

제한공간내 펄스가열에 기인한 열음향파의 전달특성에 관한 수치적 연구

황 인 주, 김 윤 제*

한국건설기술연구원 건축설비 및 플랜트연구그룹, *성균관대학교 기계공학부

A Numerical Study on the Transmission of Thermo-Acoustic Wave Induced by Step Pulsed Heating in an Enclosure

In-Ju Hwang, Youn J. Kim*

Building Facility & Plant Group, Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-712,, Korea

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received June 17, 2002; revision received September 9, 2002)

ABSTRACT: Thermo-acoustic waves can be thermally generated in a compressible flow field by rapid heating and cooling, and chemical reaction near the boundary walls. This mechanism is very important in the space environment in which natural convection does not exist. Also this may be a significant factor for heat transfer when the fluids are close to the thermodynamic critical point. In this study, the generation and transmission characteristics of thermo-acoustic waves in an air-filled confined domain with two-step pulsed heating are studied numerically.

The governing equations are discretized using control volume method, and are solved using PISO algorithm and second-order upwind scheme. For the purpose of stable solution, time step was set to the order of 1×10^{-9} s, and grids are 50×2000 . Results show that temperature and pressure distributions of fluid near the boundary wall subjected to a rapid heating are increased abruptly, and the induced thermo-acoustic wave propagates through the fluid until it decays due to viscous and heat dissipation. Pressure waves have sharp front shape and decay with a long tail in the case of step heating, but these waves have sharp pin shape in the case of pulsed heating.

Key words: Compressible fluid(압축성 유체), Pulsed heating(펄스가열), Pressure wave(압력파), Thermo-acoustic wave(열음향파), Numerical diffusion(수치확산)

기 호 설 명

a : 공기 중의 음속 [m/s]
 C : Courant 수 ($C = a\Delta t/\Delta x$, a 는 flux vector)

H : 높이 [m]
 k : 열전도도 [W/m · K]
 L : 길이 [m]
 M : Mach 수
 p : 압력 [Pa]
 Pr : Prandtl 수
 q : 열속 [W/m²]

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7448; fax: +82-31-295-1937

E-mail address: kimyj@me.skku.ac.kr

t : 시간 [W/m^2]

그리스 문자

γ : 비열비, C_p/C_v

ζ : 무차원 길이, x/L

θ : 무차원 온도, T_w/T_0

μ : 점성계수 [$kg/m \cdot s$]

ξ : 무차원 시간, t/t_0

ρ : 밀도 [kg/m^3]

τ : 전단응력 [Pa]

상첨자

* : 무차원 변수

하첨자

0 : 초기값

w : 벽면

1. 서 론

일반적으로 제한된 공간에 놓여진 압축성 유체 (compressible fluid)를 급속히 가열 또는 냉각하거나 열을 수반하는 급격한 화학반응(chemical reaction)이 일어나는 혼합과정 중의 경계면 근처에서는 유체가 급격히 팽창하는 경우가 발생하게 된다. 이렇게 열적인 요인에 의하여 유발되는 팽창은 주변유체의 진동을 수반하면서 압력파(pressure wave)를 생성시키는데, 일반적으로 이러한 압력파를 열음향파(thermo-acoustic wave)라 한다. 또한 압축성 유체의 경계에서 발생하는 열전달에 관계하는 현상을 설명하는 용어로 열음향대류(thermo-acoustic convection)라는 표현을 사용하기도 한다.⁽¹⁻⁵⁾

이러한 열음향파의 영향은 표준조건에서는 매우 미미하나 유체가 열역학적인 임계점(critical point)에 근접하거나 대류 열전달이 미약할 경우 등에는 중요한 열전달 인자로 작용한다. 특히 자연대류가 존재하지 않는 우주에서는 매우 중요한 열전달 메커니즘으로 작용한다. 이러한 이론은 초

기에 열적 또는 음적인 에너지 변환에 관심을 가지고 연구가 수행되었으며, 최근에는 열전달현상에 대한 열음향파의 역할과 열시스템의 안정성 향상 등을 위한 수단으로 관심을 끌고 있으며, 선진국에서는 열음향 냉동기 및 열펌프, 압축기, 센서응용, 의료용 장비 등의 기초이론으로 활용하고 있다. 또한 태양에너지를 열원으로 하는 열음향 스텔링 엔진(thermo-acoustic stirling engine) 등의 효율향상을 위한 연구가 진행되고 있다.^(11,12)

열음향 현상(thermo-acoustic phenomena)에 대한 연구는 비교적 오랜 역사를 가지고 있으나 초기에는 주로 현상에 대한 관찰과 이해를 목적으로 파동현상 측면에서 연구가 수행되었다. 특히 Trilling⁽⁶⁾은 선형적인 해석 연구를 수행하였는데 반무한(semi-infinite) 매질에서 Laplace 변환기법을 사용하여 열적으로 야기된 압력파에 대한 점근적인 표현을 얻은 바 있다. 또한, Radhwan and Kassoy⁽⁸⁾는 경계층 해석기법을 사용하여 유한 압축성 매질에서 전파되는 일차원 비선형 열음향파의 특성을 연구한 바 있다.

최근에는 보다 일반적인 해를 얻기 위하여 수치적인 방법을 사용한 연구결과가 발표되고 있다. 특히, 유한 영역에서 열음향파에 관한 연구로 Ozoe et al.^(3,4)은 밀폐된 공간 내 한쪽 수직벽의 급속 가열에 의하여 압축성 유체 내에서 생성된 열음향학적인 대류현상을 연구하였다. 유한차분법을 이용하여 2차원, 3차원 모델에 대해 수치적 연구를 수행하였으나 극히 제한된 격자의 적용과 수치확산 등으로 인하여 정교한 압력파 모사에 어려움이 있었다. 또한 Farouk et al.⁽²⁾은 효과적인 열제거 메커니즘으로 열음향파를 이용하기 위한 연구로 질소가 채워진 2차원 미소공간을 대상으로 열음향파의 거동특성에 관한 연구를 수행하였는데, 압력파의 생성과 전달현상을 비교적 정확하게 모사하였다.

한편 열음향파에 대한 실험적 연구는 단지 일부 연구자에 의하여 수행되어 왔는데, Parang and Salah-Eddine⁽⁹⁾은 밀폐된 실린더 상부에 급격한 온도변화를 부가했을 때 온도와 압력은 상대적으로 시간의 함수로 표현됨을 보였고, 열음향파가 열적 혼합(thermal mixing)을 강화시킨다는 결과를 발표하였다. 그리고 Brown and Churchill⁽¹⁰⁾은 가스영역과 접한 고체 표면에서 급격한 가열에 의하여 약한 음파가 생성됨을 보였다.

이와 같이 열적으로 기인한 열음향 현상에 대한 연구는 20세기 말에 이르러 제한적이지만 다소 체계적인 연구가 수행되었으며, 보다 광범위한 변수의 적용에 따른 수치해석 및 정교한 실험과 가시화 등에 관한 연구는 매우 취약한 것으로 평가되고 있다.

이에 본 연구에서는 제한된 공간 내 압축성 유체의 급속 가열에 기인한 열음향파의 생성 및 전달특성에 관한 실험적 연구의 전단계로 수치해석적인 방법을 도입하여 2단계 펄스가열 및 형상비에 따른 열음향파의 전달특성을 수치적인 방법으로 예측하고자 하였다. 또한 도입한 수치적 기법의 적용성과 타당성을 선행연구 결과와 비교하여 2차원적인 확장성을 검증하였다.

기존 연구의 경계조건과는 달리 응용성에 기반을 두고 가열벽면의 경계조건으로 2회 이상의 순간가열(step pulsed heating)을 부가할 경우에 열적인 요인으로 발생한 열음향파의 전파 및 간섭 현상을 증점적으로 연구하였다. 또한 압력파의 생성 및 전파특성을 모사하는 데 있어 격자의 구성과 시간간격의 설정에 따른 수치해석 결과의 수렴성과 수치확산(numerical diffusion)의 영향을 평가하였다.

2. 수치해석 모델 및 방법

2.1 해석모델 및 이론

본 연구에서 도입한 해석대상 모델은 Fig. 1과 같이 직육면체의 형상을 가지며, 해석을 위하여 형상비(L/H)가 2이고 내부에 압축성 유체로 공기가 채워진 2차원 모델을 설정하였다. 순간 가열 경계조건을 가지는 해석대상의 좌측 수직 벽

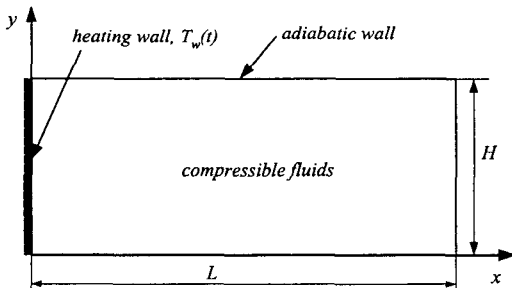


Fig. 1 Geometry of boundary conditions.

면을 제외한 모든 외부 벽은 단열된 것으로 가정하였다.

해석대상에 대한 수치해를 얻기 위하여 Fig. 1과 같은 2차원 공간에 제한체적에 관한 보존법칙을 적용하였으며, 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 근간으로 다음과 같이 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 상태방정식을 나타내었다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\gamma \rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{3}{4\gamma \rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\gamma \rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{3}{4\gamma \rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (2b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{(\gamma-1)p}{\rho} \times \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{3k}{4p\gamma\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$p = \rho RT \quad (4)$$

여기서, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} 는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_w(t) &= T_0, \quad t = 0 \\ T_w(t) &= 2T_0, \quad 0 < t \leq t_1 \\ T_w(t) &= 2T_0, \quad t_2 < t \leq t_3 \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 경계조건

해석대상 공간 내 초기의 압축성 유체는 준정적($u = v = 0$)이고 $p_0 = 1 \text{ atm}$, 균일온도 $T_0 = 300 \text{ K}$ 의 조건을 가지는 것으로 설정하였다. 본 논문에서는 수직벽의 가열조건으로 펄스(pulse) 모양과 같이 이상적으로 기준온도에 도달하여 전체 시간 동안 계속 가열되는 조건을 식(6)과 같이 적용하

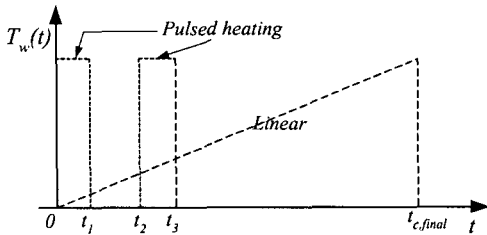


Fig. 2 Various boundary conditions of heating wall with time.

였다. Fig. 2에는 적용 가능한 수직 벽면의 가열 조건이 시간의 함수로 도시되어 있다.

수직벽의 가열조건 변화에 따른 열음향파의 생성 및 전달특성을 평가하기 위하여 초기 가열조건을 Fig. 2와 같이 2단계로 나누어 일정 온도를 순간적으로 부가하였으며, 세부설명은 다음과 같다.

(1) 1단계 펄스가열 : 수직 벽면을 제한된 초기 정적인 조건에서 제한된 시간($0 < t \leq t_1$) 동안 이상적인 펄스파 형식의 순간적인 온도조건을 부가한다.

(2) 2단계 펄스가열 : 초기 1단계 가열 후 일정 시간이 지난 후 수직 벽면에 제한된 시간($t_2 \leq t \leq t_3$) 동안 순간적인 온도조건을 부가한다.

2.3 수치해석방법

본 연구에서는 2.1절에서 기술한 바와 같은 조건하에서 열음향파의 생성과 전파현상을 해석하기 위하여 Fig. 3과 같이 50×2000개의 격자(mesh)를 갖는 계를 구성하였다. 그리고 주요 지배방정식은 2차원 격자계에 대하여 보존법칙을 근간으로 하는 유한체적법(finite volume method)을 이용하여 이산화(discretization)하였다.

그리고 해석하고자 하는 공간의 압력장을 구하는 기법으로 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations) 및 PISO(pressure implicit with splitting of operators) 알고리즘을 도입하여 비교하였다. 이러한 기법은 연속방정식과 운동량방정식을 조합하여 압력수정방정식을 만들어 반복적인 계산을 통하여 근사적으로 정확한 압력장을 구하는 방법이다.

열음향파의 특성을 해석하기 위해서는 진행방향에 따라 조밀한 격자계를 구성하여야 하며, 이에 따라 적절한 시간간격(time step)에 의한 영향

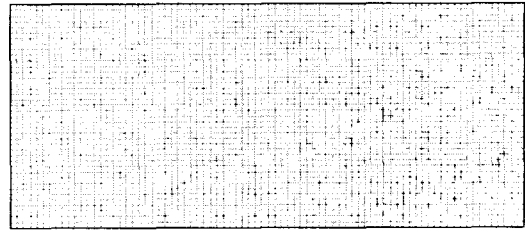


Fig. 3 Grid systems (50×2000).

을 고려하여야 한다. 이러한 이론적 배경⁽¹³⁾을 검토하여 확산유속의 값은 시간간격에 큰 영향을 받지 않는 내재적인 기법(implicit scheme)을 적용하였으며, 확산 및 대류항의 처리를 위하여 2계 상류도식(second order upwind scheme)을 사용하였다. 또한 벽면에서는 점착(no-slip)조건을 모든 벽면에 적용하였으며, 순간가열 경계조건을 좌측 수직 벽면에 설정하였다.

한편 일반적인 정확도로 계산을 수행할 경우 정확한 압력파형을 얻을 수 없었지만 배 정도의 정확도 및 2계 상류도식으로 계산하는 경우 생성된 압력파의 주파수는 선행연구와 거의 근사한 결과를 보였다. 또한 확장된 2차원 모델에 대하여 격자수 및 시간간격, 이완계수 등을 변화시키면서 해의 안정성을 평가하였다.

해석결과의 설명과 평가를 용이하게 하기 위하여 무차원 길이(ζ), 무차원 온도(θ), 무차원 압력(p^*), 무차원 시간(ξ)를 각각 도입하였다.

3. 결과 및 고찰

앞서 제2장에서 기술한 바와 같은 해석모델 및 관련 이론을 적용하여 열음향파의 생성 및 전달특성에 관한 수치해석을 수행하였으며, 주요 결과에 대한 고찰은 다음과 같다.

1차적으로 수치적 기법의 적용 타당성을 검토하기 위하여 Farouk et al.⁽²⁾과 Vasilyev and Paolucci⁽¹⁴⁾의 1차원적인 연구결과를 도입하였으며, Fig. 4 및 Fig. 5에서 해석결과의 타당성과 안정성을 선행 연구결과와 비교 및 평가하였다. 이러한 평가결과는 2차원적인 수치해석에도 적용이 가능한 것으로 가정하였으며, SIMPLE 및 PISO 알고리즘을 각각 적용하여 2차원적인 확장에 관한 결과는 Fig. 6에서 기술하였다.

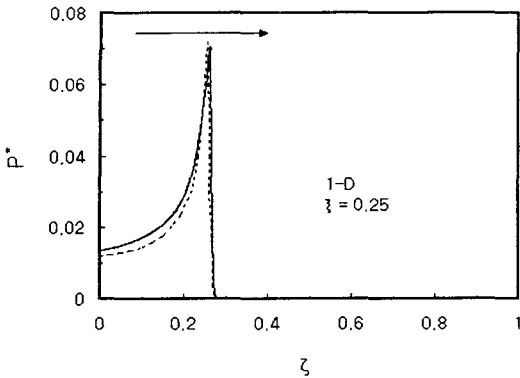


Fig. 4 Comparison of pressure wave (dashed line: Farouk et al.,⁽²⁾ solid line: present study).

먼저 Farouk et al.⁽²⁾이 수행한 결과와 본 연구에서 수행한 결과를 도시한 Fig. 4를 보면, $\xi=0.25$ 인 경우에 1차원적으로 계산된 압력파형과 주파수는 거의 동일하게 계산되었다. 그리고 첨두값(peak value)은 본 연구의 결과가 다소 작게 나타났으며, 파형 후단부의 값은 다소 높게 나타났다. 이러한 결과는 정성적으로 상사한 결과를 보여 본 연구에서 도입한 수치해석기법을 확장된 공간과 경계조건에도 적용이 가능한 것으로 판단된다.

Fig. 5에 도시된 결과는 $\xi=0.5$ 인 경우에 Vasilyev and Paolucci⁽¹⁴⁾의 연구결과와 비교한 결과로서 Farouk et al.⁽²⁾의 결과와 유사한 경향을 보이며, 보다 더 정량적, 정성적으로 상사한 결과를 보였다. 이 경우에도 본 연구의 결과가 첨두값은

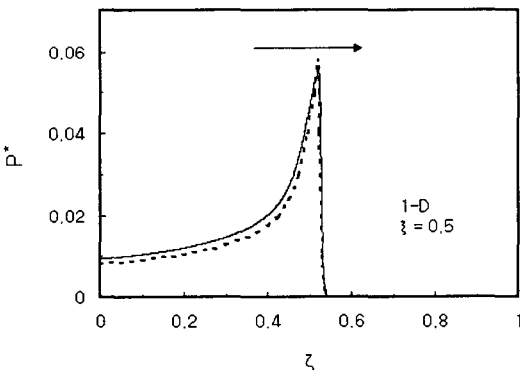


Fig. 5 Comparison of pressure wave (dashed line: Vasilyev and Paolucci,⁽¹⁴⁾ solid line: present study).

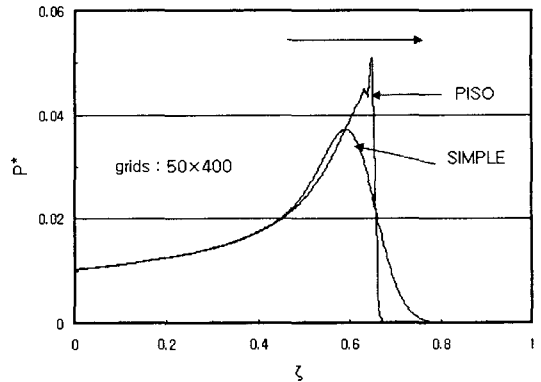


Fig. 6 Comparison of computational algorithms.

다소 작게 나타나고 파형 후단부의 값은 다소 높게 관찰되었다.

한편 Fig. 6은 SIMPLE 및 PISO와 같은 알고리즘에 따른 영향 및 2차원적인 확장성을 검토하기 위하여 선행연구와 동일한 격자수 및 유체에 대하여 비교한 결과로서 PISO 알고리즘의 경우 첨두값의 모사에 효과적임을 알 수 있으나 첨두값 후단부가 왜곡되는 현상을 보여 개선의 여지가 있음을 알 수 있다.

일반적으로 압축성 유동현상 해석에 적용되는 SIMPLE 알고리즘의 경우에는 Fig. 6에 도시한 바와 같이 압력파형과 주파수 그리고 날카로운 첨두형상을 정확하게 나타내지 못하는 것으로 나타났다. 이는 수치확산의 영향으로 인하여 정확한 압력장을 계산하지 못한 결과로 판단된다. 또한 SIMPLE 알고리즘은 본질적으로 밀도변화가 거의 없는 경우를 대상으로 하고 있어 압축성을 고려한 압력수정방정식을 별도로 유도하여 적용하여야 할 것으로 판단되며, 일반적인 압축성 유동처럼 유체가 압력구배에 따라 유동하는 것이 아니라 단지 진동만하고 압력파만 전달되는 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 반면에 PISO 알고리즘의 경우 압력파형의 전단부가 가파르게 상승하고 날카로운 첨두형상과 길게 늘어지는 후단부를 보여 열음향파의 정교한 모사 및 특성파악에 충분히 적용할 수 있는 것으로 파악되었다.

이에 PISO 알고리즘을 적용한 경우에 대하여 시간간격 및 격자수의 증감을 통하여 정확한 열음향파의 특성을 파악하고자 다음과 같은 절차를 통하여 안정적인 결과를 도출하였다.

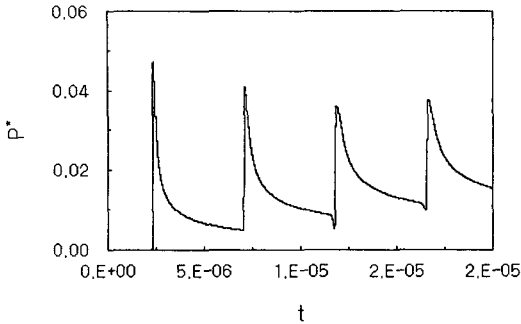


Fig. 7 History of pressure distribution at mid-point.

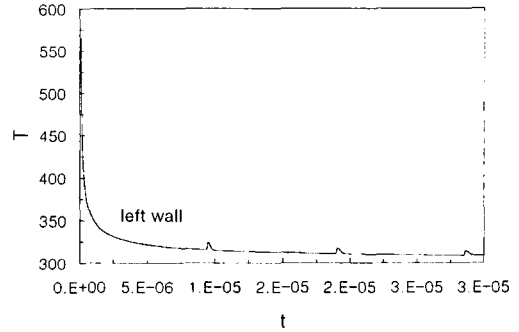


Fig. 8 History of temperature variation.

먼저 시간간격에 따른 해의 안정성은 열유향과의 전달현상에 대한 유한차분법의 이론적인 안정성에 관한 연구자료^(13,14)와 일반적인 이론서⁽¹⁵⁾ 등을 기초로 시간간격을 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-10}$ 범위에서 변화시키면서 반복적으로 평가하였다. 계산결과 시간간격이 1×10^{-9} 미만인 경우에는 수렴시간의 증가와 과형 침투값이 감소하는 경향을 보였다.

시간간격이 1×10^{-9} 이상인 경우에는 수렴속도의 증가와 더불어 침투값이 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 결과적으로 시간간격은 전파되는 음파가 적용된 격자계에서 해결될 수 있을 정도로 충분히 작아야 함을 파악하였으며, 본 연구에서는 1×10^{-9} 정도의 오더(order) 이상에서 안정적인 결과를 얻을 수 있었다. 이는 시간간격에 따른 수치해의 안정성에 관한 Courant 수의 제한요소들과 잘 일치하는 것으로 평가되었다.

그리고 해석모델에서 정교한 압력파를 얻기 위하여 격자수를 변화시키면서 압력파형을 분석하였다. 동일한 시간간격에 대해 격자수를 증가시키기에 따라 침투값이 점증하고 과형의 전단부가 가파르게 변하는 경향을 관찰하였다. 본 연구에서는 50×2000 개의 격자에서 선행 연구결과에서 나타난 압력파의 전체적인 파형과 침투값이 근사한 열유향과의 형상을 얻을 수 있었다.

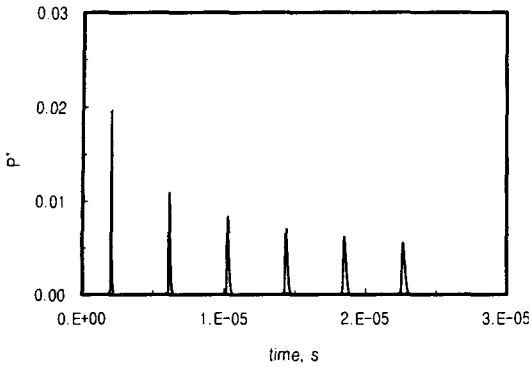
Fig. 7은 선행연구와 동일한 경계조건이 부가된 경우에 해석공간의 중앙점에서 시간에 따른 압력파형을 도시한 결과이다. 압력파의 침투부분이 통과하는 순간 압력이 급격히 상승하고 이후에 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 압력파의 진행 및 시간의 경과에 따라 열유향과의 침투값은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 점성이

나 압력파의 간섭 또는 열적소산 등에 기인한 결과로 판단된다. 그리고 기저압력이 점증하고 있는데, 이는 지속적인 가열조건에 따른 공간 내부의 온도상승에 기인한 결과임을 알 수 있다.

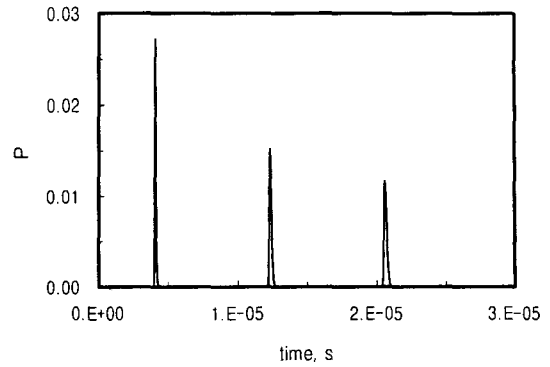
Fig. 8은 순간적인 펄스 경계조건을 부가하여 얻은 시간에 따른 좌측 가열 벽면의 온도변화를 도시한 결과이다. 가열 초기에는 앞서 지속적으로 가열하는 경우와 동일하게 급속한 온도상승으로 보였으며, 정해진 시간이 지난 후에는 급격히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 일정 시점이 지난 후에는 감소하는 정도가 완만하게 진행되는 것을 볼 수 있다. 또한 지속 가열하는 경우와 유사하게 주기적으로 미소한 온도의 증감현상을 볼 수 있는데, 이는 열유향과의 침투부분이 통과함에 따라 발생하는 유체의 압축 및 팽창에 따른 결과로 이해할 수 있다.

Fig. 9는 제한공간의 중앙지점(a) 및 우측 벽면(b)에서 시간에 따른 압력변화 및 전파를 도시한 결과이다. Fig. 9(a)는 2차원 공간의 중앙지점에서 계산한 압력값으로 초기에 생성된 날카로운 썩기 모양의 압력파가 진행되어 우측 벽면에서 반사된 후 다시 역진행하는 현상이 주기적으로 관찰되고 있다. Fig. 9(b)는 우측 벽면에서 계산된 값을 도시한 결과로서 중앙점에서와 마찬가지로 날카로운 형상을 유지하고 있다.

모든 경우에 날카로운 썩기 모양의 파형이 시간의 진행에 따라 그 침투값은 점점 감소하고 파형이 무디어지는 현상이 관찰되었다. 또한 압력감소율은 지속가열조건에 비하여 초기에 비교적 크게 발생하고 있으며, 후기에는 둔화되는 경향을 보이고 있다. 그리고 공간을 진행하는 열유향파의 최고값에 비하여 벽면에 반사될 경우에 다

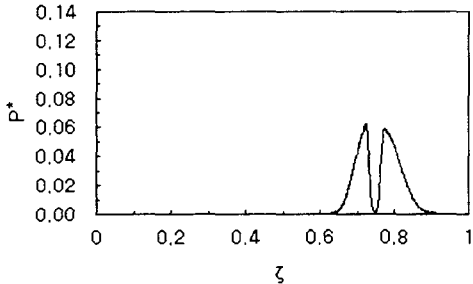


(a) $\zeta=0.5$

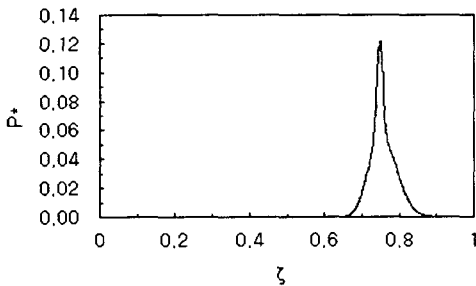


(b) $\zeta=1.0$

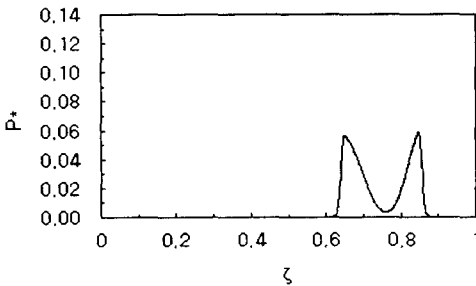
Fig. 9 History of pressure variation at $\zeta=0.5$ and 1.0.



(a) $\xi=initial\ state$



(b) $\xi=superposition$



(c) $\xi=final\ state$

Fig. 10 Variation of pressure profiles.

소 압력값이 증가하는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 10은 일정 주기를 가지고 순간적인 펄스 가열을 2회 부가했을 경우에 발생한 열음향파와 이의 중첩현상을 도시한 결과이다. Fig. 10(a)는 일정한 시간간격으로 진행하던 압력파가 중첩되기 직전인 경우로 우측에 있는 파형이 먼저 생성되어 우측 벽면에서 반사되어 역으로 진행하는 압력파이고 좌측 파형이 일정 시간 후에 동일한 조건에서 생성되어 정방향 진행하는 압력파이다.

Fig. 10(b)는 두 개의 압력파가 완전하게 중첩된 상태를 도시한 결과로서 중첩 전에 약 0.06의 침투값으로 진행하던 열음향파가 완전하게 중첩되었을 경우에는 침투값이 약 0.12로 2배 이상 증가하는 결과를 보였다. 이러한 현상은 각종 시스템에서 압력이나 진동의 공진현상^(15,16)을 유발할 수 있으며, 시스템의 불안정성이나 효율저하 등을 초래할 수 있는 원인으로 작용하기도 한다. Fig. 10(c)는 중첩단계를 지나 압력파가 다시 분리되어 진행되는 결과를 도시한 결과로서 중첩전의 형상을 그대로 유지한 채 진행되는 압력파형을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 2단계 펄스 가열시 발생한 압력장을 Fig. 10과 같이 압력파의 중첩 직전과 중첩상태 그리고 중첩상태를 완전히 벗어나는 상태를 각각

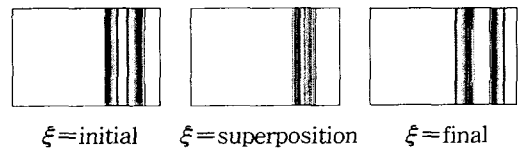


Fig. 11 Contour plots of pressure distribution.

나타내고 있다.

순간적인 펄스 온도경계조건 하에서는 지속적인 가열조건에 비하여 열음향파의 침투깊이나 음파의 전파 속도 등이 다소 약화되는 결과를 보였다. 본 연구에서 적용한 급속 가열 온도경계조건에서 가열 초기 순간적인 Mach 수는 약 1.3 전후로 평가되었다. 즉, 초기에 생성된 압력파는 음속의 약 1.3배로 진행하는 것을 의미하며, 이러한 결과는 Farouk et al.^(2,3)의 결과와 유사하게 나타났다. 또한 가열시간이나 가열온도 또는 가열주기 등 부가되는 경계조건에 따라 생성 및 전파되는 열음향파의 파형이나 크기, 전파속도 등은 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

제한된 2차원 공간내 압축성 유체의 급속 가열에 기인한 열음향파의 생성 및 전달특성에 관한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원적으로 확장한 해석대상에서 열적인 요인에 의한 열음향파의 생성과 전달현상을 PISO 알고리즘과 Kinetic theory 등을 이용하여 수치해석적으로 관찰할수 있음을 보였다.

(2) 열음향파의 파형과 전파현상을 격자수 및 시간간격 조정을 통하여 선행 연구결과와 근사적으로 모사할 수 있었으며, 보다 정교한 특성치를 얻기 위해서는 비선형성 등을 고려하는 수치확산 방지기법의 적용이 요구됨을 파악하였다.

(3) 제한공간내 열음향파의 전파과정에서 유체의 점성이나 열적인 소산, 압력파의 간섭 등 비가역적인 요인에 의한 에너지가 소산으로 압력파형이 감쇠되는 현상을 관찰하였다.

(4) 2단계 펄스가열(pulsed heating)에 따른 열음향파의 전달특성과 증첩효과를 검토하여 압력파 및 진동의 공진이나 증첩에 의하여 각종 시스템의 불안정을 유발할 수 있음을 보였다.

향후에는 실측된 온도조건을 적용하여 압력파의 생성과 전파현상을 해석하고 검증을 위한 실험 및 가시화 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

1. Huang, Y. and Bau, H. H., 1995, Thermoacoustic waves in a semi-infinite medium,

Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 8, pp. 1329-1345.

2. Farouk, B., Oran, E. S. and Fusegi, T., 2000, Numerical study of thermoacoustic waves in an enclosure, Physics of fluids, Vol. 12, No. 5, pp. 1052-1062.

3. Fusegi, T., Farouk, B. and Oran, E. S., 1995, Numerical study of thermo-acoustic convection in a cavity, HTD-Vol. 305, National Heat Transfer Conference.

4. Ozoe, H., Sato, N. and Churchill, S. W., 1990, Numerical analyses of two- and three-dimensional thermo-acoustic convection generated by a transient step in the temperature of one wall, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 18, pp. 1-15.

5. Hwang, I. -J. and Kim, Y. -J., 2002, A Study on the transmission of pressure wave induced by rapid heating of compressible fluid in an enclosure, Proceedings of the SAREK 2002 Summer Annual Conference, pp. 1348-1353.

6. Trilling, L., 1955, On thermally induced sound fields, J. Acoustical Society of America, Vol. 27, pp. 425-431.

7. Kim, D. H., 1995, Thermoacoustic refrigeration, Korean J. of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 283-296.

8. Radhwan, A. M. and Kassoy, D. R., 1984, The response of a confined gas to a thermal disturbance: Rapid boundary heating, J. Eng. Math., Vol. 18, pp. 133-156.

9. Parang, M. and Salah-Eddine, A., 1984, Thermo-acoustic convection heat transfer phenomena, AIAA J., Vol. 22, pp. 1020-1022.

10. Brown, M. A. and Churchill, S. W., 1995, Experimental measurements of pressure waves generated impulsive heating of a surface, AIChE J., Vol. 41, No. 2, pp. 205-213.

11. Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G. W. and Migliori, A., 1985, Understanding Some Simple Phenomena in Thermo-acoustics with Applications to Acoustical Heat Engines, Ameri-

- can J. of Physics, Vol. 53, pp. 147-162.
12. Swift, G. W., 1995, Thermoacoustic natural gas liquefier, Natural gas R&D Contractor's Review Meeting, pp. 1-5.
 13. Spradley, L. W. and Churchill, S. W., 1975, Pressure and buoyancy driven thermal convection in a rectangular enclosure, J. of Fluid Mechanics, Vol. 70, pp. 705-720.
 14. Vasilyev, O. V. and Paolucci, S., 1996, A dynamically adaptive multilevel wavelet collocation method for solving partial differential equations in a finite domain, J. of Computational Physics, Vol. 125, pp. 498-512.
 15. Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T., 1993, Computational fluid dynamics for engineers, Vol. I - II, Engineering Education System, Wichita, USA.
 16. Lee, C. H. and Hyun, J. M., 2000, Oscillatory enclosed buoyant convection of a fluid with the density maximum, Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting, Vol. B, pp. 311-315.