

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.2.118>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

Eye-Tracking 기반 비행훈련 교육피드백 모델(EFM) 설계 연구

이석종*, 장영현**

A Study of Designing an Eye Tracking-Based Educational Feedback Model(EFM) for Flight Training

Seokjong Lee*, Yeonghyeon Jang**

ABSTRACT

Flight training requires student pilots to develop not only aircraft control skills but also situational awareness and decision-making abilities. However, conventional flight training has largely depended on instructors' subjective observations, limiting systematic interpretation of student pilots' visual attention characteristics. To address this limitation, this study proposes an Eye-Tracking-based Educational Feedback Model(EFM) for flight training environments. The proposed EFM integrates Eye-Tracking data analysis with instructor debriefing and recurrent training processes. The framework consists of data collection, preprocessing, analysis, and feedback stages, and incorporates AOI-based attention analysis and transition pattern analysis to interpret student pilots' visual exploration characteristics. In addition, visualization-based feedback structures are included to support educational feedback. The proposed framework presents the applicability of Eye-Tracking-based feedback in flight training and provides a conceptual foundation for future data-informed flight training feedback research.

Key Words : Flight Training(비행훈련), Eye Tracking(시선추적), Educational Feedback(교육 피드백), AOI Analysis(관심영역 분석), Transition Pattern(전이패턴)

1. 서 론

비행훈련은 학생조종사에게 단순한 조종기술 습득을 넘어, 상황인식(situational awareness)과 의사결정(decision making) 능력을 통합적으로 함양하는 핵심 교육과정이다. 그러나 전통적인 비행교육훈련은 교관의 경험적 판단에 크게 의존하는 경향이 있으며, 학생

조종사의 인지적 행동과 시각적 주의 특성을 정량적으로 평가하는 데에는 한계가 있다(Kwon and Lee, 2025). 이에 따라 피드백의 객관성과 일관성을 확보하기 어렵고, 오류 유형을 구조적으로 분석하는 데 제약이 발생해 왔다.

최근 시선추적(eye tracking) 기술은 학습자의 시각적 주의 분포와 정보처리 특성을 분석할 수 있는 방법으로 활용되고 있다(Holmqvist et al., 2011; Di Nocera et al., 2007). 시선 데이터는 인간의 인지 처리 과정이 시각적 주의 이동과 밀접하게 연관된다는 eye-mind hypothesis(Just and Carpenter, 1980)에 기반하며, 학습자가 '어디를 보고 있는가'는 '어떤 정보를 처리하고 있는가'를 간접적으로 반영한다. 따라

Received: 2. May. 2026, Revised: 1. Jun. 2026,
Accepted: 23. Jun. 2026

* 한국항공대학교 항공운항학과 교수

** 해군전력분석시험평가단 감행인증실 전문군무경력관(전 해군 P-3 조종사)

연락처 E-mail : pilotjang@navy.mil.kr

연락처 주소 : 충청남도 계룡시 계룡대로 663

서 시선 기반 분석은 집중도, 절차 수행 특성, 인지 부하 변화 등을 정량적으로 해석할 수 있는 가능성을 제공한다(Sweller, 1988; van Gerven et al., 2002).

이러한 이론적 배경을 바탕으로 본 연구는 시선 데이터 기반 교육피드백 체계를 EFM(eye tracking - based educational feedback model)으로 정의하고, 이를 비행훈련 평가와 반복훈련 설계 개선을 지원하기 위한 개념적 프레임워크로 제안한다. EFM은 학생조종사의 시각적 행동 데이터를 교육적 피드백 과정과 연계하기 위한 프레임워크로서, 시선 데이터 기반 반복훈련 설계 가능성을 제시한다.

본 연구의 목적은 시선추적 기반 교육피드백 구조의 설계 가능성을 제시함으로써, 데이터 기반 비행훈련 평가 체계의 적용 가능성을 논의하는데 있다. 특히 시선 데이터 분석 결과를 교육 피드백과 반복훈련 설계 과정에 연결하는 순환형 운영 구조를 제안하였다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다.

II. 이론적 고찰

최근 조종사 교육훈련은 절차 숙달 중심 접근에서 역량기반 훈련 및 평가(CBTA; competency-based training and assessment) 체계로 전환되고 있으며, ICAO와 EASA는 수행 데이터와 행동지표에 기반한 객관적 평가 및 피드백 체계 구축을 강조하고 있다(ICA0, 2020; EASA, 2025). 이는 교육훈련 결과를 정성적 판단이 아닌 수행 기반 데이터 중심으로 해석하려는 패러다임 변화를 반영한다.

시선추적 기술은 학습자의 주의집중과 정보처리 특성을 분석할 수 있는 방법으로 활용되고 있으며, 이러한 분석의 이론적 기반인 Eye-Mind Hypothesis에 따르면 인간의 시선 위치는 인지적 초점을 반영하는 지표로 해석된다(Just and Carpenter, 1980). 이에 따라 시선고정(fixation)과 이동(saccade) 패턴은 인지 부하 변화와 탐색 전략을 분석하기 위해 주요 지표로 활용되어 왔다(Salvucci and Goldberg, 2000; Holmqvist et al., 2011).

항공 및 관제 분야의 선행연구들은 시선데이터를 활용하여 조종사의 시각적 탐색 패턴, 인지적 작업부하, 정보처리 특성을 분석할 수 있음을 제시하였다(van Gerven et al., 2002; Di Nocera et al., 2007). 국내 연구에서는 은닉마르코프모델(HMM) 기반 전이분

석을 활용하여 조종사의 시선 이동 패턴을 분석한 연구가 수행된 바 있다(Lee and Cho, 2025). 또한 학생 조종사의 상황인식 역량과 비행수행 특성 간의 관계를 분석한 연구도 제시되었다(Kwon and Lee, 2025).

그러나 기존 연구들은 시선 데이터의 개별 인지지표 분석이나 실험적 검증에 주로 집중되어 있어, 시선 데이터 분석 결과를 교육 피드백 및 반복훈련 설계 과정과 연계하는 운영 구조에 대한 논의는 제한적이었다. 이에 본 연구는 시선 데이터 기반 분석 결과를 교육훈련 피드백 체계와 연결하기 위한 개념적 프레임워크를 제안한다.

III. EFM 설계 구조

본 연구는 비행훈련 과정에서 학생조종사의 시각적 행동 데이터를 교육훈련 피드백 체계와 연계하기 위한 EFM(eye tracking - based educational feedback model)을 제안하였다. EFM은 시선 데이터 기반 분석 결과를 교육훈련 과정에 반영하기 위한 피드백 프레임워크이다.

본 연구는 개념적 프레임워크 설계 연구로서, EFM의 구조와 교육적 활용 가능성을 이론적으로 제시하는데 초점을 둔다. Fig. 1은 본 연구의 전체 설계 절차를 단계별로 제시한 것이다. 연구는 문헌 검토(literature review), 모델 설계(model design), 적용구조 제시(application), 그리고 교육적 시사점 도출(discussion & implications)의 네 단계로 구성된다. 각 단계는 이론적 근거를 바탕으로 EFM을 설계하고, 비행훈련 적용 가능성을 단계적으로 검토하기 위한 과정이다.

① Step 1 - Literature Review

- 선행연구와 이론적 배경을 검토하여, 비행훈련의

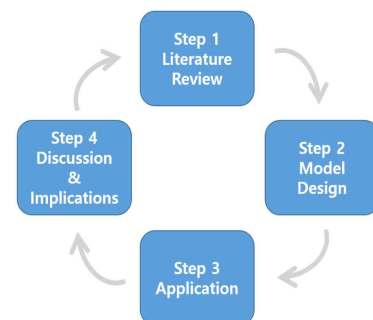


Fig. 1. Research flow overview

인지적 특성과 시선 데이터의 교육적 활용 가능성을 검토한다(ICA0, 2020; EASA, 2025).

② Step 2 - Model Design

- 분석된 이론을 기반으로, 학생조종사의 시각적 행동 특성과 분석 결과를 교육 피드백 구조와 연계하기 위한 EFM 구성요소를 설계한다(Holmqvist et al., 2011).

③ Step 3 - Application

- 설계된 EFM의 비행훈련 적용 가능성을 검토하기 위해, 단계별 적용 구조를 개념적으로 제시한다.

④ Step 4 - Discussion & Implications

- 제안된 프레임워크의 교육적 활용 가능성과 시사점을 논의하고, 향후 실증 연구 방향을 제안한다.

3.1 모델 구조 개요

EFM은 비행훈련 과정에서 수집된 시선 데이터를 교육적 피드백 과정과 연계하기 위한 교육 피드백 프레임워크이다. 본 프레임워크는 시선정보의 수집(data collection) - 전처리(preprocessing) - 분석(analysis) - 피드백(feedback) 과정을 기반으로 학생조종사의 시각적 행동 특성을 분석하고, 이를 교관 피드백과 반복훈련에 반영할 수 있도록 설계되었다.

각 단계는 시선 데이터의 수집부터 교육적 활용까지의 흐름을 체계적으로 연결한다. 이러한 단계적 구성은 시선 데이터 기반 수행진단 결과를 교육훈련 피드백 과정과 연계하기 위한 EFM의 운영 흐름을 반영한다.

Fig. 2는 EFM의 기본 구조를 나타낸다. EFM은 데이터 수집, 전처리, 분석, 피드백의 단계적 구조로 구성되며, 각 단계는 시선 데이터 기반 교육 피드백 과정을 설명하기 위한 요소로 구성된다.

① Data Collection

- Eye Tracker를 활용하여 학생조종사의 시선좌표, AOI(area of interest) 기반 데이터를 수집한다(Holmqvist et al., 2011). 이 단계는 학생조종사의 시각적 주의 특성을 시선데이터 형태로 수집하는 초기 과정에 해당한다.

② Preprocessing

- 수집된 데이터에 대해 노이즈 제거, 보정(calibration), AOI 매핑 과정을 수행하여 분석에 활용 가능한 형태로 정제한다(Holmqvist et al., 2011). 이 과정은 측정 오차를 감소시키고 시선 데이터 분석의 안정성을 높이기 위한 전처리 단

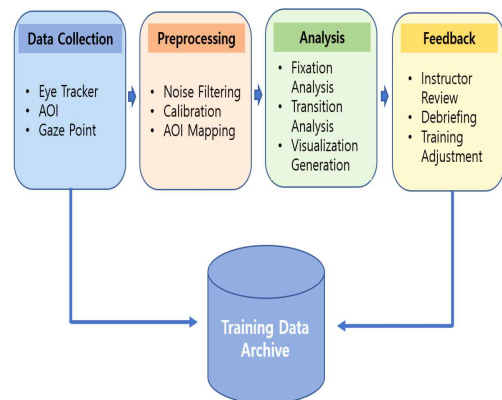


Fig. 2. Conceptual structure of the eye tracking-based educational feedback model (EFM)

계로 활용된다.

③ Analysis

- 전처리된 시선 데이터를 기반으로 AOI 집중 특성, 시선 고정(fixation), 전이 패턴 등을 분석하여 학생조종사의 시각적 탐색 특성을 해석한다(Salvucci and Goldberg, 2000; Holmqvist et al., 2011). 이 단계는 학생조종사의 시각적 탐색 특성을 분석하기 위한 과정으로서, 공간적 주의집중과 시간적 전이 특성을 함께 해석하는 구조로 구성된다.

④ Feedback

- 분석 결과는 시각화 자료와 교관 검토 과정을 통해 교육 피드백 자료로 제시되며, 반복훈련 설계 과정에 참고자료로 활용될 수 있다(EASA, 2025). 이 단계는 시선 데이터 기반 분석 결과를 교관 피드백과 반복훈련에 반영하기 위한 과정이다.

각 단계에서 생성된 시선 데이터는 학습 이력 형태로 축적될 수 있으며, 학생조종사의 수행 변화 특성을 분석하기 위한 참고자료로 활용될 수 있다. 이러한 구조는 시선 데이터 기반 피드백 결과를 반복훈련 과정과 연계할 수 있는 방향을 제시한다.

3.2 주의집중 기반 수행진단 모듈(AOI 분석)

EFM에서 AOI(area of interest) 분석은 학생조종사의 시선이 주요 항공계기 또는 외부 시야에 어떻게 분포되는지를 분석하기 위한 핵심 과정으로 구성된다. AOI는 비행 수행 중 조종사가 정보를 획득하는 주요 시각 영역을 의미하며, 시선추적 연구에서 주의집중 특



Fig. 3. AOI-based attention analysis procedure in EFM

성을 분석하기 위한 단위로 활용된다.

본 연구에서는 자세계, 속도계, 고도계, 방향지시계 등을 대표 AOI 예시로 제시하였으며, 학생조종사의 절차 수행 과정에서 필수 정보 확인 여부를 분석할 수 있는 영역으로 활용 가능성을 검토하였다. 이를 통해 특정 계기에 시선이 집중되거나 필수 계기 확인 빈도가 낮게 나타나는 시각적 탐색 패턴을 분석할 수 있다(Holmqvist et al., 2011).

AOI 분석에서는 fixation ratio(시선집중비율)와 dwell time(응시시간) 등의 지표를 활용하여 시각적 주의 분포 특성을 해석한다(Holmqvist et al., 2011). 또한 fixation과 saccade 기반 분석은 조종사의 시각적 탐색 전략과 정보처리 특성을 해석하기 위한 기초 지표로 활용될 수 있다(Salvucci and Goldberg, 2000). 이러한 지표들은 학생조종사의 시각적 탐색 특성을 비교·분석하기 위한 참고자료로 활용될 수 있다.

Fig. 3은 AOI 기반 시각적 주의 분석 절차를 도식화한 것이다. 데이터 정제 이후 AOI 단위의 시선집중 특성을 분석하고, 그 결과를 시각화 자료 형태로 제시하여 교관이 학생조종사의 시각적 탐색 경향을 참고할 수 있도록 구성하였다.

3.3 절차 수행전략 평가 모듈(전이패턴 분석)

전이패턴(transition pattern) 분석은 학생조종사의 시각적 주의가 시간의 흐름에 따라 어떠한 순서로 이동하는지를 분석하기 위한 과정이다. 이는 AOI 분석에서 나타나는 공간적 시선집중 특성을 시간적 연속성의 관점에서 해석함으로써, 학생조종사의 절차적 탐색 흐름을 분석하기 위한 구조로 활용된다(Di Nocera et al., 2007; Holmqvist et al., 2011).

전이패턴 분석은 AOI 간 시선 이동 경로를 전이행렬(transition matrix) 형태로 구성하고, 각 이동 경로의 빈도와 방향성을 산출하는 절차로 이루어진다. 이러한 시선 이벤트의 식별은 fixation과 saccade의 구분

을 기반으로 수행되며(Salvucci and Goldberg, 2000), 이를 통해 학생조종사의 시선 이동 흐름과 계기 탐색 순서를 분석할 수 있으며, 특정 계기 간 반복적 이동이나 scan flow 특성을 시각적으로 확인할 수 있다(Holmqvist et al., 2011).

Fig. 4는 전이패턴 분석의 개념적 흐름을 도식화한 것이다. 원시 시선 데이터는 AOI 분류 과정을 거친 뒤, AOI 간 이동 경로를 기반으로 전이행렬이 구성된다. 이후 AOI 간 이동 빈도를 산출하고, 결과는 flow diagram 또는 matrix 형태로 시각화된다. 이러한 시각화 자료는 교관이 학생조종사의 정보탐색 순서와 시각적 탐색 경향을 참고하기 위한 자료로 활용될 수 있다(EASA, 2025).

전이 기반 접근은 조종사 scan pattern 연구에서 인지적 작업부하 및 시각적 탐색 특성과의 관계를 해석하는 방법으로 활용되어 왔으며(van Gerven et al., 2002; Di Nocera et al., 2007), 국내 연구에서도 HMM(Hidden Markov model)을 활용한 전이분석 사례가 보고된 바 있다(Lee and Cho, 2025). 이러한 연구 흐름을 바탕으로, 본 연구는 전이패턴 기반 구조를 비행훈련 피드백 과정에 활용하기 위한 교육적 분석 틀로 제안하였다.

3.4 시각화 피드백 구조

EFM의 최종 단계는 분석 결과를 시각화하여 학생조종사와 교관이 시각적 탐색 특성을 이해할 수 있도록

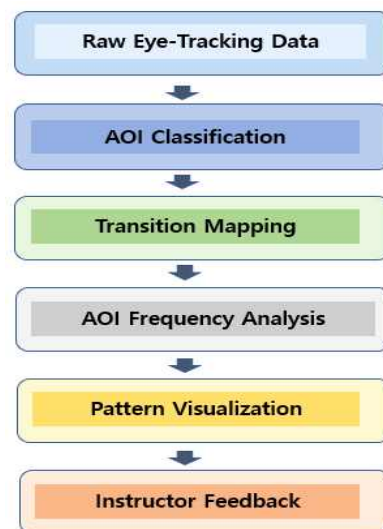


Fig. 4. Conceptual flow of transition analysis

제시하는 피드백 단계이다. 본 단계는 시선 데이터 기반 분석 결과를 교육적 디브리핑 과정과 연계하기 위한 피드백 절차를 제시한다(EASA, 2025). 시각화 피드백은 다음과 같은 세 가지 형태로 구성된다.

첫째, heatmap visualization은 시선 분포를 색상 강도로 표현하여 학생조종사의 주의 집중 영역을 직관적으로 제시한다(Holmqvist et al., 2011).

둘째, AOI focus ratio graph는 AOI별 주시시간 비율을 비교하여 주의 분포 특성을 확인할 수 있도록 한다(Di Nocera et al., 2007; Holmqvist et al., 2011).

셋째, transition-based visualization은 AOI 간 이동 흐름을 도식화하여 정보 탐색 순서와 시선 이동 흐름을 시각적으로 확인할 수 있다. 이러한 시각화 결과는 피드백과 반복훈련 과정 간의 연계를 지원하는 자료로 활용될 수 있으며, 교육적 디브리핑 자료로 활용 가능하다.

Fig. 5는 EFM에서 생성되는 시각화 기반 피드백의 개념적 예시를 제시한다. AOI 설정, 시선 분포 시각화, 그리고 순환형 피드백 구조가 통합되어, 분석 결과가 교육 피드백 과정과 연계되는 흐름을 나타낸다.

3.5 통합 프레임워크

EFM의 통합 프레임워크는 시선데이터 기반 분석 결

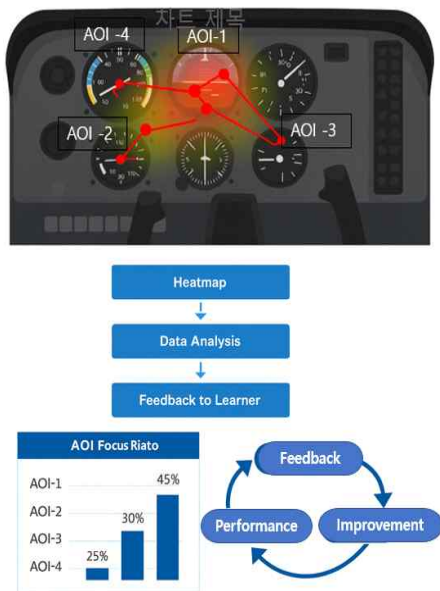


Fig. 5. Visualization-based feedback example in EFM

과를 다음 훈련 설계 과정과 연계하기 위한 순환형 교육 피드백 구조이다. 이는 비행훈련 과정에서 반복훈련과 피드백 간의 연계 흐름을 설명하기 위한 교육적 프레임워크에 해당한다.

본 연구에서 제시한 통합 구조는 requirement analysis → training objective setting → training scenario development → eye tracker utilization design → evaluation and feedback의 다섯 단계로 구성된다. 각 단계는 상호 연계된 구조로 구성되며, 평가 결과는 feedback loop를 통해 훈련 목표 및 시나리오 설계 과정과 연결된다.

Fig. 6은 요구분석에서 평가·피드백에 이르는 전 과정을 순환 구조로 제시한다. 특히 평가 결과는 다음 훈련 설계 단계로 피드백되어, 데이터 기반 피드백 결과를 반복훈련 설계 과정과 연계하는 개념적 구조를 나타낸다. 이를 통해 수행 결과와 피드백, 시나리오 개선 과정 간의 연계 흐름을 설명한다.

예를 들어, 접근(approach) 단계에서 학생조종사의 시선 데이터를 분석한 결과, 자세제어에 대한 과도한 fixation과 속도계 및 활공경로에 대한 주시 부족이 확인될 수 있다. 이러한 분석 결과는 heatmap 및 AOI focus ratio 형태로 시각화되어 교관 디브리핑 과정에서 활용되며, 학생조종사의 주의 편중 및 정보 탐색 특성과 시선 분포 경향을 시각적으로 제시할 수 있다.

이후 반복훈련 단계에서는 해당 결과를 반영하여 속도 유지 및 경로 관리에 대한 시각적 스캔 패턴 개선을 목표로 훈련 시나리오가 재설계되며, 이러한 과정은 EFM의 feedback loop 구조를 통해 지속적으로 피드

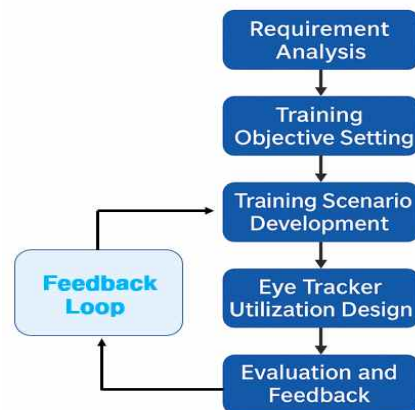


Fig. 6. Integrated EFM framework with feedback loop

백된다. 이를 통해 EFM은 수행진단 결과를 단순 분석에 그치지 않고, 교육훈련 피드백 과정과 반복훈련 설계 간의 연계 가능성을 제시하는 개념적 프레임워크로 활용될 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 학생조종사의 비행훈련 과정에서 수집되는 시선 데이터를 교육훈련 피드백 구조와 연계하기 위한 EFM(eye tracking - based educational feedback model)을 제안하였다. 제안된 EFM은 시선 데이터를 공간적 주의집중 분석(AOI)과 시간적 전이패턴 분석으로 구조화하고, 이를 시각화 기반 피드백 및 반복훈련 설계 과정과 연계할 수 있는 비행훈련 프레임워크를 제시하였다.

특히 본 연구는 시선 추적 기술을 단순 인지지표 분석 수준을 넘어 교육훈련 피드백 과정과 연계하였다는 점에서 의미를 가진다. 또한 시선 데이터 분석 결과를 교관 디브리핑과 반복훈련 설계 과정에 반영함으로써, 학생조종사의 시각적 탐색 및 주의 집중 특성을 보다 객관적으로 분석할 수 있는 가능성을 제시하였다. 이는 향후 EBT 및 CBTA 기반 비행훈련 환경에서 데이터 기반 피드백 체계 구축에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만 본 연구는 개념적 설계 연구로서 실증적 효과 검증을 포함하지 않으며, 실제 훈련 환경에서의 적용 결과를 제시하지 못한 한계를 가진다. 따라서 향후 연구에서는 모의비행훈련장치 환경에서의 적용 실험과 정량적 성과 분석을 통해 학습효과 및 수행 향상과의 관계를 검증할 필요가 있다. 또한 AI 기반 데이터 분석 기법과의 연계 가능성을 검토함으로써, 대규모 시선 데이터 분석 과정에서 보조적 교육지원 도구로 활용할 수 있는 확장 가능성을 제시한다.

References

1. Kwon, M. J., and Lee, J. R., "A study on the eye movement according to the student pilot's manual operation skills and situation awareness competency", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 32(4), 2024, pp.123-131.
2. Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., and van de Weijer, J., "Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures", Oxford University Press, Oxford, UK, 2011.
3. Di Nocera, F., Camilli, M., and Terenzi, M., "A random glance at the flight deck: Pilots' scan patterns and the real-time assessment of mental workload", *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(3), 2007, pp.271-285.
4. Just, M. A., and Carpenter, P. A., "A theory of reading: From eye fixations to comprehension", *Psychological Review*, 87(4), 1980, pp.329-354.
5. Sweller, J., "Cognitive load during problem solving: effects on learning", *Cognitive Science*, 12(2), 1988, pp.257-285.
6. van Gerven, P. W. M., Paas, F., van Merriënboer, J. J. G., and Schmidt, H. G., "Cognitive load theory and aging: effects of worked examples on training efficiency", *Learning and Instruction*, 12(1), 2002, pp.87-105.
7. International Civil Aviation Organization (ICAO), "Manual on Competency-Based Training and Assessment (Doc 9868)", ICAO, Montreal, Canada, 2020.
8. European Union Aviation Safety Agency (EASA), "EBT Manual", Version 2.3, TE.RPRO.00058-008, European Union Aviation Safety Agency, Cologne, Germany, 2025.
9. Salvucci, D. D., and Goldberg, J. H., "Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols", *Proceedings of the Eye Tracking Research & Applications Symposium*, 2000, pp.71-78.
10. Lee, D. H., and Cho, Y. J., "Analysis of pilot eye tracking data using Hidden Markov model", *Journal of Advanced Navigation Technology*, 29(1), 2025, pp.37-44.