

Melting Characteristics for Radioactive Aluminum Wastes in Electric Arc Furnace

아크 용융로에서 방사성 알루미늄 폐기물의 용융특성

Byung-Youn Min*, Pyung-Seob Song, Jun-Hyung Ahn, Wang-Kyu Choi,
Chong-Hun Jung, Won-Zin Oh and Yong Kang*

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

*School of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

bymin@chol.com

민병연*, 송평섭, 안준형, 최왕규, 정종현, 오원진, 강 용*

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

* 충남대학교 화학공학과, 대전시 유성구 궁동 220번지

(Received October 4, 2005 / Approved November 22, 2005)

Abstract

The characteristics of the aluminum waste melting and the distribution of the radioactive nuclides have been investigated for the estimation on the volume reduction and the decontamination of the aluminum wastes from the decommissioning of the TRIGA MARK II and III research reactors at the Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI). The aluminum wastes were melted with the use of the fluxes such as flux A : NaCl-KCl-Na₃AlF₆, flux B : NaCl-NaF-KF, flux C : CaF₂, and flux D : LiF-KCl-BaCl₂ in the DC graphite arc furnace. For the assessment of the distribution of the radioactive nuclides during the melting of the aluminum, the aluminum materials were contaminated by the surrogate nuclides such as cobalt(Co), cesium(Cs) and strontium(Sr). The fluidity of aluminum melt was increased with the addition of the fluxes, which has slight difference according to the type of fluxes. The formation of the slag during the aluminum melting added the flux type C and D was larger than that with the flux A and B. The rate of the slag formation linearly increased with increasing the flux concentration. The results of the XRD analysis showed that the surrogate nuclide was transferred to the slag, which can be easily separated from the melt and then they combined with aluminum oxide to form a more stable compound. The distribution ratio of cobalt in ingot to that in slag was more than 40% at all types of fluxes. Since vapor pressures of cesium and strontium were higher than those that of the host metals at the melting temperature, their removal efficiency from the ingot phase to the slag

and the dust phase was by up to 98%.

Key words : Melting, Arc Furnace, Aluminum Waste, TRIGA, Slag, Distribution

요 약

한국원자력연구소 내의 연구용 원자로(TRIGA II, III) 해체 시 발생한 방사성 알루미늄 해체 폐기물의 감용 및 제염 특성을 평가하기 위해 아크로에서 알루미늄의 용융 특성 및 방사성 핵종의 분배 특성에 대한 연구를 수행하였다. 알루미늄 폐기물은 흑연전극(graphite electrode)을 이용한 전기아크로에서 4가지 종류의 플럭스(A : NaCl-KCl-Na₃AlF₆, B : NaCl-NaF-KF, C : CaF₂, D : LiF-KCl-BaCl₂)를 함께 첨가하여 용융시켰다. 또한 알루미늄의 용융 시 방사성 핵종의 분배 특성을 고찰하기 위해 알루미늄 시편에 방사성 모의 핵종인 코발트, 세슘, 스트론튬의 화합물을 오염시킨 후 흑연도가니에 넣어 알루미늄 용융실험을 수행하였다. 전기아크로에서 알루미늄의 용융실험을 수행한 결과 플럭스의 종류에 따라 다소 차이는 있으나 플럭스의 첨가에 의해 알루미늄 용융체의 유동성이 증가됨을 확인할 수 있었다. 아크 용융에 의해 생성된 슬래그의 발생량은 플럭스 A와 B를 첨가한 알루미늄 용융실험에 비해 플럭스 C와 D를 첨가한 실험에서 상대적으로 많은 양이 생성됨을 알 수 있었으며, 첨가된 플럭스의 양이 증가할수록 이에 비례하여 슬래그의 발생량이 증가함을 알 수 있었다. 슬래그(slag)의 XRD 분석을 통해 방사성 핵종이 주괴에서 슬래그 상으로 이동한 후 슬래그를 구성하고 있는 산화알루미늄과 결합하여 안정한 화합물로 슬래그 상에 포집됨을 알 수 있었다. 알루미늄 폐기물의 용융 시 Co의 분배율은 플럭스를 첨가한 경우에 보다 높은 제염계수를 나타냈으며, 모든 플럭스에서 40% 이상의 제염 효과를 나타내었다. 반면에 휘발성 핵종인 Cs과 Sr은 주괴로부터 98% 이상이 제거되어 대부분이 슬래그상과 분진으로 이동되는 특성을 확인할 수 있었다.

중심단어 : 용융, 아크로, 알루미늄 폐기물, 슬래그, 분배

I. 서 론

우수한 강도와 UF₆에 대한 내부식성 때문에 원자력 연구시설 및 우라늄 정련시설(Gaseous diffusion plant etc.)의 구조재 및 배관 등으로 사용된 알루미늄은 원자력 시설의 노후화와 해체에 의해 다양한 오염 준위를 나타내는 방사성 폐기물로 발생된다. EC의 자료에 의하면 2060년까지 유럽의 우라늄 농축 시설을 포함한 원자력 시설에서 약 9000 ton의 방사성 알루미늄 해체 폐기물이 발생할 것으로 예측하고 있다[1,2]. 이러한 알루미늄 폐기물들은 대부분 방사능 오염도가 낮기 때문에 적절한 제염처리를 거치면 재

활용이 가능하며 이에 대한 시나리오가 연구되어져 오고 있는 실정이다. 특히, 국내적으로도 1995년에 운전이 정지되어 현재 해체 진행 중인 TRIGA Mark-II, III(연구로 1~2호기)의 해체 시 노심 라이닝(lining) 및 배관, 조사 설비 등의 오염된 알루미늄 폐기물들이 발생되고 있다[3]. 방사성 알루미늄 폐기물들의 처리 기술 중 부피감용 및 제염 측면에서 가장 효과적인 방법 중의 하나가 금속용융 처리기술이다. 용융 처리 기술은 화학제염이나 초고압 압축과 같은 다른 기술에 비해 최대의 부피감용 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 적절한 플럭스를 첨가하여 용융하면 높은 제염 효과도 얻을 수 있다는 장점을 가지고

있다. 일반적으로 금속용융 처리 기술에서는 금속 용융체의 유동성 및 점성, 이온이동도 등의 물리적 및 화학적 특성을 향상시키기 위해 슬래그 형성제인 SiO₂, CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaF₂ 등의 화합물을 첨가하여 용융하지만, 알루미늄의 용융 기술에서는 슬래그 형성제의 용점이 알루미늄의 용점보다 높을 뿐만 아니라, SiO₂가 알루미늄 용융체와의 환원반응에 의해 금속 실리콘(Si)과 산화알루미늄(Al₂O₃)을 생성하기 때문에 KF, CaF₂, NaF, NaCl 등과 같은 플럭스를 첨가하여 알루미늄 폐기물을 용융시킨다[4].

지금까지 금속용융에 대한 대부분의 연구는 탄소강과 스테인레스강에서의 용융특성 및 방사성 핵종의 분배에 대한 연구로서 방사성 알루미늄 폐기물에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전기 아크로에서 첨가된 플럭스의 종류 및 첨가량에 따라 알루미늄 용융체의 용융특성 및 슬래그의 발생량의 변화를 고찰하고자 한다. 또한 알루미늄의 용융시 표면에 오염되어 있는 Co, Cs, Sr과 같은 방사성 핵종이 플럭스의 조성 및 첨가량에 따라 주피와 슬래그 상에 분포되는 분배 특성을 알아보하고자 한다.

II. 실험

Fig. 1은 알루미늄 용융 실험에 사용된 전기 아크로(Electric Arc Furnace)의 개략도로서, 본 실험장비는 크게 장치하부의 동관 기저전극과 상부의 흑연전극, 오염시킨 알루미늄을 넣고 용융시키는 흑연 도가니, 고온의 아크열에 의한 장비의 손상을 막기 위한 cooling jacket 시스템 그리고 여러 가지 주변장치로 구성되어 있다. 전기아크로는 크기는 폭이 1.2 m이고 높이가 2.2 m이며, 처리용량은 1 kg/batch이고, DC 아크 시스템을 채택하고 있다. 용융 실험에 사용된 알루미늄 시편은 TRIGA 연구 시설의 제염/해체시 발생하는 알루미늄과 같은 조성의 알루미늄을 사

용하였으며, 1mm 두께의 알루미늄 판(sheet)을 10 mm × 10 mm의 크기로 절단하여 300 g의 알루미늄을 흑연도가니에 장입하였다. 방사성 동위원소의 핵종 거동을 평가하기 위해 사용된 모의 핵종은 총 3가지 (Co, Cs, Sr)로서 각각의 화합물을 사용하였다. 금속 용융체의 산화를 방지하고 유동성을 증가시켜 용융 금속과 원소의 이동을 쉽게 하며 불순물의 안정한 제거를 위해 첨가되는 플럭스의 양은 용융시킬 알루미늄 시편무게의 각각 3, 5, 7, 9 wt%로 첨가하였으며, 플럭스 종류와 주입된 첨가량에 따른 방사성 핵종의 분배 특성을 평가하였다. 본 실험에서 사용된 실험 장치의 세부사항과 용융실험조건은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 플럭스들은 알루미늄 폐기

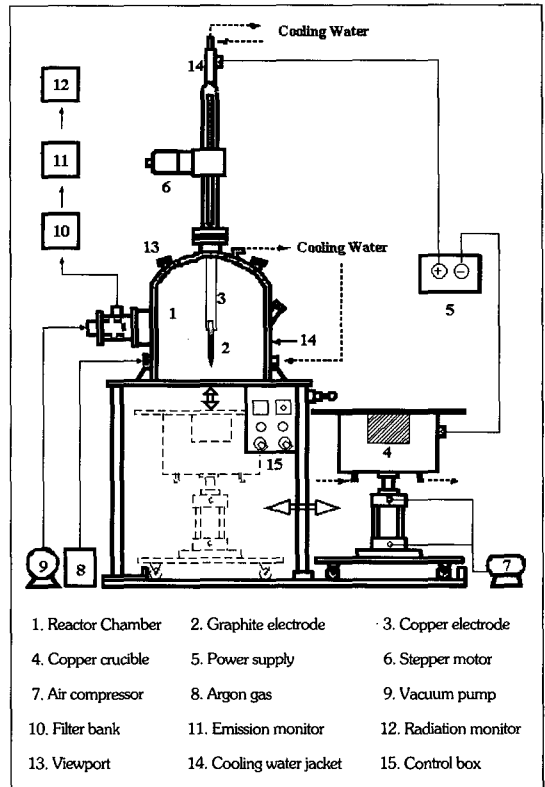


Fig. 1. Schematic of the electric arc furnace.

Table 1. The composition of flux agents and experimental conditions.

Composition of flux agents	A : NaCl, KCl, Na ₃ AlF ₆ , B : NaCl, NaF, KF, C : CaF ₂ , D : LiF, KCl, BaCl
Surrogate nuclide (0.1wt%)	CoCl ₂ · 6H ₂ O, CsCl, SrCl ₂ · 6H ₂ O
Flux weight (wt%)	3, 5, 7, 9
Melting time(min)	3

물의 처리 시 필요한 높은 전기전도도 및 열전도도, 큰 열용량, 낮은 밀도, 적절한 점도, 상호간의 혼합성, 높은 표면에너지, 낮은 증기압 등의 다양한 장점을 가지고 있는 플럭스들을 선정하여 사용하였다[5].

알루미늄 용융 실험은 300 cc의 흑연 도가니에 300 g의 오염된 알루미늄을 넣은 다음 하부 전극 역할을 수행하는 구리 도가니 안에 위치시켰다. 구리 도가니가 장착되어 있는 수직·회전 테이블(Turn-table)은 유압시스템에 의해 상부의 챔버(Chamber)에 완전 밀착시킨 후, 진공 시스템을 사용하여 진공 상태로 만든 후 불활성 가스인 아르곤(Ar) 가스를 주입한다. 아르곤 가스는 탄소 전극봉의 소모를 방지 및 알루미늄 용융체의 산화를 막기 위하여 10 l/min의 유속으로 연속 주입하였다. 배기가스의 유량을 자유로이 조절할 수 있는 2개의 배기팬(Induced fan)을 사용하여 배기가스를 대기 중으로 배출시켰으며, 대기 중으로 배출하기 전에 HEPA 필터와 Charcoal 필터로 구성된 필터뱅크를 통과시켰다. 탄소 전극봉은 수직 운동을 통해 급속 시편과 근접하며 이때 아크가 발생되고 아크가 발생된 이후에는 수동으로 운전하여 알루미늄을 용융하였다. 방사성 핵종의 분포 특성을 알아보기 위해 1000 ppm의 Co, Cs, Sr을 알루미늄에 오염시켜 용융하였으며, 플럭스 양은 3, 5, 7, 9 wt%씩 변화시켜 가면서 이들 플럭스의 조성과 첨가량에 따라 약 3분 동안 용융 실험을 수행하였다. 용융된 알루미늄의 용융체는 주형에 부어 실린더 형태의 주괴를 생성하였으며, 알루미늄 급속 용융체의 하부에 존재하는 슬래그는 분말 형태로 채취되었다. 주괴내에 존재하는 각 핵종의 정확한 분석을 위해서 주괴의 다양한 위치에서 시료를 채취하였으며, Co는 ICP-AES(IRIS DUO, Thermo Elemental Co.)를 사용하여 정량을 분석하였으며, Cs과 Sr은 ICP-MS(X-7, Thermo Elemental Co.)를 사용하여 분석하였다. 또한 XRD 분석을 통해서 각각의 시료에 모의 핵종이 어떠한 화합물들이 존재하는지 알아보았다.

III. 결과 및 고찰

여러 종류의 플럭스를 사용하여 용융 실험을 수행

한 결과 유동성 측면에서 두 가지 형태의 용융 특성을 나타내었다. 첫 번째는 유동성이 상대적으로 양호한 알루미늄의 용융체가 생성되는 것으로 Table 1에 수록한 플럭스 A(NaCl , KCl , Na_3AlF_6 의 혼합물)와 D(LiF , KCl , BaCl_2 의 혼합물)를 첨가했을 경우이며, 두 번째는 플럭스 B(NaCl , NaF , KF)와 플럭스 C(CaF_2)를 각각 첨가한 경우로서 첫 번째 형태의 플럭스 보다 유동성 확보가 어려웠다. 알루미늄 용융 후 알루미늄 주괴는 염성분의 플럭스로 덮여 있는데 이는 밀도차이 뿐만 아니라, 알루미늄 용융체의 표면 장력이 슬래그 용융체의 표면장력보다 비교적 크기 때문이다. 전반적으로 모든 실험에서 염성분의 슬래그와 주괴의 분리는 비교적 쉽게 이루어졌으며 용융 특성 실험 결과 커다란 차이점을 보였는데 이는 용융 염 성분들이 지니고 있는 고유의 특성에 기인한 분진형 입자들의 비산 및 비말동반 현상이다. 플럭스 A와 D는 많은 입자성 분진(Fume)의 발생으로 용융로 내부 시야 확보가 상당히 어려워 자유로운 운전을 유지할 수 없었으나, 플럭스 B와 C를 사용한 용융 실험에서는 분진의 발생량이 적어 운전이 용이하였다. 이러한 차이는 투입되는 플럭스의 조성 특히, 불화물과 염화물의 물리적 특성에 기인한다. 즉, 용융 초기에는 노내의 분위기가 상당히 양호한 상태이나 도가니의 온도가 염화물의 휘발 온도에 근접하면 급격히 분진이 발생함을 알 수 있었으며 이는 고온에서 안정된 염화물은 증기압이 커서 쉽게 휘발한다는 특성과 일치한다[6]. 휘발성 입자의 분진 중 일부는 응축되어 흑연도가니 주변의 회전형 테이블(Turn-table)과 반응기 상부의 챔버(Chamber) 표면에 침적되었으며, 침적된 분진의 분석 결과 휘발성 핵종인 Cs과 Sr이 다량 포함되어 있었으며 약간의 Co도 검출되었다. 불화물도 염화물과 마찬가지로 휘발 특성을 가지고 있으나 단일성분의 CaF_2 은 비교적 높은 녹는점(1418 °C)은 지니고 있어 플럭스 A와 D의 결과와는 상이한 양상을 보였다.

Fig. 2는 플럭스를 첨가한 알루미늄의 용융 실험에서 얻어진 슬래그의 XRD 분석결과로 슬래그의 기본 물질뿐만 아니라 모의 방사성 핵종과 알루미늄의 화합물인 CoAl_2O_4 가 검출됨을 알 수 있었으며, 이러한

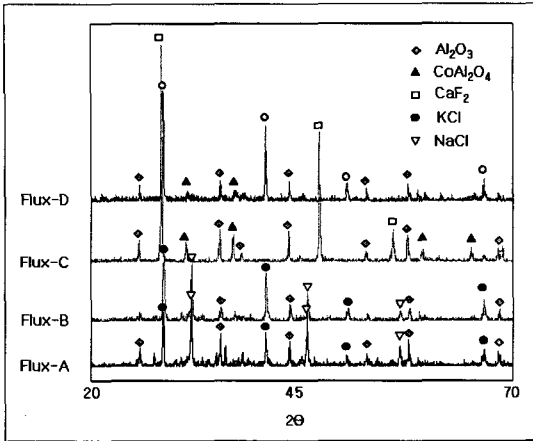


Fig. 2. Typical examples of XRD analysis for the slag.

결과로 볼 때 방사성 핵종이 슬래그 상에 존재하는 염이나 산화알루미늄 화합물과 결합하여 안정화됨을 확인할 수 있었다. 일반적으로 Co는 탄소강이나 스테인레스강과 같은 금속의 용융 시에는 대부분이 주피내에 균일하게 분포됨으로써 회석에 의한 비방사능의 감소로 제염효과를 얻을 수 있다고 보고[7-9]되었으나, 알루미늄의 용융 반응에서는 용융체내에서의 혼합에 의한 제염 효과뿐만 아니라 슬래그내의 화합물과 결합하여 보다 안정한 화합물을 형성함으로써 보다 높은 제염 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

알루미늄 용융 기술에서 중요한 변수는 용융온도와 첨가된 플럭스의 조성으로 이들은 오염물질의 열화학적 및 전기화학적 반응에 영향을 미친다. 특히, 첨가된 플럭스는 알루미늄 용융 시 이온으로 해리되어 알루미늄 용융체의 전기전도도와 점도 그리고 비중에 영향을 미치며, 알루미늄 용융체에 존재하는 불순물과 반응하여 보다 안정한 화합물을 생성한다. 그러나 알루미늄 용융 시 제염에 영향을 미치는 용융염은 실리콘(Si)처럼 격자 구조 또는 결정을 형성하여 불순물을 제거 하는 것이 아니라 세정제로서 알루미늄에 고착되어 있는 불순물을 용해하여 산화물로 만든 후 플럭스의 구성성분과 화학적 결합에 의해 불순물을 제거시키는 것이다[10]. 첨가된 플럭스의 증가에 따른 슬래그의 발생량 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 첨가된 모든 플럭스의 경우에 첨가된 플럭스의 양이 증가할수록 슬래그의 발생량은 증가하는 경향

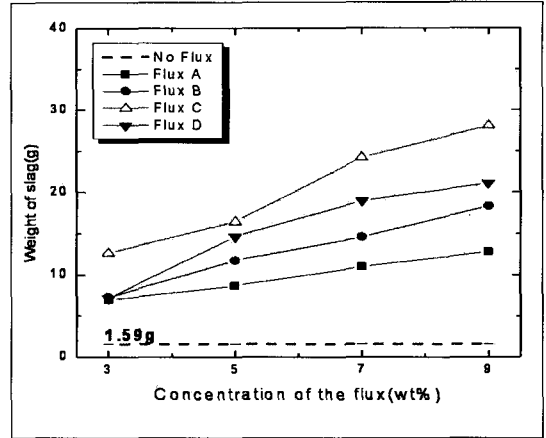


Fig. 3. Effect of the flux concentration on the formation of the slag.

을 나타냈으며 플럭스 C(CaF₂)가 가장 많은 양의 슬래그를 발생시켰다.

Fig. 4는 첨가된 플럭스 양의 증가에 따른 Co의 분배특성을 나타내었다. 일반적으로 금속 용융체상에서 형성된 방사성 핵종 산화물은 첨가되는 플럭스의 영향에 의해 확산이나 비중 및 활동도 차이 그리고 교반에 의해 플럭스와 접촉하면서 슬래그 상으로 이동한다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Co는 플럭스를 주입하지 않은 경우보다 플럭스를 주입한 경우에 많은 양의 Co가 주피에서 슬래그 상으로 이동되어 높은 제염효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 플럭스를 주입하지 않고 알루미늄만 용융하였을 경우에 Co의 분배율은 주피에 82.5%, 슬래그에 12.8%로 대부분이 주피에 잔류하지만, 플럭스를 첨가함에 따라 주피에 대부분 존재하던 Co가 슬래그 상(phase)으로 이동하여 최대 60%까지 슬래그에 분배됨을 확인할 수 있었다. 전반적으로 주피에 포집되는 Co의 농도는 25~40% 정도로 나타났으며 슬래그에서는 좀 더 많은 40~50% 정도의 포집율을 나타내었다.

비휘발성인 Co의 경우 시험조건에 관계없이 초기 투입량의 대부분이 주피와 슬래그에 잔존하고 있음을 확인할 수 있었다. 플럭스 A의 경우에는 78%, 플럭스 B는 68%, 플럭스 C는 74%, 플럭스 D는 77%가 용융로에 잔재하여 각각 주피와 슬래그에 함유되어 있다. Co는 특성상 약 1500℃까지의 고온에서도 염소원소의 존재 유무에 관계없이 안정된 고체 산화물

(CoO)의 형태로 존재하며 증기압이 없기 때문에 대부분이 용융로에 존재해야 하지만 20~30%의 Co가 소실된 이유는 용융 시에 발생하는 기체의 유동특성과 플럭스 성분의 휘발에 의해 Co가 함께 입자상 물질로 변화하여 용융로에서 이탈했기 때문으로 판단된다[11]. 이러한 입자상 물질로 동반된 Co는 용융로의 배관에 응축되어 침적되거나 필터 시스템에 의해 포집된다. 일반적으로 Co는 열역학적 특성을 고려해 볼 때 금속주괴에 고루 분포되는 것으로 보고되고 있는데 본 실험에서는 다소 차이를 보이고 있다. 이는 Co와 같은 비휘발성 금속들도 화염부의 극 고온에 의해서나 다른 기체와의 반응에 의해 휘발성이 큰 물질로 변해 휘발하기 때문이다. 특히 염소성분이나 불화물 성분이 존재하는 경우에 금속성분들은 할로젠

화물로 변화하게 되며 금속의 염화물은 산화물보다 훨씬 증기압이 높기 때문에 잘 휘발한다.

플럭스의 종류와 첨가량을 변화시켜 가면서 알루미늄을 용융하였을 경우에 주괴와 슬래그로 분배되는 Cs의 분배특성을 Fig. 5에 나타내었다. 휘발성인 Cs의 경우 실험조건에 따라 다소 차이를 보이거나 플럭스 C의 경우 1000℃ 이상의 고온실험에서도 투입된 양의 최대 40% 정도가 슬래그에 분배되어 포집됨을 알 수 있었다. 플럭스 D의 경우 슬래그 상으로의 분배율이 약 20%로 다른 플럭스에 비해 분배효율이 낮은 것을 볼 수 있는데 이는 실험 시 상당히 많은 양의 입자상 물질이 발생되어 배기가스로 휘발되는 것이 주원인이며 챔버와 테이블의 입자를 분석한 결과 무게는 약 10%의 Cs이 검출되었다. Cs화합물은 높은 증기압으로 인해 대부분 배기체로 이동할 것이라고 생각되었으나 본 실험에서는 상당량의 Cs이 슬래그 상으로 분배됨을 알 수 있었다. 이는 향후 Cs으로 오염된 방사성 금속폐기물의 용융 시 배기체의 부하를 줄임과 동시에 필터의 가동시간을 연장시켜 운전비용에 상당히 유리하게 작용할 것이며 2차 폐기물 처리에 대한 부담을 상당히 완화시키는 역할을 할 것으로 판단된다. 고온의 흑연 도가니에서 휘발된 세슘의 대부분은 응축되어 용융로 내부 또는 HEPA filter에 포집된다. Cs의 분배특성 실험 시 Cs에 대한 포집효율의 차이는 투입된 플럭스의 조성에 따른 비발동반 특성 및 가스상 성분의 평형조성과 증기상 세슘의 용

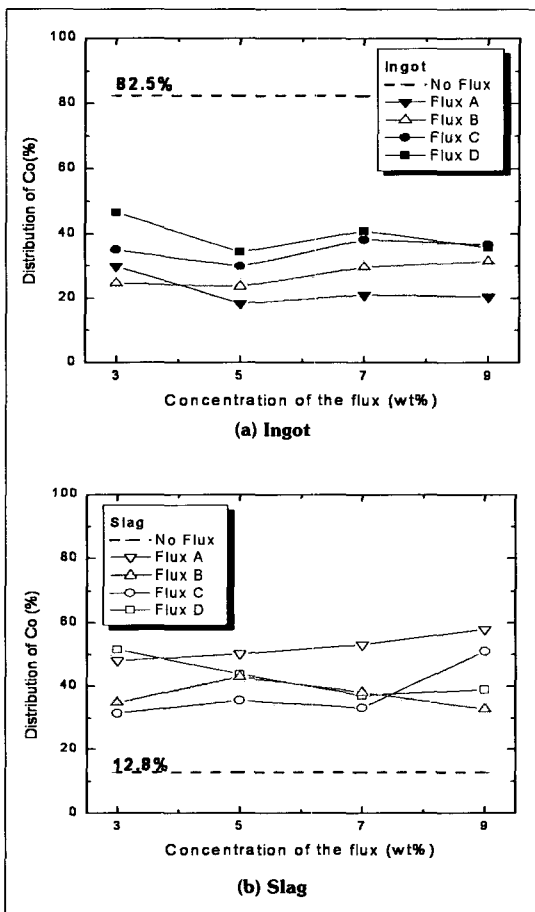


Fig. 4. Effect of the flux concentration on the distribution of cobalt in the ingot & slag phases.

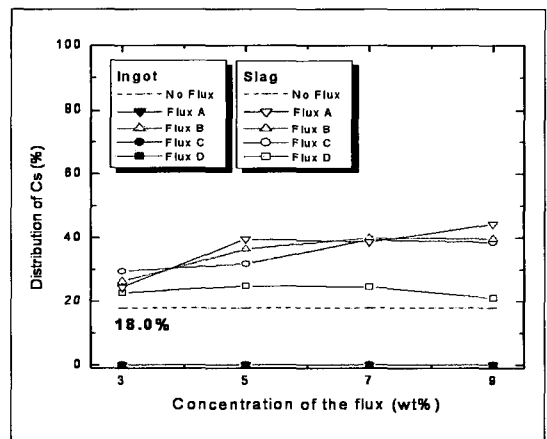


Fig. 5. Effect of the flux concentration on the distribution of Cesium in the ingot & slag phases.

축기구의 차이에 따른 입자상 세습의 분포특성에 기인된다고 볼 수 있다[11]. 주괴에서 Cs은 플럭스 종류 및 첨가량에 관계없이 1% 미만의 적은 농도만이 검출되었다. 전반적으로 슬래그의 양이 증가할수록 슬래그 상으로 분배되는 비율이 증가함을 알 수 있으며 플럭스 D를 제외한 나머지 플럭스에 의한 분배특성은 비슷한 수준을 나타냈다.

Fig. 6은 주괴와 슬래그 상에 존재하는 Sr의 분배특성을 나타낸 그림으로 많은 부분이 분진이나 증기에 동반되어 제거된 Cs의 경우와 비교할 때 반휘발성인 Sr은 보다 많은 양의 Sr이 주괴와 슬래그 상에 분배됨을 알 수 있었다. 이는 반휘발성 핵종인 Sr의 특성으로 Sr의 경우에는 850℃ 이하에서는 증기압이 낮아 쉽게 증발되지 않기 때문이다. Sr의 경우에서도

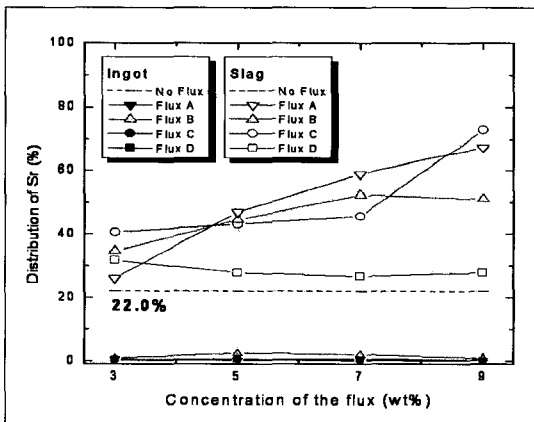


Fig. 6. Effect of the flux concentration on the distribution of Strontium in the ingot & slag phases.

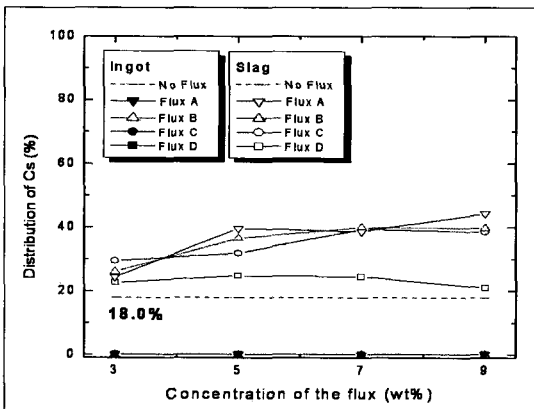


Fig. 7. The distribution of surrogate nuclides(Flux A, 9wt%). (I : Ingot, S : Slag, D : Dust)

Cs의 경우와 마찬가지로 플럭스 D를 제외한 모든 플럭스에서 첨가된 플럭스의 양이 증가함에 따라 슬래그에 분배되는 Sr의 양이 증가함을 확인할 수 있었다. 플럭스 D에서는 Sr의 약 70 % 정도가 휘발되어 분진으로 이동되는 반면에 플럭스 A, B, C를 첨가한 용융실험에서는 최대 75% 정도까지 슬래그에 포집시킬 수 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 투입되는 플럭스의 조성 특히 불소(F)와 염소(Cl)의 물리적 특성에 기인한다[6, 11].

알루미늄에 플럭스와 각 핵종을 첨가한 후 용융하였을 경우에 주괴와 슬래그 그리고 분진에 각각 분포하는 핵종의 분배 특성을 Fig. 7에 나타내었다. Cobalt의 경우 실험조건(Flux A, 9wt%)에 따라 최대 60%까지 주괴에서 슬래그로 이동시켜 제거함으로써 높은 제염효과를 얻을 수 있었다. Cesium과 Strontium의 분배 특성은 대부분이 주괴에서 휘발되어 슬래그와 분진으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

전기아크로에서 알루미늄 용융 시 알루미늄의 용융특성 및 플럭스 종류, 그리고 플럭스의 첨가량에 따른 방사성 핵종의 분배특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄 용융체의 유동성 측면에서는 A>D>B>C 플럭스 순으로 우수하였으며, 아크로에서 알루미늄 용융의 운전 용이성은 플럭스 C>B>D>A 순으로 나타났다. 분진의 분석결과 Cs과 Sr 모두 10% 이상이 함유되어 있었으며 Sr보다 Cs이 더 많이 검출됨을 확인할 수 있었다.
2. Co는 실험조건(플럭스 농도 및 종류)에 따라 최대 약 60%, 휘발성 핵종인 Cs은 최대 44%, 반 휘발성인 Sr의 경우 최대 73%가 용융체에서 슬래그 상으로 이동함으로써 매우 우수한 제염 효과를 얻을 수 있었다.
3. 운전의 용이성과 용융 및 제염특성을 평가한 결과 플럭스 NaCl-KCl-Na₃AlF₆와 CaF₂가 다른 플럭스보다 알루미늄 금속 제염 시 가장 유리한 플럭스로 나타났다.

참고문헌

- [1] K.L. Hopkinson, A. Bishop, M.T. Cross, J. Harrison and F. Selgas, "Recycling and reuse of radioactive material in the controlled nuclear sector," EUR18041 EN, European Commission (1998).
- [2] S. Frigren, "Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations," Radiation Protection 89, European Commission(1998).
- [3] J.K. May and S.D. Wahnschaffe, "Engineering study for a melting, casting, rolling and fabrication facility for recycled contaminated stainless steel," WINCO-1189, January(1994).
- [4] 김의훈, 박홍채, 오기동, 이윤복, 최태현, 내화물 공학개론, 다성출판사, pp. 316-321(2002).
- [5] G. Lovering and J. Gale, "Molten salt techniques," Plenum Press, New York(1983).
- [6] USEPA, "Operation Parameters for Hazardous Waste Combustion Devices," USEPA, Office of Research and Development, Cincinnati, OH 45268 (1993).
- [7] G. Imbard and S. Rigaud, "Melting of Cs-contaminated ferritic steel from G2/G3 reactors, Marcoule," Proceeding of technical seminar on melting and recycling of metallic waste materials from decommissioning of nuclear installations, European Commission, Germany, pp. 193-208(1993).
- [8] M. Sappok, G. Lukacs and A. Ettemeyer, "Melting of radioactive scrap from nuclear installations," Proceeding of an international conference on Decommissioning of nuclear installations, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, pp. 482-493(1989).
- [9] S. Menon, G. Hernborg and L. Andersson, "Melting of low-level contaminated steels," Proceeding of an international conference on Decommissioning of nuclear installations, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, pp. 497-503(1989).
- [10] D. K. Fukumoto, S. Matthews, G. Klein, "Low dross aluminum melter project," California Energy Commission(1999).
- [11] H.C. Yang, J.H. Lee, J.G. Kim, J.H. Yoo and J.H. Kim, "Behavior of radioactive metal surrogates under various waste combustion conditions", J. of the Korean Nuclear Society, 34, pp. 80-89(2002).