

HRSG 소음예측 프로그램 개발

o정철웅*, 류제욱*, 남경훈**, 이병은**, 이수갑***

Development of Noise Prediction Program for HRSG

Cheolung Cheong, Jaewook Ryu, Kyoungun Nam, Byeongeun Lee and Soogab Lee

ABSTRACT

It is usually the contractual responsibility of HRSG (Heat Recovery Steam Generator) supplier to limit combustion turbine exhaust noise at cogeneration sites. Thus, it is necessary to predict the noise level from HRSG at the stage of preliminary design. HRSG is usually composed of inlet duct, main casing, outlet duct, stack. To satisfy the noise limit level, additional equipments are sometimes required - duct shroud, silencer. We develop algorithms for predicting the noise emission from all these equipments of HRSG units. For the convenience of user, we develop the GUI window version program, named NP-HRSG program. To evaluate the accuracy of this program, predicted noise levels from a real HRSG model are compared with measured data. Through this comparison, we observe that the maximum error is just about 3dB.

1. 서론

최근에 환경에 대한 관심증대와 효율성에 대한 이점으로 인하여 폐열회수보일러(Heat Recovery Steam Generator, 이하 HRSG)를 이용하는 가스 터빈 복합발전 시장이 급성장하고 있다. 환경에 대한 규제로 각 나라마다 HRSG에 대한 소음 규제를 두고 있어 HRSG 초기 설계 단계에서 HRSG로부터 발생하는 소음을 예측하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되었다. 이에 본 연구에서는 HRSG 전체 시스템에 대한 소음예측을 할 수 있는 프로그램을 개발하는 것을 목표로 하였다.

HRSG에 대한 발주처의 소음규제 요구 조건은 각각의 주요부에 대한 음향 출력레벨을 요구하고 있다. 주문주의 요구조건을 만족하면서 경제적인

HRSG를 제작하기 위해서는 HRSG의 주 소음원인 가스터빈의 음향 정보로부터 각각의 주요부로 방사되는 소음량을 예측하는 기술이 필요하다.

따라서, HRSG 주요부의 음향출력레벨과 음압레벨을 예측하기 위해 Tube Bundle 감음량, 덕트

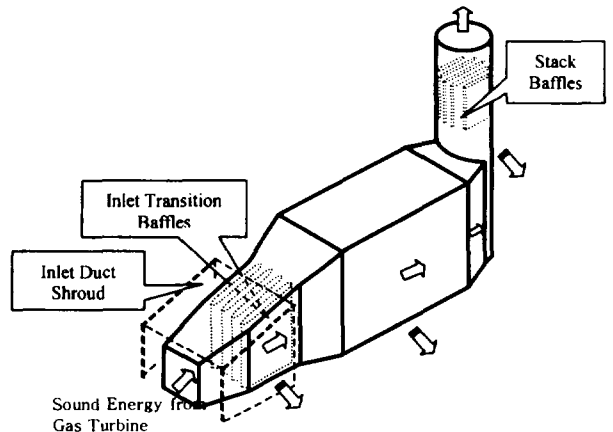


Figure 1. Schematic of HRSG and additional noise reduction apparatus

* 서울대학교 공력소음 및 소음제어 연구실
** 한국중공업 기술연구원
*** 서울대학교 기계항공공학부 조교수

소음기의 필요 감음량, 덕트의 절연과 외형 두께에 의한 투과손실을 계산할 수 있는 모듈들이 필요하다. Figure 1에서 HRSG의 개략도, 소음의 전달 경로, 소음 저감 장치를 나타내고 있다. 기존에 HRSG 소음해석에 대한 연구[1]보다 좀 더 발전된 알고리즘과 또 소음저감장치인 덕트 쉬라우드(Duct Shroud)와 덕트소음기(Duct Silencer)에 대한 해석을 포함하는 프로그램 개발을 위해 HRSG 주요 소음원 및 주요부의 소음 저감 메커니즘에 대한 이론 및 해석방법을 정립하였으며, 이를 근거로 프로그램을 완성하였다. HRSG 소음 예측 프로그램 알고리즘은 HRSG의 주요 소음 전달 경로 - HRSG 벽면 투과손실, 튜브 번들(Tube bundle) 감음량, 덕트 소음기의 삽입손실, 음의 전파에 의한 거리 감쇄 등을 계산하는 모듈로 구성되어 있으며, 사용자의 편의를 위하여 GUI를 이용한 입/출력 Format을 사용한 윈도우용으로 개발하였다.

프로그램 검증을 위해 실제 국내에서 운전되고 있는 HRSG에 대해서 예측된 값과 측정값을 비교 검토 하였다.

2. HRSG 소음예측이론

HRSG 주요 소음원은 가스터빈(Gas Turbine)이다. 가스터빈의 소음은 제작사에서 OBCF(Octave Band Center Frequency) 별로 음향파위레벨(Sound Power Level, 이하 PWL)이 제공된다. HRSG 소음해석은 가스터빈 소음을 입력 값으로 하여, HRSG 입구덕트, Main Casing, 출구덕트, 스택(stack)등의 주요부에서 음의 투과 및 전파에 의한 음에너지 값을 계산하는 것이다. 따라서 HRSG 소음해석을 위해 HRSG 각 주요부의 소음 저감 메커니즘 및 소음 전파 원리를 이해해야 한다.

2.1 벽면투과손실 (Transmission Loss, 이하 TL)

충분히 넓은 벽체에 음파가 입사 되면 일부는 반사되고 일부는 투과된다. 이때 투과음의 세기(I_t)와 입사음의 세기(I_i) 비를 투과율(Transmission coefficient : τ)이라 한다.

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} \quad (1)$$

투과손실(Transmission loss : TL)은 투과율의 역수를 상용대수 취한 후 10을 곱한 값으로 정의된다.

$$TL = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \log\left(\frac{I_i}{I_t}\right) \quad (2)$$

먼저, 단일벽(단일재료로 구성)의 차음특성은 주파수에 따라 강성제어영역(Stiffness region), 질량법칙영역(Mass law region) 및 일치효과영역(Coincidence region)등 세 영역으로 구분된다. 강성제어영역은 사용자재의 강성에 지배되는 공진영역으로 사용자재의 영율(E)과 단면 2차 모멘트(I_2)등에 의해서 제어된다. 질량법칙영역은 투과손실이 옥타브당 6dB씩 증가되며, 그 주파수는 공진주파수의 2배에서 일치주파수의 1/2배 사이이다. 일치효과영역은 입사음의 파장과 굴곡파의 파장이 일치하면 벽체의 굴곡과 진폭은 입사파의 진폭과 동일하게 진동하는 일종의 공진상태가 되어 차음성능이 현저히 저하되는 영역이다. 질량법칙으로 말하자면 벽체의 두께를 2배로 하여도 투과손실은 5~6dB 밖에 증가하지 않으며, 일치주파수는 두께의 증가에 따라 저음역으로 이동하게 되어 위험부담이 증가한다. 이에 비해 완전히 독립된 벽체를 이중으로 설치하면 첫번째 벽에서 차음된 음이 다시 다음 벽에 차음되어 전체 투과손실은 각 벽체의 투과손실을 합한 값이 된다. 따라서

차음판의 성능을 향상시키기 위한 방법으로는 이중판 혹은 다중판을 이용한 구조물이 바람직하다. 이중판은 단일판과 단일판 사이에 공기층이 존재하는 것을 의미한다. 이런 다중판에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있다.[2-4]

그러나 이중판으로 차음판을 설계했을 경우에는 2개의 벽체가 2개의 질량으로 작용하고, 그 사이의 공기가 스프링으로 작용하여 진동계의 공진과 같은 현상이 일어나 차음특성이 현저히 떨어진다. 즉 이중판의 공진 투과 주파수 부근에서는 투과손실이 질량법칙에 의한 투과손실 보다 더 낮아지는 현상이 일어난다. 이중판의 공진 투과 주파수(f_c)는 (3)식으로 구할 수 있다.

$$f_c = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (3)$$

여기서, ρ : 공기 밀도 (kg/m^3)

d : 공기층의 두께(m)

m_1, m_2 : 각 판의 면밀도 (kg/m^2)

중공이중벽에 대해서는 이미 언급한 바와 같이 많은 공진주파수가 발생되어 투과손실의 성능이 현저히 떨어진다. 이를 방지하기 위해 흡음재를 이중벽사이에 충전시키면 일반적으로 3~10dB정도 투과손실이 증가한다.

HRSG 덕트는 단열효과를 위해 이중판 또는 삼중판을 사용하게 되는데, 이때 판 사이에는 단열재이면서 흡음재인 세라믹울(ceramic wool) 또는 미네랄울(mineral wool)을 충전하여 사용한다. HRSG 벽체의 TL계사를 위해 음향학적 구분과는 약간의 차이가 있지만 편의상 단열재의 개수에 따라 일중벽, 이중벽, 삼중벽등으로 구분하여 모델링하였다. 일중벽은 Insulation층이 한 개인 것을 의

미 한다. 그리고 HRSG 벽체는 Casing의 위치에 따라 내부보온 혹은 외부보온으로 구분되며, 내부보온은 Casing과 가스터빈의 연소가스가 직접 접촉하는 경우이고 외부보온은 Casing이 외부공기와 직접 접촉하는 경우이다. 지금까지 벽면의 투과손실에 대한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 아직까지 실제현상과 이론적 현상에는 차이가 있어 범용식을 사용하기에는 많은 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 HRSG 벽체의 투과손실을 좀더 실용적으로 정확하게 계산하기 위하여 질량법칙을 이용하는 기본식에 최대값의 한계를 두고, 벽면의 종류를 고려한 식을 사용한다.

2.2 Tube Bundle 삽입손실(Insertion Loss)

가스터빈에서 유입되는 소리는 유동방향과 덕트 주위로 전파된다. 이때 덕트 주변으로 전파되는 소음은 덕트 벽면의 Casing 및 Insulation에 의해 차음 되고, 배기가스의 방향과 같이 전파되는 소리는 일종의 소음기 역할을 하는 Tube Bundle에 의해 저감 된다.

지금까지는 Tube Bundle 개수와 감음량이 선형적으로 비례하는 것으로 인식되어 왔다. 그러나 HRSG 내부 가스터빈 출구에 loudspeaker를 설치하고 Tube Bundle 감음량을 측정된 결과하여, 이 결과를 선형함수 예측한 계산치와 비교하여 보면, 저주파수(< 500 Hz)에서는 과대예측(overestimates)되었고, 오히려 고주파수(>1000 Hz)에는 저평가(underestimates) 되는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 Tube Bundle 개수와 감음량은 최소한 선형적인 관계가 아님을 알 수 있다. 따라서 tube bundle 개수와 감음량의 관계식을 유도하기 위해 측정 결과를 자연log 함수로 curve-fitting하였으며, (4)식으로 표현된다.[5]

$$IL_{T,B} = A \ln(N) - B \quad (4)$$

여기서, $IL_{T,B}$: Tube bundle의 감음량, A, B는 주파수의 함수, N는Tube bundle 개수를 나타낸다

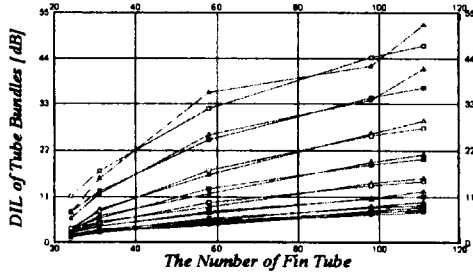


Figure 2. Insertion loss at different fin tube numbers and OBCF (□ : Our Model, △:Old Model)

Figure 2에서 각 옥타브 밴드 주파수와 핀튜브 개수에 따른 튜브 번들의 삽입손실을 그래프로 나타내고 있다.

2.3 소음기의 삽입손실

HRSG에 적용되는 소음기 종류는 흡음형이다. 흡음형 소음기는 흡음물(rock wool, glass wool, etc)을 관로 내에 부착하여 음향에너지를 흡수시켜 출구로 방출되는 음향파워를 줄이는 방식으로, 다른 형식의 소음기에 비하여 압력손실이 비교적 적고 넓은 주파수 범위의 소음에 대하여 감음 성능이 우수하기 때문이다. 흡음형은 팽창형 소음기의 원통에 흡착물질을 부착시켜 공동 내의 평면파를 반사에 의한 간섭효과와 흡음효과를 동시에 이용하여 감음하는 형과 공동내의 산란파를 흡음하는 형(흡음캠버), 관내에서 흡음을 행하는 흡음 덕트 등으로 분류된다

소음기의 감음 성능을 나타내는 삽입손실(Insertion Loss : IL)은 덕트 일부에 소음기를 삽입했을 때와 하지 않았을 때의 음향파워레벨(PWL)의 차이로 아래 식으로 표현된다. 삽입손실

은 소음기의 부착효과를 직접 평가하는 실질적인 방법으로 소음기의 감음 성능을 나타내는데 가장 일반적으로 사용된다.

$$IL = 10 \log \frac{W_{with}}{W_{without}} \quad (5)$$

여기서, W_{with} 는 소음기가 설치되었을 경우 덕트의 음향파워(Watt), $W_{without}$ 은 소음기가 없을 경우 덕트의 음향파워(Watt)를 나타낸다.

본 연구에서는 흡음덕트의 음향 감쇄량을 계산하기 위해 기존의 문헌 조사를 통하여 Ramakrishnan & Watson [6]와 Beranek [7]등이 제시한 삽입손실 예측 방법을 이용하였다. 흡음덕트의 삽입손실은 유동의 속도가 작을 경우에는 유동소음을 무시할 수 있으므로 아래와 같이 구분된다.

- (a) 입구 손실 : 입구 단면적 변화 등으로 인한 음의 반사
- (b) 흡음 Baffle에 의한 손실 : 흡음재에 음의 흡수
- (c) 출구 손실: 출구 단면적 변화 등으로 인한 음의 반사

이중에서 (b)항의 흡음 Baffle에 의한 손실이 흡음덕트 삽입손실의 대부분을 차지하고 (a), (c)항의 입구와 출구손실은 (b)항에 비하여 매우 작은 값을 가진다. 따라서 입,출구 손실 값은 매우 작아 무시하거나 혹은 설계 안전계수(Safety factor)로 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 간혹 설계자는 자신의 경험을 통하여 입구손실을 0 dB(저주파) ~ 8 dB(고주파)정도의 값을 사용하기도 한다. Figure 3에 Splitter흡음 덕트를 통과하는 경우 삽입손실의 거동을 개략적으로 도시하였다.

흡음덕트의 감쇄량(ΔL)은 흡음 Baffle의 길이, 흡음재의 접수길이(P)와 단면적(A)에 반비례하며,

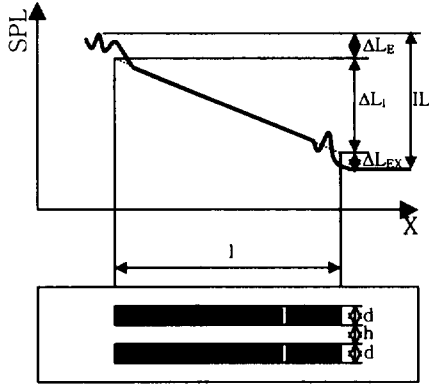


Figure 3. Schematic of Insertion Loss

아래 식으로 표현된다.

$$\Delta L_i = \frac{P}{A} IL_h \quad (6)$$

여기서, L_h 는 주파수, 온도, 흡음재의 음향학적 특성, 공기통로(h), 흡음 Baffle 길이 및 두께(d) 등에 의해서 복잡한 방법으로 결정되며, 이때 L_h 는 흡음 덕트 단위 길이당 감쇠량을 의미한다. 식(6)에서처럼 흡음 덕트의 감쇠량은 P/A , 흡음 Baffle 길이에 비례하므로 P/A 비를 크게 할수록 감쇠량을 증가시킬 수 있다. 이와 같이 P/A 비를 증가시키기 위해 덕트 내부에 흡음 Baffle로 Splitter하여 사용한다. 이때, P/A 비가 크면 P/A 는 $1/h$ (공기통로)로 대체할 수 있으며, 식(6)은 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta L_i = \frac{l}{h} L_h + \Delta L_{ENT} \quad (7)$$

위 식으로부터 흡음덕트의 삽입손실은 소음기의 형상, 치수 및 흡음재의 음향학적 특성으로부터 어떻게 L_h 값을 얻는가 하는 문제이며, 본 연구에서는 L_h 를 구하기 위해 Beranek 이 제시한 방법을 사용하였다. (See Ref. 7)

2.4 원방향으로 음의 전파

음원(sound source)으로부터 방사되는 음의 에너

지는 모든 방향으로 전달되며, 음원으로부터 멀어질수록 음의 에너지는 약해진다. 이것을 음의 거리감쇠(혹은 기하확산에 의한 감쇠)라 하며, 이 감쇠치는 음원의 형상이나 크기에 따라 다르다. 또한 음이 원거리로 전파할 때 거리 이외의 각종 요인에 의한 영향으로 감쇠현상을 보이는데, 이를 초과감쇠(excess attenuation)라 한다. 초과 감쇠 요인으로는 대기의 온도, 지면 조건, 기후, 바람 및 공기에 의한 흡수 등이 있다. 따라서 음이 원거리 전파시 감쇠량을 계산 하기 위해서는 거리 감쇠량과 초과 감쇠량을 빼주어야 한다. 따라서 소음원의 음향파위레벨을 알 경우 원거리에서 음압레벨은 아래 식으로 계산이 가능하다.

$$L_p = L_w - (K + D_{IM} + A_E) \quad (8)$$

여기서, L_p , L_w 는 음압출력레벨(SPL), 음향파위레벨(PWL), K 는 음원의 형상 요인, D_{IM} 는 음원의 방향성을 고려한 방향 지수(Directivity Index), A_E 는 초과 감쇠 요인이다.

2.4.1 음원의 형상에 의한 감쇠(K)

자유공간 내의 모든 방향으로 일정한 음을 방사하는 점음원일 경우, 음원의 형상에 의한 감쇠(K)는 다음 식으로 표현된다.

$$K = 10 \log(4\pi r^2) = 10 \log(4\pi) + 20 \log(r) \quad (9)$$

2.4.2 Stack 방향 지수(D_{IM})

HRSR Stack의 방향 지수는 Sutton[8]이 제안한 실험적 모델을 이용하였으며, Stack 지름, 주파수, stack 방향각도 및 Stack 출구 가스의 음속 등에 의해서 결정된다.

2.4.3 초과 감쇠 요소 (A_E)

초과 감쇠 요인으로는 아래 식의 5개항의 합으로 표현된다.

$$A_E = A_o + A_b + A_f + A_r + A_m \quad (10)$$

- 여기서, A_a : 공기 흡수에 의한 요인
 A_b : 장애물에 의한 요인
 A_f : 숲에 의한 요인
 A_r : 지면의 반사에 의한 요인
 A_m : 기후조건에 의한 요인

그러나 본 연구에서는 HRSG 주변에 숲이나 장애물이 없다고 가정하고 또한 지면 반사, 기후 조건에 의한 감쇄는 매우 미미하므로 무시하고, 공기에 의한 거리 감쇄만 포함하였다. 공기에 의한 거리 감쇄는 음이 공기 중을 전파하는 과정에서 음에너지가 흡수되는 것으로 이는 공기의 점성과 공기 분자의 운동상태 변화에 기인한다. 일반적으로 공기 감쇄량은 대기 온도와 상대습도에 의해서 결정이 되며, 주파수는 높을수록 상대습도는 낮을수록 거리 감쇄량은 증가한다. 본 연구에는 거리 감쇄량을 계산하기 위해 ISO9613에 규정된 계산식을 이용하였으며, 계산 식은 다음과 같다.

$$A_a = \alpha S \quad (11)$$

여기서, α 는 공기 흡수에 의한 감쇠계수 (ISO 9613 Code 참조), S는 거리를 나타낸다. 공기흡수 감쇠계수는 주파수(Hz), 상대습도(%), 대기온도(K) 및 대기압력(Pa)에 의해서 결정된다.

3. 프로그램의 정확성 검증

프로그램의 검증을 위하여 국내에서 실제로 운용되고 있는 HRSG를 대상으로 실제 측정한 값과 NP-HRSG 프로그램으로 예측된 값과 비교를 하였다.

Figure 4에서 NP-HRSG 프로그램의 Main Window를 보여주고 있다. 크게 INPUT DATA 항목과 OUPPUT DATA 항목으로 이루어져 있다. 자세한 프로그램 설명은 지면 관계상 생략하고, 국내 모지역에 설치

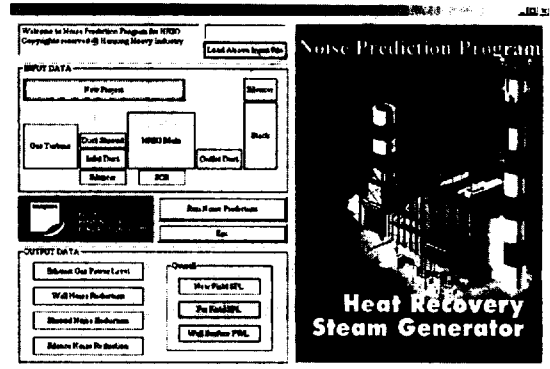


Figure 4. The main window of NP-HRSG Program

Source	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Overall
All Inlet Duct 1	186.0	123.0	133.0	136.4	139.0	144	148.2	151	143.0	154.713
All Inlet Duct 2	186.0	123.0	133.0	136.4	139.0	144	148.2	151	143.0	154.713
All HRSG 1	181.0	128.1	136.0	131.6	136.7	139.0	145.4	143.0	134.5	148.97
All HRSG 2	184.22	114.2	123.0	122.1	123.5	124.8	126.0	116.0	116.0	131.007
All HRSG 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All HRSG 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All HRSG 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All Outlet Duct 1	185.00	118.0	118.0	117.2	117.1	115.0	113.0	102.3	83.24	124.178
All Outlet Duct 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All Stack 1	186.70	109.0	118.0	116.4	116.3	116.3	113.3	101.7	82.64	123.362
All Stack 2	186.70	109.0	118.0	116.4	116.3	116.3	113.3	101.7	82.64	123.362

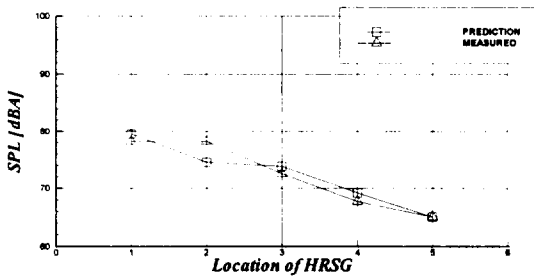
Source	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
All Inlet Duct 1	28.01	34.07	38.99	41.01	44.03	48.05	53.07	53.09	55.11
All Inlet Duct 2	27.49	39.52	48.47	37.48	48.51	47.53	53.56	58.57	63.59
All HRSG 1	28.22	34.24	37.19	41.21	44.23	48.25	53.28	53.30	55.32
All HRSG 2	26.57	32.59	35.54	39.56	42.58	46.60	51.62	51.64	57.66
All HRSG 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All HRSG 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All HRSG 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All Outlet Duct 1	26.57	32.59	35.54	39.56	42.58	46.60	51.62	51.64	57.66
All Outlet Duct 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All Stack 1	27.59	33.61	36.56	40.58	43.60	47.62	52.64	52.66	58.68
All Stack 2	27.59	33.61	36.56	40.58	43.60	47.62	52.64	52.66	58.68

Source	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
All Inlet Duct 1	28.01	34.07	38.99	41.01	44.03	48.05	53.07	53.09	55.11
All Inlet Duct 2	27.49	39.52	48.47	37.48	48.51	47.53	53.56	58.57	63.59
All HRSG 1	28.22	34.24	37.19	41.21	44.23	48.25	53.28	53.30	55.32
All HRSG 2	26.57	32.59	35.54	39.56	42.58	46.60	51.62	51.64	57.66
All HRSG 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All HRSG 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All HRSG 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All Outlet Duct 1	26.57	32.59	35.54	39.56	42.58	46.60	51.62	51.64	57.66
All Outlet Duct 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
All Stack 1	27.59	33.61	36.56	40.58	43.60	47.62	52.64	52.66	58.68
All Stack 2	27.59	33.61	36.56	40.58	43.60	47.62	52.64	52.66	58.68

Figure 5. The output windows of NP-HRSG

되어 있는 HRSG를 대상으로 소음 예측한 결과를 Figure 5에서 보여주고 있다. Inlet Duct를 2부분, HRSG Main Casing 부분을 2부분, Outlet Duct를 1부분, Stack을 2부분으로 나누어 계산하였다. 위로부터 차례대로 Exhaust Gas Power Level, 각부분 벽면의 TL, 벽면 1m 거리에서의 SPL, PWL, 원방 150 거리에서의 SPL 값을 나타내고 있다.

Figure 6에서 HRSG 각부분 벽면으로 1m 지점에서 SPL의 계산값과 측정값을 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 계산값과 측정값의 차이가 대체로 ± 1 dB 정도이고 최대 차이도 3 dB 를 넘지 않고 있다.



1: Transition Inlet, 2: Transition Outlet, 3: HRSG Main 1, 4: HRSG Main 2, 5: Outlet duct

Figure 6. Comparison of Predicted Results and Measured data

4. 결론

초기 설계단계에서 HRSG에서 발생하는 소음값을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. HRSG의 기본 구조들에 대하여 모두 해석할 수 있을 뿐만 아니라, 특별한 소음 저감 장치로 HRSG에 부착되는 Duct Shroud와 소음기에 대한 소음 해석도 포함하였다. 또, 사용자의 편의를 위하여 GUI를 이용한 Window용 응용프로그램으로 개발하였다. 측정치와의 비교를 통하여 이 프로그램의 신뢰성을 확보하였다.

참고문헌

1. 남경훈, 박석호, “복합발전용 배열회수보일러의 소음예측”, 소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 205~210, 1998.
2. Sharp, B. H., “A Study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements”, Wylie Laboratories Report WR 73-S, 1973.
3. Brekke, A., “Calculation Methods for the transmission loss of single, double and triple partitions.”, Applied Acoustics, 14, 225-240, 1981.
4. Davy, J.L., “Predicting the sound transmission loss of cavity walls”, In Proceedings of Interior Noise Climates, 1990.
5. George, F.H., Jr. P.E., “Sound Transmission Loss Elements To Improve Noise Level Prediction Algorithms”, Hessler Associate Report No. 1274A, 1994.
6. Ramkrishnan, R. and Watson, W.R., “Design curves for circular and annular duct silencers”, Noise Control Engineering Journal, 36, 107-120, 1991.
7. Beranek, L.L., Ver, I.L., Noise and Vibration Control Engineering, New York: McGraw Hill, Ch. 10, 1992.
8. Sutton, M., “Noise Directivity of Exhaust Stacks”, Final year thesis for the Honors Degree of Bachelor of Engineering, University of Adelaide, South Australia.