

# 공력 Buffet 하중을 고려한 헬리콥터 탐색등의 구조진동해석 Structural Vibration Analysis of Helicopter Search Light Considering Aerodynamic Buffet Load

김요한\* · 김동만\* · 김동현† · 최희주\*\* · 박용석\*\* · 김종건\*\*  
Yo-Han Kim, Dong-Man Kim, Dong-Hyun Kim,  
Hui-Ju Choi, Yong-Suk Park and Jong-Gun Kim

Key Words : Search Light (탐색등), Buffet Load (버펫하중), Computational Fluid Dynamics (전산유체역학), Finite Element Method (유한요소법), Computational Structural Dynamics (전산구조동역학)

## ABSTRACT

In this study, computational structural vibration analysis of helicopter search light exposing unsteady buffet load have been conducted using combined advanced numerical methods. Unsteady CFD method based on Navier-Stokes equations is used to predict viscous buffet load due to flow separation effects. Full three-dimensional finite element model is constructed in order to conduct static and structural dynamic analyses of the search light model for two different typical flight speeds. Also, the correct performance of the search light can be physically estimated to examine the actual lighting area considering the effects of structural deformations.

## 1. 서 론

헬리콥터 외부 탐색등(search light) 구조는 비행중에 지속적으로 외부 공력하중의 영향을 받게 된다. 탐색등이 유동 흐름에 놓이게 될 경우 전면부가 평평하며, 후면부가 다소 둥근 형태인 뭉툭한 물체형상이기 때문에 지지 구조물과의 유동간섭 현상도 예상된다. 또한 부착 구조물을 경량화 설계하기 위해서는 정확한 외부 공력하중 데이터를 추출하여 이를 연계한 구조 응력해석이 수행되어야한다. 특히, 뭉툭한 형상의 경우 그 유동 특성상 다양한 유동박리(flow separation) 현상이 초래될 수 있는데, 후류에 발생하는 와류와의 상호 작용으로 인한 동적 버펫(buffet) 현상이 초래될 수 있다. 풍하중을 지속적으로 받는 구조물의 버펫 현상은 그 발생빈도가 높고 비교적 큰 진폭을 가질 수도 있기 때문에, 구조물 피로파손이나 정교한 성능에 예측하지 못한

문제를 유발할 수 있다. 따라서 최근에는 이러한 현상에 대한 중요성이 보다 크게 인식되고 있는 추세이며<sup>(1)</sup> 장대교량 등의 설계 안정성 검토에도 중요하게 고려되고 있는 사항이다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 우선 헬리콥터에 장착될 외부 탐색등 설계 모델에 대해 3차원 유동해석 격자를 생성하고, 전산유체역학(CFD) 기법을 도입하여 정상 및 비정상 공력해석을 수행하였다. 또한 구해진 공력하중을 기반으로 기본적인 구조 응력해석을 수행한 후 버펫 하중에 의한 구조진동 응답특성을 고찰하였다. 이를 위해 탐색등 및 지지구조에 대한 정적/동적 3차원 유한요소 모델링을 수행하였고, 임계 비행조건에 대한 구조안전성 및 탐색등의 성능변화 범위를 물리적으로 예측하여 보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 비정상 점성 방정식

비정상 압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 유동해석 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

† 국립경상대학교 기계항공공학부 및 항공기부품기술연구소, 교신저자  
E-mail : dhk@gnu.ac.kr

Tel : (055) 755-2083, Fax : (055) 755-2081

\* 국립경상대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 퍼스텍 (주)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij} + R_{ij}] \quad (2)$$

여기서, 전단응력 텐서, 변형 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu[S_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}]$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}]$$

또한

$$\tilde{u} = u_j - u_{g,j}$$

여기서,  $u_{g,j}$ 는 격자속도를 의미한다. 레이놀즈 응력 텐서

$R_{ij}$ 는 Bossiness 가설에 따라 다음과 같이 가정된다.

$$R_{ij} \cong \mu_T[S_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}] - \frac{2}{3}(\rho k)\delta_{ij} \quad (3)$$

식(1)~(3)은 유한차적법을 근간으로 하는 상용 전산유체해석 프로그램인 Fluent (Ver.6.2)를 이용하여 계산되었다.<sup>(3)</sup> 본 연구에서는 유동점성 및 박리 효과를 포함한 비정상 버펫 공력하중 계산을 위해 K- $\omega$  SST 난류모델을 사용하였고, RANS 방정식의 이산화를 위해서 2차 풍상기법(2nd upwind scheme)을 적용하였다.

## 2.2 구조해석 이론

직교좌표계에서 탄성범위 내의 구조요소는 수직응력(normal stress)과 각 면의 접선방향 전단응력(shear stress)성분으로 부하를 받고 있다. 여기서 9개의 응력 성분 중 세 개의 수직응력 성분인  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  과 여섯 개의 전단응력 성분인  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{zy}, \tau_{yz}$  로 구성되게 되고, 관련된 응력 텐서(tensor)는 아래 식과 같다.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

본 논문에서는 강도해석을 위해 Von-Mises 응력 기준식을 사용하였으며, 식(5) 같은 이론식에 근거하여 유한요소해석을 통해 구해지게 된다. 유한요소 구조 해석은 벨기에에서 개발되어 유럽에서 활발하게 사용하고 있는 SAMCEF (Ver.6.1)을 활용하였다<sup>(4)</sup>.

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} \\ &\quad + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

## 3. 해석결과 및 검토

### 3.1 해석모델

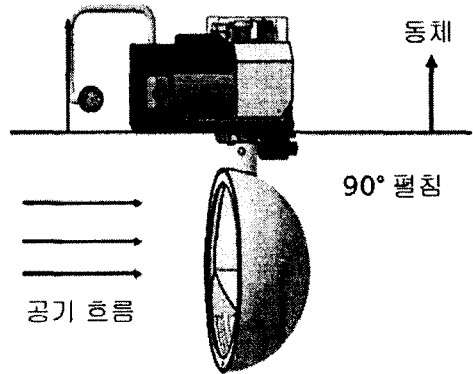
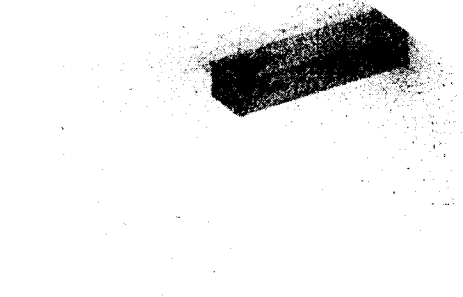


Fig.1 탐색등 형상 및 지지구조 개념도

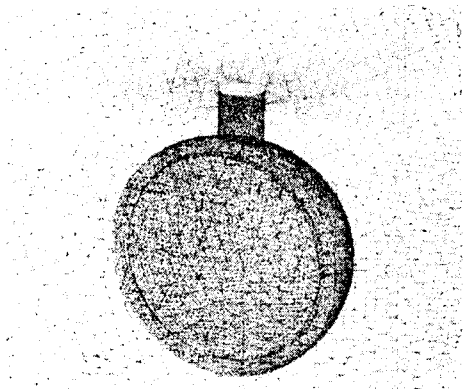
Fig.1은 본 연구에서 고려한 헬리콥터의 전형적인 탐색등 및 지지구조 형상을 보여주고 있다. 헬리콥터 동체 내부에 접혀있던 탐색등은 조종사의 작동 명령으로 회전운동을 하여 외부로 돌출될 수 있게 되어있다. 본 연구에서 고려한 모델의 경우 최대 110 kts와 180 kts의 속도로 비행하는 경우에 대해 안정성을 검토하도록 요구되어 있다.

### 3.2 공력하중해석

본 해석에 사용된 탐색등은 지름이 약 83 mm인 반원형 형태의 형상을 가진다. 탐색등에 작용하는 공력하중해석을 비교적 정확하게 해석하기 위해 유동점성 및 박리효과를 고려한 3차원 전산유체역학(CFD) 기법을 적용하였다. 공력해석 격자는 Fig.2에서 보는바와 같이 탐색등의 후류영역을 고려한 내부영역과 외부영역의 격자로 구성되어있고, 경계조건은 격자의 윗면에 벽면경계조건(wall boundary condition)을 적용하고 나머지 영역(외부격자의 나머지 바깥면)엔 원방경계조건(Far-field boundary condition)을 적용하여 격자에 대한 유동해석을 정의할 수 있게 하였다. 본 모델의 경우 생성된 총 격자수는 약 259,000 이다.



(a) 전체 격자 형상



(b) 탐색등 주위 격자계

Fig.2 탐색등 공력격자

버펫 하중해석을 위해 N-S방정식과 K- $\omega$  SST 난류모델이 적용되었고, 해면고도에서의 운항속도로 110 kts와 180 kts를 고려하여 탐색등의 유동해석을 수행하였다. 180 kts에서는 동적인 버펫하중을 예측하기 위하여 비정상 유동해석을 집중적으로 수행하였다. 비정상 유동해석을 위한 시간스텝(time step)은 0.0005sec이고 sub-iteration은 30번을 적용하였다.

Fig.3는 180 knot로 비행하는 경우에 대한 해석결과로 압력선도를 보여주고 있다. 유동해석의 결과 110 kts에서의 유동방향으로 약 56.5N 공력하중이 예측되었고, 180 kts에서는 약 159N의 공력하중이 예측되었다. 특히, 180 kts에서의 비정상 유동해석에서는 탐색등에 부가되는 비정상 버펫하중이 Fig.4에서 같이 예측되었다. Fig.5은 특정 시간스텝에서의 유선 모양을 보여주고 있는데, 탐색등 후류 영역에서 심한 유동박리 현상이 초래될 수 있음을 확인할 수 있다.

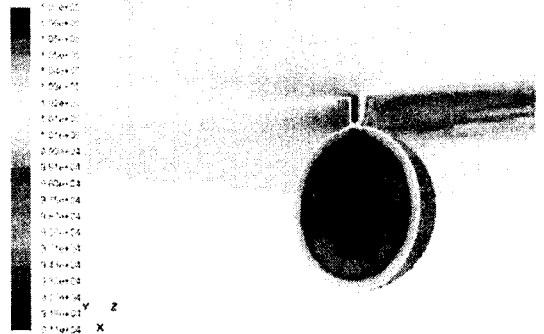


Fig.3 탐색등 주변의 등압력선도

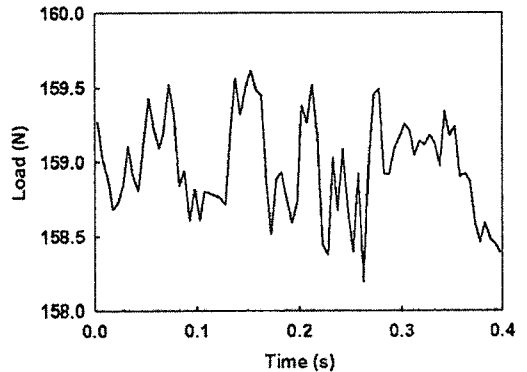


Fig.4 탐색등에 부가되는 비정상 공력 버펫하중



Fig.5 탐색등 주변의 흐름패턴 예

### 3.3 정적구조해석

탐색등 구조물은 주로 Al 6061-T6(Tensile Strength : 275MPa)로 이루어져 있으며, 동체로 연결되는 지지 축은 SUS630(Tensile Strength: 340MPa) 재질로 이루어져 있다. 기구학적 이동구조를 포함한 탐색등의 전체적인 구조 모델 형상은 Fig.6과 같다. 유한요소 구조해석을 위해 공력하중에 의해 많은 영향을 받을 수 있는 부분들을 모두 포함하여 고려하였다(Fig.7). 그림과 같이 구조진동해석을 위한 유한요소모델은 총 59,640개의 절점과 총 30,514개의 요소

로 구성되어 있다.

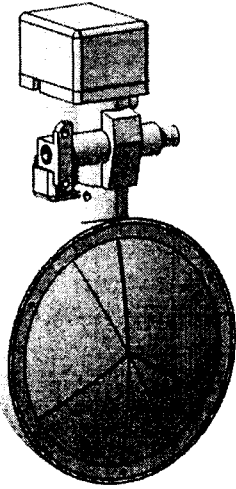


Fig.6 탐색등의 전체적인 구조형상



Fig.7 3차원 유한요소 구조모델

우선 탐색등 구조물의 정적 구조안정성을 판단하기 위해 110 kts에서 발행하는 공력하중인 56.5N과 180 kts에서 발생하는 공력하중인 146N을 부가하여 구조해석을 수행하였다. Fig.8은 정적 공력하중에 의해 유발되는 응력수준을 예측해본 결과이다. 동체로 연결되는 축이 탐색등 케이스에 연결되는 지점에서 최고응력이 발생함을 알 수 있다. 첫 번째로 110 kts의 비행속도 조건에서는 유발되는 최고응력이 44.9 MPa로써 탐색등의 인장강도인 275 MPa보다 매우 낮은 수준임을 알 수 있다. 두 번째로 180 kts의 비행속도

조건에서는 유발되는 최고응력이 118 MPa로 나타났는데 이 경우도 재료의 인장강도인 275 MPa 보다 낮게 예측되었다. 이 경우 안전계수는 아래와 같이 약 1.33 정도로 나타났다.

$$M.S = \frac{\text{Tensile Str.ength}}{\text{Maximum Stress}} = \frac{275\text{MPa}}{118\text{MPa}} - 1 = 1.33$$

참고로 180 kts 비행조건 하중에 안전계수 1.5를 적용한 219 N의 공력하중을 부가한 경우는 유발되는 최고 응력수준이 약 149 MPa로 나타나 정적인 구조안정 조건은 충분히 여유가 있음을 알 수 있었다.

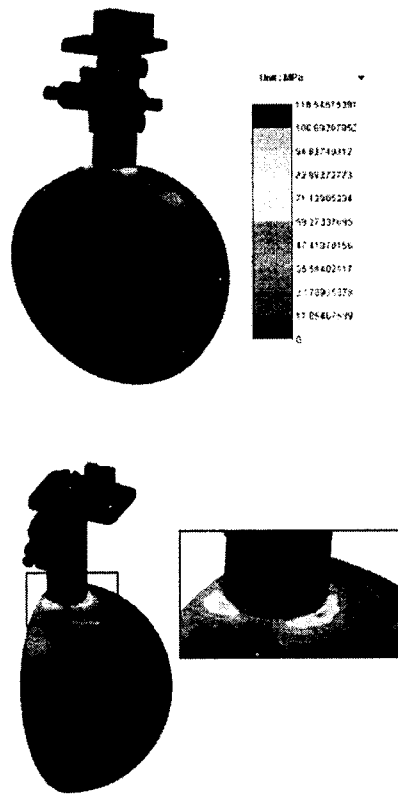


Fig.8 탐색등에 대한 정적 응력해석 결과

### 3.4 Buffet 구조진동해석

탐색등 주위의 유동박리 현상과 동적인 버펫하중에 의해 유발되는 구조물의 안정성을 판단하기 위해 천이응답해석을 수행하였다. 이 때 동적 외력은 비정상 공력해석을 통해 얻어진 Fig.4와 같은 버펫 하중을 부가하여 이에 대한 응답을 구하였다. Fig.9는 180 kts로 비행하는 경우 버펫 하중에 의해 유발될 수 있는 탐색등의 동적변위 응답을 나타내고

있다. 탐색등은 작동명령에 따라 피치 운동을 할 수 있도록 기계역학적인 메커니즘을 포함하고 있는데, 외부의 동적하중이 추가되는 경우 피치 메커니즘과 연동되어 그림과 같이 시간에 따른 회전응답 변위가 도출되게 된다. 결과를 고찰해 보면 시간에 따라 회전응답 변위가  $-0.54^{\circ} \sim -0.61^{\circ}$  사이에서 지속적으로 반복되는 특성을 나타내고 있다. 이는 물리적인 관점에서 헬리콥터가 해당 속도로 운항 중에 탐색등을 작동하는 경우 지상에 비춰지는 불빛 영역 또한 흔들리게 됨을 의미한다. 약  $0.07^{\circ}$  진폭으로 각도가 지속적으로 변화할 수 있는데, 이는 약 1km 전방을 비춘다고 가정할 때, 약 1.2 m ( $1000\text{m} \times 0.07^{\circ} \times 3.14/180^{\circ}$ ) 정도의 흔들림이 발생할 수 있음을 의미한다. 본 모델의 경우 보아 동적 버퍼하중에 의한 공진현상은 관찰되고 있지 않기 때문에 구조적인 건정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim, H. D., 1999 "Study on the Estimation of Aerodynamic Admittance and Its Application to Buffeting Response" 한국풍공학회지, Vol. 3, No. 2, pp. 158~167.
- (2) Cho, Y. L., Cho, J. Y. and Lee, H. E., 2006, "Numerical Analysis for the Evaluation of Buffeting Response of a Long Span Bridge in Turbulent Wind Flow", 한국풍공학회지, Vol. 10, No. 1, pp. 45~53.
- (3) FLUENT User's Manual V.6.3, FLUENT Inc., 2006.
- (4) SAMCEF Static Analysis Module, User's Manual, 2006, SAMTECH Co.

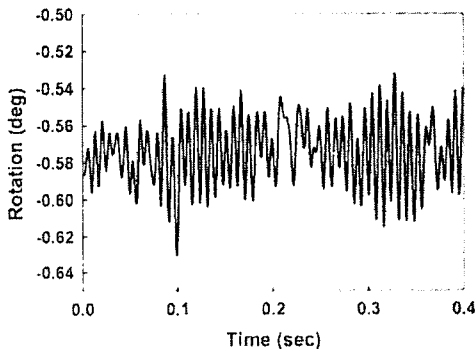


Fig.9 버퍼하중에 기인한 탐색등의 회전변위 응답

## 결 론

본 연구에서는 헬리콥터에 장착되는 탐색등 모델에 대해 유동마리 효과를 고려한 버퍼(buffet) 유동해석을 수행하였으며, 공력과 구조모델을 연계하여 이에 기인한 구조진동 안정성 해석을 성공적으로 수행하였다. 해석결과 설계된 탐색등 모델의 경우 임계 비행조건에서의 풍하중 조건에 대해 정적 및 동적인 구조 건정성을 충분히 확보하고 있음을 알 수 있었다. 또한 동적인 버퍼 하중에 의해 탐색등에 부수적인 피치 운동이 유발될 수 있음을 파악하였으며 지상 탐색 임무 수행시 이로 인해 지상으로 투영된 빛영역의 떨림 현상 정도를 정밀해석을 통해 사전에 예측해 볼 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 퍼스텍(주) 및 2단계 BK21사업에 후원된 연구 결과의 일부이다.