

선체구조 신뢰성 해석법에 대하여

양 영 순*

1. 신뢰성 공학의 중요성

최근 우주, 해양 및 원자력 개발은 새로운 환경 조건하에서도 안전하게 사용할 수 있을 뿐만 아니라 내구력이 강한 구조물을 요구하고 있는데, 이와같은 구조물의 설계에는 기존의 설계기준, 시방서를 그대로 적용할 수 없는 문제점이 있어 하중 및 구조강도의 통계 데이터를 이용하여 구조설계를 도모하는 직접계산법이 이용되고 있다. 선체구조분야에 있어서도, 선박이 대형화 됨에 따라 나타나는 구조강도 상의 많은 문제점을 해결하기 위해, first principle에 의한 직접 설계방식을 채택하려는 경향이 많이 경립되어 가고 있으나, 선체구조물의 복잡성 및 다양성에 의해 선급 규칙을 이용하는 간접적인 설계방법도 병행하여 선체 구조물의 안정성을 검토해 오고 있는 실정이다.

그런데, 선체구조물에 가해지는 파랑하중과 선체구조물의 최종강도의 값들은 설계자가 추정한 기대치를 갖는 것이 아니라, 그 추정치를 중심으로 분산되어 있는 특성을 보인다는 사실이 많은 실험과 경험에 의해 알려져 왔다. 따라서, 구조안전성의 측면에서 설계변수들이 갖고 있는 이러한 분산 특성(불확실양)을 보다 합리적으로 고려하는 것이 바람직하다. 과거에는 주로 경험에 입각한 안전계수(safety factor)를 사용하여 불확실성에 대한 고려를 하면서 이론상 아주 조그마한 파괴 위험성도 없다고 가정하지만, 실제 현상에서는 충분한 안전계수를 갖는다 할지라도 적지 않은 구조물의 파괴현상이 일어나고 있는 모순을 갖고 있다. 이에 반해, 불확실성을 이론적으로 다루는 신뢰성 해석 방법에서는 작지만 0이 아닌 파괴위험을 고려하여 구조물의 안전성을 평가한다는 것이 기존의 방법과 다른 점이다.

신뢰성 해석에서 파괴위험을 고려한다는 것이 기존의 설계방법과 비교하여 그만큼 안전계수를 줄이는 것이 아닌가 하는 우려를 할 수도 있지만 안전도가 떨어

지는 것이 아니라, 기존의 방법에서 고려하지 않는 파괴가능성을 정량적으로 추정하여 설계에 포함시킬 수 있다는 관점에서 보면 과거의 경성적인 안전계수를 사용하는 방법에 비해 상당히 합리적이라 할 수 있다.

종전에 건조 및 운항 경험이 없는 새로운 선박 및 해양구조물 등의 안전성 평가를 하는데 있어서도, 기존의 방법은 안전계수 선정에 있어서 과거의 경험과 전문가의 판단에 의존하는 관계로 상당한 한계를 갖고 있을 뿐만 아니라, 같은 안전 계수를 택하였다 할지라도 설계 인자들의 통계적 특성에 따라 파괴 확률이 달라질 수 있는 가변성을 무시하는 등 구조물의 안전에 대한 정량적인 평가에 있어서, 그 타당성의 여부가 거론되기 시작하고 있다.

또한 신뢰성 내지는 안전성의 요구는 최근 원자력 발전소를 중심으로 화학 plant, 항공기 등 대형 구조물의 시공이 많아짐에 따라 점점 강화되고 있는데, 이는 이러한 대형 구조물의 사고가 미치는 파급효과가 사회적으로 상당히 중요시 인식되고 있음을 의미하며, 이러한 경향은 공학기술의 발전과 더불어 비례하고 있어, 급후에는 점점 더 강화 되리라 예상된다.

최근 구조물 설계에 있어서 두드러진 경향은 대형화와 더불어 구조물 내부에 대다수의 부재가 다양하게 구성되어 복잡화 되어 가고 있는 현상인데, 시스템 신뢰성 입장에서 보면 구조물이 복잡하면 할수록 전체 시스템의 신뢰도가 저하되는 경향이 있어, 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해선, 먼저 개개 부재의 신뢰성을 높이지 않으면 안되기 때문에, 구조신뢰성 문제는 설계의 조건으로서 구조물의 성능과 더불어 중요한 인자로서 고려되지 않을 수 없으리라 본다.

2. 신뢰성 해석 방법과 문제점

구조물의 신뢰성 해석의 기본 방법은 통계적 확률 개념을 이용하는 것으로서, random 특성을 보이는 설계변수를 확률분포 함수로 표시하여 구조물의 파괴확

를 수치적으로 계산하는 방법이다. 이 방법은 Freudenthal[1] 교수에 의해 시도된 이래, level 3 방법이라 칭하는데, 가장 정확한 방법이긴 하지만 적분계산의 복잡성과 결합 민도함수 선정의 어려움 때문에, 근사해법으로서 random 변수들의 평균과 표준편차를 이용하여 파괴확률을 구하는 level 2 방법이 Cornell[2]에 의해 제안 되었다. 이 방법은 다중적분 대신에 어떤 한점에서 극한상태 방정식을 선형 근사하여 신뢰도를 평가함으로써 계산 효율을 향상시켰다. 그러나 이 방법은 선형 근사법의 선정에 따라 해석 결과의 차이가 심해[3], 보다 개선되고 정확도가 높은 신뢰성 해석법이 요구되었다. 그 결과 Hasofer와 Lind가 제안한 Advanced level 2 방법[4]은 이제 거의 무난한 신뢰성 해석 방법으로서 정착되어 가고 있다. 그러나, 극한상태 방정식의 비선형성이 강한 경우에는 2차 근사법(SORM)을 사용하는 것이 바람직하다[5].

실제 구조설계시, 상기의 두방법을 그대로 적용하여 구조물의 안전성을 평가하기에는 방법 자체가 복잡하여, 보다 간단히 안전성을 검토할 수 있는 level 1 방법이 제안 되었다[6]. 이 방법은 통상의 설계과정에서 안전계수를 이용하는 것과 아주 유사하게 개개 설계변수의 분포특성을 이용하여 개개의 설계변수에 등가의 partial safety factor를 도입하여 구조물의 안전성을 평가하는 방법인데, 여기서 등가란 의미는 주어진 partial safety factor를 이용하면, 개개 설계변수의 분포특성을 고려하여 신뢰성 해석을 하여 얻은 결과와 같은 파괴확률을 갖게 된다는 말이다.

신뢰성 해석법은 원래 1950년경 토목, 항공분야에서 개발되어 사용되어 왔는데, 조선분야에서는 1970년경, 영국의 Caldwell 교수에 의해 ISSC에서 소개된 이후, 미국의 Mansour[7] 교수나 영국의 Faulkner[8] 교수 등에 의해 정립되어 가고 있는 실정이다. 최근 국내의 선박 구조해석 및 설계에서도 신뢰성 문제가 거론되어 몇 편의 연구 논문이 학회를 통해 발표되고 있는 실정인데[9], 선박구조물과 같이 복잡한 구조물의 경우, 파괴형태가 다양하여 구조설계에 사용된 실적이 미비하긴 하지만, 선체를 hull girder로 취급하여 보 이론을 적용하는 선체 종강도 문제라든지, 또는 최종강도 이론을 이용하여 신뢰성을 검토하려는 시도가 이루어지고 있어, 앞으로 이에 대한 연구가 활발해 지리라 예상된다.

신뢰성 이론에 따라 구조물의 안전도를 파괴확률로서 표시하려면, 우선 구조물의 안전성을 판단할 수 있는 파괴방정식을 극한상태 설계개념에 의해 구한뒤, 이

를 이용하여 Advanced level 2 방법에 의해 주어진 파괴형태에 대해 파괴확률을 구하는 것이 통상적이다. 이러한 방법에 있어선, 구조물의 안전성을 평가할 수 있는 극한상태 방정식을 실제 변수로 명확하게 표시하는 것이 필수적이었다. 이에 반해, 일반 구조해석에서는 최종적으로 얻어진 최대응력이 주어진 구조부재의 허용응력에 비해 얼마만큼 적은가 하는 것으로서, 구조물의 안전성을 평가하는 극한상태 방정식이 대체로 실제변수의 음함수 형태로 주어지고 있다. 이와같이 극한상태 방정식이 확률변수의 음함수 형태로 주어지는 경우, 파괴확률을 구하는 방법으로서 Monte Carlo 방법이 있는데, 이 방법은 매우 정확한 파괴 확률을 구할 수는 있지만, 구조해석을 여러번 반복 수행해야 하므로 시간이 과다하게 소요되는 단점이 있어 복잡한 구조물의 신뢰성 해석에는 적합치 않으며, 단지 여타 근사해법으로 구한 파괴확률의 정확도를 검증하기 위해 통상 사용된다. 따라서 선체와 같이 복잡한 구조물의 안전성을 보다 합리적으로 다루려면, 통상의 구조해석법과 신뢰성 해석법을 동시에 수행하는 확률론적 구조해석법을 정립하여, 구조해석의 최종단계에서 신뢰성 이론을 적용하던 종전의 방법과는 달리 구조해석의 각단계마다 변수들의 통계특성을 고려할 수 있는 확률 유한요소법의 개발이 요망된다[10, 11].

신뢰성 해석에 있어서 구조물의 저항과 구조물에 작용하는 하중은 각각 어떤 특정한 분포 형태에 의해 표시되는 불확정 특성을 갖는 변수로 취급하여 기존의 확정론적 모델에서 충분히 고려치 못한 random 특성을 고려할 수 있게끔 되었다. 그런데, 이 두 종류의 변수(하중과 저항)의 통계적 특성을 표시함에 있어서 하중은 저항에 비해 시간에 의존하는 특성이 강해, 단순한 통계적 처리만으로 취급하는 데에는 상당한 주의를 요한다. 그래서 일반적으로 신뢰성 해석에 있어서 시간이 포함되어 있는 문제를 근사화 시키기 위해 동상 극한치 이론을 이용하여 시간에 무관계한 하중으로 치환시키는 방법을 적용해 왔는데, 이는 기존의 설계 방법상 많이 적용되는 worst case 개념과 비슷한 방법의 하나로 간주될 수 있다. 그러나 시간에 의존하는 하중이 둘 이상이 되면, 이러한 극한치 이론에 입각한 결과는 너무 과대한 값을 주고 있음이 밝혀지고 있어, 시간에 의존하는 두개 이상의 확률변수를 효율적으로 처리하기 위해서는 stochastic process에 의한 하중조합법[12]을 근간으로 하여 동적하중하의 신뢰성 문제를 검토해야 한다.

피로 해석 또는 피로 파괴에 대한 연구는 기계, 항

공, 원자력 분야에서 시작되어 많은 연구결과가 발표되고 있으며, 조선 분야에서는 해양구조물에 대한 관심이 대두되면서 이 분야에 있어서의 피로파괴에 대한 연구가 증점적으로 수행되어 오고 있는 실정이나 주로 일반 구조해석의 결과를 이용하여 응력 집중 현상과 스펙트럼 해석 방법을 이용하는 방법과 파괴역학 이론에 입각한 Miner의 손상 누적 법칙이나 Paris의 균열 진전 법칙을 이용하는 방법[13] 등에 의해 피로파괴 문제를 규명하려는 연구가 대중을 이루고 있으나, 대부분의 해석 결과들이 실험결과와 많은 차이를 보이고 있어, 피로파괴에 대한 보다 합리적이고 근본적인 대책은 아직 정립되어 있지 못한 실정이다.

이러한 파괴역학을 이용한 설계법은 기존의 허용응력 설계법과는 달리 구조물 내부에 있는 결함을 인지하고 그 결함이 구조강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가 분석하는 손상허용설계법으로 발전되어 주로 항공기 구조설계나 원자력 plant 구조설계에 활용되고 있다. 한편 조선분야에서 많이 사용되고 있는 파괴강도 평가법은 주로 과거의 경험과 실적자료에 바탕을 둔 비교강도법을 활용해 오곤 있지만, 축적된 자료가 많지않은 특수선, 예를 들면 LNG선이나 LPG선의 구조설계에 있어서 파괴역학설계법에 대한 검토가 요구되고 있다.

그래서, 최근에는 피로특성상 갖고 있는 하중이나 재료의 불확실량들이 피로해석 결과에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하려는 확률론적 입장에서 피로현상을 규명하려는 연구가 시도되고 있다[14]. 확률론적 파괴역학에서는 구조물의 파괴에 중요한 영향을 주는 파라미터들에 대해 평균값뿐만 아니라 고유의 분산특성도 함께 고려하여 이들의 분산특성이 최종적인 파괴에 미치는 영향을 일관되게 취급하며, 특히 피로 균열 성장에 의한 피로 파괴 문제에 있어서 피로 수명 내지는 잔여 수명의 추종을 보다 합리적으로 하기 위해, 주기적으로 실시되는 보수 점검의 영향이 최종적인 피로 파괴 확률에 미치는 영향을 분석하는 연구라든지, Paris 방정식에 나타나 있는 재료상수의 random 특성을 고려하여 피로 균열 진전 과정을 stochastic 모델로 정식화하여, 피로 진전 과정의 천이 상태를 Markov chain 개념에 의해 표시하는 피로 파괴의 확률과정을 검토하는 연구 등 피로 파괴 신뢰성 해석 기법의 개발이 요망된다.

전체 구조물은 구조물에 가해지는 하중조건이 다양하게 변할 수 있어 어느 특정한 파괴 형태로 붕괴되는 것이 아니라 다양한 파괴형태로 붕괴될 위험이 있다는

것은 이미 주지의 사실이나, 해석의 편의상 대개 개개의 파괴모드를 구분하여 평가해 오고 있는 실정이다. 뿐만아니라, 같은 파괴형태, 예를 들면 소성붕괴라 할지라도 구조물의 구성요소가 많기 때문에 전체구조물의 파괴기구는 하나 이상 존재하는 것이 상례이다. 특히 파괴의 위험을 줄이기 위해 통상적으로 구조물을 설계할 경우, 파괴 메카니즘에 도달하지 않도록 상당량의 과구속(redundancy)을 부여하여 파괴에 이르는 하중의 전달과정을 분산시키는 방법을 사용해 오고 있는 실정이다. 따라서 구조물의 시스템 파괴는 하나의 파괴형태로 표시되는 것이 아니라 여러 파괴형태 또는 다수의 파괴 메카니즘 등이 복잡하게 얽혀 일어 난다고 보아야 하며, 이러한 개개의 파괴형태 및 파괴기구는 전체 구조물의 파괴에 서로 기여를 하므로 체계적인 시스템 신뢰성 연구가 필요하다[15].

실제적으로 선박과 같이 대형구조물의 경우에는 파괴형태 및 파괴모드가 다양하여 모든 경우를 고려하는 것이 불가능하므로, 다수의 파괴모드 중에서 유력한 몇개의 파괴모드를 구해 이것을 전체 시스템의 파괴모드로 간주하여 시스템의 신뢰성을 검토하고 있는 실정이다. 구체적인 예로서는 Moses의 하중중분법에 의해 구조물 전체 시스템의 파괴확률을 계산하는 방법이라든지, Christensen의 beta-unzipping 방법, Murotsu의 branch and bound[16] 방법에 의해 유력한 파괴모드를 추적해 가는 방법, 및 Ang의 PENT 방법 등이 사용되고 있으며, 최근 이 분야와 관련된 많은 학위논문들이 발표되고 있어 상기의 이론을 이해하는데 많은 도움이 되리라 본다.

3. 미래 연구 방향

구조물의 신뢰성을 평가하기 위해서는 강도나 하중의 통계 데이터가 필요한데, 대체로 이러한 데이터는 충분치 못한 관계로 별도로 유사한 데이터로부터 유추한 결과를 사용하는 것이 상례이다. 특히 선박과 같이 대형 구조물인 경우, 상당량의 자료가 있다 할지라도 실제에는 구조물의 부위에 따라 자료의 성질이 상이하게 달라질 수도 있어 많은 경우 데이터를 분석하는 경우마다 주관적인 판단에 의해 평가되곤 하여, 최종적으로 얻어진 통계치에는 애매 모호한 결과가 포함될 여지가 많다.

따라서, 보다 정확하게 신뢰성 해석을 하기 위해선 불분명한 자료의 보다 효율적인 처리가 가능한 fuzzy 이론을 이용한 fuzzy 신뢰성 해석법[17] 내지는, 실험

에서 얻어진 데이터를 이용하여 기존의 데이터를 개선하는 Bayesian 신뢰성 해석 기법을 통해 기존의 신뢰성 해석시 문제되는 자료의 결함을 보완할 수 있는 새로운 해석 기법의 연구가 필요하며, 아울러 구조물 설계시 최종목표인 최적화 과정에서 안정성과 경제성을 동시에 검토할 수 있는 구조신뢰성 최적설계 방법에 관한 연구가 머지 않은 장래에 실용화 되리라 예상된다.

신뢰성 공학의 이론은 다른 공학이론과 마찬가지로 공학문제에 대한 해답을 주는 것이 아니라, 설계변수들의 불확실량들을 어떻게 고려하는 것이 합리적인가를 보여 주고 있을 뿐이지, 그 자체가 공학 문제에 대한 완전한 해결책을 제시하는 것이 아님을 명심해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Freudental, A.M., "The Safety of Structures", *Proceeding ASCE*, Vol. 71, 1945.
- [2] Cornell, C.A., "A Probability-Based Structural Code", *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 66, No. 12, pp.974-985, December 1969.
- [3] Ditlevsen, O., "Structural Reliability and the Invariance Problem", Research Report No. 22, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1973.
- [4] Hasofer, A.M. and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second Moment Code Format", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 100, No. EMI, pp.111-121, 1974.
- [5] Fiessler, B., Neumann, H.J. and Rackwitz, R., "Quadratic Limit States in Structural Reliability", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 105, No. EM \$, pp.661-676, August 1979.
- [6] Ayyub, B.M. and White, G.J., "Reliability based Design Format for Marine Structures", *Journal of Ship Research*, Vol. 31, 1987.
- [7] Mansour, A.E., "Probabilistic Design Concepts in Ship Structural safety and Reliability", Presented at the Annual Meeting, New York, N.Y., November 16 and 17, 1972, of The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [8] Mansour A.E. and Faulkner D., "On Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull Length", *RINA*, 1972.
- [9] 임상진, 양영순, 경기태, 김창욱, 서용석, "선체 상감판의 신뢰성 해석", 대한 조선 학회지, 제26권 제3호, 1989.
- [10] Nagagili, S. and Hisada, T., "확률 유한요소법 입문.", 배풍관.
- [11] 양영순, 김지호, "평면 Frame 구조물의 확률 유한요소 해석", 한국 전산구조 공학회, 제2권, 제4호, pp.89-98, 1989.12.
- [12] Wen, Y.K., "Methods for Reliability of Structures under Multiple Time Varing Loads". *Nuclear Engineering Design* 60, 1980.
- [13] Paris, P.C., Tada, H., Zahoor, A. and Ernst, H., "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth", *ASTM* 668, 1979.
- [14] Zhao, W., "Reliability Analysis of Fatigue and Fracture under Random Loading", Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Imperial College, 1989.
- [15] Lee, J.S., "Reliability Analysis of Continuous Structural Systems", Ph. D. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow, 1989.
- [16] Christensen, T. and Murotsu, Y., "Application of Structural Systems Reliability Theory", Springer-Verlag, 1986.
- [17] Ushigome, H., "Fuzzy Estimation Method of Reliability Data by Combination of Fuzzy Rules and Statistical Data", 일본 기계 학회 논문집 (편), 56권 522호 1990.