

선체 구조 설계 분야의 최적화 기술 적용 현황 및 전망

나 승 수 <선박해양공학연구센터>

김 외 현 <현대중공업>

엄 항 섭 <대우조선공업(주)>

윤 장 호 <삼성중공업>

1. 서 언

근년에 들어 몇차례의 유류 파동과 극심한 조선 경기의 불황속에서도 각 조선소에서는 선체 중량을 최소화하는 에너지 절약형 선박을 설계하는데 전력을 다하여 왔다.

그러나, 최근 조선 경기의 급속한 회복으로 호경기를 누릴 조선 산업이 인건비의 급상승으로 인하여 제동이 걸리고 있으며 이를 극복하기 위해서는 지금까지의 중량 감소 측면만을 고려한 설계에서 벗어나 인건비가 적게드는 선박을 설계하는데 집중적인 투자가 절실히 요망되고 있다.

구조 설계 분야에 대한 최적화 기법의 적용 과정을 살펴보면 종래에는 주로 수작업에 의해 설계를 수행하여 오다가 1960년대 중반 Johnson[1] 등에 의해 Computer를 이용한 Parametric Study를 통하여 선체 구조 설계가 시도되었다. 그후 1965년경부터 최적화 기법을 도입한 선체 구조 설계가 시도되었으며 주로 선급 규정에 의한 종강도 부재의 설계와 구조 해석에 의한 횡강도 부재의 설계분야에 적용되었다.

선급 규정에 의한 종강도 부재의 설계에 대한 적용 예를 보면 1967년 Moe[2] 등에 의한 Tanker의 중앙 단면 설계, 1970년 Moe[3] 등에 의한 OBO의 중앙 단면 설계 1972년 Moe[4]에 의한 Tanker의 중앙 단면 설계 및 그의 다수의 연구를 들 수 있으며 국내에서도 연구가 활발하여 1980년 처음으로 申[5]에 의해 Tanker의 중앙 단면 설계가 시도된 이후 계속해서 이 분야에 집중적인 연구가 이루어져 실제 설계에 적용할 수 있게 되었다.

구조 해석을 통한 횡강도 부재의 설계에 대한 적용 예를 보면 1968년 Moe[6]에 의한 Tanker의 Web

Frame 설계, 1970년 Lund[7]에 의한 Tanker의 Web Frame 설계, 1971년 Kavlie[8] 등에 의한 Grillage 및 Tanker의 Web Frame 설계, 1972년 Kitamura[9]에 의한 Grillage 설계 및 그의 다수의 연구를 들 수 있으나 최적점을 찾는데 어려운 점이 많아 아직까지 실용화되지 못하고 있는 실정이다. 최근에 들어 Hughes[10] 등에 의해 합리적인 설계에 기초를 둔 실제적인 방법이 개발되어 사용되고 있지만 Computer 용량 및 계산 시간을 극복하지 못해 아직 실용화되지 못하고 있다.

한편, 지난 30여년간 구조물에 대한 최적화 기법은 다양한 Mathematical Programming Technique들을 응용한 최적화나 Kuhn-Tucker의 Optimality Condition에서 유도된 Optimality Criterion Method들이 개발되어 왔다[11,12]. 이와 함께 Single Objective Optimization의 문제점을 보완한 다목적함수 기법과 복잡한 구조물의 설계를 여러 단계로 나누어서 최적화를 수행하는 Multi-Level Optimization도 개발되었다. 또한, 적자생존의 법칙과 Simulated Annealing Technique을 결합한 Genetic Algorithm의 개발로 정수 변수 문제에 대한 최적화의 가능성을 높여 주었으며 Fuzzy개념의 응용으로 수학적으로 정의하기 곤란한 제한 조건들을 정의할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 지금까지 개발된 주요 최적화 기법의 현황을 살펴보고, 국내 조선소에서의 선체 구조 설계시 최적화 기술의 적용 현황 및 적용예를 살펴보고자하며, 또한, 지금까지 국내에서 수행된 최적화 기술에 대한 연구를 토대로 향후 나아가야 할 최적화 기술에 대한 연구 방향을 모색하고자 한다.

2. 최적화 기법의 개발 현황

2.1 Mathematical Programming Method와 Optimality Criterion Method

구조물의 최적화를 위한 최적화 기법으로는 크게 Mathematical Programming Method[11]와 Optimality Criterion Method[12]로 나눌 수 있다. Mathematical Programming Method의 종류로는 1) Sequential Linear Programming 2) Sequential Quadratic Programming 3) Conjugate Gradient Method 4) Quasi-Newton Method 5) Lagrangian Multiplier Method 6) Genetic Algorithm 등이 있다. Optimality Criterion Method는 비선형 Mathematical Programming의 Khun-Tucker Condition들과 등가인 제한 조건들을 구조물의 최적화에 응용한 방법이다. 구조물의 최적화는 구조물의 해석과 변수의 변환과정으로 이루어 지는데 이 변수의 변환을 Khun-Tucker Condition을 만족하는 Recurrence Relation과 Lagrangian Multiplier를 이용한다.

2.2 다목적함수 기법

다목적함수 기법은 1896년 Pareto[13]에 의해 non-inferior 개념이 도입된 이래 1951년 Kuhn-Tucker[14]에 의해 non-inferiority의 이론이 정립된 이후 다수의 다목적함수 기법이 개발되어 널리 사용되고 있다.

다목적함수 문제에 대한 최적화의 기법은 설계자나 의사 결정자의 선호도의 결정에 따라 1) 선호도의 초기 결정에 의한 방법 2) 선호도의 계속적인 결정에 의한 방법 3) 선호도의 최종 결정에 의한 방법들로 나눌 수 있다[15].

선호도의 초기 결정에 의한 방법은 Goal Programming이 대표적이고, Compromise Programming, Surrogate Worth Tradeoff method, Fuzzy Programming 등이 있다. 이 방법은 비교적 많이 쓰이고 있으나 weighting 결정시 어려움이 따른다. 선호도의 계속적인 결정에 의한 방법은 Step method, Zionts-Wallenius method 등이 있다. 이 방법은 설계자가 새로운 최적점을 찾을 때마다 새로운 Preference를 결정하여 설계자가 최적점에 매우 가까워졌다고 판단될 때까지 최적화를 계속 수행하는 방법이다. 한편, 선호도의 최종 결정에 의한 방법은 Pareto Optimization method를 들 수 있는데 Pareto Optimal Set을 발생시키는 방법에 따라

Weighting method, Non Inferior Set Estimation(NISE) method, ϵ -Constraint method, Genetic Algorithm을 이용한 MOGA 등을 들 수 있다. Pareto Optimal Set을 생성하는 방법은 계산 가능한 상충되는 목적 함수들의 관계를 잘 표현하는 장점이 있으나 그중에서 설계자가 최적점을 선택하는 것이 용이하지 않다.

2.3 Multi-Level Optimization

복잡한 구조물의 경우 많은 수의 설계 변수와 비선형 제한 조건들이 존재하게 되는데 이런 경우 여러 단계로 나누어 최적화를 수행하는 방법에 대한 연구가 수행되어 왔다[16,17] 이 중에서 Kirsh의 Model Coordination Method와 General Goal Coordination Method 등이 많이 쓰이고 있다. Model Coordination Method는 Level간의 연결관계인 Equality Constraint가 반드시 만족되어야 하므로 실제의 복잡한 문제의 최적화시 수렴성에 어려움이 있다. 한편, General Goal Coordination Method는 연결 관계를 Goal Programming Technique을 이용하여 또다른 제한 조건으로 간주함으로써 용이하게 여러 Level로 나눌 수 있다. 이 분야에 대한 구조물의 최적화에 관한 연구는 매우 제한적이며 특히 대형 구조물의 설계시 개념 설계, 초기 설계, 상세 설계등의 여러 단계를 거치는 것이 통상적이므로 이 분야의 연구는 실제 설계에의 응용성이 높을 것으로 판단된다.

3. 국내 조선소의 최적화 기술의 적용 현황

3.1 현대중공업의 경우

설계자의 직관과 경험 그리고 참고 도면을 기반으로 수행되어오던 선박 구조 설계가 1980년경 국내에서도 선박 구조에 관련한 최적 설계의 움직임이 싹트기 시작하였다[5, 18]. 이에따라 주로 선박 구조의 상당 부분을 차지하며 선수미 중량의 추정을 위한 기본이 되는 중앙부 구조를 대상으로 전체적 혹은 국부적 구조의 최적화를 시도하였다[18~20].

초기에는 대학 및 연구소와 공동으로 1980년경에 최적 구조 설계를 산적화물선을 중심으로 시작하였고 이와 병행하여 기존의 설계 과정을 표준화하고 자동화시켜 나갔다[21~25]. 이러한 연구 활동을 통하여 제시된 결과들은 최적화 단계의 단순 가정들로 인하여 직접적으로 사용되기 보다는 설계자의 검토를 거치든지 경향의 추정만으로 만족하는 경우가 많았

다. 이는 설계의 복잡한 상황을 정식화에 산업하기 어렵기 때문이며 반면에 정식화가 복잡하지 않고 설계 규정이나 방법, 구조 및 재질 특성에 변동이 많지 않는 횡격벽 설계등에서는 큰 효과를 볼 수 있었다.

한편, 근년에는 설계 하중에 대한 선체 강도 검토를 위한 효율적인 방법으로 구조 변경전 구조 해석 과정에서 얻은 값을 이용하여 수정된 구조의 해석 효율을 높이는 재설계 시스템의 개발과 관련하여 각 재해석 기법의 특성을 조사하고 실제 선체 설계에 적용하였다[26]. 그리고, 기존의 상용 유한 요소 프로그램에 상당한 최적화 기능이 내장되어 있는 MSC/NASTRAN을 이용하여 설계 변수, 제한 조건 및 목적 함수등을 사용자가 임의로 설정하고 구조 해석 자료를 설계 변수로 하여 일관된 계산을 수행하는 흐름이 선호되고 있다[27,28].

따라서, 이에 연관되어 현재까지 추진되었던 연구 사례와 활용 현황을 중심으로 그 내용을 소개하고자 한다.

당사에서는 1981년 Lloyd 선급 규정을 근간으로 산적화물선의 파형 격벽, 보강재 단면 형상 및 이중저 구조의 최적화를 서울대와 공동으로 건조 비용 및 중량에 관련된 일련의 결과를 얻을 수 있었다[18].

그리고, 1983년부터 1984년에 걸쳐 한국선박연구소와 공동으로 산적화물선의 중앙 단면 최적화 작업이 이루어졌다[19]. 여기서는 용접장등을 포함한 건조비까지 고려한 시도를 하였지만 최적점을 찾기 어려운 즉 경사도가 거의 없는 결과를 얻었다. 이는 보강재의 간격이 감소됨에 따른 중량 감소 효과가 용접장의 증가에 따른 제작 비용의 증가와 서로 상쇄되는 현상이 도출되었기 때문이다.

1985년에는 설계 변수가 크게 복잡하지 않은 산적화물선의 파형 횡격벽에 대한 최적설계 프로그램을 개발하여 현업에 많은 도움을 주었다[20]. 이는 기존의 횡격벽 설계에 주로 사용되는 설계 규정식들과 선각 설계시에 부수적으로 포함되는 제약 조건들을 조합하여 중량면에서 유리한 횡격벽 치수 및 하부 S-tool 높이를 얻어내는 설계 시스템으로서 기존에 설계되었거나 초기 제시된 파형 격벽에 대해 10% ~ 30% 정도의 중량 절감효과를 얻을 수 있었다.

또한, 당사의 기본설계실에서 많은 산적화물선의 설계 표준화에 대한 연구를 종합적으로 정리하여 경험 및 참고 도면에 의한 최적화 결과도 이론적 최적화 작업에 못지않게 설계 능력을 향상시키는데 도움이 되었다[21]. 따라서, 현업 설계 부서에서 구조 설계를 행하는 수순을 프로그램화하여 CAD를 이용한

구현으로 자동 치수 계산을 제공하며 설계검증용 유한 요소 프로그램 시스템과 정보를 교환할 수 있는 설계 전산화 및 자동화의 요구가 자연스럽게 발생되었다. 또한, 데이터베이스의 구축으로 축적된 정보의 효율적인 처리가 필요하게 되었다. 이러한 이유로 1988년경부터 당사의 설계 경험과 선급 규정을 결합한 설계 전산화 프로그램 개발이 진행되었고 본격적으로 1989년부터 설계시 학계 및 연구소와의 협동 연구로 진행하게 되었다[24,25].

1991년에는 재해석 기법을 도입하여 해석 과정의 효율을 높이는 작업을 수행하였다. 본 연구에서는 선체 구조 설계에 사용할 수 있는 재설계 시스템의 개발과 관련하여 각 재해석 기법의 특성을 조사하고 실제 선체 설계에 적용하였다. 선체 구조 해석 모델은 일반적으로 유한 요소 모델로 표현되고 있으나 최적설계 알고리즘에서 설계 변수, 구속 조건, 목적 함수 등이 사용자에게 의해 정의되어야 하므로 선체 구조 강도를 최적화하기 위해서는 유한 요소 데이터를 변수로 하여 목적 함수를 표현해야 한다. 유한 요소 프로그램과 최적설계 프로그램이 독립적으로 존재할 경우 이들간의 연결 문제가 발생한다. 또한, 유한 요소 모델이 대형화되면 설계 변수가 변화함에 따라 유한 요소 프로그램의 계산 결과는 반복 계산되어야 함으로 상당한 계산량의 증가를 피할 수 없다. 이러한 문제를 개선하기 위해 유한 요소 데이터를 설계 변수로 하여 최적 설계 모델을 구성할 수 있고 최적 설계 알고리즘을 내장하여 일관된 계산을 수행할 수 있는 상용 프로그램(MSC/NASTRAN)을 1992년부터 사용해오고 있다. 본 상용 프로그램에서는 유한 요소 모델 데이터를 설계 변수로 하여 사용자가 최적 설계 모델을 구성하기 때문에 유한 요소 계산 과정의 강성 매트릭스와 구조 응답은 최적 설계 계산 과정에서 전달되어 각종 구속 조건과 목적 함수를 구성하는데 이용된다. 또한, 설계 변수가 변화함에 따라 변화하는 구조 응답을 적은 계산량으로 추정하기 위해 해석 모델로부터 설계 민감도를 구성하여 반복 계산 과정에서는 근사 최적 설계 모델을 이용하고 있다. 최종 구조 응답은 설계 변수값을 이용하여 재해석 결과로서 검증된다.

3.2 대우조선공업의 경우

1980년대에 들어서면서 부터 최적화 기법을 통한 선체 구조 설계가 국부적으로 시도[29~31]되다가 1987년부터 1991년까지 서울대학교와 공동으로 유조선 및 산적화물선의 최적 구조 설계 System I,

II. III를 개발하였다[32~34].

System I에서는 Lloyd 선급 규정을 근간으로 Conventional Tanker에 대한 종강도 부재의 최소 중량 설계, 횡강도 부재의 최소 중량 설계 및 Tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하였다. 또한, Lloyd 선급 규정을 근간으로 산적화물선에 대한 종강도 부재의 최소 중량 설계, D/B Grillage 해석에 의한 Cargo Hold의 최소 중량 설계를 수행하였다[32,35].

System II에서는 System I을 확장시켜 Lloyd, DnV 선급 규정에 의한 Conventional Tanker의 최적 구조 설계, Lloyd, DnV 선급 규정에 의한 Narrow Wing Tanker의 최적 구조 설계 및 stringer type 횡격벽의 최소 중량 설계를 수행하였다. 이에 대한 내용으로는 각 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계, 각 선급별 간이 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계 및 각 선급별 Tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하였다. 또한, 산적화물선에 대해서는 각 선급 규정별 종강도 부재의 최소 중량 설계, 종강도 및 D/B Grillage 강도를 동시에 고려한 Cargo Hold의 최소 중량 설계를 수행하였다[33,36,37].

System III에서는 유조선의 잦은 해난 사고에 의한 해상 오염의 심각성으로 미국 의회 및 국제해사기구(IMO)에서 유조선의 이중 선각 의무 조항을 법제화하는 과정에서 이중 선각 유조선에 대한 최적 구조 설계를 수행하게 되었다[34,38,39].

이에 대한 내용으로는 각 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계, 각 선급별 간이 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계, 간이 해석에 의한 corrugated type 및 stringer type 횡격벽의 최소 중량 설계, 각 선급별 Tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계를 수행하였다. 또한, Tank 배치시 MARPOL 준수 여부를 알아보기 위해 MARPOL 계산 프로그램을 개발하였고 최적 설계 결과의 출력을 위해 각 선급별 선급 승인용 scanting sheet를 작성하였으며 중앙부의 자동 drawing 프로그램을 개발하였다.

이에 대한 상세한 내용을 종강도 부재, 횡강도 부재, 횡격벽 부재 및 선체 전체로 나누어 최적 설계를 수행하는 과정을 보여주고자 한다.

3.2.1 선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소중량 설계

선급 규정에 의한 종강도 부재의 최소 중량 설계를 위해서는 갑판 부분을 제외한 나머지 치수를 선급 요

구 최소 치수로 결정하고 종강도를 맞추기 위해 최적화 기법을 도입하여 갑판 부분의 치수를 변화시켜가며 중앙 단면적이 최소가 되도록 갑판 부분의 치수를 결정하였다. 목적 함수는 중앙 단면적이며 설계 변수는 갑판 부분의 치수로서 나머지 치수는 모두 각 선급에서 요구하는 최소치로 잡았다. 또한, 제한 조건으로는 각 선급에서 요구하는 갑판 부분의 최소 치수 및 선저와 갑판에서의 최소 선각 단면 계수를 만족하도록 정하였다. 최적 설계 프로그램은 Hooke & Jeeves direct search method를 이용하여 구성하였으며 discrete value를 용이하게 취할 수 있도록 충분량 및 수렴도를 적절히 조절하였다.

3.2.2 간이 해석에 의한 횡강도 부재의 최소중량 설계

간이 해석에 의한 횡강도 부재의 최소 중량 설계를 위해서는 선체 중앙부를 한 web 간격만큼 떼어내 web frame 구조물로 modeling한 후 일반화 경사 처짐법[40]에 의해 횡강도 해석을 수행하여 각 부재에 발생하는 응력을 계산하고 이 응력이 허용 응력 범위안에 있으면서 선각 중량이 최소가 되도록 부재 치수를 결정하였다.

설계 변수는 이중 구조인 경우 web의 두께이며 web의 높이, 상하부 flange의 폭과 두께는 종강도 부재 치수를 사용하였다. 또한 그외의 구조에 대해서는 web의 높이 및 두께, 하부 flange의 폭과 두께를 설계 변수로 잡았으며, 상부 flange는 종강도 부재 치수를 사용하였다. 제한 조건으로는 각 부재의 허용 응력, 허용 전단 응력과 각 부재의 web 및 flange이 좌굴 방지를 위한 최소 두께로 결정하였다. 최적 설계 프로그램은 Hooke & Jeeves direct search method를 이용하여 구성하였으며 discrete value를 용이하게 취할 수 있도록 충분량 및 수렴도를 적절히 조절하였다.

개발한 프로그램의 유용성을 확인하기 위해 150K 및 300K D/B.D/S Tanker를 대상으로 하여 DnV 및 Lloyd 선급에서 규정하는 하중 조건 및 허용 응력에 따라 최소 중량 설계를 수행한 후 기존의 설계 치수 및 선각 중량과 비교하였다.

3.2.3 간이 해석에 의한 횡격벽 부재의 최소중량 설계

간이 해석에 의한 횡격벽 부재의 최소 중량 설계를 위해서는 횡격벽을 Grillage 구조물로 modeling한 후 일반화 경사 처짐법에 의해 Grillage 해석을 수행하여 각 부재에 발생하는 응력을 계산하고 이 응력이 허용 응력 범위안에 있으면서 선각 중량이 최소가 되

도록 부재 치수를 결정하였다. 설계 변수는 각 stringer의 높이 및 두께, 하부 flange의 폭과 두께이다. 설계 변수를 줄이기 위해 상부 flange로 작용하는 외판은 선급 규정에 의한 치수를 사용하였으며 폭은 유효폭을 사용하였다. 제한 조건으로는 각 stringer의 허용 굽힘 응력, 허용 전단 응력과 각 stringer의 web 및 flange의 좌굴 방지를 위한 최소 두께로 정하였다.

최적 설계 프로그램은 Hooke & Jeeves direct search method를 이용하여 구성하였으며 discrete value를 용이하게 취할 수 있도록 증분량 및 수렴도를 적절히 조절하였다.

3.2.4 Tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계

Tank의 구획 배치를 고려한 선체 전체의 최소 중량 설계를 위해서는 설계하려는 여러가지 구획 배치에 따라 principal dimension, 화물창 길이, 횡격벽 위치 및 종격벽 위치를 변화시켜 선체 전체의 선각 중량이 최소가 되는 최적 Tank의 구획 배치를 결정하였다. 선체 전체의 선각 중량을 구하기 위해서는 선체를 선수부, 화물창부 및 선미부로 나누고 화물창부에 대해 횡격벽 개수, web frame 개수 및 종격벽의 위치를 변화시켜 앞에서 구한 단위 길이당 종강도 부재의 중량, 단위 개수당 횡강도 부재 및 횡격벽 부재의 중량을 토대로 화물창 부분의 선각 중량을 구하고 선수부 및 선미부는 중량추정 공식에 의한 선각 중량을 추정하여 선체 전체의 선각 중량을 구하였다.

구획 배치에 대한 제한 조건으로는 *MARPOL (SBT,PL)을 고려하여 MARPOL이 만족되는 배치인지 검토하도록 하였다.

3.3 삼성중공업의 경우

선급 규정에 의거한 유조선 및 산적화물선의 중앙 단면 최소 중량 설계 프로그램과 유조선의 web frame 최소 중량 설계, grillage 구조물의 최소 중량 설계 그리고 fore mast의 최소 중량 설계 프로그램 등을 개발하였다. 최적화 기법으로는 미계수법인 gradient projection 법과 직접탐사법인 Hooke & Jeeves 법, Nelder & Mead Simplex법, random search 법을 사용하였으며, 제한 조건이 있는 문제를 제한 조건이 없는 문제로 바꾸어 주는 external penalty function법을 조합하여 사용하였다.

3.3.1 산적화물선 중앙단면 중부재의 최소중량 설계[41]

산적화물선의 중앙 단면 설계에 최적화 기법을 도입하여 적용 선급 규정에 준하여 종강도 부재의 치수를 결정하는 프로그램을 구성하여 선각 중량의 감소 및 설계의 효율성을 도모하였다.

최적화 기법으로는 gradient projection법 또는 Hooke & Jeeves의 직접탐사법, random search 법과 external penalty function법을 조합하여 사용하였다. 설계 변수로는 선급 규정에 의한 중앙 단면의 중부재 치수 결정시 영향이 큰 상갑판 두께, 상갑판 종통 보강재의 깊이와 선저 종통 보강재, hopper side tank 경사판 보강재, hopper side tank 측판 보강재, top wing tank 경사판 보강재, wing tank 측판 보강재의 간격등 8개의 설계 변수를 선택하였다. 설계 변수에 의하여 최적 설계치를 판단하는 기준이 되는 목적 함수로는 일반적인 구조설계에서는 구조 중량 또는 건조비등이 선택된다. 본 프로그램에서는 선체 중량을 나타낼 수 있는 중앙 단면 중부재의 면적을 목적 함수로 취하였다.

또한, 최적 설계를 위해서는 주어진 제한 조건을 만족하는 범위내에서 이루어져야하며, 최적 설계의 수렴도는 제한 조건의 중요도에 의해서 나타나야 하므로 본 프로그램에서는 선급 규칙에서 제시하는 최소 치수와 최소 중앙단면계수를 제한 조건으로 하였다.

본 최소 중량 설계 프로그램을 186K, 220K 산적화물선에 적용한 결과 1~2% 정도의 중량감소가 가능함을 보여 주었다.

3.3.2 유조선 중앙단면 중부재의 최소중량 설계[42,43]

유조선의 중앙 단면 설계에 최적화 기법을 도입하여 적용 선급 규정에 준하여 종강도 부재의 치수를 결정하기 위한 방법은 산적화물선의 경우와 같다. 단, 상갑판의 보강재는 JIS의 형강을 사용토록 하였다. 사용된 최적화 기법도 산적화물선의 경우와 같으나 random search법이 효율성면에서 상당히 떨어지므로 최적화 기법에서 제외하였다. 최적화를 수행하기 위한 설계 변수로는 상갑판, 선저 또는 내저판 종통 보강재의 간격, 선측 외판 또는 종격벽 종통 보강재의 간격, 상갑판 두께 그리고 상갑판 종통 보강재의 단면계수등 4개를 취하였다.

유조선의 최적 설계 프로그램을 4척의 실적선에 적용해본 결과 0.68~1.61% 정도의 중량 감소가 가능함을 보여주었다. 또한, 95K 정유 운반선에 대하여 중부재의 최소 중량 설계 프로그램, 뒤에 언급될 횡부재의 최소 중량 설계 프로그램과 grillage 구조의 최소 중량 설계 프로그램을 이용하여 구조 설계

를 수행하였다. 그 결과 화물창의 길이를 실적선과 같이하여 횡격벽을 제외하고 약 8.5 Ton/m(2.0%)의 중량이 감소됨을 알 수 있었다.

3.3.3 유조선 횡부재의 최소 중량 설계[44]

본 프로그램은 선체 구조에서 흔히 나타나는 2차원 frame 구조의 최소 중량 설계를 목적으로 개발되었다. 선체의 web frame은 면내 하중을 받는 2차원 보구조로 이상화할 수 있다. 이상화된 보구조는 전단을 고려한 요소 강성 행렬, span point의 개념 그리고 탄성지지의 개념등이 포함된 행렬법으로 구성된 2차원 frame 전용 해석 프로그램으로 해석을 수행하게 된다. 여기에서도 최적화 기법으로 Hooke & Jeeves 법과 gradient projection 법을 사용하였으며, 제한 조건이 있는 문제를 제한 조건이 없는 문제로 바꾸어 주는 external penalty function 법을 조합하여 사용하였다.

선체의 web frame은 보요소로 치환할 수 있으며 top flange의 단면적, web의 깊이 및 web의 두께 등 설계 변수는 3개이며, cross tie와 같이 plate flange가 종방향 부재로 작용하지 않을 경우에는 top flange의 단면적과 같은 변수로 취급하였다. 또한, top flange의 치수는 폭과 두께를 구분할 경우 설계 변수 및 제한 조건의 수가 많아져 계산 시간 및 계산의 정도가 문제되기 때문에 면적만을 변수로 취급하였다.

목적 함수는 한 web frame에서 횡부재만의 중량을 취하였으며 web 단면적은 깊이와 두께의 비가 50보다 큰 경우 일반적으로 보강재를 취하므로 보강재를 고려한 web의 단면적을 사용하였다. 제한 조건으로는 각 설계 변수의 최소치 및 최대치에 대한 조건과 축응력, 전단 응력, 굽힘 응력 및 Von Mises의 등가 응력의 허용치를 택하였다.

3.3.4 Grillage 구조물의 최소 중량 설계

Grillage구조의 최적 설계 프로그램은 상감판, 선저 및 이중저 구조와 같이 2차원 구조로 이상화할 수 있는 구조물의 최소 중량 설계를 목적으로 개발되었으며, 구조 해석시 2차원 grillage 전용 해석 프로그램을 사용하는 것 외에는 web frame의 최소 중량 설계와 동일한 방법으로 구성하였다.

3.3.5 파형 격벽의 최소 중량 설계[45,46]

이중저 구조의 선체에서 흔히 나타나는 상하부 stool을 갖는 파형 격벽의 최소 중량 설계 프로그램은

로서 변단면보 이론과 Hooke & Jeeves 법 및 external penalty function법을 조합한 최적화 기법을 이용하여 구성하였다. 파형 격벽의 전체 중량은 stool 부분의 중량과 파형 부분의 중량으로 구분되는데 파형 부분의 비율은 약 40% 내외이므로 stool 구조가 확정된 후 파형 부분만을 최적화시키는 것은 전체 격벽의 최적화라고 보기는 어렵다. 따라서, 본 프로그램에서는 파형 부분의 치수는 물론 stool의 높이도 설계 변수에 포함시키고, 목적 함수로 파형 부분의 중량에 상하부 stool의 중량을 합한 중량을 취하여 최적화를 수행하도록 하였다.

제한 조건으로는 굽힘 응력, 전단 응력, 좌굴 응력과 격벽 제작시 요구되는 용접 허용치를 취하였다. 이때, 모든 제한 조건들이 같은 중요도를 갖도록 정규화를 시켰다.

최적화에 사용된 설계 변수는 파형 부분의 두께, 파형 부분의 flange 폭, 파형 부분의 web depth, 하부 stool의 높이, 상부 stool의 높이와 파형 사판의 수평 투영 길이 등 6개를 취하였다.

본 최소 중량 설계 프로그램을 실선에 적용한 결과 약 2.5% 정도의 중량 감소를 기대할 수 있다는 결과를 얻었으며 초기 설계 단계에서 격벽의 기하학적인 치수만으로 파형격벽의 최소 중량 설계를 위한 방향을 설정할 수 있으며, 설계 변경시 격벽 각 부분의 중량을 추정하는데 이용함으로써 선박의 최소 중량 설계에 기여할 수 있을 것이다.

또한, 기타 부분에 적용한 예로서는 Fore mast가 propeller의 기진 주파수와 공진이 발생하지 않도록 하면서 중량이 최소가 되는 형상과 치수를 결정하는 fore mast 최적 설계 프로그램을 Hooke & Jeeves 법과 external penalty function법을 결합하여 개발하였으며 이밖에도 기본 설계 분야의 Cp곡선의 최적화 프로그램 등 최적화 기법을 선박 설계에 적용하는 연구를 수행하였다.

4. 결 언

이상과 같이 선체 구조 설계 분야에 대한 국내 조선소의 최적화 기술의 적용 현황 및 적용예를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 선체 구조에 대한 최적화 기술의 적용시 설계 변수 및 제한 조건이 복잡하지 않고 설계법의 변화가 거의 없는 국부 구조나 설계 경험에 별로 필요치 않은 상태에서의 적용은 상당한 효과를 주는 반면 많은

설계 및 건조 경험이 있는 선박들에 대한 최적화를 할 경우 적용이 까다로워 잘못된 판단 자료를 제공하거나 설계 의도에서 벗어난 결과를 줄 가능성이 많게 되고 상대적인 경향이 일치한다고 하여도 숙련된 설계자들에게 신뢰성을 주기가 어렵다.

2) 근년에는 설계 하중에 대한 선체 강도 검토를 위한 효율적인 방법으로 구조 변경전 구조 해석에서 얻은 값을 이용하여 수정된 구조의 해석 효율을 높이는 재설계 시스템의 개발과 관련하여 각 재해석 기법의 특성을 조사하고 실제 선체 설계에 적용하고 있으며 이들 재설계 시스템을 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 특히 설계 변수 수정량 결정 과정에 대한 많은 경험의 축적이 필요하다.

3) 기존의 상용 유한 요소 프로그램을 이용하여 목적 함수, 설계 변수 및 제한 조건들을 사용자가 임의로 설정하여 구조 해석 자료를 설계 변수로 하여 일관된 계산을 수행하는 흐름이 선호되고 있어 보다 향상된 구체적이고 실제적인 최적 설계에 접근하고 있다. 그러나 아직 개발식에서 정의되는 논리적 표현에 한계성이 존재하므로 사용상 제약이 따른다.

4) 향후 기존에 최적화 단계에서의 문제점이 보완되고 형상 최적화를 포함한 상용 구조 해석 프로그램을 손쉽게 접할 수 있을 뿐 아니라 속도가 빠른 Computer를 이용하여 보다 효율적이고 정도 높은 최적 설계 결과를 얻을 수 있어 머지않아 실제 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 향후 연구 방향

지금까지 논의된 국내 조선소에서 선체 구조 설계 시 수행된 최적화 기술에 대한 연구를 토대로 향후 나아가야 할 최적화 기술에 대한 연구 방향을 모색하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 선체 구조물과 같이 대형이며 복잡한 구조물을 최적화 기법에 의한 설계를 수행하고 실제 조선소에서 효과적으로 사용하기 위해서는 많은 계산 시간이 요구되는 구조 해석 시간을 줄이기 위한 해석 방법의 개발이 선행되어야 하며 실제 현상을 충분히 나타내기 위한 평가 기준(제한 조건들)을 세우고 이를 구현하는 방법을 개발하여야 한다.

2) 기존의 다양한 최적화 기법을 이용하여 적절히 서로 결합한 Mixed optimization 방법의 개발이 필요하다고 생각하며 기존의 다양한 방법을 Package 형태로 전산화함으로써 상호 비교 계산을 통한 최적

의 방법을 찾는 것도 병행해야 할 것으로 생각된다.

3) 향후 인건비 상승을 고려해 볼 때 기존의 증량 감소 측면만을 고려한 설계에서 벗어나 건조비가 적게드는 선박을 설계하는데 집중적인 투자가 요망되며, 이를 해결하기 위해서는 건조비를 최소화하기 위한 Cost Modeling 및 Cost Optimization에 관한 연구가 필요하다.

4) 상용 유한 요소 해석 Package를 통한 최적 설계 수행시 해결해야 할 문제는 기존의 Black Box Package로부터 최적화에 필요한 정보들을 얻어내는 방법의 개발이 필요하며 특히 좌굴에 관한 제한 조건이 있는 경우 기존의 Package들은 좌굴 평가용 Post Processor를 제공하지 않거나 설계 기준이 여러개가 있어 제공할 수 없는 경우가 대부분으로 이 부분의 개발이 선행되어야 한다.

5) 설계의 개념이 증량 감소등의 단일 목적 함수에서 여러개의 상충되는 목적 함수들을 종합적으로 검토하여야 하는 다목적함수가 존재하며 설계의 여러 단계에서 각각 다른 목적 함수들이 존재함에 따라 다단계 최적화를 수행하여야 한다. 따라서 앞으로의 최적화의 개념은 다목적함수 및 다단계 최적화 문제에 맞는 기법의 개발과 병행하여 발전하여야 한다.

6) 설계 변수가 정수와 실수가 혼합되어 있는 문제를 해결하기 위한 방법의 개발이 필요하며 기존의 잘 알려진 방법들로는 이런 종류의 문제를 해결하는데 한계가 있으므로 최근에 급속한 발달을 보이고 있는 Genetic Algorithm을 이용한 방법의 개발이 요구된다.

7) 실제 설계 수행시 수학적으로 확실히 표현할 수 있는 제한 조건과 목적 함수가 있는 경우도 있지만 인간의 느낌등 판단 기준이 모호한 경우도 많아 이런 문제의 최적화를 위해 Fuzzy개념을 응용한 최적화를 수행하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

- [1] Johnson, I. and Ovrebo, B., "Optimization Studies of Hull Constructions of Large Ships, with Different Steel Types Taken into Consideration", N-STM66, 1966.
- [2] Moe, J. and Lund, S., "Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphasis on Longitudinal Strength Members of Tankers",

- Trans. Royal Institute of Naval Arch., Vol.110, No.1, 1968.
- [3] Moe, J., Kavlie, D. and Lund, S., "Optimum Design of Ship Structures", SNAJ, Vol.128, Dec., 1970.
- [4] Moe, J., "Integrated Design of Tanker Structures", European Shipbuilding, No.3-4, 1972.
- [5] 신중계, "최적화 기법을 이용한 선체 중앙 단면의 최소 중량 설계", 대한조선학회지, 제17권, 1980.
- [6] Moe, J., "Optimum Design of Statically Indeterminate Frames by means of Nonlinear Programming", Meddlese SKB II /M12, 1968.
- [7] Lund, S., "Tanker Frame Optimization by means of SUMT Transformation and Behavior Models", Meddlese SKB II /M17, 1970.
- [8] Kavlie, D. and Moe, J., "Automated Design of Frame Structures", ASCE, Vol.97, No.ST 1, Jan., 1971.
- [9] Kitamura, K., "Studies on Optimization of Ship Structures(2nd report)-optimum design of grillages", SNAJ, Vol.130, 1972.
- [10] Hughes, O. F. and Mistree, F., "A Comprehensive Method for the Automated Optimization of Ship Structures", PRADS77, 1977.
- [11] Morris, A. J., Foundations of Structural Optimization: A Unified Approach, John Wiley and Sons Ltd., 1982.
- [12] Avriel, M., Nonlinear Programming Analysis and Methods, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1976.
- [3] Pareto, V., "Cours d' Economie Politique", Rouge, Lausanne, Switzerland, 1896.
- [14] Kuhn, H. W. and Tucker, A. W., "Nonlinear Programming", Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Edited by J. Neyman, University of California Press, Berkeley, 1951.
- [15] Cohn, J. S. and Marks, D.H., "Multiobjective Screening Models and Water Resources Investment", Water Resource Research, Vol.11, No.2, 1975.
- [16] Kirsh, U., "Multi-Level Approach to Optimum Structural Design", ASCE, Vol.101, ST1, 1975.
- [17] Urm, H. S., "Optimum Structural Design of Submersibles", Ph. D Thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1991.
- [18] 김외현, 나영근, 박진화, 김지중, "Optimization Theory and its Application to Bulk Carrier Design", 기술현대, 추계호, 1981.
- [19] Optimal Design of Ship Structures, 현대중공업 선박해양연구소, 공동연구보고서, 1984.
- [20] 함주혁, 산적화물선의 파형 격벽 최적 설계 프로그램, 현대중공업 선박해양연구소 보고서, 1985.
- [21] "산적화물선의 중앙횡단면 형상 기준", 현대중공업 구조설계부 설계자료, 1988.
- [22] 함주혁 외, Computer Aided Midship Section Design of Bulk Carrier based on L. R. Rule and H.H.I. Practice, Hyundai Maritime Research Institute, Report(SD88161), April, 1988.
- [23] Juh-Hyeok Ham, Oi-Hyun Kim and Jung-Youl Kim, "Development and Application of Interactive Screen Management System for Initial Ship Hull Design", Proceedings of the 1990's Ship & Offshore Structures Congress in Korea, Aug., 1990.
- [24] 함주혁, 강점문, 김외현, 산적화물선의 구조 설계 전산시스템 개발-대화식 화면운영에 의한 초기 구조 설계 시스템-(1차보고서), 현대중공업 선박해양연구소 보고서, 1991.
- [25] 최익홍, 산적화물선의 구조 설계 전산시스

- 템 개발-구조 해석 시스템-(3차보고서), 현대중공업 선박해양연구소 보고서, 1991.
- [26] 김의현, 박종우, 조상래, "선체 구조의 정적 재설계 기법", 대한조선학회 논문집, 제29권 제2호, 1992.
- [27] 김화수, "Application of MSC/NASTRAN Optimization in Ship Structural Analysis", Proceedings of 10th MSC/NASTRAN User's Conference in Japan, Nov., 1992.
- [28] 최익홍, MSC/NASTRAN의 최적 설계 기능 사용을 위한 선체 구조 해석 전용 전처리 프로그램의 개발, 현대중공업 선박해양연구소 보고서, 1992.
- [29] 민계식, 나승수, "Lloyd Rule에 의한 산적화물선의 최소 중량 설계", 대우조선 기술지, Vol.2, No.5, 1984.
- [30] 나승수, 민계식, 엄향섭, "Lloyd Rule에 의한 O/T의 최소 중량 설계", 대한조선학회 추계연구발표회, 1985.
- [31] 나승수, 민계식, 엄향섭, "유한요소법에 의한 유조선 중앙부의 최소 중량 설계", 대한조선학회지, 제22권 3호, 1985.
- [32] 장창두 외, Oil Tanker 및 Bulk Carrier의 최적 구조 설계 시스템 개발(Ⅰ), 서울대학교 생산기술연구소 보고서, RIIS87-037, 1988.
- [33] 장창두 외, Oil Tanker 및 Bulk Carrier의 최적 구조 설계 시스템 개발(Ⅱ), 서울대학교 공학연구소 보고서, RIES89-036, 1990.
- [34] 장창두 외, Oil Tanker 및 Bulk Carrier의 최적 구조 설계 시스템 개발(Ⅲ), 서울대학교 공학연구소 보고서, RIES90-052, 1991.
- [35] 나승수, 장창두, "일반화된 경사 처짐법에 의한 선체의 최소 중량 설계", 대한조선학회 추계연구발표회, 1989.
- [36] 장창두, 나승수, "선급 규정에 의한 유조선의 최적 구조 설계에 관한 비교 연구", 대한조선학회 추계연구발표회, 1989.
- [37] 장창두, 나승수, "Narrow Wing Tanker의 최적 구조 설계에 관한 연구", 선박구조연구회, 1990.
- [38] 장창두, 나승수, 이 화룡, "이중 선각 유조선의 최적 구조 설계 System개발", 대한조선학회 추계연구발표회, 1991.
- [39] 장창두, 나승수, "대형 이중 선각 유조선의 최적 구조 설계 System 개발", 대한조선학회 추계연구발표회, 1992.
- [40] 장창두, 나승수, "선체 구조 해석 및 설계를 위한 일반화 경사 처짐법 개발에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제29권 제4호, 1992.
- [41] 윤장호, 양영태, 선박 최적 구조 설계(Ⅰ)-B/C의 최소 중량 설계, 삼성중공업 선박해양연구소 보고서, 1986.
- [42] 김성찬 외, D/B & D/H Tanker의 중앙단면 최적화 program 개선, 삼성중공업 선박해양연구소 보고서, 1992.
- [43] 윤장호, 김현권, 선박 최적 구조 설계(Ⅱ)-Tanker의 최소 중량 설계, 삼성중공업 선박해양연구소 보고서, 1987.
- [44] 윤 장호, "Tanker의 최소 중량 설계에 관하여", 선박구조연구회 발표회, 1988.
- [45] 윤장호, 파형 격벽 최적 설계 program, 삼성중공업 선박해양연구소 보고서, 1985.
- [46] 김창욱 외, 상하부 stool을 고려한 파형 격벽의 최적 형상 연구, 삼성중공업 선박해양연구소 보고서, 1988.