

간극효과를 고려한 증기발생기 전열관의 3차원 유한요소해석

조영기* · 박재학†

3-D Finite Element Analyses of Steam Generator Tubes Considering the Gap Effects

Young Ki Cho* and Jai Hak Park†

(Received 15 NOV 2011, Accepted 21 NOV 2011)

ABSTRACT

Steam generator is one of the main equipments that affect safety and long term operation in nuclear power plants. Fluid flows inside and outside of the steam generator tubes and induces vibration. To prevent the vibration the tubes are supported by AVB (anti vibration bar). When the steam generator tube contact to AVB, it is damaged by the accumulation of wear and corrosion. Therefore studies are required to determine the effects of the gap between the steam generator tube and AVB. In order to obtain the stress and the displacement distributions of the steam generator tube, three dimensional finite element analyses were performed by using the commercial program ANSYS. Using the calculated the stress and the displacement distributions, the static residual strength of the steam generator tube can be evaluated. The results show that the stress and displacement of the steam generator tube increase significantly compared with the results from a zero-gap model.

Key Words : Steam Generator Tube(증기발생기 전열관), Gap Effect(간극효과), Anti Vibration Bar(진동방지대), Tube Support Plate(튜브 지지판)

기호설명

A = sectional area (m^2)

C_D = drag coefficient

D = outer diameter of a pipe (m)

F_D = drag force (N)

V = fluid velocity (m/s)

ρ = density (kg/m^3)

1. 서론

증기발생기는 원자력발전소의 안전성과 장기 운전

에 직접적인 영향을 미치는 중요한 설비 중 하나이다. 증기발생기 내부에 존재하는 전열관은 외부 및 내부를 흐르는 냉각수에 의하여 정적 및 동적 하중을 받게 되고, 장기적으로 마멸 및 피로 등에 의해 손상될 수 있다. 이러한 경우 1차 냉각수의 누설로 연결되므로 증기발생기의 건전성 확보는 매우 중요한 문제이다.

Fig. 1은 전열관, AVB(anti vibration bar) 그리고 TSP (tube support plate)의 개략도를 보여주고 있다. AVB와 TSP는 냉각수의 흐름에 의하여 발생하는 진동 및 변형을 방지하기 위하여 전열관을 지지해 주는 역할을 한다. 그러나 많은 경우 전열관과 AVB 사이에는 간극이 존재하며, 마멸이나 진동이 존재하는 경우 시간에 따라 간극의 크기가 증가될 수도 있고, 불순물 침적 등으로 간격이 감소할 수도 있다. 전열관은 마멸 및 피로에 의해 파손될 가능성이 있고 시간이 지남에

† 책임저자, 회원, 충북대학교 안전공학과

E-mail : jhpark@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2460 FAX : (043)264-2460

* 충북대학교 대학원

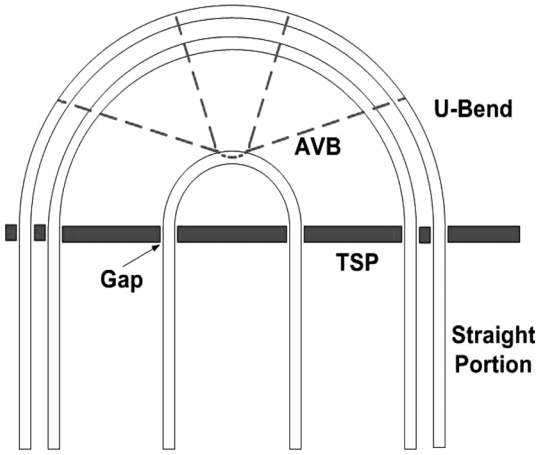


Fig. 1 Steam generator tube, AVB and TSP geometry

따라 간극이 커진다면 파손 가능성은 더욱 커지게 될 것이다.

본 논문에서는 전열관과 AVB의 간극이 전열관에 미치는 영향을 구하기 위하여 ANSYS¹⁾를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 전열관에 발생하는 응력과 변위 결과를 간극의 영향을 고려하지 않은 모델에서 구해진 결과와 비교하여 간극의 영향을 살펴보았다. 또한 얻어진 응력의 크기는 손상된 전열관의 정적 잔류강도 및 동적 잔류수명을 평가하는데 사용될 수 있을 것이다.

2. 3차원 전열관 모델의 평가

2.1 지지점 간극 생성

실제에 가까운 모델링을 하기 위해서 전열관과 AVB의 간극을 구하고 이것을 적용할 필요가 있다. 간극과 같이 분포의 상한값과 하한값이 정해진 경우 베타 분포를 보이는 확률변수로 처리하는 것이 좋고, EPRI 보고서²⁾에서도 간극을 베타 분포로 취급하였다. 베타 분포의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_X(x) = \frac{1}{B(q,r)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \quad (1)$$

$$(a \leq x \leq b)$$

$$= 0 \quad (\text{elsewhere})$$

여기서 $B(q,r)$ 은 다음과 같이 정의되는 베타함수이다.

Table 1 q and r values in beta distribution for the gap between tube and AVB

Generator	a (mils)	b (mils)	q	r	Ratio of zero gap (%)
1	0	62	0.8236	3.8547	15.2
2	0	70	1.1347	5.6104	19.3
3	0	40	0.6855	3.1092	22.5
4	0	62	1.0919	3.5779	26.6

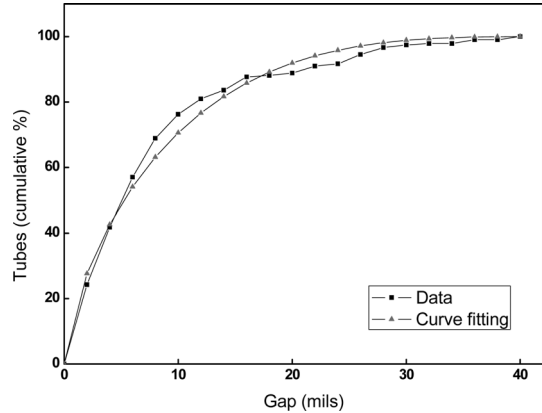


Fig. 2 Curve fitting with the gap data in the generator 3

$$B(q,r) = \int_0^1 x^{q-1}(1-x)^{r-1} dx \quad (2)$$

베타분포의 계수를 구하기 위하여 EPRI 보고서²⁾에 제시된 간극 측정 데이터를 이용하였다. Table 1은 데이터를 이용하여 곡선맞춤한 경우의 모수들을 보여주고 있다. 간극이 0인 데이터는 제외하고 곡선맞춤하였다. Table 1에서 전체 데이터 중 간극인 0인 비율도 함께 보여주고 있다.

Generator 3의 간극 데이터와 베타분포로 곡선맞춤된 곡선을 함께 표시하면 Fig. 2와 같다.

Jöhnk의 알고리즘³⁾을 사용하여 베타분포를 가지는 확률변수를 생성하였다. 알고리즘은 다음과 같다.

1. $j \leftarrow 1$
2. Generate U_j and U_{j+1} from $U(0,1)$
3. $Y_1 \leftarrow U_j^{1/q}$
4. $Y_2 \leftarrow U_{j+1}^{1/r}$
5. If $Y_1 + Y_2 \geq 1$, go to step 2
6. $j \leftarrow j + 2$
7. Deliver $X = Y_1 / (Y_1 + Y_2)$

Table 2 Examples of generated gap data

Node Number	Case1 gap data (in.)	Case2 gap data (in.)	Case3 gap data (in.)
1	0 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
11	0.013176	0.0085252	0.00071
21	0	0.0064724	0.007127
31	0.0179055	0.0030054	0.012785
41	0.0152866	0.0067109	0
51	0.0051576	0.0013062	0.04423
61	0.0122139	0.011381	0.002481
71	0.0000632	0.0008266	0.013018
130	0.026626	0	0.011227
140	0.000277	0.0005856	0.035504
150	0.0004201	0.0009699	0.000992
160	0	0.0073632	0
170	0.0266152	0.0078074	0.001265
180	0.0096222	0.006803	0.010154
190	0.006173	0.0066539	0.007371
200	0 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
205	0.0183295	0.00000281	0.044913
209	0	0.0058842	0.015563
213	0.0133689	0.0079716	0.026302
217	0.0081055	0.0017344	0.0000297

여기서 $U(0,1)$ 은 0에서 1사이에서 일정한 밀도를 가지는 분포를 의미한다.

간극이 0인 비율이 전체의 x 라고 하면 프로그램에서는 $U(0,1)$ 으로부터 확률변수 U_4 를 생성시킨 후 $U_4 \leq x$ 이면 0의 간극을 주고, $U_4 > x$ 가 되면 beta 분포를 가지는 확률변수를 생성하여 간극 값으로 준다. 생성된 확률 변수를 간극 값으로 적용하였다. Table 2는 생성된 몇 개의 간극 값의 예를 보여준다.

2.2 정적 하중 평가

유체의 흐름 내에 어떤 물체가 존재하는 경우 그 물체는 유체의 흐름에 의한 항력 F_D 를 받게 되고 그 크기는 다음과 같이 표현된다⁴⁾.

$$F_D = C_D A \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) \quad (3)$$

여기에서 ρ 는 유체 밀도, V 는 유체 속도, A 는 흐름에 수직방향의 물체의 단면적, C_D 는 항력계수이다. 배관의 외부에서 배관의 축에 대하여 수직으로 흐르는

Table 3 Drag force, F_D

Angle(deg)	FD(lb/in)	Angle(deg)	FD(lb/in)
0	0.000129	100	0.259184
10	0.025918	110	0.285102
20	0.051837	120	0.311102
30	0.077755	130	0.336939
40	0.103673	140	0.362857
50	0.129592	150	0.388776
60	0.15551	160	0.414694
70	0.181429	170	0.440612
80	0.207347	180	0.466531
90	0.233265		

유체의 경우 배관의 단위 길이당 항력 F_D 는 (3)식에서 $A=D$ 가 되므로 다음과 같다.

$$F_D = C_D D \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) \quad (4)$$

증기발생기에서 흐르는 유체는 증기와 물의 혼합물이고, 유체 흐름의 특성에는 다른 전열관의 배치 상태도 영향을 미치므로 증기발생기에서 정확하게 항력 계수를 구하는 것은 쉽지 않다. 박범진 등은 전열관에 수직으로 흐르는 난류 유체에 대하여 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 행하여, 정교한 계산결과가 없는 경우에 보수적인 값으로 항력계수로 0.9의 값을 사용할 수 있다고 하였다⁴⁾. 항력계수를 0.9로 하고 유체 밀도, 유체 속도로 EPRI 보고서²⁾에 제시된 값을 이용하여 식(4)로부터 U-벤드부에 대하여 항력을 구하면 Table 3과 같은 값을 얻는다.

2.3 정적 응력 해석

ANSYS(V. 12.0.1)¹⁾를 이용하여 모델링을 하고 해석을 실시하였다. 전열관은 3차원 2절점의 빔요소(Beam4)를 AVB와 TSP의 지지부는 콤비네이션요소(Combin40)를 사용하여 모델링 하였다. 콤비네이션요소에서는 변위가 입력한 간극보다 작으면 지지력이 발생되지 않는다. 그러나 변위가 입력 간극보다 더 커지면 스프링으로 받쳐진다고 생각한다. 해석에서는 스프링상수로 84,000 lb/in의 값을 주었다²⁾. 각 절점에서의 국부좌표계를 전열관의 축방향을 y축, y축에 수직한 방향 중 전열관 전체가 포함된 면의 방향을 x축, x와 y축에 수직한 방향을 z축으로 취하는 경우, 콤비네이션요소는

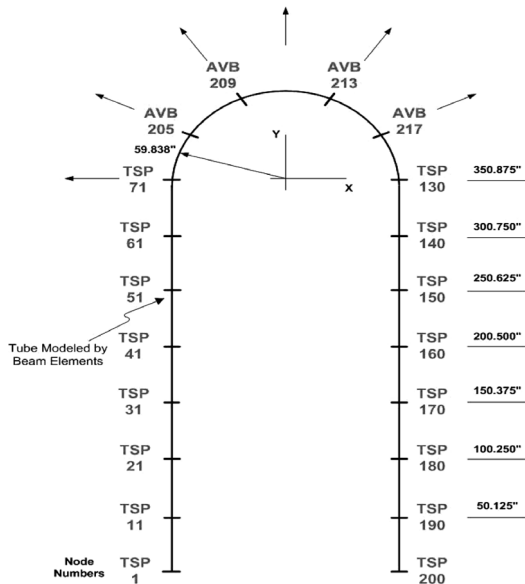


Fig. 3 Node number and location of AVB and TSP in a steam generator tube model

각 지지점에서 +x, -x, +z, -z 방향으로 4개를 배치하였다.

모델링한 전열관에는 AVB와 맞닿은 4개의 절점이 U-벤드부에 존재하고 TSP와 맞닿은 16개의 절점이 직선부에 존재한다. TSP의 간격은 50.125 in.이다. 또한 Table 2에 나와있는 항력을 하중으로 하여 전열관 U-벤드부의 각각의 절점에 분포하중의 형태로 절점 좌표계 x, z방향에 대하여 모두 가하였다. Fig. 3은 모델링한 전열관의 절점의 번호, AVB 그리고 TSP의 위치에 대하여 보여주고 있다

3차원 전열관 모델을 평가하기 전에 올바르게 전열관을 모델링 하였는지 확인하기 위해 2차원 전열관 모델⁵⁾과 같은 조건으로 비교하였다. 비교한 결과 같은 응력 분포와 변위 분포를 나타내었으며 이로부터 3차원 전열관 모델은 올바르게 모델링 되었다고 판단된다.

간극의 크기가 다른 50개의 3차원 전열관 모델을 해석하였으며, 응력 분포와 변위 분포의 평균값과 표준오차 값을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 2차원 모델과 3차원 전열관 모델의 비교

3차원 전열관 모델의 타당성을 확인하기 위해 해석

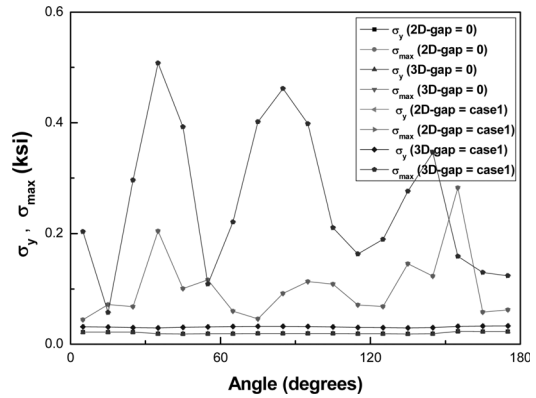


Fig. 4 σ_y and σ_{max} distribution of 2-D and 3-D model in the U-bend region

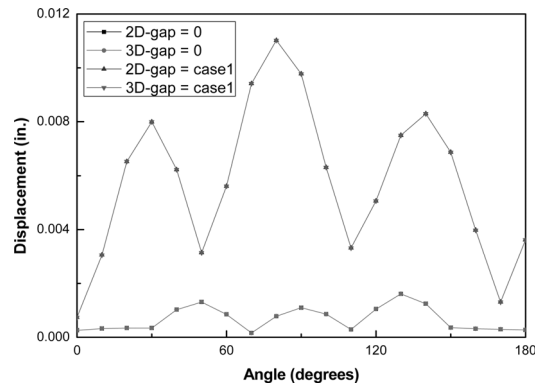


Fig. 5 Displacement distribution of 2-D and 3-D model in the U-bend region

결과를 2차원 전열관 모델⁵⁾과 비교하였다. 2차원 전열관 모델과 3차원 전열관 모델 모두 똑 같은 간극을 갖도록 모델링 하였고 같은 하중을 작용하였을 때 발생하는 응력과 변위를 비교하였다. 비교한 결과 응력과 변위가 모두 동일하게 나타났다. 그러므로 3차원 전열관 모델은 올바르게 모델링 되었다고 판단된다. Fig. 4와 Fig. 5는 2차원 전열관 모델과 3차원 전열관 모델에서 얻어진 응력과 변위의 분포를 보여주고 있다. 여기서 σ_y 는 축하중에 의한 응력, σ_{max} 는 굽힘모멘트에 의한 응력을 포함한 전체응력의 최대값을 나타낸다. 그림에서 보면 간극이 없는 경우에 비해 간극이 있는 경우 응력과 변위 모두 크게 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 3차원 전열관 모델의 평가

3차원 전열관 모델을 평가하기 위해 간극이 없는

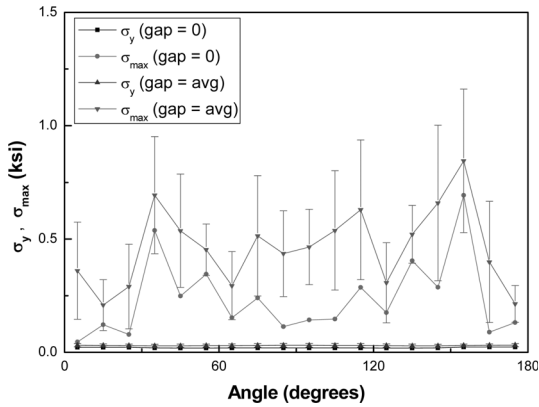


Fig. 6 σ_y and σ_{max} distribution 3-D model in the U-Bend region

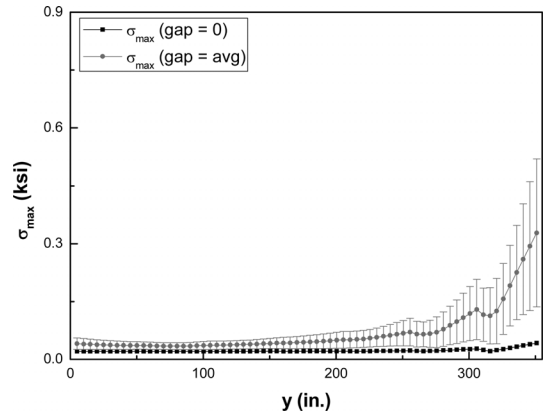


Fig. 8 σ_{max} distribution 3-D model in the left straight region

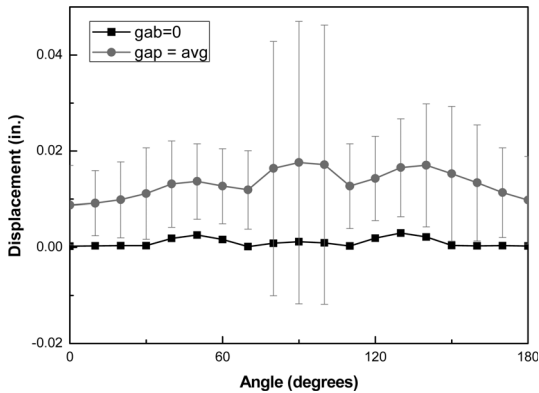


Fig. 7 Displacement distribution 3-D model in the U-Bend region

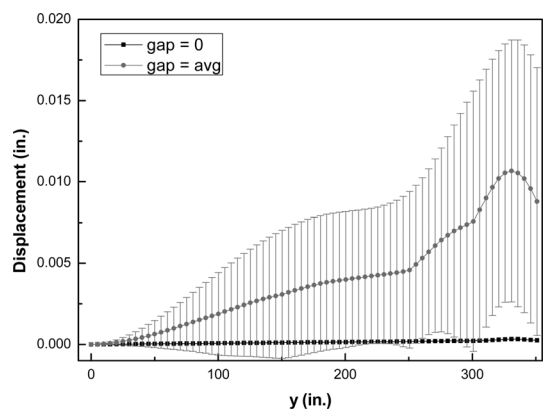


Fig. 9 Displacement distribution 3-D model in the left straight region

경우와 간극이 있는 경우를 비교하였다. 전열관 모델이 3차원이기 때문에 U-벤드부에 절점좌표계 x, z 방향으로 모두 하중을 주었다. 간극이 있는 경우는 간극이 다른 50개의 모델을 해석하였으며 이것의 응력과 변위 값의 평균값과 표준오차를 구한 뒤 간극이 없는 경우의 값과 비교하였다.

Fig. 6은 U-벤드부의 응력 분포를 나타내는 그래프이다. 응력 분포는 간극이 있는 모델의 경우 최대 응력이 0.85 ksi를 간극이 없는 모델은 최대 응력이 0.023 ksi를 나타내어 간극이 있는 모델이 훨씬 큰 최대 응력값을 보여준다. Fig. 7은 U-벤드부의 변위 분포를 보여주는 그림이다. 변위의 분포 또한 간극이 있는 모델은 최대 변위가 0.017 in.를, 간극이 없는 모델은 최대 변위가 0.001 in.를 나타내어 간극이 있는 경우가

훨씬 더 큰 변위를 주는 것을 보여준다. 3차원 모델의 경우 응력과 변위의 값이 2차원 모델⁵⁾ 보다 크게 나타나는 이유는 Z방향으로도 하중을 가하였기 때문이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 3차원 전열관 모델 왼쪽 직선부의 응력과 변위의 분포를 나타내는 그래프이다. 왼쪽 직선부 또한 간극이 없는 경우보다 간극이 있는 경우 응력과 변위의 분포가 훨씬 크게 나타나고 있음을 보여준다.

Fig. 10과 Fig. 11은 3차원 전열관 모델의 오른쪽 직선부의 응력과 변위의 분포를 나타내는 그래프이다. 오른쪽 직선부 또한 간극이 없는 경우 보다 간극이 있는 경우 응력과 변위의 분포가 훨씬 크게 나타나고 있음을 보여준다.

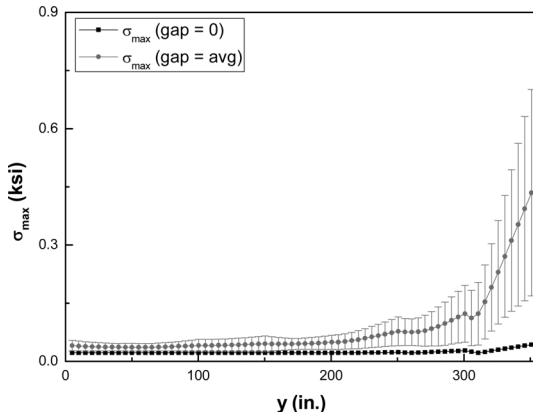


Fig. 10 σ_{\max} distribution 3-D model in the right straight region

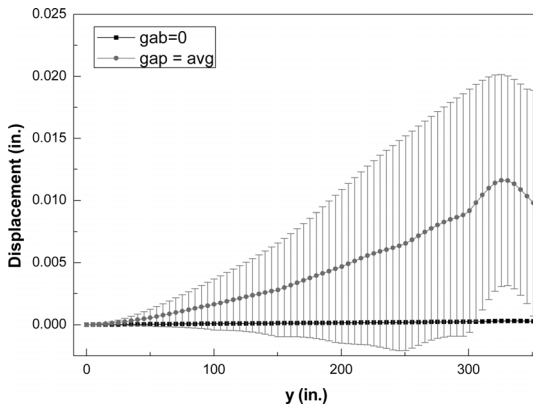


Fig. 11 Displacement distribution 3-D model in the right straight region

4. 결론

증기발생기 전열관과 AVB의 간극이 전열관에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3차원 전열관 모델을 간극이 없는 경우와 간극이 있는 50개의 경우를 ANSYS¹⁾를 이용하여 해석하고 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 사실들을 알 수 있었다.

1) 응력, 변위의 경우 U-밴드부에서 간극이 있는 전열관 모델이 간극이 없는 전열관 모델보다 크게 증가하였다.

2) 전열관 모델의 왼쪽 직선부와 오른쪽 직선부 또한 U-밴드부와 마찬가지로 간극이 있는 경우가 간극이 없는 경우보다 응력과 변위 모두 크게 증가하였다.

3) 결함이 존재하는 전열관의 잔류강도나 잔류수명을 평가하기 위하여 해석할 경우에는 간극의 영향을 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2009T100100644).

참고문헌

1. ANSYS, 2009, V. 12.0.1.
2. Livingston, N. J., 1996, "Steam Generator Tube Fatigue Evaluation", Electric Power Research Institute. Report, TR-107263.
3. Rubinstein, R.Y., 1981, Simulation and the Monte Carlo Method, John Wiley and Sons.
4. Park, Bumjin, Park, Jai Hak and Cho, Young Ki, 2011, "Estimation of Static Load Applied on Steam Generator Tubes", Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, Vol. 7, No.1, pp. 35-40.
5. Cho, Young Ki and Park, Jai Hak, 2011, "Evaluation of Static Strength of Wear-damaged Steam Generator Tubes", Spring Conference of the Korean Society of Safety, p. 3.