

나트륨-물 반응에 의한 5Cr-1Mo Steel 시편의 부식특성

정 경 채[†] · 정 지 영 · 박 진 호 · 황 성 태 · 김 의 식*

한국원자력연구소 KALIMER 검증시험 Lab., *충북대학교 화학공학과
(1998년 6월 16일 접수, 1998년 9월 9일 채택)

Corrosion Characteristics of a 5Cr-1Mo Steel Specimen by Sodium-Water Reaction

Kyung-Chai Jeong[†], Ji-Yeong Jeong, Jin-Ho Park, Sung-Tai Hwang, and Eui-Sik Kim*

Korea Atomic Energy Research Institute, KALIMER Verification Test Lab., Taejon 305-353, Korea

*Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, Cheong Ju 360-763, Korea

(Received June 16, 1998; accepted September 9, 1998)

요 약: 5Cr-1Mo steel을 이용하여 나트륨 분위기에서 미량 물 누출 실험을 수행하였다. 시편에서 미량 물 누출로 인한 누출경로의 완전 re-open time 은 129분으로 나타났고, 그 크기는 직경 2 mm를 나타냈다. 누출경로는 re-open되기 전에 누출부위를 중심으로 halos현상을 형성하였으며, halos의 크기와 실제 re-open 크기와는 다르게 나타났다. 나트륨-물 반응으로 인한 재료의 부식은 나트륨부위로부터 시작되었으며, steam 부위에서는 부식이 발생하지 않았다. 시편 누출부위를 AES로 분석한 결과 Cr의 segregation이 가장 많이 나타났으며, SEM과 EPMA 관찰로부터 나트륨화합물들이 누출부위 주변에 대량 침적되어 있는 것이 관찰되어 나트륨·철·크롬혼합물 형태로 부식생성물들이 혼재되어 있는 것으로 예측되었다.

Abstract: Small water leak experiment was carried out for the 5Cr-1Mo steel specimen in sodium atmosphere. Perfect re-open time for the leak path of a specimen, by micro leak, was 129 minutes, and its size observed about 2 mm diameter at sodium side. The halos phenomena appeared around of leak spot before the leak path has re-opened, and the size of halos observed was different from the real re-open size of a specimen. Also, the corrosion of a specimen initiated from sodium side, but it did not occur at steam side. In AES analysis, the segregation phenomena of Cr in the specimen was found much more than those of other elements. And also, the sodium compounds formed by sodium-water reaction and deposited onto the leak site of specimen were observed by EPMA analysis and SEM photograph. It is postulated that the corrosion products could be precipitated to form mixed Na·Fe·Cr compounds.

Key words: Sodium-water Reaction, Corrosion, Wastage

1. 서 론

액체나트륨은 우수한 열 전도도와 높은 비열, 고온에서 갖고 있는 낮은 점도, 넓은 온도 범위에서 액체상태를 유지하는 특성, 또한 고온에서 구조물과의 좋은 양립성 등과 같은 많은 장점으로 인해 고속증식로에서 냉각재로 많이 사용된다[1,2]. 반면에 원자로내 열 전달 매체인 물(증기)과는 급격히 화학 반응하여 많은 반응열과 부식생성물 및 시스템의 압력을 상승시키는 대량의 수소가스를 발생시키는 단점이 있다[3,4]. 일반적으로 액체나트륨을 냉각재로 사용하는 고속증식로도 다른 로형의 원자로와 유사하게 증기발생기를 포함하는 1, 2차 계통으로 구분되어 있으며, 특히 증기발생기와 중간 열 교환기에서는 고압의 물이 상대적으로 저압으로 유지되어 있는 액체나트륨과 전열관을 사이에 두고 열 교환이 이루어지고 있다.

만약 이곳에서 전열관 재료의 결함이나, pin-hole, breach, 용접 불량 등에 의해 약 150 kg/cm² 정도의 고압인 물(수증기)이 상대적으로 1 kg/cm² 정도의 저압으로 유지되어 있는 액체나트륨 속으로 누출이 발생되면, 전열관의 누출부위는 나트륨-물의 급격한

화학반응으로 많은 반응열과 부식생성물에 의해 신속하게 부식이 증대되어, 소위 "wastage"라는 현상을 발생시켜[5,6] 누출량의 급격한 증가를 보이게 된다. 이러한 누출부위의 손상에 따른 누출량 증가는 전열관에서 발생된 초기 누출량에 의해 많이 달라지는데, 누출량의 크기에 따라 소규모 누출과 대규모 누출로 구분하고 있다.

소규모 누출의 경우 다시 초기 누출량의 크기에 따라 micro-leak(0.5 g-H₂O/sec 이하), small leak (0.5~10 g-H₂O/sec), intermediate leak (10 g~2 kg-H₂O/sec)로 구분하고 있으며, 각 누출 범위에서 나타나는 특성은 Table 1과 같다. 이와 관련하여 고속증식로 개발에 대한 경험이 풍부한 선진 각국에서 수행되었던 물 누출 관련 연구는 micro 및 small 누출에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 이를 좀 더 자세히 구분해 보면, micro 누출의 경우 나트륨-물 반응에 의해서 발생하는 재료의 손상(특히, 전열관 자체가 손상되는 "self-wastage" 현상)과 부식이 확대되는 메카니즘의 해석이 대부분이고[7], small 누출에서는 물 누출에 의해 발생하는 target tube에서의 wastage 특성해석 및 wastage 방정식[8]을 실험적으로 구하는 것이 주종을 이루고 있다.

한편, intermediate 누출의 경우는 나트륨-물 반응의 위험성으로 인해 세계적으로 영국과 일본 등에서 몇 번의 실험만이 수행되었으며, 주로 누출부위 주변에서 발생하는 반응열에 의한 overheating 현상[9]이 연구되었다.

[†] 주 저자 (e-mail: kcjeong@nanum.kaeri.re.kr)

Table 1. Leak Sizes and Their Effect

Classification	Water leak rate		Major effects
	Monju(Japan)	PFR(U.K.)	
micro leak	~ 50 mg/sec	< 0.1 g/sec	self-wastage
small leak	50 mg~10 g/sec	0.1 g~10 g/sec	single target wastage
intermediate leak	10 g~2 kg/sec	10 g~1 kg/sec	multi-target wastage, overheating
large leak	2 kg/sec~		pressure increase

대규모 누출의 경우 나트륨-물 반응으로 발생하는 수소가스에 의한 압력전과 현상 및 이를 해석하기 위한 컴퓨터 코드의 개발이 대부분이며[10,11], 원자로의 안전성을 확보하기 위해 물 누출을 조기에 감지할 수 있는 물 누출검출기의 개발[12,13]과 더불어 물 누출에 의한 계통내의 안전성 평가기술도 동시에 개발되어, 여기서 개발된 검출기나 안전성 평가 결과가 증기발생기 설계에 즉각적으로 반영되고 있으나, 우리나라의 경우는 고속증식로 개발 초기단계이기 때문에 이와 관련된 연구는 거의 전무하다.

한편, 물 누출과 관련된 안전성 평가기술의 개발은 micro누출을 포함하여 소규모 누출인 경우, 증기발생기의 종합 안전성 평가에 필요한 설계기준 물 누출율 (DBL, Design Base Leak Rate)을 결정하는 것을 주목적으로 하고, 대규모 누출의 경우는 물 누출로 인한 시스템 내의 압력 및 온도특성 평가와 후속 설비를 개발하는 것이 주목적으로 연구되고 있다.

일반적으로, 소규모 누출과 관련하여 상기에서 언급한 DBL을 결정하기 위해서는 각 증기발생기의 특징에 맞는 DBL결정 코드를 개발하여 사용하게 되는데, 코드에서 요구하는 입력 값으로 micro 누출 단계부터 중규모 누출 단계까지, 초기누출의 크기(initial leak size)나 초기 누출량의 값과 self-wastage, small wastage 방정식 및 overheating에 의해 파손되는 전열관의 개수 등이 요구된다. 그러나 이러한 초기 값들은 각국에서 개발하고 있거나 이미 개발된 증기발생기의 모양이나 운전조건이 일정하지 않기 때문에 각각에 맞는 자료 값들을 필요로 한다.

본 연구에서는 고속증식로 증기발생기의 안전성 평가기술 개발과 관련한 기본적인 연구로 소규모 누출 분야 중 micro-leak 누출과 관련하여 상기에서 언급한 입력 값을 얻기 위해, 먼저 소규모 물 누출 실험장치를 설계, 제작하였으며, ferrite steel을 사용하여 누출 시편을 제작, 액체나트륨 분위기에서 물 누출 실험을 수행하여, 재질의 부식현상과 누출부위의 re-opening size를 파악하여, DBL 결정을 위한 입력 값으로 사용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

액체 나트륨은 물과의 화학반응으로 폭발적인 발열 및 대량의 수소가스를 방출하기 때문에 실험장치의 제작시 안전성 확보와 누출실험에 상당한 주의가 요구된다. 실험장치도 이러한 안전성이 고려된 부대설비(일정한 압력 상승시 자동적으로 safety valve가 과열되어 반응기를 보호하거나, 나트륨의 응고를 막을 수 있는 보온장치 등)의 설치가 필요하기 때문에, 소규모 실험장치의 제작에도 많은 비용과 어려움이 따른다.

본 연구에서 사용된 시편의 조성, 실험장치와 재원에 대해서는 기 발표된 자료를 활용하였으며[14], 다만 물 누출 시편 제작시 arc방전으로 누출 hole을 만든 후, 시편의 crack을 제작하기 위하여 누출 hole의 pressing 압력을 약 8 ton/cm²로 변경하여 시편에

서 물의 누출량이 증가되도록 하였다.

2.2. 실험방법 및 분석

먼저 상기 2.1에서 설명한 실험장치에서 누출시편을 반응조에 먼저 장착한 후, 나트륨 저장조에 있는 고체 나트륨을 외부 가열하여 액체 나트륨으로 용융시킨다. 고체 나트륨의 용융이 완료되면 중간 의 이송 밸브를 열고 나트륨 저장조를 Ar가스로 가압하여 액체나트륨을 나트륨-물 반응기로 이송한 후 중간 밸브를 잠근다. 반응기 내부의 액체나트륨 온도를 500 °C까지 가열한다. 한편, 반응기 상부에 위치한 injector에 누출시킬 물(증류수)를 투입한 후, 외부 가열하여 고온/고압의 수증기를 제조한 다음 원하는 온도로 유지하여 누출 준비를 완료한다.

누출의 개시는 injector와 누출시편 중간에 위치한 밸브를 열면 누출이 진행되며, 이때 누출로 인한 반응기 내부의 온도와 압력 및 injector에 부착된 압력계의 값들을 기록하여 누출의 진행정도를 예측한다.

누출실험이 완료되면 상기에서 설명한 역순으로 실험을 종료한 후 시편을 인출하여 시료 보관함에 보관한 후 분석을 수행한다. 액체 나트륨 중에 있는 물 누출로 인해 생성된 반응생성물의 분석은 아직까지 국내에서는 분석이 불가능하며, 외국의 경우도 분석 결과를 발표한 나라는 극히 일부분으로 정확한 절차는 밝혀지지 않고 있다. 다만, 누출 시편의 분석으로 누출경로 주변에서의 부식 반응특성과 주사현미경(SEM)이나 원소분석기와 같은 분석장비를 이용하여 시편의 분석을 통해 누출현상을 해석하고 있다.

본 연구에서는 상기에서 인출된 누출시편을 SEM(JEOL-840A 일본), EPMA(Electron Probe Micro Analyze, JEOL-JAX 8600, 일본)와 AES(ESCALAB 200i, 영국)를 통해 누출부위 주변의 부식 모양과 크기 및 원소분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 누출 특성

극 미량의 물이 누출 시편에서 누출경로를 통해 누출되면, 누출 경로에서는 나트륨-물 반응에 의해 생성되는 반응생성물 중 나트륨산화물(Na₂O, NaOH, Na₂O₂)과 시편을 구성하는 조성 성분 중 Fe이 나트륨-물 반응생성물중 부식성이 강한 NaOH와 반응하여 Na₂O·Fe_xO_y나 NaOH·Fe_xO_y 형태의 산화물로 형성되어, 이 고체 화합물들이 누출경로를 sealing시키는데 이를 "self-plugging"이라고 한다[15]. 이러한 현상은 물이 누출되는 조건과 액체나트륨의 환경에 따라 sealing되었던 고체화합물들이 재 용해되어 누출경로가 re-open되는 현상으로 발전하기도 하지만, 극 미량 누출인 경우 누출경로가 self-plugging된 채로 유지되어 물 누출을 감지하지 못하는 경우가 대부분인 것으로 알려져 있다[16].

이처럼 누출경로가 self-plugging되는 현상은 초기 누출량이 0.1 g-H₂O/sec 미만인 경우인 것으로 알려져 있지만[16], 누출부위 주변에 어떤 환경적인 변화가 일어나면(즉, 누출경로를 sealing시키고 있던 침적물 주변으로 어떤 열적인 transient가 발생되거나 시편의 vibration 등이 발생할 경우), 고체 침적물의 용해와 재생성 등이 반복적으로 발생하게 되어, 누출경로가 re-open하게 되는데, 이 시간을 측정해 보면 Figure 1과 같이 나타난다.

Figure 1은 외국에서 발표된 미량 물 누출 실험결과들을 유사 실험조건인 자료들만 선택해서 본 연구에서 초기 누출량과 누출시간과의 상관관계로 도시화한 것으로, 본 연구에서 얻어진 실험결과를 함께 나타낸 것이다. 외국의 실험 데이터들도 대부분 많이 scattering되어 있는 것을 알 수 있는데, 이는 물 누출 실험시 각국에서 사용된 누출시편의 조성이나 실험 조건 등이 유사하다고는

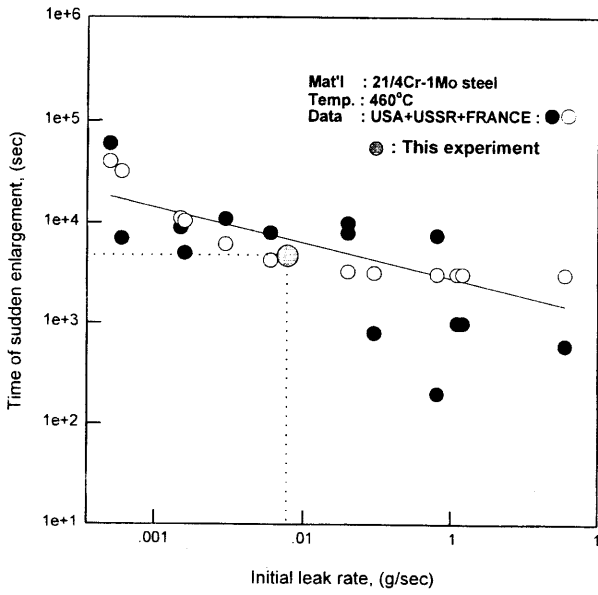


Figure 1. Correlation of initial leak rate and re-opening time.

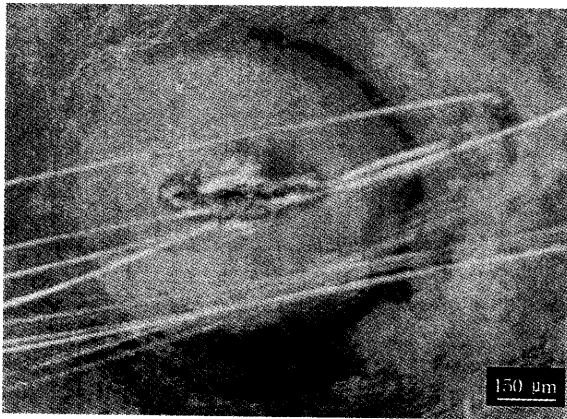


Figure 2. Halos phenomena in the specimen (Microscope 40 ×).

하지만 실험장치의 규모나 실험방법, 특히 시편의 제조방법 등이 서로 상이하기 때문으로 보인다.

따라서 본 연구에서 얻어진 실험 결과도 이러한 영향을 고려해 보면 외국의 실험결과와 유사할 것으로 예측되어, 어느 정도 타당성은 갖춘 것으로 예측되었으며, 실제 본 연구에서 re-open에 걸리는 시간이 129분으로 관측되었다. 이러한 자료들은 상기에서 설명한 누출부위의 부식 특성을 해석하는데 유용하게 사용될 것으로 예측된다.

한편, 누출 부위가 re-open되기 전에는 Figure 2에서 볼 수 있는 것처럼 시편 자체의 누출부위 주변이 열적인 defect를 입어 halos (시편의 표면이 heat나 부식 등과 같은 defect에 의해 크게 무늬형태를 나타내는 현상)를 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. Figure 2는 본 연구에서 누출실험을 수행하는 동안 누출경로가 re-open되지 못한 시편을 인출하여 광학현미경으로 시편의 누출부위 주변을 관찰한 것으로, 이 그림으로부터 예상할 수 있는 것은 누출이 더욱 오랜 시간 진전되어 만약 누출경로가 re-open되면, steam 부위가 아주 고압이고 나트륨부위는 상압으로 유지되어 있기 때문에, halos를 형성하고 있는 부위가 re-open될 수 있는 가능성이 크고,

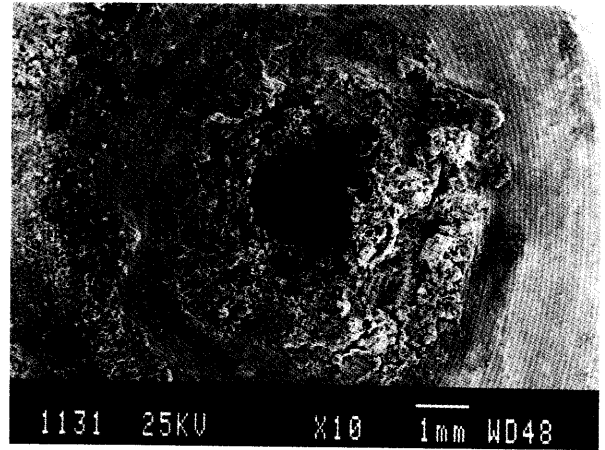


Figure 3. SEM photograph of a specimen perfectly re-opened at sodium side.

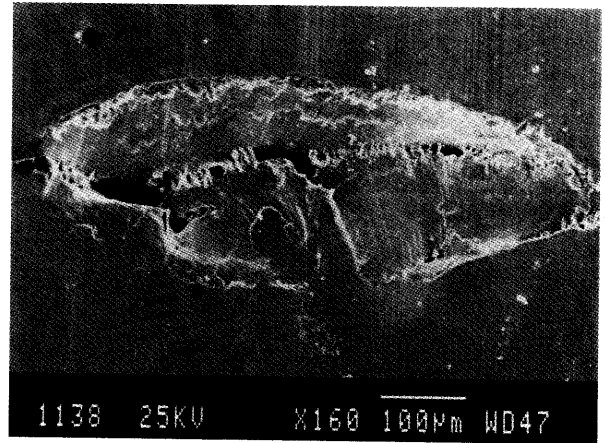


Figure 4. SEM photograph on the middle part after cutting of a specimen.

이 경우 초기 누출량은 상당히 큰 값을 나타낼 가능성이 있을 것으로 예상하였다.

3.2. 누출 size

상기 3.1에서 나타난 누출특성을 확인하기 위해 또 다른 시편을 이용해서 누출 실험을 수행하였다. 시편의 제조시 pressing 압력이 변경된 것을 제외하고 동일한 실험 조건에서 누출 실험이 진행되었다. Figure 3에 5 g의 물을 가열하여 포화 수증기를 만든 다음 600 psig의 누출 압력으로 약 130분간 누출시킨 후 인출된 시편의 나트륨 side쪽을 SEM으로 관찰하여 나타내었다. 그림을 보면 3.1에서 설명한 누출 point를 중심으로 직경 2 mm 정도로 self-plugging되었던 누출경로가 re-open되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 3.1에서 설명한 halos size가 약 4 mm를 나타내고 있는 것과 비교해 보면 크게 줄어든 것으로, self-plugging되었던 누출경로가 re-open되면서 expanding되는 크기는 halos의 크기와 큰 관계는 없는 것으로 해석된다.

한편, 누출시편을 diamond saw로 cutting하여 steam부위에서의 누출경로를 SEM으로 관찰하여 Figure 4에 간단히 나타내었다. 누출시편의 두께는 약 3 mm로서 최대한 steam 부위에 근접하여 cutting한 경우로, steam 부위에서는 부식이 진행된 것을 발견할

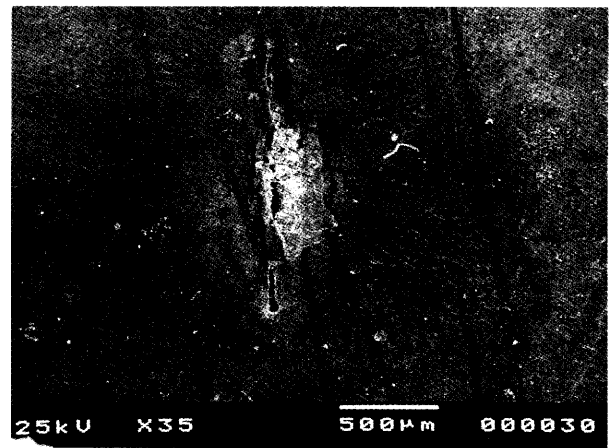
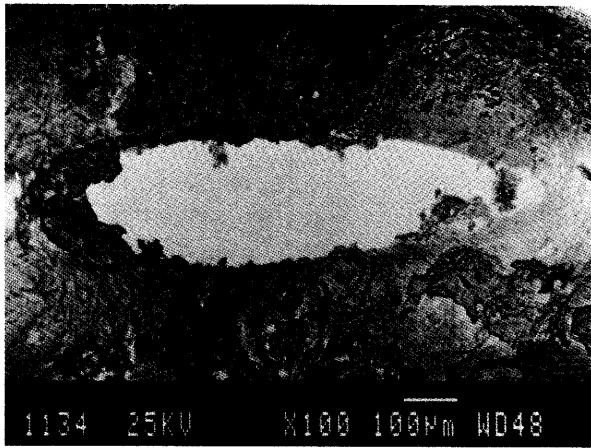


Figure 5. SEM photograph at inside of the leak site.

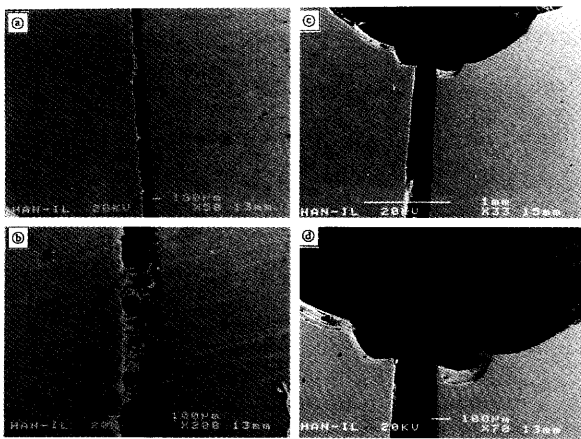


Figure 6. SEM photographs for the leak path after cutting of a specimen.

수 없었다. 이것으로부터 실제 증기발생기의 전열관에서 crack이나 미세 pin-hole 등에서 미량의 물이 누출되는 경우, 전열관 재질의 부식은 나트륨부위에서 시작됨을 예측할 수 있다.

또, 상기 그림 Figure 3을 자세히 관찰해 보면 시편 표면보다 그 내부에는 표면에서 보다 더 작은 누출 hole을 발견할 수 있는데, 이를 자세히 관찰하기 위해 SEM의 inverted image 기법으로 누출 부위를 촬영하여 Figure 5에 간단히 나타내었다. 중앙의 흰 부분으로 나타난 것이 누출시편의 중간 부위(두께로)에서 실제 누출이 진행된 누출 hole로 예측된다. 이 hole size를 보면 상기 Figure 3의 나트륨 side에서 re-open된 size나 3.1의 halos의 size보다 훨씬 적은 값을 나타내고 있지만, Figure 4의 steam 부위에서의 size와 비교해 보면 훨씬 커진 것을 알 수 있다.

한편, 시편의 두께에 따라 누출경로에서 부식이 진행되는 정도를 파악하기 위해, 누출시편을 세로로 cutting한 다음 표면을 연마하여 SEM으로 촬영하여 Figure 6에 간단히 나타내었다. Figure 6의 ㉑는 시편을 통해 나트륨부위로 물이 누출되기 전의 상태로 약 70~80 µm의 누출경로를 나타내고 있으며, ㉒는 ㉑를 확대한 그림으로 누출경로가 부분적으로 blocking되어 있음을 알 수 있다. 나트륨부위로 물 누출이 진행되어 누출경로가 re-open된 후 시편의 누출경로에 대한 그림이 ㉓로서 상부 쪽이 나트륨 쪽을 나타내고 있다. 나트륨 부위 쪽에서 나트륨-물 반응에 의해 재질이 부식되어

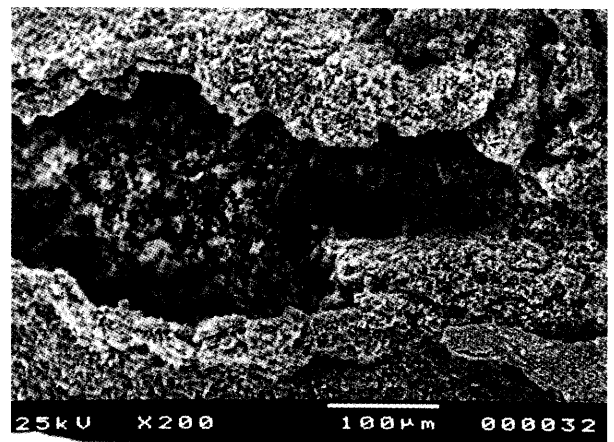


Figure 7. SEM photographs on the leak site before re-opening.

시편이 떨어져 나간 것을 알 수 있으며, 아직까지 누출경로 전체가 damage를 입지는 않은 것으로 판단된다. Figure 6의 ㉑는 ㉒부위를 확대한 그림으로서 부식으로 떨어져 나간 시편 표면의 속을 보면 부식생성물들이 많이 침착되어 있는 것을 알 수 있다.

이상을 종합해 보면, 시편에서 미량의 물 누출이 발생하면 누출 경로가 나트륨-물 반응생성물에 의해 self-plugging되었다가, 누출 경로에서 어떤 환경의 변화를 받으면, sealing되었던 반응생성물들이 dissolution & precipitation이 반복되면서 재질의 부식을 가속화시키고, 어느 경계점에 도달되면 누출경로가 expanding 되는 것으로 해석할 수 있다.

3.3. 부식특성

Figure 7은 본 연구에서 수행되었던 극 미량 물 누출 실험 시 누출 경로가 re-open되기 전에 시편을 인출하여 누출부위 주변을 SEM으로 촬영하여 간단히 나타낸 것으로 누출경로가 re-open되기 전에도 나트륨 쪽에서는 시편의 누출부위 주변에서 부식이 진행되고 있음을 간접적으로 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 물 누출 실험이 완료된 후 인출된 시편의 표면과 물을 누출시키지 않은 base material을 AES로 원소 분석하여 Figure 8에 간단히 나타내었다. Figure 8은 AES 분석시 시편의 누출부위를 5등분해서 각 point마다 AES를 측정된 후 대표적으로 spot 1에서 분석된 원소들을 미분법으로 데이터 처리해서 나타낸 것이다. 누출이 진행된 상부의 시편과 하부의 base material과는 상당한 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 이로부터 시편의 누출경로는 re-open되지

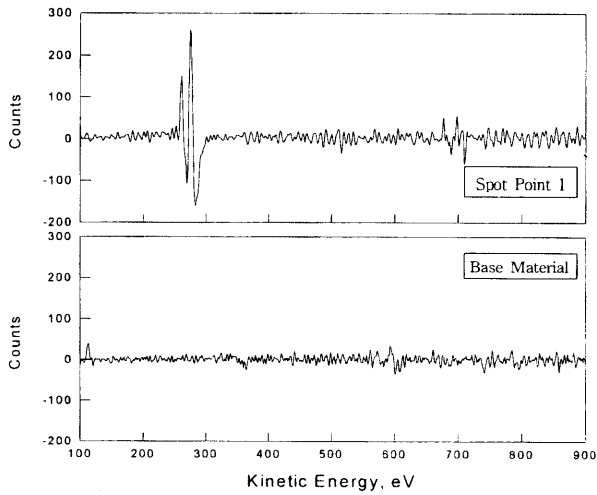


Figure 8. Differential treating lines for the base material and leak site of a specimen.

않았다 하더라도 나트륨 쪽의 시편표면에서는 부식이 진행되고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

Figure 8을 보면 300 eV 부근에서의 매우 큰 C peak는 실험 후 인출된 시편의 미세한 hole에 있었던 나트륨이 시료의 전처리 과정에서 공기중의 CO₂와 반응하여 Na₂CO₃를 생성하였기 때문으로 해석할 수 있으나, 700~710 eV부근에서의 Fe peak가 많이 변화된 것으로 보아 위에서 언급한 것처럼 누출부위 주변에서는 이미 부식이 진행되고 있음을 알 수 있으며, 또한 510 eV부근에서의 O와 Cr peak값도 역시 미량이지만 상대적으로 약간의 변화를 보이고 있는데, 이는 Cr과 O가 반응하여 CrO₂를 형성하여 segregation 되기 때문으로 예측된다.

한편, re-open이 진행된 시편의 누출부위 주변에 대해 EPMA로 원소분석을 수행하여 각 부위에서 측정된 원소의 양을 Table 2 및 Figure 9에 간단히 나타내었다. Figure 9를 보면 시편의 조성 성분 중 Cr 성분이 spot 3을 중심으로 현저한 차이를 보이는데, 이는 base material에 상당량 존재하던 Cr이 부식부위로 이동하면서 CrO₂와 같은 산화물을 생성시키면서 segregation된 것으로 예측된다.

또한 시편 본래의 조성 중에는 나트륨이 존재하지 않는 성분이나, 그림에서 볼 수 있는 것처럼 누출부위를 중심으로 상당량 나트륨이 존재하다가 spot 3을 정점으로 해서 base material로 갈수록 적어지는 것을 보여주고 있다. 이는 상기에서 설명한 누출경로를 중심으로 나트륨-물 반응이 일어나면서 반응생성물로 형성된 Na₂O 나 NaOH 등이, 나트륨-물 반응시 발생하는 고온분위기(실제 나트륨-물 반응시 반응부위는 1400 °C까지 상승되는 것으로 알려져 있음)에서 시편 조성 성분 중 Fe나 Cr등과 반응하여 NaOH·Fe₂O₃ 나 Na₂O·Fe₂O₃와 같은 철의 부식화합물을 생성하거나, NaCrO₂와 같은 Cr화합물을 생성하면서 반응부위를 중심으로 침적되어 있는 것

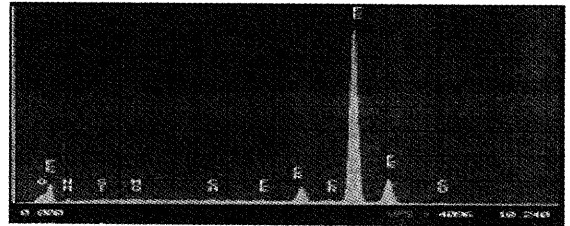
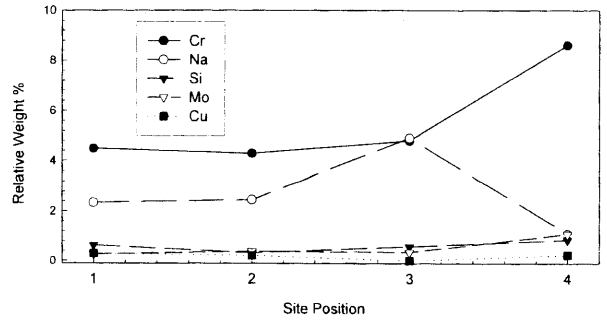


Figure 9. Changes of the elements composition and EPMA peaks on leak site.

는 것으로 예측된다.

이는 Figure 9의 하부에 나타난 EPMA의 peak profile을 보면 앞쪽에 나트륨 peak가 선명히 생성되어 있는 것으로부터도 예측이 가능하다.

이를 확인하기 위해서 누출부위 주변을 SEM으로 촬영하여 확대해 보면 Figure 10과 같이 나타난다. Figure 10의 A는 base material의 표면을 확대한 것이고, B는 실제 물이 누출되었던 시편의 누출부위를 확대한 것으로, A와는 달리 여러 형태의 화합물들이 결정상태로 혼재되어 있음을 알 수 있다. 일반적으로 고온에서는 나트륨의 용해도 매우 크기 때문에 나트륨과 다른 원소와의 반응에 의해 생성되는 나트륨화합물은 침상형으로 생성될 것으로 예상되는데, 본 연구에서도 EPMA분석 결과와 SEM 그림을 종합해 볼 때 나트륨화합물로 구성된 부식생성물들이 누출부위 주변에 침적되어 있는 것으로 예측된다.

한편, 2.1의 시편 제작에서 미량의 물 누출시 또 다른 현상을 관찰하기 위해, 누출부위 맞은편에 시편과 동일한 크기의 target material을 설치하였다. 이는 시편의 누출경로가 누출이 진행됨에 따라 부식이 진행되어 re-open되면, 고압의 steam이 분출되면서 전면에 설치된 target으로 소위 "jet"를 형성시키며 부딪치게 될 때, target에서 어떤 현상이 발생할 것인가를 알아보기 위한 것이다.

Figure 11의 상부는 target 시편 표면에서의 SEM사진으로 base material에 검은 색으로 둥글게 defect를 맞은 흔적을 볼 수 있었으나, 본 연구의 경우 누출량의 크기가 매우 적은 양이기 때문에 damage의 정도는 확연히 드러나지 않았고, 이를 확대해 보면 그림

Table 2. Relative Compositions for Leak Sites at Sodium Side of a Specimen

Site	Fe		Cr		Na		Mo		Si		Cu	
	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %	At. %	Wt. %
1	88.73	91.97	4.65	4.49	5.51	2.35	0.35	0.63	0.50	0.26	0.25	0.30
2	88.77	92.35	4.43	4.29	5.72	2.45	0.18	0.32	0.73	0.38	0.18	0.21
3	83.21	89.41	4.79	4.79	11.07	4.90	0.31	0.57	0.62	0.34	0.00	0.00
4	82.60	84.85	9.01	8.61	2.58	1.09	0.47	0.84	2.09	1.08	0.19	0.23

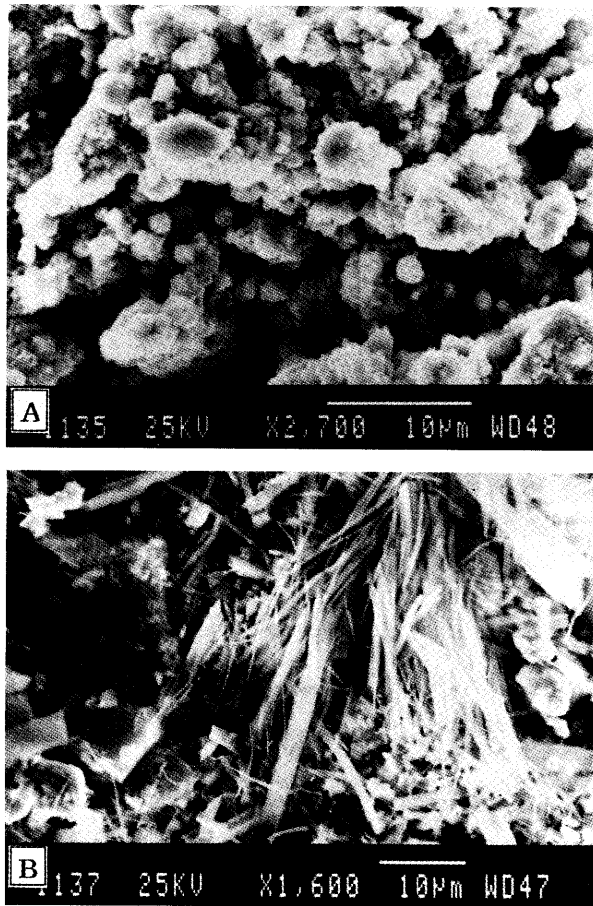


Figure 10. SEM photographs at the base material(A) and leak site of a specimen(B).

하부와 같이 나타났다.

이는 실제 증기발생기 전열관의 경우 매우 조밀하게 전열관들이 배열되어 있기 때문에, 하나의 전열관에서 미세 누출이 발생되더라도 누출부위에서 부식이 진전되어 누출경로가 re-open되고, re-open된 경로를 따라 고압의 steam이 분출되면 누출되는 전열관 앞쪽에 위치한 또 다른 전열관에 손상을 주게 되어, 2차 전열관의 파손을 유발하기 때문이다. 이러한 jet는 누출량이 상기 Table 1에서 보는 것처럼 어느 범위 이상에서 발생하는 것으로, 본 연구에서는 target에 jet가 발생된 흔적만 발견한 정도로 이에 대한 연구도 계속되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

고속증식로 증기발생기의 전열관 재질로 사용이 예상되는 ferrite steel을 사용하여, 나트륨분위기에서 미량 물 누출 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 미량 누출로 인해 self-plugging되었던 누출경로는 129분이 경과하자 re-open 되었으며, re-open size는 약 2 mm를 나타내었다.
- 2) 누출경로는 완전 re-open되기 전에 halos를 형성하여 defect를 갖고 있음을 알 수 있었으며, 실제 halos의 크기와 re-open 크기는 다르게 나타났다.
- 3) 누출경로는 나트륨부위에서 re-open 크기가 최대로 나타났으며, steam부위에서는 아직 부식이 진행되지 않았음을 알 수 있었다.

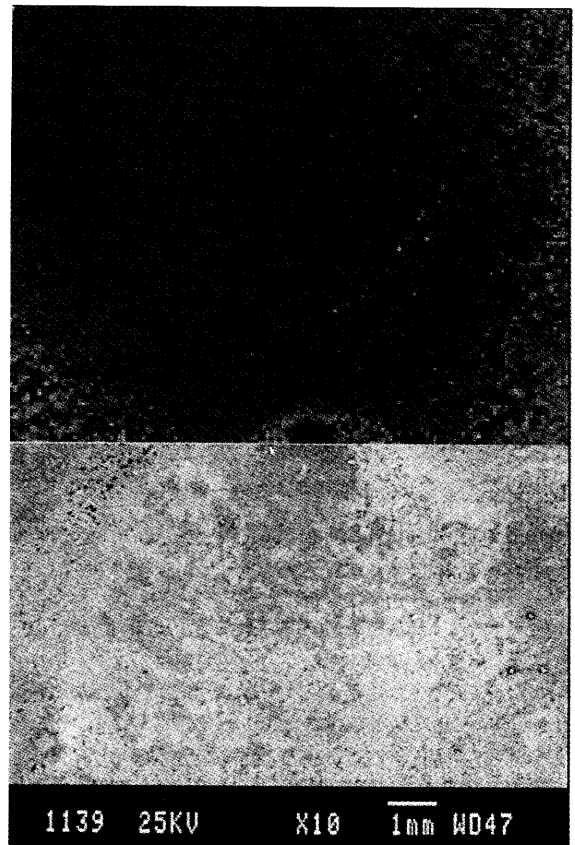


Figure 11. Photographs on the target surface.

4) 부식부위의 원소분석 결과 Cr원소의 segregation이 현저한 것을 알 수 있었으며, 누출부위 주변으로 부식화합물인 나트륨 화합물들이 산재되어 있음을 확인할 수 있었다.

감 사

본 논문은 1998년도 과기부 “원자력개발 중장기 과제”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. L. Quinet, L. Lannou, *Nucl. Tech.*, **46**, 582(1979).
2. T. Desmas, P. Lemoine, 3rd Int. Conf. Liquid Metal Engineering and Technology in Energy Production, Oxford (1983).
3. K. Dumm, *Atomkernenergie*, **14**, 309(1969).
4. D. A. Greene, *Nucl. Tech.*, **14**, 218(1972).
5. H. V. Chamberlain, J. A. Cameron and J. H. Coleman, J. A. Ford, APDA Report 254(1968).
6. 大音 明洋, 木下 泉, 吉田 和生, 植田 伸幸, CRIEPI Report T91016(1992).
7. 根井 弘道, 橋口 功, 日本原子力學會誌, **44**, 2439(1978).
8. K. Tregonning, A. Mackey, and K. Buxton, *J. Nucl. Energy Soc.*, **14**, 77(1975).
9. R. Currie, N. Innes, A. S. Fraser, LIMET '88, Proc. 4th Int. Conf. Liquid Metal Engineering Technology, Avignon, France

- (1988).
10. P. S. Chopra, C. C. Stone, E. Hutter, W. K. Barney, and R. G. Starker, Proceeding Int. Conf. Liquid Metal Technology in Energy Production, CONF-760503-P1, 248(1976).
 11. M. A. Salmon, J. S. McDonald, Atomic International Report NA-SR-8140 (1963).
 12. D. R. Vissers, *Nucl. Tech.*, **21** (1974).
 13. A. C. Whittingham, *J. Nucl. Mat.*, **60**, 119 (1976).
 14. K. C. Jeong, B. H. Kim, S. W. Kwon, K. R. Kim, and S. T. Hwang, *J. Kor. Ind. and Eng. Chem.*, **9**, 268(1998).
 15. D. A. Greene, Liquid Metal Engineering and Technology, Proceedings of the 3rd International Conference 1, 13~19, Oxford (1984).
 16. M. Hori, K. Kawashima, M. Sato, T. Saito, N. Kanegae, H. Hiroi, Int. Meeting on Fast Reactor Safety Related Physics, Chicago, Oct. (1976).