

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.4.001>  
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 청각 자극이 이륙하는 헬리콥터 조종사에게 미치는 영향

## - 놀람 -

김문성\*, 이승렬\*\*, 김신우\*\*\*, 이형철\*\*\*

## The Effects of Auditory Stimuli on Helicopter Pilots Taking Off

## - Startle -

MunSeong Kim\*, SeungYeal Lee\*\*, ShinWoo Kim\*\*\*, Hyung-Chul O. Li\*\*\*

## ABSTRACT

Startle stimuli elicit physiological, involuntary behavioral, emotional, and cognitive responses. Specifically, startle responses are heightened when arousal or stress levels are either very low or very high. Under unexpected, low-visibility conditions at night, where startle and surprise are induced and stress levels are heightened, we examined whether additional auditory stimuli enhance pilots' startle and surprise responses. Current pilots were tested while performing hovering flight in a virtual environment. Results revealed that physiological, psychological, and physical responses to startle and surprise were induced in pilots. These results suggest that additional auditory stimuli may adversely affect pilot performance during takeoff.

**Key Words** : Arousal(각성), Stress(스트레스), Hover Flight(제자리 비행), Takeoff(이륙), Auditory Stimuli(청각 자극), Startle(놀람)

## 1. 서 론

놀람(startle)은 권총소리처럼 갑작스럽고 강렬하거나 위협적인 자극에 대하여, 매우 짧고 빠르게 나타나는 생리적인 반응이다(Ekman, Friesen and Simons,

1985). 놀람 반응은 비자발적인 근육수축뿐만 아니라 생리적 반응, 정서적 반응도 유발하며, 스트레스와 관련된 교감 신경계가 신경을 지배하게 하고 놀라게 한 자극에 대하여 주의를 지향하게 만드는 인지적 반응도 동반한다(Rivera, Talone, Boesser, Jentsch and Yeh, 2014).

놀람 반응은 촉각, 시각 또는 청각 자극으로 유도될 수 있고(Davis, Gendelman, Tischler and Gendelman, 1982; Carlsen, Chua, Inglis, Sanderson and Franks, 2008), 혈압과 심박수를 증가시키는 등의 생리적 반응과 행동 반응도 수반한다. 예를 들어 권총 발사와 같은 큰 자극이 키보드 누르기 같은 단순한 운동 작업의 수행을 200ms~1,695ms 동안 지연시켰고, 복잡한 운동 작업에서는 10초 동안이나 수행을 지연시켰다(Sternbach, 1960). 특히, 연속적인 산술 뺄셈 같은 일반적인 인지 정보 처리조차도 30초

Received: 9. Sep. 2025, Revised: 10. Nov. 2025,

Accepted: 25. Nov. 2025

\*소방청(중앙119구조본부), 광운대학교 심리학 박사

\*\*국토교통부(항공철도사고조사위원회), 세종대학교 항공우주공학 박사과정

\*\*\*광운대학교 산업심리학과 정교수 (공동저자)

These authors contributed equally to this work

공동교신저자 E-mail : shinwoo.kim@kw.ac.kr

주소 : 서울특별시 노원구 광운로 20 (월계동 447-1) 광운대학교 한울관 526호

공동교신저자 E-mail : hyung@kw.ac.kr

주소 : 서울특별시 노원구 광운로 20 (월계동 447-1) 광운대학교 한울관 628호

에서 60초 동안 제대로 수행하지 못하게 하였다 (Vlasak, 1969). 따라서, 놀람 자극은 최종적인 목표 행동 수행을 방해하는 생리적 반응, 행동적 반응을 일으키고, 개인의 인지 처리를 방해하여 의사 결정 및 문제 해결 능력에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Rivera et al., 2014).

놀람 반응을 유발할 수 있는 청각(acoustic) 자극의 크기를 측정하기 위하여, Berg(1974)는 정신물리학적 역치 결정 절차를 적용하여, 안검 전위계(lid potentiometer)로 눈꺼풀의 움직임을 측정하였다. 측정 결과 눈 깜빡임 반응의 50% 확률 역치는 85dB(A)<sup>1)</sup>라고 보고하였다. 이로 인해 많은 청각 놀람 연구에서 100dB(A) 이상의 강도가 사용되었고(Blumenthal, Cuthbert, Filion, Hackley, Lipp and Van Boxtel, 2005), Ramirez-Moreno와 Sejnowski(2012)의 연구에서도 80~85dB의 역치를 초과하는 청각 자극이 신경회로를 거쳐서 놀람 반응을 유발할 수 있다고 설명하였다.

청각 자극의 크기와 주파수에 따른 비자발적인 신체 반응을 측정하기 위하여, Foss, Ison, Torre Jr & Wansack(1989)은 참가자들을 소총으로 5.5m 떨어진 과녁을 정밀하게 조준하게 한 다음에, 청각 자극을 제공하여 조준점의 동요 정도를 측정하였다. 전자식 오실로스코프를 사용하여 5ms 간격으로 기록하였고, 방위 방향으로 움직이는 정도를 milliradian 단위로 측정하였다. 청각 자극의 중앙 주파수는 250Hz 또는 800Hz 이고, 크기는 110, 120, 130dB이었으며, 청각 자극은 조준 중에 50ms 동안 제공하였다. 실험 결과 모든 조건에서 1~2초 정도 영향을 주었다. 초기 시도에서 자극의 크기가 증가할수록 2.7, 3.2, 5.1 mrad 만큼 조준점이 동요되었으며, 주파수에 따른 차이는 없었다.

항공 분야에서의 놀람은 조종사의 기대에 어긋나는 갑작스럽고 강렬한 사건에 노출됨으로써 유발되는 제어할 수 없는 자동적인 근육 반사, 심박수 상승, 혈압 등으로 정의된다(FAA, 2015). 항공 분야에서 놀람 자극을 사용한 실험 연구는 많지 않으며, 촉각이나 시각에 비해서 현실에서 더 쉽게 발생될 수 있는 청각 자극

이 주로 사용되었다.

Martin, Murray, Bates & Lee(2016)는 계기비행 방식으로 접근하는 과정에서 화재 경고 벨 소리와 동시에 팡(loud bang) 소리로 자극하여 결심 고도(decision height) 이하로 내려간 고도 손실을 정상 조건에서의 고도 손실과 비교하였고, 놀람 조건에서 수행의 저하가 인지 처리의 손상 때문에 발생한 것으로 해석하였다. Lee, Lee & Park(2021)은 연출된 엔진 고장 상황에서 80~85dB의 천둥번개 소리로 30초 동안 자극하고 사업용 조종사와 자가용 조종사의 심박수와 호흡수, 놀람에 대한 주관적 인식의 차이를 평가하였다. Martin et al.(2016)은 비행기 조종 상황을 모사한 연구이고, Lee et al.(2021)의 연구는 헬리콥터 조종 상황을 모사한 연구이며, 놀람 자극에 의한 수행의 정도, 생리적 반응, 심리적 평가로 놀람에 대한 영향을 평가하였다.

일반적인 비행기 조종과 달리, 헬리콥터 조종 환경에는 놀람 반응을 유발할 수 있는 요인이 더 많이 존재한다. 특히 조종석과 가까운 위치에 있는 엔진계통, 동력전달계통, 로터시스템 등에서 발생하는 다양한 대역의 진동(FAA, 2019)과 큰 소음은 조종석 내에 상존하며, 이는 조종사의 생리적 각성 수준을 높이는 요인으로 작용한다.

각성은 깨어나거나 감각 기관의 자극이 뇌의 지각 지점까지 전달되어 반응을 보일 수 있는 생리적, 심리적 상태(Pfaff, 2006), 개인의 각성 또는 스트레스 수준이 아주 낮거나 높은 극단적인 상황에서 증가된다. 즉, 쉬고 있거나, 졸리거나, 잠들려고 할 때와 같이 개인의 각성 수준이 매우 낮을 때, 그리고, 스트레스, 불안, 위협을 받거나 격렬하게 활동할 때와 같이 매우 각성되었을 때에는 증가하게 된다(Martin, Murray and Bates, 2011; Barnett, Wong, Westley, Adderley and Smith, 2012).

비행기와 헬리콥터의 또 다른 점은 승무원의 위치와 역할이다. 비행기의 객실 승무원은 조종석과 공간적으로 분리된 객실에 위치하며, 필요한 경우에만 주로 인터폰을 통해서 의사소통을 한다. 헬리콥터는 운용 목적상 안전한 비행장이 아닌 아주 협소한 장소에서 운용되므로, 조종석에서 볼 수 없는 근접한 외부 장애물에 대한 정보, 로터 시스템과 장애물과의 간격 등의 정보가 필요하다. 이를 위해 헬리콥터 승무원은 조종석의 바로 뒤에 위치하여, 조종사와 동일한 기내 통화시스템 속에

1) dB(A)는 IEC 61672-1 표준에 따라 1kHz를 기준으로 하여 주파수의 크기에 따라서 가중치를 부여하여 측정된 값이다. 실험에 사용된 가상의 남성 음성 스펙트럼은 1kHz보다 대부분 낮아 낮은 가중치로 계산되므로, 남성 소리의 강도 dB(A)를 dB로 변환하면 약 1~4dB 정도 커지게 된다(NTi Audio, n.d.).

서 헬멧의 마이크를 통해서 직접 정보를 주고받는다.

이러한 과정에서 조절되지 못한 큰 소리가 발생한다면 서로에게 놀람 자극으로 작용될 가능성이 크다. 특히, 다양한 인지 과제(Seamster and Redding, 2017)를 수행해야 하는 조종사에게는 더 큰 악영향을 미칠 수 있다.

특히, 높은 주의력이 요구되는 이착륙 과정은 심리적인 압박에 의하여 각성 수준이 더 높아진 상태이다. 만약, 이러한 상황에서 큰 소리가 발생되면 생리적, 심리적으로 각성된 상태이므로 놀람 반응이 더 증가될 수 있다.

000 헬기 해상 추락 사고 조사 보고서(2023)에서도 이륙하는 과정에서 큰 소리가 조종사의 놀람 반응을 유발했을 가능성이 제시되었다. 항공기 내 CRM(crew resource management) 분야에서, 이륙을 하기 위하여 제자리 비행을 하는 과정에서 기내의 큰 소리가 긴장한 조종사를 더 긴장하게 하였다고 기술되었고, 놀람 반응(startle reflex)을 부연하여 설명하였다.

이러한 사례에도 불구하고, 기내 의사소통 과정에서 발생할 수 있는 큰 소리가 실제로 조종사에게 영향을 줄 수 있는지에 관한 연구는 거의 없으며, 이러한 상황이 또 발생할 가능성도 여전히 있다. 따라서, 본 연구에서는 청각 자극이 이륙하는 과정에서 제자리 비행을 수행하는 헬리콥터 조종사에게 미치는 영향을 검증하고자 한다.

## II. 실험

본 연구는 Kim, Lee, Kim & Li(2025)의 “예상하지 못한 급격한 시정의 변화가 이륙하는 헬리콥터 조종사에게 미치는 영향”의 야간 조건과 급격한 시정 변화를 모사한 저시정 조건에서 청각 자극 조건을 추가한 연구이다. 야간과 저시정 조건에서 놀람과 놀라움의 반응(startle and surprise response; SSR)이 유발되었다. 야간 조건에서는 어둠-강화 효과가 나타났고, 저시정 조건에서는 공포-강화 효과가 나타났다. 본 연구는 어둠-강화 조건과 공포-강화 조건에서 청각 자극의 제공 여부에 따른 SSR을 측정하는 연구이다.

본 연구에서도 Kim et al.(2025)의 연구처럼 이륙 과정 중의 하나인 제자리 비행 단계에서 실험하였다. 증속 및 상승 단계에서 헬리콥터의 광원과 멀어짐으로써 발생하는 시각 단서의 감소와 저시정 조건의 조우

를, 제자리 비행 단계에서 실험자가 조도 감소와 기상 조작 등으로 구현하였다.

또, 증속 및 상승 단계는 제자리 비행 단계에 비해서 비교적 큰 크기의 조종간의 움직임이 필요한 단계이다. 따라서, 이 때 발생하는 조종간의 움직임은 조종사의 의도적인 조작인지 놀람 및 놀라움에 대한 의도하지 않은 반응인지 구분하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 비교적 작은 크기의 조종간 움직임이 필요한 안정적인 제자리 비행 단계에서 실험하여, 조종간 움직임의 변화율이 갑자기 증가하면 놀람 및 놀라움에 대한 신체반응으로 간주하였다.

또, Kim et al.(2025)의 연구와 Diarra, Marchitto, Bressolle, Baccino and Draï-Zerbib(2023)의 주장처럼 놀람 반응에 대하여 생리학적 측정과 주관적 평가로 놀람 여부를 평가하였다. 생리학적 측정으로 심박수와 심박변이도를 측정하였고, 주관적 평가로 놀람에 대한 감정가와 불안에 대하여 응답하게 하였다. 또, 놀람 반사로 유발되는 신체의 움직임으로도 놀람 여부를 평가하였다. Kim et al.(2025)의 연구에서 유발된 놀람과 놀라움의 반응(SSR)에 청각 자극으로 인한 놀람 반응(startle response)이 추가되어 SSR이 더 증가될 것으로 예상하였다.

### 2.1 실험 목적 및 설계

본 연구의 목적은 야간의 예상하지 못한 저시정 조건에서 청각 자극이 이륙하는 헬리콥터 조종사의 SSR을 증가시키는지 검증하는 것이다. 야간에 시정이 양호한 조건에서 이륙하여 제자리 비행을 하는 도중에 예상하지 못한 저시정 조건에 조우한다면, 야간으로 인한 어둠-강화 효과와 저시정으로 인한 공포-강화 효과로 인하여 강화된 SSR이 유발되는 조건이다. 청각 자극이 추가되는 조건에서는 SSR이 더 증가될 수 있으며, SSR로 인한 신체반응과 인지적인 영향으로 제자리 비행과 이어지는 이륙 과정에 더 큰 악영향을 미칠 수 있다.

실험은 집단 내 설계로 청각 자극의 유무 순서에 따라 2개의 조건으로 나누어 상쇄 균형화(counterbalancing)하여 실험하였다. 야간에 시정이 양호한 조건에서 제자리 비행을 하는 도중에 갑작스럽게 시정을 변화시켜 저시정 조건을 구현하였고, 이때 청각 자극이 있는 조건에서는 음성 자극을 제공하고 SSR을 측정하였다. 참가자의 왼쪽 전완에 암밴드를 착용시켜 심박변이도와 심박수로 생리적 반응을 측정하였고, 놀람과 놀

Table 1. Experimental design

연구설계	비행조건	비행과제	독립변인	종속변인
집단내설계	어둠-강화 공포-강화	제자리비행	청각 자극 (유, 무)	생리적 반응 심리적 평가 신체반응

라움에 대한 주관적 감정가와 상태 불안 척도 설문지 (STAI-X-1)로 심리적 평가를 하게 하였다. 시뮬레이션 프로그램에서 추출되는 데이터 셋으로 SSR에 의한 조종간 반응을 계산하였다(Table 1).

## 2.2 실험 기구

실험은 Kim et al.(2025)의 연구 조건에 추가되는 청각 자극에 대한 SSR의 증가를 측정하는 것으로 동일한 비행기구, 생리학적 측정 기구, 심리학적 측정 도구와 비행 데이터를 사용하였다.

### 2.2.1 비행 기구

실험에 사용된 시뮬레이션 프로그램과 장비들은 Kim et al.(2023, 2025)의 연구에서도 사용되었으며, 실험 참가자들은 비행 기구의 조종 반응과 영상 현실감에 대한 타당성을 인정하였다(Kim et al., 2003). 시뮬레이션 프로그램은 Laminar Research 사의 X-PLANE 11, 헬리콥터는 S-76을 사용하였고, 가상 환경은 오쿨러스 VR(Virtual Reality)사의 Oculus Rift S로 구현하였다. 권장 사양 이상의 PC와 24인치 모니터를 사용하여 비행 중에 기록되는 비행 데이터와 참가자의 시야를 확인하고, X-PLANE 11의 메뉴를 선택하였다. 조종간은 logitech flight G-940을 헬리콥터 조종간과 유사하도록 사이클릭과 컬렉티브를 연장하여 사용하였다. 사이클릭에 연결되어 있는 트림(trim) 버튼의 기능을 제거하여 SSR이 발생되면 의도하지 않은 신체의 놀람 반사가 손을 거쳐서 사이클릭으로 전달되게 하였다.

저시정 조건은 control pad라는 아이패드 응용프로그램으로 조작하였다. X-PLANE과 동일한 무선 네트워크로 연결된 경우에는 응용프로그램으로 환경을 설정할 수 있으며, 시간, 시정, 구름, 활주로 등화(RWY LIGHTS) 등의 항목들을 사용하였다.

청각 자극은 사전에 가상의 남성 목소리로 녹음한 음성파일을 사용하였고, 음성파일이 저장된 휴대폰을

참가자 앞에 있는 책상에 두고 조건에 맞추어 실행하였다. 청각 자극은 “좌로, 좌로”로 약 1.6초의 시간 동안 제시되었다. 자극의 크기는 참가자들의 각성 상태를 고려하여 음량계로 측정하여 최댓값이 70~75dB이 되도록 휴대폰의 위치를 조절하였으며, 참가자의 머리에서 휴대폰까지의 거리는 약 1.2m였다(Fig. 1).

### 2.2.2 생리학적 측정 기구

암밴드 형태인 SCOSCHE사의 RYTHM24를 참가자의 전완에 착용하게 하여 심박수(heart rate)와 심박변이도(heart rate variability)를 측정하였다. RYTHM 24는 휴대폰의 응용프로그램인 Elite HRV와 블루투스로 연결되어 1분 이상 측정이 지속될 경우에는 심박수와 심박변이도가 계산된다(Fig. 1)

심박변이도는 시간 영역과 주파수 영역에서 분석된다. 시간 영역에서 HR은 일반적으로 1분당 심장 박동수이며(bpm) 값이 작으면 안정상태이다. MEAN RR과 RMSSD(root mean square differences of successive difference)는 특정 시점의 높은 순간 심박(R 또는 N)을 사용하여 계산된다. R(N)과 R(N) 사이의 간격의 평균인 MEAN RR은 값이 크면 안정상태이다. RMSSD는 인접한 RR 간격 간 차이에 대한 평균 제곱합의 제곱근으로, 값이 크면 안정상태이다(Fig. 2)

주파수 분석 단계에서는 측정된 심박 신호를 fast Fourier transform(FFT)과 같은 기법을 활용해 저주파 및 고주파 영역으로 분리한 다음에, 전체 주파수 영역의 강도(total power), 저주파 대역 강도(LF

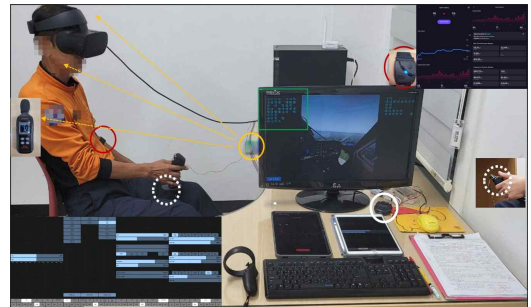


Fig. 1. Actual experimental scene

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N ((R_{i+2} - R_{i+1}) - (R_{i+1} - R_i))^2 \right)}$$

Fig. 2. RMSSD

power), 고주파 대역의 강도(HF power), 두 대역 간의 비율(LF/HF ratio)이 산출된다.

Castaldo, Melillo, Bracale, Caserta, Triassi & Pecchi(2015)는 급성 정신적 스트레스를 평가하기 위하여 건강한 성인들을 대상으로 단기 심박변이도를 분석하였다. 그 결과 급성 정신적 스트레스가 발생하는 경우에는 LF/HF는 증가하고 MEAN RR, RMSSD, HF 값은 감소하는 것으로 나타났다.

본 실험은 야간에 헬리패드에서 이륙하기 위하여 제 자리 비행을 하는 도중에 예상하지 못한 급격한 시정의 변화를 맞는 짧은 순간에 청각 자극을 추가하는 상황이다. 따라서, 짧은 순간의 측정이 필요하며, 1분 측정과 적용이 가능한 MEAN RR, RMSSD, HF(Castaldo, Montesinos, Melillo, James and Pecchia, 2019)와 HR의 증가, 감소의 추세로 SSR에 의한 급성 스트레스가 증가되었다고 평가하였다(Table 2).

### 2.2.3 심리학적 측정 기구

놀람과 놀라움에 대한 주관적 평가는 11점 리커트 척도로 측정하였고, 불안은 상태-특성 불안 척도 설문지로 측정하였다. 상태-특성 불안 척도(state-trait anxiety inventory)는 1970년에 Spielberger(1970)가 개발한 자기 보고식 검사 도구로, 불안을 순간적인 정서 반응으로 보는 상태 불안(state anxiety)과 비교

Table 2. Meaning and application of HRV(Kim et al., 2025)

구분	의 미	스트레스 반응	1분 측정
HR	1분당 심박수 작을수록 안정상태	증가	가능
RMSSD	연속적인 RR 간격 차이값의 편차 부교감신경의 활동 지표 클수록 안정상태	감소	가능
MEAN RR	정상 심장 박동의 평균 간격 클수록 안정상태	감소	가능
LF	0.04~0.15Hz 강도 주로 교감신경과 더 관련이 있음	-	불가능
LF/HF	LF와 HF의 비율 자율신경계의 균형을 나타냄	증가	불가능
HF	0.15~0.4Hz의 강도 부교감신경을 반영	감소	가능

적 변하지 않는 성격적 경향으로 보는 특성 불안(trait anxiety)으로 구분하였다.

본 연구에서는 Kim(1978)이 번안한 한글판 X형 중에서 상태 불안만을 측정하였다. 특정한 상황에서 스트레스로 인하여 일시적으로 야기되는 상태 불안은 ‘지금 이 순간에 느끼고 있는 상태’인 ‘나는 마음이 든든하다’, ‘나는 마음이 조마조마하다’ 등의 20개의 구성되고, 10개의 역문항이 포함되어 있다.

참가자들은 4점 리커트 척도를 사용하여 “전혀 그렇지 않다(1점)”, “가끔 그렇다(2점)”, “자주 그렇다(3점)”, “대단히 그렇다(4점)” 중 하나를 선택해 응답했으며, 역문항은 반대로 환산하여 점수에 반영하였다. 전체 점수는 20점에서 80점 사이로 산출되며, 점수가 높을수록 불안 정도가 크다고 해석된다.

### 2.2.4 신체 반응 측정 데이터

비행 데이터는 사용자의 선택에 따라서 시뮬레이터가 실행되는 동안 화면에 표시하고, 동시에 텍스트 파일로도 저장할 수도 있다. 저장할 수 있는 데이터는 시간, 조종간의 위치, 항공기 계기의 지시 값 등이 있다. 본 실험에서는 시간과 항공기의 제원인 속도, 고도, 헤딩, 사이클릭의 물리적인 각도인 피치, 롤의 데이터들을 최대 샘플링 간격인 약 0.025초 간격으로 저장하였다.

사이클릭은 피치(전후) 및 롤(좌우) 방향으로 각각 ±15° 범위 내에서 움직일 수 있으며, 이때 ±15°는 비행 데이터 상에서 ±1로 기록된다(그림 8). 0.025초마다 기록된 사이클릭 피치와 롤 각도의 벡터 합으로 각 속도를 산출하고, 각속도의 변화량을 통해 각속도를 계산한 후, 호도법을 적용하여 병진 가속도로 변환하였다. 조종하는 과정에서 사이클릭의 조작은 반드시 수행되므로, 조종간 중에 사이클릭 움직임의 병진 가속도만 신체 반응 데이터로 사용하였다.

### 2.3 참가자

본 실험은 000 항공대 소속 남성 조종사 10명을 대상으로 통제된 장소에서 수행되었다. 모든 참가자는 유효한 1종 항공 신체검사증명을 보유하고 있었고, 운송용 또는 사업용 조종사 자격과 계기비행 자격을 갖추었으며 최소 1,000시간 이상의 기장 경력을 보유하고 있었다. 참가자들의 나이는 평균 51.50세(SD=3.83)이고, 총 비행 경력으로 실행시간은 평균 5,060시간(SD=1,556.49), 모

의비행시간은 평균 292시간( $SD=150.09$ ), 계기비행시간은 평균 360시간( $SD=196.02$ )이며, 경험한 시뮬레이터 종류는 평균 5.8개( $SD=2.30$ )이었다. 실험을 종료한 다음에 10,000원의 참가비를 지급하였다.

## 2.4 연습절차

참가자에게 인구통계학적 정보, 보유하고 있는 비행 자격, 비행 경험 등을 간단하게 설문한 다음에 실험 목적과 절차를 설명하였다. 실험 목적은 제자리 비행 간 조종사의 시간지각에 대한 측정으로 설명하였고, 실험 과정은 지시된 비행 제원 범위 내에서 약 1~2분 동안 제자리 비행을 하는 것이라고 설명하였다. 실험에 필요한 심박수와 심박변이도를 측정하기 위해서 암밴드를 미리 착용시켰다.

참가자들을 좌석에 먼저 앉게 하여 컬렉티브, 싸이클릭, 페달의 위치를 자신이 사용하는 변위에 맞게 배치하도록 한 다음에 HMD(head mounted display)를 착용하게 하였다. 그리고, 현실감을 증가시키기 위해서 프로그램에서 구동되는 헬기의 효과음을 HMD의 내장 스피커로 들리게 하였다. 효과음의 크기는 약 35~40dB로 가정의 평균 생활 소음 정도로 사전에 설정하였다. HMD를 착용한 참가자들에게 필요한 계기판과의 높이, 거리 등을 요구하게 하여 실험자가 키보드로 조종석의 위치를 조절하였다. 이후, 비행에 필요한 여러 계기들을 참가자들에게 설명하였다.

연습 기상은 시정이 10km이고 구름은 전혀 없는 양호한 주간 조건으로 설정하였다. 제자리 비행의 기준 제원으로, 고도는  $20 \pm 5$ ft, 방위각은 현재 헤딩의  $\pm 10^\circ$ , 편류는 현재 지점에서  $\pm 5$ ft를 제시하였고, 지면에서 수직으로 이륙하여 약 10분 동안 제자리 비행을 수행하게 하였다(Fig. 3). 제자리 비행 연습을 하는 동안 실험자가 2초, 3초의 시간 간격을 각 1회씩 요구하였고, 참가자는 왼손의 엄지손가락으로 스위치를 각 1회씩 조작하여 요구된 시간을 보고하게 하였고, 실험자의 구두 지시가



Fig. 3. Practice scenes from external and internal view point(Xplane 11 captured)

있음을 인식하게 하였다. 연습을 종료한 다음에는 실험자가 시뮬레이션 프로그램을 재설정하는 동안 참가자는 HMD를 해제하고, 휴식을 취하였다.

## 2.5 실험절차

실험은 현실의 일몰 시간 이후에 가상 환경의 야간 조건에서 실시하였다. 가상의 연습 장소와 다른 가상의 실험 장소에서 야간 시간으로 설정된 상황에서 실험이 실시되었다. 참가자들을 청각 자극을 먼저 제공하는 조건과 먼저 제공하지 않는 조건의 순서를 무작위로 배정하였고 상쇄 균형화하여 실험하였다.

청각 자극을 제공하지 않는 조건에서는 기상이 양호한 야간 조건에서 수직으로 이륙하여, 연습 절차에서 제시한 제자리 비행의 기준 이내에서 1~2분 동안 제자리 비행을 하게 하였다. 제자리 비행이 안정되었다고 판단되었을 때에, 아이패드의 응용 프로그램으로 저시정 조건을 만들고, 이 때 모니터에 나타나는 시간을 기록하여 결과 분석에 사용하였다. 저시정 조건의 시정은 160m, 구름의 높이는 0ft, 구름의 양은 overcast(하늘을 완전히 덮은 상태)로 설정하였다. 헬기장 주변 등화의 조도도 감소시켰고, 참가자들은 희미하게나마 시각 단서



(a) Day example to aid understanding



(b) High visibility condition



(c) Low visibility condition (counterbalanced the conditions with and without auditory stimulation)

Fig. 4. Experimental scenes from external and internal view point(Xplane 11 captured)

를 식별하고 제자리 비행을 수행할 수 있었다(Fig. 4). 저시정 조건을 만든 다음에 휴대폰의 응용프로그램으로 심박변이도를 측정하기 시작하였고, 측정이 완료되면 착륙하게 하였다. 착륙한 다음에 HMD를 해제시켰고, 제자리 비행 과제를 수행하는 도중에 느꼈던 놀람과 놀라움에 대한 감정가와 불안에 대하여 응답하게 하였다 응답한 다음에는 5~10분 정도 휴식을 취하게 하였고, 실험자는 참가자의 비행 데이터를 저장하였으며, 실험 조건을 재설정하였다.

청각 자극을 제공하는 조건에서는 저시정 조건을 만드는 것과 동시에 음성파일을 실행하여 청각 자극을 제공한 다음에 시간을 기록하였다. 이후 절차는 청각 자극을 제공하지 않는 조건과 동일하였다.

2.6 실험결과

SPSS version 25를 사용하여 청각 자극의 유무 순서에 따라 상쇄 균형화하여, 반복 측정된 HR, RMSSD, MEANRR, HF, 감정가, 불안 점수, 조종간 반응에 대하여 대응 표본 t 검정을 실시하였다. 조종간 반응은 실험자가 기록한 시간을 고려하여, 3초 이내에 발생하는 조종간의 가장 큰 가속도를 산출하여 SSR로 간주하였다. 3초 이후에 발생하는 큰 가속도는 잘못된 비행 제원을 수정하기 위한 조작으로 간주하였다. 분석에 사용된 모든 데이터는 |왜도|<2.41, |첨도|<5.95로 정규성 검정을 만족하였다(Kline, 2005).

HR에서는 청각 자극이 없는 조건(M=72.50, SD=9.55)보다 청각 자극이 있는 조건(M=78.10, SD=15.79)이 5.6회 만큼 많았으며, 통계적으로 유의하였다(t=-2.52, df=9, p<.05). RMSSD에서는 청각 자극이 없는 조건(M=50.61, SD=25.37)보다 청각 자극이 있는 조

건(M=36.79, SD=21.28)이 13.82 만큼 낮았으며 통계적으로 유의하였다(t=2.44, df=9, p<.05)(Fig. 5).

MEAN RR에서는 청각 자극이 없는 조건(M=843.33, SD=103.49)보다 청각 자극이 있는 조건(M=795.29, SD=137.38)이 48.04 만큼 낮았으며 통계적으로 유의하였다(t=3.41, df=9, p<.01). HF에서는 청각 자극이 없는 조건(M=699.84, SD=812.45)보다 청각 자극이 있는 조건(M=373.89, SD=570.85)이 325.94 만큼 낮았으며 통계적으로 유의하였다(t=3.19, df=9, p<.05)(Fig. 6).

감정가에서는 청각 자극이 없는 조건(M=4.40, SD=2.37)보다 청각 자극이 있는 조건(M=6.80, SD=2.49)이 2.4만큼 높았으며 통계적으로 유의하였다(t=-6.00, df=9, p<.001). 불안 점수에서는 청각 자극이 없는 조건(M=45.60, SD=10.66)보다 청각 자극이 있는 조건(M=55.80, SD=14.30)이 10.2점 만큼 높았으며, 통계적으로 유의하였다(t=-3.99, df=9, p<.01)(Fig. 7).

조종간 반응에서는 청각 자극이 없는 조건

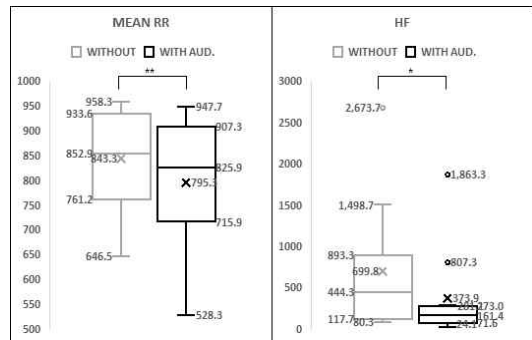


Fig. 6. The MEANRR and HF results under both conditions

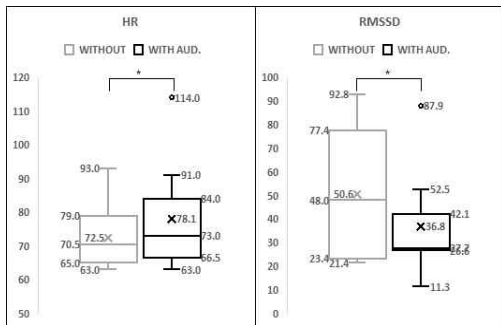


Fig. 5. The HR and RMSSD results under both conditions(with and without)

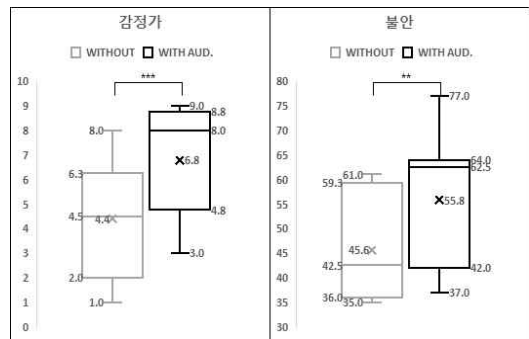


Fig. 7. The emotional valence and anxiety points results under both conditions

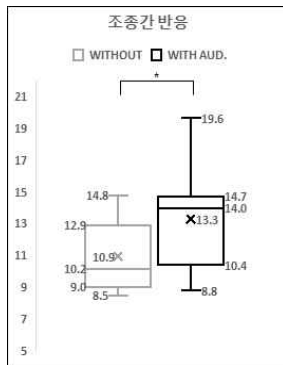


Fig. 8. The flight control responses under both conditions

( $M=10.90$ ,  $SD=2.27$ )보다 청각 자극이 있는 조건 ( $M=13.26$ ,  $SD=3.43$ )이  $2.36\text{Cm/s}^2$  만큼 컸으며, 통계적으로 유의하였다( $t=-2.51$ ,  $df=9$ ,  $p<.05$ ) (Fig. 8).

### III. 논 의

본 연구의 목적은 이륙하는 과정에서 야간의 예상하지 못한 저시정 상황을 조우하여 SSR이 유발되는 조건에서, 큰 소리의 청각 자극이 조종사의 SSR을 더 강화시키는지를 검증하는 것이다.

실험 결과 청각 자극이 없는 조건보다 청각 자극이 있는 조건에서 SSR로 나타나는 생리적 반응, 심리적 반응, 신체 반응이 더 컸다. 청각 자극이 없는 조건보다 청각 자극이 있는 조건에서 심박수가 더 많았고, RMSSD, MEAN RR, HF는 더 작았다. 불안 점수와 놀람 및 놀라움에 대한 감정기도 더 컸고, 조종간 반응의 크기도 더 컸다.

이와 같은 결과는 야간에 갑작스러운 저시정 조건을 조우하여 공포-강화와 어둠-강화가 일어나 조종사의 SSR이 유발될 상태에서, 큰 소리의 청각 자극이 조종사의 SSR을 더 강화시켰음을 의미한다. 이 결과는 이미 높은 스트레스와 각성 수준의 조종사에게 SSR이 유발된 상태에서, 추가된 큰 소리의 청각 자극이 조종사의 SSR을 더 강화시켰다고 해석할 수 있다. 각성은 깨어나거나 감각 기관의 자극이 뇌의 지각 지점까지 전달되어 반응을 보일 수 있는 생리적, 심리적 상태이며, 대뇌 피질의 활동을 증가시켜 주의력을 향상시키고, 내분비계는 심박수와 혈압을 증가시킨다(Pfaff, 2006).

헬리콥터의 제자리 비행은 비행 중요 단계(critical phase of flight) 중의 하나이다(European Union Aviation Safety Agency, 2018). 이 상황은 높은 시각적 주의력, 신속한 정보처리와 반응이 필요하여 조종사를 심리적으로 높은 각성 상태로 만든다. 만약, 환자 이송을 위한 실제 임무라면 심리적인 압박감으로 인하여 더 큰 각성 상태일 수 있다.

또, 현실의 헬리콥터는 생리적 각성을 유발하는 비교적 큰 진동과 다양한 주파수대역의 소음이 항상 존재한다. 발생하는 진동은 헬리콥터의 공진 등을 예방하고 로터 시스템의 안정성이 보장될 수준 정도로만 관리되며, 다양한 주파수 대역에서 발생하는 소음에 대해서는 귀마개, 귀뿔개 등을 착용하더라도 골도 등을 통해서 전파되므로 완벽한 차음이 어렵다. 따라서, 헬리콥터를 운용 중인 조종사들은 항상 생리적으로 각성되어 있을 수밖에 없으며, 특히, 조종사 상호 간의 대화와 관제기관과의 교신에 대한 음성을 소음으로부터 식별하기 위해 청각 신호에도 상당한 주의를 유지하고 있는 상태이다.

각성 또는 스트레스 수준이 낮거나 높은 극단적인 상황에서는 놀람 반사가 증가한다(Martin et al., 2011; Barnett et al. 2012). 특히, 000의 사고처럼 어둠-강화 효과가 나타나는 야간 상황에 환자 이송을 위하여 이륙하는 과정에서 조종사는 극단적인 각성 상태일 수 있으며, 이때의 예상하지 못한 저시정 조건의 조우는 공포-강화 효과를 유발하여 더 큰 SSR을 만들고, 여기에 추가된 큰 소리의 청각 자극은 더 극단적인 SSR을 유발할 수 있다.

극단적인 각성 상태에서의 예상하지 못한 저시정 조건의 조우와 큰 소리의 청각 자극은 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 실험에서도 대부분의 조종사는 청각 자극에 대하여 상당히 놀랐다고 직접 표현하였다. 또한, SSR로 인하여 아주 짧은 순간이라도 수행의 중단(May and Rice, 1971; Burki-Cohen, 2010)과 정보처리의 손상(Vlasak, 1969; Burki-Cohen, 2010)이 발생할 수 있다. 실험에서도 일부 조종사는 청각 자극에 대한 주의의 지향과 수행의 중단이 잠깐 있었고, 중단된 이후에 다시 제자리를 유지하려고 하였을 때에는 다른 위치에 있었다고 설명하였다.

만약 이러한 상황이 항공역학적 현상이 많이 발생하는 복잡한 비행 과정이고, 짧은 순간에 의사결정을 해야 하는 중요한 이륙 과정이었다면 판단을 내리는 고

차원적인 의사결정 기능이 크게 손상되어 정확하게 대처하기 어려울 수 있다(Rivera et al., 2014). 특히, 강한 자극은 복잡한 작업의 수행과 인지 처리에 오랫동안 영향을 줄 수 있으므로(Sternbach, 1960; Vlasak, 1969), 이어지는 증속과 상승 단계에도 악영향을 미칠 수 있다.

Lee et al.(2021)의 실험에서는 조종사를 2개의 자격 등급으로 구분하고 비행 상황을 3가지로 나누어서 실험하였다. 청각 자극이 포함된 예상하지 못한 엔진 고장 상황에서 80~85dB인 천둥번개 소리로 30초간 자극하여 놀람 및 놀라움의 반응으로 심박수와 호흡수를 측정하였다. 실험 결과 모든 조건에서 사업용 조종사와 자가용 조종사 사이에서 유의미한 차이가 있었다. 이 의미는 비교적 하위 기량을 가진 자가용 조종사에게 미치는 영향이 더 컸다는 것을 의미하며, 주로 부기장 역할을 하는 비교적 하위 기량의 조종사에게 더 큰 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

환자 이송 등의 긴급 운항을 하는 경우에는 기장과 부기장으로 구분하며 조종 업무와 조종 이외의 업무로 주로 나누어 수행한다. Muhlberger, Wieser & Pauli (2008)는 운전을 묘사한 실험에서 운전을 수행하는 능동 조건, 조수석에 탑승하여 운전을 수행하지 않는 수동 조건에서 밝음, 어둠에 따른 조명 조건으로 나누어 실험하였다. 자유도 6의 움직임 기능이 있는(motion based) 장비로 가상의 터널 속에서 운전하게 하면서 0.04초 103db의 짧은 청각 신호로 자극하였고, 놀람 반응에 대하여 EMG 센서로 눈 깜박임을 측정하였다.

측정 결과 운전 여부에 따른 조건과 조명에 따른 조건은 유의미한 차이가 없었다. 그러나, 조명 조건과 운전 조건의 상호작용이 있었고, 어둠 조건에서 조수석에 앉은 수동 조건의 놀람 반응이 능동 조건보다 더 컸다. 이는 어두운 환경에서는 운전을 하는 조건보다 하지 않는 조건에서 더 큰 놀람 반응을 일으킨다는 의미이다.

이러한 결과들은 비행하는 과정에서 큰 소리의 청각 자극이 조종간을 잡고 있는 기장의 의사결정과 수행 등에도 부정적인 영향을 줄 뿐만 아니라, 부기장에게도 영향을 끼쳐 계기 모니터링과 경계 등에 대한 능력도 저하시킬 수 있음을 시사한다.

본 실험에서는 Berg(1974)가 제시한 청각 자극의 크기인 85dB(A)보다 더 작은 70~75dB의 자극으로도 참가자들의 SSR이 유발되었다. 이는 참가자들이 이미 각성된 상태였기 때문에, 더 낮은 자극에도 놀람 반응

이 쉽게 유발되었음을 의미한다. 또한, 더 큰 크기의 청각 자극은 더 큰 신체 반응을 유발하므로(Foss et al., 1989), 조종간의 과도한 움직임으로 이어져 비행에 악영향을 줄 수 있다.

헬리콥터의 운용에서 CRM은 안전 운항을 위한 필수적인 요소이다. 그러나, 000 사고에서는 원활한 기내 CRM이 이루어지지 않았다. 큰 소리의 청각 자극뿐만 아니라 “지시적인 말투”도 있었다. 이러한 부정적인 어조는 메시지 전달력과 메시지 수용 의도에 부정적인 영향을 미치므로(Choi, 2023), CRM이 이루어지는데 방해가 될 수 있다. 기내에서 CRM이 원활하게 이루어질 수 없었던 원인과 대책에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다.

## 후 기

본 논문은 저자 김문성의 박사학위 논문의 내용 중 일부분을 발전 적용하였고, 2025년도 광주대학교 교내 연구비(이형철) 지원을 받아 연구되었습니다.

## References

1. Barnett, J., Wong, W., Westley, D., Adderley, R., and Smith, M., "Startle reaction: Capturing experiential cues to provide guidelines towards the design of realistic training scenarios," Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, 2012, pp. 2477-2481.
2. Burki-Cohen, J., "Technical challenges of upset recovery training: Simulating the element of surprise," Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 2010, pp. 8008.
3. Carlsen, A. N., Chua, R., Inglis, J. T., Sanderson, D. J., and Franks, I. M., "Motor preparation in an anticipation-timing task," Experimental Brain Research, 190(4), 2008, pp. 453-461.
4. Castaldo, R., Melillo, P., Bracale, U., Caserta, M., Triassi, M., and Pecchia, L., "Acute mental stress assessment via short term HRV

- analysis in healthy adults: A systematic review with meta-analysis," *Biomedical Signal Processing and Control*, 18, 2015, pp. 370-377.
5. Castaldo, R., Montesinos, L., Melillo, P., James, C., and Pecchia, L., "Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: A case study on mental stress detection in real life," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 19, 2019, pp. 1-13.
  6. Choi, J., "The effect of tone on message communicability and relationship framing," *Journal of Speech, Media & Communication Research*, 22(4), 2023, pp. 207-236.
  7. Davis, M., Gendelman, D. S., Tischler, M. D., and Gendelman, P. M., "A primary acoustic startle circuit: Lesion and stimulation studies," *The Journal of Neuroscience*, 2(6), 1982, pp. 791-805.
  8. Diarra, M., Marchitto, M., Bressolle, M. C., Baccino, T., and Draï-Zerbib, V., "A narrative review of the interconnection between pilot acute stress, startle, and surprise effects in the aviation context: Contribution of physiological measurements," *Frontiers in Neuroergonomics*, 4, 2023, Article 1059476.
  9. Ekman, P., Friesen, W. V., and Simons, R. C., "Is the startle reaction an emotion?," *Journal of Personality and Social Psychology*, 49(5), 1985, pp. 1416-1426.
  10. European Union Aviation Safety Agency, "What are critical phases of flight?," EASA, 2018. Available from: <https://www.easa.europa.eu/en/faq/19133>
  11. Federal Aviation Administration, "Stall prevention and recovery training," FAA-AC:120-109A, U.S. Department of Transportation, Washington, 2015, p. 3.
  12. Federal Aviation Administration, *Helicopter Flying Handbook*, FAA-H-8083-21B, U.S. Department of Transportation, Washington, 2019.
  13. Blumenthal, T. D., Cuthbert, B. N., Filion, D. L., Hackley, S., Lipp, O. V., and Van Boxtel, A., "Committee report: Guidelines for human startle eyeblink electromyographic studies," *Psychophysiology*, 42(1), 2005, pp. 1-15.
  14. Berg, K. M., *Elicitation of acoustic startle in the human*, Doctoral dissertation, ProQuest Information & Learning, 1974.
  15. Foss, J. A., Ison, J. R., Torre Jr, J. P., and Wansack, S., "The acoustic startle response and disruption of aiming: I. Effect of stimulus repetition, intensity, and intensity changes," *Human Factors*, 31(3), 1989, pp. 307-318.
  16. NTi Audio, "Frequency-weightings for sound level measurements," NTi Audio, n.d. Available from: <https://www.nti-audio.com/ko/자-원/측정-노-하-우/frequency-weightings-for-sound-level-measurements-ko-kr>
  17. Kim, J. T., "The relationship between trait-anxiety and sociality: Focusing on Spielberger's STAI," M.S. Thesis, Korea University, Seoul, 1978.
  18. Kim, M., Kim, S., and Li, H. O., "Effect of weather, flight, and time conditions on anxiety and time perception of helicopter pilots in flight," *Korean Journal of the Science of Emotion & Sensibility*, 26(1), 2023, pp. 65-78.
  19. Kim, M. S., Lee, S. Y., Kim, S. W., and Li, H. C. O., "The impact of unexpected and sudden changes in visibility on helicopter pilot taking off: Startle and surprise," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 33(2), 2025, pp. 61-77.
  20. Kline, T. J., *Psychological Testing: A Practical Approach to Design and Evaluation*, Sage Publications, 2005.
  21. Korea Aviation and Railway Accident Investigation Board, "ARAIB/AAR-1903: Dokdo National 119 Rescue Headquarters maritime crash report," 2023.

22. Lee, S., Lee, K., and Park, W., "A study on the helicopter pilot's psychological and physiological influences by 'surprise and startle effect': Comparison by pilot certificate (private and commercial)," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 29(4), 2021, pp. 28-36.
23. Martin, W. L., Murray, P. S., and Bates, P. R., "What would you do if...? Improving pilot performance during unexpected events through in-flight scenario discussions," *Aeronautica*, 1(1), 2011, pp. 8-22.
24. Martin, W. L., Murray, P. S., Bates, P. R., and Lee, P. S., "A flight simulator study of the impairment effects of startle on pilots during unexpected critical events," *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 2016.
25. May, D. N., and Rice, C. G., "Effects of startle due to pistol shots on control precision performance," *Journal of Sound and Vibration*, 15(2), 1971, pp. 197-202.
26. Mühlberger, A., Wieser, M. J., and Pauli, P., "Darkness-enhanced startle responses in ecologically valid environments: A virtual tunnel driving experiment," *Biological Psychology*, 77(1), 2008, pp. 47-52.
27. Pfaff, D. W., *Brain Arousal and Information Theory: Neural and Genetic Mechanisms*, Harvard University Press, 2006.
28. Ramirez-Moreno, D. F., and Sejnowski, T. J., "A computational model for the modulation of the prepulse inhibition of the acoustic startle reflex," *Biological Cybernetics*, 106(3), 2012, pp. 169-176.
29. Rivera, J., Talone, A. B., Boesser, C. T., Jentsch, F., and Yeh, M., "Startle and surprise on the flight deck: Similarities, differences, and prevalence," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58, 2014, pp. 1047-1051.
30. Seamster, T. L., and Redding, R. E., *Applied Cognitive Task Analysis in Aviation*, Routledge, 2017.
31. Spielberger, C. D., *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory (Self-Evaluation Questionnaire)*, 1970.
32. Sternbach, R. A., "Correlates of differences in time to recover from startle," *Psychosomatic Medicine*, 22(2), 1960, pp. 143-148.
33. Vlasak, M., "Effect of startle stimuli on performance," *Aerospace Medicine*, 40(2), 1969, pp. 124-128.