

<논문>

# 다목적 헬리콥터 로터 블레이드 피로하중에 대한 연구

오만석\* · 김현덕\* · 박정선† · 기영중\*\*

## A Study of Fatigue Load for Rotor Blades of the Utility Helicopter Man-Seok Oh, Hyunduk Kim and Jungsun Park

**Key Words:** Prediction of the Fatigue Life(피로수명 예측), Load Spectrum(하중 스펙트럼)  
Helicopter Rotor System(로터 시스템), UH Mission(기동형 헬리콥터 임무)  
Helix/Felix(헬리콥터 블레이드 피로하중)

### Abstract

In this study, we have generated fatigue load spectrum that is using to prediction of life time for the helicopter rotor blades. We derive utility helicopter missions for the sake of generating load spectrum. Helix and Felix are standard loading sequences which relate to the main rotors of helicopters with articulated and semi-rigid rotors respectively. We got scale factors which is applied to specific case and it did be obtained through the finite element analysis tools. The fatigue life of the rotor blade is estimated by using MSC/Fatigue. We suggest that generated our fatigue load spectrum in conjunction with small utility helicopter should use to rotor blade fatigue test of the korea helicopter program.

#### 기호설명

R : 로터 반경  
 $\sigma_m$  : 평균 응력  
 $\sigma_a$  : 응력 진폭

#### 1. 서 론

우리나라의 헬기 산업은 많은 성장을 하였으나 아직도 유럽이나 미국 등의 헬리콥터 기술 선진국에 비해 제작과 관련된 제반 여건이 뒤쳐져 있으며 기술 또한 선진 기술에 의존적인 것이 현실이다. 헬리콥터를 독자적으로 개발하기 위해서는 많은 요건들이 요구되지만 무엇보다도 구조적으로 가장 핵심부분인 로터 시스템의 개발능력이

매우 큰 비중을 차지하고 있다. 선진국들이 기술 이전을 꺼리는 상황에서 로터 시스템을 설계하고 독자적인 기술 확보를 위해서는 개발 용도에 따른 헬리콥터 로터 시스템의 하중 스펙트럼 개발이 기초가 된다. 헬리콥터 로터 시스템은 다양한 운용조건하에서 공력과 진동의 의한 하중을 받는다. 하중이 누적됨으로 인해 피로파괴가 발생 할 수 있다. 헬리콥터를 운용하기 위한 안전 목적상 피로수명을 예측할 수 있는 프로그램이 반드시 필요하며 이는 각국의 항공 규정에도 명시되어 있다. 본 연구에서는 관절형 로터 시스템 헬리콥터 블레이드를 위한 피로하중 스펙트럼을 산출하고 산출된 하중 스펙트럼을 상용 피로해석 툴로 피로해석을 실시하였다. 그 이유는 한국형 헬기 사업으로 진행되고 있는 소형 기동 헬기가 관절형 로터 시스템을 채택하였기 때문이다. 소형 기동헬기의 임무 도출과 그에 따른 임무 시나리오 구성 및 임무별 하중 스펙트럼 생성과 블록하중을 구성하여 하중 스펙트럼을 산출할 것이며 그에 따라 피로해석을 최종적으로 실시하였다.

† 책임저자, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

E-mail : jungsun@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0283 FAX : (02)3158-3189

\* 한국항공대학교 대학원

\* 한국항공우주연구원, 로터그룹

## 2. 기동헬기 임무도출 목적 및 정의

### 2.1 임무도출 목적

한국형 헬기 사업은 한국군의 노후 된 소형 기동헬리콥터를 대체하기 위하여 진행되고 있다. 이에 따라 하중 스펙트럼을 적용하기 위한 신형 헬리콥터의 임무를 대체될 기종을 대상으로 예상 임무를 도출한다. 특수목적에 맞는 맞춤형 하중 스펙트럼을 사용하여 적용하는 것이 효율적이기 때문이다. 도출된 임무는 인원공수, 조명대기, 공중강습, 헬기레펠, 의무후송, 산불진화, 교육비행, 승무원 공중사격으로 하였다.

### 2.2 임무정의

8가지 도출된 임무에 대한 정의이다

#### 2.2.1 인원공수

이 임무는 기지를 이륙하여 인원탑승지역까지 이동하고 탑승객을 탑승 시킨 후 목적지 까지 이동하는 것으로 구성되어 있다. Fig. 1은 인원공수 임무를 시간대별 고도 그래프로 나타낸 것이며 장거리 임무이다.

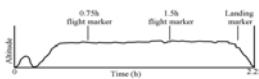


Fig. 1 VIP airlift

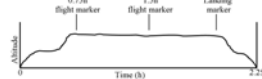


Fig. 2 Illumination round drop

#### 2.2.2 조명대기

야간에 해안으로 침투한 적(반잠수정, 간첩선 등)을 지상부대 또는 공격 헬기가 사격이 용이하도록 고공에서 조명탄을 터트려 전투지원 하는 임무이다. Fig. 2는 시나리오에 따른 시간대 고도별 상황을 도식한 것이며, 0.75h flight marker 바로 전에 고도가 상승하는 것은 조명탄 투하 요망 고도까지 상승을 나타내는 것이다.

#### 2.2.3 공중강습

다수의 헬기가 공중강습대원을 헬기를 이용하여 적지중심지역에 투입하는 임무이다. Fig. 3에서 고도가 심하게 변화되는 구간은 등고선 비행과 침투 비행을 묘사한 것이다. 0.75h flight marker와 Landing marker 사이에는 착륙 후 탑재지역까지 다시 이동하는 과정이 2회 묘사되어 있다. 탑재지대 이후에서는 저공수평비행, 등고선 비행, 침투 비행을 실시한다.

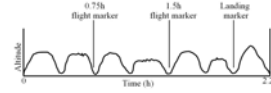


Fig. 3 Air assault training

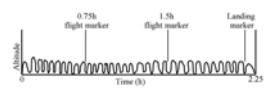


Fig. 4 Helicopter rappel

#### 2.2.4 헬기레펠

착륙이 불가능한 산악지역이나 급경사 지형에 병력을 투입할 때 사용하는 방법이다. Fig. 4는 레펠을 위해 이동하는 과정은 제외하고 순수 레펠 과정만을 묘사 하였다. 이는 헬리콥터가 몇 가지 제한된 기동을 반복적으로 실시할 때 하중 스펙트럼 특성을 파악하기 위한 것이다.

#### 2.2.5 의무 후송

각종 사고로 인한 응급환자를 사고지역이나 지역병원에서 큰 규모의 군 통합병원으로 이송하는 것이며 신속성을 요한다. 시나리오는 기지를 이륙해서 환자 탑승지역까지 이동을 하고, 환자를 탑승시킨 후, 통합병원으로 환자를 이송 후에 다시 기지까지 복귀하는 것이다. 이는 Fig. 5로 도식화 하였다.

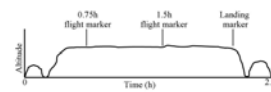


Fig. 5 Aeromedical evacuation

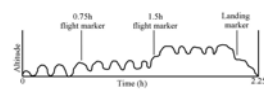


Fig. 6 Education flight

#### 2.2.6 교육비행

교육비행은 조종사 개인훈련을 목적으로 비행 교육을 실시하는 것이며 장주(traffic pattern) 이·착륙, 제한지 이·착륙, 산정 이·착륙, 비상 절차 등을 포함하고 있으며 Fig. 6에 도식하였다. 0.75h flight marker 이전에는 장주비행이, 1.5h flight marker 이전에는 제한지 이·착륙이, Landing marker 이전에는 산정이·착륙 실시되고 있음을 고도변화를 통해 실시했다. 또한 Landing marker 바로 전 고도가 급격히 강하하는 것은 자동 활공을 묘사한 것이다.

#### 2.2.7 산불진화

군의 사격훈련장은 전투기, 헬기, 탱크, 대포 등 중화기 사격에 의한 화재 위험을 갖고 있는데 사격장은 대부분 산에 위치하고 있기 때문에 화재 발생 시 지상인원의 접근이 어렵다.

이 임무는 기지를 이륙해 산불지역까지 이동

하고, 담수장소를 파악한 후, 산불 진화용 밤비 버킷을 외부에 장착하여 담수지역으로 이동하여 담수를 실시하고, 이를 이용해 화재를 진압할 때까지 물을 살포하는 일련의 과정을 말한다.

Fig. 7은 일련의 과정에 대한 시간대 고도를 그래프로 나타낸 것이다. 중거리, 장거리에는 담수와 살포 과정이 단거리 일 때 보다 추가되었다.

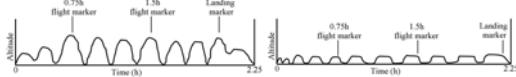


Fig. 7 Extinguishment of forest fire

Fig. 8 Crewman air firing

### 2.2.8 승무원 공중사격

기동헬기 좌, 우측에 기관총으로 승무원들이 사격 훈련을 하는 것을 말한다. 사격전에 헬기는 무장패드에서 대기하다가 사격 순서가 되면 표적 앞 사격 패드 상공까지 이동 후 사격을 실시하게 된다. 사격 기동은 프로그램을 효율적으로 작성하기 위하여 결합된 기동(combined manoeuvre)테이블을 이용하여 반복기동을 표현하였으며, 여기에 무장패드와 사격패드 상공까지의 이동을 더하여 Fig.8과 같은 시나리오를 구성하였다.

## 3. 하중 스펙트럼 구성절차

하중 스펙트럼을 구성하기 위해서 기동헬리콥터의 임무를 분석하고 20여 가지의 기동형태가 비슷한 것끼리 재분류하여 앞서 임무정의에서 제시한 8가지 임무로 압축하였다.

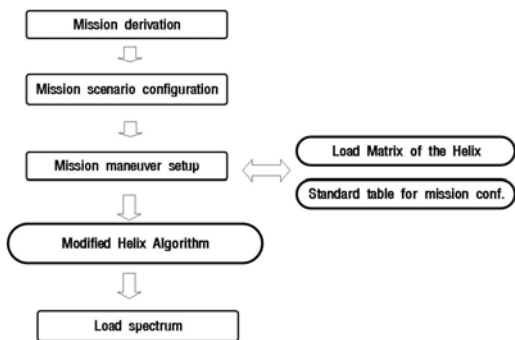


Fig. 9 Procedure of load spectrum configuration

Fig. 9에서 임무별 시나리오 작성은 시간에 따른 위치별 기동형태에 따라 구성했고, 단거리, 중거리, 장거리 임무의 모든 소티는 1회의 이륙과 착륙요소로 구성하였다. 하중 매트릭스는 Helix의

것을 사용하였고 기존의 코드는 4가지 임무로 한정되어 있기 때문에 이를 8가지로 확장된 상태에서도 실행이 가능하도록 일부를 수정하였다. Table 1에서 교변응력 반복수(Matrix applications)의 적용근거는 Helix의 4가지 임무(훈련, 운송, 대잠수함전, 탐색 및 구조) 시나리오에 근거한 것이다. 예를 들면, 임무를 작성 할 때 전진 비행 20 노트로 일정 구간 이동하기 위해서는 최소 적용시간이 4초이며 시간 구성은 4초의 배수가

Alternating Stress		20	24	28	32	36	40	Unit time	Matrix applications
No	Manoeuvre	Mean stress	Number of cycles					(s)	
1	Take-off	44	2					6	1
2	Forward flight 20 kts	72	13					4	1
3	Forward flight 30 kts	68		12	2			6	1
4	Forward flight 40 kts	60	4	9	1			4	1
5	Forward flight 60 kts	60	11	2				4	1
6	Forward flight 103 kts	64	2	4	12			5	1
7	Maximum power climb 70 kts	68	1					3	1
8	Shallow approach to hover	56	12	5	6	8	4	5	1
9	Normal approach to hover	60	11	2	4	3	5	1	4
10	Hover							any time	0
11	Bank turn port 30°	68		1	20	1		6	1
12	Bank turn starboard 30°	68		1	16	1		5	1
13	Vno Sideways flight port 30 kts	56	3					4	1
14	Recovery from 13 Sideways flight starboard 30 kts	52	11	5	9	1	2	5	1
15	Recovery from 15	60	3	3	3			3.5	1
16	Recovery from 17	52	11	2	3	2	4	1	5
17	Rearward flight 20 kts	68	1					2.5	1
18	Recovery from 19	60	4		9	10	1	6	1
19	Spot turn port	64	30	8	2			18	1
20	Spot turn starboard	68	3					18	1
21	Auto-rotation	60	19					5	1
22	Recovery from 13	60		2	10	4	1	5	1
23	Descent	60	11	2				5	1
24	Landing	72	1	3	1			6	1

Table 1 Load matrix for making mission scenario

되어야 한다. 8초간 이동하면 교변응력 반복수는 2가된다. 이러한 요령으로 다른 기동도 적용하게 되며 15, 17번 항목은 자연수로 처리된다. 즉 3.5 초는 3초에 1회 반복하고 7초는 2회 반복하는 것이다. Table1에 사용된 평균응력과 응력진폭은 다음과 같다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ ----- (1)}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \text{ ----- (2)}$$

#### 4. 하중 스펙트럼 생성결과

수정된 Helix 알고리즘으로 생성한 하중 스펙트럼의 결과는 Table2와 같다. 순서 1의 하중 값 -20은 지상 하중(Ground load)으로 로터 블레이드가 정지한 상태에서 자중에 의한 하중을 말한다. Table 2에서 생성된 하중 점(Load point)의 수는 모두 2,019,510개이다. 하중점을 2로 나누면 사이클 수가 된다. 순서 2는 장거리 산불진화 임무의 이륙 기동이며 평균응력 44에 교변응력 20이 더해져서 64가 순서 3은 20을 빼서 24가 되었다.

Sequence	Load	Sequence	Load	Sequence	Load
1	-20	17	24	2,019,494	96
2	64	18	64	2,019,495	48
3	24	19	24	2,019,496	96
4	64	20	64	2,019,497	48
5	24	...	...	2,019,498	92
6	64	2,019,478	80	2,019,499	52
7	24	2,019,479	40	2,019,500	100
8	64	2,019,480	100	2,019,501	44
9	24	2,019,481	44	2,019,502	96
10	64	2,019,482	96	2,019,503	48
11	24	2,019,484	96	2,019,505	48
12	64	...	...	2,019,506	96
13	24	2,019,490	100	2,019,507	48
14	64	2,019,491	44	2,019,508	92
15	24	2,019,492	96	2,019,509	52
16	64	2,019,493	48	2,019,510	72

Table 2 Fatigue load sequence generated by HELIX

마지막 하중점은 단거리 교욱비행에서 착륙기동의 평균응력 72가 나타낸 것이며 이는 하중 사이클이 평균응력에서 종료되는 것을 고려하면, 알고리즘이 하중을 제대로 생성했음을 의미하고 있는 것이다.

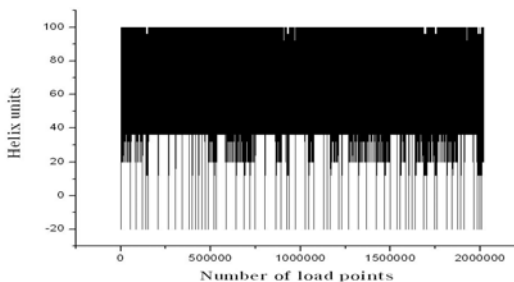


Fig. 10 Load spectrum generated by Helix

Fig. 10은 Table2를 도식한 하중 스펙트럼이다. 지상하중의 수63과 소티의 총수 63 두 개가 일치함을 볼 수 있다. Fig. 11은 임무별 하중 점 생성

수를 나타내고 있다. A(인원공수) 장거리 임무는 57,914개로서 단위 임무(소티)에서 가장 많은 하중 점을 생성하였고, 가장 적은 하중 점을 생성한 것은 헬기레펠 단거리 임무이다. 헬기레펠 임무가 다른 임무들 보다 하중 점의 수가 적은 이유는 시나리오에 비교적 많은 하중 점을 생성시키는 이동구간 기동을 제외하고 순수한 레펠 기동만을 묘사하였기 때문이다. Table3 은 임무별 하중 점 생성수를 나타내고 있다.

Mission	A	B	C	D	E	F	G	H
Shortest	17,886	16,680	17,256	4,160	14,558	12,962	14,716	5,516
Middle	37,806	35,022	35,278	8,522	31,900	30,610	32,068	10,106
Longest	57,914	54,706	53,380	13,084	54,774	46,594	54,006	14,776

Table 3 Number of load points of each sortie

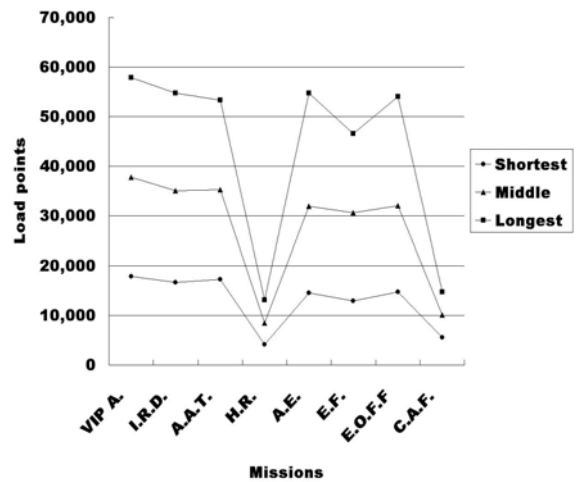


Fig. 11 Number of load points of each mission generated by HELIX

#### 4.1 지상하중에 의한 응력분포 모델링

지상 하중 상태에서 작용하는 응력을 비교해 구성품별 수정계수를 구하기 위해 블레이드 스파를 MSC/ Patran 과 Nastran을 이용해 모델링과 정해석을 실시하였다. 블레이드 스파 모델링은 관절형 로터 시스템이면서 4개의 블레이드를 가지고 있는 미국 시콜스키사의 UH-60 로터 블레이드를 참고 하였다. 로터형상은 Fig. 12와 같으며 SC1095 에어포일 형상을 기초로 하중을 담당하는 스파(Spar)만을 모델링하였다. 로터 블레이드 1개의 무게 295Kgf (650 lb)이고, 스파는 티타늄 합금으로 되어 있다. SC1095 풍판의 시위(chord)는 533mm 이며 스파의 코드방향 길이는 218mm

이다. 플랩방향 앞부분 호의 직경은 44mm이고 뒷부분 호의 직경은 50mm이다. 스파의 두께는 7.6mm 이며 로터 한 개의 길이는 8,131mm이다. 계산의 의한 스파의 자중은 106Kg 이었다.

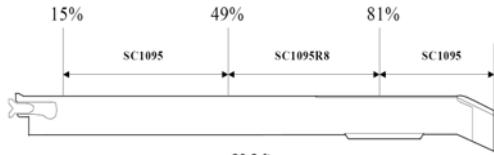


Fig. 12 UH-60 helicopter blade

티타늄 합금의 물성 값은 Table 4와 같다. 모델링은 2차원 요소인 Shell을 이용하였으며 유한요소 모델은 Fig.13과 같다.

Mechanical Properties	Metric	English
Modulus of Elasticity	110,240 MPa	16,000 ksi
Poisson's Ratio	0.33	0.33
Shear Modulus	41,960 MPa	6,090 ksi
Density	4,698.6 K g/m <sup>3</sup>	0.17 lb/in <sup>3</sup>

Table 4 The properties of titanium alloy

4.2 하중 및 경계조건

관성하중(Inertial Load)값은 중력 가속도( patran 의 Trans Accel <0,-9.8,0>)와 재료 물성치중 밀도 값으로 부여하였다.

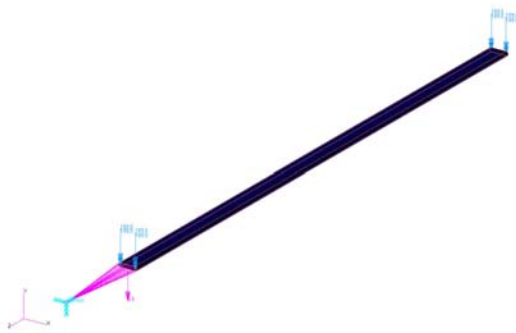


Fig. 13 Load and boundary condition

MPC를 이용하여 스파의 Z방향 한쪽 끝 6자유도를 모두 구속하고 면의 가장자리(타원형 edge)에 체결하였다. 지상하중에 의한 로터 특정부위 (55.9%R)의 응력을 알아야 하므로 나머지 로터 블레이드의 무게 189Kg은 스파 전 영역에 대한 분포하중(patran의 total load)으로 처리 하였다. 결과는 Fig.14-15와 같다. 55.9%R 지점에서 압축응력은 30.2Mpa 이고 이 값을 Helix Unit로 무차원화 시키면 -17.5가 된다. 원래 Helix의 지상하중은

-20이므로 조절계수는 0.8775를 얻게 된다.



Fig. 14 State of stress distribution at spar 55.9% R

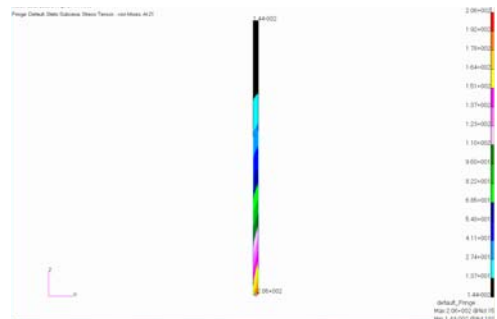


Fig. 15 State of stress distribution of spar

조절계수를 적용한 최종 하중 스펙트럼은 Fig.16과 같다.

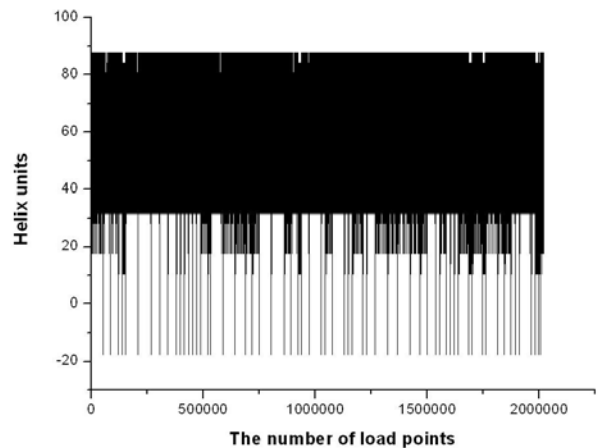
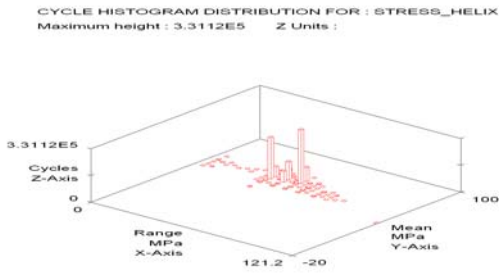


Fig. 16 Calibrated load spectrum by Helix 생성된 하중 스펙트럼을 피로 해석 상용 툴인 MSC/Fatigue를 이용하여 피로해석을 실시하였다. 해석을 위한 하중 집계법은 레인 플로우법(6)을 이용하였으며 Fig. 17에서 하중은 응력진폭은 70, 평균응력은 60 부근에서 높은 값을 나타내고 있다.



**Fig. 17** Rain-flow counting by Helix

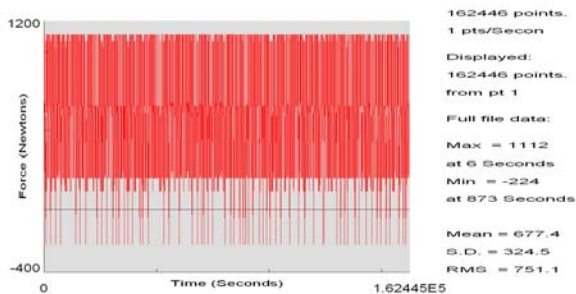
해석 결과는 Table 5와 같다. Helix 하중을 사용한 것과 Helix32를 사용한 해석 결과의 차이는 피로손상에 의한 차이가  $4.04 \times 10^{-14}$ 이며 피로수명 사이클은  $10^{12}$ 의 차이가 있었다. 피로손상에 의한 차이는 매우 작고 피로수명 사이클도 1%의 차이가 나타나고 있다. 다른 연구(1)에 따르면 실제 실험결과 4%의 오차가 나타났다. 이것은 Helix 전체 데이터에 비해 92% 작은 하중이력을 가진 Helix/32는 피로실험에 사용할 때 시간 단축의 큰 장점이 있지만 오차가 있어 적용할 때에는 이점을 감안해야 함을 의미한다.

Material	UTS	Damage	Estimated Life (Repeats)	Remarks
2TA11	1,233	4.0426E-15	2.47E+14	Helix
Titanium(300)		4.0252E-18	2.48E+14	Helix32

**Table 5** Result of fatigue analysis of rotor blade spar

#### 4.3 설계 조건을 적용한 최종 하중스펙트럼

하중이 작아 무한수명이 나와 설계조건을 만족시키는 범위를 알아보기 위해 수정계수를 적용해 보았다. 로터 블레이드의 설계 수명이 10,000 시간 이므로 103 하중블럭 이상의 피로 하중을 견디



**Fig. 18** Calibrated load spectrum generated by Helix32

야 하며 이에 따른 응력스펙트럼 수정계수는 7.09를 얻을 수 있었다.

Material	UTS	Damage	Estimated Life (Repeats)	Remarks
2TA11 Titanium(300)	1,233	9.6809E-3	103	Helix32 factor=7.09

**Table 6** Result of fatigue analysis of rotor blade spar

## 5. 결론

기동형 헬리콥터 블레이드용 하중 스펙트럼을 산출하고 티타늄 합금 재질을 상용 피로해석 툴을 사용해 피로해석을 실시하고, 설계 수명 시간을 만족시키기 위한 수정계수를 적용해 하중 스펙트럼을 산출하였다.

## 후 기

본 연구는 한국형 헬기 민군겸용 구성품개발사업 및 스마트 무인기 기술 개발의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) P. R. Edwards and J. Darts, 1984, "Standardised fatigue loading sequences for helicopter rotors", *RAE Technical report 84084*, pp.5~33
- (2) P. R. Edwards and J. Darts, 1984, "Final definition of Helix and Felix", *RAE Technical report 84085*, pp.7~8
- (3) Julie A. Bannantine, 2005, "Fundamentals of metal fatigue analysis", *Chungmoongak Publisher*, pp.228~231
- (4) A. K. Khosrovaneh and N. E. Dowling, 1989, "Fatigue life estimates for helicopter loading spectra", *NASA contractor report 181941*, pp.1~30
- (5) J. Darts and D. Schütz, 1980, "Development of standardised fatigue test load histories for helicopter rotors basic consideration and definition of Helix and Felix", *In Helicopter fatigue life assesment, AGARD CP-297*, pp.1~30
- (6) MSC software, 2005, "MSC.Fatigue quick start guide", pp.46~100