



KR0000277

KAERI/TR-1615/2000

소규모 누출 현상 실험 및 해석

The Experiment and Analysis on Small Leak Phenomena

2000. 7.

한국원자력연구소

**Please be aware that all of the Missing Pages in this document were
originally blank pages**

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 소듐 기술 개발 과제의 “소규모 누출 현상 실험 및 해석” 분야에
대한 기술 보고서로 제출합니다.

2000. 7. 31

주 저 자 정 경 채

공동저자 황 성 태
 김 병 호
 정 지 영

요 약 문

I. 제 목

소규모 누출 현상 실험 및 해석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

액체금속로에서 냉각재로 사용되는 액체 나트륨은 증기발생기의 안전성 측면에서 중대한 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 액체금속로 개발 초기부터 많은 연구가 수행되고 있다. 특히 전열관 튜브에서 pin-hole이나 용접 불량 등에 의해 고압의 스틱이 나트륨 부위로 누출되면 대량의 수소가스 및 부식성 나트륨 화합물을 생성하여 증기발생기 재료의 안전성에 심각한 damage를 미칠 수 있다. 이 경우 초기 누출 부위는 시간이 경과함에 따라 미량, 소량, 중규모 누출을 거쳐 최종적으로 대규모 누출로 발전하게 된다. 따라서 전열관 튜브에서 극미량이나 미량 물 누출에 의한 나트륨-물 반응 현상 해석은 누출 전파의 방지 및 증기발생기의 안전성 평가 측면에서 매우 중요하게 취급되고 있다. 본 연구에서는 소규모 누출 현상 실험 및 해석을 위해 우선 누출경로의 self-plugging과 reopen에 대한 메커니즘을 포함해 reopen time, size, shape 및 self-wastage, 재료의 corrosion 현상 등에 대해 문헌 조사와 실제 미량 물 누출 실험을 통해 해석하였다.

III. 결과 및 건의

미량 물 누출 실험 장치의 설계 및 운전을 통해 액체 소듐 분위기에서 시편의 누출 특성을 해석하였다. 초기 누출 실험에서 누출 경로는 소듐-물 반응 생성물 및 부식현상에 의해 self-plugged되는 현상을 확인할 수 있었고, sealed된 leak path는 누출 경로에서의 열적인 transient와 튜브의 진동에 의해 reopen되는 것으로 해석할 수 있었다. 한편 전열관 재료로 사용이 예상되는 ferrite steel을 사용해서 누출 실험을 수행한 결과 reopen time은 대략 130분, reopen size는 약 2mm 직경을 나타내었으며, circular 형태를 나타냄을 알 수 있었다. 누출 부위를 AES로 분석한 결과 부식현상은 소듐 부위에서 시작됨을 알 수 있었고, 시편 표면에서 Cr의

segregation 현상이 발생되었음을 관찰하였다. 한편 국제공동연구를 통해 2.25Cr-1Mo steel을 이용해서 reopen time을 소둔 온도와 초기 누출량과의 관계로 correlation한 결과 $\tau_c = \delta \cdot g^{-0.83} \cdot 10^{\left(\frac{3570}{T_{so}} - 3.34\right)}$ 와 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.

Summary

I. Title

The experiment and analysis on small leak phenomena

II. Objective

The liquid sodium which is used as a coolant in LMFBR, may give rise to a serious trouble in the safety aspect of steam generator. The defects in a heat transfer tube, such as pin-hole or tube welding defect, will result in a leakage of high pressure steam into the sodium side and production of hydrogen gas and corrosive sodium compounds which can cause significant damage to the tube wall of steam generator by using exothermic reaction. In this case, initial leak size will be enlarged with time and the leak rate developed to large leak through the micro, small, intermediate leaks.

Therefore, the analysis of sodium-water reaction phenomena on the micro and small water leaks in the heat transfer tube is very important in the initial leak stage in the aspects of the protection of leak progress and safety evaluation of steam generator. In this study, firstly, the micro and small leaks phenomena, such as reopen size, shape, and time of leak path, self-wastage, corrosion of tube materials, was analyzed from the literature survey and water leakage experiments using the leak specimen.

III. Results and proposal

In small water leak experiments, the leak path was plugged by the sodium-water reaction products at the leak path of a specimen, and re-open phenomena were not observed in initial experiments. Other leak experiments, reopen phenomena of self-plugged leak path was observed. Re-open mechanism of sealed path could be explained by the thermal transient and vibration of heat transfer tube. As a result, perfect reopen time of self plugged leak path was observed to be about 130 minutes after water leak initiation. Reopen shape of a

specimen was appeared with double layer of circular type, and reopen size of this specimen surface was about 2mm diameter on sodium side. Also, the corrosion of a specimen initiated from sodium side, the segregation phenomena of Cr in the specimen was found much more than those of other elements, in AES analysis. In small water leakage experiments were carried out using the 2.25Cr-1Mo steel through co-work with IPPE, the following correlation equation about the reopen time between sodium temperature and initial leak rate was obtained,

$$\tau_c = \delta \cdot g^{-0.83} \cdot 10^{\left(\frac{3570}{T_{Na}} - 3.34\right)}, \text{ in } 400\text{-}500 \text{ } ^\circ\text{C of liquid sodium atmosphere.}$$

CONTENTS

Summary

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Technical review for water leak in liquid sodium.....	5
1. Introduction for leak phenomena.....	5
2. Sodium-water reaction.....	6
3. Analysis of micro leakage phenomena.....	8
4. Wastage phenomena.....	12
(1) Outline.....	12
(2) The factors on wastage	15
(3) Results on wastage experiment.....	17
(4) Wastage equation.....	20
Chapter 3. Small leak phenomena experiment and analysis.....	23
1. Experimental apparatus.....	23
2. Method.....	23
3. Analysis.....	25
4. Results and discussion.....	25
(1) Reaction characteristics of reaction site.....	25
(2) Leak characteristics.....	30
(3) Reopen time.....	32
(4) Reopen size.....	32
4. Water leakage experiment in flowing sodium	37
(1) Outline.....	37
(2) Apparatus and method.....	38
(3) Results and discussion.....	41
1) Self-wastage pattern.....	41
2) Reopen time.....	46

3) Temperature effect.....	49
Chapter 4. Conclusions	52

Reference

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 물 누출 현상에 대한 기술 현황.....	5
1. 서 언.....	5
2. 나트륨-물 반응.....	6
3. 극 미량 물 누출 현상의 해석.....	8
4. Wastage 현상.....	12
(1) 개요.....	12
(2) Wastage에 영향을 주는 인자.....	15
(3) Wastage 실험 결과.....	17
(4) Wastage 방정식.....	20
제 3 장 소규모 물 누출 실험 및 현상 해석.....	23
1. 실험 장치.....	23
2. 실험 방법.....	23
3. 분석.....	25
4. 실험 결과 및 고찰.....	25
(1) 누출부위의 반응특성.....	25
(2) 누출특성.....	30
(3) Reopen time.....	32
(4) Reopen size.....	32
4. 유동 나트륨에서의 물 누출 실험	37
(1) 개요.....	37
(2) 실험 장치 및 방법.....	38
(3) 결과 및 고찰.....	41
1) Self-wastage pattern.....	41
2) 재개방 시간.....	46
3) 나트륨 온도의 영향.....	49
제 4 장 결 론.....	52

참고문헌

표 목차

표 1. 물 누출량의 구분 및 누출에 의한 영향.....	10
표 2. 나트륨-물 반응에 의한 재질의 부식 저항성	17
표 3. 2.25Cr-1Mo steel에 대한 wastage 방정식.....	21
표 4. Wastage에 영향을 미치는 주요 인자들의 일반적인 경향.....	22
표 5. 5Cr-1Mo steel 시편의 화학 조성.....	23
표 6. Self-wastage 해석을 위한 미량 물 누출 실험 조건 및 결과.....	42
표 7. 나트륨 온도가 reopen time에 미치는 영향.....	48

그림목차

그림 1. 누출 경로의 self-plugging과 reopen 메커니즘.....	9
그림 2. 미량 누출에서 초기 누출율과 reopen time과의 관계.....	13
그림 3. Jet에 의한 전열관 표면에서의 손상현상.....	14
그림 4. Wastage에 영향을 미치는 여러 인자들의 효과.....	22
그림 5. 미량 누출 실험 장치.....	24
그림 6. 시편 표면에서의 halos 현상.....	26
그림 7. SEM 사진으로부터 얻어진 누출 시편의 표면 특성.....	28
그림 8. 누출 시편의 Auger 분석 및 화학 조성 변화.....	29
그림 9. 누출 시편의 Ar 가스 압력 테스트 결과.....	31
그림10. 물 누출에 의한 반응기 내부의 압력 상승.....	31
그림11. 초기 누출량과 reopen time과의 상관 관계 및 본 실험 결과.....	33
그림12. 누출 경로가 완전 개방된 시편 표면(나트륨 부위).....	34
그림13. 누출 부위 내부 모습.....	35
그림14. 물 누출 실험 후 시편 절단면에서 누출 경로의 모습.....	36
그림15. IPPE 유동 나트륨 루프와 물 누출 부위.....	39
그림16. 물 누출 장치의 세부 모습.....	40
그림17. 표6에서 수행된 실험 8, 9번 시편의 표면 모습.....	43
그림18. 표6에서 수행된 실험 17, 18번 시편의 표면 모습.....	45
그림19. 시간 경과에 따른 누출율 변화 모습(실험8).....	47
그림20. 시간 경과에 따른 누출율 변화 모습(실험17).....	47
그림21. 소듐 온도에 따른 2.25Cr-1Mo 시편의 incubation time.....	50
그림22. 2.25Cr-1Mo 시편의 누출율과 self-wastage time과의 상호관계.....	51

제 1 장 서 론

나트륨을 냉각재로 사용하는 액체금속로의 증기발생기에서 물 누출로 인한 나트륨-물 반응은 매우 격렬하여 반응속도가 매우 빠르고, 반응결과 증기발생기의 내부에 고온과 고압의 상태가 됨으로서 증기발생기의 구조적 안전성에 문제를 야기킬 수도 있음이 일반적으로 알려져 있으며, 따라서 액체금속로의 2차 계통을 설계하는 경우에는 반드시 나트륨-물 반응에 의한 압력과 온도의 영향을 고려하여야 한다 [1-2]. 나트륨-물 반응에 관한 연구는 1955년경 미국의 Fermi원자로의 증기발생기의 설계를 위하여 APDA에서 single-wall 증기발생기에 대하여 연구가 시작된 이래 많은 연구가 수행되었으며, AI에서도 1956년부터 modular형태의 증기발생기에 대하여 누출 시험을 수행하여 압력을 분석하였다.

이러한 초창기 연구에서는 대규모 누출 사고가 발생한 후 증기발생기 내부의 압력 변화를 거시적인 측면에서 주로 연구를 수행하였으나, 후에 증기발생기의 내부를 검사한 바, 다수의 증기 발생기(SG)의 전열관이 파손되어 있었으며, 파손되지 않았다고 하여도 전열관의 두께가 감소되어 있음을 발견함으로써 물이 누출된 곳 부근에서 주변 전열관의 손상, 이른바 wastage가 발생하였고 이것이 대규모 누출로 발전되었다고 결론 지음으로서 wastage에 관한 관심이 높아지기 시작하였다[3-5].

그후 1960년대 말부터 여러 가지 물 누출 사고에 대하여 많은 실험과 연구가 수행되었고, 특히 미국의 APDA에서는 나트륨-물 반응에 관한 폭넓고 깊은 연구 결과 wastage 및 원자로 정지의 criteria를 설정하게 되었다[6]. 또 실험결과로부터 1차 누출의 결과, 인접 전열관의 2차 파손에 이어 큰 사고로 발전하는 경우에 대비한 여러 가지 대책설비, 대책방안이 모색되어야 한다는 결론을 얻게 되었다. 이러한 미국의 나트륨-물 반응에 관한 연구는 1970년대 초반까지 이어졌는데, 그때 이후의 연구 개발 과제로서 소규모 누출 시에는 감지 장치의 개발이, 대규모 누출 사고인 경우에는 누출로 인한 2차 계통의 압력 및 온도의 영향을 코드에 의하여 해석함으로써, 사고의 진행 추이 평가가 우선적으로 지적되고 있다.

유럽에서는 1960년대부터 나트륨-물 반응에 관한 연구가 시작되었으며, 영국의 경우 1963년 PFR의 증기발생기 설계를 위하여 Dounery에 1/6 규모의 Noah test설비

를 건설하여 많은 연구결과를 얻었으며 이를 토대로 Super-Noah로 발전시켜 대규모 실험에 관한 연구를 수행하였다[7]. 특히 1978년 PFR의 대규모 누출사고 이후에 물의 누출량과 전열관의 파손규모가 새롭게 정의됨으로서 설계 누출량의 재평가, PFR 증기발생기의 모델 시험 등 나트륨-물 반응 해석에 많은 공헌을 하기도 하였다[8]. 프랑스에서도 독자적으로 1965년이래 Phenix원자로의 증기발생기 개발 위하여 많은 연구가 수행되었으며, 규모는 이 증기발생기가 modular 형태임으로서 규모를 축소하지 않고 그대로 사용하였는 바, 이를 기초로 하여 Super-Phenix의 증기발생기 설계를 위하여 많은 연구가 수행되었다[9,10].

러시아에서도 SN-300 및 SN-600을 설계하기 위하여 IPPE연구소를 중심으로 나트륨-물 반응에 관한 많은 연구를 1990년대 중반까지 수행하여 왔다[11]. 이곳에서는 대개 두 방향으로 수행되었는데, 하나는 소규모 누출 관련으로 시간에 따른 누출율의 변화를 실험적으로 관찰하고 반응부위에서 부식현상에 대한 물리·화학적인 기초자료를 상세히 얻고자 하였으며, 다른 하나는 대규모 반응의 경우 코드해석은 물론 이를 실험으로 입증하고자 약 시간당 2000톤의 순환 능력을 가진 나트륨-물 반응장치를 건설하기도 하였다.

현재 원형로인 Monju를 가지고 있는 일본에서는 증기발생기의 설계를 위하여 1/8 규모로서 대규모 누출 사고의 시험을 시작하여, 이를 1/2.5 규모까지 확대하여 안전성을 확인하였다. 그 후 Monju의 증기발생기 계통의 증기 조건에 맞도록 증발기(evaporator)와 과열기(superheater)분리형의 개발, 신 재료의 채용, 일체형, 관류형 증기발생기 쪽으로 초점을 맞추어 연구가 계속되었다. 이러한 나트륨-물 반응에 관한 연구는 1980년대 중반까지 비교적 활발히 계속되었으나 그 이후 연구의 경향이 감소하면서 최근에는 이 반응에 관한 기초 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며, 다만 누출의 감지 장치의 개발이 주로 연구되고 있다고 하겠다[12,13].

근래에 와서 일본의 전력중앙연구소에 의하여 Monju와는 전혀 다른 개념의 MDP형 원자로에 대한 혁신 개념을 제안하고, 여기서 물-나트륨 반응의 연구를 활발히 수행하고 있다[14]. 그러나 이곳의 경우에서도 사용된 기초 자료는 대개 Monju의 SG설계를 위하여 연구되었던 자료를 사용하여, 대규모 누출 사고에 대한 경우를 주로 다루고 있으며, 사고 후 원자로 등의 구조 전전성에 대한 연구 결과들만 발표되고 있다.

우리 나라에서도 1994년부터 칼리머(KALIMER, Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 개념설계를 위한 증기 발생 시스템의 기반 기술을 확립하고 설계자료 등을 획득하기 위해서 나트륨-물 반응에 관한 연구가 시작되어 다음의 세 분야로 나뉘어 연구가 진행되어 왔다[15].

물 누출의 감지시스템의 개발 :

물 누출 사고 방지의 처음 단계는 물의 누출이 초기에는 소규모로 일어나, 이것이 대규모로 확대되어 가기 때문에, 초기 단계에서 이를 감지하여 대규모의 누출 사고까지 발전하기 전, 누출을 감지하는 시스템의 활용이다. 누출 장치로서는 니켈 등의 금속박막(Ni-membrane)을 사용하여 나트륨내의 수소농도를 감지하는 hydrogen diffusive detection system[16]과 누출 시 발생하는 음향을 감지하는 acoustic detection system을 개발의 대상으로 하고 있다[17]. 전자의 경우는 장치의 개발보다는 시스템의 개발이 주목적이 될 것이며, 음향누출 시스템은 장치와 감지된 음향으로부터 누출의 여부를 판단하는 software의 개발이 목표이다.

소규모 누출의 확대 전과해석 :

위에서 설명한 물 누출 감지 장치가 완벽하게 작동하지 않을 경우도 있으며 또는 작동한다고 하여도 물 누출의 조건에 따라서는 감지하여 나트륨-물 반응 대책 설비가 작동하기 전에 대규모로 확대되기 때문에 대규모의 누출 사고에 대한 대비를 설계 시 반드시 고려하여야 한다. 이의 처음 단계는 확대되는 경우에 물 누출량의 예측이다. 물의 누출량은 초기 소규모의 누출규모와 그 확대 과정에 의하여 결정되는 것으로 알려지고 있으며, 이를 위하여 누출의 과정이 완전히 이해되고 또 정량적으로 해석될 수 있어야 한다.

대규모 누출 시 압력 및 온도의 영향 해석 :

대규모로 물이 누출되면 많은 양의 열과 수소가 발생하기 때문에 2차 계통에 높은 압력이 발생하게 되고 구조적 안전성의 문제까지 야기 시킨다. 특히 2차 계통에서 제일 취약 부분인 중간 열 교환기의 전열관의 건전성에 문제를 발생시킨다. 따라서 2차 계통의 모든 부분에서 누출의 진행과정 동안 압력과 온도의 변화를 예측할 수 있어야 하며, 이로부터 2차 계통의 안전성의 확보를 예측할 수 있다. 이 압력과 온도의 변화는 2차 계통, 증기발생기 및 나트륨-물 반응 시 발생하는 압력의 개방 시스템 (SWRPRS)에 영향을 많이 받기 때문에 압력의 영향을 해석하기 위하여

이들의 영향을 고려하여야 하며, 역으로 해석에 의한 이들 시스템의 압력영향을 최적화 할 수 있다. 이의 해석은 보통 전산 코드로서 이뤄지며 이 전산 코드의 개발과 이들의 검증이 부분의 연구 목표이다.

본문에서는 원자력 중장기 연구 과제인 “소듐 기술 개발” 연구의 한 부분으로 추진되어온 나트륨-물 반응 해석분야에서, 소규모 누출에 의한 누출 전파 현상 해석을 위해, 극 미량 물 누출에 의한 실험 및 해석을 통해 액체 나트륨 분위기에서 발생하는 누출 특성을 해석하고 이를 누출 전파 현상 해석을 위한 기초 자료를 얻고자 하였다.

제 2 장 물 누출 현상에 대한 기술 현황

1. 서언

액체금속로에서 냉각재로 사용되는 나트륨은 물리·화학적으로 물과의 반응성이 매우 뛰어나 증기발생기의 설계시 안전성 측면에서 중요하게 취급하고 있으며, 아주 극 미량이라도 물과 반응하는 경우, 나트륨-물 반응의 특이성에 의해 중대사고로 연결된다는 점에서 중요하게 다루어지고 있다. 또 나트륨-물 반응에 대한 중요성이 기존의 다른 노형 증기발생기 설계에서와 달리 중요시 취급되는 이유는, 다른 원자로형의 경우 냉각재로 물(중수 혹은 경수)이 주로 사용되기 때문에, 물 누출에 따른 2차 적인 피해의 우려가 적은 반면에, 액체금속로의 경우 액체 나트륨에 고압으로 유지되어 있는 steam(혹은 물)이 누출될 경우, 나트륨-물의 급격한 화학반응으로 발생하는 반응열에 의한 시스템 내의 온도상승과 반응 후 생성되는 수소가스에 의한 압력상승, 또 나트륨-물 반응에 의해 누출부위의 재질을 신속히 손상시키는 등, 이러한 현상이 발전하여 누출을 확대 진전시킴으로서, 누출 규모가 확대된 소규모, 대규모의 누출로 발전됨으로써, 대형사고의 가능성이 상존하기 때문이다.

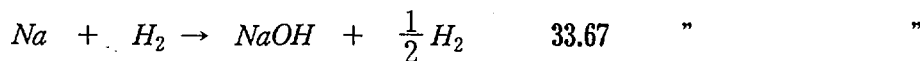
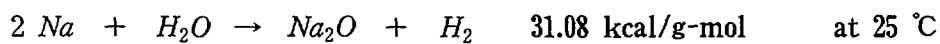
나트륨-물 반응특성에 대한 이제까지의 연구들을 보면, 기본적으로 나트륨-물 반응에 대한 연구를 기초로 해서, 증기발생기내에 고압으로 유지되어 있는 steam(물)이 나트륨 부위로 누출되는 물 누출에 관련된 연구가 주를 이루고 있으며, 증기발생기의 재질과 관련된 material 관련 연구[18], 물 누출이 발생하였을 경우 이를 감지할 수 있는 감지기술 관련 연구[19], 그리고 나트륨-물 반응으로 발생하는 반응 생성물중 수소가스에 의한 압력상승 및 relief system에 관한 연구[20], 누출이 발생하였을 경우 누출부위의 특성을 파악하는 연구 등으로 매우 넓은 분야에 걸쳐 연구가 이뤄지고 있으나, 각국에서 보유하고 있는 원자로의 상이성, 이에 따른 나트륨-물 반응장치 및 실험상의 복잡성에 의해, 보고된 각 실험 데이터나 실험 결과들이 서로 다른 경우가 대부분이고, 몇몇의 경우는 아예 실험의 결과가 상반되는 경우도 있는 것으로 파악되고 있다.

2. 나트륨-물 반응

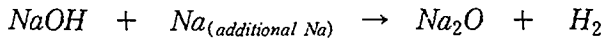
나트륨과 물의 반응은 화학적인 측면보다 안전성 관점에서 중요하게 취급되고 있으며, 반응 생성물로는 수소, Na_2O , NaOH , NaH 등을 형성한다. 이들 중 어느 성분이 얼마만큼 존재하는가는 나트륨이나 H_2O 의 조성비, 계 내의 온도와 압력 조건에 따라 매우 복잡하게 구성된다. 나트륨과 물의 반응은 급격한 발열반응으로, 수소 가스의 발생과 더불어 부식성 alkali 화합물들이 용융되어 일부는 나트륨 증기로 발생된다. 따라서 나트륨 증기가 물이나 수증기 또는 공기중의 산소와 반응하여 다량의 반응열을 발생하기도 한다. 또 반응에서 발생한 수소 가스와 공기중의 산소가 반응해서 연소열을 발생하기도 한다. 이러한 반응결과 고온, 고압의 상태가 되고 부식성의 반응 생성물인 Na_2O , Na_2O_2 , NaOH 등으로 구성된 연기(fume)를 형성한다[21].

일반적으로 나트륨과 물의 반응에 대한 연구는, 반응 속도론(reaction kinetics) 분야와 Na-O-H 계에서의 열역학적 특성 규명, 부식과 마모에 대한 연구, 반응 시 유체의 역학적 현상과 각종 성분 에 대한 분석 장치와 분석 방법에 대한 연구가 대부분을 이루고 있다. 먼저 반응 화학적 측면을 보면 반응물들이 정량적으로 이상적인 상태에서 반응이 일어난다고 가정하면 이때 반응은 순식간에 일어난다. 그러나 실험적으로 이렇게 이상적인 상태를 얻기는 매우 어렵기 때문에, 반응 속도를 측정하는 것이 쉽지 않으며 반응물의 혼합 속도와 반응물들간의 접촉면적을 함수관계로 해서 표시하는 방법이 제시되고 있다.

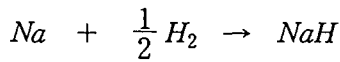
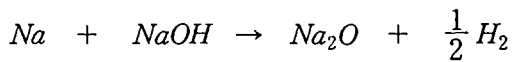
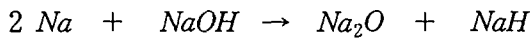
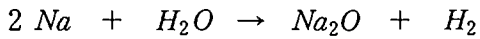
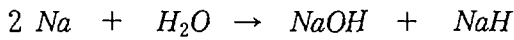
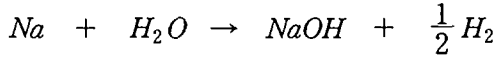
대체적으로 반응 속도에 영향을 주는 인자로 반응물의 표면적, 반응 driving force, 반응 zone에서의 혼합상태, 반응물의 비율, 반응물의 상태(phase), 반응 실험 장치의 구조 및 크기, 초기 조건, 기타 등의 영향을 받는 것으로 나타났다. 먼저 나트륨-물의 반응 화학 방정식은



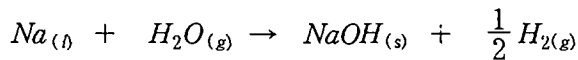
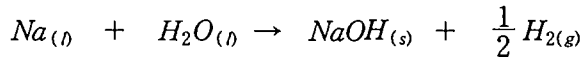
와 같은 반응이 주로 일어난다[22]. 그러나 상기 반응은 반응 온도에 따라 $\text{NaOH}_{(s)}$ 의 용융점 이상에서는



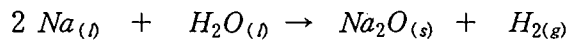
와 같은 반응이 2차 적으로 일어나게 된다. 한편, 상온에서 나트륨-물 반응이 일어날 수 있는 화학 방정식은



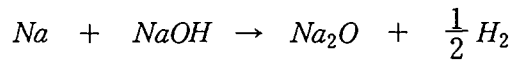
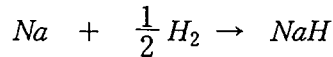
와 같은 반응 방정식의 가능성이 있으며, NaOH의 용융점 이하에서는 나트륨-물 반응의 비율에 관계없이



의 반응이 일어난다. 과잉 나트륨의 존재 하에서 그리고 반응 온도가 NaOH의 용융점 이상에서는



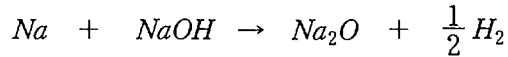
의 반응이 주로 발생하고, 2차적인 반응으로



의 반응이 일어나는 것으로 보고되고 있다[23]. 한편 반응온도가 액체금속로 내의 통상 운전온도인 770K 부근에서 일어나는 나트륨-물 반응인 경우



의 반응이 일어나는 것으로 보고되어 있으며, 증기발생기안의 평균 온도를 750K로 가정할 경우 과잉 나트륨 하에서는 반응온도가 NaOH의 용융점 이상이기 때문에

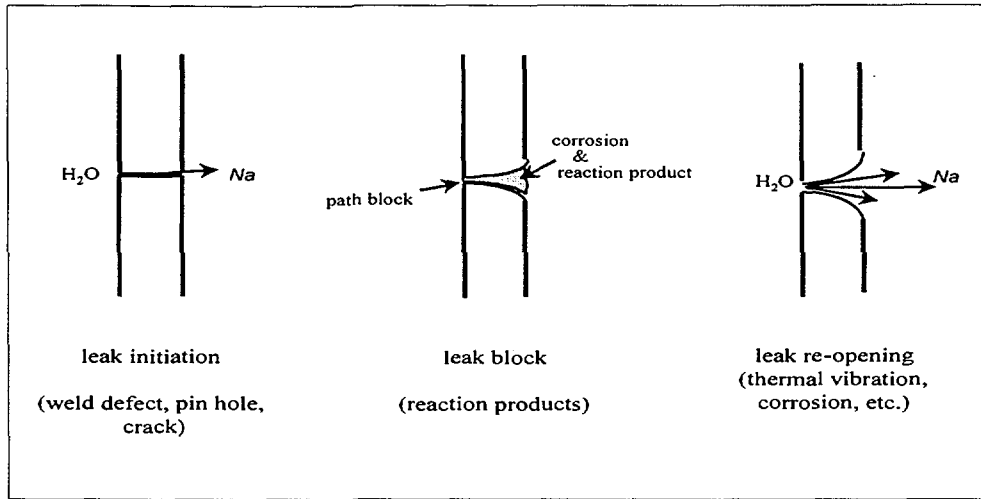


의 반응이 부분적으로 일어날 수 있다.

3. 극 미량 물 누출 현상의 해석

고압으로 유지되어 있는 steam(혹은, 물) 부위에서 누출이 일어날 가능성은 증기발생기의 가공 및 제작 시 결함에 의해 특정 부위에서의 부식이 가속화되거나, stress corrosion, 전열관 재질의 cracking이나 pin hole의 가능성, fatigue등에 의해 항상 가능성이 상존하며, 극 미량의 steam이나 물이 누출될 가능성이 있다. 이 때 steam 부위의 압력이 거의 150~200 bar 정도로 고압이기 때문에 steam이 나트륨부위로 누출되면서 나트륨-물 반응이 발생하게 되고, 이러한 나트륨-물 반응은 증기발생기시스템을 구성하고 있는 조건에 따라서 복잡한 반응 방정식에 의해 나트륨-물 반응생성물과 반응열, 그리고 수소가스를 발생시켜 최종적으로 시스템 내의 압력을 증가시키고, 나트륨-물 반응에 의한 부식과 반응생성물의 erosion현상에 의해 wastage 현상을 발생하는 것으로 발전할 수 있다.

이러한 현상은 누출되는 steam이나 물의 양, 증기발생기의 구조, dimensions, 전열관의 배열, 운전조건, leak hole의 조건, 기타 등에 의해 다르게 나타나며, 누출되는 누출량에 따라 일본의 Monju나 영국의 PFR의 경우를 보면 표 1과 같이 구분하고 있다. 일반적으로 누출량이 0.05 g/sec 이상인 경우, 누출 point에서 jet flame을 형성하여 신속히 인근 전열관에 영향을 미치지만, 그 이하인 경우 전열관의 누출 point에서 나트륨과 물(혹은 steam)이 반응해서 고온 반응생성물과 나트륨-물 반응생성물에 의한 erosion에 의해, 소위 "self-wastage" 라는 현상을 야기시켜[24], 전열관 자체의 defect를 가중시키는 결과를 초래할 수 있다. 이처럼 self-wastage가 진행되는 동안 전열관은 그림 1과 같은 메커니즘에 의해 누출 point가 enlargement 되는 것으로 알려져 있다[25].



Incubation	Self - Erosion		
<p>Na</p> <p>H₂O</p>	<p>Na</p> <p>H₂O</p>	<p>Na</p> <p>H₂O</p>	<p>Na</p> <p>H₂O</p>
<ol style="list-style-type: none"> Through crack choked by sodium/water reaction product Material corrosion ; <ol style="list-style-type: none"> general and intergranular corrosion, intergranular cracking (Incoloy 800) general corrosion (ferric steel) Blind detection means 	<ol style="list-style-type: none"> Clearing of the crack due to material weakening and/or to an alteration of the stress state Appearance of a leak proportional to the extent of the corrosion that took place during the incubation state 	<ol style="list-style-type: none"> Internal crack erosion and formation of a fairly conical pit The leak rate increases, remains constant, or decreases, but always remains below 100 mg/sec. The leak can be traced by hydrogen measurement in the sodium 	<ol style="list-style-type: none"> Breaking down of the metal between the cone apex and the tube inner wall, formation of a fairly cylindrical hole with a few -millimeter diameter The leak rate increases suddenly

그림 1. 누출 경로의 self-plugging 과 reopen 메커니즘.

표 1. 물 누출량의 구분 및 누출에 의한 영향

Classification	Water leak rate		Major effect
	Monju	PFR	
micro leak	~50 mg/sec	< 0.1 g/sec	self-wastage
small leak	50mg~10 g/sec	0.1g~10 g/sec	single target wastage
intermediate leak	10 g~2 kg/sec	10g~ 1 kg/sec	multi-target wastage overheating
large leak	2 kg/sec~		pressure increase

이 경우 발생하는 현상의 특성은 반드시 나트륨부위에서 손상이 시작되어 steam(물) 부위에 큰 halos [전열관이 열(heat)등의 defect에 의해 크게 무늬형태를 나타내는 현상]을 형성하는데[26], 이는 나트륨-물 반응으로부터 고온의 반응열이 전열관을 열화시킴으로써 발생하는 것으로 추측된다. 나트륨-물 반응이 진행되면 전열관의 두께에 도달할 때까지는 누출의 양은 변하지 않다가 어느 critical point를 지나게 되면 급격한 누출을 증가를 기록하게 되고, 결국 극미량 → 미량 → 소규모 → 대규모 누출로 발전하게 된다.

일반적으로 plugging 되었던 crack이나 pin hole이 re-opening되기까지의 시간을 통상 "incubation period"로 부르며, 어떤 경우 700~1300 시간 정도까지 보고되어 있는 경우도 있으며[27], incubation 기간동안 나트륨-물 반응에 의한 부식과 반응생성물에 의한 erosion현상이 동시에 공존하는 것으로 알려져 있고, 또 이러한 현상은 시편으로 사용된 전열관 재료의 조성, 반응온도, leak의 shape, 나트륨의 유동 여부, 기타 등의 변수에 따라 매우 다르기 때문에, 이제까지 나타난 연구에 의하면 정확한 self-wastage에 관련된 방정식은 거의 없는 상태이고, 다만 시편에서 leak point 주위의 재질에 대한 defect를 관찰하여 특성을 해석하는 정도에 그치고 있는 실정이다.

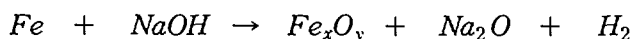
한편, micro-leak가 발생하는 경우 누출부위가 plugging 되거나 re-opening 되는 메커니즘은 크게 두 가지로 설명되고 있는 데, 먼저 초기 누출율이 10^{-2} g-H₂O/sec 이하인 경우 나트륨-물 반응에 의해 self-plug되는 경향이 강하게 나타나고, 이러한

현상은 물이 누출되자마자 나타나는데 최초 물과 반응하여 반응생성물인 NaOH를 형성하여 이것이 leak point를 sealing시킴으로써 물의 누출을 방지하는 역할을 한다. 이러한 현상은 시스템내의 disturbance가 일어나지 않는 경우 아주 느린 속도로 diffusion되어 아무런 변화를 느끼지 못하게 된다. 그러나 어떤 열 적인 transient가 발생하면 전열관이 팽창하게 되어 NaOH 주위로 물의 누출을 허용하게 되고, 아주 느린 속도지만 나트륨-물 반응에 의해 생성된 anhydrous caustic이 material을 공격하게 되고, 만약 aqueous solution인 경우 매우 빠른 부식 현상을 초래한다.

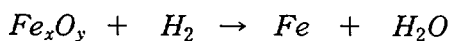
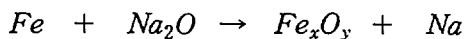
Defect로 들어간 물은 상기 그림 1에서처럼 chamber 형태까지 들어가서 반응생성물들이 wall을 공격하게 되지만, 물이 누출되는 양이 어느 한계 값을 갖고 있기 때문에, defect의 확대되는 것은 제한적일 수밖에 없다. Aqueous caustic에 의한 전열관 wall의 공격에 의해, 물이 누출되는 동안 leak path를 계속적으로 open시키려 하고, 또 steam(water)에 의해 plugged (or sealed)되었던 반응물을 dissolution시킴으로써 물의 누출을 다시 허용하여 re-opening되는 과정이 발생하게 된다.

또 다른 plugging 메커니즘은 orifice의 부분적인 blockage를 야기시켜 orifice 출구에 metallic plugs를 형성하는 경우이다. 나트륨 속에 5 wt.% 이상의 산소가 존재하는 경우 재료의 부식 속도는 매우 빠르기 때문에, Fe가 나트륨 속에 용해되어 Fe 침전물(precipitate)을 형성하고 이것이 colder exit region에 porous 하게 plugging시킨다는 메커니즘을 고려할 수 있다[28].

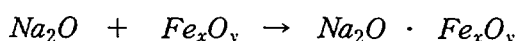
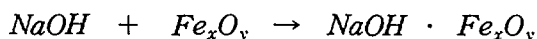
즉, 일례로 전열관 재질이 2 1/4 Cr - 1 Mo steel의 경우 전열관의 구성 성분 중 Fe와 NaOH가 반응하여



와 같은 1차 반응을 형성하고, 여기서 생성된 Na₂O는 Fe와 다시 반응하여



와 같은 2차 반응으로 연결되어, 최종적으로



와 같은 복잡한 반응에 의해 나트륨과 철이 혼합된 침전생성물이 형성되어 plugging을 야기시키는 것으로 해석하는 경우도 있다.

한편, 나트륨-물 반응 생성물이나 재질의 부식에 의해 누출 path가 plugging 되었던 것이, 상기에서의 복합적인 원인에 의해 reopen되는 경우 순간적으로 어느 규모 이상의 큰 누출이 발생되기 때문에, 누출 초기부터 reopen시까지 걸리는 시간을 측정하는 실험이 많은 나라에서 수행되었다. 각국 실험장치의 상이성과 실험조건에 따라 많은 차이를 보이지만 각국의 유사한 실험 결과를 분석해 보면, 그림 2처럼 나타난다. 그림 2는 미국, 러시아 및 프랑스에서 실험한 결과를 종합해서 나타낸 것으로, 누출율에 따라 0.1 g/sec 이하일 경우 reopen에 걸리는 시간은 약 10^4 sec 정도 인 것을 알 수 있으나, 이것은 일반화된 관계식으로부터 구한 것이 아니며, 실제 일부 실험의 경우 이보다 더 빨리 reopen되었거나 혹은 아주 leak path가 plugged된 경우도 있다.

4. Wastage 현상

(1) 개요

고압으로 유지되어 있는 steam(물)이 나트륨 부위로 누출되는 경우 누출의 규모가 소규모일지라도 나트륨-물의 격렬한 반응에 의해 jet flame을 형성하게 되며, 이 들로부터 인접한 전열관에 영향을 미치는 것을 해석하게 되는 데 통상 “wastage” 라는 terminology를 사용하게 된다. 이러한 wastage에 관해서는 여러 나라에서 많이 연구는 되어 있으나, 실험장치와 실험조건 등의 상이성으로 서로 다른 결과들을 나타내고 있다. 만약 고압으로 유지된 steam(물)이 pin hole 등과 같은 구멍을 통해 누출되는 경우 jet stream을 형성하게 되고, 그 jet의 구조는 시스템을 구성하고 있는 조건에 따라 여러 가지 형태로 나타낼 수 있으며, 나트륨-물 반응에 의한 부식과 반응생성물에 의한 erosion에 의해, 발생하는 인근 전열관에 미치는 영향은 그림 3처럼 jet의 길이에 따라 서로 다른 양상을 보인다[29].

Wastage 관련 연구에 의하면 wastage rate에 영향을 미치는 인자로 물 누출을,

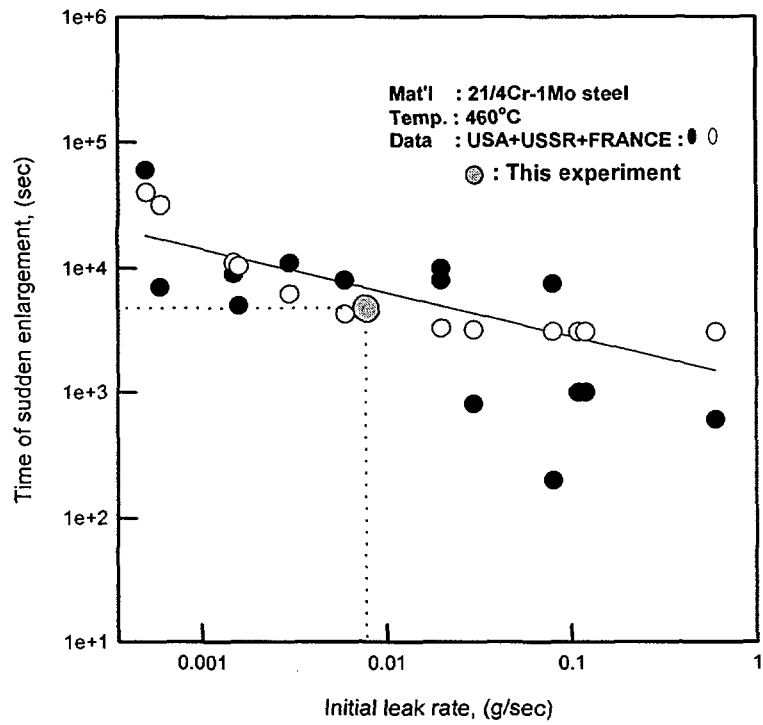


그림 2. 미량 누출에서 초기 누출율과 reopen time
 과의 상호 관계.

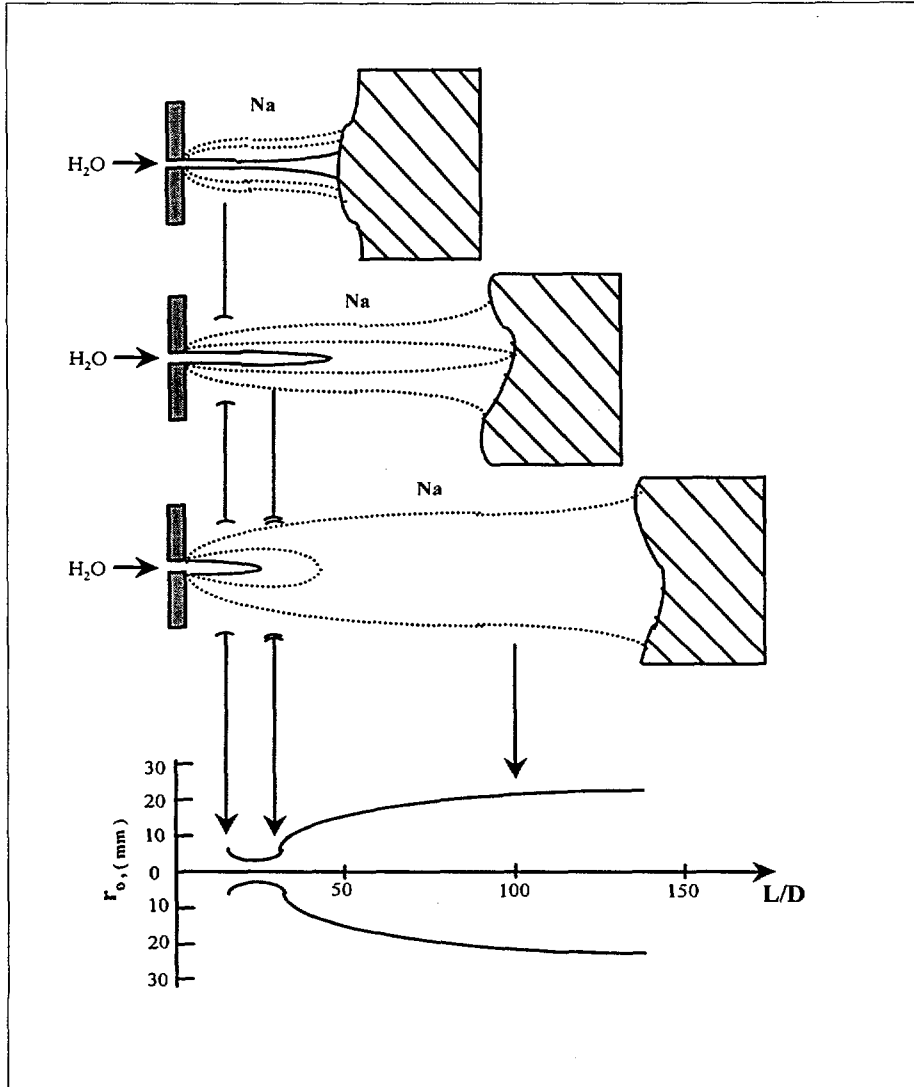


그림 3. Jet에 의한 전열관 표면에서의 손상 현상.

누출기간, 누출 point와 전열관과의 거리, 나트륨의 유동속도, 누출되는 물의 압력과 온도, 나트륨 온도, 전열관의 재질, 누출되는 위치 등으로 언급하고 있으나, 상기에서 언급했듯이 각 연구자들의 실험 데이터를 보면 상기와 같은 실험 조건들이 서로 상이하기 때문에 서로 다른 결과들을 나타내고 있는 것이다.

(2) Wastage에 영향을 주는 인자

온도의 영향 :

나트륨의 온도와 wastage rate는 Arrhenius식의 형태로 나타내었으며

$$W_R = \exp \frac{(K_1 - K_2)}{T_N}$$

와 같이 표현된다. 여기서 T_N 은 나트륨의 온도, K_1, K_2 는 상수로서 경험적으로 사용하는 방정식이다. 이 방정식은 이론적으로 나타낸 식이 아니기 때문에 상기에서 언급한 나트륨-물 반응시 jet flame의 구조로부터 온도를 계산하고, 이에 따른 wastage rate와 온도와의 함수관계를 유도하여 본 바, 위의 Arrhenius식과 유사한 형태의 방정식이 유도됨으로써 상기 식을 wastage rate에 관한 일반적인 방정식으로 사용하고 있다[30].

누출량의 영향 :

물 누출량 역시 wastage에 영향을 주는 주요 인자로, 앞에서 언급했듯이 누출량이 증가함에 따라 wastage rate에 최대 값을 나타내다가 그 이상 누출량이 증가하여도 wastage rate는 더 이상 증가하지 못하고 도리어 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 여러 연구자들의 경우와 동일한 경향을 나타내고 있다.

Leak point와 target간의 거리 :

시편과 leak point와의 거리는 wastage rate 방정식에서 가장 중요한 인자의 하나로 알려져 있으며, 이제까지 보고된 여러 연구들에 의하면 공통적으로 나트륨-물 반응의 test 조건이 동일한 경우 wastage rate는 L/D의 값에 따라 어떤 최대 값을 갖고 있으며, 그 이상의 누출이 진행되어도 wastage rate를 증가시키지 못하는 것으로 나타나 있다. 어떤 critical spacing보다 먼 경우는 나트륨-물 반응에 의한 부식과 jet의 erosion에 의한 wastage rate는 감소하고, 만약 spacing이 일정한 경우에는 동일한 결과를 나타낸 경우도 있다.

나트륨의 유동여부 :

Wastage 관련 실험으로부터 얻어진 데이터를 분석해 보면, 나트륨-물 반응 시스템내의 나트륨을 유동시키는 경우가 static의 경우보다 실험 데이터들의 재현성이 좋은 것으로 나타나 있고, 실험의 결과 값들이 static의 경우보다 높은 값을 보이고 있으나 scattering이 심하게 나타난다. 또 유동시키는 상황이라도 실제 유동을 및 유동시키는 방향이 leak point에서의 jet의 방향과 순방향인가 또는 역 방향인가에 따라서도 wastage rate는 다르게 나타난다.

Leak fluid phase의 영향 :

누출되는 유체의 상태(phase)에 따라서도 wastage rate에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 누출 당시 압력이나 온도에 따라서 jet stream의 phase는 liquid, vapor, mixture의 경우가 달라지며 GE의 실험 데이터를 보면 누출되는 양이 적은 경우 vapor에서 liquid로 변화되면 wastage rate 곡선은 높은 쪽으로 shift되는 것을 나타내고 있다. 일반적으로 누출이 liquid 상태인 경우가 vapor 상태인 경우보다 wastage rate는 4~10 배정도 증가되는 것으로 보고된 예도 있으며, 3 g/sec 미만의 경우는 무시한다.

시편의 composition :

Wastage rate는 시편의 조성 중 Cr, Ni의 함량이 증가할 수록 감소하는 것으로 알려져 있다. 나트륨-물 반응에 의한 반응 jet의 erosion과 부식에 의한 전열관의 저항성은 wastage rate W_R 의 역수($R = 1/W_R$)로 정의한 후, Cr과 Ni의 weight %를 함수로 2 1/4 Cr - 1 Mo steel을 기준으로 하여

$$\frac{W(Cr-N)}{W(2.25Cr-1Mo)} = (1.8044 - 0.0172 N) \exp[-0.0905] Cr$$

와 같은 방정식에 의해서 각 alloy의 저항성 R을 구하여 표 2에 간단히 나타내었다 [31].

그러나 다른 대부분의 연구자들에 의하면 wastage rate에 직접 영향을 미치는 성분은 Cr의 함량에 대한 함수라고 보고하고 있는데 반하여, 상기의 wastage rate correlation 방정식은 Ni을 주 함수로 하여 correlation한 경우로, 대부분의 데이터들이 Cr의 함량에 따라 어떤 함수관계가 있는 것처럼 보이며, 실제 일부 연구자들의 경우도 상기 correlation한 방정식도 Cr의 함량에 대한 함수로 나타낼 경우, 상기

에서 구해진 각 데이터들의 값들이 좀 더 정확한 값을 보일 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 나트륨-물 반응에 의한 재질의 부식 저항성

Items	Composition	Resistance (R)
Ferrite	2 1/4 Cr - 1 Mo	1
	9 Cr - 1 Mo	1.2
Austenite	18 Cr-11 Ni-2.5 Mo	3.1
	20 Cr-33 Ni- Mn	4.0
	Nickel	5.2
나트륨온도 : 900 ℃ , Pressure : 1 atm, Vapor의 온도 : 150 ℃, 나트륨의 velocity : 240 m/sec		

Leak duration :

Leak가 유지되는 시간 즉, duration에 대한 영향은 체계적으로 연구되어 있지 않으나 Chamberline등에 의하면 누출율이나 spacing에 비해서는 덜 중요하게 취급되고 있으며, leak에 대한 duration이 증가할 수록 leak rate가 0.0011~0.0023lb/sec 범위 내에서는 미세하나마 wastage rate가 증가하는 것으로 나타났으나, 이와 관련된 실험 data 수가 충분하지 않아 정확히 예측한 보고는 없다.

(3) Wastage 실험 결과

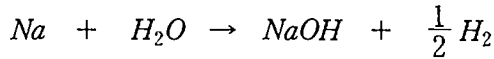
시편의 표면관찰 :

시편의 표면관찰 결과는 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 L/D의 함수로 wastage는 어떤 최대 값을 갖고 있는 것을 알 수 있으며, L/D의 값이 적은 경우 누출되는 point에서의 jet의 flame이 시편 표면에 미치는 영향이 A point처럼 다소 거리를 두고 영향을 미치다가 L/D의 값이 증가할 수록 그 거리는 점차 가까워지면서, 어떤 최대 값을 갖게 되고, L/D의 값이 이 값을 넘게 되는 경우 wastage rate는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 앞의 그림 하부에서 볼 수 있듯이 L/D의 값이 적은 경우 시편의 표면에 닿는 jet flame의 모양은 그림 상부처럼 될 것이고, 점차 중간 그림처럼 되어 어떤 최대 wastage rate를 기록하다가 하부 그림처럼 jet flame

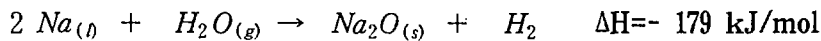
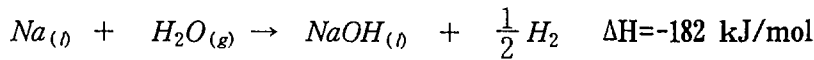
이 퍼지면서 시편에 주는 영향은 점차 감소하는 것으로 해석하고 있다.

Leak point에서의 온도 :

나트륨과 물의 반응은 격렬한 발열반응이기 때문에 나트륨-물 반응에 의한 wastage현상의 발생 시 반응 jet zone에서의 최고 온도는

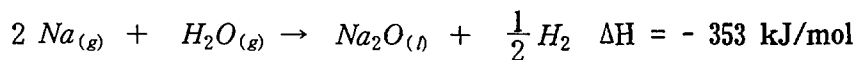
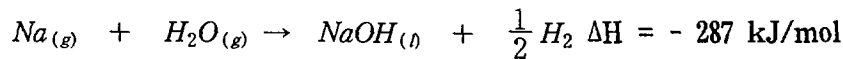


반응에 의해서 주로 언급되고 있으며, 누출의 형태나 유량, 기타 다른 요인이 변화 되어도 1663 K를 넘지 않는 것으로 알려져 있다.

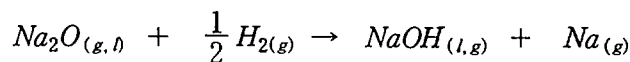
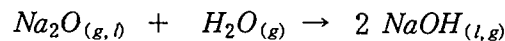


의 반응이 동시에 일어나며, 평형상태에서 두 반응생성물의 생성 비율은 JANAF table로부터 추측이 가능하지만(상대적인 자유 에너지를 고려), liquid mixture의 경우 정확한 분석은 반응의 복잡성 때문에 불가능하다. 이러한 제한된 조건하에서는 700 K 미만에서는 NaOH, Na₂O, NaH의 혼합물이 생성되며, 700 K와 나트륨의 비점 사이에서는 NaOH가 주된 생성물인 것으로 해석하였다.

그러나 NaOH와 Na₂O는 Na보다 비점이 높기 때문에 상대적으로 덜 volatile하고, 먼 저 비점에 도달한 Na 가스가 dominate 하기 때문에



의 반응에 의해 앞의 방정식 보다 높은 온도의 smoke로서 반응생성물이 얻어진다. 상기의 4개의 방정식으로부터 생성된 solid와 liquid가 혼합된 반응생성물은 2차 적 으로 water vapor와 반응하여



와 같이 고온의 비점을 갖는 NaOH를 생성함으로써 온도를 상승시키는 요인이 되는 것으로 알려져 있다.

Reaction zone의 온도 :

Leak point에서 발생하는 나트륨-물 반응에 의한 jet flame의 온도를 측정하였으며, 측정 방법은 시편인 전열관 벽이나 반응 zone에 직접 온도 감지기를 장착하여 측정하거나, wastage에 의해 전열관이 손상을 입은 것을 관찰해서 간접적으로 측정하는 방법이 사용되었으나, 측정된 결과들이 많이 scattering되어 있어서 정성적인 연구는 불가능한 것으로 보고되어 있으나, Chamberline등에 의하면 jet에서 최고온도는 실험조건에 따라 달라지며 평균 1150 ± 200 °C의 범위를 보이고 있다[32].

Wastage pattern :

Small leak에 의한 나트륨-물 반응은 주로 전열관에서 pin-hole, crack등에 의해 발생하며 인접 전열관에 failure를 야기시킨다. 이 분야에 대한 연구는 지난 70년대 초부터 미국의 APDA에서 연구가 시작된 이래 영국, 러시아, 독일, 프랑스, 일본 등 여러 나라에서 수행되었으며, wastage mechanism에 대한 이론적인 연구도 동시에 진행되었다. 일례로, 일본의 경우 Monju 증기발생기의 안전설계를 위해 소규모 누출시 나트륨-물 반응에 대한 연구가 PNC에서 1972년부터 SWAT-2 실험장치에서 수행되었는데 PNC의 SWAT-2 초기실험은 나트륨온도, target 재질, 누출율 등이 wastage pattern에 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구를 수행하였으며, 그 후속 연구로서 nozzle-to-target 간의 거리, 누출부위diameter, steam 누출율이 wastage rate 및 wastage pattern과 주변 다른 전열관에 미치는 영향 등이 파악되었다[33].

Nozzle-to-target간의 거리를 17.5 mm, 나트륨온도를 480°C로 고정시킨 후 2 1/4 Cr-1 Mo steel을 사용하여,

$$W_R = 252 \exp -\left[0.255 \left(\ln \frac{G}{5.12} \right)^2 + \frac{5460}{T_N} \right]$$

식을 사용하여 실험을 수행하였다.

이 실험으로부터

① Nozzle-to-target간의 거리 효과 : Wastage rate와 nozzle-to-target간의 관계로부터 wastage depth는 누출되는 nozzle size를 일정하게 한 경우, 최대 wastage rate는 nozzle-to-target간의 거리가 20~40 사이에 나타난다.

- L/D ≥ 40 인 경우 wastage rate는 L/D가 증가할 수록 감소한다.
- L/D ≥ 150 인 경우 wastage현상을 관찰할 수 없었다.
- L/D ≤ 20 인 경우 wastage rate는 L/D가 20~40 사이에서 보다 작게 나타

나며, wastage pattern은 torroidal type으로 나타났다.

② Wastage depth curve : Wastage 전열관의 단면은 error curve로 나타난다. Small leak jet 반응 zone의 모양과 free jet의 반응 zone 모양이 유사하다고 가정하여, wastage depth profile curve를 다음과 같이 유도하였다.

$$l = l_0 \exp \left(- \frac{r^2}{b} \right)$$

한편, 위 방정식을 적분하여 wastage area의 volume과 weight loss W_L 를

$$V_w = \pi \cdot b \cdot l_0, \quad W_L = \pi \cdot b \cdot l_0 \cdot \rho$$

와 같은 식으로 유도한 경우도 있다.

(4) Wastage 방정식

Wastage 방정식에 자주 사용되는 변수들로는 나트륨의 온도, 누출량, 누출 point와 전열관과의 거리(spacing)등이 주로 사용되며, 사용된 재질은 주로 9 Cr-1 Mo steel, 304 stainless steel, 2 1/4 Cr-1 Mo steel 등이 주로 실험에 많이 사용되었다.

표 3에 각 연구자에 의해 보고된 2 1/4 Cr-1 Mo steel의 wastage 방정식을 간단히 표기하였다.

이상에서 본 바와 같이 wastage rate에 영향을 미치는 인자들에 대해서 각국에서 보고된 발표를 토대로 간략히 언급해 보았는데, 이를 간단히 종합해 보면 표 4, 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4는 wastage rate에 영향을 미치는 주 인자로 leak rate를 취하고 이에 따른 각종 다른 인자들의 영향을 표시한 것으로 재질, 나트륨 온도, target 간의 거리, 나트륨 유속, phase, leak hole의 shape등에 따라 정성적으로 어떠한 변화를 나타내는가를 보여주고 있으며, 정량적인 데이터(즉, wastage 방정식)는 일부를 제외하고는 알려지지 않고 있다.

표 3. 2.25Cr-1Mo steel에 대한 wastage 방정식

Name	Wastage Equations	Remarks
Lee	$W = 15120 e(-) \{1.408 \ln(1.22 q / (LXP^{1/2})) \ln(134 / (T_{Na}^{0.352}))\}$	steam 0.1 < q < 1 P = P _a
Anderson	$W = 0.206 q U (d/x)^2$	
Ford	$W = 111(q)^{0.785}$	water 0.001 < q < 0.1 lb/sec
Nei	$W = 252 e(-) \{0.255 \{\ln(q/5.12)\}^2 + 5460/T_{Na}\}$	steam, 17 mm Na 0.24 m/sec dia.: 0.3-0.7mm
Kanegae	$W = 4400/L e(-) \{0.255 \{\ln(q/5.12)\}^2 + 5460/T_{Na}\}$	steam state 270 < T _{Na} < 530 0.07 < q 0.2 < d < 1.5
Payne	$W = 4400/L e(-) \{0.255 \{\ln(59.8q/L^2)\}^2 + 5460/T_{Na}\}$	steam, water 10 < L/D < 40 0.1 < q _s < 10 1.0 < q _w < 100
Greene	$W = 81.6 d^2 - 12 d + 0.45$	steam 0.25 < q < 4
Anderson	$W = 15120/L e(-) \{0.255 \{\ln(3.42q/L)\}^2 + 5460/T_{Na}\}$	steam 10 ⁻² < q _s < 10 L: 12mm
	$W = 3.08 e(-) \{0.666 \{\ln(0.72q/L^{1/2})\}^2\}$	water T _{Na} : 350 q _w < 3 6.35 < L < 25.4

표 4. Wastage에 영향을 미치는 주요 인자들의 일반적인 경향

Na temp.	Na velocity	H ₂ O temp.	H ₂ O quant.	Target dist.	Wast. Rate
↗	-	-	-	-	↗
-	↗	-	-	-	↘
-	-	↗	-	-	↗
-	-	-	↗	-	↗
-	-	-	-	↗	↘

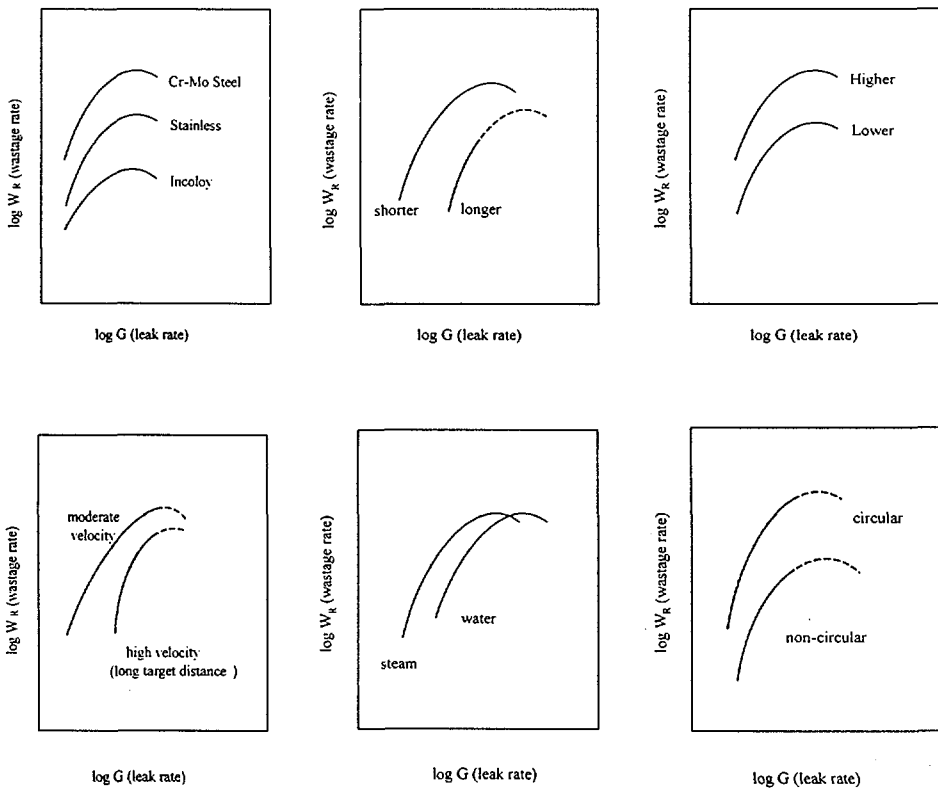


그림 4. Wastage에 영향을 미치는 여러 인자들의 효과.

제 3 장 소규모 물 누출 실험 및 현상 해석

1. 실험장치

액체 나트륨 용량 약 3L의 반응 장치를 그림 5와 같이 제작하였다. 실험장치는 액체 나트륨 저장조, 나트륨-물 반응기, 물 누출을 위한 injector와 그 부속물로 구성되어 있으며 나트륨의 melting 및 온도 상승을 위해 각 반응기 외부에 절연 heater를 사용하였으며, 나트륨의 이송 라인도 모두 보온 및 가열 장치를 설치하였다. 원하는 누출 압력을 만들기 위해 Ar 가스를 이용하여 가압하였으며, 물 누출시 발생하는 수소가스를 배출하기 위해 반응기 상부에 vent system을 장착하였다. 한편 물 누출기는 5Cr-1Mo steel을 사용하여 제작하였으며, 시편 물질의 조성은 표 5와 같다. 시편의 제조는 약 ϕ 30mm X 5 mm 직경의 원판에 0.15mm의 구경을 갖도록 Arc 방전을 이용해서 hole을 낸 후 press를 이용해서 약 8 Ton/cm²의 압력으로 압착한 후 leak hole이 crack으로 작용하도록 가공하여 시편으로 사용하였다.

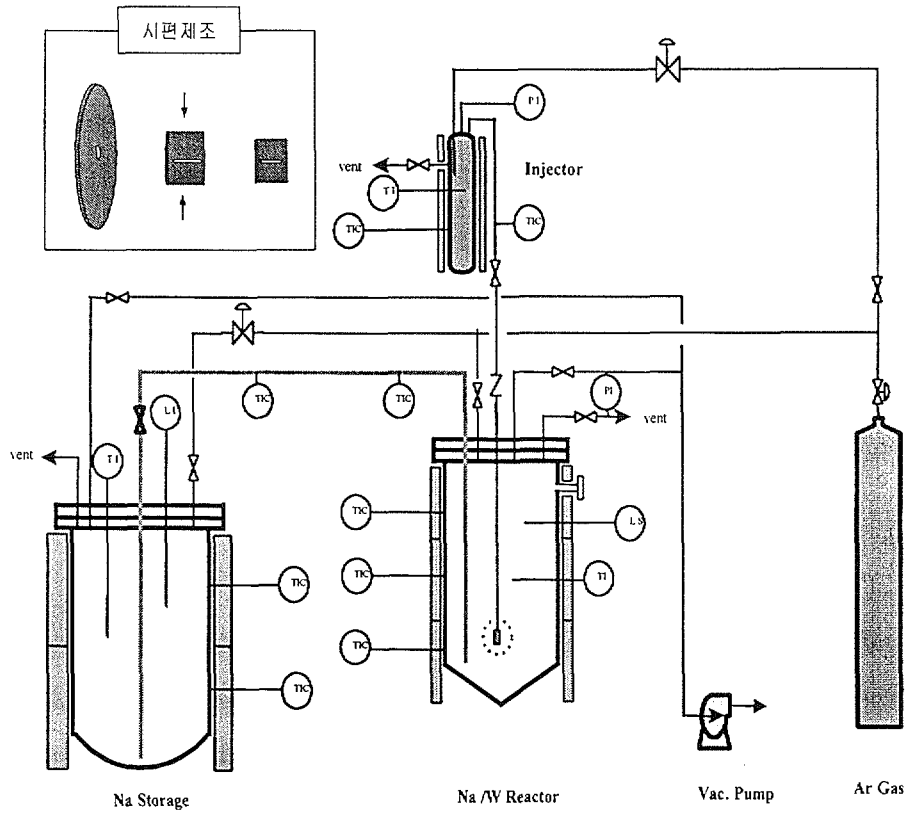
표 5. 5Cr-1Mo steel 시편의 화학 조성

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

2. 실험 방법

나트륨은 상온에서 고체상태(대부분 brick상태로 보관)이기 때문에 이를 상기의 나트륨 저장조에 인입한 후 외부 가열로 저장조의 고체 나트륨을 용융시킨다. 저

장조에 설치된 외부가열기를 이용하여 나트륨을 용융시키며 나트륨은 melting되면



시편제조 방법

5Cr-1Mo steel plate
초기 누출 hole : 0.15mm → Press : 9 ton/cm² → Fabrication

그림 5. 미량 누출 실험 장치.

서 약 2.7 vol %의 부피 증가를 가져오기 때문에, 먼저 저장조 상부를 가열하여 고체 나트륨을 melting시킨 후 하부를 가열시키는 방법을 사용한다. 나트륨 저장조의 가열이 진행되는 동안 나트륨 이송 라인과 반응기 내부, 증류수가 들어있는 물 누출기를 가열하여 실험준비를 한다. 시편은 반응기 내부에 미리 장착하여야 하며, 원하는 반응 조건이 완료되면 액체 나트륨 저장조와 반응기를 연결하고 있는 중간 밸브를 열고 나트륨 저장조에 Ar 가스를 인입하여 가스 압력을 이용하여 melting된 액체 나트륨을 반응기로 이송시킨다.

물 누출 실험은 물 누출기와 시편이 연결된 중간 밸브를 열면서 시작되며, 누출기의 수증기가 injection되는 동안 반응기 안에서는 나트륨-물 반응에 의해 반응열과 수소가스를 발생시켜 반응기 내의 압력이 상승되는데 이는 별도 설치된 vent system을 이용하여 방출시킨다. 반응기 내부의 온도, 압력 및 기타 실험 결과들을 기록하고 실험이 완료되면 상기에서 설명한 역순으로 액체 나트륨을 저장조로 이송하고 반응기의 온도를 서서히 낮춘 후 시편을 인출하여 분석을 수행한다.

3. 분석

시편의 분석을 위해 상기에서 인출된 시편은 Ar 가스로 충전된 bottle에 넣고 분석을 위해 보관한다. 시편은 광학현미경과 SEM을 이용하여 시편의 물 누출부위에서 반응생성물과 누출 부위를 관찰하였으며, 재질의 부식상태를 관찰하기 위해 AES(Auger electron spectroscopy, Fision사, ESCALab 220i, 영국)를 이용하여 원소 분석을 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

(1) 누출부위의 반응특성

고온의 액체 나트륨분위기에서 시편을 통해 물(스팀)이 누출되면 나트륨-물 반응에 의해 온도가 상승하게 되고 반응생성물이 형성되어 누출 경로를 막는 현상이 발생되고, 누출경로를 중심으로 주변에 halos(고온의 반응열에 의해 누출경로 주변

이 열화되는 현상)를 형성하게 된다. 본 실험에서도 이러한 현상이 발생되었으며, 그림 6에 간단히 나타내었는데, 이는 고온, 고압의 물(스팀)이 누출경로를 따라 연

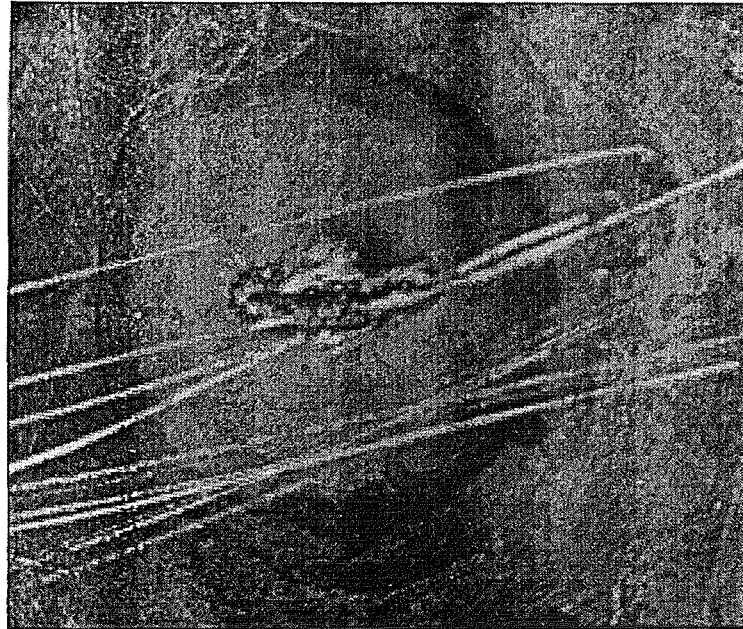


그림 6. 시편 표면에서의 halos 현상.

속적으로 penetration되는 것을 확인시켜 주는 것으로, Greene 등에 의해 아주 간단히 언급되었던 실험결과와 아주 유사한 것으로 예측되지만, 초기 누출크기와 halos의 크기에 어떤 상관 관계가 있는지는 유추할 수 없었다.

한편, 상기 그림 6의 누출시편의 표면을 자세히 관찰해 보면, 그림 7의 아래와 같이 나타난다. 시편의 누출 경로는 아직 reopen된 상태는 아니지만 시편표면에 나트륨-물 반응 생성물인 나트륨 산화물로 예측되는 입자들이 붙어 있는 것이 확인되

었으나, 누출부위에서 부식현상을 육안으로 판단할 수 없었다. 또, 동일한 시편을 200배로 확대해 누출부위 주변을 관찰하여 그림 7의 상부에 나타내었다.

시편의 외부(나트륨 side)를 나타낸 것으로 반응생성물들이 누출 경로를 따라 생성되어 있는 것을 확실히 보여주고 있는데, 이는 상기 Greene등이 주장한 견해에 비추어 보면 누출경로를 통해 물(스팀)이 penetration되면서 최초 나트륨과 접촉하게 되고 이때 나트륨-물 반응생성물인 Na_2O 나 NaOH 등의 반응생성물이 형성되고 이들이 미세한 누출경로를 막고 있는 것으로 예측이 가능하다.

누출부위에 대한 시편재질의 부식특성을 확인하기 위해 시편의 표면을 AES로 분석하여 그림 8에 간단히 나타내었다. 이는 시편의 누출 부위 주변을 5 point로 구분해서 각 point마다 AES를 측정 한 것으로 C, Fe, O, Cr, Mo, Ni등의 원소분석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림 8을 보면 누출부위를 중심으로 P1-P5에서 C의 peak가 상당히 높게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 누출부위 확대 사진에서 보면 미세 hole에 있던 나트륨이 시료의 전처리과정에서 공기중의 CO_2 와 반응하여 Na_2CO_3 가 생성된 것으로 예측된다.

또 다른 가능성은 시편의 누출 경로가 완전 reopen되지는 않았지만 미세하나마 스팀이 배출되어 나트륨-물 반응이 발생하고, 이때 발생된 반응열에 의해 시편중의 C가 탄화되어 누출부위 주변에서 segregation된 경우를 예상할 수 있다. 이는 시편의 반응부위에서 ferrite steel 조성 중 C 성분의 변화가 P1에서 P2, P3, P4, P5로 멀어질수록 점점 줄어드는 경향으로부터도 추측이 가능한데, 전자의 경우가 높은 가능성이 있을 것으로 예측된다. 한편 Fe의 경우를 보면 P1, P2에서 보다 상대적으로 P3, P4, P5에서 높은 조성을 나타내었다. 이는 누출경로에서 물(스팀) 누출이 진행되면 나트륨-물 반응에 의한 반응열이 발생되는데, 이로 인해 P1, P2 부위에서 온도가 상승하게 되고 이 경우 나트륨-물 반응생성물인 NaOH 나 Na_2O 가 시편의 Fe와 반응하여 철산화물이 생성되면서 segregation되는 것으로 예측된다.

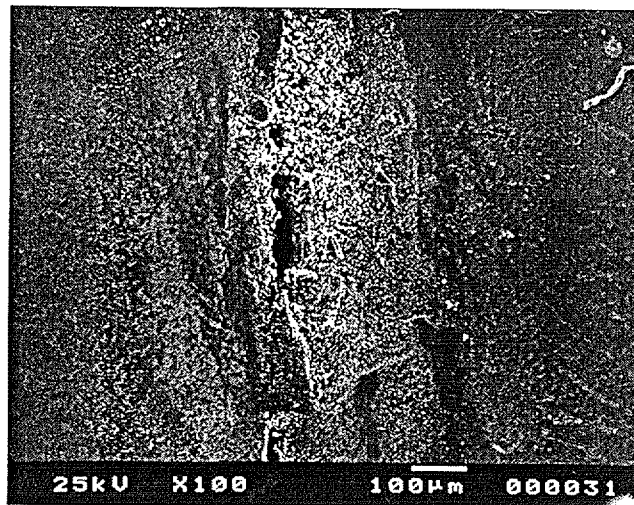
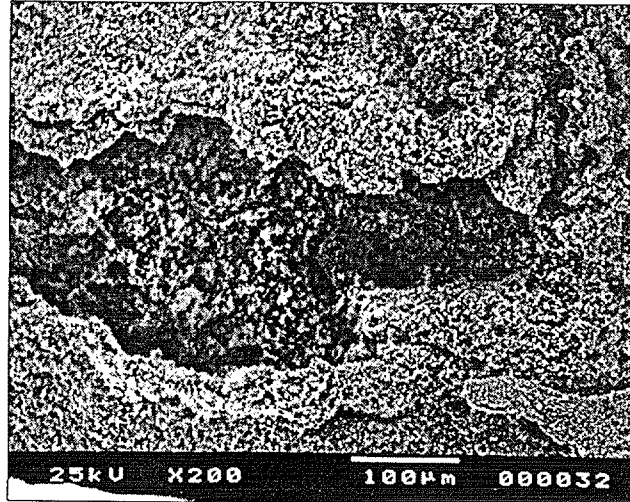


그림 7. SEM 사진으로부터 얻어진 누출 시편의 표면 특성.

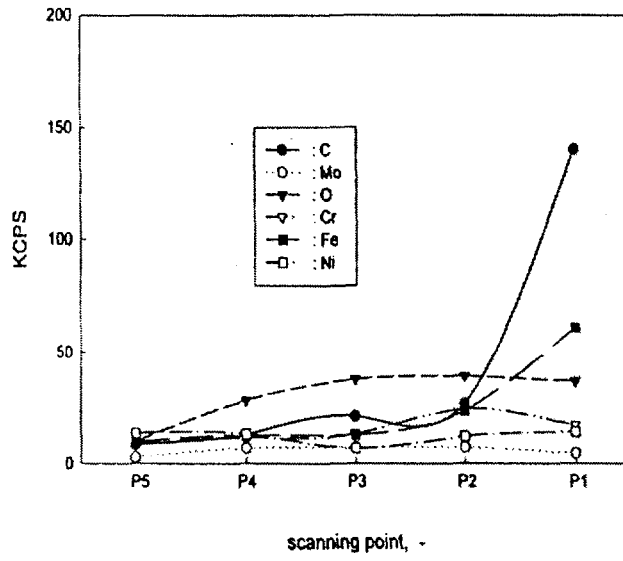
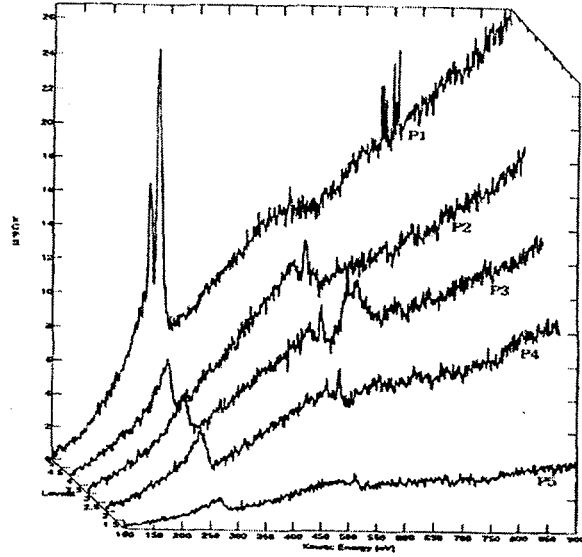


그림 8. 누출시편 표면의 Auger분석 및 조성 변화.

(2) 누출특성

먼저 누출 시편에서 물(스팀)이 누출되는지를 확인하기 위해 나트륨 분위기에서 Ar 가스를 이용해서 blank test를 수행하였다. 그림 9에 시편에서 누출되는 정도를 압력강하로 표시한 것인데 누출된 양은 반응기에 부착된 압력 gauge로부터 관찰되며 누출된 양은 500 psig이상의 압력에서는 거의 일정한 경향을 보이기 때문에, 실제 물(수증기) 누출 압력을 600 psig로 결정하였다. 물 누출 실험은 물 누출기에 약 10 ml의 증류수를 가한 후 400°C로 외부 가열하여 super saturated steam을 제조한 후, 외부에서 Ar 가스로 600 psig로 맞춘 다음 누출기 외부에 장착된 가열기를 이용하여 500°C가 유지되도록 하였다.

누출실험은 시편과 누출기 중간 밸브를 open시켜 물 누출이 진행되면서 시작되는데, 시편의 crack부분으로 누출되는 압력과 반응기 내부에서의 압력 변화를 측정하여 그림 10에 간단히 나타내었다. 그림 10의 상부는 시간이 경과함에 따라 누출기에서 나타내는 압력 강하를 보여주고 있으며, 하부는 반응기 내부에서 나타나는 압력 상승을 보여주고 있다. 그림을 보면 밸브를 열고 물 누출이 진행되면 초기 약 몇 초 이내에서 약간의 변화를 보이고 있는데, 약 10초의 경우를 보면 누출기의 압력 강하는 미미하게 나타나는 반면 반응기 내부의 압력상승은 약 10 psig 정도 상승된 것으로 관찰되었는데 이는 고압의 스팀이 밸브를 열자마자 나타나는 현상으로 누출경로는 아직 plugging되지 않았던 것으로 예측되지만 그 후 나트륨-물 반응생성물에 의해 누출경로가 급격히 sealing된 것으로 해석된다.

계속해서 약 15분 경과될 때까지 반응기 내의 압력은 변하지 않는 것으로 보아 leak path가 물 누출에 의한 나트륨-물 반응생성물에 의해 self-plugging된 것을 간접적으로 알 수 있었으며, 22-23분 경에 약간의 압력변동에 의한 reopen현상의 발생 흔적이 있으나, 이러한 현상은 압력의 급격한 변화가 없이 70분까지 계속 유지되었다. 그러나, 이 시기에 물 누출기의 압력이 약간 떨어진 것이 관찰되어(그림의 상부 참조), leak path가 잠시 미량이나마 open되어 있음을 간접적으로 추측할 수 있었다.

약 129분이 경과하자 물 누출기 및 반응기에서의 압력강하와 압력상승이 거의 동시에 갑자기 발생되어, 누출경로가 완전 reopen된 것으로 추정되었으며, 반응기의 폭발성을 고려하여 압력 vent 밸브를 열어 반응기 내의 압력을 해소시켰다.

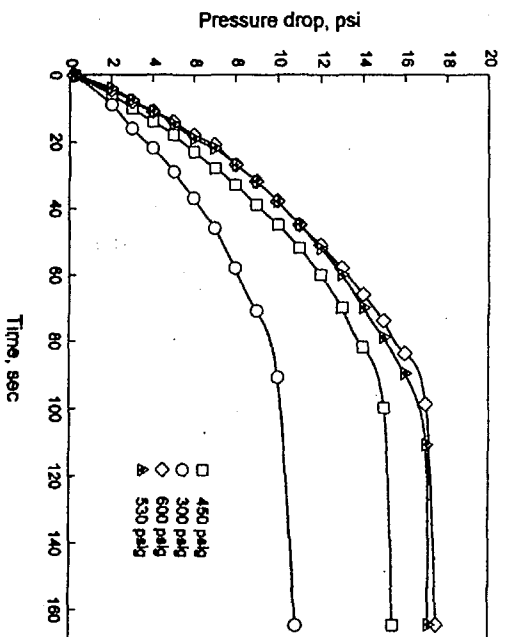


그림 9. 누출 시편의 AR 가스 압력 테스트 결과.

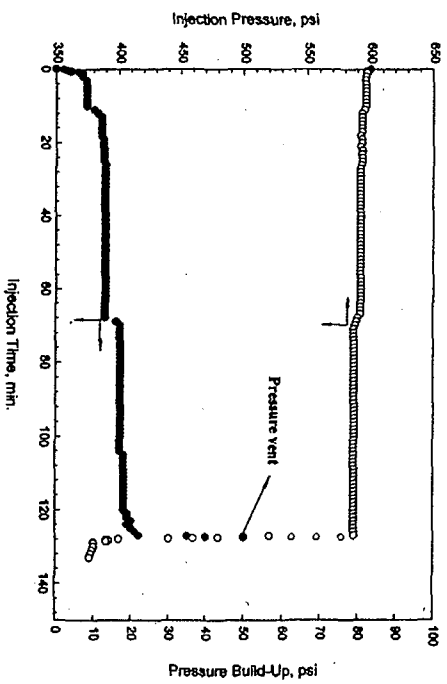


그림 10. 물 누출에 의한 반응기 내부의 압력 상승.

(3) Reopen time

미량의 물(스팀)이 전열관에서 발생되면 누출크기가 아주 미세한 경우 나트륨-물 반응생성물에 의해 누출경로가 막히는 self-plugging이 발생된다. 이러한 self-plugging은 어떤 열적인 transient나 튜브의 vibration등에 의해 sealing된 바깥 부위에서 반응생성물이 재용해, 또 반응생성물과 누출되는 물에 의해 나트륨-물 반응의 재발생, 발열반응으로 인한 온도상승과 나트륨-물 반응생성물인 부식성이 강한 NaOH와 다시 반응하여 누출부위가 부식되는 현상이 반복적으로 발생된다. 이제 까지 발표되었던 외국의 실험 결과들에 의하면 50 mg/sec이하의 물 누출인 경우 대부분 누출경로가 reopen되지 않는 경향이 많은 것으로 보고되어 있으며, 그 이상의 경우라도 전열관 재질에 따라 달라지지만, 우리가 고려하고 있는 2.25Cr-1Mo steel의 경우 그림 11과 같은 경향을 나타내는 것으로 조사되었다.

그림 11은 액체금속로 선진국인 미국, 프랑스, 러시아 등에서 발표된 자료들 중 동일한 재질로 유사 실험조건에서 실험한 결과를 수치로 얻어 본 연구에서 수행된 실험과 비교해 나타낸 것이다. 모든 결과들을 correlation 해보면 그림에서 보는 것처럼 누출량이 증가하면 reopen time은 줄어드는 경향을 나타내고 있으며, 본 실험의 결과는 평균값보다 약간 낮은 수치를 나타내고 있다. 이는 사용된 재질의 조성이 각국에서 나타낸 재질의 조성과 약간 다른 것이 주원인일 것으로 추측되며, 실제 각국에서 발표된 실험 조건도 약간의 상이함이 있기 때문으로 생각되나, 이러한 상황을 종합적으로 해석해 보면 본 실험의 결과도 상당한 타당성을 나타낸다 하겠다.

(4) Reopen size

서론에서 언급한 대로 전열관에서 물 누출로 인한 안전성 확보 및 안전성 평가 기술을 개발하는 것이 매우 중요하게 대두되는데 일반적으로 사용되는 것이 안전성 평가 코드이다. 안전성 평가코드를 구성하는 프로그램은 각국의 상황에 따라 상이하나 프로그램에 입력되는 기본 변수들 중에는 본 연구에서 다루고 있는 reopen time을 비롯해서 reopen size, 모양 및 부식속도 등을 들 수 있다. 상기에서 설명한 누출특성을 확인하기 위해 또 다른 시편을 이용하여 누출 실험을 수행하였다. 실험 조건은 동일한 조건으로 수행되었으며, 그림 12에 10 ml의 물을 가열하여 포화수증

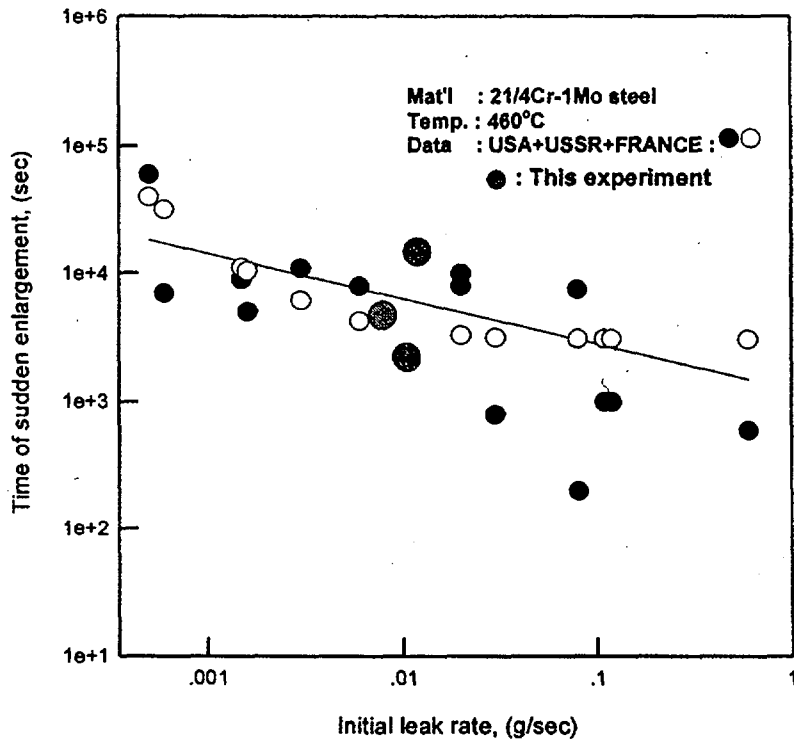


그림 11. 초기 누출량과 reopen time과의 관계
 및 본 실험 결과.

기를 만든 다음 600 psig의 압력으로 실험을 수행한 후 인출된 시편의 나트륨 side SEM 사진을 나타내었다. Reopen point를 중심으로 직경 약 2mm 정도의 circular type의 hole로 reopen 된 것을 알 수 있다. 한편, 누출 경로가 어떤 형태를 나타내는지 분석하기 위해 시편을 cutting 하여 SEM 사진을 관찰하였다.

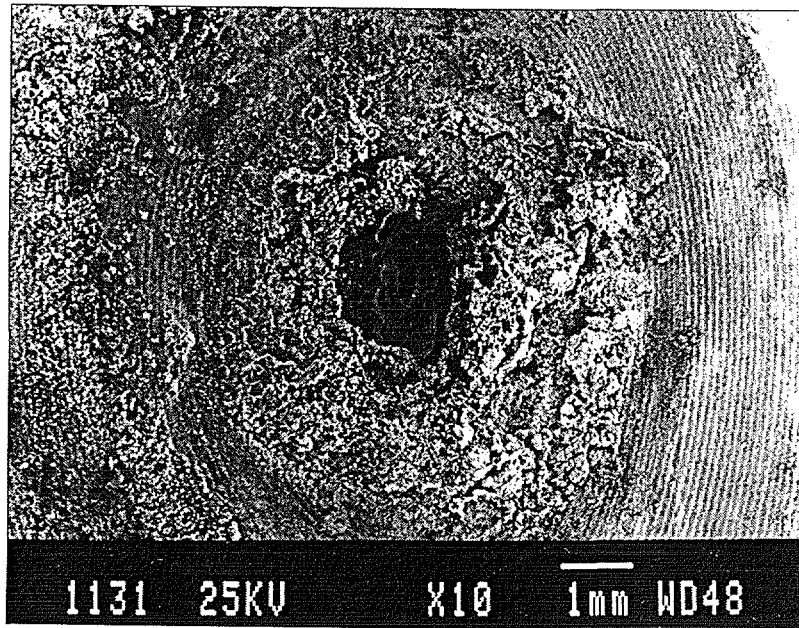


그림 12. 누출 경로가 완전 개방된 시편 표면(나트륨 부위).

누출 시편의 두께는 약 3mm로 최대한 스팀 부위에 근접하여 diamond saw를 이용하여 cutting 한 경우로 스팀 부위에서는 부식이 진행된 흔적은 육안으로는 발견할 수 없었다. 이것으로부터 실제 증기발생기의 전열관에서 crack이나 미세 pin-hole등에 의해 미량의 물 누출이 발생되면 전열관 재질의 부식은 나트륨 부위에서부터 시작됨을 알 수 있다. 한편, 상기 그림 12를 자세히 관찰해 보면 시편의 나

트롬 side 표면보다 그 내부에 표면에서보다 더 작은 누출 hole을 발견할 수 있는데, 이를 자세히 관찰하기 위해 SEM의 inverted image 기법으로 누출부위를 촬영하여 그림 13에 나타내었다.

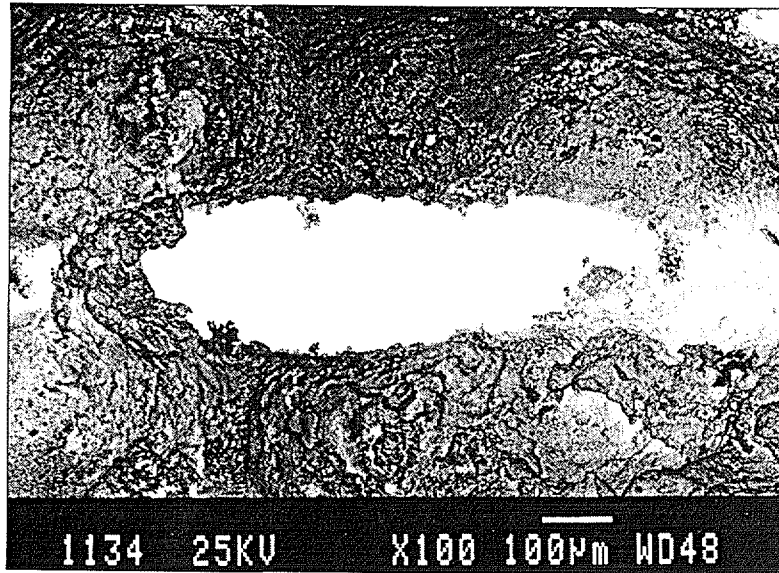


그림 13. 누출 부위의 내부 모습.

중앙의 흰 부분으로 나타난 것이 시편의 중간부위에서 실제 누출이 진행된 누출 hole로 예측된다. 이 hole size를 보면 상기 그림 12의 나트롬 side 에서 reopen 된 size나 상기 그림 6의 halos size보다 훨씬 적은 값을 보여주고 있지만, 다음에 설명할 그림 14의 스티프 side에서 size와 비교해 보면 훨씬 커진 것을 알 수 있다.

한편, 시편의 두께에 따라 누출경로에서 부식이 진행되는 정도를 파악하기 위해,

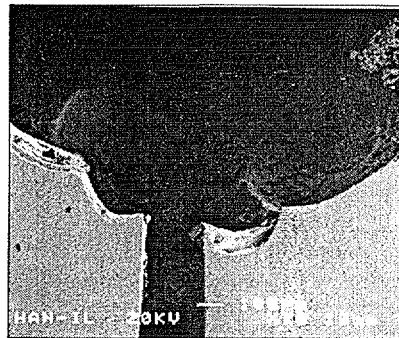
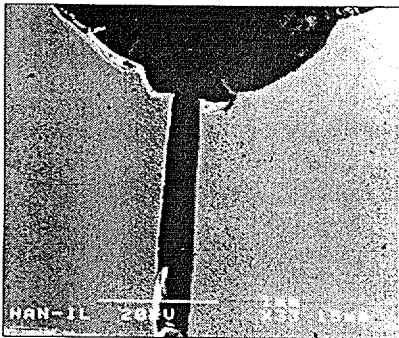
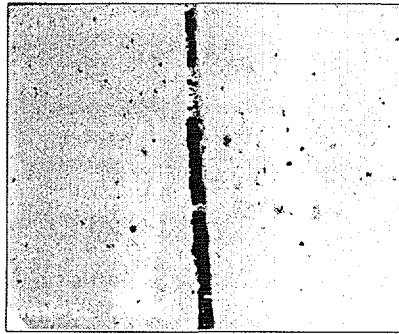
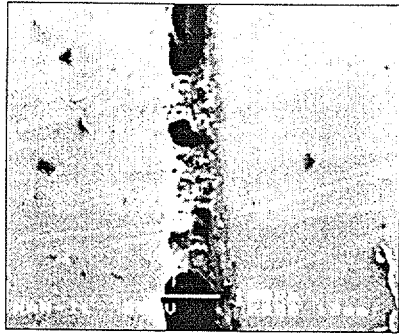


그림 14. 물 누출 실험 후 시편 절단면에서 누출 경로의 모습.

누출시편을 세로로 cutting한 다음 표면을 연마하여 SEM으로 촬영하여 그림 14에 간단히 나타내었다. 그림 14의 ㉓는 시편을 통해 나트륨 부위로 물이 누출되기 전의 상태로 약 70~80 μm 의 누출경로를 나타내고 있으며, ㉔는 ㉓를 확대한 그림으로 누출경로가 부분적으로 blocking되어 있음을 알 수 있다. 나트륨부위로 물 누출이 진행되어 누출경로가 re-open된 후 시편의 누출경로에 대한 그림이 ㉕로서 상부 쪽이 나트륨 쪽을 나타내고 있다. 나트륨부위 쪽에서 나트륨-물 반응에 의해 재질이 부식되어 시편이 떨어져 나간 것을 알 수 있으며, 아직까지 누출경로 전체가 damage를 입지는 않은 것으로 판단된다.

그림 14의 ㉕는 ㉕부위를 확대한 그림으로서 부식으로 떨어져 나간 시편 표면의 속을 보면 부식생성물들이 많이 침적되어 있는 것을 알 수 있다.

4. 유동 나트륨에서의 물 누출 실험

(1) 개 요

한국형 고속증식로인 KALIMER의 개발을 위한 프로그램이 1990년대 중반부터 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 액체금속로의 증기발생기 안전성 평가분야에서 연구 현황을 파악해 보면, 일반적으로 물 누출에 의해 발생하는 나트륨-물 반응 메커니즘 해석, 반응으로 발생하는 재질과의 부식특성 해석, 반응생성물인 수소 gas와 열에 의한 압력영향 평가 및 조기에 물 누출을 감지할 수 있는 시스템의 개발 분야 등으로 나뉘어 연구가 진행중임을 알 수 있다.

한국에서의 액체금속로 개발 프로그램에서도 증기발생기 전열관에서 물 누출이 발생하는 경우 누출량에 따라 미량 (0.1 g/sec 이하), 소량 (0.1~10 g/sec), 중규모 (10~1 kg/sec) 및 대규모 누출로 구분하여 누출현상을 해석하고 있으며, 미량 누출인 경우 재질의 부식특성과 self-wastage현상이, 소량인 경우 target material의 손상 규모 및 wastage방정식이, 중규모 누출의 경우 overheating에 대한 연구가, 대규모인

경우 컴퓨터 코드의 개발과 함께 대규모 누출에서 발생하는 압력 영향의 해석과 증기발생기의 안전성 평가 등에 대한 연구로 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 물 누출과 관련하여 물 누출시 나트륨-물 반응에 의한 전열관 재질의 wastage 특성을 해석하기 위해 액체금속로 선진국이면서 나트륨의 운전 경험이 풍부한 러시아의 IPPE 연구소와 국제공동연구로 국내에서 실험을 수행할 수 없는 소규모 물 누출 실험을 2.25Cr-1Mo steel을 사용해서 수행하였다.

(2) 실험장치 및 방법

실험장치(나트륨 Loop):

소규모 물 누출 실험을 수행하기 위하여 그림 15와 같은 나트륨 루프가 사용되었다. 실험에 사용된 나트륨 loop는 약 160 L정도 담길 수 있는 나트륨 저장조, 물 누출시 발생하는 수소가스를 감지하기 위해 Ni membrane을 이용하여 제작된 수소 감지기, 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 m³/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 그림 16과 같은 장치를 사용하였으며, 약 5~13 MPa의 물(스팀)이 나트륨부위로 누출될 때 압력 차를 이용하여 물 누출율과 누출량을 측정할 수 있도록 differential manometer를 설치하였으며, electromagnetic valve, cermet filter 및 증기발생기 부분으로 구성되어 있다.

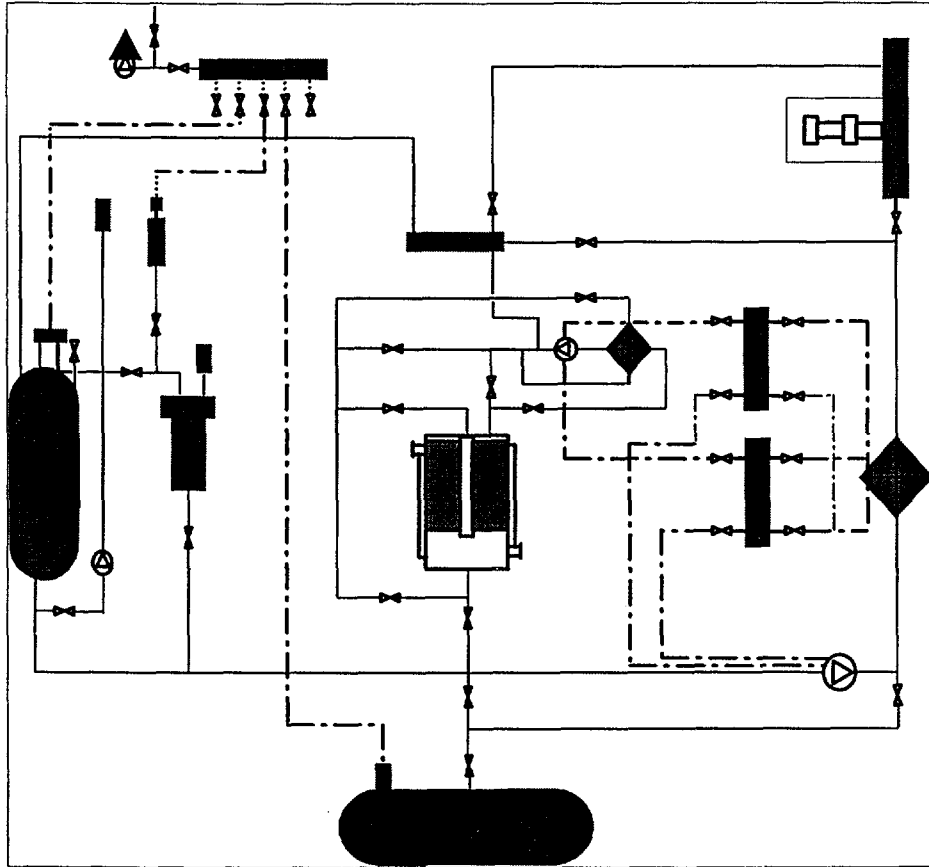


그림 15. IPPE 유동 나트륨 루프와 물 누출 부위.

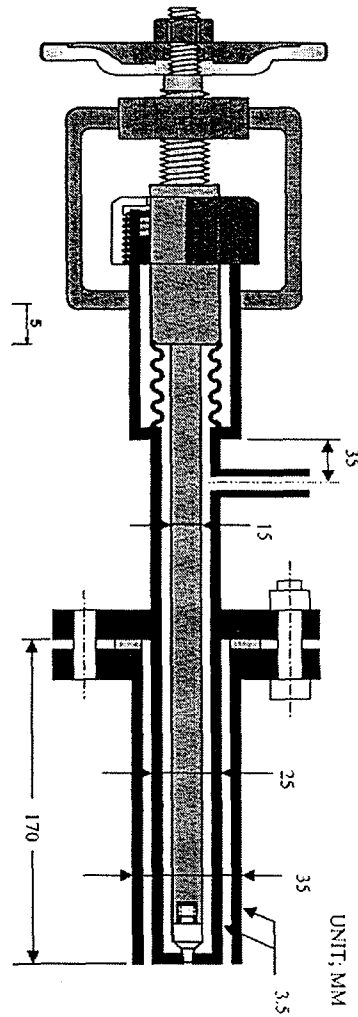


그림 16. 물 누출 장치의 세부 모습.

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 액체 나트륨이 흐르면서 열 교환을 이루며 물이 스팀으로 변환된다. Simulator의 flap과 seat는 2.25Cr-1Mo

steel로 제작되었으며, seat에 접촉하고 있는 flap needle은 cylinder 모양 또는 9~10°의 cone 형태를 취하고 있다. 나트륨부위에 접촉하고 있는 orifice diameter는 3~5 mm 이며 flap needle 상부에 notch로 가공되어 있다.

실험 방법 :

실험 전에 상기 그림 16에 보는 물 저장조에 약 1 L의 증류수를 채우고 differential manometer에 의해 연속적으로 압력을 측정한다. 물이 누출되면 상기 그림 17의 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 ~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 indicator등을 이용해서 실험 특성 자료를 획득하였다.

(3) 결과 및 고찰

1) Self-wastage pattern

미량 물 누출 실험을 수행한 실험조건과 실험결과를 요약하여 표 6에 나타내었다. 물 누출 실험은 나트륨의 온도와 물(수증기)의 누출 압력 및 누출 시편의 두께를 변경해서(표 6참조) 실험을 진행하였으며, 물 누출량은 실험에 인입된 총 누출량을 누출 시간으로 나누어 평균값(g)을 사용하였다.

표 6. Self-wastage 해석을 위한 미량 물 누출 실험 조건 및 결과

Exp. No	Na Temp.	Initial leak rate (g/secX10 ⁻³)	Final leak rate (g/sec)	Duration (secX10 ³)	Quantity up to sharp increase(g)	Absence time (secX10 ³)	Steam P. (MPa)	THX (mm)
1	450°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

물 누출 실험이 종료된 후 injector의 visual pattern을 관찰하여 그림 17에 간단히 나타내었다. 그림 17은 상기 표 6의 실험 8과 9로써, 475°C로 유지되어 있는 액체 나트륨 분위기에 2.5 mm 두께의 누출 시편을 통해 약 12 MPa의 압력으로 물을 누출시킨 후 시편을 관찰한 것으로, a, b는 물을 누출시키기 전, 후 시편의 모양을 나타낸 것이다. 그림 17의 c는 물 누출이 진행되면서 중앙의 flap을 중심으로 우측 하부로 나트륨 부위에서 부식이 진행되어 있는 현상을 관찰할 수 있으며, d의 경우 누출 경로가 재개방되면서 한쪽 방향으로 터진 것 같은 현상이 나타났다.

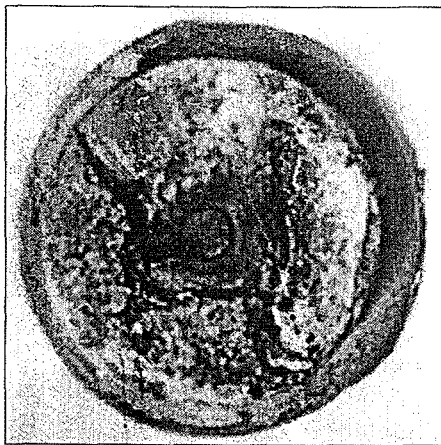
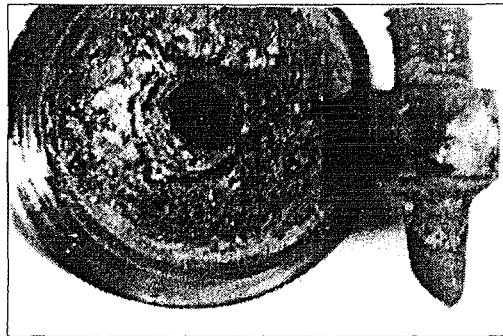
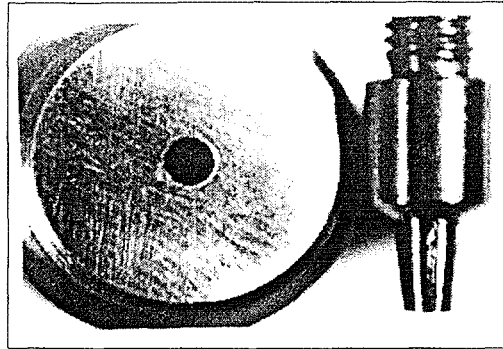


그림 17. 표 6에서 수행된 실험 8, 9 시편의 모습.

실제 표 6으로부터 8과 9번 실험에서 나타난 1 g/sec에 이르기까지 걸린 시간을 분석해 보면 상기 그림 17의 c와 d 시편의 누출 진행과정을 예상할 수 있는데, c의 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 d의 경우를 보면 누출경로가 c 보다는 좀 더 확장되어 있어 누출량이 c 보다는 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 그림 18에 간단히 나타내었다. 그림 18은 나트륨 온도를 510°C으로 상승시켜 누출 실험을 수행한 후 시편을 관찰한 그림으로 a, b 두 시편 모두 누출경로가 재개방된 것을 알 수 있으며, 상기의 475°C에서 실험한 그림 17의 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 그림 18에서 보는 바와 같은 재개방 현상을 일으키게 되고, 시간이 경과함에 따라 re-open된 전열관으로부터 분출되는 고압의 스팀이, 분출되는 방향에 있는 다른 정상적인 전열관 표면으로 부딪치는 이른바 “jet” 현상을 발생시킨다. 이 jet 현상에는 스팀과 나트륨반응에 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 크기(diameter)에 의해 2차 전열관을 마모시키는 시간이 결정되기 때문이다. 실제 본 연구에서 수행된 실험으로부터 시편의 누출 경로가 재개방되면서 나타내는 재개방된 크기를 관찰한 결과 그림 17~18에서 보는 것처럼 스팀의 온도에 따라 약간의 차이는 있으나 부식 부위를 포함해서 5 mm 이하를 나타내는 것으로 사료된다.

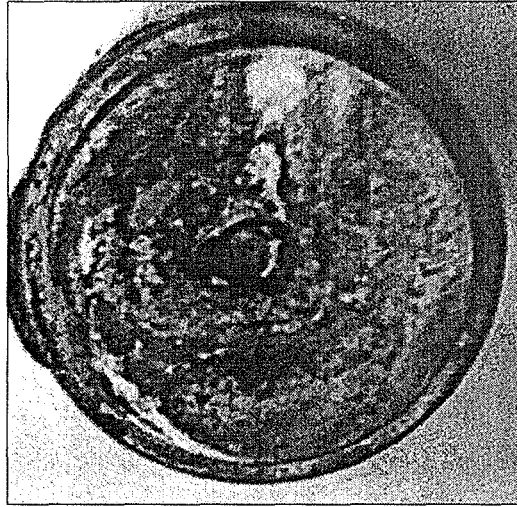


그림 18. 표 6에서 수행된 실험 17, 18 시편의 표면 모습.

2) 재개방 시간

물 누출이 완료된 후 실험에서 얻은 결과를 물 누출율과 재개방 시간과의 관계로 plotting하여 재개방 시간과 관련된 그림으로 그림 19~20에 나타내었다. 이 실험의 진행과정을 보면 상기 표 6에서 알 수 있듯이 시편의 누출 경로가 완전 재개방된 것으로 판단되는 1 g/sec까지 걸리는 시간은, 그림 19의 경우 약 38분 정도, 그림 20의 경우는 3.8분 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 그림 20을 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 35분이 경과하자 누출 경로가 완전 재개방되는 것을 알 수 있다.

실제 외국의 여러 사례를 보면 10^{-2} g-H₂O/sec 이하의 극 미량 누출인 경우 누출 경로는 완전 plugging되어 재개방되지 않는 경우도 있음이 보고된 것도 있다. 그러나 본 연구에서는 35분 정도 경과하자 재개방되었는데, 미세하지만 누출경로를 통해 물 누출이 진행되다가 누출경로의 나트륨 부위에 나트륨-물 반응생성물인 Na₂O이 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 있다. 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 표 6으로부터 얻은 실험 결과로부터 온도와 완전 재개방되는데 걸린 시간을 계산해서 표 7에 간단히 나타내었다. 표 7은 물 누출 실험 시 나트륨 온도에 따라 실험이 진행되는 동안 총 누출된 물의 양을 1

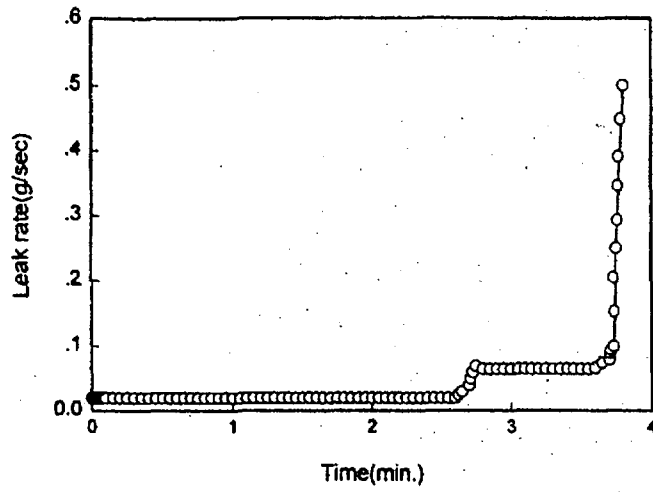


그림 19. 시간 경과에 따른 누출율 변화 모습(실험8).

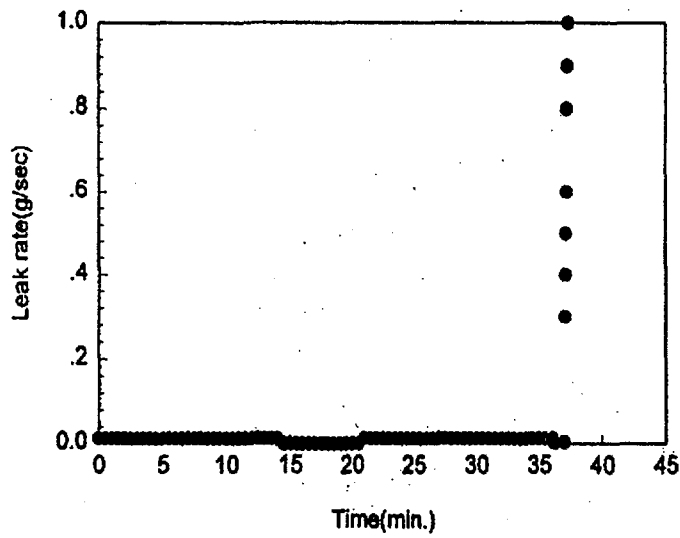


그림 20. 시간 경과에 따른 누출율 변화 모습(실험17).

g/sec이상 누출이 진행되었을 때까지 걸린 시간으로 나누어 그 평균값을 구한 것이다. 일반적인 경향을 살펴보면 나트륨 온도에 따라 재개방되는데 걸리는 시간은 약간의 scattering 이 있으나 대체적으로 온도가 상승될수록 시간은 단축되는 경향을 알 수 있다. 결과적으로, 표 7로부터 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 재료의 wastage속도는 훨씬 클 것으로 예측된다.

표 7. 나트륨 온도가 reopen time에 미치는 영향

Exp. No	Na Temp.	Re-open time(min)	Average (min.)	두께 (mm)	Exp. No	Na Temp.	Re-open time	Average (min.)	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

본 연구와 관련하여 기 보고된 연구에 의하면, 누출 경로에서의 self-plugging은 대부분 나트륨-물 반응에 의해 생성되는 Na_2O 같은 산화물 결정들이 직접 plugging 시키거나 혹은 NaOH 같은 부식성의 반응생성물과 전열관 재료중의 철(Fe)성분이 반응하여 $\text{NaOH} \cdot \text{Fe}_x\text{O}_y$ 형태의 생성물이 누출 경로를 plugging시키는 것으로 밝혀진 바 있다. 본 실험에서는 누출 경로에서 1번의 self-plugging이 발생되었다 다시 재개방된 것을 알 수 있으며 약 35분이 경과하자 누출경로에서 self-wastage가 발생하면

서 누출경로가 완전 개방되었음을 알 수 있다.

3) 나트륨 온도의 영향

상기 표 6의 연속된 누출 실험으로부터 나트륨온도가 재개방되는데 미치는 영향을 해석하기 위해, 표로부터 평균 누출량을 계산하여 나트륨 온도별로 correlation하여 그림 21에 간단히 나타내었다. 그림 21은 전열관 두께가 2.5 mm로 일정하게 제작된 시편을 동일한 실험조건에서 온도만 변경시켜가며 실험을 수행한 후 그 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 그림 21의 a, b, c 모두 평균 누출량과 재개방되는데 걸리는 시간과는 반비례하는 형태로 나타났는데, 이는 J. L. Quinet등이 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 510°C의 경우를 살펴보면 거의 1 order 정도의 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

이는 상기 표 7을 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°C 까지 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.

각 실험으로부터 얻은 재개방시간을 초기 누출량과의 관계로 plotting하여 그림 22에 간단히 나타내었다.

초기 누출량이 증가할수록 재개방에 걸리는 시간이 직선적으로 감소함을 알 수 있으며, 이 관계를 이용하여 누출 시편이 재개방되는데 걸리는 시간을 본 연구의 실험 범위인 400~500°C 범위로 국한하여 초기 물 누출량과 나트륨 온도를 변수로 하여 시행착오법을 이용하여 상관 관계화한 결과 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

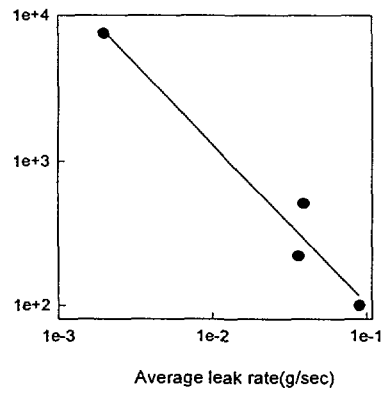
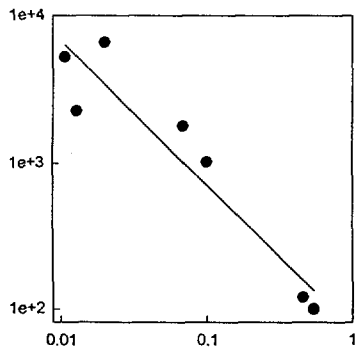
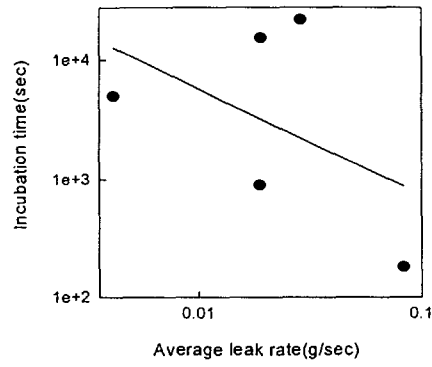


그림 21. 나트륨 온도에 따른 2.25Cr-1Mo 시편의 incubation time.

$$\tau_c = \delta \cdot g^{-0.83} \cdot 10^{\left(\frac{3570}{T_{Na}} - 3.34\right)}$$

여기서, τ_c 는 재개방되는데 걸린 총시간, δ 는 시편의 두께, g 는 초기 누출량을 나타낸다. 따라서 위의 일반화된 식으로부터 누출 시편이 재개방되는 시간을 예측하기 위해서 δ 와 T_{Na} 는 일정하게 정해진 값이고, 실험으로부터 관찰되는 초기 누출량 값을 알 수 있으면 대략 재개방 시간을 예상할 수 있는 중요한 식으로 본 연구의 최종 목적인 소규모 누출에 의한 누출 전과 mechanism 규명에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

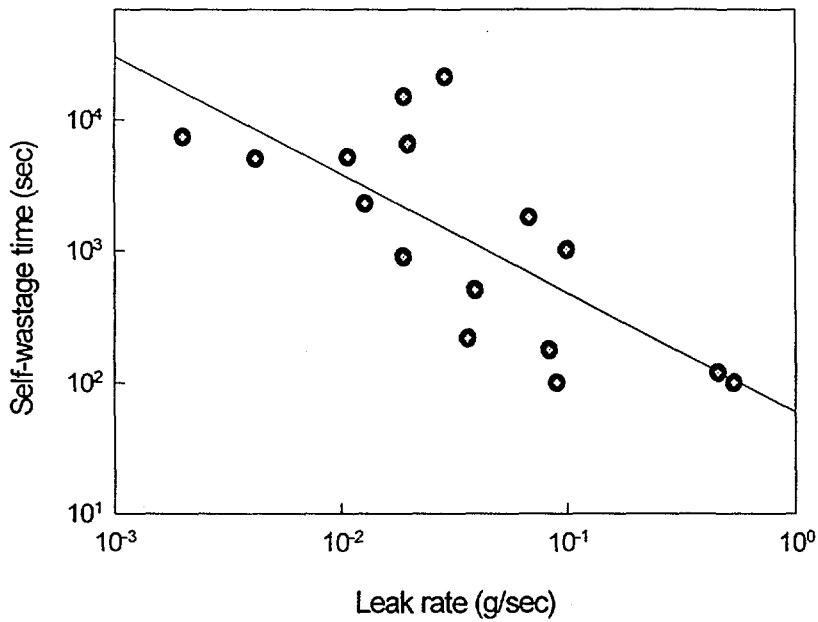


그림 22. 2.25Cr-1Mo 시편의 누출율과 self-wastage time과의 상호관계.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 액체금속로 2차 계통을 포함한 증기발생기에서 물 누출에 의해 발생될 수 있는 나트륨-물 반응에 대한 특성을 해석하기 위해 기존의 선진국에서 수행된 내용을 중심으로 문헌의 수집 및 분석이 수행되었으며, 특히 소규모 물 누출에 의해 발생될 수 있는 나트륨-물 반응 현상, self-wastage현상, corrosion 및 누출 진전에 대해 간략히 기술 분석을 수행하였으며, 미량 물 누출 실험 장치를 자체 제작 및 운전을 수행하여 전열관 재질로 사용이 예상되는 ferrite steel에서의 물 누출시 누출부위에서의 부식특성, leak path의 self-plugging 및 reopen현상, reopen shape, size등에 대한 연구를 수행하였다.

유동 나트륨 분위기에서 물 누출 실험은 국제 공동연구를 통해 수행하였으며, 이 연구로부터 나트륨 온도와 leak path의 reopen time 및 표적의 size에 대한 상관관계식을 획득함으로써 추후 누출 진전에 의한 누출을 평가기술 개발에 사용할 기본적인 기초 자료를 획득할 수 있었다.

본 연구에서 수행된 내용을 요약하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 각국에서 수행된 물 누출 실험으로부터 자국의 특성에 맞는 실험장치의 개발 및 운전을 통해 데이터를 획득하고 이를 안전성 평가를 위한 종합코드의 개발에 이용하고 있다.
2. 문헌 수집 및 분석을 통해 나트륨분위기로 물 누출이 미량으로 발생되면 나트륨-물 반응에 의해 고온의 반응생성물(NaOH, Na₂O)이 튜브 재질을 부식시키고, leak path를 sealing시키거나 reopen시켜 점차 누출율이 확대되는 현상이 발생된다.
3. 제조된 시편의 leak path를 통해 10ml 이하의 물 누출이 발생한 경우, leak path의 self-plugging과 reopen에 대한 mechanism을 예측할 수 있었으며, 그 sequence는 먼저 미량의 물이 누출되면 나트륨-물 반응생성물이 생성되어 1차 느슨한 plugging이 발생하고, plugging 부위에서 반응생성물중 부식성 나트륨 산화물과 재질을 구성하는 Fe의 반응이 형성되어 2차 plugging이 유지되는 것으로 예측되

며, 이 plugging은 시스템 내의 어떤 열적인 transient나 vibration과 같은 물리, 화학적인 변화가 발생되면 반응생성물이 재 용해되면서 어떤 틈을 만들어 부식이 점차 증진되면서 최종적으로 reopen되는 mechanism으로 해석할 수 있었다.

4. 부식현상을 해석하기 위해 시편의 누출 전, 후를 분석한 결과 C, O와 Cr, Fe가 미량이나마 조성의 변화를 나타내었는데, 이는 물 누출로 인해 시편의 반응부위에서 크롬 산화물이나 철산화물 등이 생성되면서 segregation되는 것으로 해석되었다.
5. 미량 누출로 인해 self=plugging되었던 leak path는 약 130분이 경과하자 reopen이 발생되었으며 reopen size는 직경이 약 2mm를 나타내었다.
6. 유동성 액체 나트륨분위기에서 2.25Cr-1Mo steel 시편을 이용해서 물 누출 실험을 수행한 결과 누출경로가 완전 reopen 된 후 나트륨 부위에서 나타내는 self-wastage pattern은 나트륨의 온도에는 무관한 것으로 해석되었으며, leak path가 reopen되면서 나타내는 defect size는 대략 5mm 미만으로 관찰되었다.
7. Leak path가 완전 reopen되는데 걸리는 시간은 나트륨 온도가 높을수록 짧아지는 경향이 있으며, 평균적으로 450°C에서는 약 140분, 475°C에서는 40분, 510°C에서는 약 35분 정도로 계산되었다.
8. Reopen으로부터 분출되는 jet에 의한 target tube의 defect시간은 시편자체가 reopen된 후 약 40초 후에 발생하였으며, 이때 측정된 평균 누출율은 약 6 g-H₂O/sec를 나타내었다.
9. 온도에 따라 reopen시간을 온도와 초기누출량을 변수로 해서 correlation 한 결과

$$\tau_c = \delta \cdot g^{-0.83} \cdot 10^{\left(\frac{3570}{T_{Na}} - 3.34\right)} \quad \text{와 같은 관계식을 얻을 수 있었다.}$$

참고문헌

1. J.A.Ford, APDA Report-175 (1965).
2. W.L.Brook and H. Soodak, NDA Report NDA-15K-3, Chapter 11 (1959).
3. D.A.Greene, Preliminary results from small leak tube wastage scoping test, Proc. Fast Reactor Safety Meeting, Conf-74041-P1, Beverly Hills (1974).
4. J.A.Ford, A recent evaluation of foreign and domestic wastage data from sodium-water reaction tests, GE prepared, CTS-73-05 (1973).
5. R. Anderson, Analysis of experimental data on wastage by sodium-water reaction jets, *Nucl. Tech.*, vol. 40, 261 (1978).
6. H.V.Chamberlain, Sodium-water reactions related to LMFBR steam generators, APDA-257 (1970).
7. J.A.Bray, *J. British Nucl. Energy Soc.*, vol. 10, 107 (1970).
8. A.M.Judd, R.Currie, G.A.B.Linkard and J.D.C.Handerson, *Nucl. Energy*, vol. 31(3), 221 (1992).
9. T.Desmas and P.Lemoine, A study of small leaks of water in sodium-heated steam generators ; self-evolution and wastage, *Liquid Metal Engineering and Technology*, BNES, London (1984).
10. J.Biscarel, G.Ferretti, M.Pacifico, and G.Pasquale, Sodium-water reaction experiments on a Super-phenix steam generator mockup, *Liquid Metal Engineering and Technology*, BNES, London (1984).
11. V.M.Poplavsky, R.P.Baklushin, Steam generator failure and failure propagation experience, IWGFR-78 (1990).
12. PNC Donen Giho, 73, 63-72 (1990).
13. 에네르기 未來技術 Forum, Tokyo (1986).
14. T.Takahashi, *日本機械學會誌*, vol. 81, 151 (1988).
15. 황성태 등, Report, KAERI/RR-1694/96 (1996).
16. S.A.Meacham, E.F.Hill, and A.A.Gordus, APDA Report-241, 37 (1970).

17. R.Rowley, J.A.Mcknight, and J.Airey, Analysis of acoustic data from UK sodium-water reaction test facilities, IWGFR SM2 : Steam generator : acoustic ultrasonic detection of in-sodium water leaks, seesion3, Aix-en-Provence (1990).
18. E.Wachi and T.Inoue, Proc. Specialist Meeting on Steam generator Failure Propagation Exercises, IWGFR-78 (1990).
19. 根井 弘道, 橋口 攻, 日本原子力 學會誌, vol. 44, 2439 (1978).
20. M.Hori, *Atomic Energy Review*, vol. 183, 707 (1980).
21. Y.S.Ching, Proc. Roy. Soc.(London), A 157, 264(1936).
22. J.A.Ford, Literature review of sodium-water reaction, APDA-163 (1965).
23. 황성태 등, Report, KAERI/RR-1477/94 (1994).
24. K.Tregonning, Int. Conf. of Liquid Metal Technology in Energy Production (1984).
25. H.V.Chamberlain, J.A.Cameron et al., Studies of material wastage resulting from reaction of water in sodium, APDA-254 (1968).
26. D.A.Greene, Small leak damage and protection systems in steam generator, Int. Conf. Liquid Metal technology I, Energy Production, Seven springs (1976).
27. D.W.Sandusky, Proc. Int. Conf. Liq. Metal Tech. Energy Production, vol. 1, 248 (1976).
28. G.T.Ewing, J.A.Gramd and R.R Miller, *J. Phys. Chem.*, vol. 58, 1086 (1954).
29. J.W.Taylor, AERE Report M/Tm 24, Dept. of Atomic Energy, Harwell, England(1954).
31. G.W.Thomson and E.Garelis, "Physical and thermodynamic properties of sodium, in sodium, its manufacture and uses, Chap. 9, Reinhold Publishing, New York (1956).
32. V.S.Trelin et al., Experimental data on velocity on sound in alkali metals at temperatures up to 800°C, *High temperature*, vol. 4, 352 (1966).
33. N.Kanegae, K.Hashiguchi and I. Ikemoto et al., The effect of nozzle-to-target distance on wastage in small in leak sodium-water reactions, *Nucl. Tech.*, vol. 40,261(178).

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식			
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-1615/2000			
제목/부제	소규모 누출 현상 실험 및 해석		
연구책임자및 부서명	정 경 채 (소듐기술개발)		
연구자 및 부서명	황 성 태 (소듐기술개발)		
출 판 지	대전	김병호, 정지영 (소듐기술개발)	
		발행기관	한국원자력연구소
발행년	2000. 7.		
페이지	P	도 표	있음(V), 없음()
크 기	A4		
참고사항			
비밀여부	공개(V), 대외비(), __급비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약 번호	
<p>초록 (15-20줄내외)</p> <p style="text-align: center;">초 록</p> <p>액체금속로에서 냉각재로 사용되는 액체 나트륨은 증기발생기의 안전성 측면에서 중대한 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 액체금속로 개발 초기부터 많은 연구가 수행되고 있다. 특히 전열관 튜브에서 pin-hole이나 용접 불량 등에 의해 고압의 스팀이 나트륨 부위로 누출되면 대량의 수소가스 및 부식성 나트륨 화합물을 생성하여 증기발생기 재료의 안전성에 심각한 damage를 미칠 수 있다. 이 경우 초기 누출 부위는 시간이 경과함에 따라 미량, 소량, 증규모 누출을 거쳐 최종적으로 대규모 누출로 발전하게 된다. 따라서 전열관 튜브에서 극미량이나 미량 물 누출에 의한 나트륨-물 반응 현상 해석은 누출 전파의 방지 및 증기발생기의 안전성 평가 측면에서 매우 중요하게 취급되고 있다. 본 연구에서는 소규모 누출 현상 실험 및 해석을 위해 우선 누출경로의 self-plugging과 reopen에 대한 메커니즘을 포함해 reopen time, size, shape 및 self-wastage, 재료의 corrosion 현상 등에 대해 문헌 조사와 실제 미량 물 누출 실험을 통해 해석하였다. 미량 물 누출 실험 장치의 설계 및 운전을 통해 액체 소듐 분위기에서 시편의 누출 특성을 해석하였다. 초기 누출 실험에서 누출 경로는 소듐-물 반응 생성물 및 부식현상에 의해 self-plugged되는 현상을 확인할 수 있었고, sealed된 leak path는 누출 경로에서의 열적인 transient와 튜브의 진동에 의해 reopen되는 것으로 해석할 수 있었다. 한편 전열관 재료로 사용이 예상되는 ferrite steel을 사용해서 누출 실험을 수행한 결과 reopen time은 대략 130분, reopen size는 약 2mm 직경을 나타내었으며, circular 형태를 나타냄을 알 수 있었다. 누출 부위를 AES로 분석한 결과 부식현상은 소듐 부위에서 시작됨을 알 수 있었고, 시편 표면에서 Cr의 segregation 현상이 발생되었음을 관찰하였다. 한편 국제공동연구를 통해 2.25Cr-1Mo steel을 이용해서 reopen time을 소듐 온도와 초기 누출량과의 관계로 correlation한 결과 $\tau_c = \delta \cdot g^{-0.83} \cdot 10^{\left(\frac{3570}{T_{No}} - 3.34\right)}$ 와 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.</p>			
키워드	나트륨-물 반응, 부식, self-wastage, 물 누출		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-1615/2000							
Title/ Subtitle		The Experiment and Analysis on Small Leak Phenomena					
Project Manager and Department		Kyung-Chai Jeong					
Researcher and Department		Hwang, S.T. (Development of Sodium Technology) Kim, B.H , Jeong, J.Y (Development of Sodium Technology)					
Pub. Place	Daejon	Publisher	KAERI			Pub. Date	2000. 7
Page	P	Ill. & Tab.	Yes(<input checked="" type="checkbox"/>), No (<input type="checkbox"/>)		Size	A4	
Note							
Classified	Open(<input checked="" type="checkbox"/>) , Restricted(<input type="checkbox"/>), Class Document			Report Type	Technical Report		
Sponsoring Org.					Contract No.		
Abstract							
<p>The liquid sodium which is used as a coolant in LMFBR, may give rise to a serious trouble in the safety aspect of steam generator. The defects in a heat transfer tube, such as pin-hole or tube welding defect, will result in a leakage of high pressure steam into the sodium side and production of hydrogen gas and corrosive sodium compounds which can cause significant damage to the tube wall of steam generator by using exothermic reaction. In this case, initial leak size will be enlarged with time and the leak rate developed to large leak through the micro, small, intermediate leaks. Therefore, the analysis of sodium-water reaction phenomena on the micro and small water leaks in the heat transfer tube is very important in the initial leak stage in the aspects of the protection of leak progress and safety evaluation of steam generator. In this study, firstly, the micro and small leaks phenomena, such as reopen size, shape, and time of leak path, self-wastage, corrosion of tube materials, was analyzed from the literature survey and water leakage experiments using the leak specimen. In small water leak experiments, the leak path was plugged by the sodium-water reaction products at the leak path of a specimen, and re-open phenomena were not observed in initial experiments. Other leak experiments, reopen phenomena of self-plugged leak path was observed. Re-open mechanism of sealed path could be explained by the thermal transient and vibration of heat transfer tube. As a result, perfect reopen time of self plugged leak path was observed to be about 130 minutes after water leak initiation. Reopen shape of a specimen was appeared with double layer of circular type, and reopen size of this specimen surface was about 2mm diameter on sodium side. Also, the corrosion of a specimen initiated from sodium side, the segregation phenomena of Cr in the specimen was found much more than those of other elements, in AES analysis. In small water leakage experiments were carried out using the 2.25Cr-1Mo steel through co-work with IPPE, the following correlation equation about the reopen time between sodium temperature and initial leak rate was obtained,</p> $\tau_c = \delta \cdot g^{-0.83} \cdot 10^{\left(\frac{3570}{T_{Na}} - 3.34 \right)}, \text{ in } 400\text{-}500 \text{ } ^\circ\text{C of liquid sodium atmosphere.}$							
Subject Keywords		sodium-water reaction, corrosion, self-wastage, water leakage					