

저속으로 전복되는 선박사고의 선체 특성에 대한 해석적 연구

최순만[†]

(Received September 30, 2015 ; Revised February 16, 2016 ; Accepted March 9, 2016)

An analytic study on the hull characteristics of ship accidents at low capsizing speeds

Soon-Man Choi[†]

요약: 복원력을 잃고 선박이 전복될 때의 횡경사 속도는 선체가 사고 상황에 대해 외부로 표현하는 고유 응답의 하나가 된다. 자유 횡요 시 횡운동은 횡관성모멘트와 GM 및 횡감쇠계수와 같은 선체계수에 의해 나타낼 수 있으나 선체가 저속으로 진행되는 전복의 경우에는 각속도 성분이 특히 작아지므로 특성 해석은 보다 용이해진다. 따라서 빠르게 진행되는 전복사고에 비해 저속 전복 사고는 선체 거동의 예측이 적절히 가능할 뿐 아니라 선박구조에 필요한 시간의 확보가 수월해지므로 선박의 구조전략 측면에서 저속 전복사고는 별도로 분류하여 대응할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 선체의 자유 횡운동에 대한 선형미분방정식을 토대로 저속 전복 시 선체계수들이 전복속도에 미치는 영향을 관련된 함수들로 나타내었으며 횡운동 진폭감쇠비를 기준으로 횡감쇠계수 크기와 선체 특성을 분석하였다. 또한, 여기에서의 수식적 관계를 실제 선박의 제원에 적용함으로써 얻어지는 결과들을 통해 제시된 저속 전복 선박의 일반적 특성이 도시적으로 설명될 수 있음을 확인하였다.

주제어: 선체 횡운동, 선박전복사고, 저속전복, 횡진폭감쇠비, 횡감쇠계수

Abstract: The capsizing speed of an unstable vessel with a lost restoring moment can be understood as a unique response to an accident situation, and is naturally affected by such parameters as moment of inertia, metacentric height, and transverse damping coefficient of the hull in the case of free roll motion. Additionally, it is supposed that the analysis of capsizing accidents can be further simplified when a vessel's leaning velocity is shown to be quite low. Therefore, capsizing accidents with low leaning speeds are desirably categorized in view of rescuing strategies, as opposed to fast capsizing accidents, since the attitude of the declining hull can be properly estimated, which allows rescuers to have more time for helping accident cases. This study focuses on deriving some analytical equations based on the roll decay ratio parameter, which describes how a hull under a low-speed capsizing is related to the situational hull characteristics. The suggested equations are applied to a particular ship to disclose the analytical responses from the model ship. It was confirmed that the results show the general characteristics of slow capsizing ships.

Keywords: Transverse ship motion, Capsizing ship accidents, Slow capsizing, Roll decay ratio, Transverse damping coefficient

1. 서론

항행중인 선박이 자체 복원력을 잃고 전복될 때의 횡경사 속도는 사고 시점에서의 GM(경심고)과 배수량, 선체의 횡관성모멘트 및 횡감쇠계수에 따라 그 크기가 달라진다. 선체가 무게 중심과 부심이 같은 수직선 상에 놓이는 중립 평형상태 근방이면 선체 기울기는 매우 천천히 진행되는 반면 평형점으로부터 멀어질수록 복원 또는 전복 방향의 어느 경우이든 횡운동은 급속한 움직임으로 나타나게 된다. 이로부터 사고 시점의 전복속도는 역으로 사고 선박의 선체 안정도에 대한 기본적인 정보를 제공하는 것으로 이해될 수 있으며 특히 저속 전복의 상황이란 경사속도의 변화가 매우 작다는 점에서

선체의 지배적인 특성을 해석하고 분석하기가 상대적으로 용이해진다. 따라서 저속 전복사고는 해석적 특성이 보다 분명해지므로 선체 거동의 예측이 어느 정도 가능할 뿐 아니라 급속한 전복사고에 비해 구조에 요하는 시간을 상대적으로 많이 확보할 수 있다는 측면을 고려할 때 선박의 재난 종류 중 저속전복 사고는 별도의 영역으로 분류하여 이에 적합한 구난전략과 대응책을 강구할 필요가 있다.

저속 전복 시의 경사속도는 특히 사고선박의 횡요 제동효과에 영향을 많이 받으므로 횡감쇠계수의 수치적 크기를 적정하게 추정하는 것이 중요한 문제로 대두된다. 여기서 횡감쇠계수는 배수량과 습면적의 표면 거칠기 정도가 같은 동일

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8795-7443>): Department of Education & Research, Korea Institute of Maritime & Fisheries Technology, 367 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: panamo@hanmail.net, Tel: 051-620-5850

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

선박에서라면 운항 상태에 따라 달라지지는 않으며 따라서 복원성이 좋고 나쁨에 관계없이 일정한 값을 가지게 된다. 이러한 전제에서 복원성이 양호할 때의 횡요 시 나타나는 횡요 진폭감쇠비를 이용하여 횡감쇠계수를 정할 수 있으며 이를 저속 전복 시 선체에 작용하는 횡감쇠계수에 대입함으로써 저속 전복 시의 선체가 나타내는 GZ 크기 및 관련된 일반적 특성들을 살펴보기로 한다.

2. 횡운동식

2.1 정상 시의 선체운동

Figure 1은 정상 상태의 선체 경사각이 ϕ 일 때 부심 B와 메타센터 M의 관계를 나타내며 무게중심 G와의 거리인 GM은 양의 방향으로 작용하고 있다.

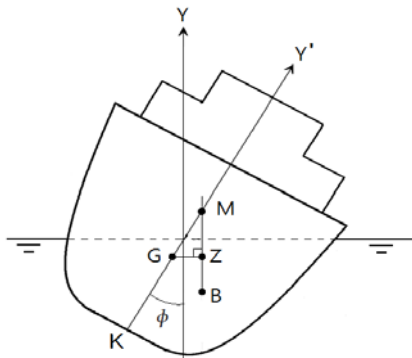


Figure 1: Schematic diagram to describe GM and GZ

GZ는 G와 BM 간 거리로서 복원모멘트의 팔길이에 해당하며 이를 ϕ 의 함수인 GZ(ϕ)라 하면 평온한 해상상태에서 선체 경사각 ϕ 는 다음의 운동식으로 나타낼 수 있다[1]-[3].

$$J\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + \Delta \cdot g \cdot GZ(\phi) = 0 \quad (1)$$

여기서 J 는 횡운동 관성모멘트, b 는 선형값인 선체 횡운동 감쇠계수(Damping coefficient)이고 Δ 와 g 는 배수량과 중력가속도이다. 한편, ϕ 가 작은 범위에서는 $GZ(\phi) \approx GM \cdot \phi$ 이므로 식 (1)은 식 (2)가 된다.

$$\ddot{\phi} + \frac{b}{J}\dot{\phi} + \frac{\Delta \cdot g \cdot GM}{J}\phi = 0 \quad (2)$$

이 경우 식 (2)의 해인 ϕ 의 응답은

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0 \cdot e^{-\frac{b}{2J}t} \left[\cos \omega t + \frac{b}{2J\omega} \sin \omega t \right] \\ &+ \phi_0' \cdot \frac{1}{\omega} \cdot e^{-\frac{b}{2J}t} \cdot \sin \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다. 여기서 ϕ_0 와 ϕ_0' 는 초기 경사각과 초기 각속도이고 각속도 ω 는

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4)$$

를 나타낸다. 또한, ω_n 과 ζ 는 각각 식 (2)의 고유각속도와 감쇠율(Damping ratio)이다. 한편, 무게중심 G로부터의 선체 횡운동 회전반경(Rolling radius of gyration)을 k 라 하면 횡 관성모멘트 J 는

$$J = \Delta \times k^2 \quad (5)$$

의 관계이므로 식 (2)와 식 (5)로부터 ω_n 과 ζ 는 다음과 같아진다.

$$\omega_n = \frac{\sqrt{g \cdot GM}}{k} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{b}{2 \times k \times \Delta \times \sqrt{g \cdot GM}} \quad (7)$$

한편, k 를 선체 폭 B 와의 비인 계수 C_B 에 의해 나타내면

$$k = C_B \times B \quad (8)$$

가 된다. 식 (8)의 C_B 값으로는 대략 0.4가 통용될 수 있으며 [4]-[6] 혹은 IMO Res. A. 749의 기준에 따라 선체 수선길이 및 흘수가 L 및 d 일 때 다음 값으로 정해진다[7].

$$C_B = 0.373 + 0.023 \times (B/d) - 0.043 \times (L/100) \quad (9)$$

2.2 진폭감쇠비와 횡감쇠계수의 관계

식 (2)의 J 값은 식 (5)와 식 (8) 또는 식 (9)에 의해 정해질 수 있다. 한편, 횡감쇠계수 식 (2)의 b 는 자유 횡요 시 발생하는 맥동현상의 감쇠효과와 관련된 것이므로 이를 시각적으로 확인할 수 있는 자유 횡요 시의 선체 횡진폭감쇠비에 의해 간접적으로 나타내는 것이 가능하다.

여기서 식 (3)의 ϕ 가 최대 혹은 최소가 되는 시점이 순서적으로 t_0, t_1, t_2, \dots 일 때 n 번째 시점은 t_n 이 되고 ϕ 의 진폭감쇠비(Decay ratio)를 λ 라 하면 다음 관계가 된다.

$$\lambda = \frac{\phi(t_{n+2})}{\phi(t_n)} \quad (10)$$

또한, t_n 일 때 식 (3)의 미분함수는 식 (11)의 조건이 되어야 한다.

$$\phi' = -\phi_0 [\omega + b^2 / (4J^2\omega)] e^{-\frac{b}{2J}t} \sin \omega t = 0 \quad (11)$$

이로부터 식 (10), 식 (11)에 의해 λ 를 나타내면 다음 식이 얻어진다.

$$\lambda = \frac{\phi(t_{n+2})}{\phi(t_n)} = e^{-\frac{\pi b}{k^2 \cdot \Delta \cdot \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}} \quad (12)$$

따라서 감쇠계수 b 는 λ 가 포함되는 식 (13)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$b = \frac{\ln \lambda}{\pi} \cdot k^2 \cdot \Delta \cdot \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (13)$$

위 식에 식 (6), 식 (7)의 ω_n, ζ 를 대입하여 b 의 2차식으로 부터 감쇠계수 b 를 정리하면 다음 식이 된다.

$$b = \frac{6.26 \times \ln \lambda}{\sqrt{4\pi^2 + (\ln \lambda)^2}} \cdot k \cdot \Delta \cdot \sqrt{GM} \quad (14)$$

3. 저속 전복 시의 특성

3.1 저속 전복 시의 선체운동

저속으로 전복되는 경우 선체 경사각은 급격한 변화 없이 거의 일정 속도로 완만히 증가하는 형태가 되므로 식 (1)의 J 에 의한 각가속도 항이 갖는 크기는 매우 작아져서 이를 무시하면 $GZ(\phi)$ 는 식 (1)로부터 근사적으로 다음과 같아진다.

$$GZ(\phi) = \frac{b}{\Delta \cdot g} \dot{\phi} \quad (15)$$

경사속도 $\dot{\phi}$ 가 ϕ_1 과 ϕ_2 구간에서 일정값 Ω_C 이라면 선체의 GZ 크기는 이 구간에서 ϕ 의 함수가 아닌 일정값의 GZ_C 가 되므로 식 (15)는 식 (16)으로 표현될 수 있다.

$$GZ_C = \frac{b}{\Delta \cdot g} \Omega_C \mid_{\phi_1 \leq \phi \leq \phi_2} \quad (16)$$

저속전복 시 GZ 가 이와 같이 ϕ 와 무관한 일정값으로 취급이 될 수 있다는 것은 복원성이 정상일 때와는 크게 대비가 되는 점이다. 복원성이 정상일 때의 GZ 는 식 (2)에서와 같이 ϕ 에 비례하거나 대각도 영역인 경우에도 GZ 는 ϕ 에 따라 큰 영향을 받는다는 차이가 있다. 식 (16)이 의미하는 특성은 정복원력 $GZ \cdot \phi$ 다이어그램인 Figure 2에서 곡선 B에 의해 설명될 수 있다.

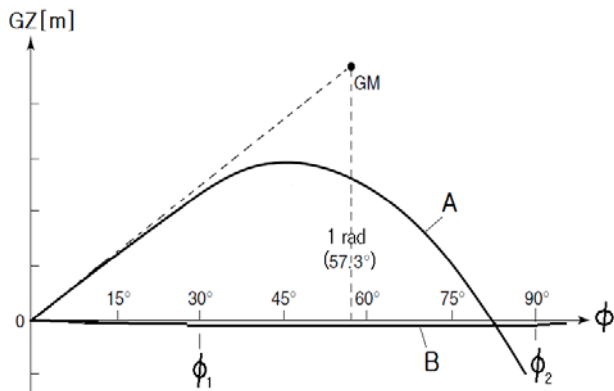


Figure 2: GZ- ϕ diagram to describe GZ at slow sinking condition

Figure 2에서 곡선 A는 복원성이 정상일 때의 것으로 GZ 는 경사각에 매우 종속적이어서 ϕ 에 따라 양의 방향으로 큰 변화를 보이는 반면 저속전복 상태의 곡선 B에서는 GZ 값은 상대적으로 가로축에 매우 접근하는 평탄한 모양이 되고 전복속도가 느릴수록 음의 방향으로 GZ 크기는 비례적으로 더욱 작아지게 된다. 따라서 곡선 B가 수평인 ϕ_1 부터 ϕ_2 사이에 해당하는 GZ 값을 GZ_C 라 하면 이 구간에서 운동식은 식 (2) 대신 식 (17)이 적용된다.

$$\ddot{\phi} + \frac{b}{J} \dot{\phi} + \frac{\Delta \cdot g \cdot GZ_C}{J} = 0 \quad (17)$$

위 식의 해를 구하면 $J = \Delta \times k^2$ 이므로

$$\phi = \phi_0 + \frac{k^2 \Delta}{b} (1 - e^{-\frac{b}{k^2 \Delta} t}) \phi_0' + K_C \cdot t - K_C \cdot \frac{k^2 \Delta}{b} (1 - e^{-\frac{b}{k^2 \Delta} t}) \quad (18)$$

이 되고 여기에서 ϕ_0 와 ϕ_0' 는 초기 경사각과 각속도이며 t 의 계수인 K_C 는

$$K_C = \frac{\Delta \cdot g \cdot GZ_C}{b} \quad (19)$$

를 나타낸다. 또한, 식 (8)과 식 (11)로부터 K_C 는 앞에서의 Ω_C 에 해당한다는 것을 알 수 있다.

3.2 전복속도와 GZ 값의 관계

선체 상태가 정상적이면 GZ 가 양으로 작용하므로 이때의 자유 횡운동은 식 (2)가 적용되지만 이에 대해 화물 선적 등의 잘못으로 복원성이 불량하여 저속 전복 상태가 되면 동일 선박이라도 선체 횡운동은 식 (17)을 따르게 된다. 이로부터 식 (2)에서의 J 와 식 (17)에서의 J 값은 서로 같아지고 마찬가지로 양쪽 식에서의 감쇠계수 b 또한 동일한 값으로 작용하므로 식 (2)를 근거로 도출한 식 (14)의 횡감쇠계수 b 는 식 (17)의 계수 b 로도 그대로 적용하는 것이 가능해진다. 따라서 식 (14)의 감쇠계수를 식 (16)에 대입하면 선체의 전복속도와 GZ 관계는 다음 식으로 얻어진다.

$$GZ_C = \frac{0.64 \times C_B \times B \times \sqrt{GM} \times \ln \lambda}{\sqrt{4\pi^2 + (\ln \lambda)^2}} \times \Omega_C \quad (20)$$

복원성이 양호할 때의 어느 선박이 GM 및 횡요 진폭감쇠비가 λ 로 확인된 적이 있다면 이후 해당 선박이 화물 적재 등의 이상으로 인해 외관 상 선체가 Ω_C 의 속도로 저속 전복되는 상황이 발생하는 경우 선체에 작용하는 음 방향의 GZ 크기는 식 (20)을 통해 구하는 것이 가능해진다. 즉, 저속전복 사고 시 해당 선박이 정상 복원성인 때 나타내었던 GM과 λ 과 같은 과거의 자료가 있다면 식 (20)에 의해서 전복속도와 GZ 간의 비례계수가 계산될 수 있다는 것을 보여준다.

4. 모의분석과 결과

4.1 적용 선박의 제원

제시된 수직식 관계를 시운전 자료가 **Table 1**과 같은 선박에 적용하여 결과를 확인해 보기로 한다.

Table 1: Basic particulars of the model ship

Displacement	9,490.8[m ³]
Length	128.0[m]
Breadth	22.4[m]
KG	9.23[m]
GM	1.2[m]
Draft	9.5[m]

적용선박의 L, B, d가 **Table 1**에서 128m, 22.4m, 9.5m이므로 이를 식 (9)에 대입하면 C_B 는 0.4보다 조금 작은 0.372로 계산된다. 한편, 진폭감쇠비 λ 의 설정으로 식 (14)에 의해 횡감쇠계수가 정해지므로 이때의 횡감쇠계수 결과를 식 (2)에 대입하면 횡경사각 ϕ 의 시간 응답은 **Figure 3**과 같아진다. 여기서 곡선 A, B는 각각 $\lambda = 1/2$ 과 $\lambda = 1/4$ 일 때의 것으로 진폭 감소가 매주기마다 각각 1/2 및 1/4로 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 감쇠가 크게 작용하는 $\lambda = 1/4$ 인 때의 과형 주기는 조금 더 커지는 것으로 나타난다. **Figure 3**의 결과는 주어진 어느 선박에서 진폭감쇠비의 설정을 토대로 제시된 수식들에 의해 해당 선박의 횡운동 구현에 필요한 계수들이 해석적으로 정해질 수 있음을 보여준다.

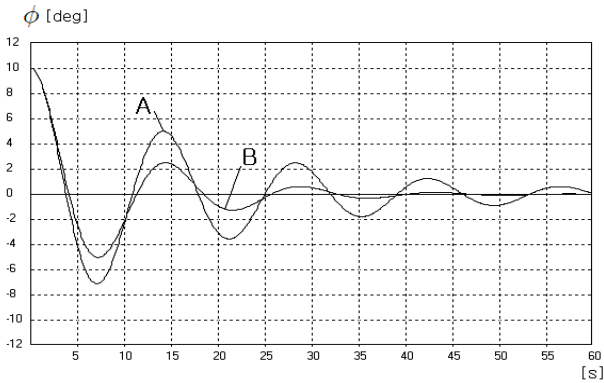


Figure 3: Comparison of damped oscillation curves at λ values of 0.5 and 0.25

4.2 전복속도와 GZ의 관계

Figure 4는 식 (20)에 의한 전복속도 Ω_C 와 이에 해당하는 GZ의 관계를 나타낸 것으로 곡선 A, B, C는 각각 진폭감쇠비 λ 가 0.5, 0.25, 0.1일 때의 변화이다.

가로축의 Ω_C 는 rad/s 대신 deg/min의 단위이고 0에서 10deg/min 까지의 범위로 나타내었다. 여기서 Ω_C 가 0일 때 GZ는 0이므로 선체는 중립평형 상태가 되어 임의 경사각에서 선체는 정지된다. 한편, 횡감쇠가 작은 곡선 A의 경우

는 10deg/min의 비교적 빠른 전복속도에 있을 때에도 음방향의 GZ 크기는 2mm를 넘지 않음을 보여준다. 이로부터 **Figure 4**의 곡선에 의해 전복 사고 시 경사가 진행되는 속도가 관찰되는 경우 전복되고 있는 선체의 GZ 크기를 구하는 것이 가능해진다는 것을 알 수 있다.

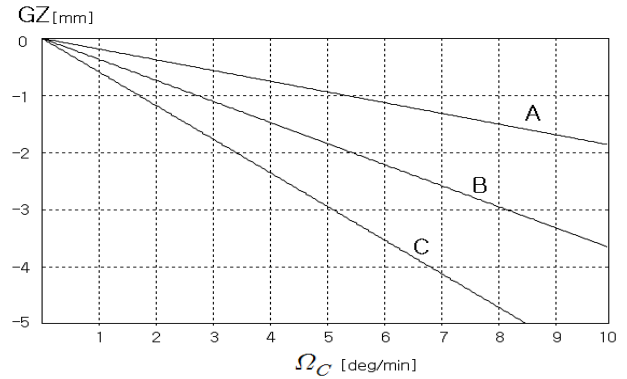


Figure 4: Variation of GZ according to observed capsizing speed Ω_C at different λ values

4.3 전복속도와 진폭감쇠비의 관계

Figure 5는 식 (20)으로부터 진폭감쇠비 λ 가 전복속도 Ω_C 에 미치는 영향을 나타내기 위한 것이다. 곡선 A, B, C는 각각 GZ가 -0.5mm, -1.0mm, -2.0mm의 일정값으로 작용할 때의 저속전복 상황을 보여준다.

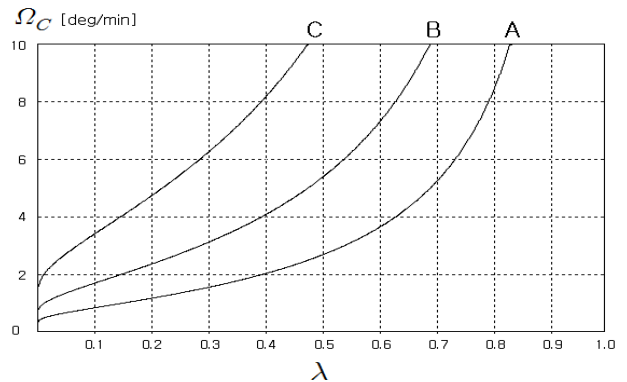


Figure 5: Variation of leaning speed according to decay ratio λ at different GZ values

GZ가 0.5mm로 크기가 작은 때인 곡선 A의 경우는 λ 의 전체 범위에서 λ 변화에 대한 경사속도 Ω_C 의 변화가 상대적으로 더 작아진다는 것을 나타내고 있으며 반대로 GZ가 가장 큰 곡선 C일 때 Ω_C 는 가장 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

복원력을 잃고 천천히 전복되는 선체에서의 일반적 특성과 함께 전복 상황에서의 선체 경사속도와 GZ의 관계를 살

펴보았다. 여기서 저속전복 시는 선체에 미치는 횡 모멘트 및 횡운동 각가속도가 매우 미소하게 작용한다는 점에서 횡운동 미분방정식에 작용하는 전복 모멘트 크기는 경사각에 무관한 일정 크기로 간주할 수 있다는 것이 제시되었으며 이를 통해 저속전복의 선체 운동의 해를 나타내었다. 또한, 정상 복원성 상태의 선체일 때 횡운동 진폭감쇠비를 적정하게 설정하는 경우 해당 선체의 횡감쇠계수를 계산할 수 있었으며 이와 함께 전복 시의 선체감쇠계수는 선체가 안정성이 양호할 때와 다르지 않다는 전제에서 저속전복 시의 GZ 크기를 선박의 기본제원만을 이용하여 도출하는 것이 가능하였다.

이러한 결과를 모델선박의 체원에 적용한 결과 제시된 함수들의 적정성과 함께 저속 전복 시 선체의 GZ는 전복속도에 비례적 관계가 된다는 것을 확인할 수 있었다. 차후의 연구로는 여기에서 제시된 저속전복 선박의 일반적 특성에 대해 모형선 및 실선에서의 정량적 실험이 과제로 남아있다고 하겠다.

References

- [1] M. Asghari, H. Zeraatgar, and F. Bakhtiari-Nejad, "An analytical and experimental study on dynamic stability of a vessel," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 33-44, 2007.
- [2] S. Surendran and J. V. R. Reddy, "Numerical simulation of ship stability for dynamic environment," *Ocean Engineering*, vol. 30, no. 10, pp. 1315-1317, 2003.
- [3] A. W. Vredeveltdt and J. M. Journee, "Roll motions of ships due to sudden water ingress, calculations and experiments," *International Conference on Ro-Ro Safety and Vulnerability the Way Ahead*, RINA, vol. 1, pp. 13-30, 1991.
- [4] S. Krüger and F. Kluwe, "A simplified method for the estimation of the natural roll frequency of ships in heavy weather," *HANSA International Maritime Journal*, Bd 145, 2008. [Online]. Available: http://www.ssi.tu-harburg.de/doc/webseiten_dokumente/ssi/veroeffentlichungen/Hansa_TUHH.pdf
- [5] Scott M. Vanden Berg, *Non-Linear Rolling of Ships in Large Sea Waves*, Ph.D. Dissertation, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2007.
- [6] A. Papanikolaou, E. Boulougouris, and D. Spanos, "On the roll radius of gyration of ro-ro passenger ships," *Proceedings of the 7th International Ocean and Polar Engineering Conference*, vol. 3, pp. 499-506, 1997.
- [7] IMO Resolution A.749, "Code on Intact for all Type of Ships Covered by IMO instruments," 1993.