

## 선박의 구조 안전성 평가



임 채 환(KIMM 구조시스템연구부)

- '76 - '80 서울대학교 조선공학과(학사)
- '80 - '82 서울대학교 조선공학과(석사)
- '88 - '93 미국 The University of Michigan(박사)
- '82 - '86 한국기계연구원 연구원
- '93 - '94 Post Doc. The University of Michigan
- '94 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

### 1. 서 언

선박은 해상에서 여객이나 화물을 수송하는 구조물로서 사용기간 동안 해상의 파랑하중을 계속 받고 있으며 대개 대형 구조물이다. 선박이나 해양구조물에 사고가 발생하면 대형 구조물이 그렇듯이 막대한 인적, 물적 손실과 더불어 환경오염이라는 큰 재앙을 발생하게 된다. 특히 두 구조물은 해상에서 일생을 보내기 때문에 한번 해양에서 사고가 발생하면 피해 지역을 최소화할 수 있는 방법이 적어 돌이킬 수 없는 오염이 확산 될 뿐만 아니라 피해기간도 길어 주위 생태계에 돌이킬 수 없는 타격을 가하게 된다.

선박과 해양구조물은 자국의 영해에서만 활동을 하는 것이 아니라 공해와 타국의 영해에서 활동을 하여야 하기 때문에 이에 대한 국제적인 규제를 가하고 있다<sup>[1]</sup>. 일본은 1997년 1월 일본 근해에서 러시아 선적 탱커인 나호트카호 침몰 사건 이후 선박의 입항과 출항을 제한하는 항만국 통제(Port State Control)의 강화책을 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에 건의하여 노후선박에 대한 검사 철저 등으로 자국의 영해를 항해하는 선박에 대한 감시를 강화하고 있다.

구조물이 안전하다는 것은 구조물 자체가 안전할 뿐만 아니라 구조물이 제 기능을 발휘하는데 쓰이는 모든 시스템이 안전하여야 한다. 따라서 이러한 구조물의 안전성이란 사용기간 동안 구조물의 성능이 사용자의 의도대로 발휘되고 사고를 미연에 방지하는 총체적인 의미를 지칭한다. 구조물의 안전성을 확보하기 위하여는 설

계, 건조, 보수유지, 정비 등의 각 과정마다 안전성에 대한 검토가 이루어져야 하며 이러한 것들을 정리한 것이 규정(rules, regulations, codes)들이다.

안전이라는 개념은 각자가 처해있는 위치에 따라 달라진다. 선박 설계에 종사하는 사람은 선박을 규정에 맞게 설계하는 것이 선박의 안전에 가장 관련 있다고 생각할 것이고 선박 건조에 종사하는 사람은 건조절차에 따라 건조하여 규정된 오차보다 크지 않게 건조하는 것이 선박의 안전에 관련 있다고 생각할 것이다. 또한 선주의 입장에서 보는 안전과, 운항하는 입장에서 보는 안전의 개념 또한 다를 것이다. IMO의 공식안전평가(Formal Safety Assessment, FSA)에서는 안전(safety)에 대한 정의를 다음과 같이 하고있다<sup>[2]</sup>. '안전이란 어느 시스템의 관리, 기술, 운용 등이 생명, 재산, 환경 등에 가하는 위험이 어느 정도 인가를 결정하는 인식된 개념이다' (Safety is a perceived concept which determines to what extent the management, engineering and operation of a system are free from danger to life, property and the environment). 따라서 이 개념에 의하면 관리, 기술, 운용 이 세 가지 질(quality)이 종합적으로 어느 정도 인가에 대한 인식이 포함되어 있다.

본 고에서는 선박의 안전성 중의 구조안전성(structural safety)에 대하여 살펴보고 앞으로의 안전성 발전방향에 대해서 살펴보기로 한다.

## 2. 선박의 구조 안전성 평가 방법

이 장에서는 선박의 구조안전성 평가 방법과 평가 동향에 대해서 살펴보기로 한다.

### 2.1 선박의 구조안전성 평가 절차

선박의 구조안전성 평가 절차는 제일 먼저 선체에 작용하는 하중을 추정하고 구조해석을 수

행한 후 목적에 맞는 평가 기준에 따라 평가를 수행한다.

#### 2.1.1 선체에 작용하는 하중

선체에 작용하는 하중은 다음과 같이 크게 4가지로 크게 나눌 수 있다<sup>[3]</sup>. 이 분류는 하중 자체의 성질과 선체의 응답의 성질에 따라 분류한 것이다.

##### 1) 정하중(static loads)

- 선체 자중과 화물
- 선체가 정지하였을 때나 움직일 때 작용하는 정수압
- 온도의 불균일 분포에 의한 열응력
- 선거(drydocking)에 의한 집중하중

##### 2) 저주파 하중(low frequency dynamic loads)

주기가 수초에서 수분에 달하며 선체와의 공진이 일어나지 않는 영역의 주파수이다.

- 파랑에 의한 변동압력
- 선체 운동에 의한 변동압력
- 자중과 화물에 의한 관성력

##### 3) 고주파 하중(high frequency dynamic loads)

선체에 진동을 일으킬 수 있을 정도의 고주파 하중

- 추진기에 의한 유체동력학적 하중
- 회전기에 의하여 선체에 전달되는 하중
- 부가물(appendage)의 유탄성 하중(hydroelastic loads)
- 파장이 짧은 파도에 의한 파랑 유기 하중(springing)

##### 4) 충격하중(impact loads)

- 선수부나 선수 플레어에 파도의 충격에 의한 슬래밍 하중(slamming)
- 선수 갑판에 작용하는 청수(green water)에 의한 충격하중

이들 하중들이 선체 각 부재에 응력을 발생시키며 설계시에는 이들의 조합응력을 사용하여야 한다. 조합응력을 사용할 경우 각 응력의 위상차를 고려하여야 한다. 운항중에 있는 선박의 선체 중앙단면에 작용하는 계측된 응력을 그림 1에 보였다. 그림에 나타난 바와 같이 응력의 크기는 아주 임의적(random)으로 변하고 있음을 알 수 있다.

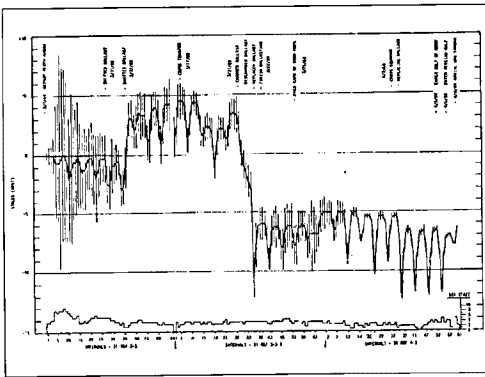


그림 1. 항해상태에서 계측된 선체에 작용하는 응력

### 2.1.2 하중 추정

파랑하중은 선체에 작용하는 하중 중에서 가장 큰 하중이며 하중의 분류 중 저주파 하중에 해당된다. 기존의 선형에 대한 파랑하중의 추정은 선급협회 규정으로 대개 수행하고 있고 새로운 선형에서는 유체동력학(hydrodynamics)에 의하여 하중을 직접 구하고 있다. 선체에 작용하는 압력과 선체운동의 추정은 단동선(mono hull)에 대해서는 스트립방법(strip method)이 널리 쓰여 왔으며 쌍동선(catamaran)이나 3차원 효과가 큰 선형에 대해서는 3차원 특이점 분포에 의한 패널법(panel method)이 널리 쓰이고 있다. 슬래밍과 같은 충격하중 추정에는 비선형 방법을 사용하고 있다. 파랑하중은 그림 1에 보인 바와 같이 매우 불규칙하기 때문에 추정이 어렵다. 정확한 추정을 위하여 해상관측 데이터를 통계적으로 처리하여 확률적으로 장기(long term) 하중을 추정하고 있다.(그림 2)

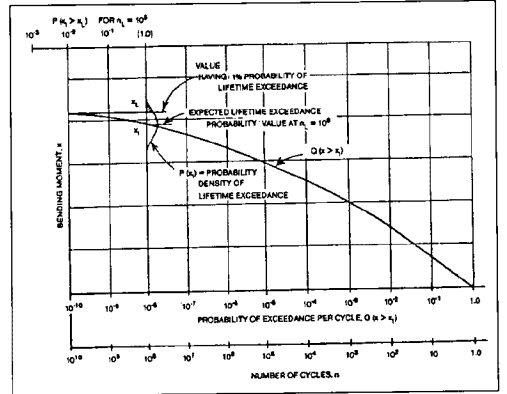


그림 2. 전형적인 파랑주기 굽힘모멘트의 장기 초과확률

### 2.1.3 구조해석

하중에 대한 선체응답을 얻기 위하여 유한요소해석을 주로 수행하고 있다. 정형화된 해석에서는 선체의 일부에 대하여 해석하면 전선해석을 한 것으로 같음을 한다. 그러나 필요한 경우에는 그림 3과 같이 선체 전체를 모델링하고 전선해석(global analysis)을 수행하여 선체 전체에 작용하는 응력 분포를 추정하고 이 결과를 바탕으로 국부해석(local analysis)을 수행한다.

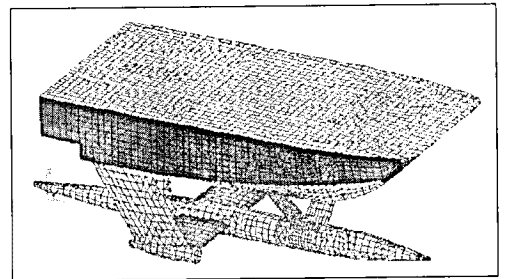


그림 3. 새로운 형태의 고속선의 전선해석 모델

### 2.1.4 응력 평가

선체 구조강도 평가를 위해서는 항복, 좌굴, 피로 등에 대한 평가가 수행되어야 한다. 항복강도는 구조해석 결과의 응력과 재료의 항복응력을 비교하여 결정한다. 여러 방향의 응력이 작용할 때는 폰미세스(von Mises) 등의 등가응력으로 치환하여 비교한다. 좌굴강도는 간단하게는

일축응력을 받는 상태에서 탄성좌굴 상태를 검사할 수 있다. 그러나 대개의 경우 선체 부재는 다축 하중이거나 압축과 전단응력을 조합한 응력상태에 있기 때문에 이러한 하중상태를 고려하여야 한다. 또한 좌굴시의 항복을 고려하여 탄소성 수정을 하여 좌굴강도 검사의 정도를 높인다. 좌굴강도 검토는 유한요소해석 프로그램에 포함되어있는 기능을 사용하거나 다른 프로그램과 연결하여 할 수 있다.

피로강도는 수명평가에 가장 큰 영향을 미치므로 다음 절에서 따로 살펴보기로 한다.

### 2.1.5 피로강도 평가

피로강도는 구조물의 전체적인 응력수준을 검토하기보다는 응력집중이 예상되는 곳의 국부응력을 검토하는 것에 초점이 맞춰진다. 피로강도에 영향을 미치는 인자는 평균응력, 잔류응력, 부식효과, 작업정도 등이다. 피로강도를 평가하기 위하여는 부재응력의 장기적인 분포를 알아야 한다. 장기응력 분포를 계산하는 방법에 따라 스펙트럴 피로해석법(spectral fatigue analysis), 결정론적 피로해석법(deterministic fatigue analysis), 간이 피로해석법(simplified fatigue analysis) 등으로 나누어진다. 이 중 간이피로해석 방법의 절차를 그림 4에 보였다. 피로해석의 자세한 절차와 방법은 참고문헌 [4]와 [5]를 참조하기 바란다.

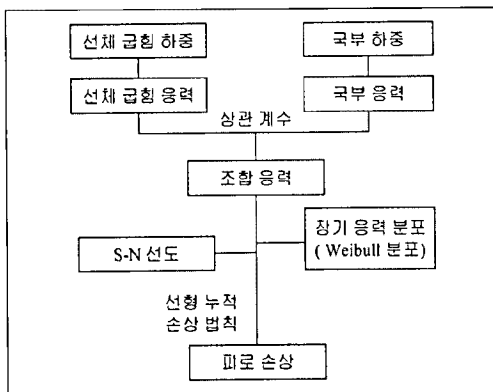


그림 4. 간이 피로해석 절차

### 2.2 선급협회의 직접구조해석 시스템

선체 구조의 안전성을 높이기 위하여 각국의 선급협회에서는 선체 구조설계를 위하여 유체력 계산, 전선 구조해석, 국부 구조해석, 통계처리 등을 한꺼번에 할 수 있는 시스템들을 개발하고 있다. 한국선급협회(KR)의 KRSTAS, 미국 선급협회(ABS)의 SafeHull, 노르웨이 선급협회(DnV)의 NAUTICUS, 영국 선급협회(LR)의 ShipRight, 일본선급협회(NK)의 PrimeShip 등이 그것들이다. 이들 시스템에서는 주어진 선형에 대하여 유체동력학을 이용하여 선체에 작용하는 유체력과 선체운동을 계산한다. 그리고 계산된 정적, 동적 하중을 이용하여 직접구조해석을 하는 방법을 선택하고 있다. 구조해석에서는 전선이나 국부구조를 모델링하고 유한요소법을 이용하여 응력계산을 수행한 후 항복, 좌굴, 피로에 대한 허용응력과 비교한다. 이와 같이 구조해석 시스템을 선급협회 규정에 의한 구조설계 과정과 연결하여 설계와 해석을 일관되게 할 수 있

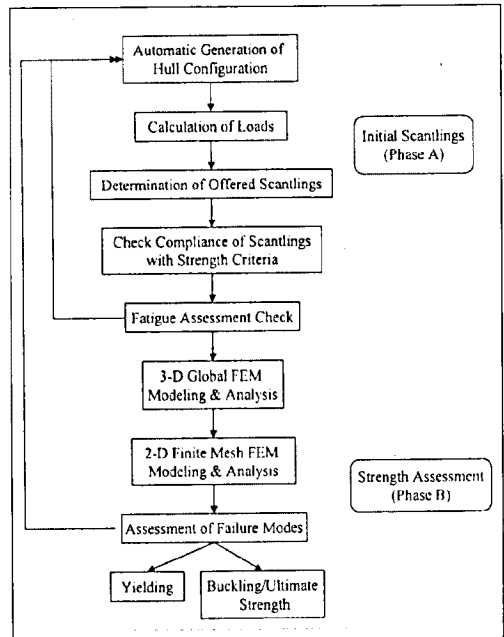


그림 5. 미국선급협회의 구조설계 및 해석 시스템 (SafeHull)

는 시스템을 구성하고 있는 것이다. 그림 5에 미국선급협회의 SafeHull에서 채용하고 있는 구조설계와 구조강도 평가 절차를 보였다.

### 2.3 구조성능 관리 시스템

여태까지 개발된 구조 안전성 평가 시스템은 구조성능 자체에만 초점을 맞춘 것들이 대부분이다. 그러나 보다 안전한 선박을 위해서는 구조성능을 선박의 다른 성능과 연계하여 평가하는 시스템이 바람직하다. 선박의 설계, 건조, 손상, 보수유지, 수리 등의 선체 구조를 일관적으로 관리할 수 있는 구조성능 관리 시스템(structural management system)을 그림 6에 보였다<sup>[6]</sup>. 이 시스템은 선체의 구조 안전을 모니터링하고 관리하기 위한 것으로서 설계, 건조, 운용, 유지(maintenance), 검사(survey and inspection) 등에서 얻어진 데이터들을 종합하고 분석, 평가하는 통합된 시스템이다. 이 시스템의 근간은 정보의 데이터 베이스와, 해석과 평가를 할 수 있는 도구의 모음이다. 그림에 보인 구조성능 관리 시스템은 다음과 같은 성능을 갖고 있다.

- 구조응답 모니터링
- 수리 관리(repair management)
- 신뢰성 해석과 위험 평가(risk assessment),
- 운항 평가(service assessment)에 대한 적합성
- 유한요소법에 의한 응력과 피로해석
- 검사 계획(inspection planning)을 위한 소프트웨어
- 긴급상황시 응답 시스템

구조성능 관리 시스템에서 사용되거나 제공되는 정보의 종류는 선박의 응력과 피로수명 이력, 실제 건조 상세와 조립 오차, 탱크의 사용과 화물의 기록, 부식과 균열 등의 검사 데이터, 구조의 개조와 수리와 관련된 데이터 등이 된다.

이 보다는 간단하지만 실제 선박에 성공적으로 적용된 구조성능 관리 운용방법(structural

management strategy)을 그림 7에 보였다<sup>[7]</sup>. 이 시스템은 구조설계와 구조성능에 대한 선주의 경험을 이용하여 15년 이상 된 VLCC의 구조성능의 내구성(structural durability) 평가방법으로 사용되고 있다. 이 운용방법은 구조개선(structural enhancement), 구조 검사(structural inspection), 해상에서의 구조 모니터링(structural monitoring at sea)의 3가지로 구성되어 있으며 구조 동역학을 포함한 기존의 선체 구조설계 기법과 피로와 파괴역학을 결합한 운용시스템이다.

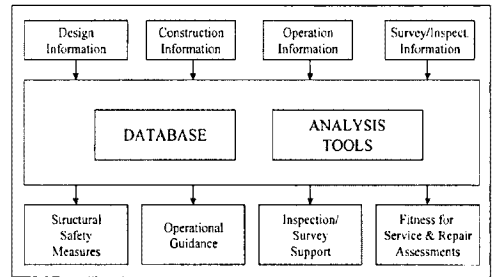


그림 6. 구조성능 관리 시스템

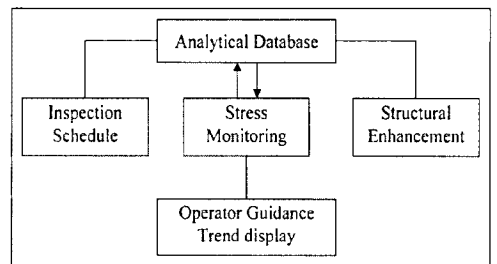


그림 7. 구조성능 관리 운용방법

### 3. 선박의 안전성 제고에 대한 전망

본 절에서는 구조 안전성 평가를 포함한 선박의 안전성 평가의 관점에서 본 새로운 평가방법을 소개하기로 한다.

#### 3.1 새로운 안전성 평가 기준의 필요성

선박의 구조안전성을 향상시키기 위하여는 구조설계 뿐만 아니라 건조, 보수유지 등에 대한

종합적인 고려도 필요하다. 설계단계에서 어느 정도의 안전을 고려할 것인가, 또는 운항단계에서는 어느 정도까지 안전을 고려할 것인가에 대한 판단은 사고의 확률과 피해의 규모, 설계/건설/보수유지의 균형, 비용 등에 대한 종합적인 분석이 끝난 후에 가능하다.

현재의 구조설계 기준은 과거의 설계 경험과 손상의 경험을 바탕으로 수립되어 왔다. 그러나 이러한 설계 기준은 경험이 부족한 형태의 선박에 이 기준을 적용하기에 부적절한 경우도 많았다. 또한 앞으로는 손상이 발생되어도 사고로 이어지지 않는 어떤 한계상태의 기준이 구조설계 기준으로 적용 될 것으로도 예상된다. 이러한 현재의 설계기준에 대한 문제점을 해결하기 위하여 여태까지의 경험에 덧붙여 신뢰성 공학을 선체 구조설계 및 선체 강도평가에 도입하기 시작하였다. 신뢰성 공학에서는 선체에 작용하는 하중과 이에 견디는 강도를 추정할 때, 이에 포함된 불확실성을 인지하고 구조물의 안전성을 통계적으로 처리하여 정량적으로 평가한다. 신뢰성 공학을 선체 구조설계에 도입하면 손상과 사고의 확률을 정량적으로 평가하는 것이 가능하고 경험이 부족한 선박에 대해서도 합리적인 설계가 가능하다. 그러나 신뢰성 공학을 구조설계에 응용하기 위해서는 하중, 강도, 공작의 정밀도 등에 대한 확률분포와, 평가에 필요한 파괴와 손상 메커니즘의 설정 등이 필요하다.

### 3.2 공식안전평가

사고가 발생한 후에야 계속 개정되어온 안전에 대한 규정들의 재평가와 사고의 요소를 미리 과학적으로 분석하여 그 위험도에 상응하는 규정을 만들어야 한다는 여론에 따라 공식안전평가(Formal Safety Assessment, FSA)라는 시스템이 도입되었다. FSA는 1993년 영국이 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 해상안전위원회(Maritime Safety

Committee, MSC)에 처음으로 제안하였다<sup>[2]</sup>. 그 이후 1997년에는 IMO에서 FSA에 대한 중간지침을 채택하였다<sup>[8]</sup>. FSA는 인명, 건강, 해상환경, 재산 등을 망라하여 해상안전 향상을 목표로 하고 위험성과 비용-혜택평가를 사용하는 조직적이고 체계적인 해상 안전평가 방법(maritime safety management system)이다<sup>[9]</sup>. FSA는 위험성 평가(risk assessment)에 근거한 평가 방법으로서 위험성 평가는 원자력 발전소, 화학플랜트 분야 등에서 사용되어 오던 방법이었다.

FSA는 다음과 같이 5단계로 이루어져 있다.

- 1) 위해요소의 파악 (Identification of Hazards)
- 2) 사고와 연관된 위험성 평가(Risk Assessment)
- 3) 위험성 제어방안 강구(Risk Control Option)
- 4) 위험성 제어방안에 대한 비용-혜택 평가 (Cost-Benefit Assessment)
- 5) 의사결정(Decision Making)

FSA 각 단계들의 연관성을 그림 8에 나타내었다. 이 단계들을 통하여 유효한 기준의 작성 또는 개정을 위한 정량적인 판단 자료를 제공하려는 것이다. 현재의 안전 기준은 대부분 중대사고가 발생한 후 그 대처 방안으로 규칙의 개정을 하였으나 FSA를 도입하면 예상되는 모든 사고 시나리오를 중요도에 따라 검토할 수 있기 때문에 합리적인 안전기준 작성이 용이해진다.

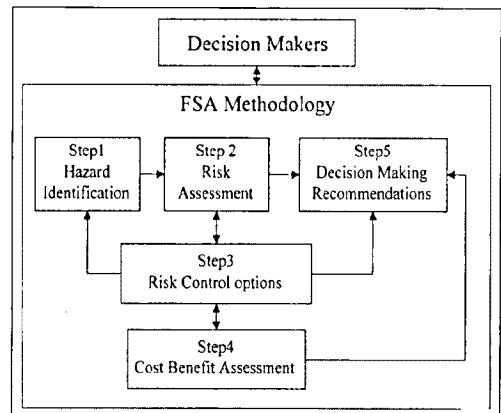


그림 8. FSA 방법론과 의사결정 과정

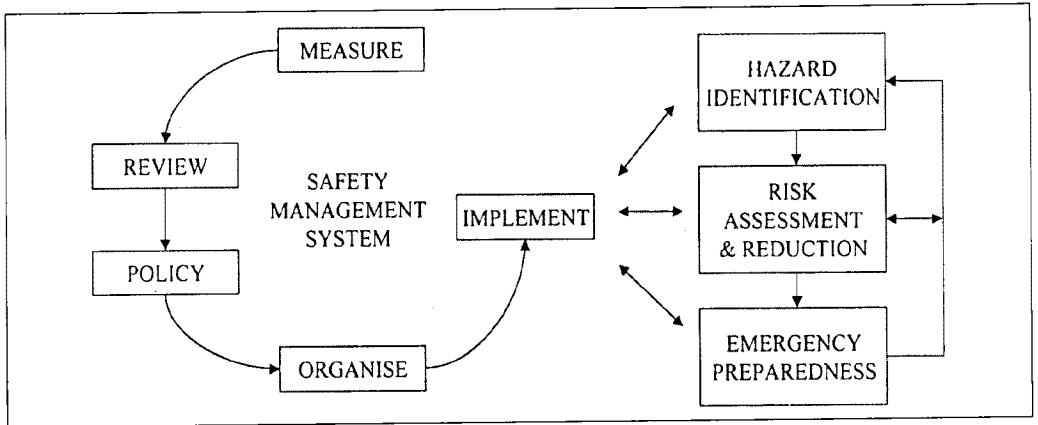


그림 9. 안전관리 시스템 모식도

FSA를 바탕으로 작성된 안전관리 시스템의 예를 그림 9에 보였다<sup>[10]</sup>. 이 구성에서는 위해요소의 파악, 위험성 평가와 감소, 비상 대책 등을 체계적으로 관리할 수 있는 안전관리 시스템을 두고 있다. 안전관리 시스템은 위해요소들에 대한 위험성의 수준을 관리하고 제어하는 기능으로서 이 시스템의 머리 역할을 한다.

#### 4. 결 언

본 고에서는 선박의 구조 안전성 평가에 대해 살펴보았다. 구조 안전성 평가의 정도를 향상시키기 위해서는 응력의 실선 계측, 각 부재의 피로강도 데이터 축적, 건조 오차와 잔류응력 계측 등 기존에 수행하던 연구를 종합하여 데이터 베이스화 하고, 이들을 통계처리 하여 의미 있는 정보로 변환시켜야 한다.

선박의 안전성을 확보한다는 것은 선박의 계획된 일생동안 제 기능을 발휘한다는 것으로서 구조 안전성만을 가지고는 선박의 일생동안 안전성을 확보할 수 없다. 그러나 선박의 안전성에 제일 중요한 것은 구조 안전성이므로 이에 대한 연구를 꾸준히 수행하여야 하고 이를 다른 안전 시스템과 접목시켜 선박의 안전성을 향상시켜야 한다.

FSA같은 종합적이고 체계적인 해상안전 관리 시스템이 도입되면 선박의 구조 안전성뿐만 아니라 선박 수명의 연장, 환경오염 방지, 운항의 안전성, 보수유지의 체계화, 위험시 대처 능력의 향상, 선원의 자질 향상 등 다방면으로 영향을 줄 것으로 예상된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 한국선급, 1994년 해상인명안전협약 (SOLAS), 1998 통합본, 1998.
- [2] IMO MSC 62/24/3, "Consideration of Current Safety Issues, Formal Safety Assessment," Proposed by the UK government to the 63rd session of IMO's Maritime Safety Committee, May 1993.
- [3] The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Principles of Naval Architecture, Vol. 1, Stability and Strength, 1988.
- [4] 김재동, "선체구조 피로평가기술의 최근 동향," 대한용접학회지, 제16권 제5호, pp.1-10, 10월, 1998.
- [5] 신찬호, "간이해석법에 의한 선체구조의 피로강도 평가," 대한용접학회지, 제16권 제5

- 호, pp.11-19, 10월, 1998.
- [6] Liu, D., and Tayamballi, A., "The Durability of Ships Considering Fatigue Cracking," *Journal of Ship and Ocean Technology*, Vol. 1, No. 1, pp.55-72, 1997.
- [7] Melitz, D.T., Robertson, E.J., and Davison, N.J., "Structural Performance Management of VLCCs - An Owner's Approach," *Marine Technology*, Vol 29, No. 4, pp. 250-262, Oct. 1992.
- [8] IMO MSC 68/WP.13, "Draft - Interim Guidelines for FSA Application to IMO Rule-making Process," MSC 67 working Group 3, June 1997.
- [9] 여인철, "공식안전평가(FSA)에 대하여," *대한조선학회지*, 제35권, 제2호, pp.54-58, 6월 1998.
- [10] Kuo, C., "the Impact of Safety Requirements on Shipbuilding," *Journal of Ship and Ocean Technology*, Vol. 1, No. 2, pp.31-40, 1997.