

高温 高速 노즐部位에서의 熱傳達

張 太 鎬

<홍릉기계공업회사>

1. 머리 말

최근 산업의 발달에 따라 고온 고속노즐에서 일어나는 열전달에 대한 해석 및 실험등이 진행되어 왔으나 우리나라는 물론, 미국, 불란서 등 선진국에서도 1957년에 발표된 D.R. Bartz⁽¹⁾의 식이 통용되고 있다.

이보다 앞서 노즐 열전달 해석은 난류관의 완전 전개된 유동으로 가정한 McAdams⁽²⁾의 시도가 있었다. 그 후 Sibulkin⁽³⁾과 Bartz⁽⁴⁾가 처음으로 운동량과 에너지 적분식을 이용하여 경계층 유동으로서의 노즐 열전달 문제를 풀기 시작했으며 이는 실제의 노즐 유동은 완전 전개된 유동으로 볼 수 없기 때문에 McAdams 식보다는 향상된 것이다. Bartz는 본 고에서 벽면온도와 정체온도비, T_w/T_0 , 그리고 온도경계층과 속도 경계층 두께의 비, Δ/δ 는 상호의존 관계에 있으나 이들 비의 값을 초기조건으로 일정한 값을 주고 2개의 독립된 방정식을 풀어서 해결하였다.

현재 실제로 사용되고 있는 Bartz의 식은 국부 열전달 계수는 국부 질량 유동율에 강한 함수라는 것에 근거를 두고 전개된 것이다. 그후 이 Bartz 식에 대한 정확도를 조사하기 위한 여러 실험들이 시도되었다. Kolozsi⁽⁵⁾가 정체압력 225와 370 psia, 정체온도 1100~1200°C에서 공기를 이용한 수렴-확산 노즐로 실험한 바에 의하면 Bartz 식에 의한 예측치가 실험결과 보다는 높은 결과를 보였다. 또 Welsh와 Witte⁽⁶⁾는 N₂O₄ Hydragine 을 이용하여 정체압력 80~290 psia 에서 실험하였다. 그 결과 수렴부위에서는

예측식이 실험치보다 낮았고 확산 부위에서는 비교적 잘 맞았다. 또 Welsh와 Harper⁽⁷⁾가 같은 방법으로 면적비를 늘려서 실험하였으나 같은 결과를 얻었다. Bartz가 인용한 실험데이터에서도 수렴부위에서는 실험치가 다소 높은 경향을 보이고 확산부위에서는 다소 낮은 값을 보여 주고 있다.

일반적으로 고온 가스가 유동이 느리면 대류 보다는 복사가, 유동이 빠르면 복사보다는 대류가 주 열전달 방법이며 고속에서는 가스자체의 유동에 의한 점성소산(viscous dissipation)이 일어난다. 이에 본 고에서는 복사열전달과 점성소산을 고려하여 Bartz의 식과, 아울러 인용한 실험 데이터와 비교하였다.

2. 이 론

2.1. 대류 열전달

복사 열전달이나 점성소산 효과를 포함하지 않은 노즐부위에서의 대류 열전달에 대한 식은 참고문헌^(1,9)에 자세히 유도과정이 설명되어 있으므로 여기서는 단지 그 결과식을 인용하여 전개하고자 한다. 국부·대류 열전달 계수 h_c 는

$$h_c = \left[\frac{0.026 \left(\frac{\mu^{0.2} C_p}{P_r^{0.6}} \right)_0 \left(\frac{P_c g}{C_*} \right)^{0.8}}{D_*^{0.2}} \left(\frac{D_*}{\gamma_c^*} \right)^{0.1} \right] \left(\frac{A_*}{A} \right)^{0.9} \sigma \quad (1)$$

이며 대괄호안의 식은 전 노즐을 통하여 상수이다. 여기서 μ 는 점성계수 C_p 는 정압비열 P_r 은 프란틀수 C_* 는 특성속도, P_c 는 연소실 압력, D 는 직경이며 첨자 *는 노즐목 그리고 첨자 0는 정체상태를 의미한다. 따라서 h_c 는 자

부위의 면적비, A_*/A 와 노즐내 경계층 위치에 따라 변하는 특성치들의 변화값에 대한 보정계수 σ 의 함수가 된다. Bartz는 이 특성치들의 값을 정하는 참고온도를 벽면온도와 유체온도의 단순산술평균온도를 택하였다. 그러나 노즐 확산부에서는 높은 Mach 수로 유동이 진행되며 따라서 가스자체의 정성 열소산이 고려되어야 한다. 이를 단열벽면 온도라는 개념을 도입하여 Eckert의 참고온도식을 사용하면, 먼저 단열벽면온도는

$$T_{aw} = T \left[1 + \frac{\gamma_c}{2} (\gamma - 1) M^2 \right] \quad (2)$$

로 표시되며, γ_c 는 복원계수이다. 층류에서 $\gamma_c = \sqrt{Pr}$, 또 난류유동에서 $\gamma_c = \sqrt[3]{Pr}$ 로 알려져 있다. γ 는 비열비, M 은 Mach 수이다. 한편 특성치중 C_p 와 P_r 은 온도에 따라 그 차이가 별로 없으므로 상수로 가정하면

$$\sigma \equiv \left[\left(\frac{\rho_R}{\rho} \right)^{0.8} \left(\frac{\mu_R}{\mu_0} \right)^{0.2} \right] \quad (3)$$

그리고 밀도, ρ 와 점도 μ 는 온도 T 와 $\rho \sim \left(\frac{1}{T}\right)$, $\mu \sim (T)^{0.69}$ 인 관계가 있다. 또 고속에서 Eckert의 참고온도식,

$$T_R = T + 0.5(T_0 - T) + 0.22(T_{aw} - T) \quad (4)$$

이며 Mach 수 20 까지 적용된다.

따라서 식 (2), (4) 및 특성치와 온도관계를 식 (3)에 대입하면 보정계수

$$\sigma = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{T_w}{T_0} + \frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} + 0.22 P_r^{1/3} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \right)^{0.136} \right) \right]^{0.8} / \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{T_w}{T_0} \left(1 - \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right) + 0.22 P_r^{1/3} \left(\frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{0.8} \quad (5)$$

로 표시된다.

2.2. 복사 열전달

연소실에서 연소가 일어나면 고온 교압이 되며 노즐을 통해서 유동한다. 이 때 고온가스와 벽면간의 복사 열전달은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_r = \epsilon \sigma T^4 + \alpha \sigma T_w^4 = \epsilon_{\text{eff}} \sigma (T^4 - T_w^4) \quad (6)$$

이 식을 대류 열전달 형태로 고쳐 쓰면

$$q_r = h_r (T - T_w) \quad (7)$$

이고 식 (6)에서 View Factor는 1로 간주한 것이다.

$$h_r = \epsilon_{\text{eff}} \sigma (T^2 + T_w^2) (T + T_w) \quad (8)$$

로 표시되며 $h = h_c + h_r$ 로 생각할 수 있다.

식 (6)에서 볼 수 있듯이 일정한 벽면 온도하에서 복사 열전달율은 가스온도의 4승에 함수이므로 가스온도에 매우 민감하다. 따라서 가스온도를 수렴-확산노즐에서 등엔트로피 과정으로 생각하면 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (9)$$

따라서 벽면온도, T_w 를 상수로 가정하면 연소실에서의 복사열전달율과 노즐부위에서의 복사열전달율 비를 알 수 있다.

$$\frac{q_r}{q_{ca}} = \frac{T^4 - T_w^4}{T_0^4 - T_w^4} = \left[\frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \right]^4 - \left(\frac{T_w}{T_0} \right)^4 / \left[1 - \left(\frac{T_w}{T_0} \right)^4 \right] \quad (10)$$

여기서 복사율은 일정한 것으로 간주하였다. 한편 Mach 수와 노즐내 임의의 위치에서의 면적과 노즐목 면적과의 비 사이에는 다음과 같은 관계식이 있다.

$$A/A_* = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{\gamma+1} \right) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (11)$$

그러므로 식 (10), (11)을 이용하면 주어진 비열비에서 각 위치에 따라 복사열전달율에 대한 변화를 알 수 있으며, 전체 열전달에 대한 관계도 알게 된다. (일정한 벽면온도하에서)

3. 수치적 고찰 및 해석

3.1. 보정계수 $[\sigma(A/A_*)^{0.9}]$

2.1절에서 식 (5)로 표시된 특성치 보정계수와 문헌 (1)에서 Bartz가 사용한 보정계수와의 관계를 비열비, $\gamma=1.2, 1.3$ 그리고 1.4에 대하여 정체온도 및 벽면온도 비에 따라서 비교하여 보았다.

■ 技術資料

이 특성치 보정계수에 면적변화(A_*/A)^{0.9}를 곱한 보정계수 값을 벽면온도와 정체온도비, T_w/T_0 가 0.2인 경우를 그림 1~3에 표시하였다.

또 T_w/T_0 가 0.6 및 0.8인 경우에 대해서는

표 1과 2에 Mach 수 및 비열비에 따라 표시되어 있다.

그림과 표에서 알 수 있듯이 Mach 수가 증가함에 따라 보정계수는 Bartz의 결과보다 작아지고 있다. Mach 수 4를 기준으로 하여 보면 비

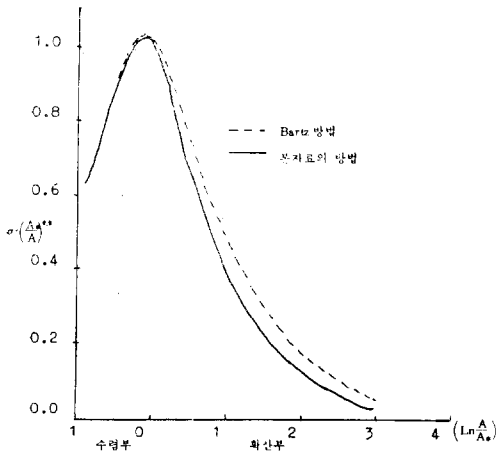


그림 1 노즐위치와 특성치 변화($\gamma=1.2$)

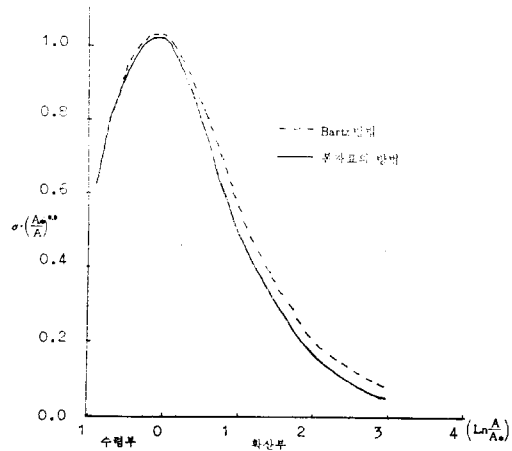


그림 2 노즐위치와 특성치 변화($\gamma=1.3$)

표 1 보정계수 $[\sigma(A_*/A)^{0.9}]$ 의 대비표($T_w/T_0=0.6$)

비열비		$\gamma=1.2$		$\gamma=1.3$		$\gamma=1.4$	
온도비	Mach 수	해	실	해	실	해	실
T_w/T_0	M	치	Bartz	치	Bartz	치	Bartz
.600	.250	.516	.518	.520	.522	.523	.526
.600	.500	.869	.876	.860	.877	.867	.878
.600	.750	1.061	1.076	1.047	1.067	1.034	1.058
.600	1.000	1.099	1.122	1.071	1.103	1.045	1.084
.600	1.250	1.020	1.051	.984	1.026	.951	1.003
.600	1.500	.873	.909	.838	.887	.807	.865
.600	1.750	.703	.740	.676	.726	.651	.712
.600	2.000	.539	.575	.525	.572	.509	.567
.600	2.250	.399	.431	.396	.439	.390	.442
.600	2.500	.288	.315	.293	.330	.295	.340
.600	2.750	.203	.225	.215	.246	.221	.259
.600	3.000	.142	.159	.156	.132	.166	.198
.600	3.250	.098	.111	.114	.134	.125	.150
.600	3.500	.067	.077	.083	.098	.094	.115
.600	3.750	.046	.054	.060	.073	.071	.088
.600	4.000	.032	.037	.044	.054	.054	.068
.600	4.250	.022	.026	.032	.040	.041	.052
.600	4.500	.015	.018	.024	.030	.032	.041

표 2 보정계수 $[\sigma(A_w/A)^{0.9}]$ 의 대비표($T_w/T_0=0.8$)

비열비		$\gamma=1.2$		$\gamma=1.3$		$\gamma=1.4$	
온도비	Mach 수	해 설 치	Bartz	해 설 치	Bartz	해 설 치	Bartz
.800	.250	.477	.478	.480	.482	.484	.486
.800	.500	.804	.808	.802	.808	.801	.809
.800	.750	.980	.990	.967	.981	.954	.972
.800	1.000	1.014	1.031	.987	1.011	.962	.992
.800	1.250	.940	.963	.905	.938	.874	.813
.800	1.500	.803	.831	.770	.807	.739	.784
.800	1.750	.645	.674	.619	.658	.595	.642
.800	2.000	.494	.522	.480	.516	.464	.503
.800	2.250	.365	.390	.361	.394	.355	.394
.800	2.500	.263	.284	.267	.295	.267	.302
.800	2.750	.185	.202	.195	.219	.201	.229
.800	3.000	.129	.142	.142	.161	.150	.174
.800	3.250	.089	.099	.103	.118	.112	.132
.800	3.500	.061	.069	.075	.086	.085	.100
.800	3.750	.042	.047	.054	.064	.064	.076
.800	4.000	.029	.033	.040	.047	.048	.059
.800	4.250	.020	.023	.029	.035	.037	.045
.800	4.000	.013	.016	.022	.026	.029	.035

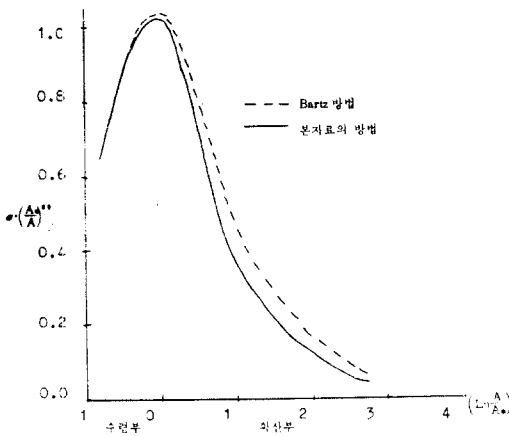


그림 3 노즐위치와 특성치 변화($\gamma=1.4$)

열비 및 온도비에 따라 다르나 그 값은 85%에서 77% 사이로 감소한다. 반면 Mach 수가 1 미만인 경우에는 98% 정도로 별 차이를 나타내지 않고 있다. 이는 예측할 수 있는 바와 같이 수렴부위에서는 Mach 수가 작은 관계로 점선소산

효과가 미미하여 영향이 나타나지 않으나, 확산부위에서는 고속이 되므로 가스 자체의 정성 열소산이 일어나기 때문이다.

3.2. 복사 열전달

복사 열전달율의 위치에 대한 변화는 2.2 절식 (10)과 (11)을 사용하여 연소실내의 복사율을 기준으로 하여 주어진 비열비에서 벽면온도 및 정체온도비, T_w/T_0 가 0.2와 0.8에 대하여 그림 4~6에 표시되어 있다. 그림에서 보듯이 복사 열전달율은 수렴부위에서 감소하기 시작하여 노즐목에서는 연소실에서의 복사 열전달율에 비하여 50%~60%로 감소된다. 이 후 확산부위에서는 급속히 감소된다. 따라서 복사열전달 효과는 연소관 및 수렴부위에서는 무시할 수 없다. 더구나 최근 연소생성물중에 산화알루미늄(Al_2O_3)이 많이 포함된 경우가 많아 이 경우에는 연소가스의 복사율(emissivity)이 0.5 이상으로 되어⁽⁸⁾ 이는 연소관 및 노즐수렴 부위에서의

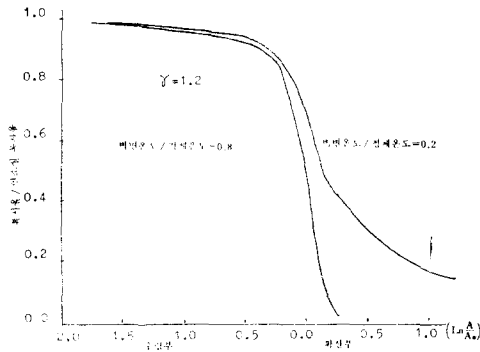


그림 4 노즐위치와 무차원 복사 열전달

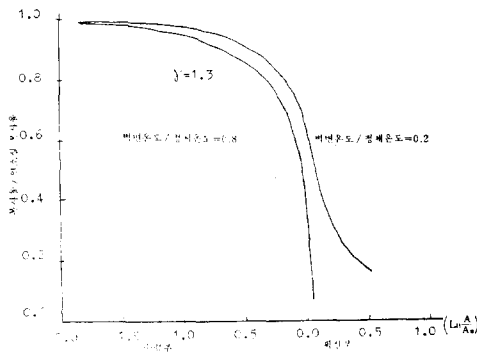


그림 5 노즐위치와 무차원 복사 열전달

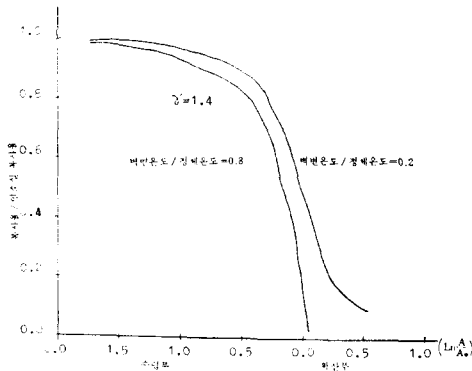


그림 6 노즐위치와 무차원 복사 열전달

대류 열전달과 같은 차수의 크기(order of magnitude)로 나타나고 있다.

이상의 2가지 효과를 고려할 때 수렴 부위에서는 Bartz가 주창한 식보다는 열전달계수가 커지는 효과를 ($h = h_c + h_r$) 갖게 되며 상대적으로 확산 부위에서는 보정계수의 감소로 열전달계수

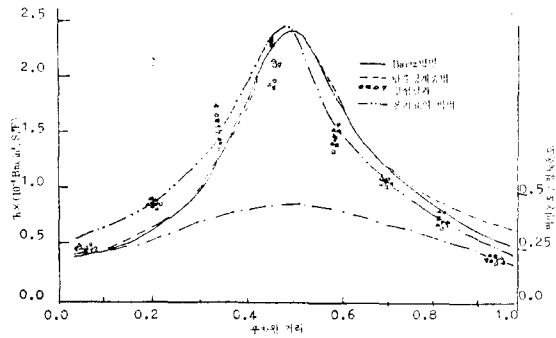


그림 7 열전달 계수의 대비

가 작아진다.

그림 7은 데이타가 인용한 실험 데이타 및 그의 식과 본 고에서 고려된 참고온도를 통한 점성소산 효과와 복사 열전달 효과를 감안한 것과의 비교하여 그린 것이다. 여기서 복사율은 0.2를 택하였다.

복사율 0.2는 저 산화알루미늄 연소생성물시에 이용되는 값이며 실제 실험시의 값은 알 수 없으나 근사치로 추정할 수 있을 것이다.

4. 맺음 말

본 고에서는 일반적으로 노즐 부위 열해석에서 무시되는 복사열전달효과와 점성소산효과를 수치적 모델을 통하여 그 필요성 여부를 조사한 것이며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소실 및 수렴부위에서는 복사열전달효율이 대류열전달효과와 같은 차수의 크기로 나타나고 있어서 고 복사율을 갖는 연소가스에서는 특히 중요하다. 특히 최근에 많이 사용되는 연료에는 연소가스에 산화알루미늄 성분이 증가하는 추세이므로 노즐부위 열해석에는 복사열전달이 차지하는 비중이 커질 것이다.

(2) 노즐의 확산부위에서는 고속으로 인하여 가스자체의 점성소산이 일어나 특성치 보정계수 값이 감소한다. 따라서 Bartz의 예측치 보다는 열전달계수의 값이 적어지고 있다.

(3) 따라서 노즐수렴부위에서는 일반적으로 Bartz의 예상치보다 높고 확산부에서는 낮은 결

과를 얻었던 실험결과와를 비교할 때 고온고속 노즐에서의 열전달해석은 복사 열전달과 점성열 소산을 고려함으로써 정확하게 될 수 있다.

(4) 이상 고려된 실험 데이터와 수치모델의 고찰은 노즐내의 침식이 없는 경우이나 실제의 경우 노즐벽 표면에서 화학적 반응이 일어난다. 그러나 이때 발생될 수 있는 순수한 발한효과는 미미하며 단지 전체적인 단면의 열 해석시 상기에서 예측된 열전달율을 근간으로 화학반응열 및 온도분포를 계산하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) D.R. Bartz, A Simple Equation for Rapid Estimation of Nozzle Convective Heat Transfer Coefficients, *Jet Propulsion* 27(1), pp. 49~51, 1957
- (2) W.H. McAdams, *Heat Transmission*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1954
- (3) M. Silbukin, Heat Transfer to an Incompressible Turbulent Boundary Layer and Estimation of Heat Transfer Coefficients at Supersonic Nozzle Throats, *J. Aeron. Sci.* 23(2), pp. 162~172, 1956
- (4) D.R. Bartz, An Approximation Solution of Compressible Turbulent Boundary Layer Development and Convective Heat Transfer in Convergent-Divergent Nozzles, *Trans ASME*. 77(8), pp. 1235~125, 1955
- (5) J.J. Kolozsi, An Investigation of Heat Transfer Through the Turbulent Boundary Layer in an Axially Symmetric Convergent Divergent Nozzle, Master Thesis, Dept. of Aeron & Astron. Engi., Ohio State Univ., Columbus, Ohio, 1958
- (6) W.E. Jr. Welsh and A.B. Witte, A Comparison of Analytical and Experimental Local Heat Fluxes in Thrust Chambers, *J. Heat Transfer C* 84(1), pp. 19~28, 1962
- (7) A.B. Witte and E.Y. Harper, Experimental Investigation of Heat Transfer Rates in Thrust Chambers, *AIAA J.* 1(2), pp. 443~451, 1963
- (8) B.E. Pearce, Radiative Heat Transfer within a Motor, *J. Spacecraft MAR-Apr.*, pp. 125~128, 1978
- (9) D.R. Bartz, Turbulent Boundary Layer Heat Transfer from Rapidly Accelerating Flow of Combustion Gases and of Heated Air, *Advances in Heat Transfer Vol. 2*, Irvine, T.F., and Hartnett, J.P., eds., Academic Press, New York, 1965
- (10) W.M. Kays and M.E. Crawford, *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, New York, 1980

