

소형 해상 부유체의 확률 기반 위기평가기법

† 임 정 빈

† 목포해양대학교 해사대학 해상운송시스템학부 교수

Probability Based Risk Evaluation Techniques for the Small-Sized Sea Floater

† Jeong-Bin Yim

† Division of Maritime Transportation System, College of Maritime Sciences,
Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 본 논문에서는 요트 계류장과 같은 소형 해상 부유체의 위기수준을 모니터링하기 위한 확률 기반 위기평가기법(Probability based risk Evaluation Techniques, PET)의 이론적인 접근 방법을 기술하였다. PET는 5단계 척도의 위기 기준을 이용한 위기 판단 절차가 핵심 개념이다. 이러한 5단계 척도들은 폐형 공식을 이용한 해상 부유체 운동의 응답함수에 대한 누적확률분포에서 계산했다. 그리고 위기기준을 갖는 PET의 위기판단 절차를 제안하였다. PET의 유용성 검증을 위하여 시뮬레이션 실험을 하였는데, 실험에는 해상 부유체의 운동 측정에 사용할 ADIS16405 센서의 전기특성을 갖는 모의 신호를 이용하였다. 실험결과, PET의 위기평가 오차는 최대 5.0 수준에서 0.38 수준으로 나타났다. 이 결과로부터 제안한 PET가 모니터링 기법으로 사용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 해상 부유체, 위기수준 모니터링, 위기평가기법, 응답함수, 누적분포함수

Abstract : This paper describes theoretical approach methodology for the Probability based risk Evaluation Techniques (PET) to monitor the risk levels of small-sized sea floater as like a yacht pier. The risk decision-making process by risk criteria with five-step scales is the core concepts of PET. These five-step scales are calculated from cumulative probability distribution of response functions for the sea floater motions using closed-form expressions. In addition, The risk decision-making process of PET with the risk criteria is proposed in this work. To verify the usability of PET, simulation experiments are carried out using mimic signals with the electrical specifications of ADIS16405 sensor that is to be use as measurement tool for the floater motions. As results from experiments, the risk evaluation error by PET shows 0.38 levels in maximum 5.0 levels. These results clearly shown that the proposed PET can be use as the monitoring techniques.

Key words : sea floater, risk level monitoring, risk evaluation techniques, response function, cumulative distribution function

1. 서 론

최근 해양레저스포츠의 활성화로 국내에 많은 요트 계류장이 구축되고 있으나, 일부 계류장은 단기간에 구축되면서 파도나 태풍으로부터 계류장과 요트를 보호하기 위한 시설이 미비한 경우가 많다. 특히, 본 연구대상인 목포해양대학교 안벽에 설치된 요트 계류장의 경우, 방파제 등의 보호 시설 없이 통항로 옆에 설치되어 있어, 태풍은 물론 통항 선박들에 의한 조파에 의해 계류장이 심하게 동요한다. 더욱이 2011년 8월에 발생한 태풍번호 1109의 무이파(MUIFA) 내습 당시 계류장이 파손 및 침수되고, 32 피트(ft.) 요트 1척이 파손되는 사고가 발생한 바 있어, 사고 예방을 위해 대응책 마련이 시급한 실정이다.

그러나 방파제 건설에 막대한 예산이 소요되고 더욱이 계류장이 통항로 옆에 설치되어 있는 관계로 방파제 건설이 불가능한 실정이다. Fig. 1은 목포해양대학교 안벽에 구축된 요트 계

류장의 모습과 태풍 무이파 당시 계류장 모습이다. 이에 본 연구에서는 요트 계류장과 같은 해상 부유체의 위기를 모니터링하기 위한 새로운 평가기법을 제안하고, 유효성을 평가했다.



Fig. 1 Yacht pier located around the quay of Mokpo Maritime University(a), photos were taken during attack of typhoon No. 1109 MUIFA, August 2011(b)

† 교신저자 : 종신회원, jbyim@mmu.ac.kr 061)240-71702

주) 이 논문은 “부유체의 진동분석을 위한 AR-ARX 모델링에 관한 연구”란 제목으로 “한국항해항만학회 2012년도 공동학술대회 (2012.6.22, pp. 157-159)”에서 발표한 연구의 후속 연구임.

2. 위기평가기법의 고찰과 제안

2.1 기존 위기평가기법의 고찰

본 연구의 목적은 해상 부유체 모델로부터 해양파와 부유체 사이의 운동특성을 획득하여 통계 변수를 추정한 후, 실제 해상에 설치된 부유체의 위기를 통계적으로 평가하는 것이다. 이에 관한 기존 연구 검토 결과, 구조물의 위기평가기법에 관한 연구는 주로 실험 구조물의 AR(Auto-regressive) 모델과 실제 구조물의 AR 모델을 비교 평가하는 방법(Lu Kung-Chun etc., 2008; 김 등, 2007)이 일반적인 기법으로 보고되어 있는데, 실험 구조물의 구축과 AR 모델 구축에 방대한 실험 기간과 고비용이 소요되는 한계점을 갖고 있다. 한편, 이러한 AR 모델을 이용한 기법과 달리 확률적인 통계 데이터를 활용한 기법(Charles R. Farrar etc., 2001)도 보고된 바 있다. 그리고 해양파와 부유체 사이의 운동특성 예측에 관한 연구는, 선박 운동을 관측하여 이로부터 해양파를 역으로 추정하는 방법이 최근 다수 보고되었는데(Iseki Toshio etc., 2000; Eduardo A. Tannuri etc., 2003), 특히 Ulrik Dam Nielsen 등(2011)은 선박의 피칭 각도(pitching angle), 롤 각도(roll angle) 및 수직가속도 등 세 가지 운동을 측정하여 해양파를 추정한 바 있다. 또한, 부유체 모델과 관련된 연구는 주로 선박 모델을 이용한 안전평가와 예측에 관한 연구(김 등, 1991; 손 등, 1997; 임 등, 1998; 박 등, 2005)가 있고, 특히 기존 선박 모델의 복잡한 전개를 단순한 폐형(close-form) 공식을 이용한 선박운동 추정 이론과 유용성 평가 연구(Jørgen Juncher Jensen etc., 2004; Ulrik Dam Nielsen, 2006)가 보고된 바 있다. 그리고 José Miguel Simón Donaire(2009)는 폐형 이론을 실제 바지선(Barge-type vessel) 운동특성 계산에 적용한 바 있다.

본 연구에서는 Charles R. Farrar 등(2001)이 제안한 통계 데이터를 활용한 평가기법과, Ulrik Dam Nielsen 등(2011)이 보고한 해양파 추정 연구 및 José Miguel Simón Donaire(2009)가 연구한 폐형 공식의 적용 방법 등을 참고하여 새로운 위기평가기법을 제안했다.

Fig. 2는 기존에 보고된 구조물의 평가기법을 정리한 개념도이다. 그림에 표기한 $X(z)$, $Y(z)$, $H(z)$ 등은 시계열 신호 $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ 등에 대한 z -변환(z -transformation)을 의미하고, $Y(p)$ 등은 z -변환 신호에 대응한 확률, $Y(n)$ 등은 수열을 의미한다. 이러한 표기는 개념을 간단하게 설명하기 위한 것으로 후술하는 이론과 수학적인 관계는 없다. Fig 2를 각 단계별로 고찰하면 다음과 같다. 우선, Step-1에서는 다양한 상태의 실험구조물(Test Bed)을 구축하여 입력신호 $X1(z)$ 을 인가한 후, 센서-1(Sensor-1)로 응답신호 $Y1(z)$ 을 획득한다. Step-2에서는 실험구조물의 전달특성 $H1(z)$ 을 계산한 후, $H1(z)$ 에 대한 기준 모델(Reference Model) $AR1=f(H1(z))$ 을 구축한다. Step-3에서는 실제 구조물의 응답신호 $Y2(z)$ 를 센서-2(Sensor-2)로 측정하여 실시간 모델(Real-time Model) $AR2=f(H1(z), Y(z))$ 를 구축한다. Step-4에서는 $AR1$ 과 $AR2$ 를 비교하여 가장 오차 $e(z)$ 가 작은 전달특성 $H1(z)$ 을 실제 구조물의 전달특성

$H2(H1(z))$ 로 선택한다. 마지막으로 Step-5에서는 선택한 $H2(H1(z))$ 를 평가하여 실제 구조물의 파손 위치와 크기 등을 추정한다.

따라서 기존의 기법은, 고비용과 장시간이 소요되는 실험용 구조물의 구축과 이에 대한 방대한 신호처리용 시스템의 구축이 필요한 한계점이 있다.

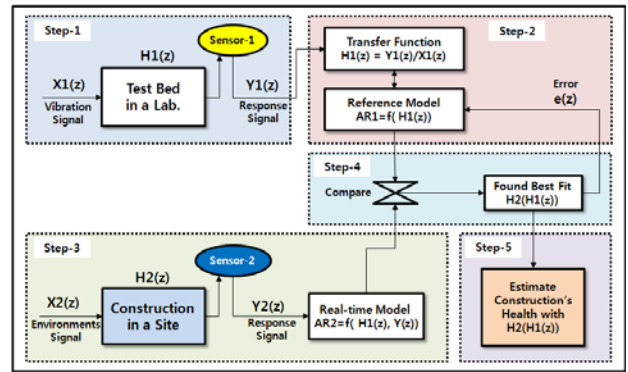


Fig. 2 Flow-diagram of the conventional monitoring techniques for a structures

2.2 제안한 위기평가기법

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 확률 기반 위기평가기법 (Probabilistic based risk Evaluation Techniques, 이하 PET라 함)의 개념도이다. Fig. 3에 표기한 $X(z)$, $Y(z)$, $H(z)$ 등의 의미는 Fig. 2에서 설명한 바와 같다. 우선, Step-1에서 통계적으로 유의성이 입증된 해양파 모델 $S(z)$ 와 연구에 적합한 부유체 모델(Floater Model) $H1(z)$ 을 선정된 다음, 부유체 모델의 응답신호 $Y1(z)$ 을 획득한다. Step-2에서는 사후 데이터 처리(Post Data Process)를 통해서 $Y1(z)$ 에 대한 수열의 응답신호 $Y(n)$ 를 구하여 평균 μ 와 표준편차 σ 를 계산한다. Step-3에서는 센서-1(Sensor-1)을 이용하여 실제 부유체의 응답신호 $Y2(z)$ 를 측정한다. Step-4에서는 μ 와 σ 로 구성된 표준누적분포함수를 구하여 위기수준 평가의 기준 값을 결정 한 후, $Y2(z)$ 에 대한 위기지수(Risk Index, RI)를 구한다. 마지막으로 Step-5에서는 RI를 통해서 부유체의 위기수준(Risk Level)을 평가한다.

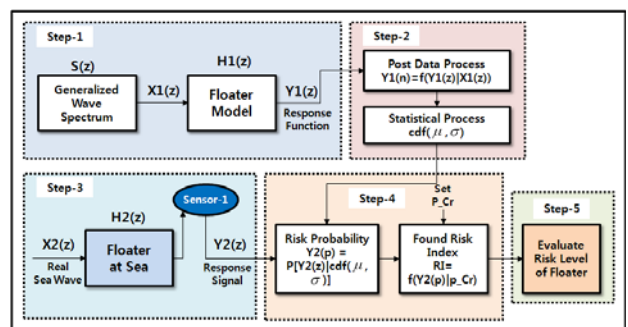


Fig. 3 Flow-diagram of the proposed monitoring techniques for a sea floater

따라서 본 연구에서 제안한 기법은 기존 기법과 달리 실험용 구조물과 이에 대한 방대한 신호처리용 시스템의 구축 등이 필요하지 않고, 부유체 모델을 기존 모델로 사용하기 때문에 실험과정이 간단하고 경제적인 장점을 갖는다.

3. 제안한 기법의 구현 방법과 절차

3.1 부유체 운동 모델 선정

본 연구에 적용한 부유체는 앞의 서론에 기술한 요트 계류장으로, Fig. 4에 제원과 오른손 법칙을 적용한 6자유도 운동 및 부유체와 조우하는 해양파의 상대 방위를 나타냈다.

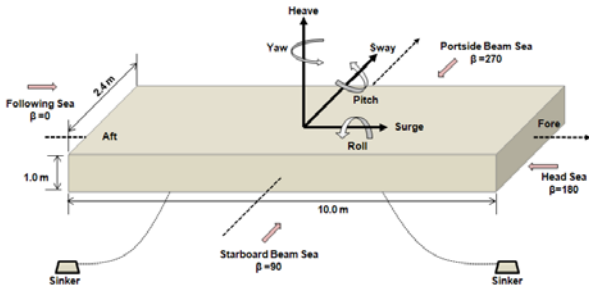


Fig. 4 Dimensions and motion definitions for the floater

부유체는 길이 10.0 m, 폭 2.4 m, 높이 1.0 m의 박스(box) 형태이고, 조석간만의 차를 고려하여 콘크리트 싱커(concrete sinker)에 와이어(wire)로 느슨하게 고정되어 있다. 그래서 진폭이 작은 해양파에 의해서도 요동이 심하고, 6자유도 운동 중에서, 히브(Heave)와 피치(Pitch) 및 롤(Roll) 등 세 가지 운동이 현저하게 나타난다. 본 연구에서는 이 세 가지 운동을 PET에 적용하였다.

유의 파고 ζ_w 를 갖는 해양 파에 대한 부유체 운동 ψ 은 일반적으로 선형 스트립 이론(linear strip theory)으로 계산할 수 있는데 계산과정이 대단히 복잡하다(Ulrik Dam Nielsen, 2006). 본 연구에서는 ψ 의 통계변수 획득이 목적이기 때문에, 계산 절차가 간단하고, Fig. 4와 같은 바지(Barge)형 부유체에 적용하여 유효성을 검증한 다음 식(1)부터 식(6)까지의 폐형 공식(Jørgen Juncher Jensen etc., 2004)과, 폐형 공식을 소형 바지선에 적용하기 위하여 개발한 MATLAB 프로그램(José Miguel Simón Donaire, 2009; MATLAB, 2012)을 참고하여 ψ 을 계산했다. 식(1)부터 식(3)까지는 세 가지 부유체 운동의 지배방정식이고, 식(4)부터 식(6)까지는 이에 대한 Heave 응답함수 Ψ_H , Pitch 응답함수 Ψ_P , Roll 응답함수 Ψ_R 등을 각각 나타낸다.

$$\text{Heave} : 2 \frac{k_w T_{..}}{\omega^2} w + \frac{A^2}{k_w B a^3 \omega} \dot{w} + w = a F \cos(\bar{\omega} t) \quad (1)$$

$$\text{Pitch} : 2 \frac{k_w T_{..}}{\omega^2} \theta + \frac{A^2}{k_w B a^3 \omega} \dot{\theta} + \theta = a G \sin(\bar{\omega} t) \quad (2)$$

$$\text{Roll} : \left(\frac{T_N}{2\pi} \right)^2 C_{44} \ddot{\varphi} + B_{44} \dot{\varphi} = M \quad (3)$$

$$\Psi_H = \eta F \text{ (m)} \quad (4)$$

$$\Psi_P = \eta G \text{ (rad)} \quad (5)$$

$$\Psi_R = \frac{|M|}{\left([-\bar{\omega} \left(\frac{T_N}{2\pi} \right)^2 + 1]^2 C_{44}^2 + \bar{\omega}^2 B_{44}^2 \right)^{1/2}} \text{ (rad)} \quad (6)$$

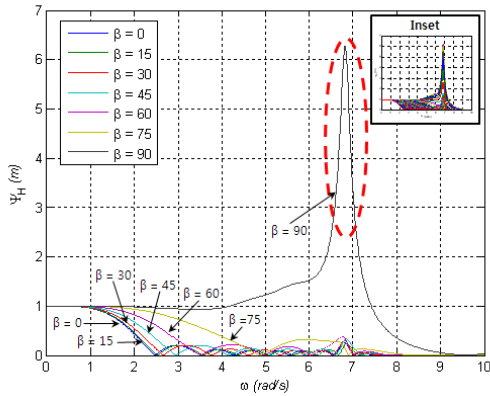
여기서, k_w : 해양파의 파수, ω : 해양파의 주파수(rad/sec.), $\bar{\omega}$: 부유체와 조우하는 해양파의 주파수(rad/sec.), a : 해양파의 진폭, A : 동유체 댐핑, B : 부유체의 폭(m), T : 부유체의 흘수(m), T_N : Roll 운동의 자연주기(sec.), C_{44} : 복원 모멘트 계수, B_{44} : 유체력 댐핑, F, G : 기진력 함수, M : 기진 모멘트 등을 나타낸다.

상기 식들에 대한 수학적 엄밀성과 변수들의 상세한 계산방법 등은 위에서 기술한 참고문헌에 상세하게 기록되어 있다.

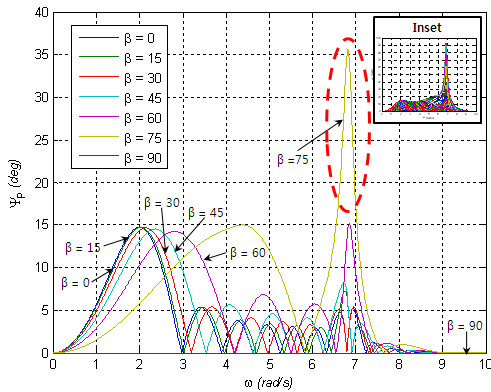
3.2 부유체 모델의 응답함수 계산

먼저, José Miguel Simón Donaire(2009)이 제안한 식(4)부터 식(6)까지의 계산용 MATLAB 프로그램을 참고하여 부유체의 Heave 운동 $\Psi_H(\omega_i, \beta_j)$, Roll 운동 $\Psi_R(\omega_i, \beta_j)$, Pitch 운동 $\Psi_P(\omega_i, \beta_j)$ 을 계산하였다. 이때, 유의파고 ζ_w 는 목포항에서 발생할 수 있는 최대 유의파고를 1.0 m으로 주고, ω_i ($i=1,2,3,\dots,I$, I 는 주파수 구분 수)는 0.01 (rad/sec.)의 간격으로 $0.01 \leq \omega_i \leq 10.0$ 의 범위로 주었으며, β_j ($j=1,2,3,\dots,J$, J 는 방위 구분 수)는 1.0 도(degree) 간격으로 $0 \leq \beta \leq 359$ 의 범위로 주었다. 이하에서는 세 가지 운동을 대표하여 $\Psi(\in\{\Psi_H, \Psi_R, \Psi_P\})$ 또는 $\Psi(\omega, \beta) (\in\{\Psi_H(\omega_i, \beta_j), \Psi_R(\omega_i, \beta_j), \Psi_P(\omega_i, \beta_j)\})$ 등으로 나타내고, 세 가지 운동 각각을 간단하게 표시할 때는 Ψ_H, Ψ_R, Ψ_P 또는 $\Psi_H(\omega, \beta), \Psi_R(\omega, \beta), \Psi_P(\omega, \beta)$ 등을 병행 사용한다. Fig. 5는 $\beta=0 \sim 90$ 범위에서 5도 간격으로 계산한 ψ 이고, 전체 결과는 삽입 그림으로 나타났다.

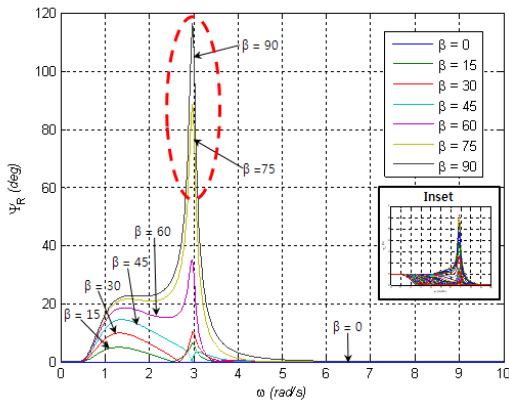
Fig. 5(a)의 Ψ_H 을 보면, 부유체의 길이가 폭에 비하여 길기 때문에 $\beta=90$ 에서 최댓값을 갖는데, 유의파고 ζ_w 을 1.0 m로 주었음에도 불구하고 6.2 m로 과대 추정되었다. Fig. 5(b)의 Ψ_P 에서도 $\beta=75$ 에서의 과대 추정을 제외하면 $\beta=0$ 에서 최댓값을 갖고 $\beta=90$ 에서 영(0)을 갖는 유의한 결과를 나타낸다. Fig. 5(c)의 Ψ_R 에서도 $\beta=90$ 에서의 과대 추정을 제외하면 유의한 결과를 나타낸다. 이러한 과대 추정 문제는 폐형 공식을 제안한 Jørgen Juncher Jensen 등(2004)과 폐형 모델을 실제 바지선에 적용한 José Miguel Simón Donaire(2009) 등의 연구에서도 한계점으로 지적된 바 있다. 본 연구에서는 이러한 과대 추정 부분을 통계분석 과정을 통해서 제거했다. 그리고 Fig. 5(a)의 Ψ_H 와 Fig. 5(b)의 Ψ_P 는 연성운동방정식을 통해 계산되는데, Ψ_P 와 달리 Ψ_H 의 경우 1.0 (rad/sec.) 이하의 저주파 영역에서는 단위 값(1.0 m)으로 나타나고 있다. 그 이유는 저주파의 해양파는 큰 주기를 갖는데, 이러한 조건에서 부유체는 해양파의 진폭에 대해서 동일한 수직변위로 나타나기 때문이다.



(a) Response function Ψ_H to Heave motion



(b) Response function Ψ_P to Pitch motion



(c) Response function Ψ_R to Roll motion

Fig. 5 Calculation results of response functions Ψ

3.3 확률변수 추정

Fig. 5에 나타난 $\Psi(\omega_i, \beta_j)$ 는 ω_i 와 β_j 에 대한 3차원 데이터이기 때문에 다음 식(7)을 적용하여 2차원 수열 데이터로 변환하여 확률변수를 추정하였다.

$$\Psi(n) \Leftarrow \Psi(\omega_i, \beta_j), \quad n = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J 1 \quad (7)$$

Fig. 6(a)에 수열로 재구성한 세 가지 응답함수 $\Psi_H(n)$,

$\Psi_P(n)$, $\Psi_R(n)$ 을 나타냈다. 부유체의 제원이 전후와 좌우가 대칭인 박스 형태이기 때문에 $\beta = 0 \sim 90$, $\beta = 90 \sim 180$, $\beta = 180 \sim 270$, $\beta = 270 \sim 360$ 등의 범위에 대한 응답함수가 좌우 대칭인 데이터가 반복되고, 앞에서 고찰한 과대 추정 결과들이 현저하게 나타나고 있다. Fig. 6(b)은 Fig. 6(a)의 $\Psi(n)$ 에 대한 표준분포 검증(normality testing) 그래프로, MATLAB(2008)의 실행 코드 **normplot**을 이용하여 계산한 것이다. x-축이 $\Psi(n)$ 의 데이터 값이고, y-축은 데이터 값이 나타날 확률 0.5를 기준으로 하는 지수함수 그래프이다. 데이터가 표준분포를 갖는다면 그래프에 표시한 일점쇄선과 일치한다.

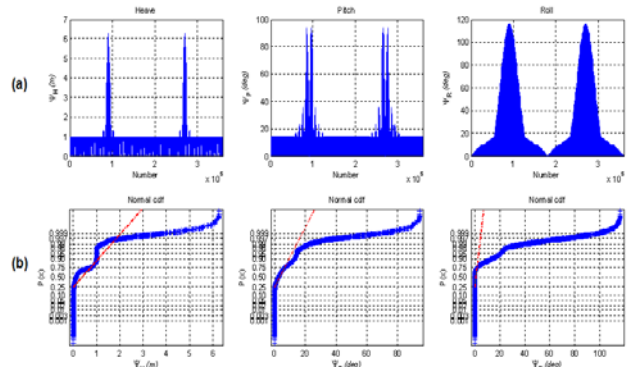


Fig. 6 Transformation results from $\Psi(\omega, \beta)$ to $\Psi(n)$ and its normality test. Sequence data $\Psi(n)$ (a), normality test graph to $\Psi(n)$ (b)

Fig. 6에서, Heave 데이터는 확률 0.25~0.997 구간, Pitch 데이터는 확률 0.25~0.95 구간, Roll 데이터는 확률 0.25~0.75 구간 등에서 대략적으로 표준분포 경향을 나타내고, 그 외는 비표준분포 경향을 나타낸다. 특히 $\Psi(n)$ 의 값이 클수록 비표준분포 경향은 현저한데, 앞에서 검토한 바와 같이 일부 특정 주파수에서 $\Psi(n)$ 의 과대 추정 결과가 반영된 것이다. 이러한 표준분포 검증이 필요한 이유는, $\Psi(n)$ 의 평균과 표준편차를 갖는 표준누적분포함수(normal cumulative distribution function, 이하 n-CDF)에서 $\Psi(n)$ 의 특정 값에 대한 확률을 기준 확률로 적용하기 때문이다.

우선, $\Psi(n)$ 의 과대 추정 문제를 해결하기 위하여 Fig. 7(a) 과 같이 $\Psi(n)$ 을 데이터 값이 작은 것부터 큰 순으로 정렬했다. 각 그림 우측의 큰 값을 갖는 $\Psi(n)$ 이 과대 추정된 부분이다. 그리고 $\Psi(n)$ 의 누적확률 구간 ($0.9 \leq P(\Psi) \leq 1.0$)에 대한 데이터의 통계분석 결과, 95% 신뢰구간($P(\Psi) = 0.95$)의 데이터가 과대 추정이 제거된 데이터로 구성됨을 알았다. Fig. 7(b)은 $P(\Psi) = 0.95$ 의 신뢰구간에 대한 $\Psi(n)$ 데이터를 나타낸 것으로, Fig. 7(a)와 비교하면 과대 추정 부분이 제거되었음을 알 수 있다. 이하에서는 이 데이터를 $\Psi_{95}(n)$ 로 나타낸다. 한편, Fig. 7(c)은 $\Psi_{95}(n)$ 데이터에 대한 실험누적분포함수를 나타낸 것으로, 과대 추정 부분이 제거되었음에도 불구하고 일부구간은 비표준분포 경향을 보인다. 비표준분포 데이터에 대한 분

포함수 추정 문제는 대단히 복잡하고 방대한 연구를 필요로 하기 때문에 논외로 하되, 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 적용하여 위기평가에 적용할 기준 확률을 구했다.

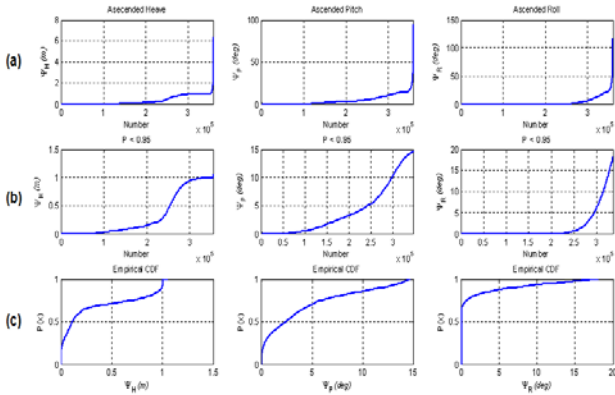


Fig. 7 Data extraction with 95% confidence level to $\Psi(n)$. Rearranged $\Psi(n)$ with ascending order(a), $\Psi_{95}(n)$ with 95% confidence level(b), empirical cumulative distribution functions to $\Psi_{95}(n)$ (c)

Table 1은 본 연구에서 기준으로 적용한 5단계 위기지수 (Risk Index, RI)와 범위를 나타낸다. 예를 들어, 실제 측정값을 φ 로 두었을 때, φ 가 $\Psi_{95}(n)$ 의 95% 누적확률($P=0.95$) 이상의 값을 갖는다면 매우 위험함을 의미하는 'Very Danger'에 속하고, 이 때 'RI=5'라는 의미이다. $\Psi_{95}(n)$ 의 75% 누적확률($P=0.75$)과 50% 누적확률($P=0.5$) 사이의 값을 갖는다면 위험함을 의미하는 'Danger'에 속하고, 이 때 'RI=4'라는 의미이다. 이러한 분류 방법은 누적분포함수에서 계급간 유의수준의 평가 방법을 준용한 것이다(Stanley Kaplan etc., 1981).

Table 2는 다음 식(8)과 식(9)을 적용하여 $\Psi_{95}(n)$ 의 평균 μ_Ψ 과 표준편차 σ_Ψ 를 구하여 n-CDF를 구한 후, 이 함수에서 계산한 $\Psi_{P=0.95}$, $\Psi_{P=0.75}$, $\Psi_{P=0.5}$, $\Psi_{P=0.25}$ 등을 나타낸다. Table 3은 $\Psi_{95}(n)$ 의 μ_Ψ 과 σ_Ψ 를 나타낸다.

$$\mu_\Psi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Psi_{95}(n) \quad (8)$$

$$\sigma_\Psi = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Psi_{95}(n) - \mu_\Psi)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

여기서, N 은 $\Psi_{95}(n)$ 의 총 데이터 수를 나타낸다.

한편, Table 2에서, Roll 운동 φ_P 에 대한 $\Psi_{P=0.25}$ 의 값이 -0.8875로 나타났는데, 이 값은 실제 Roll 운동에서 나타날 수 없는 것으로, 비표준분포 경향을 갖는 $\Psi_{95}(n)$ 에 대한 n-CDF에서 기준 값을 구했기 때문이다. 물론 $\Psi_{P=0.95}$, $\Psi_{P=0.75}$, $\Psi_{P=0.5}$ 등에도 비표준분포의 영향이 포함되어 있을 것으로 보이는데, 이에 대한 영향 분석은 방대한 연구를 요하기 때문에 추후 연구과제로 두고, 본 연구에서는 $\Psi_{P=0.25}$ 을 최솟값 0.0으로 대체한 Table 2의 결과를 기준 값으로 적용했다.

Table 1 Risk Index(RI) and range of Risk Level

RI	Range	Meaning
5	$\varphi \geq \Psi_{P=0.95}$	Very Danger
4	$\Psi_{P=0.75} \leq \varphi < \Psi_{P=0.95}$	Danger
3	$\Psi_{P=0.5} \leq \varphi < \Psi_{P=0.75}$	Caution
2	$\Psi_{P=0.25} \leq \varphi < \Psi_{P=0.5}$	Watching
1	$\varphi < \Psi_{P=0.25}$	Safety

Table 2 Risk criteria for five scales

Criteria Motions	$\Psi_{P=0.25}$	$\Psi_{P=0.5}$	$\Psi_{P=0.75}$	$\Psi_{P=0.95}$
Heave φ_H	0.0162	0.3182	0.5748	0.9441
Pitch φ_R	1.0224	3.9539	6.8854	11.1030
Roll φ_P	-0.8875* (0.0000)	1.6590	4.2055	7.8692

Table 3 Mean μ_Ψ and standard deviation σ_Ψ to $\Psi_{95}(n)$

Motions	Parameters	Mean μ_Ψ	s.t.d σ_Ψ
Heave $\Phi_{H_{95}}$		0.3402	0.4355
Pitch $\Phi_{P_{95}}$		4.6270	6.1122
Roll $\Phi_{R_{95}}$		3.4654	8.8761

4. 시뮬레이션 및 평가

4.1 실험신호 생성

본 연구에서는 3축 가속도계와 3축 자이로(Gyro)가 내장된 Analog Device(2009)사의 ADIS16405를 부유체 응답측정 센서로 이용할 예정이기 때문에 이 센서의 데이터 시트에 기록된 전기특성을 이용하여 실제 부유체에서 측정되는 응답신호와 유사한 실험신호(test signal)를 생성하여 실험하였다.

센서의 자이로에서 측정할 Pitch와 Roll 운동의 각속도를 $\dot{\varphi}_P$ 와 $\dot{\varphi}_R$ 로 두면 이산시간 k 에 대한 각도 $\varphi_P[k]$, $\varphi_R[k]$ 는 다음 식(10)으로 계산되고, 센서의 가속도계에서 측정된 Heave 운동의 가속도 $\ddot{\varphi}_H$ 와 속도 $\dot{\varphi}_H$ 에 대한 변위 $\varphi_H[k]$ 는 다음 식(11)로 계산할 수 있다.

$$\begin{cases} \varphi_P[k+1] = \varphi_P[k] + T\dot{\varphi}_P[k] \\ \varphi_R[k+1] = \varphi_R[k] + T\dot{\varphi}_R[k] \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_H[k+1] \\ \dot{\varphi}_H[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_H[k] \\ \dot{\varphi}_H[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} \ddot{\varphi}_H[k] \quad (11)$$

여기서, 각속도는 $\dot{\varphi}_P[k] = v_{w1} + v_{F1}$, $\dot{\varphi}_R[k] = v_{w2} + v_{F2}$ 로 모델링하고, v_{w1} 과 v_{w2} 는 백색잡음(wite noise), v_{F1} 과 v_{F2} 는 플리커 잡음(flicker noise), T 는 샘플링(sampling) 시간을 각각 나타낸다. 그리고 가속도는 백색잡음만을 이용하여 $\ddot{\varphi}_H[k] = v_w$ 로 모델링했다.

그리고 위의 식(10)과 식(11)로부터 구한 시계열 신호는 이산신호처리 과정을 통해서, 부유체 모델에서 구한 $\Psi_{95}(n)$ 과 동일한 샘플 수의 수열 신호 $\varphi(n)$ 으로 변경하였다. 한편, $\varphi(n)$ 은 평균 0, 분산이 1의 표준분포를 갖기 때문에 영(0)을 중심으로 정(+)과 부(-)로 진동한다. 그러나 실제 부유체에 장착한 센서에서 측정하는 각도 또는 변위는 단조증감함수로 나타나기 때문에 다음 식(12)과 같이 $\varphi(n)$ 에 대한 절대 값 $|\varphi(n)|$ 을 취한 후, 가우시안 창(Gaussian window)을 갖는 필터를 적용하여 고주파 노이즈를 제거한 실험신호 $\tilde{\varphi}(n)$ 을 생성했다.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\varphi}_H(n) &= \text{filt}(\text{win}_G, a, |\varphi_H(n)|) \\ \tilde{\varphi}_P(n) &= \text{filt}(\text{win}_G, a, |\varphi_P(n)|) \\ \tilde{\varphi}_R(n) &= \text{filt}(\text{win}_G, a, |\varphi_R(n)|) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

여기서, 가우시안 창 win_G 의 길이는 30, 필터 계수 a 는 1.0 으로 주고, 필터를 의미하는 $\text{filt}(\cdot)$ 는 MATLAB 실행 코드 **filt**를 이용하여 계산했다.

Fig. 8에 Heave에 대한 실험신호 생성과정을 샘플로 나타냈다. Fig. 8(a)은 식(10)과 식(11)에서 계산한 신호, Fig. 8(b)은 식(12)의 $|\varphi(n)|$, Fig. 8(c)은 길이 30의 가우시안 창, Fig. 8(d)은 실험신호 $\tilde{\varphi}(n)$ 등을 나타낸다. 그리고 $\tilde{\varphi}(n)$ 은 비교평가를 위하여 부유체 모델의 $\Psi_{95}(n)$ 와 최댓값이 같도록 조정하였다.

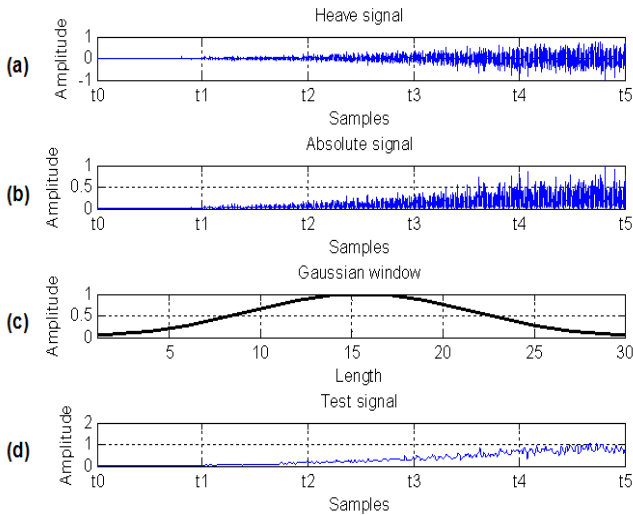


Fig. 8 Signal processing procedure to create tests signal of Heave motion(Sample). Heave motion signal φ_H with ADIS16405 electrical specifications(a), $|\varphi_H|$ to φ_H (b), Gaussian window with length of 30(c), test signal $\tilde{\varphi}_H(n)$ after filtering(d)

4.2 실험 및 평가

Fig. 9는 실험을 위하여 생성한 실험신호에 대한 위기수준(Risk Level) 평가결과이다. Fig. 9(a)는 세 가지 실험신호

$\tilde{\varphi}_H(n)$, $\tilde{\varphi}_P(n)$, $\tilde{\varphi}_R(n)$ 을 나타내고, Fig. 9(b)는 Table 1의 5단계 범위를 적용한 세 가지 실험신호 각각에 대한 위기평가, Fig. 9(c)는 세 가지 위기평가를 이용한 최종 위기평가 결과 RL_φ 과 참조 신호 $U_{RL}(n)$ 을 나타내고, Fig. 9(d)는 RL_φ 에 대한 오차 e_{RL_φ} 을 각각 나타낸다.

Fig. 9(c)에 나타난 최종 위기평가 평가 RL_φ 은 다음 식(13)과 같이 세 가지 위기평가의 평균으로 계산하고, Fig. 9(d)에 나타난 오차 e_{RL_φ} 는 다음 식(14)과 같이 RL_φ 과 $U_{RL}(n)$ 의 차이로 구하였으며, $U_{RL}(n)$ 은 다음 식(15)의 의미를 갖는다.

$$RL_\varphi(n) = [RL(\tilde{\varphi}_H(n)) + RL(\tilde{\varphi}_P(n)) + RL(\tilde{\varphi}_R(n))] / 3.0 \quad (13)$$

$$e_{RL_\varphi} = RL_\varphi(n) - U_{RL}(n) \quad (14)$$

$$U_{RL}(n) = \sum_{n=1}^{N_{max}} \frac{n}{(N_{max}/4)} + 1.0 \quad (15)$$

식(15)에서 N_{max} 은 $\tilde{\varphi}(n)$ 의 최대 샘플 수를 나타내고, U_{RL} 의 값은 전체 샘플에 대해서 1.0부터 5.0까지의 단조증감함수로 나타난다. 한편, RL_φ 의 이상적인 결과는 참조신호 U_{RL} 과 동일하게 나타나야 하는데, 그 이유는 위의 식(10)과 식(11)에서 생성한 실험신호 $\tilde{\varphi}(n)$ 는 샘플링 시간 T 의 증가에 비례하는 단조증가 신호로서 $\Psi_{95}(n)$ 의 최댓값을 갖는 신호로 만들었기 때문이다.

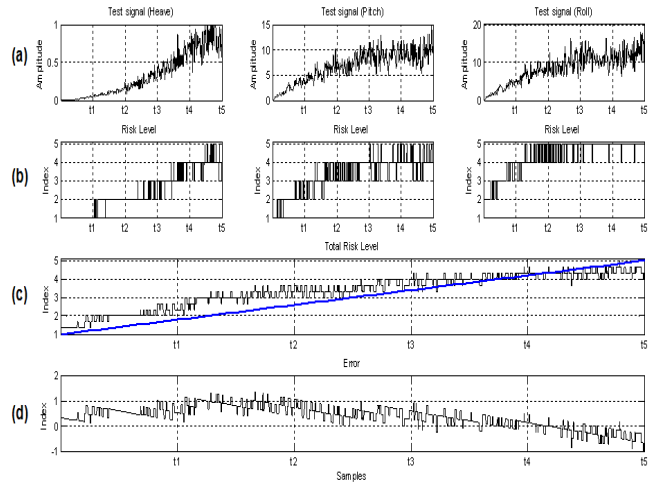


Fig. 9 Experimental results for the evaluation of test signals. Test signal $\tilde{\varphi}_H$, $\tilde{\varphi}_P$ and $\tilde{\varphi}_R$ (a), Risk Level to each test signals(b), Risk evaluation result RL_φ and reference signal U_{RL} (c), error e_{RL_φ} (d)

한편, Fig. 9(d)의 오차 e_{RL_φ} 가 발생한 가장 큰 원인은 앞에서 검토한 바와 같이 $\Psi_{95}(n)$ 의 n-CDF에서 구한 5단계 기준 값을 표준분포를 갖는 실험신호 $\tilde{\varphi}(n)$ 에 적용한 것과, $\tilde{\varphi}(n)$ 에 개입된 오차 등으로 고려된다. 따라서 비표준분포를 갖는 데이터에서 기준 값을 구하는 것이 중요함을 알 수 있는데, 앞에

서 검토한 바와 같이 이러한 비표준분포 데이터에 대한 분포 함수 추정에는 방대한 연구가 필요하기 때문에 추후 연구과제로 둔다.

그리고 오차 e_{RL_x} 에 대한 평균은 0.38로 계산되었는데, 이 오차 값은 $\Psi_{95}(n)$ 의 n-CDF에서 구한 5단계 기준 값을 적용했음에도 불구하고 최대 5단계 척도에서 7.6 % (0.38/5.0) 의 작은 오차를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 제안한 확률 기반 위기평가기법(PET)이 해상 부유체의 위기평가기법으로 유효함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 목포해양대학교 안벽에 구축된 요트 계류장과 같은 소형 부유체의 위기평가기법을 제안하고, 그 유효성을 검토하였다. 실험결과는 다음과 같다.

(1) 요트 계류장에 대한 부유체 모델로부터 확률 변수를 확보한 후, 실제 계류장에서 측정된 Heave, Roll, Pitch 운동에 대한 확률적인 위기수준을 평가할 수 있는 확률 기반 위기평가기법(PET)을 제안했다.

(2) 실제 부유체에 장착할 센서의 출력과 유사한 특성의 실험신호를 이용한 실험결과, 최대 5단계 척도에서 7.6 %의 작은 오차로 나타나서 본 연구에서 제안한 PET가 해상 부유체의 위기평가기법으로 유효함을 확인했다.

(3) 제안한 방법은 기존 구조물의 위기평가 기법들과 달리 고비용과 장시간이 소요되는 실험 구조물이 필요하지 않고, 계산과정이 단순한 장점을 갖는다.

한편, 본 연구에서 제안한 PET 기법의 최적설계를 위해서는 안정적으로 부유체의 응답함수를 예측할 수 있는 모델의 선정과, 비표준분포 함수에서 통계적으로 유의한 5단계 위기 기준의 선정이 필요하다. 현재 실제 요트 계류장의 운동 측정 시스템을 구축 중에 있는데, 이와 병행하여 연구를 지속하여 본 연구에서 제기된 문제점을 해결할 예정이다.

후 기

이 논문은 2012년도 국토해양부지정 호남지역 Sea Grant 사업단 연구개발사업 과제 지원에 의해 수행된 연구임.

참고문헌

[1] 김병찬, 허민, 임재홍(2007), “무선 네트워크를 이용한 적조 모니터링 시스템의 설계 및 구현”, 한국항해항만학회지, 제31권, 제3호, pp. 263-269.

[2] 김순갑, 이충로(1991), “황천시의 항해안전 평가시스템 개발에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제15권, 제1호, pp. 49-65.

[3] 박성현, 정중식(2005), “레이더 리플렉터 장착을 위한 어업용 바지선의 동적 응답해석에 관한 연구”, 한국항해항

만학회지, 제29권, 제5호, pp. 383-388.

[4] 손경호, 광승현(1997), “선체 주위의 해양파 해석 및 수치적 고찰”, 한국항해항만학회지, 제11권, 제1호, pp. 1-8.

[5] 임남균, 김환수(1998), “확률변수를 이용한 레이더 시물레이터의 상대선박 출현방법의 개선에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 1998년도 춘계학술발표회 논문집, pp. 83-89.

[6] Analog Device(2009), *ADIS16405 Data Sheet*. (URL: <http://www.analog.com>)

[7] Charles R. Farrar, Scott W. Doebling and David A. Nix(2001), “Vibration-based structural damage identification,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Londo*, Vol. 359, pp. 131-149.

[8] Eduardo A. Tannuri, Joao V. Sparano, Alexandre N. Simos and Jose J. Da Cruz (2003), “Estimating directional wave spectrum based on stationary ship motion measurements,” *Applied Ocean Research* 25, pp. 243-261.

[9] Iseki Toshio and Ohtsu Kohei(2000), “Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions,” *Control Engineering Practice* 8, pp. 215-219.

[10] Jørgen Juncher Jensen, Alaa E. Mansour and Anders Smærup Olsen(2004), “Estimation of ship motions using closed-form expressions,” *Ocean Engineering* Vol. 31, pp. 61-85.

[11] José Miguel Simón Donaire(2009), *Sea Transport Analysis of Upright Wind Turbines*, Master Thesis(MEK-FM-EP-2009-14), Technical University of Denmark.

[12] Lu Kung-Chun, Loh Chin-Hsiung, Yang Y. S., Jerome P. Lynch and Kincho H. Law(2008), “Real-Time Structural Damage Detection using Wireless Sensing and Monitoring System,” *Smart Structures and Systems*, TechnoPress, Vol. 4(6), pp. 759-778.

[13] MATLAB(2012), *Programming, MATLAB Version 7.6 (R2008a)*. (URL: <http://www.mathworks.co.kr>)

[14] Stanley Kaplan and B. John Garrick(1981), “On The Quantitative Definition of Risk,” *Risk Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 11-27.

[15] Ulrik Dam Nielsen(2006), “Estimations of on-site directional wave spectra from measured ship responses,” *Marine Structures*, Vol. 19, pp. 33-69.

[16] Ulrik Dam Nielsen and Iseki Toshio(2011), ‘A Study on Parametric Wave Estimation Based on Measured Ship Motions,’ *Wite Paper*. (URL: <http://orbit.dtu.dk>)

원고접수일 : 2012년 08월 29일
 심사완료일 : 2012년 10월 29일
 원고채택일 : 2012년 10월 29일