

# 항공기 이·착륙 시 초대형 부유식 해양구조물의 시간 영역 응답 해석

신현경\* · 이호영\* · 임춘규\* · 강점문\*\* · 윤명철\*\*

\*울산대학교 수송시스템공학부

\*\*현대중공업(주) 구조설계부

## Transient Responses of an Airplane Taking off from and Landing Very Large Floating Structure in Waves

H. SHIN\*, H.Y. LEE\*, C.G. LIM\*, J.M. KANG\*\*, M.C. Yoon\*\*

\*School of Transportation System Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

\*\*Hyundai Heavy Industry Co. Ltd, Ulsan 682-792, Korea

**KEY WORDS:** Very large floating structure 초대형 부유식 해양 구조물, Source-dipole distribution method 소오스-다이폴 Newmark  $\beta$  method 뉴마크베타법, Dynamic load 동적 하중, Drag 항력

**ABSTRACT:** *Up to this day, Most studies of hydroelasticity are inclined to frequency domain analysis. This analysis of the landing, take-off, and dropping of aircraft on a structure. So, the concern of this paper is a transient response of a VLFS subjected to dynamic load induced by airplane landing and take-off. To predict added mass, damping wave exciting force, the source-dipole distribution method were used. The responses are accomplished by F domain analysis method is based on Newmark  $\beta$  method to pursuit time step procedure taking advantage function for hydrodynamic effects.*

### 1. 서 론

1977년 일본의 간사이공항에 관한 연구가 시작된 이래로 부유식 해상 공항의 연구는 발전되어 왔다.

구조물은 유탄성 운동을 하므로 운동을 해석하기 위해선 많은 자유도의 계산이 필요하고 파도, 바람 등의 외부 환경적 영향 외에도 비행기 이·착륙 같은 외력 등도 고려되어야 한다.

주파수 영역에서의 해석은 VLFS(Very large floating structure) 유용한 해석법인 반면에 항공기 이·착륙 문제, 선박과의 충돌 문제, 항공기와의 충돌문제등의 충격문제를 해석하기에는 어려움이 있다. 따라서 충격문제를 해석하기 위하여 시간영역 해석이 필요하다.

Yeung 등은 부유구조물 위의 움직이는 하중을 원으로 가정하여 하중에 의한 구조물의 변형등을 해석하였고(Yeung and Kim 1998), Endo 등은 일본에서 실증 실험을 한 MF-300 구조물을 대상으로 규칙파 중 비행기가 이·착륙하는 경우에 대해 실험 및 수치해석을 수행하였다.

본 논문에서는 소오스-다이폴 분포법을 사용하여 주파수 영역에서 부가질량, 감쇠계수 및 파강제력을 계산하여 이를 토대로 기역효과함수를 계산한 후 시간 영역에서 유한요소법을 이용하여 이 등이 사용한 뉴마크베타법으로 시간적분을 수행하였다.

계산 모델은 Endo 등이 수행한 모델과 같은 모델을 도입하였

으며 규칙파 중에서 항공기가 이·착륙할 때 동적 하중을 계산하여 구조물의 응답, 모멘트 및 항력을 해석하였다.

### 2. 해석 방법

#### 2.1 운동방정식

주파수 영역에서 동유체력은 곱 적분에 의해 고려되고 유체력이 선형으로 변한다는 가정 아래 초대형 부유식 해상 구조물을 판 요소로 조합되어있다고 생각하면 시간영역의 해석을 하기 위한 운동방정식은 다음과 같다(Cummins, 1962).

$$\sum_{j=1}^{(3 \times N_x \times N_y)/4} [(M_{ij} + A_{ij}) \ddot{x}_j(t) + \int_0^t R_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j d\tau + (C_{ij} + K_{ij}) x_j(t)] = F_{wi}(t) + F_{li}(t) \quad (i=1,2,3, \dots, 3 \times N_x \times N_y/4) \quad (1)$$

$$R_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

where,  $M$  : mass,  $A$  : added mass  
 $B$  : damping,  $C$  : static restoring  
 $K$  : stiffness,  $R_{ij}$  : memory effect function  
 $F_{wi}$  : wave exciting force  
 $F_{li}$  : dynamic load

위의 (1)식에서  $N_x$ 와  $N_y$ 는 각각 부체의  $x$ 방향과  $y$ 방향의 유체 요소수이고 앞에 3은 Heave, Roll, Pitch운동을 나타낸 것이다.

그리고 1/4는 4개의 유체요소를 1개의 구조요소로 치환하기 위해 나타낸 것이다.

식 (1)에서 무한대의 부가질량 계수는 다음과 같이 나타낸다.

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0} \int_0^{\infty} R_{ij}(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

where,  $A_{ij}(\omega_0)$ : 임의의 주파수에서의 부가질량

본 논문에서는 감쇠계수와 부가질량 값이 0에 가까운 주파수까지 계산하고 나머지는 0으로 치환하였다(이와 신, 2000).

## 2.2 수학적 모델

본 논문에서는 일본에서 실험 해역 실험과 해석을 마친 구조물인 MF-300을 기준으로 계산하였다(Endo, 1999).

구조물의 기본 제원은 Table 1과 같다.

**Table 1** Particulars of MF-300

L×B×D	300m×60m×2m
Draft	0.5m
Water depth	8m
EI (Bending stiffness)	$4.78 \times 10^8 \text{ KN-m}^2$

구조물은 FEM을 해석을 위해 36×8개의 판 요소로 분할 하였다. 따라서 구조 모델의 총 자유도수는 999개(3×37×9)가 된다.

활주로는 길이방향의 중심선으로부터 3.75m 떨어진 곳에 위치하고 비행기 이·착륙은 F.P에서부터 58.33 m 떨어진 위치에서 출발하는 것으로 결정하였다.

이·착륙하는 항공기의 질량은 3톤이고, 제원은 Table 2와 같다.

**Table 2** Particulars of the model airplane

	착륙	이륙
속력	150 Km/h	150 Km/h
가속도	$-5.79 \text{ m/s}^2$	$+5.79 \text{ m/s}^2$
거리	150 m	150 m
시간	7.2 sec.	7.2 sec.

항공기에 의해 구조물에 유기 되는 하중은 활주로의 수직방향으로만 작용되며, 이 수직방향의 힘은 속도의 자승에 비례하는 양력(Lift force)만큼 줄어들고, 하중은 점하중(Point)으로 가정하였다. 수직방향의 하중은 식(4)와 같이 나타내었다.

$$F_l = W - \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 l C_l \quad (4)$$

where,  $W$ : mass of airplane,  $\rho_{air}$ : density of air

$U$ : velocity,  $l$ : length of airplane

$C_l$ : lift coefficient

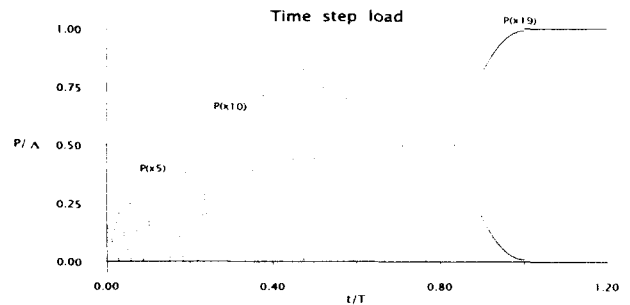
각 위치에서의 하중은 요소 중앙점 위치에서의 하중값을 최대

로하고 이에 인접한 두 개의 요소사이의 중앙점 위치에서의 최소값으로 연결하여 비행기가 지나가는 각 요소내부의 하중을 결정하였다.

## 3. 계산 결과

### 3.1 착륙

Table과 식(4)를 이용하여 착륙할 때의 하중은 Fig. 1과 같이 나타낸다.

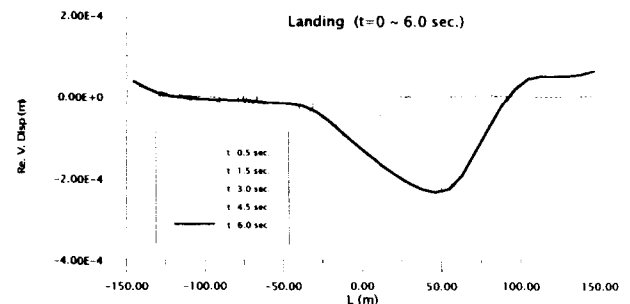


**Fig. 1** Time step load during landing

Fig. 1에서  $x$ 축의  $T$ 는 착륙시간으로 7.2초이고  $y$ 축의  $P$ 는 동적하중,  $\Delta$ 는 비행기의 질량 3000 kg이다.

비행기는 p(x1)요소의 중앙부에 착륙을 시작하여 총 7.2초동안 활주한다. 7.2초 후에는 비행기가 정지하고 비행기가 요소 중앙점에 위치하므로 마지막 요소에 하중 3000 kg이 작용된다.

정수 중에서 비행기의 착륙에 의한 시간에 따른 활주로의 변형을 Fig. 2에 나타내었다.



**Fig. 2-1** Deformed profile of the runway subjected to landing (t=0~6.0 sec.)

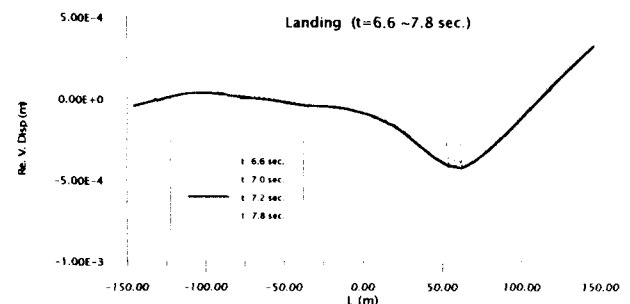


Fig. 2-2 Deformed profile of the runway subjected to landing (t=6.6~7.8 sec.)

Fig. 2에서 각 시간 별 항공기의 위치는 ○로 표시하였다. 비행기가 착륙하면서 하중은 증가하고 이에 따른 활주로의 변형도 증가함을 알 수 있다. 비행기가 정지하는 7.2초 후에는 약 0.05 Cm정도 활주로가 변형됨을 알 수 있다.

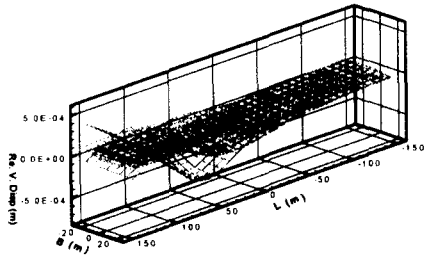


Fig. 3 Deformed profile of the structure subjected to landing (t=3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.2 sec.)

Fig. 3은 비행기의 착륙으로 인한 하중으로 구조물의 전체적인 변형을 3초, 4초, 5초, 6초, 7.2초마다 표현한 것이다.

Fig. 4은 정수 중에서 비행기가 착륙할 때의 6.8초부터 7.4초까지 0.2초 간격으로 길이 방향의 굽힘 모멘트의 변화를 나타낸 것이다.

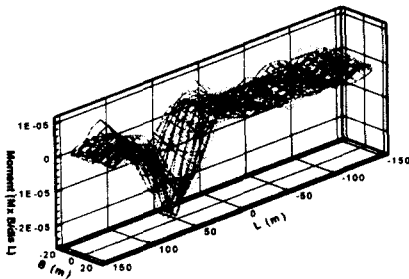


Fig. 4 Bending moment profile of the runway subjected landing load (t=6.8, 7.0, 7.2, 7.4 sec.)

Fig. 4에서 y축은 무차원화한 값(moment × B/displacement × L로 표현하였다.

굽힘 모멘트도 역시 시간이 지나면 하중이 증가하므로 모멘트도 시간에 따라 증가함을 나타낸다.

Fig. 5는 파주기 4.4초, 파장 30m, 파고 1m의 규칙파가 입사한 후 한 주기(4.4초)동안 파하중에 의해서만 나타나는 활주로의 변형을 표시한 것이다.

Fig. 6는 주기 4.4초, 파고 1m인 규칙파가 선수쪽으로부터 선미 쪽을 향하여 입사하고 이와 동시에 비행기가 입사파 방향으로 착륙할 때 파하중과 비행기의 착륙하중에 의한 활주로의 변형

을 나타낸 것이다.

파도 중의 안정적인 수직 변위를 나타내기 위해서 파도의 한 주기(4.4초)가 지나고 난 후부터 비행기가 착륙을 시작하는 것으로 하였고, 비행기가 진행하는 방향과 파도가 입사하는 방향을 같게 하여 계산하였다.

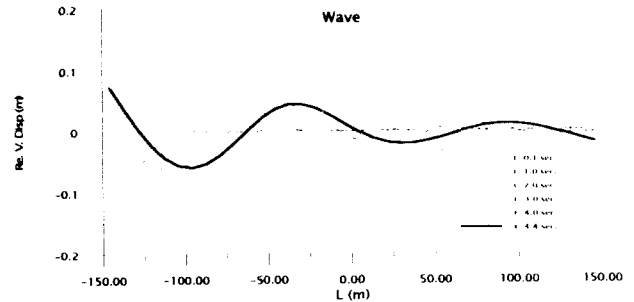


Fig. 5 Deformed profile of the runway subjected to wave load 파도 중에서는 비행기의 착륙에 의한 변형은 파도에 의한 구조물의 변형에 비하여 거의 무시하여도 될 만큼 나타나지 않는다. 즉, 파하중이 비행기의 하중에 비해 구조물의 변형에 결정적 역할을 한다.

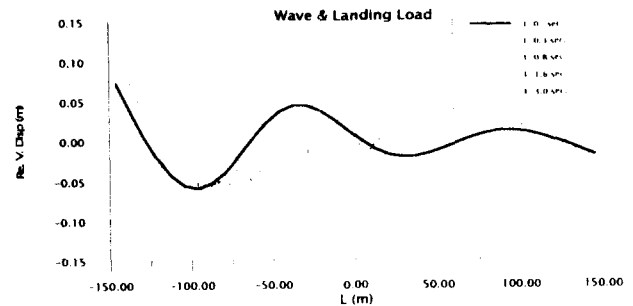


Fig. 6-1 Deformed profile of the runway subjected to wave landing load (t=0~2.0 sec.)

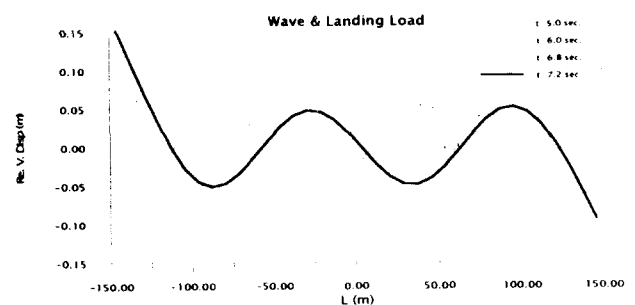


Fig. 6-2 Deformed profile of the runway subjected to wave landing load (t=5.0~7.2 sec.)

### 3-2. 이륙

이륙 시 비행기는 등가속도(+5.79 m/s<sup>2</sup>)로 운행하고 처음에는 3000 kg의 하중으로 정지하였다가 갑자기 출발하는 것으로 가정하고, 가속도의 변화 외에는 착륙 시와 같은 조건하에서 계

산을 수행하였다.

이륙 시 비행기에 의한 하중의 변화는 Fig. 7과 같다.

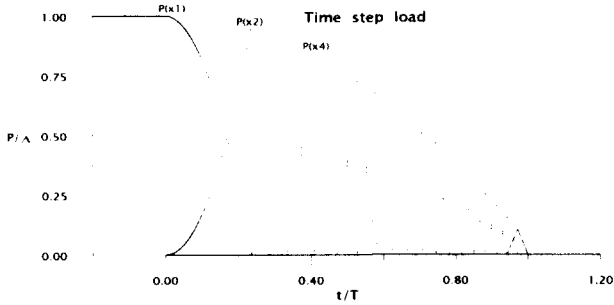


Fig. 7 Time step load during take-off

정수 중에서 비행기가 이륙하는 동안 변형되는 활주로의 모양을 Fig. 8에 나타내었다.

비행기는 착륙과 마찬가지로 F.P.에서부터 58.33 m 떨어진 위치에서부터 착륙하는 것으로 하였다. 처음 약 0.05cm 정도의 변형에서 시간이 지남에 따라 활주로의 변형이 점점 줄어들고, 처음의 변형은 착륙에서의 마지막 시간(7.2초)일 때의 변형과 비슷한 양의 변형을 보인다.

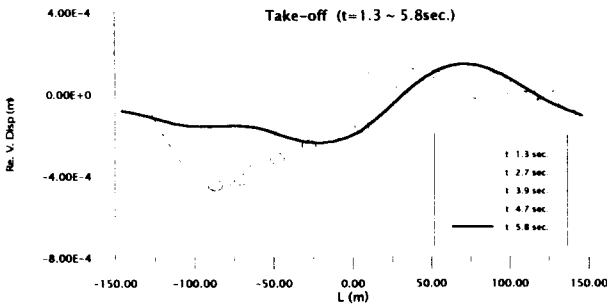


Fig. 8-1 Deformed profile of the runway subjected to take-off load (t=1.3~5.8 sec.)

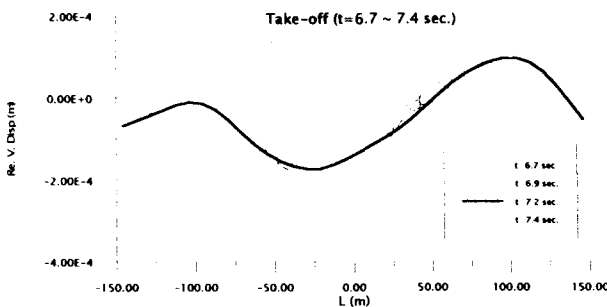


Fig. 8-2 Deformed profile of the runway subjected to take-off load (t=6.7~7.4 sec.)

Fig. 9는 주기 4.4초, 파고 1m인 규칙파가 선수쪽으로 입사하고 이와 동시에 비행기가 입사파 방향으로 이륙할 때 파하중과 비행기의 이륙하중에 의한 활주로의 변형을 나타낸 것이다.

비행기는 정수 중에서 이륙할 때와 같은 조건으로 이륙하는 것으로 가정하였고, 한 파장동안(4.4초)동안은 하중 3000kg이

한 요소에 연속해서 작용하고 갑자기 비행기가 움직이기 시작하여 7.2초 후에는 완전히 비행기에 의한 하중이 없는 것으로 계산을 하였다.

착륙할 때와 비슷하게 비행기에 의한 하중보다 파하중의 영향이 지배적이어서 활주로의 변형은 착륙 때와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

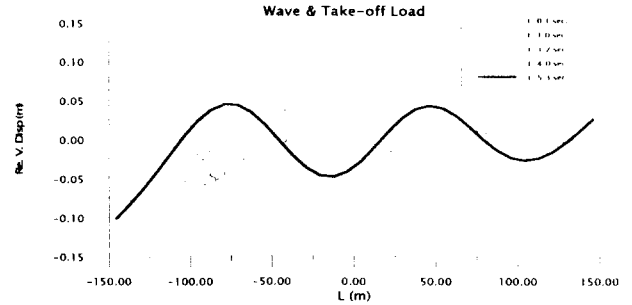


Fig. 9-1 Deformed profile of the runway subjected to wave take-off load (t=0.1~5.3 sec.)

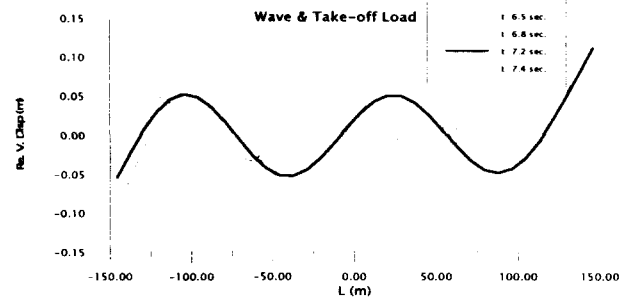


Fig. 9-2 Deformed profile of the runway subjected to wave take-off load (t=6.5~7.4 sec.)

Fig. 10은 파하중과 비행기의 이륙하중이 동시에 구조물에 작용될 때 구조물 전체의 길이 방향 굽힘 모멘트를 나타낸 것이다.

앞의 Fig. 9에서와 같이 구조물의 변형뿐만 아니라 모멘트도 비행기의 하중 보다 파하중에 의해 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

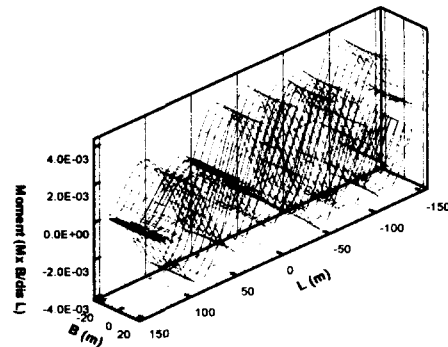


Fig. 9 Bending moment profile of the runway subjected to

and landing load (t=0, 0.5, 1.8, 7.2 sec.)

### 3.3 항력

활주로의 변형은 비행기의 항력에 영향을 준다. 항력은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$D = \Delta \frac{dz}{dx} \quad (5)$$

where,  $z$  : vertical displacement of the runway  
 $\Delta$  : mass of airplane

Fig.10의 항력은 입사파가 비행기의 진행방향과 동일하게 선수에서 선미쪽으로 진행할 때 계산한 결과로 비행기의 무게를 나누어 무차원화 하였고, 값은 약  $\pm 0.003$  범위에 있다.

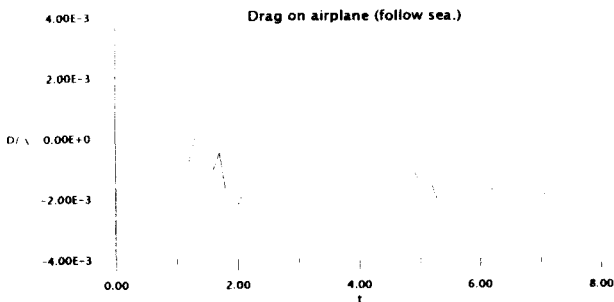


Fig. 10 Time history of drag during take-off run

## 4. 결 론

본 연구는 일본에서 실험역 실험을 행한 MF-300을 대상으로 비행기 이·착륙에 대한 초대형 부유식 해상 구조물의 변형과 굽힘 모멘트의 변화를 계산하였고, 다음 결론을 도출하였다.

- 1) 비행기의 이·착륙으로 인해 구조물은 활주로를 기준으로 V자 형태로 변형을 일으키고 비행기가 진행함으로 인해 구조물에 약한 탄성 진동(Elastic vibration)을 일으킨다.
- 2) 비행기의 이·착륙에 의한 구조물의 변형은 수직방향으로 약 5cm 내외의 값으로 나타난다.
- 3) 파중의 구조물의 변형은 비행기의 하중보다는 파하중의 영향이 구조물 전체 변형에 큰 영향을 미친다.
- 4) 항력의 증가는 구조물의 변형에 중요한 영향이 되나, 항력의 양은 매우 작은 값으로 나타난다.
- 5) 앞으로 좀 더 거대한 구조물에 대한 해석이 필요하며, 실험과의 비교 연구도 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 이호영, 신현경(2000). "시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동 해석", 한국해양공학회지, 제14권 제3호
- Cummins, W. E,(1962), "The Impulse Response Function and Motions", Schifftechnik Bd, pp101~109
- J. W. Kim and W. C. Webster,(1996). "The Drag of an Airp Taking Off from a Floation Runway", VLFS'96, pp235~2
- J. W. Kim and W. C. Webster,(1998). "An Eigenfunc-Expansion Method for Predicting Hydroelastic Behavior Shallow-Draft VLFS", RIAM, pp47~59.
- R. W. Yeung and J. W. kIM,(1998). "Structural Drag Deformation of a Moving Load on a Floating Plate", RI pp77~89.
- H. Endo(1999). "The Behavior of an Airplane Taking Off from landing on a VLFS in Rough Sea Condition", VLFS'99, p 2~218.