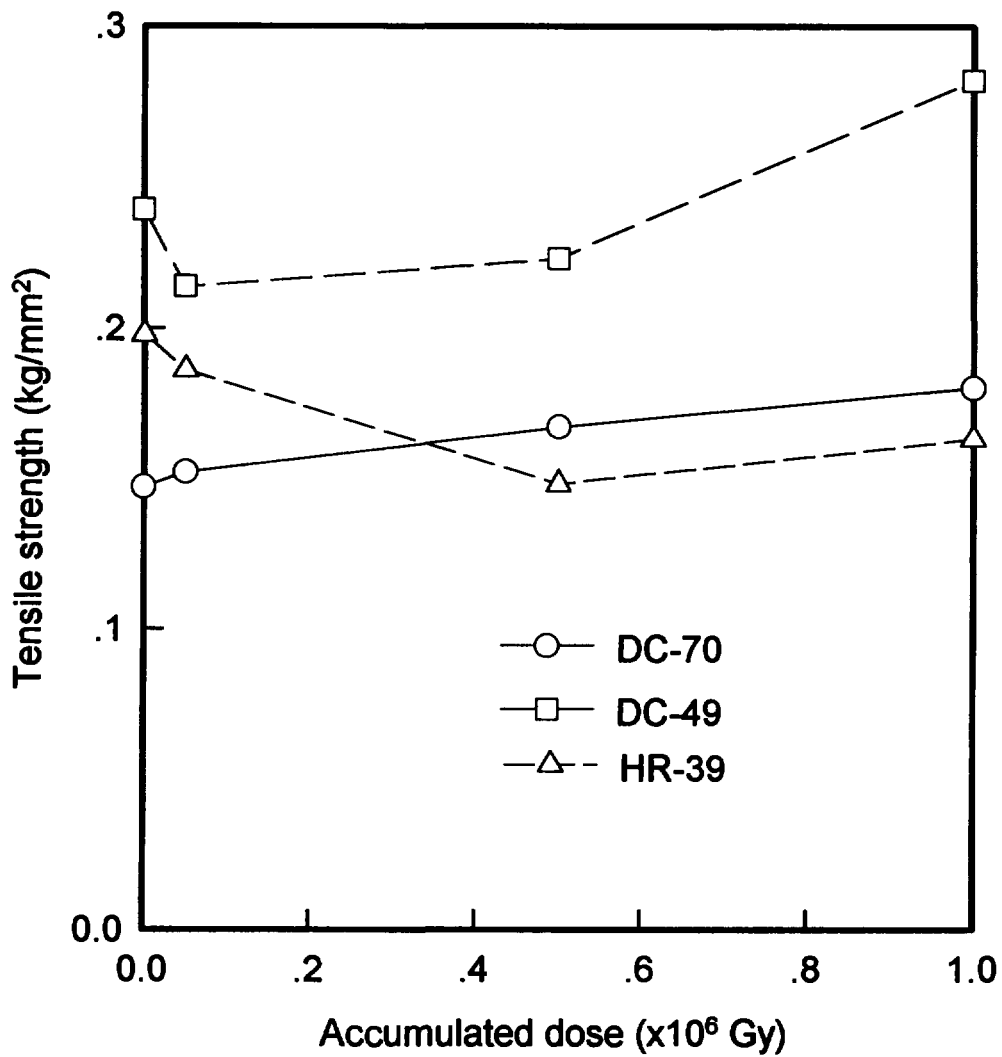


Fig. 6. Radiation-induced tensile strength of shielding materials.

이 주로 일어나 망상구조를 이루는 가교결합수가 증가하기 때문으로 해석할 수 있다. 본 실험에서 기본소재로 사용한 실리콘고무의 기본구조는 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane: $((\text{CH}_3)_2\text{SiO})_n$)으로, Si-O 구조를 갖고 있는데, 화학결합의 강도를 나타내는 결합에너지측면을 살펴보면 실리콘구조로 되어 있는 Si-O(101 Kcal/mole)의 결합에너지는 다른 구조를 이루고 있는 Si-C(50-80 Kcal/mole), C-C(83.2 Kcal/mole) 그리고 C-H(98.8 Kcal/mole)의 결합에너지보다 큰 것으로 알려져있다. 이것은 Si-O의 전기음성도차가 크기 때문에 Si-O가 이온결합에 가깝게 되어 있어서 에너지적으로 안정화가 되어있기 때문이라 알려져 있다[10]. 따라서 폴리디메틸실록산고무에 방사선을 조사하면 결합에너지 값으로 볼때 주쇄절단보다는 측쇄절단으로 생긴 라디칼의 가교결합이 우세하여 인장강도를 증가시키는 것으로 생각된다. 즉 첨가제의 양이 적고 실리콘고무가 주를 이룬 DC-70은 초기 가교결합인 C-C나 Si-O의 주쇄의 절단으로 생긴 주쇄라디칼의 재결합이 잘 이루어지며, 바로 이웃하는 생성된 측쇄라디칼의 가교결합이 잘 이루어지는 한편 첨가된 폴리프로필렌과도 결합하여 조사선량의 증가에 따라 인장강도가 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 실리콘고무가 DC-70보다 적은 DC-49는 적은 양의 γ 선 조사시에는 측쇄가교결합에 의한 인장강도의 증가 효과보다는 주쇄라디칼이 재결합을 하지않고 불균등화반응으로 절단됨으로서 생기는 인장강도의 감소효과가 커서 전체적으로 인장강도는 감소되는 것으로 생각된다. 그러나 조사선량이 증가하면 가교결합이 활발해져 인장강도를 높이는 효과가 더 커서 인장강도가 증가되는 것으로 생각된다. 한편으로 실리콘고무가 매우 적은 HR-39는 측쇄의 가교결합에 의한 인장강도의 증가 효과보다 주쇄절단 라디칼이 첨가제에 의해 재결합이 방해되므로 불균등화반응이 주로 일어나 인장강도의 감소효과를 보다 더 크게 나타나게 하므로서 인장강도가 γ 선 조사선량의 증가에 따라 인장강도가 감소하는 것이라 생각된다

다. 이와같이 차폐재를 구성하고 있는 고분자물질들이 방사선조사에 의해 분해반응을 하거나 가교형성반응을 하는 것은 혼합 고분자물질의 성분 및 특성, 첨가제 등에 의해 결정된다고 판단된다. 따라서 차폐재의 인장강도를 일정 수준이상으로 유지하기 위해서는 실리콘고무에서의 실리카함량의 조절이 필요하다고 하겠다. 실리콘고무의 기본물질에 탄화붕소를 첨가하여 제조된 외국산 차폐재, Boraflex의 조사전의 인장강도는 0.11 kg/mm^2 , 조사후(조사선량, $5 \times 10^{10} \text{ rad}$), 0.28 kg/mm^2 로 보고되었다[22].

2. 압축강도 및 경도에 대한 영향

방사선조사선량이 고분자차폐재의 압축강도 및 경도에 미치는 영향을 Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 나타내었다. Fig. 7 및 Fig. 8에서 보는 바와 같이 방사선조사선량이 1.0 MGy까지 증가함에 따라 DC-70과 DC-49 고분자차폐재들의 압축강도 및 경도의 증가 경향이 HR-39보다 크게 나타났음을 알 수 있다. 이는 방사선조사에 의하여 차폐재의 기본물질인 실리콘고분자의 측쇄절단으로 생성된 자유라디칼간의 가교결합이 HR-39보다 DC-70과 DC-49가 우세하므로 압축강도 및 경도가 보다 더 증가하는 것으로 판단된다. 특히 폴리프로필렌이 첨가된 DC-70의 경우는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 조사선량이 증가함에 따라 DC-49 차폐재보다 압축강도가 보다 더 증가하는데, 이는 폴리프로필렌과 실리콘 폴리머사이의 가교결합도 함께 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 외국산차폐재, Boraflex의 조사전의 압축강도는 0.17 kg/mm^2 , 조사후(조사선량, $5 \times 10^{10} \text{ rad}$), 0.45 kg/mm^2 이고, 조사전의 경도는 87, 조사후는 95로 보고되었다[22]. 방사선조사선량의 증가에 따른 하중-변위관계를 Fig. 9에 나타내었다. 일반적으로 고분자물질은 방사선에 조사되면 분자구조가 절단됨으로서 약해지는 물질이 있는 반면에 가교결합

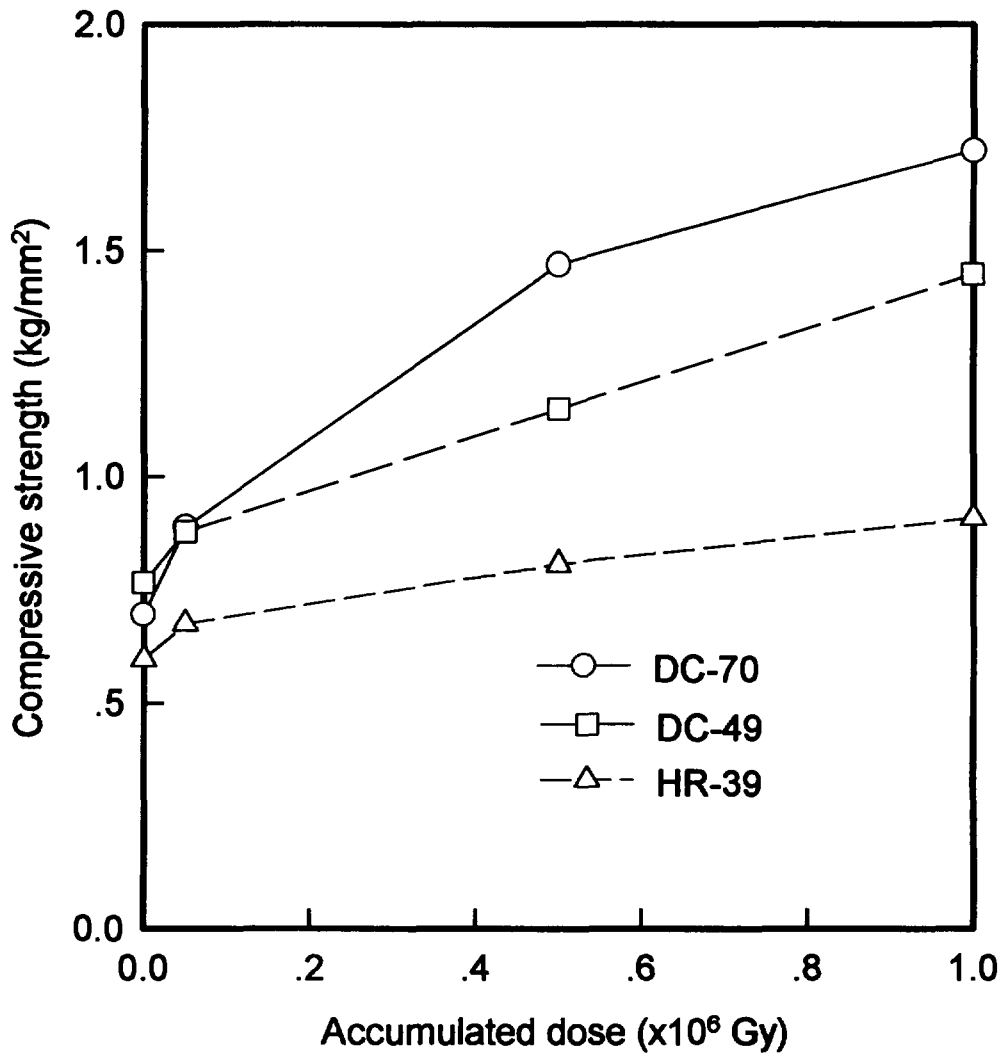


Fig. 7. Radiation-induced compressive strength of shielding materials.

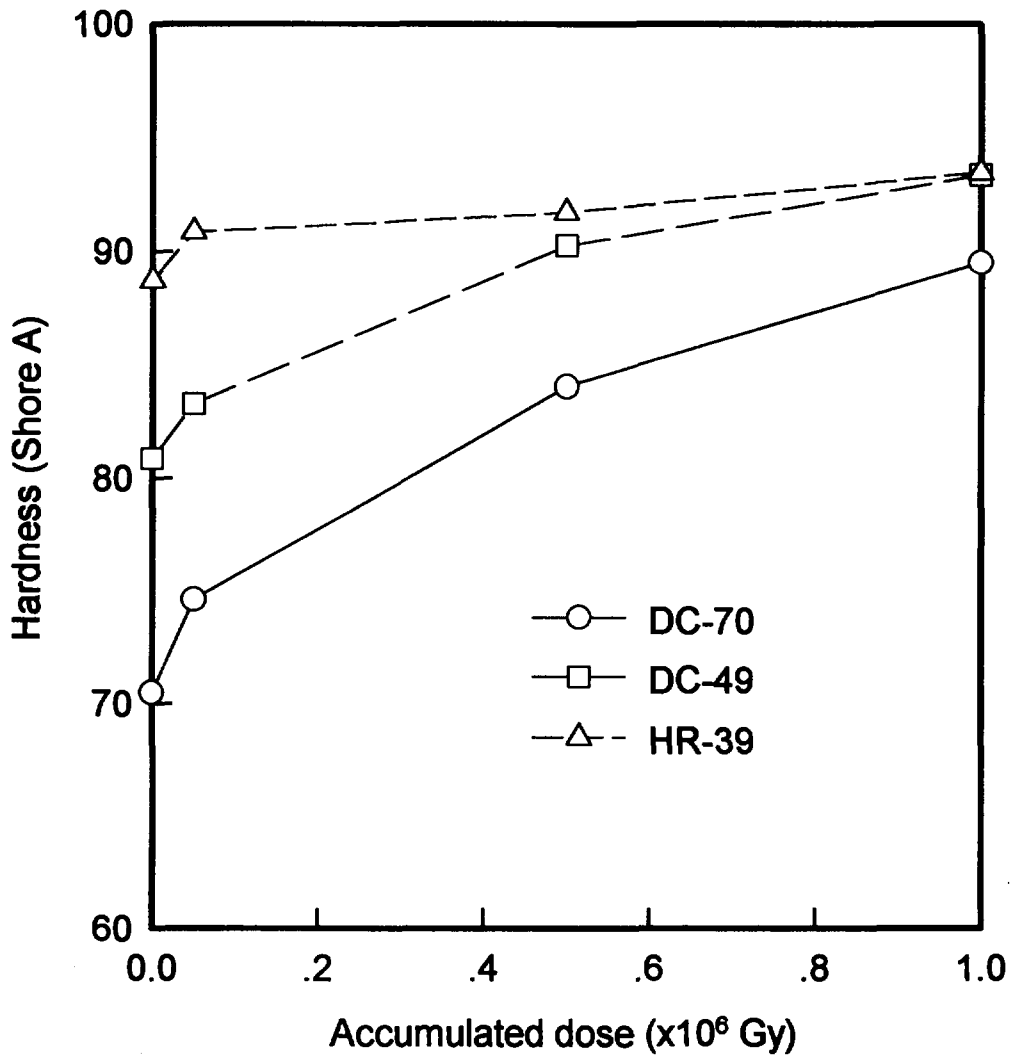


Fig. 8. Radiation-induced hardness of shielding materials.

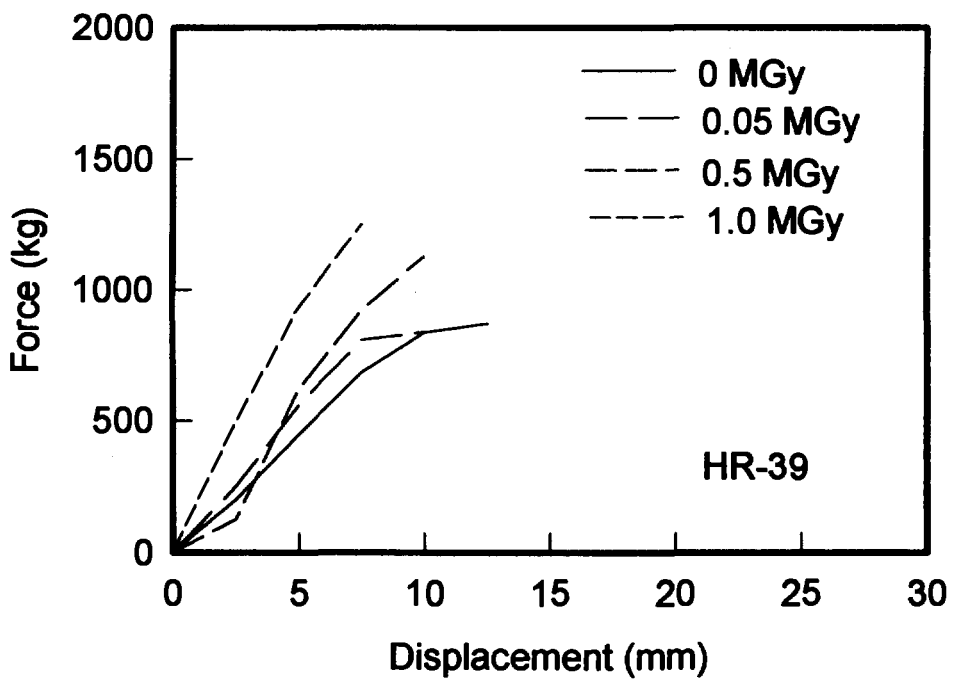
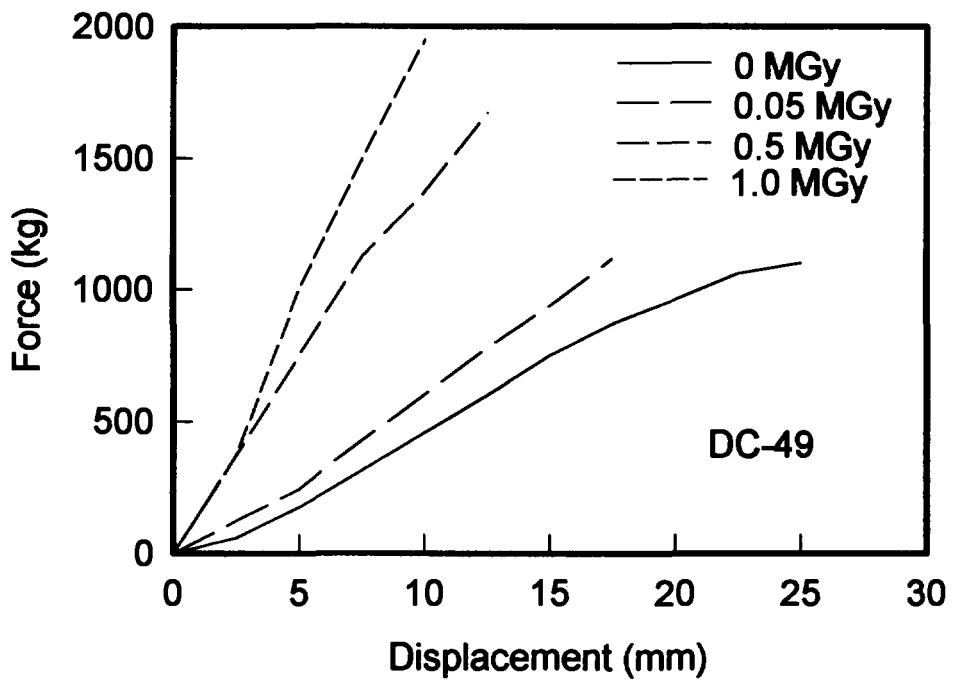


Fig. 9. Force-displacement curves for shielding materials.

을 하여 망상구조를 갖게됨으로서 더욱 단단하게 되는 물질도 있는 것으로 보고되고 있다[22]. Fig. 9에서 보는 바와 같이 방사선조사선량이 증가함에 따라 고분자 차폐재물질의 최대하중은 증가하는 반면에 하중에 대한 변위가 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 가교결합에 기인된 것이며 단단한 중합체로 되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 고분자 차폐재에 방사선이 조사되면 가교결합이 발달되어 차폐재가 더욱 고밀도화하는 경향을 나타낸다고 할 수 있다. 이와같은 차폐재의 고밀도화는 차폐재내의 탄화붕소 결정립(grain) 사이로 통과될수 있는 중성자의 통과 확률을 줄일 수 있으므로 결국 중성자의 통과를 억제하는 효과를 가져올수 있다고 하겠다. 실리콘고무를 기본물질로 한 중성자 차폐재가 방사선조사에 의하여 비중이 증가되어, 고밀도화됨으로써 중성자의 차폐능이 다소 향상된다는 연구의 결과들이 이를 입증한다고 볼 수 있다[22]. DC-49는 HR-39보다 최대하중이 크며, 또한 하중에 대한 변위도 크게 나타났다[23].

3. 비중에 미치는 영향

방사선조사선량이 고분자 차폐재의 비중에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 방사선조사선량이 증가함에 따라 DC-70 과 DC-49 차폐재의 비중에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 한편, 방사선조사선량의 변화에 따른 고분자 차폐재의 무게변화를 Table 10에 나타내었다. Table 10에서 보는 바와 같이 방사선조사선량이 증가함에 따라 고분자 차폐재의 무게에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 차폐재에 함유된 붕소 등의 첨가물들이 방사선의 조사량이 1.0 MGy까지 되어도 큰 손실이 없다고 판단된다.

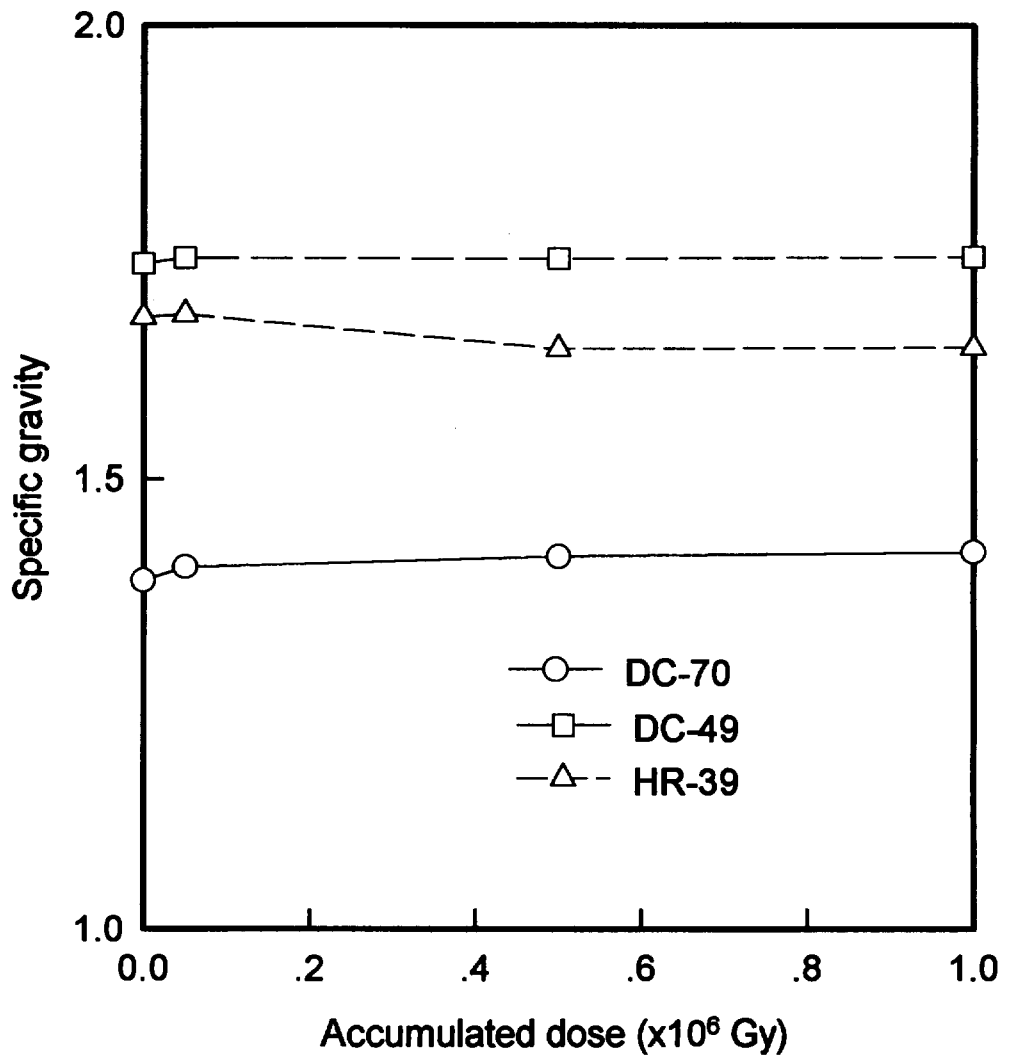


Fig. 10. Effects of radiation on specific gravities of shielding materials.

Table 10. Effects of Radiation on Weights of Shielding Materials

Dose (MGy)	Shielding material (weight(g))								
	DC-70			DC-49			HR-39		
0	104.62	104.79	105.17	130.07	129.94	128.95	125.97	127.05	126.87
0.05	104.65	-	-	130.05	-	-	125.96	-	-
0.5	-	104.89	-	-	129.95	-	-	127.06	-
1.0	-	-	105.35	-	-	129.01	-	-	126.91

4. 수소함량 변화에 미치는 영향

방사선조사선량이 고분자 차폐재의 수소함량 변화에 미치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 중성자의 감속효과를 증가시키기 위해 수소원자수 밀도가 큰 폴리프로필렌을 첨가한 DC-70과 DC-49의 경우에는 방사선 조사선량의 증가에 따라 수소함량이 약간 감소하는 것으로 나타났으며, 실리콘고무의 함량이 적은 HR-39의 경우에는 수소함량이 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. DC-70과 DC-49의 경우 방사선조사량의 증가에 따른 약간의 수소함량의 손실도 차폐재의 중성자 차폐성능에는 크게 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다[22].

제 6 절 열적 특성

1. 열안전성

액상 실리콘고무와 각종 첨가제들을 일정비율로 혼합해서 만든 차폐재

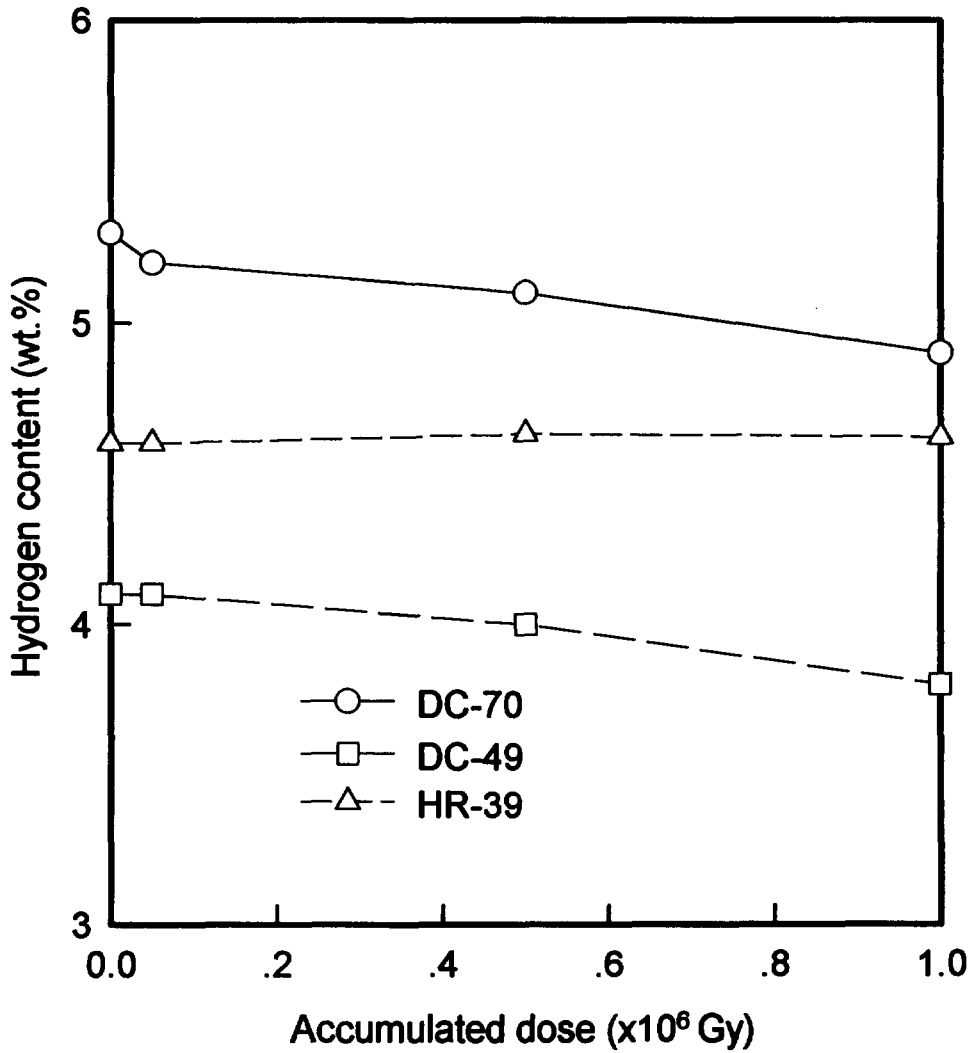


Fig. 11. Effects of radiation on hydrogen component of shielding materials.

시편들의 TGA 분석결과를 Fig. 12와 Table 11에 나타내었다. Table 11에서 보는 바와 같이 시편들의 열분해온도는 첨가제의 영향으로 수산화알루미늄이 혼합된 DC-49 및 HR-39는 230 ℃ 근처에서 폴리프로필렌과 수산화알루미늄이 혼합된 DC-70은 150 ℃ 근처에서 나타났으며, DC-70 시편의 열분해온도가 가장 낮게 나타났다. 사용후 핵연료 수송용기의 정상 수송조건에서 중성자 차폐재 부분의 온도는 120℃ 전후이므로 제조된 차폐재 시편들이 모두 열적으로 안정한 물질들임을 알 수 있으며, Table 11에서 보는 바와 같이 이들 값들은 외국에서 개발된 차폐재들의 열분해온도와 거의 비슷하게 나타났다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 DC-70 시편의 무게감량이 제일 큰 것으로 나타났다. 이는 폴리프로필렌이 470 ℃ 근처에서 완전히 분해되기 때문에 다른 시편들보다 무게감량이 크게 나타난 것으로 판단된다.

Table 11. Thermal Stabilities of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Onset temperature(℃)	153	233	233
Weight loss(%) at 800 ℃	40.3	34.6	36.3
Reference[19]	Reactor Experiments 237(Boro-Silicone)		Onset temp. 226
	Bisco Products NS-1(Silicone Sheet)		310
	Kobe Steel Type I(Silicone Rubber)		238

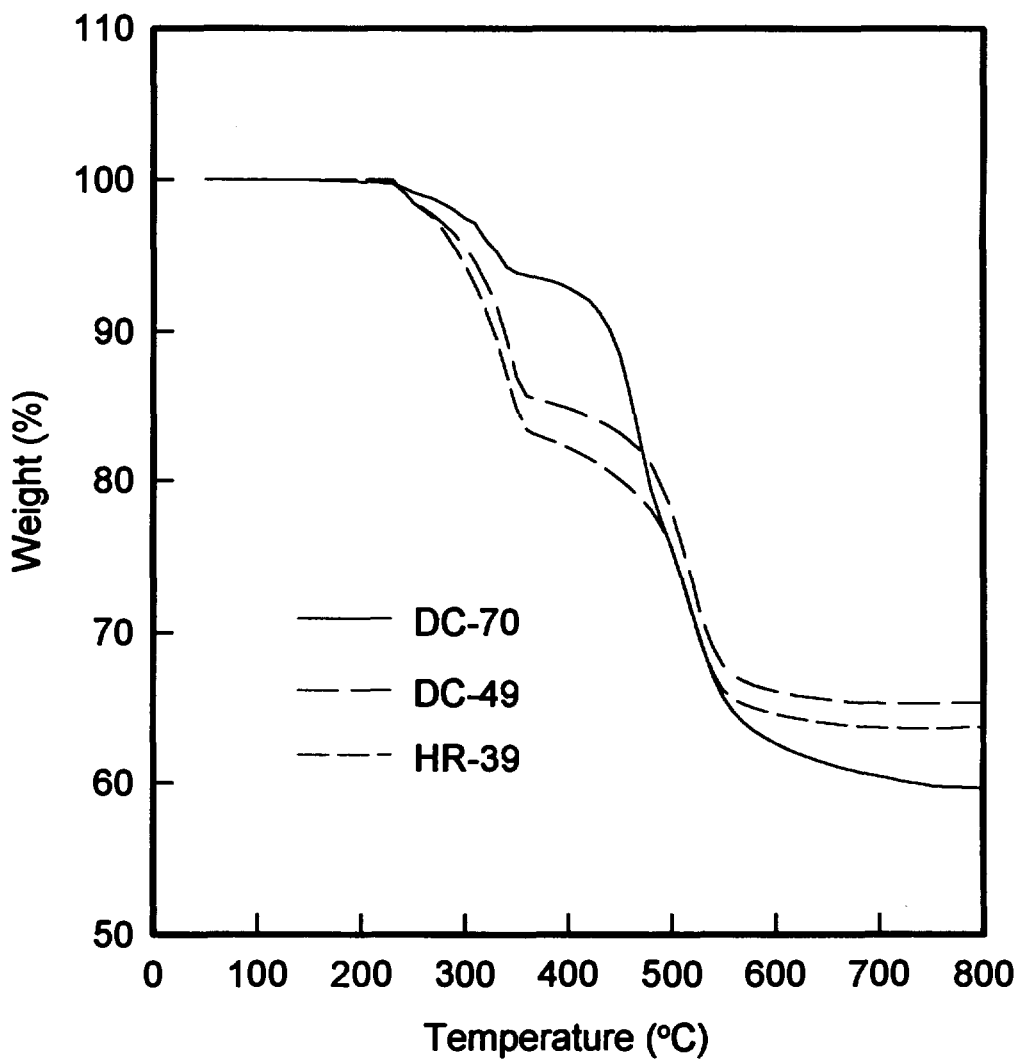


Fig. 12. TGA curves for silicone rubber based shielding materials.

2. 열전도도

본 연구에서 제조한 중성자 차폐재 시편들의 열전도도 측정결과를 Table 12에 나타내었다. Table 12에서 보는 바와 같이 DC-49 차폐재의 열전도도값이 HR-39의 열전도도값보다 크게 나타났다. 제작된 차폐재 시편들의 열전도도값은 외국에서 개발된 차폐재보다 크게 나타났다. 또한 폴리프로필렌이 첨가된 DC-70의 열전도도값은 DC-49와 HR-39보다 작은 것으로 나타났다.

Table 12. Thermal Conductivities of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Thermal conductivity (W/m · K)	0.591	1.316	1.120
Reference[19]	Kobe Steel Type I(Silicone Rubber) : 0.77 W/m · K		

3. 열팽창계수

본 연구에서 제조한 중성자 차폐재 시편들의 열팽창계수 측정결과를 Table 13에 나타내었다. Table 13에서 나타난 바와 같이 DC-49 차폐재의 열팽창계수값이 HR-39의 열팽창계수값보다 낮게 나타났다. 이는 DC-49 차폐재의 열치수안정성이 HR-39보다 우수하다는 것을 의미하는 것이다. 제조된 차폐재 시편들의 열팽창계수값이 외국산 중성자 차폐재보다 낮게 나타났다.

Table 13. Thermal Expansion Coefficients of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	2.080	1.522	1.555
Reference[19]	Kobe Steel Type I(Silicone Rubber) : $1.80 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		

4. 열건전성

고분자물질을 고온의 분위기에서 장시간 방치하면 자유라디칼이 생성되어 여러형태의 반응이 일어나며, 이로 인해 장시간의 고온 분위기는 고분자물질의 특성에 큰 영향을 미치게된다. 본 연구의 실험에서는 이 영향들을 규명하기 위하여 130 $^\circ\text{C}$ 및 150 $^\circ\text{C}$ 분위기의 고무노화시험기에서 5, 10, 20, 50 그리고 100일 동안 방치하였다.

가. 인장강도에 미치는 영향

고온에서의 산화분해는 주쇄의 절단, 측쇄의 절단이 일어나며, 주쇄 절단으로 생긴 말단의 자유라디칼은 서로 반응하여 불균등화 생성물의 생성 또는 재결합을 하며, 측쇄절단으로 생긴 자유라디칼은 서로 반응하여 절단 혹은 가교결합을 하게된다[10,24].

장시간의 고온 분위기가 차폐재 시편의 인장강도에 미치는 영향을 Fig. 13와 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 130 $^\circ\text{C}$ 분위기에서 DC-70 차폐재의 인장강도는 초기에 증가하다가 감소하는 경향을 나타

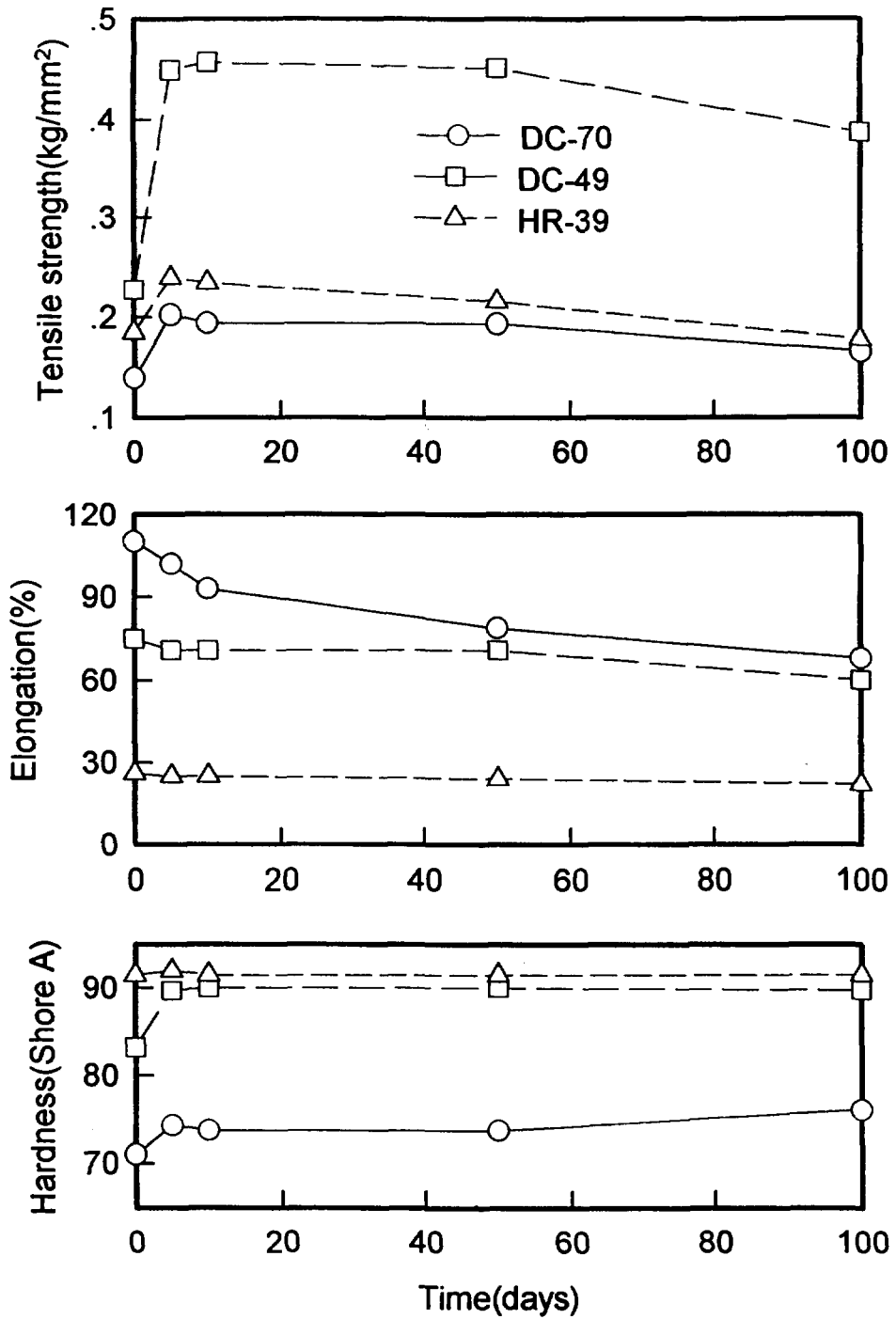


Fig. 13. Effects of heating time on mechanical properties at 130°C.

내었으며, DC-49와 HR-39 차폐재들도 같은 현상을 보였으나 초기에 증가하는 경향은 적게 나타났다. 150 °C 분위기에서는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 DC-70과 DC-49 차폐재들의 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, HR-39 차폐재는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 장시간의 고온 분위기가 이들 차폐재의 인장강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

나. 연신율에 미치는 영향

장시간의 고온 분위기가 차폐재 시편의 연신율에 미치는 영향을 Fig. 13와 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 130 °C 분위기에서 DC-70 차폐재의 연신율은 감소하는 경향을 나타내었으며, DC-49와 HR-39 차폐재들은 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 150 °C 분위기에서는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 DC-70, DC-49, HR-39 차폐재들의 연신율은 감소하는 경향을 나타내었으며, HR-39 차폐재가 감소하는 경향의 정도가 제일 낮게 나타났다. 장시간의 고온 분위기는 이들 차폐재의 연신율에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

다. 경도에 미치는 영향

장시간의 고온 분위기가 차폐재 시편의 경도에 미치는 영향을 Fig. 13와 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13와 Fig. 14에서 보는 바와 같이 고온 분위기가 DC-70 차폐재의 경도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, DC-49와 HR-39 차폐재들은 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 장시간의 고온 분위기는 이들 차폐재의 경도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

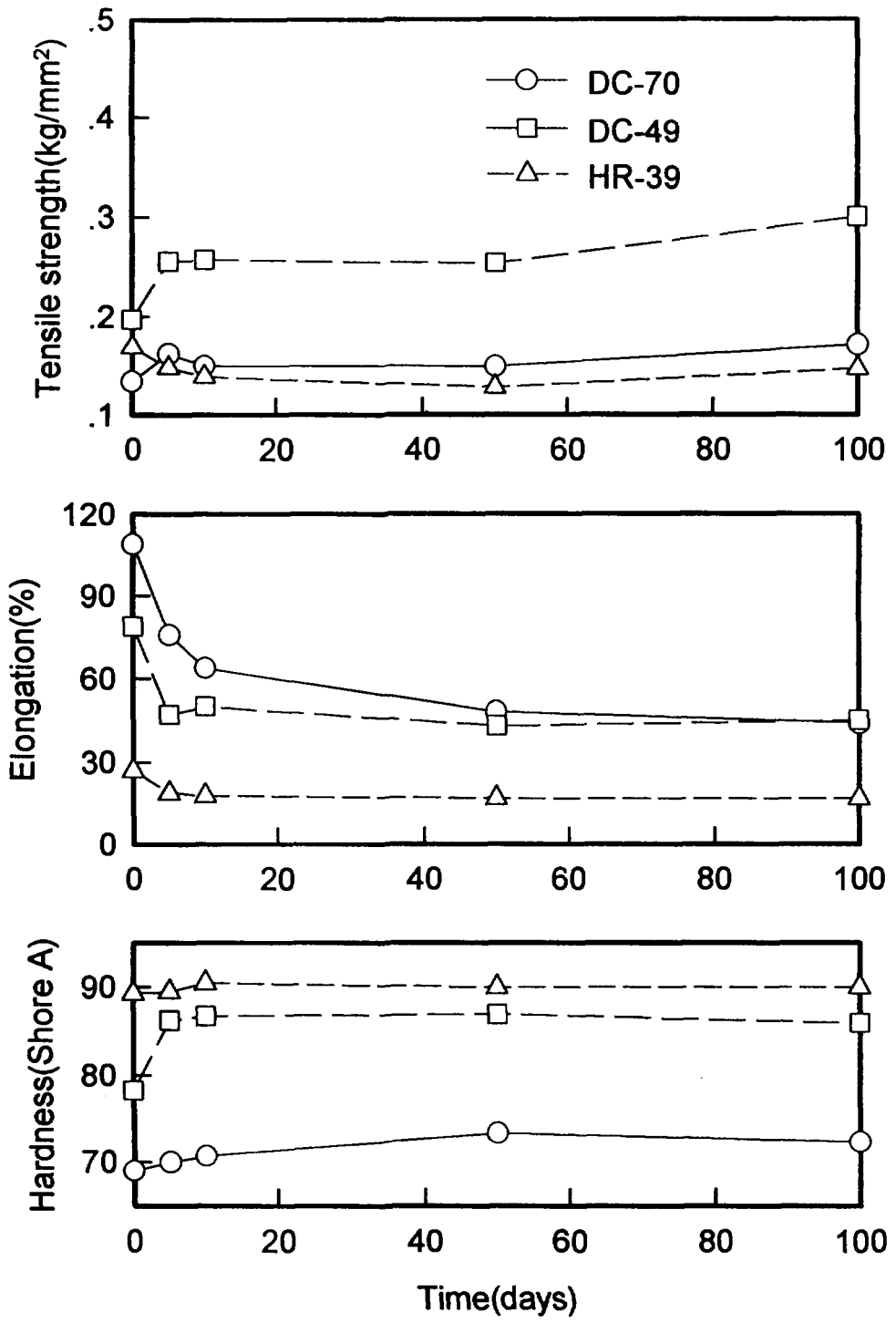


Fig. 14. Effects of heating time on mechanical properties at 150°C.

다. 무게변화에 미치는 영향

장시간의 고온 분위기가 차폐재 시편의 무게변화에 미치는 영향을 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 고온 분위기가 DC-70 차폐재의 무게손실은 크게 증가하는 경향을 나타냈으며, DC-49와 HR-39 차폐재들은 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 아울러 장시간의 고온 분위기는 이들 차폐재의 무게변화에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 한편 임의의 온도 및 시간경과에 따른 열화 정도를 예측하기 위해서 무게변화를 Fig. 16에서 보는 바와 같이 각 온도에 있어서 시간의 대수함수의 선형으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[24].

$$W(T,t) = W_0 - k(T) \cdot \ln t \quad (5)$$

여기서, W 는 물질 무게, W_0 는 초기 무게, $k(T)$ 는 열분해 상수, T 는 온도 (K), t 는 시간 (day)을 나타낸 것이다.

일반적으로 열에 의한 고분자물질의 분해는 Arrhenius식(6)으로 표현된다.

$$k(T) = k_0 \cdot \exp(E_A/RT) \quad (6)$$

여기서, k_0 는 초기 조건, E_A 는 활성화에너지 (J/mol), R 은 기체상수 (J/mol · K)를 나타낸 것이다.

위의 두 식으로 부터 온도와 시간에 따른 무게 변화율은 식(7)과 같다.

$$W(T,t) = W_0 - k_0 \cdot \exp(E_A/RT) \cdot \ln t \quad (7)$$

130 °C 및 150 °C의 결과로 부터 각 물질에 대한 k_0 및 E_A 값을 Table 14에 나타내었으며, 이들 값으로부터 임의의 온도 및 시간경과에 따른 무게변화율을 예측할 수 있다. 1년 중에 수송용기를 200일간 사용하여 20년 사용

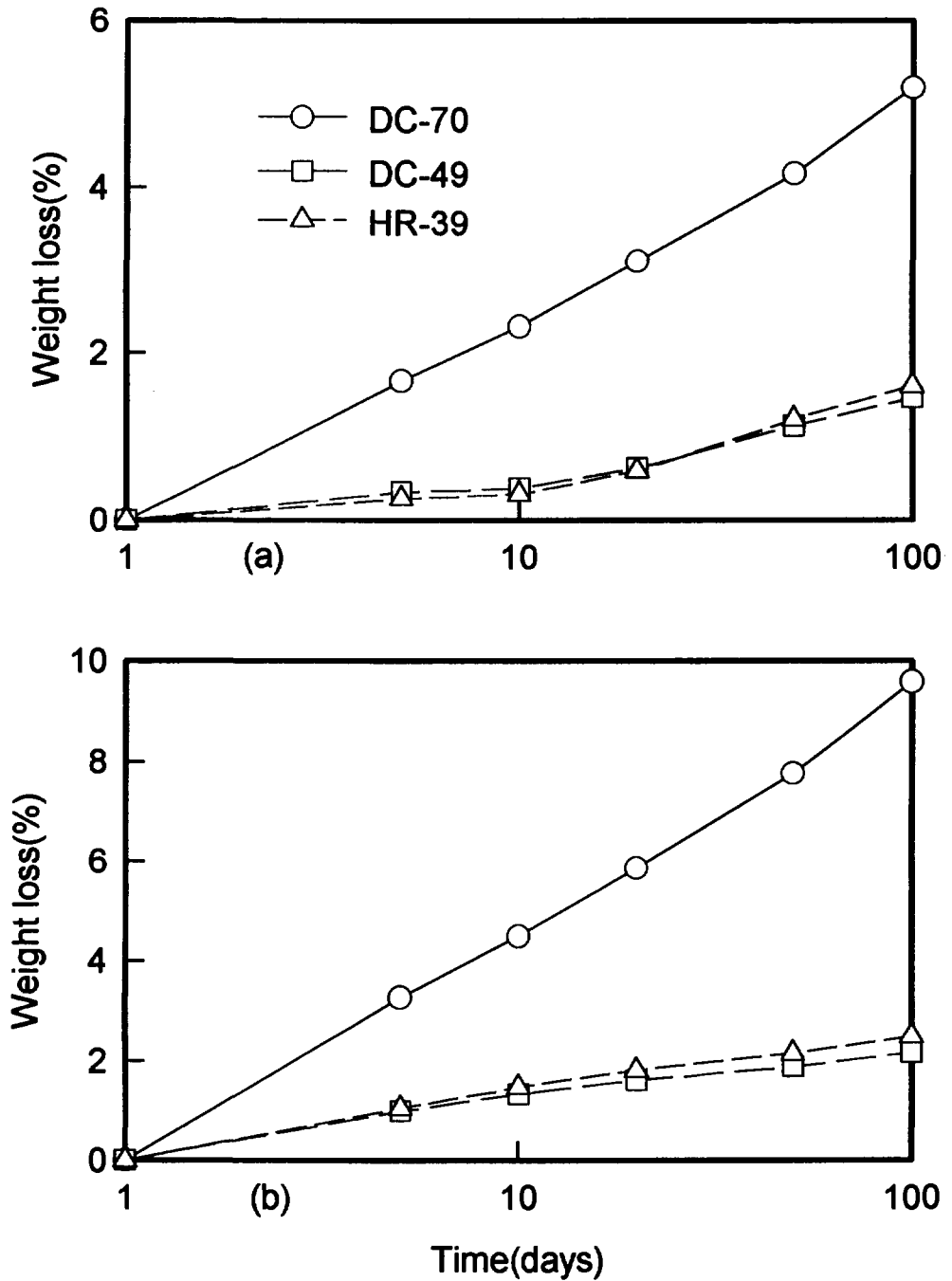


Fig. 15. Effects of heating time on the weight loss of shielding materials ((a) 130°C, (b) 150°C).

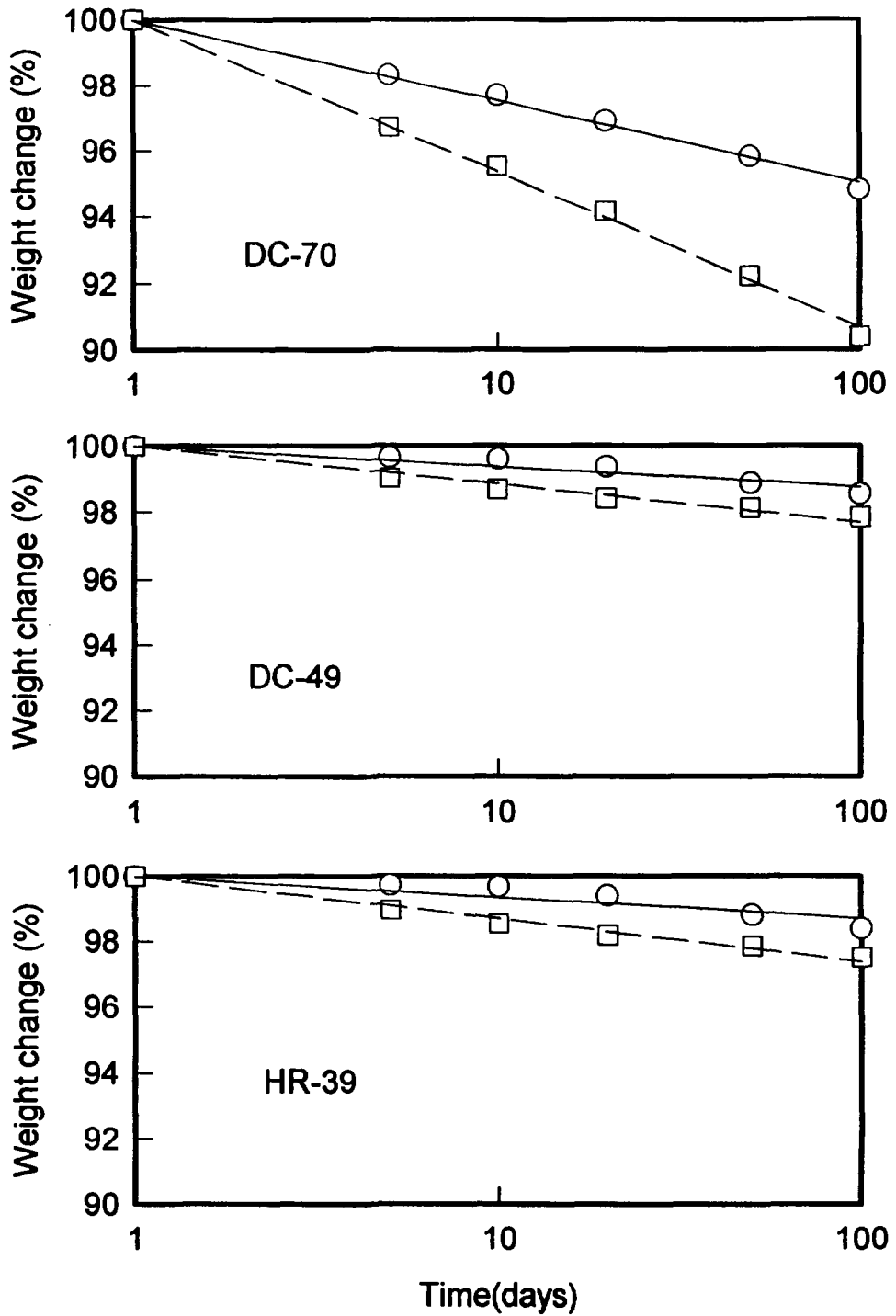


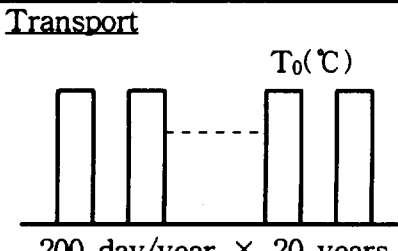
Fig. 16. Estimation of thermal degradation at 130°C (○), 150°C (□).

하였을 경우에, 각 물질에 대한 무게변화율 예측값을 Table 15에 나타내었다.

Table 14. Initial Condition of Parameter(k_0) and Activation Energy(E_A) of Neutron Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
$k_0 (\times 10^3)$	6.40	1.12	7.61
$E_A (\times 10^4)$	-4.46	-4.33	-4.96

Table 15. Estimation of Thermal Degradation (weight loss(%))

Purpose	Temp. (°C)	Shielding material		
		DC-70	DC-49	HR-39
Transport 	120	- 6.37	-1.63	-1.61
	130	-8.93	-2.26	-2.35
	150	-16.74	-4.16	-4.73

라. 수소함량에 미치는 영향

장시간의 고온 분위기가 차폐재 시편의 수소함량에 미치는 영향을 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 고온 분위기가 DC-70, DC-49, HR-39 차폐재들의 수소함량에 영향을 미치는 것으로 나타났으며,

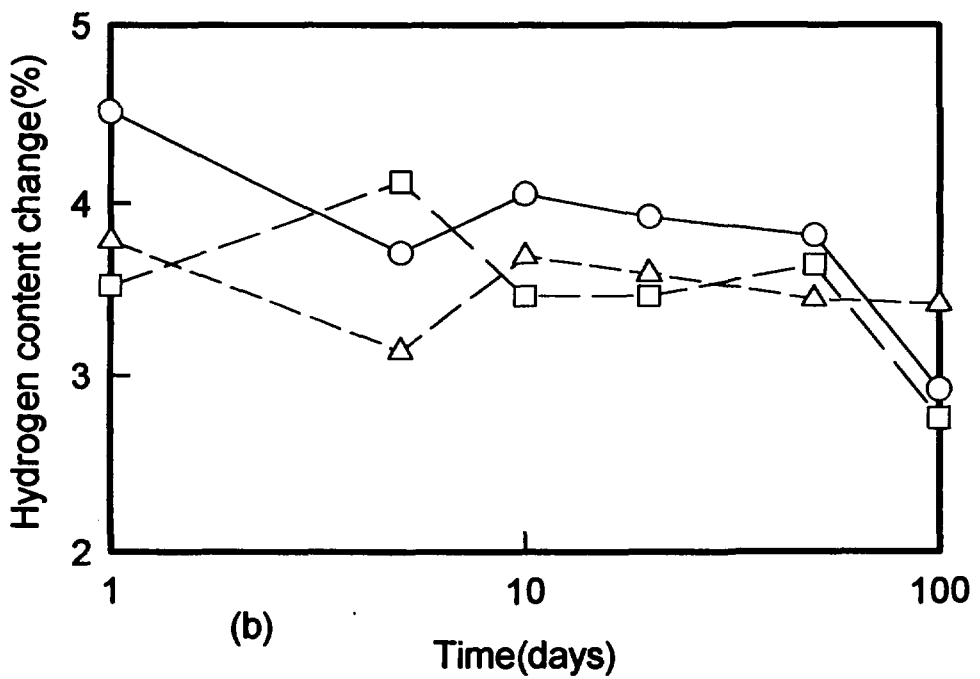
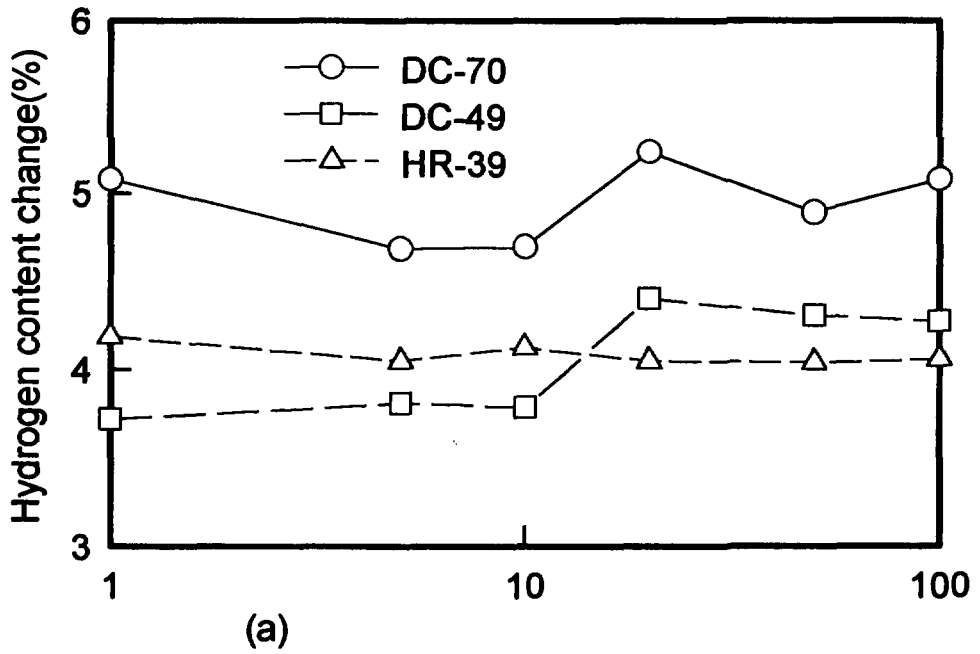


Fig. 17. Effects of heating time on the hydrogen content of shielding materials ((a) 130°C, (b) 150°C).

HR-39 차폐재가 제일 적게 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 장시간의 고온 분위기는 이들 차폐재의 수소함량에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

제 7 절 역학적 특성

액상 실리콘고무와 각종 첨제들을 일정비율로 혼합해서 만든 차폐재 시편들의 역학적 특성 시험결과를 Table 16에 나타내었다. Table 16에서 보는 바와 같이 DC-49 차폐재의 인장강도 및 압축강도는 HR-39보다 크게 나타났다. 이는 DC-49 차폐재의 실리카 함량이 HR-39보다 많은 것에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 경도는 DC-49가 HR-39보다 낮게 나타났다. Table 16에서 보는 바와 같이 폴리프로필렌이 첨가된 DC-70 차폐재의 인장강도, 압축강도 및 경도는 DC-49 및 HR-39보다 낮게 나타났다. 이는 폴리프로필렌의 입자크기가 다른 첨가제인 수산화알루미늄이나 탄화붕소보다 훨씬 큰 것에 기인하는 것으로 생각된다.

Table 16. Mechanical Strengths of Shielding Materials

Description	Shielding material		
	DC-70	DC-49	HR-39
Tensile strength(kg/mm ²)	0.144	0.239	0.198
compressive strength(kg/mm ²)	0.70	0.77	0.60
Hardness (Shore A)	70.50	80.88	88.71
Reference[25]	RX-237; Tensile strength(kg/mm ²) : 0.04 Compressive strength(kg/mm ²) : 0.32 Hardness(Shore A) : 66		

제 4 장 결 론

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

1. 실리콘고무를 기본소재로 하여 시제조한 DC-70, DC-49, HR-39 중성자 차폐재들의 중수감속 Cf-252 중성자 선원에 의한 거시적 중성자 반응단면적의 측정값은 DC-70은 0.13 cm^{-1} , DC-49는 0.13 cm^{-1} 그리고 HR-39는 0.14 cm^{-1} 이다. 이들 값들은 외국산 실리콘고무계 중성자 차폐재와 거의 비슷하게 나타났다.
2. 중성자 선원으로 Cf-252를 사용하여 수행한 중성자 차폐능 시험결과와 MCNP Monte Carlo 코드에 의한 해석결과는 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다으며, 앞으로 검증된 MCNP Monte Carlo로 중성자 차폐재의 최적두께를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
3. DC-70, DC-49, HR-39 중성자 차폐재를 KSC-7 사용후핵연료 수송용기에 적용시 ANISN 코드로 해석한 결과 수송용기 표면으로부터 2 m 거리에서 방사선량은 각각 8.3 mrem/h, 7.5 mrem/h, 6.5 mrem/h으로 허용규제치인 10 mrem/h 이하를 만족하였다.
4. DC-70, DC-49 및 HR-39 중성자 차폐재들의 내연성 특성 및 연소 특성은 외국산 중성자 차폐재와 거의 비슷하게 나타났다.

5. 중성자 차폐재의 기본물질인 실리콘고무에서의 실리카 함유량과 첨가물들의 혼합비율에 따라 차폐재의 분해 특성을 예견할 수 있었으며, 측쇄절단으로 생긴 가교생성반응이 우세한 DC-70, DC-49 차폐재는 방사선 조사선량의 증가에 따라 인장강도가 대체로 증가하는 반면에 주쇄절단의 영향이 큰 HR-39 차폐재는 인장강도가 감소하는 경향을 나타내었다.
6. DC-70 과 DC-49 차폐재들은 HR-39 차폐재보다 방사선조사에 의해 보다 많은 가교반응으로 방사선 조사선량의 증가에 따라 압축강도와 경도가 크게 증가하는 경향을 나타내었다.
7. 방사선조사에 의해서 DC-70 및 DC-49 차폐재들이 고밀도화가 됨으로서 차폐효과가 증가될 것으로 판단된다.
8. 방사선조사선량이 DC-70, DC-49 및 HR-39 고분자 차폐재들의 수소함량 및 무게변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
9. DC-70, DC-49 및 HR-39 중성자 차폐재들의 열적 성질은 외국산 중성자 차폐재보다 대등하거나 약간 우수한 것으로 나타났다.
10. DC-70, DC-49 및 HR-39 중성자 차폐재들의 역학적 특성은 장시간 고온분위기에 의해 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.
11. DC-70, DC-49 및 HR-39 중성자 차폐재들의 역학적 특성은 외국산 중성자 차폐재보다 우수한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. GA-4/GA-9 Legal Weight Truck from Reactor Spent Fuel Shipping Casks, DOE/ID/129698-1-Vol.1 (1990).
2. Japan Kokai Tokkyo Koho, Neutron shielding materials, JP80119099 A2 (1980).
3. Japan Kokai Tokkyo Koho, Neutron shielding materials, JP82173795 A2 (1982).
4. Japan Kokai Tokkyo Koho, Neutron shield material, JP 82147095 A2 (1982).
5. Japan Kokai Tokkyo Koho, Neutron shield material, JP 86173198 A2 (1986).
6. Japan Kokai Tokkyo Koho, Neutron shielding materials, JP 86290400 A2 (1986).
7. H.Taniuchi, T.Iida, F.Matsuda, H.Nagahama, Development of Rubber-Type Neutron Shields for Transport/Storage Packagings, IAEA-SM-286/135P (1987).
8. K.A.Blakely, M.F.Gaffney and P.T.B.Shaffer, A Novel Boron Carbide Metal Composite for Nuclear Shielding Applications, Trans. Amer. Nucl. Soc., 34, 199, (1980).
9. H.J.Rack, S.A.Dupree and J.F.Smugeresky, SAND78-2317, (1979).
10. Silicone and Its application, Japan Toshiba, Co.Ltd. (1988).
11. J.B.Do, S.H.Cho, I.K.Kim, S.C.Oh, S.S.Hong and C.H.Do, Development

- of Radiation Shielding materials, KAERI-NEMAC/RR-120/94, (1994).
12. S.Y.Chang, S.C.Yoon and D.Y.Jeong, Development of Radiation Protection and Measurement Technology, KAERI/RR-1328/94 (1994).
 13. International Organization for Standardization, Neutron reference radiations for calibrating neutron measuring devices for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy, ISO 8529(E) (1989).
 14. Briesmeister, J. F.(Ed.) MCNO-A general monte carlo code for neutron and photon transport, Version 4, Los Alamos National Lab. (1992).
 15. S.Y.Chang and S.C.Yoon, Development of Radiation Protection and Measurement Technology, KAERI/RR-1199/92 (1992).
 16. J.B.Do, S.H.Cho, K.S.Seo, S.C.Oh, S.S.Hong and J.H.Ku, Development of Spent Fuel Transportation Technology, KAERI-NEMAC/RR-158/95 (1995).
 17. D.E. Hankins, and J.R. Cortez, "Energy dependence of four neutron remmeter instruments", Health Physics, 28 (1975)
 18. J.H.Yoon and J.R.Choi, Shielding Analysis for KSC-7 Spent Fuel Shipping Cask, KAERI-NEMAC/TR-03/93 (1993).
 19. R.H.Boonstra, Thermal Testing of Solid Neutron Shielding Materials, GA-A19897 (1990).
 20. Packing and Transportation of Radioactive materials, Code of Federal

Regulations, Title 10, Part 71 (1983).

21. 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).
22. R.R.Burn and G.R.Blessing, Radiation Effects on Neutron Shielding Materials, Trans. Amer. Nucl. Soc., 39, 429 (1981).
23. M.P.Spevens, Polymer Chemistry, Abdison-Wesley Pub., New York (1975)..
24. T.Iida, H.Taniuchi and K.Fujisawa, Highly Effective Neutron Shielding for Transport/Storage Packaging, RAMTRANS, 2 (1991).
25. Bulletin S-83N, Boro-Silicone Shielding, Reactor Experiment, Inc., (1987).

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR -864/97					
제목 / 부제	실리콘고무계 중성자 차폐재 개발				
연구책임자 및 부서명 (AR,TR일 경우 주저자)	도 재 범 (사용후핵연료 관리이용기술개발팀)				
연구자 및 부서명	조수행(사용후핵연료 관리이용기술개발팀), 김익수(*), 오승철(*),홍순석(*),노성기(*),정덕연(행정부 인사관리실)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1997년
페이지	71 p.	도 표	있음(v), 없음()	크 기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(v), 대외비(), — 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>방사성물질의 저장용기나 수송용기 또는 원자로나 방사성물질 취급시설에서 발생되는 방사선은 인체에 중대한 장애를 줄 수 있으므로 방사선을 인체가 받을 수 있는 허용량 이하로 안전하게 차폐하는 것이 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 방사성물질의 수송용기 또는 방사성물질 취급시설에서 사용될 차폐성능이 우수한 중성자 차폐재를 개발하는데 있다.</p> <p>본 연구에서는 실리콘고무를 기본소재로 한 중성자 차폐재를 개발하여 그들의 중성자 차폐능, 내연성, 연소특성, 내방사선성, 열적 및 역학적 특성을 시험.평가하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	중성자 차폐재, 실리콘고무, 수송용기, 방사성물질, 실리콘차폐재, 중성자 차폐능				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code		
KAERI/TR -864/97					
Title / Subtitle	Development of Silicone Rubber-Type Neutron Shielding Materials				
Project Manager and Department	Jae Bum Do(Spent Fuel Management Technology Research Team)				
Researcher and Department	Soo Haeng Cho(Spent Fuel Management Technology Research)				
	Ik Soo Kim(*), Seung Chul Oh(*), Sun Seok Hong(*) Seung Gy Ro(*), Duk Yeon Chung(Personal management Team)				
Publication Place	Taejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	1997. 6.
Page	71 p.	Ill. & Tab.	Yes(v), No ()	Size	26 Cm.
Note					
Classified	Open(v), Restricted(), ___ Class Document	Report Type	Technical Report		
Sponsoring Org.		Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)	<p>Because the exposure to radiation in the nuclear facilities can be fatal to human, it is important to reduce the radiation dose level to a tolerable level. The purpose of this study is to develop highly effective neutron shielding materials for the shipping and storage cask of radioactive materials or in the nuclear/radiation facilities.</p> <p>On this study, we developed silicone rubber based neutron shielding materials and their various material properties, including neutron shielding ability, fire resistance, combustion characteristics, radiation resistance, thermal and mechanical properties were evaluated experimently.</p>				
Subject Keywords (About 10 words)	neutron shielding material, Silicone rubber, Shipping cask, Radioactive material, Silicone shield, Neutron shielding ability				

실리콘고무계 중성자 차폐재 개발

1997 년 6 월 23 일 인쇄

1997 년 6 월 26 일 발행

발 행 인 김 성 년

발 행 처 한 국 원 자 력 연 구 소

인 쇄 처 대전 · 충남인쇄공업협동조합