

증기발생기 전열관에 작용되는 정적 하중 평가

박범진* · 박재학† · 조영기**

Estimation of Static Load Applied on Steam Generator Tubes

Bumjin Park*, Jai Hak Park† and Young Ki Cho**

(Received 16 FEB 2011, Accepted 21 FEB 2011)

ABSTRACT

If a plugged tube in a steam generator is broken, it may damage nearby intact tubes. To prevent this damage, it is recommended that a stabilizer is installed into the plugged tube. However, the installation cost of a stabilizer is very high. So studies are required to determine the conditions on which the installation is necessary. For this purpose static loads and dynamic loads applied on a tube should be known to estimate the residual strength and remaining fatigue and wear life of a plugged tube. Two-dimensional and three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analyses are performed to obtain the drag coefficient for cross flow to a tube. Using the obtained drag coefficient, the static load can be estimated and the residual strength of a plugged tube can be calculated. An inclined flow problem is also analyzed and the vertical and horizontal forces are obtained and discussed.

Key Words : Steam generator tube(증기발생기 전열관), Drag coefficient(항력계수), Computational fluid dynamics (전산유체역학), Drag force(항력)

기호설명

A = sectional area (m^2)
 C_D = drag coefficient
 D = outer diameter of a pipe (m)
 F_D = drag force (N)
 p = pressure (N/m^2)
 R_e = Reynolds number
 V = fluid velocity (m/s)
 V_h = horizontal component of fluid velocity (m/s)
 V_v = vertical component of fluid velocity (m/s)
 q = angle in Fig. 4 (degrees)
 m = viscosity ($kg/m \cdot s$)
 r = density (kg/m^3)

1. 서론

증기발생기 전열관에서 결함이 발생되고 성장하여 결함깊이가 정해진 조건을 만족하면 관막음을 하게 된다. 현재까지 관막음 전의 결함의 거동에 대해서는 많은 연구가 진행되었지만 관막음 후의 결함의 거동에 대해서나 전열관의 파손 가능성에 대해서는 관심의 대상이 되지 않았었다. 그러나 최근 관막음 후에 전열관이 파단될 수 있고, 파단된 전열관은 부근의 건전한 전열관을 침으로써 손상을 입힐 수 있음이 지적되고 있고, 이러한 손상을 방지하기 위하여 관막음된 전열관에 스테빌라이저(stabilizer)를 설치해야 할 필요성이 대두되고 있다.

Fig. 1은 스테빌라이저의 개략도를 보여주고 있다. 스테빌라이저에는 유연형(flexible type)과 강체형(rigid type)이 있는데, 유연형은 유연성이 있는 스테인리스강 재료의 로프를 전열관 내부에 삽입하는 형식으로 유연성이 있으므로 전열관의 U 밴드 부분 넘어서까

† 책임저자, 회원, 충북대학교 안전공학과
E-mail : jhpark@chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-2460 FAX : (043)264-2460

* 서울대학교 대학원

** 충북대학교 대학원

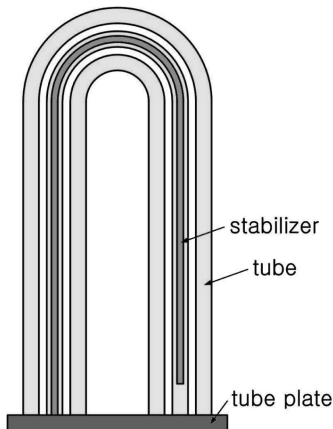


Fig. 1 Schematic of a stabilizer

지 삽입할 수 있다. 반면 강체형은 유연성이 없는 봉을 전열관 내에 삽입하는 형식으로 관판(tube plate) 부근 및 관판 상단의 1단 부근의 결함에 사용된다. 사용되는 재료는 type 304 스테인리스강이며, alloy 600, alloy 680, alloy 800 전열관에 적용하는데 문제가 없어야 한다.

이러한 스테빌라이저의 설치 필요성에도 불구하고 스테빌라이저 설치비용이 개당 1.5억 원 이상이라서 의무적으로 스테빌라이저를 설치하여야 하는 경우 많은 경제적 부담이 예상되고 있어 스테빌라이저 설치 기준에 대한 연구와, 설치가 되는 경우 스테빌라이저의 설계에 대한 연구가 요구되고 있다.

스테빌라이저 설치 기준을 검토하기 위해서는 전열관에 작용되는 정적 하중을 평가하여 결함이 존재하는 전열관의 파단 가능성 여부를 검토하여야 하고 또한 동적 하중을 검토하여 피로 및 마멸에 의한 잔류수명을 평가하여야 한다. 본 논문에서는 이에 관한 첫 번째 연구로 파단 가능성을 평가하기 위하여 필요한 정적 하중을 구하는 연구를 진행하고자 한다.

이와 관련된 기존의 연구로는 전열관에 작용되는 동적 하중¹⁾, 진동 및 마멸을 예측한 연구가 있고²⁾, 피로수명을 예측한 연구³⁾ 등이 있다.

2. 정적하중의 평가

2.1 배관에 작용되는 하중

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

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

여기서 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 유체의 경우 배관의 단위 길이당 항력 F_D 는 식 (1)에서 $A=D$ 가 되므로 다음과 같다.

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

여기서 D 는 배관의 외경이다.

관막음된 전열관에는 1차수는 흐르지 않으므로 전열관에 작용되는 하중은 2차수의 흐름에 의한 하중이 추가 된다. 2차수의 흐름에 의한 정적 하중의 계산에 필요한 항력계수 C_D 를 구하기 위한 수치해석을 행하였다.

2.2 배관에 수직인 흐름

우선 배관에 수직으로 흐르는 유체에 대하여 살펴 보았다. 프로그램은 상용프로그램인 FLUENT⁴⁾를 사용하였다. 배관에 수직으로 흐르는 유체의 경우 2차원 문제가 되므로 사용된 모델은 Fig. 2와 Fig. 3에 도

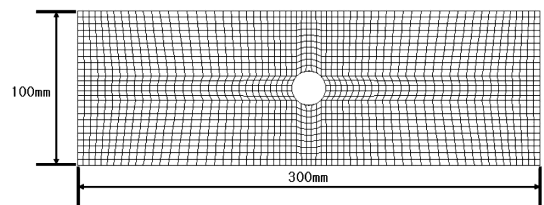


Fig. 2 CFD model for 2D analysis

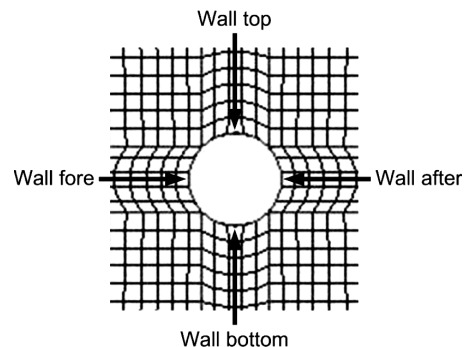


Fig. 3 CFD mesh near a pipe

Table 1 Used options in CFD analysis

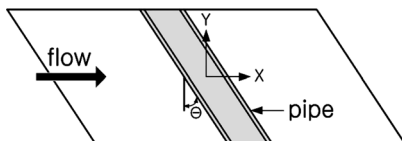
Variable	Option
Time step	0.01 sec
Viscous model	Standard k-epsilon
Pressure-velocity coupling	Simple
Pressure	Standard
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy	Second order upwind
Turbulent dissipation rate	Second order upwind

시된 2차원 모델이다. Fig. 2는 전체 모델을 Fig. 3은 배관 부근의 격자를 보여준다. 배관의 외경은 22.23 mm로, 모델의 가로는 300mm, 세로는 100mm로 하였다. 모델은 가로 65개, 세로 25개, 파이프 주위에는 20개로 총 1,600개의 요소를 사용하였다. 배관은 벽(wall)으로 보았으며 Fig. 2에서 위와 아래의 수평경계에는 대칭의 조건을 주었다. Fig. 3은 배관 주위의 격자를 보여주고 있다. 배관 주위를 그림과 같이 4개의 영역으로 나누었다.

해석에서 사용된 조건들은 Table 1에 정리되어 있다. Table 1에 주어진 시간 스텝 값은 비정상상태 해석에서 사용된 값이다. 어떤 조건의 해석의 경우 정상상태로 가정하는 경우보다 수렴이 더 잘되기 때문에 비정상상태로 해석하였다. 해석을 통하여 배관 주위에서의 압력분포와 항력을 구할 수 있고 식 (2)로부터 항력계수 C_D 를 구할 수 있다.

2.3 배관에 경사진 흐름

다음으로 배관에 경사지게 흐르는 유체에 대하여 살펴보았다. FLUENT 프로그램⁴⁾을 사용하였고, 3차원 모델을 구성하여 해석하였다. 모델에서 사용된 요소 수는 48,000개이다. Fig. 4는 계산 영역중 배관 축을 지나는 면을 보여주고 있다. 유체는 전역좌표축 X 방향으로 흐르고 있고, 배관의 축은 XY 면에 놓인다.

**Fig. 4** Schematic of a model used in three-dimensional CFD

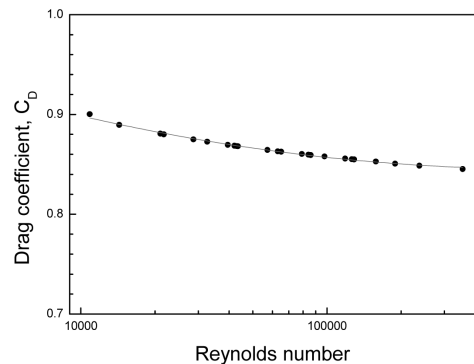
3. 계산 결과 및 고찰

3.1 배관에 수직인 흐름

참고문헌 3에서는 증기발생기 전열관의 피로수명을 예측하기 위하여 전열관에 작용되는 동적하중을 해석하였다. 또한 몇 개의 전열관에 대하여 CFD 해석을 행하여 유체속도, 밀도, 공극률(void fraction) 등의 결과를 주고 있다. 이들 결과에 의하면 유체속도는 2m/s에서 6m/s 사이의 값을 보이고 있고, 밀도는 100kg/m³에서 300kg/m³ 사이의 값을, 공극률은 0.6에서 0.95 사이의 값을 보이고 있다. 따라서 유체속도는 2, 4, 6m/s, 밀도는 100, 200, 300kg/m³, 공극률은 0.6, 0.7, 0.8 및 0.9의 값에 대하여 해석을 행하였다. 점도는 혼합법칙을 사용하여 물과 증기의 점도에서부터 구하였고, 공극률 0.6 및 0.9인 경우 점도 값을 각각 0.000409kg·m·s 및 0.0001124kg·m·s로 사용하였다. 온도에 따라 점도가 달라지지만 계산된 C_D 는 Reynolds 수의 함수가 되므로 어떤 점도 값을 사용하는 가는 큰 문제가 되지 않는다.

Fig. 5는 계산된 결과를 보여주고 있다. 각 점들이 계산 결과들이다. 일관성 있게 C_D 는 Reynolds 수의 함수로 표시됨을 확인할 수 있다. Reynolds 수는 $Re = VD/\nu$ 로 계산되며, 여기서 ν 는 동점도(kinematic viscosity)이다. 곡선 맞춤에 의하여 C_D 를 Reynolds수 Re 의 함수로 표현하면 그림의 실선과 같이 되고, 식으로는 다음과 같이 된다.

$$C_D = 1.3654 - 0.17688 \log_{10} Re + 0.01504 (\log_{10} Re)^2 \quad (3)$$

**Fig. 5** Drag coefficient for a pipe as a function of Reynolds number

얻어진 항력계수 결과들을 기존의 출판된 결과와 비교하였다. 기존의 결과^{5,6)}에서는 $Re=10,000$ 에서 100,000의 범위 내에서 $C_D=1.2$ 정도의 일정한 값을 보이고 있는데 이는 이 범위에서 층류의 특성을 보이기 때문이다. 현 해석에서는 난류로 가정하였기 때문에 이보다 작은 값이 얻어질 것으로 판단된다. 참고문헌 6에서는 표면이 거친 경우나 난류인 경우의 결과도 보여주고 있는데 $Re=100,000$ 의 근처에서 $C_D=0.8$ 정도의 값을 주고 있다. 이 값들은 현 논문의 결과와 상당히 유사한 값을 알 수 있다.

Rao²⁾는 전열관에 작용되는 정하중에 대한 해석에서 $C_D=0.3$ 의 값을 사용하고 있다. 이 값은 출판된 기존 C_D 결과에서 Reynolds수가 10,000에서 10^7 사이인 경우에 대한 가장 작은 값에 해당된다. 현 논문에서는 이보다 큰 값이 얻어졌다. Rao²⁾에 의하면 마찰 계측에서는 정하중이 클수록 마찰량은 적게 예측된다. 따라서 마찰 계측에서 보수적으로 평가하기 위해서는 정하중을 고려하지 않거나 $C_D=0.3$ 의 값을 사용하는 것이 좋을 것이다.

증기발생기에서 흐르는 유체는 증기와 물의 혼합물이고, 유체 흐름의 특성에는 다른 전열관의 배치 상태도 영향을 미치므로 증기발생기에서 정확하게 항력계수를 구하는 것은 쉽지 않다고 판단된다. 따라서 현 논문에서의 계산 결과로 볼 때 보다 정교한 계산결과가 얻어지기 전까지는 보수적인 값으로 $C_D=0.9$ 의 값을 사용하는 것은 타당하다고 판단된다.

참고문헌 3에 몇 가지 증기발생기 전열관에 대하여 CFD 해석을 행하여 유체속도, 밀도, 공극률(void fraction) 등을 U 밴드 영역에 대하여 원주각의 함수

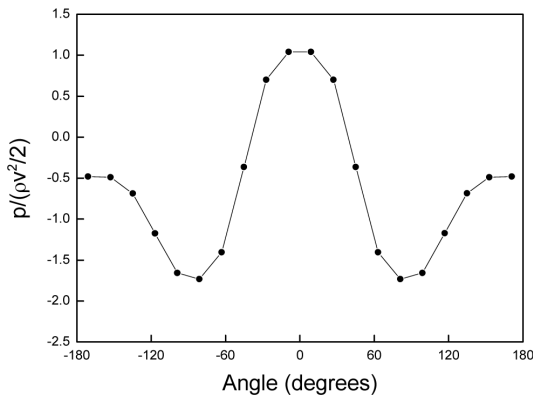


Fig. 6 Nondimensionalized pressure distribution in circumferential direction on the pipe surface

로 주고 있다. 이들 결과와 항력계수를 이용하면 U 밴드 영역에 작용되는 정하중을 원주각의 함수로 표현할 수 있다. 또는 보수적으로는 U 밴드 영역에서 원주각에 따른 최대 정하중을 구하여 일정한 값으로 가할 수도 있다.

Fig. 6은 배관주위의 압력을 나타낸 그림이다. $V=6\text{m/s}$, $r=200\text{kg/m}^3$, 공극률 0.8에 대한 계산 결과이며 압력은 $(1/2)\rho V^2$ 에 의하여 무차원화 되었다. 각도 0° 위치가 유체가 유입되는 위치이다.

3.2 배관에 경사진 흐름

Fig. 7에 도시된 바와 같이 배관에 경사지게 흐르는 유체에 대하여 고려하여 보자. Table 2는 $V=2\text{m/s}$, $\rho=998.2\text{kg/m}^3$, $\mu=0.001003\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 인 경우의 결과이다. 이때 Reynolds 수는 44,240이 된다. Table 2에서 힘은 배관의 단위길이 당 힘이며 수직력은 배관에 수직방향의 힘, 수평력은 배관의 축방향의 힘으로 각각 Fig. 7에서 F_n 과 F_h 에 해당한다. C_D 는 수직력만을 고려하여 구하였으며, 배관의 단위 길이 당 한 값이다. 따라서 C_D 를 식(2)에 대입하면 단위 길이 당 수직하중을 구할 수 있다.

Table 2에서 $\theta=0^\circ$ 인 경우는 배관에 수직으로 흐르는 유체에 해당되므로 2차원에서 구한 결과와 비교할 수 있다. 2차원 해석에서는 $C_D=0.868$ 이 얻어져 Table 2의 3차원 해석과 아주 유사한 결과가 얻어짐을 확인할 수 있다.

Table 2에서 볼 때 각도 θ 가 커짐에 따라 수직력은 감소하고, 수평력 즉 배관의 축방향 힘은 증가하고 있음을 알 수 있다. θ 가 작을 때에는 수평력은 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 보이고 있다. 즉 $\theta=60^\circ$ 이하에서는 수직력의 4% 이하의 값을 보이고 있어 무시할 수 있다. 또한 $\theta=75^\circ$ 에서 수평력은 수직력의 16% 정도의 값을 보이고 있다.

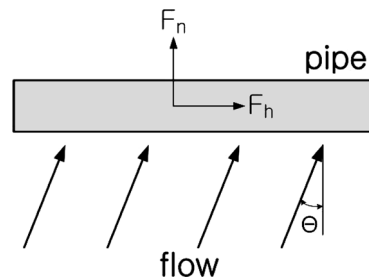


Fig. 7 Flow inclined to a pipe

유체속도 V 를 배관에 수직인 성분 V_v 와 배관에 수평인 성분 V_n 로 나누면 $V_v = V \cos \theta$, $V_n = V \sin \theta$ 가 될 것이다. 수직흐름에 대한 C_D 를 알고 있으므로 V_v 와 수직흐름에 대한 C_D 를 이용하여 수직하중을 평가하였다. 그 결과는 Table 3과 같다. θ 가 작을 때에는 V_v 로부터 구한 수직력과 3차원 모델에서 계산된 수직력이 유사한 값을 보이거나 θ 가 증가함에 따라 3차원 모델에서 계산된 수직력이 V_v 로부터 구한 수직력에 비하여 커짐을 알 수 있다. $\theta = 75^\circ$ 에서 약 45%의 차이를 보이므로 배관에 비스듬히 흐르는 유체의 경우 수직 속도성분 V_v 만으로 수직력을 평가하면 실제보다 작은 힘이 얻어지게 되므로 주의를 요한다.

Table 4는 $V = 2\text{m/s}$, $\rho = 100\text{kg/m}^3$, $\mu = 0.0002113\text{kg/m}\cdot\text{s}$

Table 2 Results for inclined flow when $Re = 44,240$

θ (Degrees)	Normal force (N/m)	Horizontal force (N/m)	C_D for normal force
0	38.19	0.000	0.861
15	35.98	0.08	0.811
30	31.80	0.18	0.717
45	24.67	0.35	0.556
60	14.21	0.53	0.320
75	4.617	0.73	0.104

Table 3 Calculated normal forces from V_v

θ (Degrees)	Normal force (N/m)	Normal force from V_v (N/m)	Error (%)
0	38.19	38.19	0
15	35.98	35.65	0.9
30	31.80	28.65	9.9
45	24.67	19.10	22.6
60	14.21	9.55	32.8
75	4.617	2.56	44.6

Table 4 Results for inclined flow when $Re = 21,000$

θ (Degrees)	Normal force (N/m)	Horizontal force (N/m)	C_D for normal force
0	3.882	0.000	0.873
15	3.663	0.012	0.824
30	3.240	0.028	0.729
45	2.505	0.046	0.564
60	1.445	0.067	0.325
75	0.4761	0.089	0.107

인 경우의 결과이다. 이때 Reynolds 수는 21,000이 된다. Table 4에서 $\theta = 0^\circ$ 인 경우는 배관에 수직으로 흐르는 유체에 해당되므로 2차원에서 구한 결과와 비교할 수 있다. 2차원 해석에서는 $C_D = 0.880$ 이 얻어져 Table 4의 3차원 해석과 유사한 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

각도 θ 가 커짐에 따라 수직력은 감소하고, 수평력 즉 배관의 축방향 힘은 증가하고 있음은 Table 2의 경우와 동일함을 알 수 있고, 수평력은 수직력에 비하여 아주 작음을 알 수 있다. 수평력이 가장 큰 $\theta = 75^\circ$ 에서 수평력은 수직력의 19%가 된다.

$V = 2\text{m/s}$, $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$, $\mu = 0.00001789\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 인 경우에 대해서도 3차원 해석을 행하였다. 이때 Reynolds 수는 3,040이 된다. 해석에 의하여 $C_D = 0.984$ 의 값을 얻었다. 해당 Reynolds 값을 식 (3)에 대입하면 $C_D = 0.932$ 가 되어 유사한 값이 된다.

이상의 3차원 CFD 해석에서부터 다음과 같은 사실들을 알 수 있다. 배관에 수직으로 흐르는 유체에 대한 C_D 값의 경우 2차원 해석과 유사한 값을 얻었다. 경사지게 흐르는 유체의 경우 배관에 수직방향의 하중과 함께 수평방향의 하중이 발생하며 유체 흐름의 방향이 수직축과 이루는 각도가 60° 이하인 경우 수평방향의 하중 성분은 수직성분에 비하여 아주 작은 값을 나타낸다. 유체 흐름의 방향이 수직축과 이루는 각도가 30° 미만인 경우에는 속도의 수직 성분만을 고려하여 하중을 구하여도 무방함을 알 수 있다. 그러나 각도가 30° 이상이 되는 경우는 속도의 수직 성분만을 고려하는 경우 하중을 과소평가 할 수 있다.

4. 결론

증기발생기 전열관에 작용되는 정적하중을 구하기 위하여 필요한 항력계수를 전산유체역학을 이용하여 구하였다. 그 결과 다음과 같은 사항들을 알 수 있었다.

1. 보수적인 항력계수 값으로 $C_D = 0.9$ 를 이용하여 전열관에서의 정하중을 구할 수 있다.
2. 전열관에 경사지게 흐르는 유체에서 흐름의 방향이 수직축과 이루는 각도가 60° 이하인 경우 전열관에 발생하는 수평력 즉 전열관 축방향 하중은 수직력에 비하여 작아 무시할 수 있다.

3. 전열관에 경사지게 흐르는 유체에서 흐름의 방향이 수직에서 많이 벗어나지 않는 경우 유체속도의 수직성분과 항력계수를 고려하여 전열관에 작용되는 수직하중을 구할 수 있다.

4. 전열관에 경사지게 흐르는 유체에서 흐름의 방향이 수직에서 많이 벗어나는 경우 유체속도의 수직 성분만을 고려하여 전열관에 작용되는 하중을 구하는 경우 하중이 작게 평가된다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2009T100100644).

참고문헌

1. Axisa, F., Antunes, J. and Villard B., 1990, "Random excitation of heat exchanger tubes by cross-flows," J. of Fluids and Structures, Vol. 4, pp. 321-341.
2. Rao, M., 1998, "Steam Generator Vibration and Wear Prediction," EPRI Report, TR-103502.
3. Livingston, N.J., 1996, "Steam Generator Tube Fatigue Evaluation," EPRI Report, TR-107263.
4. FLUENT, V. 6.3.26, 2006.
5. Holman, J.P., 1976, Heat Transfer, International Student Edition.
6. Kutz, M., 2006, Mechanical Engineers' Handbook, Energy and Power, 3rd ed., John Wiley and Sons.