

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.3.209>

외부 연료탱크 수평 핀 동적거동이 피로수명에 미치는 영향

김근원*, 신기수*

The effect on fatigue life for dynamic behavior of external fuel tank horizontal fin

Geun-won Kim* and Ki-Su Shin*

ABSTRACT

Recently, there were significantly increased cracks failure for external fuel tank horizontal fin of F-5 aircraft. In this paper, the dynamic behavior of horizontal fin was to quantitate by using Finite Element Method. To achieve this goal, the fatigue analysis for time and frequency domain has been performed by using the dynamic load spectrum of speed brake. In conclusion, it was proved that fatigue life of the horizontal fin was reduced by the influence of dynamic behavior.

초 록

최근 F-5 항공기 외부 연료탱크 수평 핀의 균열결함이 크게 증가함에 따라 원인 규명이 필요하다. 본 연구에서는 수평 핀의 동적거동을 유한요소법을 이용하여 피로해석 측면에서 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 스피드 브레이크(speed brake)에 의한 동하중 이력을 적용하여 시간영역과 주파수영역의 피로해석을 수행하였다. 연구결과 수평 핀은 동적거동 영향으로 피로수명이 감소되었음을 입증하였다.

Key Words : Fatigue analysis(피로해석), Horizontal fin(수평 핀), Dynamic behavior(동적거동), Finite Element Method(유한요소법), Fatigue life(피로수명)

1. 서 론

인류 최초의 동력 항공기인 라이트형제의 항공기가 1908년 프로펠러축 균열결함으로 비행 중 추락하는 사고를 경험한 이후 최근까지도 항공기 구조물에서 발생하는 각종 결함으로 인한 비행 사고는 끊임없이 발생하고 있다. 현재 한국공군에서 운영 중인 장기운영 항공기의 경우에도 구조적 결함이 다수 발생하고 있으며, 지난 수년 동안 F-5 항공기 외부 연료탱크 수평 핀의 균열 결함이 크게 증가하였다.

수평 핀의 잦은 결함 발생에 따라 균열 발생 원인을 규명하기 위한 연구가 몇몇 기관을 중심으로 수행되어 왔다. 연구결과 균열은 수평 핀과 테일 콘(tailcon)이 체결되는 후방 모서리 부위에서 시작되었다. 그리고 주요 결함원인은 비행 중 수평 핀에 작용하는 상하 방향의 반복 하중으로 인해 피로 균열이 진전된 것으로 연구되었다[1, 2].

또한 비행 중 수평 핀에 작용하는 반복 하중의 대부분은 수평 핀 전방 항공기 하부에 장착된 스피드 브레이크(speed brake) 작동 시 발생하는 와류의 영향으로 분석되었다[3]. 스피드 브레이크에 의한 와류가 외부 연료탱크 수평 핀 동적거동에 영향을 줄 경우 피로수명 감소로 이어질 수 있다. 그러나 와류의 영향을 정량적으로 평가하기 위한 연구는 수행되지 않았다.

† 2011년 12월 13일 접수 ~ 2012년 2월 8일 심사완료

* 정희원, 국방대학교 국방과학학과
교신저자, E-mail : ksshin@kndu.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 제2자유로 33

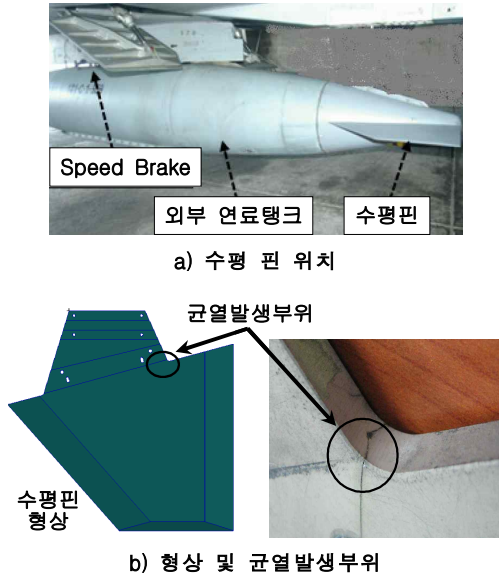


Fig. 1. Horizontal fin configuration

본 연구에서는 F-5 항공기 외부 연료탱크 수평 핀의 균열결합을 피로해석 측면에서 분석하였다. 이를 위해 유한요소법 이론을 바탕으로 스피드 브레이크에 의한 동하중 이력을 적용하여 피로해석을 수행하였다. 특히 시간영역과 주파수영역의 피로해석을 수행하여 동적거동이 피로수명에 미치는 영향을 살펴보고, 구조물 형상변경을 통해 외부 연료탱크 수평 핀의 수명향상 방안을 모색하였다.

II. 본 론

2.1 피로해석(Fatigue Analysis) 기법[4][5]

2.1.1 준정적(Quasi-static) 피로해석

준정적 피로해석은 동적효과가 피로수명에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도로 작다는 가정 하에서 수행된다. 구조물에 대한 하중정보는 식 (1)과 같이 정적해석 결과와 시간영역에 의해 정의된 동하중 이력을 중첩하여 동응력 또는 변형률을 구한다.

$$\sigma(t) = \sum P(t) \left(\frac{\sigma}{P_{fea}} \right) \quad (1)$$

여기서 $\sigma(t)$ 는 시간이력의 응력, $P(t)$ 는 시간에 대한 외부하중, σ 와 P_{fea} 는 정적해석으로부터 나온 응력과 하중크기이다. 이러한 불규칙한 동응력 또는 변형률은 사이클 카운팅(cycle counting) 방법에 의해 응력반복 횟수가 계산되며, 히스토그

램으로 합산되어 피로 손상률에 적용된다.

2.1.2 과도(Transient) 피로해석

시간영역에서 구조물의 동적효과를 고려한 피로수명을 산출하기 위해서는 과도 피로해석 수행이 필요하다. 과도 피로해석에는 직접적분법(direct integration method)과 모드중첩법(modal superposition method)이 있다.

직접적분법은 각 시간 단계별 응력 결과를 조합하는 방법이다. 따라서 방대한 데이터 량으로 처리시간이 길고, 용량처리가 어려운 단점이 있다. 이에 반해 모드중첩법은 시간에 대한 응력이력을 저장할 필요가 없어 처리용량을 줄일 수 있다. 이에 따라 본 연구에서도 과도 피로해석시 모드중첩법을 사용하였다.

모드중첩법에서 사용되는 시간영역에서의 응력은 식 (2)와 같이 고유모드해석을 통해 얻은 모드별 응력과 과도응답해석으로부터 얻은 각 모드별 기여도(modal participation factor)를 조합하여 동응력 또는 변형률을 계산함으로써 피로수명을 구한다.

$$\sigma(t) = \sum \sigma_i q_i(t) \quad (2)$$

여기서 σ_i 는 i 개의 모드별 응력이고, $q_i(t)$ 는 각 모드의 기여도이다.

2.1.3 진동(Vibration) 피로해석

진동 피로해석은 하중데이터를 시간이 아닌 주파수 영역의 파워스펙트럼밀도(PSD) 형태로 표현하고, 공진효과를 명확하게 할 수 있는 피로해석 방법이다.

이 방법은 식 (3)과 같이 유한요소모델의 주파수응답해석 결과와 주파수영역에 의해 정의된 파워스펙트럼밀도 형태의 동하중 이력을 중첩하여 동응력 또는 변형률을 얻어내어 피로수명을 구한다.

$$G(f) = |H(f)|^2 W(f) \quad (3)$$

여기서 $G(f)$ 는 응력 PSD, $W(f)$ 는 입력하중 PSD, $H(f)$ 는 주파수응답 전달함수이다.

진동 피로해석에서 반복 응력범위 히스토그램은 확률밀도함수(PDF) 형태로 나타내며, 주파수영역의 파워스펙트럼밀도로부터 피로손상률을 구할 수 있다.

확률밀도함수를 계산하는데 있어서 과거 여러 방법이 제안되었으나, Bishop(1988)은 Dirlik의 시험식이 이전에 발표된 시험식보다 확률밀도함수를 보다 우수하고 정확하게 얻을 수 있음을 입

증하였다[6]. 따라서 본 연구에서도 Dirlik 방법을 적용하였다.

2.2 수치해석 결과

2.2.1 유한요소 모델링

유한요소 모델링은 Fig. 2와 같이 solid 요소로 HEXA를 사용하였다. 또한 모델의 절점 수는 7,193개 이며, 요소 수는 4,396개이다.

경계조건은 외부 연료탱크 수평 핀이 테일콘에 체결되는 부위를 고려하여 홀(hole)과 연결되는 평판 표면(surface)에 대하여 6자유도를 구속하였으며, 하중조건은 스피드 브레이크에 의해 생성된 와류가 외부 연료탱크 수평 핀 표면에 미치는 영향을 고려하여 동하중 이력값[3] 중 최대하중인 692N을 수평 핀 상부에서 균일하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 또한 Table 1은 수평 핀의 물성치를 나타낸다.

Figure 3은 정적해석 결과를 나타낸 것이다. 최대응력(Von Mises)은 111MPa로 외부 연료탱크 수평 핀 후방 모서리 부분에서 응력집중부위가 형성되었으며, 이는 실제 결함 발생부위와 일치함을 알 수 있다.

또한 수평핀의 동적특성을 파악하기 위하여 고유모드해석을 수행하였다. 고유모드해석 결과 수평 핀의 1차 고유주파수는 54.0Hz로 계산되었다[7]. 이 결과로부터 수평 핀에 가해지는 동하중 가진 주파수가 54.0Hz 내에 위치하거나 근접할 경우 공진범위 이내에 포함되어 동적 피로수명에 영향을 줄 것으로 판단할 수 있다.

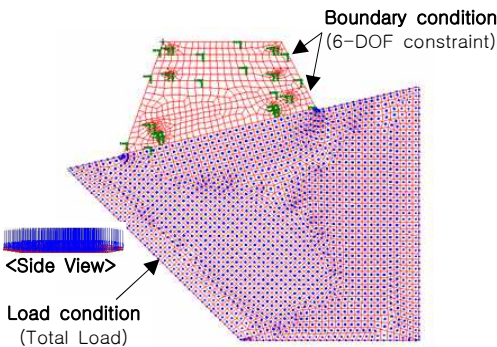


Fig. 2. Modeling configuration

Table 1. 물성치(AZ31B-H24)

구분	값	구분	값
극한강도	290MPa	탄성값	45GPa
항복강도	180MPa	밀도	1.76g/cc
		포아송비	0.35

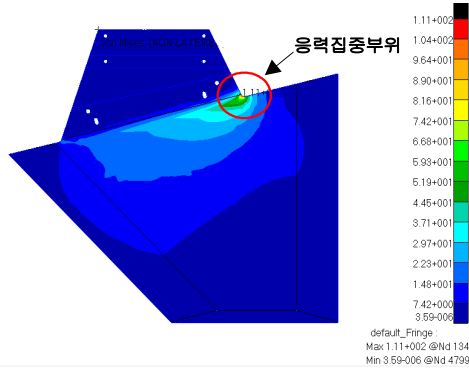


Fig. 3. Result of static FE analysis

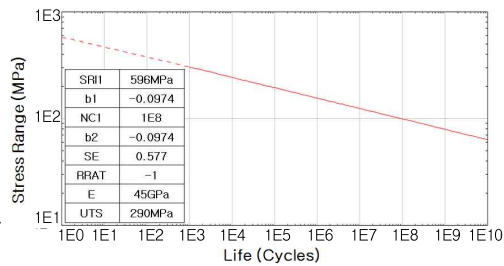


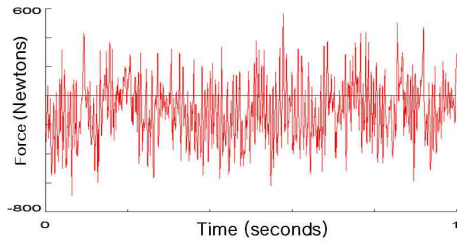
Fig. 4. S/N curve

2.2.2 피로해석 결과

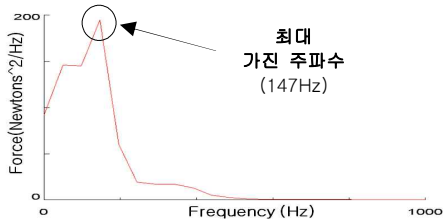
준정적 및 과도 피로해석은 응력-수명(S-N), 변형률-수명(ε-N)선도 모두 사용이 가능한 반면, 진동 피로해석은 응력-수명(S-N)선도만 가능하다. 응력-수명 선도는 작용 응력이 재료 탄성영역 내에 있고 수명이 긴 경우(high cycle)에 적용되는 기법으로 소성 변형 영역이 상대적으로 작은 경우에 사용된다. 따라서 본 연구에서도 항복강도 이하의 하중을 고려하여 응력-수명 선도를 사용하였다.

피로해석을 위한 물성치는 외부 연료탱크 수평 핀 재질과 유사한 AZ31B-F 마그네슘 Best-fit S/N Curve 시험자료를 사용하였다[8]. 응력비(stress ratio) R=-1에 대한 42개의 자료로부터 최소자승법[9]을 이용하여 회귀식 $Y=28.49 - 10.26X$ 을 구하였고, 피로해석에 사용되어지는 S/N 선도는 Fig. 4와 같이 MSC.Fatigue S/N 프로그램인 PAMAT를 이용하여 생성하였다.

Figure 5(a)는 시간 하중이력으로 스피드 브레이크에 의한 공력해석 자료[3] 중 1초 동안에 발생한 10E4개의 하중 데이터를 활용하였으며, 최대하중이 항복강도 이하로 유지되도록 크기를 감소하여 적용하였다. Fig. 5(b)는 시간영역의 동응력 스펙트럼에 대한 주파수 영역의 파워스펙트럼밀도를 나타낸 것으로 최대가진 주파수는 147Hz임을 알 수 있다.



(a) Time History



(b) Frequency History

Fig. 5. 동응력 스펙트럼

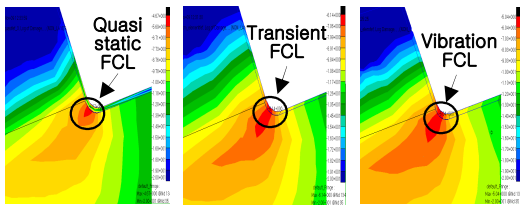


Fig. 6. 피로취약부위(FCL) 비교

Figure 6은 피로해석결과와 피로취약부위를 나타낸 것으로 정적해석 응력집중부위와 동일한 지점에서 피로에 의한 균열이 진행되었음을 알 수 있다.

Table 2는 피로수명 결과로 가장 피로손상이 큰 요소를 비교하여 나타낸 것이다.

시간영역에서 동적거동에 의한 구조물 수명영향을 확인하기 위하여 Table 3과 같이 피로취약부위에 대한 출력응력(output stress)을 비교하였다.

과도 피로해석 출력응력이 준정적 피로해석 응력에 비해 +33.6 ~ -40.5MPa정도 많게 나오며 이

Table 2. Fatigue life

구분	Life(sec)
Quasi static	2.765E+8
Transient	4.680E+5
Vibration	4.103E+4

Table 3. Output stress 비교

구분	Quasi static	Transient	Difference
Output stress	+46.0 ~ -37.6MPa	+79.6 ~ -78.1MPa	+33.6 ~ -40.5MPa

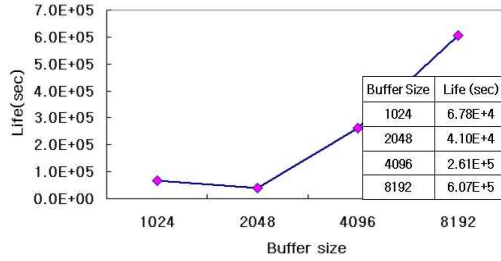


Fig. 7. FFT buffer size

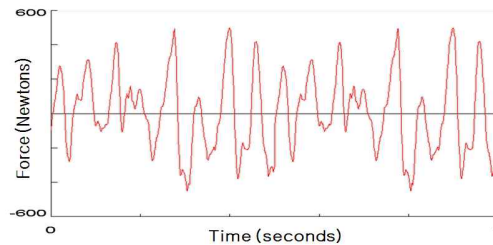
를 통해 동적거동이 피로수명에 영향을 주었음을 알 수 있다.

또한 진동 피로해석은 패스트 푸리에(Fast Fourier Transform, FFT) 버퍼크기(buffer size)에 의해 피로수명 오차가 발생할 수 있다[6]. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 보수적 값인 FFT 버퍼크기 2048을 적용하여 피로수명을 계산하였다.

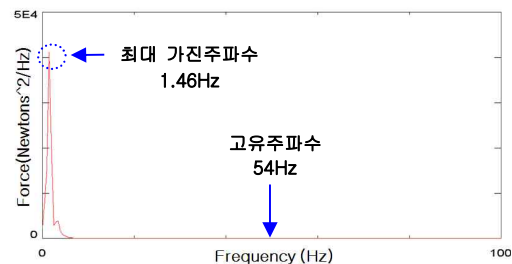
2.3 동적거동 분석

동적거동영향을 받지 않은 주파수범위의 하중을 적용한 경우 준정적, 과도 및 진동 피로수명은 동일하여야 한다. 이를 검증하기 위하여 동적거동영향을 받지 않은 주파수 하중이력을 적용하여 피로수명을 계산하였다.

Figure 8(a)는 시간영역의 동하중 이력이며, Fig. 8(b)는 주파수 영역의 하중이력을 나타낸 것이다. 그림과 같이 가진 주파수는 1.46Hz이며, 수평 편 고유주파수인 54Hz에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.



(a) Time History



(b) Frequency History

Fig. 8. 동하중 응력스펙트럼

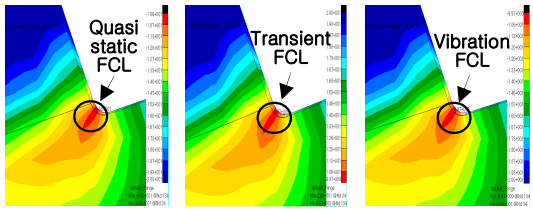


Fig. 9. 피로취약부위 비교

Figure 9는 준정적, 과도 및 진동 피로해석의 피로 취약부위를 비교한 것으로 응력집중부위와 위치가 동일함을 확인할 수 있다.

Table 4는 준정적, 과도 및 진동 피로수명 결과이며, 동적거동 영향을 받지 않은 하중적용 시 준정적, 과도 및 진동 피로수명은 일치함을 알 수 있다. 따라서 스피드 브레이크 와류는 피로수명에 영향을 미치며, 수평 핀은 동적거동 영향으로 피로수명이 감소되었음을 입증하였다.

또한 Fig. 10은 동적거동 검증을 위해 진동 피로해석에 사용된 패스트 푸리에 버퍼크기로 본 연구에서는 보수적 수명 값을 갖는 1024를 적용하였다.

Table 5는 시간영역의 출력응력을 비교한 것이다.

Table 4. 피로수명 비교

구분	Life(sec)	차이(%)
Quasi static	3.213E+9	-
Transient	3.206E+9	0.02
Vibration	3.211E+9	0.01

Table 5. Output Stress 비교

구분	Quasi static	Transient	차이(%)
Output Stress	+68.0 ~ -75.4MPa	+69.0 ~ -75.0MPa	0.1

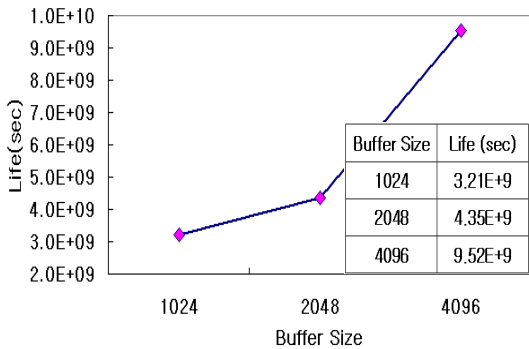
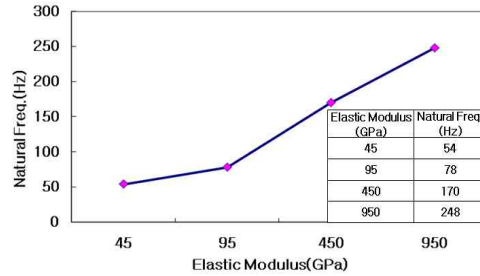
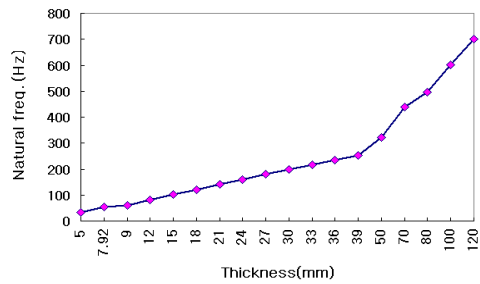


Fig. 10. FFT buffer size



(a) 탄성계수 & 고유주파수 관계



(b) 두께 & 고유주파수 관계

Fig. 11. 고유주파수 변화

2.4 수명향상 방안

수평 핀의 수명향상 방안을 모색하기 위하여 본 연구에서는 고유주파수 변화를 통하여 동적거동에 의한 수명 영향을 분석하였다. 이를 위해 10개의 두께 형상 변화를 적용하였다.

Figure 11(a)는 수평 핀 형상에 대하여 탄성계수에 대한 고유주파수 변화를 나타낸 것이다. 고유주파수는 탄성계수에 비례하여 증가함을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 11(b)는 두께 형상변경에 따른 고유주파수 변화를 나타낸 것이다. 밀도와 탄성계수를 일정하게 유지한 경우 고유주파수는 두께 증가에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

Figure 12는 10개의 두께 형상 변화를 적용하여 고유주파수에 따른 피로수명을 나타낸 것이다.

준정적 및 진동 피로수명은 고유주파수에 따라 다양하게 나타나며 최대 가진 주파수인 147Hz에서 가장 낮은 피로수명을 갖게 됨을 알 수 있다. 또한 현재 수평 핀은 동적영향이 가장 큰 147Hz를 벗어나 설계되어 있다. 그러나 수평 핀 고유주파수가 가진 주파수에 포함되어 동적거동 영향은 지속적으로 받고 있음을 알 수 있다.

향후 동적거동 영향을 최소화 할 수 있는 형상 재설계를 할 경우 Table 6과 같이 현재보다 수명향상이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 수명향상은 두께변화에 따른 영향만을 고려

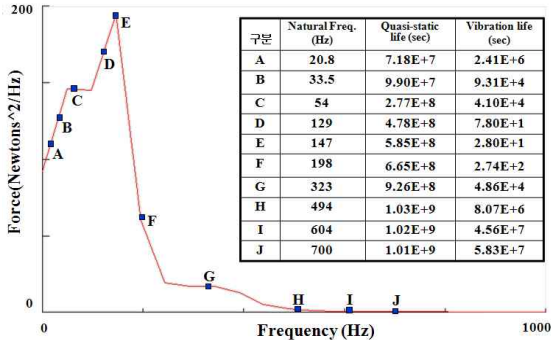


Fig. 12. 고유주파수 & 피로수명 비교

Table 6. 수명 향상 비율

Natural Frequency (Hz)	20.8	33	54	323	494	604	700
Life Improvement (rate)	59	2.3	1	1.2	197	1112	1422

하였으며, 중량과 재료비 측면에서 과도할 수 있으므로 향후 안정성 측면에서의 기타 요소 고려도 필요하다.

III. 결 론

본 연구에서는 현재 한국공군에서 운영 중인 F-5 항공기 외부 연료탱크 수평 핀의 결함원인을 피로해석 측면에서 접근하였다. 스피드 브레이크에 의해 생성된 외부 동하중 이력을 적용하여 피로해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 정적구조해석결과 후방 수평 핀 모서리 부분에서 응력 집중현상이 발생하였으며, 이는 실제 결함 발생 부위와 일치하였다.

둘째, 스피드 브레이크에 의한 외부하중을 적용하여 시간영역과 주파수영역에서의 피로해석을 수행한 결과 피로취약부위와 균열이 발생되었던 응력집중부위가 일치하였다. 이를통해 수평핀은 피로에 의해 균열이 진행되었으며, 동적거동 영향으로 수명차이가 발생하였다.

셋째, 두께 형상 조절에 의한 피로해석 결과 수평 핀은 최대 동적거동 영향을 벗어나 설계되었으나 수평 핀 고유주파수가 가진 주파수에 포함되어 동적거동 영향을 지속적으로 받고 있음을

알 수 있다. 또한 동적거동 영향을 최소화 할 수 있는 형상 재설계 시 수명 향상이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C1090-0940-0005)

참고문헌

- 1) 강치행, 윤용인, "항공기 외부연료탱크 수평 핀의 균열분석과 대체방안 연구", 항공우주공학회 2008년도 추계학술발표회 논문집, 2008, pp.1246~1249.
- 2) 강치행, 윤용인, 정대한, "F-5E/F 외부 연료탱크 수평 핀 균열분석 및 재설계", 항공우주공학회학회지, 제38권 제4호, 2010, pp.382~388.
- 3) 최동수, 조 용, "전투기 Speed Brake의 공력특성 및 인접 구조물에 미치는 영향 연구", 군사과학기술학회 종합학술대회, 2009, pp.1683~1686.
- 4) The MSC.Software Corporation, "MSC/NASTRAN BASIC DYNAMIC ANALYSIS", 2008, pp.37~39.
- 5) The MSC.Software Corporation, "MSC/Fatigue User's Guide", 2010.
- 6) M.M.Rahman, A.K. Ariffin, N.Jamaludin and C.H.C. Haron, "FINITE ELEMENT BASED VIBRATION FATIGUE ANALYSIS FOR A NEW FREE PISTON ENGINE COMPONENT", The Arabian Journal for science and engineering, vol. 34, No.2B, 2009. pp.231~245.
- 7) 김근원, 신기수, "MSM을 이용한 외부 연료탱크 수평 핀 피로해석", 국방경영분석학회지, 제 37권 제2호, 2011, pp.85~92.
- 8) "METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES", DoD HANDBOOK, 2003, pp.4~15.
- 9) Yung-Li Lee, Jwo Pan, Richard Hathaway and Mark Barkey, "Fatigue Testing and Analysis" Theory and Practice, 2005, pp.109~113.