

선박설계단계에서 손상안전성 평가에 관한 연구

이동곤^{†*}, 최진*, 박범진*, 강희진*, 임석남^{**}

해양(연) 해양시스템안전연구소*, 한국방사성폐기물관리공단^{**}

A Study on the Damage Safety Assessment in Ship Design Stage

Dongkon Lee^{†*}, Jin Choi*, Beom-Jin Park*, Hee-Jin Kang* and Seok-Nam Lim^{**}

Maritime and Ocean Engineering Research Institute/KORDI*
Korea Radioactive Waste Management Corporation^{**}

Abstract

Recently ship safety regulations are being reinforced to improve maritime safety and to prevent maritime pollution by International Maritime Organization. It means that the regulation is becoming more proactive rather than reactive. In the mean time, design philosophy is also moving from rule based design to performance and simulation based design. In this paper, a study on practical application of the damage safety assessment system is carried out. The damage stability and the survivability of a cargo ship that was designed based on current regulation is investigated using performance based design tools in order to improve the safety of the design and verify the performance of the developed damage safety assessment system. To do this, damage scenarios is established and the characteristics and geometry the cargo ship is modeled. A new design alternative is proposed with small change in the internal arrangement based on safety evaluation results of the current design.

※Keywords: Damage(손상), Survivability(생존성), Safety assessment(안전성평가), Ship design (선박설계)

1. 서론

해양안전에 관계된 국제규정은 지금까지 중대한 해양사고가 발생하고 난 이후에, 재발 방지를 위한 규정의 강화 형태로 진보되어 왔다. 이러한 방

식은 새로운 규정을 제정하는데 오랜 시간이 소요되고, 규정의 반복적인 개정이나 항목의 신설로 인하여 규정이 매우 복잡하게 되며, 현존하는 규정으로 새로운 개념의 선박에 적용하기 어려운 문제가 발생한다. 또한 현재의 규정은 선박의 크기와 운반하는 화물의 종류(선종)에 따라 화물탱크의 배치, 용적제한 및 일정수준 이상의 손상 후 복원능을 요구하고 있다. 따라서 개개 선박의

접수일: 2009년 2월 6일, 승인일: 2009년 5월 20일

† 교신저자: dkleee@moeri.re.kr, 042-866-3410

특성이나 운항 항로에 대한 특성은 고려되지 않고 있어, 실제 운항 상황을 고려한 안전성 확보에는 미흡한 점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 GBS(Goal Based Standards)를 통하여 안전에 관한 규정의 전반적인 검토와 함께, 기술적으로는 성능기반설계에 기반한 대안설계(Alternative Design)를 인정하고 있다.

본 논문에서는 현재 규정에 의하여 설계된 선박의 손상 안전성을 성능기반 손상 안전성 평가 시스템을 활용하여 평가하고, 그 결과를 바탕으로 안전성을 향상시킬 수 있는 설계 대안을 생성하여 안전성을 검토하였다. 손상 안전성을 평가하기 위하여 대상 선박을 모델링하였고, 손상 시나리오에 의한 손상 케이스를 도출하였으며, 운항 선박의 항로 특성을 성능기반 시뮬레이션 과정에 적용하였다.

2. 성능기반 손상안전성 평가 기술

해양사고로 인한 손상선박의 안전성을 평가하여 2차 사고를 방지하기 위한 손상 선박의 생존성 평가 시스템에 관한 연구가 수행되었다(Lee 2003). 본 손상선박의 2차 사고를 방지하기 위한 생존성 평가 시스템은 통상 사고 발생 후 2시간 내에, 선박을 모델링하고 사고해역의 해상조건을 고려하여 선박의 손상복원성과 구조안전성을 평가한 후, 그 결과를 바탕으로 적절한 조치를 취할 수 있는 대응방안을 도출하여야 한다. 따라서 신속한 의사결정에 중점을 두므로, 상대적으로 공학적 해석결과와 정확도는 떨어지게 된다.

국제해사기구는 최근 해양사고를 원천적으로 예방하기 위한 선박 자체의 안전은 물론 운항 상의 안전과 관련된 규정을 강화하고 있다. IMO는 선박의 안전성을 획기적으로 향상시키기 위한 전략적인 과제로 “목표기반 선박안전성 기준(Goal Based Standard, GBS)”을 개발하고 있으며, EU는 기존의 설계방법론인 규칙(Rule)에 기반을 둔 수동적 안전의 개념에서 탈피하여, 시뮬레이션 및 성능기반 설계를 위한 핵심기술을 개발하고 있다.

국내에서도 이러한 움직임에 대응하여 설계단계에서 선박의 운항항로를 고려한 해상상태와 손상 시나리오를 바탕으로 시뮬레이션에 의한 손상 안전성을 평가할 수 있는 시스템을 개발하였다(Lee et. al 2008). 본 시스템은 실제 해상상태에서 손상선박의 거동 예측뿐만 아니라 파랑 중에서의 선박의 구조적인 결함여부를 나타내는 구조안전성 평가 등을 수행할 수 있는 시뮬레이션 기반의 설계지원시스템이다. 개발시스템은 선박에 대한 선형, 구획, 손상부위 및 구조부재 형상을 신속하게 모델링할 수 있는 형상모델링 기능, 손상선박의 유체정역학적 특성을 계산하는 기본계산 기능, 파랑 중 손상선박의 거동을 예측하는 기능(Lee et al 2006) 및 파랑에 의한 선체구조 부재들에 대한 안전성 평가 기능으로 구성되어 있다(Lee and Leel 2008). 본 연구에서는 이 개발된 손상안전성 평가 시스템을 활용하여 대상 선박의 손상안전성을 평가하였다.

3. 대상 선박

일반화물선의 경우에는 해양사고에 따른 다양한 분석결과가 현재 적용되는 각종 안전규정에 반영되어 있으며, 현재 통용되는 설계안은 안전과 경제성이 적절한 타협점을 찾아 최적화되어 있다. 그러나 향후 안전에 관한 규정이 강화되고 설계단계에서 적용할 수 있는 보다 진보된 기술이 개발되면, 현재 통용되는 설계안의 형태도 변화할 것으로 예상된다.

본 연구에서 적용한 대상선박은 중저준위방사능 폐기물을 운반하는 선박으로 위험화물을 운반하는 IMO의 IMDG Code(IMO 2006)를 적용받는 선박이다. 화물의 종류에 따라 선박의 내부배치와 손상복원성은 관련 규정을 참조 적용하게 되며, IBC Code(IMO 2007)에 따라 화물창의 보호 규정과 손상복원성 해석에 필요한 손상가정을 적용받는다.

본 선박은 규정에 따라 폭 방향으로 최소 B/5 값을 갖는 선측 탱크에 의하여 화물창이 보호 받도록 설계되어 선측 탱크의 용량이 매우 큰 특성을 갖는다. 이는 충돌사고시에 화물창 보호 측면

에서는 우수하나, 탱크 용량이 크므로 많은 해수가 침입하게 되어 손상복원성 관점에서는 불리하다. 본 선박의 주요 설계 값은 LBP 71.0m, 선폭 15.8m, 깊이 7.3m, 만재흘수 4.0m, 선측 발라스트 탱크 폭 3.16m, 이중저 높이 1.52m이다.

4. 손상 시나리오

손상 시나리오에 의한 손상 범위를 가정하는 방법은 충돌 시뮬레이션에 의한 방법, 사고 데이터 분석에 의한 방법, 법규에서 요구하는 손상 범위를 사용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 타 선박에 의하여 충돌 당하는 경우에 대하여 검토하였다.

4.1 충돌 시뮬레이션에 의한 손상범위

컴퓨터 기술의 발달과 공학적 해석 기술의 발달로 유한요소해석(FEM)을 통한 충돌 해석을 시도하고 있으며, 비교적 의미 있는 결과를 제공하고 있다. 그러나 유한요소해석을 하기 위해서는 충돌 선박의 선수부와 충돌 받는 선박의 중앙부 구조부재를 유한요소해석격자(FEM Mesh)로 모델링하여 전문 해석 도구를 사용하여 해석하여야 하므로, 많은 시간과 경비가 소요된다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 본 논문에서는 충돌 받는 선박의 중앙부 구조부재만을 간단하게 모델링하여 해석하는 방법을 사용하였다(KIMM 1998).

본 연구에서는 크기와 선종이 다른 7척의 선박이 각각 2개의 속력과 2개의 흘수로 충돌각 90°로 충돌하는 경우에 대해 충돌해석을 수행하였다. Fig. 1은 24,000급 소형 유조선이 속력 5Kts로 충돌할 경우의 손상 범위를 나타낸 것이다. 충돌해석 결과 충돌 선박의 크기와 속력에 따라 손상부위의 차이가 크게 발생하며, 대형선박이 충돌할 경우에는 선체가 절단되는 현상이 발생하였다.

간단화된 방법은 충돌과정에서 충돌선의 선수구조 부재가 손상을 받지 않으며, 충돌 받는 선박은 고정 물체로 가정하여 뒤로 밀려나지 않는다는 가정으로 개발되었기 때문에 실제 손상에 비하여 손상 범위가 크게 나타나게 되어 현실적이지 못한 단점이 있다.

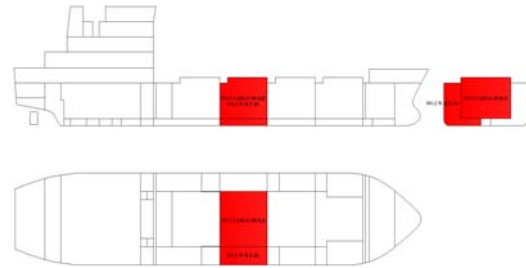


Fig. 1 An example of damage compartments by collision of small crude oil vessel

4.2 사고 데이터 분석에 의한 손상범위

충돌사고로 인한 손상 규모는 선박의 종방향 길이와 횡방향 폭이 배의 수선간장과 전폭에 비해 얼마나 큰지 그 비율로 표현된다. Fig. 2는 충돌당한 선박의 폭 방향 손상 깊이를 선박의 폭에 대하여 무차원화한 손상 깊이의 확률을 표시하고 있고, Fig. 3은 길이 방향의 손상 규모를 선박의 길이에 대하여 무차원화한 확률을 보여주고 있다 (Skjong and Vanem 2004). Fig. 2와 3에서 알 수 있듯이 충돌 시 횡방향으로 손상 폭이 전폭의 5%보다 클 확률이 78.3%이며 20% 이하일 확률은 50% 이상이다. 종방향으로는 손상길이가 수선간장의 10%보다 작을 확률이 87.6%이다.

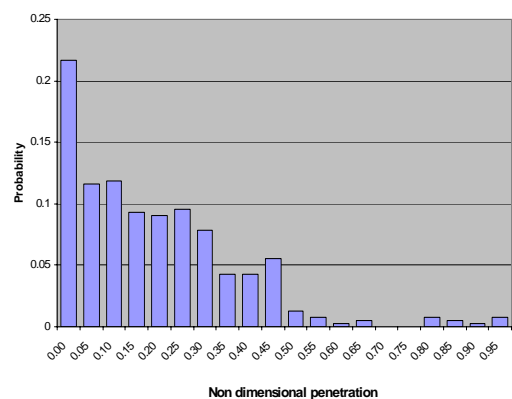


Fig. 2 Probability distribution of non-dimensional collision penetration(Bulk Carrier)

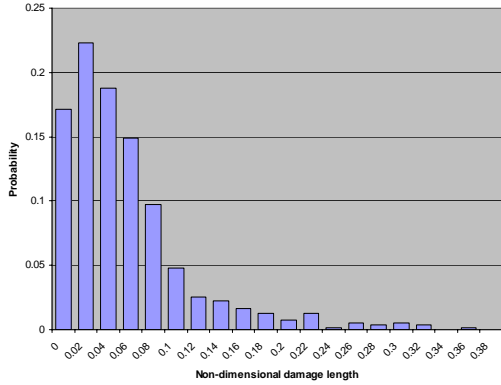


Fig. 3 Probability distribution of non-dimensional collision damage length(Bulk Carrier)

4.3 범규에 의한 손상범위

IBC Code에서 정의하고 있는 손상범위는 선측 손상의 경우에는, 폭방향으로 선폭의 20% 혹은 11.5m 중의 작은 값, 길이방향으로는 $1/3L^{2/3}$ 혹은 14.5m보다 작은 값, 높이 방향으로는 상방향 전체를 손상되었다고 가정하여 손상복원성을 평가한다. IBC Code는 규정에서 요구하는 손상범위 보다 외판에서 먼 거리에 화물창이 배치되면, 즉 충분한 안전거리를 두고 배치하면 화물창은 손상 받지 않는다는 가정을 전제로 하고 있다.

4.4 안전성 평가를 위한 손상범위 및 케이스 선정

충돌 시뮬레이션에 의한 손상 범위 선정은 충돌 대상 선박의 크기와 속력에 따라 손상 규모가 달라지고, 간이해석에 의한 손상은 실제보다 손상이 크게 발생하는 문제가 있다. 따라서 사고 데이터 분석 자료를 바탕으로 손상 범위를 선정하는 것이 보다 공학적인 측면에서 타당성이 있는 반면에, 통계해석 값이므로 특정한 선박에는 적합하지 않을 수 있다. IBC Code에서 요구하는 손상범위는 화물창이 손상을 받지 않는다는 가정으로 손상 규모가 실제사고를 반영하지 못하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 사고 사례분석 결과와 IBC Code의 손상범위를 조합하여 손상 범위를 결정하였다. 길이 방향으로는 최대 50% 폭까지 손

상을 가정하였고, 길이 방향으로는 선박 길이의 최대 20% 이상인 15m까지 손상을 고려하였다.

손상 케이스는 Table 1과 같이 4개를 도출하였다. Case 1은 기관실 손상으로 중간에 중격벽이 없어 침수 용량이 크고 대칭 침수가 일어나는 경우로서 중동요와 침하가 주요 평가 대상이다.

Table 1 Damage cases

Damaged Compartments	
Case 1 : 기관실 침수(좌우 대칭 침수)	
Case 2 : 측면 탱크 침수(규정에서 요구하는 길이 방향 최대 손상 길이 이상의 손상 값 사용)	
Case 3 : 측면 탱크 및 화물창 침수(규정에서 요구하지 않는 화물창 침수를 고려)	
Case 4 : 선수 2개 구획 침수(충돌에 의한 최대 손상 범위)	

Case 2는 규정에서 요구하는 최대 손상 길이인 8.24m보다 큰 길이 방향 15m의 손상이 나는 경우로서 2 구역의 측면 탱크가 침수된다. Case 3은 Case 2의 손상에 1개의 화물창이 동시에 침수되는 경우이다. 규정에서 요구하는 손상 복원성 계산에는 화물창은 손상 범위에 포함되지 않으나, 보다 심각한 손상을 고려하기 위하여 화물창도 손상되는 것으로 가정하였다. Case 2와 3은 종동요와 횡동요가 주요 평가 대상이다. Case 4는 충돌 사고로 인하여 선수가 손상되는 경우로, 화물창이 손상되지 않는 최대의 손상 범위로서 종동요가 안전성에 지배적인 요소가 된다.

5. 손상 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 대상 선박은 안전운항을 위하여 야간에는 운항하지 않으며, 기상 주의보(유의파고 3m 이상)가 발령되어도 운항하지 않는다. 따라서 실제 운항 상황을 고려하면 3m의 유의파고를 고려하여 시뮬레이션하면 되나, 실제 해상은 순간적으로 발생하는 높은 파도가 존재하고, 본 연구의 목적이 실제상황에서 안전성을 평가하는 것이므로, 대상 파고를 2m, 3m, 4m로 하였다. 또한 불규칙파보다 운동응답이 크게 나오는 규칙파를 사용하여 보다 가혹한 상황으로 시뮬레이션하였다.

파도의 각도는 선수측면파(135°), 횡파(90°), 선미측면파(45°)의 3가지 종류를 사용하였다. 대상 선박이 운항하는 한반도 주위의 파 주기는 연안에서는 주로 8초, 10초 정도이며, 제주도 밖의 해역에서는 12초 정도이다(KORDI 2003). 따라서 파 주기 8초, 10초, 12초에 대응하는 1.4, 2.2 및 3.2의 λ/L 의 값을 사용하였다. 이들 각각의 조합에 대한 108개의 시뮬레이션 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

6. 시뮬레이션 결과 분석

6.1 안전성 평가 기준

6자유도 운동에 대하여 시뮬레이션하였으나, 정적인 요소인 횡경사, 종경사 및 침하는 동적인 요소에 포함되어 해석되므로, 손상 안전성 평가는

횡동요, 종동요, 수직동요의 3가지 요소를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 안전성 평가 기준으로는 허용 최대 횡동요 각은 23°, 허용 최대 종동요 각은 9°, 허용 최대 침하 값은 2.3m를 사용하였다. 허용 최대 횡동요 각은 선박이 침수 후 갑판의 측면 끝 부분이 물에 잠기기 시작하는 각도이며, 허용 최대 종동요 각은 횡동요 각과 같은 개념으로 길이 방향의 침수 시작 각도이다. 허용 최대 침하 값은 견현 값을 사용하였다. 안전성 평가 기준은 평가의 목적에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구의 목적이 선박이 사고 후에 안전한 운항이 가능한 상태를 판단하는 것이 아니고 전복이나 침몰 가능성의 여부를 판단하는 생존 개념이므로 평가 기준은 적절하다 판단된다.

6.2 결과 분석

파고 2m인 경우와 λ/L 이 1.4와 3.2인 모든 조합의 경우는 손상 Case 4개 전체가 안전성 평가 기준을 만족하였다. 규정에서 요구하는 손상 범위의 값을 사용한 Case 1과 Case 2의 경우에는 본 선박의 운항 최대 파고인 파고 3m에서뿐만 아니라 4m에서도 안전성을 모두 만족하나, 파고 4m, λ/L 2.2, 횡파의 경우에는 횡동요 각이 허용범위를 약간 넘어서고 있다.

규정에서 요구하는 손상범위 이상으로 손상을 가정한 Case 3과 Case 4의 경우에는 파고 3m와 4m, λ/L 2.2, 횡파의 조건에서는 횡동요 각이 허용범위를 벗어나 안전성이 확보되지 않았다.

Fig. 4에서 Fig. 9는 각 손상 Case에 대하여 관심 대상인 파고 3m와 4m, λ/L 2.2, 횡파에 대하여 안전성 평가 요소의 값을 나타낸 것이다.

λ/L 2.2인 경우에 선박의 운동이 λ/L 의 다른 값에 비하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 선박의 길이와 파의 주기(길이)에 관계되는 것으로, 설계단계에서 손상 안전성을 고려할 때 선박의 고유 진동수와 선박이 운항할 항로 특성을 반영하여 함을 의미한다.

6.3 대안 설계

화물창까지 손상 범위를 확대한 Case 3의 손상 안전성 향상을 위하여 현측 탱크에 수평방향의 중

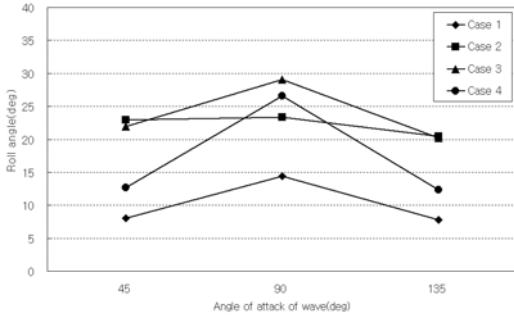


Fig. 4 Maximum roll angle: h 3m, λ/L 2.2

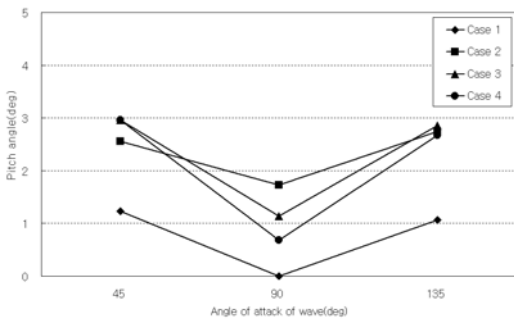


Fig. 5 Maximum pitch angle: h 3m, λ/L 2.2

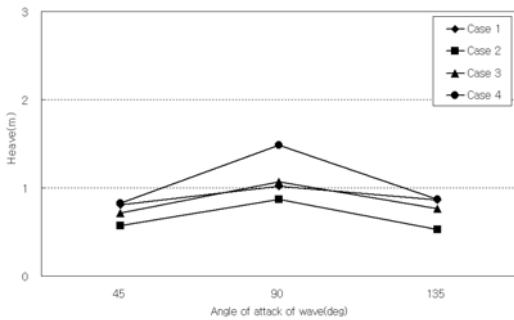


Fig. 6 Maximum Heave: h 3m, λ/L 2.2

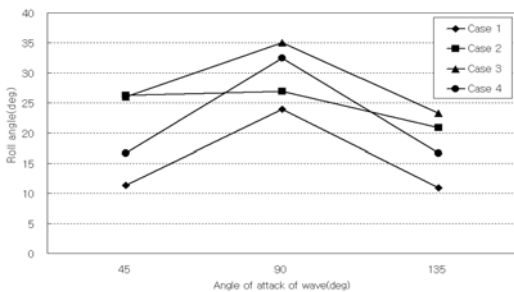


Fig. 7 Maximum roll angle: h 4m, λ/L 2.2

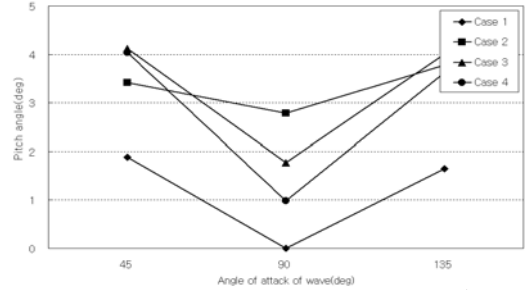


Fig. 8 Maximum pitch angle: h 4m, λ/L 2.2

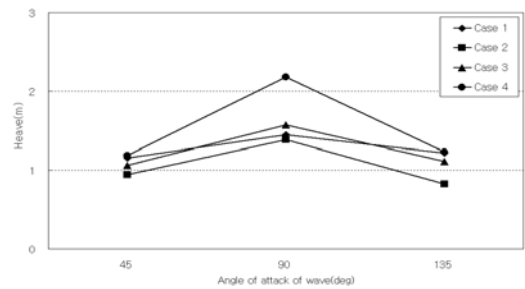


Fig. 9 Maximum heave: h 4m, λ/L 2.2

격벽을 추가 설치하여 시뮬레이션을 수행하였다. 격벽은 높이 2m 위치에 현측 탱크 길이 방향 전체에 대하여 양현에 설치하였다. 이는 측면 손상이 2m 위쪽에 발생하면 해수가 침수되는 공간을 줄여 경사가 줄어들게 되고, 바닥과 밑지부근에 손상을 받았을 경우에도 동일한 역할을 하게 된다. 또한 충돌당할 경우에 선체의 강성을 증가시켜 손상 범위를 줄이는 효과도 있다. 추가 격벽 설치에 의한 비용은 선박 건조비의 0.1% 이내로 계산되었고 선체 중량의 증가도 매우 작다.

Fig. 10에 Case 3에 대한 원래 설계안과 추가 격벽을 설치한 대안 설계안의 안전성 평가를 나타내었다. 파고 3m와 4m에서 횡동요 각이 약 10% 정도 감소하였으나, 횡파인 경우에는 평가 기준을 만족하지는 못하였다.

손상되어 해수가 침입한 상태에서는 선박의 질량변화로 인한 고유 주파수가 바뀌게 된다. 따라서 대안 설계를 위해서는 비손상 상태의 GM은 물론, 각 손상 상태에 대한 GM의 변화 추이를 고려하는 것이 필요하다. 추가 격벽을 설치할 경우에는 적절한 위치가 매우 중요하며, 손상 Case에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여야 한다.

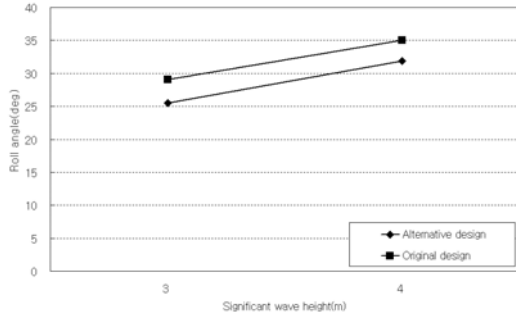


Fig. 10 Roll angle of original and alternative design : Beam sea, λ/L 2.2

7. 결론

본 논문에서는 선박의 안전성 규정에 따라 설계된 선박의 손상 안전성을 성능기반 시뮬레이션 방법을 사용하여 평가하였다. 설계된 선박은 규정에서 정하고 있는 손상 범위일 경우, 선박이 운항할 항로에서 실제 파도조건을 고려하면 안전성을 만족함을 확인하였다. 반면에 규정에서 요구하는 범위 이상으로 손상이 발생하면 안전성 평가 기준을 넘어 가는 경우가 있었으나 선박의 방향을 조절하여 파도의 각도를 바꾸면 안전성을 만족할 수 있으며, 또한 추가 구획을 설치하면 안전성을 보다 향상시키는 것이 가능하였다.

손상 안전성 규정을 만족하는 것은 설계자에 있어 기본적인 업무이며, 선박의 특성과 항로를 고려하여 설계단계에서 성능기반 안전성을 평가하는 것도 점차 중요해지고 있다. 본 연구는 관련 기술의 개발 및 활용측면에서 손상 안전성 평가 기술을 실제 적용한 것으로, 해양에서 사고에 대비한 안전설계 측면에서 손상 안전성 평가 시스템의 유용성을 확인하였다.

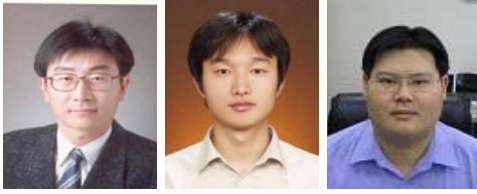
후 기

본 논문은 한국해양연구원의 기본연구사업인 “효과분석을 통한 안전설계 기반기술 개발”, 지식경제부의 “선박 손상 안전성 향상 설계기술 개발”, 한국방사성폐기물관리공단에서 지원한 “실제

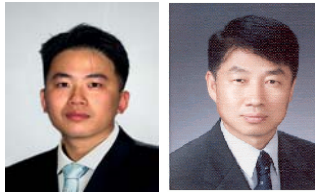
조건에서 해상운반사고 모의분석 예방방안 확립” 과제의 연구결과의 일부분임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- IMO, 2006, "IMDG Code".
- IMO, 2007, "IBC Code".
- KIMM, 1998, Development of A Simplified Structural Strength Assessment System on Collision and Grounding of Oil Tankers, Research Report.
- KORDI, 2003, "Observation and Survey of Sea Wave" Research Report, BSPM 164-00-1544-2
- Lee, D.K., 2003, "A Study on the Survivability Assessment System of Damaged Ships," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 2, pp. 34-40.
- Lee, D.K., Hong, S.Y. and Lee, G.J. 2006 "Theoretical and Experimental Studies on Dynamic Behavior of a Damaged Ship in Waves," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 1, pp. 1-14.
- Lee, S.S. and Lee, D.K., 2008, "Development of Integrated System for Safety Assessment of Damaged ship," Journal of the Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 227-234.
- Lee, S.S., Lee, D.K., Kim, K.S., Park, B.J., Kang, H.J. and Choi, J. 2008, "Development of Design Support System for Safety Assessment of Ship under Damage Conditions," Proceeding of 10th International Ship Stability Workshop, Daejeon, Korea, pp. 173 - 180.
- Rolf Skjong and Erik Vanem 2004, "Damage Stability Evaluation in Collision of Bulk Carriers," Proceedings of 3rd International Conference on Collision and Grounding of ships, Izu, Japan, pp. 97-103.



< 이 동 군 > < 최 진 > < 박 범 진 >



< 강 희 진 > < 임 석 남 >