

# Self-wastage에 의한 2.25Cr-1Mo Steel 시편의 Re-open 현상

정 경 채<sup>†</sup> · 권 상 운 · 최 중 현 · 박 진 호 · 황 성 태

한국원자력연구소 KALIMER 기술개발팀  
(1999년 1월 19일 접수, 1999년 4월 28일 채택)

## Reopening Phenomena of the 2.25Cr-1Mo Steel Specimen by Self-wastage

Kyung-chai Jeong<sup>†</sup>, Sang-woon Kwon, Jong-hyeun Choi, Jin-ho Park, and Sung-tai Hwang

Korea Atomic Energy Research Institute, KALIMER Technolgy Development Team, Taejon 305-353, Korea  
(Received January 19, 1999; accepted April 28, 1999)

요약: 물 누출실험 장치를 이용하여 미량 물 누출 실험을 수행하였다. 2.25Cr-1Mo 시편의 누출경로는 나트륨-물 반응 생성물에 의해 plugging되는 경우가 발생하였으나, 대부분 re-open상태를 나타내었다. 또한 누출 경로가 완전 re-open된 후 나트륨 부위에서 시편의 self-wastage pattern은 온도에 영향을 받지 않음을 알 수 있었으며, 누출경로가 re-open 되면서 나타나는 defect된 크기는 대략 5 mm 이내임을 알 수 있었다. 누출 경로가 완전 re-open 되는데 걸리는 시간은 나트륨 온도가 높을수록 짧게 나타났으며, 평균적으로 450 °C에서 143분, 475 °C의 경우 40.7분, 510 °C의 경우 34.7분을 나타내었다.

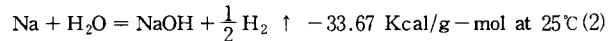
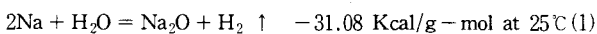
**Abstract:** Experiments on micro-leak of water were carried out with the water injecting simulator in liquid sodium atmosphere. The leak path was plugged by the sodium-water reaction products in the 2.25Cr-1Mo steel specimen. However, leak paths re-opened in most cases. The self-wastage patterns were not affected by the sodium temperature in the re-opened specimen. The diameter of the defect area, including the re-opened part, was about 5 mm. It took 143, 40.7 and 34.7 minutes to re-open the leak path at 450, 475, and 510 °C, respectively. It was concluded that the reopening time decreased with the increasing temperature.

**Key words:** Self-wastage, Reopening time, Sodium-water reaction

### 1. 서 론

액체금속을 사용하는 고속증식로에서 가장 중요하게 신뢰성을 갖추어야 할 부분으로 증기발생기를 들 수 있다. 증기발생기에서는 전열관을 사이에 두고 액체금속인 액체 나트륨과 고압의 수증기가 열 교환을 이루고 있다. 이때 증기발생기 내부를 구성하고 있는 전열관에서 어떤 결함으로 인해 고압의 물(수증기)이 나트륨 부위로 누출되면 열매체인 액체 나트륨과 폭발적으로 반응하여 다량의 반응열, 반응생성물인 sodium oxide(Na<sub>2</sub>O), sodium hydroxide(NaOH), sodium hydride(NaH)와 같은 부식 생성물로 인한 전열관의 마모, 특히 다량의 수소 가스를 방출하기 때문에, 증기발생기의 설계시 이러한 영향을 고려하는 것이 필수적이다[1-3].

일반적으로 증기발생기 내부의 전열관에서 물이 누출되는 원인은 그동안 외국에서 개발된 증기발생기의 물 누출 사고 경험에서 종합해 보면 전열관 재료의 결함, pin-hole, 전열관을 연결하는 연결부위의 용접 불량 등이 주원인으로 밝혀지고 있다[4]. 이러한 부위에서 만약 미량의 물이 누출된다고 하면, 약 150 kg/cm<sup>2</sup>의 물(수증기)이 상대적으로 저압으로 유지되어 있는 나트륨 부위로 누출되어 다양한 반응식의 나트륨-물 반응이 폭발적으로 발생하는데 대표적으로,



와 같은 반응이 일어난다[5].

상기 두 반응은 나트륨의 온도에 따라 주 반응이 진행되는 것으로 알려져 있는데 대략 320 °C 이상의 나트륨 온도에서는 (1)번 반응이, 그 이하에서는 (2)번 반응이 주가 되는 것으로 보고된 바 있다. 또한, 이 반응으로부터 중요하게 밝혀진 내용은 반응 생성물로 형성된 Na<sub>2</sub>O나 NaOH 등이 고온의 열과 함께 corrosion, erosion 등의 현상을 일으켜 전열관 재질을 부식시키는 소위 "wastage"라고 하는 마모현상을 발생시키고[6,7], 이러한 현상이 계속적으로 진행된다면, 누출 부위가 점차 확대되고 증기발생기 전열관 파열과 같은 중대한 문제를 야기 시키기 때문에 이러한 요인을 감안한 증기발생기의 안전성 확보와 설계가 필수적이다.

한편, 한국형 고속증식로인 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor)의 개발을 위한 프로그램이 1990년대 초반부터 시작되어 활발한 연구가 진행 중에 있으며, 개발 프로그램 중 나트륨-물 반응에 대한 특성 연구 및 해석 기술 분야가 포함되어 연구가 진행되고 있다. 선진 외국의 경우 고속증식로의 증기발생기 안전성 평가분야에서 연구 현황을 파악해 보면, 일반적으로 물 누출에 의해 발생하는 나트륨-물 반응 메카니즘 해석, 반응으로 발생되는 재질과의 부식특성 해석, 반응생성물인 수소 가스와 열에 의한 압력영향 평가 및 조기에 물 누출을 감지할 수 있는 시스템의 개발 분야 등으로 나뉘어 연구가 진행중임을 알 수 있다.

한국에서의 고속증식로 개발 프로그램에서도 증기발생기 전열관에서 물 누출이 발생하는 경우 누출량에 따라 미량(0.1 g/sec 이

<sup>†</sup> 주 저자 (e-mail: kcjeong@nanum.kaeri.re.kr)

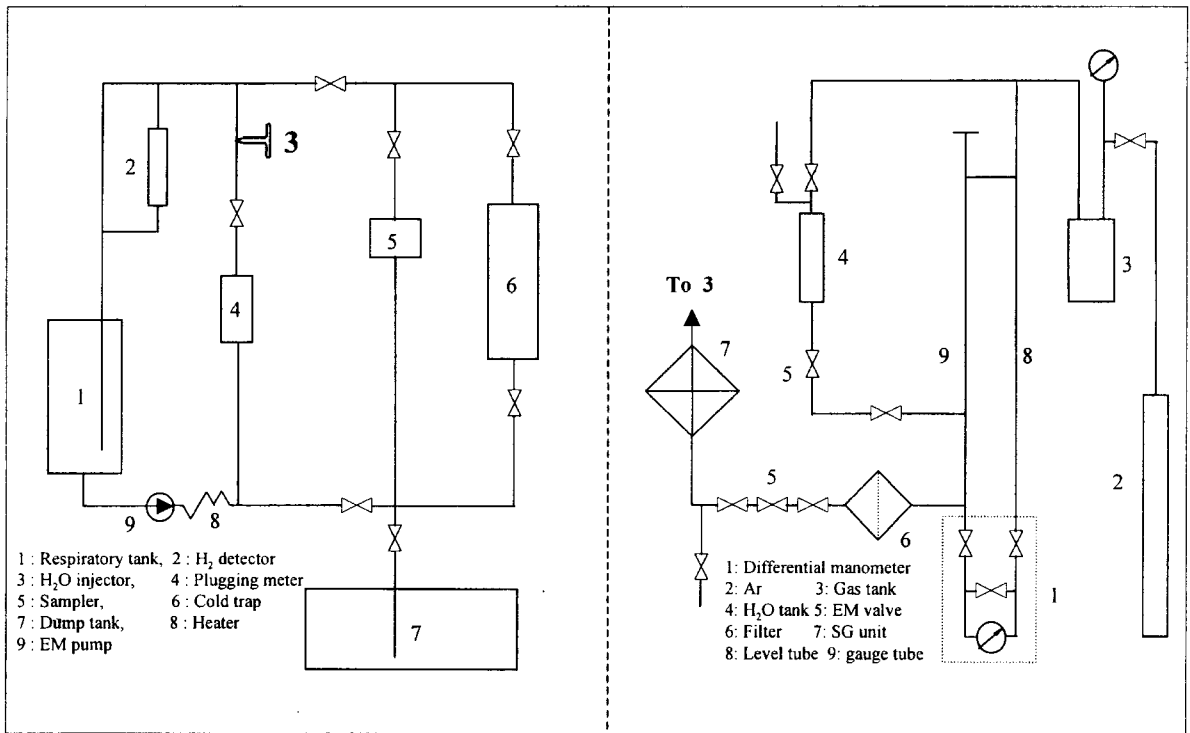


Figure 1. Diagram of the sodium circuit and system of water delivering into injector.

하), 소량(0.1~10 g/sec), 중규모(10~1 kg/sec) 및 대규모 누출로 구분하여 누출현상을 해석하고 있으며[8], 미량 누출인 경우 재질의 부식특성과 self-wastage 현상이[9], 소량인 경우 target material의 손상 규모 및 wastage 방정식이[10], 중규모 누출의 경우 overheating에 대한 연구가[11], 대규모인 경우 컴퓨터 코드의 개발과 함께 대규모 누출에서 발생하는 압력 영향의 해석과 증기발생기의 안전성 평가 등에 대한 연구로 진행되고 있다[12-14]. 따라서 본 연구에서는 물 누출과 관련하여 물 누출시 나트륨-물 반응에 의한 전열관 재질의 wastage 특성을 해석하기 위해 소규모 물 누출 실험장치를 설계, 제작, 운전하여 미량 물 누출시 발생하는 반응현상으로 전열관 재질에서 누출경로의 막힘과 재개방 등 wastage 특성을 해석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치(나트륨 loop)

미량의 물 누출 실험을 수행하기 위하여 Figure 1과 같은 나트륨 루프가 사용되었다. 실험에 사용된 나트륨은 고체 brick을 melting 시켜 약 160 L 정도 담길 수 있는 나트륨 저장조, 물 누출시 발생하는 수소가스를 감지하기 위해 Ni membrane을 이용하여 제작된 수소감지기, 물 누출기(simulator), 물 누출로 생성되는 산화물(반응생성물)을 정화(purification)하기 위한 cold trap, 나트륨의 유동을 위한 electromagnetic pump 등으로 구성되어 있으며, 액체 나트륨의 최대 flow rate는 10 m<sup>3</sup>/hr를 유지하였다.

나트륨의 온도와 유량은 by-pass line에 열전대와 magnetic flow meter를 사용해서 조절하였으며, 누출 실험 중에 물 누출에 의해 발생하는 다량의 수소 가스에 의한 압력상승을 예방하기 위해 0.25 MPa 차압에 의해 rupturing 되도록 safety valve를 설치하였다. 물 누출을 위한 leak simulator는 Figure 2와 같은 장치를 사용하였으며, 약 5~13 MPa의 물(스팀)이 나트륨 부위로 누출될 때

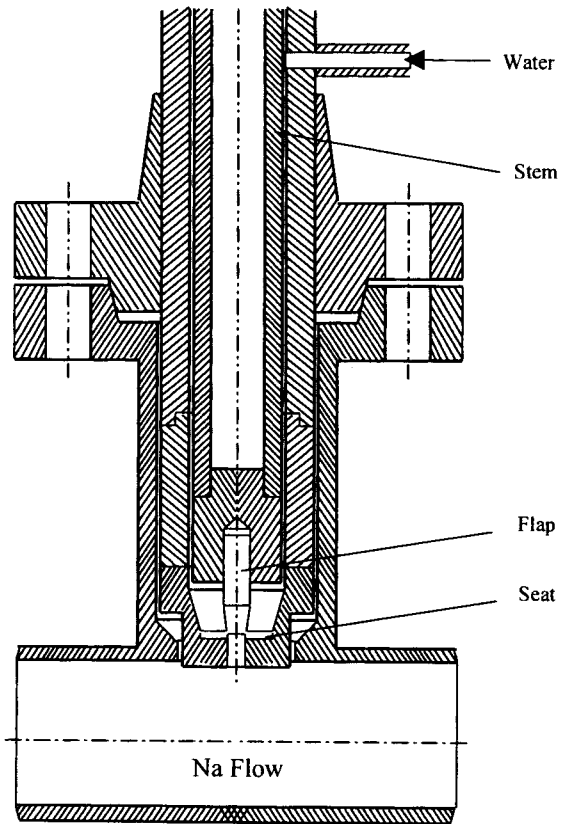


Figure 2. Detail drawing for injection part.

압력 차를 이용하여 물 누출율과 누출량을 측정할 수 있도록

differential manometer를 설치하였으며, electromagnetic valve, cermet filter 및 증기발생기 부분으로 구성되어 있다. 증기발생 부분은 tube-in-tube 방식으로 되어 있으며, 물은 내부 tube( $\phi 6 \times 1.5$  mm)로 인입되고, 내부와 외부( $\phi 38 \times 3$  mm) tube 사이에 나트륨이 흐르면서 열 교환을 이루며 물이 수증기로 변환된다.

Simulator의 flap과 seat는 2.25Cr-1Mo steel로 제작되었으며, seat에 접촉하고 있는 flap needle은 cylinder 모양 또는  $9 \sim 10^\circ$ 의 cone 형태를 취하고 있다. 나트륨 부위에 접촉하고 있는 orifice diameter는 3~5 mm이며, flap needle 상부에 notch로 가공되어 있다.

## 2.2 실험 방법

실험 전에 Figure 1에 보는 물 저장조에 약 1 L의 증류수를 채우고 differential manometer에 의해 연속적으로 압력을 측정한다. 물이 누출되면 상기 Figure 1의 8번 튜브의 water level은 일정하게 유지되는 반면에 9번 튜브의 level은 simulator로 물이 누출되기 때문에 level이 감소하게 되는데 이 압력차이를 연속적으로 측정해서 시간에 따라 누출되는 양을 역으로 계산한다.

실험이 진행되는 동안 나트륨의 온도와 유속은 일정하게 유지하며, leak simulator을 통해 물 누출율이  $\sim 1$  g/sec로 상승하면 실험을 종료한다. 여기서 물 누출율이 1 g/sec 상승까지 유지한 후 물 누출을 종료하는 이유는, 누출 경로를 갖는 시편의 재질이 물 누출로 인해 부식이 발생하고, 어느 정도의 incubation period(잠복기)를 거친 후 완전 재개방됨으로써 급격한 누출 증가가 뒤따르고, 나트륨-물 반응에 의해 생성되는 수소가스에 의한 폭발현상이 일어나기 때문이다. 시편을 통해 누출이 실험이 종료되면 leak simulator에 Ar 가스를 불어넣어 내부에 나트륨이 penetration되는 것을 방지하며, loop의 나트륨을 drain한 후 simulator를 loop에서 탈착하여 sample로 사용한다.

실험 후 시편은 Ar 가스로 완전 purge하고 누출 경로 주변의 반응부위 표면을 광학현미경으로 관찰하여, 누출 특성 및 재질의 부식 특성을 해석하였으며, 기타 실험이 진행되면서 실험장치에 부착된 manometer, temperature indicator 등을 이용해서 실험 특성 자료를 획득하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Self-wastage pattern

미량 물 누출 실험을 수행한 실험조건과 실험결과를 요약하여 Table 1에 나타내었다. 물 누출 실험은 나트륨의 온도와 물(수증기)의 누출 압력 및 누출 시편의 두께를 변경해서(Table 1 참조) 실험을 진행하였으며, 물 누출량은 실험에 인입된 총 누출량을 누출 시간으로 나누어 평균값(g)을 사용하였다.

물 누출 실험이 종료된 후 injector의 visual pattern을 관찰하여 Figure 3에 간단히 나타내었다. Figure 3은 상기 Table 1의 실험 8과 9로써,  $475^\circ\text{C}$ 로 유지되어 있는 액체 나트륨 분위기에 2.5 mm 두께의 누출 시편을 통해 약 12 MPa의 압력으로 물을 누출시킨 후 시편을 관찰한 것으로, a는 물을 누출시키기 전 시편의 모양을 나타낸 것이다. Figure 3의 b는 물 누출이 진행되면서 중앙의 flap을 중심으로 우측 하부로 나트륨 부위에서 부식이 진행되어 있는 현상을 관찰할 수 있으며, c의 경우 누출 경로가 재개방되면서 한 쪽 방향으로 터진 것 같은 현상이 나타났다.

실제 상기 Table 1로부터 8과 9번 실험에서 나타난 1 g/sec에 이르기까지 걸린 시간을 분석해 보면 상기 Figure 3의 b와 c 시편의 누출 진행과정을 예상할 수 있는데, b의 경우 2280 sec 동안 총 27 g의 누출량을 나타내고 있는 것으로 보아, 누출 경로를 통해 극미량의 물이 누출되면서 계속적으로 재질의 부식에 의한 self-wastage는 진행되고 있으나 누출경로를 재개방시키기에는 못 미치는 양으로 누출이 진행되어 최종에는 재개방되는 양상을 나타낸 것으로 추측할 수 있고, 반대로 c의 경우를 보면 누출경로가 b보다는 좀 더 확장되어 있어 누출량이 b보다는 초기에 다소 많아지면서 나트륨-물 반응에 의한 부식이 훨씬 빨리 진행되고 짧은 시간 내에 누출경로가 완전 재개방되면서 일시에 많은 양의 누출이 진행된 것을 알 수 있다.

한편, 물 누출 조건을 동일하게 유지하고 다만 나트륨 온도만을 변경시켜 누출실험을 수행하여 Figure 4에 간단히 나타내었다. Figure 4는 나트륨 온도를  $510^\circ\text{C}$ 로 상승시켜 누출 실험을 수행한 후 시편을 관찰한 그림으로 a, b 두 시편 모두 누출 경로가 재개방된 것을 알 수 있으며, 상기의  $475^\circ\text{C}$ 에서 실험한 Figure 3의

Table 1. Experimental Conditions and Results of the Investigation on the First Stage of Small Water-in-Sodium Leak Self-wastage

Exp. No	Na Temp.	Initial leak rate (g/sec $\times 10^{-3}$ )	Final leak rate (g/sec)	Duration (sec $\times 10^3$ )	Quantity up to sharp increase (g)	Absence time (sec $\times 10^3$ )	Steam P. (MPa)	THX (mm)
1	450 $^\circ\text{C}$	2.78	>1	0.9	17	-	13	2
2	"	1.81	"	5.04	21	-	5	"
3	"	1.94	"	0.18	15	-	"	"
4	"	1.00	0.35	21.6	62	3.6	"	4.5
5	"	2.75	>1	15.19	29	4.68	"	6
6	300	11.11	"	86.4	395	-	"	3
7	"	11.11	"	126	970	54	"	"
8	475	11	"	2.28	27	0.35	12.2	2.5
9	"	68	"	1.8	122	-	12	"
10	"	360	"	0.1	54	-	13	"
11	"	31	0.7	5.22	56	-	"	"
12	"	54	0.8	6.54	130	-	"	"
13	"	100	>1	1.02	102	-	"	"
14	"	500	0.95	0.12	55	-	"	"
15	510	17	0.8	0.51	20	-	"	"
16	"	1.4	>1	7.49	15	-	"	"
17	"	25	0.6	0.22	8	-	"	"
18	"	147	>1	0.1	9	-	"	2.6

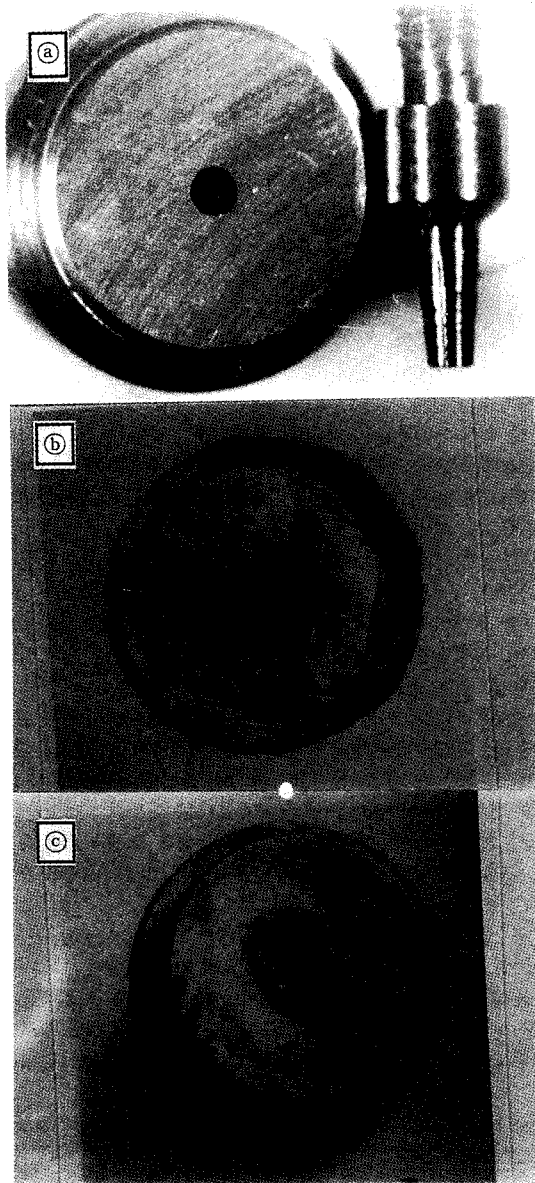


Figure 3. Visual pattern of the leak specimen before test (a), after experiment 8(b) and 9(c) in Table 1.

결과와 비교해 보면 재개방 time이 짧아지고 재개방된 방향이 좀 다를 뿐 self-wastage pattern은 동일한 결과를 나타내고 있다.

한편, 시편의 누출 부위가 재개방되고 난 후 그 크기가 매우 중요하게 취급된다. 이는 실제 증기발생기의 어떤 한 전열관에서 defect에 의해 물 누출이 진행된다고 가정할 때, 상기 Figure 3, 4에서 보는 바와 같은 재개방 현상을 일으키게 되고, 시간이 경과함에 따라 re-open된 전열관으로부터 분출되는 고압의 스팀이, 분출되는 방향에 있는 다른 정상적인 전열관 표면으로 부딪히는 이른바 "jet" 현상을 발생시킨다[15].

이 jet 현상에는 스팀과 나트륨 반응에 의해 생성된 나트륨 산화물과, 반응이 안된 스팀이 혼합되어 정상적인 전열관의 표면을 때리는 wastage를 발생시키게 되는데, 이러한 현상이 지속되면 2차, 3차의 연속적인 누출 사고로 발전하게 되고, 이때 제일 먼저 누출이 진행된 전열관에서의 누출부위가 재개방되면서 형성하는 누출

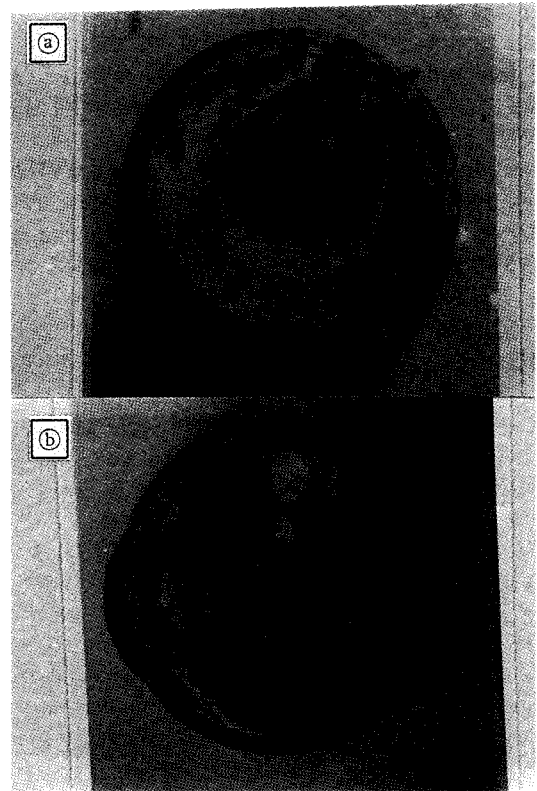


Figure 4. Visual pattern of the leak specimen after experiment 17 and 18 in Table 1.

크기(diameter)에 의해 2차 전열관을 마모시키는 시간이 결정되기 때문이다.

실제 본 연구에서 수행된 실험으로부터 시편의 누출 경로가 재개방되면서 나타내는 재개방 된 크기를 관찰한 결과 Figure 3, 4에서 보는 것처럼 나트륨의 온도에 따라 약간의 차이는 있으나 부식 부위를 포함해서 5 mm 이하를 나타내는 것으로 사료된다.

### 3.2. 재개방 시간

물 누출이 완료된 후 실험에서 얻은 결과를 물 누출율과 재개방 시간과의 관계로 plotting하여 재개방 시간과 관련된 그림으로 Figure 5, 6에 나타내었다. 이 실험의 진행과정을 보면 상기 Table 1에서 알 수 있듯이 시편의 누출 경로가 완전 재개방된 것으로 판단되는 1 g/sec까지 걸리는 시간은, Figure 5의 경우 약 38분 정도, Figure 6의 경우는 38분 정도 걸린 것을 알 수 있었다. 두 실험의 차이로부터 알 수 있는 것은 나트륨 온도가 재개방 시간을 결정하는 주요 변수임을 알 수 있다. 나트륨 온도 380 °C에서 수행된 실험 결과를 나타내는 Figure 5를 자세히 관찰해 보면 초기에는 시편의 누출 경로를 통해 극 미량이지만 물 누출이 진행되다가 약 15분이 경과하자 누출 경로가 막히면서(self-plugging) 누출이 중단되고, 다시 약 5분이 지나자 누출경로는 미세하게 re-open되고 약 35분 이 경과하자 누출 경로가 완전 재개방되는 것을 알 수 있다.

실제 외국의 여러 사례를 보면 10<sup>-2</sup> g-H<sub>2</sub>O/sec 이하의 극 미량 누출인 경우 누출 경로는 완전 plugging되어 재개방되지 않는 경우도 있음이 보고된 것도 있다[9]. 그러나 본 연구에서는 35분 정도 경과하자 재개방되었는데, 미세하지만 누출경로를 통해 물 누출이 진행되다가 누출경로의 나트륨 부위에 나트륨-물 반응생성물인

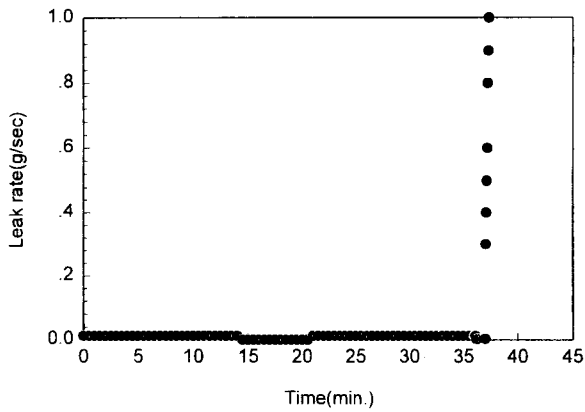


Figure 5. Time dependence of the water leak rate on the experiment 8 in Table 1.

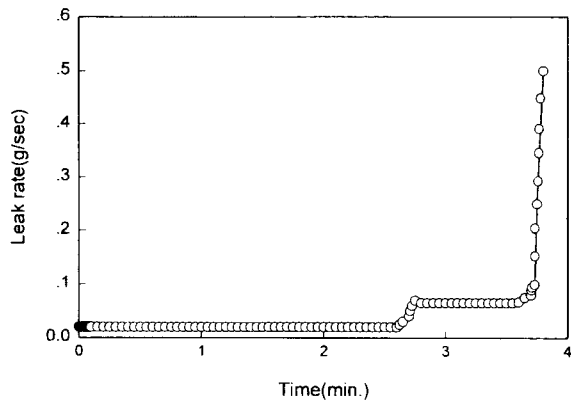


Figure 6. Time dependence of the water leak rate on the experiment 17 in Table 1.

Na<sub>2</sub>O이 누출경로를 막거나 NaOH가 누출 시편의 성분 중 철과 반응(부식)함으로써 부식생성물이 생성되어 누출경로를 plugging시켰다가 국부적인 온도상승이나 나트륨의 유동 등에 의해 재개방되는 것으로 해석할 수 있다.

한편 510 °C에서 누출실험 결과를 보면 초기부터 약 2.8분까지는 극 미량이지만 누출이 진행되다가 나트륨-물 반응에 의한 재질의 부식이 진행됨에 따라 누출경로가 약간 확장되면서 누출량이 약간 증가하다가 약 1분 후 누출 경로가 완전 재개방된 것을 알 수 있

다. 이 경우 누출 경로가 self-plugging되는 현상은 발견할 수 없었으며, 380 °C에서의 실험보다 재개방되는데 걸리는 시간이 훨씬 짧아졌음을 알 수 있다. 이 결과로부터도 상기에서 언급한 나트륨의 온도가 시편 재질의 부식속도를 결정하는 중요 변수임을 다시 한번 확인할 수 있다.

따라서 이러한 특징을 분석하기 위해 Table 1로부터 얻은 실험 결과로부터 온도와 완전 재개방되는데 걸린 시간을 계산해서 Table 2에 간단히 나타내었다.

Table 2는 물 누출 실험시 나트륨 온도에 따라 실험이 진행되는 동안 총 누출된 물의 양을 1 g/sec이상 누출이 진행되었을 때까지 걸린 시간으로 나누어 그 평균값을 구한 것이다. 일반적인 경향을 살펴보면 나트륨 온도에 따라 재개방되는데 걸리는 시간은 약간의 scattering이 있으나 대체적으로 온도가 상승될수록 시간은 단축되는 경향을 알 수 있다. 결과적으로, Table 1, 2로부터 유추할 수 있는 것은 나트륨의 온도가 재개방되는데 걸리는 시간을 좌우하는 중요 변수임을 알 수 있으며, 나트륨의 온도가 높을수록 재개방되는 시간은 짧아지는 경향과 함께 물 누출이 일으키는 나트륨-물 반응생성물에 의한 corrosion, erosion현상에 의한 전열관 재질의 wastage속도는 훨씬 클 것으로 예측된다.

본 연구와 관련하여 기 보고된 연구에 의하면[16], 누출 경로에서의 self-plugging은 대부분 나트륨-물 반응에 의해 생성되는 Na<sub>2</sub>O같은 산화물 결정들이 직접 plugging시키거나 혹은 NaOH 같은 부식성의 반응생성물과 전열관 재질중의 철(Fe) 성분이 반응하여 NaOH·Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 형태의 생성물이 누출 경로를 plugging시키는 것으로 밝혀진 바 있다.

본 실험에서는 누출 경로에서 1번의 self-plugging이 발생되었다가 다시 재개방된 것을 알 수 있으며, 약 35분이 경과하자 누출 경로에서 self-wastage가 발생하면서 누출경로가 완전 개방되었음을 알 수 있다.

### 3.3. 나트륨 온도의 영향

상기 Table 1의 연속된 누출 실험으로부터 나트륨 온도가 재개방되는데 미치는 영향을 해석하기 위해, 표로부터 평균 누출량을 계산하여 나트륨 온도별로 correlation하여 Figure 7에 간단히 나타내었다. Figure 7은 전열관 두께가 2.5 mm로 일정하게 제작된 시편을 동일한 실험조건에서 온도만 변경시켜가며 실험을 수행한 후 그 결과를 그림으로 나타낸 것이다. Figure 7의 a, b, c 모두 평균 누출량과 재개방되는데 걸리는 시간과는 반비례하는 형태로 나타났는데, 이는 Quinet 등[17]이 보고한 것과 동일한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 이 그림으로부터 나트륨 온도가 상승하였을 경우 그 기울기 값이 커지는 것을 알 수 있으며, 450 °C와

Table 2. Calculation Results for the Sodium Temperature and Reopen Time

Exp. No	Na Temp.	Re-open time(min.)	Average (min.)	Wall 두께(mm)	Exp. No	Na Temp.	Re-open time	Average (min.)	Wall 두께(mm)
1	450 °C	15	143	2	10	475 °C	1.7	40.7	2.5
2		84		2	11		87		2.5
3		3		2	12		109		2.5
4		360		4.5	13		17		2.5
5		253		6	14		2		2.5
6	300 °C	1440	1770	3	15	510 °C	8.5	34.7	2.5
7		2100		3	16		124.8		2.5
8	475 °C	38		2.5	17		3.7		2.5
9		30		2.5	18		1.7		2.6

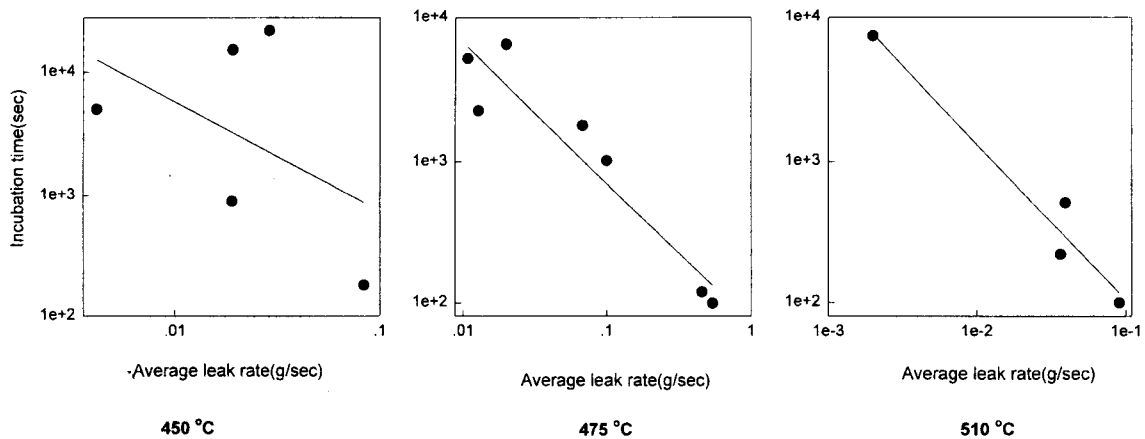


Figure 7. Water-in-sodium self-wastage times for the 2.5 mm wall the thickness of 2.25Cr-1Mo steel.

510 °C의 경우를 살펴보면 거의 1 order 정도의 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

이는 상기 Table 2를 보면 추측이 가능하며, 나트륨의 온도가 300 °C로 낮은 경우 나타나는 재개방되는데 걸리는 시간을 510 °C의 경우와 비교해 보면, 거의 2 order 정도 차이가 남을 알 수 있다. 이는 전열관에서 물 누출이 발생하는 경우 증기발생기를 구성하고 있는 전열관의 위치(실제, 증기발생기의 전열관의 온도는 위치에 따라 대략 300 °C에서 530 °C까지 변화됨)에 따라, 동일한 양의 물이 누출된다 해도 온도가 높은 부위에서는 누출경로가 재개방되는 시간이 짧아져 물 누출의 감지가 용이한 반면, 온도가 낮은 부위에서는 누출 경로가 완전 plugging되거나 극 미량으로 진전되어 감지가 어려운 경우도 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

물 누출실험 장치를 제작, 운전하여 액체 나트륨 분위기에서 미량 물 누출 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 액체 나트륨 분위기에서 2.25Cr-1Mo steel 시편의 누출경로는 나트륨-물 반응 생성물과 재질의 부식 현상 등에 의해 plugging되는 경우가 발생하였으나, 대부분 재개방된 상태를 나타내었다.

2) 누출 경로가 완전 재개방된 후 시편의 나트륨 부위에서 나타내는 self-wastage pattern은 나트륨의 온도에 영향을 받지 않음을 알 수 있었으며, 누출경로가 재개방되면서 나타나는 defect 크기는 대략 5 mm 이내임을 알 수 있었다.

3) 누출 경로가 완전 재개방되는데 걸리는 시간은 나트륨 온도가 높을수록 짧게 나타나는 경향을 보였으며, 평균적으로 450 °C에서 143분, 475 °C의 경우 40.7분, 510 °C의 경우 34.7분으로 나타났다.

#### 감 사

본 논문은 1999년도 과기부 “원자력개발 중장비 과제”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 石神 努, 小林健介, 日本原子力學會誌, 35, 549(1993).
2. R. Anderson, *Nuclear Energy*, 18, 333(1979).
3. H. Tanabe and E. Wachi, IAEA/IWGFR Specialists' Meeting on "Steam Generator: Failure and Failure Propagation", Aix-en-Provence, Sept. 26, France(1990).
4. H. V. Chamberlain, J. A. Cameron, J. A. Ford, et al., APDA report 254(1968).
5. H. Nei, *J. Nuclear Science and Technology*, 14, 652(1997).
6. R. N. Newman and C. A. Smith, *J. Nuclear Material*, 52, 173(1974).
7. 宇佐美 正行, 下山一仁, 田邊裕美, 姫野嘉昭, 日本原子力學會誌, 33, 363(1991).
8. D. F. Casey, *Trans. ANS*, 19, 316(1974).
9. J. Voss, P. Vagt, J. K. von Westenbrugge, and J. Joziassse, Report - IWGFR/50, 79(1983).
10. N. Kanegae, K. Hashiguchi, I. Ikemoto, and M. Hori, *Trans. ANS*, 24, 386(1976).
11. R. Currie, N. Innes, and A. S. Fraser, LIMET '88, Proceedings 4th Inter. Conf., Liquid Metal Engineering Technology, Avignon, France(1988).
12. Y. W. Shin, G. F. Berry, and J. G. Daley, *Trans. Int. Conf. Structural Mechanical Reaction Technology*, Paper B8(1981).
13. J. O. Sane, J. J. Regimbal, J. A. Fairbairn, and R. A. Meyer, Proceedings of the Inter. Meeting on Fast Reactor Safety Technology, 4, 1878-1887, Seattle(1979).
14. J. H. Bae, M. C. Shin et al., *Kor. Nuclear Society*, 30, 568(1998).
15. J. F. B. Payne, *Nuclear Energy*, 19, 303(1980).
16. 정경채, 정지영, 박진호, 황성태, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, 9, 1023(1998).
17. J. L. Quinet, L. Lannou, *Nuclear Technology*, 46, 582(1979).