

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(9), 731-738(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.9.731>

틸트로터 무인기 함상이착륙 위한 파고운동 해석 및 시뮬레이션

유창선*, 조 암, 박범진, 강영신

Sea Wave Modeling Analysis and Simulation for Shipboard Landing of Tilt Rotor Unmanned Aerial Vehicle

Chang-Sun Yoo*, Am-Cho, Bum-Jin Park and Young-Shin Kang

Future Aircraft Systems Division, Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

The mission of UAV has been expanded from a land to an ocean based on an enhancement of its technologies. Korea Aerospace Research Institute (KARI) also tries to expand the mission of tilt rotor UAV to an ocean, in which the shipboard landing of UAV is required. However the environment of an oceanic operation is severer than that of land due to salty, foggy, and windy condition. The landing point for automatic landing is not fixed due to movement of shipboard in roll, pitch, and heave. It makes the oceanic operation and landing of UAV difficult. In order to conduct an oceanic operation of tilt rotor UAV, this paper presents that the sea wave modeling according to the sea state is conducted and the shipboard landing of tilt rotor UAV under the sea wave is tested and evaluated through the flight simulator for UAV.

초 록

오늘날 무인기는 기술 발전을 통해 육해상의 다양한 분야에서 이용되고 있다. 한국항공우주연구원(KARI)에서는 육상용 수직이착륙기로 개발된 틸트로터 무인기를 해상에서 운용할 수 있도록 임무영역 확장을 고려하고 있다. 틸트로터 무인기의 효과적인 해상운용을 위해서는 함상이착륙이 필요하지만 해상은 지상에 비해 염분, 연무, 바람 등 기상영향을 많이 받는다. 또한 지상과는 달리 선박 운동으로 인한 착륙지점의 운동이 발생하며, 자동 함상착륙을 어렵게 만든다. 이러한 무인기 함상이착륙을 위하여 본 논문에서는 파고에 따른 선박 운동을 모델링 하고, 무인기 시뮬레이터를 통해 시험평가한 결과를 제시하고 있다.

Key Words : Unmanned Aerial Vehicle(무인항공기), Shipboard Landing(함상착륙), Sea Wave(파고), Sea State(해상상태), Flight Simulator(비행시뮬레이터)

1. 서 론

무인기 시스템과 운용 기술이 발전하면서 무인항공기 임무는 점점 유인항공기 운용영역까지

확장되고 있으며 육상에서 해상 운용으로 확대되고 있다. 헬리콥터 기술의 발전과 더불어 오늘날에는 함상에서 헬리콥터를 운용하는 것이 당연한 것으로 인식되고 있다. 그렇지만 1943년 5월 미

† Received: March 25, 2014 Accepted: August 19, 2014

* Corresponding author, E-mail : csyoo@kari.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

육군이 시콜스키 XR-4를 구축함에 착륙시키면서 헬리콥터 함상운용을 최초로 시도하기까지 수직 이착륙 항공기인 헬리콥터를 함상에서 운용한다는 것은 커다란 도전이었다. 해상에서 항공기를 운용하기 위해서는 육상보다 심한 바람, 파도와 배의 이동에 의한 착륙장 운동, 염분에 의한 장비의 부식이 고려되어야 하며, 안전한 운용을 위한 운용절차가 요구된다. 넓게 포장된 활주로에서 관제사의 유도에 따라 정립된 접근착륙절차로 이착륙이 이루어지는 육상에 비해 해상에서는 제한된 공간과 자체 운동이 있는 이착륙장에 착륙해야 한다. 함상 착륙 후에도 항공기를 고정하여야 하고 필요시 격납고로 이송 보관하여야 한다. 또한 육상에서의 이착륙 환경과 달리 함상착륙장 주변의 선박 구조물 간섭에 의한 후류의 영향도 고려되어야 한다. 착륙장이 고정된 육상과 달리 함상착륙장은 피치, 롤, 상하운동을 갖고 있어 이에 대한 착륙절차도 새롭게 정의되어야 한다. 또한 함상에서 수직 이착륙하는 경우 육상운용과는 달리 착륙장 부근에서의 지면효과를 얻을 수 없어서 정지비행이나 전진비행시 출력 소모가 더 크다. 또한 선박과 헬리콥터에서 나오는 배기가스로 인하여 헬리콥터의 출력 이용에 제한을 받을 수 있다. 이로 인하여 선박의 운동에 대해 적절히 대응할 수 있는 기동성능이 떨어진다. 따라서 선박 주변의 와류에 의한 운용 제한과 돌풍이나 난류에 의한 돌발 상황을 고려하여 일반적으로 헬리콥터 비행조종시스템은 10% 조종여유를 갖도록 설계된다[1][2][3]. 수직이착륙 무인항공기 가운데 함상이착륙에 성공한 사례는 미국 노드롭 그루만사의 Fire Scout RQ-8B [4], 오스트리아 Camcopter사의 S-100 [5], 캐나다 봄바르디어사의 CL-327, 미국 보잉사의 ULB (Unmanned Little Bird) [6]가 있으며 착륙유도시스템으로는 지상의 레이더 추적장비와 DGPS가 사용되고 있다. 한국항공우주연구원에서는 틸트로터 항공기인 스마트무인기를 개발하여 2011년 자동이착륙을 포함한 비행시험을 성공한 바 있으며 최근에 해상에서의 운용을 위하여 함상이착륙에 대한 연구를 진행하고 있다[7][8][9]. 스마트무인기는 육상 운용으로 개발되어 비행시험을 통해 자동이착륙 성능이 검증되었다. 이를 함상 운용으로 확장하려면 배의 이동에 따른 자동착륙 지점의 위치운동을 실시간으로 갱신해주어야 하고 함상착륙장 주변의 선박 구조물의 간섭에 의한 후류의 영향도 새롭게 모델링되어야 한다[10]. 따라서 헬리콥터의 함상운용을 위해서 항공기와 선박간의 운동, 바람 및 후류 간섭에 따른 함상착륙의 운용한계에 대한 연구들이 이루어져 왔다[10][11]. 수

직이착륙 무인기의 함상이착륙을 위한 연구는 ULB의 DGPS 시험, 항공기 탑재 센서연구, 또한 함상착륙을 위한 자동제어기 설계 분야에서 발견되고 있다[6][12][13]. 무인기 함상이착륙을 위한 시스템과 제어기법을 평가하기 위해 기존의 비행시뮬레이션 환경에 선박 운동 모델링을 추가하였다. 본 논문에서는 틸트로터 무인기의 함상이착륙 연구를 위해서 해상상태에 따른 파고와 이에 따른 선박 운동을 각각 모델링하고, 틸트로터 무인기의 비선형 비행운동모델과 연동시켰으며, 시뮬레이션 환경통제장치, 지상관제, 비주얼 시스템으로 이루어진 무인기 시뮬레이터를 통해 함상이착륙을 모의시험한 결과를 제시하고 있다.

II. 선박 운동 모델링

2.1 선박 운동

틸트로터 무인기 함상이착륙을 구현하기 위해서는 먼저 선박운동 모델링이 요구된다. Fig. 1과 같이 선박운동은 항공기와 동일하게 전후, 좌우, 상하 위치이동과 롤, 피치, 요 방향 자세이동의 6자유도 운동으로 이루어지며 롤, 피치, 높낮이 운동은 주로 파고에 기인하며 전후, 좌우, 요 운동은 조종력, 추진력, 바람, 조류와 같은 내외력에 의해 발생된다. 또한 선박운동은 정역학적, 동역학적 수력과 섭동 간섭에 의해 피치, 요, 높낮이 운동 간에 강한 간섭이 존재한다. 예를 들면 배가 수면에 잠기는 높이인 흘수 변화시 수직방향의 정역학적 수력 중심이 이동하게 되어 높낮이 운동은 피치 주기 운동을 발생시킨다. 또한 배가 전후 방향으로 비대칭이어서 좌우운동과 요 운동은 동역학적 수력에 의한 간섭을 일으키며 섭동에 의해 좌우 운동에 의한 롤 운동은 피치 주기 운동을 유발시킨다.

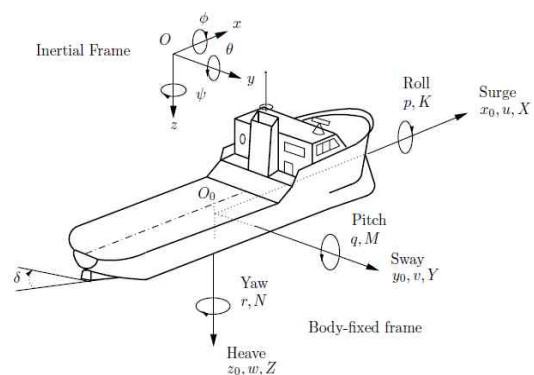


Fig. 1. Notation and sign convention of ship motion (SNAME, 1950)

선박 운동식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$(M+A_h)\ddot{x}_h+B_h\dot{x}_h+C_hx_h=F \quad (1)$$

$$F=F_F+F_T+F_C+F_E$$

여기서, M 은 선박의 무게, A_h 는 유체작용으로 선박에 추가된 무게, B_h 는 댐핑계수, C_h 는 복원계수, F 는 외력이다. 외력 F 는 유체작용력 F_F 와 추진력 F_T 와 조타력 F_C 와 다양한 외부환경에 의한 힘 F_E 로 이루어진다. 본 논문에서는 F_E 가운데 파고에 의한 힘이 고려되었다.

파고에 의한 선박운동을 모사하는 방법은 수학적 모델을 이용하거나 함정에서의 실제 측정값을 이용하는 방법이 있다. 해상에서의 실제 측정값을 이용하는 방법은 시뮬레이션 환경 구현시 계산량이 적으며, 실제 환경을 가장 잘 모사할 수 있어 유인기 함상이착륙을 모사할 때 사용되는 경우가 있으나, 다양한 해상환경, 함정 속도, 파도 입사각 등을 모사하기 위해서는 매우 큰 데이터베이스를 확보해야 하므로 수학적 모델을 통해 선박운동을 모사하였다.

2.2 해상상태

선박의 운동은 해상상태, 선박의 기하학적 형상, 배수량 등의 영향을 받는다. 해상상태는 Table 1과 같이 세계기상기구(WMO)에서 정의한 기준에 따르면 파도의 진폭, 바람 속도, 파도 파

Table 1. Sea state code (WMO)

조건	파고 (m)	풍속 (kts)	파고주기 (sec)	해상상태
0	0	~1.0	-	No swell
1	0~0.1	1~6	-	Very low
2	0.1~0.5	7~10	3.3~12.8	Low
3	0.5~1.25	11~16	5.0~14.8	Light
4	1.25~2.5	17~21	6.1~15.2	Moderate
5	2.5~4.0	22~27	8.3~15.5	Moderate rough
6	4.0~6.0	28~47	9.8~16.2	Rough
7	6.0~9.0	48~55	11.8~18.5	High
8	9.0~14.0	56~63	14.2~18.6	Very high
9	14.0~	64~	15.7~23.7	Very high

Table 2. Shp dynamic characteristics (SS=5)

선박급수		피치		롤	
길이 (m)	배수량 (ton)	최대진폭 (deg)	주기 (sec)	최대진폭 (deg)	주기 (sec)
135	4100	2.4	5	17.6	13
172	9466	1.9	7	19.1	17
332	91487	0.8	10	5.0	21

형의 주기에 따라 0에서 9까지 정의하고 있다. Table 2는 해상상태 5에서 선박의 배수량에 따른 선박의 롤, 피치 운동 특성의 예이다[1].

2.3 해상상태에 따른 파고운동

수학적 모델을 기반으로 함정운동을 모사하는 경우 해상에서의 함정운동은 제어입력에 반응하여 발생하는 장주기 운동과 파도에 의해 가진되는 움직임으로 구분된다. 해상에서의 파도는 다양한 주기의 정규파들이 중첩된 비정규파의 형태를 띤다. 비정규 파도는 주파수별 에너지를 나타내는 파도 스펙트럼으로 대표될 수 있다. 해상에서의 파도는 다양한 주파수의 정규파가 중첩된 비정규파로 표현된다[15].

$$\eta(x,t)=\sum_{n=1}^Ma_j\cos(k_jx-w_jt+\theta_j) \quad (2)$$

$\eta(x,t)$: 시간 t 위치 x 에서의 파고
 a_j : j 번째 정규파의 진폭
 k_j : j 번째 정규파의 파수
 w_j : j 번째 정규파의 각주파수
 θ_j : j 번째 정규파의 위상

수심이 충분히 깊은 경우(수심 $\geq \lambda/2$)에는 분산관계식에 의해 파도의 파수와 주파수는 독립적으로 정해질 수 없고 정규파의 파수 k_j 와 주파수 w_j 관계는 아래 식과 같은 관계를 갖는다.

$$k_j=\frac{w_j^2}{g} \quad (3)$$

여기서 g 는 중력가속도이다.

임의의 지점에서 파고는 가우시안 분포를 따르므로, 파고의 파워스펙트럼 밀도함수 $S_\eta(w)$ 의 적분 값은 파고의 분산 값과 같다.

$$E[\eta(t)^2]=\int_0^\infty S_\eta(w)dw$$

따라서 파고 $\eta(x,t)$ 의 파워스펙트럼 밀도함수

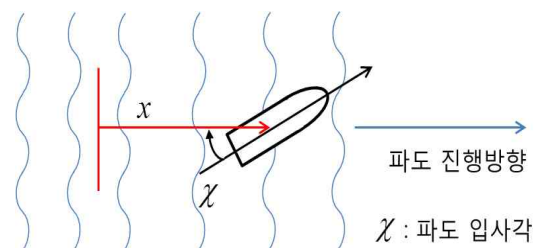


Fig. 2. Sea wave and coordination

를 $S_\eta(w)$ 로 나타내면 진폭 a_j 는 다음식과 같이 유도된다.

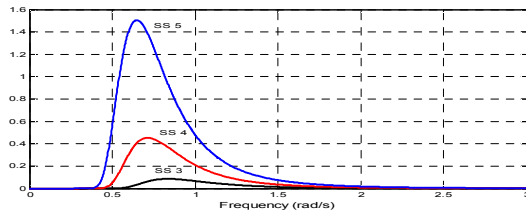
$$a_j = \sqrt{2S_\eta(w_j)\Delta w}, \quad \Delta w : \text{주파수 간격} \quad (4)$$

파도를 수학적으로 모사하기 위하여 사용되는 파워스펙트럼 밀도함수 가운데 완전히 발달된 해상 이외의 조건에서도 적용 가능한 Bretschneider 스펙트럼을 사용하면 다음과 같다[16].

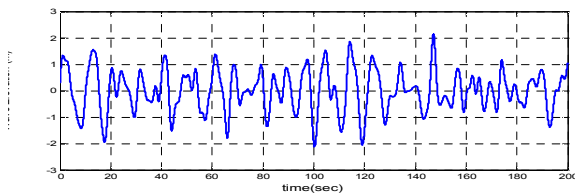
$$S_\eta(w) = \frac{5w_m^4}{16w^5} H_s^2 e^{-1.25w_m^4/w^4} \quad (5)$$

w_m : 가장 많이 나타나는 파도 각주파수
 H_s : 유의파고

Figure 3(a)는 해상상태 3~5에 대한 Bretschneider 스펙트럼이고 Fig. 3(b)는 해상상태 5에서의 파고 높이를 시간영역으로 표현한 것이다. 선박의 이동속도 U 를 고려하면 선박에 각주파수 w 의 파도가 입사각 χ 로 입사할 때 선박에서 관측되는 파고의 주파수는 도플러 효과에 의해 다음과 같이 조우주파수 w_e 가 된다.



(a) Wave spectrum for sea state 3, 4 and 5



(b) Wave elevation for sea state 5

Fig. 3. Wave configuration for sea state

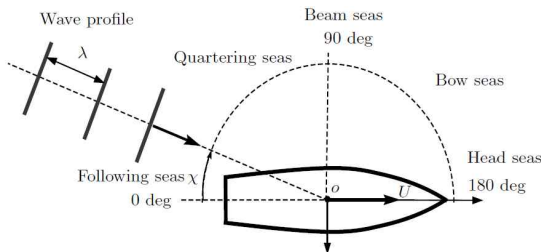
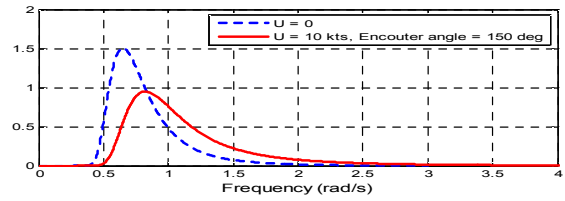
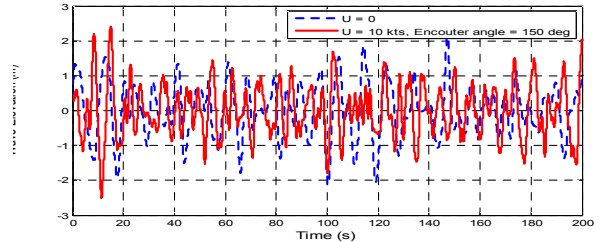


Fig. 4. Definition for an encounter wave



(a) Wave spectrum



(b) Wave elevation

Fig. 5. Wave configuration at ship speed 10kts

$$w_e = w - kU\cos\chi = w - \frac{w^2 U \cos\chi}{g} \quad (6)$$

도플러 효과에 의해 파고의 주파수가 다르게 관측되더라도 파도의 에너지는 다음과 같이 변하지 않는다.

$$\int S_\eta(w_e) dw_e = \int S_\eta(w) dw$$

따라서 함정에서 관측되는 파고의 파워스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_\eta(w_e, \chi) = \frac{S_\eta(w)}{|1 - (2wU/g)\cos\chi|} \quad (7)$$

선박이 정지해 있을 때와 파도의 입사각이 150도인 상태에서 10kts로 전진할 때의 Bretschneider 스펙트럼과 파고를 해상상태 5에 대해 도시하면 Fig. 5(a)와 (b)와 같다. 함정이 파도를 향해 나아갈 때, 함정의 전진 속도로 인해 함정에서 관측된 파도의 스펙트럼은 고주파수 쪽으로 이동함을 확인할 수 있으며 파고 진폭은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

2.4 파고에 따른 선박운동

선박을 선형 시불변시스템으로 간주하면, 각 주파수의 정규 파도에 대한 선박의 반응을 중첩함으로써 비정규 파도에 대한 함정의 반응을 알 수 있다[15]. Fig. 6에서 파도에 대한 선박의 전달함수 $R_j(w)$ 를 응답진폭함수(RAO: Response Amplitude Operator)라고 하고 RAO는 선박의

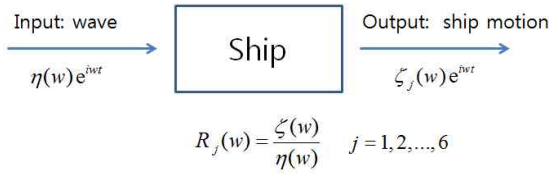


Fig. 6. Model of ship motion for sea wave

형상 및 하중 특성, 선박의 속도, 파도 입사각의 함수이며 일반적으로 테이블의 형태로 주어진다.

파도에 대한 함정 운동을 모사하기 위해서는 전후, 좌우, 상하 운동, 피치, 롤, 요운동 각 6축에 대한 해당 함정의 RAO가 있어야 한다. RAO를 통한 파고와 선박의 운동에 대한 파워스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_{\xi_i}(w) = |R_i(w)|^2 S_{\eta}(w) \quad (8)$$

일반적으로 RAO 함수는 입사각이 고려되지 않은 상태에서 주어지므로 선박의 속도와 파도의 입사각을 고려하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_i(w_e, \chi, U) = \frac{R_i(w)}{|1 - (2wU/g)\cos\chi|} \quad (9)$$

최종적으로 조우주파수로 표현한 선박운동의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_{\xi_i}(w_e, \chi, U) = |R_i(w_e, \chi, U)|^2 S_{\eta}(w_e, \chi) \quad (10)$$

Figure 7은 속도 10kts으로 전진하는 4,179톤급 미해군 함정 USS Joseph Hewes에 입사각 150도로 진입하는 파고 운동에 대해 주파수 0.393 ~ 4.422 rad/sec에서의 상하, 피치, 롤 운동에 대한 한 RAO이다[17]. 앞에서 기술한 파고 모델링과 RAO를 이용하여 해상상태에 따른 파고를 계산하고 파고 입력과 RAO전달함수를 이용하여 식(10)의 선박운동에 대한 파워 스펙트럼

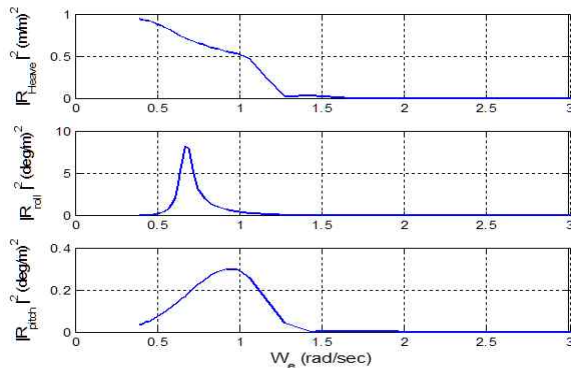


Fig. 7. RAO for USS Joseph Hewes

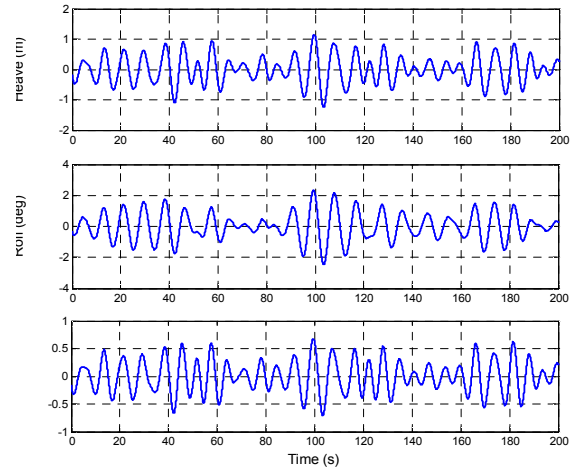


Fig. 8. Ship motion of USS Joseph Hewes at sea state 3

을 구하고 이를 시간영역으로 변환함으로써 파고 입력에 따른 선박의 운동을 얻을 수 있다. Fig. 8은 해상상태 3에서 150도 입사각으로 진입하는 파고에 대해 10kts 속도로 전진하는 함정의 상하, 피치, 롤 운동 결과를 보여주고 있다.

III. 함상이착륙 시뮬레이션

3.1 무인기 시뮬레이터

함상이착륙 시뮬레이션을 수행하기 위하여 항공우주연구원의 무인기 시뮬레이터가 이용되었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 무인기 시뮬레이터는 비행시험을 모사할 수 있는 3D 그래픽, 시뮬레이션 환경을 통제하는 통제장치, 항공기에 탑재되는 비행제어컴퓨터, 내부조종사용 지상관제장비로 구성되어있다. 이 장비들의 상호 네트워크 연결을 통해 HILS(Hardware-In-the-Loop)

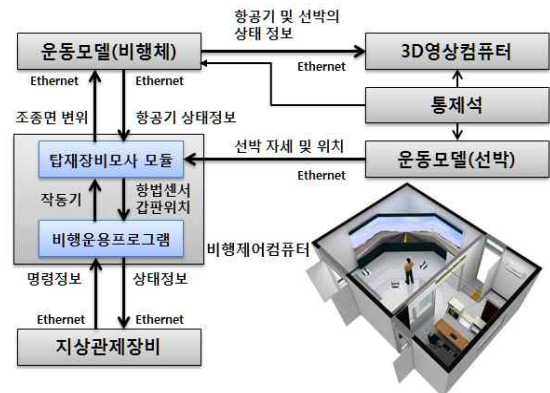


Fig. 9. Configuration of UAV simulator

시험을 수행할 수 있도록 개발되었다. 함상이착륙 시뮬레이션을 위해서 기존의 무인기 시뮬레이터에 선박의 운동 모델을 추가하였다. 통제장치에서 설정된 해상상태에 따라 파도가 정의되면, 이에 따른 선박의 운동정보가 계산되어 비행제어 컴퓨터로 전송된다. 비행제어컴퓨터에서는 선박 운동 정보를 이용하여 함상의 갑판 위치를 계산하고 이 값을 지상관제장비로 전송하여 함상이착륙 위치 정보가 자동적으로 설정되도록 하였다 [9].

3.2 자동이착륙 위치 계산

함상이착륙은 육상과 달리 선박의 운동으로 인하여 자동착륙점이 매시간 변하게 되므로 이를 실시간으로 반영해 주어야 한다. 함상의 갑판 위치는 다음의 SBC (Ship Body Coordinate) 프레임임을 통해 선박의 위치로부터 함상의 갑판의 위치를 계산하였다.

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} + B_S^T \begin{bmatrix} dx_D \\ dy_D \\ dz_D \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $[x_S \ y_S \ z_S]^T$ 는 NED 프레임에서 선박의 위치벡터, $[dx_D \ dy_D \ dz_D]^T$ 는 선박의 중력중심에서 갑판까지의 상대거리벡터 그리고 B_S^T 는 NED 좌표계를 SBC 프레임으로 변환시키는 행렬로써 선박의 오일러 각을 이용하여 식 (12)와 같이 표현된다.

$$B_S^T = \begin{bmatrix} c\theta_s c\psi_s & c\theta_s s\psi_s & -s\theta_s \\ -c\phi_s s\psi_s + s\phi_s s\theta_s c\psi_s & c\phi_s c\psi_s + s\phi_s s\theta_s s\psi_s & s\phi_s c\theta_s \\ s\phi_s s\psi_s + c\phi_s s\theta_s c\psi_s & -s\phi_s c\psi_s + c\phi_s s\theta_s s\psi_s & c\phi_s s\theta_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, c는 cos, s는 sin를 나타낸다.

여기서 계산된 갑판의 위치정보는 비행운용프로그램에서 사용되는 자동이착륙 위치에 저장되어 함상이착륙 모드에서 자동이착륙 지점으로 사용된다.

3.3 자동이착륙 위치 제어기 설계

함상이착륙 제어기를 설계하기위해서 Fig. 10과 같은 항공기와 선박의 상대위치를 가정하자. 선박과 비행체의 상대위치오차는 다음의 식 (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_V \\ y_V \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)의 상대위치오차와 PID이득을 이용해서 지구좌표계의 속도명령을 식 (14)와 같이 설계한다.

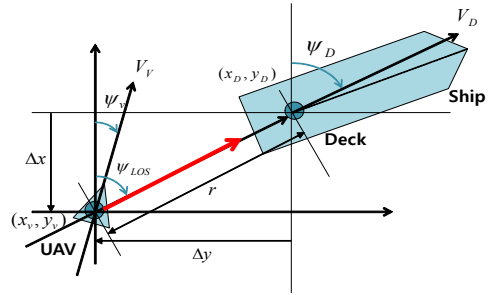


Fig. 10. Relative position between aircraft and ship

$$\begin{bmatrix} V_{N_{cmd}} \\ V_{E_{cmd}} \end{bmatrix} = K_p \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} \frac{\Delta x}{dt} \\ \frac{\Delta y}{dt} \end{bmatrix} + \frac{K_i}{s} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (14)$$

지구좌표계에서 설계된 북쪽 및 동쪽 속도명령을 식 (15)와 같이 동체좌표계의 속도명령으로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} u_{cmd} \\ v_{cmd} \end{bmatrix} = L_E^B \cdot \begin{bmatrix} V_{N_{cmd}} \\ V_{E_{cmd}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 L_E^B 는 식 (12)의 변환식 B_S^T 에서 선박의 자세각 대신 비행체의 오일러 자세각을 사용한 좌표변환행렬이다. 식 (15)의 속도명령은 속도유지모드 제어기를 통해 피치와 롤 자세명령을 발생시킨다. 그리고, 방위각 명령은 Fig. 10의 시선각(Line of sight) ψ_{LOS} 이 되며 식 (16)과 같이 계산된다.

$$\psi_{LOS} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \quad (16)$$

3.4 시뮬레이션 평가

함상자동이착륙에 대한 시뮬레이션은 5m/sec의 일정한 속도로 직선운동을 하는 4000톤급 규모의 선박에 대하여 해상상태 0인 조건에서 이루어졌다. 성능검증을 위해서 Table 3과 같은 성능요구조건을 설정하였다.

Figure 11과 Fig. 12는 선박 갑판위의 이착륙장에서 선박과 함께 움직이다가 이륙 후 우측으로 이탈한 후 선박의 우측 후방에서 접근하여 자

Table 3. Target performance of shipboard landing

성능조건	성능사양
착륙위치 정확도	< CEP 2.5m
착륙시 하강률	< 1.5 m/sec

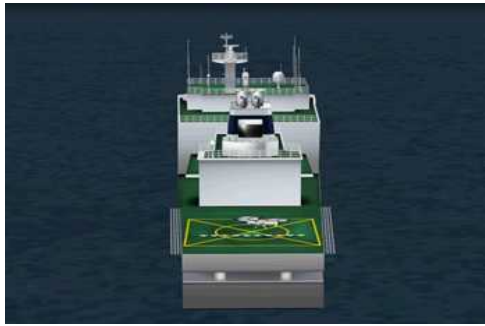


Fig. 11. Shipboard landing of TR-60

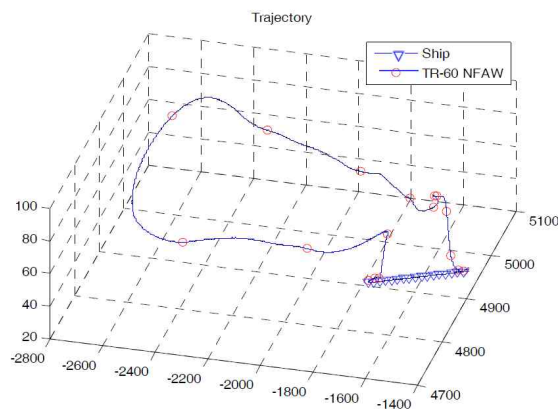


Fig. 12. Shipboard landing trajectory in sea state 0

동착륙 후 선박과 동일한 속도와 방향으로 정확하게 움직이고 있음을 보여주고 있다. 또한 함상 착륙의 요구조건인 착륙점 원형공산오차 (CEP : Circular Error Probability)를 판단하기위해서 총 10회의 함상이착륙 시뮬레이션을 수행하였다. 함상이착륙 조건은 앞에서 언급한 선박속도 5m/s, 해상상태 0으로 설정하고 다양한 함상착륙조건을 부여하기 위해서 선박의 180도 후방과 좌/우 후방에서 각각 착륙 접근을 시도하였다. Fig. 13은 시뮬레이션 결과 평균수평오차 0.71m, 표준편차 0.28m의 정확도로서 성능요구도 2.5m를 만족하고 있음을 보여주고 있다. 앞절에서 모델링된 파고에 따른 선박운동으로 해상상태 3인 조건에 대한 함상이착륙 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 14와 같다. 해상상태 3에서도 항공기가 이륙 후 자동착륙 명령에 따라 선박을 따라가서 접근착륙을 수행한 결과를 보여주고 있다. 또한 해상상태에 따른 함상이착륙을 완전히 시뮬레이션하기 위해서는 함상접근착륙시 항공기가 1~2m의 결심고도에서 호버링 후 선박의 수평자세가 되는 정점에서 착륙을 결행하고 착륙 후 선박에 고정시키는 절차의 구현과 항공기와 선박간 운동의 통합이 요구됨을 확인하였다.

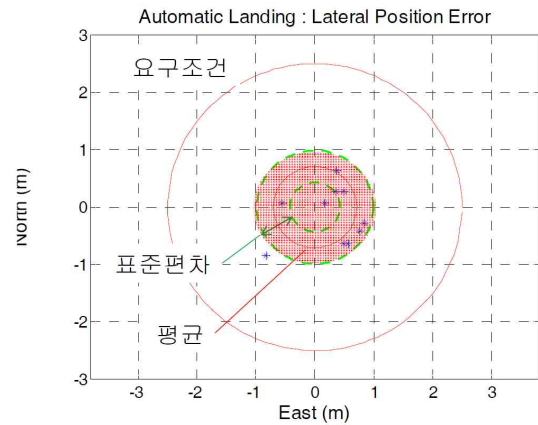


Fig. 13. Shipboard automatic landing performance

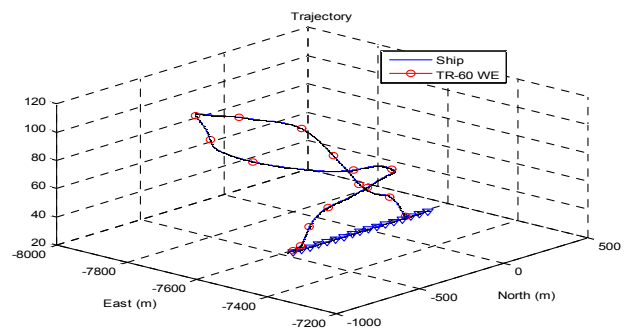


Fig. 14. Shipboard landing trajectory in sea state 3

IV. 결 론

무인기 해상운용은 선박의 운동, 협소한 착륙 환경, 염무 등으로 인해 육상에서 보다 운용이 어려우며 이러한 조건에서 함상이착륙이 요구된다. 무인기의 함상이착륙 기능을 구현하기 위하여 해상상태에 따른 파고를 모델링하고 파고에 의한 선박운동을 모델링하였다. 또한 함상이착륙을 모사하기 위하여 무인기 시뮬레이터에서 선박의 위치를 비행제어컴퓨터로 전송하여 착륙지점을 실시간을 갱신할 수 있도록 하였다. 이동 중인 선박의 착륙지점을 갱신하고 자동착륙 모드로 시뮬레이션한 결과 목표한 착륙위치 오차 범위 내에서 착륙가능함을 확인할 수 있었으며 해상상태 3에서 접근착륙을 시뮬레이션 한 결과 이륙 후 자동착륙 명령에 따라 접근 착륙함을 확인할 수 있었지만 착륙 후 항공기와 선박간 운동의 통합이 요구되었다. 파고에 의한 선박운동 모델링과 선박 착륙지점 갱신을 기반으로 다양한 해상상태와 접근절차에 따른 함상이착륙 모의시험평가를 수행할 예정이다.

References

- 1) W. P. Geyer, Jr., K. Long, D. Carico, *American Clearance Process*, Naval Air Systems Command, USA
- 2) R. Fang, H. W. Krijns, R. S. Finch, *Dutch/British Clearance Process*, National Aerospace Laboratory NLR and Royal Netherlands Navy, Netherlands, Boscombe Down, England
- 3) U.S. Army, *Joint Shipboard Helicopter and Tiltrotor Aircraft Operations*, Joint Publications 3-04, Dec, 06, 2012
- 4) Fire Scout Newsletter, "U.S. Navy MQ-8B Fire Scout Completes Test Period Onboard USS MCLnerney, June 2009.
- 5) UAV Briefing, The Rising of the Remote VTOL UAVs, June 2008. pp 14-20.
- 6) M. Hardesty, S. Kennedy, S. Dixon, T. Berka, J. Graham, D. Caldwell, "Development of Navigation and Automated Flight Control System Solutions for Maritime VTOL UAS Operations," USNA12, pp. 1 -20
- 7) H. M. Shin, H. C. Shim, "Autonomous Shipboard Landing Guidance Law of Unmanned Helicopter in Cross Wind Situation," Proc. of the Korea Society of Aeronautical and Space, Nov., 2012, pp. 459-462
- 8) H. M. Shin, D. I. Yoo, H. C. Shim, "An Automatic Ship Landing Algorithm of Vertical-Take-off and Landing Unmanned", Proc. of the Korea Society of Aeronautical and Space, Apr. 2012, pp. 702-708
- 9) Y. S. Kang, B. J. Park, A. Cho, C. S. Yoo, S. O. Koo, "Flight Test Results of Automatic Take Off and Landing for the Full Scale Smart UAV", Proc. of the Korea Society of Aeronautical and Space, Apr. 13~15, 2011, pp. 426-429
- 10) C. S. Yoo, Y. S. Kang, B. J. Park, A. Cho, "Research on Shipboard Landing of Tilt Rotor Unmanned Aerial Vehicle," Proc. of the International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 2012
- 11) C. S. Yoo, A. Cho, B. J. Park, Y. S. Kang, "Sea Wave Modeling and Shipboard Landing Simulation of Tilt Rotor Unmanned Aerial Vehicle," Proc. of the Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Nov. 2013
- 12) S. J. Hodge, S. J. Zan, D. M. Roper, G. D. Padfield, I. Owen, "Time-Accurate Ship Airwake and Unsteady Aerodynamic Loads Modeling for Maritime Helicopter Simulation," J. of the AHS, Jan. 2009. pp. 022005-1~16
- 13) S. J. Hodge, J. S. Forrest, G. D. Padfield, I. Owen, "Simulating the environment at the helicopter-ship dynamic interface : research, development and application," The Aeronautical Journal, VI 116, No. 1185, Nov. 2012, pp.1155 ~ 1184
- 14) SNAME (1950). "Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body through a Fluid", Technical Report Bulletin 1-5. Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, USA. 1950.
- 15) T. Peres, M. Blanke, "Simulation of Ship Motion in Seaway," Technical Report EE02037, Department of Electrical and Computer Engineering. pp.1~13
- 16) P. Zwolan, K. Czapski, "Sea waves models used in maritime simulators," Scieintific Journals, 2012, 32(104) z.2 pp.186-190
- 17) T. R. Applebee, et al, "Response Amplitude Operator Prediction for the USS Belknap (DLG-26) and USS Joseph Hewes (DE 1052) Class Destroyers," Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Maryland, Nov. 1974