

고리 1호기 증기발생기 관막음을 예측

박 인 규

선문대학교 공과대학 금속공학과

Kori-1 Steam Generator Tube Plugging Level Forecast

In-Gyu Park

Dept. of Metallurgical Engineering, Sun Moon University

Kori-1 is a two-loop plant having a Westinghouse Nuclear Steam Supply System(NSSS) with 51 Series steam generators of Alloy 600 MA tubes. The plant has been in commercial operation since April 29, 1978. A number of tube degradation mechanisms have been observed in the steam generators to date, such as pitting, primary water stress corrosion cracking(PWSCC), bulged sleeve etc.. However, the majority of repairs has been related to the tube pitting. The effective plugging level at the end of Cycle 12, in June 1993, was 6.4%. Based on the previous steam generator tube degradation data, Kori-1 S/G tube degradation projection has been made by using a Weibull function technique. The approach utilized in this study was to provide tube plugging projections based upon plant historical plugging data. It has then been predicted that PWSCC would be the main degradation mechanism in the future. Furthermore, it was estimated that the plugging limit of 15% would be reached around 2004.

1. 서 론

고리 원자력 발전소 1호기는 1978년 4월 상업 운전을 시작한 이후 현재까지 약 16년간 운전되고 있다. 고리 1호기의 증기발생기는 웨스팅하우스 51형으로 세관재질은 Alloy 600MA이다. 세계적으로 웨스팅하우스 51형의 증기발생기 세관은 점식 및 일차측용력부식균열 등의 손상에 취약하여, 운전성, 안정성, 경제성 및 PA (Public Acceptance) 측면에서 많은 발전소가 증기발생기를 교체하였거나 교체계획 중에 있다.¹⁻⁵⁾

증기발생기의 교체 타당성을 분석하기 위해서

는 우선 증기발생기 세관의 결함율을 예측할 필요가 있다. 증기발생기 세관의 결함율을 예측하는 방법으로는 결정론적방법과 통계학적방법이 있다. 결정론적방법이란 세관손상기구에 대한 이론적, 실험적 해석을 통하여 주요 지배인자를 파악하고 해당 원자력 발전소의 측정치를 기준으로 결함의 생성율 및 성장율을 예측하는 것이다. 그러나 증기발생기의 많은 세관들은 재료특성 및 환경조건이 서로 조금씩 상이하므로 결정론적 방법을 사용하는 것은 적합하지 않다. 또한 세관손상예측에는 다양한 불확실성이 내포되어 있다. 그러므로 본 연구에서는 웨이블(Weibull)

합수를 이용한 통계학적 방법으로 고리 1호기 증기발생기 세관의 향후 결함발생을 및 관막음율을 예측하였다.

2. 고리 1호기 증기발생기 세관 손상 현황

현재(1993년 기준)까지 고리1호기 증기발생기에서 발견된 세관결함으로는 점식결함, 확관천이부의 일차측용력부식균열, U-Bend 부위의 일차측용력부식균열, 유체탄성진동결함, 수압시험에서 발견되는 누설세관 및 재생관 내부돌출 등이 있다. 여기서 세관결함이란 외류탐상시험 결과에 따라 나타나는 세관정비를 필요로 하는 일 정크기 이상의 손상을 의미한다.

Table 1은 1988년부터 1993년 까지 수행된 고리 1호기 증기발생기의 세관정비결과를 원인별로 요약한 것이다.⁶⁾ 결함이 발견된 세관의 대부분은 관재생 작업을 통하여 계속 사용하고, 관재생이 곤란한 결함세관은 관막음을 한다. 현재 까지 관재생된 결함세관의 주요 손상요인은 점식으로 약 91%를 차지한다. 1990년 이후에 발견된 확관천이부의 일차측용력부식균열로 인한 관재생 비율은 현재 약 8%이다. 관막음의 원인은 재생관의 내부돌출 및 용접결함 등의 일시적 결함이 전체 관막음된 세관의 약 49%로 대부분

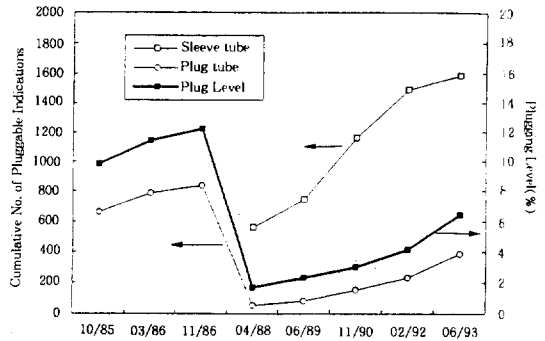


Fig 1. Kori-1 Effective Tube Plugging Levels

을 차지하는 반면, 시간의존성 결함인 점식, 확관천이부의 일차측용력부식균열, U-Bend 일차측용력부식균열 등은 전체의 17%를 차지한다. 이 중에서 확관천이부의 일차측용력부식균열 결함의 대부분은 재생관 설치가 곤란한 가장자리 구역에 위치하여 관막음한 것이다. 유체탄성진동결함은 약 10%를 차지하고 있으나 이미 대상세관을 예방관막음 처리하였다. 수압시험으로 발견된 누설세관은 약 8%이다.

고리 1호기의 세관정비 내역은 Fig. 1에 나타나 있다. 세관손상에 따른 관막음율은 최고 12.2%에 도달하였으나, 1988년에 실시한 대규모 관재생으로 관막음율은 1.68%로 감소되었다. 그러나 최근에는 다시 증가하여 1993년 현재의 관막음율은 약 6.4%이다.

Table 1. Kori-1 S/G Tube Maintenance History(as of 1993)

| year | Sleeved | | | Plugged | | | | | | | | |
|------|---------|------------|--------|---------|------------|------------|---------------|-------------|-----|-------------|-------------|--------|
| | Pitting | PWSCC (TS) | Others | Pitting | PWSCC (TS) | PWSCC (UB) | Bulged Sleeve | Weld Defect | FIV | Pulled Tube | Leaked Tube | Others |
| 1988 | 540 | - | 18 | 11 | - | - | - | - | - | 4 | 6 | 33 |
| 1989 | 184 | - | - | 4 | - | - | 9 | 7 | - | - | 5 | 4 |
| 1990 | 376 | 38 | 1 | - | - | - | 19 | 6 | - | - | 3 | 18 |
| 1991 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1992 | 274 | 52 | 4 | - | 7 | 7 | 23 | - | 31 | 3 | 7 | - |
| 1993 | 43 | 34 | - | 3 | 27 | 2 | - | 111 | 4 | - | 6 | 1 |
| SUM | 1437 | 124 | 23 | 18 | 34 | 9 | 51 | 124 | 35 | 7 | 27 | 56 |

3. 증기발생기 세관손상 예측

통계학적 세관손상 예측방법은 과거의 세관 손상이력을 토대로 결함발생 확률밀도함수의 매개변수를 결정하여 결함성장율을 예측하는 것이다. 본 연구에서는 증기발생기 세관손상 예측법으로 웨이블 함수방법을 사용하였다.^{7,8)}

3.1 웨이블 함수법⁸⁾

웨이블 분포에 대한 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \left[\frac{b}{\theta - t_0} \left(\frac{t - t_0}{\theta - 6t_0} \right)^{b-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right] \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서 $f(t)$ = 확률밀도함수
- t = 시간
- t_0 = 결함 시작 시간
- b = 웨이블 기울기
- θ = 시간에 대한 특성값

식(1)을 시간에 대해서 적분하면 누적확률 밀도함수, $F(t)$ 가 된다.

$$F(t) = \int_{t_0}^t f(t) dx = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t - t_0}{\theta - t_0} \right)^b \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2)를 선형화시키면 다음과 같다.

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = -b \ln(\theta - t_0) + b \ln(t - t_0) \dots\dots\dots (3)$$

식(1)은 특정 세관결함에 대한 발생시간의 확률 분포를 나타내며, 식(2)는 결함발생시간에 따른 누적확률분포이다. 식(2)를 선형화한 후 누적확률분포의 기울기를 구하면 미래의 결함발생율을 산출할 수 있다. 웨이블 상수 b 는 웨이블 기울기로 불리우며, b 가 1보다 작으면 결함발생이

지수 함수적으로 감소하고, b 가 1인 경우는 결함 발생이 항상 일정함을 나타낸다. b 가 1 이상인 경우는 정규분포형태의 결함발생을 의미한다. θ 는 모집단(전체 세관 수)의 63.2% [$F(t)=1-1/e=0.63212$]가 손상되는 시간을 나타낸다.

3.2 결함유형별 분석

1993년까지 고리 1호기에서 발견된 증기발생기 세관의 결함유형을 (i) 점식결함 (ii) 확관천이부 일차측응력부식균열 (iii) U-Bend 응력부식균열 (iv) 수압시험 누설세관 (v) 재생관 내부돌출 등으로 분류하여, 각각의 결함유형에 대해서 향후 발생경향을 예측하였다. 앞에서 언급한 바와 같이, 유체탄성진동이 발생할 가능성이 있는 세관은 이미 상세 분석을 통하여⁹⁾ 예방 관막음처리를 하였으므로 분석대상에서 제외하였다. 점식결함, 누설세관, 재생관내부돌출 등의 결함분석에는 화학세정 효과를 고려하였고, 특히 확관천이부의 일차측응력부식균열과 U-Bend 일차측응력부식균열에 대해서는 고리 1호기의 세관결함 자료 및 외국 원자력 발전소의 사례분석자료를⁷⁾ 토대로 웨이블 기울기를 산출하였다. 각 손상유형별 웨이블 기울기 값은 Table 2에 나타나 있다. 이 기울기를 이용하여 각 결함유형별로 발생확률을 시간(EFPY:Effective Full Power Year)의 함수로 산출하였으며, 결함유형별 상세 분석내용은 다음과 같다.

3.2.1 점 식

점식은 세관내에 국부적인 부식전지의 형성으로 발생하는 불균일한 부식현상이다. 점식결함 발생에 영향을 미치는 고리 1호기 운전조건외 주요 변화내역은 다음과 같다. 1988년에 2차측 급수가열기의 재질을 동합금에서 스텐레스강으

Table 2. Weibull slope, b for Each Degradation Mechanisms

| Degradation Mode | Pitting | PWSCC(TS) | PWSCC(UB) | Leaked Tube | Bulged Sleeve |
|------------------|---------|-----------|-----------|-------------|---------------|
| b | 0.5 | 4.3-5.0 | 4.5 | 2.3 | 2.8 |

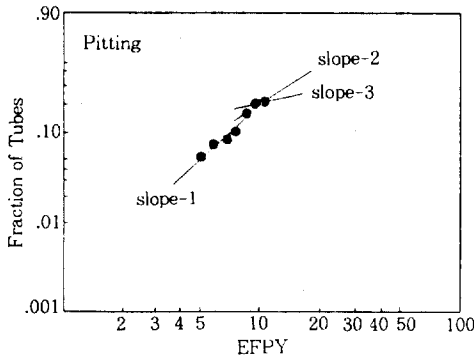


Fig 2. Weibull Plot of Pitting

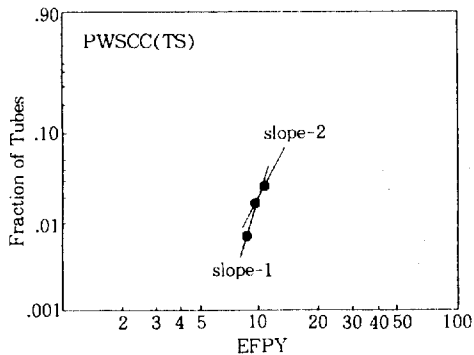


Fig 3. Weibull Plot of PWSCC at Tube Sheet

로 교체하였으며, 복수기세관을 티타늄으로 교체하였고, 복수탈염기 설치 및 수질기준 강화에 따른 엄격한 산소제어를 실시하였다. 1990년에는 증기발생기 2차측의 슬러지를 제거하기 위한 화학세정을 실시하여 불순물 농축가능성을 크게 감축시켰다. 그러므로 점식결합의 발생율은 과거에 비해 증가속도가 매우 줄어들 것으로 전망된다.

Fig. 2는 와류탐상시험에 의해 검출된 점식결합을 EFPY에 대한 웨이블 선형누적분포로 나타낸 것이다. 기울기-1 ($b=2.0$)은 화학세정의 효과를 고려하지 않은 것이고, 기울기-2는 화학세정을 실시한 후의 경향을 평균한 것으로, 화학세정에 따른 결함차폐 제거효과는 보정하지 않은 것이다. 기울기-3 ($b=0.5$)은 화학세정후의 결함차폐 제거효과를 보정한 가장 최근자료를 근간으로하여 산출한 것이다. 그러므로 슬러지 랜싱 및 화학세정을 주기적으로 실시하고 복수

기누설을 조기에 탐지하며, 복수탈염 설비로 대처하면 점식결합 발생은 기울기-3 ($b=0.5$)을 따를 것으로 예상된다.

3.2.2 환관천이부의 일차측응력부식균열

Fig. 3은 일차측응력부식균열의 발생경향을 웨이블 분포함수를 사용하여 나타낸 결과이며, 종합 분석한 웨이블 기울기는 $b=6.3$ 이다.

그러나 11, 12주기에는 와류탐상검사에 MRPC (Motorized Rotating Pancake Coil)를 사용한 반면, 10주기에는 8x1 방식을 사용하였기 때문에 측정결과 신뢰성에 차이가 있을 수 있다. 11, 12주기의 측정결과만을 사용하여 구한 것이 기울기-2 이며 $b=4.3$ 이다. 그러므로 고리1호기의 일차측응력부식균열의 웨이블 기울기는 $b=4.3-6.3$ 범위일 것으로 추정된다. 그러나, 고리 1호기에서 측정한 균열결함 자료는 3주기 동안에 불과하므로 신뢰성을 높이기 위하여 외국의 일차측 응력부식균열 사례를 비교분석하였다. 외국 원자력 발전소의 환관천이부의 일차측응력부식균열결함의 기울기는 $b=4.3-5.0$ 범위로 보고되고 있다.⁷⁾ 그러므로 환관천이부 일차측응력부식균열에 대한 웨이블기울기의 최대값으로는 $b=5.0$ 을 적용하였다.

3.2.3 U-Bend의 일차측 응력부식균열

Fig. 4는 U-Bend의 일차측응력부식균열에 대한 웨이블 기울기이다.

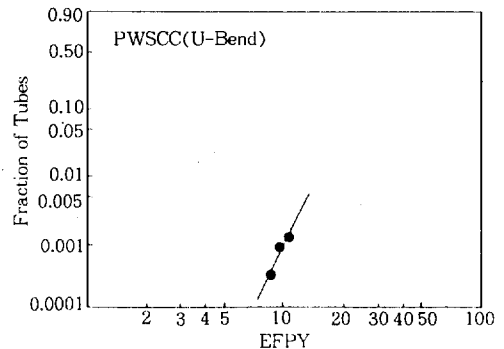


Fig. 4 Weibull Plot of PWSCC at U-bends

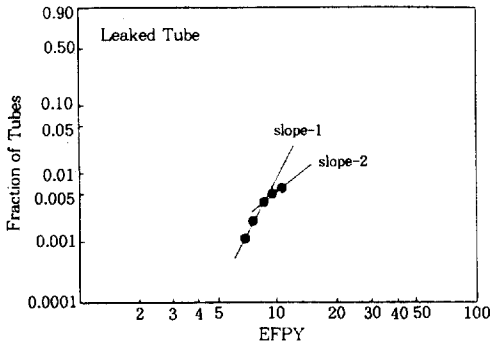


Fig. 5 Weibull Plot of Leaked Tubes

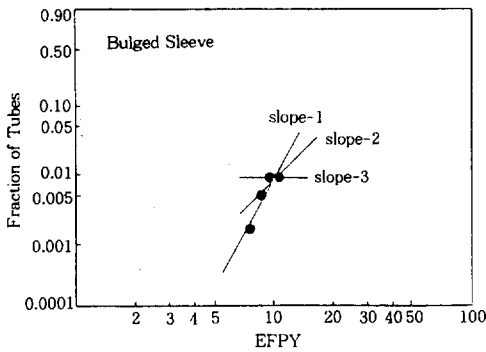


Fig. 6 Weibull Plot of Bulged Sleeves

그러나 고리 1호기의 U-Bend 일차측 용력부 식균열 결함수가 현재 7개에 불과하므로 신뢰도 측면에서 외국의 결함분석 결과를 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 그러므로 U-Bend 일차측용력부식균열의 예측에는 외국 원자력 발전소의 웨이블함수 기울기인 $b=4.5$ 를 적용하였다.⁷⁾

3.2.4 누설세관

수압시험에서 발견되는 누설세관의 웨이블 분석결과는 Fig. 5와 같다.

기울기-1 ($b=5.3$)은 화학세정전, 기울기-2 ($b=2.8$)는 화학세정후의 기울기를 나타낸다. 화학세정후 기울기가 급격히 감소한 이유는, 화학세정으로 와류탐상시험의 정확도가 증가하여 누설가능세관을 대부분 예방정비를 할 수 있기 때문으로 추정된다. 고리 1호기 정비계획에 주기적

인 화학세정이 포함되어 있으므로, 향후 누설세관의 발생을 예측에는 화학세정효과를 고려한 기울기-2 ($b=2.8$)를 적용하였다.

3.2.5 재생관의 내부돌출

재생관 내부돌출결함의 발생은 1989년이후 계속 증가하였으나, 1993년(12주기)에는 발생하지 않았다. 이는 화학세정의 효과에 의해 점식결함의 성장속도가 크게 완화되므로써, 점식결함을 통한 불순물 유입에 따라 나타나는 내부돌출결함의 발생경향이 감소하고 있음을 나타낸다.

Fig. 6은 재생관 내부돌출결함의 웨이블 분석결과이다. 기울기-1 ($b=5.3$)은 전체 평균기울기를 나타내며, 기울기-2 ($b=2.9$)는 화학세정후의 결과만을 고려한 것이다. 내부돌출결함이 발생하지 않은 최근(12주기: 1993년) 결과만 고려한다면 기울기-3 ($b=0$)과 같은 예측도 가능하다. 그러나 재생관 내부돌출의 발생을 보수적으로 감안하고, 고리 1호기의 정비계획에 주기적인 화학세정이 포함되어 있으므로, 재생관 내부돌출 발생에 대한 예상기울기로는 $b=2.9$ 를 적용하였다.

3.3 결함발생을 예측

Fig. 7은 3.2절에서 분석한 웨이블 기울기틀 이용하여 산출한 각 손상유형별 결함발생율의 예측결과이다. 현재까지 고리 1호기에서 가장

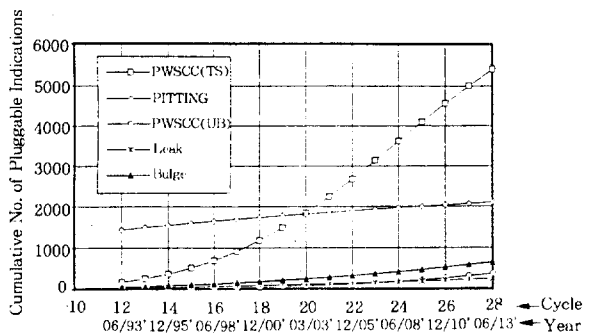


Fig. 7 Pluggable Indications by Degradation Mechanism vs. EPFY

많이 발생했던 점식결합의 증가속도는 화학세정 효과로 크게 감소할 것으로 예측되었다. 그러나 환관천이부의 일차측용력부식균열은 급격하게 증가하여 결함의 주인인이 될 것으로 예상되며, 기타 결함의 증가속도는 상대적으로 낮을 것으로 예측된다.

4. 관막음을 예측

각 세관결함의 발생율에 증기발생기의 세관정비기준을 적용하여 고리 1호기의 향후 관막음을 예측하였다.

4.1 세관정비기준

고리 1호기의 세관정비 내력에 의하면¹⁰⁾, U-Bend의 일차측용력부식균열, 누설세관, 재생관 내부돌출, 재생관 용접결함은 관막음을 하고, 환관천이부의 일차측용력부식균열은 관재생을 한다. 점식결합의 경우는 깊이가 세관두께의 90% 이상인 경우는 관막음을 하고, 40 - 90% 이면 관재생을 한다. 화학세정후에는 60% 이상의 점식결합이 발생하지 않고 있으므로, 점식에 의한 결함세관은 모두 관재생된다고 볼 수 있다. 한편 재생관을 설치하기가 곤란한 지역에 위치한 환관 가장자리의 환관천이부 일차측용력부식균열과 누설세관 및 재생관에 용접불량이 발생한 세관은 관막음을 해야 한다.

본 분석에 적용한 세관정비기준은 고리 1호기의 최근 5년간의 결함세관 정비실적의 평균치를 토대로 하여, 전체 결함세관의 20%는 관막음, 80%는 관재생하는 것으로 설정하였다. 관재생한 세관의 압력손실을 고려하여 23개의 재생관을 1개의 관막음으로 계산하였으며, 재생관의 내부돌출은 관재생후 발생하는 2차 결함이므로 20% 관막음 부분에 포함시켜 전체 세관결함수에서 제외하였다. 이와 같은 기준을 적용하여 산출한 손상유형별 결함발생량을 합산하여 관막음율로 환산하였다.

4.2 관막음을 예측

고리 1호기 증기발생기의 향후 관막음을 예측한 결과는 Fig. 8과 같다.

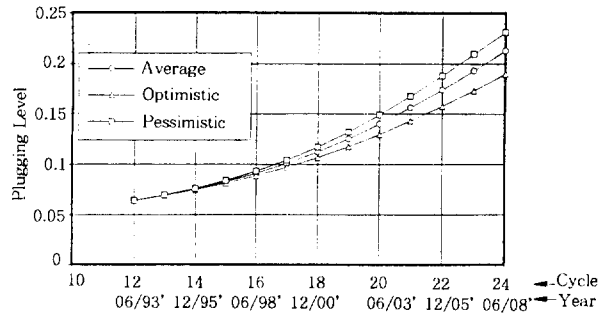


Fig. 8 Future Effective Tube Plugging Levels for Kori-1' S/G

불확실성을 고려하여, 환관천이부 일차측용력부식균열의 기울기에 따라 낙관적, 중간적, 비관적인 3가지 경우로 구분하였다. 낙관적 전망은 환관천이부 일차측용력부식균열의 기울기가 $b=4.3$ 인 경우이며, 중간적 전망은 기울기 $b=4.7$ 인 경우, 비관적 전망은 기울기 $b=5.0$ 인 경우를 나타낸다. 그림 8에 나타난 바와 같이, 현재 적용하고 있는 관막음한계인 15%에 도달하는 시점은 20-22주기 (2003-2005년) 사이가 될 것으로 예측되었다.

5. 결 론

고리 원자력 발전소 1호기 가동후 12주기 (1993년)까지의 증기발생기 세관손상이력과 외국의 손상사례 분석결과를 토대로, 웨이블 함수를 이용한 통계학적 분석방법을 적용하여, 향후 증기발생기 세관의 결함발생율을 예측하였다. 기존의 주요 손상원인인 점식결합은 화학세정효과로 발생율이 급격히 감소하고, 미래의 주요 세관손상결함은 일차측용력부식균열일 것으로 분석되었다. 결함발생율과 결함세관의 정비기준을 기반으로 향후의 관막음을 분석한 결과,

현재 적용하고 있는 15%의 관막음 울 한계는 2004년경에 도달할 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 한국전력공사 및 한국전력기술(주)의 후원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Zuercher, "Virginia Power Sets world Record for Steam Generator Replacement", Nucleonics Week, Vol.34, No.15, p.1, April 15 (1993)
2. S.E. Kuehn, "A new round of steam generator replacements begins", Power Engineering, pp. 39-43, July (1992)
3. C. Leblois, "Belgian steam generator experience: the whole picture", Nuclear Engineering International, pp. 25-33, May (1992)
4. E. Sandona, "Why Replace the Steam Generators at Beznau 1?", Nuclear Engineering International, pp. 23-25, January (1991)
5. S. Ripon, "The Dampierre-1 Steam Generator Replacement", American Nuclear Society Nuclear News, p.84, September (1990)
6. 한국전력공사, 고리 1호기 증기발생기 와류 탐상검사 결과 보고서 (1993)
7. R.W.Staehle, J.A. Gorman, K.D. Stavroulos and C.S. Welty, Publication of Statistical Distributions to characterizing and predicting Corrosion of Tubing in S/Gs of PWRs, presented at 3rd NACE International Relations Committee Symposium on Life Prediction of Corridable Structures, Cambridge, UK, Sept. 23-26, (1991)
8. J.F. Lawless, Statistical Models and Methods for Lifetime Data, John Wiley & Sons, (1982)
9. 한국전력공사, 기술연구원, 고리 1호기 증기발생기 유체탄성진동분석, (1990)
10. 한국전력공사, 고리 원자력본부 제 1발전소, 고리 1호기 증기발생기 보호활동 보고서 (1993)