

# 구조-하중 설계를 고려한 공진화 구조 설계시스템

## Co-evolutionary Structural Design Framework: Min(Volume Minimization) —Max(Critical Load) MDO Problem of Topology Design under Uncertainty

양 영 순†                      유 원 선\*                      김 봉 재\*\*  
Yang, Young Soon              Ruy, Won Sun              Kim, Bong Jae  
(논문접수일 : 2003년 4월 19일 ; 심사종료일 : 2003년 9월 3일)

### 요 지

구조적 성능이 주어진 설계하중에 대해서만 최적화되는 현행 구조설계에 있어서, 공학자의 직관과 경험에 의해 추정된 하중만을 대상으로 최적화된 구조물은, 추후 발생 가능한 여러 하중패턴에 대해 완벽한 성능을 보장해 줄 수 없다. 그래서 흔히 다중 하중 경우에 대한 최적 구조설계 방법 등으로 구조물의 안전성을 설계하고 있으나, 사전에 구조물에 작용하는 다양한 하중패턴을 아는 것은 그리 용이하지 않다. 본 논문에서는 입력으로 작용하는 하중의 패턴 결정과 구조물의 형상 진화를 동시에 고려할 수 있는, 공진화 구조설계(Co Evolutionary Structural Design Framework, CESD)라 명명한 새로운 구조설계 방식을 제안하고, 연성을 가지는 두 discipline, 즉 구조 위상설계와 하중설계를 동시에 연속적으로 수행하면서 최적설계를 하는 공진화 최적 설계 시스템을 개발하였다. 다시 말해 주어진 구조형상에 대해 구조물을 가장 취약하게 하는 하중패턴을 구하는 하중설계와, 주어진 하중패턴에 대한 최적구조 위상을 구하는 위상설계를 반복적으로 수행하여 최적설계를 하는 MDO (Multidisciplinary Design Optimization) 설계방법을 개발하였다. 본 접근 방식의 유용성을 평가하기 위해서 10 bar truss 구조물과 Jacket Type 구조물을 예제로 제시하였다. 뿐만 아니라 단순히 확정론적 입장에서 최적설계만이 아니라, 다분야 통합최적설계 입장에서 입력변수의 변동성도 함께 고려할 수 있는 확률론적 설계방법을 함께 수행함으로써 구조물의 안전성을 정량적으로 평가하도록 하면서, 신뢰성 최적설계에 흔히 요구되는 과도한 계산시간을 효율적으로 처리 가능한 SORA(Sequential Optimization and Reliability Assessment) 방법의 유용성도 확인하였다.

**핵심용어** : 하중설계, 구조위상설계, 공진화 최적설계, MDO, 신뢰성 최적설계, SORA

### Abstract

Co Evolutionary Structural Design(CESD) Framework is presented, which can deal with the load design and structural topology design simultaneously. The load design here is the exploration algorithm that finds the critical load patterns of the given structure. In general, the load pattern is a crucial factor in determining the structural topology and being selected from the experts' intuition and experience. However, if any of the critical load patterns would be excluded during the process of problem formation, the solution structure might show inadequate performance under the load pattern. Otherwise if some reinforcement method such as safety factor method would be utilized, the solution structure could result in inefficient conservativeness. On the other hand, the CESD has the ability of automatically finding the most critical load patterns and can help the structural solution evolve into the robust design. The CESD is made up of a load design discipline and a structural topology design discipline both of which have the fully coupled relation each other. This coupling is resolved iteratively until the resultant solution can resist against all the possible load patterns and both disciplines evolve into the solution structure with the mutual help or competition. To verify the usefulness of this approach, the 10 bar truss and the jacket type offshore structure are presented. SORA(Sequential Optimization & Reliability Assessment) is adopted in CESD as a probabilistic optimization methodology, and its usefulness in decreasing the computational cost is verified also.

**Keywords** : load design, structural topology design, co evolutionary structural design, probabilistic optimization, SORA

† 책임저자, 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과 교수  
전화: 02 880 7338 ; Fax: 02 888 9298  
E-mail: ysyang@gong.snu.ac.kr  
\* 서울대학교 공학연구소 연구원  
\*\* 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

\* 이 논문에 대한 토론회를 2003년 12월 31일까지 본 학회에 보내주  
시면 2004년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

구조설계의 연구는 과거 한 세기를 거치면서 이론과 응용 면에서 상당한 발전을 이루어 왔다. 하지만 아직도 산업 현장에서 핵심적으로 중요하게 사용되지 못하는 현실을 돌아보면 다음과 같은 문제점을 찾아볼 수 있다. 첫 번째로 산업 현장의 복잡한 시스템을 통합하여 문제 정식화시키기에 아직 무리가 있으며, 두 번째로는 설계에 필요한 다양한 인자들에 관한 불확실성을 충분히 고려할 방안이 정립되지 못해, 비교적 현실적이지 못하다는 이유에 기인한다. 본 논문에서는 신뢰성 기반 최적설계에서 주로 고려되어 온 하중크기, 물성치, 기하학적 정보들의 불확실성과 더불어 하중패턴의 불확실성까지 고려할 수 있는 새로운 설계 프레임워크를 통해 이러한 불확실한 요인들의 영향을 가능한 설계단계에 포함시킴으로써 두 번째 문제점을 완화시킬 수 있는 대안을 제시하고자 한다.

근래 구조설계 분야에서는 불확실성을 고려한 강건한 구조물을 설계하는 연구가 한창이다. 구조성능에 영향을 미치는 특성 인자들의 영향에 둔감한 구조물, 혹은 확률론적 변동을 고려하여 파괴확률을 고려한 구조설계 등이 대표적인 예가 될 수 있다. 전자는 흔히 강건설계라 지칭되고, 후자는 신뢰성 기반 설계라고 통칭된다. 표준화된 정의는 아니지만 최적화 기법의 관점에서 보았을 때, 전자는 설계자의 의도인자(Control Factor) 혹은 제어할 수 없는 인자(Noise Factor)에 관한 목적함수의 변동에 관심을 두며, 후자는 인자의 특성상, 불확실성을 내포하는 랜덤 변수들을 고려하여 주어진 파괴확률을 만족하는 보다 안전한 구조물의 설계를 지향한다.

기술된 두 방법의 공통점은 이미 정해진 설계 파라미터의 제조상 혹은 재료의 특성상 발생할 수 있는, 평균치를 중심으로 하는 변동량에 관한 불확실성을 언급하고 있다. 물론 이에 관한 고려도 중요한 의미를 담고 있어 활발한 연구가 진행되고 있는 상황이며, 본 연구에서도 적극적으로 신뢰성 기반 최적설계에서 반영하고 있으나, 정작 중요하고 결정적인 불확실성은 어떤 평균치의 형태(하중패턴)를 설계에 반영하는가에 있다. 특히 구조 최적 설계점에 지대한 영향을 미치는 설계하중의 경우에는 어떠한 형태(혹은 패턴)의 입력하중을 작용할 것인가에 관한 결정이, 이미 계획된 하중에 변동량을 반영하는 결정보다, 최종 결과물의 성능에 미치는 영향이 지배적이다. 그림 1에서는 1(a)의 최적 구조물과의 차이점을 검토하기 위해서 하중패턴의 변화(1(c))와 하중치의 변동량을 고려한 확률 최적화 결과(1(b))를 보여준다. 예상하듯이, 하중치의 변동보다는 하중패턴의 변동에 따른 영향이 최적 구조물의 형상에 더욱

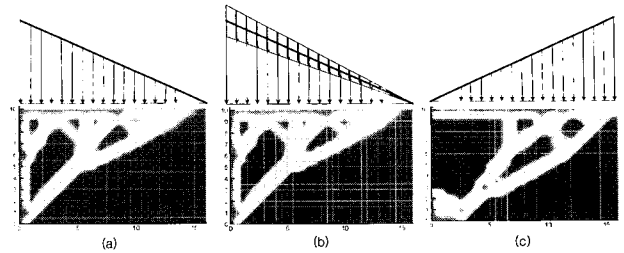


그림 1 Effects of the different load mean and deviation

민감하게 작용됨을 확인할 수 있다.

결국 설계에 영향을 미치는 주요 하중들을 사전에 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있는데, 실제 설계의 경우 구조물에 어떤 하중이 작용할까를 미리 안다는 것은 그리 쉬운 문제가 아니다. 다만 경험적으로 구조물이 견뎌야 하는 최대하중을 통계적으로 추정하여 이를 반영하고 있으나, 이는 절대치에 관한 추정일 뿐 2, 3차원적인 구조물의 하중 작용점들에 관한 하중 분포가 정해진, 구체적인 입력으로 볼 수 없다. 결국 설계 과정에서 하중의 절대치와 작용점에 관한 결정도 포함시키는 것이 보다 실용적이고 합리적인 최적설계의 방향이라는 점이 본 연구의 동기가 되었다. 다시 말해, 구조물의 응답을 최적화하는 구조위상 해석과 구조물에 가장 취약한 하중패턴을 구하는 과정을 MDO 관점에서 해결하려는 계획으로 공진화 구조설계(Co-evolutionary Structural Framework)라는 새로운 구조설계 방법을 제시한다.

공진화 최적화 기법에 관한 연구는 Santa Fe Institute를 중심으로 활발하게 연구되고 있는 분야인데, 주로 진화 최적화(Evolutionary Optimization) 혹은 설계 분야에서 두 종(Species)의 적합도(Fitness) 결정에 있어서 상호 의존적으로 서로를 진화시키는 방향으로 알고리즘이 진행되거나,<sup>1)</sup> 설계의 요구조건과 그에 상응하는 설계안이 상호 의존적인 관계를 맺으면서 진화해 가는 원리가 적용된다.<sup>2)</sup> 본 연구에서의 구조위상설계 Discipline과 최대하중설계 Discipline의 경우, 하중설계는 구조설계의 진화상태를 고려하면서 설계의 요구조건을 구성하는 역할을 하게 되며, 구조위상설계는 주어진 설계 요구조건을 최적으로 만족시키기 위한 설계안 도출의 역할을 담당한다. 이들 두 Discipline은 상호 의존적으로 진화해 가면서 궁극에는 최적화되는 성향을 가지게 되므로 이들의 관계와 방향성을 공진화 설계라 지칭하였다. 이와 유사한 연구로는 Bental과 Nemirovski<sup>3)</sup>가 연구하였던 "Robust Truss"에 관한 것이 있다. 여기서는 주어진 하중 시나리오도 만족하고 비교적 적은 규모의 우발적인 하중에도 견딜 수 있는 강건한 구조물을 확보하고자 하였다. 본 논문의 접근 방식과는 달리 안정성에 관한 구속조건 없이 주어진 체적을 넘지 않는

한계 내에서 Compliance를 최소화시키고자 하였으며 이는 합리적인 구조물이라 할 수 없는 불안정성을 가지는 구조물이 생산될 가능성이 있는데, 이를 합리적인 구조물로 전환하기 위해서 논문<sup>3)</sup>에서 언급하고 있는 소위 "Active Node"에 소규모의 하중을 작용시켜서 이를 제거시키려는 의미로 활용하였다. 이러한 접근 방식은 모든 하중 집합을 자동적으로 탐색해 나가는 본 접근 방식과 뚜렷한 차이를 보이며 해당 구조물이 구해진 하중에 영향을 받아서 진화해 간다는 독특한 특징을 찾아볼 수 없다.

2장에서는 본 논문에서 주장하는 구조설계 프레임워크 자체에 관한 설명으로 이루어지고, 3장에서는 10-bar Truss 예제를 통해서 설계 하중패턴의 불확실성에 관한 설명을 구체화 하였으며, 4장에서는 Jacket Type의 구조물을 대상으로, 변동량의 불확실성까지 포함한 프레임워크의 실례를 들어보고, 활용가능성에 관한 논의를 하였다. 5장에서는 다양한 구조물에 본 개념을 적용시키기 위한 계획과 방안, 그리고 결론을 실었다.

## 2. Co-Evolutionary Structural Design Framework의 구조

본 프레임워크는 상호 연성이 존재하는 두 개의 Disciplinary 모듈로 구성된다(그림 2). 첫 번째 Disciplinary 모듈(구조 위상 최적화 모듈)은 통상적인 구조 최적화 기법에 적용되었던 그대로다. 해당 구조물의 구속조건을 만족시키면서 목표 성능을 최적화시키는 과정인데, 다

만 차이점은 두 번째 모듈을 통해 산출되는 하중패턴 모두를 구속조건에서 고려하는 Multi-Loading Case 최적화 모듈을 사용하고 있다는 점이다. 본 논문에서는 구조물의 위상과 치수를 포함하는 형상(Shape) 최적화를 대상으로 한다. 설계변수의 변동량에 관한 불확실성의 처리를 위해서 구조 형상 최적화 모듈에 SORA<sup>4)</sup>의 알고리즘을 첨가하였다. 이는 확률론적 최적화 모듈을 구성하기 위해 필요한, 연성된 두 최적화 과정(외부를 구성하는 일반적 최적화 과정과 파괴확률을 얻기 위한 최적화 과정)으로 인해 신뢰성 기반 최적설계 시에 요구되는 과도한 해석의 반복과정을 획기적으로 줄일 수 있도록 신뢰성 구속조건을 확률론적 최적화 과정의 구속조건으로 대체하여 고안된 방법이다. 본 논문의 적용에 있어서 특이할만한 점으로, 확률론적 해석을 위해 필요한 확률변수의 설정에 있어서 논문<sup>4)</sup>에서 주로 설계변수만을 확률변수로 고려하여 설계변수 도메인에서의 구속조건의 이동을 중점적으로 다루었다면, 본 연구에서는 설계인자(design parameters)만을 확률변수로 다루어 설계인자의 표준화된 확률변수공간에서 구속조건의 이동이 반영되도록 하였다. 이러한 적용은 최적화 과정에 필요한 과도한 반복 계산을 2~3번의 확률론적 최적화 과정만으로 신뢰성 기반 최적설계를 해결할 수 있으면서, 과도한 계산비용을 절감하는 효과도 얻을 수 있는 장점이 있다. 결국 하중패턴의 불확실성을 고려하는 하중모듈 큰 틀 속에서, 설계인자의 변동량까지도 구조 위상설계 최적화 과정에 추가시킬 수 있도록 하는 역할을 SORA가 담당하게 된다. 본 모듈의 출력은 하중 데이터베이스에 저장된 모든 하중 케이스들에 대응하는 최적 구조형상이고 이는 두 번째 모듈의 입력으로 작용한다.

두 번째 Disciplinary 모듈(최대하중 설계)은 주어진 형상을 대상으로 가장 치명적인 하중패턴을 찾아내는 하중 설계과정이다. 즉 해당 구조물의 특성상 가장 큰 파괴를 가져올 수 있는 하중패턴이 고유하게 존재한다는 가정을 하게 되는데, 물론 해당 하중패턴이 다수 존재할 수 있고 만일 그렇다면 이들을 모두 데이터베이스에 보관한다. 두 번째 모듈의 정식화는 어떤 하중이 가장 구조물에 치명적인가에 대한 판단에 따라 결정된다. 문제에 따라서 부재의 최대응력이 최대가 되는 경우의 하중으로 볼 수도 있고 부재의 최대변위가 최대가 되는 경우의 하중으로 볼 수도 있고 이미 정의된 다른 파괴양식이 있다면 이러한 파괴양식에 대해서 파괴확률이 최대가 되는 경우의 하중으로 볼 수도 있을 것이다. 본 논문에서는 현 구조 위상에 새로 제시된 하중패턴이 어떤 영향을 미치는가에, 항복파괴에 대한 파괴확률이 가장 객관적인 판단 기준을 제시할 수 있다고 판단하여 이를 통해 하중을 평가하였으며 이는 알고리즘 중

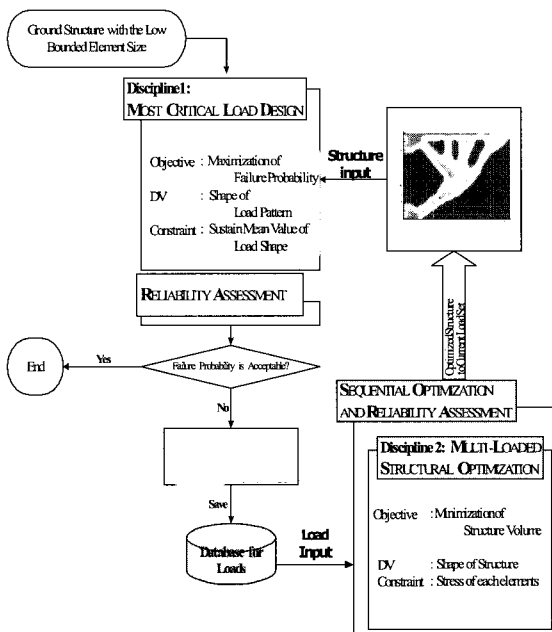


그림 2 Overview of Co-Evolutionary Structural Design

료 조건으로 활용된다. 구체적으로 말하면, 주어진 구조위 상에 최대한의 악영향(최대응력 또는 파괴확률)을 끼치는 하중패턴에 관한 파괴확률을 계산하여서 이 수치가 이미 설정된 기준 파괴확률보다 작게 된다면 알고리즘이 종료하게 된다. 본 하중설계 과정에서 확보된 하중패턴을 데이터 베이스에 보관하게 되는데, 여기서 반복된 하중패턴이 발견되면 알고리즘이 종료되는 조건으로 사용토록 하였다.

2장의 서두에서도 언급하였듯이, 두 모듈은 첫 번째 모듈의 출력이 두 번째 모듈의 입력으로 사용되고, 두 번째 모듈의 출력이 다시 첫 번째 모듈의 입력이 되는 연성관계를 가지고 있으며, 이러한 프레임워크는 MDO 분야에서 널리 벤치마킹되고 있는 비행체 날개의 구조 및 유체 모듈의 연성관계와 매우 유사한 형태이다.<sup>5)</sup> 이 연성을 풀어가기 위해서는 역시 순차적인 방법을 채택할 수밖에 없다. Grid-like의 구조물의 경우, 가장 적은 치수로 구성된 Ground Structure를, Plate Structure인 경우 각 요소의 강성을 최소화 하는 구성 등으로 하중 설계와 구조 형상 설계에 관한 반복 작업을 진행하다가 더 이상 형상의 변화가 없어서 수렴하게 되거나, 하중 설계로 확보된 파괴확률이 적정한 수준까지 도달하게 되면 반복을 멈추게 한다. 결국, 각 Disciplinary 모듈의 출력은 수렴하기까지 상호 연관된 진화 과정을 거치게 된다. 첫 번째 모듈의 출력인 구조 형상은 초기에는 하나의 극한 하중에 견딜 수 있는 최적 구조물이지만 반복이 진행되면서 다양한 극한 하중에 견디기 위해서 진화하게 되며, 두 번째 모듈의 출력인 하중 패턴은 진화하는 구조 형상을 파괴시키려는 목적으로 또

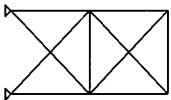
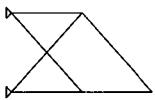
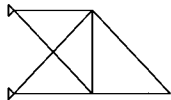
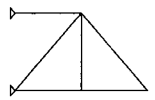
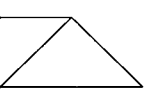
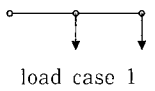
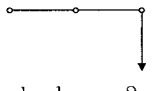
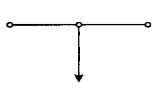
다른 하중패턴을 찾아내기 위해 진화한다. 결국, 구조형상과 하중패턴은 상호를 의식하면서 진화하게 되며 더 이상의 변경이 없게 되면 수렴한다. 이러한 방식으로 진화된 구조 형상은 주어진 문제 구성에서의 어떠한 하중에도 견딜 수 있는, Taguchi의 강건설계와는 구분되는 강건한 구조물이라 칭될 수 있다. 물론 첫 번째 모듈에는 Taguchi의 강건설계와 확률론적 최적화 개념을 추가할 수 있으며, 두 번째 모듈은 신뢰성 해석을 포함할 수 있는 일반적인 정식화임을 확인할 수 있다.

실제 환경에 노출된 구조물의 경우, 한 종류의 하중만을 받는 경우는 드물다. 이러한 경우를 고려하기 위해서 Multi-Load Case를 고려하게 되지만, 문제는 어떠한 하중패턴을 고려해야 하는가인데, 흔히 공학적 직관과 경험을 통한 정보를 활용할 수밖에 없으나, 이러한 방식으로 고려되는 하중패턴 중에는 계산비용만 소요되고 설계에는 아무 영향이 없는 경우가 있을 수 있다. 따라서, 가장 중요한 점은, 강건 구조물을 위해 꼭 필요한 하중패턴이 간과되지 않도록 해야 한다는 점이다. 공진화 구조설계의 접근 방식에서는 해당 구조물에 가장 치명적인 하중패턴을 구하고, 이를 설계에 지속적으로 반영하고 있다는 점에서, 하중패턴을 인지하는가의 유무가 기존 방식과의 다른 점이다.

### 3. Example of 10-bar Truss Structure

10-bar 트러스 구조물을 통해, 하중패턴의 평균 불확실성을 고려한 프레임워크의 구체적인 설명을 진행하였다. 2

표 1 Optimization results of the prefixed topology against the load cases

						
		Topology 1	Topology 2	Topology 3	Topology 4	Topology 5
	Obj.	1593.18	1584.00	1655.43	1728.00	-
	$\xi$	0.10, 0.10, 3.94, 0.10, 5.57, 0.10, 7.94, 8.06, 5.75, 5.57	4.00, 5.66, 8.00, 8.00, 5.67, 5.67	4.00, 5.66, 1.98, 6.02, 9.98, 8.46, 2.85	4.00, 5.66, 4.00, 12.0, 4.00, 11.31	-
	Obj.	2313.20	2309.10	2499.46	2307.60	2304.41
	$\xi$	0.10, 0.10, 7.94, 0.10, 11.2, 0.10, 15.93, 8.07, 0.10, 11.22	8.00, 11.31, 16.00, 8.00, 0.10, 11.31	8.00, 11.31, 5.43, 10.57, 13.43, 7.68, 3.64	8.00, 11.31, 0.10, 16.00, 8.00, 11.31	8.00, 11.32, 16.00, 11.32
	Obj.	890.42	881.38	905.94	1164.29	-
	$\xi$	0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 7.94, 11.22, 0.10	0.10, 0.10, 0.10, 8.00, 11.31, 0.10	0.10, 0.10, 0.92, 0.92, 7.08, 10.02, 1.31	0.10, 0.10, 8.00, 8.00, 0.10, 11.31	-

장에서도 언급되었듯이 본 문제의 대상은 위상을 고려한 설계이다. 모든 위상구조를 비교해 볼 수 없으므로 유망하다고 판단되는 4개의 위상을 대상으로 본 예제에서 생각할 수 있는 대표적인 하중패턴 3가지에 대해 최적화된 결과를 표 1에 보였다. 각 하중패턴 별로 서로 다른 결과를 보여주며 해당 최적 위상이 다름을 확인 할 수 있다. 그림 1에서 확인한 바와 같이, 입력으로 작용하는 하중패턴이 최적구조물 결정에 큰 영향을 미치는 것을 다시 확인할 수 있었으며, 이렇게 생성된 최적 구조물은 주어진 하중에 치우친 구조물이라고 유추해 볼 수 있다. 예를 들어, 표 1의 위상 4번째에 해당하는 구조물의 경우 하중패턴 2에는 최적 구조물이지만, 다른 하중패턴에서는 가장 낮은 성능의 구조물임을 알 수 있다. (물론 두 번째 하중 경우에 위상 5번째가 위상 4번째 보다 우수한 성능을 가지고 있지만 본 위상은 치수설계에서 위상설계로의 후처리과정을 거쳐서 나온 결과이고 하중 case 1과 3번의 하중을 가할 수 있는 절점이 하나 제거된 경우이므로 다른 위상과의 비교에서는 제외한다. 이는 Co-Evolutionary Structural Design에 관한 설명에서 활용된다.) 결국 정확한 하중과 구조물간의 관계에 관한 분석 없이 최적구조물을 제시하는 것은 위험한 설계 행위가 될 수 있다.

다양한 하중패턴을 최적설계에 반영시킬 수 있는 방안을 생각해 보면 다음 세 가지 정도를 제시할 수 있다.

- 1) 각 하중패턴에 관한 최적점을 확보한 후, 각 요소치수에 대해서 가장 큰 값들로 구조물을 구성하는 방법
- 2) 설계에 직접적인 관련이 있는 모든 하중패턴을 구해서 이들을 반영한 최적 설계안 도출 방법
- 3) 공진화 구조설계

첫 번째 방안, 즉 하중패턴 별로 구해진 최적해의 위상과 사이즈를 누적하여 새로운 구조물을 구성(표 2 참조)하고 이에 관한 분석을 시도해 본다. 여기서 분석이라 함은 이렇게 생성된 새로운 구조물에 각각의 하중을 작용하여 각 부재에 걸리는 응력을 표시하는 것으로 표 3에 나열하였다. 음수는 해당 요소에서 만족영역에, 양수는 불만족영역에 위치함을 의미한다. 이러한 조합으로 구성된 구조물은 비록 각각의 최적해 보다는 사이즈 면에서 보강이 되었지만 각각의 하중패턴에도 견디지 못하는 결과를 양산하였다. 두 번째와 세 번째 하중 케이스의 최종 결과를 혼합하

표 2 Optimum of each load case

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	OBJ
Case1	0.1	0.1	3.9	0.1	5.6	0.1	7.9	8.1	5.8	5.6	1593.2
Case2	0.1	0.1	7.9	0.1	11.2	0.1	15.9	8.1	0.1	11.2	2313.2
Case3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	7.9	11.2	0.1	890.4
Total	0.1	0.1	7.9	0.1	11.2	0.1	15.9	8.1	11.2	11.2	2878.9

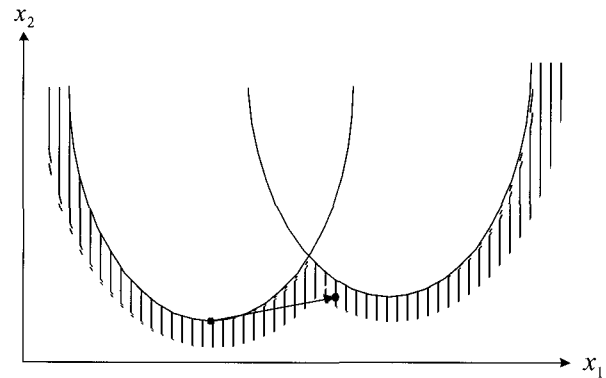


그림 3 Risk of the reinforcement

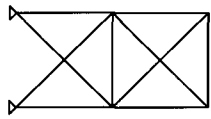
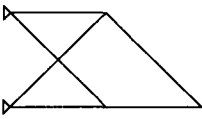
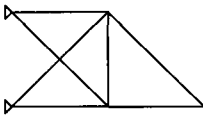
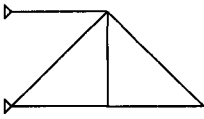
여 요소들이 구성되었으며, 이는 힘의 재분배 과정에서 허용응력을 넘어가는 현상이 나타남을 확인 할 수 있다. 정성적인 차원에서 이러한 현상은 그림 3에서도 확인해 볼 수 있듯이, 최적점에서 설계변수의 보강으로 발생한 새로운 점은 만족영역의 Non-Convex한 형상 때문에 불만족 영역으로 전이될 수 있음을 의미한다. 비슷한 현상은 Kim<sup>6)</sup>의 논문에서도 확인해 볼 수 있는데, 연속적 설계변수의 최적결과로 이산적인 설계변수 처리를 하고자 할 때, Round-Off 방식의 설계변수의 변형이 불만족영역의 설계점으로 전이되는 현상을 보고하고 있다. 결국 이러한 결과가 시사하는 의미는 어떤 하중에 치중된 최적설계 구조물을 해석과 분석 없이 함부로 보강해서는 보강하기 전 구조물보다 열등한 성능을 보여줄 수 있다는 점이다. 결국 이는 단순한 합산을 통한 결과보다는 체계적인 접근 방안이 필요하다는 반증이 된다.

위에서 제시된 두 번째 방안의 결과가 표 4에 제시되었다. 주목해야 할 부분은 각 하중패턴에 관한 최적화 구조물과는 다른 결과가 도출되었다. 하중패턴의 변화에 따라 한번도 최적해로 제시된 바 없는 위상 3번 구조물이 주어진 모든 하중패턴 집합에 관한 최적해이다. 하중패턴의 평균치를 고려한 강건한 최적 구조 형상은 각각의 하중패턴에

표 3 Analysis of the reinforced structure

Total	S{1}	S{2}	S{3}	S{4}	S{5}	S{6}	S{7}	S{8}	S{9}	S{10}
Case1	0.786	0.786	0.499	0.697	-0.499	-0.529	-0.497	-0.012	-0.499	-0.492
Case2	-0.001	-0.001	-0.005	0.412	-0.004	0.835	-0.010	0.026	-0.924	-0.027
Case3	-0.429	-0.429	-0.992	-0.193	-0.993	1.777	-0.979	-0.050	-0.034	-0.957

표 4 Optimums of the prefixed topologies against the multi-load case

				
	Topology 1	Topology 2	Topology 3	Topology 4
Objective (Multi-load case)	2569.25	2880.04	2500.18	2592.09

관한 최적형상과 다를 수 있다는 것을 의미한다. 또 하나 주목할 점은 하중패턴 1에 관한 모든 구속조건은 불활성화 (Inactive)된 결과가 나와 결국 설계에 아무런 영향을 미치지 못하였다. 하중패턴 1을 고려하지 않아도 같은 결과가 얻어진다는 의미이다. 1번 패턴을 제외한 나머지 하중 패턴 2, 3번이 다음에 볼 공진화 구조설계의 접근방식에서 고려해야 하는 하중패턴으로 밝혀진다. 가능한 모든 하중 패턴(치명적인 하중패턴이든, 중요하지 않은 하중패턴이든)을 포함하여 최적해로 접근시키는 본 방안은 본 논문에서 설정한 문제의 최종해이며 목표다. 하지만 문제는 특히 최종 최적해에 영향을 미치는 주요 하중패턴, 다시 말해서 치명적인 하중패턴을 어떻게 확보하는가에 관한 의문점이 본 방안에 남게 된다. 아무튼, 고려해야 하는 하중패턴을 이미 안다면 Multi-Load 문제와 공진화 구조설계의 결과는 동일해야 한다.

확정론적 입장에서의 공진화 구조설계를, 본 예제를 이용해서 구체적으로 설명해 보자. 시작은 최소 사이즈로 구성된 Ground Structure를 대상으로 하중 설계(2nd Disciplinary 모듈)를 진행한다. 확보한 하중패턴을 데이터베이스에서 추출하여 형상(위상과 치수) 설계(1st Disciplinary 모듈)를 시행하며, 이를 기반으로 다시 하중 설계(그림 4: 2nd Load max. Optimization)를 수행하며 두 번째 형상 설계에서는 보관된 총 2개의 하중패턴을 바탕으로 Multi-Load 형상 최적화 과정을 진행한다. 이러한 과정을 수렴이 될 때까지 반복하는데, 확정론적 입장에서의 수렴조건은 새롭게 획득한 하중패턴이 데이터베이스에 이미 보관된 하중의 그것과 일치하거나, 구조 형상의 변화가 없게 되는 조건이다. 이미 고려된 하중패턴으로는 당연히 형상의 변화가 생길 수 없으며, 구조 형상에 영향을 미치지 못하는 하중은 설계에 영향을 주는 하중패턴이 아니므로 더 이상의 반복 과정 없이 수렴으로 결정하였다. 각 형상설계 단계에서는 최적 위상을 위한 후처리 과정을 밟게 된다. 여기서 최적 위상 후처리 과정이라 함은 치수 최적화 과정을 통해 확보된 치수 정보로부터 상응하는 위상으로의 전환과정을 일컫는다. 자세히 언급하자면 확보된 최적 치수를 이용하여 해당 요소와 절점을 제거하는 방식

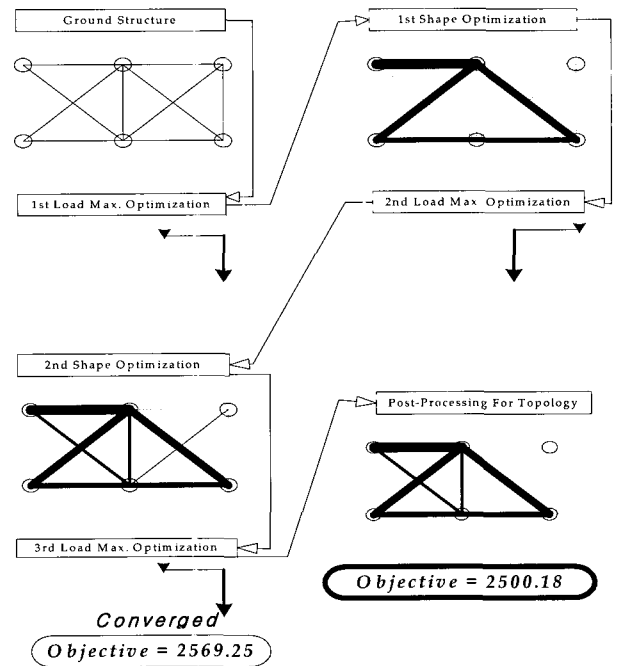


그림 4 Co-Evolutionary Structural Design Overview of Example 1

으로 진행되는데, 본 논문의 논점과 거리가 있으므로 생략하도록 한다. 다만 그림 4의 첫 번째 형상 최적화의 결과를 살펴보면 기타 유망한 위상설계와의 비교를 제시하는 표 1의 2번째 하중 case의 결과에서도 볼 수 있듯이, 적절한 정해를 탐색하고 있음을 확인할 수 있다. 예상했던 바와 같이 최종 구조형상은 이미 하중 정보를 확보하고 접근하였던 결과와 일치함을 확인할 수 있었다. 다만 이미 확보한 하중패턴을 입력으로 진행되었던 Multi-Load 최적화 기법과 달리 하중-형상 설계가 반복되면서 해당 설계에 중요한 하중패턴을 스스로 찾아서 설계할 수 있다는 차이점이다.

다중 하중을 처리하기 위한 방안을 3가지로 분류하여 각각의 특징을 살펴보았다. 첫 번째 방식은 정해로 접근할 수 있는 방안이 아니며 계산비용도 많이 들 수밖에 없으므로 논외 대상이고, 두 번째 방식은 정해를 확보할 수 있는 잘 알려진 방안이지만 본 논문에서 언급하고 있는 주요한 하중패턴을 미리 확보한 연후에나 가능한 방안이다. 이 문제

는 첫 번째 방안의 공통된 문제이기도 하다. 본 논문에서 제시하는 공진화 구조설계 방안은 스스로 설계에 필요한 주요 하중패턴을 찾아가면서 정해를 탐색할 수 있는 능력을 보이고 있으므로, 알려지지 않은 다중 하중을 처리하는 문제에 있어서 보다 유용한 접근방법이라 생각된다.

#### 4. Example of Jacket-Type Structure

예상할 수 있는 하중패턴을 가지는 예제에서 벗어나서 비교적 복잡한 형상을 가지는 Jacket-Type 구조물을 대상으로 수치 실험을 수행해 보았다. Ground Structure의 절점은 12개, 가능한 연결 요소는 36개를 가지는 구조이다. 문제 설정에서 가장 핵심적인 것은 하중패턴의 대상이 되는 하중절점의 결정이다. 하중패턴의 다양화를 위해서 위쪽과 왼쪽 면에 존재하는 4개의 절점에 각 방향으로  $4.e+5$ 에 해당하는 평균 하중을 갖도록 설정하였으며 경계조건은 바닥부분을 3차원 방향 모두 고정 형식을 택하였다.

Jacket-Type Structure에서 구체적으로 다루고자 하는 부분은 3장에서 설명된 하중패턴에 관한 불확실성을 포함하고 확률론적 최적화와 강건설계 등에서 다루고 있는 평균치의 변동량에 관한 불확실성까지 추가된 공진화 구조설계의 설명이다. 우선 본 예제에서 선정한 확률변수는 재료의 특성치에 해당하는 Young's Modulus(E)와 허용 응력( $\sigma_Y$ )으로서 각각 10%의 변동을 가정하였다. 구조 형상

설계 모듈에 추가된 SORA는 3장의 확정론적 최적화 모듈을 대체하는 일종의 확률론적 최적화 모듈이며, 특히 설계 변수가 아닌 설계인자만을 확률변수로 태함으로써 확정론적인 그것에 비해 5배(107,331/19,772)의 계산 비용이 소요됨을 확인할 수 있었다. 계산 비용의 절감을 위해서 확정론적 최적화 결과를 초기치로 선택하였으며 확정론적 최적화 모듈에서는 민감도 해석을 수행하였다. 이에 비해서, SORA 모듈을 연성이 존재하는 전통적인 확률론적 최적화 방법(62,045,403)으로 대체한다면 확정론적 접근 방식에 비해 3000배(SORA에 비해서는 600배)에 이르는 과도한 계산 비용이 필요함을 확인하였다(표 5 참조). 이는 설계변수의 개수가 많은 이유도 있겠지만, 본 문제구성의 특성상 Discipline 간의 반복이 진행되면서 다중하중처리로 인해 한계상태 방정식에 해당하는 구속조건의 수가 급격하게 증가하게 되는 데에 원인이 있다. 참고로 전통적인 확률론적 최적화 방법에서는 목표성능치(Target Performance) 기반의 탐색방법<sup>7)</sup>을 사용하였으며 SORA의 경우와 마찬가지로 확정론적인 최적화를 통해서 초기치를 확보하였다. 반복수에 따른 함수호출 수와 그에 해당하는 목적함수 수치가, 기존의 신뢰성 기반 최적설계(GPO)의 결과와 SORA의 결과에서, 첫 번째 수행 결과를 제외하고는 다른 방향을 나타내고 있다. 이는 두 접근 방식이 다른 결과를 주는 것에 기인하는 것이 아니라, 구조 형상에 변동이 가해질 때 해당하는 주요 하중의 결과를 조금씩 바뀌게 되고 이

표 5 Objective and No. of iteration history

Iter	Deter. Only		Deter.	SORA_1st	SORA_2nd	SORA_3rd	$\beta/P_f$	GPO*	
	Iter./Obj.	$\beta/P_f$	Iter./Obj.	Iter./Obj.	Iter./Obj.	Iter./Obj.		Iter./Obj.	
1	1808/6485	-8.00/1.0000	3489/6477	252/6805	-	-	-8.00/1.000	146412/6789	-8.00/1.000
2	2427/9582	-8.00/1.0000	3226/9573	504/9997	-	-	-8.00/1.000	272160/9999	-8.00/1.000
3	2442/10263	-8.00/1.0000	1207/11231	756/10658	756/10665	-	-8.00/1.000	351540/10631	-8.00/1.000
4	1389/10937	-8.00/1.0000	1136/11431	1008/10885	1008/10890	-	-8.00/1.000	429408/11124	-8.00/1.000
5	2015/11286	-8.00/1.0000	736/13809	1260/11538	1260/11567	1260/11564	-8.00/1.000	6841180/11470	-8.00/1.000
6	1701/11980	-8.00/1.0000	2595/11675	1512/12073	1512/12073	1512/12073	-8.00/1.000	1058400/12001	-5.98/1.000
7	1423/12264	-4.65/1.0000	1160/12556	1764/12679	1764/12684	1764/12683	-5.92/1.000	3004500/12470	-5.89/1.000
8	1506/12347	-3.49/0.9997	567/12674	2016/12885	2016/12952	-	-5.51/1.000	4897500/13000	-5.45/1.000
9	1025/12433	-1.74/0.9591	2134/12715	2268/12733	2268/12821	2268/13153	-3.10/0.999	5124801/13152	-3.50/1.000
10	1258/12448	-0.81/0.7910	2270/12752	2520/13188	-	-	-0.31/0.622	6542178/13225	-0.35/0.637
11	1025/12567	-0.33/0.6293	2378/12759	2772/12800	2772/12860	2772/13194	-0.29/0.614	5402609/13244	-0.24/0.595
12	545/12539	-0.13/0.5516	2436/12773	3024/12812	3024/12993	3024/13213	-0.23/0.591	8124795/13250	-0.19/0.575
13	1208/12759	<b>0.00/0.5000</b>	150/13077	3276/13026	3276/13225	-	0.18/0.429	6214785/13253	0.15/0.440
14			150/13278	3528/13024	3528/13225	-	0.32/0.375	7421546/13260	0.30/0.382
15			152/13279	3780/13395	3780/13241	3780/13262	1.99/0.023	6214589/13265	2.00/0.022
16			152/13279	4032/13028	4032/13235	4032/13229	<b>2.05/0.020</b>		
ttl	<b>19,772</b>		<b>D(21651)+S(85680) = Total(107,331)</b>					<b>62,045.403</b>	

\*GPO = General Probabilistic Optimization

들이 누적되어서 서로 다른 경로를 따라가고 있기 때문이다. 표 5에는 사용자가 종료조건으로 사용한 파괴확률이 0.02275( $\beta=2$ )이하가 되기까지 반복되는 과정 속에서 SORA가 결과를 배출하기까지의 반복 해석 수를 표시하고

있다.

참고로 SORA의 목표성능치 기반 접근방법과 달리 그림 3의 신뢰도 평가 부분에서는 신뢰도지수 기반 접근방법을 사용할 수밖에 없는데, 관심 설계점에 해당하는 신뢰도 지

표 6 Load pattern history - SORA

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
1	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	1.3E+03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05
2	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	3.9E+05	0.0E+00	7.8E+03
3	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	2.0E+02	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	8.8E+02
4	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	4.9E+02	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05
5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05
6	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	9.3E+02	0.0E+00	0.0E+00	3.2E+05	3.7E+03
7	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	6.2E+02
8	4.0E+05	8.5E+02	0.0E+00	1.4E+02	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	5.2E+02
9	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	4.9E+03	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	3.8E+03
10	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	7.6E+02	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	5.7E+02
11	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	5.9E+02
12	0.0E+00	5.5E+02	4.0E+05	4.5E+02	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	1.3E+03
13	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	6.5E+02	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	4.2E+02
14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	1.5E+03
15	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	3.6E+02	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05
16	0.0E+00	4.0E+05	1.6E+03	2.7E+02	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	8.9E+02

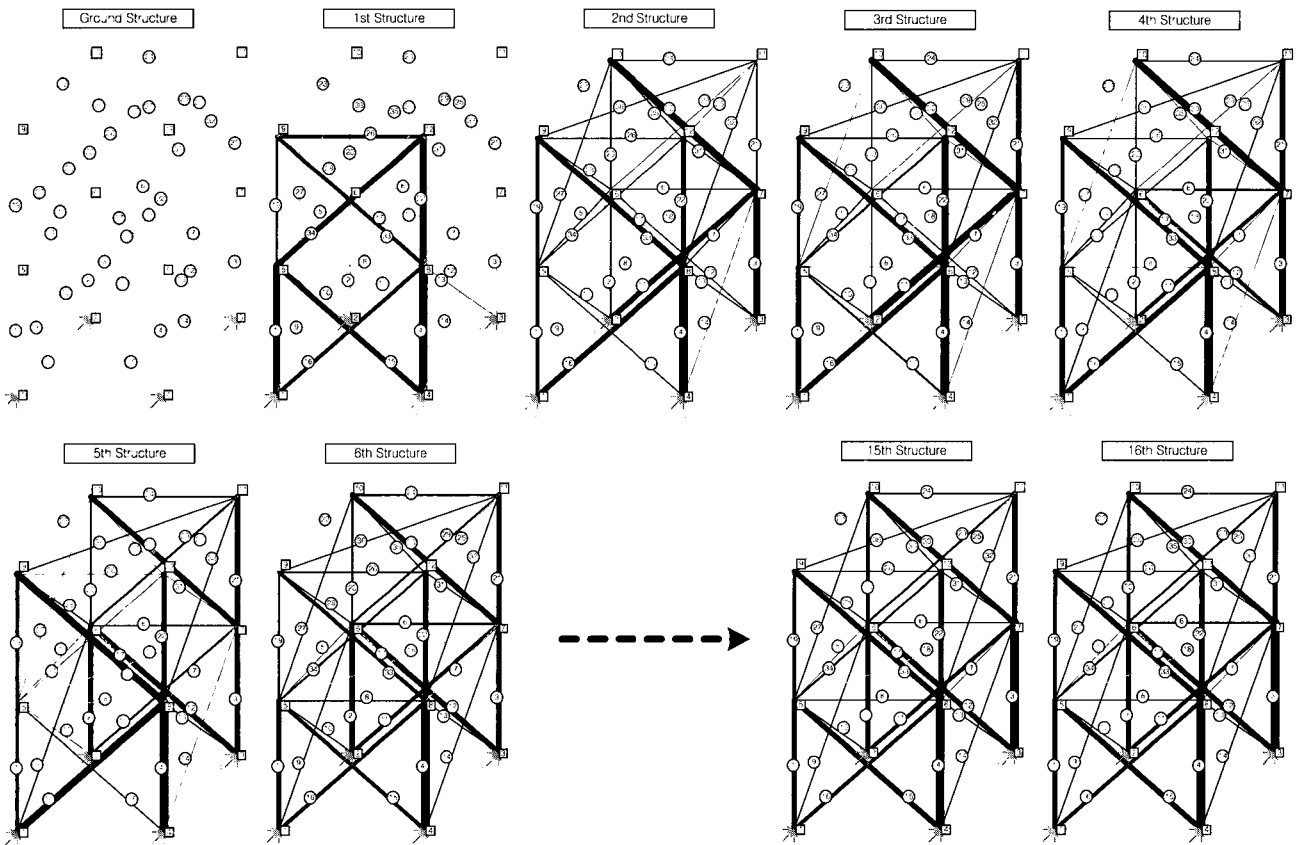


그림 5 Evolutionary Process of Jacket Type Structure (SORA)



수의 값이 너무 작거나 큰 치수에 해당하는 곳에서는 탐색이 불가능한 단점을 가지고 있다.<sup>7)</sup> 결국 해당 영역을 벗어나는 곳에서의 신뢰도지수 산정이 불가능하지만, 그 의미도 없는 구간이라고 할 수 있다. 본 수치실험에서는 신뢰도지수가 -8 이하로 떨어지는 구간은 신뢰성 해석을 수행하지 않고 -8로 설정하였다.

다양한 하중패턴이 극한 하중으로 확보되었고 최종 구조는 이러한 하중패턴을 모두 견딜 수 있도록 진화되었다. 간단하게나마 반복과정을 추적해 가면 우선 설정된 절점을 모두 있는 Ground Structure는 하중 설계 모듈에 입력되어서 해당 구조물에 가장 치명적인 하중패턴을 탐색하고 이에 관한 초기 Ground Structure의 파괴확률은 1.0으로 판명되었다. 종료조건을 만족시키지 못하였으므로 전 과정에서 구한 하중패턴을 작용시켜서 구조형상 최적화 모듈을 수행하는데, 우선 확정론적 최적화 모듈(Method of Feasible Direction)을 수행하여 SORA의 초기치를 확보하고 모든 구속조건의 파괴확률이 0.02275( $\beta=2$ ) 이하가 되도록 구조 형상을 설정하게 된다. 이러한 과정을 반복하여 얻어진 치명적인 하중들은 DB을 통해 모두 다음 단계의 구조형상 최적화 모듈에 참여한다. 결과는 표 6와 그림 5에서 설명되고 있는데, 하중과 구조형상의 경쟁적 진화 관계가 흥미롭다. 표 6의 1번 하중은 그림 5의 Ground Structure에 있어서 가장 치명적인 하중패턴이고, 이 하중은 다음 구조형상을 위한 하중으로 작용한다. 그림 5의 2번 구조물을 파괴시키기 위한 하중이 표 6의 2번 하중이며 이는 3번의 구조형상 생성을 위해 표 6의 1번 하중과 함께 참여하는 방식을 따른다. 구조형상의 진화 과정은 하중들에 경제적으로 견디기 위한 기본 골격이 일단 완성되고 이에 약한 부분이 최소 중량을 유지하면서 보강되는 형태로 진행되며 필요에 따라 위상설계 차원에서 제거되었던 새로운 요소들이 참여하는 현상도 살펴볼 수 있다. 반면에 하중 부분은 전 과정에서 간과되었던 하중패턴을 찾아가면서 구조형상의 진화를 돕는 경향이 뚜렷하다.

## 5. 결론 및 향후 연구

기존의 구조 최적화 과정은 치명적인지, 혹은 최적화 결과에 영향을 미치지 못하는 하중(Inactive Load)인지 구분하지 않은 상태에서의 설계의 필요상 가장 합리적이라고 가정된 하중 집합을 대상으로 하나의 구조 설계안을 제시하는 과정이라 할 수 있다. 이러한 구조 설계안은 경험이 많고 직관력이 뛰어난 설계자가 적절한 하중패턴을 가정하였다면 본 연구의 설계안과 비슷한 결과를 산출할 수 있겠지만 구조물에 치명적인 모든 하중패턴을 기대하기에는 무

리가 있음을 예상할 수 있다. 하나의 치명적인 하중패턴의 제외가 구조물의 심각한 파괴 결과를 가져올 수 있다. 결국 설계자는 완벽하지 못한 혹은 신뢰성이 떨어지는 구조물에 안전계수를 적용하여 비경제적인 설계안을 택하거나(만일 최적 설계점에서 출발하는 보강이 이루어진다면 수치실험에서 파악할 수 있듯이 명확한 분석 없이는 위험할 수 있다), 최적화를 포기하고 기존의 모델 구조물의 변형을 통해서 최종안을 설정할 수밖에 없다.

본 논문에서는 구조물에 입력으로 작용하는 하중패턴의 결정과 구조물의 형상 진화를 동시에 고려할 수 있는 공진화 구조설계라는 새로운 구조설계 접근 방식을 설명하였다. 상호 연성이 뚜렷한 하중설계와 형상설계, 두 Discipline 들을 함께 묶어 설계하는 MDO 문제로 접근하였으며, 최종 구조형상 설계는 어떤 하중도 견딜 수 있으며, 목적함수로 설정된 구조성능을 최적화 시킬 수 있는 능력을 가진다. 또한 기존의 강건 설계 혹은 확률론적 최적화 설계가 추구하는 평균치의 변동량을 고려하는 불확실성에 관한 개념을 포함하고, 하중패턴(평균치)에 관한 불확실성을 구조설계에 반영함으로써 진정한 의미의 신뢰성 있는 구조물을 생성할 수 있다.

본 논문에서는 Grid-like 타입의 구조물들만 예제로 사용하였지만 문제 구성에 있어서 어떤 특정 구조 종류에 구애 받지 않는 일반적인 개념을 사용하고 있어, 타 구조물의 경우에도 적용하려는 다양한 시도를 계획하고 있다. 또한 구조 설계에 입력을 작용하는 또 다른 주요 인자인 경계조건에 관한 결정도 설계 과정 중에 결정하도록 하여, 구조 설계 방식을 일반화시킬 계획도 가지고 있다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단 조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었다. 또한 그림 1의 작성에 도움을 준 서울대학교 조선해양공학과 CSML (조선호 교수 연구실)에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

1. Richard N. L., "The Coevolution of Technology and Organization in the Transition to the Factory System", Report-no:95-153, Department of Economics, *University of Connecticut*, 1995
2. Maher M. L., Poon J., Boulanger S., "Formalizing design exploration as co-evolution: A combined gene approach, in J.S. Gero and F.

- Sudweeks (eds.)", *Advances in Formal Design Methods for CAD*, Chapman & Hall, 1995, pp. 1~28
3. A. Ben-Tal, A. Nemirovski, "Robust Truss Topology Design Via Semidefinite Programming", *SIAM J. Optim.*, Vol.7, No.4, November 1997, pp.991~1066
  4. Xiaoping Du, Wei Chen, "Sequential Optimization and Reliability Assessment Method for Efficient Probabilistic Design", Proceedings of ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference Montreal, Canada, September 29-October 2, 2002
  5. R.J. Balling & J.S. Sobieski, "Optimization of Coupled Systems: A Critical Overview of Approaches", *AIAA* Vol.34, No.1, 1996, pp.6~17
  6. 김기화, Genetic Algorithm에 의한 다목적함수 최적화 구조 설계, 서울대학교 대학원 조선해양공학과 공학박사 학위논문, 1994
  7. J.O. Lee, Y.S. Yang and W.S. Ruy, "A Comparative Study on Reliability-index and Target-performance-based Probabilistic Structural Design Optimization", *Computers & Structures*, Vol.89, Issue 2-4, February, 2002, pp.257~269