

고준위 방사성 폐기물의 고정화를 위한 다상 고화체 합성

채수천^{1*} · 장영남¹ · 배인국¹ · 류경원²

한국지질자원연구원 자원활용소재연구부, ²충북대학교 지구환경과학과

Synthesis and Characterization of Polyphase Waste Form to Immobilize High Level Radioactive Wastes

Soo-Chun Chae^{1*}, Young-Nam Jang¹, In-Kook Bae¹ and Kyung-Won Ryu²

¹Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Earth and Environment Science, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

The synthesis of polyphase waste form, which is an immobilization matrix for the high level radioactive wastes, was performed with the mixed composition of garnet and spinel ($Gd_3Fe_5O_{12} + (Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$) in the range of 1200 to 1400°C. The phases synthesized from all stoichiometric compositions were garnet, perovskite, and spinel. Especially, garnet was synthesized only in the composition of the highest content of Fe ($y=0.9$), whereas it was not synthesized in other compositions. This result indicated that the content of Fe was closely related to the formation of garnet. The composition of garnet revealed that the content of Gd was exceeded and that of Fe was depleted. Preferential distribution of elements in the phases can be attributed to the nonstoichiometric composition of garnet.

Key words : immobilization, waste form, SYNROC, radionuclide, sintering

석류석과 스피넬의 혼합성분($Gd_3Fe_5O_{12} + (Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$)으로부터 고준위 방사성 폐기물의 고정화를 위한 다상 고화체를 1200~1400°C에서 합성하였다. 이들 화학조성에서는 석류석, 페로스카이트 및 스피넬이 관찰되었으며, 특히 석류석은 Fe의 함량이 가장 높았던 조성에서만 관찰되는 특성을 보임으로써 Fe의 함량이 석류석의 형성과 밀접한 관계를 지시하고 있다. 석류석의 성분은 Gd와 Fe가 각각 초과 및 결핍된 양상을 보였다. 이같은 석류석의 비화학양론적인 조성은 상들과 원소간의 선호적 배분관계에 기인된 것으로 사료된다.

주요어 : 고정화, 고화체, 인공암석, 방사성핵종, 소결

1. 서 언

고준위 방사성폐기물의 처리는 유리질 물질, 예를 들어 붕규산염 유리는 방사성 폐기물에 대한 유망한 고화체로서 오랫동안 연구되어 왔다. 그러나 이들 유리질 물질은 열역학적으로 준안정하기 때문에 실투화(devitrification) 될 가능성이 높으며, 이로 인한 화학적 내구성의 감소는 결과적으로 유리질 내에 함유되어 있던 핵종을 자연계로 방출시킬 위험성을 가지고 있다. Ringwood 등(1988)은 이들 단점을 최소화시키기 위하

여 유리질 물질의 대안으로서 소위 “SYNROC”을 제시하였다(Ringwood *et al.*, 1988). 그들은 방사성 원소를 함유하고 있는 천연 광물들이 오랜 세월동안 안정한 결정구조를 유지하고 있다는 점에 착안한 것이다. 지금까지, 다양한 종류의 고화체에 대한 합성 및 특성 연구가 수행되어 왔다(채수천 등, 2004; 채수천 등, 2003; 장영남 등, 2002; Ringwood *et al.*, 1988; Vance *et al.*, 1995; Luo *et al.*, 1998; Burakov *et al.*, 2000; Burakov and Strykanova, 1998; Burakov and Anderson, 1998; Burakov *et al.*, 1999; Yudintsev,

*Corresponding author: chae@kigam.re.kr

2001; Yudinsev *et al.*, 2002).

SYNROC은 지르코놀라이트(zirconolite), 홀랜다이트(hollandite), 페롭스카이트(perovskite) 및 TiO_2 등으로 구성된 다상의 고화체이다. 각 상들은 중요한 핵종을 선택적으로 수용할 수 있는 능력을 가진 것으로 알려져 있다. 즉, 홀랜다이트는 Cs, Rb, 및 Ba 등 핵분열 생성물(fission product)을, 지르코놀라이트는 U, Zr, Np 및 Pu를 그리고 페롭스카이트는 Sr 및 초우라늄 원소인 Np과 Pu를 선호적으로 수용할 수 있다. SYNROC과 유사한 종류인 재단형 세라믹(tailored ceramics)은 Rockwell International Science Center에서 주로 연구되어 왔다(Harker, 1998; Ewing *et al.*, 1995). 이것은 마그네토프럼바이트(magnetoplumbite), 스피넬, 네펠린, 우라나이트 및 강옥 등으로 구성되어 있으며, 주로 방어용 무기(defense weapon)로부터 유래된 방사성 폐기물의 고정화를 위하여 적용되었다.

세계적으로 고준위 방사성을 띠는 악티나이드를 포함한 인공적인 물질로는 핵무기의 제조 및 해체 그리고 원자력 발전으로부터 유래된 사용후 연료와 이들 사용후연료의 재처리동안 유래된 액상의 고준위 폐기물 등이 있다(Ewing, 1999). 사용후 연료의 약 96%는 미반응 연료성분($^{235,238}U$)이며, 대다수의 방사능의 강도는 핵분열성 산물(Kr 또는 Cs 등), 미반응 연료(U), 마이너악티나이드(minor actinides: MA; Np, Pu, Am, Cm) 및 활성산물(H, C, Al, Na, Mn, Fe, 및 Co) 등으로부터 유래된다(Yudinsev *et al.*, 2005). 따라서 고준위 폐기물에서의 다양한 원소들의 존재는 이들 원소들을 선택적으로 수용할 수 있는 다상의 고화체의 개발의 필요성을 가중시키고 있다.

본 연구에서는 상술한 다양한 원소들과 특정 결정구조 간의 선호적 수용관계를 파악하기 위하여 다상고화체를 합성하였다. 현재까지 알려진 유망한 단일상 고화체의 하나인 석류석을 악티나이드에 대한 고화체로 설정하였고, Fe, Mn, Ni 및 Cr 등 활성산물의 모암(host)으로 스피넬 구조를 선택하였다. 즉 석류석과 스피넬과의 혼합 조성 [$Gd_3Fe_5O_{12} + (Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$; $x=0.1-0.9$ and $y=0.1-0.9$]로부터 특정조건에서의 공존상들의 물리화학적 특성 그리고 원소와 생성상들의 선택적 수용관계를 조사하였다.

2. 실험방법

다상 고화체의 합성은 상온 압축소결(Cold Press and Sintering: CPS)법에 의해 수행되었고, 사용된 초

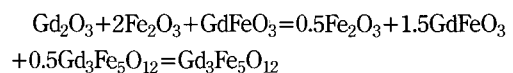
기물질은 Gd_2O_3 (Cerac Co., 3N), Fe_2O_3 (Rare Metallic Co., 3N), Cr_2O_3 (Rare Metallic Co., 3N), MnO (Rare Metallic Co., 3N) 그리고 NiO (High Purity Chemicals, 3N) 등이었다. 이들 분말은 알루미나 몰타르를 사용하여 알코올과 더불어 $Gd_3Fe_5O_{12} + (Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$ ($x=0.1-0.9$ and $y=0.1-0.9$) 조성으로 혼합하였다. 혼합된 분말은 400 kg/cm^2 인 압력을 가하여 펠렛(10-mm diameter×2-mm height)으로 성형하였다. 성형된 펠렛은 $1200-1400^\circ\text{C}$ 로 약 20시간동안 소결하였다. 합성상에 대한 상동정은 흑연 모노크로메터가 부착된 Phillip사(네덜란드)의 X-선 분말회절기(X'pert MPD powder diffractometer; Cu-K α tube; accelerate voltage: 40 kV, current: 20 mA)를 사용하였고, 합성된 상의 화학조성과 변화양상은 SEM/EDS분석기를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과

다상고화체를 합성하기 전에, 이들 다상 고화체의 단종(end-member)인 석류석($Gd_3Fe_5O_{12}$)과 스피넬($(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$)을 합성함으로써, 다상고화체의 합성 및 실험조건을 설정코자 하였다.

3.1. 예비실험(석류석과 스피넬의 합성)

석류석의 합성실험에서, Gd_2O_3 , Fe_2O_3 및 페롭스카이트가 1000°C 에서 관찰되었다. 1100°C 에서, Gd_2O_3 가 소멸되는 대신 처음으로 석류석이 생성되었으며, Fe_2O_3 및 페롭스카이트의 회절강도가 상당히 감소되었다. Fe_2O_3 와 페롭스카이트는 온도가 증가함에 따라 점차 감소되어 소멸되었다. 석류석의 단일상은 1300°C 에서 처음으로 확인되었고, 이것의 회절강도가 1400°C (Fig. 1a)까지 변화를 보이지 않음에 따라 석류석의 최적합성 조건이 1300°C 임을 확인하였다. 부가적으로 1500°C 에서 본 조성의 석류석은 용융되는 특성을 보였다. 상술한 XRD 동정 결과를 통하여, 석류석의 생성반응은 아래와 같이 표시될 수 있다.



SEM/EDS 분석 결과, 석류석은 기질부를 형성하고 있으며, 소량의 Fe_2O_3 와 공존하고 있음을 확인하였다. 석류석의 조성은 Gd가 다소 초과된 반면 Fe는 결핍되어 있기는 하지만, 화학양론적 조성($Gd_3Fe_5O_{12}$)과 거의 유사한 $Gd_{3.1}Fe_{4.9}O_{12}$ 였다.

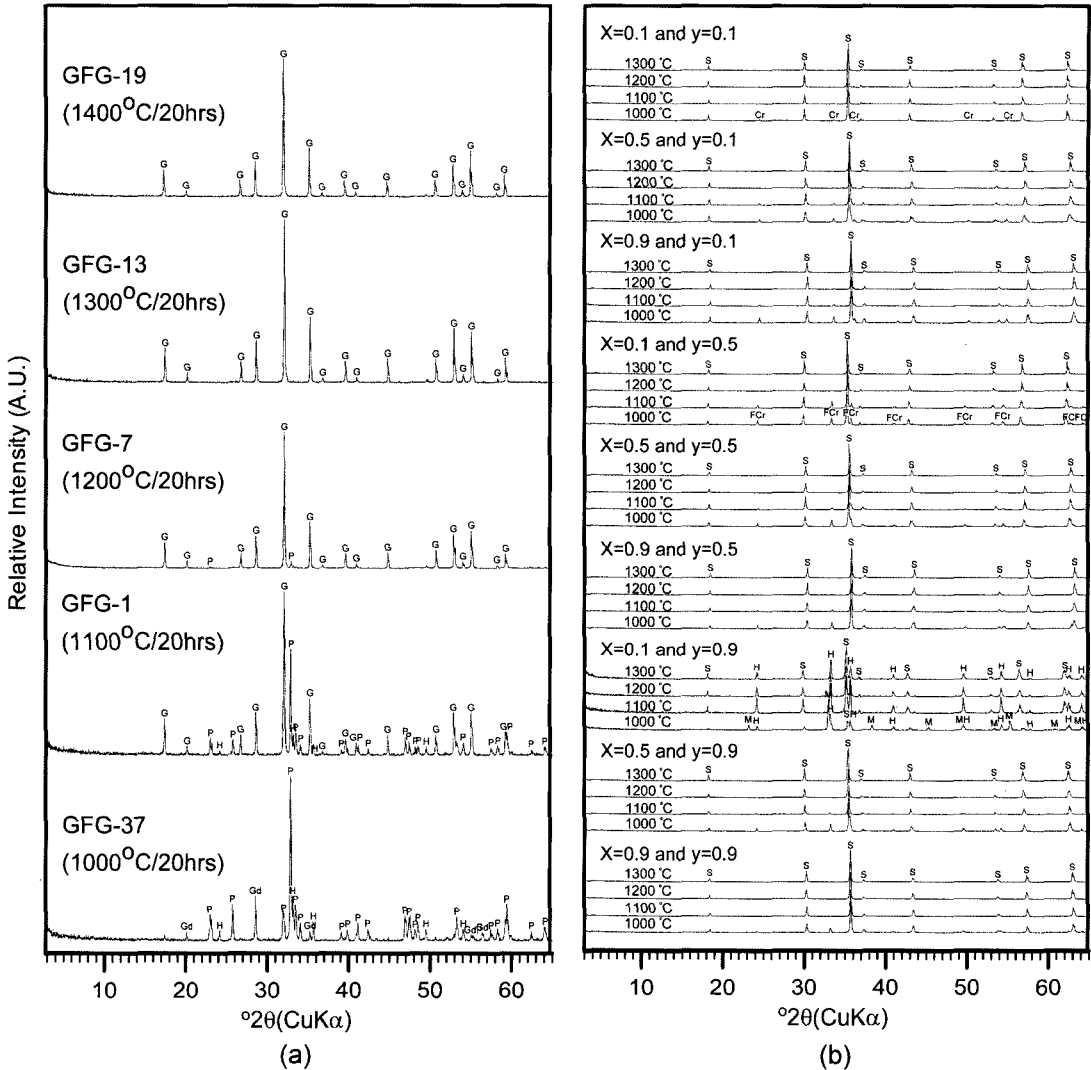


Fig. 1. XRD patterns of (a) garnet ($Gd_3Fe_5O_{12}$) and (b) spinel ($(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$ ($x=0.1-0.9, y=0.1-0.9$)). G: garnet, P: perovskite, H: Fe_2O_3 , M: Mn_2O_3 , Gd: Gd_2O_3 , Sp: spinel, FCr: $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$, Cr: Cr_2O_3 .

스피넬의 화학조성인 $(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$ ($x=0.1-0.9$ and $y=0.1-0.9$)에서의 XRD 분석 결과, $x=0.1$ 과 $y=0.9$ 인 조성을 제외하고, 단일상의 스피넬은 1100-1300°C에서 얻어졌다. 또한 저온의 경우, 3가의 양이온 (Fe 및 Cr)의 함량에 따라 공존상들이 명확히 구별되어 $y=0.1, 0.5$ 및 0.9 인 경우, 각각 Cr_2O_3 , $(Fe_{0.6}Cr_{0.4})_2O_3$ 및 Fe_2O_3 의 상이 관찰되었다(Fig. 1b). 측정된 스피넬의 화학조성은 화학양론적 조성임을 확인하였다.

3.2. 다상 고화체의 합성

상술하였듯이, 석류석과 스피넬의 단일상은 각각

1300°C와 1100-1300°C에서 얻어졌다. 이들 결과를 토대로, 1200-1400°C에서 다상 고화체의 합성 실험을 실시하였다(Table 1).

XRD 분석결과, 각각의 화학조성에서 생성된 상들의 회절강도는 온도와는 무관하게 거의 일정하였다. 또한 총 9가지 화학조성에서 관찰되는 상조합은 크게 Fe_2O_3 -페롭스카이트-스피넬, Fe_2O_3 -스피넬-석류석 및 페로스카이트-스피넬-석류석 등 3가지 타입으로 분류될 수 있다(Table 1). 이들 9가지의 화학조성 중 Fe의 함량이 가장 높았던 2가지의 화학조성($x=0.1$ and $y=0.9$; $x=0.5$ and $y=0.9$)에서만 석류석이 관찰되는 특성을 보

Table 1. Relative Intensities of phases synthesized with the batch composition, $Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$.

No.	Conditions			H	P	Sp	G
	Temp.	Hr	Atm.	2.695Å	2.72Å	2.53Å	2.79Å
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.1}Mn_{0.9})(Fe_{0.1}Cr_{0.9})_2O_4$							
GDS-35	1200	20	O ₂	25	100	10	-
GDS-31	1300	20	O ₂	23	100	8	-
GDS-39	1400	20	O ₂	18	100	9	-
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.5}Mn_{0.5})(Fe_{0.1}Cr_{0.9})_2O_4$							
GDS-3	1200	20	O ₂	17	100	27	-
GDS-8	1300	20	O ₂	17	100	23	-
GDS-13	1400	20	O ₂	15	100	21	-
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.9}Mn_{0.1})(Fe_{0.1}Cr_{0.9})_2O_4$							
GDS-37	1200	20	O ₂	11	100	38	-
GDS-33	1300	20	O ₂	12	100	33	-
GDS-41	1400	20	O ₂	11	100	32	-
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.1}Mn_{0.9})(Fe_{0.5}Cr_{0.5})_2O_4$							
GDS-5	1200	20	O ₂	21	100	8	-
GDS-10	1300	20	O ₂	21	100	7	-
GDS-15	1400	20	O ₂	27	100	10	-
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.5}Mn_{0.5})(Fe_{0.5}Cr_{0.5})_2O_4$							
GDS-2	1200	20	O ₂	16	100	17	-
GDS-7	1300	20	O ₂	29	100	24	-
GDS-12	1400	20	O ₂	19	100	18	-
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.9}Mn_{0.1})(Fe_{0.5}Cr_{0.5})_2O_4$							
GDS-4	1200	20	O ₂	13	100	34	-
GDS-9	1300	20	O ₂	13	100	35	-
GDS-14	1400	20	O ₂	20	100	41	-
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.1}Mn_{0.9})(Fe_{0.9}Cr_{0.1})_2O_4$							
GDS-36	1200	20	O ₂	4	-	39	100
GDS-32	1300	20	O ₂	8	-	45	100
GDS-40	1400	20	O ₂	-	12	41	100
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.5}Mn_{0.5})(Fe_{0.9}Cr_{0.1})_2O_4$							
GDS-1	1200	20	O ₂	-	3	16	100
GDS-6	1300	20	O ₂	-	7	17	100
GDS-11	1400	20	O ₂	-	40	28	100
$Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_{0.9}Mn_{0.1})(Fe_{0.9}Cr_{0.1})_2O_4$							
GDS-38	1200	20	O ₂	18	100	29	-
GDS-34	1300	20	O ₂	24	100	39	-
GDS-42	1400	20	O ₂	19	100	31	-

Abbreviations: G: garnet, P: perovskite, H: Fe₂O₃, Gd: Gd₂O₃, Sp: spinel

였으며, 석류석이 존재하지 않는 조성인 경우에는 페롭스카이트가 가장 강한 회절강도를 보였다. 특히 석류석이 형성되지 못한 조성의 경우, 스피넬의 회절강도는 Ni의 함량에 비례하는 경향(Table 1 and Fig. 3)을 보인다는 사실과 석류석이 Fe의 함량이 높은 경우에만 생성되었다는 점으로 볼 때, Fe와 Ni가 각각 석류석과 스피넬의 형성에 중요한 역할을 하고 있음을 지지하고 있다.

Fig. 4는 1200-1400°C에서 소결된 시료에 대한 배

면산란 전자상(Back scattered electron image: BSE image)으로, 석류석, 페롭스카이트, 스피넬 및 Fe₂O₃ 등이 관찰되었다. 일부 제한된 화학조성에서만 관찰되는 석류석의 조성은 비화학양론적인 조성을 나타내었다($Gd_{2.7-3.4}Fe_{4.4-5.1}Cr_{0.2}O_{12}$). 특히 석류석과 공존하고 있는 스피넬이 화학양론적 조성을 보여주는 반면, 석류석과 공존하고 있지 않는 스피넬의 경우는 Fe가 상당히 초과된 비화학양론적 조성을 갖는 특성을 보였다. 또한 목적상으로 고려되지 않았던 페롭스카이트의 조성

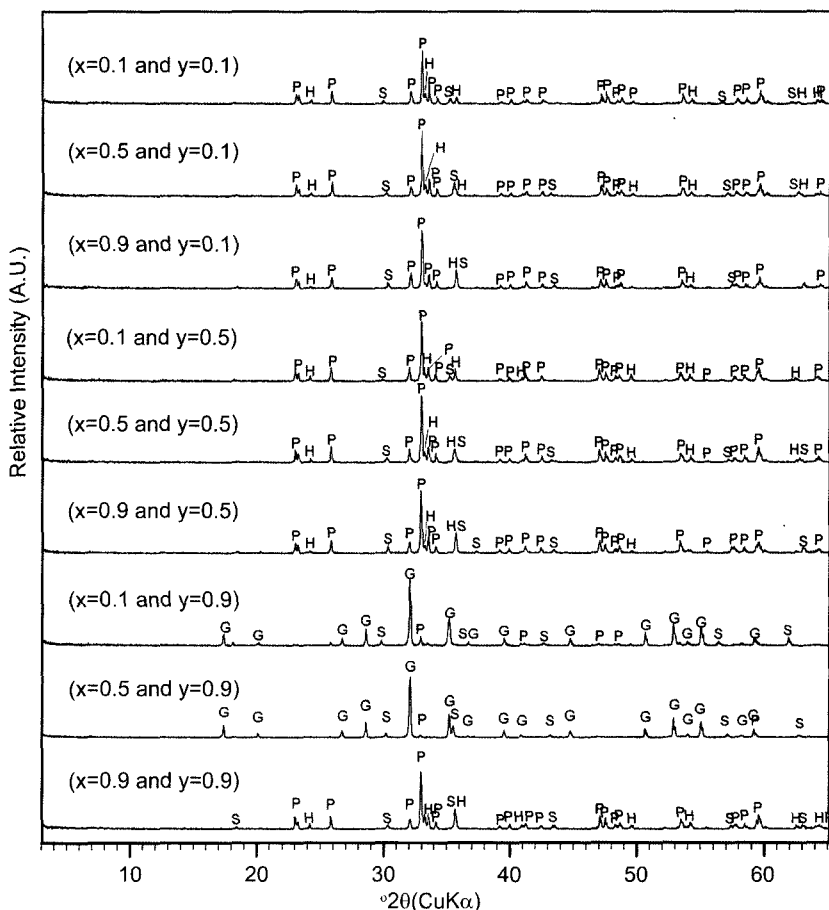


Fig. 2. XRD patterns of $Gd_3Fe_5O_{12} + (Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$ sintered at optimal conditions. G: garnet, P: perovskite, H: Fe_2O_3 and S: spinel.

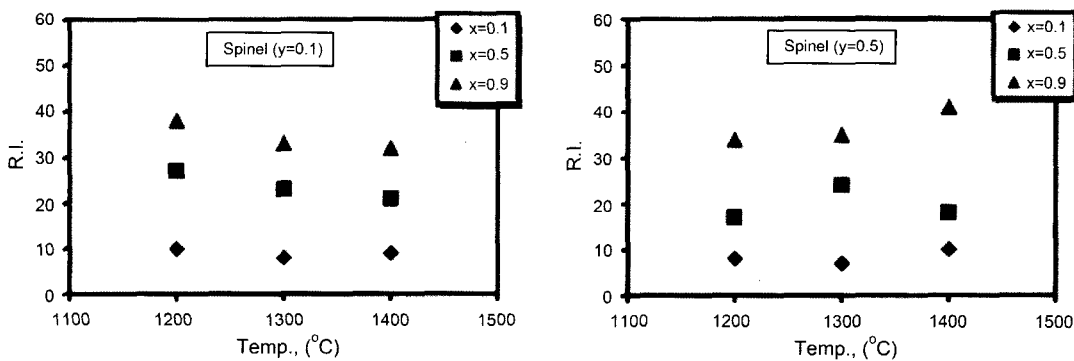


Fig. 3. The relation of relative diffraction intensity with the content of Ni (x) and Fe (y) of spinel.

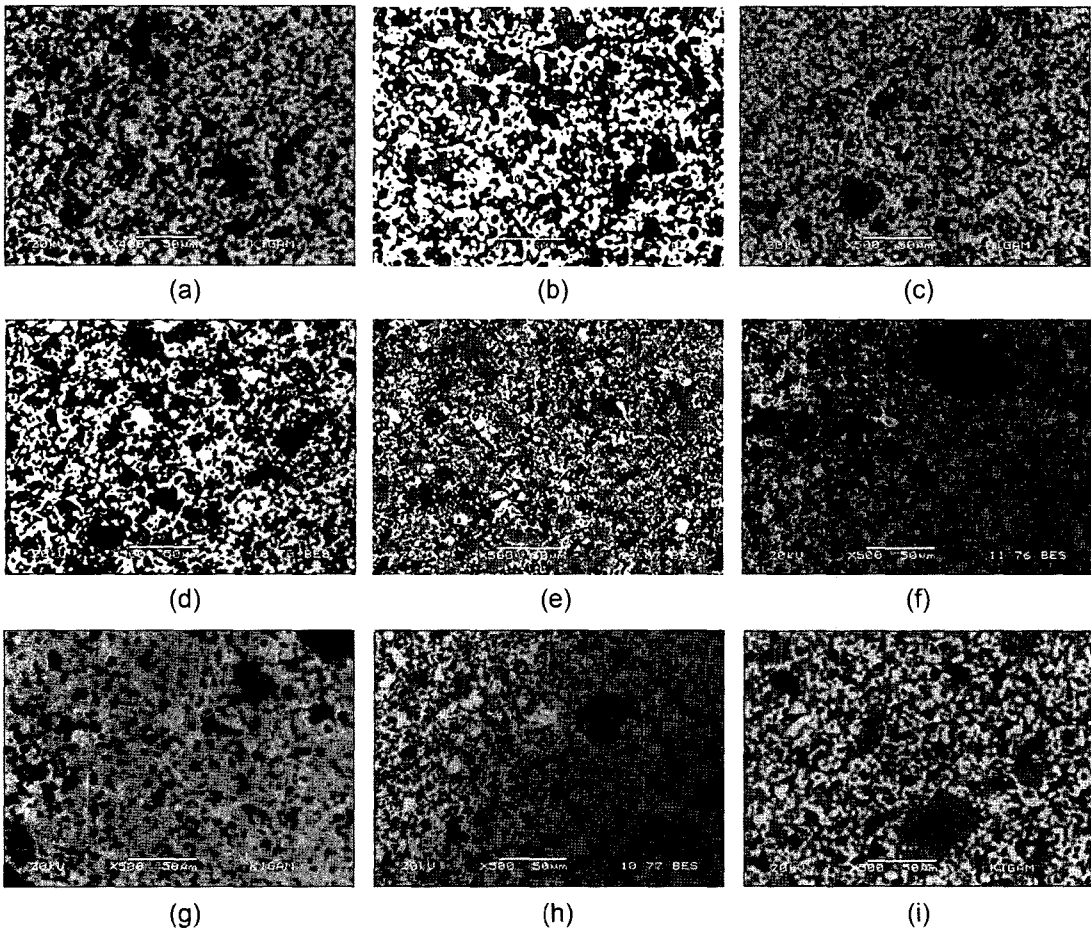
은 석류석과 스피넬의 조성과는 대조적으로 거의 모든 타입의 화학조성에서 Gd, Fe 및 Ce를 포함한 산화물 로써 비교적 일정한 화학조성을 나타내었다(Table 2).

4. 토 의

석류석과 스피넬이 공존할 수 있는 조성을 선택하였 음에도 불구하고, 이들의 공존은 $x=0.1-0.5$ 와 $y=0.9$ 인

Table 2. Chemical formula of phases which were contained matrices synthesized with the precursor composition of $Gd_3Fe_5O_{12}+(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$.

x	y	Garnet	Spinel	Perovskite	Fe_2O_3
0.1	0.1	-	-	$Gd_{0.9}(Fe_{0.7}Cr_{0.4})O_3$	$(Fe_{1.5}Mn_{0.1-0.2}Cr_{0.4})O_3$
0.5	0.1	-	$(Ni_{0.5-0.6}Mn_{0.4-0.5})(Fe_{0.8}Cr_{0.2})_2O_4$	$Gd_{1.0}(Fe_{0.7}Cr_{0.3})O_3$	$(Fe_{1.6}Mn_{0.1}Cr_{0.3})O_3$
0.9	0.1	-	$(Ni_{0.5}Mn_{0.1})(Fe_{0.9}Cr_{0.2-0.3})_2O_4$	$Gd_{0.9}(Fe_{0.7-0.8}Cr_{0.3-0.4})O_3$	-
0.1	0.5	-	-	$Gd_{1.0}(Fe_{0.8}Cr_{0.2})O_3$	$(Fe_{1.7}Mn_{0.1}Cr_{0.2})O_3$
0.5	0.5	-	-	$Gd_{1.0}(Fe_{0.7-0.8}Cr_{0.2})O_3$	$(Fe_{1.7-1.8}Mn_{0.1}Cr_{0.1-0.2})O_3$
0.9	0.5	-	$(Ni_{0.6}Mn_{0.1})(Fe_{1.0}Cr_{0.1})_2O_4$	$Gd_{1.0}(Fe_{0.8-0.9}Cr_{0.1-0.2})O_3$	-
0.1	0.9	$Gd_{2.7-2.8}Fe_{5.1}O_{12}(Cr: 0.2)$	$(Ni_{0.1}Mn_{0.7})(Fe_{1.1}Cr_{0.05})_2O_4$	-	-
0.5	0.9	$Gd_{3.4}Fe_{4.4}O_{12}(Cr: 0.2)$	$(Ni_{0.5}Mn_{0.4-0.5})(Fe_{1.0}Cr_{0.05})_2O_4$	$Gd_{1.0}(Fe_{0.9}Cr_{0.1})O_3$	-
0.9	0.9	-	$(Ni_{0.6-0.7}Mn_{0.1})(Fe_{0.9}Cr_{0.2})_2O_4$	$Gd_{0.9}(Fe_{0.7}Cr_{0.4})O_3$	-

**Fig. 4.** Back scattered electron (BSE) images of specimens synthesized from the composition of $Gd_5Fe_3O_{12}+(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$. (a) GDS-39 ($x=0.1, y=0.1, 1400^\circ C, 20$ hr), (b) GDS-13 ($x=0.5, y=0.1, 1400^\circ C, 20$ hr), (c) GDS-41 ($x=0.9, y=0.1, 1400^\circ C, 20$ hr), (d) GDS-10 ($x=0.1, y=0.5, 1400^\circ C, 20$ hr), (e) GDS-2 ($x=0.5, y=0.5, 1200^\circ C, 20$ hr), (f) GDS-4 ($x=0.9, y=0.5, 1200^\circ C, 20$ hr), (g) GDS-40 ($x=0.1, y=0.9, 1400^\circ C, 20$ hr), (h) GDS-1 ($x=0.5, y=0.9, 1200^\circ C, 20$ hr), (i) GDS-42 ($x=0.9, y=0.9, 1400^\circ C, 20$ hr). White (Perovskite or garnet); Gray (Spinel or Fe_2O_3); Black (Holes).

조성에서만 관찰되었다. 이 조성을 제외하고, 페롭스카이트의 회절강도는 나머지 조성에서 가장 강한 면모를

보였고, 페롭스카이트의 강도는 석류석이 형성 시 급작스럽게 감소되는 특성을 보여, 순수한 석류석

($Gd_3Fe_5O_{12}$)의 합성의 결과와 유사하였다.

석류석과 스피넬은 비화학적 조성은 보였으며 이는 각 상들의 선택적 원소 수용능력에 의한 것으로 해석된다. 즉 Fe는 석류석의 주요 성분일 뿐만 아니라 스피넬의 주요 성분이다. 또한 Gd는 석류석과 페롭스카이트의 주요 성분이나 스피넬의 형성과는 무관하였다. 결과적으로 석류석의 비화학적 조성은 화학양론적 조성에서 고려되지 않았던 Gd-Fe 페롭스카이트와의 공존에 따른 결과로 사료된다. 또한 석류석과 공존하고 있지 않은 스피넬의 비화학적 조성은 페롭스카이트의 형성과 관련이 있다. 즉 석류석과 페롭스카이트 간의 화학식인 $Gd_3Fe_5O_{12}=3GdFeO_3+Fe_2O_3$ 로부터 모든 석류석의 구성성분인 Gd가 페롭스카이트에 배분된다면, 1몰의 Fe_2O_3 가 남게되며, 이러한 1몰의 Fe_2O_3 의 함량은 스피넬에 배분됨으로써, 스피넬 내의 Fe의 함량의 증가 원인으로 해석될 수 있다. 페롭스카이트 내의 Cr^{3+} (0.615Å)의 존재는 스피넬의 주요 원소인 Ni^{2+} (0.69Å)과 Mn^{2+} (0.83Å)과는 달리 페롭스카이트의 주요 구성원소인 Fe^{3+} (0.645Å)의 전하 및 이온반경과 매우 유사하다는 사실로부터 유래된 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 고준위 방사성 폐기물 내에 함유된 복잡한 원소를 수용할 수 있는 고화체인 다상고화체를 개발하고자 하였다. Gd를 Pu의 모조제로 사용한 $Gd_3Fe_5O_{12}$ 조성의 석류석과 Ni, Mn, Fe 및 Cr 등의 원소를 수용할 수 있는 스피넬 조성($(Ni_xMn_{1-x})(Fe_yCr_{1-y})_2O_4$)을 선택하여 석류석과 스피넬이 공존할 수 있는 다상 고화체를 합성하여, 이들 화학조성에서의 상관관계 및 특성을 연구하였다.

다상고화체의 합성온도는 1200-1400°C로 설정하여 수행한 결과 Fe_2O_3 -페롭스카이트-스피넬, Fe_2O_3 -스피넬-석류석 및 페롭스카이트-스피넬-석류석 등 3가지 타입의 상조합이 관찰되었다. 석류석은 Fe의 함량이 가장 높았던 $x=0.1-0.5$ 및 $y=0.9$ 인 조성에서만 형성된 반면, Ni의 함량이 가장 높았던 경우에는 석류석이 형성되지 않는 특성을 보였다. 또한 석류석이 관찰되지 않는 경우에는 Gd-Fe 페롭스카이트가 가장 강한 회절강도를 보였다. 석류석과 스피넬은 비화학적 조성을 보였는데, 이는 페롭스카이트의 형성 및 각 상들의 선택적 원소 수용능력에 기인된 것으로 해석된다. 따라서 본 연구에서 합성된 다상고화체를 통하여 고준위

방사성 폐기물 내에 함유된 Pu에 대한 모조제로 사용된 Gd가 석류석과 페롭스카이트에 주로 배분되는 것이 확인됨으로써 이들 두 상이 Pu에 대한 높은 고용능력의 가능성을 지시하고 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 과학기술부 국제공동연구사업의 ‘고준위 폐기물의 고정화를 위한 매트릭스개발 연구’ 과제(M6-0302-00-0096)에서 지원되었습니다.

참고문헌

- 장영남, 채수천, 배인국, Yudinsev, S.V. (2002) 새로운 파이로클로어의 합성 및 결정화학적 특징. 한국광물학회지, 15권, p. 78-84.
- 채수천, 배인국, 장영남, Yudinsev, S.V. (2003) 고준위 방사성폐기물의 고정화를 위한 Fe-석류석 합성 연구. 한국광물학회지, v. 16, p. 307-320.
- 채수천, 배인국, 장영남, Yudinsev, S.V. (2004) Ca-Ce-Hf-Ti-O System에서의 파이로클로어 합성. 자원환경지질, v. 37, p. 375-381.
- Burakov, B.E. and Anderson, E.B. (1998) Development of Crystalline Ceramic for Immobilization of TRU Wastes in V.G. Khlopin Radium Institute. Proceedings of the 2nd NUCEF International Symposium NUCEF'98, 16-17/11/98, Hitachinaka, Ibaraki, Japan, JAERI-Conf.99-004(Part I), p. 295-306.
- Burakov, B.E. and Strykanova, E.E. (1998) Garnet Solid Solution of $Y_3Al_5O_{12}$ - $Gd_3Ga_5O_{12}$ - $Y_3Ga_5O_{12}$ (YAG-GGG-YGG) as a Prospective Crystalline Host-Phase for Pu Immobilization in the Presence of Ga. Proceedings of the International Conference Waste Management'98, Tucson, Arizona, USA, 1-5/03/1998, CD version, <http://localhost:6017/html/sess34/34-05/34-05.htm>.
- Burakov, B.E., Anderson, E.B. and Knecht, D.A. (1999) Ceramic Forms for Immobilizing Pu Using Zr, Y, Al Metal Additives. Environmental Issues and Waste Management Technologies IV, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, p. 349-356.
- Burakov, B.E., Anderson, E.E., Zamoryanskaya, M.V. and Petrova, M.A. (2000) Synthesis and study of ^{238}Pu -doped gadolinium-aluminum garnet. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., v. 608, p. 419-422.
- Ewing, R.C. (1999) Nuclear Waste Forms for Actinides. Proc. Natl. Acad. Sci., v. 96, p. 3432-3439.
- Ewing, R.C., Weber, W.J. and Clinard, Jr. W. (1995) Radiation effects in nuclear waste forms for high-level radioactive waste. Progress in Nuclear Energy, v. 29, p. 63-127.
- Harker, A.B. (1998) Tailored ceramics. In: Radiative waste forms for the future. Lutze, W. and Ewing, R.C. (Eds.), Elsevier, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, p. 335-392.
- Luo, S., Zhu, X. and Tang, B. (1998) Actinides con-

- tainment by using zirconolite-rich Synroc. Proc. of International Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management (Spectrum 98), American Nuclear Society, La Grange Park, IL, p. 829-833.
- Ringwood, A.E., Kesson, S.E., Reeve, K.D., Woolfrey, J.L. and Ramm, E.J. (1988) Radioactive waste forms for the future. edited by W. Lutze and Ewing, R.C., Elsev., Amst., p. 233-334.
- Vance E.R., Begg B.D., Day R.A. and Ball C.J. (1995) Zirconolite-rich ceramics for actinide wastes. Scientific Basis for Nuclear Waste Management-XVIII. MRS Symposia Proceedings, v. 353, Pt. 2, p. 767-774.
- Yudintsev, S.V. (2001) Incorporation of U, Th, Zr, and Gd into the garnet-structured host. Proc. of the ICEM'01 (the 8-th Int. Conf. Rad. Waste Mangement and Environ. Remed.), ICEM, Brugge, Belgium, Sept. 30-Oct. 04, 2001.
- Yudintsev, S.V., Lapina, M.I., Ptashikin, A.G., Ioudintseva, T.S. Utsunomiya, S., Wang, L.M. and Ewing, R.C. (2002) Accommodation of Uranium into the Garnet Structure. Proc. of the MRS Symp., v. 713, JJ11. 28. 1-4.
- Yudintsev, S.V., Stefanovsky, S.V. and Ewing, R.C. (2005) Actinide Host Phases as Radioactive Waste Forms (tentative title: unpublished); In Myasoedov, B.F. (Ed.) Structural Chemistry of Inorganic Actinide Compounds, Elsevier B.V./Ltd.

2006년 1월 26일 원고접수, 2006년 3월 20일 게재승인.