



KR0100925

KAERI/AR-586/2000

미국 ASME Section III Subsection NH 코드의  
재료 및 설계현안 분석

(A study on technical issues of materials and design bases in  
ASME Section III Subsection NH Code)

한국 원자력 연구소

32 / 48

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “미국 ASME Section III Subsection NH 코드의 재료 및 설계 현안 분석”에 관한 기술현황분석보고서로 제출합니다.

2000년 12월 27일

연구기관명 : 한국원자력연구소

참여연구원

주 저 자 : 이 형 연(기계설계기술개발)

공동저자 : 김 종 범(기계설계기술개발)

: 유 봉(기계설계기술개발)

## 요 약

본 연구에서는 미국의 고온구조 설계지침인 ASME Code Section III Subsection NH(줄여서 ASME NH로 지칭) 코드의 기술 현안문제를 검토 및 평가한 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)의 평가보고서를 기초로 하여 현재 ASME NH 코드가 안고 있는 현안문제 및 적용한계에 대해 분석하고 코드가 제시하고 있는 크립-피로 손상평가 방법에 대해 기술하였다.

ORNL은 NRC의 의뢰에 의하여 ASME NH의 기술 현안문제에 관한 평가보고서를 1993년에 발간했다. ASME NH의 전신인 Code Case N-47은 1989년 판에서 크립평가시 응력이완 개념이 도입되는 등 비교적 크게 개정되었다. 그 후 1992년 판의 Code Case N-47과 Subsection NH로 승격된 1995년도 판은 물성치에서 약간의 변화를 제외하고는 동일하다.

본 보고서에서는 NRC로부터 설계 인증을 득한 개량형 액금로(ALMR)의 기대수명기간 동안 안전한 운전을 보장할 수 있는 설계지침 및 규제지침이 부족하거나 적절하지 못한 분야를 현안사안으로 제기하였다. 여기서는 23개의 사안이 제기되었으며 이들을 해결하기 위한 방안이 제시되었는데 그 중에서 10가지의 중요 사안은 다음과 같다.

- 60년 수명기간에 대한 허용 설계 데이터 및 곡선에 대한 재료 물성치 부족
- 노치 약화효과(notch weakening effect)에 대한 이해 부족
- 검증된 용접 설계법의 부족
- 장기 조사에 따른 고온 물성치의 열화 (환경문제)
- 장기 부식현상에 따른 물성치의 열화 (환경문제)
- 검증된 열 스트라이핑 자료의 부족
- 신뢰할 만한 크립-피로 설계지침의 부족
- 결함 평가절차의 부족
- 배관의 비탄성 설계절차 부족
- 고온에서 지진효과에 관한 법규 및 지침의 부족

또한 본 연구에서는 1999년에 작성된 ASME 코드 서브그룹 회의록에 기초하여 ASME NH의 최신판인 1998 버전에서 코드 수정 및 추가를 포함한 변경추진 항목들에 대해서도 기술했다.

## Abstract

In this study, an analysis of evaluation report by ORNL on the technical issues of elevated temperatures design guide line, ASME Code Section III Subsection NH was conducted and a brief evaluation procedure of the creep-fatigue damage was presented. ORNL published the report in 1993 and reviewed the issue areas where code rules or regulatory guides may be lacking or inadequate to ensure safe operation over the expected life cycles for liquid metal reactor systems. From historical viewpoint of the ASME NH code development, ASME Code Case 47 was changed much in 1989 edition, which includes the stress relaxation behavior in creep damage evaluation. Afterwards the 1992 version of CC N-47 was upgraded to Subsection NH in 1995 edition, which is the same with that of CC N-47 1992 edition except few material data.

This report brings up the technical and regulatory issues that can not guarantee the safe and reliable operation of the ALMR which got the conceptual design certification from NRC. Twenty three technical issues were raised and the settlement methodology were proposed.

Additionally, the status of items approved by ASME code subgroup of elevated temperature design committee for the revision of the most recent 1998 edition of ASME NH was described.

## 목 차

	page
1. 서론	5
2. ASME Section III Subsection NH의 현안문제	7
2.1 현안사안	7
2.2 사안의 분류	28
2.3 해결방안	32
3. ASME NH의 개정 추진내용	36
4. ASME NH의 크립-피로손상 평가법 요약	38
4.1 피로손상 평가절차	38
4.2 크립손상 평가절차	40
5. 결론	41
참고문헌	42

## 표 목 차

표 1. 확장이 요구되는 ASME NH 허용치 요약	7
표 2. 각 사안에 대한 요약	30

## 1. 서론

미국 고온구조 설계지침의 개발은 액체금속로와 고온 가스냉각로의 개발에 사용할 목적으로 1967년 ASME B&PV Code, Section III, Code Case 1331로부터 시작하여 1975년 Code Case 1592, 1977년 Code Case N-47을 거쳐 지속적인 보완을 하여 1995년 Subsection NH[1]로 발전되었다. 그런데 Code Case N-47부터는 고온 가스냉각로나 액체금속로 뿐만 아니라 일반적인 고온구조물에 적용할 수 있도록 하였으며, 현재까지 전 세계적으로 액체금속로 고온 구조물의 구조건전성을 확보할 수 있도록 사용되고 있다.

개량형 액체금속로(Advanced Liquid Metal Reactor : ALMR) 기기에 적용할 미국의 고온구조 설계지침인 ASME Section III Subsection NH 설계지침의 검토 및 평가와 관련하여 본 연구에서는 고온에서 운전되는 ORNL의 예비 검토의견[2]과 설계인증 과정에서 부정적인 영향을 미칠 수 있는 문제(issue)들을 제기하였다. 이 연구는 원자력 규제위원회(US NRC)의 요청에 의하여 ORNL이 수행한 것이며 여기서 다루는 내용은 ASME Subsection NH의 고온설계 지침에 대하여 기기 또는 부품에 기초한 설계문제가 아닌 일반 설계지침에 대한 것이다. 일반적으로 ASME 코드의 개정을 위해서는 2년에서 5년 또는 사안에 따라 이보다 훨씬 긴 시간이 소요되기 때문에 설계인증을 위해서는 개정이 필요할 경우 미리 보완 작업에 착수할 필요가 있다.

본 연구에서는 한정된 자료로 인하여 깊이 있는 검토 및 평가는 수행하지 못하였고, 각 현안사안을 정의하고, 요약하는데 초점을 맞췄다. 미국 NRC는 향후 10년 이내에 미국 내외에서 차세대 전력산업 시장을 형성할 ALMR의 설계를 인증하기 위하여 산업체와 공동작업을 벌인 바 크립영역에서 운전되는 주요 기기의 설계시에 크립 파단, 크립-피로 및 크립-라체팅 등의 크립기인 파손 모드가 설계과정에서 반드시 고려되도록 요구하고 있다. 현재 운전 중인 경수로에는 크립 효과가 중요하지 않은 영역 즉 오스테나이트 합금강에 대해서는 425 °C, 페라이트 합금강에 대해서는 375 °C 이하에 대하여 설계되었다.

여기에서 제기된 문제 중에서 많은 부분은 PVRC(Pressure Vessel Research Council)가 전에 고속증식로 검토시 추천했던 향후 개발사항이고, 또한 일부는 CRBRP 인허가 과정에서 제기되었던 문제를 반영한 것이다.

일반적으로 ASME Subsection NH은 설계자에게 다음 사항을 제공한다.

- ① 허용 건설재료

- ② 피로 및 크립파단에 대한 시간 및 온도의존 허용치
- ③ 온도한계치
- ④ 운전 수명(열하중 에이징 기인 기계적 물성치의 열화 포함)
- ⑤ 다음 네가지 파손모드로부터 방어하기 위한 설계지침
  - 단기하중으로부터의 연성파손
  - 장기하중으로부터의 크립파단
  - 크립-피로파단
  - 점진적 붕괴 및 라체팅에 기인한 전체적 변형
- ⑥ 다음 형태에 기인한 파손 방지를 위한 간략한 지침
  - 과변형에 기인한 기능상실
  - 단기 하중으로 인한 좌굴
  - 장기하중으로 인한 크립 좌굴

한편 여기서 제기한 23개의 사안들 중에서 22개의 문제는 아직 해결되지 않았으며 이들 중 일부는 다른 문제보다 훨씬 중요한 문제들이다. 본 보고서의 2장에서는 23개의 현안사안을 자세히 살펴보고 안전성 또는 경제성에 따른 사안 형식, 재료 데이터베이스, 설계 또는 두 가지 모두에 대한 사안근거 그리고 사안의 수준에 따라 사안의 중요성을 분류하고 각 사안에 대한 해결 방안 및 추천 안들을 제안하고자 한다.

고온설계지침인 ASME NH의 최신판은 1998년 버전인데 이에 대해서 코드 개정을 위한 ASME 코드 서브그룹의 활동이 계속되고 있다. 본 보고서의 3장에서는 1999년 5월에 개최된 ASME 코드 서브그룹 위원회 회의 보고서[9]를 기초로 1998년 버전으로부터 개정이 추진되고 있는 내용의 일부를 소개한다.

## 2. ASME Section III Subsection NH의 현안문제

### 2.1 현안 사안(issues)

#### 2.1.1 사안 1 : 60년 설계수명에 대한 허용설계 데이터 곡선 물성치 부족(Lack of Material Property Allowable Design Data Curves for 60-year Design Life)

ASME NH의 설계 허용 물성치는 설계수명 300,000시간 (34년)에 대하여 주어진 것으로 60년 수명을 목표로 하는 ALMR의 설계를 위해서는 설계코드의 허용치를 최소 525,000 시간까지 확장할 필요가 있다. 확장이 필요한 물성치는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 확장이 요구되는 ASME NH 허용치 요약

$S_t$	Table I-14.4	Figure I-14.4
$S_{mt}$	Table I-14.3	Figure I-14.3
Expected Min Stress-To-Rupture	Table I-14.6	Figure I-14.6
Thermal Aging & Weld Reduction Factor	Table I-14.10	Figure I-14.13
$S_{mt}$ (bolting)	Table I-14.13	
Design Fatigue Strain Range *	Table T-1420-1	Figure T-1420-1
Average Isochronous Stress-Strain Curve	-	Figure T-1800

\* : 크립-피로의 주기가 304SS 및 316SS, 800H 재료에 대해서는 31.65분, 2.25 Cr-1Mo강에 대해서는 36.82분 이상인 경우(60년/10<sup>6</sup> 사이클 = 31.56분 for 316SS)에는 확장이 필요하다.

#### 2.1.2 사안 2 : 장기 조사에 따른 고온에서의 물성치 열화(Degradation of Material Properties at High Temperatures due to Long-Term Irradiation)



크립영역의 고온에서 장기간(60년) 조사의 영향은 조사기인 변질(transmutation) 생성물과 석출과 같은 열 공정의 상호작용으로 인하여 복잡하다. 고온 조사의 결과는 고온 및 조사에 노출된 시간과 이에 따른 공정의 진척에 좌우된다. ASME 코드에는 아직 이 중요한 부분을 다루는 지침이 마련되어 있지 않다. 현재로서는 이 열화에 대한 평가방법을 개발하고 또한 이에 대하여 NRC의 문제제기를 방어하는 의무는 원자로 제작 및 설계자의 몫이다.

그러나 고온 조사취화에 대한 기구(mechanism)가 몇 가지(5~6가지) 재료에 대해서는 알려져 있는 상태이다. 합금강에서 고온 조사취화의 주요 원인은 헬륨이 생성되고 이것이 입계로 이동한다는 데 있다. 헬륨의 가장 일반적인 생성 원인은 열 중성자에 의한 보론의 변환 및 니켈의 변환으로서 예를 들면 중량비로 1%의 보론은 1%의 헬륨으로 변환된다.  $5 \times 10^{19}$ 의 열 유속(thermal fluence)에서는 보론의 10%가 헬륨을 변환되며,  $10^{21}$ 의 열 유속에서는 90%의 보론이 헬륨으로 변환된다. 니켈의 변환에 의한 헬륨의 생성은 중간 핵의 형성으로 인하여 복잡하다. 근사적으로  $10^{21}$ 의 열 유속은 오스테나이트 스테인레스강에서 약 1 appm(1 atomic part per million)의 헬륨을 생산한다. 그리고 나서 보론 및 니켈로부터 헬륨의 생성은 열 유속  $10^{21}$ 에서 대략 평형을 이루게 되며 그 후로는 헬륨원으로서 니켈이 급속하게 지배하게 된다.

헬륨 취화는 온도, 입계에서 헬륨 집중 및 변형률에 좌우된다. 헬륨의 취화는 오스테나이트 스테인레스강에서는  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  이하에서 관찰되지 않는다. 그러나  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서는 장기 크립 시험에서 1% 이하의 연성이 발견된 바 있다. 많은 크립-피로 시험을 수행한 결과 조사는 고온 헬륨취화에 따른 크립에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. Van der Schaaf 등은 현재의 크립-피로 설계방법은 조사 조건에서 AISI 304 재료에 대해서는 보수적이라는 결론을 내렸다. 그러나 개량형 액체금속로(ALMR) 또는 모듈형 고온 원자로(MHTGR)는 물론이고 ASME NH의 재료에 대해서도 일반적으로 적용하기에는 자료가 부족하며 특히 유속 및 온도와 관련된 자료도 부족한 실정이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

### 2.1.3 사안 3 : 장기간 열 에이징에 의한 재료물성치의 열화(Degradation of Material Properties due to Long-Term Thermal Aging)

60년 수명에 걸쳐 발생하는 장기 열 에이징이 재료의 물성치 및 크립영역의 파손에 미치는 영향에 대해서는 아직 많은 연구가 이루어지지 않았다. 화력발전소의 장기 고온운전(316~538 °C) 경험에 의하면 저합금강 및 스테인레스강 재질에서 열화로 인한 많은 균열 및 파손 사례가 보고되고 있다. 오스테나이트 강에서의 취화는 시그마-상(sigma phase), Laves-상, 알파 프라임-상, 또는  $\delta$ -페라이트의 G-상에 기인하고 있다. 이와 같은 형태의 취화는 주물과 용접 및 이종 합금에서 문제가 되어 왔다.

오스테나이트 합금에서 탄화물(carbide)의 형성으로 인한 연성의 상실은 또 하나의 문제이다. 우선 탄화물은 스테인레스강 또는 유사 합금의 입계에서 얇은 판 모양으로 석출될 수가 있고 이에 따라 연성이 감소하게 된다. 304, 316 및 Alloy 800H는 냉간가공, 온도 및 응력조건에 따라 연성이 1%까지 감소하는 것으로 나타났다. 석출물에 탄소를 상실하는 것은 오스테나이트강을 불안정화시키고 재료의 온도가 저온으로 떨어질 때 페라이트 또는 마르텐사이트의 생성을 촉진할 수 있다. 입계에 형성되는 약상(weak phase)은 고온에서 강도 및 연성을 저하시킨다. 이런 형태의 파손이 304 스테인레스 강에서 발견된 바 있다.

베이나이트강(bainitic steel)과 마르텐사이트강의 강도 저하는 많은 형태의 에이징 현상으로부터 발생할 수 있다. “885 취화”는 잘 알려져 있는 것이며, ASME 코드에 이에 대한 경고가 있다. 그러나 Grade 91과 같은 재료의 장시간 노출은 미세 입자를 거칠게 하고 Laves상의 석출을 야기할 수 있으며 이에 따라 인장, 항복 및 크립강도가 떨어진다. 불림(tempering)처리를 하거나 최소 인장강도 부근까지 용접한 후 열처리한 재료는 강도가 떨어질 수 있으며, 이 현상은 566 °C 이상에서 더욱 심각하지만 이에 대한 시험은 수 개의 heat에 대해서만 시험해보았을 뿐이다.

열화를 나타내주는 허용응력 “knock down” 인자(factor)에 대한 표가 1993년 ASME Code Sect.III 부위원회의 인증 절차를 받고 있는 중이며, 이 인자에 기초한 에이징 데이터는 ALMR 60년 수명에 외삽을 할 수 있을 만큼 충분히 긴 실험에 기초하여야 한다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

#### 2.1.4 사안 4 :부식현상으로 인한 물성치의 열화(Degradation of Material Properties due to Corrosion Phenomena)

여기서는 부식현상으로 인하여 발생할 수 있는 장기 물성치 열화에 대한 이해가 부족하다는데 초점을 맞추고 있다. ASME 코드는 그 지침에서 명시적으로 새로운 건설에 있어서 부식효과를 고려하지는 않는다. 대신 설계자는 사용할 재료의 선정 및 필요할 경우 부식 허용치를 도입하여야 할 의무를 갖는다. 고온구조 설계지침인 ASME NH은 다루고 있는 재료가 한정되어 있다. 일반 부식, ALMR에서 발생할 수 있는 온도 또는 물성의 구배(compositional gradient)에 의한 질량의 이동, 응력 부식, 부식피로, 방사선 기인 응력부식균열 및 틈새 부식(crevice corrosion) 등이 부식과 관련된 많은 열화 기구들 중의 일부이다. ASME NH의 재료들은 이와 같은 부식의 우려가 있지만 각 문제는 각각의 경우에 대하여 처리하여야 한다.

크립-피로 손상 누적에 있어서 부식의 역할은 중요한 사안 중의 하나이다. H급(grade) 스테인레스강 및 스테인레스강계인 Alloy 800H에서는 입계에서 탄화물이 생성되며 이 탄화물은 크롬을 소모시키기 때문에 산화 저항성을 약화시킨다. 크립-피로하중에서 산화는 반복하중이 작용할 때 입계의 균열진전을 가속시킨다. 입계 석출물의 특성은 화학 및 열 기계적 공정 그리고 노출조건에 좌우되며, 이에 따라 열화(degradation)경향이 상당히 달라질 수 있다. 이에 대한 손상기구는 보다 많은 연구가 요구된다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

#### 2.1.5 사안 5 : 현재의 용융 및 제작기술에 기초한 허용 물성치의 부족(Lack of property allowables based on current melting and fabrication practices)

고온구조 원자력 설계지침은 1970년대에 개발되었다. 당시에 304 및 316 스테인레스강의 데이터베이스 구축을 위해 강재들은 공기 중 용융처리(air melting practice)에 의하여 생산되었다. 현재 미국에서는 이에 대하여 아르곤/산소 탄소제거(argon/oxygen decarburized) 공정을 적용하고 있다. 이 두 방법에 따른 차이는 크지 않을 것으로 생각되지만 새로 용융된 heat와 과거의 물성치를 비교하는 데이터는 전무한 실정이다.

일본이 불안정화된 H급(grade) 스테인레스 재료에 대하여 관심을 가지고 있지만, 프랑스, 독일, 일본 등에서는 고온구조물에 적용을 위하여 저탄소 고질소 강으

로 이동해가고 있다. 이와 같은 선택은 예민화와 부식 및 장기 취화에 관한 우려를 감소시켜주는 것이다. Alloy 800의 변화(modification)도 고려 중이다. 이 강들은 현재 ASME NH에 포함되어 있지 않은 것이다.

원자로 제작자들은 특정 등급의 재료에 대하여 특별한 화학조성비를 주문하는 경향이 있지만 때면 결과들이 인정을 받지 못하는 못한다. 예를 들면 액체금속로에 진공 용융, 전기용재 재용융된(electroslag-remelted) Grade 22강을 적용하면 매우 낮은 강도의 재료가 생산된다. 고온 압출(extrusion) 공정은 304 스테인레스강의 크립 연성을 낮추는 요인이 되는 입계 공동(cavitation)을 발생시키는 것으로 알려져 있다.

용접 소모재와 공정도 계속 문제로 남아 있다. 특히 Grade 91강은 용접강도에 있어서 완전히 풀리지 않은 주요 문제로 남아 있다. 용접강도 감소인자가 ASME NH에 제시되어 있지만 Grade91 배관 용접부에서 용접후 열처리 미숙으로 인하여 파손이 일어난 바 있었다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

#### 2.1.6 사안 6 : 저 주파수 응력의 열화 영향(Degradation effects of small cyclic stress)

베이나이트강과 마르텐사이트강의 비교적 높은 강도는 석출물로 안정화된 미세 전위 조직(precipitate-stabilized fine dislocation microstructure)에 기인한다. 반복 대변형률 조건하에서 이들 재료가 반복 연화거동을 한다는 것은 잘 알려진 사실이지만 매우 작은 반복 소변형률이 여기에 중첩될 때 미세조직을 거칠게 하는 속도를 가속시키는 것으로 보인다. 보통 강도의 수준에 따라 1~2 차수(order)의 크립과단 강도를 낮추기도 한다. 두께방향으로 하중은 완전히 인장 압축을 가하는 경우가 드물기는 하지만 강도가 상당히 약화될 가능성이 있으며 베이나이트강과 마르텐사이트강에 대해서 더욱 깊이 있는 연구가 이루어져야 할 것이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

#### 2.1.7 사안 7 : ASME NH 이하 온도에서의 크립기인 파손(creep-induced failures at temperatures below ASME NH limits)

화력발전소의 페라이트강 배관에서는 크립효과가 ASME NH에서 제시한 중요한

영역인 371 °C 이하에서도 크립효과가 중요한 영역에서의 크립파단과 같은 파손이 발생한 바 있다. 만일 이와 유사한 파손이 특히 60년 수명을 지향하는 343 °C에서 운전되는 ALMR에서도 발생이 가능하다면 316~371 °C 범위에서의 크립효과에 대한 고려가 필요할 것이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제” 및 “설계기초” 안전성 문제로 분류된다.

#### 2.1.8 사안 8 : 설계시 평균 및 최소물성치의 사용(Use of average vs minimum material properties in design)

설계해석에서 평균 및 최소 물성치의 사용은 계속하여 문제가 되어 왔다. 이것은 원자로 용기 연구위원회(Pressure Vessel Research Council : PVRC)에서 토의된 바 있으며 그 내용을 인용하면 다음과 같다.

비탄성 재료의 거동예측은 사용되는 재료의 비탄성 거동에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 변형률의 누적 및 피로손상은 항복응력이 감소함에 따라 증가하는 반면 크립손상은 항복응력이 증가함에 따라 증가한다. 그러므로 적절하게 재료를 선정한다는 것이 모호한 일이다. 예를 들면 설계 계산 한계치가 허용치 이내일 때에도 재료의 물성치에 평균 및 최소값을 적용하는 적어도 두 가지 경우에 대하여 한계(bound) 해석을 수행할 필요가 있을 수 있다. 현재의 ASME 코드는 이 재료의 선정에 있어서 혼동을 해결할만한 방법을 제시하고 있지 않으며, 다만 코드 위원회에서 상세 비탄성 해석을 수행하는데 있어서 평균 물성치를 사용하는 것에 대해서는 동의하고 있는 상황이다.

ASME NH은 항복강도에 대해서는 최소값을 채택하고 있지만 평균 등시 응력-변형률곡선(isochronous stress-strain curve)에서는 평균 크립 물성치를 적용하고 있다. 더구나 ASME NH의 평균 곡선으로부터 라체팅 및 좌굴 계산을 위한 최소 등시곡선을 어떻게 얻을 것인가에 대한 것도 분명하지 않다. ASME 코드는 그동안 최소치에 1.25배를 곱하여 평균 항복강도를 정의하였지만 고온설계시 등시곡선에서 이 숫자 및 사용은 명확하지가 않다.

상세 비탄성 해석에서 평균 물성치의 사용은 NE Standard F9-5T[3]에서 권장하는 것으로 그 이유는 먼저 제작되는 재료의 다른 종류의 많은 heat의 대표성을 띄고, 평균 물성치에 기초한 크립-피로 손상이 최소 물성치에 기초한 손상보다 크

기 때문이다. 평균물성치에 기초한 변형률 누적은 최소 물성치를 이용한 것보다 작지만 변형률의 한계치가 손상 모드에 관련된 것이 아니기 때문에 이것은 중요성에서 이차적인 문제이다.

실제로 각 하중 조건에 대하여 최대/최소 강도 및 변형 물성치의 조합을 미리 결정한다는 것은 불가능한 일이다. 또한 그와 같은 최대/최소의 조합이 실제의 재료 거동에 있어서 물리적으로 일관성이 있는 것도 아니다. 이에 대하여 ORNL은 확률론적 연구를 통하여 한 재료의 다른 heat 평균 물성치로부터 재료의 거동을 관찰하여 비교평가를 수행하였다. 평가결과는 ASME 코드의 변형률 누적에 대한 설계여유도가 그 연구에서 사용된 재료물성치 조합(재료의 heats)보다 50% 정도 초과하는 것으로 나타났다. 크립 손상에 대한 코드의 여유도는 heats의 1.8%를 초과하였으며 피로손상 한계 또한 초과되지 않았다. 또한 시험결과는 ASME NH에 따른 초기 균열진전 후에도 구조물의 잔류 수명이 상당히 남아 있음을 보여주고 있으며 이는 균열의 초기성장에 기초하고 있는 ASME 코드의 설계 한계는 구조물의 파손을 의미하지는 않는다는 것이다. heats의 1.8%를 초과하는 크립손상 한계치에 대해서도 이것을 초과하는 것이 바로 구조물의 크립 파손을 의미하는 것은 아니다.

최소 및 평균 물성치와 관련된 모호성은 명백히 할 필요가 있다. 한 가지 권장하는 사항은 고온 운전되는 화력발전의 경험과 장기 액금로 구조시험 데이터, 무작위 재료 물성치 대신 현장 재료의 물성치 선택에 관한 확률론적 연구 그리고 합리적인 다른 종류의 재료 물성치를 가지고 해석적 예측을 수행할 필요가 있다는 것이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

#### 2.1.9 사안 9 : Modified 9Cr-1Mo 강에 대한 설계방법 부족(Lack of design methodology for Modified 9Cr-1Mo steel)

ASME NH에 제시된 재료의 종류는 매우 제한적이다. 새로 개발된 재료가 설계자에게 부가적인 선택안이 될 수가 있다. Modified 9Cr-1Mo 강은 현재 ASME CCN-253에는 추가된 바 있지만 ASME Sect.III 및 ASME NH에는 아직 추가되지 않고 있다. Modified 9Cr-1Mo 강을 ALMR 설계에 사용하기 위해서는 적절한 설계 허용치 및 지침이 코드에 마련되어야 한다. 몇 년 동안 이 물성치 제시를 위한 연구가 이루어진 바 있지만 반복 변형률 연화 및 크립 연화거동을 보이는 이 재료에

대하여 설계방법의 제시를 위한 연구는 이루어지지 않고 있다. Modified 9Cr-1Mo 강은 페라이트/마르텐사이트 강으로서 미국에서는 스테인레스강 및 2.25 Cr-1 Mo 강의 유망한 대체 재료로서 사용을 추진하고 있다.

이 재료는 593 °C까지는 응력의 허용치가 304 스테인레스 강과 비슷하며, 482 °C 이상에서는 2.25Cr-1 Mo 강보다 단기 및 크립 강도가 크며, Inconel 718 만큼 열스트라이핑에 저항성이 있는 것이 특징이다. 또한 이 재료는 크롬 및 응력 부식에 저항성이 있으며 무엇보다도 중요한 것은 이 재료의 열 물성치가 열하중을 줄여주는 것과 같은 효과가 있다는 것이다. 그러나 이 재료의 비탄성 거동이 코드의 다른 합금들과는 현저하게 다르기 때문에 기존의 비탄성 해석을 위한 구성방정식 및 단순화 식들을 크게 변경해야 한다는 점이 있다. 또한 이 재료의 시간 의존성 파손 거동도 스테인레스강과는 다르기 때문에 재료거동 모델과 파손 이론 및 단순 해석 절차도 상당히 수정을 하지 않으면 안된다.

고온구조물 설계기술 개발을 위해서는 재료의 구성식 모델, 파손이론, 단순화된 평가법 및 구조설계법을 검증할 수 있는 구조물 검증 시험 등이 요구된다. 매우 높은 온도에서는 Alloy 617이 Modified 9Cr-1Mo 강과 거동이 비슷하다. Modified 9Cr-1Mo 강과 같이 Alloy 617은 크립의 진행속도에 매우 영향을 크게 받는다. 전에 Code case가 617에 대하여 개발된 바 있고 그 후에 코드의 설계 부위원회에서 고려된 바 있다. 이 코드는 Modified 9Cr-1Mo 강의 골격을 제공해줄 수 있을 것이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

2.1.10 사안 10 : 단기 과하중이 그 후에 기계적 물성치에 미치는 영향에 대한 이해 및 검증부족 (Lack of understanding/validation of effects of short-term overload events on subsequent mechanical properties)

Hanford 소재의 FFTF(Fast Flux Test Facility)에서 수집된 자료에 기초하여 코드의 부그룹은 단기 과하중 후에 기계적 물성치가 상당히 열화되는 것은 심각한 문제가 아니라는 결론을 내렸다. 그러나 최근의 연구에 의하면 이것이 여전히 사안이 되는 것으로 나타났다. ASME NH보다 프랑스의 RCC-MR 코드의 “크립 무시곡선(negligible creep curve)”이 더 보수적이다. 원전의 장기수명 관점에서 보면 크립 손상에 대한 온도 임계치(threshold)와 응력 또는 온도가 지나치게 변동하였을 때의

평가방법을 재고할 필요가 있다. 지나치게 큰 응력이 작용하면 소성변형이 매트릭스(matrix)를 강화시키고 또한 잔류응력을 발생시킨다. 저온에서의 완화율(relaxation rate)은 느리고 잔류응력은 매우 높은 수준으로 유지 될 수 있다. ASME NH의 응력 및 변형률에 관한 등시곡선은 538 °C 부근에서 발생하는 변형률 에이징 효과를 포함하고 있지 않기 때문에 그렇게 좋은 지표가 되지 않는다. 높은 수준의 잔류응력은 오랜 시간동안 유지될 수 있고, 스테인레스 강에서는 공동(cavities)이 매우 낮은 응력 수준에서 생성될 수가 있다. 오랜 시간동안 열 에이징이 미치는 영향에 대한 자료가 거의 없다. 온도가 지나치게 올라가는 과정을 겪고 열 및 응력을 복합적으로 받을 때 이것은 일부 재료의 강도를 낮게 하는 것으로 알려져 있다. 이력효과에 대한 정량화는 단순한 선형손상 평가식을 제외하고는 어려운 문제이다. 신뢰할 만한 자료가 없다는 것이 문제이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제”로 분류된다.

#### 2.1.11 사안 11 : 검증된 열 스트라이핑 자료 및 설계방법의 부족(Lack of validated thermal stripping materials and design methodology)

액체금속 냉각재가 서로 다른 온도로 원자로 노심으로부터 흘러나와 신속하게 섞임에 따라 LMR 계통에 고주파수 온도 변동(fluctuation)을 야기하게 된다. 이 변동은 설계 또는 재료의 열 저항에 의하여 충분히 감소되지 않으면 원자로 상부구조물인 UIS에 전달된다. 구조 부품은 60년 수명동안  $10^6 \sim 10^{10}$ 회의 변형률 제어 열 사이클을 겪게 되는데 이를 열 스트라이핑이라 한다. 열적 피로에 기인한 기기의 파손은 선정 재료, 열 변동의 주기 그리고 크기에 좌우된다. 원자로에서의 열 파동은 장기적으로 균열 및 부품의 파손을 야기할 수 있으며 다음과 같은 세 가지 항목을 기술적으로 검토해야 한다.

① 열 스트라이핑이 심한 부위에 대해서는 어떤 재료를 이용할 것인가? GE는 CRBRP의 설계에서 사용한 Inconel 718을 선호하는 경향이 있다. 그러나 웨스팅하우스는 Inconel 718강에 대해 열 스트라이핑 조건하에 있는 영구적 원자로 기기에 대한 재료로서의 적합성에 대하여 의문을 제기한 바가 있기 때문에 좀 더 구체적인 연구가 필요할 것이며 그들이 사용재료 후보로 고려하고 있는 Modified 9Cr-1 Mo 강에 대한 검토도 요망된다.



② Inconel 718 재료에 대해서는 볼팅에 대한 응력 허용치를 제외하고는 현재로서는 설계 허용치 및 설계기준(criteria)이 없다. CRBRP의 설계기준은 열 스트라이핑 데이터가 마련되기 전에 개발된 것으로 이는 고주파수 피로의 하부 영역에 속하고 따라서 이는 현재 사용되고 있는 설계 절차 및 여유도가 고온 원자로의 장수명 부품에 관하여 재료 및 설계의 불확실성을 담당할 수 있을 지에 대한 우려가 제기되고 있다. CRBRP 설계자들은 입자크기에 따라 변동하는 인자(factor)의 필요성을 인식하였다. 이 인자가 필요한지에 대하여 아직 의견의 일치가 이루어지지 않고 있는 것이 현실인 것으로 보인다. 그러나 GE는 이 인자를 사용하지 않았다.

③ 초기균열이 발생하였다고 가정하면 크립 영역에서 균열의 발생을 허용하는 균열진전 평가법이 기존의 코드에 포함되어 있지 않은데 이것은 앞으로 개발할 필요가 있는 것이다. 열 스트라이핑 시험 프로그램은 316SS에 대하여 22개의 데이터와 Inconel 718에 대하여 11개의 데이터 및 Modified 9Cr-1 Mo 강에 대해서는 12개의 데이터 점들을 생산하였다. 미국에서 SAFR 노형을 개발한 바 있는 Rockwell사와 Westinghouse는 316SS에 대하여 설계지침을 제시하였지만 권장사항은 서로 달랐다. 양사의 어느 곳도 Inconel 718에 대해서는 지침서를 개발하지 않았다. GE의 열 스트라이핑관련 ALMR 기술개발 계획은 Modified 9Cr-1 Mo 강에 대해서만 다루고 있으며 그들은 이를 확실하게 ALMR에 적용할 계획은 아니었다.

이상의 PVRC 연구에서는 열 스트라이핑을 고온 LMR의 주요 사안으로서 정의하였다. 다음은 이 연구로부터 도출된 내용이다.

열 스트라이핑은 ASME 코드에서 다루고 있지 않는 고주파수 피로 문제이다. 열 스트라이핑에 따른 정확한 평가를 위해서는

- (a) 고온 및 저온 온도이력
- (b) 경계층 효과의 평가
- (c) 혼합 유체온도
- (d) 금속 표면온도
- (e) 재료의 고주파수 변형률제어 피로곡선

등의 정의가 요구된다.

열 스트라이핑은 새로운 파손 모드가 아니며 이는 어떤 특별한 해석방법의 개발

을 요구하지 않지만 ASME NH의 일반적인 크립-피로 손상 평가절차에 추가적인 설계이론을 정립할 필요가 있다. 열 저항은 재료의 피로강도, 기기의 표면 마무리상태 및 발전소 운전 중에 발생하는 다른 환경요인에 영향을 받는다. 변형률제어 열하중에 대한 내구한도 설정을 위하여 현재의 ASME 코드 피로설계 곡선을  $10^6$  이상으로 확장하고 또한 열 스트라이핑에 관한 시험을 수행할 필요가 있다.

열 스트라이핑 시험은 316 스테인레스강과 Inconel 718 및 Modified 9 Cr-1 Mo 강의 원통형 시편을 이용하여 수행하였다. 시험결과 316 스테인레스강의 열 스트라이핑 피로한도는 단축 피로시험의 내구한도와 같거나 더 큰 것으로 나타났다. 반면에 Alloy 718 재료의 열 스트라이핑 피로한도는 초기 균열의 크기, 표면의 마무리상태 및 제작형태에 민감한 것으로 나타났다. 열 스트라이핑 성능은 modified 9 Cr-1 Mo 강이 316 스테인레스강과 Alloy 718에 비하여 우수한 것으로 나타났다. 반면 사각형 모양의 바(bar)에 대한 열 스트라이핑 시험에서는 (a) modified 9 Cr-1 Mo 강의 성능이 Alloy 718과 거의 비슷하며 (b) LMFBR의 내구한도가  $2 \times 10^6$  이상에 대해서는 설정할 수가 없는 것으로 나타났다. ASME 코드의 피로곡선을 고주파수 영역에까지 확장하는 것은 열 스트라이핑 문제를 해결하기 위해서 반드시 필요한 것이다. 실제의 혼합조건 하에서 유체 및 금속온도를 표현해주는 절차가 필요하다. 과거의 경험에 의하면 동일한 고온 및 저온 유체유동 온도 이력 조건을 줄 때 열 스트라이핑 시험설비에서 측정된 열 변동(fluctuation)이 EBR-II 및 FFTF의 실제 운전조건에서 평가된 열 변동보다 더욱 심한 것으로 나타났다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제” 및 “설계기초” 문제로 분류된다.

#### 2.1.12 사안 12 : 신뢰성있는 크립-피로 설계지침 부족(Lack of reliable creep-fatigue design rules)

크립-피로에 관한 ASME 코드의 설계지침은 부록 T(모재에 대해서는 T-1400, 용접재에 대해서는 T-1700)에 제시되어 있다. 평가를 위해서는 탄성 또는 비탄성 절차를 밟을 수가 있다. 두 경우 모두 크립-피로 손상은 수명기간에 걸쳐 크립-피로손상 envelope 또는 D-Diagram에 의한 시간과 주기의 선형합산에 기초하고 있다.

이 단순화된 평가식은 “경험식이며 지나치게 보수적이고 설계과정에서 이해 및

적용이 난해하다”는 비평을 받아 왔다. 그러나 코드의 부그룹(SG)이 가장 우려하는 사항은 열 천이 시험에서 드러난 비탄성 해석의 보수성 부족 및 Eddystone 발전소 배관의 파손이다. 탄성 크립-피로 지침의 개량 필요성에 의하여 ASME 코드의 SG는 보다 정확하고 적용이 쉬운 지침을 ASME NH에 적용하였지만 비탄성 지침은 아직도 보수성이 지나치게 큰 시간 및 주기 손상률에 대한 선형 접근법을 그대로 사용하고 있다. 이에 대한 우려의 결과로 ASME 코드의 고온구조 SG(설계 부위원회의 부그룹)는 이 불확실성을 고려하기 위하여 설계 여유도를 증가시켰다.

또한 천이상태의 예측과 관련하여 등은 데이터를 사용하는 것에 대한 의견의 차이가 있다. 즉 현재의 코드는 등은 데이터에 기초하고 있는데 실제의 천이 상태는 천이온도의 범위에 걸쳐 발생하기 때문이다.

지금의 비탄성 해석 지침은 파단이 일어날 때까지 반복되는 인장, 압축 유지시간 사이클 하에서 이루어지는 단기 실험실 시험조건에서는 보수적인 수명을 제시하는 것으로 나타났다. 그러나 느린 크립-피로 (유지시간) 사이클을 동반하는 고주파수 피로(HCF) 블록을 산재시키면 ASME NH의 안전 여유도는 상당히 줄어드는 것으로 나타났다. 그 설계여유가 초과할 우려도 있다. 일반적으로 설명하면 수명 초기의 단지 몇 사이클에 의하여 균열이 진전하고 이 균열은 고주파수 피로 사이클에 의하여 빠르게 진전하며 결과적으로 순수한 HCF에서보다 빨리 파단이 일어날 수가 있게 된다. 크립-피로 사이클 하에서 수명에 관하여 일부 연구원들은 손상이 더 이상 긴 유지시간에 대해서는 증가 또는 가속되지 않는 포화 효과가 존재한다고 보며, 반면에 다른 연구원들은 매우 긴 유지시간에 대해서는 피로저항이 복원된다고 보고 있다. 장기간에 걸친 시험데이터가 없기 때문에 장기에 걸쳐 어떤 거동이 나타날지는 아무도 확실하게 말할 수가 없다. 대부분의 실험실 시험은 유지시간이 30분 이하이지만(드물게는 10시간까지도 수행), LMR 원자로의 경우 유지기간이 1,500시간까지 간다. 현재 ASME NH의 선형손상 모델을 대체하는 것에 대한 명확한 동의가 없는 실정이고, 보다 개선되고 신뢰할만한 모델이 개발 및 검증되고 이것이 설계과정에 반영이 되어야 할 것이다.

이 사안은 “재료 및 데이터 베이스의 안전성 문제” 및 “설계기초” 문제로 분류된다.

2.1.13 사안 13 : 어렵고, 너무 보수적인 라체팅 설계지침(Difficult, overly conservative ratcheting design rules)

라체팅 파손에 의한 설계지침은 ASME NH의 부록 T(T-1200과 T-1300)에 제시되어 있으며, 이는 부품의 수명기간에 걸쳐 누적 비탄성 변형률을 제한하기 위하여 제정된 것이다. 누적 변형량이 코드의 허용치를 초과하지 않은 것을 보이기 위하여 탄성, 단순화된 비탄성 지침 또는 시간이 많이 소요되는 상세 비탄성 해석을 수행할 수가 있다. 기존의 설계지침은 너무 보수적이며 이해 및 적용이 어렵다는 비판을 받아 왔다[4]. 이것도 PVRC에 사안으로 제기된 바 있으며 이를 인용하면 다음과 같다.

탄성론에 기초한 라체팅 지침은 경험적이고 임의적이며 지나치게 보수적일 뿐만 아니라 때로는 따르기에 혼란스럽기도 하다. 지금의 지침은 구조 불연속부위에 적용이 불가능하며 ASME NH의 1983년도 버전의 라체팅 시험 No.3은 양면 열충격(double-sided thermal shock)의 평가에는 적절하지가 않다.

CRBRP 프로젝트가 중단되고 PVRC가 위의 문제를 발견한 이래로 ASME NH의 라체팅 파손에 대한 설계지침은 일반 구조물에 적용이 가능하도록(종전 지침은 축대칭이 아닌 경우 및 비선형 온도구배를 갖는 경우에 대해서는 적용이 불가능하였음) ASME에 의하여 수정 개선작업이 이루어졌다. 또한 개정된 지침은 구조적 불연속 부위에 대해서도 적용이 가능하도록 수식화가 이루어졌다. 또한 탄성추종이 동반된 응력을 다루는 문제도 설계의 현안문제가 되어 왔었다. CRBRP가 중단된 후 ASME는 탄성추종이 동반되는 이차응력은 모두 일차응력으로 분류하였으며 이로부터 코드의 모호한 부분의 일부가 명확하게 되었다.

ORNL의 전체적인 평가의견은 (a) 이 사안은 안전성에 배치되는 경제성의 문제로서 대중을 위험에 처하게 할 수도 있고, (b) 이 지침은 지나치게 보수적이며 원전의 단가를 올려주는 요인이 되고 (c) 설계 방법론의 관점에서 지침의 개선이 필요하다는 것이었다.

이 사안은 “설계기준 경제성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.14 사안 14: 검증된 용접설계 방법의 부족(Lack of validated weldment design methodology)

고온 원자로 특히 ALMR에 대해서는 중요한 기술문제로서 용접에 관한 설계이론이 부족하다는 것이 보편적인 인식이다. 용접부의 크립 및 피로강도를 제어하는

중요한 인자들이 많이 있다. 일반적으로 용접에서 어떤 인자가 가장 중요한 것인가에 대한 이해가 부족하다. 프랑스의 Phenix 원자로는 가동후 얼마 되지 않아 11 군데에서 용접 손상이 발생하였다. CRBRP의 인허가 과정에서 NRC는 해결되지 않은 첫 번째 구조문제로서 특히 반복 열충이 하중을 받는 기기에 대하여 용접 균열발생의 위험성을 제기하였다. 이를 인용하면 다음과 같다.

고온에서 운전되는 구조재료 용접부에서 잠재적 균열발생 가능성은 특히 우려되는 사항으로서 CRBR의 적용에 있어서 중요한 많은 인자들이 포함되지 않았다. 심사 요청자들은 고온에서 운전 중인 용접재의 구조적 건전성을 성공적으로 실증하지 못했다. 심사 요청자들은 다음의 부가적인 인자들을 고려하여야 한다.

- 내부 표면에서 반복 소동 열하중을 받는 용접부의 열 영향부(HAZ)에서 균열의 초기 발생에 대한 고려
- 용접부에서 재료 물성치 변화 및 재료의 노치효과 특유의 크립-피로 및 크립-파단 손상의 고려
- 길고 얇은 균열이 존재할 때 HAZ에서 시간속도(time rate), 사이클속도(cycle rate) 및 유지시간의 효과 고려
- 벽 두께 방향으로 균열이 가지 않은(remaining uncracked wall thickness) 부분에서 잔류응력 및 열 반복하중 기인한 enhanced 크립의 고려
- 크립영역의 고온 운전에 따른 균열이 발생하지 않은 부분에서의 안정성 평가 등이다.

CRBRP 관련 위의 공개 질문들에 대하여 정량적인 평가를 수행하는 것이 요구되어 NRC는 5년간에 걸친 시험 및 해석을 통해 검증 프로젝트 수행을 지원하게 되었다.  $S_t$  및  $S_{mt}$  허용 응력강도의 설정을 위하여 하중제어 응력 하에서 용접부의 응력-파단 설계인자가 개발되고 또한 ASME NH에 반영되었다.(section 3221 & Tables I-14.10) CRBRP 프로젝트가 중단된 후로 용접부의 피로설계를 위하여 이와 유사한 인자의 개발을 위한 활동이 이루어졌으며 동이가 이루어진 인자(factor) 및 지침은 관련 코드 위원회의 승인을 얻었다.

PVRC도 원자로 기기의 장기 안전성을 확보하는데 있어서 용접부가 가장 우선적으로 해결해야 할 중요 문제로 제기하였다. 이를 인용하면 다음과 같다.

금속 물성치에 관한 ASME 부위원회(SC-P)는 고온에서의 용접 물성치를 검토

하기 위하여 용접 부위원회(SC-IX)와 강도에 관하여 협력 부그룹(sub-group)을 결성하였다. 이 분야의 연구 개발은 미국내 정부의 지원을 받는 국립 연구소, 학교 및 산업체 등이 용접 구조물의 수명예측 기술을 개선하기 위하여 설계 해석방법, 설계 이론 및 다른 특별한 요건들에 관하여 이루어지고 있다. 예를 들면 실험 및 해석에 기초한 용접감소 인자(welding reduction factor)는 1986년도 ASME NH에 포함되었다. 용접균열에 대하여 상세한 재료평가 및 비탄성 구조평가를 수행하고 모형 노즐 시험 등을 수행한 결과 높은 항복강도와 HAZ에서의 낮은 연성이 높은 '일차' 압력하중에서 관찰되는 크립-파단 균열의 주요 원인인 것으로 나타났다. 용접재 및 모재의 물성치 차이는 지배적인 하중이 변형률제어 열천이 상태에 기인한 설계일 때 이것이 모재 및 강도가 더 높은 용접재에 항복을 야기하기 때문에 매우 중요하게 될 수가 있다.

용접시험 관련 일본의 시험적 연구에 의하면 용접재가 모재보다 더 약한(낮은 항복응력) 것으로 나타났다. 결과적으로 크립-피로 상호작용에 의한 파괴는 용접재가 아닌 접촉하는 '강한' 모재에서 발생한다. 용접부위에서 재료 및 기하학적 불연속성에 따른 용접부의 크립-피로 강도를 평가하는 단순한 절차가 개발되었다. CRBRP의 여러 금속의 천이용접에 대한 실험 및 해석적 복합평가법에 의하면 냉간체결(cold joint)은 30년의 발전소 수명에 걸쳐 구조적 건전성을 그대로 유지하지만 고온체결(hot joint)은 약 15년 정도에 걸쳐 건전성이 유지되는 것으로 나타났다. 용접재에 대하여 제작방법, 설계지침과 이론 및 비탄성 해석 기술을 개선하는 것이야말로 설계방법을 개선하고 설계지침을 명확히 하며 부족한 운전경험을 보상하기 위해서는 반드시 필요하다. 용접 설계방법의 개발을 위한 많은 프로젝트가 현재 수행되고 있으며 이 프로젝트의 연구결과를 적용하는 것이 필요할 것으로 보인다. 여기서 추천하고자 하는 사항은 다음과 같다.

- 용접 피로 및 장기 크립-피로 재료 데이터의 수집, 평가 및 현재의 해석적 방법과 이론의 용접부에 적용성 평가
- 용접 거동의 이해 도모와 단순 및 상세 해석방법 개발을 위한 단기(변형), 장기(파괴) 용접특성 및 구조시험
- 용접부의 크립 균열발생과 반복 기계 및 열하중 그리고 고온에서의 장시간 유지에 따른 크립 균열진전의 예측방법 개발
- 물성치의 잘못 짝짓기(mismatch), 용접 형상, 잔류응력, 삼축응력 등의 다양한 용접효과를 평가하고 정량화하며, 일반 설계해석에서 중요한 용접특성의 포함을 권

장한다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.15 사안 15 : 결함 평가절차의 부족(Lack of flaw assessment procedures)

ASME NH에서 파손(failure)은 균열의 초기발생으로 정의되고 있다. 현재의 코드 설계방법 하에서는 원자로 부품에는 어떤 결함 및 균열도 없는 것으로 가정된다. 기동 전에 발견되는 어떠한 결함도 전출력 운전 전에 보수가 된다. 그렇지만 이 보수과정이 손상을 제거하거나 줄이기보다는 부가적인 손상을 야기할 수가 있다. 여기서 최상의 처방 특히 작은 결함을 잘 찾아내어 ISI 중에 감시를 하는 것이다. 설계 및 제작 사회(community)에서는 건설을 완료한 시점에서 새로운 원자로계통의 부품에 결함(flaw)이 있을 것이라는 것에 대하여 동의하고 있다. 여기서 제기되는 문제는 그러면 ‘균열’이란 무엇인가 하는 것이다. 어느 점에서 결함(imperfection)이 1~수 개에 입자에 걸친 미소균열(micro-crack)이 균열로 성장하느냐 하는 것이다. 또한 ASME 코드 Sect. XI은 ISI에서 발견된 균열이 원자로 운전 재개 이후 잔류수명이 얼마나 남아 있는지에 대하여 평가할 수 있는 균열진전 평가법을 제시하고 있지 않다. 크립 및 소성효과를 포함하는 고온재료의 비탄성 균열진전 지침이 개발되어 ASME NH 및 Sect. XI에 포함이 되거나 NRC의 규제 지침에 포함되어야 한다. 전체적으로 보았을 때 필요한 분야는 크립, 크립-피로 및 크립-라체팅 조건에서의 부품 파손을 예측하기 위한 결함의 모델링 지침 및 실험적으로 입증된 방법의 개발이다. 이 분야는 특히 중요 LMR 부품에서 파단전 누설(LBB) 평가기술과 관련된다. PVRC는 다음과 같은 조언을 하고 있다.

결함의 허용 평가는 많은 고속로의 부품 및 계통에 대하여 이루어졌으며 이 중 가장 두드러진 것은 루프형 원자로의 일차계통 배관이다. 미국 DOE의 지원을 받은 고온구조설계(HTSD) 프로그램 하에서 여러 가지 사례에 대해 많은 평가가 이루어졌다. 고온에서의 결함 평가법, 피로 및 크립-균열 진전에 대하여 향후연구의 추천 사항은 다음과 같다.

- 크립-피로 상호작용의 효과를 포함한 크립영역에서의 균열진전 평가
- 용접부 잔류응력이 균열진전에 미치는 영향
- 용접 천이역에서의 균열 거동

- 열 스트라이핑이 피로 및 크립 균열성장에 미치는 영향
- 다축 응력장에서 짧은 균열 및 균열들의 거동
- 비탄성 파괴역학 평가법 개발
- 소규모 부품시험에 의한 해석법의 검증
- 확률론적 파괴역학에 의한 구조건전성 평가

EPRI가 지원 하에 ORNL은 고온구조 평가절차를 개발하였는데 이는 ASME 코드에 반영되지는 않았다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.16 사안 16 : 다축 응력상태의 불확실성(Uncertainty of multiaxial stress state effect)

다축응력 상태가 고온에서 부품의 파손에 미치는 영향에 대한 이해가 아직은 부족한 상태이다. 현재의 ASME NH 지침은 크립기인 시간의존 파손 모드에 대하여 보수적인 수명 평가법을 제시하고 있다. 이 지침들의 검증은 단축시험에 기초하고 있다. 현재의 설계코드의 정확성을 검증할 수 있는 충분한 시험 시간(설계수명의 10% 이상-특히 60년 수명으로 예상하고 있는 ALMR에 대하여)의 다축 재료 및 구조시험이 많이 수행되지 못했다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.17 사안 17 : Nonradial 하중효과의 불확실성(Uncertainty of nonradial <nonproportional> loading effect)

설계자 및 재료 엔지니어들은 복잡한 다축응력 하에서의 크립 및 크립-피로 손상의 누적에 대하여 잘 이해하고 있지 못하다. 설계수명의 10% 이상인 장기 nonradial 하중과 관련하여 ASME NH의 지침을 검증할 만한 데이터가 거의 전무한 상태이다. 현재의 ASME NH은 크립 및 피로손상을 스칼라 물성치로서 다루고 있지만 이 데이터들은 그 특성상 손상 누적이 방향성이 있는 텐서라는 사실이다. ORNL이 nonradial 하중 하에서 수행한 크립-파단 시험은 선형 시간-분수 손상방법이 보수적인 것을 검증하기 위하여 몇 건의 시험을 수행한 결과 손상을 스칼라 형태로 다루는 것은 크립-파단 및 크립-피로 하중 하에서는 보수적인 수명평가가 되는 경향이 있지만 이 가정을 뒷받침해줄 만한 데이터가 매우 적다.



이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.18 사안 18 : 노치 약화효과의 이해 및 검증의 부족(Validation of notch weakening effects)

노치와 같은 불연속부의 수명을 적절하게 실증하는 것은 고온구조 설계법에서 가장 어려운 시험을 요구한다. 용접문제와 더불어 이 문제는 CRBRP의 인허가 과정에서 NRC의 가장 중요한 관심의 대상이었으며, 5년에 걸친 실증 프로그램이 NRC에 의하여 규정된 바 있다. 노치 부분의 크립 및 피로손상에 대한 장기 변동 물성치에 기인한 불확실한 비탄성 거동의 효과가 주요 문제였다. 밀접하게 관련된 문제는 최대, 최소 또는 두 개의 조합과 같은 설계 물성치의 평균값 사용과 관련된 것이다. 합금성분 변화의 허용치로부터 기인하거나 구성방정식 또는 유한요소해법의 근사화에서 발생하는 해석적 오차 등이 결합하기 때문에 고온구조물의 거동을 정확하게 평가한다는 것은 매우 어렵다. 노치와 같이 생긴 구조물에 대한 코드의 평가법이 적절한지를 실증하기 위해서는 부가적인 파괴 시험, 특히 굽힘하중에 대한 시험이 요구된다. NRC는 이에 대하여 다음과 같이 기술하고 있다.

코드에서 허용응력은 기본적으로 노치가 없는 크립시편 시험 데이터에 기초하고 있다. 응력을 올리는 것(stress raiser)은 전체 벽 두께에 걸쳐 다음의 두 가지 방법으로 크립 거동에 영향을 미친다. 이것은 슬립 라인의 형성을 막음으로써 비탄성 유동(flow)을 억제한다. 이 사실은 net 단면에서 평균응력 강도가 줄어드는 것을 보면 알 수 있다(노치 강화효과). 응력을 올리는 것은 또한 크립-파단 손상이 조기 균열성장 및 보다 빠른 균열의 전파를 야기할 수 있는 위치를 정하게 한다. 비록 이 두 가지의 혼합된 효과가 대부분의 경우에 있어서는 노치 강화효과에 해당되지만 어떤 기하학적 형상, 하중 및 재료의 물성치가 노치 약화효과를 야기하는지 특히 장기 고온 하중에 대해서 평가가 요구된다. 가로 전단(transverse shear)과 같은 하중조건은 노치 강화를 일으키지 않고 구조 불연속 부위에서 용접부의 균열 발생 원인으로 작용한다.

본 연구에서 파악한 바로는 이상에 대하여 필요로 하는 정보를 가지고 있고, 이 문제에 대하여 깊이 있는 연구를 수행하고 있으며 설계에 적용할 수 있는 시험데이터를 생산하고 있는 프로젝트는 없는 것으로 보인다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

2.1.19 사안 19 : 소성 변형률 집중인자에 기초한 단순피로평가에 대한 코드의 보수성부족 (Lack of conservatism in code rules for simplified fatigue evaluations based on plastic strain concentration factor)

이 사안은 CRBRP 설계인증 과정에서 드러난 것으로 “이 사안은 피로 평가시 소성변형률의 집중계수인  $K_e$  인자의 사용과 관련된다. ASME 코드의 단순화된 방법에서는 일차 및 이차응력범위(primary plus secondary stress range)가  $3 S_m$ 을 초과할 때까지 이 인자는 ‘1’이다. 탄성응력 집중계수를 포함하는 국부 응력 범위가  $2 S_y$ 를 초과할 때 실제로 이 인자는 1을 초과하게 된다. 출판된 논문에서 ASME 코드의 단순 탄소성 접근법에서 보수성이 부족하다는 지적이 있었다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

2.1.20 사안 20 : 고온에서 지진효과를 나타내는 검증된 지침 부족(Lack of validated rules / guidelines to account for seismic effects at elevated temperature)

이 사안은 CRBRP 설계인증 과정에서 Finding No. 2에 해당되며 계속하여 현안 문제가 되고 있다. 이를 인용하면 다음과 같다.

ASME NH은 수명기간동안 부품에 누적된 다양한 비탄성 변형률에 대한 제한치를 제시하고 있다. 수명이력은 제한된 강도(limited intensities)의 그룹별 사이클에 의하여 표현된다. 크립을 무시할 수 있는 온도영역에서는 변하는 하중의 순서가 중요하지 않으며 응력은 응력제어 일차 및 변형률 제어 이차값(secondary values)으로 분류된다. 이 응력값은 구조물의 수명평가를 위한 구조해석에 사용된다. 지진은 구조물에 높은 수준의 단기 일차응력을 일으킨다. 지진하중은 잔류응력을 변화시킴으로써 enhanced 크립을 발생시키는 비탄성 변형률 누적에 영향을 미친다. 지진하중은 또한 진동의 강도가 소성 라체팅을 일으키기에 충분하면 운동 중에 소성변형률을 누적시킬 수 있다. 지진발생 이후에 잔류응력의 이완(relaxation)은 그 후의 고온운전에서 enhanced 크립을 야기한다. 결과적으로 하중의 순서가 크립에서는 중요하게 된다.

CRBRP의 경우에 이 문제는 NRC가 웨스팅하우스에 지진하중 이후에 국부 잔류응력으로부터 발생하는 enhanced 크립(라체팅) 및 크립-파단 손상을 고려하도록 조

치함으로써 해결되었다. 운전 천이 상태와 관련하여 지진하중의 작용순서를 고려할 필요가 있다. ASME 코드는 보수적인 결과가 나오도록 하는 반복하중의 이력을 어떻게 이상화시킬 것인가에 대한 지침이 마련되어 있지 않다. LMFBR의 비탄성 동적 해석이 정적 비탄성 해석보다 훨씬 복잡하기 때문에 가장 보수적인 하중의 정의는 실제적인 것이 아니다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.21 사안 21 : 배관의 비탄성 설계절차 부족(Lack of inelastic design procedure for piping)

이 문제에 대해서는 참고문헌[5]에 좀 자세히 설명이 되어 있다. 여기에서 간추린 주요 내용은 다음과 같다. 탄성추종이라는 용어는 Robinson이 배관계통에서 변형률제어 열팽창 하중에 의한 크립 변형률 집중을 설명하기 위하여 만들어낸 것이다. 탄성추종은 소성 및 크립 등에 의한 비탄성 효과를 포함시키기 위하여 탄성설계 지침에서 사용되고 있는 개념이다. 탄성추종은 파괴 모드가 아니다. 탄성추종에 대한 정의가 코드에서 명확하게 내려져 있지 않기 때문에 이 분야의 전문가들마다 서로 다른 탄성추종의 정의를 가지고 있다. 코드에서 탄성추종에 대한 정의가 분명하게 내려져 있지 않기 때문에 탄성추종법을 해석에 고려하지 않고 복잡한 구조물을 설계하는 것은 비교적 쉬운 일이다.

탄성추종은 구조 기기에서 소성 및 변형률 집중을 표현하는데 있어서 단순하게, 때로는 부적절하게 사용되는 등 이 분야에서 혼동이 일어나고 있다. 혼동은 구조적인 거동보다는 정의상의 문제이다. CRBRP의 일차 열전달계통 배관의 상세 비탄성 해석에 의하면 잘 설계된 배관계통에서는 탄성추종이 문제가 되지 않는 것으로 나타났다. 상세 비탄성해석에 의하여 검증된 단순 탄성해석 절차는 탄성추종에 관한 수치 평가법을 제시하고 CRBRP 배관계통의 장기 구조 건전성에 관한 US NRC의 우려를 불식시켜 주었다. 탄성추종을 평가하는 다른 단순 평가법이 유럽 및 일본에서 개발된 바 있다. 이 단순한 평가절차들은 어떠한 배관계통의 형상에 대해서도 선형 탄성추종을 평가할 수 있다. 예를 들면 일본 몬주의 축소배관 시험에서 설계가 잘된 배관 계통에서는 탄성추종이 크게 발생하지 않았다. 이를 실행한 엔지니어들과의 비공식적인 토의 결과도 원형로에서는 탄성추종이 중요하거나 탄성추종이 발전소 운전정지를 야기하는 경우를 찾아보지 못했다는 것이다. ASME 코드에서도

탄성추종에 대하여 보다 명확히 정의를 할 필요가 있으며, LMFBR 배관계통의 탄성추종을 평가하기 위한 평가절차가 설계자에게 제공되어야 한다. 또한 ‘많은 양의 탄성추종을 동반한 이차응력은 ...’과 같이 모호한 용어는 ASME 코드로부터 삭제될 것이 아니라면 보다 명백히 표현되어야 한다.

여기서 주의할 사항은 CRBRP가 중단된 이래로 ASME 코드는 Subsection NH에서 PVRC의 연구에서 드러난 코드의 불확실성을 명백히 하기 위하여 탄성추종을 동반하는 모든 이차응력을 일차응력으로 분류하였다는 것이다. ORNL이 여기서 중요한 것으로 판단하는 것은 이 탄성추종에 대한 정의 및 표준화된 해석방법에 있어서의 동의가 필요하다는 것이다. 배관의 부품에 대한 응력지수의 확장과 고온에서 시간의존성 파괴에 확장하기 위해서는 이를 실험적으로 검증하는 것이 필요하지만 가장 시급한 기술적 과제는 실험적으로 검증된 탄성추종 평가법의 개발이다. 탄성추종은 배관이 스프링과 같이 작용하게 하고, 동적인 과도가 끝난 후에도 계속 하중이 작용하게 하며 배관 라인의 취약부에서 비탄성 변형률의 누적을 야기한다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.22 사안 22 : 지나치게 보수적인 좌굴 기준(Overly conservative buckling rules)

이 사안은 ASME NH의 좌굴지침에서의 지나친 보수성에 관한 것으로 종래에 PVRC도 이에 대하여 다음과 같이 지적한 바 있다.

ASME 코드의 Sect. I, III, VIII 등에 제시된 좌굴지침은 외압을 받고 있는 원통 쉘, 구형 쉘 및 축방향으로 압축하중을 받고 있는 원통형 쉘에 대한 것이다. 배관의 엘보우 등과 같이 Sect.III에서 커버하고 있지 않은 기하학적 형상 및 하중의 경우에도 해석을 가능하게 하고, 최근의 발전된 수치해법 기술을 적용하기 위하여 ASME NH은 좌굴 및 붕괴(collapse)하중에 관하여 설계하중을 제한하는 좌굴 계수(factor)의 형태로 좌굴 한계를 고려하고 있다.

CRBRP 배관계통 및 압력용기의 적용경험에 의하면 좌굴하중 계수 ‘3’은 소성영역에서 좌굴이 일어나는 배관, 엘보우 및 압력용기 등에 대하여 매우 보수적인 것으로 나타났다. 이 하중계수를 감소시킬 수 있는 이유는 소성영역에서의 좌굴이 초기에 결함에 둔감하고(imperfection insensitive), 비교적 큰 소성 붕괴가 발생한 후에 점차 소성붕괴가 점진적으로 진행되기 때문이다. 엘보우에 대하여 고온 좌굴시험을 수행한 결과 제작 상태 대로의 엘보우에서 측정된 소성 좌굴하중은 ASME

NH의 최소 물성치를 이용한 것보다 약 50%정도 높게 나타났으며, 실험적으로 측정된 크립 좌굴시간은 해석에 의해 예측된 시간보다 약 10배가 긴 것으로 나타났다.

ASME NH은 하중제어 좌굴보다는 변형률 제어에 대한 낮은 설계인자를 규정하고 있다. 그러나 반복형태에 대한 좌굴을 방지하기 위하여 코드는 변형률제어 및 하중제어의 복합하중제어 하중이 구조물에 작용할 때 좌굴에 적용되는 높은 설계계수를 변형률제어 열 하중에 사용하도록 보수적으로 규정하고 있다. 이 요건은 이미 보수적인 설계계수를 사용하고 있는 것에 추가적인 제약을 주는 것이다. LMFBR 구조물의 붕괴를 예측하기 위해서는 상세 비선형 해석을 따를 경우 현재의 설계 절차에서 변형률 제어 및 하중제어 좌굴에 관한 불확실성의 제거 및 설계계수를 줄이는 것이 필요하다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

#### 2.1.23 사안 23 : 설계지침에서 열성층 설계지침의 필요성 (Need for thermal stratification design guidelines)

배관의 길이방향 뿐만 아니라 배관단면 상하의 온도구배를 의미하는 배관의 열성층은 유체온도가 다른 두 개의 탱크를 연결하는 배관에서 유체가 거의 정지상태에 있을 때 발생하게 된다. 열성층 현상은 배관의 직경방향 온도차에 의하여 축방향으로 심한 굽힘응력을 일으킨다. 이와 같은 유동이 실제 일어날 수 있는 곳은 경수로의 가압기 밀림배관, 잔열제거 배관계통 등이다. 고온 LMR 발전소의 설계특성에 따라 설계에 반드시 반영되어야 하는 열성층 현상이 중요하게 나타나는 부품 또는 연결 부품이 있을 수 있다. 과거의 원전설계에서는 이 현상에 대한 이해의 부족으로 열성층 효과에 의한 열응력 및 잠재적 열충격을 고려하지 않았지만 요즘은 이 현상이 설계에 반영되고 있다. NRC도 원자로의 제작자 및 전력회사 공동체 (utility community)에 이 문제를 제기한 바 있으며, 이 문제를 해결하기 위한 설계방법이 있다. 그러므로 이 문제는 풀린 것으로 간주 할 수 있기 때문에 이 보고서에서는 더 이상 다루지 않는다.

이 사안은 “설계기준 안전성” 문제로 분류된다.

## 2.2 사안의 분류

위에서 언급한 사안들은 다음과 같은 방법으로 분류하였다.

### 2.2.1 사안형식

- (S) : 안전성
- (E) : 경제성

### 2.2.2 사안 근거

- 재료 및 데이터베이스 기초 (M)
- 설계 기초 (D)
- 위의 두 가지 모두 (M&D)

### 2.2.3 사안의 수준

i) 수준 1 : 해결되지 않으면 60년 원자로 수명 설계기간에 적합하지 않게 될 설계지침

ii) 수준 2 : 현재 코드 내에 존재하는 방법으로 부정확한 것으로 알려져 있고 설계에는 사용될 수 있지만 불안전 측의 설계로 대형 파괴 가능성을 안고 있는 사안

iii) 수준 3 : 현재 코드 내에 존재하는 방법으로 설계에는 사용될 수 있지만 해결하는 데 상당한 시간을 요구하며 원자로수명기간 동안에 걸쳐 실증이 충분히 이루어지지 않은 것으로 판단되는 문제

iv) 수준 4 : 현재 코드 내에 존재하는 방법으로 설계에는 사용될 수 있지만 해결하는 데 비교적 많은 자료를 요구하며 원자로수명기간 동안에 걸쳐 실증이 충분히 이루어지지 않은 것으로 판단되는 문제

v) 수준 5 : 현재 코드에는 명시적인 규정이나 지침이 존재하지 않지만 안전한 설계 및 운전을 위해서는 설계지침이 필요한 것으로 판단되는 문제

vi) 수준 6 : 현재 코드 내에 존재하는 방법으로 설계에는 사용될 수 있지만 많은 예산 및 장기적 노력이 없이도 추가적인 데이터, 검증 등의 정보를 이용하여 해결할 수 있는 것으로 판단되는 문제

이상의 방법에 기초하여 현안 사안들을 분류하면 다음과 같다.

표 2. 각 사안에 대한 요약

Issue No.	Issue Level	Issue	Category (type-bases)
1	1	Lack of material property allowable design data curves for a 60 year design life	M-S
6	2,6	Degradation effect of small cyclic stresses	M-S
16	2	Uncertainty of multiaxial stress state effects	D-S
19	2	Lack of conservatism in Code rules for simplified fatigue evaluation based on plastic strain concentration factors	D-S
18	2	Lack of understanding /validation of notch weakening effects	D-S
14	3,4,5	Lack of validated weldments to account for seismic effects at elevated temperature	D-S
20	3,4	Lack of validated rules /guidelines to account for seismic effects at elevated temperature	D-S
2	3,4	Degradation of material properties at high temperature due to long term irradiation	M-S
3	3,4	Degradation of material properties due to long term thermal aging	M-S
4	3,4	Degradation of material properties due to corrosion phenomena	M-S
12	3	Lack of reliable creep -fatigue design rules	M&D-S
11	4	Lack of validated thermal striping materials and design methodology	M&D-S
7	5	creep-induced failures at temperatures below ASME NH limits	M-S
9	5	Lack of design methodology for modified 9Cr-1Mo steel	M&D-E
10	5	Lack of understanding /validation of effects of short-term overload events on subsequent mechanical properties	M&D-S

Issue No.	Issue Level	Issue	Category (type-bases)
15	5	Lack of flaw assessment procedures / rules	D-S
21	5	Lack of inelastic design procedures for piping	D-S
5	6	Lack of property allowables based on current meting practices	M-S
8	6	Use of average vs minimum material properties in design	M&D-S
13	6	Difficult, overly conservative ratcheting rules	D-E
17	6	Uncertainty of non-radial (nonproportional) loading effects	D-S
22	6	Overly conservative buckling rules	D-S

사안의 형식, 사안근거 및 사안 수준에 따라 분류된 23가지 현안 사안 중에서 연구 개발 중요도를 고려하여 다음과 같이 10가지의 중요 사안을 제안하고자 한다.

- 60년 수명기간에 대한 허용 설계 데이터 및 곡선에 대한 재료 물성치 부족
- 노치 약화효과(notch weakening effect)에 대한 이해 부족
- 검증된 용접 설계법의 부족
- 장기 조사에 따른 고온 물성치의 열화 (환경문제)
- 장기 부식현상에 따른 물성치의 열화 (환경문제)
- 검증된 열 스트라이핑 자료의 부족
- 신뢰할 만한 크립-피로 설계지침의 부족
- 결함 평가절차의 부족
- 배관의 비탄성 설계절차 부족



- 고온에서 지진효과에 관한 법규 및 지침의 부족

## 2.3 해결방안

ORNL은 앞에서 언급한 23가지 기술현안 사안의 각각에 대하여 해결을 위한 방안 또는 추천(program recommendation) 안들을 다음과 같이 제안하였다.

### 2.3.1 사안 1 : 60년 설계수명에 대한 허용설계 데이터 곡선 물성치 부족

- 필요데이터의 검토, 평가 및 확인
- 검증시험
- 관련코드 개발

### 2.3.2 사안 2 : 장기 조사에 따른 고온에서의 물성치 열화

- 문제 검토 및 평가
- 데이터 수집 및 시험 매트릭스 정의
- 핫셀 검증시험
- 코드 지침 및 규제 가이드 패키지 개발

### 2.3.3 사안 3 : 장기간 열 에이징에 의한 재료물성치의 열화

- 문제/경험 검토 및 평가
- 데이터 수집 및 시험 매트릭스 정의
- 계획된 코드의 knock-down 인자 평가
- 필요할 경우 검증시험 수행
- 코드 및 규제 지침 패키지 개발

### 2.3.4 사안 4 : 부식현상으로 인한 물성치의 열화

- 문제/경험 검토 및 평가
- 데이터 수집 및 시험 매트릭스 정의
- 모델개발 / 검증시험
- 코드 및 규제 지침 패키지 개발

### 2.3.5 사안 5 : 현재의 용융 및 제작기술에 기초한 허용 물성치의 부족

- 문제 검토 및 평가
- 데이터 수집 및 수정
- 선별적 검증시험
- 코드 권장 안으로 제시

- 2.3.6 사안 6 : 저 주파수 응력의 열화 영향
- 문제 검토, 평가 / 검증시험
  - 코드 및 규제 지침 방안으로 권장
- 2.3.7 사안 7 : ASME NH 이하 온도에서의 크립기인 파손
- 문제/경험 검토 및 평가, 검증시험
  - 코드 및 규제 지침 권장사항 제안
- 2.3.8 사안 8 : 설계시 평균 및 최소물성치의 사용
- 문제/경험 검토 및 평가
  - 확률론적 매개변수 연구(parametric studies)
  - 코드 및 규제 지침 권장사항 제안
- 2.3.9 사안 9 : Modified 9Cr-1Mo 강에 대한 설계방법 부족
- Modified 9Cr-1Mo 강의 특성시험
  - 이 재료에 대한 구성방정식, 파손이론 및 단순 평가법의 개발
  - 코드 및 규제 지침 개발
- 2.3.10 사안 10 : 단기 과하중이 그 후에 기계적 물성치에 미치는 영향에 대한 이해  
및 검증부족
- 문제 검토 및 평가
  - 검증시험
  - 코드 및 규제 지침 권장사항 제안
- 2.3.11 사안 11 : 검증된 열 스트라이핑 자료 및 설계방법의 부족
- 문제 검토 및 평가
  - 스트라이핑 조건 범위에 대한 특성연구
  - 구조 검증시험
- 2.3.12 사안 12 : 신뢰성있는 크립-피로 설계지침 부족
- 문제 검토 및 평가
  - 크립-피로 모델 개발
  - 단축 및 다축 검증시험
  - 코드 및 규제 지침 패키지 개발
- 2.3.13 사안 13 : 어렵고, 너무 보수적인 라체팅 설계지침
- 문제 검토 및 평가
  - 라체팅 모델/지침개발 및 단순화

- 검증 해석
  - 코드 및 규제 지침 패키지 개발
- 2.3.14 사안 14: 검증된 용접설계 방법의 부족
- 문제 검토 및 평가
  - 용접결합 특성파악
  - 설계방법개발
  - 검증을 위한 구조시험(특히 열과도 하중조건에서)
  - 코드 및 규제 지침 패키지 개발
- 2.3.15 사안 15 : 결함 평가절차의 부족
- 문제 검토 및 평가 / 결함 특성연구
  - 균열성장 및 설계 평가법 개발
  - 검증을 위한 재료 및 구조시험
  - 코드 및 규제 지침 패키지 개발
- 2.3.16 사안 16 : 다축 응력상태의 불확실성
- 문제 검토 및 평가
  - 다축 검증시험 : 크립-파단, 크립-피로, 코드 및 설계지침 제안
- 2.3.17 사안 17 : Nonradial 하중효과의 불확실성
- 문제 검토 및 평가
  - non-radial 검증시험 : 크립-파단, 크립-피로
- 2.3.18 사안 18 : 노치 약화효과의 이해 및 검증의 부족
- 문제 검토 및 평가
  - 기하학적 노치, 하중조건 및 물성치에 대한 매개변수 연구
  - 검증을 위한 구조시험
  - 코드 및 규제 지침 패키지 개발
- 2.3.19 사안 19 : 소성 변형률 집중인자에 기초한 단순피로평가에 대한 코드의 보수성부족
- 문제 검토 및 평가
  - 데이터와 설계지침의 연관시키기
  - 단순지침 개발
  - 코드 및 규제 지침 패키지 개발
- 2.3.20 사안 20 : 고온에서 지진효과를 나타내는 검증된 지침 부족

- 문제 검토 및 평가
- 회수 카운팅 및 분포도 산정 단순모델 개발
- 검증시험 (자료 존재시 데이터/모델 연관시키기)
- 코드 및 규제 지침 패키지 개발

2.3.21 사안 21 : 배관의 비탄성 설계절차 부족

- 문제 검토 및 평가
- 분석 방법, 절차개발 및 분석결과와의 경험 비교
- 코드 및 규제 지침 패키지 개발

2.3.22 사안 22 : 지나치게 보수적인 좌굴 기준

- 문제 검토 및 평가
- 좌굴 데이터 수집
- 해석방법/지침 개발
- 코드 및 규제 지침 패키지 개발

### 3. ASME NH의 개정 추진내용

ASME Section III 코드의 고온설계(ETD) 서브그룹은 1999년 5월 모임에서 다음의 사항들을 논의하고 1998년 이후 버전인 2001년도 ASME NH 코드 내용에 추가하는 것을 승인했다.

#### 3.1 9Cr-1Mo-V강 재료의 추가

ASME ETD 서브그룹은 9Cr-1Mo-V강의 재료 물성치를 ASME NH에 추가시키기로 했다. 영률, 등시곡선 등 일련의 물성치가 게재될 예정이다. 다만 1992년도 ORNL 보고서[10]에 의하면 크립-피로 손상 평가시 TFA(time fraction approach)보다 DEA(ductility exhaustion approach)가 더 좋은 결과를 준다는 점을 지적했다.

#### 3.2 노심지지 및 2/3 등급 지침에 대한 고온설계 지침 제정

ETD 서브그룹은 노심지지 및 class 2/3 지침이 ASME NH에 추가되어야 한다는데 동의했다.

#### 3.3 816 °C 이상의 고온 허용 응력치에 대한 SG-ETD의 검토

SG-ETD는 추가적인 고려사항으로 816 °C (1500 °F) 이상의 고온 허용 응력치에 대한 검토를 계속하기로 합의했다.

#### 3.4 고온 section VIII, Div. 2 지침

section VIII의 크립-피로 면제지침(creep-fatigue exemption rule)에서 제시하고 있는 100사이클에서 항복의 두 배가 Corum의 ductility exhaustion 방법 및 Severud의 크립 응력이완 평가결과에 따르면 보수적인 값이 아니라는 결과가 나왔다는데 유의해야 할 것이라는 논의가 있었다.

#### 3.5 Code Case N-999 추가

Porowski가 제안[11]한 대로 N-499를 ASME-NH의 Appendix P로 다음 사항을 고려하여 채택하기로 합의했다.

+ N-499의 508 class 3을 508 Grade 3 Class 1로 표기한다. 그러면 343 °C의 온도제한이 제거된다.

+ 이 appendix를 참고하기 위해 NH1110을 수정한다.

### 3.6 316FR을 NH에 추가하는 방안

316FR은 일본이 개발한 액체금속로 용도의 개량형 316 스테인리스강이다. 외국 재료를 ASME NH에 추가하는데 대한 논란은 있었지만 먼저 Section VIII의 시간의존 및 시간 비의존 허용치(NH 설계조건에서의  $S_0$ )를 개발하기로 합의했다.

### 3.7 Alloy 617의 982 °C까지 사용 가능하게 하는 초고온설계 Code Case 제정

이는 10년 전부터 Al Dalcher 주도하에 가스냉각로(GCR)에 사용하는 것을 목적으로 태스크포스 팀을 구성하여 개발을 추진해왔지만 GCR 프로젝트가 종료되면서 이 Code Case 제정도 중단되었다. 서브그룹 ETD는 이들 정보와 방법의 보전, 활용 및 개발에 대한 타당성을 조사한다는 계획이다.

## 4. ASME NH의 크립-피로손상 평가법 요약

ASME Section III Subsection NH는 Subsection NB의 적용온도 범위를 넘는 고온구조물에 대해 주로 탄성해석방법에 의한 설계를 권장하고 있으며 경우에 따라 비탄성 해석에 의한 설계도 허용하고 있지만 이 경우에는 인증된 비탄성해석 방법을 사용하여야 하며 이를 설계보고서에 수록하여야 한다. 여기서는 Subsection NH에 따른 크립-피로 평가와 관련된 사항에 대하여 개략적으로 살펴보기로 한다.

크립-피로 손상은 크립과 피로에 대한 각각의 누적손상을 계산한 뒤 단순 선형중첩에 의하여 합한 다음 이를 크립-피로 손상 포락선(creep fatigue damage envelope)에 적용하여 누적 손상계수가 곡선의 내부에 위치하는 지를 살펴 구조건전성 여부를 판정한다.

### 4.1 피로손상 평가절차

탄성해석법에 따른 피로손상 평가 절차를 살펴보면 가해진 하나의 사이클 하중에 대하여 각각의 시간에서의 탄성해석 변형률 범위 성분들을 구하고 이로부터 등가 최대 변형률 범위를 계산한다. 탄성적으로 구한 값은 실제의 비탄성변형을 과소평가하기 때문에 이를 적절하게 보상해 주어야 하는데 다음과 같이 수정된 노이버 법칙(Neuber rule)을 활용한 세 가지 보상식 중의 하나를 사용해서 수정 최대 변형률 범위( $\Delta \epsilon_{mod}$ )를 구하게 된다.

$$\text{(방법 1)} \quad \Delta \epsilon_{mod} = \left( \frac{S^*}{S} \right) K^2 \Delta \epsilon_{max} ,$$

$$\text{(방법 2)} \quad \Delta \epsilon_{mod} = \frac{K^2 S^* \Delta \epsilon_{max}}{\Delta \sigma_{mod}} ,$$

$$\text{(방법 3)} \quad \Delta \epsilon_{mod} = K_e K \Delta \epsilon_{max}$$

여기서  $\Delta \sigma_{mod}$ 는  $\Delta \epsilon_{mod}$ 에 대한 등가 응력범위를 나타내며  $K_e$ 는 설계코드에 따른 변형률집중 계수를 나타내며, 위의 세가지 경우 중에서 첫번째 방법은 국부적인 소성변형과 크립의 영향을 고려한 보수적인 방법인데  $K$ 는 등가 응력 집중계수이고  $S^*$ 와  $\bar{S}$ 는 각각  $\Delta \epsilon_{max}$ 와  $K \Delta \epsilon_{max}$ 에서의 응력지시값이다. 두 번째의 경우도 수정된 노이버 법칙을 이용한 식인데 첫 번째 방법보다 덜 보수적이고 세 번째 방법이 가장 보수적인 경우이다. 위에서 설명된 절차를 따라 수정 최대

변형률범위를 구하고 나면 다축 응력 소성영향과 포와송비를 다음과 같이 고려하는 계수  $K_v$  를 사용하여 최종적인 총 변형률 범위( $\epsilon_t$ )를 다음과 같이 구한다.

$$\epsilon_t = K_v \Delta \epsilon_{mod} + K \Delta \epsilon_c$$

여기서  $\Delta \epsilon_c$ 는 등가 크립응력  $\sigma_c$ 를 하중제어 응력으로 사용해서 구한 크립 변형률 범위이고  $K$ 는 국부 형상집중 계수이다. 윗식에서 오른쪽 두번째 항은 피로손상값을 구할 때 추가적인 보수성을 부여하기 위하여 크립 손상값을 더한 것을 알 수 있다. 계산된 총 변형률범위를 이용하여 피로곡선에서 허용횟수를 구한 다음 피로 손상계수를 계산하고, 누적 피로손상 계수는 작용하는 모든 형태의 사이클 하중에 대하여 설명된 절차와 같은 평가를 반복해서 피로 손상계수를 계산하고 이를 모두 선형적으로 더하여 구한다.

#### 4.2 크립손상 평가절차

탄성해석법에 따른 크립 손상계수를 구하는 절차를 살펴보기로 한다. 응력 사이클 동안에 응력응답 평가절차는 우선 지속시간 온도( $T_{HT}$ )에서의 등시 응력-변형률 선도(isochronous stress-strain curve)에  $j$  번째 사이클 형태에 대한 총 변형률 범위( $\epsilon_t$ )를 적용하여 응력값  $S_j$ 를 구하고 이를 지속시간 동안의 초기 응력으로 정의한다. 그리고 이를 평균 사이클시간( $\bar{t}_j$ ) 동안의 응력이완과 다축 응력상태를 고려해 주기 위하여 많은 실험과 연구를 통하여 설정된 다음 식을 이용하여 이완 후의 응력수준( $S_r$ )을 계산한다.

$$S_r = S_i - 0.8G (S_i - \bar{S}_r)$$

여기서  $\bar{S}_r$ 은 단축 이완 모델에서 이완된 응력수준을 나타내고  $G$ 는 응력 사이클의 두 극단 경우 각각에 대한 응력상태에 대해 결정된 다축응력계수(multiaxiality factor)를 나타내며 1보다 크지 않은 값이다. 그리고 평균사이클 시간 동안의 하중제어 과도기간이 응력이완에 영향을 미치면 이를 고려해 주어야 하며 이때에는  $j$  번째 사이클 형태의 하중이 가해지는 동안에 발생하는 최대 온도를 사이클 과도온도( $T_{tran}$ ) $_j$ 로 정의하여 과도기간 중에 발생하는 크립손상을 평가하는데 사용한다. 앞에서 언급한 과정을  $P$  개의 사이클 하중 형태에 대하여 반복하여 응력이력 포락선(envelope stress-time history curve)을 결정한다. 여기서  $S_{LB}$ 는 등가 크립응력( $\sigma_c$ )의 1.25배를 취한 하한치 응력이완 수준을 나타낸다. 이 응력 포락선을  $q$  개의 시간 간격으로 나누어서 각 시간 간격 내에서 편리한 방법으로 계단식 함수로 표현하되 각각의 시간 간격에서의 응력( $S_k$ )과 온도( $T_k$ )를 시간 간격 내에서 최대 크립손상을 나타낼 수 있도록 하는 상수값을 취



한다. 이렇게 구한 응력값에 보수성 인자 1.5배를 곱하여 크립 파단곡선으로부터 허용시간을 구함으로써 크립 손상계수를 계산할 수 있다. 이를 각각의 시간 간격에 대하여 반복해서 크립손상계수를 구하여 모두 선형적으로 더하면 누적 크립 손상계수가 된다.

Subsection NH에서는 크립과 피로현상이 연계된 복합적인 크립-피로 손상계수를 구하는 방법[6]으로 단순히 선형적으로 이들을 더하여 각 사용재료에 따라 정해 놓은 비선형 이직선 설계곡선의 제한치와 비교하는 방법을 채택하고 있는데 이는 사용이 편리하여 프랑스[7]와 일본[8]에서도 같은 방법을 채택하고 있다.

## 5. 결론

본 보고서에서는 고온구조 설계지침인 ASME Code Section III Subsection NH 설계지침이 안고 있는 현안문제 및 적용한계와 관련하여 미국의 ORNL이 작성한 평가보고서를 기초로 하여 현안 사안에 대해 언급하고 그 후의 기술동향에 대해서도 기술하였다.

첫째, ASME NH의 현안 설계 사안 중 가장 중요한 것으로 평가되는 23가지 사안에 대해 문제점을 기술하고 이중 연구개발의 중요도에 따라 10가지 중요사안을 제시했다.

둘째, ASME NH는 고온설계(ETD) 서브그룹에 의해 꾸준히 개정이 추진되고 있다. 국내에서도 고온설계 기술을 향상시키기 위해 ASME와의 활발한 교류가 필요할 것으로 사료된다.

셋째, ASME NH의 크립-피로 손상 평가법에 대해 탄성해석법에 따른 피로손상 및 크립손상 평가절차를 간략히 기술했다.

앞으로 프랑스의 RCC-MR과 일본의 DDS 설계지침 등은 연구개발이 계속 진행되고 있는 바 고온에서 운전되는 액체금속로 구조물의 설계평가를 위해서는 미국, 프랑스 및 일본의 업데이트된 설계지침들의 면밀한 검토 및 분석이 요망된다. 또한 국내 고온 설계기술의 향상을 위해 전문 인력양성 및 고온구조 시험시설에 대한 시설 투자가 절실히 요구된다.

## 참고문헌

- [1] ASME B&PV Code, Section III, Subsection NH, ASME, New York, 1995.
- [2] R.L. Huddleston, R.W. Swindeman, Materilas and Design Bases Issues in ASME Code Case N-47, ORNL prepared for US NRC, NUREG/CR-5955, ORNL/TM-12266, 1993.
- [3] Guidelines and Procedures for Design of Class I Elevated Temperature Nuclear System Components, Nuclear Standard NE F 9-5T, U.S. DOE Office of Scientific and Technical information, Oak Ridge, Tennessee, September, 1986.
- [4] R.A. Ainsworth, M.B. Ruggles, and Y. Takahashi, Oak Ridge National Laboratory, Flow Assessment Guide for High Temperature Reactor Components Subjected to Creep-fatigue loading, ORNL-6641, October, 1990.
- [5] A.K.Dhalla, ed, "Recommended Practices in Elevated Temperature Desgin : A Compendium of Breeder Reactor Experiences (1970-1987), Colume 1, Current Status and Future Directions," Bulletin 362, 42 Welding Research Council, New York, April, 1991.
- [6] L.K.Severud, 'Creep-Fatigue Assessment Methods Using Elastic Analysis Results and Adjustment,' WHC, ASME PVP-Vol. 163, Honolulu, USA, 1989.
- [7] RCC-MR, Design & Const. Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, France, 1985.
- [8] 고속원형로 제1종 기기의 고온구조 설계방침(BDS), PNC, Japan, 1984.
- [9] Meeting addenda, ASME subgroup on elevated temperature design, May 18, 1999.
- [10] ORNL/9CR/92-2, Summary Report JAPC-USDOE Joint Study design methods and data for Modified 9Cr-1Mo Steel.
- [11] Proposed text and data for inclusion of SA-533 and SA-508 into Appendix of Subsection NH.

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/AR-586/2000					
제목/부제	미국 ASME Section III Subsection NH 코드의 재료 및 설계현안 분석				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	이형연 / 액금로 기계설계기술개발				
연구자 및 부서명	김중범, 유 봉 / 액금로 기계설계기술개발				
출판지	한국, 대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2000.12
페이지	42 p.	도표	있음(V), 없음( )	크기	26cm
참고사항					
비밀여부	공개(V), 대외비( ), __ 급비밀		보고서종류	기술현황분석 보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>본 연구에서는 미국의 고온구조 설계지침인 ASME Code Section III Subsection NH코드의 기술 현안문제(issues)를 검토 및 평가한 ORNL의 평가보고서를 기초로 하여 현재 ASME NH 코드가 안고 있는 현안문제 및 적용한계에 대해 분석하고 코드가 제시하고 있는 크립-피로 손상평가 방법에 대해 기술하였다. ORNL은 NRC의 의뢰에 의하여 ASME NH의 기술 현안문제에 관한 평가보고서를 1993년에 발간했다. ASME NH의 전신인 Code Case N-47은 1989년 판에서 크립평가지 역력이완 개념이 도입되는 등 비교적 크게 개정되었다. 그 후 1992년 판의 Code Case N-47과 Subsection NH로 승격된 1995년도 판은 물성치에서 약간의 변화를 제외하고는 거의 동일하다.본 보고서에서는 NRC로부터 설계 인증을 득한 개량형 액금로(ALMR)의 기대 수명기간 동안 안전한 운전을 보장할 수 있는 설계지침 및 규제지침이 부족하거나 적절하지 못한 분야를 현안사안으로 제기하였다. 여기서는 23개의 사안이 제기되었으며 이들을 해결하기 위한 방안이 제시되었다. 또한 본 연구에서는 1999년에 개최된 ASME 코드 서브그룹 회의록에 기초하여 ASME NH의 최신판인 1998 버전에서 코드 수정 및 추가를 포함한 변경추진 항목들에 대해서도 기술했다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	ASME Section NH Subsection NH, Code Case N-47, 액체금속로, 고온구조 설계, 크립-피로				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/AR-586/2000							
Title/ Subtitle		A study on technical issues of materials and design bases in ASME Section III Subsection NH Code					
Project Manager and Department (Main Author)		Hyeong-Yeon Lee/ KALIMER Mechanical Structure Design Development					
Researcher and Department		Jong-Bum Kim, Bong Yoo / KALIMER Mechanical Structure Design Development					
Pub.Place	Taejon, Korea	Publisher	KAERI	Pub.Date	2000.12		
Page	42 p.	Fig. & Tab.	Yes( V ), No ( )	Size	26cm		
Note							
Classified	Open( V ), Restricted( ), ___ Class Document			Report Type	A State-of -the-Art Report		
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>In this study, an analysis of evaluation report by ORNL on the technical issues of elevated temperatures design guide line, ASME Code Section III Subsection NH was conducted and a brief evaluation procedure of the creep-fatigue damage was presented. ORNL published the report in 1993 and reviewed the issue areas where code rules or regulatory guides may be lacking or inadequate to ensure safe operation over the expected life cycles for liquid metal reactor systems. From historical viewpoint of the ASME NH code development, ASME Code Case 47 was changed much in 1989 edition, which includes the stress relaxation behavior in creep damage evaluation. Afterwards the 1992 version of CC N-47 was upgraded to Subsection NH in 1995 edition, which is the same with that of CC N-47 1992 edition except few material data. This report brings up the technical and regulatory issues that can not guarantee the safe and reliable operation of the ALMR which got the conceptual design certification from NRC. Twenty three technical issues were raised and settlement methodology were proposed. Additionally, the status of items approved by ASME code subgroup of elevated temperature design committee for the revision of the most recent 1998 edition of ASME NH was described.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		ASME Section NH Subsection NH, Code Case N-47, Liquid metal reactor, High temperature structure design, Creep-Fatigue					