

비행안전을 고려한 조종사의 비행착각에 관한 연구 (A Study on The Spatial Disorientation of Pilots for Flight Safety)

강한태*, 윤봉수**

Abstract

Statistical data have shown that most of aircraft accidents attributed to the spatial disorientation result from visually restricted environments such as a flight amid clouds or a night flight, in particular during roll maneuvering. This study investigates the time necessary for a flying pilot to recognize a sloped status as a horizontal status on the condition that the roll maneuver is operating when the visual sense is blocked. In this study, aspects which affect such disorientation phenomena are examined. The result of this study shows that a pilot is rushed into a somatogyral illusion when a certain time elapses with visual sense blocked, and that as a speed of the flight increases and a bank of aircraft decreases, so a rushing time increases rapidly.

Keywords : Spatial Disorientation, Somatogyral Illusion

* 공군사관학교 항공우주연구소
** 공군사관학교 산업공학과 교수

1. 서 론

1.1 연구의 내용 및 목적

최근 발생하는 사고의 많은 부분이 기계적 결함보다는 인간의 실수에 기인된 사고이고 이는 인간의 생리학적 구조가 비행환경에 적합하게 되어있지 못한 것에 근본적인 이유가 있다고 생각된다[1]. 공군에서 최근 발생한 중사고 분석 자료를 보면 인적요소에 의한 사고가 전체의 70% 이상을 차지하고 있으며 여기에는 무리한 조작, 공중충돌, 조작과실, 비행착각 등 다양한 이유가 내재하고 있어 인적요소에 대한 보다 과학적인 분석과 연구를 통한 근본적인 대책마련이 요구되며 그것이 사고의 원인을 근본적으로 제거하는 방안이 될 것으로 생각한다[2].

공군의 여러 사고 가운데 특히 비행착각에 의한 사고는 <표 1-1>에서 보는 바와 같이 끊임없이 계속 되어 왔고 최근 5개년간의 중사고 원인 중에서

<표 1-1> 인적과실에 의한 사고요인 분석

	62-66	67-71	72-76	77-81	82-86	87-91	92-96
이상자세, 과조작	5	1	3	4	4	4	1
공중충돌	5	4	2	1	1	2	1
조작과실	9	11	6	3			3
비상저지불량	2	3		4			
비행착각		5			2	1	5
기재취급불량		1	2		2	1	1
절차불엄수	1	1	3	2	7	2	1

인적요인에 의해 발생하는 사고 가운데에서 41.7%를 차지하는 가장 많은 빈도를 가지고 있다. 이러한 비행착각에 의한 사고는 항공기의 형태와 조종사의 비행시간에 무관하게 발생함으로 인해 가장 큰 비행안전 저해요인으로 작용하고 있다고 해도 큰 무리가 없을 것이다.

그러나 비행착각이 이러한 심각한 사고의 요인이 되고 있음에도 비행착각에 돌입되는 환경이 특수함으로 인해 다른 비상절차처럼 훈련을 하거나 학습하는 것이 제한되어 있다. 더구나 항공생리과정에 입과한 조종사들을 대상으로 실시한 설문조사자료를 보면 상당수의 조종사가 비행착각에 폭로되었을 때 이 상태를 밝히기를 꺼리고 있으며 이러한 현상은 초급 리더(Leader) 조종사에게서 더 두드러진 양상을 보이고 있다. 이는 실제 비행착각에 폭로되었을 때 조종사가 상황을 전파(Confess) 하지 않고 스스로도 상황을 극복하지 못한다면 외부 조인이 불가능한 상태가 되어 정상상태의 항공기와 조종사가 순식간에 사고로 돌입되는 불행한 결과를 초래한다는 점에서 심각한 문제점이라고 말할 수 있다. 초급 리더는 자신은 물론이고 편대원의 안전까지 책임지고 있는 위치임을 인식해 볼 때 비행착각에 대한 의식의 전환이 필요하고 이를 위해 구체적인 지침을 제시해 줄 수 있는 연구가 동반되어야 할 것이다. 비행착각에 대해서는 지금까지 국내외로 많은 연구가 이루어져 왔으나 이것이 지상에서는 쉽게 발견할 수 없는 비행에서의 특수한 현상이기 때문에, 조종사가 연구된 내용을 참조하여 비행착각에 대비한다거나 사고를 예방하는데 사용되기에는 다소 제한적인 이론들이었다[3,4,5,6,7]. 따라서 본 연구에서는 비행착각 현상에 대한 보다 실증적인 자료를 얻고자 조종사 35명을 대상으로 항공기 실험을 통하여 영향을 미치는 요소와 영향정도를 분석하였다. 따라서 본 연구는 비행착각에 대해 생리학 분야의 학문적 고찰이나 단순한 현상 실험에 그치지 않고 비행하는 조종사가 구체적으로 인지할 수 있는 정보를 제공함으로써 비행안전에 기여할 수 있는 연구가 될 것으로 확신한다.

2. 비행착각에 대한 이론 연구

2.1 비행착각의 개념

비행 중, 특히 계기비행 중 조종사들이 인체 평형 기관의 감각을 그대로 받아들이고 이 감각에 의지하여 비행하려고 할 때 비행착각을 유발하게 된다. 비행환경은 우리가 일상생활 환경에서는 도저히 경험할 수 없는 여러 가지 형태의 가속도에 폭로되는데 계기비행과 같이 시각 정보가 제한되어 외부 참조물을 확인할 수 없는 경우에는 우리 인체의 평형 기관들이 정확한 자세나 방향을 인지할 능력이 없기 때문이다. 이러한 현상은 모든 사람에게 일어나는 정상적인 생리 반응으로 특히, 항공기를 조작하는 조종사들이 이러한 환경에 처할 때 정확하고 적절한 조치를 취하지 못한다면 극히 위험한 상태에 직면하게 된다. 미 공군에서 다년간 관찰 및 조사한 결과에 의하면, 모든 조종사들은 비행 중 비행착각 경험을 갖고 있으며, 이러한 현상으로 인하여 수많은 항공기 사고를 유발하였고, 그 사고의 대부분이 중사고였다는 사실에서 확인할 수 있다[8].

2.1.1 비행착각 관련 용어 정의

구체적인 이론 고찰에 앞서 비행착각과 관련하여 사용하는 여러가지 용어들에 대해 의미를 살펴보면 다음과 같다.

가. 착각(illusion)

어떠한 사상(事象)에 대하여 그릇된 인식을 갖거나 판단을 잘못할 때, 이를 착각(錯覺)이라 한다[8].

나. 감각착오(Sensory illusion)

감각착오(感覺錯誤)란 여러 가지 평형감각 기관이 어떤 사실을 잘못 감지하여 사실에 위배된 정보를

중추신경 계통에 전달함으로써 일어나는 것을 말한다. 예를 들면 비행 중 항공기의 자세, 위치 및 기동형태를 실제로 어긋나게 감지하게 될 때를 말한다. 인체의 모든 평형기관들은 그 정상적인 생리기능으로 인하여 비행 중에 이러한 착오를 유발하게 된다 [8].

다. 역치(閾值)

생물체가 자극에 대한 반응을 일으키는 데 필요한 최소한도의 자극의 강도를 표시하는 수치[9].

라. 정위 또는 평형유지(Orientation or Equilibrium)

지구중력 방향에 대한 자기의 위치나 자세 및 운동형태를 정확하게 판단하고 감지할 때 이를 정위(正位) 혹은 평형(平衡)을 유지하고 있다고 말한다 [8].

마. 공간 정위 상실(Spatial Disorientation)

지구중력 방향에 대한 자신의 자세나 위치 혹은 기동형태를 정확하게 감지하지 못할 때 이를 공간 정위 상실이라고 한다. 비행 중 조종사들이 비행계에 나타나는 모든 사실을 믿지 않고 인체의 평형 기관에 의존하여, 즉 감각착오 상태를 정상으로 믿고 비행하게 된다면 이것이 곧 비행착각 상태가 된다[8].

바. 현훈(Vertigo)

현훈(眩暈)이란 의학용어로서 물체의 상대운동 관계에서 일어나는 일종의 현기증을 말한다. 그러나 조종사들은 공간 정위 상실과 동일한 의미로서 이 현훈(Vertigo)이라는 용어를 사용하고 있다. 이 용어가 원래 갖고 있는 의학적인 의미와 명확하게 구별하려 할 때는 가끔 Pilot's Vertigo란 용어를 쓰게 된다 대부분의 조종사들도 공간 정위 상실과 동일한 의미로서 Vertigo란 용어를 사용하고 있다[8].

2.2 인체의 평형기관

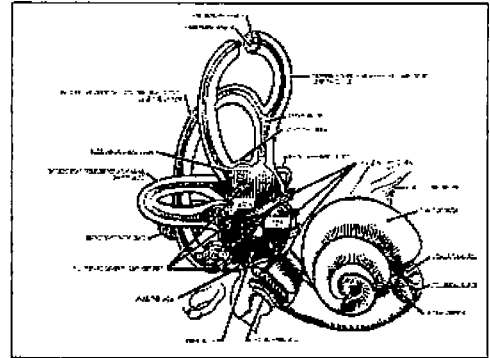
인체의 평형이나 정위를 유지하는 역할을 하는 것은 시각과 내이의 미로 전정기관, 그리고 고유 수용기의 세 가지 기관에 의해서 통제된다. 즉 이들 세 가지 기관의 상호 협동과 조화로써 이루어지는 것이다. 그 각각의 구조와 특징을 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 시각계통(The Visual System)

시각(視覺)은 우리 인체의 평형 유지에 있어서 가장 중요하고 정확한 기관이다. 시각이 우리로 하여금 평형을 유지하게 하는 이유는 대조물을 볼 수 있기 때문이다. 이 대조물을 우리는 두 가지 형태로 구분할 수 있는데 자연대조물(自然對照物)과 인공대조물(人工對照物)이 그것이다. 우리가 지면을 볼 수 없는 비행환경에서는 아주 간결한 인공대조물(자세계)이 계기반에 나타나 있다. 그러나 이러한 인공대조물은 불행하게도 자연대조물과 동일한 정도로 명확한 자극을 우리 중추신경계통에 주지 못한다. 그러한 이유로 계기비행 환경에서는 흔히 비행계기를 의심하는 경우가 있게 되며 잘못된 평형감이 주어진 상태에서 계기를 불신하게 될 때 인간은 공간정위를 상실하게 된다. 시각계통이 평형유지에 중요한 또 한 가지 이유는 바로 이 시각을 통하여서만 비행계기를 관독할 수 있기 때문이다. 이 계기들을 종합적으로 관독(Cross Check)할 것 같으면 비행 중에 요란이나 부주의, 기계고장 등으로 일어나는 항공기 자세의 이상상태를 조기에 발견할 수 있게 된다. 이외에도 시각은 지면의 고정된 대조물을 기준으로 하여 항공기의 속력과 방향도 어느 정도 판단할 수 있게 한다[8,14].

2.2.2 미로전정기관(The Vestibular Apparatus)

내이에는 청각기관과 별도로 미로전정기관(迷路前庭器官)이 있다. 이 미로전정기관 중에서 삼반규관(三半規管)과 이석기관(耳石器官)이 신체의 평형을 유지하는데 중요한 역할을 하는데 이들 기관의 구조와 기능을 살펴보면 다음과 같다.



<그림 2-1> 내이(內耳)의 구조

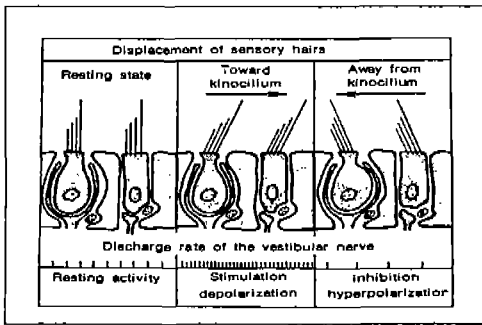
가. 이석기관(The Otolith Organs)

미로전정기관의 일부분인 이 이석기관은 구형낭(Sacculle)과 난형낭(Utricule)으로 구성되어 있다. 난형낭의 하부와 구형낭의 벽 중간의 모세포충이 있고 이들 각 모세포로부터는 감각 모발이 솟아 있다. 이 감각모발 위에는 탄산칼슘 성분으로 된 이석을 함유하고 있는 아교질의 막으로 덮여 있는데, 감각모발의 상단은 이 막속으로 돌출되어 있다. 이 이석기관들은 일상생활 환경에서는 지구중력에 의하여 반응을 일으키는데 우리가 머리를 움직이면 이에 작용하고 있는 지구 중력 방향 변화에 의하여 이석막과 모세포 사이에 변위가 생겨서 감각 모발을 굴절시키며, 이로 인한 자극이 중추신경 계통에 전달되어 머리의 자세나 위치를 지각하게 된다[8,10,11].

나. 삼반규관

삼반규관(三半規管)은 우리가 각 가속도에 폭로될 때 이를 지각하여 몸의 평형을 유지하고 여러 가지

운동 상태에 적응할 수 있도록 하는 것이다. 반원형으로 된 세 개의 반규관은 각각 x, y, z축으로 대략 90°의 각도를 이루고 있어서 인체가 삼방면 운동을 할 때 어느 방향의 운동일지라도 감지할 수 있도록 되어 있다. 이 반규관을 해부하면, 각 반규관의 내부에는 내입파액이 있고 팽대부 속에는 감각 모발이 수직으로 직립하고 있으며, 이 감각 모발은 허부에 있는 기로전정 신경에 연결되어 있다. <그림 2-2>에서 보는 바와 같이 우리 인체가 각 가속도 운동에 폭로될 때 같은 평면상에 놓여 있는 반규관 내의 내입파액이 관성에 의하여 반대 방향으로 흐르는 결과를 초래하게 된다. 이 내입파액의 흐름은 감각 모발에 작용하여 이를 굴절시킨다. 그래서 우리들은 감각 모발이 굴절하는 반대 방향으로 회전감을 느끼게 된다[8,10,11].

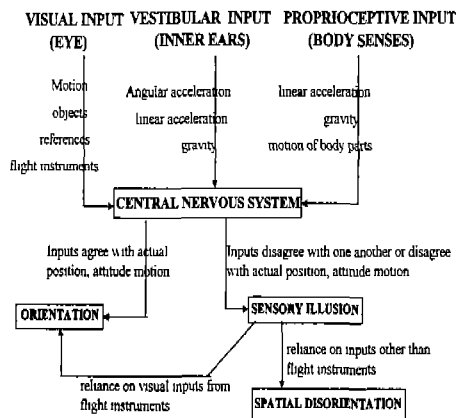


<그림 2-2> 섬모세포의 반응

다. 고유 수용기 계통(The Proprioceptive System)
 고유수용기(固有受容器)란 원래 내이의 미로전정 기관과 피하조직, 근, 건관절 등에 분포되어 있는 지각신경섬유(知覺神經纖維)들 전부를 지칭하는 것이다. 이들 지각신경 섬유들은 공간에서 우리들로 하여금 체위를 유지하게 하고, 신체가 여러 가지 환경에 적응하는 데 필요한 운동기능을 관장하는 것이다. 그 중에서 특히 피하 압력감각기(Subcutaneous

Pressure Receptors)와 근육운동 감각기(Kinesthetic Muscle Activity Sensors)가 인체의 정위유지에 중요한 역할을 한다. 근육운동 감각기는 우리들로 하여금 신체의 상대운동 관계와 신체부분의 상대적 위치를 감지할 수 있도록 한다. 그리고 피하압력 감각기는 지구중력에 대한 우리의 자세를 감지할 수 있도록 하는 것이다. 즉, 우리가 앉아 있을 때는 엉덩이에 압력을 느끼게 되므로, 이를 판단하게 되며 서 있을 경우 발바닥, 누워 있을 때는 등에 각각 압력을 느끼게 된다. 그러한 감각을 오래 전부터 조종사들은 'Seat-of-the-Pants Sense'라 불렀다. 이 기관도 비행 중에 발생하는 여러 가지 형태의 가속도를 지구중력과 구분할 능력이 없으므로, 이에 의지하여 자세를 유지할 수 있다는 생각은 극히 위험한 것이다. 우리가 비행 중에 만일 압력 감각기를 통한 지각을 믿고 의지하게 되면 이것이 곧 공간 정위 상실 상태가 되는 것이다[8,10,11].

2.3 감각기관과 비행착각의 상관관계



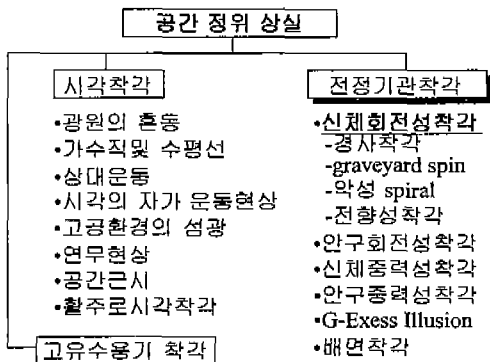
<그림 2-3>

정위유지 및 정위상실의 진행과정[6]

<그림 2-3>에서 보는 바와 같이 인체에는 평형

을 통제하는 중추신경기관(central nervous system)은 소뇌에 위치하며 눈, 전정기관, 체감의 세 가지 정보원으로부터 받은 information으로 평형을 유지하게 된다. 정상적인 경우에 자세정보가 실제와 일치하여 제공되고 소뇌가 이를 토대로 자세를 유지한다면 인간은 정위유지(orientation) 상태를 유지하나 만일 소뇌에 공급되는 정보가 실제의 평형상태와 일치되지 않을 때 인간은 감각적 착오(sensory illusion)에 빠져 혼란을 가져오게 된다. 그러나 이러한 경우라도 인간이 자신의 감각을 고집하지 않고 인공대조물(자세계)을 통한 자세 정보를 받아들인다면 정위유지가 가능하나 계기보다는 자신의 감각을 고집할 때는 정위상실(disorientation)에 빠지게 되는 것이다. 신체 회전성착각은 이러한 세 가지 감각기관에 회전운동이 주어질 때 그 정보가 앞서 제시한 몇 가지 요인에 의해 부정확하게 공급되어 회전상태를 평행으로 혹은 평행상태를 회전상태로 착각하는 현상을 의미하는 것이다[6,8].

2.4 비행착각의 종류



<그림 2-4> 비행착각의 종류[12]

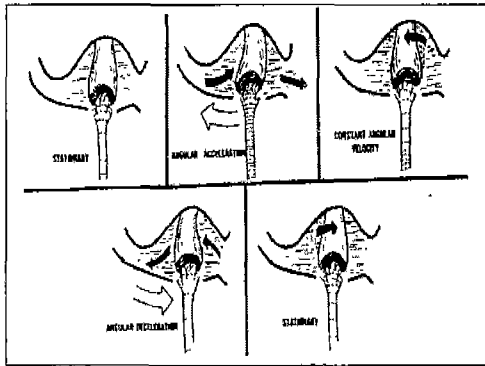
비행착각에는 <그림2-4>에서 보는 바와 같이 그

원인이 무엇인가에 따라 여러 형태가 존재하나 본 연구에서는 공군 항공기 사고 중 비행착각이 원인으로 밝혀진 사고의 대부분이 잦은 선회 중에 발생하였다는 사고분석 결과에 근거하여 전정기관에 의한 착각 현상 중 신체회전성 착각으로 한정하여 연구를 진행하고자 한다. 신체회전성 착각에 대한 개념과 원리를 살펴보면 다음과 같다.

2.4.1 신체회전성 착각

신체회전성 착각은 실제 회전 정도나 방향을 잘못된 인식한 결과 나타나는 잘못된 회전(또는 회전하지 않는다는)감각이다. 본질적으로, 신체회전성 착각은 삼반규관이 장시간의 회전, 즉 일관된 각속도를 정확하게 나타낼 수 없어 발생하는 결과이다. 예를 들어 어떤 사람이 요(yaw)축으로 각 가속도를 받게될 때, 처음에는 팽대정-내림프계(cupula endolymph system)의 역학관계가 각가속도계(즉, 회전을 감지기)로서 반응을 하기 때문에 생리적 범위 내의 자극 주파수에서 정확하게 지각하게 된다. 그러나 지상에서 회전의자를 통해서도 실험해 볼 수 있듯이 각 가속도에 이어 감속도가 일어나지 않고 대신 일정한 각속도가 나타난다면, 회전감은 점점 약해지고 팽대주가 점진적으로 각가속도 자극이 없을 때인 안정된 위치로 돌아옴에 따라 회전감이 사라지게 된다. 장시간의 일정한 각속도에 노출된 후, 예를 들어 10초간 일정한 속도로 회전 후에 감속도를 받는다면, 실질적으로 우리는 같은 방향으로 약간 느리게 회전한다 하더라도 팽대주-내림프계는 장시간의 일정한 각속도와 반대 방향으로 회전한다는 신호를 보내게 되는데 이러한 현상이 바로 신체회전성 착각인 것이다. 조종사가 고의적이거나 부지 불식간에 적당한 맹크로 장기적인 회전에 들어간다면 회전에서 얼마

간의 시간이 지난 후, 팽대주-내림프계가 일정한 각 속도에 반응할 수 없기 때문에 조종사는 회전감을 상실하게 된다. 이러한 신체회전성 착각 현상은 시야가 감소된 상황에서는 더욱 치명적일 수 있다[8]. 이러한 과정을 <그림 2-5>를 통해 가시적으로 볼 수 있는데 다음의 4가지 현상으로 요약될 수 있다. 첫째, 회전속도 또는 선회 속도가 점점 빨라지는 각 가속도 환경 하에서는 회전 및 선회 방향이 비교적 정확하게 감지가 된다. (<그림 2-5>의 위쪽 가운데)



<그림 2-5> 신체회전성 착각의 원리

둘째, 회전속도 또는 선회속도가 일정 회전율이 유지되는 등각속도 환경이 지속되면 삼반규관은 회전 상태에 적응이 되어 정지 또는 동속수평 비행감을 느끼게 된다. (<그림 2-5>의 위쪽 우측)

셋째, 회전속도 또는 선회속도가 점점 느려지는 마이너스 각 가속도(각 감속도)환경이 되면 비록 회전 또는 선회속도가 느려진다 하더라도 그 방향은 변화가 없음에도 불구하고 반대방향으로 회전 또는 선회에 진입한 것 같은 느낌을 느끼게 된다. (<그림 2-5>의 아래쪽 좌측)

넷째, 위의 첫째 또는 셋째의 현상은 그 각가속도 변화량이 $2.5 \text{ }^\circ/\text{sec}^2$ 이상이 되는 경우에만 회전 또는 선회감을 느끼게 되면 그 이하의 미세한 각가속

또는 각감속은 감지하지 못하거나 무시를 한다.

이러한 신체회전성 착각은 인간의 일상생활 중에서도 흔하게 돌입되는 현상인데 어린이 놀이터에 있는 회전판을 타고 난 뒤 내리고서는 곧바로 어지러움을 느끼고 걸어가지 못하는 현상을 신체회전성 착각의 좋은 예가 될 것이다. 신체 회전성착각은 주로 roll조작과 관련된 착각을 유발시키며 특히 경사(Bank) 자세감각에 착각현상이 심하게 나타나게 된다. 이러한 신체회전성 착각은 원리는 다르나 현상의 인지에 있어서 다음에 설명되는 경사착각과 유사한 면을 가진다[7,12].

2.4.2 경사착각

경사 착각은 롤(roll)축에 대한 각 변위의 잘못된 지각(즉 경사(Bank)졌다는 착각)으로 설명되며 조종사가 사실상 잘못 지각한 수직 방향으로 기울이는 결과를 가져온다. 내이의 삼반규관은 모든 자극에 반응하는 것이 아니라 역치(閾值:threshold) 이상의 롤 자극에 대해 정확하게 반응하므로 비행 중 잘못된 정보를 준다. 예를 들어, 가속도의 발생과 그 적용시간이 역치(閾值) 이하인 $2^\circ/\text{sec}$ 이 감각적 착각의 역치(閾值)는 $0.5 \text{ }^\circ/\text{sec}^2$ [10], $2.0 \text{ }^\circ/\text{sec}^2$ [12], $2.5 \text{ }^\circ/\text{sec}^2$ [8]등 분현마다 달리 표현을 하고 있다.)의 롤(roll) 각 가속도에 노출된 조종사는 롤(roll)을 지각하지 못한다. 수평직선 비행을 하려는 이 조종사가 10초 동안 지각하지 못하며 $2^\circ/\text{sec}$ 의 롤(roll)에 들어갔다고 가정해 보면 20° 의 경사(Bank)가 지게 된다. 만약 의도하지 않은 경사(Bank)가 갑자기 확실해져서 역치(閾值) 이상으로 항공기를 똑바른 자세로 롤 한다면 조종사의 감각은 항공기가 수평이라고 지각된 자세에서 시작되었기 때문에, 실제 수평 자세로 돌아왔을 때의 수정한 롤(roll) 방향으로 20° 경사(Bank)졌다는 착각에 빠지게 되고 경사감을 체험한다. 조종사가 자세계를 신

중하고 어려운 과정을 통해 올바르게 판독하여 항공기를 적절하게 비행할 수 있게 되었다고 하더라도 경사 착오가 오랫동안 지속될 수 있고, 그동안 비행 효율은 심하게 떨어지게 된다[8,12].

2.4.7 연구 가정사항

본 연구에서는 비행착각이 들입될 수 있는 환경을 인위적으로 설정하여 착각 들입시간을 도출하려는 것이 목적이므로 다음과 같은 연구 가정사항을 설정하여 진행하고자 한다.

첫째, 피 실험자는 전정기관 및 기타 신체조건이 정상인 비행대대 조종사로 선정하였으며 이를 위해 이비인후과 병력 여부를 확인하였다.

둘째, 실험시 항공기 선회율은 조종사의 평소 선회 조작으로 모발세포 감각 역치(閾值)($2.5^{\circ} / \text{sec}^2$) 이상으로 설정하였다. 이는 감각역치 이하에서 기동을 하면 감각모발이 자극을 받지 않아 본 연구에서 의도하는 신체회전성 착각의 실험자료를 얻을 수 없기 때문이다. 이를 위해 실험을 주관하는 조종사가 1초에 10도 경사를 조작하였으며 이는 현재 조종사들이 계기비행을 행할 시 조작하는 실제 조작 형태이다.

셋째, 피 실험자 개개인의 체감(somatic proprioceptor)특성에 따라 신체회전성 착각 들입시간이 영향을 받을 수 있으나 이 특성은 고려하지 않는다.

넷째, 피 실험자는 시각정보가 차단된 상태로 자세계 또한 참조하지 못하는 상황으로 설정하였다. 이러한 경우는 인간의 평형유지를 위한 시각정보가 뒤에서 언급할 주변시를 통해 얻어지는데 야간, 운중 등 시각정보가 제한된 상태에서 시각의 자가운동 현상(Auto-Kinesis), 공간근시(Space Myopia), 잔상현상 등의 시각적 착각 현상 등이 조종사의 심리적 요소와 결합하여 주의실패(注意失敗, Attention Failure),

주의동조(注意同調, Channelized Attention)등을 발생시킬 때 조종사는 일정시간 시각정보를 받아들이지 못하거나 인식하지 못할 수 있다는 유추에서 설정된 가정사항이다. 이런 상태에서 조종사는 일정시간 전정기관에 의해서만 평형을 유지하게 되는 것이다. 각각의 현상에 대한 내용은 다음과 같다.

가. 시각의 자가운동 현상(Auto-Kinesis)

완전하게 광원이 차단된 암실에서 하나의 희미한 광원체를 응시할 경우 광원체는 고정되어 있어도 제각각 마구 흔들리는 것처럼 보이는 현상이다[7].

나. 공간근시(Space Myopia)

바깥 경치가 변화없이 평이하고 일정한 해상상공, 사막이나 설원지대 상공, 우주공간 등에서 발생하는 안구의 생리적 착각으로서 시각에 별다른 자극의 변화가 없을 때 안구의 모양체가 휴식상태에 들어가게 된다. 따라서 원거리 시력이 평소에 비하여 약간의 저하현상이 나타나게 된다. 심한 경우 20m 거리에까지 다가와서야 갑자기 인지가 되어 없던 물체가 갑자기 눈앞에 나타난 것과 같은 느낌이 드는데 이를 공간근시라 한다[7].

다. 잔상현상

망막의 시세포들은 빛을 받으면 흥분하여 시각정보를 발생하여 시신경을 통하여 뇌로 보내진다. 그러나 빛이 제거되더라도 일정시간 동안은 그 흥분상태가 지속된다. 한 번 밝은 면의 색을 30초 이상 주시하고 있다가 갑자기 어두운 면으로 시선을 돌리면 방금전에 보고있던 색의 보색으로 색이 바뀐 채 같은 형태의 상이 아직 어른거리는 것을 볼 수 있을 것이다. 이것이 잔상현상으로 이로 인하여 허깨비로 오인되거나 무의식중에 이로 인한 착시를 유발시킬 수 있다[7].

라. 주의실패(注意失敗, Attention Failure)

과도각성(High Arousal) 상태에서는 수행율이 떨어지고 그로 인해 평소보다 주의 전환(Attention Shifting)이 유연하게 일어나지 않는다. 그럼으로써 한 자극, 한 생각에 주의가 고착됨으로써 기타 다른 자극에 대해 주의가 적절히 전환되거나 분배되지 않으면 주의실패가 된다[13].

마. 주의동조(注意同調, Channelized Attention)

시각이나 청각 등의 정보가 동시에 여러 계통으로 여러 종류의 자극이 가해진다 할 지라도 인간이 오직 하나의 자극에만 선별적으로 주의를 집중하면 나머지는 무시되는 현상을 의미한다. 이는 마치 라디오나 TV가 여러 가지의 방송전파가 있지만 오직 하나의 방송 주파수만이 동조(同調)되어 들려주는 이치와 같으며 비행 중에도 지상과의 교신에 주의를 집중하면 다가오는 위험상황을 인지하지 못할 수도 있다. 즉 '다른 자극에 집중하여 보아야할 순간에 보아야할 것을 보지 못하는 현상'이 나타나고 이로 인하여 상황에 대한 올바르지 못한 판단을 하게된다 [7].

바. 중심시(中心)와 주변시(周邊視)

많은 정보를 제공하는 눈은 그 기능에 있어 중심시와 주변시로 구분될 수 있다. 우리가 전방의 한 물체를 쳐다보고 있을 때에, 보고 있는 물체뿐만 아니라 그 물체의 주변에 있는 다른 것들도 뚜렷하지는 않지만 보이는 것을 알 수 있다. 전방의 한 물체를 쳐다보게 되면 전방에서 반사되어 나온 빛이 눈속으로 들어가 망막에 상을 맺으면서 보고자 하는 물체는 망막의 중심부에 상을 맺고 그 물체의 주변에 있는 것들은 각각의 위치에 따라 망막의 주변부에 상을 맺게 된다. 따라서 보고자하는 주변에 물체

는 아주 예민한 망막의 중심부를 통하여 보게 되므로 선명하게 보이고, 주변부에 있는 사물들은 예민하지 못한 망막의 주변부를 통하여 보게 되므로 희미하게 보이는 것이다. 이와 같이 한쪽 눈으로 전방의 한 점을 쳐다보고 있을 때에 그 눈으로 볼 수 있는 외계의 전체범위, 즉 주시하고 있는 점을 포함하여 주변의 희미하게 보이는 모든 범위를 그 눈의 '시야'라고 한다. 여기에서 망각의 주변부를 통한 시각을 '주변시'라고 하는데 이는 외부의 물체를 발견하고 그 상호위치 관계를 파악할 수 있도록 해준다. 녹내장과 같은 병적인 이유로 시야가 매우 좁아짐으로써 주변시가 없어지고 중심시만 남으면 시력은 정상이어도 외계와의 위치관계가 파악되지 않기 때문에 자유로운 신체활동을 할 수 없게 된다[14]. Gillingham의 'Spatial Orientation in Flight'에서는 이러한 내용을 보다 상세하게 기술하고 있는데 중심시는 상대적으로 세밀하며, 정보처리능 보통 의식이 있는 상태에서 잘 나타나고, 자극 에너지 및 굴절 오차와 같은 물리적 매개 변수와 매우 관련이 깊다고 하며 그 범위를 중심 30도 부근으로 설명하고있다. 즉 중심시는 환경에서 인간이 방향을 잡는데 주로 관여하지는 않지만, 거리 및 심도의 판단으로부터 얻게되는 것, 그리고 비행계기를 읽어 얻는 것과 같이, 의식적으로 방향을 인식하는데는 큰 도움을 주는 시각정보인 것이다. 또한 주변시는 공간의 위치 및 정위 측정과 식별에 사용되며 "where"이라는 질문과 일반적으로 관련이 있는것으로 중심시보다 상대적으로 낮은 해상도를 갖는다. 이러한 주변시는 주로 환경에서 개인의 정위를 유지시키는 것과 관련이 있는데 이 기능은 대부분 중심시와는 독립적이다. 사람이 걸거나 자전거를 타기 위해 주변시각으

로 충분한 정위 신호를 얻는 동시에 읽는 작업으로 중심 시각을 완전히 사용할 수 있다는 사실로 볼 때 명백해진다. 비행환경에 있어 시각고착현상(Fixation)은 환경적 요인 및 심리적 요인에 의해 조종사의 시력이 한쪽으로 고착되어 주변시가 무의식적으로 상실될 때 일어나는 현상이다. 이러한 경우에는 시야에 들어오는 '무엇(What)'에 대한 정보는 상실되어 평형감각 차원에서의 시각정보(visual sense)는 차단되었다고 볼 수 있다[12].

3. 실험설계 및 분석결과

신체회전성 착각에 돌입되는 시간은 인간의 평형감각에 인지를 측정하기 것이기 때문에 현장과 동일한 환경을 구성하지 않고서는 많은 예러가 개입될 것으로 판단하여 비행 중인 항공기내의 조종사를 대상으로 하였으며 예상되는 영향인자로 항공기속도, 경사각, 조종사 비행시간 및 조종사 체형을 선정하여 실험을 행하였다. 도출된 실험 자료에 대해서는 분산분석을 통해 유효한 요소를 선별하고, 선별된 요소에 대해서 회귀분석을 통해 수리적 모형을 도출하였다.

3.1 실험설계 및 절차

3.1.1 실험대상

실험을 실시한 조종사는 시력이 조종사 정상범위(0.8이상)이고, 귀로 인한 질병을 경험하지 않은 평균 조종사 35명을 대상으로 하였다.

3.1.2 실험 방법

실험매체는 전 후방식 복좌(또는 side by side 좌

석)항공기를 이용하였으며 전방에 위치한 조종사는 조종 및 경계를 하고 후방(또는 우측)석에 탑승한 조종사는 피 실험자가 되어 정해진 실험 절차대로 행하였다. 실험은 1명의 조종사에 대해 경사각 20도, 30도 및 40도를 각 1회씩 실시하였으며 피 실험자가 초기 경사(rolling 기동)를 인지하고 나서 지속된 경사 상태를 수평으로 인지하는데 까지 소요되는 시간을 항공기에 탑재된 녹음기를 이용하여 비행 후에 측정하였다. 구체적인 실험절차를 살펴보면 다음과 같다.

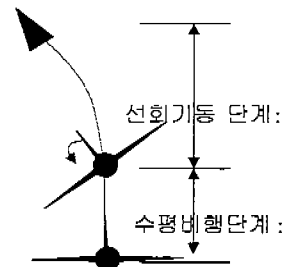
가. 1차 : 20도 경사(bank) 실험

임의의 속도 정속, 수평 상태를 유지한 상태에서 전방에 위치한 조종사가 선회기동을 시작하면서 후방식 조종사에게 눈을 감게 한다.(이때 rolling rate는 자신의 평소 조작으로 행한다) 20도 경사가 완료되면 "20° bank" 라고 말하며 피 실험조종사는 눈감은 상태에서 수평감을 느끼면 "수평"이라고 말한다. 피 실험 조종사가 수평이라고 말하면 자세를 수평으로 하고 피 실험자에게 눈을 뜨게 한다. 다음 실험까지 약 30초 이상 정상 수평 비행을 실시한다.

나. 2차 : 30도 경사(bank)실험도 동일하게 실시.

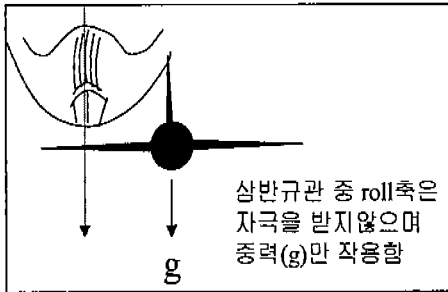
다. 3차 : 40도 경사(bank)실험도 동일하게 실시.

3.1.3 항공기에 미치는 외부력



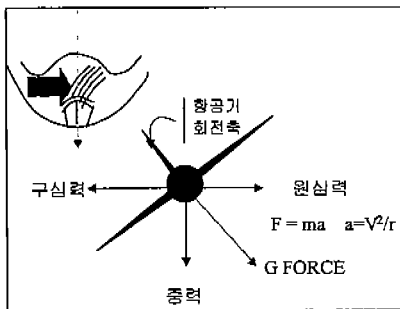
<그림 3-1>실험 전,후 비행기동 형태

우선 비행의 형태는 <그림 3-1>에서 보는 바와 같이 실험준비 단계인 수평비행단계와 실험단계인 기동(rolling) 증으로 구분되며 속도 및 고도는 두 단계 모두 동일한 등속 수평비행을 행한다.



<그림 3-2> 수평 비행중의 외부력[15,16]

경사기동 전에는 항공기가 등속 수평비행 상태이므로 <그림 3-2>에서 보는 것처럼 중력만 작용하게 되어 피 실험자는 시각 정보가 없어도 항공기의 자세를 바로 인지할 수 있다.



<그림 3-3>

선회 기동중의 외부력[15,16]

실험 중에 항공기에 미치는 외부력은 다음과같이 작용한다. 우선 평균 가속도는

$$a(m/sec^2) = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \text{ 이고, } v_2 \text{는 실험 후 속도, } v_1 \text{는 실험 전 속도를 나타낸다. 예를 들어 어떤 항공기가 정지선으로부터 } 100 \text{ m/sec 속도로 } 5 \text{ 초간 선운동을 하였다고 하면 평균가속도는 } \frac{100m/sec - 0m/sec}{5sec} = 20 \text{ m/sec}^2 \text{ 이다. 가속도는 'G'라는 단위를 흔히 사용하는데 } 1G = 9.81 \text{ m/sec}^2 \text{ 이므로 이 항공기의 가속도를 G로 환산하면 } 2.04G \text{ 가 가해지는 것이다. 이것은 항공기가 하강하여 지상표적을 사격한 후 상승하거나, 선회비행을 할 때에도 같은데 구심가속도를 구하는 공식은 } a = \frac{v^2}{r} \text{ 으로서 } \gamma \text{ 은 회전반경(m), } v \text{ 는 접선속도(m/sec)를 나타낸다. 예를 들어 어떤 전투기가 접선속도 } 154 \text{ m/sec (약 } 300 \text{ knots)이면 이것을 G로 환산할때 } 3.1G \text{가 부하되는 것이다[5]. 실험에서 구상한 것처럼 경사기동이 시작되면 전정기관의 섬모세포(hair cell)가 자극을 받아 경사감을 바로 인지하며 그와 함께 항공기에는 원심력이 작용하게 된다. 항공기에는 중력과 원심력이 동시에 작용하여 피 실험자는 중력과 원심력의 합력 방향으로 자세감각의 수평축이 형성된다. 따라서 일정시간이 경과하면 섬모세포는 합력방향으로 직립하여 그 방향으로 수평감을 인지하게 된다. 본 연구는 이러한 항공역학적 외부력이 가해진 상태에서 피 실험자의 전정기관에도 동일한 영향을 미칠 것인데 속도 및 경사각에 따른 결과 값의 차이를 측정하고자 하는 것이다.$$

3.2 실험 결과 및 분석

3.2.1 실험실시 현황

실험은 HH-60, T-41, T-37, F-5, F-4 등 공군 복좌 군용항공기를 매체로 이용하여 진행하였으며 실험속도는 각 항공기 고유의 순항속도 범위를 적용 하였다. 실험속도를 포함한 피 실험 조종사의 신체

3.2.1 실험실시 현황

3.2 실험 결과 및 분석

3.2.1 실험실시 현황

실험은 HH-60, T-41, T-37, F-5, F-4 등 공군 복좌 군용항공기를 매체로 이용하여 진행하였으며 실험속도는 각 항공기 고유의 순항속도 범위를 적용 하였다. 실험속도를 포함한 피 실험 조종사의 신체

특성(키, 몸무게) 및 총 비행시간에 대한 기초통계자료는 다음의 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 실험속도 및 피 실험자 기초자료

		평균	표준편차	범위
실험 속도	km/hour	470.84	148.02	185~648
	NM/hour (knots)	259.74	76.21	100~350
키(cm)		173.45	3.83	165~182
몸무게(kg)		68.29	5.73	59~78
비행시간(hour)		847.19	690.37	50~2300

실험횟수는 각 기종별로 다양하게 35회를 실시하였으며 실험기종, 속도, 해당기종 조종사의 비행시간 및 표준체중은 다음의 <표 3-2>와 같다.

<표 3-2> 항공기 기종별 실험 기초자료

기종	실험 횟수	항공기 속도 (km/h)	피 실험자 비행시간 (hour)	피실험자 표준체중
HH-60	1	222	1300	-6.6
T-41	3	185	920~1650	0.2~1.4
T-37	9	296~444	50~1400	-6.2~7.5
F-5	14	500~648	219~2300	-3.1~7.8
F-4	8	556~741	430~1576	-2.8~8.1

실험 속도 표현은 보편적으로 이해하기 쉬운 단위인 km/h를 사용하고 특별히 항공기에서 사용되는 속도단위가 NM/hour(nautical mile/hour)인 관계로 두 단위를 모두 표시하였다. 또한 조종사의 키와 몸무게에 대해서는 브로카(Broca)공식에 의거한 표준체중으로 환산하여 적용하였으며 브로카(Broca)공식은 운동 생리학에서 인체의 표준 체중을 구하기 위해 사용되는 공식으로 '체중-((신장-100)×지수)'이며 지수는 남자기준 0.9, 여자는 0.85를 적용한다[17].

<표 3-2>에 표시된 숫자에서 표준 체중 0을 기준으로 음수는 표준체중에 미달되는 마른 체형을, 양수는 비만정도를 나타낸다.

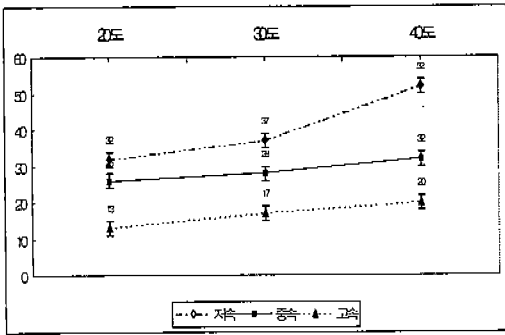
3.2.2 실험결과

실험결과에 대해서 항공기의 속도(SPD), 경사각(BANK), 조종사 개인 비행시간(FTIME) 및 조종사 체형(BODY) 등을 고려요소로서 신체회전성착각에 돌입되는 시간과의 관계를 분석하였다. 분석에 앞서 속도와 경사각에 대해 자료가 어떤 형태로 나타나는지를 보기 위해 속도와 경사각을 3개의 범주로 나누어 정리하였다. 속도는 편의상 저속(185~300km/hour, 100~160knots), 중속(300~500km/hour, 170~270knots), 고속(500km/hour, 270knots 이상)으로 나누고 경사각은 실험된 자료인 20도, 30도, 40도로 나누어 실시한 결과 신체 회전성착각에 돌입된 시간의 평균값은 <표 3-2>와 같은 결과를 얻었으며 이것을 그래프로 나타내면 <그림 3-3>과 같다. 자료와 그래프 상으로 볼 때 속도가 증가될수록 경사각이 적을수록 신체회전성착각 돌입시간이 빨라짐을 알 수 있다.

<표 3-3> 속도 및 경사각에 따른 평균 착각 돌입시간

(단위: 초)

속도 \ 경사각		20도	30도	40도
		저속	32	37
중속	26	28	32	
고속	13	17	20	



<그림 3-4>

속도 및 경사각에 따른 착각 돌입시간

3.2.3 분산분석

실험결과에 대해서 통계적으로 유의한 요인을 찾기 위해 통계프로그램 SAS를 이용하여 분산분석 (GLM ; general linear models procedure)을 실시하였다. 비행착각에 돌입되는 시간(SDT)을 종속변수로 설정하고 항공기의 속도(SPD), 경사각(BANK), 조종사 비행시간(FTIME) 및 조종사 체형(BODY)를 독립변수로 설정하여 실시하였으며 종속변수 각각의 자료는 범주형 자료로 처리하여 통계분석 하였다.

즉 항공기 경사각은 20, 30, 40도의 3개 범위로 구분하고, 항공기 속도는 기종별로 185Km/h부터 648Km/h 까지의 12개 범주로 구분하였다. 또한 조종사 비행시간은 500시간 이하, 500~1000시간, 1000~1500시간, 1500시간 이상의 4개 범주로 나누었으며, 조종사 체형은 브로카 공식에 적용한 수치를 13 단계로 나누어 각 체형별 특성을 고려하였다.

분산분석에 대한 결과는 다음의 <표 3-4>와 같다. <표 3-4>의 분산분석표를 보면 각 요인이 유의한 차이가 있는지를 P-value를 통해서 볼 수 있는데 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 신체회전성 착각에 돌입되는 시간에는 경사각(BANK)과 항공기 속도(SPD)가 유의한 차이를 보이며 조종사 비행시간(FTIME)과 조

<표 3-4> 분산분석표

요인	SS	DF	MS	F	P
BANK	2735.4	2	1367.7	13.48	0.0001
SPD	11705	11	1064.1	10.49	0.0001
FTIME	396.5	3	132.2	1.30	0.2789
BODY	2020.9	9	224.5	2.35	0.0211
오차	7455.1	78	95.6		
합계	24312.96	103			

종사 체형(BODY)은 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다. 또한 이 모델의 R-Square는 0.69로 나타났다.

3.2.4 실험 결과분석 종합

피 실험자 35명에 대하여 시각정보가 차단된 상태에서 회전자극을 주었을 경우 신체회전성 착각에 돌입에 영향을 주는 인자를 분석한 본 연구를 종합하면 다음과 같다.

가. 실험결과 185~300km/hour (100~160knots)의 속도범위, 20~40도 경사각에서 조종사는 대략 32~52초 사이에 착각현상이 일어났으며, 300~500km/hour(170~270knots)의 속도범위, 20~40도 경사각에서는 26~32초 사이에 진입하였고, 500km/hour (270knots) 이상, 20~40도 경사각에서는 13~20초 사이에 착각현상에 돌입하였다. 따라서 시각정보가 제한된 상태에서 선회비행 중인 조종사가 자세계를 참조하지 않는다면 속도에 경사각에 따라 차이는 있으나 일정시간이 경과 할 때 신체회전성 착각에 돌입될 수 있다. 따라서 선회비행 중에는 이러한 사실을 인지하여 타계기와 자세계를 반복 확인(Cross Check)하는 노력이 필요하고 편조 내 조종

사, 비행 통제자 및 관제사는 해당 조종사에 대해 일정시간 간격으로 주의를 가해야 할 것으로 판단된다.

나. 통계분석 결과 신체회전성 착각에 돌입되는 현상은 항공기 속도에 따라 유효한 차이가 있으며 항공기 속도가 증가할수록 진입되는 시간은 짧다.

다. 통계분석결과 신체회전성 착각에 돌입되는 현상은 항공기 경사각에 따라 유효한 차이가 있으며 경사각이 작을수록 진입되는 시간은 짧다.

라. 통계분석결과 조종사의 비행시간은 신체회전성 착각 진입 현상에 유효한 영향을 미치지 않는다. 즉, 조종사의 비행시간이 많다고 해서 착각에 대한 적응력을 갖는다거나 비행시간이 적다고 해서 특별히 많은 차이가 있는 것이 아니므로 이에 대한 지속적인 주기적인 교육과 훈련이 필요하다고 판단된다.

마. 통계분석결과 신체회전성 착각에 돌입되는 현상은 조종사 체형(BODY)이 유효한 영향을 미치지 않는다. 즉, 브로카(Broca)공식을 기준으로 볼 때, 표준을 넘는 조종사나 미달하는 조종사 사이의 착각 돌입시간에는 차이가 없다.

이상과 같이 실험자료에 대한 분석을 해보았다. 통계 프로그램 SAS를 이용한 분산분석에서 위 분산분석의 R-Square는 0.69로 설정된 4개 요소가 비행 착각에 유의한 영향을 미치는지에 대한 가설은 상당한 설득력을 가진다고 판단된다. 또한 본 연구가 군용 항공기를 대상으로 한 실험으로 다양한 형태를 실험하기가 쉽지 않아 계기비행에서 주로 기동하는 20~40도 경사각 범위와 각 기종별 순항속도 185~648 km/hour(100~350knots) 라는 제한적 범위에 대해서만 행해졌으나 보다 넓고 다양한 영역으로 실험이 행해진다면 분석결과와 신뢰도를 보다 향상시킬

수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

GULF戰에서 야간에 발생한 비행사고의 80%가 비행착각에서 발생하였다는 분석보고에서도 볼 수 있듯이 비행착각에 의한 사고는 전 세계적으로 증가 추세에 있으며 큰 눈점이 되고 있다[21]. 기계적 결함에 의한 사고가 감소추세에 있는 것에 비해 인적 요소에 의한 사고는 상대적으로 증가 추세에 있는 것은 인적요소에 대한 많은 연구가 뒤따라야 한다는 것을 의미한다. 특히 비행착각에 의한 사고는 최근 증가 추세에 있고 정상상태의 항공기와 조종사가 아무런 조치도 취하지 못한 상태에서 중사고로 이어진다는 점에서 볼 때 심각한 문제가 아닐 수 없다. 본 연구는 비행착각 중에서도 특히 사고 발생확률이 높았던 운중, 야간비행 상태를 가정하여 신체회전성 착각을 실험하였고 현장에 사용할 수 있는 의미있는 결과 도출을 시도하였다. 다만 본 연구가 인간의 감각을 실험하는 것이니 만큼 조종사들이 경사상태를 수평으로 인지하는데는 많은 시간의 차이가 있었으며 수평과 경사진 상태를 구별하기 어려운 애매한 시간이 존재하므로 인해 적지 않은 오차도 포함되어 있을 것으로 생각한다. 그러나 비행착각에 의한 사고는 이렇듯 불안정한 인간의 감각을 자세계보다 더 믿기 때문에 발생하였고 이러한 사실을 조종사들이 인식하지 못한다면 비행착각에 의한 사고는 항상 발생될 가능성이 잠재되어 있는 것이다. 더구나 실험에 임한 일부 조종사들이 실험 후에 심한 어지러움을 느끼거나, 구토증세를 느끼기도 하였는데 본 연구에서 가정된 상황이 비행 중에 발생한다면 심리적 불안요인과 신체의 좋지 않은 상태(Condition)가 복

합적으로 작용하여 비행안전의 저해요인으로 작용할 수 있다고 생각한다. 따라서 이러한 실험결과는 비단 조종사뿐 아니라 비행 관제사 및 비행 통제관들이 인식하여 비행착각에 돌입될 가능성이 있는 상태의 조종사에 대해 일정시간 간격으로 집중적인 관찰과 조인이 행해져 착각 진입으로 인한 비행사고를 예방토록 해야 할 것이다. 이러한 비행착각 사고를 예방하고 차후 비행착각 분야의 향상된 연구를 위해 본 연구가 작은 발판 역할이 될 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 홍순길·이강석, 문화적 요인이 항공안전에 미치는 영향, 항공안전과 Human Factors 세미나, 1997 p.69.
- [2] 공군본부 감찰관실, 유형별 항공기 사고사례집, 1993.
- [3] 고민수, 인체의 전정기관, 항공의학 34권, 1996, pp.139-165.
- [4] 구본술, 비행착각 훈련장치, 항공의학 25권, 1977.
- [5] 박병욱, 운동역학의 공간에서의 평형유지, 항공의학 34권 1호, 1986, pp.19-28.
- [6] 황정민, 비행착각 훈련동안의 안구반응, 항공의학 29권, 1986, pp.61-68.
- [7] 엄기성, 비행착각의 중요성과 훈련 및 관리방안, '97 항공안전 세미나, 1997.
- [8] 공군 항공의학 적성훈련원, 항공생리학 교본, 1997.
- [9] 이회승, 국어사전, 민중서림, 1997, p.1527.
- [10] 강두희, 생리학, 신광출판사, 1988.
- [11] 백만기, 최신이비인후과, 일조각출판사, 1993, pp.3-28.
- [12] Malcolm Braithwaite, Evaluation of The Spatial Disorientation Sortie in Training Aviators, U.S. Army Aeromedical Research Laboratory, 1997.
- [13] 권오성, 항공기 위기상황 시 조종석 의사소통 효율성 증진에 관한 연구, 동국대학교, 1995, pp.43-48.
- [14] 박재갑, 인간생명과학, 서울대학교 출판부, 1994, pp.283-294.
- [15] 조육찬, 항공역학의 기초, 경문, 1994.
- [16] Paul A. Tipler, 물리학, 청문각, 1996.
- [17] 김의수, 운동과 성인병, 태근문화사, 1995, p130
- [18] 이계오·박진우, 표본조사론, 한국방송통신대학교 출판부, 1995, p.41.
- [19] 성내경, 분산분석 & 회귀분석, 자유아카데미, 1996.
- [20] 김연형·이기훈, 통계자료분석, 자유아카데미, 1997.
- [21] Malcolm Braithwaite, Evaluation of The Spatial Disorientation Sortie in Training Aviators, U.S. Army Aeromedical Research Laboratory, 1997.

[98년 10월 22일 접수, 99년 4월 25일 최종수정]