

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.3.245

질소 이온 발광 분광법을 이용한 초음속 유동의 기체 온도 측정[§]

신 지 철^{**}

* 울산대학교 항공우주공학과

Gas Temperature Measurement in Supersonic Flows by N₂⁺ Emission Spectroscopy

Jichul Shin^{**}

* Dept. of Aerospace Engineering, Univ. of Ulsan

(Received June 18, 2009 ; Revised January 25, 2010 ; Accepted January 27, 2010)

Key Words: Temperature Measurement(온도 측정), Optical Emission Spectroscopy(광학적 발광 분광법), Supersonic Flow(초음속), DC Discharge(직류 방전)

초록: 초음속 유동에서의 공기 방전에 대한 기체 (회전) 온도를 측정하는 과정이 자세하게 소개되었다. 초음속 유동에서는 직접적인 온도 측정이 어려우므로 질소 분자 이온 스펙트럼의 광학적 발광 분광법을 이용하는 비침투 방식의 측정법이 사용되었다. 질소 분자 이온의 발광 스펙트럼 구조를 이해하기 위하여 발광선의 세기를 나타내는 관계식들에 대한 자세한 설명이 소개되었다. 유도된 발광 스펙트럼의 표현식을 이용하여 질소 이온의 first negative system을 구현하였고 실험으로 측정된 스펙트럼과 비교하였다. 합성 스펙트럼과 측정된 스펙트럼들은 밴드 스펙트럼 전 범위에 걸쳐서 6-8%의 상대오차 이내로 서로 일치함을 보여주었다. 마하 3의 초음속 경계층에서 25 mA의 직류 방전에 의한 기체 온도 분포 곡선을 측정한 결과 온도값이 최대 약 350 K인 선형적인 변화를 보여주었다.

Abstract: The procedure for estimating the gas (rotational) temperature of an air discharge in supersonic flows is presented in detail. Since direct measurement of the temperature in a supersonic flow is difficult, a nonintrusive measurement was performed by optical emission spectroscopy based on the emission spectra of nitrogen molecular ions. A detailed explanation, including the equations for emission line intensity, is presented in order to understand the structure of the emission spectra of nitrogen molecular ions. Using the obtained representation for emission spectrum, a synthetic spectrum of the first negative system of N₂⁺ is obtained, and it is compared with the experimentally measured spectrum. Within a relative error of approximately 6-8% for the overall band spectra, the synthetic and measured spectra agree well. In the case of a 25-mA DC air discharge in a supersonic (Mach 3) flow, the gas temperature profile shows an approximately linear variation and a peak temperature of approximately 350 K.

- 기호설명 -

Ψ : 진동 파동 함수(vibrational wave function)
 $A_{v'}$: 자연적 발광(spontaneous emission)에 대한 Einstein 계수
 δ : Kronecker 델타 함수
 h : Planck 상수, 6.626068×10^{-34} [kg m²/s]
 k : Boltzmann 상수, 1.3807×10^{-23} [J/K]
 I_{em} : 발광선의 세기(emission line intensity)

ν : 전이 주파수(transition frequency)
 $(R_{v'})^2$: 전자-진동 전이 모멘트(electronic-vibrational transition moment)
 $R_e(r)$: 전자 전이 모멘트 함수(electronic transition moment function, ETMF)
 q' : Frank-Condon 지수
 $S_{v'v''}$: 밴드 세기(band strength)
 S : 스핀 양자수(spin quantum number)
 N_o : 상위 상태의 총 입자 밀도(number density)
 $N_{n'}$: 상위 전자 상태의 입자 밀도
 $N_{n'v'}$: 상위 진동 상태의 입자 밀도

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 울산지부 춘계학술대회 (2009. 5. 8., 울산대) 발표논문임

† Corresponding Author, jshin@ulsan.ac.kr

- $N_{v'v''J'}$: 상위 회전 상태의 입자 밀도
 E_e, E_v, E_r : 각각 전자, 진동, 회전 상태의 에너지
 Q_{el}, Q_v, Q_r : 각각 전자, 진동, 회전 상태의 분배함수(partition function)
 T_e, T_v, T_r : 각각 전자온도, 진동온도, 회전온도
 $q_{J'}$: 회전 상태의 축퇴도(degeneracy)
 F : 에너지 항($E = hcF$)
 B_v, D_v : 회전 에너지 상수
 c : 빛의 속도(3×10^8 m/s)
 K : 스핀을 제외한 총 회전 모멘트
 J : 스핀을 고려한 총 회전 모멘트($= K + S$)

1. 서 론

유동에 관한 실험적 연구에 있어서 광학 측정 기법은 오늘날 필수적인 진단 수단 중에 하나이다. 특히 초음속 유동 환경에서 탐침을 직접 유동에 삽입하여 측정하는 침투식(intrusive) 방식은 유동 자체에 변화를 줘서 정확한 측정이 어려울 뿐만 아니라 탐침 진단에서 충격파(shock)가 발생하므로 측정값에 대한 보정이 필요하다. 따라서 비 침투식 진단 기법인 Schlieren 이미징이나 입자영상유속계(PIV),⁽¹⁾ 스펙트럼 등을 사용하게 된다. 이들 비 침투식 진단 기법 중에 기체의 온도를 측정하는 방법으로는 스펙트럼을 관찰하여 간접적으로 온도를 계산하는 발광 분광법(emission spectroscopy)이 있다. 광학적 발광 스펙트럼을 이용한 분광법은 기체 온도뿐만 아니라 회전 온도, 진동 온도 그리고 전자 온도의 측정도 가능하므로 발광의 특성을 파악할 수 있는 지표로 사용할 수 있다. 흔히 사용되는 분자의 종류로는 질소 (N_2, N_2^+) 또는 수산화물(OH) 등이 온도 측정에 많이 활용되는데, 질소의 경우 공기 중에 다량 분포되어 있어 쉽게 스펙트럼을 측정할 수 있고,⁽²⁾ 관련 데이터 또한 많이 축적되어 있어⁽³⁾ 온도 측정에 사용이 용이한 장점이 있다.

발광 스펙트럼을 이용하여 기체의 온도를 측정하는 기법은 이미 많이 알려진 온도 측정 방법 중에 하나이다. 하지만 다수의 경우 상용 프로그램을 사용하거나 비교적 간단하지만 정확도가 떨어지는 Boltzmann 직선을 사용한다. 보다 정확한 온도의 측정을 위해서는 스펙트럼 자체를 합성하여 실험적으로 얻어진 스펙트럼과 비교하여야 하는데 이 과정을 포괄적으로 설명하는 문헌을 찾기는 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 여러 문헌으로부터 습득한

자료들을 바탕으로, 질소의 스펙트럼을 분석하고 합성 스펙트럼을 모사하여 온도를 예측하는 기법에 대하여 상세히 기술함으로써 향후 질소 스펙트럼을 이용하여 온도 측정을 하고자 하는 이들에게 도움이 이 되고자 한다.

2. 스펙트럼의 구성

2.1 발광선 스펙트럼의 세기

스펙트럼을 이용하여 온도 측정을 하고자 할 경우 가장 중요한 것이 원자 또는 분자의 발광선의 세기를 정확하게 예측하는 것이다. 발광은 주어진 고 에너지 상태에서 저 에너지 상태로 안정화(de-excitation)되는 과정에서 발생하는 광자(photon)의 에너지 분출에서 기인하는 물리적 현상인데, 이때 발생하는 발광선의 세기(I_{em})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$I_{em} = N' h \nu' A' . \quad (1)$$

여기서 N' 은 상위 상태의 분자(또는 원자)의 입자 밀도, h 는 Planck 상수, ν' 는 전이 주파수, 그리고 A' 는 Einstein 계수이다. 일반적으로 스펙트럼에서 첨자 '은 상위 에너지 상태를 나타내고 ''은 하위 에너지 상태를 의미한다. 식 (1)에서 Einstein 계수는 전자-진동 전이 모멘트 $((R_e)')$ 와 관련이 있으며 아래의 식으로 표현할 수 있다.⁽⁵⁾

$$A' = \frac{64\pi^4 \nu'^3}{3h} \frac{(2 - \delta_{0, A' + A''})}{(2 - \delta_{0, A'})} (R_e)'^2$$

$$(R_e)'^2 = \left(\int \Psi' R_e(r) \Psi'' dr \right)^2 . \quad (2)$$

여기서 δ 는 Kronecker 델타 ($\delta_{0, A' + A''}$ 에서 $A' + A'' = 0$ 이면 $\delta_{0, A' + A''} = 1$ 이고 $A' + A'' \neq 0$ 이면 0임), r 은 원자핵간의 거리, Ψ' 과 Ψ'' 은 상위 및 하위 에너지 상태의 진동 파동 함수, 그리고 $R_e(r)$ 은 전자 전이 모멘트 함수(ETMF)이다. 이 ETMF가 원자핵간의 거리의 변화에 대한 완만한 함수일 경우에는 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$(R_e)'^2 \cong (R_e(\bar{r}))^2 \left(\int \Psi' \Psi'' dr \right)^2 .$$

여기서 $\left(\int \Psi' \Psi'' dr \right)^2$ 은 Franck-Condon 인자($\equiv q_{v'v''}$)로서 주어진 전자 전이에 있어서의 진동

전이의 세기를 결정한다. v' 과 v'' 은 각각 상위 및 하위 상태의 진동 양자수이다. 이들을 식 (2)에 대입하면

$$A_{v'} = \frac{64\pi^4\nu^3}{3h} \frac{(2 - \delta_{0,A'+A''})}{(2 - \delta_{0,A'})} (R_e(\bar{r}))^2 q_{v'v''} \quad (3)$$

가 된다. 이와 유사한 형태를 가진 계수로 oscillator strength($\equiv f_{v'v''}$)라는 것이 있는데 이는 주로 흡수 과정(absorption process)에 사용되는 것이다.⁽⁶⁾

만약에 주어진 상위 회전 양자수 (J')로부터 전이 가능한 모든 하위 회전 양자수 (J'')로의 전이 과정을 모두 합한다면,

$$\Sigma(R_e)^2 q_{v'v''} = (2 - \delta_{0,A'+A''})(2S' + 1)(R_e)^2 q_{v'v''}$$

가 되며, 이는 전자-진동 전이의 대역 세기(band strength)로 불리며 흔히 $S_{v'v''}$ 로 표현된다. 여기서 $(2S' + 1)$ 은 스핀 다중도(spin multiplicity)이다. 이를 이용하여 Einstein 계수를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$A_{v'} = \frac{64\pi^4\nu^3}{3h} \frac{S_{v'v''}}{(2 - \delta_{0,A'})(2S' + 1)} \quad (4)$$

식 (4)를 (1)에 대입하면

$$I_{em} = \frac{64\pi^4}{3h} \frac{N' h\nu''^4}{(2 - \delta_{0,A'})(2S' + 1)} S_{v'v''} \quad (5)$$

이제는 상위 상태의 총 분자(또는 원자) 입자 밀도를 알면 주어진 상태에서의 발광선 세기를 계산할 수 있다. 상위 상태의 입자 밀도는 Boltzmann 분포에 따라 달라지며 상위 전자, 진동, 회전 상태에 대하여 각각,⁽⁷⁾

$$N_n = \frac{N_o}{Q_{el}} (2 - \delta_{0,A'}) (2S' + 1) \exp(-E_e'/kT_e) \quad (6a)$$

$$N_{n'v'} = \frac{N_n}{Q_v} \exp(-E_v'/kT_v) \quad (6b)$$

$$N_{n'v'J'} = \frac{N_{n'v'}}{Q_r} g_{J'} \Phi_{J'} \exp(-E_r'/kT_r) \quad (6c)$$

로 계산된다. 여기서 N_o , N_n , $N_{n'v'}$, $N_{n'v'J'}$ 는 각각 전체 상위 상태, 전자 상태, 진동 상태, 회전 상태의 입자 밀도를 의미하며, E_e' , T_e , E_v' , T_v , E_r' , T_r 는 각각 전자, 진동, 회전 상태의 에너지 및 온도, 그리고 Q_{el} , Q_v , Q_r 는 각각 전자, 진동, 회전

상태의 분배 함수(partition function)이다. $g_{J'}$ 는 축퇴도(degeneracy)로써 한 에너지 준위에서 존재 가능한 양자 상태의 수를 의미하고, $\Phi_{J'}$ 은 원자 핵 스핀(nuclear spin)에 의한 발광선 세기의 교번(alternation) 현상을 설명하는 것이다. 식 (5)와 (6)들을 조합하면 임의의 전이에 대한 발광 스펙트럼의 세기에 대한 관계식을 얻을 수 있다. 위 식들은 분자(또는 원자)의 종류에 상관없이 적용되는 기본 식들이 되겠다.

2.1 질소 스펙트럼

이 절에서는 앞에서 유도된 발광선의 세기에 대한 표현식(식 (5))을 적용하기 위한 질소의 스펙트럼 구조에 대하여 설명하고자 한다. 흔히 사용되는 질소 스펙트럼은 N_2^+ 대역(band) 스펙트럼 중 391.44 nm에서 427.81 nm에 위치한 first negative system(FNS, $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$)이다. 이는 상위와 하위 상태의 양자 수가 같으며(Σ) 분자 구조는 Hund's case (b)를 따른다.⁽⁴⁾ Fig. 1은 이 시스템에서 전이 가능한 경로를 설명하는 것으로 이는 양자 역학에서의 전이 선택 법칙(selection rule)에 의거한 것이다. 원호 안의 +와 -는 고유 함수(eigenfunction)의 동격(parity)을 의미하고 s와 a는 회전에 따른 분자 구조의 대칭성과 비대칭성을 의미한다. 그림에서 보여 지는 것과 같이 에너지 전이는 두 번째 여기상태(2nd excited state, B)에서 기저상태(ground state, X)로 일어난다. 상위 및 하위의 상태에서 최저 레벨($K=0$)을 제외하고는 2개의 상태가 존재하는데 이는 스핀 양자수(spin quantum number, S)가 1/2이기 때문에 $2S+1 = 2$ 개의 서로 다른 각 운동량(J)을 가진 상태로 존재하는 것이다. 전이 가능한 가지(branch)로는 그림에서와 같이 $P(J-J''=-1)$, $Q(J-J''=0)$, $R(J-J''=+1)$ 이 있으며 Q가지의 경우는 P 또는 R가지들의 형태를 따르기 때문에 실제로 나타나지는 가지들은 R과 P가지들만이 구별 가능하다.

Fig. 1에서 보이는 각각의 상태에서의 분자의 회전 에너지는 에너지 항(F)을 사용하여,

$$F = B_v J(J+1) + (A - B_v) \Lambda^2 - D_v J^2(J+1)^2 \quad (7)$$

으로 표현되며 $E_r = hcF$ 의 관계를 가진다. c 는 빛의 속도를 의미한다. 첫째항은 이원자분자의 강체 회전 에너지를 의미하고, 두 번째 항은 이원자 분자

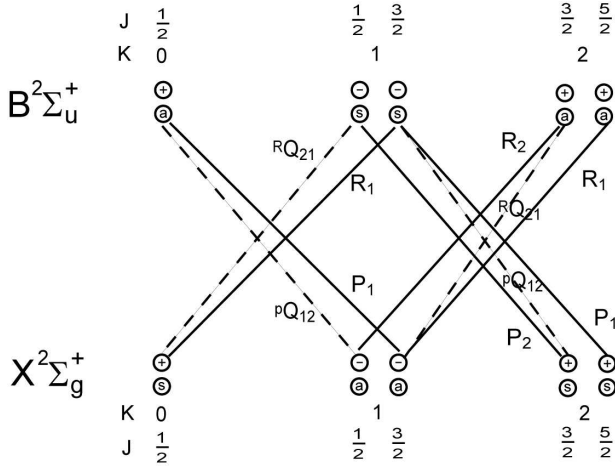


Fig. 1 Transition diagram of N_2^+ first negative system ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$)

의 symmetric top 모델에 대한 보정 항이며 마지막 항은 회전에 의한 원자핵의 벌어짐(stretching) 현상에 대한 보정을 해주는 것이다. 여기서 A 는 전자상태와 관련이 있는 상수이고 B_v 과 D_v 는 진동상태와 관련이 있는 상수들이다. 따라서 회전전이 또는 진동전이 만을 고려할 때에는 $A \times \Lambda^2$ 는 무시하여도 된다. R 과 P 가지들의 전이에 소요되는 회전 에너지 (E_r')는 $E_r' = hc (F' - F'')$ 이며 전이 주파수 (ν')는 $\nu' = E_r'/h$ 이다.

회전 스펙트럼의 발광선의 세기는 식 (6c)와 (7)을 식 (1)에 대입하여 구해지며 다음과 같다.

$$I_{em} \sim \frac{\nu'^4 g_J \Phi_{P'}}{Q_r} \exp^{-hc(F' - F'')/kT_r} \quad (8)$$

여기서 $Q_r = \sum g_J \Phi_{P'} \exp^{-hc(F' - F'')/kT_r}$ 이다. 위의 식 (8)은 회전 온도 (T_r)에 대한 함수이며 이를 이용하여 Fig. 1에서 보여진 각각의 전이에 해당하는 전이 주파수에 따른 발광선의 세기를 주어진 회전 온도에 대하여 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 발광선의 스펙트럼을 실험적으로 얻어진 스펙트럼과 비교하여 일치할 때의 회전 온도가 측정된 기체의 온도가 되겠다.

이온이 아닌 분자 (N_2)를 이용하여 온도 측정을 하고자 할 경우에는 N_2^+ 의 경우와 전이 과정이 다르기 때문에 N_2 에 대한 선택 법칙(selection rule)이 적용된 전이 구조가 Fig. 1의 경우처럼 고려가 되어야 하며, 회전 에너지를 표현하는 관계식 또한 식 (7)과 다르다. 그 외의 과정은 N_2^+ 의

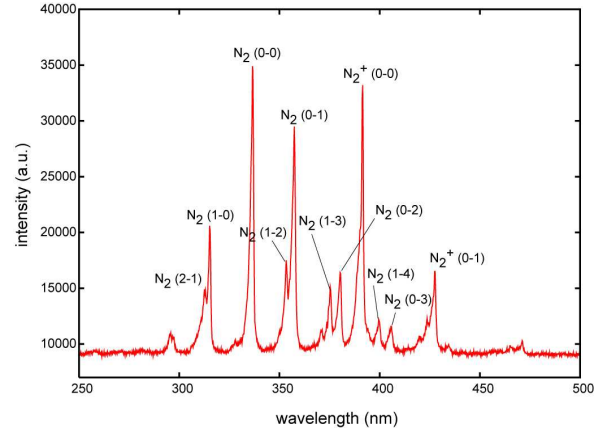


Fig. 2 Emission spectra of air plasma in a stagnant condition

경우와 동일하다.

3. 스펙트럼 비교를 통한 온도 측정

3.1 공기 스펙트럼

Fig. 2는 정체된 공기에서 발생한 100 mA의 직류 방전에서 측정된 스펙트럼을 보여준다. 이 그림에서 보여 주듯이 공기에서의 기체 방전은 질소가 풍부하기 때문에 아주 다양한 질소 분자 및 질소 이온의 스펙트럼들이 관찰된다. 괄호 안의 숫자들은 해당 회전 스펙트럼이 발생하는 전이 과정의 상위-하위 진동 양자수이다. 예를 들어 $N_2(1-0)$ 는 질소 분자 스펙트럼 중 진동 양자수 1에서 0으로의 진동 발광 전이를 의미한다. Fig. 2의 스펙트럼 중에 가장 세기가 강한 질소 이온의 스펙트럼은 394.4 nm에 위치한 것임을 알 수 있다. 이를 좀 더 해상도가 좋은 분광계로 측정할 경우 앞 장에서 소개된 스펙트럼의 branch들을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 100 mA의 직류방전에 의해 발생된 스펙트럼중 394.4 nm에 위치한 N_2^+ FNS를 상세하게 보여주는 곡선이다. 이 시스템은 각각의 다른 회전 상태에서의 branch들이 식별 가능할 정도로 분별력 있는 스펙트럼을 보여준다. 이러한 점 때문에 N_2^+ 를 이용한 온도 측정법이 자주 사용된다. 또한 branch들의 세기가 강하고 약함이 번갈아 발생하는데 이는 식 (6c)에서 $\Phi_{P'}$ 로 표현된, 원자핵 스핀(nuclear spin)에 의한 영향으로 인하여 발생하는 현상이다. N_2 스펙트럼에서는 이러한 현상을 관찰하기가 상당히 어렵다.

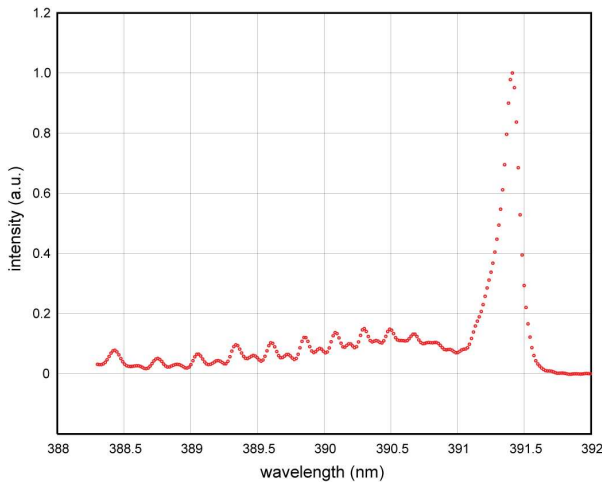


Fig. 3 Emission spectra of first negative system of nitrogen ion molecular band at 394.4 nm of DC air discharge in Mach 3 supersonic flow

3.2 합성 스펙트럼의 모사

측정된 방전에서의 기체 온도를 예측하기 위해서는 Fig. 3에서 보여진 스펙트럼의 세기를 정확하게 계산하여야 한다. 서론에서 잠깐 언급된 Boltzmann 직선을 이용하는 방법은 Fig. 3에서 보여진 스펙트럼에서 각각의 branch들의 발광 세기의 최고값들을 추출하여 log스케일로 그리게 되면 식 (8)로부터 회전온도의 역수에 해당하는 직선의 기울기가 구해진다. 이 방법은 스펙트럼 전체를 비교하는 것이 아니고 식별 가능한 몇 개의 branch들만을 고려하는 방법이므로 비교적 간단하지만 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

스펙트럼의 모사는 앞 장에서 소개된 발광선의 세기에 관한 관계식들로부터 계산이 가능하다. 이를 이용하면 발광선들은 델타 (δ) 함수와 같이 각각의 전이 branch에 해당하는 주파수에서 한 개의 값을 가지게 되어 Fig. 3에서 보는 것과 같은 연속된 스펙트럼을 계산하기 위해서는 Gaussian 곡선과 델타 함수와의 convolution을 수행하여야 한다. Gaussian 곡선의 full-width-half-max (FWHM)는 측정 시스템의 계측 과정에서 발생하는 광학적 넓어짐 (broadening)에 의한 것으로 이는 독립적으로 측정 가능하다. 여기서 적용된 FWHM은 0.083 nm이다. 이러한 과정을 거쳐 만들어진 합성 스펙트럼은 계산에 사용된 회전 온도에 따라 형태가 달라지며 측정된 스펙트럼과 비교할 경우 두 곡선이 거의 일치할 때의 온도가 실제로 측정된 기체의 온도가 되는 것이다.

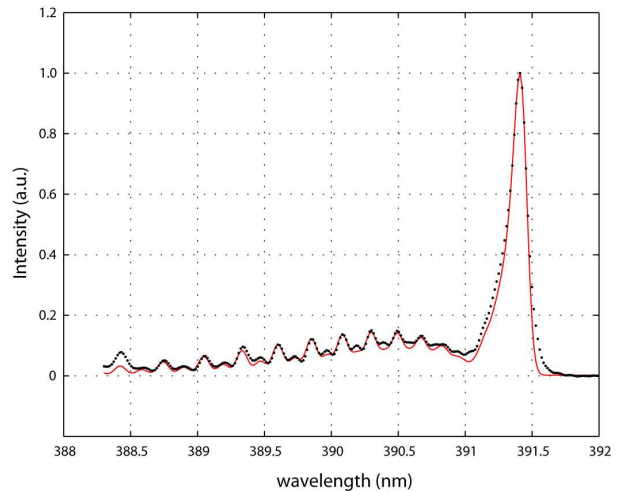


Fig. 4 Spectral line fit of nitrogen ion molecular spectra with synthetic spectra at a rotational temperature of 570 K. Dotted line is for measured spectrum and solid line is for synthetic spectrum

Fig. 4는 계산된 합성 스펙트럼과 Fig. 3의 측정된 스펙트럼을 겹쳐놓은 것으로 기체 온도가 570 K 인 합성스펙트럼을 사용하였을 경우 Fig. 4와 같이 거의 일치함을 알 수 있었다. 이때의 상대오차는 6-8% 정도로 그림에서와 같이 상당히 일치하게 모사가 가능함을 보여 준다. 한가지 짚고 넘어가야 할 것은 식 (6c) 또는 식 (8)에서의 온도는 회전온도인데 실제 측정 가능한 기체의 온도는 병진온도이다. 하지만 압력이 아주 낮은 경우를 제외한 대부분의 공학 문제에서는 병진온도와 회전온도가 평형을 이루게 된다.

3.3 초음속 유동에서의 온도 측정

위와 같은 방법을 사용하여 초음속 유동에서 발생하는 직류 방전에서의 기체온도를 측정하였다. 초음속 유동에서 저 전력의 글로우 방전을 발생시키면 경사충격파가 발생하면서 국지적 압력 증가가 발생한다.⁽⁸⁾ 이러한 현상을 설명하기 위하여 기체 온도의 측정이 시도되었다.

Fig. 5는 마하 3 초음속 경계층 유동에서 경계면에 25 mA 직류 방전을 발생시켜 얻어진 스펙트럼으로부터 측정된 스펙트럼의 세기와 기체 온도를 표면에 수직 방향으로 측정된 값의 변화를 나타낸 곡선이다. 실선은 온도 분포이고 점선은 스펙트럼의 세기를 나타낸다. 예러 범위는 신뢰도 95%를 의미한다. 경계면에서의 온도는 약 350 K으로 회복 (recovery) 온도인 300 K보다 약간 높게 측정되었고 경계면에서 멀어지면서 완만하게 온도가 감소됨을

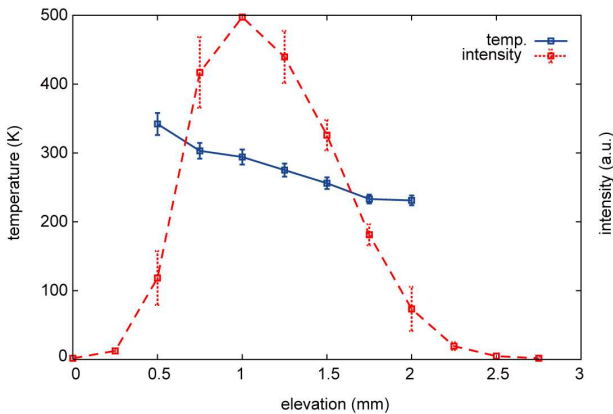


Fig. 5 Intensity profile and temperature trend of 25 mA DC discharge in Mach 3 supersonic flow. X-axis is elevation from flat plate surface

보였다. 위의 경향으로 보면 경계층 바깥의 자유 흐름(free stream)의 온도인 110 K까지 선형적으로 감소됨을 알 수 있다. 결과적으로 경계층 내의 공기가 가열되어 국지적으로 경계층을 두껍게 하여 경사층 격파가 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

광학적 발광 분광법을 이용하여 기체의 온도를 측정하는 방법에 대한 전반적인 과정을 소개하였다. 질소 분자 스펙트럼의 구조를 설명하였고 분광선의 세기를 계산하기 위한 관계식을 유도하였다. 자체 제작된 합성 스펙트럼 모사 프로그램을 이용하여 실제 실험으로부터 측정된 스펙트럼과 비교했을 때 약 6-8%의 에러 범위 내에서 서로 일치함을 보여 in-house 코드의 적격성을 검증하였다. 초음속 유동에서 발생한 25 mA의 직류 방전에서의 온도가 경계층 표면에서 약 350 K로 측정되었고 표면과 멀어지면서 완만하게 감소하여 일반적인 단일 경계층 유동에서의 온도 분포와는 다르게 관찰이 되었다. 이로부터 경계층의 가열 효과로 인하여 경사 충격파가 발생함을 간접적으로 검증할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009년 울산대학교 연구비에 의해 연구되었음.

참고문헌

- (1) Do Duk-Hee, 1998, "PIV(Particle Image Velocimetry) Measurement Technique," *KSME*, Vol. 38, No. 10, pp. 36-41.
- (2) Williamson, J. M., Bletzinger, P. and Ganguly, B. N., 2004, "Gas Temperature Determination in a N₂/Ar Dielectric Barrier Discharge by Diode-Laser Absorption Spectroscopy and Resolved Plasma Emission," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 37, No. 12, pp. 1658-1663.
- (3) Laux, C. O. and Kruger, C. H., 1992, "Arrays of Radiative Transition Probabilities for the N₂ First and Second Positive, NO Beta and Gamma, N₂⁺ First Negative, and O₂ Schumann-Runge Band Systems," *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, Vol. 48, No. 1, pp. 9-24.
- (4) Herzberg, G., 1962, "Molecular Spectra And Molecular Structure: I. Spectra of Diatomic Molecules," Van Nostrand Reinhold, New York.
- (5) Schadee, A., 1978, "Unique Definitions for the Band Strength and the Electronic-Vibrational Dipole Moment of Diatomic Molecular Radiative Transitions," *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer*, Vol. 19, No. 4, pp. 451-453.
- (6) Nicholls, R. W. and Stewart, A. L., 1962, "Atomic and Molecular Processes edited by D. R. Bates," Academic Press Inc. (London) Ltd.
- (7) Nassar, H, Pellerin, S., Musiol, K., Martinie, O., Pellerin, N. and Cormier, J. M., 2004, " N₂⁺/N₂ Ratio and Temperature Measurements Based on First Negative N₂⁺ and Second Positive N₂ Overlapped Molecular Emission Spectra," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 37, No. 14, pp. 1904-1916.
- (8) Shin, J., Narayanaswamy, V., Raja, L. L. and Clemens, N. T., 2007, "Characterization of a Direct-Current Glow Discharge Plasma Actuator in Low-Pressure Supersonic Flow," *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 7, pp. 1596-1605.