Check for updates

Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 24, No. 6, pp. 28-44, 2020

Research Paper
DOI: https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.6.028

소형 2행정 엔진의 전송 포트 형상에 따른 소기 성능에 대한 수치 해석적 연구

김청환[a] · 박성호[a] · 김명규[a] · 안은수[a,*]

Numerical Study on Transfer Port Design for Scavenging Performance in Small Two-stroke Engines

Cheonghwan Kim[a] · Sungho Park[a] · Myeongkyu Kim[a] · Eunsoo Ahn[a,*]
[a]*Engine Design Team, TENERGY, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: ahnes@tenergy.co.kr*

ABSTRACT

In this paper, the scavenging process of various transfer ports was evaluated to improve the performance of a small two-stroke engine for unmanned aerial vehicles. Three-dimensional computational fluid dynamics simulations were performed to four transfer ports for the evaluation, and a three-phase scavenging model was developed and applied to the simulation results for the quantitative comparison of scavenging performance. the short-circuit of fresh charge was restrained and an in-cylinder turbulent kinetic energy was enhanced by changing the transfer port. Also, a difference in the scavenging for each port were confirmed by applying the three-phase model to the simulation results.

초 록

본 연구에서는 무인 항공기용 소형 2행정 엔진의 성능 개선을 위해 다양한 전송 포트 형상의 가스 교환 성능을 평가하였다. 성능 평가를 위해 네 가지 전송 포트 형상에 따른 3차원 전산 유체 해석을 진행하였으며, 가스 교환 성능의 정량적 평가를 위해 이상적 소기 모델인 완전 대체 소기 모델과 완전 혼합 소기 모델을 바탕으로 새로운 3단계 소기 모델을 개발하여 해석 결과에 적용하였다. 2행정 엔진의 전송 포트 형상 변경을 통해 흡기의 단락 현상을 효과적으로 줄였으며 가스 교환 과정 동안의 실린더 내 난류 에너지 또한 크게 개선되었다. 또한, 전송 포트 형상 별 3단계 소기 모델의 적용을 통해 가스 교환 성능을 정량적으로 평가할 수 있었으며, 포트 형상 별 소기 양상의 차이를 확인할 수 있었다.

Key Words: Internal Combustion Engine(내연기관), Two-stroke(2행정), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Scavenging(소기), Scavenging Model(소기모델), Unsteady Flow(비정상유동), Short-circuit(단락)

Received 21 July 2020 / Revised 5 November 2020 / Accepted 10 November 2020
Copyright Ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548
[이 논문은 한국추진공학회 2020년도 춘계학술대회(2020. 7. 16-17), 온라인 학술대회) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근, 무인 항공기(UAV, unmanned aerial vehicles) 기술은 통신 기술 및 경량 드론 기술의 발전으로 인해 매우 보편적인 기술 중 하나가 되었다. 무인 항공기란 조종사가 탑승하지 않고 사람이 지상에서 원격 통신을 이용하여 조종하거나 사전에 입력된 경로를 따라 자율적으로 비행하는 비행체를 의미한다. 무인 항공기는 사람이 탑승해야 한다는 제약 조건이 없으므로, 유인 항공기(manned aircraft)에 비해 크기가 작고 가벼우며 제작과 사용에 대한 비용도 상대적으로 적다는 장점이 있다. 한때 무인 항공기는 특정 지역을 감시하거나, 무인 폭격 등의 군사적인 목적으로만 사용되었으나, 어렵고 위험한 작업을 작은 비용으로 안전하고 신속하게 실행할 수 있다는 점에서 무인 항공기의 수요는 군용뿐 아니라 민간에서도 폭발적으로 증가하는 추세이다[1].

무인 항공기를 개발하는 데 있어 중요한 부분 중 하나는 적절한 동력원(power source)을 선택하는 것이다. 2행정 엔진(two-stroke engine)은 무인 항공기의 주 동력원으로 가장 보편적으로 이용되는 내연기관 중 하나이다. 2행정 엔진은 두 번의 행정(stroke), 즉 크랭크축(crank shaft)이 한 번 회전하면서 이에 연결된 피스톤이 한 번 상승 및 하강하는 것으로 한 번의 사이클을 충족시킨다. 현재 내연기관 중 가장 많이 사용되는 방식인 4행정 엔진(four-stroke engine)과 비교하였을 때, 2행정 엔진은 같은 축 회전수 동안 4행정 엔진 대비 두 배의 사이클 수, 즉 두 배 많은 동력 행정(power stroke)을 거치게 된다. 엔진의 출력은 연료가 가진 화학적 에너지로부터 연소 과정을 통해 열에너지로 변환, 이를 이용하여 피스톤을 밀어내는 동력 행정을 거쳐 발생하므로, 2행정 엔진은 같은 배기량을 가지는 4행정 엔진에 비해 높은 출력 밀도(power density) 특성을 가진다.

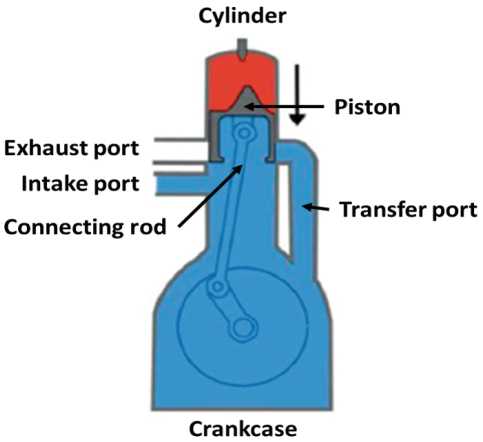

Fig. 1 Simple two-stroke engine structure [2].

2행정 엔진은 Fig. 1과 같이 크게 크랭크축이 위치한 크랭크케이스(crankcase) 와 연료의 연소가 발생하는 실린더(cylinder)의 두 체적으로 구성된다. 피스톤은 커넥팅 로드(connecting rod)를 통해 크랭크축에 연결되어, 두 체적을 분리한 채로 상하 운동을 하는 구조이며, 두 체적 사이에는 전송 포트(transfer port)가 라이너 벽면에 가공되어 두 체적을 연결한다. 라이너 벽면에는 연소한 가스가 빠져나가는 배기 포트(exhaust port) 또한 가공되어 있으며, 피스톤의 상하 움직임을 통해 배기 및 전송 포트의 개폐가 조절된다. 2행정 엔진은 구동계가 단순하고 부가적인 밸브트레인 계통이나 윤활 계통이 필요하지 않기 때문에, 다양한 밸브 조절 기술을 통해 흡·배기 밸브를 여닫는 4행정 엔진보다 상당히 경량이고, 이러한 점에서 2행정 엔진은 소형 무인 항공기의 주 동력원으로 상당히 좋은 선택지가 된다[2].

2행정 엔진은 운전 과정 동안 피스톤 상단의 실린더 체적과 하단의 크랭크케이스 체적에서 서로 다른 과정(process)이 동시에 진행된다. Fig. 2는 2행정 엔진의 운전 과정을 나타낸 것이다. 피스톤이 상승하는 압축 및 흡입 과정 시기에는 피스톤이 상승하면서 실린더 체적이 줄어들어 실린더 내 연료-공기 혼합기의 압축이 진행되며, 크랭크케이스의 체적은 반대로 늘어나게 되면서 압력이 낮아져 흡기 포트(intake port)로부터 새로운 연료-공기 혼합기가 크랭크케이스로 유입된다. 피스톤이 상사점(TDC, top dead center)에 거의 도달하게 되면 실린더 상단에 있

는 점화 플러그에 의해 연소가 시작되고, 상사점 이후에는 고온·고압의 기연 가스(burned gas)가 피스톤을 밀어내면서 크랭크축에 동력을 전달한다. 피스톤이 특정 시점 이후까지 하강하게 되면 라이너에 가공된 배기 포트가 실린더에 연결되어 기연 가스의 배기 과정이 진행되고, 동시에 피스톤의 하강으로 인해 크랭크케이스 내의 연료-공기 혼합기의 압축이 진행된다. 배기 과정이 진행되면서 피스톤의 하강이 더 진행되면 전송 포트 또한 실린더와 연결되는데, 이 시기에는 크랭크케이스 내의 새로운 연료-공기 혼합기가 전송 포트를 통해 실린더로 유입되어 실린더 내 잔류하는 기연 가스를 밀어내면서 가스 교환이 진행된다. 이 과정을 소기 과정(scavenging process)이라 한다. 소기 과정이 진행되는 동안 전송 포트와 배기 포트가 동시에 실린더와 연결되어 있으므로 실린더 내부로 유입된 연료-공기 혼합기가 배기 포트로 바로 유출되는 단락(short-circuit) 현상이 발생할 수도 있다. 소기 과정은 피스톤이 하사점(BDC, bottom dead center) 에 도달한 이후 다시 상승하여 전송 포트가 닫힐 때까지 계속 진행되고, 전송 포트와 배기 포트가 순차적으로 닫힌 이후에 가장 처음의 압축 및 흡입 과정이 다시 이루어지면서 전체 사이클이 반복된다.

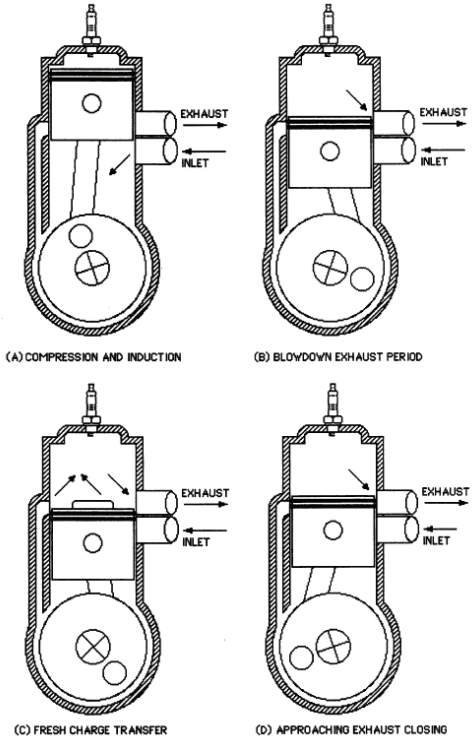

Fig. 2 Running process of two-stroke engine [3].

2행정 엔진의 출력은 사이클이 진행되면서 배기 포트 닫힘 시점 이후 실린더 내에 갇힌(trapped) 혼합기의 양에 직결된다. 따라서 2행정 엔진의 성능을 최적화하기 위해선 소기 과정에서 연료-공기 혼합기의 흐름을 최적화하여 전송 포트로부터 유입되는 연료-공기 혼합기가 실린더 내 기연 가스를 효과적으로 밀어내며 단락 현상은 최소한으로 발생하도록 설계해야 한다. 2행정 엔진의 소기 과정은 엔진의 성능 및 연료 소비율에 지대한 영향을 미치며, 이는 포트의 높낮이 조절에 의한 포트 개폐 시간 및 포트의 형상, 그리고 배기 시스템에서 압력파의 거동 등에 의해 조절될 수 있다[4]. 본 연구에서는 이러한 설계 요소 중에서도 전송 포트의 형상을 최적화하여 2행정 엔진의 성능을 개선하는 데 초점을 맞추고자 한다.

최근, 컴퓨터 기술의 발전과 함께 복잡한 형태의 부품을 설계하는 단계에서 전산 유체 역학(CFD, computational fluid dynamics) 해석에 대한 수요가 증가하고 있다. 전산 유체 해석은 유체의 거동을 표현하는 지배 방정식인 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes equation)을 주어진 영역 내에서 수치 해석적 기법으로 풀어내는 것으로, 전산 유체 해석은 내연기관과 같은 복잡한 기계 장치 내부의 유동을 분석하는 데 효과적인 방법이며 많은 연구에서 실린더 내의 가스 교환 과정이나 혼합기 형성 및 연소[5-7] 과정의 분석에 사용되었다. 엔진설계 단계에서 부품의 성능을 확인하기 위해 시제품을 제작하여 시험하는 것은 상당한 시간과 비용이 필요하며, 필요한 정보를 취득하기 위한 과정도 복잡하거나 불가능할 수 있다. 특히, 엔진 내 유동을 확인하기 위해선 특수한 광학 엔진(optical engine)을 이용하여 평면상에서 입자 영상 속도계(PIV, particle image velocimetry) 촬영[8]을 하거나, 레이저 도

플러 속도계(LDV, laser doppler velocimetry)를 활용하는 등의 방법[9]이 사용됐으나 이는 상당히 어려운 과정이고 고비용이라는 문제가 있다. 그러나 전산 유체 해석을 엔진설계 단계에서 활용하면, 컴퓨터 지원설계(CAD, computer aided design) 작업을 통해 엔진 모델을 제작하고, 모델에 대한 계산 격자 생성 및 초기 조건(IC, initial condition)과 경계 조건(BC, boundary condition) 설정을 통해 해석 모델을 만들고 이를 수치적으로 계산하여 부품의 성능을 대략적으로 확인할 수 있다. 또한, 전산 유체 해석은 실험을 통해 확인할 수 없는 정보들에 대한 분석 및 시각화를 할 수 있어 다양한 분야에서 유용하게 활용되고 있다.

현재까지, 전산 유체 해석을 활용하여 2행정 엔진 포트 형상을 최적화하기 위한 다양한 연구들이 진행되어왔다. Garg 등[10]은 STAR-CD 를 이용한 전산 유체 해석을 기반으로 루프 소기식 2행정 엔진의 가스 교환 과정을 규명하고, 전송 포트 형상 변경에 따른 가스 교환 양상의 변화를 분석하였다. Garg 등은 수동적 스칼라(passive scalar) 개념을 도입하여 실린더로 새롭게 유입되는 흡기와 잔류 가스를 구분하여 가스 교환 과정 동안 흡기의 흐름을 파악하고, 가스 교환 진행 후 이들의 비율을 통해 트래핑 효율을 계산하였다. 해당 연구 결과에 따르면 루프 소기식 2행정 엔진 3500 RPM 스로틀 완전 개방(WOT, wide open throttle) 조건에서 배기 포트를 통해 단락된 흡기량은 전체 흡기의 26%를 차지하였으며, 단락된 연료-공기 혼합기의 90%는 주 전송 포트(main transfer port)를 통해 실린더로 유입된 흡기였고, 포트 닫힘 이후 실린더 내 잔류 가스량은 16% 인 것으로 보고하였다. 또한, 2행정 엔진에서의 이러한 유동 경향은 다른 부하 조건 하에서도 비슷한 경향을 보였다고 언급하였다. 해당 연구에서는 앞서 취득한 유동 해석 결과를 바탕으로 주 전송 포트에서 유입되는 연료-공기 혼합기가 배기 포트로부터 멀어지도록 조절하고, 부양 포트로부터 유입되는 연료-공기 혼합기량의 비율을 높임으로써 단락 손실이 12% 감소한 계산 결과를 얻었고, 이를 바탕으로 실물 엔진을 제작하여 10%의 탄화수소(HC) 배출 저감 및 10～25%에 달하는 토크 향상의 결과를 보였다. Qiao 등[11]은 2행정 엔진의 가스 교환 과정을 수학적으로 표현한 모델인 Benson-Bradham 모델을 바탕으로 최적화의 목적 함수(objective function)를 설정하여 2행정 엔진의 전송 포트를 전산 유체 해석을 통해 최적화하였다. 해당 논문에서는 AVL FIRE 를 이용한 전산 유체 해석을 통해 다양한 형상의 전송 포트의 가스 교환 성능을 확인하였다. 특히, 직교 실험 계획 (OED, orthogonal experimental design) 방법을 활용하여 총 25 개의 해석 결과를 통해 포트 설계 인자가 최적화의 목적 함수에 미치는 영향도 분석을 통해 주 전송 포트의 형상이 2행정 엔진의 소기 성능에 가장 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 이러한 최적화 방법은 2행정 엔진의 소기 양상이 가장 이상적인 소기인 완전 대체 소기(perfect displacement scavenging)에 가깝도록 하는 것으로, 이러한 개선을 통해 1% 이하 수준의 연료 소비율(SFC, specific fuel consumption) 증가와 함께 3.5% 이상의 출력 향상을 이루었다고 보고하였다. Mattarelli 등[12]의 연구에서는 2행정 엔진의 전송 포트 최적화 연구를 위해 엔진 형상을 극히 단순한 형태로 매개변수화 하여 유체 해석을 진행하였다. 전송 포트 최적화를 위해 세 가지의 형상 매개변수를 조절하였으며, 세 가지 RPM 조건에서 진행하여 총 1352 case 에 대한 소기 성능 해석 결과를 map의 형태로 나타내었다.

본 연구에서는 3차원 전산 유체 해석을 이용하여 당사가 개발하고 있는 2행정 엔진의 전송 포트의 다양한 설계안들을 평가하였다. 특히, 전송 포트 설계안 평가를 위해 2행정 엔진의 소기 과정을 수학적으로 표현하는 3단계 소기 모델을 새로이 고안하여, 전산 유체 해석을 통해 취득한 정보를 바탕으로 모델에서의 매개변수 값을 계산하여 포트의 소기 성능을 정량적으로 분석하고자 하였다. 이러한 평가 방법은 근본적으로 2행정 엔진의 성능을 결정하는 가스 교환 과정 자체를 개선하는 데 초점을 맞춰 이에 대한 개선을 이룰 수 있다는 데 의의가 있다. Qiao 등

[11]의 연구에서는 Benson-Bradham 소기 모델을 바탕으로 최적화를 진행하였으나, 이 소기 모델은 가스 교환 시작 지점부터 단락이 발생하는 상황을 가정한 모델이며 이는 실제의 가스 교환과는 차이가 존재한다. 본 연구에서 고안한 3단계 소기 모델은 이러한 점을 보완하는 모델로써 3단계 소기 모델을 이용한 소기 성능 분석 방법은 추후 다른 2행정 엔진을 개발하는 데 있어서 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 2행정 엔진 소기 모델 이론

2.1 소기비(scavenge ratio) 와 소기 효율 (scavenging efficiency)

일반적인 2행정 엔진은 밸브 구동계를 사용하지 않고 피스톤의 움직임에 따라 실린더 라이너의 벽면에 가공된 포트가 개폐되면서 가스 교환 과정을 거치게 된다. 소기비는 소기 기간 동안 실린더 내로 공급된 공기량(m_{as}, mass air supplied)을 표현하는 파라미터로, 일반적으로 대기 조건에서 엔진 실린더 전체 체적만큼의 공기 질량을 기준 질량(m_{cyl})으로 정하여 이 두 값의 비로 표현한다.

$$\lambda_s = \frac{m_{as}}{m_{cyl}} \tag{1}$$

만약 공기를 가압하여 공급하는 경우, 소기비의 기준 질량을 가압 조건 (P^*, V^*) 하에서 실린더 체적만큼의 공기 질량으로 정하여 계산한다.

$$m_{cyl} = \rho^* V_{cyl} = P^* V_{cyl} / (R_{air} T^*) \tag{2}$$

실린더 내로 유입된 신기는 가스 교환 과정 동안 실린더 내에 계속해서 존재하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 2행정 엔진은 가스 교환 과정 동안 전송 포트와 배기 포트가 동시에 열리는 구조로 되어 있으므로 신기의 일부는 사이클을 거치지 않은 채 배기 포트를 통해 곧바로 빠져나가 버리는 단락 현상이 필연적으로 발생하게 된다. 2행정 엔진에서는 실린더 내로 공급된 공기량 대비 실린더 내부에 잔류하는 신기의 양(m_{tas}, mass trapped air supplied)의 비율을 트래핑 효율(trapping efficiency)로 정의하여 표현한다.

$$\eta_t = \frac{m_{tas}}{m_{as}} \tag{3}$$

소기 효율은 실린더 내에 존재하는 유체의 총 질량 대비 해당 사이클에 새로이 유입된 신기의 질량의 비로 정의된다. 실린더 내 존재할 수 있는 유체는 크게 해당 사이클에서 새롭게 유입된 신기, 이전 사이클에서 연소한 기연 가스(m_b, burned) 그리고 이전 사이클에서 연소하지 않은 미연 가스(m_{ub}, unburned)로 나눌 수 있다. 따라서 소기 효율을 수식으로 표현하면 Eq. 4와 같다.

$$\eta_s = \frac{m_{tas}}{m_{tr}} = \frac{m_{tas}}{m_{tas} + m_b + m_{ub}} \tag{4}$$

만약 해당 사이클에 유입된 신기만 고려하는 것이 아닌, 실린더 내 잔류하는 공기의 양 전체를 고려하는 경우 이는 순도(purity, Π)로 정의하여 표현한다.

$$\Pi = \frac{m_{ta}}{m_{tr}} = \frac{m_{tas} + m_{ub}}{m_{tas} + m_b + m_{ub}} \tag{5}$$

2.2 이상적 소기 모델과 Benson-Bradham 소기 모델

초기에 2행정 엔진의 소기 시스템을 평가하기 위해 Hopkinson[13]은 수학적으로 2행정 엔진의 소기 과정 모델인 완전 대체 소기 모델과 완전 혼합 소기(perfect mixing scavenging) 모델을 제안하였다. 두 모델은 실린더에서 일어나는 소기 과정의 가장 이상적인 형태를 설명한 것으로, 소기 과정이 일어나는 실린더의 체적은 일정하고 교환이 일어나는 과정 동안 유체는 온도와 압력

이 일정(isothermal and isobaric)한 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 체적이 실시간으로 변화하며 온도와 압력 또한 계속해서 변화하는 실제의 소기 과정과는 상당히 거리가 있으나, 소기라는 복잡한 과정을 이론적으로 접근하여 실제와 비교할 수 있는 하나의 지표를 정립하였다는 데에서 의미가 있다.

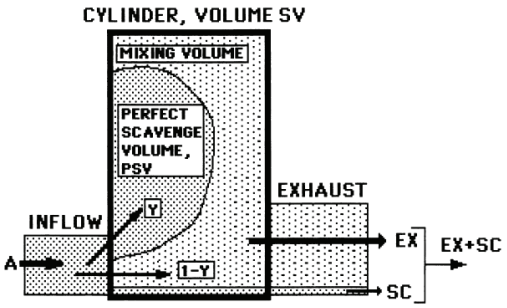

Fig. 3 Physical representation of scavenging model [3].

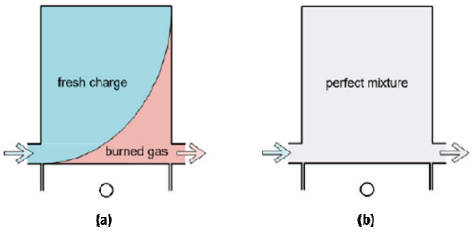

Fig. 4 (a) Perfect displacement scavenging and (b) perfect mixing scavenging model [11].

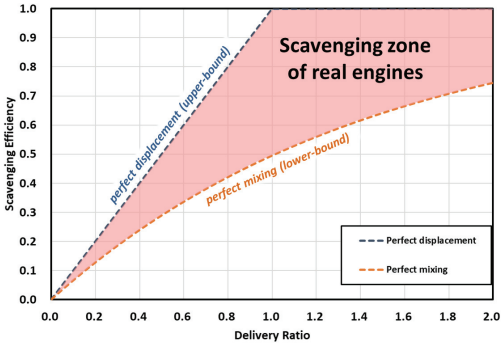

Fig. 5 Scavenge ratio-scavenging efficiency curve of perfect displacement and perfect mixing model.

완전 대체 소기 모델은 실린더 내로 유입된 새로운 흡기가 기연 가스와 섞이지 않은 채 기연 가스가 차지하고 있던 공간을 완전히 대체하는 상황을 가정한 수학적 모델이다. 완전 대체 소기 상황에서는 실린더 내부의 기연 가스가 전부 배출되기 전까지는 항상 기연 가스만이 배기 포트를 통해 빠져나가게 되며, 모든 기연 가스가 빠져나가 실린더 내부에 새로운 흡기만 존재할 때 비로소 배기 포트를 통해 흡기가 유출된다. 즉, 완전 대체 소기는 2행정 엔진의 소기 과정에서 가장 이상적인 상황을 설명하는 모델이다. 소기비가 1보다 작은 상황인 경우, 즉 실린더 내 기연 가스가 남아있는 경우 공급된 공기량과 실린더 내부에 잔류하는 신기의 양이 같으므로 소기비와 소기 효율 사이의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$m_{tas} = m_{as} \tag{6}$$

$$\eta_s = \frac{m_{tas}}{m_{tr}} = \frac{m_{as}}{m_{cyl}} = \lambda_s \tag{7}$$

소기비가 1보다 큰 상황에서는 실린더 내 모든 유체가 흡기로 대체되었으므로 소기 효율은 1이 성립한다.

완전 혼합 소기 모델은 실린더 내로 유입되는 흡기가 유입과 동시에 기연 가스와 완전히 섞이는 상황을 가정한 모델이다. 이는 완전 대체 소기 모델과는 반대로 이상적이지만 소기 과정에서 가장 좋지 않은 경우를 설명하는 모델이라 할 수 있다. 완전 혼합 소기 상황에서 실린더 내 잔류하는 신기의 변화량 (dm_{tas})은 흡기의 미소 공급량 (dm_{as}) 과 흡기가 배기로 빠져나가는 미소 유출량 (dm_{ae}) 의 차이로 나타낼 수 있다.

$$dm_{tas} = dm_{as} - dm_{ae} \tag{8}$$

이때 실린더의 체적이 일정하다는 가정이 있으므로 실린더 내 잔류 신기 변화량 dm_{tas} 은 소기 효율의 정의에 따라 소기 효율의 미소 변화량 ($d\eta_s$) 과 실린더 내 총 질량의 곱으로 나타낼

수 있고, 배기 포트를 통해 빠져나가는 가스의 조성은 해당 순간의 실린더 내부의 평균 기체 조성 상태이므로 흡기의 미소 유출량 dm_{ae} 은 가스의 미소 유출량에 소기 효율을 곱한 것과 같으며, 가스 미소 유출량은 흡기의 미소 공급량과 같으므로 다음과 같이 소기비와 소기 효율 사이의 관계를 유도할 수 있다.

$$d\eta_s m_{cyl} = dm_{as} - dm_{as}\eta_s \tag{9}$$

$$\frac{d\eta_s}{1-\eta_s} = \frac{dm_{as}}{m_{cyl}} = d\lambda_s \tag{10}$$

$$\eta_s = 1 - e^{-\lambda_s} \tag{11}$$

완전 대체 소기 모델과 완전 혼합 소기 모델에 대한 소기비와 소기 효율 관계식을 소기비-소기 효율 평면상에 나타내면 Fig. 5와 같은 형태가 된다. 완전 대체 소기는 이상적으로 가장 우수한 형태의 소기 과정을, 완전 혼합 소기는 이상적으로 가장 좋지 않은 형태의 소기 과정을 나타내므로 실제 엔진에서의 모든 소기 과정은 이 두 모델 사이의 영역 내에 분포하게 된다. 즉, 완전 대체 소기 모델과 완전 혼합 소기 모델은 실제에서 발생하는 모든 소기 과정의 상한과 하한을 정의했다는 데에 그 의미가 있다.

Benson과 Bradham[14]의 이중 소기 모델은 완전 대체 소기 및 완전 혼합 소기 모델을 응용한 소기 모델로, 가스 교환 초기에는 완전 대체 소기 과정으로 가스 교환이 진행되다 특정 시점 이후에는 완전 혼합 소기 과정을 따르도록 고안된 모델이다. 완전 대체 소기에서 완전 혼합 소기로 전환되는 시점의 실린더 내 신기의 비율은 대체비(displacement ratio, x)로 정의되며 Eq. 12와 같다.

$$x = \frac{m_x}{m_{cyl}} \tag{12}$$

여기서 m_x는 완전 혼합 소기가 발생하는 순간 실린더 내 충전된 흡기 질량이다. 즉 대체비 x는 완전 혼합 소기 단계로 전환되는 순간에서의 소기 효율 값을 의미한다.

또한, Benson 등[15]은 가스 교환에 참여하지 않은 채 단락되어 빠져나가는 흡기의 비율을 단락 분율 (short-circuiting fraction, y)로 정의하여 이중 소기 모델의 개념을 확장했다.

$$y = \frac{m_{leak}}{m_{as}} \tag{13}$$

단락 분율을 고려하여 완전 대체 소기와 완전 혼합 소기 상황에서 소기비와 소기 효율 사이의 관계식을 유도하면 Eq. 14 및 Eq. 15와 같다.

$$\eta_s = (1-y)\lambda_s, \ \lambda_s < \frac{x}{1-y} \tag{14}$$

$$\eta_s = 1-(1-x)e^{x-(1-y)\lambda_s}, \ \frac{x}{1-y} \le \lambda_s \tag{15}$$

Benson-Bradham 소기 모델은 대체비가 1에 가까울수록, 그리고 단락 분율이 0에 가까울수록 이상적인 소기에 가깝다고 볼 수 있다. Qiao 등[11]의 연구에서는 다양한 전송 포트 형상의 2행정 엔진에서 전산 유체 해석을 통해 포트별 대체비와 단락 분율을 계산하고 이 값의 비교를 통해 포트 형상을 평가하였다.

2.3 새로운 소기 과정 모델 (3단계 소기 모델)

Benson-Bradham 소기 모델의 경우 단락 분율 y 값이 결정되면 소기의 전 과정에서 단락 현상이 발생하는 것으로 소기를 표현하고 있다. 그러나 실제로는, 가스 교환의 초기에는 단락 현상이 발생하는 유체의 흐름 경로가 실린더 내에서 발달하기 전까지 단락 현상은 발생할 수 없다. 따라서 이러한 한계점을 보완한 모델을 새로 제안하고, 이를 이용하여 추후 2행정 엔진의 포트 형상 평가를 진행하고자 한다.

새로 고안한 소기 모델인 3단계 소기 모델은 완전 대체 소기 단계에서 단락 현상의 발생 전·후를 나누어 단락 현상이 없는 완전 대체 소기 단계, 단락을 동반한 완전 대체 소기 단계 그리고 단락을 동반한 완전 혼합 소기 단계의 총 세

가지 단계를 구성하도록 고안하였다. 세 단계의 구분을 위해 기존의 Benson-Bradham 소기 모델

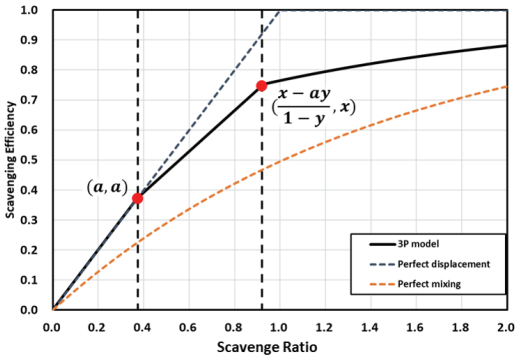

Fig. 6 Scavenge ratio-scavenging efficiency curve of three-phase scavenging model.

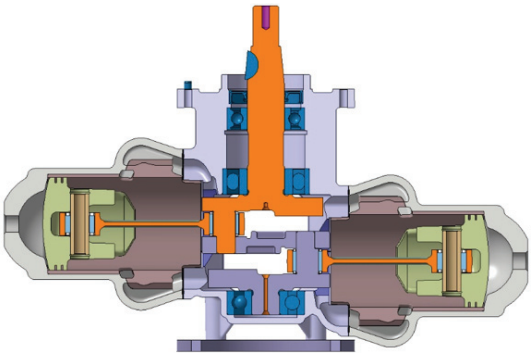

Fig. 7 Cross-sectional view of two-stroke engine.

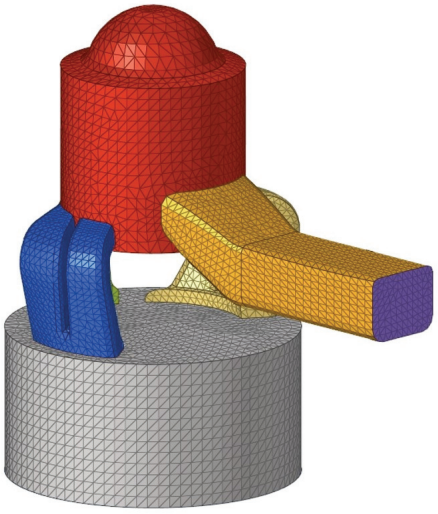

Fig. 8 Numerical model of two-stroke engine.

에서 사용된 대체비 x 와 단락 분율 y와 함께 단락비 a를 Eq. 16와 같이 정의하였다.

$$a = \frac{m_a}{m_{cyl}} \tag{16}$$

여기서 m_a는 단락이 발생하는 순간 실린더 내 충전된 흡기 질량이다. 즉, 단락비 a는 단락이 발생하는 순간에서의 소기 효율 값을 의미한다. 단락비 a, 대체비 x 그리고 단락 분율 y를 이용하여 3단계 소기 모델의 소기비와 소기 효율 사이의 관계식은 Eq. 17~Eq. 19과 같다.

$$\eta_s = \lambda_s, \ \lambda_s < a \tag{17}$$

$$\eta_s = ay + (1-y)\lambda_s, \ a \le \lambda_s < \frac{x-ay}{1-y} \tag{18}$$

$$\eta_s = 1-(1-x)e^{(x-ay)-(1-y)\lambda_s}, \ \frac{x-ay}{1-y} \le \lambda_s \tag{19}$$

3단계 소기 모델의 소기비-소기 효율 평면상의 개형은 Fig. 6와 같다. 이때, 각 단계가 전환되는 단락비 a와 대체비 x는 엔진 모델의 전산 유체 해석 결과와의 커브 피팅(curve fitting)을 통해 결정되어 엔진의 소기 단계를 구분한다.

3. 전산 유체 해석 개요

3.1 2행정 엔진 전송 포트 형상 및 설계 변수

본 연구에서 사용된 2행정 엔진은 무인 항공기의 발전용으로 개발 중인 엔진이며 기본 정보는 Table 1과 같다. 엔진의 보어(bore)는 50 mm,

Table. 1 Two-stroke engine specification.

Engine Type	-	two-stroke
No. of cylinder	-	two cylinders
Bore / stroke	mm	50 / 45
Displacement	cc	176.7
Compression ratio	-	10.0
Ignition	-	1 spark/cylinder

스트로크(stroke)는 45 mm 이며 압축비는 10이다. 해석에 사용된 모델은 단기통 모델을 사용하였으며, 크랭크케이스로부터의 흡기 유입을 모사하기 위해 전송 포트 하단에 반경 40 mm, 높이 40 mm 의 원기둥 형 체적을 이어붙인 형태이다.

본 연구에 사용된 2행정 엔진의 전송 포트의 설계 변수는 Fig. 9와 같다. 설계 변수를 크게 분류하면 전송 포트의 경사각 (tilt angle, α and γ) 과 슬립각(slip angle, β), 슬립 오프셋(slip offset, δ), 포트 연결부의 직선 길이(k), 포트 구멍의 폭(a)과 높이(b)로 분류할 수 있다. 사용된 전송 포트의 종류는 총 네 종류이며, 각 포트의 설계 변수 값은 Table. 2와 같다. 주 전송 포트의 형상은 기본 사양으로부터 포트의 경사각이 전반적으로 변경되었으며, 슬립각 또한 증가하여 주 전송 포트로부터 유입되는 흡기가 부양 포트

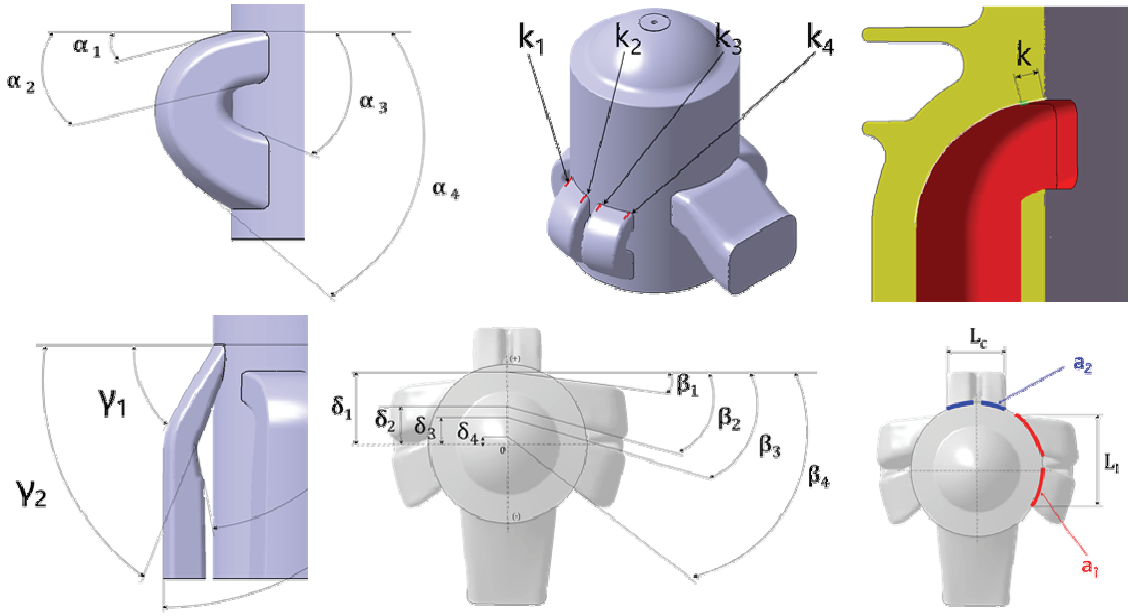

Fig. 9 Two-stroke engine transfer port design parameter.

Table. 2 Two-stroke engine transfer port design parameter.

Symbol	Base	Var A	Var B	Var C	Symbol	Base	Var A	Var B	Var C
α_1	10°	13°	17°	6°	k_1	3.1	15.1	←	13.2
α_2	20°	←	←	7°	k_2	2.4	13.9	←	12.1
α_3	80°	70°	←	67°	k_3	2.2	11.8	←	10.2
α_4	90°	70°	←	72°	k_4	2.0	11.2	←	9
β_1	15°	20°	←	←	δ_1	22	25	←	←
β_2	20°	35°	←	←	δ_2	13.4	22.8	←	←
β_3	20°	35°	←	←	δ_3	10.1	20.9	←	←
β_4	30°	45.4°	35°	34°	δ_4	0	15.1	6.2	5
γ_1	60°	←	←	←	a_1	29.6	28.4	←	28.7
γ_2	70°	←	←	←	a_2	18.9	18.8	←	←

에 가까워지도록 변경되었다. 또한, 포트 연결부의 직선 길이 k 값 또한 증가해 실린더로 유입되기 직전의 유동 방향이 일정하도록 조정하였으며 이로 인해 전반적인 포트의 길이가 증가하였다.

3.2 전산 유체 해석 모델 및 평가 방법

본 연구에서는 2행정 엔진 유동 해석을 위하여 상용 해석 소프트웨어인 Altair 사의 Acusolve 2018을 사용하였다. 유동 해석을 위해 사용된 엔진 모델 개요는 Table. 3와 같다. 이번 해석의 해석 유형은 과도 상태(transient) 해석으로, 난류 모델은 Realizable k-ϵ 난류 모델을 사용하였으며 wall function과 함께 사용되었다. 유동 해석을 위한 엔진의 격자는 Altair 사의 Hypermesh 2017 소프트웨어를 통해 생성하였으며, 격자의 크기는 전체 엔진 영역에서 2 mm에서 3 mm 수준으로 설정하였다. 또한, 벽면 근처에서의 유동 모사를 위하여 프리즘 레이어(prism layer) 격자를 모든 벽면 경계에 대해 생성하였다. 프리즘 레이어 격자의 최외곽 격자 두께는 0.2 mm, 격자 수는 네 개로 설정하여 무차원화된 벽면 거리(dimensionless wall distance, y^+) 값이 엔진의 모든 영역에서 30~100 수준을 유지하도록 하였다. 해석은 각 포트 형상에 대하여 0.007 초간 진행되었으며 이는 목표 엔진의 정격 속도 및 최대 속도 수준에 해당하는 6200~7000 RPM 구간에서 한 사이클 당 가스 교환 과정 시간에 해당하는 시간보다 충분히 길도록 고려한 수준이다. 해석의 time step은 10^{-5} 초로 설정하여 엔진의 모든 영역에서 Courant number가 1보다 작은 수준으로 유지되도록 결정하였다.

해석에 사용된 격자 모델의 흡기 경계 조건은 정체 압력(stagnation pressure) 120 kPa 고정 조건이며 배기 경계 조건은 95.725 kPa 고정 조건이다. 작동 유체는 단순 가스 교환 과정만을 계산하므로 공기를 사용하였고, 실린더 내 존재하는 유체와 전송 포트로부터 새로이 유입되는 유체를 구분하기 위하여 두 가지의 수동적 스칼라를 모델에 도입하였다. 모델의 초기 조건에 실린더 내부와 배기 포트 영역에 존재하는 공기에는 배기 스칼라(exhaust scalar)값을 1로 할당하고, 실린더로 향하는 체적 및 흡기 경계에서 유입되는 공기에는 흡기 스칼라(intake scalar)값을 1로 할당함으로써 동일한 공기지만 새로이 유입되는 공기와 기존에 실린더 내부에 잔류하고 있던 공기를 구분할 수 있게 된다.

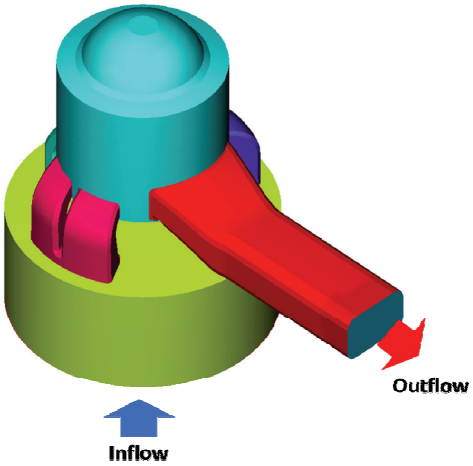

Fig. 10 Model inflow and outflow boundary.

Table. 3 Engine analysis solver setting.

Solver	Acusolve 2018
Analysis type	Transient
Solving time	0.007 s
Time increment	10^{-5} s
Turbulence model	Realizable $k-\epsilon$
near wall y^+	~50
Courant number	~1
Mesh size	~3 mm
boundary layer First element thickness	0.2 mm
No. of boundary layer	4
Inflow boundary	120 kPa (absolute, stagnation pressure)
Outflow boundary	95.725 kPa (absolute)

본 연구에서는 각 포트와 실린더 사이에 교차면(interface)을 정의하여 교차 면에서의 질량 유량 값과 수동적 스칼라의 조성비를 취득하여 해석 시간에 따른 실린더 내 새로 유입된 공기량 정보를 얻어내고, 이를 이용하여 소기비와 소기 효율 사이의 관계 곡선을 계산하였다. 그 후, 각 전송 포트의 형상 별로 얻어낸 소기비-소기 효율 관계 곡선에 3단계 소기 모델을 커브 피팅하여 모델에서의 단락비 a, 대체비 x 그리고 단락 분율 y값을 각 포트 형상 별로 취득하였다. 그리고 이 세 파라미터를 이용하여 정의한 목표 값을 계산하여 2행정 엔진의 전송 포트 형상에 따른 소기 성능을 정량적으로 평가하였다.

4. 해석 결과 및 평가

2행정 엔진의 전송 포트 형상에 따른 소기 성능을 평가하기 위하여 3차원 전산 유체 과도 상태 해석을 진행하였다. Fig. 11은 전송 포트 형상 별 시간에 따른 실린더 내로 유입되는 신기량과 배기로 유출되는 신기량을 나타낸 것이다. 유입되는 신기량의 경우 기본 사양에서 변형 사양으로 변경되면서 전반적으로 포트의 길이가 늘어난 것에 대한 영향으로 초기 유입 타이밍과 유량 전부 기본 사양이 우세한 결과를 보였다. 그러나 경향성과 유량이 큰 차이를 보이지 않으며, 실제 엔진 상황에서는 실린더 내로 신기가 공급되면서 가압된 크랭크케이스 내부의 압력이 줄어들 것이므로 실제 흡기량은 큰 차이를 보이지 않을 것으로 판단된다.

그러나 배기 포트를 통해 유출되는 신기량의 경우 기본 사양과 변형 사양들 사이의 경향성 차이를 확인할 수 있다. 기본 사양의 경우 변형 사양 대비 이른 타이밍부터 신기의 유출이 시작되고, 유량 또한 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 그러나 변형 사양들의 경우 유출이 시작되는 시간이 상대적으로 느리고, 기본 사양과는 달리 특정 시점에서 유출 유량이 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향성의 차이는 실린더 내로 유입된 신기의 유동 특성에 기인한 차이인 것으로 확인된다.

Fig. 12는 각 포트 사양에 따라 $y=0$ 평면에서 실린더 내 수동적 스칼라의 분포를 시간에 따라 나타낸 것으로, 값이 1에 가까울수록 신기에 가까운 것이다. 기본 사양의 경우 설계 변수 중에서 슬립각이 작으며, 이로 인해 슬립 오프셋이 변형 사양들보다 작다. 즉, 주 전송 포트에서 유입되는 신기가 상대적으로 실린더의 중심축에 가깝게 유입이 되고, 유입된 흡기는 반대편의 주 전송 포트에서 유입된 신기와 부딪히며 퍼지는 과정에서 피스톤을 타고 배기 포트로 흘러 지속해서 빠져나가는 흐름 양상을 확인할 수 있다. 그러나 변형 사양의 경우 전반적으로 슬립각이 증가하여 슬립 오프셋이 늘어나 주 전송 포트로부터 유입되는 신기가 부양 포트에 가깝게 되도록 설계가 이루어졌고, 그 결과 실린더 내로 유입되는 유체의 흐름이 부양 포트 부의 라이너를

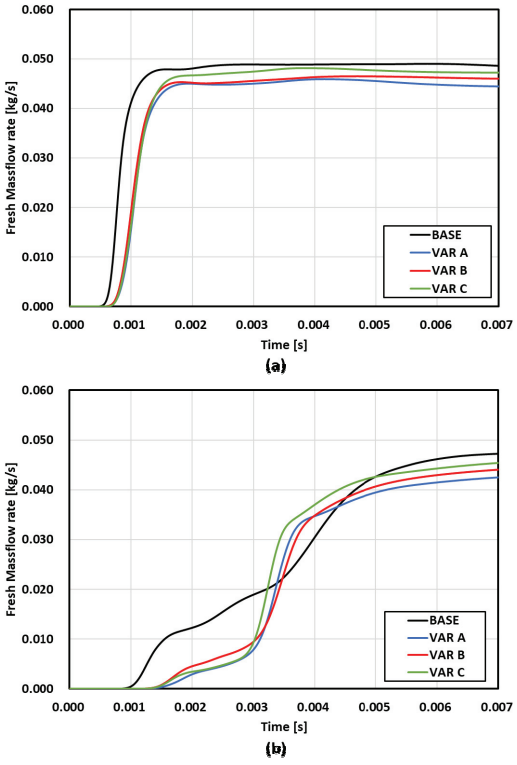

Fig. 11 Fresh scalar massflow rate (a) into the cylinder and (b) exiting from the cylinder.

타고 상승하여 실린더 상단의 가스를 밀어내는 경향을 보인다(Fig. 13). 이러한 유동의 경향성 차이가 기본 사양과 변형 사양 사이의 초기 유출 시점과 유출량의 차이를 만든 것으로 파악된다. 그러나 신기가 실린더 상단을 거쳐 배기 포트로 도달하는 순간에 신기의 유출량이 급격하게 증가하고, 이러한 유동 경로가 형성된 이후에는 기본 사양과 비슷한 수준으로 신기의 유출이 발생하는 것으로 파악된다.

Fig. 14은 포트 사양 별 각 포트 교차 면에서의 신기 유량을 바탕으로 소기비와 소기 효율을 계산하여 이 둘의 관계 곡선을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 두 점선은 각각 완전 대체 소기와 완전 혼합 소기를 나타낸 것이다. 모든 사양

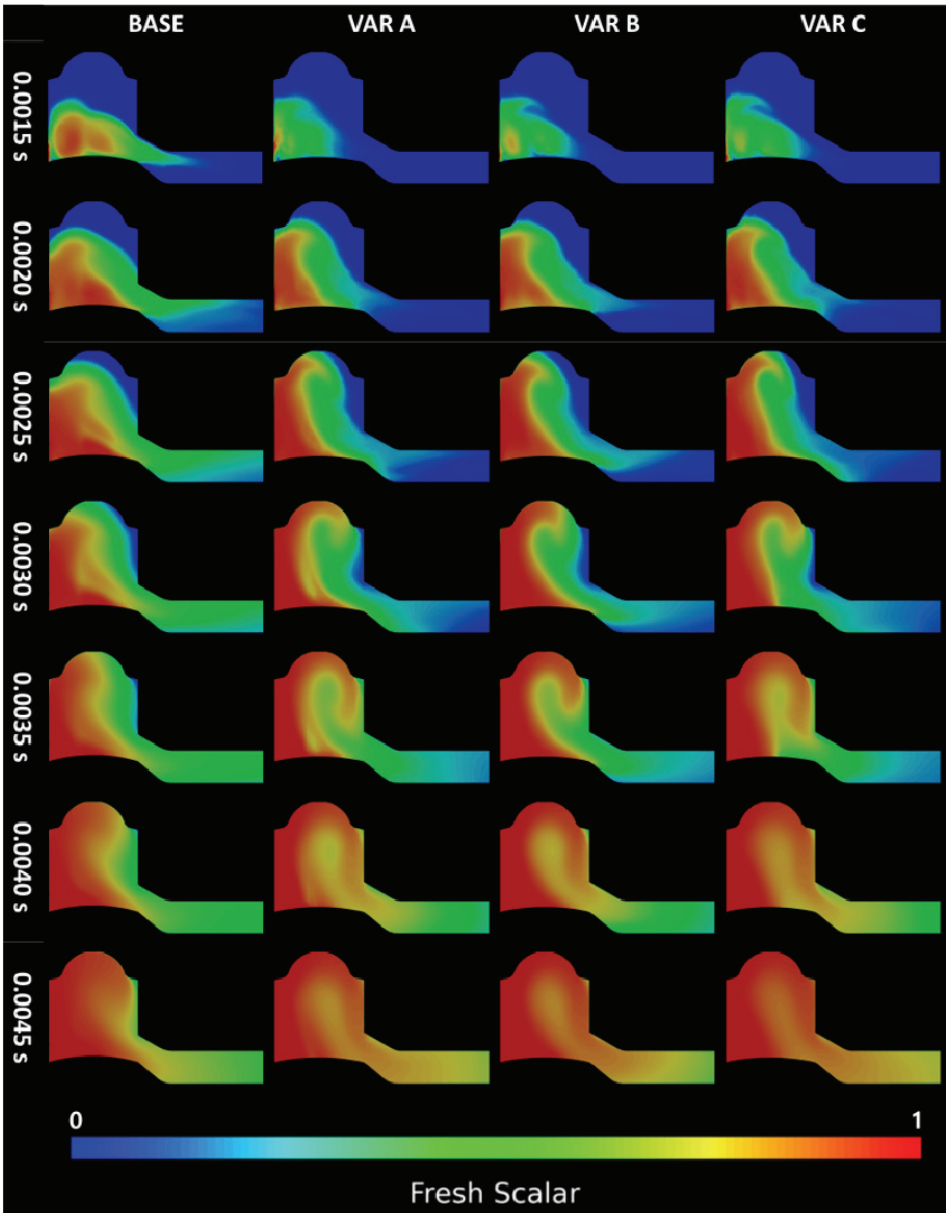

Fig. 12 Fresh scalar distribution in the cylinder according to the transfer port at $y=0$ plane.

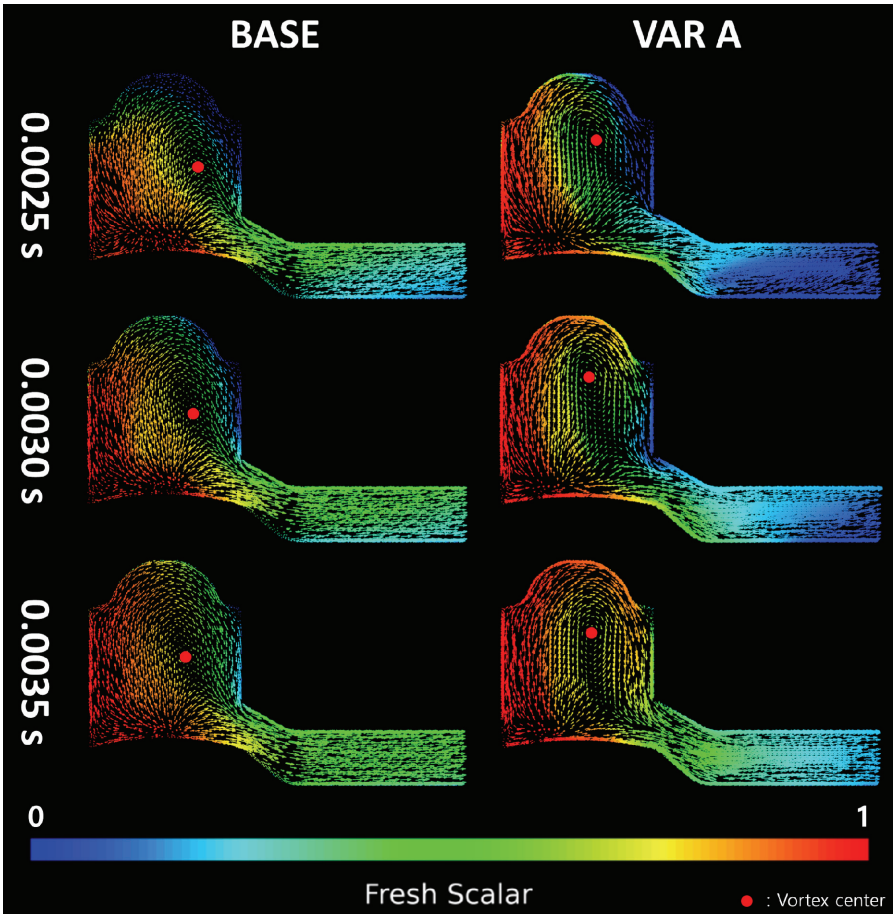

Fig. 13 Flow of fresh scalar in the cylinder at $y=0$ plane (base and variant A).

에서 소기비-소기 효율 곡선은 이 두 점선이 형성한 영역 사이에 존재한다. 소기비가 약 0.8 이하의 영역에서는 변형 사양들의 소기비-소기 효율 곡선 개형이 완전 대체 소기와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 해당 구간의 가스 교환 시점에서는 이상적으로 우수한 소기가 발생하고 있다고 볼 수 있다. 기본 사양의 경우 상당히 이른 시점에서 지속해서 신기의 유출이 발생하였고 그에 따라 소기비-소기 효율 곡선도 완전 혼합 소기에 가까운 것을 확인할 수 있다. 그러나 소기비가 증가함에 따라 변형 사양들에서 급격한 신기 유출이 발생하고, 이에 따라 소기비-소기 효율 곡선의 기울기가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 더 나아가 소기비가 약

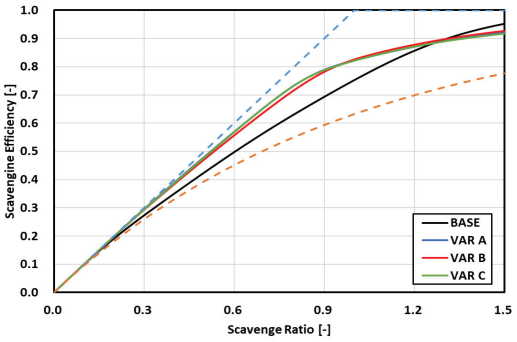

Fig. 14 Scavenge ratio-scavenging efficiency curve according to the transfer port.

1.2 보다 큰 상황에서는 기본 사양의 소기 효율이 변형 사양들에 비해 높아지는 것을 확인할

Table. 4 Three-phase model parameters according to the transfer port.

	a	x	y	objective
Base	0.2539	0.8261	0.3219	0.1266
Var A	**0.3736**	**0.8087**	**0.1560**	**0.0664**
Var B	0.3472	0.8270	0.1938	0.0725
Var C	0.3168	0.8036	0.1336	0.0687

수 있다. 그러나 실제 2행정 엔진에서 소기비 1.2 이상의 신기를 공급하는 것은 상당한 연료 손실 및 탄화수소 배출을 의미하므로 해당 구간에서 소기 효율이 높아졌다 하더라도 큰 실효성은 없을 것으로 판단된다.

포트 형상에 따른 소기 성능을 평가하기 위해 소기비 1.2까지의 소기비-소기 효율 곡선을 이용하여 각 포트 형상에 따른 3단계 소기 모델의 단락비 a, 대체비 x 그리고 단락 분율 y를 커브 피팅을 통해 취득하고, 이를 바탕으로 목표 값을 계산하였다. 목표 값은 소기비 1.2까지의 구간에서 3단계 소기 모델과 완전 대체 소기 모델 사이의 영역의 크기로 정의하였다. 즉, 목표 값이 작을수록 이상적인 완전 대체 소기 모델에 가깝다고 볼 수 있다. 각 모델에 따라 단락비, 대체비, 단락 분율 그리고 목표 값 결과는 Table 4와 같다. 목표 값의 크기가 가장 작은 변형 A 사양이 소기의 성능이 가장 우수하다고 볼 수 있으며, 초기 단락이 발생하는 시점과 단락 분율이 기본 사양에 비해 크게 개선된 것을 볼 수 있다.

기본 사양과 변형 사양 사이에 유동의 차이를 나타나게 한 주요 인자는 포트 연결부의 직선 길이 k 값과 슬립 오프셋 δ 인 것으로 파악된다. 슬립 오프셋이 증가하면 주 전송 포트를 통해 유입된 신기가 배기 포트를 향해 단락되기까지의 유동 경로가 길어지는 효과를 가지게 되며, 유동의 운동이 배기 포트의 반대 방향을 향하도록 흐르게 되므로 초기 단락 발생이 억제되는 효과를 가지게 된다. 포트 연결부 직선 길이의 경우 포트 방향으로 향하는 유동을 충분히 발달시키는 효과를 가지는 것으로 판단된다. Fig. 15는 포트 형상 별 0.0015 s 시점에서 엔진 내로

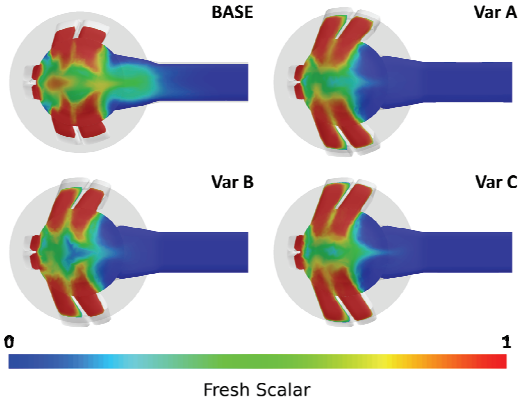

Fig. 15 Fresh scalar distribution according to the transfer port at 0.0015s.

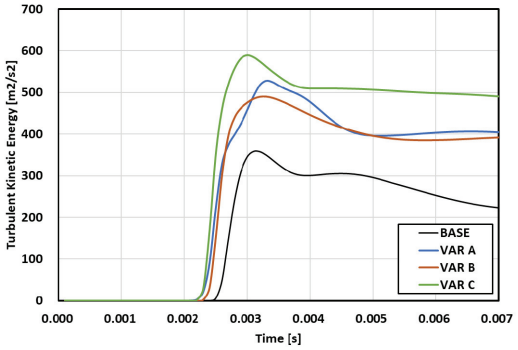

Fig. 16 Turbulent kinetic energy near the spark plug.

유입되는 신기의 분포를 실린더 상단에서 바라본 단면이다. 포트 연결부 직선 길이가 짧은 기본 사양의 경우 주 전송 포트를 통해 유입되는 신기가 실린더의 대칭면까지 충분히 도달하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 슬립 오프셋과 포트 연결부 직선 길이가 둘 다 작은 기본 사양은 유입된 신기가 빠르게 배기 포트를 통해 단락되고, 이로 인해 소기 성능이 좋지 않은 결과가 나타났다고 볼 수 있다.

변형 사양들 사이에서 나타나는 소기 성능의 차이는 주 전송 포트의 상부 경사각인 α_1의 차이로 인해서 나타난 것으로 판단된다. 변형 사양들 사이에서는 α_1이 작을수록 대체 분율 y가 낮았으며, 이는 슬립 오프셋 δ_4가 상대적으로 작았던 변형 C 사양에서도 효과적인 것으로 파악된

다. Fig. 12의 0.003 s 시점에서 피스톤 우측 하면을 따라 신기가 유출되는 경향이 변형 C 사양에서는 거의 보이지 않는 것을 확인할 수 있고, 이러한 경향 차이 때문에 대체 분율 y가 변형 C 사양에서 가장 작게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과가 주 전송 포트의 경사각이 작아 발생한 차이로 추측된다.

유동 및 소기 측면에서의 관점뿐 아니라 가스 교환 과정 동안의 실린더 내 난류 특성 또한 전송 포트 형상 별로 확인하였다. Fig. 16는 2행정 엔진의 점화 플러그 위치에서 시간에 따른 난류 에너지를 나타낸 결과이다. 변형 사양들의 경우 전반적으로 난류 에너지가 기본 사양에 비해 높게 형성되었다. 실린더 내 높은 난류 에너지는 혼합기의 빠른 연소를 촉진하므로, 4행정 엔진보다 상대적으로 연료가 연소할 수 있는 기간이 짧은 2행정 엔진에서 변형 사항들의 이러한 결과는 상당한 이점을 가질 것으로 판단된다.

5. 결 론

2행정 엔진의 성능은 가스 교환 과정 이후 실린더 내 잔류하는 신기의 양에 직결되므로 가스 교환 과정 동안의 실린더 내 유체의 흐름이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 3차원 전산유체 해석을 이용하여 무인 항공기용 소형 2행정 엔진의 전송 포트 형상에 따른 소기 성능을 평가하였다.

소기 성능의 평가를 위해 완전 대체 소기 모델과 완전 혼합 소기 모델을 기반으로 하여 3단계 소기 모델을 새로이 제안하였다. 해당 모델은 완전 대체 소기가 진행되는 1단계, 완전 대체 소기와 단락이 동시에 진행되는 2단계, 완전 혼합 소기와 단락이 진행되는 3단계로 진행되어 전송 포트 형상에 따라 초기 단락이 시작되는 시점과 단락이 진행되는 비율, 완전 혼합 소기로 전환되는 시점을 구분할 수 있다.

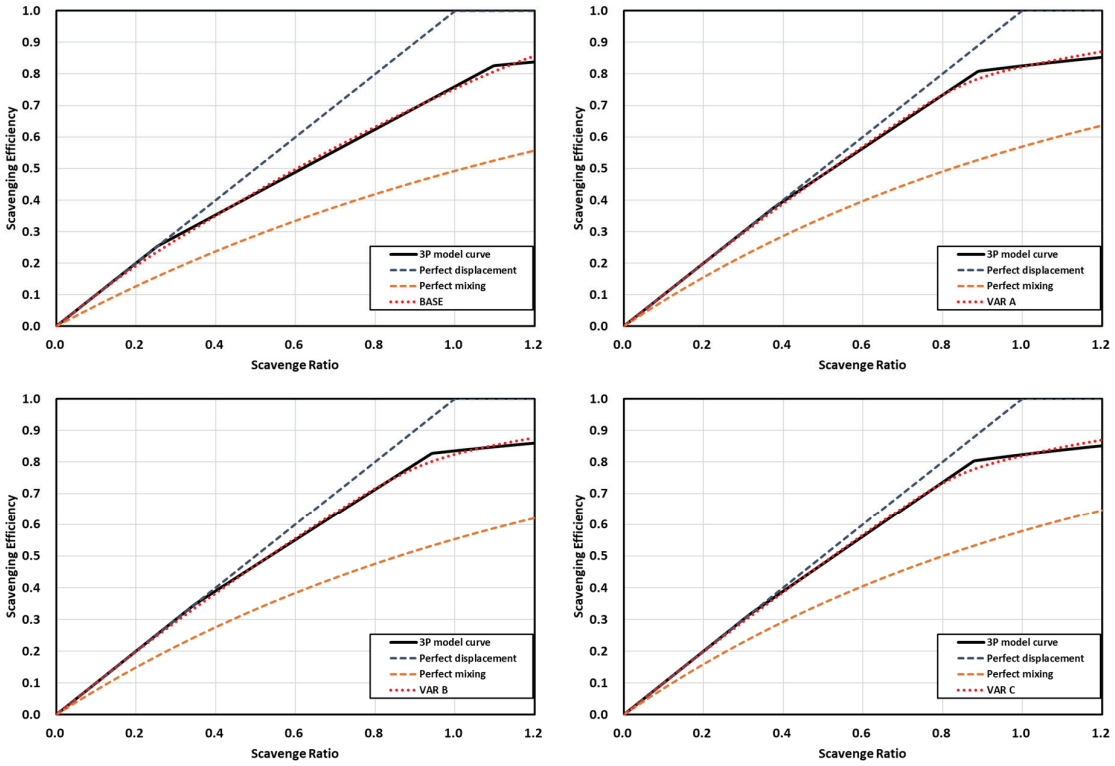

Fig. 17 Three-phase model curve fitting results.

3차원 전산 유체 해석 결과 다음과 같은 결과들을 확인할 수 있었다.

- 실린더의 중심축을 향해 신기가 주로 유입되는 기본 사양과 달리 변형 사양들은 부양 포트 위치로 신기가 유입, 실린더 벽을 타고 실린더 상단으로 신기가 흐르는 유동 경향을 보였다.
- 유동 경향성 차이로 인해 변형 사양들의 초기 단락 발생 시점이 기본 사양에 비해 늦고, 단락으로 빠져나가는 신기의 비율도 줄어들었다.
- 실린더 내 유동 난류 에너지 또한 변형 사양들에서 높게 형성되어 혼합기의 연소 측면에서 유리할 것으로 예측되었다.
- 3차원 전산 유체 해석 결과에 3단계 소기 모델을 적용한 결과 각 포트 형상에 따른 모델 매개변수 값을 통해서 엔진의 소기 성능을 정량적으로 분석할 수 있었다.
- 변형 A 사양에서 초기 단락 발생 시점 및 단락 분율이 기본 사양에 비해 크게 개선되어 가장 우수한 소기 성능을 나타내었다.
- 전산 유체 해석 결과의 차이를 만든 설계 변수는 슬립 오프셋(δ)과 포트 연결부 직선 길이(k) 그리고 주 전송 포트의 상부 경사각(α)인 것으로 추측된다.
- 슬립 오프셋과 포트 연결부 직선 길이가 모두 작은 기본 사양에서 단락이 상대적으로 이른 시점에 발생하였으며, 유입되는 신기가 실린더의 중심 지점까지 충분히 도달하지 못하였고, 변형 사양들 사이에서는 주 전송 포트의 상부 경사각이 작을수록 대체 분율 y가 작은 결과를 보였다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원의 “민군기술협력사업” 중 “드론용 하이브리드 전원장치(6 kW) 개발”(18-CM-AS-03) 과제 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Boukoberine, M.N., Zhou, Z. and Benbouzid, M. “A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects,“ *Applied Energy,* 255: 113823, 2019.
2. Cwojdziński, L. and Adamski, M. “Power units and power supply systems in UAV,“ *Aviation,* Vol. 18, No. 1, pp. 1-8, 2014.
3. Blair, G., *The basic design of two-stroke engines*, SAE, 1990.
4. Barsotti, S., Carmignani, L. and Matteucci, L. “Optimization of a Two-Stroke Engine Scavenging Process By a CFD Analysis in Order to Reduce the Raw Pollutant Emissions,“ *SAE Technical Paper* No. 2005-32-0113, 2005.
5. Garg, M. and Ravikrishna, R.V., “CFD Modeling of In-Cylinder Fuel-Air Mixing in a CNG-Fuelled SI Engine with Port Gas Injection,“ *SAE Technical Paper* No. 2010-32-0003, 2010.
6. Garg, M. and Ravikrishna, R.V., “Effect of port gas injection on in-cylinder stratification in a CNG fuelled SI engine,“ *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal,* Vol. 14, No. 4, pp. 244-258, 2014.
7. Murakami, Y., Kurosaka, H., and Kamiya, H., “Practical Application of Combustion Simulation using CFD for Small Engine of Two-Wheeled Vehicle,” *SAE Technical Paper* 2004-32-0006, 2004.
8. Wang, Y., Zhang, J., Yang, Z., Wang, X., Dice, P., Shahbakhti, M., Naber, J., Czekala, M., Qu, Q. and Huberts, G. “Investigation of flow conditions and tumble near the spark plug in a DI optical engine at ignition,“ *SAE Technical Paper*

2018-01-0208, 2018.

9. Takahashi, D., Nakata, K., Yoshihara, Y. and Omura, T., "Combustion Development to Realize High Thermal Efficiency Engines," *SAE Int. J. Engines*, Vol. 9, No. 3, pp. 1486-1493, 2016.
10. Garg, M., Kumar, D., Syed, M. and Nageswara, S., "CFD Modelling of a Two Stroke Engine to Predict and Reduce Short Circuit Losses," *SAE International Journal of Engines*, Vol. 9, No. 1, pp. 355-364, 2016.
11. Qiao, Y., Duan, X., Huang, K., Song, Y. and Qian, J., "Scavenging Ports' Optimal Design of a Two-Stroke Small Aeroengine Based on the Benson/Bradham Model." *Energies,* Vol. 11, No. 10, p. 2739, 2018.
12. Mattarelli, E., Rinaldini, C. and Savioli, T., "Port Design Criteria for 2-Stroke Loop Scavenged Engines," *SAE Technical Paper* 2016-01-0610, 2016.
13. Hopkinson, B., "The Charging of Two-Cycle Internal Combustion Engines," *Journal of the American Society for Naval Engineers,* Vol. 26, No. 3, pp. 974-985, 1914.
14. Benson, R.S. and Bradham, P.T., "A method for obtaining a quantitative assessment of the influence of charging efficiency on two-stroke engine performance," *International Journal of Mechanical Sciences,* Vol. 11, No. 3, pp. 303-312, 1969.
15. Benson, R.S. and Whitehouse, N.D., "Internal Combustion Engines," *Pergamon*, 1979.