열전달계수에 대한 새로운 고찰 및 고-중압 터빈 케이싱 모형의 열응력 해석

엄달선†

A new consideration for the heat transfer coefficient and an analysis of the thermal stress of the high-interim pressure turbine casing model

Um Dallsun

Key Words : Heat transfer coefficient(열전달계수), Turbine casing(터빈 케이싱)

Abstract

In real design of the high & interim pressure turbine casing, it is one of the important things to figure out its thermal strain exactly. In this paper, with the establishment of the new concept for the heat transfer coefficient of steam that is one of the factors in analysis of the thermal stress for turbine casing, an analysis was done for one of the high & interim pressure turbine casings in operating domestically. The sensitivity analysis of the heat transfer coefficient of steam to the thermal strain of the turbine casing was done with a 2-D simple model. The analysis was also done with switching of the material properties of the turbine casing and resulted in that the thermal strain of the turbine casing was not so sensitive to the heat transfer coefficient of steam. On the basis of this, 3-D analysis of the thermal strain for the high and interim pressure turbine casing was done.

1. 서 론

두 물체(실제로는 대부분의 경우 고체 표면을 접촉하면서 흘러가는 유체가 됨) 사이에 열에너지 교환을 정확하게 예측하고자 하는 시도는 오래 전부터 시작 되어왔다. 이 때 에너지를 주거나 또는 받아들이는 유체 쪽의 열전달 계수는 항상 중요한 관심의 대상이였다. 많은 열 유체 관련 구조물의 열응력(열변형) 해석 시에 반드시 알아야 할 계수인 이 열전달계수를 되도록 정확히 알아내고자, 많은 노력을 기울인 끝에 몇 가지 특정된 경우에 사용할 수 있는 수식들이 정립되었다. 그러나 각 수식으로부터 알 수 있듯이 정확한 열전달계수의 산출은 그렇게 간단하지 않으며, 열 전달이 이루어 지고 있는 주변 조건에 따라서 항시 그 값은 변화를 한다. 이러한 구조적 특성을 띠고 있는 열전달계수를 이용해야 하는 터빈 케이싱의 열응력 해석은 더욱 어려운 문제를 안게 된다. 따라서 일반적으로 알려진 식들에 의존하여 구해진 열전달계수를 터빈 케이싱의 열응력 해석에 그대로 적용하기에는 무리가 많다는 것을 깨달은 발전용 터빈 생산 업체인 외국의 회사들은 많은 실험을 통하여 산출해낸 고유의 특정식을 사용하고 있다. 그러나 그들 선진사와는 달리 해당부분에 이렇다 할 실험적 데이터가 거의 없는 필자는, 독특한 방법으로 열전달계수를 분석하여 새로운 정의를 내리고, 이를 이용하여 터빈 케이싱의 열응력 해석에 활용해보았다.

† 두산중공업 기술연구원 터빈시스템연구팀
E-mail : h113652@doosanheavy.com
TEL : (055)278-8190 FAX : (055)278-8546

2. 고압터빈케이싱의 2-D 모형과 증기의 기준열전달계수의 산출

2.1 2-D 모형

증기의 열전달계수와 터빈 케이싱 열변형과의 특성을 연구하기 위하여 해당 고압 터빈 내부 케이

싱을 통과해 가는 증기의 조건 즉, 증기압, 증기 온도 및 증기가 통과해 가는 케이싱 각 부위의 단면적을 기준으로 하여 Fig.1 과 같은 모형을 기반으로 기준 열전달계수 값을 산출하였다

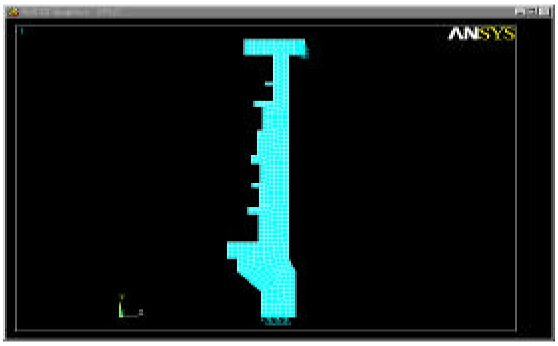

Fig.1 2-D model of the high-pressure turbine casing

2.2 열전달계수의 산출

산출식은 한 선진사의 실험식을 이용하였다. 고압 터빈 내부 케이싱은 형상에 따라서 내부 부분을 8 단계로 나누었고 외부를 9 번째 단계로 정하였다. 이렇게 하여 계산된 각 단계마다의 열전달계수는 Table 1 과 같다. 참고란의 수치는 일반적으로 알려진 Colburn equation 에 의하여 계산된 값이다.

Table 1. Reference heat transfer coefficient at each turbine stage

터빈 단계	온도 (섭씨)	압력(Pa)	증기량 (kg/sec)	열전달계수 (W/m^2)	참고
1	535	20041895	442.61	21601.3	12834.6
2	509.56	17106382	435.51	24280.0	13733.8
3	482.56	14517814	435.51	21222.0	11935.3
4	454.83	12197520	435.51	18864.4	10545.6
5	426.44	10105554	435.51	16550.9	9237.6
6	397.5	8321286	435.51	14480.0	7929.6
7	371.89	6938266	406.51	11860.0	6458.2
8	345.83	5719272	406.51	10506.4	5722.4
9	315.65	4826330	406.51	8174.9	4470.6

3. 고압 터빈 Inner 케이싱 열변형의 열전달계수에 대한 민감도 분석

3.1 기준 열전달계수 설정

Table 1에 제시된 각 단계에서의 열전달계수의 값을 기준 열전달계수로 정한다.

3.2 고압 터빈 내부 케이싱의 2-D 단순 모형을 이용한 열응력 계산

Table 1에 제시된 온도, 압력 및 열전달계수 와 그 밖의 고압 터빈 내부 케이싱의 재질에 대한 물리적 특성을 나타내는 계수를 결합하여 계산된 열변형량은 Fig 2 와 같다.

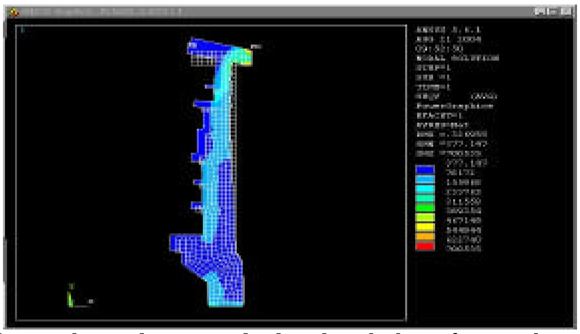

Fig. 2. Thermal stress calculated with the reference heat transfer coefficients and material properties

또한 사용된 재질의 기준 물성치는 다음과 같다

밀도: 7750.4kg/m^3, 포아손 계수: 0.273
열전도율:26.878W/($m^\circ C$), 영률:1.8x10^{11} N/m^2,
비열: 632J/($kg^\circ C$), 열팽창 계수: 13.4 x10^{-6} $/^\circ C$)

위의 각 수치들에 의하여 계산된 열변형량은 **8.280mm** 이다.

3.3 열전달계수의 변화와 열변형량

열전달계수의 변화에 대하여 해당 터빈 케이싱의 열변형량과의 관계를 알아보고자, 3.2 절에서 적용한 각 단에서의 증기압과 온도 및 재질의 물리적 특성(Table. 1)을 그대로 적용하고 열전달계수의 값만을 변화 시키며 열변형량을 계산하여 보았다 (Table 2).

Table 2. Thermal strains calculated with changing the values of heat transfer coefficients only

경우	열전달계수	최대변형(mm)
1	1/10 배 기준값	8.222
2	1/5 배 기준값	8.365
3	1/2 배 기준값	8.228
4	**기준값**	**8.280**
5	2 배 기준값	8.286
6	5 배 기준값	8.292
7	10 배 기준값	8.365
8	15 배 기준값	8.290

3.4 재질의 물리적 특성 계수를 달리한 분석

열전달계수를 각 단에서의 기준 값에 고정시키고 대신 터빈 케이싱 재질의 물리적 특성을 변경하여 열변형을 계산해 보았다(Table 3).

Table3. Thermal strains with the reference heat transfer coefficients but different material properties

비열	영률 x10^{11}	포아손 계수	열전도도	열용량	열팽창률 x 10^{-6}	최대변형
632	**1.89**	0.273	26.88	632	**13.4**	8.29
670	**1.83**	0.275	27.76	670	**13.6**	8.39
712	**1.72**	0.28	26.62	712	**13.8**	8.46
758	**1.56**	0.28	26.66	758	**13.9**	8.54

3.5 기준 값 재질의 6 개 중 1 개의 값만을 변경시켜 적용 하였을 시

여기에서는 재질의 초기 물성치를 다음과 같이 하고, 즉 **영률: 1.834 x 10^{11}, 포아손계수: 0.2, 비열: 632.2, 열전도도: 28.38, 밀도: 7750.4, 열팽창계수: 12.52 x 10^{-6}**

가. 열팽창계수만을 7%정도 증가 시킨 13.4 x 10^{-6} 로 주었을 때

나. 영률만을 7%정도 증가 시킨 1.965 x 10^{11} 로 주었을 때

다. 열전도도만을 7%정도 증가 시킨 30.47 로 주었을 때

라. 비열만을 7%정도 증가 시킨 678.24 로 주었을 때의 열변형량을 계산해 보았다(Table 4).

Table 4. Thermal strains with changing just one value of the material properties

경우	조건	열변형량	변형률 (증가율)
1	초기 물리적 특성치로 계산	7.6476	
2	열팽창계수만의 7% 증가	8.2428	7.8%
3	영률만의 7% 증가	7.677	0.38%
4	열전도도만의 7% 증가	7.6487	0.015%
5	비열만의 7% 증가	7.6476	0.0%

3.6 Transient 를 통해본 분석

앞서 제시한(Table.1 및 3.2 절) 기준 값 열전달 계수와 기준 값 재질의 물리적 특성을 그대로 사용하고 해석을 Transient 로 수행해본 결과는 다음과 같다(Table 5).

Table 5. Transient analysis

경과 시간	최대변형
0.15	4.596
0.25	5.531
0.5	6.645
0.75	7.137
1.0	7.404
2.0	7.818
static	8.286

3.7 온도, 압력, 재질의 물리적 특성을 일정한 값에 고정 시키고 세 개의 서로 다른 열전달 계수의 값으로 Transient 해석

온도와 압력 및 재료의 물리적 특성을 기준 값에 고정 시키고 3 개의 서로 다른 열전달 계수를 이용하여 Transient 상태로 계산해 보았다. 즉 기본값 열전달계수 h 와 그의 2배(h2) 및 5배(h3)의 값을 사용하였다(Table 6).

Table 6. Transient thermal strain analysis with three different heat transfer coefficients but fixed temperature, pressure and material properties

경우	시간 간격	각 h 값에 대한 열변형		
		h	h2	h3
1	0.15	4.596	4.723	4.803
2	0.25	5.531	5.632	5.695
3	0.5	6.645	6.709	6.748
4	0.75	7.137	7.181	7.207
5	1.0	7.404	7.435	7.454
6	2.0	7.818	7.83	7.837
7	static	8.223	8.228	8.236

3.8 열전달 계수의 민감도에 대한 평가

열에너지의 교환이 이루어 지는 두 물체 간의 열전달 계수는 온도 압력 유량이 변하는 Inner Casing 의 경우 어떠한 영향을 주는지 예측 하기 위하여 단순한 2-D 모델로서 여러 조건에 따라 열변형을 통하여 비교 검토해본 결과, 전체적으로 Inner Casing 열 변형의 열전달 계수에 대한 민감도는 그렇게 심각한 것은 아니었다. 그러나 이에 대한 최종 결정은 앞서 소개한 방법 이외의 방법을 착안 더 깊은 분석 후에 확정할 예정이다. 한가지 확실한 사실은, 고-중압 터빈 케이싱의 설계를 위한 정확한 수치의 고정된 값의 열전달 계수는 별 의미가 없다는 것이다. 열전달 계수는 증기의 유량, 온도, 압력, 형상에 따라서 항상 변하기 때문에 각 경우에 따라 적정 수준에서 타당한 열전달 계수를 선택하여 어느 정도 오차의 범위까지 응용하는 방안을 택해야 한다.

4. 4 장 터빈 케이싱의 3-D 열변형 계산

앞서 수행한 2-D 축 대칭 모델을 이용한 열전달 계수의 분석을 기초로 하여 3-D 고-중압 터빈 케이싱의 열응력 해석을 수행하였다. 3-D 모델 해석 시에도 재질의 물리적 특성은 앞서 제시된 값과 기준 열전달 계수를 그대로 적용하였다. 분석 대상은 HIP 터빈의 Inner Casing 과 Outer Casing 그리고 Inner & Outer Casing 이 조립되었을 경우, 또 더 나아가 Transient 경우도 포함되겠지만, 현재까지는 Inner Casing 의 상단부와 하단부 각각의 1/2 부분으로만 수행 하였다. 본 해석을 위하여서, Meshing 전용 프로그램인 ICEM-CFD 로 Meshing 을 수행하고 Meshing 이 완성된 파일은 구조 및 열해석 전문 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 열변형 해석을 수행하였다.

4-1. Meshing

3-D 모형의 Meshing 은 Tetra Mesh 를 사용하였다.

4.1.1 HIP Inner Casing Upper 부분의 Meshing

Inner Casing Upper 부분의 표면 Meshing 이 Fig. 3 에 나타나 있다.

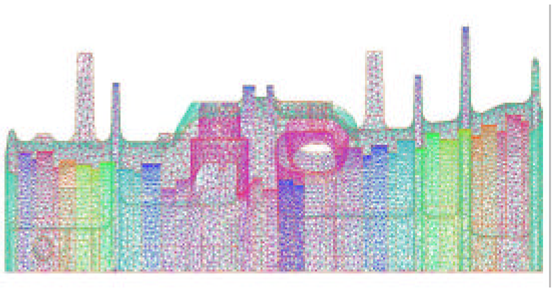

Fig.3 Meshing of the Inner casing upper part

4.1.2 HIP Inner Casing Lower 부분의 Meshing

Inner Casing Lower 부분의 표면 Meshing 이 Fig. 4 에 나타나 있다.

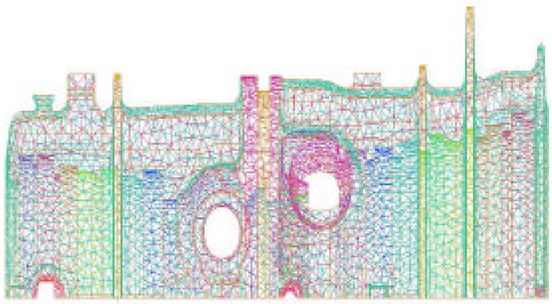

Fig.4 Meshing of the Inner Casing lower part

4.2 경계 구획 설정

경계 구획은 온도와 압력이 변하는 각 단계에 맞추어 수행되었으며 Casing 외부는 출구 측 온도와 압력을 유추 적용하였다. 그리고 Outer Casing Inner Casing 을 지지하는 부분을 고정부로 정하였다.

4.2.1 HIP Inner Casing Upper 부분

Inner Casing Upper 부분의 경계 구획설정은 Fig. 5 에 각 색으로 구분이 되어 있다. 컴퓨터 출현 색들이 서로 다른 곳은 서로 다른 경계 조건이 형성된 곳이다. 또한 비슷해 색상이 보이는 곳이라도 동일 경계구역은 아니다.

Fig. 5 Boundary area of the upper part

4.2.2 HIP Inner Casing Lower 부분

Inner Casing Lower 부분의 경계 구획설정은 Fig. 6 에 각 색으로 구분이 되어 있다. 이하 조건은 Upper 부분에 언급한 사항과 동일하다.

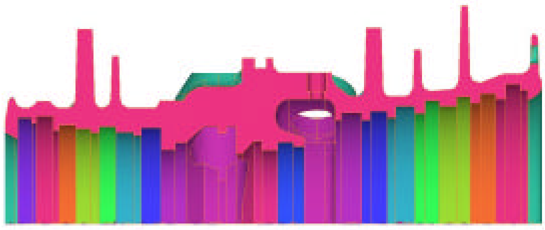

Fig. 6 Boundary area of the lower part

4.2.3 열변형 위한 경계조건으로 설정된 수치

입력되어지는 경계조건 수치들은 각 단계에 따라서 다음 Table7과 같다. Thermodynamic Design Report 에서 산출되지 않은 Data 는 주변 경계 조건을 유추하여 값을 산정 후 적용하였다.

Table 7. Boundary conditions for 3-D model

단계	온도	압력	열전달계수
HP 입구	563.16	23.554	16109.5
1	535	20.042	21601.3
2	509.56	17.106	24280.0
3	482.83	14.518	21222.0
4	454.83	12.198	18864.35
5	426.44	10.106	16550.86
6	397.5	8.321	14480.0
7	371.89	6.938	11860.0
8	345.83	5.719	10506.4
HP 외부	315*	4.826*	8175*
IP 입구	590.44	5.075	5756
9	553.67	4.098	6508.5
10	516.89	3.284	5242.8
11	484.5	2.686	4414.4
12	450.72	2.162	3819.55
13	405.83	1.6	3398.7
14	358.83	1.147	2723.0
15	307.61	0.78	2175.7
IP 외부	262*	0.4*	1600.0*
중앙부 1	509*	17.106*	24280.0*
중앙부 2	482*	14.518*	21222.0*

4.3 해석 결과

4.3.1 HIP Inner Casing Upper 부분

HIP Inner Casing Upper 부분에 대한 최종적인 열변형 해석 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림 파일에서 확인할 수 있듯이 Upper 부분의 최대 열변형량은 12.7mm이다.

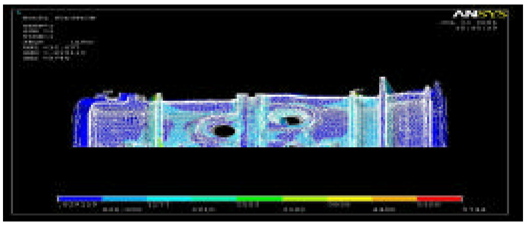

Fig. 7 Result for the Inner casing upper part

4.3.2 HIP Inner Casing Lower 부분

Lower 부분의 해석 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Lower 부분에서도 극히 적은 오차를 무시하였을 때 산출된 최대 변형량은 12.7mm이다.

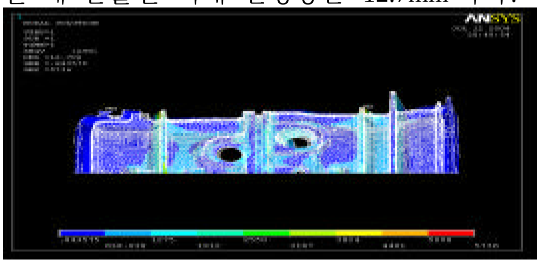

Fig. 8 Result for the Inner casing lower part

5. 결론 및 향후 계획

현재까지 수행된 연구의 결과를 종합해보면, 새로운 HIP 터빈 Casing을 설계 시는 열전달 계수의 값은 무시 할 수는 없으나 반드시 정확한 값을 알아야 할만큼 결정적 사항은 아님을 확신 할 수 있었다. 현재까지 수행된 HIP Inner Casing Upper 부분과 Lower 부분의 연구 결과에서 제시된 부분의 최대 열변형이 12.7mm로 일치함을 보이는 것은, 해석 대상인 케이싱의 두 부분이 약간의 외형적 또는 내형적 차이는 있으나, 최대 변형이 일어난 부분은 서로 경계 조건이 일치하는 접속부분이기 때문일 것임을 유추해 볼 수 있다. 그러나 본 3-D 해석에 Tetra mesh를 사용했기 때문에 보다 효과적이라는 Hexa mesh를 이용한 해석과의 비교 검토는 차후의 과제로 남긴다.

참고문헌

(1) T. J. David, 1969. The Measurement of Thermal Strains in Turbine Casings, Proceedings of the International Conference on Thermal Stresses and Thermal Fatigue, Great Britain.

(2) N. Adinarayana, P. Kodanda Ram, Estimation of Heat Transfer Coefficients in Outer Casings of Industrial Steam Turbines by Model Experiments.

(3) P. Dhananjaya Rao, V.M.K. Sastri, 1995, Experimental Investigation on a Simulated Model for Estimating Transient Heat Transfer Coefficient in Steam Turbine Casings, Journal of Energy, Heat and Mass Transfer, Vol. 17, 161-169.

(4) H. Jericha, W. Sanz, M. Thei Bing, Graz/A, 1995. Temperature Calculation in Steam Turbine Casings, VDI Berichite NR, 1186.

(5) Jeff J. Wenzel, Thomas J. Otter lee, David M. Rasmussen, Case Studies for the Analysis and Renovation of Low Pressure Steam Turbine Casings, Turbine Consultants Inc. Milwaukee, Wisconsin.

(6) A C Benim, M Geiger, Optimization of the Inlet Casing of a Low-Pressure Steam Turbine, Steam Turbine Basic Development Department, Siemens KWU, Germany, C557/007/99.

(7) E. M. Vernikov, N. P. Vernikova, 2002. A Method for Self-Equalization of Temperature Fields in the Flanged Joints of Steam Turbine Casings, Thermal Engineering, Vol. 49, No. 6.