

# 고온 연소가스에 노출되는 디퓨저의 복합 열전달량 계산

진상욱\*<sup>†</sup> · 나재정\* · 이상호\* · 이규준\* · 임진식\* · 김성돈\*\*

## Analysis of Conjugated Heat Transfer for the Diffuser Exposed to Hot Combustion Gas

Sangwook Jin\*<sup>†</sup> · Jae-Jung Na\* · Sang-Ho Rhe\* · Kyu-Jun Lee\* · Jin-Shik Lim\* · Sung-Don Kim\*\*

### ABSTRACT

Analysis of conjugated heat transfer has been conducted for the diffuser exposed to hot combustion gas to design the mechanical durability in high temperature. All the heat transfer means, conduction, convection and radiation have been considered to calculate the total heat flux from hot gas to diffuser surface. The calculation has been implemented by two kinds of methods. One thing is one dimensional method based on empirical equations. The other is CFD(Computational Fluid Dynamics) axisymmetric calculation containing  $k-\omega$  SST(Shear Stress Transport) turbulent model and DO(Discrete Ordinate) radiation model. The derived results of two methods have compared and showed similar values. From this result, the amount of cooling water and the dimension of water cooling channel were decided.

### 초 록

고온의 연소가스에 노출되는 디퓨저 냉각에 필요한 열량을 계산하였다. 디퓨저 내부는 공기와 혼합된 연소가스가 흐르고 디퓨저 벽체는 채널로 구성된 공간에 물이 흐르도록 되어 있다. 디퓨저 구조물과 유체 간에 또는 유체 자체적인 열전달과 구조물 내부의 열전달 현상은 복합적인 형태로 나타나는데 고온에서 작동하는 점을 고려하여 복사, 대류, 전도 모두를 적용 하였다. 열전달량 계산은 경험식에 근거한 1차원 해석과 CFD 해석의 2가지 방법으로 수행하였다. 1차원 해석은 경험식을 통해 얻어진 결과를 적용하여 열전달량을 산출하였고, CFD 해석은 DO 복사 열전달 모델을 적용하여 계산하였으며, 계산의 타당성을 검증하기 위하여 두 방법을 비교 하였다. 총 열전달량의 차이는 1% 미만으로 거의 같았으나, 1차원 계산은 열전달 모델의 단순화로 디퓨저 입구에서의 순환영역을 구현하지 못하여 전체적인 열전달량 분포에서는 차이를 보였다. 디퓨저의 안정성을 확보하기 위한 냉각수 용량은 2가지 계산 결과를 조합하여 각 구간별로 최대 열전달량을 근거로 도출하였다.

Key Words: Diffuser(디퓨저), Conjugated Heat Transfer(복합 열전달), Radiation(복사)

\* 국방과학연구소

\*\* (주)한화

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: engine@add.re.kr

디퓨저는 면적비를 달리하여 압축 효과를 내는 배관을 말한다. 유체가 가지고 있는 운동 에너지를 정적에너지로 바꾸어 정압을 높이는 역할을 하는데, 저압 모의용 시험 장치에 쓰이는 디퓨저는 배기가스의 압력을 회복시켜 대기로의 배출을 쉽게 한다.

고온의 배기가스에 노출되는 디퓨저는 단순히 디퓨저 자체가 가져야할 압력 회복 성능뿐만 아니라 고온으로부터 구조물을 보호하기 위한 자체 냉각 장치도 갖추어야 한다. 일반적으로 추진 기관으로부터 방출되는 배기가스는 유속이 빠르며 고온이다. 따라서 총 열전달량 계산에는 대류에 의한 열전달뿐만 아니라, 복사에 의한 열전달량도 필연적으로 고려해야 한다. 비슷한 유동 현상에 대한 해석 연구는 신재철 등[1]이 수행한 로켓 플룸에서의 복사 열전달 계산과 최훈기 등[2]에 의해 수행된 열풍기 연구 등이 있으나 복사 열전달 계산에 있어 전자는 Rosseland 모델을 후자는 Monte Carlo 모델을 사용하여 본 연구에 이용된 DO(구종좌표, Discrete Ordinate) 모델과는 다르다. 또한 수치해석을 이용한 계산 결과만 제시하고 있어 실제 물리적으로 타당한 값인지 여부를 확인하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 냉각 채널이 구성된 디퓨저에 대해 복사 열전달이 고려된 CFD 해석 방법을 이용하여 전체 열전달 계산을 수행하고 그 계산 결과를 1차원 경험식 해석 결과와 비교하여 계산의 타당성을 확보하였다.

## 2. 디퓨저 개요

### 2.1 디퓨저 형상

Figure 1(좌)은 냉각이 필요한 디퓨저의 형상을 나타낸 것이다. 디퓨저는 크게 직선 형태로 이루어진 실린더 구간과 단면적이 증가하는 정도에 따라 천이구간 1(transition 1), 천이구간 2(transition 2)로 나뉘었다. 실제 디퓨저의 형상은 Fig. 1(우)과 같이 spiral flow type으로, 제작에 어려움이 따르는 하나 동일 배관에 대해서는 비교적 균일한 냉각 성능이 보장되고 구조

강도도 우수하다.

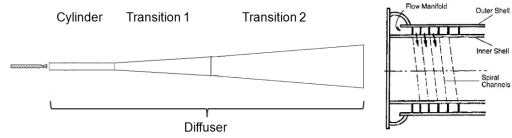


Fig. 1 Shape of Diffuser

### 2.2 디퓨저 설계 조건

디퓨저의 열 설계 조건은 최대 유량 대비 48%의 연소 공기가 디퓨저로 유입되는 경우이다. 배기가스의 온도는 케로신(Kerosene) 연료가 이상적으로 연소한 경우라고 가정하였으며 디퓨저의 출구 압력은 대기압으로 두었다. 디퓨저의 냉각 채널을 통해 흐르는 물의 온도는 유입시 33°C 유출시 85°C로 설정되어 있으며 압력은 4 bar로 유지된다.

## 3. 열해석 모델

### 3.1 1차원 열전달 모델

추진기관의 노즐에서 분사되는 배기가스와 테스트 셀에서 유입되는 공기가 완벽하게 섞인 상태로 혼합된 것으로 가정하였다.

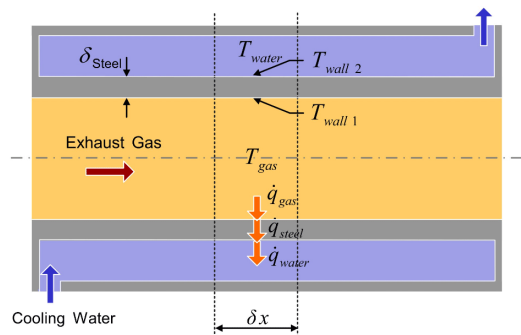


Fig. 2 1-D Heat Transfer Model

Figure 2는 디퓨저 내부에서 외부의 냉각 채널로 열전달이 이루어지는 상태를 표현한 그림이다. 두께  $\delta$ 인 강관 내부로 배기가스가 흐르고 외

부는 Fig. 1(우)의 냉각수 채널을 단순화하여 적용하였다. 냉각 채널의 외부는 지표면의 표준 대기 조건에서의 자연 대류만 고려되므로 내부의 고온 기체와 물에 의한 열전달량에 비해 대단히 낮은 양이므로 계산 모델에서 제외하였다.

대류열전달은 Incropera[3] 문헌을 참고하여 계산하였으며 복사 열전달은 Hotel, Sarofim[4] 문헌을 참고하여 계산하였다. 자세한 내용은 지면 관계상 생략한다.

### 3.2 1차원 열전달 모델 계산 절차

주어진 배기가스 및 냉각수의 온도에 대한 디퓨저 벽면온도의 결정과 열전달량 결정 절차를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 가정된 디퓨저 벽면에서의 온도로 열전달량을 결정하고 배기가스에서 디퓨저 내벽으로의 열전달량과 벽면을 통한 열전달량 그리고 냉각수 채널로의 열전달량을 비교한다.

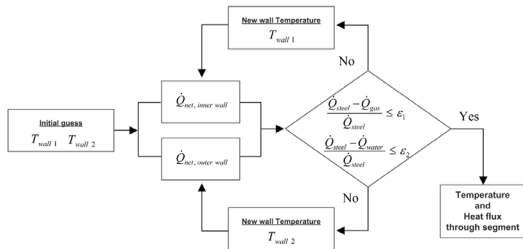


Fig. 3 Procedure of Temperature Set

디퓨저 벽면을 통한 열전달량은 동일하여야 하며 온도 설정 값에 의한 열전달량의 error 값은  $10^{-5}$ 을 만족하도록 반복계산을 수행한다. 벽면 경계에서의 온도 값 재설정 방법은 다음과 같이 각각의 경계에서의 열전달량을 기준으로 마련하였다.

최종적으로 내벽면 온도 재설정을 위한 방정식은 식 (1)~(2)와 같으며 Newton-Rhapon법에 의해 얻어진다.

$$\left(D + \alpha\right) T_{wall}^4 + \left(E + \frac{A^2}{B}\right) T_{wall} = RHS \quad (1)$$

$$A = \frac{\kappa A_{steel}}{\delta_{steel}}, \quad B = C - A, \quad C = -h_{water} A_{water},$$

$$D = \sigma A_{gas}, \quad E = A + F, \quad F = h_{gas} A_{gas}$$

$$RHS = \frac{A}{B} T_{water} + FT_{gas} + \epsilon DT_{gas}^4 \quad (2)$$

$$T_{wall2} = -\frac{A}{B} T_{wall1} + \frac{C}{B} T_{water}$$

### 3.3 CFD 해석에 의한 냉각 용량 계산

수치해석은 상용 CFD tool인 Fluent 6.3을 이용하여 수행되었다. 2D로 구성된 정형 격자(Fig. 4)를 축대칭으로 압축성, 점성, 복사를 고려하여 계산하였다. 난류 모델은 Menter[5]의  $k-\omega$  SST 모델을, 복사는 정확도가 높은 DO(구종좌표, Discrete Ordinate)모델을 적용하였다. 전체 격자는  $y+$  3이하가 되도록 하였고, 적응 격자(adaptive mesh)를 적용하여 압력구배가 큰 영역에서는 격자수를 증가 시켰다. 복사 해석의 정확도를 위해 극각, 방위각을 각각 5로 두었고 각각에 대한 화소는  $3 \times 3$ 으로 하였다.

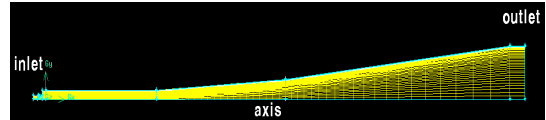


Fig 4. grid

## 4. 해석 결과

Figure 5는 디퓨저 벽면에서의 열전달량을 1차원, CFD 계산 결과에 대해 복사, 대류, 대류+복사의 형태로 나타낸 것이다. 초기 실린더 구간에서 큰 차이를 보이거나 천이 구간 1, 2에서는 차이가 크지 않다. 전체 열전달량은 1차원 계산에서 54.1MW, CFD 계산에서 53.6MW로 0.5MW의 차이를 보인다. 이 차이 값은 전체 열전달량 대비 0.92 %로 두 계산 결과는 거의 같다고 볼 수 있다.

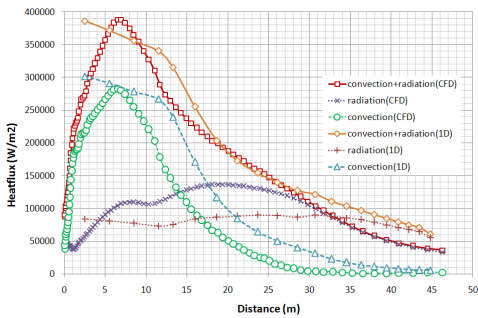


Fig. 5 Comparison of Heat Flux

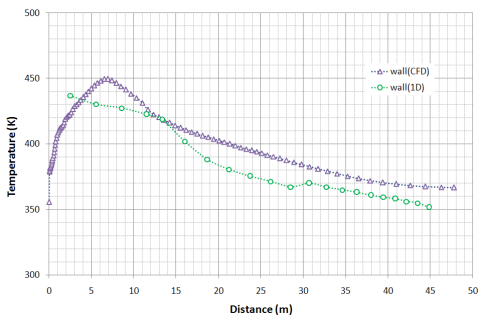


Fig. 6 Distribution of Surface Temperature

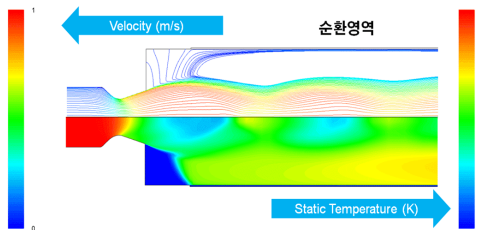


Fig. 7 Re-circulation in Inlet Region

Figure 6은 내부 표면 온도 분포를 나타낸 것이다. 초기 구간의 표면 온도 차이는 시험부 냉각 공기와 연소가스의 혼합의 모사 가능 여부로 설명될 수 있고, 초기 이후의 구간에서 표면 온도 차이는 해석 절차에서 물 온도 설정의 차이에 기인한 것으로 설명된다. Fig. 7은 디퓨저 초기 구간에서 냉각 공기와 연소가스의 속도 차이로 혼합의 정도가 균일하지 못하고 재순환 영역을 나타내고 있음을 보이는데, 이 영역은 실린더 구간 전영역에서 나타난다. 이로 인해 압력 회복

되기 전까지 디퓨저 표면에서의 낮은 열유속 구간이 형성된다.

## 5. 결 론

고온의 연소가스에 노출되는 디퓨저 구조물 냉각에 필요한 열량 산출을 1차원, CFD 해석의 두 가지 방법으로 수행하였으며, 열전달량을 바탕으로 도출된 냉각수량을 도출하였다. 해석 결과, 디퓨저 표면 열유속과 내부 온도 모두 비슷한 분포 경향을 보였다. 큰 차이점은 1차원 해석에서의 디퓨저 초기 구간의 간략화로 인해 순환 영역이 나타나지 않는다는 점이었고, 그로 인해 초기 구간에서의 열전달 분포와 온도에 있어 차이를 보였다.

본 연구를 바탕으로 순환 영역의 정량화, 속도 차이가 큰 영역에서의 블록화 등을 1차원 해석에 적용한다면 디퓨저 설계에 보다 효과적으로 응용 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 신재철, 최정열, 최환석, "평형화학반응과 복사열전달을 고려한 로켓 플룸 유동 해석," 한국전산유체공학회 학술대회논문집, 2004, pp. 146~153
2. 최훈기, 유근중, 김인호, "근적외선 열풍기의 복합열전달에 관한 수치적 연구," 한국전산유체공학회지, 제12권, 제4호, 2007, pp. 7~13
3. Frank R. Incropera, David P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, 4th Edition, John Wiley & Sons, 2001
4. H. C. Hottel, A. F. Sarofim, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill Book Company, 1967
5. Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 1598-1605, August 1994.