

침부식에 의한 CANDU형 원전 2차측 배관의 감육 예측에 관한 연구

심상훈* · 송정수** · 윤기봉** · 황경모*** · 진태은*** · 이성호**** · 김위수****

A Study on Prediction of Metal Loss by Flow-Accelerated Corrosion in the CANDU NPP Secondary Piping Systems

S. H. Shim*, J. S. Song**, K. B. Yoon**, K. M. Hwang***, T. E. Jin***,
S. H. Lee****, W. S. Kim****

Key Words: FAC(Flow Accelerated Corrosion, 침부식), Metal Loss(감육), CHECWORKS Code, Remaining Life(잔여수명), Plant Database(발전소 데이터베이스)

Abstract

Flow-accelerated corrosion(FAC) is a phenomenon that results in metal loss from piping, vessels, and equipment made of carbon steel. FAC occurs only under certain conditions of flow, chemistry, geometry, and material. Unfortunately, those conditions are in much of the high-energy piping in nuclear and fossil-fueled power plants. Also, for domestic NPP secondary pipings whose operating time become longer, more evidences of FAC have been reported.

The authors are studying on FAC management using CHECWORKS, computer code developed by EPRI. This paper is on the prediction results of metal loss by FAC in the one of CANDU type NPP secondary piping systems.

1. 서론

원전 2차계통 배관의 FAC(Flow-Accelerated Corrosion) 감육 손상은 1980년대 이래 전세계적으로 광범위하게 보고되고 있다. 특히 1986년 12월 미국의 Surry 2호기 발전소 복수(condensate) 계통의 주급수 펌프 흡입측 18 인치 배관 elbow가 파열된 사고로 인명피해와 경제적인 손실이 발생한 이후 FAC에 의한 배관감육 손상에 대한 관심이 더욱 집중되고 있다.

최근 국내 원전에서도 가동년수가 증가됨에 따라 배관감육으로 인한 손상사례가 다수 발견되어 왔으며, 대표적인 배관감육 사례는 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기, 월성 2호기 등으로 국내 원전 전반에 걸쳐 발생되고 있다. 이러한 배관감육으로 인한 손상은 가동년수 증가에 따라 점차 증가할 것으로 예상된다. 이렇듯 배관 감육에 의한 사고가 확산되고 있는 시점에서 원전 2차 계통 배관 설비의 안전성 확보는 국가적으로 중대한 사안임이 분명하다.

현재 국내에서는 한전 산하 전력연구원에서 2차 계통 배관의 주요 파손 원인이 되고 있는 FAC 관리를 위해 국내 원전 16기의 2차 계통 감육배관 중장기 관리 방안 수립을 위하여 호기별 운전이력, 수처리와 감육배관에 대한 데이터 베이스를 구축하고, 미국 EPRI에서 개발한

* (주)프랜티스
** 중앙대학교 기계공학부
*** 한국전력기술(주)
**** 한전 전력연구원

CHECKWORKS 전산코드를 활용하여 감육 속도와 잔여수명을 예측하는 과제를 수행 중이다. 본 연구팀이 감육 배관 데이터 베이스 구축에 참가하여 배관감육 관리 기술의 표준화 연구개발에 참여하고 있으며 그 초기 단계로서 비교적 가동 연수가 오래 된 CANDU형 원전의 2차계통 배관에 대한 감육해석 연구를 수행하였다.

2. 원전 2차계통 배관의 FAC

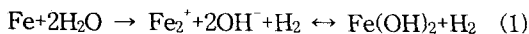
FAC는 탄소강 재질로 만들어진 배관 및 압력 용기 등에서 설비 내벽에 형성되는, 부착력이 약한 다공성 마그네타이트 피막에 액상의 유체가 흐름에 따라 가속되는 재질의 감육 현상이다. 정체되어 있는 유체에 의해 발생하는 전반적인 부식(generalized corrosion process)이 확장된 형태로 볼 수 있으나, 마그네타이트 피막과 유체 사이 계면에 유체의 유동이 있다는 것이 차이점이며, 이로 인해 감육이 더욱 가속되는 것이다. 또한 재질의 감육 속도는 몇 가지의 반응단계에 따라 결정되며, 각 단계의 반응 속도는 금속재질의 조성, 유체의 pH, 용존산소, 온도, 유속, 압력, steam quality 및 배관형상 등 각종 변수들의 복합 작용에 의해 결정된다.

2.1 FAC Mechanism

FAC의 진행은 배관 표면에 다공성 마그네타이트 피막의 존재를 설명하는 두 가지의 과정으로 나눌 수 있다. 그 진행과정을 개략적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

첫 번째 과정은 산화층-유체 계면에서 용해성 철 이온이 생성되는 것이며, 동시에 진행되는 세 가지의 과정으로 분류할 수 있다.

① 다음의 반응식에 의해 산소가 없는 유체가 흐르는 철-마그네타이트 계면에서 금속의 산화가 발생한다.



② 철이 다공성 산화층을 통해 유체 쪽으로 흡수된다. 식(1)에 의해 철-산화층 계면에서 수소가 생성되며, 식(2)에 의해 금속과 산화성 기공을 통

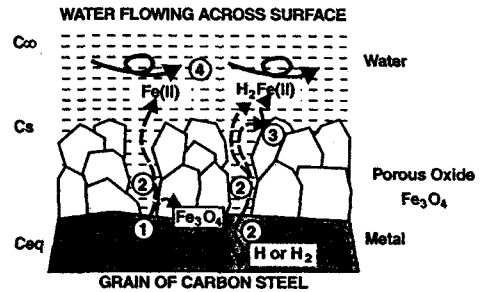


Fig. 1 FAC mechanism

과하여 유체 속으로 확산된다. 여기까지의 과정은 일반적인 부식 현상과 유사하다.

③ 산화층-유체 계면에 있는 마그네타이트 산화층이 수소로 인한 환원반응에 의해 용해된다. 수소는 금속-산화층 계면으로부터 빠져 나오게 된다.

정상상태에서는 산화층의 두께와 잔여 기공이 일정하게 유지된다. 산화층-유체 계면에서의 마그네타이트의 용해속도는 금속-산화층 계면에서의 마그네타이트 성장속도와 동일해야 한다. 이 반응은 pH 값에 영향을 받는다.

두 번째 과정은 철 이온이 확산 경계층을 통과하여 bulk water 속으로 이동하는 것이다. 이것은 산화층-유체 경계면에서 나온 철 이온과 금속-산화층 경계면에서 나온 철 이온이 확산경계층을 통과하여 매우 빠르게 유체 속으로 확산되는 것으로 추측된다. 또한 bulk water 내의 철이온 농도는 산화층-유체 계면의 철이온 농도보다 매우 낮은 것으로 추측되며, 이러한 조건에서는 산화층-유체 계면을 지나는 유체의 속도가 증가한다면 부식속도도 따라서 증가하게 된다.

2.2 FAC에 영향을 미치는 요인

원자력 2차계통 배관의 FAC에 영향을 미치는 요인들을 살펴보면 single phase flow의 경우 금속 재질, 온도·pH·산소농도 등의 수화학적 요인, 유속·배관 형상 등의 수력학적 인자들이 상호 복합적으로 작용하여 영향을 미치게 된다.

(1) Steam quality

원전 2차계통 배관에서의 FAC는 습증기나 물을 운반하는 배관 계통에서 발생하고, 건증기를

운반하는 배관에서는 거의 발생하지 않는다. 일반적으로 모든 발전소에서 steam quality가 높은 계통의 배관은 감속속도가 높은 것으로 나타난다. Two phase flow 배관의 경우 single phase flow에 비해 다소 높게 나타나고 있으며 steam quality가 5% 이상에서는 steam quality의 함량이 많을수록 감속속도도 커지게 된다.

(2) 재질(alloy contents)

FAC는 현재 원자력 2차계통 배관에 가장 널리 사용되고 있는 탄소강 배관에서 가장 심하게 나타나고 있다. 그러나 이 탄소강에 Cr, Cu, Mo 등의 원소를 첨가하게 되면 FAC 억제에 상당한 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다. 실험에 의하면 Cr과 Mo 원소의 함량이 1% 이상일 때 상당한 FAC 억제효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 특히 Cr의 영향은 매우 커서 0.5% 정도의 Cr 함량으로도 FAC는 무시할 수 있을 정도인 것을 알 수 있다. 이는 아주 적은 Cr 함량으로도 산화 피막층의 안정성이 매우 증가하기 때문으로 알려져 있다.

(3) pH 및 pH 조절용 아민의 종류

원전 2차계통의 부식방지를 위해 일반적으로 pH를 부식속도가 낮은 약알칼리 쪽으로 유지하기 위하여 휘발성 아민으로 pH 값을 조절하게 된다. pH 값을 9.3 이상으로 유지하면 부식이 현저히 감소하게 된다. 본 연구의 대상 발전소에서는 pH 제어제로서 몰포린과 암모니아를 동시에 사용하여 pH 값을 9.4 ~ 10으로 제한하고 있다. Fig. 2에서는 pH 값에 따른 감속속도의 차이를 비교하여 보여준다. 또한 Fig. 3에서는 pH를 조절하기 위한 아민의 종류에 따른 감속속도의 차이를 비교하여 보여준다.

(4) 기타

그 밖에도 2차계통 배관의 감속속도에 영향을 주는 요인들은 온도, 용존산소(DO)의 농도, 배관의 형상 및 유속 등이 있다.

온도는 열역학적 조건 변화에 영향을 주게 되어 감속속도에 차이가 발생하며, single phase flow의 경우 300°F(150°C) 부근에서, two phase flow의 경우 360°F(180°C) 부근에서 감속이 가장 심하게 발생한다. 그리고 200°F 이하의 single

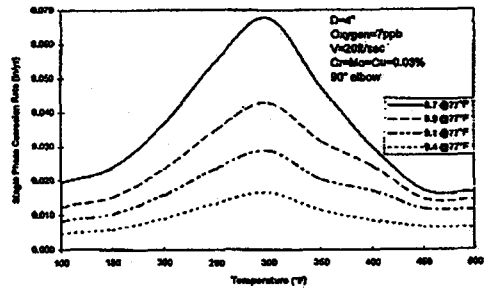


Fig. 2 The comparison of wear rates for various pH

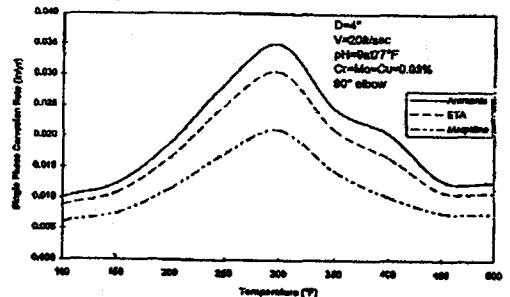


Fig. 3 The comparison of wear rate for various amines

phase flow의 경우에는 확산반응이 거의 일어나지 않으므로 FAC 관리 대상에서는 제외한다.

또한 용존산소의 영향을 보면, 용존산소량이 적을 경우에는 금속이 직접 FAC 환경에 노출됨으로써 감속이 가속되며, 20 ppb 이상이 되면 감속속도가 급속히 줄어들게 된다. 본 연구의 대상 원전에서는 용존산소의 농도가 5 ppb 이하로써 비교적 적게 유지되고 있었다.

3. 전산코드 적용 사례

3.1 FAC 해석 대상 배관 선정

원전 2차계통 배관은 수천 개의 component들로 구성되어 있으나, 주기별 계획예방정비 기간 중 두계검사를 수행할 수 있는 배관부품 개수가 300~400 개 정도라고 볼 때 전체 배관 구성 요소의 10% 이하의 소량만을 검사하여 전체 배관 계통의 신뢰성을 확보하여야 한다. 따라서 모든

배관의 감육을 해석하는 것은 비효율적이므로, FAC에 의한 배관감육이 무시할 정도로 적을 것으로 예상되는 배관 및 감육에 의한 파단 발생 시 그 영향이 미미할 것으로 예상되는 배관은 해석대상에서 제외하는 것이 효율적이다. 따라서 대상 원전 2차계통 배관 중에서 해석이 불필요한 배관을 먼저 분류하였다.

- ① 배관 재질이 stainless steel이거나 Cr의 농도가 1.25% 이상인 탄소강 배관
- ② 200°F(93.3°C) 이상의 single phase flow인 배관
- ③ 용존산소 농도가 높은 raw water 사용 배관
- ④ steam quality가 미미한 superheated 배관
- ⑤ 해당 line의 운전시간이 발전소 정상가동 시간의 2% 미만인 배관
- ⑥ 정상 가동 중 출력에 영향을 미치지 않고 차단 및 보수가 가능한 배관
- ⑦ 직경이 2 inch 이하인 배관

위의 항목 중 ①~⑤ 항목은 EPRI NSAC-202L의 권고항목이며, ⑥과 ⑦ 항목은 현장 담당자의 의견을 반영하여 결정하였다.

3.2 데이터베이스 구축

(1) 기본자료 수집 및 정리

FAC에 영향을 미치는 모든 요인들을 충분히 고려하여 해석을 수행하려면 설계자료, 운전자료 등을 수집하고 이를 체계화하여 CHECWORKS 전산코드에 데이터베이스로 입력해야 한다.

데이터베이스 입력을 위해 필요한 기초 자료들은 다음과 같다.

- P&ID
- Isometric Drawings
- 발전소 운전이력
- 화학질차서
- 수처리 보고서
- Piping Material Specification
- Fitting류의 dimension 사양에 대한 자료

(2) Component 데이터베이스 구축

대상 원전의 2차계통 주요 기기 및 배관 line의 배열상황을 CHECWORKS 전산코드의 HBD

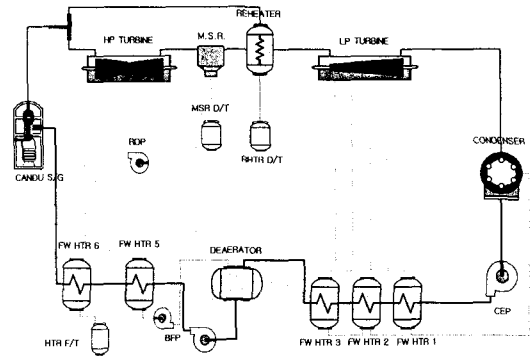


Fig. 4 Heat Balance Diagram of 'A' NPP

Editor 기능을 활용하여 모델링하였다. Fig. 4에 대상발전소 1호기 2차계통에 대하여 구성한 HBD를 나타내었다.

또한 발전소 운전주기를 "Operating(Cycle)" 및 "Maintenance(RFO)"의 두 가지 형태로 구분하여 각 주기마다 시작·종료일시, 운전시간 등을 입력한다. 본 연구에서 대상으로 하는 원전은 1,565시간의 시운전을 거쳐 현재까지 15주기 운전 중에 있다.

CHECWORKS 전산코드에는 pH, 용존산소 농도, 아민의 종류 등의 수화학적 인자가 적용되어야 한다. 따라서 복수계통에서의 Cold pH 값 및 증기발생기 입구에서의 용존산소 농도를 입수하여 전산코드에 입력하였으며, amine의 종류 및 그 농도를 적용하였다. 그리고 보다 정확한 결과를 얻기 위하여 글로벌한 전체 데이터와 주기별 데이터 값들을 적절히 조정하였다.

대상 원전에서 확보가 가능한 7주기부터 14주기까지의 데이터를 분석한 결과, 각각의 평균값으로서 pH는 9.7, 아민으로 사용되는 몰포린은 11.98 ppm, 암모니아는 0.94 ppm, 그리고 용존산소 농도는 2.12 ppb이었다.

그밖에도 발전소의 line data를 입력하게 되는데, 여기에는 line name, line group, line class, component name, component geometry code, 외경, Schedule, insulation, 설계압력 및 온도 등이 포함된다.

3.3 FAC 모델 해석

(1) Water Chemistry Analysis

대상 원전의 2차계통 line별 수화학 운전환경을

Chemistry Analysis Results

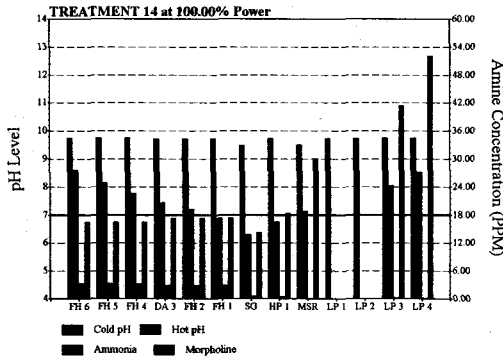


Fig. 5 Plot of Water Chemistry Analysis Results

FAC 해석에 반영하기 위하여 CHECWORKS 전산코드의 water chemistry analysis 기능을 활용하였다. 데이터베이스 구축한 값들을 그대로 적용한 후 HBD와 연계하여 수행한 후 각 line 및 main component 별 cold pH, hot pH, ammonia 농도 등의 결과를 얻었다.

그 해석결과를 Fig. 5에 나타내었으며 정상 운전 시 제14주기에서의 상태이다.

(2) Network Flow Analysis

각각의 component에 대한 유량, 운전온도 및 압력, 엔탈피, steam quality 등을 알지 못하는 경우 network flow analysis를 수행하게 되는데, line network를 정의한 후 입구측과 출구측의 알고 있는 유량, 엔탈피 및 압력 등을 이용하여 반영하는 것이다. 이것은 주로 입구와 출구 사이에 압력 및 엔탈피의 변화가 상당히 큰 경우에 대해 주로 수행하게 된다.

Fig. 6은 Isometric Viewer라는 기능으로 Moisture Separator에서 Flash Tank까지의 line 중에서 2개의 Flash Tank로 분기되기 직전까지를 구현한 것이며, Fig. 7은 이 line에 대해 수행한 Network Flow Analysis 결과이다. 결과로부터 유체가 각각의 component를 지나면서 압력 및 steam quality가 변화하는 양상을 볼 수 있다.

(3) Wear Rate Analysis

대상 발전소의 2차계통 배관계 중에서 line 및 component 데이터베이스가 구축된 총 269개 line (69개 line group), 4,497개 component에 대하여, network flow analysis 결과 및 수동으로 입력한

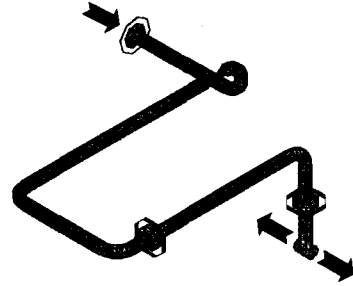


Fig. 6 Isometric Drawing Carried out by Isometric Viewer

NFA Pressure and Quality

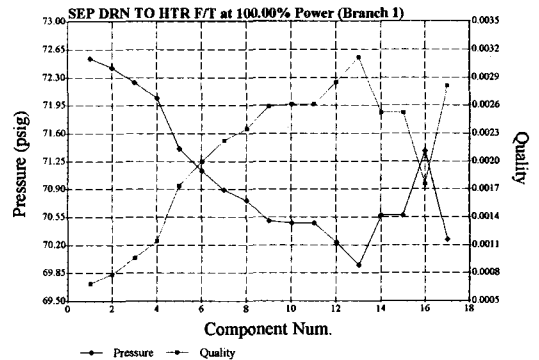


Fig. 7 Network Flow Analysis Results

운전변수들을 반영하여 wear rate analysis를 수행하였다. Fig. 6의 line에 대하여 수행한 감속해석 결과를 Table. 1에 나타내었다. Table. 1의 항목을 보면 component의 명칭과 각각의 geometry code(component의 기하학적 형상과 유체의 흐름 방향을 구분할 수 있도록 전산코드에 입력하는 일련의 숫자) 및 평균 감속속도, 현재의 감속속도, 두께값(초기값, 예측값, 최소요구두께값 등) 등을 알 수 있다. 또한 최종적으로 최소요구두께값 까지의 잔여수명을 볼 수 있는데, 이는 전산코드 내에 내장된 계산식으로서 EPRI의 NSAC 202L을 적용한 것이다. 전체적인 경향을 보자면, steam quality가 상당히 높은 line이라 그다지 감속속도가 크지는 않은 것으로 보이며, component에 따른 감속속도의 차이는 기하학적 형상의 영향에 의한 유동 변화로 인해 Tee 부위가 가장 빠른 것으로 나타났으며, 그 다음으로 orifice 및

Table. 1 Wear Rate Analysis Result

| Component Name | Geom. Code | Average Wear Rate (mils/year) | Current Wear Rate (mils/year) | Thickness (in) | | | | Component Predict[1] Time to Tcrit (hrs) | |
|----------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|---------|-------|-------|--|-------|
| | | | | Init. | Prd.[1] | Thoop | Tcrit | Non-Insp. | Insp. |
| TC0071NA | 31 | 1.570 | 1.417 | 0.375 | 0.353 | 0.085 | 0.085 | 1657263 | ----- |
| TC0071PA | 61 | 0.848 | 0.766 | 0.375 | 0.363 | 0.085 | 0.085 | 3184041 | ----- |
| TC0071EA | 2 | 1.165 | 1.051 | 0.375 | 0.358 | 0.085 | 0.085 | 2282050 | ----- |
| TC0071EB | 4 | 1.167 | 1.053 | 0.375 | 0.358 | 0.085 | 0.085 | 2277960 | ----- |
| TC0071VA | 25 | 1.585 | 1.431 | 0.375 | 0.352 | 0.091 | 0.091 | 1603042 | ----- |
| TC0071PB | 58 | 0.699 | 0.631 | 0.375 | 0.365 | 0.085 | 0.085 | 3893827 | ----- |
| TC0071EC | 2 | 1.178 | 1.063 | 0.375 | 0.358 | 0.085 | 0.085 | 2254000 | ----- |
| TC0072PA | 52 | 0.797 | 0.719 | 0.375 | 0.364 | 0.085 | 0.085 | 3398582 | ----- |
| TC0072EA | 2 | 1.182 | 1.067 | 0.375 | 0.358 | 0.085 | 0.085 | 2246038 | ----- |
| TC0073PA | 52 | 0.799 | 0.721 | 0.375 | 0.364 | 0.085 | 0.085 | 3389996 | ----- |
| TC0073OA | 6 | 1.598 | 1.442 | 0.375 | 0.352 | 0.085 | 0.085 | 1625599 | ----- |
| TC0073PB | 56 | 0.320 | 0.289 | 0.375 | 0.370 | 0.085 | 0.085 | 8664618 | ----- |
| TC0073EA | 2 | 1.188 | 1.072 | 0.375 | 0.358 | 0.085 | 0.085 | 2234782 | ----- |
| TC0073PC | 52 | 0.798 | 0.720 | 0.375 | 0.364 | 0.085 | 0.085 | 3392866 | ----- |
| TC0073OB | 6 | 1.597 | 1.441 | 0.375 | 0.352 | 0.085 | 0.085 | 1627036 | ----- |
| TC0073PD | 56 | 0.317 | 0.286 | 0.375 | 0.370 | 0.085 | 0.085 | 8752245 | ----- |
| TC0073TA(U/S) | 10 | 1.601 | 1.445 | 0.375 | 0.352 | 0.085 | 0.085 | 1622463 | ----- |
| TC0073TA(D/S) | 10 | 1.601 | 1.445 | 0.375 | 0.352 | 0.085 | 0.085 | 1622463 | ----- |
| TC0073TA(BR.) | 10 | 1.281 | 1.156 | 0.375 | 0.357 | 0.085 | 0.085 | 2062779 | ----- |

valve, 그리고 elbow의 순으로 감속 속도가 빠른 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 FAC에 의한 국내 원전 2차계통 배관에 대한 데이터베이스 구축 및 감속해석을 수행하고 있으며, 국내 원전 14개 호기에 대하여 향후 약 2년간 수행할 계획이다. 본 고에서는 국내 특정 CANDU 원전 2차계통 배관의 감속해석을 수행하기 위한 절차와 방법을 소개하는데 중점을 두었으며, Separator에서 Flash Tank 직전까지의 배관라인을 대상으로 감속해석을 수행한 결과를 예를 들어 소개하였다.

본 고에서는 2차계통 전체 배관 중 한 개의 라인을 대상으로 결과를 소개하였지만 본 연구에서 수행한 데이터베이스 구축 및 감속해석 결과에 기초하여 현장에서 배관을 관리할 경우 효율적인 배관관리 뿐만 아니라 막대한 시간 및 경비절감이 예상된다.

후기

본 연구는 2000년도 원자력 기초연구사업인 “실측 데이터에 근거한 이론적 FAC 예측 모델 연구” 과제 및 한전 전력연구원의 “원전 이차계

통 감속배관 관리 표준기술체계 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한전 전력연구원, TR.96NW01.J1999.346,1999, 침부식에 의한 원전배관 건전성 저해 해석 연구
- (2) EPRI TR- 103198-P3, 1998, CHECWORKS User Guide
- (3) 한전전력연구원, 1998, 고리 3호기 2차계통 배관 데이터베이스 구축 및 FAC 해석 보고서
- (4) B. Chexal, 1998, CHECWORKS Application Manager, Version 1.0D, TR-103198-P3
- (5) ACRES CANATOM, 1980, Piping Materials Specification System Identification, 59-70000-7701-TS
- (6) EPRI, 1996, Recommendation for and Effective Flow Accelerated Corrosion Program, NSAC-202L
- (7) 심상훈, 송정수, 윤기봉, 황경모, 진태은, 이성호, 김위수, 2000, “월성 원전 1호기 2차계통 배관 감속 해석을 위한 전산코드의 적용”, 2000년도 압력기기 기술대회