

소듐분위기에서 물 누출로 인한 Ferrite Steel에서의 반응현상

정 경 채 · 김 병 호 · 권 상 운 · 김 광 락 · 황 성 태

한국원자력연구소

(1997년 12월 11일 접수, 1998년 2월 23일 채택)

Reaction Phenomena of the Ferrite Steel by Water Leakage into Liquid Sodium

Kyung-chai Jeong, Byung-ho Kim, Sang-woon Kwon, Kwang-rag Kim, and Sung-tai Hwang

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon 305-353, Korea

(Received December 11, 1997, Accepted February 23, 1998)

요 약 : 액체금속로 냉각재인 액체 소듐에서 시편의 누출특성을 소듐-물 반응 실험에 의해 조사하였다. 소듐-물 반응 현상의 확인은 물 누출 실험 전 후에 Fe, Cr 및 Ni 등과 같은 시편의 조성 변화로 확인하였다. 100 Kg/cm²의 누출 압력으로 4시간 동안 시편의 누출 경로를 통해 물을 누출시킨 결과, 누출경로에서 소듐-물 반응생성물들이 침적되어 있는 것을 확인하였으나, 부식에 의해 누출경로가 완전 파열되어 다량의 수증기가 액체 소듐속으로 빠져나가는 re-opening 현상은 관찰되지 않았다. 시편의 누출경로가 막히는 self-plugging 현상은 소듐-물 반응에 의한 반응생성물과 시편의 부식에 의한 부식 생성물이 주 원인으로 추정되고, re-opening 현상은 시편의 누출경로에서 열적인 transient로 추정되었다.

Abstract : Water leak phenomena in the liquid sodium, which is a coolant of liquid metal reactor, were investigated by carrying out sodium-water reaction experiment. It was confirmed that sodium and water react each other by the analysis of material composition of aspecimen at the end of experiment. When steam of 100 Kg/cm² was passed through the leak path of the specimen for 4 hours, reaction products from sodium-water reaction were observed on the leak site. However, re-opening phenomena were not observed at this condition. It was interpreted that the reaction product precipitated on leak path and thermal transient caused self-plugging and re-opening phenomena, respectively.

1. 서 론

액체금속로는 기존의 중수로나 경수로에서 사용된 사용후 핵연료의 재활용 가능성과 방사성 폐기물 처리 문제점의 저감, 기존의 열중성자로에 비해 60~100배의 우라늄 이용율을 향상시킬 수 있다는 장점등으로 인해 선진국가에서는 1960년대부터 차세대 원자로로 사용하기 위해 관련분야의 많은 연구가 이루어져 왔다[1-3]. 이에 따라 국내에서도 그동안 추진되어 오던 액체금속로 개발 프로그램을 1990년대 초부터 본격적으로 가동하기 시작하였으며, 고유의 안전성, 경제성등에 초점을 맞추어 개발이 진행되고 있다.

일반적으로 액체금속로에서는 냉각재로 액체 소듐을 사용하며, 이는 기존의 중수로나 경수로에서 냉각재로 사용하고 있는 경수나 중수보다, 열 전도율이 좋고 고온에서 비등점이 높아, 원자로의 1차측을 고압으로 운전하지 않아도 되는 장점등이 있기 때문에 소듐에 관한 연구도 활발히 진행되어 많은 연구보고나 기술현황들이 발표되어 있으나[4], 액체 소듐이 갖는 높은 화학적 반응성으로 인해 물과의 격렬한 반응에 따른 온도 및 압력상승, 재료의 부식으로 인한 누출량 증가등이 뒤따르기 때문에 안전성 확보에 대한 연구는 계속 진행되고 있다. 특히, 액체금속로를 구성하고 있는 열교환기(전열판)에서 고압으로 유지되어 있는 물(또는 수증기)이 상대적으로 저압으로 유지되어 있는 소듐부위로 누출되는 경우, 소듐/물 반응에 의해 원자로 자체에 직접적인 압력상승이 일어날 수 있기 때문에 이의 예방에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는 실정이다 [5, 6].

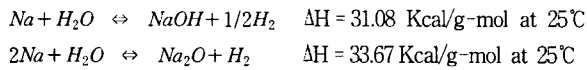
일반적으로 소듐은 물과 아주 폭발적으로 반응해서 소듐 산화물들과 수소가스를 방출하기 때문에[7], 만약 증기발생기를 구성하고 있는 전열판에서 용접결함이나 crack, pin-hole 등과 같은 누출부위가 발생하게 되면, 이로부터 고압의 물(스팀)이 소듐부위로 누출되어 소듐/물의 급격한 발열반응에 의한 온도상승, 반응생성물인 수소가스에 의한 시스템내의 압력상승과 소듐산화물에 의한 corrosion 및 erosion현상 등에 의해 대규모의 사고가 초래될 위험성이 있다 [8]. 이러한 사고에 대비한 안전대책으로 세계 각국에서는 물 누출현상 해석에 관련된 소위 "wastage현상"이라고 하는 재료의 특성에 관련된 분야의 연구와 물이 누출되었을 경우 생성되는 수소가스를 검출하여 물 누출 초기에 사고확대를 방지하는 방법에 대한 연구[9, 10], 그리고 대규모 누출이 발생할 경우 압력상승으로 인한 사고전파 방지에 관한 연구들이 주종을 이루어 연구가 진행되고 있다[11, 12]. 그러나 실제 소듐/물 반응에 대한 실험은 매우 위험하기 때문에 안전성을 고려한 장치의 제작 및 운전이 요구되어 실험 규모가 커지고 많은 횟수의 실험이 어려운 형편이기 때문에, 다분야와 비교해 상대적으로 많은 실험자료들은 발표되지 않고 있으며, 우리나라의 경우 이에 관련된 연구는 거의 초기단계에 있는 실정이다.

본 연구에서는 먼저 전열판에서 물이 미량 누출 될 경우 소듐/물 반응에 의한 전열판의 재질이 파손되어 가는 과정에 대해 이론적으로 간단히 언급하고, 이를 실험적으로 규명하기 위해 미량의 물 누출실험 장치를 제작하고 누출실험을 통하여 누출부위에서 재질의 부식현상을 관찰하였으며, 이로부터 차후에 누출확대 실험을

위한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2. 이론적 고찰

일반적으로 고압의 물이 소듐 부위로 누출되는 주된 원인은 증기발생기 내에 있는 전열관 접속부분에서 용접불량이 주된 원인인 것으로 알려져 있으며, 그외에 증기발생기의 제작이나 가공시 재질의 손상등에 의해 corrosion이 가속화되거나, 고온의 stress에 의해 열교환 tube에 crack의 발생, 기타 pinhole 등이 원인인 것으로 알려져 있다. 만약 이러한 원인에 의해 누출이 일어나면 미세누출인 경우 누출경로를 따라 소듐/물 반응생성물에 의한 부식과 erosion 현상에 의해 소위 "self-wastage"라고 하는 현상을 야기시켜[13], 점차 시간의 경과에 따라 누출량의 확대를 가져온다. Self-wastage현상은 고압으로 유지된 물이 소듐 부위로 누출되면 소듐과 물이 반응하여



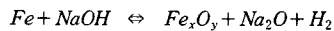
와 같은 반응에 의해 많은 반응열이 생성되어 고온의 분위기를 유지하고, 또 반응에 의해 생성된 반응생성물이 누출경로에서 주변의 재질을 재차 공격하여 damage를 증가시키는 erosion 현상, 또 위 반응에서 생성된 부식성이 강한 NaOH와 재질과의 반응에 의한 부식현상을 초래하여 누출부위를 확대시키는 결과를 초래하여 Fig. 1과 같은 메카니즘으로 진행될 것으로 예상하였다.

즉, 원자로의 증기발생기를 구성하고 있는 열교환 tube에서 어떤 결함이 발생하여 미량누출이 발생되면 상기 Fig. 1에서 처럼 잠복기(incubation)를 맞이하게 되고, 이때 소듐/물 반응에 의해 생성된 부식성의 NaOH가 tube의 재질을 구성하고 있는 Fe, Cr 등의 성분과 반응하거나, 또 다른 반응생성물인 Na₂O가 누출경로(path)를 plugging시켜 sealing시키는 현상을 일으키게 된다. 특히, 반응생성물에 의해 누출경로가 막히는 경우를 self-plugging현상으로 부르고 있는데, 이는 반응기내 소듐의 온도에 의한 thermal fluctuation이나 시편 재질의 조성 및 누출부위의 조건에 따라 다시 누출을 허용하는 re-open 현상을 일으켜 누출부위를 확대하는 경우로 발전하기도 한다[14].

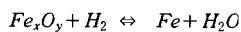
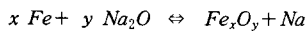
따라서, 본 연구에서는 미량누출시 누출경로가 self-plugging되거나 re-open되는 메카니즘은 다음과 같이 예상하고 있다.

· 반응생성물에 의해 plugging되었던 누출부위가 어떤 열적인 transient에 의해 tube가 팽창하게 되면 plugging역할을 하던 반응생성물 주위로 물의 누출을 다시 허용하게 되고, 아주 느린 속도지만 소듐/물 반응에 의해 생성된 anhydrous caustic soda(NaOH)이 metal을 공격하게 되어 빠른 부식현상을 야기시킴으로써 누출을 확대할 수 있고,

· tube 재질을 구성하고 있는 철(Fe)과 고온의 NaOH가 반응하여



와 같은 반응에 의해 1차 생성물을 형성하고, 반응생성물인 Na₂O는 다시 Fe와 반응하여



와 같은 2차 반응으로 연결되어, 최종적으로

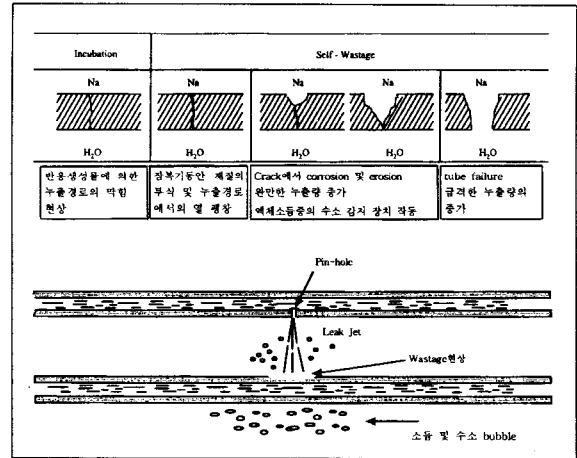
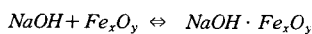


Fig. 1. Self-plugging and re-open mechanism of the leak path.

와 같은 복잡한 반응 메카니즘에 의해서, 소듐산화물과 철화합물이 혼합된 침전물이 생성되고 이것이 누출부위를 plugging시키는 것으로 해석할 수 있겠다.

Self-plugging(or re-open)현상은 tube를 구성하고 있는 튜브 재질의 조성에 의해 달라질 것으로 예상되는데, 일반적으로 tube 재질의 여러 조성중 Cr의 함량이 증가할 수록 wastage에 견디는 저항성은 증가하는 것으로 알려져 있으나[15], 기타 다른 조성에 대한 영향은 잘 알려져 있지 않다.

3. 장치제작 및 실험

3.1. 장치제작

용량 약 2L의 반응장치를 Fig. 2와 같이 제작하였으며 반응장치의 제원은 Table 1에 간단히 나타내었다. 물 누출을 위한 injector, 소듐/물 반응을 위한 반응기, 소듐 저장조와 control panel로 구성되어 있으며 반응생성물인 수소가스의 배출을 위해 vent system을 상부에 설치하였다.

이때 반응조를 비롯한 모든 배관에 대해 기밀 테스트를 실시하여 소듐/물 반응으로 생성되는 수소가스에 의한 폭발을 방지해야 한다. 한편, 물(스팀)의 누출을 위해 국내에서 생산되는 ferrite steel 중에서 5Cr-1 Mo steel을 이용하여 시편을 제작하였으며, 시편물질의 조성은 Table 2와 같다. 시편의 제조는 $\phi 30 \times 5$ mm의 원관에 0.1 mm의 구경을 갖도록 Arc 방전에 의해 hole을 낸 후 press를 이용하여 약 8 ton/cm²의 압력으로 아주 서서히 압착하여 hole이 압착되어 crack으로 작용하도록 가공하여 누출을 위한 시편으로 사용하였다.

3.2. 실험방법 및 분석

소듐은 상온에서 고체상태(대부분 brick 상태로 보관)이기 때문

Table 1. Experimental Conditions for the Water Leak Test Apparatus

Reactor volume	8 L	Steam temperature	300 °C
Sodium inventory	3 L	Steam pressure	1500 psi 이상
Sodium temperature	400 °C	Injection weight (H ₂ O)	< 0.5 g/sec
Material	Stainless steel	Atmosphere	Ar

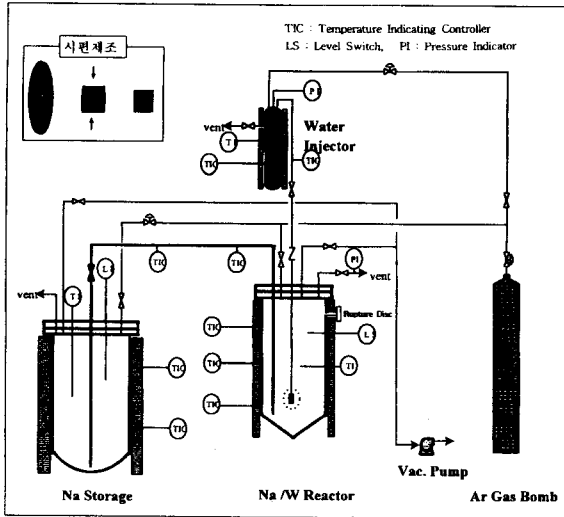


Fig. 2. Experimental apparatus for micro-leak test.

Table 2. Chemical Compositions of Leak Test Cell (5Cr-1 Mo steel)

Chemical elements	Compositions (%)	Chemical elements	Compositions (%)
C (Carbon)	0.32 - 0.42	S (Sulfur)	< 0.03
Si (Silicon)	0.18 - 1.20	Cr(Chromium)	4.50 - 5.50
Mn(Manganese)	< 0.5	Mo(Molybdenum)	1.00 - 1.50
P (Phosphorous)	< 0.03	V (Vanadium)	0.80 - 1.20

에 이를 상기 Fig. 2의 소듐 저장조로 이송한 후 외부가열로 저장조 내의 소듐을 가열하여 용융시킨다. 저장조에 설치된 외부가열기는 2단으로 구성되어 먼저 상부의 가열기를 작동하여 저장조의 고체소듐을 용융한 다음 하부의 가열기를 작동하여 전체 소듐이 용융되도록 하였으며, 고체소듐이 melting되는 경우 약 2.7%의 부피 증가가 있기 때문에[16], 상단 부위부터 가열이 진행되어야 하며, 만약 하단부터 가열하면 용기의 폭발을 가져 올 수 있기 때문에 각별한 주의가 요구된다.

소듐 저장조의 가열이 이루어 지는 동안 소듐 이송라인과 반응기 안의 온도를 원하는 온도로 가열한 후, Ar 가스를 이용하여 저장조를 가압함으로써 소듐이 저장조로부터 반응조로 이송되며, injector에서는 증류수를 가열하여 수증기를 고압 상태로 만든 후, 상기에서 제작한 시편을 통해 injection시킴으로써 누출실험이 진행된다. 수증기의 injection이 진행되는 동안 반응기 안에서는 누출되는 수증기와 소듐이 반응하여 반응열과 수소가스를 방출하고, 압력의 상승을 가져오게 되는데 이는 별도의 압력 방출 시스템을 이용하여 배출한다. 원하는 양만큼의 수증기가 injection되면 누출발브를 잠그고 반응기내의 압력을 방출한 후 상기의 역순으로 소듐을 저장조로 이송하고 누출시편을 반응기로부터 꺼낸 후, 온도를 서서히 낮추어 실험을 종료한다. 실험조건에 사용된 재질의 화학성분을 Table 2에 간단히 나타내었다.

분석을 위해 상기에서 인출된 시편을 Ar가스로 충전된 bottle에 넣어 보관하며, 광학현미경과 SEM을 이용하여 시편 누출부위에서의 반응생성물과 누출 부위를 관찰하였으며, 실제 시편 재질의 부식상태를 파악하기 위해 AES(Auger Electron Spectroscopy, Fison사, ESCALAB 220i, 영국)를 이용하여 원소분석을 수행하였다.



Fig. 3. Halos phenomena in the specimen. (Microscope 30X).

4. 결과 및 고찰

4.1. 누출부위의 특성

누출시편을 통해 물(수증기)이 고온의 소듐 부위로 누출되면 물과 소듐의 접촉부위에서 소듐/물의 발열반응에 의해 온도가 상승하게 되며, 미량의 물이 누출되는 경우 반응생성물이나 부식 혹은 erosion현상 등에 의해 누출경로를 막는 현상과 함께 반응열에 의한 시편의 누출경로를 중심으로 주변에 halos(고온의 반응열에 의해 누출경로 주변이 열화되는 현상)를 형성하게 된다. Fig. 3은 상기 injector에 증류수 25 ml를 넣은 후 가열하여 수증기를 생성시킨 후 시편을 통해 소듐 부위로 약 1500 psi의 압력으로 누출시킨 다음 시편을 인출하여 표면을 관찰한 사진으로, 누출부위 주변에 비교적 큰 halos가 생성된 것을 육안으로 관찰할 수 있다. 이는 고온, 고압의 물(수증기)이 누출경로를 따라 미세하지만 누출이 계속 진행되었다는 것을 확인시켜 주는 것으로, Green등[17]에 의해 아주 간략히 언급되었던 실험결과와 유사한 것으로 예측되지만, halos의 반경에 대한 크기는 언급되지 않아 비교할 수 없었다.

한편, 누출시편의 내부(물 또는 수증기 부분)와 외부(소듐 부분)의 표면을 좀 더 자세히 관찰해 보면 Fig. 4와 같이 나타난다. Fig. 4의 (A)는 광학현미경을 사용하여 시편의 외부를 약 35배로 확대시킨 그림으로, 누출부위 주변에 소듐/물 반응생성물인 소듐산화물로 예측되는 입자들이 붙어 있는 것을 관찰할 수 있으며, 누출부위의 부식현상을 육안으로는 판단할 수 없었다. 따라서 동일한 시편을 SEM을 사용하여 200배로 확대하여 누출부위 주변을 관찰하여 Fig. 4의 (B)에 나타내었다. 누출시편의 외부(소듐쪽 부위)로 이곳 역시 반응생성물들이 누출 경로를 따라 생성되어 있는 것을 확실히 관찰할 수 있으며, 이는 상기 Green등이 주장한 견해에 비추어 보면 누출부위가 self-plugging되어 있다가 re-open되기 직전에 미량의 물이 흘러나와 소듐-물 반응이 일어난 후 반응생성물들인 Na₂O나 NaOH 혹은 Na₂CO₃등이 형성되어 있는 것으로 해석할 수 있다.

여기서 누출경로가 re-open되었을 경우 소듐-물 반응에 의해 생성되는 수소가스에 의해 반응기 내의 압력이 상승되어야 함에도 불구하고 본 실험에서는 압력의 상승은 관찰할 수 없었으며, 이로부터 이 시편에서 누출경로가 아직 re-open되지 못했음을 추측할 수 있다.

4.2. 재질의 조성변화

누출부위에서의 재료부식 특성을 확인하기 위하여 시편의 표면을 AES로 분석하여 Fig. 5에 간단히 나타내었다. 이는 상기 Fig. 4

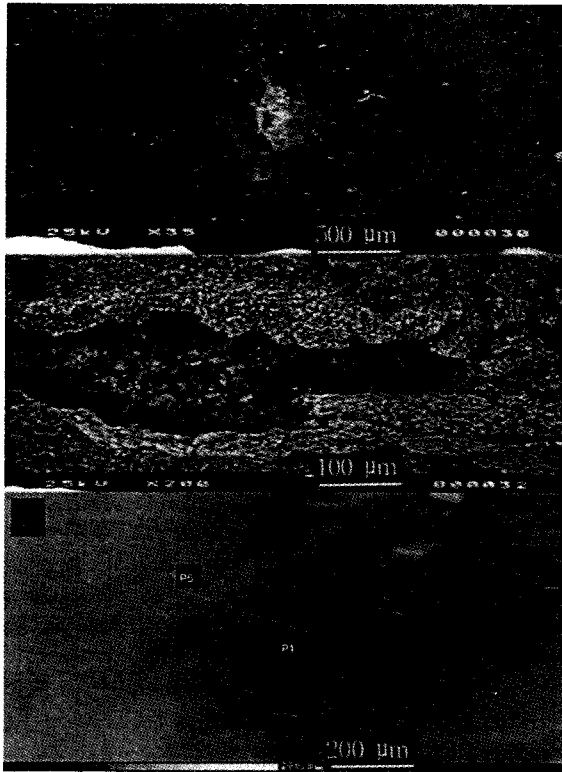


Fig. 4. Microscope(35X) and SEM photographs(200X) at leak spot.

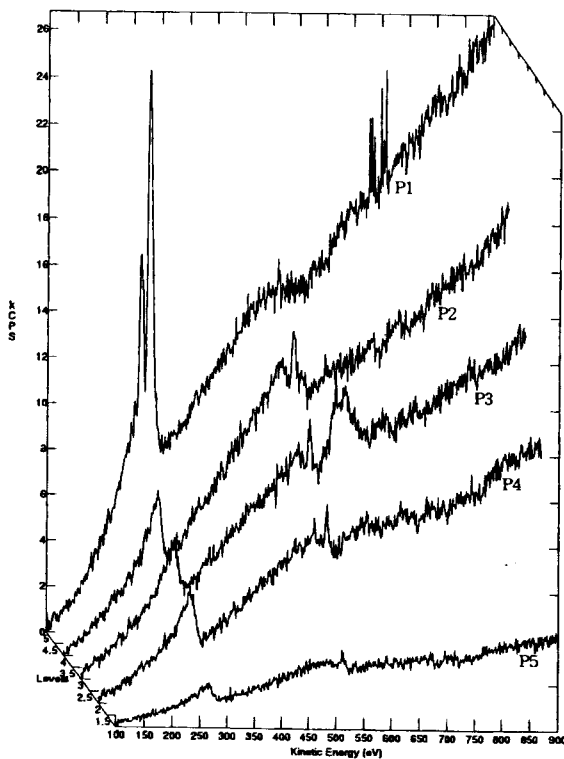


Fig. 5. Auger analysis curves of the leak specimen.

의 (C)에서 보는 것처럼 누출부위에서 바깥방향으로 길이를 5 등

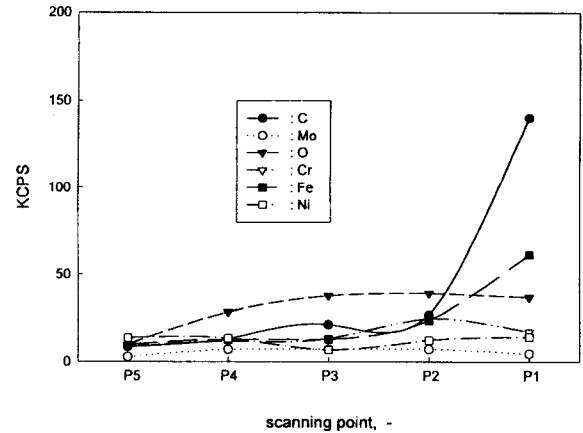


Fig. 6. Composition changes for a leak specimen.

분하여 각 point마다 AES를 이용하여 분석한 것으로 원점을 중심으로 P1, P2, ..., P5로 구분하였다.

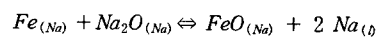
4.2.1. 탄소 및 산소성분 변화

시편의 AES분석 그림인 Fig. 6에서 보면, 누출부위를 중심으로 P1~P5에서의 C의 peak가 상당히 높게 나타난 것을 알 수 있는데 이는 다음과 같이 해석할 수 있다. 먼저, 누출부위를 확대한 사진에서 보면 미세한 hole에 있던 소듐이 시료의 전처리 과정에서 공기중의 CO₂와 반응하여 Na₂CO₃가 생성되었기 때문에 해석할 수 있는데, 이는 상기 Fig. 4 (B)의 누출부위 확대 사진을 보면 소듐-물 반응생성물이 deposit된 것으로부터 추측할 수 있다. 또 다른 가능성으로는 시편의 누출경로에서 미세하나마 수증기가 배출되어 소듐-물 반응이 발생하고, 이때 발생된 반응열에 의해 시편중의 C가 탄화되어 누출부위 주변으로 segregation된 경우를 예상할 수 있다. 이는 시편의 반응부위에서 ferrite steel 조성중의 C성분의 변화량이 중앙으로부터 P2, P3, P4, P5로 멀어질수록 상기 Fig. 5의 C peak가 점점 줄어드는 경향으로부터 추측이 가능한데 전자의 경우가 높은 가능성이 있을 것으로 예측된다.

한편, Fig. 5의 500eV에서 관찰되는 O의 함량 변화는 P5에서 가장 낮은 값을 보이고 있으며, 중앙으로 갈수록 약간 높은 농도로 유사한 조성변화를 나타내고 있다. 이는 액체 소듐중에 불순물로 용해되어 있던 O가 시편 표면에서 각종 element들과 반응하여 금속산화물을 형성하면서 segregation되어 O의 농도가 상승된 것으로 추정되지만 현재로서는 분석상의 어려움으로 판단이 곤란하다.

4.2.2. 철 성분 변화

상기 Fig. 6에서 Fe의 경우를 보면 P3~P5에서 보다 상대적으로 P1, P2에서 Fe의 조성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 누출경로에서 수증기의 누출이 진행되면 소듐/물 반응에 의한 반응열로 인해 P1과 P2 부위에서의 온도가 가장 높을 것으로 예상되며, 이 경우 소듐/물 반응에 의해 생성되었던 부식성이 강한 NaOH나 Na₂O가 시편의 Fe와 반응하여 상기 2의 이론적 고찰에서 언급한 반응 메카니즘에 의해 철의 산화물이 생성되면서 segregation된 것으로 추정된다. 실제 시편의 누출부위에서의 온도는 소듐/물 반응으로 인해 상당히 높을 것으로 예측되지만, 누출량이 미량이고 반응용기 내의 액체 소듐의 온도가 약 400°C 정도이기 때문에, 이 온도에서 생성되는 소듐산화물은 주로 Na₂O가 주된 성분일 것으로 예상되며 이 경우 Fe-O-Na계에서 나타나는 반응은



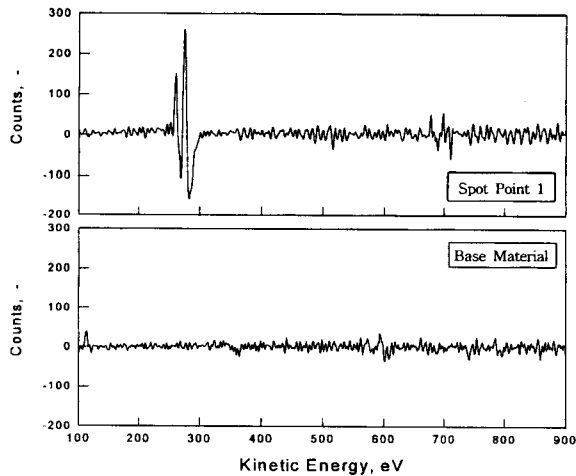
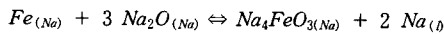


Fig. 7. Differential treating lines for the base material and specimen.



와 같기 때문에, 시편에서 생성된 철 산화물은 FeO 와 Na_4FeO_3 가 될 것으로 예측된다.

4.2.3. 기 타

한편, 제조된 시편을 물 누출을 위해 액체 소듐에 인입하기 전과, 물 누출 실험 후 각 point마다 AES분석을 수행하였으며, 대표적으로 P1에서 조성변화를 분석한 결과와 실험전의 시편에서의 AES spectrum을 얻은 후 이를 data 처리하여 Fig. 7에 간단히 나타내었다. Fig. 7은 base material과 누출시편 P1의 경우에 각 element들의 조성변화를 간단히 보여주고 있는데, 300 eV부근에 나타난 C peak의 경우 상당히 큰 변화를 나타내고 있으며, 510 eV 부근에서의 O와 Cr peak값도 역시 미량이지만 상대적으로 약간의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 P2에서 나타났으며, P3나 P4의 경우에는 변화값이 적었고 P5에서는 C peak 이외에는 관찰할 수 없었다.

또한 Fig. 7로부터 680~700 eV부근의 Fe peak가 높은 것으로 보아 시편의 누출부위에서 이미 위에서 언급한 것 처럼 재질의 부식이 진행되고 있음을 간접적으로 추측할 수 있으며, 그외에 700 eV부근의 Co peak나 미세하지만 800 eV부근의 Ni peak 값들로부터도 부식이 진행되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

액체급속로의 냉각재로 사용되는 소듐분위기에 시편을 통해 물을 누출시키는 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소듐과 물과의 반응은 급격한 발열반응으로 다량의 수소가스를 방출하여 폭발하기 때문에 소듐취급, 특히 소듐-물 반응에 대한 사전 안전장치의 확보가 시급하다.
- 2) 시편을 통하여 물 누출시 누출경로의 self-plugging과 re-open에 대한 mechanism으로 반응생성물에 의한 plugging과 열적인 transient에 의한 re-open을 가정하였으며, 본 연구에서는 반응생성물의 생성 및 부식현상에 대한 특성은 해석할 수 있었으나, re-open현상은 확인할 수 없었다.
- 3) 부식현상 해석을 위해 시편의 조성 변화를 분석한 결과 C 및 O와 Cr, Fe가 상대적으로 많은 변화를 나타내었으며, 이는 Cr과

O가 반응하여 CrO_2 를, Fe와 O가 반응하여 Fe_3O_4 (FeO 나 Na_4FeO_3)와 같은 화합물이 생성하면서 segregation되는 것으로 해석된다.

참 고 문 헌

1. R. D. Smith, "Fast reactor progress-Slow but Sure", *Progress in Nuclear Energy*, 20, 71-88(1987).
2. J. K. Butler and O. Hayden, "Liquid metal fast breeder reactor steam generator design and experience in the U. K.", *Nucl. Energy*, 25, 335-360(1986).
3. J. H. Crowley, G. H. Pavlenko, "Main directions for decreasing the capital costs of LMFBRs", Symp. Fast Breeder Reactors: Experience and Trends, Lyons, 22-26 July(1985).
4. O. T. Foust, "Sodium-NaK Engineering Handbook : Sodium chemistry and physical properties", NewYork (1972).
5. J. P. Maupre and K. B. McCrindle, "A Model of the propagation of water leaks into sodium in steam generator", Proceeding of the specialists' meeting on SG failure and failure propagation experience, IWGFR-78, Held in Aix-En-Provence, France(1990).
6. P. S. Chopra, C. C. Stone, et al., "Fail-safety of the EBR-II steam generator systems", Int. Conf. on Liquid Metal Tech. in Energy Production, Seven Springs(1976).
7. D. D. Williams, "A study of the sodium-hydrogen-oxygen systems", NRL Memo report-33(1952).
8. H. V. Chamberlain et al., "Studies of material wastage resulting from reactions of water in sodium", APDA-254 (1970).
9. D. A. Greene, "Sodium/water wastage and reaction program", IAEA study group meeting on steam generator for LMFBRs, Summary report IWGFR-1, Bensberg(1974).
10. P. Roy, D. N. Rodgers, "Characterization of a diffusion tube hydrogen detector in dynamic sodium system", *Nucl. Tech.*, 12, 388(1971).
11. M. Hori et al., "Analytical treatment of large leak pressure behavior in LMFBR steam generators", PNC report-N041 (1980).
12. K. Dumm, H. Mausbeck, "Studies on the safety engineering design of the steam generators of the SNR-300", *Kerntechnik*, 16, 121(1974).
13. D. A. Greene, "Small leak damage and protection systems in steam generator", Int. Conf. Liquid Metal Technology I, Energy Production, Seven Springs(1976).
14. H. V. Chamberlain, J. A. Cameron et al., "Studies of material wastage resulting from reaction of water in sodium", APDA-254(1968).
15. D. W. Sandusky, "Behavior of small leaks in LMFBR steam generators", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 19, (1974).
16. P. W. Bridgman, "The physics of high pressure", G. Bell & Sons Ltd., London (1931).
17. D. A. Greene, "Sodium-water reaction phenomena associated with small leaks in LMFBR steam generator", Proc. of 3'rd Int. Conf., Oxford(1984).