

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.1.061>

물 분무를 이용한 연소가스 냉각 1차원 해석

임주현^{a,*} · 김명호^a · 김용련^a

1-D Analysis for Water Spray Cooling of Exhaust Gas in Combustor Test Facility

Ju Hyun Im^{a,*} · Myung Ho Kim^a · Yeong Ryeon Kim^a

^aThe 4th R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: juhyunim@add.re.kr

ABSTRACT

The cooling of hot exhaust gas is an important issue for the construction of combustor test facility. Water spray is an effective method for exhaust gas cooling due to its large latent heat in process of evaporation. In this study, 1-D analysis has been performed based on continuity, energy conservation, and saturated vapor property to understand water spray cooling of combustion gas. In the exhaust duct of combustor test facility, the injected water decreases combustion gas temperature, and evaporates in the combustion gas. However, some of the injected water is collected in the sump due to condensation. The evaporation of water helps combustion gas cooling, but causes pressure increase inside the exhaust duct due to increase of vapor pressure. These phenomena has been analyzed by 1-D modeling in this study. From 1-D analysis, the adequate mass flow rate of water spray to cool combustion gas and to avoid excessive pressure rise inside the exhaust duct has been decided.

초 록

연소기 시험 장치의 구축 시 고온의 연소 가스의 냉각은 중요한 설계요구조건이다. 물 분무(Water spray) 냉각 방식은 증발 과정에서 물의 잠열을 이용하므로, 효과적인 연소 가스 냉각이 가능하다. 본 연구에서는 연소기 시험 설비 구축 과정의 일환으로, 물 분무를 이용한 연소 가스의 냉각을 이해하기 위하여 연속방정식, 에너지 보존식과 포화 증기의 압력-온도 관계식을 이용한 1차원 해석을 수행하였다. 연소기 시험 장치에서 배출되는 고온, 고압의 연소 가스는 냉각수와의 혼합과정에서 배출가스의 온도가 낮아지며, 분무된 물의 일부는 기화하여 연소가스와 함께 배출되고, 일부는 다시 응축 되어 집수조로 모인다. 냉각수는 연소 가스의 온도를 낮춰주는 동시에, 증발된 증기는 연소기 내부의 압력을 증가시키므로 1차원 해석에서 증기의 압력-온도 관계식을 고려하여 해석을 수행하였다. 1차원 해석으로부터 연소가스의 적절한 냉각과 배기 덕트 내부의 압력의 지나친 상승을 피하기 위한 최적의 물 분무량을 확인하였으며, 물 분무 냉각 방식에 대한 물리적 이해를 얻을 수 있었다.

Key Words: Water Spray Cooling(물 분무 냉각), 1-D Analysis(1차원 해석), Continuity(연속방정식), Energy Conservation(에너지 보존식), Saturated Vapor Property(포화증기 특성)

Received 9 June 2014 / Revised 12 January 2015 / Accepted 17 January 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 춘계학술대회(2014. 5. 29-30, 서울대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

C_p : constant pressure specific heat

H : total enthalpy
 P : pressure
 T : temperature
 W : mass flow rate
 η_{vap} : vaporization efficiency
 sat : saturated condition
 v : vapor
 w : water

1. 서 론

가스터빈 엔진의 연소기 개발 과정에서 연소기 성능은 리그(Rig) 시험으로 평가하므로, 연소기 시험 리그 구축은 시험목적에 맞게 이루어져야 한다. 연소기 시험 장치 구축 시 고려해야 할 요구 조건 중 하나는 고온의 연소 가스를 적절한 냉각을 통해 대기로 배출하는 것이다. 효과적인 냉각 방법 중 하나는 연소 가스에 물을 분무하는 것이다. 물은 상당한 잠열을 지니고 있으므로 물 분무(Water spray)를 이용한 연소 가스 냉각은 매우 효과적이다. 따라서 물 분무 냉각은 다양한 시험 장치에 적용되고 있으며, 다수의 공학자들은 이에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

Adam and Norris[1]는 연소기 시험 장치의 구축 과정에서 연소가스의 냉각을 위하여 물 분무 방법을 이용하였다. Westergaard and Fife[2]는 배기 가스의 냉각 방법으로서 대기공기와 혼합 및 물 분무 방식을 제시하고, 이에 대한 효과를 보고하였다. 물 분무 냉각에 대한 물리적인 이해를 위해 다양한 해석적 방법 연구가 진행되었다. Pelton[3]과 Pelton and Willbanks[4]는 물 분무를 이용한 연소가스의 냉각을 1차원 모델링 방법을 이용하여 해석적으로 조사하였다. Pelton and Willbanks[4]는 연소가스의 냉각 과정을 두 단계로 나누고, 냉각 성능을 예측하기 위하여 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 이용하였으나, 연소가스 냉각 해석에서 압력 변화에 따른 포화증기특성은 고려하지 않았다. 물 분무 냉각의 효과는 실험적 방법으로도 연구되었는데,

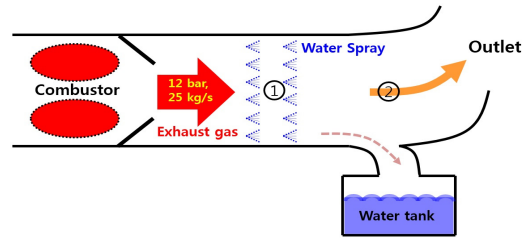


Fig. 1 Water spray cooling system in combustor exhaust duct.

Kachhwaha 등[5,6]은 물 분무 냉각을 수치적 모사 방법과 실험적 방법으로 연구하였다.

하지만 지금까지의 물 분무 냉각에 대한 대부분의 해석적 연구는 연속방정식과 에너지 보존에 근거하여 물의 현열과 잠열에 의한 연소 가스의 냉각을 예측하였다. 그러나 실제 물 분무 냉각에서는 물의 증발과 함께 배기 덕트 내의 증기압 상승에 따른 응축현상도 동시에 나타난다. 따라서 물 분무 냉각을 정확히 예측하기 위해서는 냉각수의 증발에 따른 증기압 상승과 이에 따른 포화증기 특성 변화를 해석에 적용하여야 한다. 본 연구에서는 물 분무 냉각을 이해하기 위하여 연속방정식, 에너지보존법칙과 함께 포화증기의 압력-온도 특성을 적용하였다. 연소가스의 물 분무 냉각에 대한 1차원 해석을 통하여 1) 분무되는 물의 양에 따른 연소가스의 출구 온도와 2) 분무된 물의 증발로 인해 야기되는 배기덕트 내부의 과도한 압력 상승을 피하기 위한 적정 물 분무량을 예측하였다.

2. 연소기 배기 덕트의 물 분무 냉각 시스템

연소기 배기 덕트에서 연소 가스를 냉각하는 물 분무(Water spray) 시스템은 Fig. 1에서 개념도로 나타내었다. 연소기에서 배출되는 고온 가스의 에너지는 분무되는 물이 증발하면서 빼앗는 현열과 잠열만큼 줄어들게 되고, 연소가스는 온도가 낮아져 습증기 형태로 배기구로 배출된다. 이 때, 고온의 연소 가스로 분무되는 물의 일부는 불완전 혼합으로 증발이 이루어지지 않

고, 일부는 물의 기화에 따른 증기압 상승의 영향으로 응축되는데, 이와 같이 증발되지 않은 물과 응축수는 집수조에 모인다. 따라서 물 분무를 이용한 연소가스 냉각 1차원 해석은 고온의 연소가스의 냉각을 비롯하여 물 분무 냉각 과정에서 증발되지 않고 수조에서 회수되는 물의 양을 예측할 수 있으므로, 연소기 시험 설비 구축 시 설계 근거 자료로 이용이 가능하다.

3. 물 분무 냉각 해석 조건 및 가정

물 분무(Water spray) 냉각의 해석 조건은 연소기 리그(Rig) 시험 장치의 설계 조건을 기준으로 하였다. 연소기에서 배출되는 연소 가스의 압력과 온도 조건은 12 bar, 1600 K이며, 질유량(Mass flow rate)은 25 kg/s이다. 이 때 분무되는 냉각수의 온도는 293.15 K (= 20°C)이며, 물 분무 냉각 결과는 분무되는 냉각수 유량의 범위 1 ~ 30 kg/s 에서 예측하였다. 물 분무 냉각 해석 조건은 Table 1에 정리되어 있다. 본 논문에서는 연소 가스와 불완전 혼합(Incomplete mixing)으로 증발이 이루어지지 않은 냉각수의 비율을 증발 효율로 정의하고, 1차원 해석에서 임의로 95%의 증발 효율을 가정하였다. 실제로 물 분무의 증발효율은 분무되는 물 액적(Water droplet)의 크기, 분무 시 연소 가스 내에서 액적 분포의 균일성, 연소가스의 흐름 방향과 냉각수 분무 방향 등의 요소에 의해 결정되나, 본 연구는 연소기 리그 시험장치 구축의 설계 근거를 확보하기 위한 1차원 해석 단계로 상세한 분무 특성이 결정되어 있지 않으므로 증발 효율을 임의의 값으

로 가정한다. 증발효율(η_{vap})은 분무된 전체 냉각수 중 연소가스와의 혼합 과정에서 증발된 냉각수의 질량 유량의 비로 정의 된다.

$$\eta_{vap} = \frac{W_{vaporized\ water}}{W_{injected\ water}} \quad (1)$$

이 때, 증발되지 않은 냉각수는 집수조에서 회수되고, 50°C까지 가열된다고 가정하였다.

물 분무 냉각 특성은 위에서 언급한 해석 조건으로부터 예측된다. 이 때, 물 분무를 이용한 연소가스 냉각 해석에서 적용한 가정은 다음과 같다. 연소가스와 분무되는 냉각수의 특성은 1차원 정상상태(Steady state)이다. 연소기 배기 덕트 벽면은 단열조건으로 가정하고, 물 분무 냉각에 대한 에너지 보존은 연소가스와 분무되는 냉각수를 기준으로 해석한다. 또한, 연소가스와 냉각수의 혼합 정도는 증발효율로 정의하고, 연소기 배기 덕트의 길이 효과는 해석에서 배제하였다. 연소 가스로 증발한 냉각수는 증기의 형태로 균일하게 연소 가스 내에 분포되어 있다고 가정한다.

4. 물 분무 냉각 1차원 해석 방법

물 분무(Water spray)를 이용한 연소 가스 냉각 1차원 해석은 보존식과 포화수증기 특성을 이용한다. 1차원 해석을 시작하기 위한 연소 가스와 냉각수의 조건은 3절 '물 분무 냉각 해석 조건 및 가정'에서 기술하였다(@). 물 분무 냉각 해석에서는 고온의 연소 가스와 냉각수의 혼합 과정에서 냉각수의 기화(Vaporization)로 물의 상변화(Phase change)가 일어나고, 이 과정에서 물의 잠열(Latent heat)을 연소가스 냉각에 이용한다. 이 때, 1차원 해석에서는 혼합 및 냉각 과정에서 공기(Air)의 질유량은 일정하며, 물은 오직 증기로의 상변화만이 이루어진다고 가정한다.

$$W_{air,1} = W_{air,2} \quad (2)$$

$$W_{w,1} = W_{v,2} + W_{w,2} \quad (3)$$

Table 1. Analysis conditions of combustion gas and injected water.

	P _t (bar)	T _t (K)	W (kg/s)
Combustion gas	12	1600	25
Injected Water	-	293.15 (=20 °C)	1 ~ 30

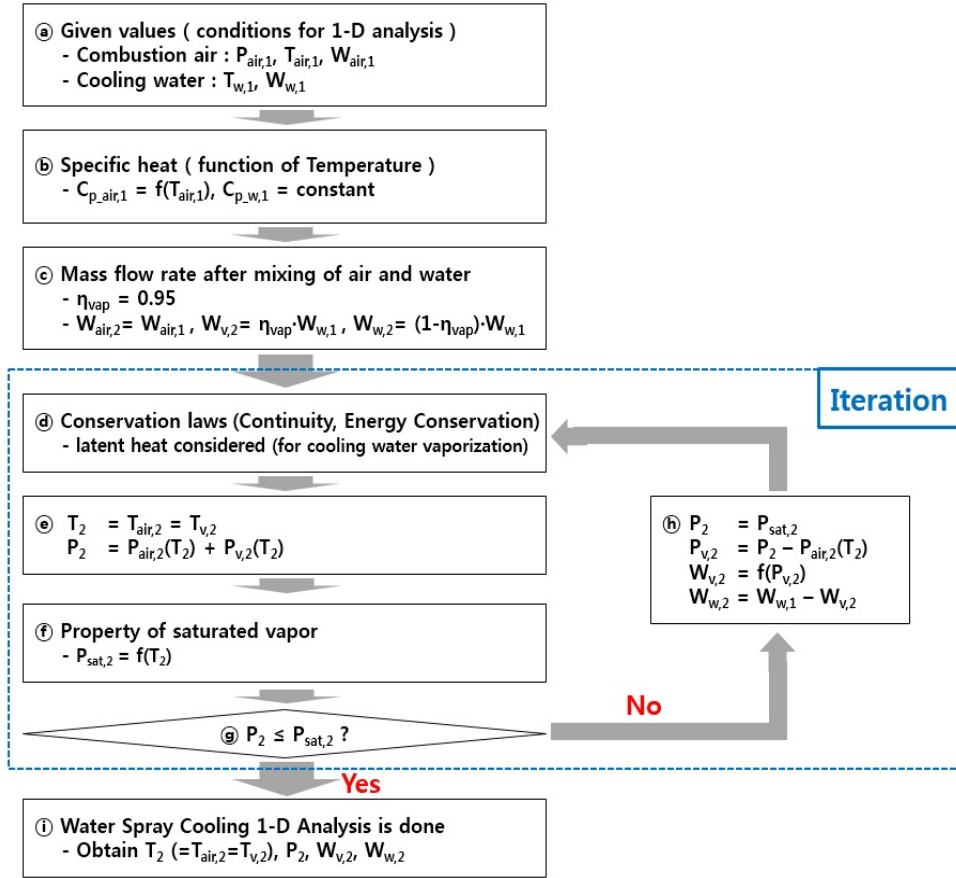


Fig. 2 Flow chart of water spray cooling 1-D analysis.

물 분무 냉각 해석에서 공기와 증기의 비열 (Specific heat)은 온도의 함수이며[7], 증발하는 냉각수의 질유량은 증발효율(η_{vap})을 이용하여 결정한다(b), c). 이 때, 증발한 냉각수는 증기로 상(Phase)이 변하고 증기 압력(Vapor pressure)은 공기와 증기의 질량비를 기준으로 임의로 결정한다. 혼합 및 냉각 과정 전후의 공기, 증기, 물의 질유량과 비열이 정해지면, 연속방정식과 에너지 보존법칙을 이용하여 냉각 후의 연소 가스 온도(T_2)와 연소가스 온도에 대응하는 연소 가스의 압력(P_2)을 얻는다(d), e).

$$W_{air,1} + W_{w,1} = W_{air,2} + W_{v,2} + W_{w,2} \quad (4)$$

$$H_{air,1} + H_{w,1} = H_{air,2} + H_{v,2} + H_{w,2} \quad (5)$$

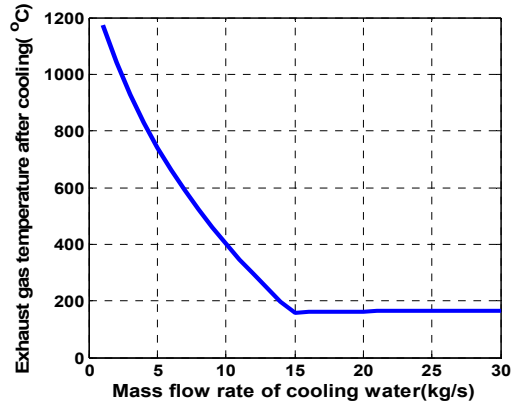
$$T_2 = \frac{(H_{air,1} + H_{w,1})}{(W_{air,2}C_{p,air,2} + W_{v,2}C_{p,v,2} + W_{w,2}C_{p,w,2})} \quad (6)$$

포화수증기압($P_{sat,2}$)은 연소 가스 온도의 함수로 포화증기특성을 이용하여 결정한다(i). 연소 가스의 온도에 따른 포화수증기압은 수증기표에 나열된 데이터베이스로부터 관계식을 도출하여 본 연구에 적용하였다[7]. 이 때, 앞서 예측한 연소 가스의 압력이 포화수증기압보다 작을 경우에는 해석 결과가 타당하나, 연소가스의 압력이 포화증기압보다 클 경우에는 연소 가스에 포함된 증기의 응축(Condensing)이 일어나므로, 이를 고려하여 재해석을 수행한다(g). 이 때, 연소 가스의 압력은 포화증기압으로 하고 이를 기준으로 증기압력($P_{v,2}$), 증기 질유량($W_{v,2}$), 물의 질유

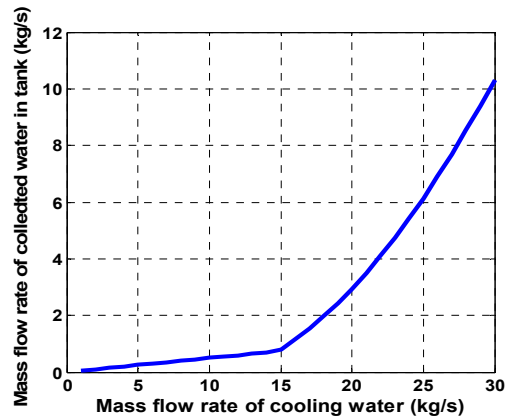
량($W_{w,2}$)을 결정한다(㉞). 이와 같이 결정된 증기와 물의 질유량을 기준으로 연속방정식과 에너지 보존법칙으로부터 수정된 공기 온도와 수정된 포화수증기압을 결정하고, 혼합·냉각 후의 공기압력과 비교하여 냉각된 연소 가스의 압력이 주어진 온도에서의 포화수증기압과 일치할 때까지 재해석(Iteration)을 반복한다(㉜~㉞). 이러한 재해석 과정을 거쳐서 타당한 연소 가스의 압력과 포화 수증기압이 도출되면 물 분무 냉각의 1차원 해석이 끝나고, 연소 가스의 온도와 압력, 냉각 후 배출되는 물의 질유량을 예측할 수 있다(㉟). 물 분무를 이용한 연소 가스 냉각의 1차원 해석을 수행하는 일련의 과정은 용이한 이해를 위해 Fig. 2에 해석흐름도(Flow chart)로 도시하였다.

5. 물 분무 냉각 1차원 해석 결과

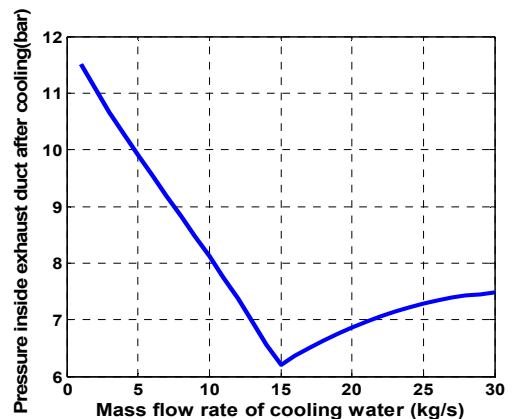
물 분무(Water spray)를 이용한 연소가스 냉각 1차원 해석 결과는 연소 가스에 분무되는 냉각수 유량 1 ~ 30 kg/s의 범위에 대해 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 연소 가스에 분무되는 냉각수 유량 변화에 따른 배출되는 연소 가스의 온도 변화를 보여준다. 냉각 후 연소 가스의 온도는 냉각수의 유량이 15 kg/s까지 증가함에 따라 급격히 감소하여 탁월한 냉각 성능을 보이며, 냉각수 유량이 15 kg/s일 때 연소 가스는 1327℃에서 160℃로 냉각된다. 그러나 연소 가스는 160℃에서 15 kg/s 이상의 냉각수를 투입하여도 더 이상 낮아지지 않는다. 이러한 현상이 1차원 해석에서 발견되는 이유는 160℃가 연소 가스의 비등점이기 때문이다. 즉, 냉각수 유량이 15 kg/s 까지 증가할 때는 대부분의 냉각수가 증발하고, 증발에 필요한 잠열을 고온의 연소 가스로부터 흡수하여 연소 가스를 급격히 냉각시켰으나, 비등점에 도달한 이후에는 냉각수의 증발과 동시에 연소 가스에 포함된 수증기의 응축이 발생하므로 비등점에 도달한 이후로는 냉각수 유량 증가에 따른 연소 가스 온도의 변화가 미미하다.



(a) Exhaust gas temperature after water spray cooling



(b) Mass flow rate of collected water in water tank after water spray cooling



(c) Pressure inside exhaust duct after water spray cooling

Fig. 3 Results of water spray cooling 1-D analysis.

Fig. 3(b)는 냉각수의 유량이 변할 때, 집수조에서 회수되는 물의 유량을 보여준다. 회수되는 물의 유량은 분무되는 냉각수의 유량이 15 kg/s 까지 증가할 때에는 점차 증가하는 경향을 보이거나, 분무되는 냉각수 유량이 15 kg/s보다 많아질 경우 연소 가스와 혼합 및 냉각 과정을 거친 후 회수되는 냉각수 유량이 급격히 증가한다. 이러한 경향은 앞서 설명한 배출 연소 가스 온도와 밀접한 관련이 있다. 물 분무 냉각 해석에서 분무 냉각수 유량이 15 kg/s 이하일 경우, 회수되는 냉각수는 대부분 연소 가스와의 혼합과정에서 증발하지 못하고 집수조에서 회수되는 물(Water)이며, 해석 조건에서 가정한 증발효율(n_{vap})값이 회수되는 냉각수 유량에 주요한 영향을 끼친다. 그러나 분무 냉각수 유량이 15 kg/s 이상일 경우에는 연소 가스의 온도가 비등점에 도달하여, 15 kg/s를 기준으로 추가적으로 분무된 냉각수는 연소가스로 증발하는 동시에 연소가스에 포함된 수증기가 응축되어 배출되므로 집수조로 배출되는 냉각수의 유량이 급격히 증가한다. 실제 연소기 시험 리그(Rig)를 구축할 때, 연소 가스와의 혼합/냉각 과정 후에 집수조에 회수되는 냉각수의 유량이 과도하게 증가할 경우 집수조의 용량이 커져야만 하므로, 물 분무 냉각을 통해 요구되는 조건의 배출가스의 온도를 만족시킬 수 있으면 회수 냉각수의 유량은 적게 하는 것이 시험 리그를 구축하는 데 있어서 유리하다.

Fig. 3(c)는 고온의 연소 가스에 분무되는 냉각수 유량 변화에 따른 연소기 배기 덕트 내부 압력을 해석한 결과이다. 배기 덕트 내부 압력은 분무되는 냉각수 유량 15 kg/s를 기준으로 하여, 분무되는 냉각수 유량이 증가할 때 1)냉각수 분무량이 15 kg/s 이하에서는 급격히 배기덕트의 압력이 작아지며, 2)냉각수 분무량이 15kg/s 이상에서는 점차적으로 배기덕트의 압력이 증가한다. 이와 같이 분무 냉각수 유량이 변할 때, 배기 덕트 내부의 압력 변화 경향이 바뀌는 것은 앞서 설명한 비등점의 특성으로 설명이 가능하다. 비등점에 도달하기까지 분무되는 냉각수는 대부분이 고온의 연소 가스 냉각에 참여하므로,

냉각수 유량이 증가함에 따라 연소 가스의 온도가 급격히 낮아지고, 결과적으로 배기덕트 내부의 연소 가스 압력이 작아진다. 반대로 비등점에 도달한 이후에는 냉각수 유량이 증가하여도 연소 가스의 온도는 거의 변화가 없지만, 추가되는 냉각수의 일부는 증발하여 증기압력을 증가시키므로 배기덕트 내부 압력이 점진적으로 증가한다. 연소기 시험장치 구축 시 안정성 및 소음 저감을 위해 지나치게 높은 배기가스 압력은 회피해야 하므로, 1차원 해석 결과는 적절한 배기덕트 내부 압력을 결정하는데 도움을 준다.

물 분무 냉각 1차원 해석은 냉각 성능과 배출 가스 특성에 대한 예측을 가능케 하였으며, 연소기 시험 장치 구축 시 연소가스 냉각 성능을 만족하면서 회수되는 냉각수 유량과 배기덕트 내부압력을 적절히 낮출 수 있는 분무 냉각수 유량을 15 kg/s 로 제시하였다.

6. 결 론

물 분무(Water spray)를 이용한 연소가스 냉각 1차원 해석은 연소기 시험 장치 중 냉각 장치 구축에 대한 설계 근거를 확보하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서는 연소 가스 냉각을 위한 물 분무 방식의 효율성을 해석적으로 조사하였다. 물 분무 냉각 1차원 해석은 연속방정식과 에너지 보존법칙을 근거로 해석을 수행하였으며, 정확한 냉각 특성 예측을 위해 분무된 냉각수의 상변화(Phase change)와 포화증기특성을 고려하였다. 이와 같은 일련의 해석 과정은 타당한 결과를 획득할 때 까지 반복적으로 수행되었다(Iteration). 물 분무 냉각 1차원 해석으로부터 고온의 연소가스의 냉각 성능을 만족시키며, 냉각 과정을 거친 후 회수되는 물의 유량과 배기 덕트 내부의 압력을 줄일 수 있는 최적의 냉각수 분무량을 예측할 수 있었다. 그리고 물 분무 냉각 시 최적의 냉각수 분무량이 도출되는 주요 인이 연소가스의 비등점 특성임을 해석적 방법을 통해 이해하였다. 1차원 해석을 이용하여 도출한 결과는 성능 시험의 수행 이전에 개략적인

냉각 장치 성능의 파악을 가능케 하였으며, 시험 장치 구축 시 설계 근거를 제시해 주었다.

References

1. Adam, P.W. and Norris, J.W., "Advanced Jet Engine Combustor Test Facility," NASA TN D-6030, 1970.
2. Westergaard, V. and Fife, J.A., , "Flue Gas Cooling," *Proceedings of 1964 ASME Incinerator Conference*, New York, N.Y., U.S.A., May 1964.
3. Pelton, J.M., "An Analytical Model for Predicting the Performance of an Exhaust Gas Cooling System," AEDC-TR-71-194, 1971.
4. Pelton, J.M. and Willbanks, C.E., "Analytical Model of an Exhaust Gas Cooling System Employing Liquid Injection," AEDC-TR-71-60, 1971.
5. Kachhwaha, S.S., DHAR, P.L. and Kale, S.R., "Experimental Studies and Numerical Simulation of Evaporative Cooling of Air with a Water Spray - I. Horizontal Parallel Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 2, pp. 447-464, 1997.
6. Kachhwaha, S.S., DHAR, P.L. and Kale, S.R., "Experimental Studies and Numerical Simulation of Evaporative Cooling of Air with a Water Spray - II. Horizontal Counter Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 2, pp. 465-474, 1997.
7. Ro, S.T., *Thermal Engineering*, 3rd ed., Munundang, Seoul, Republic of Korea, 2001.