

T-50/A-50 조종사의 인체 진동 영향성 평가

The Evaluation of Human Vibration Effect on T-50/A-50 Pilot

문성욱* · 조대현** · 김영익**

Seong-Wook Moon, Dae-Hyeon Cho and Young-Ik Kim

Key Words : Human Vibration(인체 진동), Cockpit(조종실), Environmental Vibration(환경 진동), RMS (실효치)

ABSTRACT

The T-50/A-50 Golden Eagle was developed for a supersonic trainer and light combat aircraft. At the design stage, vibration control plans were established and applied. For cockpit vibration, crew comfort vibration level was defined by the requirement of MIL-A-8892. It is found that the T-50/A-50 meets the requirement of cockpit vibration from the flight test data analysis. This paper contains the results of cockpit vibration analysis using the flight test data and the results of human vibration analysis for the pilot inside aircraft. The human vibration level of pilot is increased as dynamic pressure is increased and at the specific high dynamic pressure, the ride comfort indicates "a little uncomfortable". Overall analysis results show that the vibration level of T-50/A-50 cockpit is tolerable and not critical for pilot's comfort.

1. 서 론

T-50/A-50 골든 이글은 고등 훈련기 및 경공격기로써 국내 최초로 개발된 초음속 항공기이고, 현재는 초도비행 이후 4호기까지 비행 시험이 진행 중이다. T-50/A-50 골든 이글 2호기, 3호기에는 환경 진동 및 기총 발사 진동에서의 영향성을 파악하여 설계 검증을 하기 위해 진동 센서들이 장착되어 있고, 실제 비행 시험에서 획득된 신호를 분석하여 진동 요구도와 비교 검증하는 과정을 거친다. 이런 과정은, 미 군사 규격 MIL-A-8892[1]에 근거하여 만들어진 T-50/A-50 진동조절계획에 근거하여 이루어지고, 형상과 운용조건이 유사한 F-16에서 사용한 방법을 수정 적용하고 있다. 조종실 진동 관련 요구도는 MIL-A-8892[1]에 나타나 있듯이 100Hz 미만의 주파수 영역에서만 고찰되었고, 요구도 수치와 단순 비교하여 판단하였다. 조종실 진동은, 항공기를 운용하여 주어진 임무를 수행해야 하는 조종사에게 안락함의 정도에서부터 보건상의 문제에 이르기까지 영향을 미치게 되고, 불편한 진동 환경 하에서는 임무 수행에 차질을 줄 수 있으므로, 항공기 개발에 있어서 고려해야 할 중요한 사항이다. 본 연구에서는 T-50/A-50 비행

시험 결과를 토대로 진동조절계획에 명시되어 있는 조종실 진동 요구도에 대한 검증과 아울러 ISO2631-1:1997(E)[2]에서 설명되고 있는 방법들을 적용하여 비행 중 전신 진동에 노출되어 있는 T-50/A-50 조종사의 인체 진동 영향성을 분석하였다.

2. 조종실 진동 요구도 및 비행 시험

2.1 T-50/A-50 조종실 진동 요구도

T-50/A-50 조종실 진동에 관한 요구도는, 미 군사 규격 MIL-A-8892[1]을 토대로 작성된 PIDS(Prime Item Development Specification)[3]에 명시되어 있는데 그 내용은 MIL-A-8892[1]의 "Crew Comfort Vibration"과 같다. 조종실 진동 요구도는, 비가속 비행 중에 조종실 내 조종사의 안락도에 영향을 줄 수 있는 주요 구조물과, 조종석, 러더 페달, 조종간 등의 진동이 22Hz 이하에서는 $\pm 0.1g$ 를, 22~86Hz 범위에서는 0.004 in Double Amplitude를, 86Hz 이상에서는 1.5g를 각각 초과하지 않도록 규정하고 있다.(그림 1) 또한 저고도 비행처럼 특별한 임무 요구도에 대해 요구되는 진동 레벨을 만족시키기 위해서는 능동/수동 진동 차단 방법을 적용하는 것이 가능하다고 명시하고 있다.

* 한국항공우주산업(주)
E-mail : swmoon@koreaero.com
Tel : (055) 851-1845, Fax : (055) 851-6169

** 한국항공우주산업(주)

MIL-A-8892 (USA7)

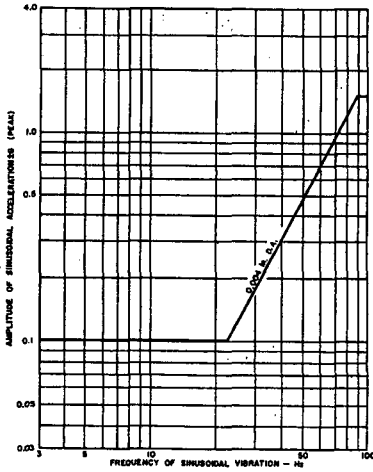


그림 1. 조종실 진동 레벨 요구도

2.2 진동 센서 장착 위치

T-50/A-50 골든 이글의 환경 진동 및 기총 발사에 의한 진동 환경을 규명하기 위해서 많은 진동 센서들이 항공기 내, 외부에 장착되어 있고 그 중 조종실 내의 진동 레벨을 확인하기 위해서 2호기, 3호기 조종실 내에 장착되어 있는 6개의 진동 센서 - 전방석 조종간 및 러더 페달, 후방석 조종간 및 러더 페달, 산소 조절기, 조종석 - 을 사용하였다. 조종실 진동을 확인하기 위해서 2호기 3호기에는 총 9개의 3축 가속도계가 조종실 내부에 장착되어 있다. (그림 2, 3)

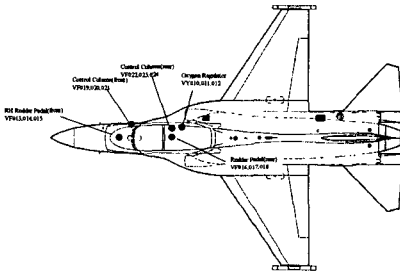


그림 2. 2호기 조종실 진동 센서 5개

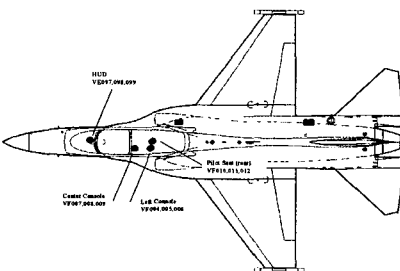


그림 3. 3호기 조종실 진동 센서 4개

2.3 비행 시험 진동 신호 처리

진동 신호 계측을 위해서 3축 가속도계(Vibra Metric, 3000X)가 사용되었고, 샘플링 주파수는 8049Hz(2호기)/8130Hz(3호기) 이며, 비행 중에 계측된 진동 센서 신호는 T-50/A-50에 장착되어 있는 테이프 저장소에 저장되어 지상에서 후처리 과정을 거쳐 제공되었다. 제공된 진동 신호는 IADS 프로그램을 이용하여 기동 분석을 하고, 비가속 수평 비행 데이터들만을 저장하여 조종실 진동 분석에 사용하였고, 이 때 MATLAB GUI(Graphic User Interface) 프로그램을 자체 제작하여 사용하였다.

첫 번째, MIL-A-8892[1]에 명시되어 있는 조종사의 안락도에 대한 요구도 만족 여부는 3~22Hz, 22~86Hz, 86~100Hz 3개의 주파수 대역에서 5Hz 간격의 bandpass filter를 이용하여 각각의 가속도 실효치(r.m.s, root-mean-square)를 계산하여 해당 주파수 대역 요구도와 비교하였다. 특정 비행 시험 조건에서 전방석 조종간 및 러더 페달, 후방석 조종간 및 러더 페달, 산소 조절기 및 조종석 진동 신호를 모두 계산하여 비교한 후 그 중 가장 큰 값을 찾아 주파수 대역별 요구도와 비교하여 대표 값으로 사용하였다.

두 번째, ISO2631-1:1997(E)[2]에서 설명된 내용을 T-50/A-50 비행 시험 결과를 이용하여 조종실 내의 조종사 인체 진동으로 확대 적용하였다. 개발 중인 항공기의 특성상, 진동 외의 목적으로 많은 센서를 장착하여 운용해야 하므로 조종실 진동 측정을 위해서 동시에 다수의 센서 사용이 쉽지 않고, 사출 좌석의 사용으로 좌석 자체에 센서 장착이 불가능하므로, ISO2631-1:1997(E)[2]에서 측정하도록 추천하고 있는 위치에서의 가속도 측정은 불가능하였다. 대신에 조종실 바닥을 통해 들어오는 진동이 모두 조종석으로 전달된다고 가정하고, 후방석 러더 페달을 통해 발로 진동이 전달된다고 가정하여, ISO2631-1:1997(E)[2]에서의 방법을 적용하였다. 조종사의 안락도에 대한 분석에서는, 엉덩이 부분에서의 병진 가속도, 회전 가속도, 그리고 좌석 등받이에서의 가속도를 조종석 바닥 면에서의 가속도로 대체하여 좌석 자세에서의 인체 진동에 적용하였고, 조종사의 보전에 대

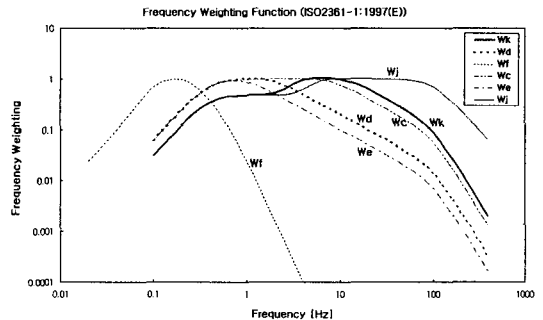


그림 4. 각 축 방향의 가중 함수

한 분석에서는 조종석 바로 밑바닥에 장착되어 있는 진동 센서만을 사용하였다. 측정된 각 방향의 가속도를 1~80 Hz 대역 필터를 이용하여 필터링하고, 주파수 가중 함수(그림 4)를 적용하여 가중화된 가속도를 얻은 후 각각의 곱셈 인자를 곱하여 최종적으로 가중화된 가속도를 얻는다.

파고율(crest factor)이 9보다 작으면, (식 1)에서처럼 가중화된 가속도(weighted acceleration) $a_w(t)$ 를 이용하여 가중화된 가속도 실효치(weighted r.m.s acceleration) a_w 를 각 축에 대하여 계산하고, (식 2)에서처럼 각 축에 대한 결과의 제곱합에 대한 제곱근으로 전체 진동 값 $a_{overall}$ 을 계산하여 진동 영향성 평가를 수행한다.

$$a_w = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w(t)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (식 1)$$

$$a_{overall} = \left(\sum_i a_w^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (식 2)$$

만약 파고율이 9보다 큰 경우에는 가중화된 가속도 실효치를 사용하는 것이 부적절하므로 (식 3)에서 정의된 네 제곱 진동 피폭값(the fourth power vibration dose value) VDV를 각 축에 대하여 계산하고, (식 4)에서 전체 진동 피폭값 $VDV_{overall}$ 을 계산할 수 있다.

$$VDV = \left(\int_0^T a_w(t)^4 dt \right)^{\frac{1}{4}} \quad (식 3)$$

$$VDV_{overall} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (식 4)$$

3. 비행 시험 결과 분석 및 고찰

3.1 조종실 진동 요구도 비교 분석

T-50/A-50 끝은 이글의 조종실 진동 레벨은 2호기 72차 비행부터 122차 비행까지의 결과를 MIL-A-8892[1]에서 명시되어 있는 3가지 주파수 대역에서 비교하였다.(그림 5) 항공기 진동은 고도, 속도 등 여러 가지 비행 변수에 따라 변화하고, 같은 비가속 비행이라도 해당 비행 시험의 고도, 속도 등에 따라 진동 레벨은 변화하지만, 본 연구 결과에서 알 수 있듯이 비가속 비행 상태에서의 T-50/A-50 조종실 진동은 모든 비행 영역에서 3~22Hz, 22~86Hz, 86~100Hz 주파수 대역의 요구도를 만족하고 있다. 특히 86Hz 이상의 주파수 대역에서는 요구도보다 아주 낮은 진동 특성을 보여주고 있고, 사람의 신체에 가장 민감하다고 알려진 주파수인 1~80Hz 대역에서 결과가 중요함을 확인할

수 있었다.

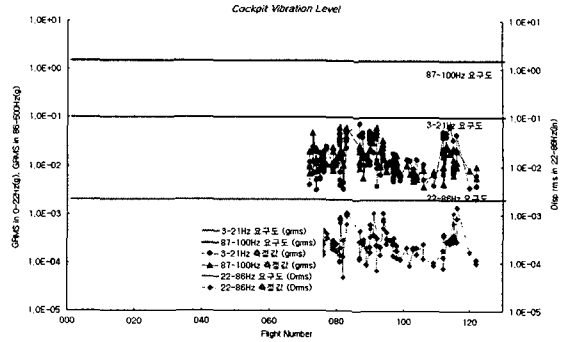


그림 5. T-50/A-50 조종실 진동 레벨 분석 결과

3.2 조종사 안락도 분석

조종사의 안락도 평가를 위해 3호기 조종석 밑바닥에 장착되어 있는 진동 센서와 2호기 후방석 리더 페달에 장착되어 있는 진동 센서를 이용하였고, 같은 시험 조건에서의 결과를 사용하여 분석하였다. 고도 20000 ft, 속도 M0.90에서 각 축의 파고율이 9보다 작으므로 가중화된 가속도 실효치를 이용하면 전체 진동 값은 $a_{overall} = 0.302 m/s^2$ 이다. 이는 앞서 살펴봤던 MIL-A-8892[1] 결과와 유사하고, 표1에서 볼 수 있듯이 진동에 의한 안락도는 "a little uncomfortable"이다.

고도 5000 ft, 속도 M0.80에서 파고율이 각 축에서 9보다 작으므로 이때 전체 진동 값은 $a_{overall} = 0.508 m/s^2$ 로, 진동에 의한 안락도는 "a little uncomfortable"이다. 동압이 증가함에 따라 전체적인 진동 레벨은 증가하므로 가중화된 가속도 실효치를 사용한 계산 결과에서도 동압이 큰 5000ft, M0.80에서의 전체 진동 실효치가 20000ft, M0.90에서의 결과보다 크게 나타난다.

Overall RMS Weighted acceleration (m/s^2)	vibration discomfort
Less than 0.315	not uncomfortable
0.315 to 0.63	a little uncomfortable
0.5 to 1	fairly uncomfortable
0.8 to 1.6	uncomfortable
1.25 to 2.5	very uncomfortable
Greater than 2	extremely uncomfortable

표 1. Scale of vibration discomfort

3.3 조종사 보건 영향성 분석

고도 20000ft, 속도 M0.90에서 조종사의 보건 영향성 분석을 위해 조종석 밑바닥의 진동 센서 3축으로부터 계산된 각 방향의 가중화된 가속도들의 제곱합에 대한 제곱근을

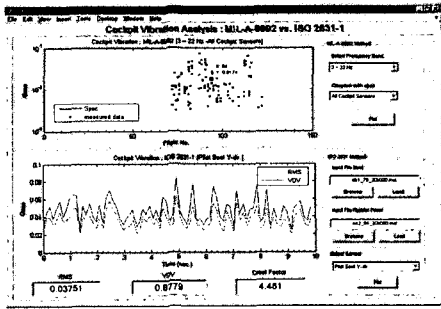


그림 6. 조종실 진동 분석 결과 (20K M0.90)

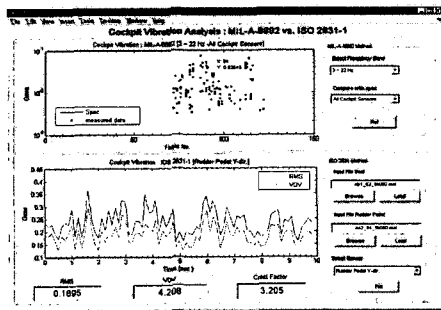


그림 7. 조종실 진동 분석 결과 (5K M0.80)

계산 하는 실효치 방법과 네제공합에 대한 네제공근을 계산 하는 VDV 방법을 각각 사용하였다.(그림 6) 이때 계산된 실효치 값과 피폭 진동 값 VDV는 각각 $0.216 m/s^2$ 과 $0.258 m/s^{1.75}$ 이고, 실효치에 의한 보전 하한 한계 $2.8 m/s^2$ (rms)와 피폭 진동 값 VDV에 의한 보전 하한 한계 $2.8 m/s^{1.75}$ 보다 낮다.

같은 방법으로 계산한 고도 5000ft, 속도 M0.80에서의 실효치와 VDV 값은 각각 $0.386 m/s^2$ 과 $0.424 m/s^{1.75}$ 이고 각각의 보전 하한을 넘지 않는다.(그림 7) ISO2631-1:1997(E)[2]에서 규정하고 있는 보전 하한을 넘는다면 최소한 건강 손실의 잠재적 가능성이 있음을 의미하고, 상한 한계는 넘지 않기를 권고하는 진동 한계선으로 권장하고 있으므로, 본 연구 결과의 보전 영향성은 건강 손실의 잠재적 가능성이 없음을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초음속 고등훈련기 및 경공격기로 제작된 T-50/A-50 골든 이글의 조종실 진동에 대한 연구를 수행하여 체계개발계획서에 의한 MIL-A-8892[1] spec 요구도를 만족함을 확인하였고, 그와 더불어 ISO2631-1:1997(E)[2]의 내용을 바탕으로 인체 진동의 영향성을 살펴보았다.

체계개발계획서에 의한 요구도는 비가속 비행 중 조종실 내부에서의 진동을 측정하여 spec과 비교함으로써, 요구도 만족 여부를 판단하였고, 현재까지 수행한 비행 영역에서 spec을 만족하고 있음을 확인하였다.

또한, 조종사의 인체 진동 영향성을 확인하기 위해 ISO2631-1:1997(E)[2]의 내용을 적용하여 고도 20000ft, 속도 M0.90과 고도 5000ft, 속도 M0.80에서의 계산 결과를 이용, 조종실 내부의 진동은 조종사의 안락함을 크게 저해하지 않음을 알 수 있었고, 보전 상의 문제를 유발할 정도가 아님을 확인하였다. 다만 제안된 방법의 적용에 있어서 현재 진행되고 있는 비행 시험 및 계측 센서 여건상, ISO2631-1:1997(E)[2]에서 추천하고 있는 방법과 동일한 형태로 시험을 수행할 수 없어 적절한 가정과 함께 현재 가능한 데이터만을 이용하였지만, 필요시 센서 보완 및 추가 시험을 수행한다면, 항공기에 적용하여 유용한 결과를 얻을 수 있는 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Military Specification, Airplane Strength and Rigidity, Vibration. MIL-A-8892, March 31, 1971
- (2) International Organization for Standardization, 1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part I : General Requirements, ISO2361-1
- (3) S.S.Ahn, "Prime Item Development Specification for the KTX-2 Air Vehicle", 85PS0002, Rev.D, November 3, 2000
- (4) H.E.Nevius, "F-16 Vibration and Acoustic Analysis Report", 16PR099, October, 1975.
- (5) G.S.Choi, "Design Vibration and Acoustic Environment for T-50", 85PS0009, Rev. C, June 2000.
- (6) Proposal of System Development for T-50 Program (체계개발계획서), June 1997
- (7) 정완섭, 김용태, 2002, "전신 진동 측정 기술과 인체 영향 평가방법", 한국소음진동공학회지, 제 12권 제 2호, 103~112
- (8) 김진기, 정완섭, 홍동표, 2001, "인체 진동을 고려한 국내의 철도 차량의 진동 환경 평가에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 1100~1104