

월성1호기 Feeder 배관 초기두께 및 감육현황 분석

An Analysis of Initial Thickness and Thinning Status of Feeder Pipes in Wolsung Unit 1

제갈성, 이순호, 서준원, 정한섭
한국전력공사 전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

월성1호기 feeder 배관의 두께감소 현황을 파악하기 위해 초기두께를 분석하였다. 이 분석법의 전제조건은 동일한 type의 feeder는 bending에 의해 일정한 두께가 감소되며, bending 후 두께는 동일하다는 것이다. 월성1호기 feeder 초기두께를 분석하기 위해 3가지 방법을 사용하였다. 월성 2,3,4호기의 초기두께 data를 이용하는 방법, 월성1호기의 52개 초기두께 data를 이용하는 방법, 그리고 월성 2,3,4호기의 bending 전,후 두께감소율을 구하고 이를 월성1호기 bending 전 두께에 곱하여 bending 후 두께를 구하는 방법이다.

이상의 3가지 방법중, 월성 1호기의 bending 전 직관두께가 월성 2,3,4호기에 비해 얇다는 data를 확보하여 첫 번째 방법은 제외되었다. 두 번째 방법과 세 번째 방법으로 구한 두께감소율을, 전력연구원과 AECL이 함께 개발한 "중수로 피더관 감육예측모델"에서 예측한 두께감소율과 비교하였다. 그 결과, 이 두 방법이 크게 차이는 없으나 약간 세 번째 방법이 나음을 알 수 있었다. 보다 정확한 평가는 향후 더 많은 두께 측정 data가 확보된 이후에 이루어 질 수 있을 것으로 본다.

Abstract

The initial thicknesses of feeder pipes in Wolsung-1 are analyzed to estimate status of feeder thinning. The assumption of the estimation is that feeders of same type are decreased to same thickness by bending and have same thickness after bending. Following three methods are used to estimated thicknesses of the remains besides 52 feeders with initial thickness data in Wolsung-1. First is the estimating initial thickness of same type in Wolsung-1 from initial thickness data of Wolsung-2, -3 and -4. Second is the finding average value of each type from 52 initial thickness data of Wolsung-1. Last is the finding the thickness-after-bending of Wolsung-1 from thickness decrease rate of each type by bending in Wolsung-2, -3 and -4.

The first method is eliminated by thickness-before-bending of Wolsung-1 lower than that of Wolsung-2, -3 and -4. The thinning rates of 2nd and 3rd method are compared with the "CANDU Feeder FAC Rate Analysis model" developed by KEPRI and AECL. The result is no special difference with two methods, but 3rd method is a little better. It is expected that more correct estimation can be done after getting more measured thickness data.

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 parameter들은 여러 가지이나 크게 두 가지로 나누어 보면, 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. [1]

이러한 parameter들의 복합적인 영향에 의해 배관두께는 감소하게 되며, 설비의 건전성 확보를 위해 매 계획예방정비기간 중에 두께 감소가 예상되는 배관에 대해 점검을 수행하여 두께감소율 및 잔여수명을 평가하고 있다. 가장 일반적인 점검 방법은 초음파검사(UT)를 이용한 두께측정이다. UT 결과를 이용한 두께감소율 계산을 위해서는 과거의 두께값과 현재의 두께값, 그리고 그 동안의 운전시간이 필요하다. 그런데 이 운전시간이 짧으면 측정오차에 의한 두께감소율 계산의 정확성이 떨어지게 된다. UT 측정 정확성에 대한 평가는 많이 이루어져 왔으며, 발전소 조건에서의 합리적인 오차는 약 0.005“ (0.125mm) 정도인 것으로 보고 있다. [2] 이러한 오차가 2번의 측정에 포함되면 약 0.177mm 정도의 오차가 생기는 것으로 본다. 이 정도의 오차는 약 2년간 운전에 의한 두께감소와 맞먹는 값이므로 3번 정도의 측정으로 두께감소율과 수명을 평가하는 것이 바람직하다. 그리고 측정 시간도 가능한 긴 것이 오차를 줄이는 방법일 것이다. 이러한 관점에서 월성 1호기 feeder의 두께감소 평가에서는 최근의 측정 data 들로부터 계산하지 않고 운전 전 초기두께와 2000년에 측정한 두께를 이용하는 것이 바람직하다.

그런데 월성1호기가 상업운전을 시작할 1983년경에는 FAC에 의한 탄소강배관의 두께감소 현상에 대한 인식이 없었던 탓으로, feeder의 운전 전 초기두께 data는 제대로 관리가 되어 있지 않은 실정이다. 현재 380개 feeder 중 52개에 대해서만 data가 있다. 그리고 이 data도 단지 1개의 data만이 존재하는 상황으로 extrados에 대해 측정한 두께인 것으로 생각하고 있다. 측정 최초두께 data가 있는 이 52개 feeder에 대해서는 두께감소율을 용이하게 구할 수 있으나, data가 없는 나머지 feeder에 대해서는 두께감소율 계산 등 관리가 쉽지 않다. 그리하여 이번 연구에서는 월성 1호기 초기두께 data가 없는 feeder에 대해 합리적인 초기두께 계산 방법을 찾아내고, 이로부터 feeder의 두께감소 현황을 분석하고자 한다.

2. 초기두께 분석 방법

초기두께를 분석하기 위한 전제 조건은, 동일한 종류의 feeder는 동일한 두께를 가진다는 것이다. 동일한 두께의 pipe라 할지라도 bending을 하게 되면 bending 부의 외곽부

(extrados)의 두께는 얇아지고, 내각부(intrados)의 두께는 두꺼워진다. 그림 1은 180° 로 cold bending 했을 때의 두께를 분석한 결과가 있다. [3] 이렇게 얇아지는 정도가 같은 각도로 bending을 하게되면 extrados의 두께는 동일할 것이다. 그리하여 feeder를 동일한 조건을 가지는 것으로 분류하여 분석하였다. Feeder는 2.5"와 2"의 두 가지 직경으로 되어 있으며, 실제 측정이 이루어진 첫 번째 bend는 2.5"와 2" 모두 73.133°, 42.833° 및 32.717°의 3가지씩으로 구성되어 있다. 이렇게 구해진 6개 type의 feeder에 대해서는 동일한 type의 feeder는 초기에 동일한 두께를 갖는다는 것을 가정한 것이다. 하지만 실제 현장에서 측정한 data를 보면 동일한 type에 대해서도 서로 다른 값을 보이고 있으며, 이는 제작 공차와 측정오차에 의해 발생된 것으로 보인다. 하지만 초기두께가 없는 feeder에 대해서는 약간의 오차를 고려하더라도 같은 type의 평균적인 초기두께값을 가지는 것으로 보고, 두께를 분석하여야만 하였다.

이러한 기본 전제하에 두께를 분석하는 방법에는 다음과 같은 3가지 방법이 있다.

- 1) 월성 2, 3, 4호기 측정된 초기두께를 이용하여 각 type에 대한 평균적인 두께를 구하고 이를 월성 1호기의 초기두께로 사용하는 방법.
- 2) 월성 1호기에서 측정된 초기두께인 52개 data를 이용해 각 type 별 평균두께를 측정 data가 없는 feeder의 초기두께로 사용하는 방법
- 3) 월성 2,3,4호기 feeder의 bending 전과 bending 후의 두께를 파악하여 각 type 별 bending에 의한 두께감소율을 구하고, 이 두께감소율을 월성1호기 채널별 bending 전 두께에 적용하여 bending 후 두께를 유추하는 방법

이상과 같은 3가지 방법으로 월성1호기 feeder 초기 두께를 분석하고, 이중 가장 합리적인 방법을 결정토록 하겠다.

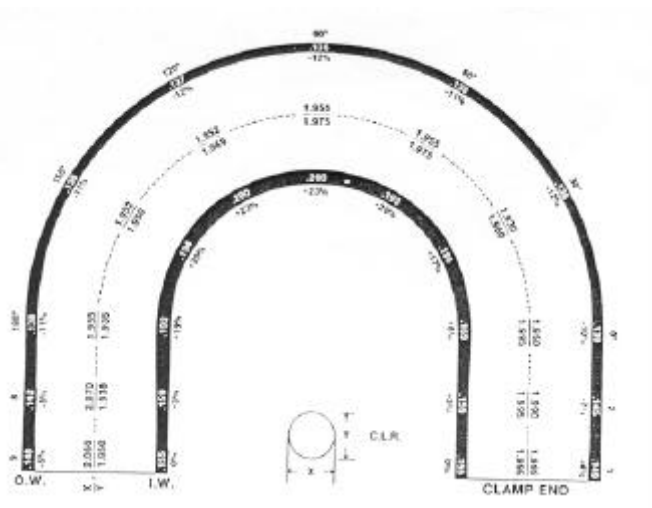


그림 1. 직경 2" tube의 180° bending 때 두께변화

가. 월성 2,3,4호기 측정 초기두께 이용 방법

월성 2호기에는 81개 채널에 대해 측정 초기두께값이 있으며, 월성 3호기는 368개의 채널에 대해, 월성 4호기에는 642개의 채널에 대해 측정한 초기두께값이 있다. 이를 type 별로 분석한 통계 data가 표 1에 있다. 그런데 월성 2,3,4호기의 초기두께가 월성 1호기

의 초기두께에 비해 두꺼운 것을 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 bending을 하기 전 직관의 두께 data를 입수하여 분석하였으며, 이 결과를 표 2에 정리하였다. 표 2를 보면 월성 1호기의 bending 전 두께가 월성 2,3,4호기의 bending 전 두께에 비해 약 0.3 ~ 0.4mm 정도 얇은 것을 알 수 있다. 이 정도는 약 3 ~ 5년 정도 운전에 따른 두께 감소 양으로, 이 정도의 차이는 두께감소를 계산에도 상당한 오차를 줄 수 있기에 사용하기는 힘들 것으로 본다.

단지 각 type 별로 월성 2,3,4호기와 월성 1호기의 두께비를 보면 약 94% 정도인 것을 알 수 있다. 물론 type 3는 월성 1호기 data가 없어 비교할 수 없고, type 6는 다른 경향을 보이고 있지만 1개의 data만 있기에 이 값이 보여주는 차이를 전체를 대표하는 것으로 보기 힘들다. 결론적으로 월성 2,3,4호기 측정 초기두께를 이용해 월성 1호기 초기두께를 유추하는 것은 유용하지 않은 방법인 것으로 판명되었다.

표 1. 월성 1호기 Feeder 초기두께 분석 및 비교

	Type	2.5"			2"			Total # of feeder
		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6	
	Bend Angle	73.133	42.833	32.727	73.133	42.833	32.727	
	# of Pipes	298	20	2	26	14	20	380
W-2,3,4 초기두께 이용	# of Pipes	641	4	3	388	15	40	1,091
	평균두께	6.63	6.79	7.15	5.39	5.39	5.50	
	(최대두께)	7.30	7.13	7.91	5.87	6.00	6.23	
	(최소두께)	6.10	6.50	6.70	4.88	5.00	4.88	
W-1 초기두께 이용	# of pipes	44	1	0	4	2	1	52
	평균두께	6.13	6.40	※	5.06	5.07	4.90 ◎	
	(최대두께)	6.56	-	-	5.23	5.10	-	
	(최소두께)	5.73	-	-	4.87	5.03	-	
	평균두께 비	0.925	0.943	※	0.939	0.941	0.891 ◎	

※ Type 3에 대한 월성 1호기 측정 data가 없어 모든 type의 비교 평균두께비인 94%를 적용하여 7.15mm의 94%인 6.721mm를 월성 1호기 type 2 평균두께로 사용.

◎ Type 6에 대한 월성 1호기 측정 data가 1개 밖에 없고, 평균두께비가 다른 type에 비해 차이가 많기에 5.50mm의 94%인 5.170mm를 월성 1호기 type 6 평균두께로 사용.

표 2. Feeder의 Bending 전 직관 두께 비교

Type		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
월성 1호기	평균두께(mm)	6.958	6.960	-	5.361	5.350	5.410
	Data 개수	75	6	0	25	11	20
월성 2,3,4호기	평균두께(mm)	7.270	7.270	7.270	5.740	5.741	5.722
	Data 개수	743	52	4	78	37	55

나. 월성 1호기 측정 초기두께 이용 방법 [4]

월성 1호기에는 상업운전 전에 측정한 52개의 feeder 초기두께 값이 존재한다. Data가 있는 채널은 해당 data를 사용하고, data가 없는 채널은 type 별로 측정 data를 평균하여 해당 type의 평균값을 그 채널의 초기두께로 사용하는 것이다. 이 분석결과가 표 1에 하단부에 있다.

Type 2와 type 6는 1개 data 씩만 있고, type 3는 data가 없는 상황이다. 이에 따라 월성 2,3,4호기 초기두께와 월성 1호기 초기두께 비를 이용해 해당 type의 평균값을 유추하는 것이 좋은 것이다. Type 2는 두께비가 94.3%로 전체적인 경향에 합당하기에 그냥 사용이 가능하나, type 6는 89.1%로 경향에서 많이 벗어나고 있다. 이는 제작시 공차 및 측정오차가 포함되어 발생할 수 있을 것으로 본다. 이에 따라 이 값을 직접 사용하기는 어려우며 type 3와 type 6는 전체적인 두께 비인 94%를 적용하여 6.721mm와 5.170mm를 각각 사용하기로 하였다. 물론 측정 data가 있는 52개 채널은 해당 data를 사용하며, data가 없는 나머지 328개 채널에 대해 이 방법을 사용하는 것이다.

다. Bending 전후 두께감소비 이용 방법

이 방법을 사용하는 기본 취지는 bending 이전의 두께가 서로 다르고 bending 이후의 두께가 동일한 type의 채널이라도 다르지만, 동일한 각도로 bending을 하게 되면 bending에 의한 두께감소 비율은 일정하다는 것이다. 물론 이에도 약간씩의 차이는 있겠지만 보편적인 경향을 보여줄 수는 있을 것으로 본다.

이 방법에 의한 과정 및 결과 data가 표 3에 있다. 월성 2,3,4호기 bending에 의한 두께감소율은 예상대로 bending 각도에 따라 차이가 있었다. Bending 각도가 크면 두께감소율이 크며 bending 후 두께가 많이 얇아지고, bending 각도가 적으면 반대가 된다. 이 data를 Point Lepreau와 Gentilly-2의 동일한 data와 비교해보면 거의 비슷함을 알 수 있다. 표 3에서 보다시피 2.5" feeder에 대해서는 두께감소율이 거의 비슷하고, 2" feeder에 대해서는 Point Lepreau와 Gentilly-2 data가 bending 각도에 거의 무관하게 한 개의 값을 가지고 있으나 월성 2,3,4호기에 대해서는 차이가 적기는 하지만 다른 값으로 나타났다. 하지만 0.2 ~ 1.3% 정도로 큰 차이를 보이지는 않았다. 이에 따라 월성 2,3,4호기의 bending에 따른 두께감소율 계산 결과가 어느 정도 합리적임을 알 수 있었다. 그리하여 이 type 별 두께감소율과 월성 1호기 채널별 bending 전 직관 두께를 곱하여 bending 후 feeder의 두께를 구하였다. 그런데 채널별 bending 전 직관 두께 data가 없는 채널에 대해서는 평균적인 두께 data를 사용하였다. 표 3에서 type 별 예측 두께를 계산한 결과를 나타내었는데, type 2에 대해서는 data가 없었기에 다른 방법에서 구한 두께값인 6.721mm를 사용하였다.

이 결과를 보면 2" feeder는 측정초기두께를 사용한 방법에 비해 두께감소율을 사용한 방법에 의해 구해진 두께 예측값이 0.25~0.3mm 정도 적게 평가되었다. Type 2도 0.15mm 적게 나타났다. Type 1은 반대로 0.03mm 정도 크게 나타났다. 이의 영향은 약 15년 운전한 월성 1호기의 두께감소율 평가에 크게 반영되지는 않을 것으로 예상되지만 차이가 있음을 확인하였고, 채널별 평가를 수행하여 유용성을 비교해 보아야 할 것이다.

표 3. Bending에 의한 두께감소율을 이용한 월성1호기 초기두께 분석결과

Type 종류		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
월성1호기 Bending 전 Data	두께(mm)	6.958	6.960	-	5.361	5.350	5.410
	Data 수	75	6	0	25	11	20
월성2,3,4호기 Bending에 의한 두께감소율	비율 (%)	88.5	89.8	91.0	89.2	90.0	90.9
	Data 수						
Point Lepreau와 Gentilly-2 원전의 두께감소율 (%)		89.5	90.0	91.2	90.5		
월성1호기 Bending 후 예측 두께 (mm)		6.158	6.247	※	4.782	4.815	4.917
월성1호기 측정초기두께를 이용한 예측 두께 (mm)		6.130	6.400	6.721	5.060	5.070	5.170

※ Type 3는 bending 전 두께 data가 없기에 bending 두께감소율을 이용하여 두께를 구할 수 없음. 그리하여 측정초기두께를 이용한 방법의 예측두께인 6.721mm 사용.

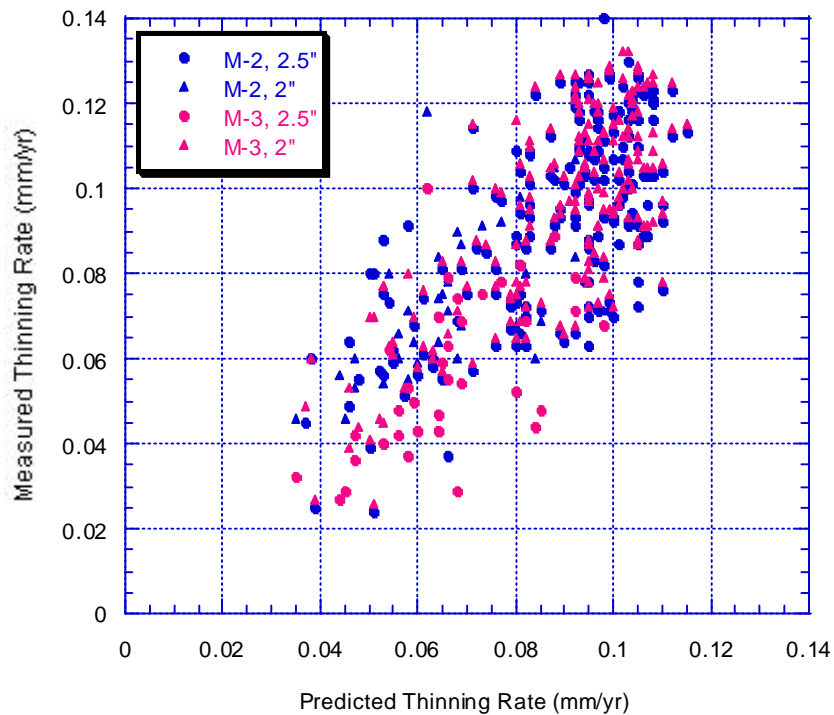


그림 2. 방법 2와 방법 3의 결과와 FACRAN model 결과 비교

3. 분석 결과 평가 및 결론

상기와 같은 두 번째와 세 번째 방법으로 구한 초기두께와 2000년에 측정한 월성1호기 가동중 두께 data를 이용해 thinning rate를 계산하였다. 2000년에 측정한 data는 총 229

개 채널에 대한 data로 thinning rate도 229개 채널에 대해서만 계산 가능하다. 이렇게 계산된 두가지 방법의 thinning rate를 비교하기 위해 전력연구원과 캐나다 AECL이 공동으로 개발한 “중수로 1차측 FAC rate 분석 모델 (FACRAN, FAC Rate ANalysis model)”을 사용하였다. 이 모델은 월성 1호기 1999년 측정 data와 캐나다 Point Lepreau 원전 및 Gentilly-2 원전의 측정 data를 이용해 개발한 것으로, 첫 번째 bend와 두 번째 bend의 FAC에 의한 두께감소율을 예측하는 것이 모델의 목적이다. 이 모델이 평가의 가장 확실한 기준이 될 수는 없는 상황이지만 비교를 위해 모델을 사용하였다.

모델에서 예측한 thinning rate와 방법 2와 방법 3으로 구한 측정 thinning rate를 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그리고 2.5“와 2”에 대한 최대 두께감소율과 평균두께감소율을 이 두 방법에서 구한 값과 모델에서 구한 값, 그리고 Point Lepreau, Gentilly-2 및 Embalse 원전의 data와 비교한 것이 표 4에 있다. 이 결과로 볼 때, 특별히 어느 방법이 우수하다는 것을 확인할 수는 없었다. 하지만 2” feeder에 대해서는 방법 3에 의한 결과가 방법 2에 의한 결과보다 두께감소율이 적은 것으로 평가되었다. 그리고 모델과의 차이에 대한 절대값을 평가해 보았다. 단순한 차이를 평가하는 것은 모델에 대한 크고 작음이 서로 상쇄되어 차이를 정확히 평가하기 힘들기 때문에 차이의 절대값에 대해 평가하였다. 이 절대값의 평균이 적거나, 표준편차가 적으면 모델과의 차이가 적음을 나타내는 것이다. 표 5에서 보다시피 세 번째 방법에 의해 구해진 값이 모델과의 차이가 적음을 알 수 있다. 하지만 그 차이가 아주 미미하기 때문에 어떤 방법이 특별히 좋은 방법이라고 평가하기는 힘든 상황이다. 향후에 보다 많은 측정 data가 확보되면 보다 정확한 평가가 이루어 질 것으로 보나, 위에도 언급했듯이 그 차이는 아주 미미할 것으로 예상된다.

초기두께 상의 약간의 차이는 운전시간이 길어지면 질수록 그 영향은 적어지게 된다. 그러므로 향후의 feeder 두께감소 평가에서 이 방법상의 차이는 없을 것으로 본다. 즉, 어떠한 방법을 사용하더라도 평가결과의 영향은 적다라는 것이다. 이에 따라 초기두께의 오차에 의한 두께감소율 및 잔여수명에 대한 논의는 무의미하며, 두께감소가 심하게 발생할 가능성이 있는 조건을 찾아내고 이에 따라 관리 방안을 수립하는 것이 더욱 중요할 것으로 본다. 또한 현재 측정하지 않고 있는 두 번째 bend에 대해서도 관리하는 것이 더욱 중요할 것으로 본다.

표 4. CANDU-6 원전의 Feeder 두께감소율 비교 (첫번째 Bend)

Plant Name (EFPY)		월성 1호기 (14.45)			Point Lepreau (14.05)	Gentilly-2 (12.58)	Embalse (12.25)
		방법 2	방법 3	예측모델			
2.5“ Pipe	최대 TR	0.140	0.132	0.115	0.127	0.131	0.127
	평균 TR	0.093	0.095	0.087	0.110	0.094	0.080
2” Pipe	최대 TR	0.118	0.100	0.098	0.114	0.144	0.063
	평균 TR	0.073	0.057	0.065	0.096	0.079	0.027

표 5. 각 방법의 FACRAN model과의 두께감소율 차이 비교

항목	최대값	평균값	최소값	표준편차
방법 2 vs Model	0.055955	0.014346	1×10^{-6}	0.0097617
방법 3 vs Model	0.044783	0.013912	4×10^{-5}	0.0097588

※ 모델과의 절대적 차이 값에 대한 통계적 분포임.

References

1. B. Chexal, et. al., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI TR-106611 (June 1996).
2. J. Pietralik, Y. Wang, R.L. Tapping, and R.L. Speranzini, "CANDU Primary Side Flow-Accelerated Corrosion Rate Model", RC-2553, AECL, (Oct. 2000)
3. J. Gillanders, "Pipe and Tube Bending Manual", Gulf Publishing Company.
4. 제갈성 외, "중수로 Feeder 배관 감육현황 분석", 2000 추계학술발표회 논문집, 원자력 학회, 2000년 10월.