

단 신

충격관 실험에서의 경계면 효과에 관한 연구

金元廣 · 申權秀*

숭실대학교 화학과

(1997. 7. 9 접수)

Boundary-Layer Effects in Shock Tube Techniques

Won Kyoung Kim and Kuan Soo Shin*

Department of Chemistry, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received July 9, 1997)

고온에서의 기체 반응에 관한 연구는 거의 충격관을 이용하여 수행되고 있지만 충격파 이후의 고온 기체의 열역학적 상태는 경계면 효과 등에 의한 유체역학적인 변수들에 의해 영향을 받을 수 있음이 알려져 있다. 따라서 충격관 실험을 통하여 정확한 반응속도 및 반응 메커니즘을 고찰하기 위해서는 반응 온도, 압력, 밀도 등의 조건들을 정확히 알아야 한다. 일반적으로 입사 충격파 및 반사 충격파의 온도, 압력 그리고 밀도 등은 초기 시료기체의 온도와 압력 그리고 입사 충격파의 속도로부터 이상적인 충격파 이론을 이용하여 계산할 수 있다.¹ 그러나 입사 충격파 이후의 기체 흐름이 유체역학적인 경계면 성장에 의해 비이상적인 행동을 하며, 입사 충격파 이후 기체의 열역학적 상태가 이상적인 계산과 차이가 날 수 있음이 보고되었다.² 따라서 이에 관한 다양한 이론적 고찰¹⁻⁴과 실험적 연구⁵⁻¹⁰가 수행되어 왔으나, 얼마나 이상적인 계산을 보정하여야 할지를 예측하기란 쉽지가 않다. 현재까지 충격파의 비이상성은 각 충격관의 길이, 모양, 관 내부의 거친 정도, 시료기체의 초기 압력, 충격파의 속도 등에 따라 달라짐을 알고 있다. 이러한 복잡성 때문에 각각의 충격관은 그 실험 범위 내에서 독립적으로 특성조사를 수행하여야 한다. 일반적으로 반사 충격파 이후의 기체 상태에서 초기 시료기체의 압력이 높고, 충격파의 속도가 큰 경우에는 이상적인 계산으로부터 크게 벗어나지 않음이 실험적으로 알려져 있다.⁷⁻¹⁰

본 연구에서는 최근 실험실에 설치된 충격관의 특성을 살펴보고, 충격파 직후의 고온 기체의 열역학

적 성질들에 미치는 경계면 효과를 고찰하고자 하며, 이상적 충격파 이론으로부터 구한 열역학적인 양들과 비교하여 실험적인 보정식을 제안하고자 한다. 특히 상대적으로 비이상성에 관한 보정이 중요할 것으로 생각되는 조건 즉 시료기체의 낮은 초기 압력 및 충격파의 속도(Mach 수)가 크지 않은 조건 하에서 그 정도를 실험적으로 측정하고자 한다.

실험

실험에 사용된 충격관은 stainless steel(Varian 제품)로 만들어졌으며, 시료기체를 채우는 낮은 압력 부분은 내경이 6.02 cm 길이는 478 cm이며, 추진기체를 채우는 높은 압력 부분은 내경이 9.73 cm 길이는 112 cm로 구성되었다. 각 부품들은 높은 진공을 유지하기 위하여 copper gasket을 사용한 Conflat fitting을 사용하여 연결하였다. 충격파의 속도, 압력 등을 측정하기 위하여 PCB Piezotronics 제품의 압력 변환기(Model 113A21)들을 설치하였다. 압력변환기는 충격관의 끝판(endplate)으로부터 4개를 각각 5.00, 41.05, 77.15, 103.15 cm 되는 거리에 위치하도록 관에 용접하여 설치하였다. 또한 압력변환기는 충격관의 곡면과 일치하도록 가공하여 충격파의 흐름의 방해요인을 최소로 하였다. 충격관의 압력의 변화에 따른 압력변환기의 전기적인 신호는 증폭기(PCB 483A11)를 사용하여 증폭시켜 2대의 digital oscilloscope(HP45601A, HP45601B)로 받아 컴퓨터를 연결하여 측정하였다. 낮은 압력 부분과 높은 압력 부

분을 구분하는 막(diaphragm)은 0.5, 1.0, 1.5 mm의 깨끗한 알루미늄 판을 사용하였으며, 연결 부분은 copper gasket을 사용하여 8개의 나사로 조여 진공을 유지하였다. 충격파를 만들기 위한 알루미늄 판의 파열은 십자 모양의 칼날을 사용하여 순간적으로 터뜨렸다. 칼날의 손잡이 부분을 스프링 철사를 사용해 움직일 수 있게 하였고 진공을 유지하기 위해서 O-ring을 사용한 compression port(Varian co.)를 사용하였다.

충격관의 높은 압력 부분은 추진기체를 채우기 전에 mechanical 펌프(Ulvac, G-50D)를 사용하여 약 1×10^{-3} torr 정도의 진공을 유지하였으며, 낮은 압력 부분은 시료기체를 채우기 전에 turbo molecular 펌프(Varian, 969-9002) 및 mechanical 펌프(Varian, SD300)를 사용해 1×10^{-7} torr 이하까지 떨어뜨렸다. 본 시스템의 degasing 및 outgassing 정도는 약 5×10^{-8} torr/min 정도로 실험 자료를 얻는데 충분한 진공도를 유지할 수 있었다. 진공을 측정하기 위해서는 1×10^{-3} torr 까지 측정할 수 있는 thermocouple gauge(Varian, 531)와 2×10^{-10} torr 까지 측정할 수 있는 ionization gauge(Varian, 572)를 사용하였다. 시료기체 및 추진기체들을 다루기 위하여 Swagelok 회사 제품의 1/4 inch 알루미늄 판과 고진공용 valve 및 fitting을 사용하였다. 시료 기체의 정확한 압력을 측정하기 위해 측정 범위가 0-999 torr인 MKS 압력계 이지(122A-01000AB)를 사용하였다. 시료기체로는 Ar(동아사, 99.9993%)을 사용하였으며 추진기체로는 He(동민특수ガ스, 99.9995%)를 사용하였다. 초기 시료기체 압력은 10-40 torr 범위에서 수행하였다.

결과 및 고찰

Table 1에 나타낸 모든 실험 결과는 Ar 기체를 시료기체로 사용하여 얻은 결과이다. 입사 충격파의 속도를 측정하고 이상적인 충격파 이론을 이용하여 구한 순간적인 압력 증가는 실험적으로 압력 변환기를 이용하여 측정한 압력 증가와 상당히 잘 일치한다. 이 결과는 Fig. 1에서와 같이 표현할 수 있으며, 다음과 같은 선형 최소제곱선으로 나타낼 수 있다.

$$(P_2/P_1)_{obs} = 0.998 (P_2/P_1)_{id}$$

여기서 P_1 및 P_2 은 각각 초기 시료기체의 압력 및

Table 1. Observed pressure jump data for incident and reflected shock waves

P_1/torr	$^a M_i$	$^b (P_2/P_1)_{obs}$	$^c (P_s/P_1)_{obs}$	$^d P_5^{obs}/P_{5s}$
10.4	3.70	71.5	85.4	1.05
10.5	3.74	17.1	85.8	1.03
13.4	3.55	15.1	71.5	0.98
13.6	3.38	14.6	70.5	1.09
16.2	3.44	15.1	70.7	1.04
16.7	3.34	14.5	66.0	1.05
17.2	3.52	14.8	70.6	0.98
19.3	3.13	12.1	54.0	1.01
19.4	3.31	12.5	62.9	1.02
22.1	3.06	11.3	53.8	1.07
22.3	3.18	11.9	57.3	1.04
25.5	3.02	11.3	50.0	1.04
28.4	2.94	10.1	47.0	1.04
31.3	2.82	9.9	42.5	1.05
34.2	2.83	9.3	41.3	1.01
34.4	2.84	10.3	42.4	1.03
37.1	2.67	8.6	35.4	1.02
37.6	2.75	8.9	38.3	1.01
40.7	2.68	8.5	35.2	1.00

^aMeasured incident shock wave Mach number. ^bMeasured values at 41.05 cm from the endplate. ^cObserved pressure jump at 5.00 cm from the endplate divided by the initial test pressure. ^dObserved pressure jump at 5.00 cm from the endplate divided by the ideal value calculated from the incident shock Mach number.

입사 충격파 직후의 압력을 나타내며, 아래 첨자 obs는 관측된 값을 그리고 id는 이상적 충격파 이론으로 계산된 값을 의미한다. 일반적으로 압력변화를

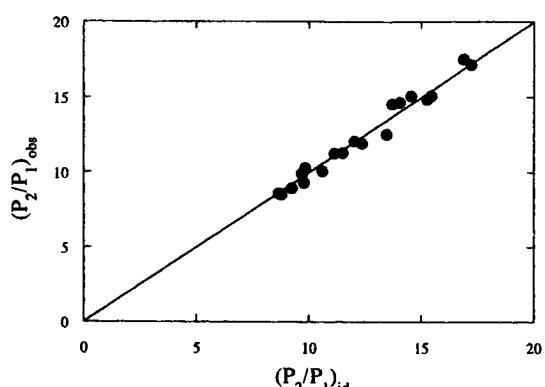


Fig. 1. Pressure jump, measured with a transducer at 41.05 cm from the endplate, is plotted as a function of pressure calculated from measured incident shock Mach number.

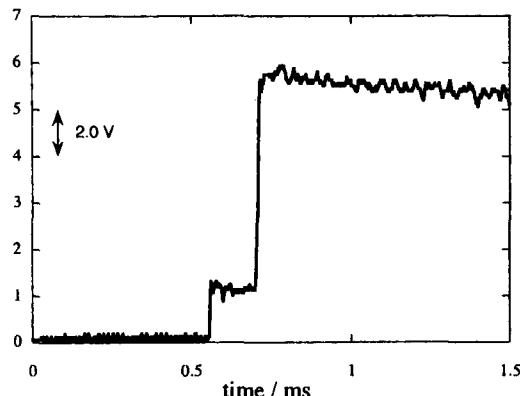


Fig. 2. Typical observed shock wave pressure jump from P_1 to P_2 to P_s at 5.00 cm from the endplate. $P_1 = 19.3$ torr and $M_i = 3.133$.

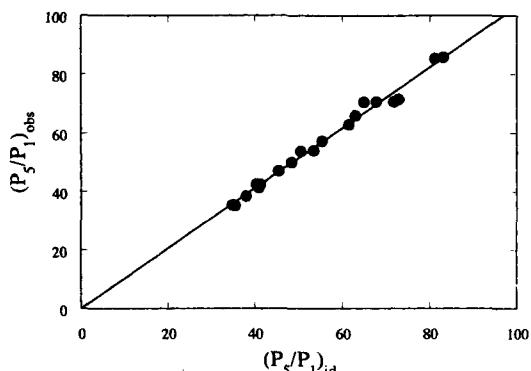


Fig. 3. Pressure jump, measured with a transducer at 5.00 cm from the endplate, is plotted as a function of pressure calculated from measured incident shock Mach number with ideal theory.

측정하여 기체의 열역학적인 성질들을 계산하는 것 보다 입사 충격파의 속도를 측정하여 기체의 열역학적인 성질들을 계산하는 것이 보다 정확하다고 알려져 있으며, 본 실험에서도 이 점을 다시 확인할 수 있었다.¹

반사 충격파 이후의 압력 변화는 충격판 끝부분에서 5 cm 떨어진 곳에서 측정하였으며, 전형적인 압력 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 비록 압력변환기의 신호가 시간이 지남에 따라 약간 변하는 것이 관찰되었으나 일반적으로 충격판을 이용하여 반응속도를 측정하는 시간(약 2.0 ms 이내) 범위에서 평균값으로부터의 벗어나는 정도는 전형적으로 $\pm 5\%$ 이내였다. 모든 실험에서 반사 충격파의 속도도 입사 충격파의 속도와 함께 측정할 수 있었다. 일반적으로 접촉면 진행과의 간섭작용으로 반사 충격파의 Mach 수($M_r = v_r/a_1$), 여기서 v_r 은 반사 충격파의 속도이며 a_1 은 상온의 Ar 기체에서의 소리속도를 의미한다)는 끝판 가까이 설치된 두 압력변환기 사이에서 측정되었으며, 반사 충격파의 속도는 약간 감속됨을 관찰할 수 있었다. 그리고 반사 충격파 이후의 관측된 압력과 이상적인 충격파 이론으로부터 계산한 압력 사이의 관계식이 같이 표현할 수 있음을 알았으며, Fig. 3에서는 이 관계를 나타내고 있다.

$$(P_s/P_1)_{obs} = 1.031 (P_s/P_1)_{id}$$

여기서 P_s 은 반사 충격파 직후의 압력을 의미한다.

연구 결과 시료기체로 채워지는 충격판 전체 길이

4.78 m 중 끝부분 약 1 m 내에서는 입사 충격파의 속도가 일정하게 유지됨을 알았다. 따라서 이 때의 기체 상태는 정상류 유체 역학을 따르며, 입사 충격파 직후의 기체는 이상적 충격파 이론으로 설명할 수 있으며 경계면은 이미 생성되어 정상류 조건을 이루었음을 알 수 있었다. 하지만 Table 1에서 살펴볼 수 있듯이 이상적 충격파 이론이 본 실험의 모든 자료들 특히 반사 충격파 이후의 기체 상태들을 다 설명할 수는 없었다. 이는 실험 자료를 모두 설명하기 위하여 경계면의 존재를 고려 하여야 함을 의미한다.

충격파 이후의 기체, 역학 과정은 소리 속도로 일어나기 때문에 분자 이동현상(질량 및 열 확산, 열전도, 접성도 등)에 의존하는 어떤 이완작용도 무시할 수 있으며, 이 작용은 항상 단열 과정이다.⁷⁻⁹ 따라서 단열 상태 방정식으로부터 다음과 같은 보정식들을 유도할 수 있다.⁹

$$\left(\frac{P_n}{P_{ns}}\right)^{(y-1)/y} = \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ns}}\right)^{y-1} = \frac{T_n}{T_{ns}} \quad (1)$$

여기서 $y = C_p/C_v$ (Ar인 경우 5/3), n 은 2 혹은 5(2는 입사 충격파인 경우, 5는 반사 충격파인 경우), s 는 측정된 Mach 수로부터 계산된 이상적 충격파 상태, P 는 압력, ρ 는 밀도, T 는 온도를 의미한다. 음향 속도가 크면(전형적인 값은 약 $5 \times 10^4 \text{ cm s}^{-1}$), 충격판 내에서 방사상으로 일어나는 압력 이완 작용은 충격판을 이용한 속도상수 혹은 압력 측정 실험 시간보다 짧은 수십 microsecond 이내에 충분히 발달된다.

따라서 측정된 압력 변화는 경계면을 가로질러 방사상으로 일정한 이완된 후의 값이다. 측정된 반사 충격파 이후의 압력 P_{5s}^{obs} 과 측정된 입사 충격파의 속도를 이용 이상적인 충격파 이론으로부터 계산된 압력 P_{5s} 과의 비 즉 P_{5s}^{obs}/P_{5s} 는 Table 1에 나타내었다. P_{5s}^{obs}/P_{5s} 값과 그에 해당하는 입사 충격파의 Mach 수 사이의 관계를 log-log 상관관계로 살펴보았다. 초기 시료기체의 압력이 10-40 torr이며, 측정된 입사 충격파의 Mach 수가 2.65-3.75인 경우 충격관 끝부분에서 5 cm 떨어진 곳에서의 관측된 결과는 다음과 같다.

$$P_{5s}^{obs}/P_{5s} = 0.991 M_s^{0.033}$$

여기서 P_{5s}^{obs}/P_{5s} 값은 M_s 에 따라 약간 변함을 알 수 있으나 입사 충격파의 Mach 수가 2.65-3.75인 범위에서 그 정도는 아주 미미함을 알 수 있었다. 그리고 위 식(1)의 단열 상태 방정식과 실험적으로 구한 P_{5s}^{obs}/P_{5s} 의 관계를 이용하면 반사 충격파 이후 높은 온도에서의 열역학적 기체 상태를 결정할 수 있으며, 본 실험에 사용된 충격관을 이용하여 기체 반응 속도 상수를 측정하고자 할 때 압력뿐만 아니라 온도 및 밀도 등을 보정할 수 있게 되었다.

결론적으로 고온에서의 연소 반응속도 및 메커니즘을 보다 정확하게 고찰하기 위해서는 충격파 이후의 기체의 압력, 온도, 밀도 등의 열역학적 상태에 관하여 보다 정확하게 기술하여야 할 필요가 있으며, 본 연구에 사용된 충격관을 이용 입사 충격파 실험을 수행하기 위해서는 압력변화를 측정하여 기체의 열역학적인 성질들을 계산하는 것보다 입사 충격

파의 속도를 측정하여 기체의 열역학적인 성질들을 계산하는 것이 보다 정확하다는 점을 다시 확인할 수 있었다. 그리고 반사 충격파를 이용한 실험의 경우에는 위 관계식들을 이용하여 충격관 내의 경계면 형성에 의한 섭동 작용을 고려한 반사 충격파 이후의 기체의 열역학적인 성질들을 계산하는 것이 가능하게 되었다.

본 연구는 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(BSRI-96-3419) 및 숭실대학교(1996)의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

인 용 문 현

1. Bradley, J. N. In *Shock Waves in Chemistry and Physics*; Wiley: New York, U.S.A., 1962.
2. Mirels, H. *Phys. Fluids* **1966**, 9, 1907.
3. Belford, R. L.; Strehlow, R. A. *Annu. Rev. Phys. Chem.* **1969**, 20, 247.
4. Schlichting, H. In *Boundary-Layer Theory*; McGraw-Hill: New York, U.S.A., 1968.
5. Gardiner, W. C.; Kistiakowsky, G. B. *J. Chem. Phys.* **1961**, 34, 1080.
6. Fujii, N.; Koshi, M.; Ando, H.; Asaba, T. *Int. J. Chem. Kinet.* **1979**, 11, 285.
7. Skinner, G. B.; Roger, D.; Patel, K. B. *Int. J. Chem. Kinet.* **1981**, 13, 481.
8. Skinner, G. B.; Sweet, R. C.; Davis, S. K. *J. Phys. Chem.* **1971**, 75, 1.
9. Michael, J. V.; Sutherland, J. W. *Int. J. Chem. Kinet.* **1986**, 18, 409.
10. Frank, P.; Just, Th. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **1985**, 89, 181.