

# 캡스톤 디자인 프로젝트 수행을 통한 제트엔진 소음특성 파악 및 저감 방안 연구

김시태<sup>\*†</sup>·김혁수<sup>\*\*</sup>·조민혁<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>공군사관학교 기계공학과 교수

<sup>\*\*</sup>공군사관학교 기계공학과 학부과정생

## A Study on Jet Engine Noise Analysis and Reduction for a Capstone Design Project

Kim, Sitae<sup>\*†</sup>·Kim, Hyuksoo<sup>\*\*</sup>·Cho, Minhyuk<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Professor, Department of Mechanical Engineering, Korea Air Force Academy

<sup>\*\*</sup>Undergraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Korea Air Force Academy

### ABSTRACT

This study introduces a series of processes aimed at understanding the noise characteristics generated by jet engines and devising measures to mitigate them through interdisciplinary capstone design projects. During the project execution, educational methods were applied to foster 4Cs (creativity, communication, collaboration, critical thinking) competencies. Project objectives were set through team discussions, and individual team members were assigned primary roles to act as subgroup leaders. As a result, the project was executed as follows: combustion tests were conducted using an SR-30 turbojet engine to generate noise, and the locations and characteristics of the noise sources were identified using beamforming techniques and frequency analysis applied to a 30-microphone array. Additionally, chevron nozzles were designed and fabricated to confirm their noise reduction performance.

**Keywords:** Capstone design, Turbojet engine, Sound localization, Chevron nozzle

## 1. 서 론

군용 항공기의 주요 소음원은 제트엔진으로, Fig. 1에서 나타나 있듯이 압축기 및 터빈 입·출구 소음, 연소 소음, 제트 소음 등으로 구성된다. 최신 전투기의 운용에서 고출력 엔진의 장착은 필수적 요구사항으로 미국의 경우 AETP(Adaptive Engine Transition Program) 등의 프로그램을 통하여 45,000 lbf 급 엔진을 개발 중이며(Hunter, 2021), 대한민국 공군 역시 근 미래 운용하게 될 KF-21의 경우, General Electric F414 쌍발 엔진이 장착되어(GE Aerospace, 2020) 26,000 lbf (dry) / 44,000 lbf (wet)의 추력을 가지는 등, 고성능 엔진을 장착한 전투기의 신규 개발 및 실전배치가 증가할 것으로 예측된다.

대부분의 군용 비행장은 성남, 광주, 대구 등과 같이 도시 근

교에 위치해 있다. 초기에는 거주지역과 이격하여 건립하였으나, 도심 지역의 확장에 따라 군용 공항 주변까지 주거·상업 지역이 점차 개발되고 있으며, 이에 따라 군용 항공기에서 발생하는 항공소음은 이전보다 다양한 갈등요인과 피해보상 문제로 연결되고 있다. 따라서 이러한 항공소음 환경을 개선하기 위해서는 제트엔진에서 발생하는 소음특성을 보다 과학적으로 이해하는 것이 필수적이다.

공군사관학교는 제4차 산업혁명 시대 대학 교육체계 개선방안의 일환으로 23학년도부터 소속 대학생 4학년을 대상으로 4Cs(creativity, critical thinking, communication, and collaboration) 능력(World Economic Forum, 2016)을 강화하기 위한 다학제간 융합팀을 구성하는 융합 캡스톤 디자인 프로젝트를 신설하고 2개 학기 연계과정으로 운영하였다(공군사관학교, 2021). 이를 통해 창의적 문제해결 능력과 협업능력을 배양하며, 특히 학교의 특성상, 국방분야 실무과제 해결에 특화된 프로젝트 주제를 제시하고, 주제에 적합한 다양한 결과물(예, 시제품 제작, 실험 수행, 정책제안 등)을 도출함을 목적으

Received April 23, 2024; Revised June 13, 2024

Accepted June 21, 2024

† Corresponding Author: sitaekim@outlook.com

©2024 Korean Society for Engineering Education. All rights reserved.

로 하고 있다. 본 연구에서는 소속대학 4학년생을 대상으로 캡스톤 디자인 프로젝트를 통하여 제트엔진의 소음발생 특성을 이해하고, 이를 저감시키는 방안의 구현을 목표로 2개 학기 간 연속 운영한 과정과 결과를 기술하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 캡스톤 디자인 사전준비, 과제도출, 요구사항 정의과정을 소개하고, 3장에서는 성능시험 시스템 구성 및 과정을 설명한다. 4장에서는 실험 결과분석 및 평가를, 5장에서는 결론을 제시하였다.

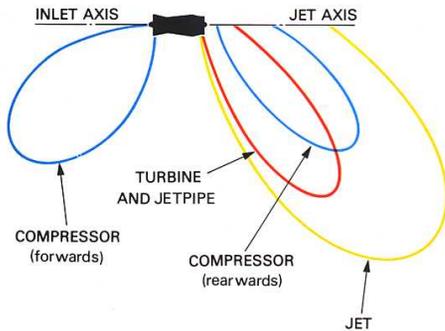


Fig. 1 Noise sources of low by-pass turbojet engine (Source: Rolls-Royce)

## II. 캡스톤 디자인 프로젝트 개요

### 1. 사전준비

사전작업으로 캡스톤 디자인 프로젝트 주제를 3학년 2학기 중에 공모하였다. 그 결과 최종 20개의 과제가 선정되었으며,

Table 1 Exemplary process model for capstone design project

과정	시기	내용
과제 기획 및 공모	3학년 2학기	· 문제 인식 및 과제 기획 · 과제 공모 및 선정
팀 구성	3학년 동계학기	· 주제별 팀 구성 / 교수매칭 · 역할분담
과제 설계	4학년 1학기	· 아이디어 제시 · 자료 수집 · 시장 조사 · 과제 해결 방안 모색 · 아이템 발굴
과제 수행	4학년 1~2학기	· 시제품 디자인 개발 · 시제품 패턴 설계 · 시제품 재료 구매
결과물 제작	4학년 2학기	· 시제품 제작 · 실험/분석
결과물 발표 및 평가	4학년 2학기/ 동계학기	· 조별 시제품/결과 발표 · 조별 종합적 평가

그중 항공소음 측정 및 개선에 대한 주제가 포함되었다. 팀 구성은 다학제간 5인 1조를 기본단위로 1개 팀을 운영하며, 최소 1인 이상은 기계진동학을 이수한 관련 전공자가 포함되어야 하는 전제조건을 두었다. 또한 Table 1과 같은 전반적인 캡스톤 디자인 운영에 대한 기본 절차를 제공하였다.

### 2. 팀 구성

팀은 기계공학 전공 4학년 3명, 컴퓨터과학 전공 1명, 시스템공학 전공 1명으로 구성되었고, 지도교수는 기계공학 전공 1명이 담당하였다. 기계공학 전공 학생은 제트엔진의 연소시험과 부품 설계·제작을, 컴퓨터과학 전공은 소음 측정 데이터 처리와 분석을, 시스템공학 전공은 실험 요구사항 정립 및 시나리오 수립을 주 임무로 역할을 맡았으며, 세부내용은 Table 2와 같다.

Table 2 Team members and configuration

팀 구성	전공	주요 임무
지도교수	기계공학	· 과제 총괄 및 지원 · 진도 관리 및 평가
팀장	기계공학	· 팀회의 주관 및 리포트 작성 · 음향카메라 작동 주관
팀원 1	시스템공학	· 시험시스템 설계 · 테스트 시나리오 구상
팀원 2	컴퓨터과학	· 소음 측정데이터 처리·분석 주관
팀원 3	기계공학	· 부품 캐드 설계 및 제작 주관
팀원 4	기계공학	· 제트엔진 연소시험 주관

### 3. 이행 목표 설정

구성된 팀원은 4주간 매주 2회 실시한 팀 미팅을 통하여 제트 소음 발생 및 저감 방안에 관한 학술자료 조사 및 발표, 학부 수준대비 높은 학문적 성취도 달성을 위한 실험 방법론 설정, 테스트 시스템 구축 방안 등을 토의하여 다음과 같은 이행과정 및 목표를 설정하였다.

- 제트엔진의 소음특성 파악을 위하여, 실제 소형 제트엔진을 이용하여 연소시험을 실시한다.
- 연소시험 시, 연료주입량을 변화시켜 다양한 추력(thrust) 상태에서 발생하는 소음특성을 파악한다.
- 발생 소음은 다중 마이크로폰 어레이(microphone array)로 구성된 음향카메라(acoustic camera)를 이용하여 음압레벨(sound pressure level)과 음향파워(sound power)를 측정한다.

- 빔포밍(beamforming) 기법을 적용하여 측정된 소음 데이터로부터 소음 발생 주요 위치 및 강도를 확인한다.
- 주파수 대역 분석을 통하여 소음을 발생시키는 엔진 주요 구성품의 기여도를 파악한다.
- 소음저감을 목표로 웨브론(chevron) 형상의 배기부 형상을 설계/제작하여 그 영향을 분석한다.

1학기에는 실험시스템 구축을 위한 학술·기술자료 분석 및 실험기법 설계 후 초도시험을 실시하고 그 결과에 대한 연구보고서를 작성, 발표하는 것을 목표로 했다. 2학기에는 소음저감 방안의 일환으로 다양한 웨브론 형상의 노즐을 설계·제작하여 제트엔진 연소시험에 적용하여 변화 특성을 확인하고 그 결과를 연구보고서에 작성, 관련 학술대회에 제출하는 것을 목표로 하였다. 한편 공군사관학교는 2021년 10대 교육목표를 재정립하고 모든 교육과정이 일부 또는 전부에 연계되도록 권고하고 있으며, 본 설계 교과는 그중 ‘창의적인 문제해결 능력’, ‘의사소통 및 팀워크 발휘’, ‘과학적 추론능력 및 공학적인 적용 능력’에 해당된다.

### III. 실험시스템 구성

#### 1. SR-30 Turbojet Engine

본 연구에서는 제트엔진의 소음 발생을 구현하기 위하여 Fig. 2에 제시되어 있는 Turbine Technologies 社의 소형 제트엔진 SR-30 Turbojet 모델을 사용하여 연소 실험을 진행하였다. 해당 엔진에는 9개의 메인 블레이드를 갖는 1단(single stage) 원심류형 압축기(centrifugal compressor)와 26개의 블레이드를 갖는 1단 축류형 터빈(axial turbine)이 장착되어 있으며 자세한 사양은 Table 3에 제시되어 있다. SR-30은 최대 출력에서의 배기가스 속도는  $M = 0.98$ 로 음속에 근접하며, 본 실험에서는 실제 항공기에서 엔진 운용을 묘사하기 위해 엔진 초기 시동 이후, 엔진 추력을 idle(착륙 시), 50%(순항 시), 100%(이륙/기동 시) 등으로 조절하며 소음을 생성하였다.

Table 3 Specifications of SR-30 turbojet engine delivered by Turbine Technologies

Content	Value [unit]
Max. Thrust	40 lbf (178 N)
Max. RPM	87,000
Mass Flow	0.5 kg/s
Exhaust gas temp.	720 °C
Engine Diameter/Length	170 mm / 270 mm
Compression Ratio	3.4:1
Approved Oils	MIL-PRF-23699F-STD

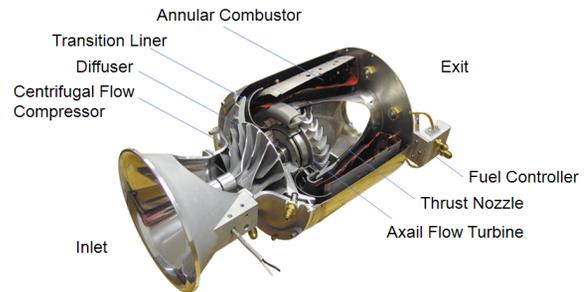


Fig. 2 SR-30 turbojet apparatus and engine cutaway (Source: Turbine Technologies LTD)

#### 2. Acoustic Camera

제트엔진 소음의 측정은 Fig. 3에서 보이는 Brüel & Kjær 社의 BK Connect Acoustic Camera Type 9712-W-FEN을 사용하여 측정하였다. 해당 모델은 30개의 마이크로폰 어레이를 이용하여 빔포밍 기법의 음원 측정을 지원하고 있으며, 음향 등고선을 통하여 소음원의 위치와 전달 특성을 분석할 수 있다. 본 실험에서는 SR-30 engine 흡입구 및 배기구를 포함한 엔진 구조물 전체를 2m 거리에서 측정하며, 해당 측정 결과를 주파수 대역별로 나누는 후 음압 레벨, 음향 강도, 소음형상 등을 비교한다.

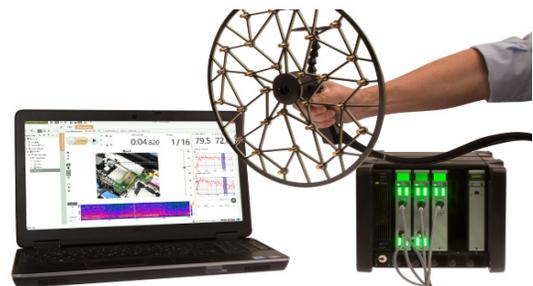


Fig. 3 BK Connect Acoustic Camera Type 9712-W-FEN (Source: HBK)

### 3. Chevron Shape Nozzle

제트소음의 저감 연구는 크게 유동을 제어하거나 분산하는 등의 능동적인 방법과 노즐 또는 나셀 등의 형상을 수정하는 수동적인 방법으로 나눌 수 있다(Huff, 2007). 이 중 수동적인 방법의 일례로 웨브론(chevron) 형상을 적용하여 주변 공기층의 혼합 속도를 향상시켜 제트소음을 저감시키는 기술이 최근 소개되고 있다(배주현 외, 2011; Jawahal et al., 2022; Cican et al., 2021). 다만 기존 연구는 압축공기 탱크의 밸브 조절을 통해 제트를 생성시켜 실시한 실험이 대부분으로 실제 엔진의 연소 및 압축기/터빈 블레이드 작동상태의 영향을 분석한 정보는 부족한 것으로 판단되었다. 본 실험에서 노즐의 설계는 기존 연구를 참조하여 설계변수를 웨브론 개수( $n$ ), 길이( $l$ ), 깊이( $d$ ), 각도(triangle, rectangle)를 달리하여 총 5가지(A, B, C, D, E)로 설정하였다. 제작에 앞서 3D 설계 프로그램인 CATIA 를 이용하여 형상을 구현하였으며, 이는 Fig. 4에 나타나있다. 기본 형상인 테이퍼(tapered)된 사각기둥 구조에 단면 끝단이 적용된 플레인(plain) 노즐을 기준(Fig. 4A 참조)으로 끝단을 삼각형 및 사각형 형태를 적용한 웨브론 형상 노즐을 각각 확인할 수 있다(Fig. 4B-4E). Table 4는 표면적비를 포함한 노즐 설계변수 정보를 나타내고 있다. Fig. 5는 웨브

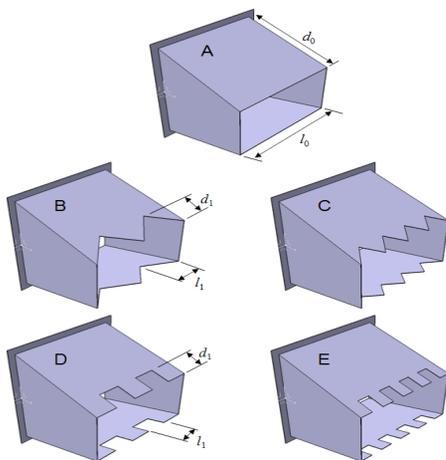


Fig. 4 3D CAD models of chevron nozzle for experiments

Table 4 Parameter values of chevron nozzle

Nozzle	Shape	Count( $n$ )	$l_1 / l_0$	$d_1 / d_0$	Area ratio
A	plain	-	-	-	1
B	triangle	2	0.25	0.167	0.88
C	triangle	4	0.125	0.167	0.92
D	rectangle	2	0.2	0.2	0.92
E	rectangle	4	0.11	0.167	0.93



Fig. 5 Activities for chevron nozzle manufacturing and mounting on SR-30 turbojet engine apparatus

론 형상을 제작하기 위하여 기계공작실에서 판금작업을 하는 모습과 이를 SR-30 turbojet engine 실험장치에 장착하는 모습을 보여주고 있다.

## IV. 실험 및 결과분석

### 1. 실험환경

실험 장소는 주변 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 야외의 넓은 개활지(150 m × 150 m)로 선정하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 6과 같이 SR-30 turbojet 엔진을 개활지에 두고 2 m 간격 뒤에 9712-W-FEN 마이크로폰 어레이를 배치하였다. 한편 음향카메라는 영상카메라가 중앙부에 내장되어 영상/음향 데이터 정보가 동시에 송출되며, 이는 DAQ board인 LAN-XI 거쳐 제어 소프트웨어인 BK Connect로 최종 전송되도록 설정되었다.

엔진의 가동 시나리오는 다음과 같다. 먼저 엔진 시동 이후 추력 레버(throttle)를 25 %, 50 %, 75 %, 100 % 단계로 계단

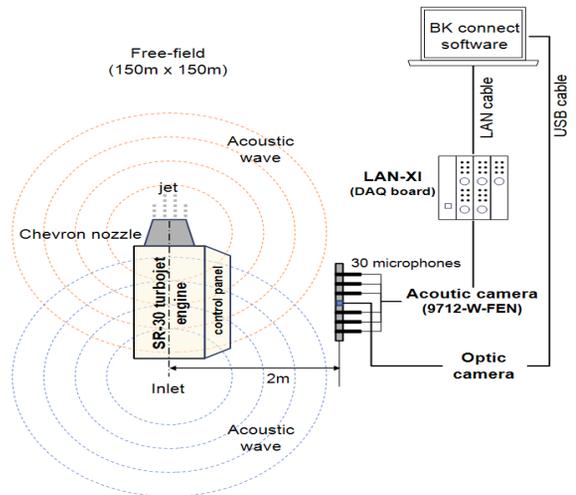


Fig. 6 Experimental setup for outdoor test

식으로 변화시키고 각 단계별로 소음을 측정하였다. 이후 추력 레버를 idle 상태로 복귀하고 1분간 연소한 후 소화시켰으며, 해당 과정은 앞서 소개한 서로 다른 5개의 웨브론 노즐 A, B, C, D, E에 동일하게 반복 적용하며, 이 과정에서 획득된 음압 레벨 등고선, 주파수 스펙트럼, waterfall diagram을 비교 분석하였다.

## 2. 결과분석

### 가. Noise Source Localization

다중 마이크로폰으로 획득된 음파데이터는 Fig. 7에 나타나 있듯이 빔포밍 기법을 통하여 음압등고선으로 표현되었으며, 이를 통해 주요 소음원의 위치는 흡입구(inlet)과 노즐(nozzle)로 확인되었다. 한편 추력이 상승함에 따라 음원의 위치는 점차적으로 노즐에 집중되고 있다.

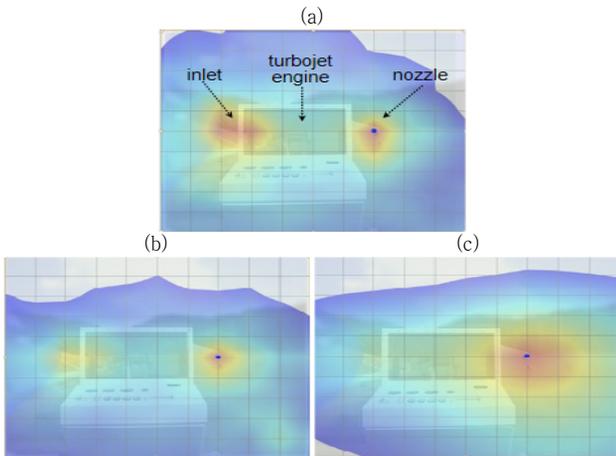


Fig. 7 Noise source localization with regards to thrust level using nozzle A: (a) idle, (b) 50%, (c) 100%

### 나. Frequency Spectrum Analysis

Fig. 8는 SR-30 turbojet engine의 run-up/run-down 동안의 전체 주파수 응답을 누적하여 기록한 waterfall plot이다. 이를 통해 엔진 가동 중 엔진 구성품의 소음 주요 기여도를 분석할 수 있었다. 먼저 추력조절과 동기화되어 계단식으로 측정되는 주파수 영역이 뚜렷하게 식별되는데, 이는 9개의 블레이드를 갖는 압축기의 날개통과주파수(blade passing frequency, BPF)와 일치하였으며, 1차, 2차 BPF가 가동 전반에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 한편, 26개의 블레이드를 갖는 터빈의 BPF는 상대적으로 미비한 것으로 나타난다. 연소 후류 제트에 의한 소음은 주로 2 kHz 인근에서 발생되었으며 100% 추력(full throttle)에서 가장 높은 강도를 갖는다. Fig. 9은 50%

추력 구간에서의 음향파워(sound power) 및 음압레벨(sound pressure level, SPL)을 주파수 대역으로 나타내고 있다. Fig. 9(a)에서 압축기의 BPF가 엔진에서 발생하는 가장 큰 소음에

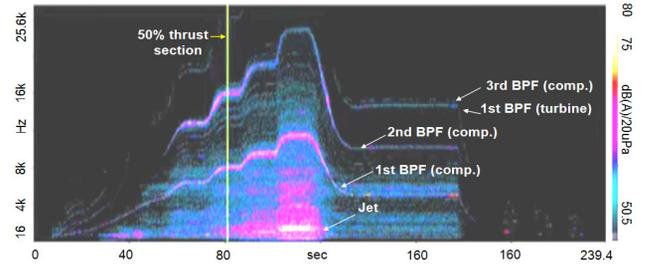


Fig. 8 Waterfall plot

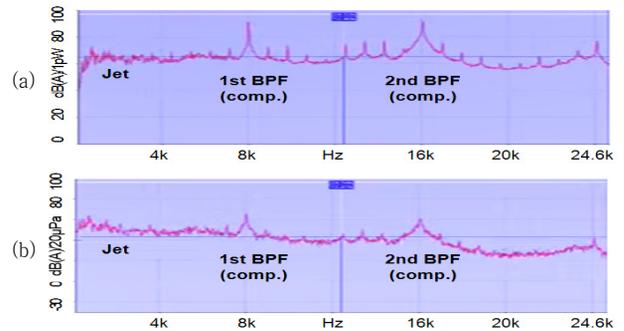


Fig. 9 Frequency spectra at 50% thrust: (a) total sound power, (b) selected mesh point at nozzle end

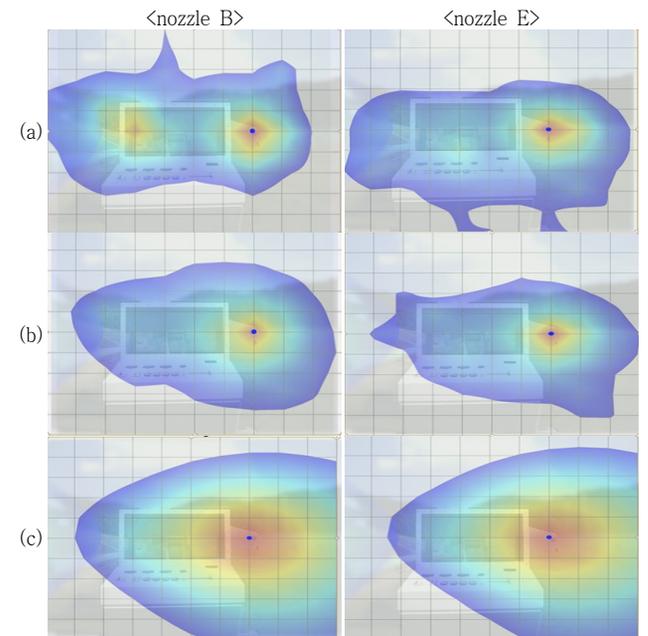


Fig. 10 Chevron nozzle effects with regards to thrust level: (a) idle, (b) 50%, (c) 100%

Table 5 Education and learning activities of capstone design project

교육목표	관련 교육 활동/성과	연계 4Cs 역량
창의적 문제해결	<Offer opportunities to build and innovate & provide autonomy to make choices> · 브레인스토밍을 통한 실험 대상, 방안, 환경 등에 대한 개념 창출 및 의견 교환 · 관련 논문 및 기술자료 분석 시간 운영 후 새로운 학술적 기여 방안 탐색 · 웨브론 형상 노즐 설계 시, 팀 주관 설계변수 설정 및 제작 방안 결정	creativity
의사소통 및 팀워크	<create a language-rich environment & foster respect and tolerances for others> · 주간 팀미팅 시 개인별 주제발표 및 전원 토의 참여토록 교육 진행 · 팀원별 주임무 부여 후, 해당 임무수행 시 리더로써 팀활동 주관 및 상호존중 도모 · 리포트 및 발표자료 작성 시 팀원 전원이 참여하여 준비(팀원별 작성 파트 할당) · 팀원 간 상호평가를 통한 임무수행도 평가 및 중간/기말 성적 반영	communication and collaboration
과학적 추론 및 공학적 적용	<give constructive feedback> · 다학제 팀으로써 개인별 전문 지식영역(소음진동, 데이터처리, 시스템설계) 활용 · 이론을 기반한 실험계획 수립 및 실험장치 구성 · 교수-팀원 미팅 시 실천방안에 대한 피드백 제공(구현 가능성 및 방법 코칭)	critical thinking

너지원으로 확인되며, Fig. 9(b)는 노즐부에서 측정된 SPL로써 후류 제트의 영향이 압축기 BPF와 증가한 것으로 나타났다.

다. Effects of Chevron Nozzle

Fig. 10은 웨브론 형태의 노즐(B, E)을 장착하였을 때, 추력에 따른 소음을 측정한 결과를 나타내고 있다. Fig. 7의 결과와 비교해 보았을 때, 웨브론 노즐의 장착 시, 배기구 방향 소음의 변화는 뚜렷하지 않으나, 흡입구 방향으로의 소음전파는 크게 개선되는 것으로 확인되었다. 특히 E 형태의 웨브론 노즐에서 가장 큰 개선을 보이며, 이는 저추력 상태에서 더욱 명확하게 나타났다.

3. 평가

캡스톤 디자인 프로젝트를 수행하며, 학생들은 제트엔진 소음과 저감방안에 대한 문헌조사를 실시하고 기존 연구사례를 분석하여 새로운 연구/기술영역을 탐색하였다. 또한, 이에 대한 실험시스템을 구성하고 소음저감을 위한 노즐을 설계·제작하였으며, 실험을 통하여 제트엔진 연소과정에서 발생하는 소음 특성을 분석하고 웨브론 노즐의 소음 저감효과를 실증할 수 있었다. 이러한 과정을 통하여 참여 학생들은 실제 전투기와 같이 보다 확장된 시스템에 대한 소음분석 및 저감방안을 연구할 수 있는 문제해결 능력을 배양할 수 있었다. 한편, 교과목 설계 시 설정하였던 교육목표인 ‘창의적 문제해결 능력’, ‘의사소통 및 팀워크 발휘’, ‘과학적 추론 및 공학적 적용능력’에 연계되는 교육활동 및 성과에 대하여 Table 5에 제시하였다. 해당 교육목표는 4Cs 역량에 기반되어 있으므로 교육목표 달성을 위한 방안으로 World Economic Forum(2016)에서 제시되었던 4Cs 역량 함양을 위한 교육방법을 참조하였다. 또한 해당 교육활동은 프로젝트 수행이 4Cs 역량 함양에 효과적인 교육 방법

이라는 Putri(2021)의 연구에 대한 적용사례가 될 수 있다. 프로젝트 수행 초반 학술적 성취 및 팀 활동을 위하여 설정하였던 이행목표 및 수행 내용을 검토하였으며 이는 Table 6에 제시되어 있다.

Table 6 Evaluation of project goals

이행 목표	수행 내용
실제 제트엔진 연소시험으로 소음 생성	SR-30 미니제트엔진을 이용한 연소소음 생성
다중 마이크로폰 격자를 이용한 소음 측정	30개 마이크로폰 격자 이용 음압/음향강도 빔포밍 측정
소음원의 위치 및 강도 분석	흡입구, 노즐 영역에서 주요 소음원 확인(추력에 따라 상이)
주파수 대역을 통한 소음 발생 주요 구성품 분석	압축기, 터빈의 BPF 및 연소후류 저주파수 대역 소음 분석 완료
웨브론 노즐 설계 및 제작	기본 노즐 및 웨브론형상 노즐 5종 설계 및 제작
웨브론 노즐 적용에 따른 소음저감 영향 분석	웨브론 노즐 장착 시 흡입구 방향 소음개선 확인
학술보고서 작성 및 관련 학술 논문 제출	보고서 작성 및 논문제출 완료

V. 결 론

본 연구는 학부 4학년을 대상으로 수행한 캡스톤 디자인 프로젝트의 교육사례로서 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 항공 엔진소음 분석 및 저감방안 도출을 목표로 다학제 팀을 구성하여 2개 학기에 걸쳐 프로젝트를 진행하였다. 둘째, 교육 운영 과정에서 4Cs(creativity, communication, collaboration, critical thinking)와 연계된 교육목표 달성을 위하여, 관련 역량 함양을 위한 다각적인 교육방법을 적용하였다. 셋째, 프로젝트 초반에 설정하였던 이행목표 달성을 위한 팀활동을 성공

적으로 수행하였고, 소음 분석 및 개선 결과를 도출하였다.

결과적으로 본 연구 과정 수행된 프로젝트 활동은 다학제간 융합된 지식과 협업 활동이 고난이도의 공학 문제를 보다 창의적이고 과학적으로 해결할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

다만 본 연구에서 부족하거나 제한되었던 내용과 연계하여 공과대학 학부과정에서의 융합 캡스톤 디자인 프로젝트 운영 개선방안에 대한 다음과 같은 제언을 갖고자 한다.

첫째, 서로 다른 학문분야 학생들이 상호 교육세션을 가짐으로써 다양한 시각, 기술, 전문성을 교류하는 사전 활동을 강화할 필요가 있다. 둘째, 프로젝트 참여자에 대한 4Cs 교육효과 달성도 추정을 위한 평가 루브릭과 평가 기준을 설정하고, 사전-사후 검사를 수행할 필요가 있다. 셋째, 연구수행 결과가 관련 산업현장에서 면밀히 피드백되어 보다 상호 보완적인 연계 주제가 식별되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 공군사관학교(2021). *사관생도를 위한 교육안내서*. 국군인쇄창.
2. 배주현 외(2011). 노즐 출구 형상에 따른 아음속 제트 유동의 소음 저감에 대한 실험적 연구. *한국소음진동공학회 학술대회논문집*, 687-692.
3. Cican, G., Deaconu, M., & Crunteanu, D. E.(2021). Impact of Using Chevrons Nozzle on the Acoustics and Performances of a Micro Turbojet Engine. *Applied Sciences*, 11(11), 5158.
4. GE Aviation Delivers First F414 Engine to South Korea for KF-X Program(2020, June 04), GE Aerospace.
5. Huff, D. L.(2007). Noise Reduction Technologies for Turbofan Engines. In *35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2006)* (No. E-15787).
6. Hunter, A.P. et al.(2021). *The Future of Military Engines*. Center for Strategic and International Studies.

7. Jawahar, H. K., Meloni, S., & Camussi, R.(2022). Jet Noise Sources for Chevron Nozzles in Under-Expanded Condition. *International Journal of Aeroacoustics*, 1475472 X221101766.
8. Putri, R. K., Bukit, N., & Simanjuntak, M. P.(2021). The Effect of Project Based Learning Model's on Critical Thinking Skills, Creative Thinking Skills, Collaboration Skills, & Communication Skills (4C) Physics in Senior High School. *Advances in Social Science. Education and Humanities Research*, 591, 23-330.
9. World Economic Forum(2016). *New Vision for Education: Fostering Social and Emotional Learning through Technology*, Geneva: World Economic Forum.



**김시태 (Kim, Sitae)**

2003년: 공군사관학교 기계공학과 졸업  
 2007년: 서울대학교 기계항공공학 석사  
 2016년: Texas A&M University 기계공학 박사  
 2017년~현재: 공군사관학교 기계공학과 교수  
 관심분야: 동역학, 진동/소음, 공학설계  
 E-mail: sitaekim@outlook.com



**김혁수 (Kim, Hyuksoo)**

2024년: 공군사관학교 기계공학과 졸업  
 관심분야: 진동/소음, 공학프로그래밍  
 E-mail: 24-10048@af.mil



**조민혁 (Cho, Minhyuk)**

2024년: 공군사관학교 기계공학과 졸업  
 관심분야: 진동/소음, 공학프로그래밍  
 E-mail: boramae21@af.mil