JESK J Ergon Soc Korea 2025; 44(6): 867-879
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2025.44.6.867
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Cognitive Abilities and Flight Performance in Helicopter Pilots across levels of Expertise

Gwang Min Bae, Rohae Myung

Korea University, Department of Industrial Management Engineering, Seoul, 02841

회전익 조종사의 숙련도에 따른 인지 능력과 비행 퍼포먼스의 관계

배광민, 명노해

고려대학교 산업경영공학과

Corresponding Author
Rohae Myung
Korea University, Department of Industrial Management Engineering, Seoul, 02841
Email : rmyung.korea.ac.kr

Received : October 15, 2025
Revised : November 19, 2025
Accepted : November 29, 2025

Objective: This study examines how cognitive abilities influence actual flight performance in military helicopter pilots of different expertise levels, based on Ackerman's theory of skill acquisition.

Background: Ackerman's model states that the predictive role of cognitive abilities shifts across stages: general intelligence (g) in the cognitive stage, perceptual speed (PS) in the associative stage, and psychomotor ability (PM) in the autonomous stage. Few studies have tested this in complex domains such as helicopter piloting.

Method: Twenty military helicopter pilots were divided into Co-pilot (N = 10) and Aircraft Commander (N = 10) groups. General intelligence was measured using a matrix reasoning task (similar to Raven's Matrices), perceptual speed with the Symbol Search, and psychomotor ability with the 4-Choice Reaction Time. Flight Performance was evaluated in real flight tasks by instructor pilots, and multiple regression analyses were applied to each group.

Results: In the CP group, g was the strongest predictor (t = 4.53, p < .01). In the AC group, both g (t = 2.47, p < .05) and PM (t = -3.95, p < .01) significantly predicted flight performance.

Conclusion: CP performance relies on general intelligence for procedural integration, while AC performance combines automated skills with strategic cognitive control. The helicopter's inherent instability demands active control over scanning, minimizing the role of perceptual speed.

Application: These findings inform pilot training and professional development by highlighting different cognitive demands across expertise levels.

Keywords: Skill acquisition, Cognitive abilities, Flight performance, Helicopter pilot, Expertise

Copyright@2025 by The Human Factors & Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

1. Introduction

항공 임무, 특히 군사 작전 환경에서의 회전익 항공기 운용은 고도의 인지적·정신운동적 능력을 요구하는 복잡하고 역동적인 과업이다. 조종사는 다중 정보를 동시에 처리하고, 급변하는 상황에 신속히 적응하며, 정교한 조작을 수행해야 한다(Wickens and Long, 1995). 이처럼 높은 수준의 능력이 요구되는 고위험 환경에서 조종사의 작은 실수는 치명적인 결과로 이어질 수 있으므로, 비행 수행능력(Flight Performance)을 정확하게 예측하고 조종사의 전문성 개발 과정을 이해하는 일은 항공 안전과 임무 성공의 핵심 요소다(Hunter and Burke, 1994). 이에 따라 지난 수십 년간 조종사 선발 및 훈련 분야에서는 우수한 조종사를 식별하고 양성하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

초기 연구들은 주로 일반지능(general intelligence, g), 공간지각능력, 정신운동능력(psychomotor ability, PM) 등 개별 능력 요인이 비행 훈련 성과에 미치는 영향을 규명하는 데 초점을 두었다. 다수의 메타분석은 이러한 능력들이, 특히 훈련 초기 단계에서 비행 수행능력의 유의한 예측 변인임을 입증했다(Martinussen, 1996).

그러나 기존 연구들은 대부분 고정익 항공기 훈련생이나 일반 학습 환경을 기반으로 수행되었으며, 훈련 과정의 통과/탈락 여부와 같은 이분형 기준을 사용한 초기 훈련 성과 예측에 초점을 두었다는 점에서 중요한 한계가 있다(Hunter and Burke, 1994; Martinussen, 1996; Paullin et al., 2006). 이러한 접근만으로는 복잡하고 불안정한 회전익 조종 환경에서 조종사가 경험을 축적해 가는 과정에서 능력이 어떻게 발달하는지를 충분히 설명하기 어렵다. 기존 메타분석과 리뷰를 종합해 보면, 숙련도가 높아지는 과정에서 능력의 상대적 중요성이 어떻게 재구조화되는지를 직접적으로 검증한 실증 연구는 매우 제한적인 것으로 나타난다(Carretta and Ree, 1997; Ackerman, 1992; Wingestad, 2005). 이러한 점에서 '숙련도 증가에 따라 어떤 능력이 비행 수행을 결정하는가'라는 핵심 질문은 여전히 충분히 탐색되지 않은 연구 공백으로 남아 있다(Paullin et al., 2006).

특히 회전익 항공기는 고정익과 달리 조종 수행에 직접적인 영향을 미치는 몇 가지 고유하고 까다로운 환경적 특성을 지닌다. 첫째, 회전익 비행역학 연구들에 따르면 헬리콥터는 본질적으로 불안정한 시스템이다(Padfield, 2007). 고정익과 달리 스스로 균형을 유지하려는 복원력이 부족하기 때문에, 조종사는 기체의 자세를 안정시키기 위해 사이클릭, 컬렉티브, 페달을 동시에, 그리고 끊임없이 조작해야 한다. 이는 조종사에게 고도의 지속적인 정신운동 부하를 유발한다. 둘째, 기체 구조에서 발생하는 소음과 고주파 진동은 조종사의 피로를 가중시킬 뿐만 아니라, 특정 주파수 대역에서는 계기 판독을 방해하고 신체적 조작 오류를 유발하는 생리학적 원인으로 작용한다(Harrison et al., 2015; Griffin, 1990). 셋째, 회전익 특유의 이착륙 환경인 브라운아웃(brownout) 상황 등은 시야를 급격히 제한하고 시각적 대비를 감소시킨다(NATO RTO-TR-HFM-162, 2012). 이러한 시각 단서의 상실은 조종사의 시각 탐색과 공간 지각에 극심한 인지적 압박을 주며(Gibb et al., 2011), 단순한 비행 기술을 넘어선 고차원적인 상황 대처 능력을 요구한다. 그럼에도 불구하고 이러한 회전익만의 특수한 환경을 고려하여 숙련 단계별 능력 구조의 변화를 체계적으로 검증한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 회전익 특유의 환경적 제약 속에서 조종 능력이 실제로 어떻게 변화하고 발달하는지 역시 아직 명확히 밝혀지지 않았다.

이와 같은 환경적 제약 속에서 일어나는 숙련도 발달과 능력 구조의 동적 변화를 설명하는 가장 대표적인 이론적 틀이 Ackerman (1988)의 3단계 기술 습득 이론이다. 이 이론은 기술 습득이 과업에 대한 인지적(cognitive) 이해에서 시작하여, 전략이 정교화되는 연합적(associative) 단계를 거쳐, 최종적으로 수행이 자동화되는 자율적(autonomous) 단계로 심화되는 질적 전환 과정이라고 설명한다. 핵심은 각 발달 단계마다 성과를 결정짓는 능력 요인의 구조와 비중이 달라진다는 점이다(Ackerman, 1988, 1990). 특히 앞서 언급한 회전익 항공기의 높은 조작 복잡성과 인지적 부하는 조종사에게 신속한 정보 처리와 자동화된 반응을 필수적으로 요구한다. 이러한 고난도 과업 환경에서는 특정 능력의 절대적 수준보다, 숙련 단계에 따라 변화하는 과업 요구에 부합하는 능력 요인을 갖추었는가가 수행을 결정하는 핵심 변수가 된다. 따라서 조종사의 경험 축적에 따른 능력 구조의 변화 과정을 체계적으로 규명할 수 있는 Ackerman의 이론은, 회전익 조종사의 전문성 발달 기제를 분석하는 데 있어 가장 적합한 접근법을 제공한다(Ackerman and Cianciolo, 2000).

구체적으로, 초기 인지 단계에서는 문제 해결과 추론 능력을 포괄하는 일반지능이 성과를 좌우하는 가장 중요한 변인이 된다. 충분한 훈련으로 절차가 익숙해지는 연합 단계에 이르면, 의식적 통제가 줄어들고 시각 정보를 빠르게 탐색하고 변별하는 지각속도의 역할이 부각된다. 마지막으로 과업 수행이 거의 무의식적인 수준으로 자동화되는 자율 단계에서는 최소한의 인지적 자원만으로도 빠르고

정확한 실행이 가능해진다. 이 단계에서는 기술의 실행 자체를 담당하는 정신운동능력이 개인차를 설명하는 핵심 요인으로 작용한다(Ackerman, 1990).

Ackerman의 이론은 주로 일관된 자극-반응 매핑(consistent mapping)을 특징으로 하는 절차적 과업에서 검증되어 왔다(Ackerman and Cianciolo, 2000). 본 연구가 다루는 회전익 조종 역시 전체 임무는 복잡하지만, 조종 기술의 근간을 이루는 장주비행, 제한지 이착륙, 계기비행 등 핵심 과업은 표준화된 절차와 규칙을 따르는 일관적 절차 과업(consistent procedural task)의 성격을 지닌다(Gagné, 1985). 이러한 과업들은 반복 훈련을 통해 절차의 자동화(automaticity)가 가능하다는 점에서(Fitts and Posner, 1967), Ackerman 이론을 회전익 조종사의 숙련도 발달 분석에 적용할 수 있는 타당성을 제공한다. 따라서 본 연구는 Ackerman의 이론적 틀을 실제 회전익 조종 환경에 적용하여, 숙련도 발달에 따른 핵심 인지 능력의 상대적 중요성이 어떻게 변화하는지를 규명하고자 한다. 이를 통해 회전익 조종사의 전문성 발달 과정을 실증적으로 입증하고, 나아가 숙련 단계에 최적화된 훈련 개입 전략을 제안할 수 있을 것이다.

2. Method

2.1 Participants

본 연구에는 대한민국 해병대 항공단 소속 군용 회전익 항공기 조종사 20명이 참여하였다. 참여자는 조직 내 공식 자격 기준에 따라 부조종사(Co-Pilot, CP)와 정조종사(Aircraft Commander, AC)로 구분되며, 이는 조종사의 숙련 단계 차이를 반영한다. 정조종사 집단(N = 10)은 모두 남성으로 구성되었고(평균 연령 = 35.3세, SD = 1.64), 평균 총 비행시간은 748.3시간(SD = 232.4)이었다. 부조종사 집단(N = 10)은 남성 9명, 여성 1명으로 구성되었으며(평균 연령 = 27.7세, SD = 1.95), 평균 총 비행시간은 339.6시간(SD = 93.9)이었다.

2.2 Research design and hypotheses

본 연구는 Ackerman (1988)의 기술 습득 이론을 기반으로, 조종사의 숙련도 수준에 따라 비행 수행능력을 예측하는 핵심 인지 능력이 달라지는지를 검증하기 위한 2 (CP vs. AC) x 3 (g, PS, PM) 실험 설계를 적용하였다. 독립변인은 일반지능(g), 지각속도(PS), 정신운동능력(PM)이며, 종속변인은 조종사 정기 비행 평가 점수로 표준화된 단일 수행 지표이다.

선행 연구 및 이론적 배경에 근거하여 설정한 가설은 다음과 같다.

H1: 연합 단계(Associative phase)에 해당하는 부조종사 집단에서는 절차적 규칙의 신속한 적용이 요구되므로, 지각속도가 비행 수행능력을 가장 유의하게 예측할 것이다.
H2: 자율 단계(Autonomous phase)에 해당하는 정조종사 집단에서는 조작의 자동화가 이루어졌으므로, 미세 조작의 정교성을 반영하는 정신운동능력(PM)이 비행 수행능력을 가장 유의하게 예측할 것이다.

2.3 Measures

2.3.1 Flight performance data

조종사의 실제 임무 역량을 측정하기 위해 시뮬레이터가 아닌 실제 항공기를 이용한 조종사 기량유지 평가 기록을 사용하였다. 데이터는 2025년 1월부터 9월까지 수집되었으며, 평가는 해병대 항공단에서 정기적으로 시행하는 조종 능력 평가 절차에 따라 표준화 교관 조종사가 동승한 상태에서 약 90분간 수행되었다. 평가는 군 내부에서 사용 중인 공식 체크리스트를 기반으로 이루어졌으며, 모든 세부 수행 항목은 5점 척도로 평정되었다.

본 연구의 비행 성과 지표는 실제 조종 임무 수행에서 요구되는 네 가지 상위 수행 영역인 기본 조종 기술, 절차 수행 능력, 항공기 조작 안정성, 비행 상황 대응 능력을 중심으로 구성되었다. 각 영역은 해당 영역의 세부 수행 항목 평균값으로 산출되었으며 동일 가중치를 적용하였다. 이후 영역 점수는 척도 차이를 제거하기 위해 z-점수로 표준화한 뒤 동일 가중 평균으로 통합하여 단일 성과 지

표를 구성하였으며, 최종 점수는 비교의 일관성을 위해 100점 기준으로 환산하였다.

2.3.2 Cognitive ability tests

모든 인지 검사는 소음과 조도가 통제된 별도의 실험실에서 실시되었으며, 참가자들은 비행 임무가 없는 날 충분한 휴식을 취한 상태에서 검사에 참여하도록 하여 피로의 영향을 최소화하였다. 지각속도와 정신운동능력과 같이 컴퓨터 기반으로 수행되는 과제(Figure 1)는 해상도 1,920 × 1,080, 주사율 60Hz의 15.6인치 노트북 화면을 통해 제시되었으며, 반응 입력은 표준 USB 키보드를 사용하여 기록하였다.

General Intelligence (g)

일반지능은 새로운 문제를 논리적으로 분석하고, 복잡한 규칙을 파악하며, 제한된 정보 속에서 추론을 수행하는 고차원적 인지 능력을 의미한다. 본 연구에서는 Raven (1938)의 Raven's Progressive Matrices와 높은 상관을 보이는 매트릭스 추론 과제를 사용하여 일반지능을 측정하였다.

이 과제는 일정한 규칙에 따라 배열된 도형들에서 비어 있는 위치에 들어갈 가장 적절한 도형을 선택하는 방식으로 구성되며, 유동성 지능(fluid intelligence)을 측정하는 대표적 도구로 널리 활용된다. 검사는 총 24문항으로 구성된 지필(paper-and-pencil) 형태로 진행되었고, 응시자는 15분의 제한 시간 내에 해결한 정답 문항 수를 통해 최종 점수를 산출하였다.

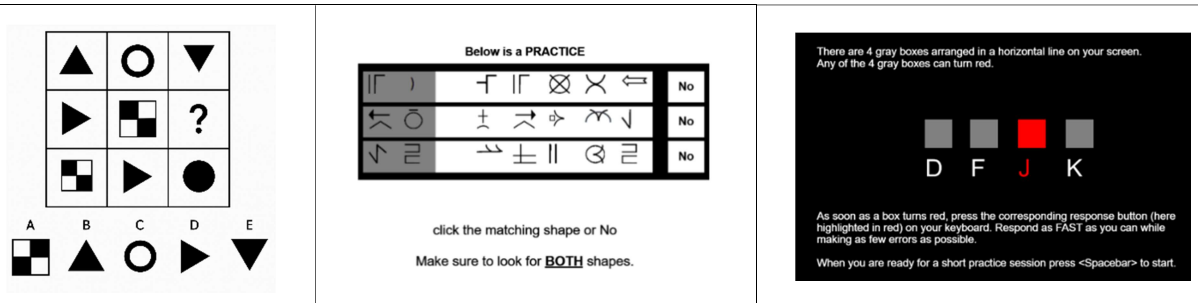
Perceptual Speed (PS)

지각속도는 제시된 시각 정보를 빠르고 정확하게 탐색하고 변별하는 능력을 반영한다. 이를 측정하기 위해 웩슬러 지능 검사(WAIS)의 소검사인 Symbol Search 과제를 컴퓨터 기반(computer-based) 형태로 재구성하여 사용하였다(Wechsler, 1981).

참가자는 화면 좌측에 제시된 목표 기호가 우측 탐색 집단 내에 존재하는지를 가능한 한 빠르고 정확하게 판단해야 했다. 과제는 총 120초 동안 지속되었으며, 점수는 정확성과 속도를 함께 고려하기 위해 전체 정반응 수에서 오반응 수를 뺀 값(Correct – Incorrect)으로 산출하였다.

Psychomotor Ability (PM)

정신운동능력은 시각적 자극을 인지한 뒤 이를 신속하고 정확하게 신체적 반응으로 전환하는 능력을 의미한다. 본 연구에서는 고전적



g: Matrix Reasoning Task	PS: Symbol Search Task	PM: 4-choice Reaction Time task

Figure 1. Measurement tasks for the independent variables: General Intelligence (g), Perceptual Speed (PS), and Psychomotor Ability (PM)

인 4-선택 반응시간(4-Choice Reaction Time) 과제를 사용하여 이를 평가하였다(Donders, 1969).

참가자는 화면의 네 위치 중 임의로 제시되는 시각 자극에 대해 해당 방향의 키를 가능한 한 빠르고 정확하게 눌러야 했다. 총 40회의 시행 동안 측정된 평균 반응시간(ms)을 최종 지표로 사용하였으며, 반응시간이 짧을수록 우수한 정신운동능력을 가진 것으로 해석하였다.

2.4 Procedure

본 연구는 각 참가자를 대상으로 약 40분간 개별적으로 진행되었으며, 모든 과정은 연구 편향을 배제하기 위해 표준화된 절차와 지시문에 따라 엄격하게 통제되었다(Figure 2).

실험 시작 전, 연구자는 참가자에게 연구의 목적과 절차, 수집된 데이터의 익명성 보장, 그리고 언제든 참여를 철회할 수 있는 권리에 대해 충분히 설명하였으며, 이에 대한 자발적 연구 참여 동의서를 서면으로 제출받았다. 검사는 소속 부대 내 소음과 외부 방해 요인이 통제된 독립된 공간에서 1:1로 실시되었다. 과제 수행 순서는 지필(paper-and-pencil) 형태의 일반지능 검사를 먼저 실시한 후, 컴퓨터(PC)를 이용한 지각속도 과제와 정신운동능력 과제 순으로 진행되었다.

본 검사에 앞서, 연구자는 표준화된 안내문을 통해 각 과제의 목표, 응답 방식, 제한 시간, 오류 수정 규칙 등을 구체적으로 설명하였다. 참가자가 과제 방법을 정확히 숙지했는지 확인하기 위해 충분한 연습 시행을 거친 후 본 검사에 진입하였다. 또한, 과제 전환에 따른 인지적 피로와 주의력 저하를 방지하기 위해 각 과제 종료 후 약 3분의 휴식 시간을 제공하였다.

종속변인인 비행 수행능력 점수는 연구자가 평가에 직접 개입하지 않고 객관성을 확보하기 위해, 소속 부대의 협조를 얻어 2025년 1월부터 9월까지 실시된 공식 조종사 정기 평가 기록을 제공받아 활용하였다. 수집된 모든 데이터는 분석 전 개인 식별 정보를 완전히 제거하는 익명화 과정을 거쳐 관리되었다.

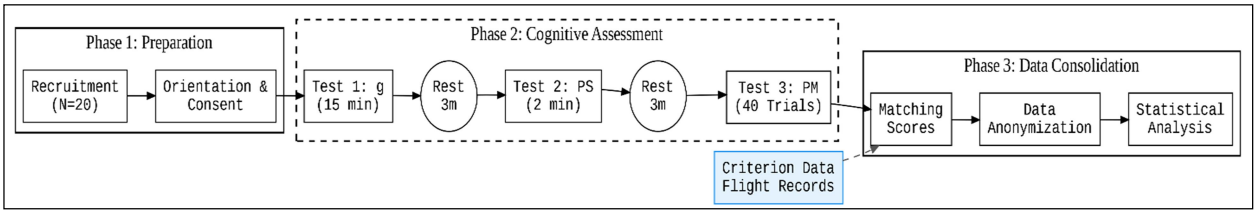


Figure 2. Research design and data collection process

2.5 Data analysis

수집된 자료의 분석은 SAS 9.4 통계 패키지를 활용하였으며, 모든 통계적 유의수준은 $\alpha = .05$로 설정하였다. 본격적인 가설 검증에 앞서, 연구의 기본 가정을 확인하기 위한 예비 분석을 먼저 실시했다. 독립표본 *t*-검정으로 두 집단(CP, AC) 간 평균 비행시간과 비행수행능력에 유의미한 차이가 있는지 확인하여 집단 구분 타당성을 확보하고자 했으며, Pearson 상관분석을 통해 각 집단 내 변인 간의 관계를 탐색하고 다중공선성 문제 여부를 점검했다.

예비 분석 이후, 연구의 핵심 가설을 검증하기 위해 표준 다중회귀분석을 실시했다. 숙련도 수준에 따라 예측 변인의 패턴이 달라질 것이라는 연구 가설을 직접 검증하고자 각 집단을 분리하여 분석했으며, 모델에는 일반지능, 지각속도, 정신운동능력 세 변인을 동시에 투입하여 다른 변인의 영향을 통제한 상태에서 각 변인이 비행 수행능력에 미치는 고유한 영향력을 평가했다. 특히 소표본 특성을 고려하여, 통계적 유의성(*p*-value)뿐만 아니라 모형의 전체 설명력(R^2/Adj. R^2)과, 표준화계수(β)를 종합적으로 검토하여 결과를 해석했다.

3. Results

3.1 Preliminary analysis: Descriptive statistics and correlation analysis

본격적인 가설 검증에 앞서, 부조종사 집단과 정조종사 집단 간 주요 변인에 대한 기술통계를 산출하고, 각 집단 내 변인 간의 관련성을 확인하기 위해 Pearson 상관분석을 실시하였다.

독립표본 t-검정 결과, 두 집단은 본 연구에서 설정한 숙련도 구분 기준을 반영하는 명확한 차이를 보였다. AC 집단은 평균 비행시간이 CP 집단보다 유의하게 길었으며(AC: M = 748.30, SD = 232.40; CP: M = 339.60, SD = 93.88; $t(11.86) = 5.16$, $p < .001$), 비행 퍼포먼스 점수 역시 AC 집단이 CP 집단보다 더 높게 나타났다(AC: M = 93.60, SD = 1.71; CP: M = 90.30, SD = 2.67; $t(18) = 3.29$, $p = .004$) (Table 1).

Table 1. Descriptive statistics and group differences

Variable	Group	N	M	SD	t
Age	AC	10	35.3	1.64	$t(18) = 11.70^{***}$
	CP	10	27.7	1.95	
Flight hours	AC	10	748.3	232.4	$t(11.86) = 5.16^{***}$
	CP	10	339.6	93.9	
Performance	AC	10	93.6	1.71	$t(18) = 3.29^{**}$
	CP	10	90.3	2.67	

$^{**}p < .01$, $^{***}p < .001$

반면 비행 수행능력과는 달리, 기초 인지 능력 과제에서는 부조종사 집단이 정조종사 집단보다 전반적으로 더 우수한 수행을 보였다 (Table 2, Figure 3).

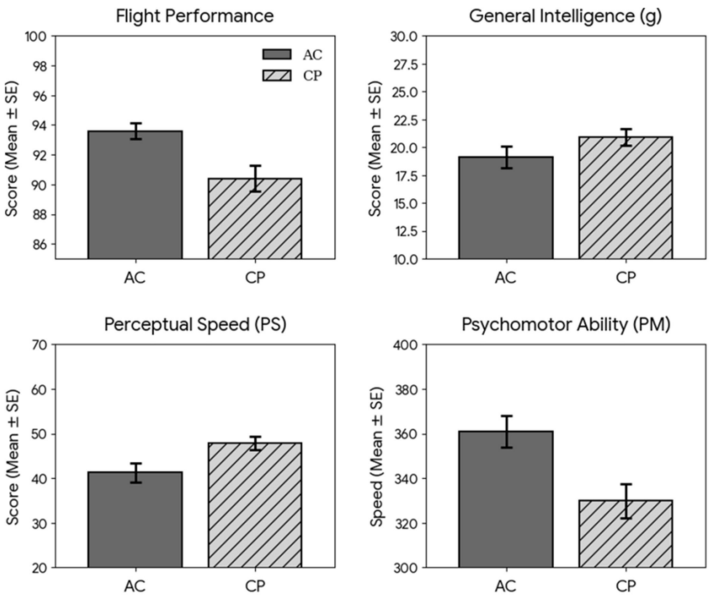


Figure 3. Group comparison of flight performance and cognitive abilities (Mean ± SE)

Table 2. Group comparison of flight performance and cognitive abilities (Mean ± SE)

Variable	AC (M ± SE)	CP (M ± SE)
Flight performance	93.6±0.54	90.4±0.86
General Intelligence (g)	19.1±0.97	20.9±0.74
Perceptual Speed (PS)	41.3±2.13	47.9±1.5
Psychomotor Ability (PM)	360.9±7.03	332.8±7.66

Note. PM reflects reaction time (ms), while the remaining variables are scored performance measures

일반지능은 CP 집단이 20.9±0.74로 AC 집단(19.1±0.97)보다 높았으며, 지각속도 또한 CP 집단이 47.9±1.50으로 AC 집단(41.3±2.13)보다 빠르게 나타났다. 정신운동능력의 경우 반응시간이 짧을수록 우수함을 고려할 때, CP 집단(332.8±7.66ms)이 AC 집단(360.9±7.03ms)보다 더 빠른 반응을 보였다. 이러한 결과는 세 가지 인지 영역 모두에서 CP 집단이 AC 집단보다 일관되게 높은 수행을 보였음을 의미한다.

각 집단별 상관분석 결과, 숙련도에 따라 비행 퍼포먼스 점수를 예측하는 핵심 인지 요인이 질적으로 다르게 나타났다(Table 3). CP 집단에서는 일반지능과 비행 수행 점수 간에 매우 강한 정적 상관이 나타났으며(r = .76, p = .012), 지각속도와 정신운동능력은 성과와 유의한 관계를 보이지 않았다. 반면 AC 집단에서는 정신운동능력과 비행 수행 점수 간에 강한 부적 상관이 관찰되었고(r = -.69, p = .026), 총 비행시간이 많을수록 정신운동능력의 반응시간이 짧아지는 경향도 확인되었다(r = -.64, p < .05).

이러한 예비 분석 결과는 각 집단에서 비행 수행과 관련된 인지적 핵심 요인이 상이하다는 연구의 기본 가설을 뒷받침한다. 특히 두 집단을 하나의 표본으로 통합하여 단일 회귀모형으로 분석할 경우, 집단별로 상이한 영향 요인이 상쇄되거나 왜곡될 수 있어, 집단을 구분한 별도 회귀모형 구축이 통계적·이론적 타당성을 모두 확보하는 접근임을 명확히 보여준다.

Table 3. Correlations among variables by group

Variable	1	2	3	4	5
CP (N = 10)					
1. Flight hours	–				
2. Performance	-.27	–			
3. General Intelligence (g)	-.08	.76*	–		
4. Perceptual Speed (PS)	-.48	-.05	-.18	–	
5. Psychomotor Ability (PM)	-.14	-.08	-.50	-.35	–
AC (N = 10)					
1. Flight hours	–				
2. Performance	.48	–			
3. General Intelligence (g)	.23	.20	–		
4. Perceptual Speed (PS)	.50	.31	.58	–	
5. Psychomotor Ability (PM)	-.64*	-.69*	.30	-.30	–

*p < .05

3.2 Hypothesis testing: Multiple regression analyses by expertise group

가설 검증을 위한 다중회귀분석 실시에 앞서, 회귀모형의 통계적 가정 충족 여부를 확인하였다. 우선 다중공선성(Multicollinearity) 진단 결과, 두 집단 모두 공차한계(Tolerance)는 .10 이상, 분산팽창지수(VIF)는 10 미만으로 나타나 문제가 없음이 확인되었다(Table 4). 또한 Cook's D와 DFBETAS 지수를 통해 영향점(Influential points)을 진단한 결과, 일부 관측치가 기준치를 초과하였으나 회귀계수의 부호와 유의성 패턴에는 변동이 없어 모든 데이터를 최종 분석에 포함하였다.

Table 4. Multicollinearity diagnostics (Tolerance and VIF) for CP and AC groups

Variable	Group	Tolerance	VIF
General Intelligence (g)	AC	.469	2.13
	CP	.666	1.50
Perceptual Speed (PS)	AC	.716	1.40
	CP	.576	1.74
Psychomotor Ability (PM)	AC	.469	2.13
	CP	.783	1.28

숙련도에 따라 다중회귀분석을 수행하였다(Table 5, Figure 4). 상대적으로 숙련도가 낮은 CP 집단(N = 10)의 회귀모형은 통계적으로 매우 유의했으며(F3, 6) = 6.97, p = .022), 비행 퍼포먼스 변량의 약 78%를 설명하는 높은 설명력을 보였다(R^2 = .7771, Adj. R^2 = .6657). 개별 예측 변인 중에서는 일반지능이 비행 퍼포먼스를 예측하는 유일하고 가장 강력한 변인으로 나타났다(B = 1.28, t = 4.53, p = .004). 반면, 정신운동능력은 통계적 유의수준에 근접한 경향성만 보였을 뿐(p = .060), 지각속도는 유의한 예측 변인이 아니었다. 따라서 CP 집단에서는 기술 습득의 초기 단계 특성과 일치하게 일반지능이 가장 핵심적인 역할을 하는 것으로 확인되었다.

AC 집단(N = 10)의 회귀모형 역시 통계적으로 유의했으며(F3, 6) = 5.95, p = .0313), 비행 퍼포먼스 변량의 약 75%를 설명하였다(R^2 = .7485, Adj. R^2 = .6228). AC 집단에서는 CP 집단과 질적으로 다른 결과가 나타났다. 정신운동능력이 비행 퍼포먼스를 예측하는 가장 강력한 변인으로 부상하였으며(B = -0.08, t = -3.95, p = .0076), 반응시간이 짧을수록 비행 퍼포먼스가 높았다. 이와 더불어, 일반지능 역시 여전히 비행 퍼포먼스를 유의하게 예측하는 변인으로 확인되었다(B = 0.43, t = 2.47, p = .0488).

Table 5. Results of multiple regression analysis for flight performance by CP and AC groups

Predictor	B (SE)	β	t	p	95% CI (B)
CP (n = 10)					
General Intelligence (g)	1.28 (0.28)	1.12	4.53	.004**	[0.73, 1.83]
Perceptual Speed (PS)	0.20 (0.13)	0.36	1.59	.164	[-0.09, 0.49]
Psychomotor Ability (PM)	0.08 (0.04)	0.58	2.31	.060	[-0.01, 0.17]
Model summary	R^2 = .78				
	Adj. R^2 = .67				
	F = 6.97*				
AC (n = 10)					
General Intelligence (g)	0.43 (0.17)	0.77	2.47	.049*	[0.02, 0.84]

Table 5. Results of multiple regression analysis for flight performance by CP and AC groups (Continued)

Predictor	B (SE)	β	*t*	*p*	95% CI (B)
Perceptual Speed (PS)	-0.11 (0.08)	-0.44	-1.44	.200	[-0.29, 0.07]
Psychomotor Ability (PM)	-0.08 (0.02)	-1.04	-3.95	.008**	[-0.13, -0.03]
Model summary	R^2 = .75				
	Adj. R^2 = .62				
	F = 5.97*				

*p < .05, **p < .01, ***p < .001

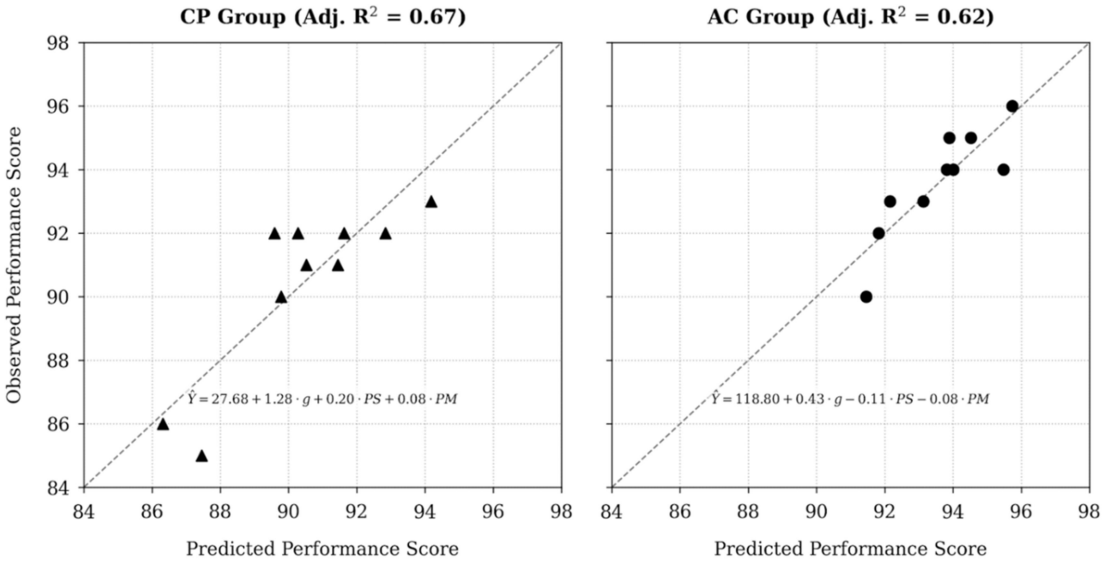


Figure 4. Predicted vs. observed flight performance scores by CP and AC groups

4. Discussion

본 연구는 Ackerman (1988)의 기술 습득 이론을 토대로 회전익 조종사의 숙련도에 따라 비행 성과를 예측하는 인지 능력의 역할 변화를 검증하였다. 분석 결과, 부조종사 단계에서는 일반지능이, 숙련된 정조종사 단계에서는 정신운동능력이 주요 예측 변인으로 나타나 능력의 상대적 중요성이 변화한다는 이론의 기본 가정이 전반적으로 지지되었다. 그러나 회전익 조종의 특수성을 고려할 때 Ackerman 이론과 상이한 두 가지 특징도 확인되었다. 첫째, 기술이 숙련된 이후에도 일반지능의 영향력은 감소하지 않았으며 여전히 성과를 예측하는 변인으로 유지되었다. 둘째, 이론에서 제시된 바와 달리 지각속도의 기여는 미미했으며, 일반지능에서 정신운동능력으로 비교적 직접적으로 전이되는 경향을 보였다.

4.1 The sustained role of general intelligence across proficiency levels

본 연구에서 일반지능이 숙련도와 무관하게 비행 성과를 유의미하게 예측한 결과는, 회전익 조종이 단순한 기술적 숙달을 넘어 고도의 판단력과 정보 통합을 요구하는 복합 인지 과업임을 보여준다. 주목할 점은 Ackerman (1988) 모델이 예측하는 일반지능의 영향력 감소 현상이 전문가 단계에서 나타나지 않았다는 것이다. 이는 숙련도에 따라 일반지능이 관여하는 정보 처리의 기능적 역할이 전환되었기 때문이다.

우선, 부조종사 집단은 인지 단계를 지나 연합 단계에 진입했음에도 여전히 일반지능에 크게 의존한다. 조종실 자원 관리(CRM) 환경에서 부조종사는 주로 계기 감시와 절차 점검을 담당하며, 비행 도식(schema)이 완전히 자동화되지 않았기 때문에 학습된 규칙과 절차를 기반으로 매 순간 의식적인 판단을 수행하는 경향이 있다. 인지심리학적으로 볼 때, CP는 정보를 통합된 의미 단위(chunk)로 파악하는 능력이 부족하여 각 정보를 개별 단위로 처리하며 높은 인지적 부하(cognitive load)에 노출된다. 따라서 CP는 불완전한 도식을 보완하고 파편화된 정보를 실시간으로 대조 및 통합하기 위해, 분석적 의사결정 과정에 일반지능을 핵심 자원으로 활용한다(Orasanu, 1993; Endsley, 1995). 이러한 맥락에서 CP에게 주의가 필요한 정보는 주로 규칙의 정확한 적용에 관한 것이며, 미숙련 단계의 특성상 처리해야 할 정보의 양이 높다.

반면, 정조종사 집단에서의 일반지능은 자동화된 기술과 공존하며 고차원적 전략 수립에 관여한다. AC는 연령 증가에 따른 유동성 지능의 자연스러운 감퇴에도 불구하고 성과 예측력이 유지되는데, 이는 보상적 기제(compensatory mechanism)로 설명될 수 있다(Morrow et al., 2003). 숙련된 조종사는 정신운동능력의 자동화를 통해 확보된 인지적 여유 자원을 비정형 상황 대응, 위험 예측, 임무 관리 등 상위 레벨의 통제 과정에 재분배(Resource Reallocation)한다(Hambrick and Meinz, 2011). 즉, AC에게 주의가 필요한 정보는 기본 조작이 아니라 상황의 해석과 미래의 예측에 대한 것이며, 일반지능은 무의식적·자동화된 조작을 기반으로 의식적·전략적 판단을 결합하는 이중 처리 구조의 핵심 요소로 기능한다(Ericsson and Kintsch, 1995). 이러한 기능적 역할 변화를 통해 일반지능의 중요성은 유지되며, 이는 회전익 환경의 높은 불확실성에 대응하기 위한 전문가 인지의 특징을 반영한다.

4.2 Psychomotor ability as the core determining factor, bypassing perceptual speed

본 연구 결과는 Ackerman 이론의 예측과 달리 회전익 조종 기술의 발달 경로가 지각속도를 건너뛰고 정신운동능력을 중심으로 전개된다는 중요한 사실을 시사한다. 이러한 현상은 과업의 물리적 특성과 임무 환경의 인지적 요구라는 두 가지 요인으로 해석된다.

첫째, 헬리콥터 조종은 시각적 탐색 속도(PS)보다 복잡하고 정교한 신체 조작의 자동화가 우선적으로 요구되는 과업이다. 회전익 항공기는 구조적으로 불안정하며, 조종석의 세 가지 주요 조작장치(사이클릭, 컬렉티브, 페달) 중 한 축의 조작 입력이 다른 축의 움직임을 유발하는 다축 상호 간섭(multi-axis cross-coupling)이 지속적으로 발생한다(Padfield, 2007). 이러한 특성은 대표적인 기본 비행 과제인 제자리 비행(Hovering)에서 뚜렷하게 나타난다. 예를 들어, 조종사가 고도를 유지하기 위해 컬렉티브를 당기면 엔진 토크의 반작용으로 기체가 회전하려는 움직임(Yaw)이 발생한다. 조종사는 이를 감지하는 동시에, 즉각적으로 안티토크 페달을 조작해 기수 방향을 보정해야 한다. 동시에 사이클릭 스틱을 미세 조정하여 자세를 유지해야 한다.

즉, 이러한 상황에서의 조종 성과는 기체 변화를 감지하는 시각적 탐색 속도(PS)보다는, 양손과 양발의 독립된 조작을 비행 상황에 맞춰 정밀하게 동기화하는 정신운동 협응 능력(PM)에 의해 실질적으로 결정된다. 이러한 복잡성은 미 육군 조종사 직무 분석에서도 다중 수지 협응력 및 통제 정밀성이 핵심 능력으로 확인되었으며(Paullin et al., 2006), 기체의 불안정성을 끊임없이 통제해야 하는 회전익 과업의 특성상 PM이 비행 성과의 최종적인 병목(bottleneck)이자 실질적 수행 차이를 만드는 결정적 요인으로 작용함을 시사한다.

둘째, 실제 임무 맥락에서는 단순한 지각속도 보다 고차원적인 인지 능력이 성과를 결정한다. 회전익 조종은 진동, 시야 제한 등으로 환경 변동성이 크므로(Padfield, 2007). 이러한 고부하·고변동 환경에서는 지각속도와 같은 단순한 자극-반응 처리 속도보다는, 현재 상황을 이해하고 미래 상태를 예측하는 상황 인식(Situational Awareness, SA) 능력이 결정적인 역할을 수행한다(Endsley, 1995). SA는 단순한 정보 지각을 넘어선 정보의 통합 및 예측을 요구하며, 이는 일반지능 기반의 고차원적 처리에 가깝다. 따라서 PS의 영향력은 일반지능 기반의 SA 요구에 의해 상대적으로 감소하거나 상쇄될 수 있다. 궁극적으로 헬리콥터 조종에서는 숙련도가 높아질수록 정교한 조작 기술이 자동화되고, 이를 토대로 고차원적 인지가 결합하여 성과 차이를 만들어내는 구조로 해석할 수 있다.

4.3 Limitations and future research

본 연구는 실제 비행 환경에서 조종사의 인지 능력 역할을 규명했다는 의의를 지니지만, 다음과 같은 한계점을 갖는다. 첫째, 연구 설계 및 표본의 제한성이다. 본 연구는 해병대 헬리콥터 조종사 집단(N = 20)을 대상으로 한 횡단적(cross-sectional) 탐색적 연구였기 때

문에, 표본 규모와 범위가 제한적이며 숙련도의 발달 과정을 시간의 흐름에 따라 추적하는 데 제약이 따른다. 특히 정조종사 집단 내 경험 수준의 이질성은 결과의 일반화 가능성을 제한하는 요인이 된다. 따라서 향후 연구에서는 더 큰 규모의 표본을 확보하고, 민간 항공 등 다양한 배경을 포함하는 동시에 동일 집단을 추적하는 종단적 설계(longitudinal design)를 활용하여 결과의 신뢰성과 외적 타당성을 검증할 필요가 있다.

둘째, 인지 요인의 범위 및 환경 통제의 한계이다. 본 연구는 Ackerman 모델의 주요 변인(g, PS, PM)에 초점을 맞추었으나, 실제 조종 과업에서는 주의 분배, 상황 인식(SA), 의사결정 등 복합적인 인지적 요소가 성과에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 실제 비행 환경(field study) 특성상 기상 등 외부 변동 요인을 완벽하게 통제하기 어려워 Ackerman 모델이 전제하는 '통제된 과업 환경'과 완전하게 일치하기 어렵다는 점이 한계로 남는다. 향후 연구에서는 SA 등 추가 인지 요인을 포함하여 확장된 모델을 구축하고, 환경 변동 요인을 체계적으로 통제할 수 있는 시뮬레이터 기반의 실험 등을 병행함으로써 이러한 한계를 보완할 필요가 있다.

5. Conclusion

본 연구는 Ackerman (1988)의 기술 습득 이론을 바탕으로, 회전익 조종사의 숙련도에 따라 비행 성과를 좌우하는 핵심 능력이 어떻게 달라지는지를 검증하였다. 분석 결과, 부조종사(CP) 집단에서는 일반지능(g)이, 숙련된 정조종사(AC) 집단에서는 정신운동능력(PM)이 성과를 예측하는 가장 중요한 요인으로 확인되었다. 이는 숙련도가 높아질수록 인지적 처리 중심의 단계에서 자율적 정신운동 단계로 능력 구조가 변화한다는 이론의 큰 흐름과 일치하는 결과이다.

그러나 회전익 환경의 특수성으로 인해 Ackerman 모델의 전통적인 예측과 상이한 두 가지 중요한 양상을 규명하였다. 첫째, 지각속도의 영향력이 나타나지 않아 능력 전이의 우회 경로가 형성됨을 발견했다. 둘째, 전문가 단계에도 일반지능의 중요성이 사라지지 않고 전략적 통제기능으로 유지됨을 입증했다. 이처럼 Ackerman 모델의 예측과 다른 새로운 발달 경로가 규명되었다.

종합하면, 본 연구는 Ackerman 모델이 회전익 조종 임무의 특수성을 반영한 맥락적 조정이 필요함을 실증적으로 보여주며 본 연구에서 확인된 능력 활용 방식의 변화를 토대로 조종사의 임무 습득도의 시간적 개선 과정을 설명하기 위한 실용적인 하이브리드 모델 구축의 토대를 제시한다. 이러한 발견은 인지 자원의 활용 방식이 숙련도에 따라 질적으로 재구성됨을 밝혀냄으로써 기술 습득 이론의 범위를 확장한다. 특히 통제된 시뮬레이터 환경이 아닌, 물리적 위험과 환경 변수가 작용하는 실제 비행 환경에서 이러한 메커니즘을 입증했다는 점에서 차별화된 의의를 지닌다.

향후 조종사 훈련은 이러한 숙련도별 인지 특성과 실전적 환경 요인을 반영하여, 부조종사 단계에서는 복잡한 정보의 통합(g)에, AC 단계에서는 전략적 통제(g)와 다축 협응 능력(PM)의 정교화에 초점을 맞춘 차별화된 전략으로 설계되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국산업기술기획평가원의 자동차산업핵심기술개발사업의 연구비지원(과제번호 RS-2024-00403108)에 의해 수행되었습니다.

References

Ackerman, P.L., Determinants of individual differences during skill acquisition: Cognitive abilities and information processing, *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(3), 288-318, 1988. doi:10.1037/0096-3445.117.3.288.

Ackerman, P.L., A correlational analysis of skill specificity: The effects of practice on individual differences, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16(5), 883-901, 1990. doi:10.1037/0278-7393.16.5.883.

Ackerman, P.L., Predicting individual differences in complex skill acquisition: Dynamics of ability determinants, *Journal of Applied*

Psychology, 77(5), 598-614, 1992. doi:10.1037/0021-9010.77.5.598.

Ackerman, P.L. and Cianciolo, A.T., Cognitive, perceptual-speed, and psychomotor determinants of individual differences during skill acquisition, *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(4), 259-290, 2000. doi:10.1037/1076-898X.6.4.259.

Carretta, T.R. and Ree, M.J., The role of cognitive ability tests in pilot selection, *International Journal of Aviation Psychology*, 7(2), 113-123, 1997. doi:10.1207/s15327108ijap0702_1.

Donders, F.C., On the speed of mental processes, *Acta Psychologica*, 30, 412-431, 1969. doi:10.1016/0001-6918(69)90065-1.

Endsley, M.R., Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37(1), 32-64, 1995. doi:10.1518/001872095779049525.

Ericsson, K.A. and Kintsch, W., Long-term working memory, *Psychological Review*, 102(2), 211-245, 1995. doi:10.1037/0033-295X.102.2.211.

Fitts, P.M. and Posner, M.I., *Human Performance*, Brooks/Cole Publishing Co., 1967.

Gagné, R.M., *The Conditions of Learning and Theory of Instruction*, 4th ed., Holt, Rinehart and Winston, 1985.

Gibb, R., Ercoline, B. and Scharff, L., Spatial disorientation: Decades of pilot fatalities, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 82(7), 717-724, 2011. doi:10.3357/ASEM.3048.2011.

Griffin, M.J., *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, 1990.

Hambrick, D.Z. and Meinz, E.J., Limits on the predictive power of domain-specific knowledge and experience in complex skill, *Current Directions in Psychological Science*, 20(5), 275-279, 2011. doi:10.1177/0963721411422061.

Harrison, M.F., Coffey, B., Albert, W.J. and Fischer, S.L., Night vision goggle-induced neck pain in military helicopter aircrew: a literature review, *Aerospace Medicine and Human Performance*, 86(1), 46-55, 2015. doi:10.3357/AMHP.4029.2015.

Hunter, J.E. and Burke, E.F., The validity of military flight aptitude tests for predicting training success and job performance, *International Journal of Aviation Psychology*, 4(4), 345-373, 1994. doi:10.1207/s15327108ijap0404_4.

Martinussen, M., Psychological measures as predictors of pilot performance: A meta-analysis, *International Journal of Aviation Psychology*, 6(1), 1-20, 1996. doi:10.1207/s15327108ijap0601_1.

Morrow, D.G., Menard, W.E., Ridolfo, H.E., Stine-Morrow, E.A.L., Teller, T. and Bryant, D., Expertise, cognitive ability, and age effects on pilot communication, *The International Journal of Aviation Psychology*, 13(4), 345-371, 2003. doi:10.1207/S15327108IJAP1304_02.

NATO Research and Technology Organisation, *Rotary-Wing Brownout Mitigation: Technologies and Training (RTO-TR-HFM-162)*, NATO RTO, 2012.

Orasanu, J., Shared mental models and crew decision making. In G.A. Klein, J. Orasanu, R. Calderwood and C.E. Zsambok (Eds.), *Decision Making in Action: Models and Methods*, Ablex Publishing, 1993.

Padfield, G.D., *Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling*, 2nd ed., Blackwell Publishing, 2007.

Paullin, C., Katz, L., Bruskiewicz, K.T., Houston, J. and Damos, D., *Review of Aviator Selection (Technical Report 1183)*, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 2006.

Raven, J.C., *Progressive Matrices: A Perceptual Test of Intelligence*, H. K. Lewis, 1938.

Wechsler, D., *WAIS-R Manual: Wechsler Adult Intelligence Scale-Revised*, The Psychological Corporation, 1981.

Wickens, C.D. and Long, J., Object versus space-based models of visual attention: A cognitive engineering analysis, *Human Factors*, 37(4), 691-717, 1995. doi:10.1518/001872095778995331.

Wingestad, T., *Selection of offshore rotary wing pilots: Do psychological tests predict simulator performance?*, The Norwegian Defence Leadership Institute, 2005.

Author listings

Gwang Min Bae: kbaegmin@korea.ac.kr
Highest degree: B.S., Department of Defense Management, Republic of Korea Naval Academy
Position title: M.S. Student, Department of Industrial Management Engineering, Korea University
Areas of interest: Aviation Psychology, Human Factors, Pilot Performance Assessment

Rohae Myung: rmyung.korea.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, Texas Tech University
Position title: Professor, Department of Industrial Management Engineering, Korea University
Areas of interest: Cognitive modeling, Cognitive Architecture, Autonomous driving