

<논 문>

복합발전용 배열회수보일러의 소음예측

Noise Prediction of HRSG for Gas Turbine

남경훈* · 박석호** · 김백영** · 김원일***

Kyoung-Hun Nam, Seok-Ho Park, Baek-Young Kim and Won-Il Kim

(1999년 3월 18일 접수 ; 1999년 11월 5일 심사완료)

Key Words : Heat Recovery Steam Generator(HRSG, 배열회수보일러), Finned Tube Bank(핀튜브뱅크), Main Casing(본체), Insulation(절연), Requirements for Noise Guarantee(소음규제조건)

ABSTRACT

HRSG, which is one of main components of the combined cycle power plant, is composed of an inlet duct, a main body and casing, an outlet duct and a stack. It is important to design HRSG within the allowable noise limit. For this purpose, it is necessary to analyze and predict the noise reduction and radiation at HRSG. In this paper, the technology for the noise prediction at each part of HRSG has been based on the empirical and field data, and also the HRSG noise prediction program has been developed. In order to verify the developed technology and program a field test is conducted. The results of noise prediction show good agreement with the measured.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 발전설비의 청정화 및 고효율화 기술 추세에 맞추어, 액화천연가스(LNG)를 주연료로 하는 가스터빈(gas turbine) 복합발전설비 시장 규모가 급신장됨에 따라, 관련업체도 이 분야의 기술개발에 박차를 가하고 있다. 가스터빈 복합발전설비는 중전의 기력발전방식에 비해 평균 발전효율이 10% 이상 높은 고효율 발전방식으로서, 주원동기인 가스터빈과 가스터빈에서 나온 배열을 회수하여 동력용 고압고온 증기를 발생시켜 주는 배열회수보일러, 이 증기를 이용하여 구동되는 증기터빈(steam turbine)등 크게 세 부분으로 구성된다. 통상 발전소를 건설함에 있어 여러가지 환경규제 조건

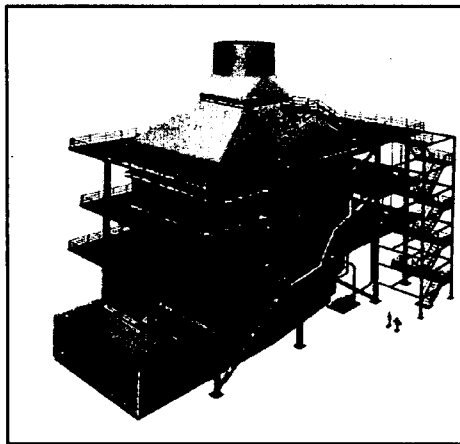
이 제시되고 있으며, 이들 중 소음도 중요한 규제조건의 하나로 그 요구 수준이 날로 다양해지고 더욱 엄격해 지고 있는 실정이다. 복합발전설비의 경우 주소음원은 가스터빈이고, HRSG는 가스터빈 출구부에 위치하여 배가스 통과시 가스터빈 출구소음을 감쇠시켜 주는 역할을 한다. HRSG의 각 부위에서 소음감쇠 예측 및 해석 기술은 업체의 오랜 실적 경험을 통해 얻어진 고유기술로 인식되어 공식적으로 발표된 것이 거의 없는 실정으로 체계적인 해석 기술이 필요하다.

HRSG는 배가스의 흐름 방향에 따라 수직형(Fig. 1)과 수평형(Fig. 2)으로 구분되며, 각각의 주요부로는 입구덕트(inlet duct), 핀튜브뱅크가 배열되어 있는 본체, 출구덕트(outlet duct), 대기로 배가스가 배출되는 연돌출구(stack outlet)로 구성되어 있다. HRSG 제작사는 HRSG의 주소음원인 가스터빈의 음향출력레벨(sound power level) 정보로부터, HRSG 주요부의 음향출력레벨 또는 음압레벨(sound pressure level)에 대한 소음규제조건을 준수해야 한

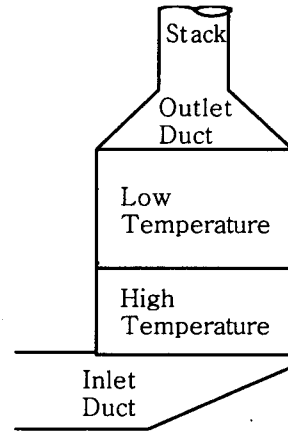
* 정회원, 삼성중공업 기전연구소 에너지환경파트

** 삼성중공업 기전연구소 에너지환경파트

*** 경남대학교 기계공학과

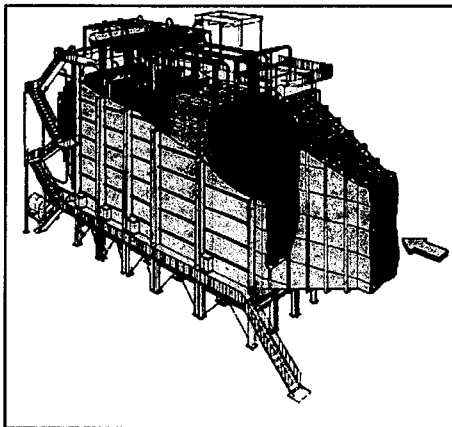


(a) Configuration of vertical HRSG

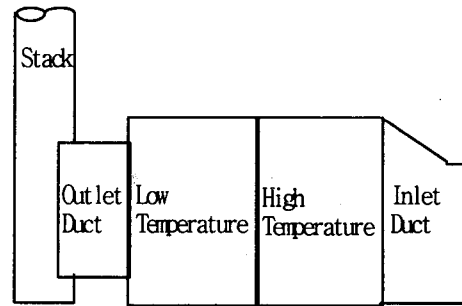


(b) Schematic of vertical HRSG

Fig. 1 Vertical type HRSG



(a) Configuration of horizontal HRSG



(b) Schematic of horizontal HRSG

Fig. 2 Horizontal type HRSG

다. 소음규제조건을 준수하면서 경제적인 HRSG 설계 및 제작하기 위해서는 각각의 주요부로 방사되는 소음량을 예측할 수 있는 기술이 필요하다. 주요부의 방사 소음량을 예측하기 위해서는 HRSG의 기하학적 조건, HRSG 주요부의 본체에 설치되어 있는 환류브뱅크의 소음 감음량 및 덕트 절연에 의한 차음손실을 계산하여야 한다. 그러나 이와 같은 계산을 하기 위해서는 많은 시간이 소요되므로, 효율적이면서 설계자가 사용하기 쉬운 소음예측 프로그램이 필요하다.

본 연구에서는 HRSG 주요부의 음향출력레벨과 음압레벨을 예측하기 위하여 HRSG 외형(casing) 치수(dimension), 연소 배가스의 여열을 흡수하기 위해 설치된 환류브뱅크의 감음량(noise reduction),

덕트 소음기의 삽입손실(insertion loss), 덕트의 절연과 외형 두께에 의한 투과손실(transmission loss) 및 덕트 일부분의 음향출력레벨을 예측하기 위한 음향출력레벨 예측식의 응용식을 고려한 HRSG 소음예측 프로그램을 개발하였다. 프로그램 내에는 실운전 공사의 소음측정 자료들을 바탕으로 유도한 환류브뱅크의 감음량 수식, 질량법칙과 보정계수를 바탕으로 한 덕트의 절연과 외형 두께에 의한 투과손실(transmission loss) 값 및 HRSG 기하학적 조건 변화에 따른 음향출력레벨 및 음압레벨 예측식이 포함되어 있다. 개발된 프로그램의 검증을 위해 운전되고 있는 보일러의 측정소음레벨과 개발된 프로그램으로 예측한 소음레벨의 결과를 비교 검토하였다.

2. 환류브뱅크의 감음량

HRSG 본체는 Fig. 1과 Fig. 2의 (b)와 같이 크게 고온영역(550~350 °C)과 저온영역(350 °C이하)으로 나누며, 가스터빈에서 발생하는 연소 배가스의 여열을 흡수하기 위해 설치된 환류브뱅크는 HRSG 본체에 설치되어 있다. 환류브뱅크는 전열효율을 높이기 위해 환류브 형상이 사용되며, 배열(array)은 HRSG의 전체 구조를 고려하여 정삼각형과 이등변 삼각형의 엇갈림배열이 사용된다. 가스터빈에서 발생하는 높은 음향출력레벨의 배가스 소음은 환류브뱅크를 통과하면서 감소한다. 즉, 환류브뱅크는 일종의 소음기 역할을 한다. 환류브뱅크의 감음량에 대해서는 많은 연구^(1~4)가 진행되어 왔지만, 실제 설계에서 실용적으로 사용하기에는 미흡하였다.

본 연구에서는 실운전 공사의 소음 측정자료⁽⁵⁾를 기본으로 환류브뱅크의 감음량 수식을 유도하기 위하여, 환류브뱅크의 감음량 특성을 크게 고온영역과 저온영역으로 나누었다. 두 온도영역에서 주파수와 튜브수의 감음량 관계를 분석해보면, 주파수의 증가와 함께 감음량도 증가하였지만 일정한 증분량을 가지는 것은 아니었다. 이 관계를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\Delta R = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (1)$$

여기서 f 는 주파수(Hz), P 는 음압(sound pressure level, dB)이며 R 은 주파수 증분과 음압레벨 증분과의 관계에서의 증분량(dB / f)을 나타낸다. 그리고 환류브뱅크는 단순 팽창형 소음기가 배가스의 유동 방향으로 직렬 배열로 다수 설치된 것과 유사하므로, 환류브뱅크의 튜브 수가 증가할 수록 감음량도 증가함을 알 수 있었다. 이상과 같이 환류브뱅크의 감음량(F)을 환류브뱅크 튜브수(N)와 주파수(f)의 함수관계로 표현하게 되면 다음과 같이 표현된다⁽⁵⁾.

$$F(N, f) = (aN + b)f^a + (cN + d)f^b + (eN + g)f + (hN + k) \quad (2)$$

Table 1 Coefficient of the high and low temperature region

구분 \ 상수	a	b	c	d	e	g	h	k
고온영역	1.2E-11	-3.8E-10	-1.7E-7	5.1E-6	7.8E-4	-2.15E-2	2.1E-1	-4.2
저온영역	1.53E-12	-4.8E-11	-2.5E-8	5.4E-7	1.3E-4	3.4E-4	6.7E-2	-9.9E-1

여기서 a, b, c, d, e, g, h, k 의 상수 값을 Table 1에 나타내었으며, 고온영역과 저온영역으로 분리하였다.

앞서 언급한 환류브뱅크의 감음량은 온도 영역, 주파수, 배가스의 유동방향과 같은 방향으로 설치되어 있는 환류브뱅크의 환류브 개수와 상관 관계가 있음을 알 수 있었고, 온도영역에 따른 감음량 차이는 온도 차에 따른 소리의 속도(sound velocity)가 달랐기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 본 연구에서는 환류브뱅크 감음량을 배가스의 유동방향으로 나열되어 있는 튜브 개수만 고려하였고, 환류브뱅크의 배열 구조, 튜브의 피치(pitch) 및 높이가 고려되어 있지 않으므로, 향후 이 분야의 연구가 계속되어야 할 부분이다.

3. HRSG 덕트의 투과손실

HRSG 주요부인 입구덕트(inlet duct), 환류브뱅크가 배열되어 있는 본체, 출구덕트(outlet duct) 및 대기로 배가스가 배출되는 연돌출구(stack outlet)에서의 음향출력레벨 또는 음압레벨을 예측하기 위해서는 벽체의 투과손실을 계산하여야 한다. 입사음의 세기(음압)레벨과 투과된 음의 세기레벨의 관계를 투과손실(transmission loss)로 표현한다. 그리고 판의 임피던스 이론으로 표현한 식에서, 주파수와 판의 면밀도 영향만 고려했을 때의 차음성능 계산식인 질량법칙(mass law)은 식 (3)으로 표현되고, 현장에서 많이 이용되는 투과손실 계산법이다⁽⁶⁾.

$$TL(\text{dB}) = 18 \times \log(m \times f) - 44 \quad (3)$$

여기서 m 은 벽체의 면밀도(kg/m²), f 는 주파수(Hz)로 표시한다.

그러나 현재까지 단일판, 다중판, 단일층, 다중층으로 이루어진 건축재료의 투과손실에 관한 많은 이론적 연구^(7~9)가 진행되어 왔지만, 문헌 또는 제작업체에서 제공하는 투과손실은 시공상의 오차 때문에 설계에 직접적으로 적용하기는 다소 어려운 점이 있었다. 그리고 HRSG 덕트와 같이 덕트 외부 표면

Table 2 Correction coefficient of a single and double layer

Layer	Octave band center frequency (Hz)					
	63	125	250	500	1000	2000
Single layer	10	10	9	4	3	3
Double layer	17	17	16	11	14	14

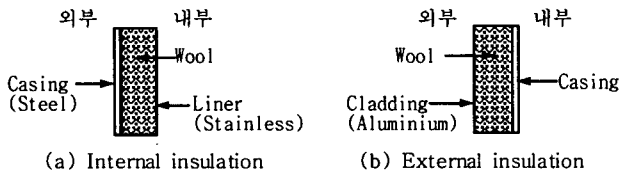


Fig. 3 Single layer insulation

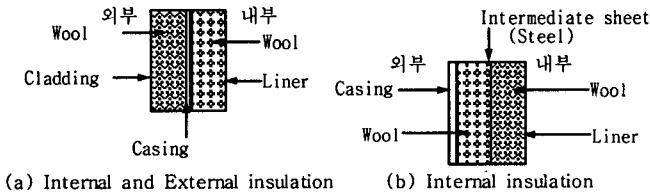


Fig. 4 Double layer insulation

을 단열하기 위해서 사용한 세라믹울(ceramic wool)이나 미네랄울(mineral wool)의 이중판 또는 삼중판 구조의 투과손실도 예측하기 어려웠다.

본 연구에서의 HRSG 덕트 투과손실은 식 (3)과 실운전 공사의 소음 측정 자료⁽⁵⁾를 활용한 Table 2와 같은 보정계수 값을 이용하여 계산되어졌다. 덕트 벽면 구조가 Fig. 3과 같은 1층(single layer) 및 Fig. 4와 같은 2층(double layer)으로 분류하고 투과손실 예측 값에 시공상의 오차 10%를 적용하였다. 그리고 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 HRSG 외형 및 덕트의 내부 보온일때는 양측면에 스테인레스판(stainless sheet)과 철판(steel sheet), 외부 보온일때는 철판과 알루미늄판(aluminum sheet)이 이용되며, 보온재로는 세라믹울과 미네랄울을 사용한다.

4. 덕트의 음향출력레벨

대형구조물인 경우 잔향실이나 무향실에서 음향출력을 측정하기 어려워, 현장에서의 직접측정방법을 많이 이용한다. ISO 규정⁽¹⁰⁾에는 음향출력레벨과 음압레벨의 관계식이 식 (4)로 표현되어 있다.

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log (S / S_0) \quad (4)$$

여기서, L_w 는 음향출력레벨, \bar{L}_p 는 표면음압레벨, S 는 측정표면적, S_0 는 단위면적(1m²)이다. 그러나 식 (4)는 기계나 덕트 전체의 음향출력레벨을 구하기 위한 방법으로는 적합하나, 덕트 일부분(Fig. 5)에 해당하는 음향출력레벨을 구하기 위해서는 적절한 응용이 필요하다.

본 연구에서는 전체 덕트의 일부분에 해당하는 덕

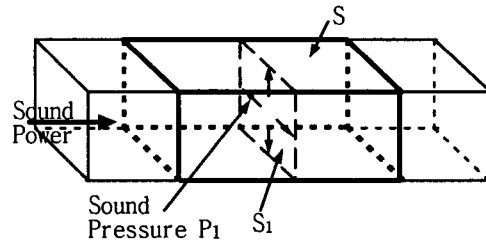


Fig. 5 Schematic of the partial duct model

트의 음향출력레벨을 각각 구하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

(1) Fig. 5와 같이 단면적 S_1 은 임의 덕트 길이 부분의 대표 단면적이다.

(2) 대표 단면적에서의 내부 표면 음압(P_1) 크기는 모두 같다.

Fig. 5의 대표 단면적 S_1 에서의 음압, 즉 덕트 내부표면 음압레벨(SPL_{IS})은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$SPL_{IS} = PWL - 10 \log S_1 \quad (5)$$

여기서, PWL 은 덕트로 인입되는 소음원의 음향출력레벨이다.

덕트 외부표면 음압레벨(SPL_{OS})은 식 (5)의 덕트 내부표면 음압레벨(SPL_{IS})에서 투과손실(transmission loss, TL)을 뺀 식 (6)이 된다.

$$SPL_{OS} = SPL_{IS} - TL \quad (6)$$

식 (4), (5), (6)을 이용하여 임의 덕트 외부표면의 음향출력레벨(PWL_s)을 표현하면 식 (7)이 된다.

$$PWL_s = PWL - TL + 10 \log \frac{S}{S_1} \quad (7)$$

덕트 내부에서 부차적으로 발생하는 감음량이 있을 경우에는 식 (7)에 부차적 손실을 포함하면 된다. 이 관계식을 표현하면 다음과 같다.

$$PWL_s = PWL - TL + 10 \log \frac{S}{S_1} - A \text{ (dB)} \quad (8)$$

여기서 A (dB)는 부차적 감음량이다.

본 연구에서는, 환류브뱅크가 설치되어 있지 않은 입구덕트와 출구덕트의 음향출력레벨을 구할때는 식 (7)을 이용하여 계산하였고, 환류브뱅크가 설치되어 있는 HRSG 본체의 음향출력레벨은 식 (7)에 환류브뱅크의 감음량을 첨가한 식 (8)을 이용하여 계산하였다. 그리고 연돌출구에서의 음향출력레벨은 식

(9)를 이용하여 계산하였다.

$$PWL_s = PWL - A(\text{dB}) - X(\text{dB}) \quad (9)$$

여기서 $X(\text{dB})$ 는 가스터빈 입구에서 연돌출구까지의 부차적으로 발생하게 되는 감음량이다. 부차적 감음량으로는 환류브뱅크의 감음량, 소음기의 삽입손실, 덕트 굴곡에 의한 감음량, 연돌 내부에서의 감음량 등이다. 그리고 HRSG에서 멀리 떨어진 임의 지점에서의 음압레벨은 새로운 소음원으로 산정된 덕트 및 연돌출구의 음향출력레벨에 거리 감쇠효과, 구조물의 회절효과, 대기에 의한 흡음효과, 지면 감쇠효과 및 방향지수(directionality index)를 고려하면 된다.

5. HRSG 소음예측 프로그램

앞서 언급한 환류브뱅크의 감음량 관계식, 다중판의 투과손실, 덕트 일부분의 음향출력레벨 응용식을 바탕으로, 소음규제조건 준수와 설계시간을 단축하고자 HRSG 소음예측 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 설계자가 쉽게 사용할 수 있도록 수치 연산 응용으로 많이 보급된 Excel 프로그램으로 되어 있고,

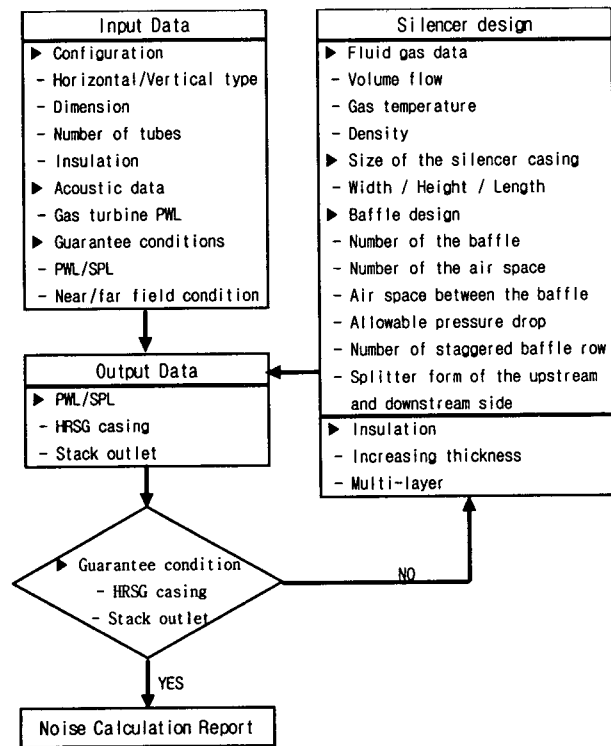


Fig. 6 Schematic diagram for HRSG noise prediction

개발된 프로그램은 크게 input sheet, calculation sheet, report sheet로 나누어져 있으며, 개략도를 Fig. 6에 나타내었다. 입력값으로 HRSG 외형 치수, 절연조건, 가스터빈 제작사로부터 제공되는 가스터빈의 음향출력레벨, 가스 유동방향으로 배열된 환류브뱅크의 튜브수 및 근음장(near field) 및 원음장(far field)에서의 소음규제조건을 입력하면, 각 덕트에서 방사하는 음압레벨 및 음향출력레벨이 소음규제조건을 준수하는 가를 알 수 있다. 덕트 및 연돌출구에서 소음규제조건을 만족하지 않을 때는 덕트 절연 조건을 변경하거나, 흡음형 소음기를 설치하도록 한다.

본 프로그램에서는 소음기의 필요 감음량을 예측하기 위하여, 흡음형 소음기의 배플 개수/두께/간격/길이를 설계할 수 있는 소음기의 기본설계 프로그램도 첨가되어 있다. 아울러 견적자료 또는 수주공사에 제출하는 "Noise Calculation Report for HRSG"도 작성된다. 본 프로그램의 HRSG 방사소음 예측 프로그램은 다음과 같은 내용으로 되어 있다.

- (1) 사용자 설명서(manual)
- (2) 절연 및 외형 두께를 고려한 투과손실 계산
- (3) 환류브뱅크의 감음량 계산
- (4) 흡음형 소음기의 기본설계 프로그램
- (5) 견적 또는 수주 공사를 위한 HRSG 덕트 주요부 및 연돌출구에서의 방사 소음계산서

6. 소음 예측 및 측정 결과의 고찰

본 연구에서 개발된 HRSG 소음예측 프로그램의 해석 정도를 검증하기 위해, 부하(load) 상태가 100%로 운전되고 있는 가스터빈 복합발전소의 HRSG 소음레벨을 측정하였다. HRSG의 입구덕트, 본체, 출구덕트 및 연돌 높이 치수는 Table 3에 나타내었고, 입구덕트, 본체 및 출구덕트의 측정은 기하학적 중심으로부터 1 m 떨어진 지점, 연돌 측정

Table 3 Dimension of the main part

	폭	높이	길이
입구덕트	5.9	5.9	6.7
본 체	9	16.8	28
출구덕트	9	16.8	4.4
연 돌	5.1 (지름)	50	-

Table 4 Gas turbine acoustic data

	Octave band center frequency (Hz)					
	63	125	250	500	1000	2000
PWL (dB)	142	145	145	136	135	127

Table 5 Comparison of the predicted and measured values

Measurement Point		Octave band center frequency (Hz)						Overall (dBA)
		63	125	250	500	1000	2000	
Inlet duct	P	62	70	74	70	69	57	77.4
	M	57	67	68	70	74	71	77.7
Main casing	P	58	66	70	65	62	48	72.9
	M	60	57	56	61	62	67	70.0
Outlet duct	P	56	63	65	59	51	30	68.1
	M	55	56	55	57	58	57	64.3
Stack (center)	P	49	57	59	53	45	25	62.1
	M	50	56	60	56	56	53	64.0
Stack outlet	P	67	80	83	74	66	49	85.2
	M	73	80	71	76	60	55	82.4

P: Prediction, M: Measurement

은 전체 높이의 중심으로부터 1 m 떨어진 지점이었으며, 연돌출구의 소음 측정은 출구 중심으로부터 90°이면서 끝단으로부터 1 m 떨어진 지점에서 측정하였다. 그리고 각부의 측정 지점은 대표 5 지점을 지정하였으며, 측정 값은 평균 값으로서 Table 5에 나타내었다.

계산조건은 운전중인 HRSG 덕트의 치수조건, 절연조건, 환류브뱅크 수를 일치시켰고, 소음원인 가스 터빈의 배기 음향출력레벨(Table 4)은 가스 터빈 제작사측으로부터 입수하였으며, 환류브뱅크 수는 고온부에서 31개, 저온부에서 82개, 절연조건은 세라믹 울과 미네랄울이 혼합 사용된 내부보온이었다. HRSG의 입구덕트, 출구덕트 및 연돌은 식 (7), 본체는 식 (8), 연돌 끝단은 식 (9)를 이용하여 계산하였고, HRSG로부터 1 m 떨어진 지점에서의 음압레벨 계산시, 소음원은 면음원으로 가정하였으며, 계산 결과를 Table 5에 나타내었다.

본 프로그램의 HRSG 소음예측 프로그램 수행을 통한 예측 결과와 실운전되고 있는 복합발전소의 소음 측정 결과에서 A-가중치(weighting) 총합음압레벨은 약 3 dB 이내의 오차 범위로서 유사하나 옥타

브밴드별 소음레벨은 다소 차이가 있다. 이 오차는 크게 세가지로 나누어 생각할 수 있는데, 첫째로 본체에 설치되어 있는 환류브뱅크의 튜브배열 간격(가스 흐름 방향 간격/가스 흐름 방향의 수직 방향 간격)과 환의 피치 및 높이에 따른 영향이 소음 감음량에 고려되지 않고 가스 흐름 방향으로 설치된 튜브 갯수에 의한 감음량만 계산되었다는 것, 둘째로 덕트절연 시공에 따른 투과손실 오차, 셋째로 대표 단면적 계산시 덕트 길이에 대한 덕트 전체 치수의 중심에 해당하는 단면적 설정인 것으로 판단된다. 오차 요인중 가장 큰 영향을 발생하는 환류브뱅크의 튜브배열 변화와 환의 피치 및 높이 변화에 따른 환류브뱅크 감음량에 관한 연구가 향후 계속되어야 할 것으로 사료된다.

7. 결 론

본 연구에서는 HRSG 소음예측을 위하여 실운전 공사의 소음 측정자료들을 이용한 환류브뱅크의 튜브수에 따른 감음량 관계식, 건축재료의 시공상 오차를 고려한 투과손실 보정량 및 덕트 일부분의 음향출력레벨을 계산하기 위한 음향출력레벨 응용식을 구하여 HRSG 소음예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램으로 소음규제조건에 적합한 덕트 절연 두께 결정, 소음기의 필요 감음량 추정 및 소음기의 기본설계가 가능하여 HRSG 설계시간 단축 및 경제적인 HRSG 설계를 할 수 있게 되었다. 그리고 운전중인 복합발전용 배열회수 보일러의 소음레벨 측정값과 개발된 프로그램의 예측값 결과의 A-가중치 총합소음레벨의 3 dB이내 오차한계를 나타내어, 본 프로그램으로 신뢰성 있는 HRSG 설계를 할 수 있는데 활용할 수 있을 것으로 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Zdravkovich, M. M., and Nuttall, H. A., 1974, "On the Elimination of Aerodynamic Noise in a Staggered Tube Bank", J. of Sound and Vib., Vol. 34, pp. 173~177.
- (2) Baylac, G. and Gregoire, J. P., 1975, "Acoustic Phenomena in a Steam Generating Unit", J. of Sound and Vib., Vol. 42, pp. 31~48.
- (3) Blevins, R. D., 1986, "Acoustic Modes of Heat Exchanger Tube Bundles", J. of Sound and Vib., Vol. 109, pp. 19~31.

(4) Jungbauer, D. E., Unruh, J. F., Rose, S. and Pantermuehl, P. J., 1993, "Sound Power and Pressure Level Measurements in the Inlet and Outlet of an HRSG Duct", ASME Cogen-Turbo, IGTI-Vol. 8, pp. 339~346.

(5) 남경훈, 1998, "HRSG 소음해석 기술개발 보고서" 삼성중공업 기전연구소

(6) 정일록, 1988, 소음 진동 이론과 실무, 녹원출판사.

(7) London, A., 1950, "Transmission of Reverberant Sound Through Double Walls", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 22, pp. 270~279.

(8) Mulholland, K. A., Parbrook, H. D. and Cummings, A., 1987, "The Transmission Loss of Double Panels", J. Sound Vib., Vol. 6, pp. 324~334.

(9) Utley, W. A. and Fletcher, B. L., 1981, "The Effect of Edge Conditions on the Sound Insulation of Double Windows", J. Sound and Vib., Vol. 26, pp. 63~72.

(10) ISO 3744, 1981, "Acoustics - Determination of Sound Power Levels of Noise Sources - Engineering Methods for Free-Field Conditions over a Reflecting Plane", International Standard Organization, Geneva.