

## 수직이착륙 무인기 함상 착륙점의 상하 운동 추정

조암<sup>1,†</sup> · 유창선<sup>1</sup> · 강영신<sup>1</sup> · 박범진<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국항공우주연구원 항공기술연구소 미래비행체계실

### Heave Motion Estimation of a Ship Deck for Shipboard Landing of a VTOL UAV

Am Cho<sup>1,†</sup>, Changsun Yoo<sup>1</sup>, Youngshin Kang<sup>1</sup> and Bumjin Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Future Aircraft System Division, Korea Aerospace Research Institute

**Abstract** : When a helicopter lands on a ship deck in high sea states, one of main difficulties is the ship motion by sea wave, In case of a manned helicopter, a pilot lands a helicopter on the deck during quiescent period of ship motion, which is perceived from different visual cues around landing spot. The capability to predict this quiescent period is very important especially for shipboard recovery of VTOL UAV in harsh environments. This paper describes how to predict heave motion of a ship for shipboard landing of a VTOL UAV. For simulation, ship motion by sea wave was generated using a 4,000 ton class US destroyer model. Heave motion of ship deck was predicted by applying auto-regression method to generated time series data of ship motion.

**Key Words** : Shipboard Landing, Ship Deck Motion Estimation, VTOL UAV, Sea Wave

#### 1. 서 론

한국항공우주연구원에서 ‘21세기 프론티어 연구개발 사업’의 일환으로 개발한 스마트무인기는 회전익 및 고정익 비행이 가능한 틸트로터 무인기로 2011년 자동이착륙, 고정익, 회전익, 천이 비행을 포함한 비행시험을 성공적으로 마친 바 있다. 현재 스마트무인기의 활용성을 높이기 위한 연구들이 진행되고 있으며, 그 중 하나로 스마트무인기의 함상이착륙에 관한 연구가 진행되고 있다 [1].

수직이착륙 항공기의 함상운용 제한조건(SHOL: Ship Helicopter Operating Limit)은 함상이착륙 단계에서 결정된다. 수직이착륙 항공기의 함상이착륙은 육상과 달리 파도에 의한 함정의 운동(Fig. 1), 바람에 의한 착륙장 주위의 와류, 함정의 배기가스 등 많은 외부 요인에 의해 영향을 받는다.

함상이착륙은 수직이착륙 항공기의 해상에서의 활용성을 높이기 위한 가장 중요한 요소이다.



**Fig. 1** Helicopter Shipboard Landing  
(<http://people.ischool.berkeley.edu/~aragon/>)

유인 헬리콥터의 함상 착륙 단계에서, 조종사는 함정 위의 다양한 시각적 신호 (visual cue)를 이용하여, 함정의 자세, 비행체와 함정의 상대 거리 등을 인지하고 이로부터 함정의 움직임이 안정화되는 시점을 예측하여 착륙한다. 이러한 시각적 신호 이외에도 함상 착륙을 돕기 위해, 파도에 의

한 함정의 움직임을 예측하여 착륙 시점을 알려 주는 장비, 함상 착륙 유도 시스템, 착함시스템 등 다양한 장비들이 함상에서 사용되고 있다. 유인기와 달리 조종사의 시각적 판단에 의존할 수 없는 무인기의 경우, 함정이 움직이는 상황에서 착륙 시점을 결정하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 수직이착륙 무인기의 함상 자동 이착륙을 위해 함정의 상하 운동을 예측하는 방법을 제시한다. 제원이 공개된 4000톤 급의 미 해군함 모델을 이용하여 파도에 의한 함정의 상하 운동을 모사하였고, 모사된 함정의 시계열 데이터(time-series data)에 자동 회귀 기법을 적용하여 5초, 10초 후의 함정의 상하 운동을 예측하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 파도 모사

세계기상기구에서는 해상상태를 파고의 대표치인 유의파고(Significant wave height)의 크기에 따라 0-9의 10단계로 구분하고 있다.

Table 1 Sea state

Sea State Number	Significant Wave Height (m)		Sustained Wind Speed (Knots)*		% Prob. of Sea State	Wave Period (s)	
	Range	Mean	Range	Mean		Range†	Most Prob.‡
0-1	0.00-0.10	0.05	0-6	3.0	0.70	—	—
2	0.10-0.50	0.30	7-10	8.5	6.80	3.3-12.8	7.5
3	0.50-1.25	0.88	11-16	13.5	23.70	5.0-14.8	7.5
4	1.25-2.50	1.88	17-21	19.0	27.80	6.1-15.2	8.8
5	2.50-4.00	3.25	22-27	24.5	20.64	8.3-15.5	9.7
6	4.00-6.00	5.00	28-47	37.5	13.15	9.8-16.2	12.4
7	6.00-9.00	7.50	48-55	51.5	6.05	11.8-18.5	15.0
8	9.00-14.00	11.50	56-63	59.5	1.11	14.2-18.6	16.4
>8	>14.00	>14.00	>63	>63.0	0.05	15.7-23.7	20.0

해상의 파도는 다양한 주파수의 정규(규칙)파가 중첩된 비정규(불규칙)파로 표현 된다 [2-3].

$$\eta(x,t) = \sum_{j=1}^M a_j \cos(k_j x - \omega_j t + \theta_j) \quad (1)$$

$\eta(x,t)$ : 시간 t, 원점으로부터 위치 x에서의 파고  
 $a_j$ : j 번째 정규파의 진폭

$k_j$ : j 번째 정규파 파수 (wave number =  $2\pi/\text{파장}$ )

$\omega_j$ : j 번째 정규파의 각주파수 (=  $2\pi/\text{주기}$ )

$\theta_j$ : j 번째 정규파 위상,  $(0, 2\pi)$ 에 균일하게 분포

수심이 충분히 깊은 경우(수심  $\geq \lambda/2$ )에는 분산관계식(dispersion relationship)에 의해 파도의 파수(또는 파장)와 주파수는 아래 식과 같은 관계를 갖는다.

$$k_j = \frac{\omega_j^2}{g} \quad (2)$$

임의의 지점에서 파고는 가우시안 분포를 따르므로, 파고의 파워스펙트럼밀도(PSD: Power Spectrum Density) 함수  $S_\eta(\omega)$ 을 알면, 이로부터 파고의 진폭  $a_j$ 을 계산한 수 있다.

$$a_j = \sqrt{2S_\eta(\omega_j)\Delta\omega} \quad \Delta\omega: \text{주파수 간격} \quad (3)$$

파도의 파워스펙트럼밀도 함수는 북대서양, 연근해, 대양 등을 모사하는 다양한 모델들이 제시되어 있다. 본 논문에서는 대양을 표현하는 데 가장 많이 사용되고 있는 아래 식의 Bretschneider 스펙트럼을 사용하였다.

$$S_\eta(\omega) = \frac{5w_m^4}{16w^5} H_s^2 e^{-1.25w_m^4/w^4}, \quad (4)$$

$H_s$ : 유의파고

$w_m$ : 가장 많이 나타나는 파도 각주파수

Bretschneider 스펙트럼을 이용하여 생성한 해상 상태 3, 5에서의 파고를 Fig. 3에 도시하였다. 유의 파고 및 파고의 각 주파수는 Table 1의 값을 사용하였다.

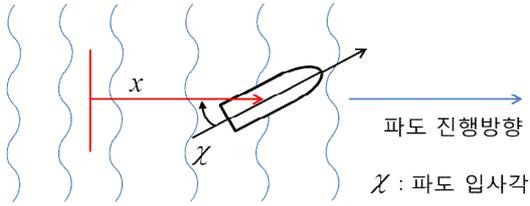


Fig. 2 Sea wave encounter angle

함정과 파도의 상대 운동에 의한 도플러 효과로, 함정에서는 파고가 조우주파수(encounter frequency)  $w_e$ 로 관측된다. 전진속도가  $U$ 인 함정에 파도가 입사각  $\chi$ 로 입사할 때 (Fig. 2), 파고의 조우주파는 다음과 같다.

$$w_e = w - kU\cos\chi = w - \frac{w^2 U \cos\chi}{g} \quad (5)$$

함정속도 10노트, 입사각 150도인 경우, 해상상태 3, 5에서 함정에서 관측되는 파고를 Fig. 4에 도시하였다.

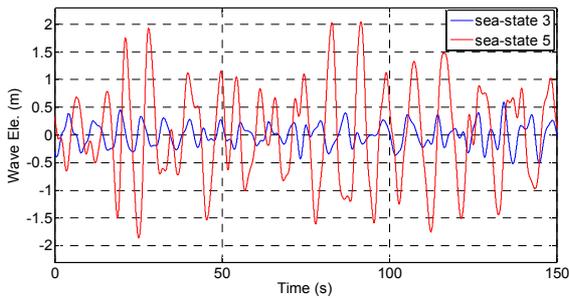


Fig. 3 Sea Wave Elevation

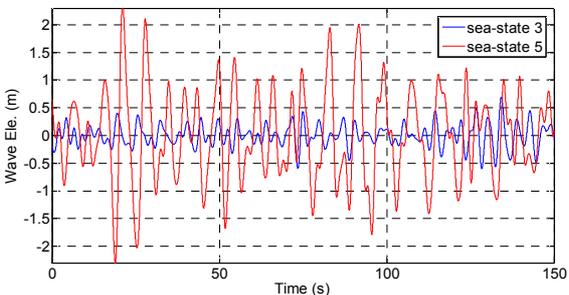


Fig. 4 Encountering Sea Wave Elevation:  $U=10$ kts,  $\chi=150^\circ$

## 2.2. 함상 착륙점 상하 운동 모사

함정을 선형불변 시스템으로 간주하면, 비정규 파도에 대한 함정의 반응은 Fig. 5와 같이 각 주파수의 정규 파도에 대한 함정의 반응을 중첩한 것과 같다.

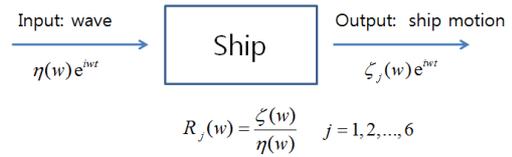


Fig. 5 Ship motion model by sea wave

파도에 의한 함정의 운동을 모사하기 위해서는 위 그림에서와 같이 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw 각 6축에 대한 해당 함정의 선박응답진폭함수(RAO: Response Amplitude Operator)  $R_j(w)$ 가 있어야 한다. 선박응답진폭함수는 함정의 형상 및 하중 특성, 함정의 속도, 파도 입사각의 함수이며 일반적으로 테이블의 형태로 주어진다. 본 논문에서는 제원이 공개된 4000톤급의 미 해군함 USS Joseph Hewes의 RAO를 이용하였다 [7].

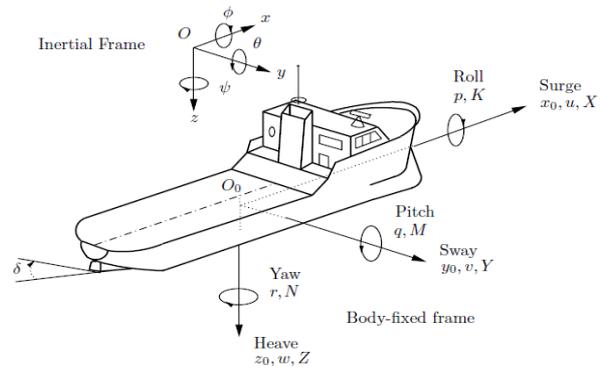


Fig. 6 Notation and sign convention of ship motion

파도에 의한 함정의 위치 변위는 함정 위의 위치에 따라 다르다. 파도에 의한 함정의 자세 변화가 작으면, Fig. 6의 좌표계로부터 함정 위의 임의의 지점  $(x^*, y^*, z^*)$ 에서 위치 변위는 아래와 같다.  $x, y, z$ 는 각각 함정 중심의 surge, sway,

heave 방향 변위이다.

$$\begin{aligned} \text{surge} : L_{surge} &= x - y^* \psi + z^* \theta \\ \text{sway} : L_{sway} &= y - z^* \phi + x^* \psi \\ \text{heave} : L_{heave} &= z - x^* \theta + y^* \phi \end{aligned} \quad (6)$$

함정 위의 착륙점  $(x^*, y^*, z^*) = (-50\text{m}, 0\text{m}, -7\text{m})$ 에서 위 식을 이용하여 생성한 상하운동을 Fig. 7에 도시하였다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 해상 상태: 5
- 파도 모델: Bretschneider 스펙트럼
- 함정 모델: 4000톤 급 USS Joseph Hewes
- 함정 속도: 10노트, 파도 입사각 150도

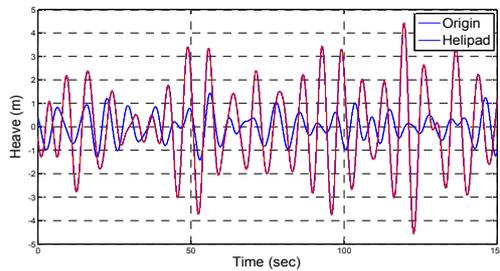


Fig. 7 Heave motion of heli-pad at sea-state 5

### 3. 함상 착륙점 상하 운동 예측

#### 3.1. 함정 운동 예측 기법

함정의 동역학 모델을 사용하여 함상 착륙점의 운동을 예측하는 방법의 정확도는 함정 모델의 신뢰성에 의해 결정된다. 함정 모델은 해상상태, 함정에 대한 파도의 입사각 등 다양한 조건들에 의해 영향을 받으므로 정확한 모델을 얻는 것이 쉽지 않다. 이에 비해 함정의 시계열 데이터를 이용하는 방법은 함정 모델이 필요 없으며 변화하는 해상 상태에도 쉽게 적용이 가능하지만, 많은 데이터를 처리해야 하는 단점이 있다. 시계열 데이터를 이용하여 함정 운동을 예측하는 방법은

크게 주파수 영역과 시간 영역에서 적용하는 방법으로 나뉜다 [4-6]. 본 논문에서는 함상 착륙점 상하 운동 예측을 위해, 함상 착륙점의 시계열 데이터에 시간 영역에서의 분석 기법인 자동 회귀 (Auto Regression: AR) 모델을 적용하였다.

Fig. 8은 함정 운동을 측정하기 위해 사용되고 있는 센서의 예로 함상 착륙점 근처에 설치되어 있는 센서이다. 본 논문에서는 함상 착륙점 근처에 장착된 고정밀 GPS/INS 센서로부터 함정의 위치 정보를 획득할 수 있는 경우를 가정하고, 앞에서 제시된 함정의 상하 운동 위치 데이터에 잡음을 추가하여 사용하였다. 함상 이착륙을 수행한 보잉의 Little bird 무인기, Schiebel 사의 S-100 무인기 등에서 이러한 시스템을 적용하고 있다.



Fig. 8 Ship Motion Sensor

#### 3.2. 자동회귀 기법을 이용한 함정 운동 예측

본 논문에서는 함정 상하 운동을 예측하기 위해, 상하 운동 위치 데이터에 자동 회귀 기법을 이용한다.

시간  $t-\tau$  까지의 함상 착륙점 위치 측정값으로부터 시간  $\tau$  후의 위치를 예측하는 자동회귀 모델을 아래와 같이 정의한다.  $m$ 은 자동회귀 모델의 차수이며,  $e(t)$ 는 백색 잡음이다. 모델 계수  $A(q^{-1})$ 에서  $q$ 는 시간차를 의미하는 연산자 (backward shift operator)이다.

$$y(t) = A(q^{-1})y(t-\tau+1) + e(t) \quad (7)$$

$$A(q^{-1}) = \sum_{i=1}^m a_i q^{-i}$$

위 모델을 이용하여 측정값과 추정값의 오차 제

곱합을 최소화 하는 모델 차수와 계수들을 추정한다. 실제상황에서는, 해상 상태의 변화에 따라 자동회귀 모델의 계수들이 변화할 수 있으므로 식 (8)과 같이 망각 상수 (forgetting factor)  $\lambda$ 를 도입한다. 일반적으로 변화가 느린 시스템에 대해, 망각 상수의 범위는 0.98~0.995 사이이다 [8].

$$J = \sum_{i=1}^t \lambda^{t-i} (y(i) - \hat{y}(i))^2 \quad (8)$$

앞장에서 모사된 함상 착륙점의 상하 운동 데이터에 위의 모델을 적용한 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 함상 착륙점의 상하 운동 데이터는 0.5 초로 샘플링 되고, 5초 후의 상하 운동을 예측하는 것으로 설정하였다. 가로축은 자동회귀 모델의 차수이며 세로축은 모델 예측치의 오차 수준을 나타낸다. 녹색과 푸른색의 결과는 각각 MDL (Minimum description length)과 AIC (Akaike information criterion) 기법을 이용한 결과이며 [9], 나머지 결과들은 식 (8)에서 망각 상수가 1인 경우의 추정 결과이다. 실시간 구현 시, 모델 차수의 증가는 계산량 및 메모리 증가의 원인이 되므로, 위의 결과에서 차수 증가에 따른 모델 정확도 향상 정도를 고려하여 모델차수를 28차로 결정하였다.

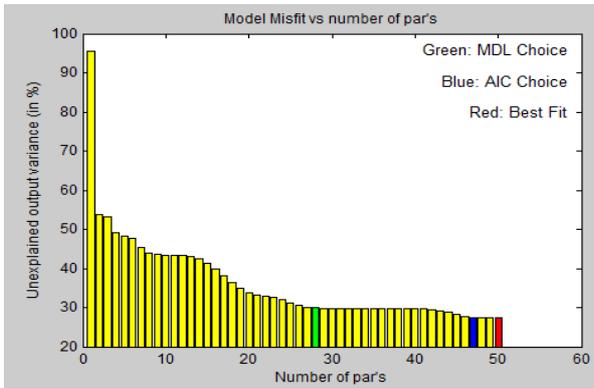


Fig. 9 AR Model for heave motion prediction

28차의 AR 모델을 적용하여 5초, 10초 후의 상하 운동을 예측한 결과를 Fig. 10에 보였다. Fig.

11에 5초 후 예측된 결과의 오차를 도시하였다. 100초 동안의 데이터 중 오차가 1m를 넘어서는 구간은 5초 이내이다. 이러한 오차는 Fig. 10에서 예측 값이 약 1초 정도의 시간 지연을 갖기 때문에 발생한 것이며, 함정 상하 운동의 변곡점 구간들만을 고려하면 위치 오차는 1m 이내에서 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

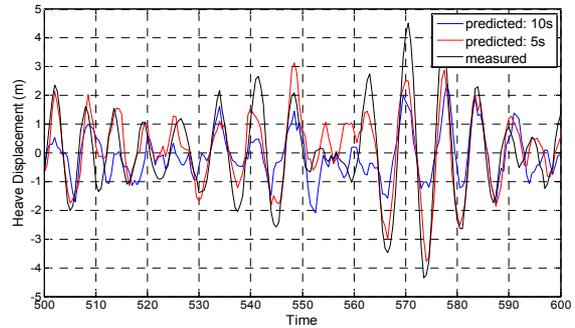


Fig. 10 Measured and predicted heave motion

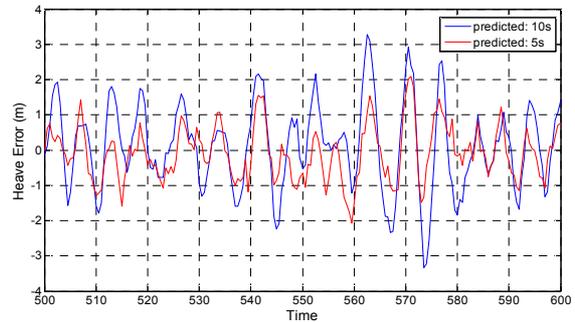


Fig. 11 The error of predicted heave motion

## 4. 결 론

조종사의 시각적 판단에 의존할 수 없는 수직이 착륙 무인기의 함상 착륙에서, 파도에 의한 함정의 움직임을 예측함으로써 착륙 시점을 결정하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 이를 위해 4000 톤 급의 해군함 모델을 이용하여 파도에 의한 상하 운동을 모사하였고, 시계열 데이터에 자동 회귀 기법을 적용함으로써 해상 상태 5에서 5초 후의

함정의 상하 운동을 1m 내외로 예측하였다. 수직이착륙 무인기의 안전한 함상 착륙을 위해서는 본 논문에서 추정한 함정의 수직 운동뿐만 아니라 함정의 롤, 피치 운동 또한 중요하다. 함상 운동 예측치의 요구 조건은 함정에 착륙하기 위한 무인기의 접근 절차 및 무인기 성능에 따라 완화되거나 강화될 수 있다. 따라서 실제 적용을 위해서는 향후 이러한 조건들을 고려하여 함상 운동 예측치의 요구 조건을 구체화하고, 함정의 수직 운동뿐만 아니라 자세 변화까지 고려할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Chang-Sun Yoo, Am Cho, Bun-Jin Park and Young-Shin Kang, "Trade-Off Study of Shipboard Landing of Vertical Take-off and Landing Aircraft", *Aerospace Engineering and Technology*, vol. 12, issue 1, pp. 10-21, July 2013.
- [2] Edward V. Lewis, *Principles of Naval Architecture: Vol. 3 Motion in Waves and Controllability*, The Society of Naval Architects & Marine Engineers, New York, USA, 1990.
- [3] Am Cho, Chang-Sun Yoo, Young-Shin Kang and Bun-Jin Park, "Sea Wave and Ship Motion Simulation for Shipboard Landing of a VTOL UAV", *KSAS Spring Conference 2013*, pp. 1270-1275, April 2013.
- [4] Xilin Yang, "Displacement motion prediction of a landing deck for recovery operations of rotary UAVs", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 11, issue 1, pp. 58-64, 2013.
- [5] Kuechler Sebastian, Eberharter Johannes Karl, Langer Karl, Schneider Klaus, Sawodny Oliver, "Heave motion estimation of a vessel using accelerometer measurements", the 18th IFAC World Congress, vol. 18, pp. 14742-14747, 2011.

- [6] Isao Roy Yumori, "Real time prediction of ship response to ocean waves using time series analysis", *Oceans 81*, pp. 1082-1089, 1981.
- [7] T. R. Applebee, A. E. Baitis, "Response Amplitude Operator Prediction for the USS Belknap (DLG-16) and USS Joseph Hewes (DE 1052) Class Destroyers", Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Maryland, 1974.
- [8] L Ljung, *System Identification: Theory for the User*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [9] Rik Pintelon, Johan Schoukens, *System Identification: A Frequency Domain Approach*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2012.

## 저 자 소 개



### 조 암

2003년 서울대 기계항공공학부 졸업. 2010년 동 대학원 박사. 2010년~현재 한국항공우주연구원 미래비행체계실 비행시험팀. 관심분야는 GPS/INS 통합 항법 및 비행제어



### 유 창 선

1987년 한국항공대 기계공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 석사. 2003년 충남대학 박사. 1991년~현재 한국항공우주연구원 미래비행체계실 선행연구팀. 관심분야는 비행제어 시뮬레이션, 충돌회피



### 강 영 신

1992 인하대 항공공학과 졸업. 1994년 서울대 석사. 2014년 한국과학기술원 박사. 2004년~현재 한국항공우주연구원 미래비행체계실 체계종합팀. 관심 분야는 비행제어 및 응용, 모델링.



### 박 변 진

1999년 충남대 항공우주공학과 졸업. 2002년 동 대학원 석사. 2006년 충남대학 박사. 2006년~현재 한국항공우주연구원 미래비행체계실 선행연구팀. 관심분야는 비행제어 및 응용, 모델링.