

## 중수로 Feeder 배관 감육현황 분석

### An Analysis of Thinning Status for CANDU Feeder Pipes

제갈성, 정한섭, 이성호  
한국전력공사 전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

권영식, 박양래  
한국전력공사 월성원자력본부  
경북 경주시 양남면 나아리 260

#### 요 약

월성 1호기 2000년 O/H중 측정된 Feeder 두께측정 data를 이용해 outlet feeder의 FAC에 의한 감육현황을 분석하였다. 이를 위해 FAC에 영향을 미치는 parameter의 DB를 구축하였는데, 이에 dissolution rate에 영향을 미치는 parameter와 mass transfer rate에 영향을 미치는 parameter가 포함되어 있다. 월성 1호기 feeder 초기두께값은 월성 2,3,4호기의 초기두께값을 이용해 분석하였다. Feeder는 feeder 직경과 bending 각도에 따라 2.5" 와 2" feeder에 대해 각각 3종류로 분류될 수 있다. 초기두께값은 이 type에 따라 차이가 있음을 확인하였고, 같은 조건이라도 제작과정에서 차이가 있음을 확인하였다. 각 type 별 평균값을 해당 type의 초기두께로 결정하였다. Thinning rate는 이 초기두께와 현재 측정두께중 최소값과의 차이를 운전시간으로 나눈 값으로 평가하였다. 채널별 유속에 대한 이 thinning rate의 분포를 분석한 결과, 상당한 연관성을 가지고 있음을 확인하였다. 그리고 thinning에 직접적인 영향을 줄 것으로 생각되는 유동 momentum에 대한 thinning rate 분포 또한 상당한 경향성을 보여주고 있음을 확인하였다.

#### Abstract

The degradation status of outlet feeders in Wolsung Unit 1 is analyzed using feeder thickness measurement data during overhaul period in 2000. DBs related to feeder thinning are made for parameters affecting dissolution rate and parameters affecting mass transfer rate. The initial thickness of feeders in Wolsung Unit 1 is analyzed using initial thickness data of Wolsung Unit 2, 3 and 4 as there are no initial thickness data of Wolsung Unit 1. The initial thickness is varied as feeder diameter and bending degree, and CANDU feeders can be divided as 3 types for 2.5" feeders and 3 types for 2" feeders. The average initial thickness value for each type is defined as the initial thickness value of the type for Wolsung Unit 1 feeders. Thinning rate is evaluated as the value dividing difference between initial thickness and minimum measured thickness by operation time. It is found that the distribution of thinning rate for flow velocity shows a proportional tendency, and that the distribution of thinning rate for flow momentum, which seems to affect significantly thinning, also shows a proportional tendency.

# 1. 서 론

발전설비 기기 손상의 주된 원인중 하나가 FAC(Flow Accelerated Corrosion)이다. FAC는 탄소강 또는 저합금강에 존재하는 부식산화층이 two-phase flow나 turbulent flow에서 용해가 증가되는 현상이다. 이 과정에서 산화층이 얇아지고 부식율이 증가하게 된다. 중수로 Feeder 배관은 저 Cr 농도 탄소강인 A106 Gr.B로 만들어져 FAC (Flow Accelerated Corrosion)에 취약하며 이에 따라 두께감소 (thinning) 현상이 발생한다. FAC에 영향을 미치는 parameter는 여러 가지이나 크게 두가지로 나누면, iron dissolution rate에 영향을 미치는 parameter와 mass transfer rate에 영향을 미치는 parameter로 나눌 수 있다. Iron dissolution rate에 영향을 미치는 parameter는 운전온도, pH 등 수화학 조건, Cr 농도 등 material 조건이며, mass transfer rate에 영향을 주는 parameter는 bending 각도 등 feeder geometry, 유속, steam quality 또는 void fraction 등이다. 이에 따라 이 parameter에 대한 database와, 실제 감육을 분석하기 위해 발전소 운전 전에 feeder 배관 두께를 측정한 PSI (Pre-Service Inspection) 때의 두께 data와, 운전중 O/H 때 측정한 ISI (In-Service Inspection) 때의 두께 data에 대한 database도 구축하였다. 이 database로부터 월성 원전 Feeder 배관의 감육현황을 분석하고, 향후 관리방안을 제시하고자 한다.

## 2. Feeder 감육현황 DB 구축 및 분석

### 가. Plant Operation History data

FAC 감육은 배관에 냉각수가 흐르는 상태에서 발생하게 된다. 그리하여 발전소가 가동한 시간을 계산하여야 한다. 이를 위해 월성 1,2,3,4호기가 실제 운전한 시간을 계산하였다. 이 data 들은 감육 rate를 구하기 위해 필요한 것으로, 월성 1호기의 ISI data는 1996년, 1998년, 1999년 및 2000년 O/H 때 측정한 것이고, 월성 2호기는 1998년과 1999년, 월성 3호기는 1999년에 측정한 것이기에 이때까지의 운전시간, EFPY (Effective Full Power Year) 값을 계산하였다. 이 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1. 월성 1,2,3호기 계획예방정비 시점에서의 EFPY

Plant Name	Year	O/H date	EFPD	EFPY
Wolsung Unit 1	1996	'96.10.01	4225.28	11.576
	1998	'98.01.01	4611.38	12.634
	1999	'99.02.20	4942.98	13.542
	2000	'00.03.25	5273.12	14.447
Wolsung Unit 2	1998	'98.04.20	320.40	0.878
	1999	'99.04.28	626.96	1.718
Wolsung Unit 3	1999	'99.09.23	486.00	1.332

## 나. Feeder 출구에서의 Operation data

Feeder의 FAC에 영향을 줄 수 있는 운전 data로는 온도, 유속(또는 유량) 및 steam quality (또는 void fraction)를 들 수 있다. CANDU 형 발전소에서 feeder 채널별 온도를 실제로 측정하는 것은 feeder 중간에 설치되어 있는 RTD (Resistance Temperature Detector)에 의해서이다. 그런데 이 온도는 핵연료의 장전과 인출, 그리고 연소도에 따라 지속적으로 변화하게 된다. 그리하여 평균적인 온도를 구하기 위해서는 운전기간동안의 온도를 지속적으로 측정하여 평균하여야만 구할 수 있다. 이것은 너무나 많은 양이고 이를 분석하는데는 많은 시간이 소요되기 때문에 여기서는 어느 시점을 정하여 그 당시의 온도분포를 확인하였다. 2000년 6월 27일 15시 14분에서의 월성 1호기 채널별 RTD 온도 분포를 sample로 선정하였으며, 온도는 채널마다 다르지만 300.7 ~ 311.0°C의 분포를 보였다. 그런데 이 RTD는 feeder 내부까지 들어가는 것이 아니라 외부 표면에 접촉되어 있기에 내부에서의 정확한 온도 값이라고는 할 수 없다. 그리고 우리의 관심사항은 Feeder의 첫 번째 bend에서의 온도이다. 이 온도를 NUCIRC code를 이용해 분석하였다. NUCIRC code를 이용하면 feeder 시작부분에서의 압력, 유량(kg/sec), steam quality 등을 구할 수 있다. 이것으로부터 two phase flow에서의 void fraction과 FAC에 영향을 주게 되는 liquid 만의 유속을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Void fraction } (\alpha) &= \frac{\text{Steam 부피}}{\text{Liquid 부피} + \text{Steam 부피}} && \text{(식 1)} \\ &= \frac{x \cdot \nu_v}{(1-x) \cdot \nu_l + x \cdot \nu_v} \end{aligned}$$

$$V_l = \frac{Q \cdot \nu_l}{A} \cdot \frac{1-x}{1-\alpha} \quad [1] \quad \text{(식 2)}$$

여기서,  $V_l$  은 liquid velocity (m/sec),  $Q$ 는 채널에서의 유량 (kg/sec),  $\nu_l$  은 liquid의 specific volume ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ),  $\nu_v$  는 vapor의 specific volume ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ),  $x$ 는 steam quality,  $A$ 는 유로 단면적 ( $\text{cm}^2$ ), 그리고  $\alpha$ 는 void fraction이다. NUCIRC code를 이용해 분석한 feeder 입구에서의 채널별 void fraction 분포는 그림 1에, 그리고 채널별 유속 분포는 그림 2에 각각 나타내었다.

그런데 RTD 온도와 마찬가지로 feeder 입구에서의 온도, 압력, 유량, 유속, steam quality, void fraction은 핵연료의 장전, 인출 및 시간에 따라 지속적으로 변화하기에 이에 대한 평균적인 값을 구하기 위해서는 일정한 시간 간격에서의 NUCIRC code 분석 결과가 있어야 한다. 하지만 한 시점에서의 NUCIRC 분석을 위해 많은 입력 data와 분석에 소요되는 시간 때문에 시간 간격을 짧게 하여 code 분석하기는 힘들다. 그리고 현재 운전주기 이전의 오래전 data를 구하기도 힘들기에 몇 주기전의 상태를 분석하기 힘들다. 그리하여 여기서는 현재 주기에서의 월성 1호기 운전 상태를 분석하는 것으로 한계 지었다.

#### 다. Feeder 출구에서의 Water Chemistry data

현장에서 관리중인 대표적인 water chemistry data는 1차계통 (Primary Heat Transport, PHT)에서의 pHa (apparent pH), conductivity 및 용존 deuterium 가스 등이다. 이 중에서 FAC에 영향을 주는 pH의 시간별 분포를 월성 1호기에 대해 분석하였다. 1998년을 기준으로 pHa 운전범위를 10.2~10.8 band에서 10.2~10.4 band로 변경하였다. 이는 고 pH 운전이 원자로 내부 구조물, 특히 feeder의 부식에 영향을 많이 준다는 연구 결과[2,3]를 반영하여 COG와 AECL이 운전범위를 낮추도록 권고한 것을 적용한 것이다. 그림 3은 pHa의 변화에 따른 corrosion rate를 나타낸 것이다.[2] 이 결과를 이용해 월성 1호기의 pH 운전범위 변경에 따른 효과를 평가해 보았다. 1998년 이전의 평균 운전 pHa는 약 10.6이며, 1998년 이후의 평균 운전 pHa는 10.3이다. 그림 3로부터 이러한 운전조건 변경에 따라 corrosion rate가 약 10 ~ 20%가 감소한다는 것을 알 수 있었다.

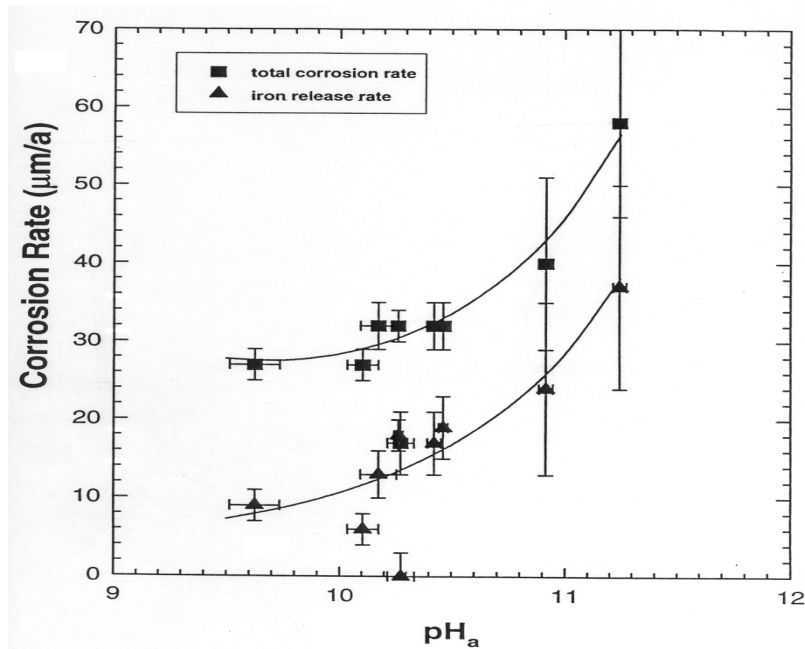


그림 3. A106B 탄소강의 corrosion rate에 미치는 pH 영향

#### 라. Feeder 배관 두께 측정 data

월성 1, 2, 3, 4호기 모두에서 운전전 (Pre-Service Inspection, PSI) 두께 data와 운전 중 (In-Service Inspection, ISI) 두께 data를 feeder 배관 첫 번째 bend의 외곽부 (extrados)에서만 측정하였다. 단지 측정 격자에 약간의 차이가 있는데 이를 그림 4에 나타내었다. 이 차이는 월성 1호기는 diamond 형태의 측정 격자를(그림 4-(a) 참조), 월성 2, 3, 4호기는 square 형태의 격자를(그림 4-(b) 참조) 가지고 있다는 것이다. 그림 4-(a)에서는 2 위치가 extrados이며, 그림 4-(b)에서는 5 위치가 extrados이다. 이 형태에서의 호기별, 채널별 두께측정 database를 구축하였다. 월성 1호기에 대한 PSI data는 모두 52개 채널에 대한 값이 확보되었으며, 현재 확보된 ISI data는 모두 229개 채널에 대한 값

이 확보되었다. ISI data는 1996년, 1998년, 1999년 및 2000년 O/H 때 측정된 data 이다. 1996년 이전에는 RIH (Reactor Outlet Header)로 들어가기 직전의 upper feeder에 대해서 측정하였기에 1996년 부터의 data 만이 사용 가능하다. 이외의 다른 채널에 대한 PSI 및 ISI data는 없는 실정이다. 그런데 월성 1호기에 대해 그림 4에서 보는 바와 같은 격자 형태로 PSI data는 측정되었는지를 확인하기 어려운 상황이며, 단지 채널당 1개의 data만이 있다. 이것이 1개 채널에 대해 여러 번 측정한 후의 평균값 또는 최소값인지에 관한 자료가 없기에 뭐라 단정하기 힘든 상황이다. 그러하기에 초기 두께값(initial feeder thickness)를 분석하는데 이 data를 사용하기는 힘들 것으로 보인다.

월성 2호기 feeder에 대한 PSI 및 ISI data는 모두 81개 채널에 대해 data 확보하였으며, ISI data는 이중 42 채널에 대해 확보하였다. 이 data는 모두 outlet feeder에 대한 측정 data이다. 월성 3호기에 대해서는 PSI data는 380개 채널에 대해 확보하였으나, 이중 outlet feeder는 315개이다. ISI data는 82개이 확보하였으나 이중 outlet feeder에 대한 data는 79개이다. 월성 4호기의 경우 PSI data만 확보되었으며, 총 690 채널의 data가 있으나 이중 346개 outlet feeder 채널에 대한 data가 확보되었다.

### 1) 초기두께 (Initial Thickness) 분석

FAC에 의한 feeder 배관 두께 감소율을 계산하고자 할 때, 가장 중요한 것 중의 하나가 최초에 설치되었을 때의 배관 두께를 아는 것이다. 오래동안 운전하였고 ISI 측정 data가 많은 월성 1호기 같은 경우 초기 두께값이 확보된 채널이 있지만 이에 대한 신뢰성이 적고, PSI data가 없는 채널이 다수 있기 때문에 월성 2,3,4호기의 PSI data로부터 설치당시의 두께값을 유추하고자 한다. 이를 위한 배경은 월성 1,2,3,4호기 모두 동일한 bending type (cold bending)이고 동일한 type의 발전소이기에 같은 채널에서의 초기두께값은 같다는 가정이다. 즉, 같은 채널은 동일한 직경과 동일한 bending 각도를 가진다는 것이다. 이는 각 발전소의 Iso-drawing을 확인하면 알 수 있다. 개략적인 feeder bend 부위의 기하학적 형상을 그림 5에 나타내었다.

동일한 두께의 pipe라 할지라도 bending을 하게 되면 bending 부의 외곽부(extrados)의 두께는 얇아지고, 내각부(intrados)의 두께는 두꺼워 진다. 그림 6은 180° 로 cold bending 했을 때의 두께를 분석한 결과가 있다. [4] Cold bending의 특징은 두께 변화가 symmetric한 것인데, 그림 6에서 보듯이 bending 후 두께는 90° 의 extrados에서 가장 얇고 각도가 변함에 따라 symmetric하게 두께가 변화됨을 알 수 있다. Intrados 부분은 90° 부분에서 가장 두껍고 역시 각도가 변화함에 따라 symmetric하게 변화되고 있다. 월성 발전소 feeder는 모두 cold bending 한 것이다.

Feeder의 wear rate에 미치는 geometry 영향을 분석하기 위해 feeder type을 분류하기 위해서는 feeder 직경, 첫 번째와 두 번째 bend의 각도, feeder의 hub와 첫 번째 bend사이의 거리 및 첫 번째 bend와 두 번째 bend 사이의 거리 등을 구분하여 분류하여야 한다. 하지만 현재 우리의 관심사는 첫 번째 bend로 국한되어 있으며, bending에 의한 초기 두께는 직경과 첫 번째 bend의 bend 각도에 의해 영향을 받는다. 월성 1,2,3,4호기 feeder 배관의 첫 번째 bend는 표 2와 같은 9개의 bend type을 갖는다. 이 type 중에서

도 outlet feeder는 2"와 2.5" 직경만 있으므로 이 중에서 1~6의 type만이 해당된다. 이 type에 따라 월성 2,3,4호기 PSI data를 분류하여 각 type에 따른 초기두께를 분석하여 이 두께값을 월성 1호기 해당 type feeder의 초기 두께값으로 설정키로 하겠다.

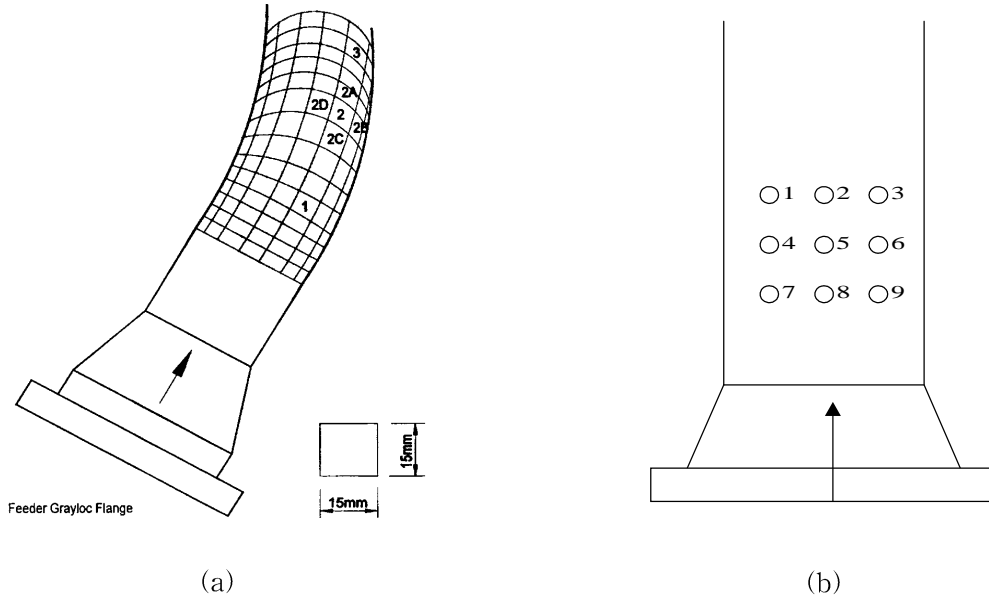


그림 4. 월성 1호기 (a) 및 월성 2,3,4호기 (b) UT 측정격자 개략도

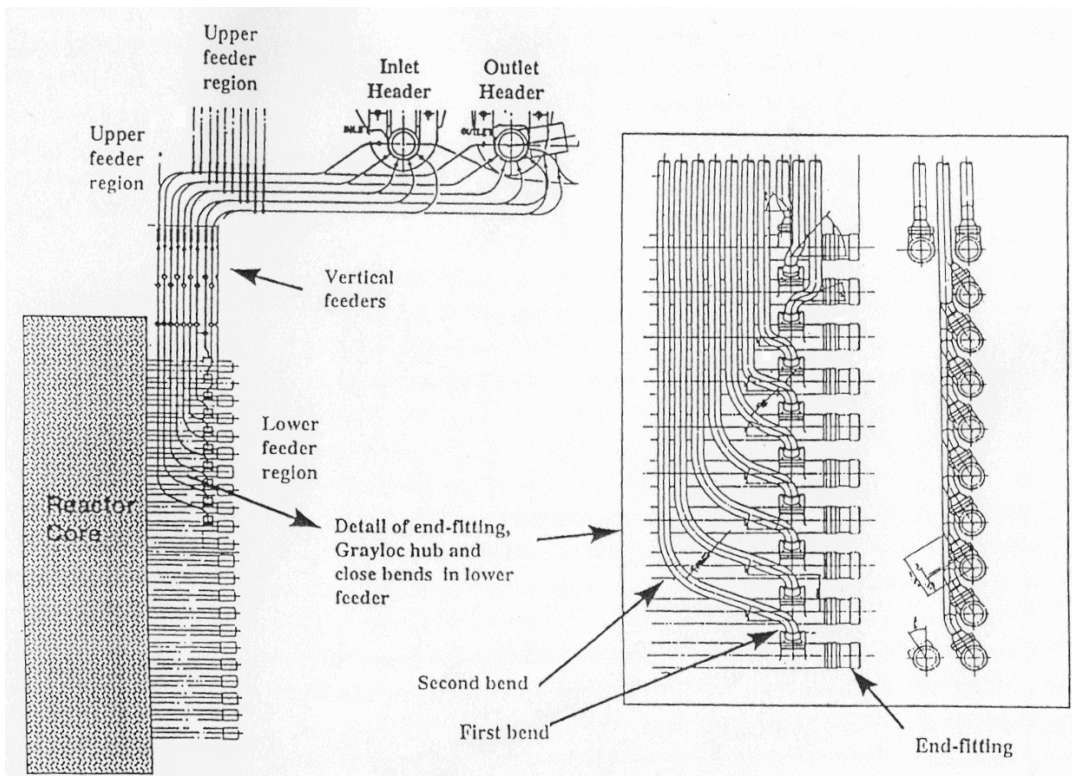


그림 5. Feeder 배관 곡관부의 기하학적 형상

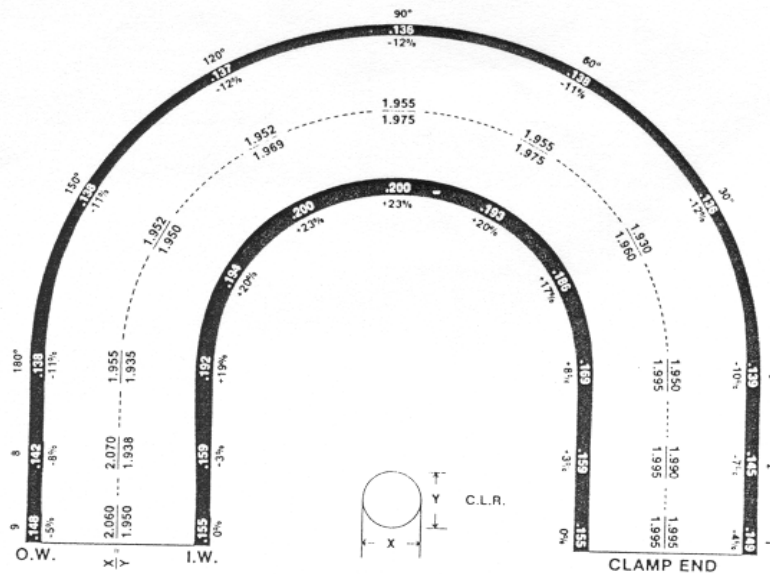


그림 6. 직경 2", 두께 0.155" tube의 180° bending 때 두께변화

표 2. Low Feeder type 분류 및 초기두께 분석 결과

bend type	pipe 직경	bend angle (°)	Bend Radius	Hub에서 bend까지 거리	분석된 초기 두께 (mm)
1	2.5" Sch.80	73.133	3.750	6.625"	6.63
2	"	42.833	3.750	6.625"	7.15
3	"	32.717	3.750	5"	6.79
4	2.0" Sch.80	73.133	3.000	6.625"	5.39
5	"	42.833	3.000	6.625"	5.50
6	"	32.717	3.000	5"	5.39
7	1.5" Sch.80	73.133	2.250	6.625"	-
8	"	42.833	2.250	6.625"	-
9	"	32.717	2.250	5"	-

그림 7와 8은 월성 2,3,4호기의 2.5"와 2" Feeder에 대한 초기두께 측정값을 type 별로 분석한 것이다. 예상했던 바와 같이 feeder 초기두께는 bending 각도에 따라 서로 다른 값을 보여주고 있다. (표 2 참조) 그리고 이 data는 type 별 평균값으로 같은 type의 feeder라 할지라도 제작 과정에서의 오차에 따라 상당한 두께값의 차이를 보이고 있다. 그러하기에 가장 좋은 초기두께값 결정 방법은 상업운전을 하기 전에 초기두께 값을 측정하는 것이다. 월성 3, 4호기 대부분, 그리고 월성 2호기 일부 채널에 대해서는 측정된 초기두께 값이 있으나 이외의 feeder 채널과 월성 1호기 feeder에 대해서는 측정된 초기두께값이 없기 때문에 하는 수 없이 여기에서 분석한 초기두께값을 사용할 수 밖에 없다.

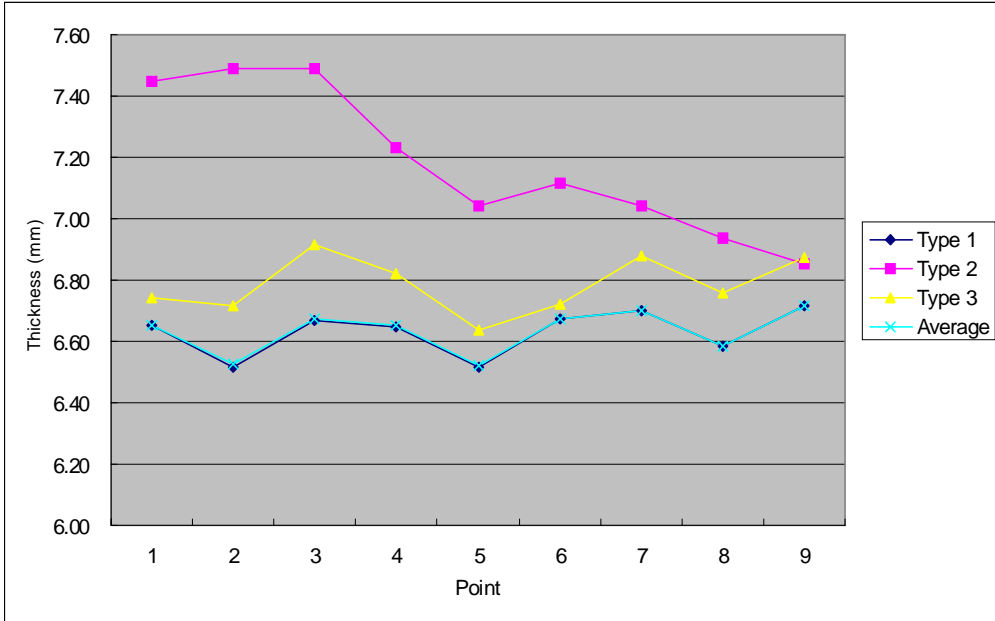


그림 7. 2.5" Feeder의 초기두께 분포

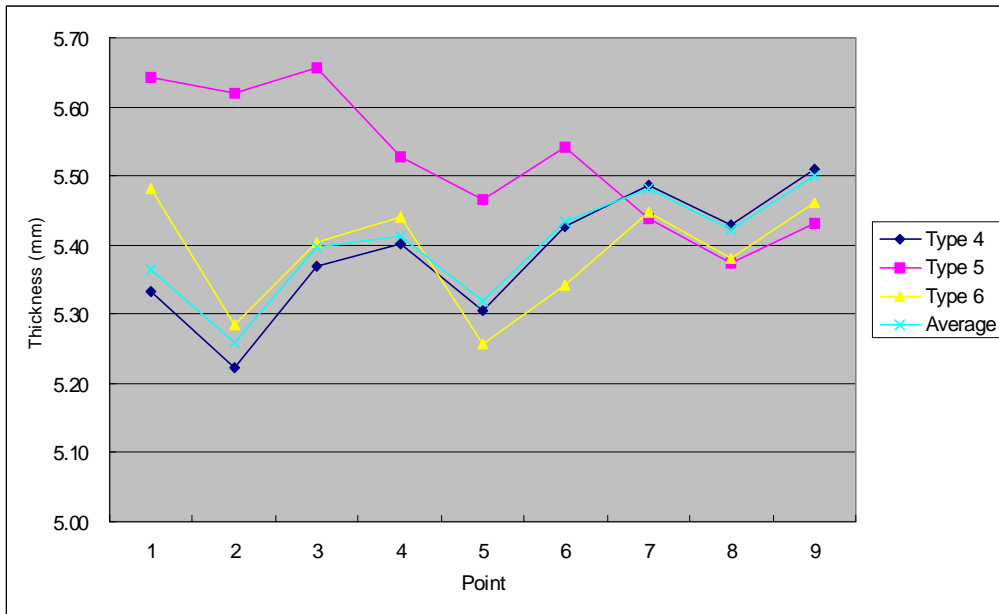


그림 8. 2" Feeder의 초기두께 분포

## 2) Feeder의 thinning rate 분석

Feeder의 thinning rate 분석을 위해서는 각 feeder의 초기두께값, 어느 시점에서의 두께값 및 그 시점까지의 운전시간이 필요하다. 초기두께값은 상기와 같은 방법으로 구하고, 운전시간은 표 1에 나타낸 것과 같이 호기별, 연도별 EFPY (Effective Full Power Year)를 사용할 것이다. Wear rate 분석을 위해서 월성의 4개 원전중 ISI data가 가장 많은 월성 1호가 2000년 ISI data를 사용하였다.



Feeder type에 따른 thinning rate 영향 분석을 하기 위해서는 feeder type을 분류하여야 한다. 이에 고려해야 할 사항은 initial thickness 분석을 위해 고려할 사항보다 다양하다. 직경 및 bending 각도뿐만 아니라 hub에서 첫 번째 bend까지의 거리가 유체 유동에 영향을 주므로 고려해야 하며, 두 번째 bend의 thinning rate 분석을 위해서는 첫 번째와 두 번째 bend 사이의 거리도 고려하여야 한다. 하지만 우리가 실제로 관심을 두고 있는 것은 첫 번째 bend 만이므로 이것만 고려한다면 초기두께 분석을 위해 분류한 type과 동일한, 9개로 구분할 수 있겠다. 그리고 outlet feeder만 고려하면 2"와 2.5"의 6가지로 구분할 수 있다.

채널별 thinning rate를 계산하기 위해 위에서 구한 type 별 초기두께와 이번 주기에 측정된 7개의 data중 가장 작은 값을 해당 feeder의 두께로 정하여 thinning된 양으로 결정하고 이 값을 운전시간으로 나누는 것이다. 이 방법을 수식화하면 다음과 같다.

$$\text{Thinning Rate} = \frac{\text{Type별 초기두께} - \text{측정최소두께}}{\text{운전시간 (EFPY)}} \quad (\text{식 3})$$

잔여수명은 해당 rate로 측정최소두께에서 최소허용두께까지 감육되는데 걸리는 시간으로 평가할 수 있다. 이상과 같은 방법으로 월성 1호기 feeder에 대한 2000년도 측정 data를 이용해 각 채널의 thinning rate를 평가하였다.

이 thinning rate를 주요한 FAC parameter에 대해 평가하였다. 식 2에서 보다시피 유량, steam quality 및 void fraction의 복합적 parameter 영향을 포함하고 있는 채널별 유속에 대한 thinning rate 분포를 2.5" feeder와 2" feeder로 나누어 평가하였으며, 그 결과를 그림 9와 10에 각각 나타내었다. 이 분포를 보면 유속이 증가하면 thinning rate가 증가하는 경향이 있음을 보여주고 있다. Pipe thinning에 연관이 클 것으로 예상되는 또 하나의 parameter로 flow momentum을 들 수 있다. 동일한 유속이라도 bending 부분에 큰 영향을 줄 수 있는 것이 momentum이다. 여기서는 최대 momentum에 대한 비를 고려하였으며, 운전시간을 포함시켜 aging 효과도 평가하였다. 이를 위해 1999년에 측정된 62개의 feeder 두께 data도 포함시켰다. 그 결과를 2.5"와 2" feeder에 대해 구분하여 그림 11과 12에 각각 나타내었다. 이 결과도 EFPY × (QV/QV<sub>max</sub>) 값이 커질수록 thinning rate가 커지는 경향을 보이고 있다.

#### 마. Feeder 배관의 material content

탄소강 배관의 material content 중 FAC에 영향을 미치는 것으로는 Cr, Mo, Cu 등이다. 그중에서도 Cr 농도가 가장 크게 영향을 준다. 이러한 material content 함량 효과를 보여주는 Ducreux 관계식은 다음과 같다. [1]

$$\text{FAC rate/FAC ratemax} = (83 \cdot [\text{Cr}\%]^{0.89} \cdot [\text{Cu}\%]^{0.25} \cdot [\text{Mo}\%]^{0.20})^{-1} \quad (3-3)$$

여기서 [Cr%], [Cu%], [Mo%]는 각 원소의 질량비를 나타낸다. 이에 따라 각 feeder 채널별 material content, 특히 Cr 함량을 알기 위해 data를 수집하였다.

월성 1호기 feeder 전부와 2호기 S, U 열을 제외한 feeder는 일본 Sumitomo 사가 제작하고 캐나다 Dominion Bridge 사가 공급한 것이다. Material content를 분석하기 위해 필요한 data는 제작 당시의 material content 자료가 있는 CMTR (Certificate of Material Test Report)과 feeder 제작후 실제 설치된 채널 이력 자료(Tabulation of Material)이다. 하지만 Dominion Bridge 사가 공급한 feeder에 대해서는 이력자료가 정확하지 않은 편이다. 하지만 제작 당시의 Heat number를 기준으로 유추하여 data를 정리하였다. 이 수집된 data를 개략적으로 확인해본 결과 Dominion Bridge에서 공급한 월성 1호기와 2호기 feeder의 Cr 농도는 0.02 ~ 0.04%로 매우 낮은 수준이다. 월성 2호기 S, U 열의 feeder 및 월성 3,4호기 feeder는 일본 Sumitomo에서 제작하고, 한국중공업에서 bending한 후 납품한 것이다. 이들은 0.02% ~ 0.08% Cr 농도로 Dominion Bridge에서 공급한 것에 비해서는 높은 편이나 여전히 저 Cr 농도 탄소강임을 확인할 수 있었다.

월성 1호기의 경우 0.02 ~ 0.04% Cr 농도로 이 정도의 차이는 채널별로 material content에 따른 thinning rate 차이가 적고, 절대적으로도 thinning rate를 줄일 수 있을 정도도 아니어서 material content는 feeder thinning에 대한 주요 parameter가 되지 않을 것으로 평가되었다.

### 3. 결 론

월성 1호기 feeder 배관의 감육현황을 2000년도 O/H중 측정된 feeder 두께 data를 이용해 분석하였다. 이를 위해 FAC dissolution rate에 영향을 미치는 parameter와 mass transfer rate에 영향을 미치는 parameter의 DB를 구축하였다. Dissolution rate에 영향을 미치는 parameter로 pH, 운전온도 및 material content와, mass transfer rate에 영향을 미치는 parameter로 feeder geometry, steam quality, void fraction 및 유속에 대한 DB를 구축하였다. 월성 1호기 초기두께값에 대한 정확한 data가 부족하기에, 월성 1호기 feeder 초기두께값은 월성 2,3,4호기의 초기두께값을 이용해 분석하였다. 분석에 앞서 bending 각도에 따라 feeder의 종류를 구분하였다. 이는 bending이 많이 될수록 bending 바깥부분(extrados)의 두께가 얇아지기 때문이다. Feeder는 feeder 직경과 bending 각도에 따라 2.5" 와 2" feeder에 대해 각각 3종류로 분류될 수 있다. 초기두께값은 이 type에 따라 차이가 있음을 확인하였고, 같은 type의 feeder라 하더라도 두께값의 차이가 커 제작과정에서부터 두께 차이가 있음을 확인하였다. 그러하므로 보다 정확한 감육현상을 평가하기 위해서는 정확한 초기두께값을 아는 것이 중요하다는 것도 파악하게 되었다. 월성 2,3,4호기에 대해서는 각 채널에 대한 측정 초기두께값이 대부분 있기에 이를 사용하여 할 것이다. 이번 분석에서는 각 type 별 평균값을 해당 type의 초기두께로 결정하였다.

Feeder 채널별 thinning rate는 상기의 type별 초기두께와 현재 측정두께중 최소값과의 차이를 운전시간으로 나눈 값으로 평가하였다. 채널별 유속에 대한 이 thinning rate의 분포를 분석한 결과, 상당한 연관성을 가지고 있음을 확인하였다. 그리고 thinning에 직접적인 영향을 줄 것으로 생각되는 유동 momentum에 대한 thinning rate 분포 또한 상

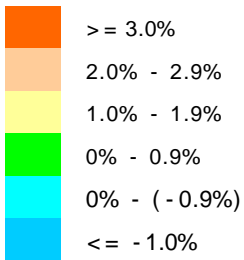
당한 경향성을 보여주고 있음을 확인하였다. 이 결과를 이용해서 채널별 상대적 감육비를 평가할 수 있을 것으로 본다. 현재 전력연구원에서는 몇 가지 parameter를 통합한 경험적인 모델을 개발중에 있으면 이 모델 개발이 완료되면 보다 정확한 채널별 감육현황을 평가할 수 있을 것이고, 효과적인 feeder 배관의 관리대책을 수립할 수 있을 것이다.

## 참고도서

1. B. Chexal, et. al., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI TR-106611 (June 1996).
2. K.A. Burrill, E.L. Cheluget, D.G. Miller, and C.W. Turner, "Primary Coolant pH for Control of CANDU Plant Aging", AECL-11963 (Dec. 1998).
3. F.H. Sweeton and C.F. Baes, "The Solubility of Magnetite and Hydrolysis of Ferrous Iron in Aqueous Solutions at Elevated Temperatures", J. Chem. Thermodyn., Vol.2, pp. 479-500 (1970).
4. J. Gillanders, "Pipe and Tube Bending Manual", Gulf Publishing Company.
5. J. Pietralik, "Progress Report on the CANDU Primary Side FAC Model for KEPRI", AECL, (June 2000)

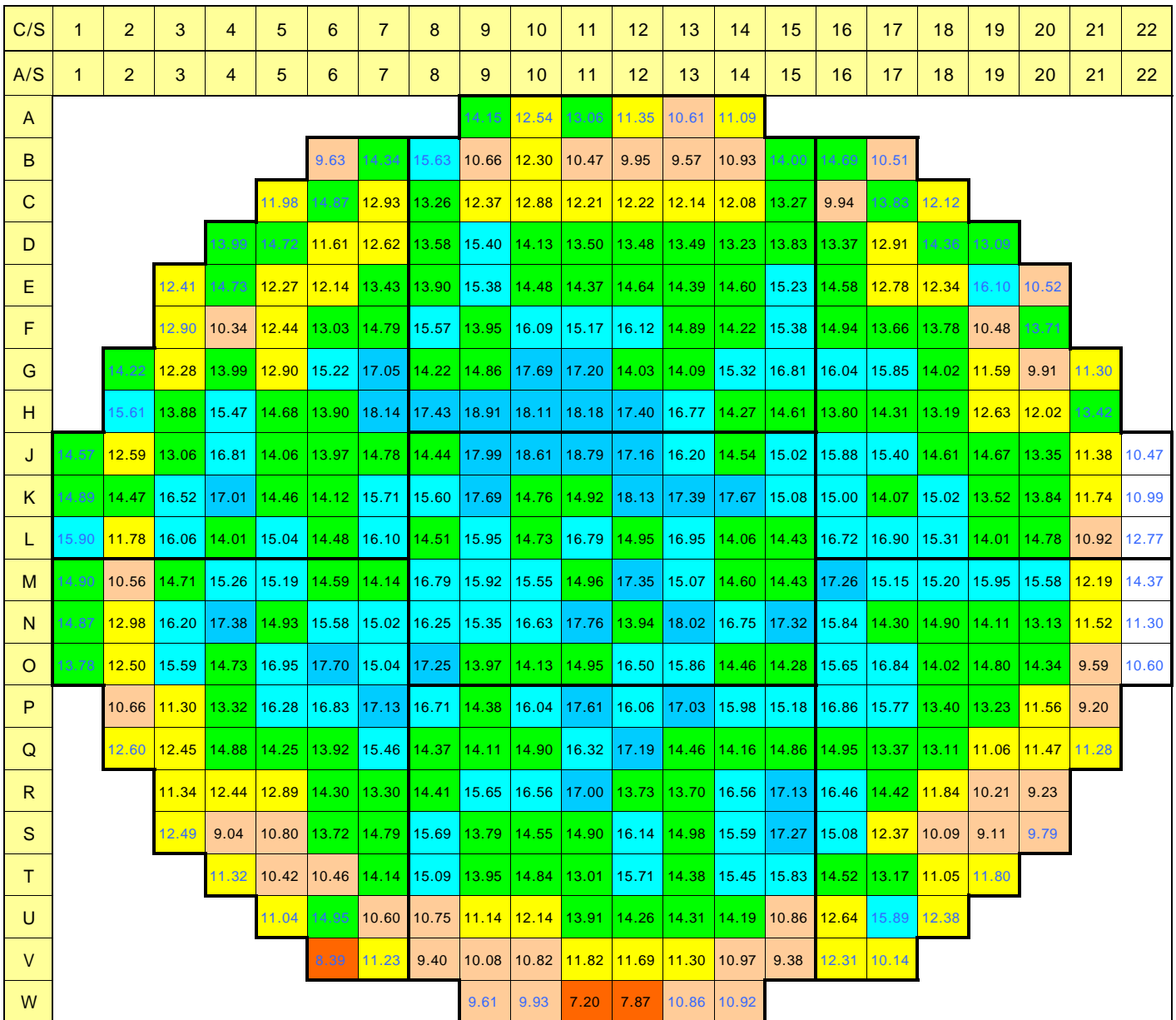
C/S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A/S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
A									35.7	12.6	22.9	7.6	0.0	10.9								
B					0.0	26.7	19.7	9.3	26.7	0.0	0.0	0.0	17.1	6.0	33.3	8.2						
C				16.2	19.7	29.5	18.0	6.0	4.8	0.0	0.0	1.3	0.0	23.0	2.5	18.8	17.1					
D			31.5	14.3	15.2	8.2	14.3	16.2	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	18.8	26.7	15.2	25.3				
E		18.0	16.2	18.0	0.0	1.3	1.3	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	13.3	9.3	17.1	26.1	0.0			
F		0.0	0.0	2.5	0.5	8.2	8.2	0.0	14.3	12.3	18.0	4.8	2.5	7.1	10.3	8.2	17.1	0.0	10.3			
G	18.8	23.0	18.8	0.0	14.3	23.7	0.0	4.8	26.7	24.5	2.5	0.0	9.3	19.7	18.8	18.8	12.3	0.0	0.0	0.0		
H	17.1	23.0	20.5	12.3	1.3	30.8	21.4	32.7	28.8	32.1	27.4	21.4	1.3	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	10.3	0.0		
J	37.9	27.4	12.3	27.4	0.0	0.0	3.7	0.0	26.7	31.5	35.1	26.7	17.1	2.5	4.8	12.3	11.3	4.8	12.3	15.2	23.0	4.8
K	30.2	37.9	32.1	25.3	0.0	0.0	11.3	8.2	26.0	6.0	13.3	32.7	25.3	26.0	3.7	6.0	0.0	4.8	1.3	16.2	18.8	2.5
L	33.3	12.3	26.7	0.0	0.0	0.0	13.3	0.0	15.2	8.2	26.0	15.2	23.7	0.0	0.0	17.1	18.8	0.0	0.0	20.5	6.0	11.3
M	26.0	1.3	18.8	9.3	2.5	0.0	0.0	17.1	10.3	13.3	13.3	28.8	11.3	0.0	0.0	22.2	4.8	2.5	16.2	26.0	16.2	26.7
N	24.4	23.7	30.2	28.1	0.0	10.3	4.8	14.3	8.2	22.2	32.1	13.3	29.5	19.7	22.2	12.3	0.0	0.0	3.7	11.3	14.3	0.0
O	26.0	26.7	31.5	13.3	22.2	26.0	8.2	23.7	0.0	1.3	16.2	25.3	16.2	3.7	0.0	12.3	22.2	0.0	17.1	24.5	0.0	3.7
P		13.3	0.0	8.2	19.7	23.0	21.4	18.8	0.0	17.1	27.4	19.7	23.0	13.3	7.1	21.4	15.2	0.0	7.1	0.0	2.5	
Q		13.3	26.0	28.1	14.3	4.8	16.2	0.0	0.0	4.8	20.5	25.3	2.5	0.0	4.8	11.3	3.7	3.7	0.0	20.5	1.3	
R			29.5	18.0	7.1	15.2	0.0	3.7	12.3	22.2	23.7	1.3	0.0	20.5	23.0	26.7	15.2	2.5	0.0	9.3		
S				22.2	0.0	3.7	21.4	21.4	18.8	0.0	0.0	6.0	15.2	3.7	13.3	31.5	23.0	12.3	0.0	2.5	0.0	
T					6.0	26.0	3.7	26.7	26.0	11.3	17.1	0.0	23.7	12.3	26.0	30.2	29.5	30.8	30.8	14.3		
U						13.3	32.7	12.3	0.0	1.3	3.7	21.4	24.5	26.0	28.1	0.0	33.3	37.4	27.4			
V							0.0	10.3	18.0	14.3	16.2	26.0	27.4	23.7	25.3	13.3	19.7	16.2				
W									0.0	0.0	1.3	13.3	9.3	16.2								

**Index**

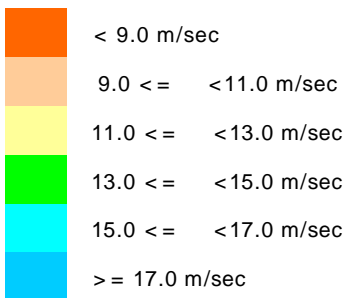


Maximum Value : 37.9 (K01, L02)

**Figure 1. Void Fraction at Outlet Feeder of Wolsong Unit 1 - NUCIRC code result**



**Index**



Maximum Value : 18.9 (H09)

Minimum Value : 7.2 (W11)

**Figure 2. Flow Velocity (m/sec) at Outlet Feeder of Wolsong Unit 1 - NUCIRC code result**

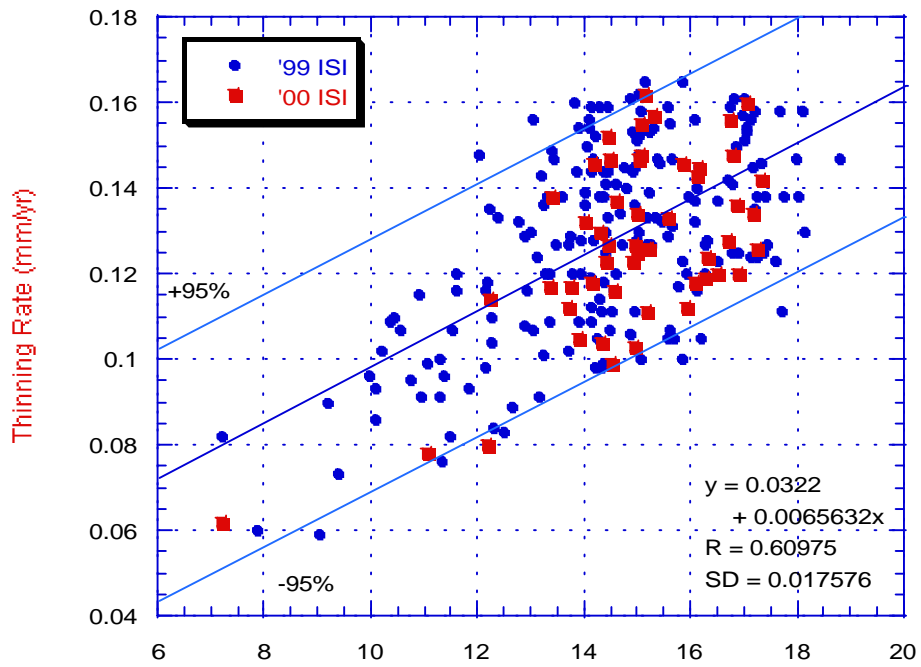


그림 9. 월성 1호기 feeder의 유속에 대한 감육율 분포

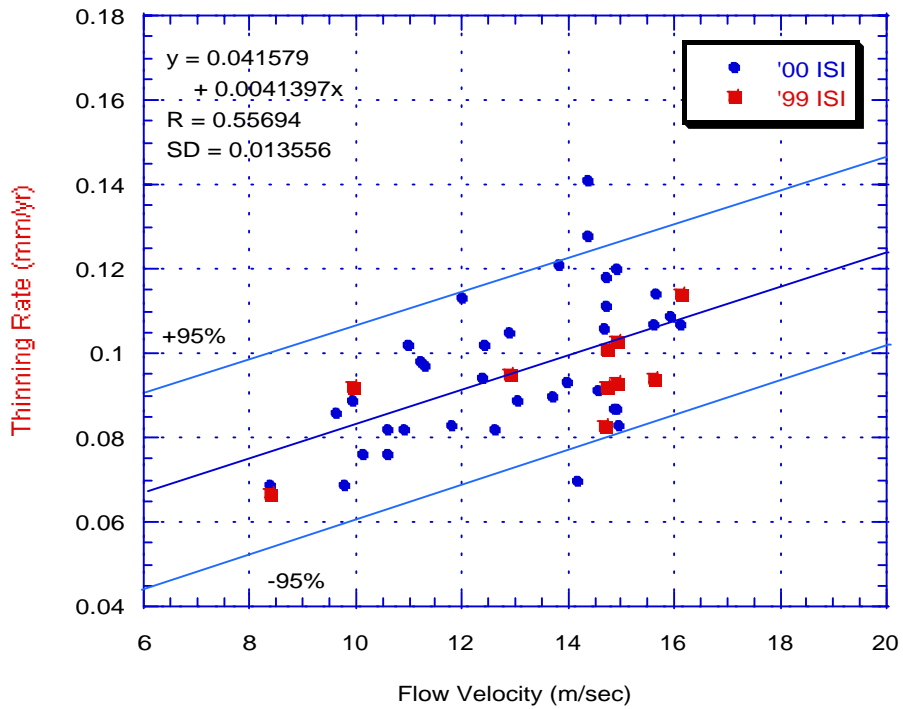


그림 10. 월성 1호기 2" feeder의 유속에 대한 감육율 분포

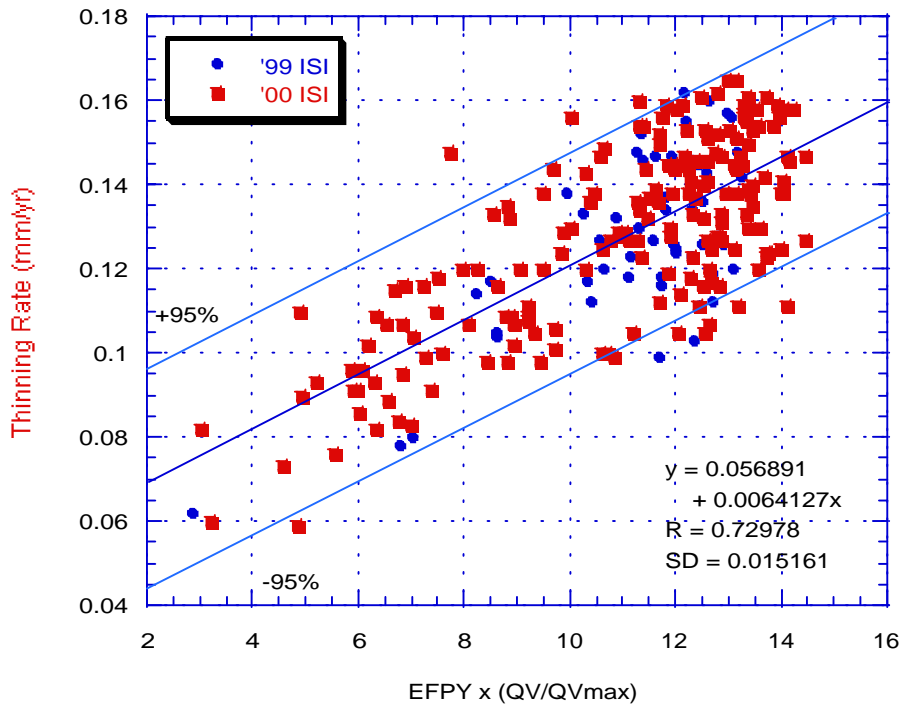


그림 11. 월성 1호기 2.5" Feeder의 FAC 운동량에 대한 감육율 분포

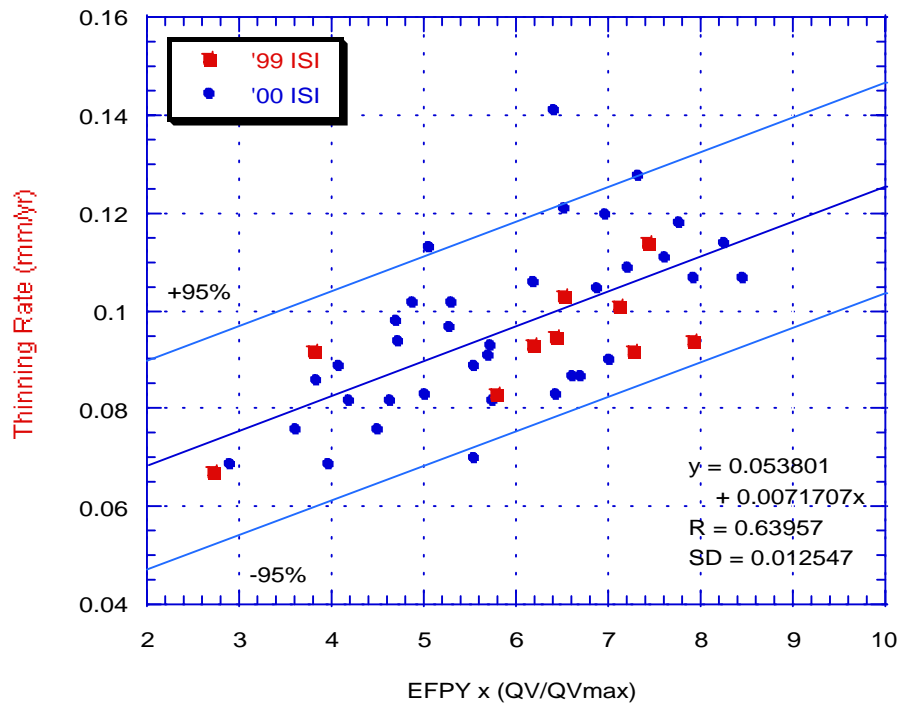


그림 12. 월성 1호기 2" Feeder의 FAC 운동량에 대한 감육율 분포