

중수로 Feeder 배관 두께감소 예측모델 개발

A Development of FAC Rate Analysis Model for CANDU Feeder Pipes

제갈성, 정한섭, 이성호

John Pietralik

한국전력공사 전력연구원

Chalk River Lab. AECL

대전시 유성구 문지동 103-16

Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0

요 약

중수로 Feeder 배관의 FAC에 의한 감육현상을 예측하고 이를 이용해 feeder 배관의 향후 관리방안을 수립하고자 감육 예측 모델(FACRAN model)을 개발하였다. 이번에 개발한 예측 모델은 feeder 첫 번째와 두 번째 bend에서의 최대 thinning rate를 예측하는 것으로 정하였다. 피더 두께감소에 영향을 주는 parameter 중 이번 모델 개발에는 feeder 직경, bend angle, hub에서 첫 번째 bend까지의 거리, 첫 번째 bend와 두 번째 bend 간 거리, 두 번째 bend의 뒤틀림 정도와, 유량, 유속, steam quality, 온도 및 운전시간, pH에 대한 영향이 포함되었다. 상용 통계처리 프로그램인 SYSTAT를 이용해 각 parameter 간의 최적 연관성을 파악하고, non-linear regression method를 이용해 개별 parameter의 fitting을 수행하였다. 이렇게 개발된 모델은 99%의 신뢰도에서 $\pm 36\%$ 의 오차를 가지고 있다. 이 모델은 향후 월성 원전 feeder 배관의 두께감소를 해석 및 수명평가와, 이 결과로부터 feeder 배관 관리방안 수립에 활용할 것이다. 특히, 현재까지는 관리를 하고 있지 않은 두 번째 bend에 대한 정보를 알 수 있어 이의 관리에 도움을 줄 것으로 기대한다.

Abstract

The FAC Rate Analysis (FACRAN) model is developed in order to predict thinning status of CANDU feeder pipe and establish a feeder management program. The model defined to predict maximum thinning rate of first and second bends of feeder. Some parameters (feeder pipe, bend angle, distance between hub and first bend, distance between first and second bend, twist angle of second bend, flow rate, flow velocity, steam quality, temperature, operation time, and pH) are included in the model. A commercial statistical software, SYSTAT, was used to analyze the optimum relation among parameters and fitting the function of each parameter by non-linear regression method. The model has the errors of $\pm 36\%$ at 99% confidence level. This model will use analysis of thinning rate and remaining life of CANDU feeders and establish a feeder management program. Especially, the model can analyze the thinning of feeder second bend and give a good tool for second bend management.

1. 서 론

탄소강 배관의 FAC는 다양한 원인에 의해 발생되며, 이러한 요인에 의한 실제적 또는 실험적 결과를 정리하여 결과에 적합한 모델을 만드는 방법이 empirical modelling 방법이며, FAC가 발생할 수 있는 여러 가지 mechanism을 바탕으로 적합한 모델을 만드는 mechanistic modelling 방법이 있다. 또한 이 두 가지를 혼합한 mixed modelling 방법이 있다. Mechanistic modelling 방법으로 만들어진 model을 검증하기 위해서는 현장의 실제 data나 FAC 조건을 모사한 실험 결과와의 비교가 필요할 것이다.

각 modelling 방법에서 포함시킬 parameter를 무엇으로 할 지를 결정하는 것이 가장 초기단계이면서 전체 modelling 업무 범위를 결정하는 일이다. FAC에 미칠 수 있는, 가능한 많은 data를 modelling에 포함시킨다면 좋은 model을 개발할 수 있을 것이나, 이를 위해서는 너무나 많은 노력과 시간, 그리고 예산이 필요할 것이다. 이에 따라 최종적인 모델이 어떠한 parameter 까지를 포함할 것이고 어느 정도의 정확도를 가질 것인지가 결정된다.

일반적으로 FAC에 영향을 미치는 parameter는 철산화물이 철이온으로 녹아나오는 dissolution rate에 영향을 주는 parameter와 녹아 나온 철이온을 유체유동에 의해 제거되는 과정인 mass transfer rate에 영향을 주는 parameter로 나눌 수 있다. Dissolution rate에 영향을 주는 parameter로는 운전온도, 수화학조건인 pH와 유체내 $[Fe^{2+}]$ 이온 농도, 용존산소농도, 그리고 산화피막에 영향을 줄 수 있는 material content 등이 있다. Mass transfer rate에 영향을 주는 parameter는 유속, 유량, steam quality 등의 유체역학적 조건과 배관 크기, geometry 등 유동 조건 등이다.

이번에 중수로 feeder 배관의 FAC 감육예측을 위한 모델 개발에서는 상기 parameter들에 대한 현장 data를 이용한 empirical model을 개발코자 한다. 이를 위해 현장의 운전 data, 즉 온도, 유속, 유량, steam quality (void fraction) data를 수집하였으며, feeder 배관의 종류와 각 배관의 직경, bend angle 등 geometry data, 그리고 각 feeder 채널별 material content에 대한 data를 확보하였다.

2. Empirical Model 개발 방법

모델 개발 절차는 어떠한 modelling 방법을 택하느냐에 따라 달라진다. 여기서는 empirical 모델을 개발하는 것이므로 다음과 같은 data 설정, 수집, 분석의 절차를 거치게 된다. [1]

1) 모델에 포함시킬 parameter를 결정한다.

Parameter를 가능한 많이 포함시킨다면 보다 좋은 model이 될 수 있지만, 그만큼 많은 data 수집과 분석이 필요하게 된다. 그리하여 여기에서는 다음과 같은 parameter로 한계지었다. [2]

- Dissolution rate 관련 parameter : 온도, 유량, steam quality, 유속, pH
- Mass transfer rate 관련 parameter : 직경, bend angle, hub에서 첫 번째 bend까지의 거리, 첫 번째 bend와 두 번째

bend의 뒤틀림 각도 (두 번째 bend에 한함)

○ 기타 : 운전시간

2) Bending 이후의 초기두께 수집 및 분석 (첫 번째 및 두 번째 bend)

감육 평가는 초기상태와 감육후 상태를 비교, 분석하는 것이다. 그러므로 초기두께를 아는 것은 아주 중요하다. 모든 배관은 제작시에 제작상의 공차에 의해 어느 정도 두께 차이를 보이며, 동일한 방법의 bending을 하여도 이후의 두께는 다르다. 그러므로 가장 중요한 것이 bending 이후 운전 전 상태에서의 두께 data를 확보하는 것이다.

3) 운전중 (ISI) 두께 data 확보 및 분석

측정 data 확보도 중요하지만, 측정방법, 측정 위치 및 절차에 대한 자료도 중요하다. 측정 data는 두 가지 방법, full grid와 partial grid의 data를 사용하였다. 측정시 data의 신뢰성을 위해서 측정 grid marking, 탐촉자 교정 등 측정상의 오차발생 가능성 최소화에 노력해야 하며, 이러한 것을 확인하여 신뢰성있는 data인지 확인하여야 한다.

4) 확보된 data로부터 FAC rate 계산

초기두께값, ISI 두께값 및 운전시간 data를 이용해 FAC rate를 계산한다. 이 과정을 통해 data를 검증도 가능하다.

5) FAC rate에 영향을 주는 parameter들 간의 영향 파악

각 parameter 들 간에는 서로 영향을 주는 것들이 있다. 이러한 parameter들을 모두 독립된 parameter로 고려하여 model을 만든다면 너무나 많은 노력이 소요된다. 서로 의존적인 parameter는 서로의 의존 관계를 파악하므로써 model의 변수를 줄여나갈 수 있을 것이다. 이의 예로 mass flow rate와 steam quality를 들 수 있다. Fuel channel은 동일한 pressure difference를 가지므로 steam quality가 증가하면 mass flow rate가 감소하게 된다. 또한 steam quality가 증가하면 void fraction도 증가하며 이에 따라 flow velocity도 증가하는 경향을 보인다. 이러한 관계를 파악하면 변수를 줄여갈 수 있다. 이에 대해서는 modelling 상세 설명에서 다시 언급하겠다.

6) DB를 구축한 parameter 이외의 parameter 효과 적용

Empirical model 개발이지만 database 이외의 다른 자료로부터 활용할 것이 있다면 modelling에 사용하여야 한다. 여기서는 실험실에서 나온 pH 관련 결과를 사용하였다.

7) Data를 분석하여 적절한 model 개발

적절한 통계적 방법과 통계 software를 이용하고, 모델의 정확도를 높이기 위해 너무나 벗어나는 data는 삭제하는 방법으로 최적의 equation을 찾아내어 모델을 찾아낸다.

8) 개발된 모델의 검증

모델 개발 절차에 대한 품질관리 측면에서의 검증 및 개발된 모델의 성능을 점검하는 것이다. 모델의 결과가 기존의 여러 문헌에서 보여주는 결과와 같은 지 여부도 점검하고, 모델의 적용범위와 신뢰도도 점검한다.

3. Feeder FAC 감육모델 개발 상세 내용

가. Feeder 설계 및 운전 data

1) Feeder Geometry

CANDU 6형 원자력발전소에는 380개의 channel이 있으며, 1개 channel은 inlet 및 outlet의 2개 feeder가 있다. 이중 감육 문제가 발생하는 것은 outlet feeder이다. 1개 면에는 190개의 inlet feeder와 190개의 outlet feeder가 있다. Outlet feeder는 2"와 2.5"의 2개 종류가 있으며, 2" feeder는 60개, 2.5" feeder는 320개였다. Feeder는 hub와 용접되어 있고, 이 hub는 metal seal joint를 통해 fuel channel의 end fitting에 연결되어 있다. Feeder의 geometry는 직경, 첫 번째 bend와 두 번째 bend의 각도, hub에서 첫 번째 bend 까지의 거리, 첫 번째 bend에서 두 번째 bend 까지의 거리, 그리고 첫 번째 bend와 두 번째 bend의 뒤틀림 각도 등에 의해 분류되어 진다. 이상과 같은 방법으로 분류된 feeder 종류를 표 2에 나타내었다. 380개 각 채널의 feeder 배관 type을 표 1에 정리하였다. 총 20개 종류로, type 6가 가장 많은 것으로 나타났으며 총 194개 feeder가 해당된다. 2"와 2.5" feeder 모두 첫 번째 bend의 각도는 3가지로 32.7°, 42.8°, 73.1°의 3가지씩 있었다. 두 번째 bend도 30.2°, 32.7°, 70.0°의 3가지가 있었다.

2) 열수리학 parameter

FAC 분석을 위해서는 유체 관련 data 및 운전에 따른 유체 특성의 변화에 대한 data가 반드시 필요하다. 각 feeder의 유량은 설계 조건에서도 서로 다르며, 한 feeder channel에서도 핵연료 교체 및 운전시간에 따라 변화한다. 일반적으로 유량은 약 10 ~ 30kg/sec 정도이며, 일부 channel은 two-phase flow가 형성된 것도 있다. Two-phase 정도를 나타내는 steam quality나 void fraction도 feeder 위치와 운전시간에 따라 달라진다. 이렇게 영향을 미치는 요인은 feeder의 위치, 상업운전이후 운전시간, 발전소 운전이력 및 해당 채널 및 인근 채널의 핵연료교체 이후 운전시간 등 일반적인 aging effect이다. 이러한 상태의 변화는 feeder에서의 유량에 직접적인 영향을 주며, 이에 따라 heat transfer rate가 변화한다. 이번 모델 개발에서는 대부분의 열수력 parameter를 NUCIRC code의 해석결과로부터 얻었다.

문헌조사 [3] 결과, feeder에서의 two-phase flow 형태는 bubbly regime 인 것으로 조사되었다. Flow regime 종류에 따라 FAC가 큰 영향을 받는다. Annular flow regime에서는 그 특성에 의해 유체 유동이 더욱 증가하여 FAC가 매우 증가하게 된다.

3) Feeder material

Feeder 배관은 탄소강인 A106 Gr.B로 만들어져 있으며, ASME의 기준으로는 0.4% 미만의 Cr 농도, 0.4% 미만의 Cu 농도, 0.15% 미만의 Mo 농도를 가지도록 규정하고 있다. 하지만 월성 원전에 설치되어 있는 feeder 배관은 이 최고치보다 훨씬 낮은 수준이다. 월성 1호기의 Cr 농도는 0.02~0.03% 수준이며, 월성 2호기는 0.02~0.06%, 월성 3, 4호기는 0.02~0.08% 수준이다. Ducreux의 연구[3] 결과에 의하면, 0.1~0.2% 정도의 Cr 농도

에서는 FAC가 급격히 줄어들며, 0.5% 이상의 Cr 농도에서는 FAC가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과에 따라 최근 중국 진산 원전에는 0.2% Cr 농도를 가지는 feeder 배관이 제작되어 공급되고 있다.

4) Water chemistry

중수로 열수송 계통에는 pH가 약 10 정도인 냉각수가 흐르고 있으며, pH는 LiOH로 조절하고 있다. 일반적인 권고 pH 운전범위는 10.2 ~ 10.8이다. 상업운전 이후 1996년까지의 평균 운전 pH를 보면, 월성 1호기가 10.54, Gentilly 2호기가 10.62, Point Lepreau가 10.66이다. [3] 하지만 높은 pH에서는 FAC 발생이 증가한다는 연구결과[5]에 따라 1996년에 COG에서 pH 운전범위를 10.2~10.4로 변경토록 권고하였으며, 월성 원전도 변경된 pH 범위에서 운전중이다. 그리고 두 개의 loop 간의 pH 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. [3]

표 1. CANDU 6 발전소 Feeder 배관의 Geometry Parameter [1]

| Bend Type | Pipe Diameter (inch) | Number of Feeders | 1st Bend Angle (°) | 2nd Bend Angle (°) | Distance between Hub and 1st Bend (inch) | Distance between 1st and 2nd Bend (inch) | Twist Angle of 1st and 2nd Bend (°) |
|-----------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------------------------------|
| 1 | 2.5 | 2 | 32.7 | 32.7 | 0.65 | 1.5 | 180 |
| 2 | 2.5 | 8 | 42.8 | 30.2 | 1.89 | 1.5 | 128.8 |
| 3 | 2.5 | 12 | 73.1 | 30.2 | 1.89 | 1.5 | 128.8 |
| 4A | 2.5 | 20 | 73.1 | 70.0 | 0.6 | 0.98 | 146.38 |
| 4B | 2.5 | 18 | 73.1 | 70.0 | 0.6 | 1.51 | 146.38 |
| 4C | 2.5 | 16 | 73.1 | 70.0 | 0.6 | 5.76 | 146.38 |
| 5A | 2.5 | 12 | 73.1 | 70.0 | 0.6 | 0.98 | 146.38 |
| 5B | 2.5 | 16 | 73.1 | 70.0 | 0.6 | 1.51 | 146.38 |
| 5C | 2.5 | 22 | 73.1 | 70.0 | 0.6 | 5.76 | 146.38 |
| 6 | 2.5 | 194 | 73.1 | * | 0.6 | * | * |
| 7 | 2 | 20 | 32.7 | 32.7 | 0.93 | 1.94 | 180 |
| 8 | 2 | 8 | 42.8 | 30.2 | 2.24 | 2.0 | 128.8 |
| 9 | 2 | 6 | 42.8 | 30.2 | 2.24 | 2.0 | 128.8 |
| 10A | 2 | 4 | 73.1 | 70.0 | 1.2 | 2.06 | 146.38 |
| 10B | 2 | 4 | 73.1 | 70.0 | 1.2 | 2.59 | 146.38 |
| 10C | 2 | 2 | 73.1 | 70.0 | 1.2 | 6.84 | 146.38 |
| 11A | 2 | 2 | 73.1 | 70.0 | 1.2 | 2.06 | 146.38 |
| 11B | 2 | 2 | 73.1 | 70.0 | 1.2 | 2.59 | 146.38 |
| 11C | 2 | 4 | 73.1 | 70.0 | 1.2 | 6.84 | 146.38 |
| 12 | 2 | 8 | 73.1 | * | 1.2 | * | * |

*) 2nd bend가 1st bend로부터 상당히 멀기 때문에 유체가 충분히 안정화되어 1st bend에 의한 영향이 없는 것으로 고려.

용존산소 농도가 FAC에 영향을 주지만, 중수로 1차계통 내에 존재하는 용존산소 농도 양이 수 ppb 정도로 워낙 적기 때문에 feeder thinning에 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 생각된다. 용존중수소 농도가 FAC에 영향을 준다는 연구결과는 아직까지 나와 있지는 않다.

나. Feeder Thinning Rate Data

Thinning rate를 구하기 위해서는 해당 bend에 대한 초기두께 (PSI data), 운전중 두께 (ISI data) 및 운전시간에 대한 자료가 있어야 한다.

1) Initial Wall Thickness (PSI, Pre-Service Inspection)

Feeder bend에 대한 초기두께 측정은 주로 full grid로 되어 있지 않다. 대부분 1980년대에 운전에 들어간 발전소로, 이 당시에는 thinning 문제가 있지 않았기에 관심의 대상이 아니었다. 그리하여 이번 모델 개발에서는 다음과 같은 방법으로 초기두께 분포를 구하였다.

- ① Point Lepreau 원전에 있는 spare bend를 full grid 측정하여 두께 분포를 구하였다. Bend type 별로 1개씩, 12개 bend에 대한 full grid 측정을 하였으며, 1개 full grid 측정에서는 10~20개의 축방향 grid와 12개 원주방향 grid로 구성되었다. 이 측정방법은 Point Lepreau와 Gentilly-2의 full grid 측정시에 동일하게 사용되었다.
- ② 월성 1호기 초기두께값중 최소값을 사용하였다. 하지만 이 data는 측정값은 있으나 측정위치에 대한 정보가 부족하여, bending시 최소두께가 extrados에 존재한다는 문헌에 따라 extrados의 두께값으로 간주하여 사용하였다.
- ③ Feeder 배관에 대한 제작규격서(XX-33126-TS-010, TS-XX-33128-1, TS-XX-33126-7, XX-33128-TS-002)와 bending 시 배관의 두께 변화에 대한 문헌[6]을 이용하였다.

Pipe를 bending 하게 되면 extrados는 얇아지고 intrados를 두꺼워진다. 얇아지는 정도와 두께분포는 bending 방법 및 각도에 따라 달라진다. Bending 방법은 cold bending과 warm bending이 있다. Gentilly-2의 feeder는 warm bending 방법이 적용되었다. 이 방법은 bending할 안쪽부분을 790~840℃ 정도로 가열한 후 bending 하는 것이다. 월성 원전과 Point Lepreau의 feeder는 cold bending 방법이 적용되었다. Cold bending하면 bending 후 최소두께가 extrados에 나타나지만, warm bending하면 최소두께가 extrados의 약간 후단에서 발생한다.

Bending 각도가 크면 그만큼 두께가 얇아지는 결과를 보였다. Bending 후 최소두께가, 2.5" feeder에 대해서 30° bending에서는 직관의 91.2%, 43° bending에서는 90.0%, 70° bending에서는 89.5%를 보였다. 2" 배관에 대해서는 bending 각도에 거의 무관하며, 대체적으로 직관의 90.5% 정도의 두께를 보였다. 제작규격서 XX-33126-TS-002에는 첫 번째 bend extrados에 보다 큰 두께값이 위치하도록 권고하고 있다.

월성 1호기 초기두께 값은 단지 1개 값만 있고 측정 위치에 대한 정보가 없기 때문에 동일한 직경과 동일한 type의 두께 평균값을 사용하였다. Extrados 이외 위치에서의 두

계 분포는 Point Lepreau spare bend의 full grid 측정값을 활용하였다. 두 번째 bend의 초기두께값은 Point Lepreau와 Gentilly 2호기의 측정 data를 활용하였다.

2) 운전중 두께 측정 data

두께 측정방법은 모두 초음파측정법(UT)를 사용하였다. Point Lepreau는 1995, 1996, 1997, 1998, 1999년 측정 data가 있다. 첫 번째 1995년에는 diamond 형태의 grid를 사용하였으며, 이 data의 신뢰성에 의문이 있어 모델 개발에는 사용하지 않았다. 이후의 Point Lepreau에서의 측정은 full grid 방법과 strip 방법, 2가지를 사용하였다. Full grid 방법에서는 UT probe 크기의 구멍이 있는 fiberglass template를 사용하였으며, 이 template는 축방향으로는 15~20개 point, 원주방향으로는 12개 point의 구멍을 가지고 있어 약 200개 정도의 point에 대해 측정할 수 있다. 이 template는 hub와 feeder의 용접부에 맞추어 축방향으로 대고 측정하게 된다. Strip 방법은 원주방향으로 3개의 magnetic strip을, extrados를 통과하는 12시 방향에 1개, 1시 방향과 11시 방향에 각각 1개를 설치하여 측정한다. 축방향으로는 20개의 측정 point가 있는 type 1과 17개의 측정 point가 있는 type 2가 있다. 온라인 두께 측정 data도 있으나 신뢰성 문제로 사용하지는 않았다.

Gentilly 2호기에는 diamond grid를 채택하고 있으며, Tomoscan이나 불리는 14개 probe를 가진 자동화된 기기를 사용하고 있다. 이 Tomoscan은 자동으로 두께 data를 측정, 수집, 저장되도록 하는 장치이다. 이를 이용함으로써 두께 측정 속도 향상과 방사선피폭을 저감하는 효과가 있다.

월성 1호기는 diamond type의 측정 grid를 사용하고 있으며 extrados와 이를 둘러싼 4개 point, 그리고 extrados 양쪽 line 상에 1개씩, 총 7개의 측정 point를 가지고 있다. 초기두께 측정값이 최소두께값으로 1개 data는 있으나, 위치에 대한 자료가 없어 모델개발에 사용하기에는 부족하였다.

3) 두께측정의 신뢰성 문제

FAC rate는 대개 0.1mm/yr 정도이다. 이에 따라 측정의 신뢰성은 data 평가에서 아주 중요한 요인이 될 수 있다. 앞서서도 언급했듯이 FAC rate를 측정하려면 2개의 data가 필요하다. 이전 두께와 현재 두께. 그런데 각각의 측정 오차가 있으므로 이것이 합해지면 오차가 증가하게 된다. UT 측정의 오차는 여러 가지 요인에 의해 좌우된다. 측정센서에 의한 요인, 측정위치 요인, 측정자에 의한 요인 등. 측정센서에 의한 요인은 대개 보정을 위한 음속값의 변화 및 측정과 관련이 있다. 그 외에 보정시 온도, 내부 표면의 거칠기에 의한 초음파의 산란, probe의 안정성 등이 요인으로 작용한다. 측정위치 요인은 지난번 측정위치와 이번 측정위치상의 오차에 의해 커질 수 있다. 그리고 bend 부분이 굴곡이 있어 정확히 수직하게 probe를 대지 못해서 생기는 오차 등이 있다. 측정자에 의한 요인은 열악한 작업환경에서 측정이 이루어지게 되므로 이에 의해 작업자의 부주의에 의해 생기는 오차이다.

UT 측정 정확성에 대한 평가가 많이 이루어져 왔다. 이러한 평가에 의하면, 발전소 조건에서의 합리적인 오차는 0.005" (0.125mm) 정도인 것으로 보고 있다. [1] 이러한 오차

가 2번의 측정에 포함되면 약 0.177mm 정도의 오차가 생기는 것으로 본다. 이 정도의 오차는 약 2년간 운전에 의한 thinning과 맞먹는 값이므로 3번 정도의 측정으로 rate 및 수명을 평가하는 것이 바람직할 것으로 본다.

4) FAC rate에 대한 현장 data

FAC rate를 구하는데 Point Lepreau, Gentilly-2와 월성 1호기 측정 data를 사용하였다. Point Lepreau에는 첫 번째 bend에 대해 249개 측정 data를, 두 번째 bend에 대해서는 23개 측정 data가 있으며, Gentilly-2에는 첫 번째 bend에 대해 350개, 두 번째 bend에 대해 175개 측정 data가 있고, 월성 1호기에는 첫 번째 bend에 대해서만 104개 측정 data가 있다. 이 중에서 전체적인 경향에서 너무나 벗어나는 data는 제외시켰는데, 첫 번째 bend에 대해서는 19개, 두 번째 bend에 대해서는 4개가 제외되었다. 평가 결과 첫 번째 bend의 평균 thinning rate는 0.0876mm/yr이고, 두 번째 bend는 0.0690mm/yr 인 것으로 나타났다.

개발된 모델의 검증에 위해서는 Point Lepreau의 2000년 outage에 측정된 14개 data (1st bend 10개, 2nd bend 4개)와 Embalse에서 측정된 30개 data(모두 1st bend)를 활용하였다. 모델 개발 및 검증에 사용된 측정 data를 표 2에 정리하였다.

표 2. Empirical Model 개발에 사용된 Data 현황

| 발전소 명 | Outage | 운전시간 (EFPY) | 사용 Data 수 | |
|----------------------------|--------|----------------|-----------|----------|
| | | | 1st Bend | 2nd Bend |
| Wolsung 1 | 1998 | 12.63 | 42 | 0 |
| | 1999 | 13.54 | 62 | 0 |
| | Total | | 104 | 0 |
| Point Lepreau | 1996 | 12.25 | 68 | 22 |
| | 1997 | 12.45 | 1 | 0 |
| | 1997 | 13.03 | 180 | 1 |
| | Total | | 249 | 23 |
| Gentilly-2 | 1996 | 10.3 | 11 | 0 |
| | 1997 | 10.9 | 64 | 0 |
| | 1998 | 11.8 | 94 | 34 |
| | 1999 | 12.58 | 60 | 24 |
| | 2000 | 13.31 | 121 | 117 |
| | Total | | 350 | 175 |
| Total | | | 703 | 198 |
| Validation을 위한 Data | | | | |
| Point Lepreau | 2000 | 15.05, 2.59 *) | 10 | 4 |
| Embalse | | | 30 #) | |

*) 1개 bend는 2.59 EFPY 이전에 교체된 feeder임. 13개는 2“, 1개는 2.5”임

#) 1st & 2nd 구분 없음. 단지 20개는 2.5“, 10개는 2” 임.

다. 실험 연구결과의 활용

발전소에서 운전되는 pH는 운전기간동안 아주 작은 폭으로 변화한다. Point Lepreau와 Gentilly-2의 평균 운전 pH는 10.6이고 월성 1호기는 10.5였다. [3] 그리하여 pH에 의한 thinning 효과는 실험실적인 연구결과를 활용하였다. Feeder pipe의 운전조건을 모사한 상태에서 충돌유체 (impingement flow) 실험을 수행하였다. [7,8] 실험 조건은 310℃ 경수, pH는 9.17~10.46 (apparent pH(pH_a)로는 9.63.~10.92), 1 ppb 이하의 용존산소농도, 6cm³/kg의 용존수소, 0.02% Cr 농도를 가진 탄소강, 1.2m/sec의 유속이었다. 이러한 실험 조건에서 pH에 의한 FAC rate 변화의 경험적인 결과가 다음 식과 같다.

$$F(\text{pH}) = e^{0.4159 * (\text{pH} - 10.6)} \quad (\text{식 1})$$

이 식은 pH_a가 10.0에서 10.8 범위에서 적용된다. 이 결과에 의하면, pH_a가 증가하면 FAC rate가 증가하게 된다.

4. FAC Rate Analysis Model

가. 모델개발의 전제

이번에 개발하는 모델은 발전소의 각종 data를 활용한 경험적인 모델을 개발하는 것으로 data의 한계성에 의해 모델 개발에 각종 가정이 필요하며 개발된 모델도 제한된 범위에서 신뢰성을 가지게 된다. 모델의 사용에 앞서 이에 대한 검토가 필요하다.

1) 시간에 따른 parameter 변화 평균화

FAC rate는 flow 변화에 영향을 받게 된다. 그런데 이 flow도 여러 가지 aging effect에 의해 변화하게 되기에 정확한 모델을 구하기 위해서는 모든 변화를 시간별로 추적, 조사하여 모델 개발해야 하나, 이렇게 하기에는 너무나 무리다. 그리고 시간에 따른 변화가 크지 않아 비용 대비 효과가 적을 것으로 평가되었다. 그 예로 Point Lepreau 원전 운전초기와 4000 EFPD에서의 유속 차이가 약 0.4m/sec 정도로 평균적인 유속인 14.5m/sec에 비해 3% 변화가 있었다. 또 steam quality는 0.4% 변화가 있었다. 그리하여 시간에 따라 변화하는 모든 parameter는 평균하여 하나의 값으로 적용하였다.

2) Bend Geometry

Bend에서의 유로 단면은 직관부와 동일한 것으로 가정했다. Bending을 하게 되면 유로 단면이 약간 찌그러지는 ovality 현상이 존재한다. 한 예로, cold bending한 2.5" feeder의 수직과 수평 길이차가 1.12mm로 내경의 1.9%이었다. 이 정도는 flow 변화에 큰 영향을 주기 않을 것으로 판단된다.

3) 기동 및 정지 회수의 효과

발전소가 정지하여 보수 등을 하게 되면 계통 내로 공기가 유입될 가능성이 높고, 이에 따라 용존산소 농도가 높아져 산화피막의 성질이 바뀔 가능성이 있다. 산소농도가 높으면 용해도가 높은 magnetite가 용해도가 낮은 hematite로 변하여 FAC rate가 줄어드

는 효과가 있다. Point Lepreau와 Gentilly-2의 경우 가동초기의 15~35ppm의 용존산소 농도가 HTS가 hot zero power 상태로 가열되는 동안 급격하게 줄어드는 것으로 나타났다. 월성의 경우 HTS가 직접적으로 공기와 접촉되는 것을 막기 위해 질소 개스로 충전하기도 한다. 하지만 이번 모델 개발을 위한 자료 수집 과정에서 기동 및 정지에 따른 FAC rate 변화를 평가하기는 불가능하다. 그리하여 이 모델에서는 기동 및 정지에 의한 FAC rate 변화는 없는 것으로 가정하였다.

나. 모델의 parameter 결정

앞에서 언급한 FAC parameter들 중 영향이 적을 것으로 평가된 것은 제외하고 세분화할 수 있는 parameter는 보다 세분화하여 아래와 같은 형태로 모델을 결정하였다.

$$\text{FAC rate} = C \cdot f_1(\text{bend angle}) \cdot f_2(\text{diameter}) \cdot f_3(\text{velocity}) \cdot f_4(\text{flow rate}) \cdot f_5(\text{steam quality}) \cdot f_6(\text{temperature}) \cdot f_7(\text{time}) \cdot f_8(\text{distance}) \cdot f_9(\text{twist angle}) \cdot f_{10}(\text{pH}) \quad (\text{식 } 2)$$

여기서 $f_1(\text{bend angle})$ 은 bending angle에 의한 geometry factor, $f_2(\text{diameter})$ 는 feeder 내경에 의한 geometry factor, $f_3(\text{velocity})$ 는 평균 유속, $f_4(\text{flow rate})$ 는 feeder의 평균 유량 factor, $f_5(\text{steam quality})$ 은 평균 steam quality factor, $f_6(\text{temperature})$ 는 온도 factor, $f_7(\text{time})$ 은 time factor, $f_8(\text{distance})$ 는 bend의 upstream에서 부터의 거리에 의한 factor로 첫 번째 bend에 대해서는 hub에서 bend까지 거리를, 두 번째 bend에 대해서는 첫 번째와 두 번째 bend 간의 거리를 나타낸다. 그리고 $f_9(\text{twist angle})$ 은 두 개 bend 간의 비틀림 효과 factor로 두 번째 bend에만 해당되고 $f_{10}(\text{pH})$ 는 pH 효과 factor이다.

이 식에서 mass flow rate와 flow velocity를 동시에 사용하였다. Flow velocity는 mass flow rate의 함수이나, 이 두 가지 factor를 동시에 고려하는 것이 보다 좋은 연관성을 보이는 것으로 나타났기에 [9] 이렇게 사용코자 한다. Alloy content는 포함시키지 않기로 하였다. 이는 각 feeder material에 대한 정확한 자료가 없고, 그 함유량의 차가 대체적으로 적어 제외하였다.

다. Data Regression Analysis

현장 data의 통계적 분석에는 SYSTAT 프로그램을 사용하였다. SYSTAT는 널리 사용되는 상용화된 통계처리 프로그램으로 통계처리에 필요한 다양한 기능들을 포함하고 있다.

이 통계처리에는 몇 가지 가정이 포함되었으며, 이에 따라 약간의 사용상 제약이 있다. Data가 가진 오차는 random 분포를 따른다는 것이다. 또한 database 구축상에는 구조적인 오차가 없다는 것이다. 이러한 오차가 있다고 하면 이를 이용해 만들 모델은 근본적으로 신뢰할 수 없기 때문이다. 그리하여 이번 regression 에서는 data 분포가 normal 분포, 또는 Gaussian 분포를 갖는다는 가정 하에 이루어 졌다. 각 parameter 들간의 연관성을 보기 위해서 Pearson correlation matrix를 작성하여 서로의 연관성이 높은 parameter와 연관 정도를 확인하였다. 이번 모델 개발에서는 non-linear regression method를 사용하였다. Linear regression method가 fitting을 위해 어느 함수든 사용가능한 장점은 있으나 프로그램 상에서 항상 선형관계를 최적화하기 때문에 non-linear 관계에 대해서는 신뢰성

이 떨어지는 단점이 있다.

라. 최종 개발 모델

Non-linear regression 분석방법을 사용하여 개발한, 첫 번째 및 두 번째 bend의 extrados에서의 최대 thinning rate 예측식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Thinning rate} = & \text{Coeff} \cdot (\text{Bend Angle})^a \cdot (\text{Diameter})^b \cdot (\text{Velocity})^c \cdot (\text{Flow rate})^d \\ & \cdot (e + f \cdot \text{Quality} + g \cdot \text{Quality}^2) \cdot \exp(h/\text{Temperature}) \cdot (\text{Time})^i \\ & \cdot (\text{Distance})^j \cdot (\text{Twist Angle})^k \cdot f_{pH} \end{aligned} \quad (\text{식 } 3)$$

여기서의 a ~ k 까지의 값은 첫 번째 bend와 두 번째 bend에 대해서 각각 다른 값을 가지며, twist angle은 두 번째 bend에만 적용되는 parameter이므로 첫 번째 bend에 대해서는 k 값은 0이다.

그림 1과 2는 이 모델을 이용한 첫 번째 bend와 두 번째 bend에 대한 예측 FAC rate와 실제 측정된 FAC rate를 비교한 것이다. 이 결과로 상당히 정확도가 높은 것을 알 수 있다. 또한 각 parameter와 FAC rate를 비교하였는데, flow velocity에 대해 상당히 연관성이 높으며, flow velocity와 mass flow rate를 함께 고려할 때의 연관성이 각각에 대한 연관성보다 높음을 알 수 있었다.

이 모델 결과의 표준편차는 첫 번째 bend에 대해서 0.0125mm/yr이고, 두 번째 bend에 대해서는 0.0095mm/yr였다. 99% 신뢰도에서 이 오차는 첫 번째 bend에 대해 ±0.032 mm/yr, ±36%이고, 두 번째 bend에 대해서는 ±0.025mm/yr, ±36%였다.

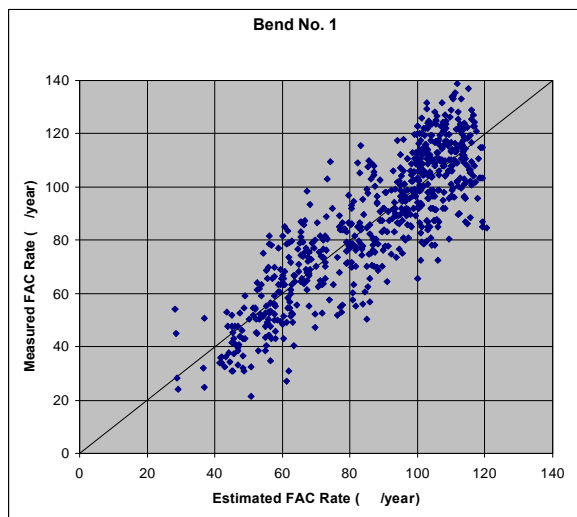


그림 1. 첫 번째 bend에 대한 예측 및 실측 FAC rate 비교

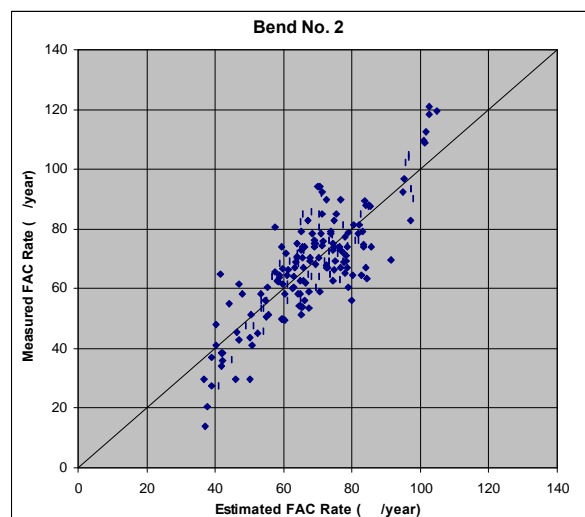


그림 2. 두 번째 bend에 대한 예측 및 실측 FAC rate 비교

마. 월성 1호기 측정 data를 이용한 검증

2000년의 월성 1호기 feeder에 대한 두께검사에서는 모두 229개 feeder의 첫 번째 bend

를 점검하였다. 193개의 2.5" feeder와 36개의 2" feeder를 검사하였다. A-side에 있는 190개의 모든 feeder를 점검하였고, C-side에는 39개를 측정하였다. 1개 feeder에 대해서 extrados에서 7개 point를 측정하였으며, 두께감소율은 초기두께와 이번에 측정한 data중 최소두께를 현재까지 감소된 두께로 간주하여 운전시간인 14.447EFPY를 나누어 구하였다. 두께감소율 계산 결과, 2.5" feeder에 대해서는 최고 0.140mm/yr, 평균 0.093mm/yr이며, 2" feeder에 대해서는 0.118mm/yr, 0.073mm/yr이었다.

측정된 두께 감소율을 FACRAN model에서 예측한 두께감소율과 비교한 것이 그림 3이다. 그림 3에서 녹색선이 예측과 실측이 정확하게 일치하는 1:1 선이다. 그림 3의 결과를 그림 1의 결과와 비교하여 보면, 상당히 비슷한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 전체적인 data 분포와, 예측 두께감소율이 약 0.120mm/yr 이하이나 측정 두께감소율은 약 0.140mm/yr 이하인 점 등이 비슷하다. 그림 3 결과의 표준편차는 2.5"와 2"를 포함하여 0.0166mm/yr로, 99% 신뢰도에서 이 오차는 ± 0.0427 mm/yr, $\pm 47\%$ 이다.

월성 1호기 2000년도 feeder 두께측정 data를 활용한 모델 검증 결과, 이번에 개발되어진 FACRAN model은 약간의 오차를 가지기는 하지만 feeder 두께감소를 예측하기 위한 모델로 활용하는데 문제가 없음을 알 수 있었다.

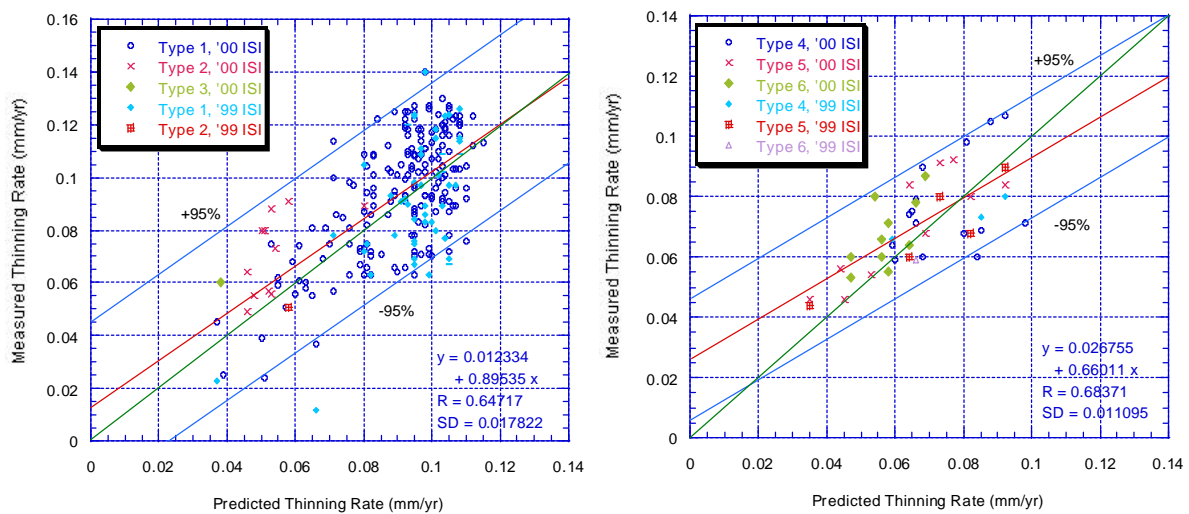


그림 3. FACRAN model 예측 및 2000년도 측정 두께감소율 비교 (좌: 2.5", 우: 2")

5. 결론

전력연구원에서는 중수로 Feeder 배관의 FAC에 의한 감육현상을 예측하고 이를 이용해 feeder 배관의 향후 관리방안을 수립하고자 캐나다 AECL과 함께 감육 예측 모델을 개발하였다. 이번에 개발하려는 FAC 예측 모델은 실제적인 발전소 운영 data와 feeder 두께 측정 data를 활용하여 feeder 첫 번째와 두 번째 bend에서의 최대 thinning rate를 예측하는 것으로 정하였다. 이번 모델개발에는, FAC에 영향을 미치는 parameter 들 중에

서 배관의 geometry data인 feeder 직경, bend angle, hub에서 첫 번째 bend까지의 거리, 첫 번째 bend와 두 번째 bend의 뒤틀림 정도가 포함되었으며, 열역학적 data로는 유량, 유속, steam quality, 온도가 포함되었고, 운전시간과 pH도 포함하였다.

실제 측정된 feeder의 두께 data도 분석하였다. 이로부터 다양한 조건에서의 FAC rate를 분석하게 되었다. Bending 이후의 초기두께 data가 수집, 분석하였으며, 운전중 측정된 ISI 두께 data를 분석하여 FAC rate를 계산하였다. 여러 parameter 중에는 유량, 유속, steam quality 등 서로 영향을 주는 parameter 들이 있는데 이 parameter 간의 영향을 파악하므로써 FAC rate에 영향을 주는 독립변수의 개수를 줄였다. 구할 수 있는 database 이외의 다른 parameter의 영향도 파악하여 pH 효과에 대해서도 실험적인 결과를 반영하였다. 각 data 들의 최적 regression 분석을 위해 상용 통계처리 프로그램인 SYSTAT를 사용하였다. 이 프로그램을 이용해 각 parameter 간의 최적 연관성을 파악하고, non-linear regression method를 이용해 개별 parameter의 fitting을 수행하였다.

이러한 방법으로 99%의 신뢰도에서 $\pm 36\%$ 의 오차를 가지는 feeder 배관의 감육예측 모델이 개발되었다. 이 모델은 향후 월성 원전 feeder 배관의 감육을 해석 및 수명평가와, feeder 배관 관리방안 수립에 활용할 것이다. 현재 월성 2, 3, 4호기는 매년 40~60 여 개의 feeder 배관에 대해 ISI 측정을 수행하고 있으며, 월성 1호기는 2000년 계획예방정비 기간에 229개를 측정하였다. 월성 1호기뿐만 아니라 현재 관리대상 feeder 숫자가 적은 월성 2, 3, 4호기에 대해, 이 모델을 이용해 감육율이 큰 배관을 선정하여 관리함으로써 향후 매년 점점, 관리하는 feeder 배관의 수를 줄이는데 도움을 줄 수 있을 것으로 본다. 특히, 현재까지는 관리를 하고 있지 않은 2nd bend에 대한 정보를 알 수 있어 이의 관리에 도움을 줄 것으로 확신한다. 그리하여 현장의 feeder 배관 관리 부담을 최소한으로 줄일 수 있을 것으로 본다.

Reference

1. J. Pietralik, Y. Wang, R.L. Tapping, and R.L. Speranzini, "CANDU Primary Side Flow-Accelerated Corrosion Rate Model", RC-2553, AECL, (Oct. 2000)
2. B. Chexal, et. al., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI TR-106611-R1 (1998).
3. P. Hnatiuk, "HTS Chemistry History for CANDU-6s and Ontario Hydro Reactors", COG-JP-96-V5, Appendix P in Field G, (1998).
4. J. Ducreux, "Theoretical and Experimental Investigation of the Effect of Chemical Composition of Steels on their Erosion-Corrosion Resistance", Paper 19 presented to the Specialist's Meeting on Erosion-Corrosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam, Les Renardieres, France (May 1982).

5. E.L. Cheluget, "Wall Thinning of CANDU Outlet Feeder Pipes: An Overview of Mechanistic Aspects", COG Report, COG-97-40 (1997).
6. J. Gillander, "Pipe and Tube Bending Manual", Gulf Publishing Company, Book Division, Houston, Texas (1984).
7. K.A. Burrill, E.L. Cheluget, and A.J. Elliot, "Operation of the Heat Transport Circuit in the pH Range 10.0 to 10.2: An Evaluation", COG Report, COG-98-44, (Feb. 1988).
8. Y.C. Lu, M.G. Dupuis, and P.A. Lavoie, "The Effect of pH on Carbon Steel Corrosion Under Heat-Transport-System Conditions: A Report on Autoclave Impingement flow Tests", COG Report, COG-97-368 (Jan. 1998)
9. A.C. Wallace, "Feeder Pipe Thinning: Predictive Methodology and Predictions", Report No. 00-33216-220-004, Revision 0, AECL (May 1997).