

튜브 내 하향 전파하는 예혼합 화염의 이차 열음향 불안정성 천이에 관한 실험적 연구

박주원* · 김대해** · 박대근*** · 윤성환****†

* 한국해양대학교 기관시스템공학부 학부과정, ** 한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부 연구원,
*** 한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부 선임연구원, **** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

Experimental Study of Transition to Secondary Acoustic Instability at Downward-Propagating Premixed Flame in a Tube

Juwon Park* · Daehae Kim** · Dae Geun Park*** · Sung Hwan Yoon****†

* Undergraduate, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea
** Researcher, Clean Energy System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Korea
*** Senior Researcher, Clean Energy System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 31056, Korea
**** Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

요 약 : 연소실 내 공조현상으로 인해 발생하는 열음향 불안정성은 안정적인 연소시스템을 구현하기 위해 해결해야 하는 고질적인 문제로 제기되어 왔다. 열음향 불안정성은 크게 1차 2차 열음향 불안정성으로 나뉘며, 본 연구에서는 열음향 불안정성 중 2차 열음향 불안정성의 천이에 관해 열손실이 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 2차 열음향 불안정성을 발생시키기 위해 한쪽 끝이 열린 1/4 파장 공명기를 채택하여 수직으로 설치하였고, 공명기 내부에는 예혼합 가스를 주입하였다. 또한 공명기 상단으로 발생하는 열손실 효과를 비교하기 위해 추가적으로 외부 동축류 관을 설치하였다. 연료 농후조건인 예혼합 가스만을 채택하여 주입하였기 때문에 동축관에 주입되는 기체에 따라 공명기 상부에 추가적인 확산화염이 형성될 수 있다. 그 결과 확산화염이 발생되었을 경우 공명기 상단으로의 열손실이 감소하며 2차 열음향 불안정성이 발현되었으며, 확산화염이 억제되어 공명기 상단으로의 열손실이 증가하였을 경우 2차 열음향 불안정성의 발현이 억제되는 결과를 도출하였다.

핵심용어 : 열음향 불안정성, 2차 열음향 불안정성, 열손실, 1/4파장 공명기, 결합 메커니즘

Abstract : Thermoacoustic instability caused by air conditioning in a combustion chamber has emerged as a problem that must be solved to establish a stable combustion system. Thermoacoustic instability is largely divided into primary and secondary acoustic instability. In this study, an experimental study of the effects of heat losses was conducted to investigate the mechanism of secondary acoustic instability. To generate the secondary acoustic instability, a quarter-wavelength resonator with one open end and one closed end was used, and the inside of the resonator was filled with premixed gases. Subsequently, secondary acoustic instability with downward-propagating flames could be realized via thermal expansion on the burnt side. To control heat losses qualitatively, an additional co-axial tube was installed in the resonator with air or nitrogen supply. Therefore, additional diffusion flames can be formed at the top of the resonator depending on the injection of the oxidizer into the co-axial tube when rich premixed flames are used. Consequently, secondary acoustic instability could not be achieved by increasing heat losses to the ambient when the additional diffusion flame was not formed, and the opposite result was obtained with the additional diffusion flame.

Key Words : Acoustic instability, Secondary acoustic instability, Heat losses, Quarter wavelength resonator, Coupling mechanism

* First Author : pjw6642@gmail.com, 051-410-4261

† Corresponding Author : shy@kmou.ac.kr, 051-410-4261

1. 서론

1.1 연구배경

최근 국제해사기구(IMO)의 선박 배기가스 규제안이 채택됨에 따라 선박 기관시스템은 기존의 디젤기간에서 친환경 연료인 LNG를 활용한 가스터빈으로 패러다임의 전환이 이뤄지고 있다. 특히 가스터빈을 선박 추진시스템으로 활용할 경우 IMO에서 규정하는 Tier III 규제까지 대부분 충족할 것으로 기대되어 고성능, 고효율 가스터빈 기술 확보는 국가별 해양산업 경쟁력을 판가름하는 중요한 잣대가 될 것으로 보인다.

이러한 추세에 발맞춰 선박 내 동력원으로써 가스터빈 적용 가능성을 평가하기 위한 연구들이 최근 활발히 수행되고 있다(Kim and Kil, 2012; Gha et al., 2019). Kim and Kil(2012)은 선박동력원 SOFC/GT 하이브리드시스템 성능 평가에 대한 연구를 수행하여 가스터빈의 압력비 향상에 대한 지표를 수립하였으며, Gha et al.(2019)은 가스터빈 엔진이 채택된 선박의 동적저동 모사를 위한 수학 모델 시뮬레이션 개발에 성공한 바 있다.

현재 선박기관의 동력원으로써 가스터빈의 기술 발전을 저해하는 요소 중 가장 큰 문제점은 연소실 내 공조현상으로 인해 발생하는 열음향 불안정성(thermo-acoustic instability)이다. 일반적으로 가스터빈 내에 열음향 불안정성이 발생하면 터빈 내에 기계적 결합이 발생하거나 연소기 폭발로 이어지는 사고를 유발할 수 있다. 따라서 열음향 안정성을 확보하는 요소기술 개발은 가스터빈 설계단계에서 필수적으로 요구된다.

Rayleigh 기준에 따르면 공명현상 중 하나인 열음향 불안정성은 비정상적인 열방출률(heat release rate)이 공명기 내에 내재되어 있는 압력섭동과 동조(in phase) 될 때 발생한다고 알려져 있다(Rayleigh, 1878). 설계자 입장에서는 시스템 안정화를 위해 연소기 내 비정상적인 열에너지와 압력섭동의 탈조(out of phase)를 유도하는 것이 필수적으로 요구되며 이를 위해 열음향 불안정성 발전 과정들을 연소 공학적으로 이해할 필요가 있다.

열음향 불안정성의 성장 메커니즘에 관한 연구는 현재까지 많은 연구자에 의해 진행되었고, 그 중에서 가장 설득력 있는 메커니즘으로 압력결합(pressure coupling)과 가속결합(acceleration coupling)을 꼽을 수 있다. Clavin 등이 이론적으로 제안한 압력결합은 열음향 불안정성의 성장률이 결합상수, βM 에 비례한다는 메커니즘으로, 화학 반응존(chemical reaction zone)과 음향파의 두께가 동조될 때 열음향 불안정성이 발달한다는 가설이다. 여기서 β 와 M 은 각각 켈도비치 수(Zel'dovich number)와 마하 수(Mach number)를 나타낸다.

즉, 외부 온도변화에 대한 민감도를 나타내는 켈도비치 수가 증가함에 따라 압력섭동에 따른 미연가스의 온도변화와 연소 반응물이 동조하여 압력증폭현상이 발생하게 되는 것으로 이해할 수 있다. 또한 아음속으로 진행되는 디플래그레이션(deflagration)의 경우 마하수가 증가할수록 화염전파속도가 음향속도에 가까워지기 때문에 압력섭동과 열방출률이 중첩되어 열음향 불안정성이 성장하는 것으로 설명하고 있다(Clavin et al., 1990). 반면 가속결합은 국소반응영역에서 혼합기 밀도 차로 인해 발생하는 수력학적 불안정성과 압력섭동이 동조하여 압력증폭현상이 발생하는 것으로 설명하고 있다(Pelcé and Rochwerger, 1992).

최근 Yoon 등은 CO₂ 레이저 조사기법을 활용하여 음향장 내에서 하향 전파하는 화염 표면에 수력학적 불안정성을 인위적으로 유도하는 실험을 수행하였다. 그들의 연구결과에 따르면 1차 열음향 불안정성(primary acoustic instability)의 성장률은 화염면적 변화에는 큰 영향을 미치지 못하였고, 오히려 높은 결합상수를 가지는 가스조성에서 압력증폭현상이 관측되는 것을 실험적으로 확인하였다(Yoon et al., 2016).

반면, 2차 열음향 불안정성(secondary acoustic instability)의 압력증폭현상은 현재까지 가속결합 메커니즘이 유력하다고 알려져 있다. Searby와 Denet의 연구에 따르면, 압력섭동의 성장률은 화염표면에 발생하는 물결모양의 파수에 비례한다고 제안하고 있다(Denet and Toma, 1995). 즉, 1차 음향장과 수력학적 불안정성이 균형을 이루며 야기된 1차 열음향 불안정성이 어떠한 외부 요인으로 인해 두 힘의 균형이 무너질 때 2차 열음향 불안정성이 발생한다고 설명하고 있다. 그러나 Searby와 Denet의 제안은 기본적으로 1차 열음향 불안정성의 성장 메커니즘을 가속결합에 근간을 두고 있기 때문에 최근의 Yoon 등의 연구결과와 일치하지 않는다.

따라서 본 연구는, 2차 열음향 불안정성의 발생 메커니즘을 우선적으로 규명하여 성장 메커니즘 규명의 단초를 제공하고자 한다. 2차 열음향 불안정성 발생요인으로 화염 후단에서 발생하는 열손실을 채택하여 열손실 크기에 따른 2차 열음향 불안정성의 천이 유무를 평가하고 아울러 음향강도의 변화도 측정하고자 한다.

1.2 열음향 불안정성의 정의

앞서 언급한 Rayleigh 기준을 실험적으로 해석하기 위하여 한쪽 끝이 열린 실린더 내에서 하향 전파하는 예혼합 화염을 관찰하는 방법이 널리 채택되고 있다(Searby and Rochwerger, 1991; Pelcé and Clavin, 1992; Clanet et al., 1999). Fig. 1(a)와 (b)는 1/4 파장의 종파모드(1/4 wavelength longitudinal mode)로 여기(excitation)되는 공명기를 나타내고 있다. Fig. 1(a)에서 공명기 중앙을 기준으로 왼쪽은 압력 분포를 나타내고 오른쪽은

속도 분포를 나타내고 있다. 압력은 관이 열린 상부가 마디 (node), 관이 닫힌 하부가 배(anti-node)에 해당하며 속도에 경우 압력과는 정반대로 나타난다. 따라서 압력은 관 하부에서 가장 큰 값을 이루며 속도는 관 하부로 이동할수록 0으로 수렴하게 된다. Fig. 1(c)는 이전 연구자인 Searby가 측정한 시간에 따른 압력변동 그래프이며, 관내 하향 전파하는 예혼합 화염의 거동을 4가지 특징적인 형태로 구분하였다.

첫 번째, 화염은 관의 상부에서 점화와 동시에 곡선형태를 그리며 아무 소음을 동반하지 않은 채 전파되고 이때 압력 변동은 나타나지 않는다(Fig. 1(b)-I, (c)-I). 두 번째, 1차 열음향 불안정성이 발생되며 화염은 평면 형태를 나타내고 작은 소음을 동반하며 압력 분포 또한 약간의 상승곡선을 나타낸다(Fig. 1(b)-II, (c)-II). 세 번째, 2차 열음향 불안정성이 발생되며 평면 형태로 전파하던 화염은 관의 중심부에서 물결 모양(corrugated structure)을 띄며 큰 소음을 동반하고, 급격하게 상승하는 압력 분포를 나타낸다(Fig. 1(b)-III, (c)-III). 마지막으로 물결 모양의 화염이 짧은 진동 주기를 거친 후 난류로 천이하는 화염(turbulent flame)이 발생하는데 이때 압력 분포는 감소곡선을 나타내고 2차 열음향 불안정성이 발생할 경우 필연적으로 나타나게 된다.

2. 실험 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 실험장비의 개략도를 나타내고 있다. 연소기로 채택된 아크릴 관의 내부 직경과 길이는 각각 5 그리고 100 cm이고, 관 상부만 개방된 전형적인 1/4파장 공명기(quarter wavelength resonator)를 실험에 사용하였다. 또한 아크릴 관 주위로 동일 재질의 동축관을 설치하여 주위 가스(ambient gas)에 따라 관 상부의 외부 환경을 인위적으로 제어하였다. 여기서 사용된 동축관의 내부 직경과 길이는 각각 8 그리고 100 cm이고, 길이 방향으로 관 중간 부분에 배쉬를 설치하여 주위 가스 공급을 균일하게 형성하였다.

Table 1은 실험에서 사용된 예혼합 화염 가스 조성을 나타내고 있다. 채택된 가스 조성은 이전 문헌을 토대로 2차 열음향 불안정성이 발생하는 이산화탄소가 희석된 에틸렌 예혼합 가스를 채택하였다(Choi et al., 2018; Yoon et al., 2017; Yoon et al., 2018). 본 연구의 지향점은 LNG 가스터빈의 시스템 안정화 구현이 주 목적이거나, LNG의 경우 메탄계 연료이기 때문에 화염의 발광도가 낮은 단점으로 인해 가시화하기 기반으로 한 실험연구에 적합하지 않다. 따라서 메탄계 연료와 분자구성이 가장 가까운 에틸계 연료인 에틸렌을 채택하였고 화염전파속도 제어를 위해 희석제로 이산화탄소를 혼합하였다. 관 상부로의 열손실을 정량적으로 제어하기 위한 방안은 다음과 같다. 기본 화염(default flame)을 당량비

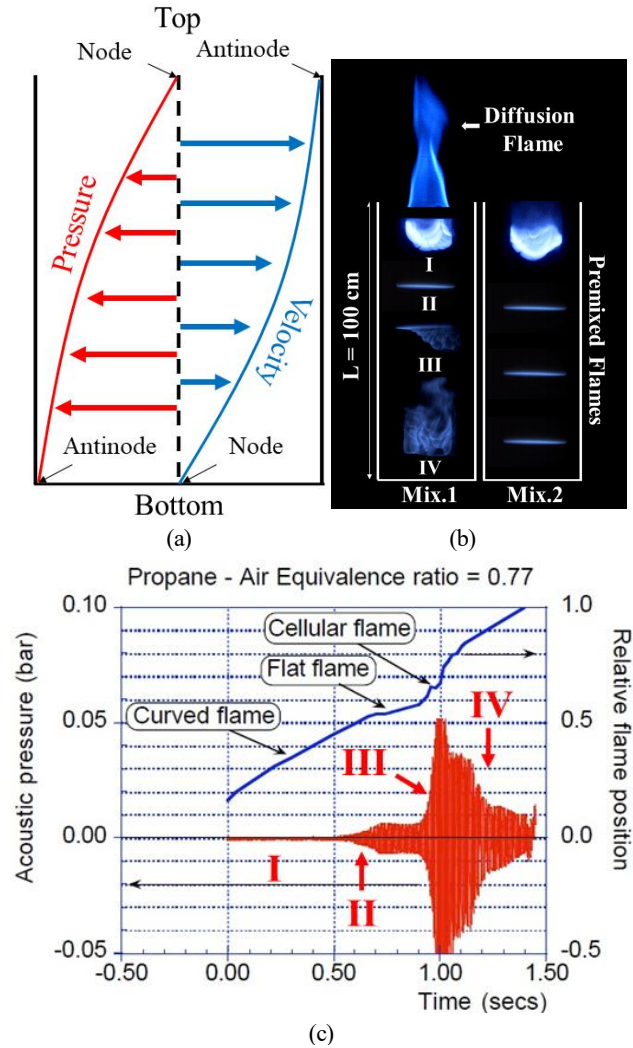


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the distribution of acoustic pressure and velocity fields in 1/4 wavelength, (b) Representative flame shapes of Mix. 1 and 2; (I) curved flame, (II) flat flame, (III) corrugated flame and (IV) turbulent flame, (c) Pressure record of acoustic instability of a premixed flame propagating in a tube in Ref. (Searby, 1992).

(equivalence ratio, ϕ) 1.4인 연료 농후조건(fuel rich condition)의 에틸렌 예혼합 화염을 채택함으로써 화염 후류에 미연소된 탄화수소 계열의 화학종과 주위류로 선정된 공기(Mix. 1)와 추가적인 반응을 유도하였다. 따라서 연소기 내부의 하향 전파하는 예혼합 화염 외에 관 상부에서 확산화염이 추가적으로 생성됨에 따라 관 상부로의 열손실을 최대한 배제하였다. 또한 기본 화염조건에서 주위 가스를 질소 혹은 헬륨 (Mix. 2 and 3)을 선택함으로써 관 상부에 확산화염이 발생되지 않는 조건에서도 실험을 수행하였다. Table 1에 표기된 연소 상태량인 층류화염전파속도(S_L)와 단열화염온도(T_b)는

Table 1. Tested gas composition

Mix	C ₂ H ₄ [%]	O ₂ [%]	CO ₂ [%]	ϕ	Ambient gas	S_L [cm/s]	T_b [K]
1					Air		
2	0.09	0.195	0.715	1.4	N ₂	9.5	1757
3					He		

S_L : Laminar burning velocity (CHEMKIN3.7, Premix Code, USC-II)

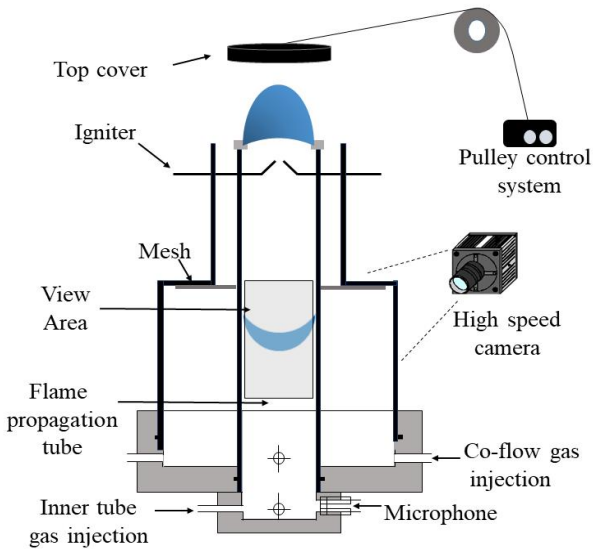


Fig. 2. Schematic drawing of the experimental setup.

USC II 반응 메커니즘을 채택하여 CHEMKIN(Premix code)을 통해 획득하였다(Kee, 1989).

실험에 사용된 제어 및 측정 시스템은 함수 발생기(function generator, keysight 33400b series)를 통해 작동되었고, 실험 진행 순서는 다음과 같다; 우선 아크릴 관 상부 커버를 닫아 밀폐계를 형성한 후, 기본화염(default flame)에 해당하는 예혼합 가스를 충전하였다. 충전 시 발생할 수 있는 유동에 의한 내부 교란을 최대한 억제하기 위하여 약 5분 정도의 대기시간을 가졌다.

이후 시작 버튼과 동시에 점화가 이루어지며 도르래 시스템은 함수발생기로부터 신호를 받아 상부 커버를 수직한 방향으로 개방하여 전형적인 1/4과장 공명기를 형성하게 된다. 점화된 화염은 하향 전파하여 관 상부로부터 45 cm 지점에 도달하였을 때 고속카메라(high speed camera, photron fastcam SA3) 촬영이 시작된다. 촬영 범위는 화염 전파 방향으로 10 × 11 cm이고 이미지 해상도와 샘플링 범위는 각각 512 × 1024 pixel 및 1000 fps(frame per second)에 해당한다. 압력 변동은 바닥에 설치된 압력 계측센서(PCB Piezotronics 106B52 dynamic pressure sensor)와 오실로스코프(Teledyne Lecroy)를 통해 획득

하였으며 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 압력 진동 분석을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열손실 효과에 의한 화염 위치 및 압력 변화

Fig. 3(a)는 Mix. 1~3까지의 해당하는 화염을 시간에 따른 화염 선단 위치, l_{tip} 로 나타내었고, Fig. 3(a) 내에 원 기호는 Fig. 3(b)에 삽입된 화염이미지를 획득한 화염 선단 위치를 나타낸다. Mix. 1~3은 모두 동일한 가스 조성을 가지며 층류화염전파속도(S_L , laminar burning velocity) 또한 동일하기 때문에 아크릴 관 중심부에 화염이 도달하기까지 약 2.6 sec 가 소요됐으며 모두 평면화염 형태로 관의 중심부에 도달하였다.

먼저, 주위류로 공기를 주입하여 관 상부에 발생된 확산 화염을 통해 관 상부로의 열손실을 억제한 Mix. 1에 경우, 점화와 동시에 발생하는 초기 곡선화염(curved flame) 형태에서 1차 열음향 불안정성 발생 후 약 3.2 sec까지 약간의 소음과 함께 일정한 주기를 갖는 평면화염(flat flame) 형태로 전파된다. 이후 약 3.3 sec에서 2차 열음향 불안정성의 발현과 함께 화염 선단의 위치는 급격하게 빠른 속도로 전파되는 모습이 관측된다. 화염 이미지를 나타낸 Fig. 3(b)에서도 마찬가지로 2차 열음향 불안정성의 발현과 동시에 평면화염에서 물결모양 화염으로 천이되는 화염 이미지가 관측되며, 이후 난류 화염으로 천이되는 모습이 관측되었다.

반면에 Mix. 2에 경우, 주위류로 질소를 주입하여 점화와 동시에 관 상부에 형성되는 확산화염을 억제시켜 관 상부로의 열손실이 크게 발생되도록 한 결과, 점화 직후 초기 곡선 화염과 1차 열음향 불안정성 발생 후 나타나는 평면화염까지 Mix. 1과 동일한 형태로 전파되는 것이 관측되었다. 하지만 1차 열음향 불안정성 발생 이후 2차 열음향 불안정성으로 천이되는 Mix. 1과는 다르게 2차 열음향 불안정성이 발현되지 않고 계속적으로 일정한 주기를 갖는 평면화염 형태로 전파되는 것이 관측되었다. 따라서 열손실의 증가는 2차 열음향 불안정성의 발현을 억제시키는 것으로 확인되었다. 하지만 주위류로 주입된 질소에 경우, 화염이 전파하는 내부 관과 관의 상부에 발생하는 밀도 차에 의한 영향을 배제할 수 없기에 주위류로 헬륨을 채택하여 추가적인 실험을 진행하였다.

주위류로 헬륨을 사용한 Mix. 3은 Fig. 3(a)와 (b)에서 나타듯 Mix. 2와 동일한 실험 결과를 도출하였다. Mix. 3에서 주위류로 사용된 헬륨은 질소와 마찬가지로 관 상부에 형성되는 확산화염을 억제하며 이로 인해 관 상부로의 열손실이 증가하게 된다. 이는 2차 열음향 불안정성 발현의 억제를 야

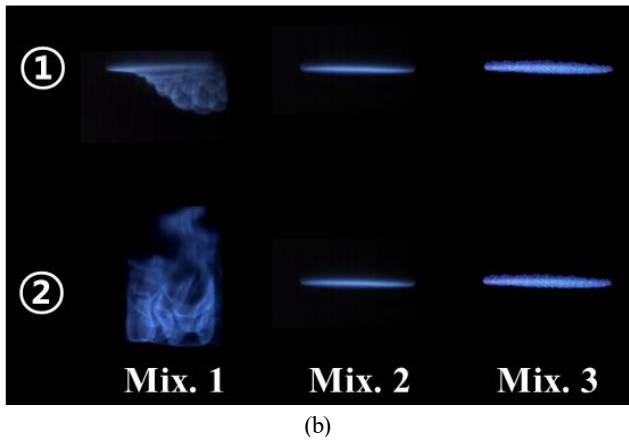
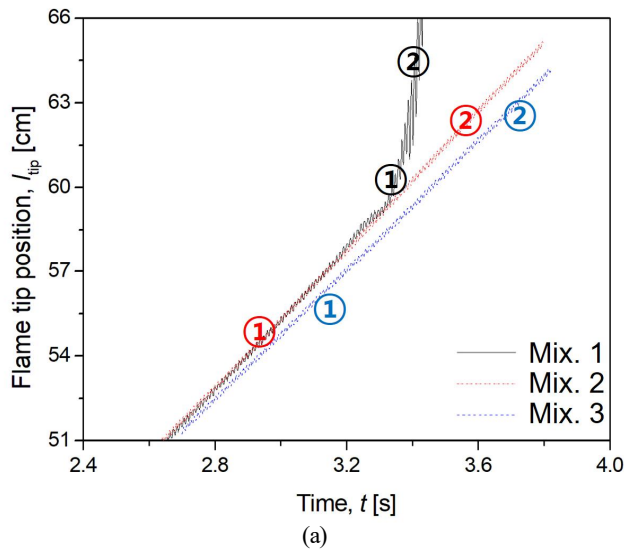


Fig. 3. (a) Temporal flame tip position at rich C_2H_4 diluted with CO_2 , (b) Flame shape of tip position graph number.

기하며 이를 통해 본 연구 결과에 대해 온전히 열손실 증감에 대한 비교가 확인되었다.

Fig. 4는 실험 장치 하부에 설치한 압력 계측센서(PCB Piezotronics 106B52 dynamic pressure sensor)를 통해 측정된 압력변동(pressure fluctuation)을 시간에 따라 나타내었다.

Mix. 1에 압력 변동 그래프를 나타낸 Fig. 4(a)를 보면, 점화 이후 곡선화염으로 전파되며 압력변동은 관찰되지 않고 일정한 주기가 없는 노이즈만 나타난다. 이후 약 1.4 sec에서 1차 열음향 불안정성(primary acoustic instability)이 나타나며 압력변동이 서서히 증가하다가 포화상태에 접어들게 되고, 약 3.3 sec 이후 평면화염이 심하게 굴곡지며 압력변동이 급격하게 증가하는 2차 열음향 불안정성(secondary acoustic instability)이 나타나는 것이 관측된다. 급격히 증대된 압력변동은 이후 난류화염으로 천이하고 압력이 급격히 감소되는 과정을 나타낸다.

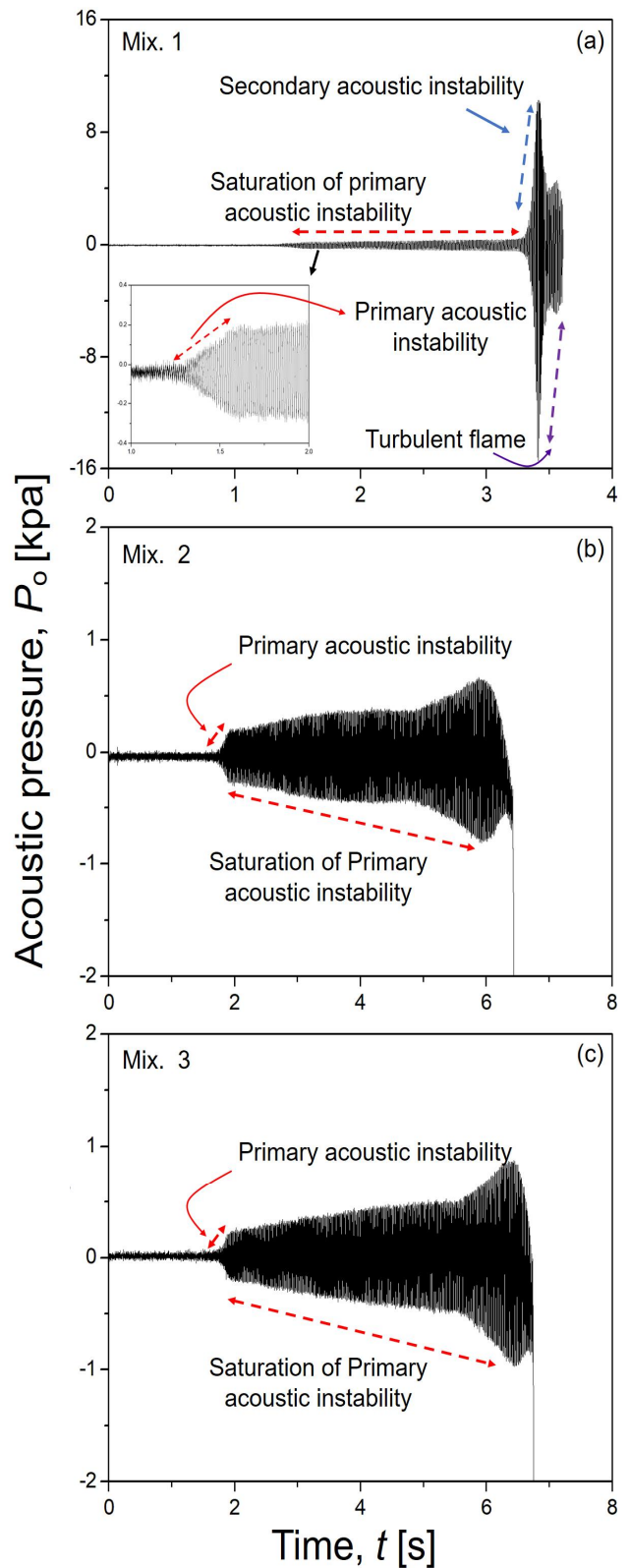


Fig. 1. Temporal acoustic pressure at the bottom of the tube; (a) Mix. 1, (b) Mix. 2, and (c) Mix. 3.

그에 반해 Mix. 2와 Mix. 3에 압력 변동 그래프를 나타낸 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)를 보면, 약 1.8 sec에서 약간의 압력 상승과 함께 1차 열음향 불안정성(primary acoustic instability)이 나타나는 것이 확인되었다. 이후 압력변동은 포화상태에 접어들고 2차 열음향 불안정성으로의 전이는 발생하지 않은 채, 화염은 평면화염 형태로 관 하부까지 전파되는 것이 그래프를 통해 확인된다.

위 실험 결과를 바탕으로 관 상부에서의 열손실은 관내 온도에 영향을 미치며 이러한 온도장의 변화는 압력, 속도장의 변화 뿐만 아니라 화염 두께에 영향을 미치기 때문에 2차 열음향 불안정성 발현 여부에 결정적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.2 음향 세기 비교

Fig. 5는 Mix. 1~3이 나타내는 열음향 세기를 비교하였다. 열음향 세기(the acoustic intensity or the sound intensity)는 한 공간에서 음압을 발생시키는 힘으로 간주되며, 단위 면적당 소리의 세기로 정의된다. 따라서 열음향 세기, I 는 다음과 같이 나타낸다(Kaskan, 1953).

$$I = P_u u_u \quad (1)$$

여기서 P_u 와 u_u 는 각각 미연소 혼합물의 압력과 속도를 말하며, 열음향 세기의 양적 논의를 위해 시간에 따른 평균 열음향 세기, $\langle I \rangle$, 를 나타내면 다음과 같다.

$$\langle I \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t P_u(t) u_u(t) dt \quad (2)$$

열음향 압력은 화염 선단에서 관 하부에 설치된 압력 계측센서로부터 측정되어 도출되었으며, 어떠한 시간에 대해 발생하는 압력, $P_u(x)$, 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_u(x) = P_b \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (3)$$

여기서 P_b 는 관 하부에서의 압력을 말하고 이는 앞서 언급했듯이 관 하부에 설치된 압력 계측 센서를 통해 값을 도출하였다. x 는 관 하부로부터 측정된 거리를 나타내며 거리의 계측은 화염 선단의 위치를 기준으로 도출하였다. 또한 λ 는 음향 파장을 나타내고, Mix. 1~3 모두 1/4 공명기를 사용하였기에 동일한 값이 적용되었다. 미연소 혼합물의 속도는, $u_u = d\xi_u/dt$ 이며 미연소 혼합물의 변이, ξ_u 는 다음과 같다(Gade, 1982).

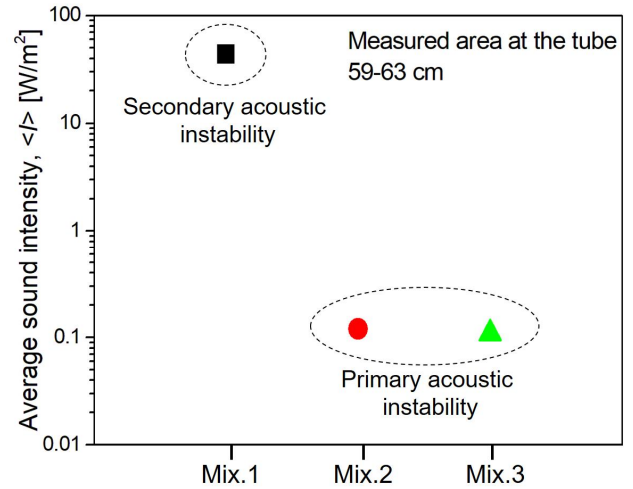


Fig. 5. Sound Intensity (Acoustic intensity) of Mix. 1, 2 and 3.

$$\xi_u(x) = \frac{P_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda}}{\rho c \omega} \quad (4)$$

모든 혼합물의 면적 단위는 고속 카메라를 통해 촬영된 범위에서 59~63 cm(4 cm) 구간을 채택하여 열음향 세기를 구했으며 Fig. 5에 표시된 각 혼합물들의 열음향 세기 값(y축)은 로그 스케일(log scale)을 기준으로 나타내었다.

Mix. 1에 경우 채택한 단위 면적 범위에서 2차 열음향 불안정성이 나타났으며 굉장히 큰 열음향 세기가 도출되었다.

그에 반해 Mix 2와 Mix. 3에 경우 열손실 효과로 인해 2차 열음향 불안정성 발현이 억제되어 1차 열음향 불안정성만 나타났으며 그로 인해 열음향 세기 또한 아주 약하게 나타나는 것이 관측되었다. 열음향 세기는 압력과 비례관계를 갖기 때문에 2차 열음향 불안정성 발현의 차이가 곧 열음향 세기에 기여하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 튜브 내 하향 전파하는 예혼합 화염의 2차 열음향 불안정성 발생에 미치는 열손실 효과에 대해 실험적으로 조사하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 가스 터빈 혹은 연소 시스템 설계에 있어서 열음향 불안정성의 문제를 해결하기 위한 단초를 제공할 것으로 기대되며, 본 연구를 통해 도출된 결론은 아래에 서술하였다.

(1) 열손실의 증가는 관내 온도뿐만 아니라 화염 두께에도 영향을 미치는 핵심 요소이며 이를 통해 2차 열음향 불안정성의 억제가 가능하며 비교적 안정된 전파화염이 관측되었다.

(2) 주위류로 각각 질소와 헬륨을 주입한 Mix. 2, Mix. 3은 각각의 실험에서 같은 결과를 도출해 냈으며 이를 통해 2차 열음향 불안정성의 억제에는 주위류로 선정된 가스와 내부 관 사이의 밀도 차에 인한 현상이 아닌 열손실 효과에 의해 나타나는 현상임을 관측하였다.

(3) 열음향 세기는 압력과 비례관계를 나타내므로 열손실 효과로 인한 2차 열음향 불안정성의 발현 유무에 따라 열음향 세기 또한 다르게 나타나는 것이 관측되었다.

사 사

이 논문은 2018학년도 한국해양대학교 학술연구지원사업 신진교수정착연구비(또는 학술연구지원사업 교내연구비)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Choi, J. H., S. C. Park, Y. S. Jun, Y. J. Chun, K. H. Han, and S. H. Yoon(2018), Dynamic Behaviors of Acoustic Instability According to Lewis Number in Downward-Propagating Premixed Flames, *KOSCO*, Vol. 3, pp. 10-18.
- [2] Clanet, C., G. Searby, and P. Clavin(1999), Primary Acoustic Instability of Flames Propagating in Tubes: Cases of Spray and Premixed Gas Combustion, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 385, pp. 157-197.
- [3] Clavin, P., P. Pelcé, and L. He(1990), One-Dimensional Vibratory Instability of Planar Flames Propagating in Tubes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 216, pp. 299-322.
- [4] Denet, B. and A. Toma(1995), Numerical Study of Premixed Flames Parametric Acoustic Instability, *Combustion Science and Technology*, Vol. 199, pp. 23-33.
- [5] Gade, S.(1982), Sound Intensity, *Technical Review*, Vol. 3, pp. 3-39.
- [6] Gha, S. W., J. Y. Ki, N. Y. Son, D. J. Kim, J. S. Shim, M. H. Kim, and S. K. Park(2019), Development of A Dynamic Simulation Mathematical Model of A 2-spool Marine Gas Turbine Engine, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 43, No. 9, pp. 655-660.
- [7] Kaskan, W. E.(1953), An Investigation of Vibrating Flames, *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 4, pp. 575-591.
- [8] Kee, R. J.(1989), *CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics*, Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, SAND 89-8009B.
- [9] Kim, M. H. and B. L. Kil(2012), Performance Analysis of Hybrid SOFC/Uncooled GT System for Marine Power Applications, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 36, No. 8, pp. 1050-1060.
- [10] Pelcé, P. and D. Rochwerger(1992), Vibratory Instability of Cellular Flames Propagating in Tubes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 239, pp. 293-307.
- [11] Pelcé, P. and P. Clavin(1992), Influence of Hydrodynamics and Diffusion upon the Stability Limits of Laminar Premixed Flames, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 124, pp. 219-237.
- [12] Rayleigh, J.(1878), The Explanation of Certain Acoustical Phenomena, *Nature*, Vol. 18, pp. 319-321.
- [13] Searby, G.(1992), Acoustic Instability in Premixed Flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 81, pp. 221-231.
- [14] Searby, G. and D. Rochwerger(1991), A Parametric Acoustic Instability in Premixed Flames, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 213, pp. 529-543.
- [15] Yoon, S. H., L. Hu, and O. Fujita(2018), Experimental Observation of Pulsating Instability under Acoustic Field in Downward-Propagating Flames at Large Lewis Number, *Combustion and Flame*, Vol. 188, pp. 1-4.
- [16] Yoon, S. H., T. J. Noh, and O. Fujita(2016), Onset Mechanism of Primary Acoustic Instability in Downward- Propagating Flames, *Combustion and Flame*, Vol. 170, pp. 1-11.
- [17] Yoon, S. H., T. J. Noh, and O. Fujita(2017), Effects of Lewis Number on Generation of Primary Acoustic Instability in Downward-Propagating Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, pp. 1603-1611.

Received : 2020. 11. 02.

Revised : 2020. 12. 07.

Accepted : 2020. 12. 28.