

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

양영순* 유원선** 김봉재***
Yang, Young-Soon Ruy, Won-Sun Kim, Bong-Jae

Abstract

본 논문에서는 설계 하중에 지배되는 구조물에 있어서, 입력 파라미터들의 불확실성을 표준편차와 패턴의 변동, 두 차원에서 접근, 처리할 수 있는 방안을 제시하기 위해서 구조물에 입력으로 작용하는 하중 패턴의 결정과 구조물의 형상의 진화를 동시에 고려할 수 있는 Co-Evolutionary Structural Design Framework라 명명한 새로운 구조 설계 방식을 개발하였다. 공학자의 직관과 경험 의존적인 하중을 대상으로 최적화된 구조물은, 성능에 완벽한 안전을 보장해 줄 수 없으며, 이에 관한 문제를 해결하기 위해서 주어진 상황 속에서 다양한 하중이 작용하더라도 안전할 수 있는 구조물의 설계 방식에 관해서 설명한다. 본 프레임워크는 연성을 가지는 두 Disciplinary Modules, 즉 구조 형상설계와 하중설계로 이루어지며 하중에 관한 DB로 연결되어 순차적인 MDO 설계과정을 거치게 된다. 두 Discipline은 설계과정을 거치면서 상호 견제의 틀 속에서 진화하며 기존 방식과 달리 극한 하중 패턴을 스스로 찾아서 설계 반영하는 특징을 가진다. 본 접근 방식의 유용성을 평가하기 위해서 10-bar truss 구조물과 Jacket-Type 구조물로 테스트해 보았다.

1. 서 론

구조설계의 연구는 과거 한 세기를 거치면서 이론과 응용 면에서 상당한 발전을 이루어 왔다. 하지만 아직도 산업 현장에서 핵심적으로 빈번하게 사용되지 못하는 현실을 돌아보면 크게 두 가지 문제점이 있다고 추측된다. 첫 번째로 산업 현장의 복잡한 시스템을 통합하여 문제 정식화시키기에 아직 무리가 존재하며, 두 번째로는 설계에 필요한 다양한 인자들에 관한 불확실성을 충분히 고려할 방안이 정립되지 못한 이유와 설계자의 직관과 경험에 의존한 결정이 시간과 비용 면에서 아직도 비교적 현실적이지 못하다는 이유에 기인한다. 본 논문에서는 구조 설계에 가장 큰 영향력을 가지며 그 결정이 명확할 수 없는 하중 패턴의 추정을 자동화시킬 수 있는 설계 프레임워크를 제시하여 두 번째 문제점의 돌파구를 마련하고자 한다.

근래 구조설계 분야에서는 불확실성을 고려한 강건한 구조물을 설계하는 연구가 한창이다. 구조성능에 영

* 정회원. 서울대학교 조선해양공학과 교수
** 서울대학교 연구원
*** 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

향을 미치는 특성 인자들의 영향에 둔감한 구조물, 혹은 확률론적 변동을 고려하여 파괴확률을 고려한 구조 설계 등이 대표적인 예가 될 수 있다. 전자는 흔히 강건설계라 지칭되고, 후자는 신뢰성기반 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 Conservative 하고 안전한 구조물의 설계를 지향한다.

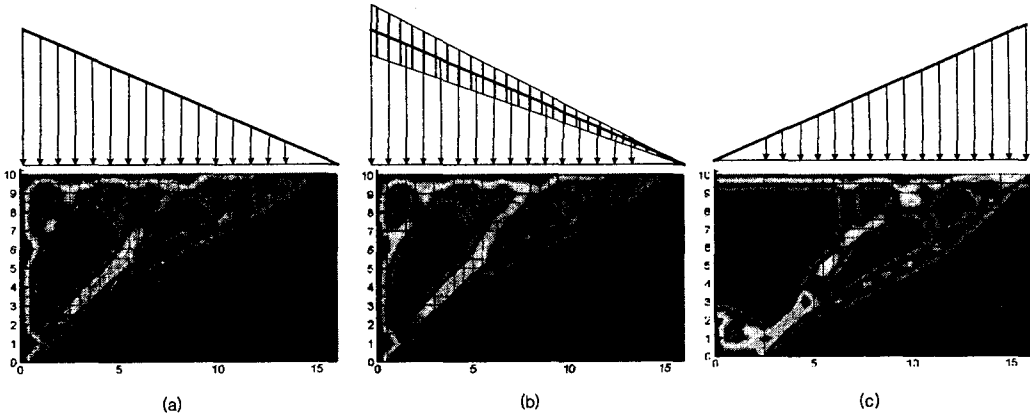


Figure 1 Effects of the different load mean and deviation

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 반영하고 있으나, 정작 중요하고 결정적인 불확실성은 어떤 평균치를 설계에 반영하는가에 있다. 특히 구조 최적 설계점에 지대한 영향을 미치는 설계하중의 경우에는 어떠한 형태(혹은 패턴)의 입력하중이 작용하는가에 관한 결정이, 이미 계획된 하중에 변동량을 반영하는 결정보다 최종 결과물의 성능에 미치는 영향이 지배적이다. Figure 1에서는 1(a)의 최적 구조물과의 차이점을 검토하기 위해서 하중 패턴(평균)의 변화(1(c))와 하중에 관한 변동량을 고려한 확률 최적화 결과(1(b))를 보여준다. 예상할 수 있는 결과이긴 하지만 하중 자체의 변동보다는 패턴의 변동에 따른 영향이 최적 구조물의 형상에 직접적으로 작용됨을 확인할 수 있다.

결국 설계에 영향을 미치는 주요 하중들을 파악하는 것이 큰 이슈가 될 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, 3차원 적인 구조물의 하중 작용점들에 관한 하중 분포가 정해진, 구체적인 입력으로 볼 수 없다. 결국 설계 과정에서 하중의 절대치와 작용점에 관한 결정도 포함시키는 것이, 보다 실용적이고 현실적인 최적화 설계의 방향이라는 점이 본 연구에 동기가 되었다. 다시 말해, 구조물의 응답을 최적화 하는 구조위상 해석과 구조물에 가장 치명적일 수 있는 하중패턴을 구하는 과정을 MDO 관점에서 해결하려는 계획으로 Co-evolutionary Structural Framework라는 새로운 구조설계 패러다임을 제시한다.

공진화(Co-Evolution) 최적화 기법에 관한 연구는 Santa Fe Institute를 중심으로 활발하게 연구되고 있는 분야인데, 주로 Evolutionary Optimization 혹은 Design 분야에서 두 종(Species)의 Fitness 결정에 있어서 상호 의존적으로 서로를 진화시키는 방향으로 알고리즘이 진행되거나[1], 설계의 요구조건과 그에 상응하는 설계안(Solution)이 상호 의존적인 관계를 맺으면서 진화해 가는 원리가 적용된다.[2] 본 연구에서의 구조위상

설계 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 상호의존적으로 진화해 가면서 궁극에는 최적화 되는 성향을 가지게 되므로 이들의 관계와 방향성을 공진화 설계라 지칭하였다.

이와 유사한 연구로는 Bental과 Nemirovski[3]가 연구하였던 “Robust Truss”에 관한 것이 있다. 이는 주어진 하중 시나리오에도 만족하고 비교적 적은 규모의 우발적인 하중에도 견딜 수 있는 강건한 구조물을 확보하고자 하였다. 본 논문의 접근 방식과 달리 안정성에 관한 구속조건 없이 주어진 볼륨을 넘지 않은 한계 안에서 Compliance를 최소화시키고자 하였으며 이는 합리적인 구조물이라 할 수 없는 불안정성을 가지는 구조물이 생산될 가능성이 있는데 이를 합리적인 구조물로 전환하기 위해서 논문[3]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 구현된 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 하중 패턴 평균의 불확실성에 관한 설명을 구체화 하였으며, 4장에서는 Jacket Type의 구조물을 대상으로, 변동량의 불확실성까지 포함한 프레임워크에 실례를 들어보고 활용가능성에 관한 논의를 하려 한다. 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 Module로 구성된다. 첫 번째 Disciplinary Module(구조 위상 최적화 모듈)은 통상적인 구조 최적화 기법에 적용되었던 그대로이다. 해당 구조물의 구속조건을 만족시키면서 목표 성능을 최적화시키는 과정인데, 다만 차이점은 두 번째 그것을 통해 산출되는 하중 패턴을 모두 구속조건에 배치시키는 Multi-Loading Case 최적화 모듈을 사용하고 있다. 본 논문에서는 구조물의 위상과 치수를 포함하는 형상(Shape) 최적화를 대상으로 한다. 변동량에 관한 불확실성을 처리를 위해서 구조 형상 최적화 모듈에 SORA[4]의 알고리즘을 첨가하였다. 이는 확률론적 최적화 모듈을 구성하기 위해 필요한, 연성된 두 최적화 과정(외부를 구성하는 일반적 최적화 과정과 파괴확률을 얻기 위한 최적화 과정)을 확률론적 최적화 과정의 구속조건으로 대체하여 신뢰성기반 최적설계 시에 요구되는 과도한 해석의 반복과정을 획기적으로 줄이도록 고안된 것이다. 본 논문의 활용에 있어서 특히 할만한 점은 확률론적 해석을 위해 필요한 랜덤 변수의 설정 면에 있어서 논문 [4]에서 주로 설계변수에 관한 랜덤변수를 다루어서 설계 변수 도메인에서의 구속조건 식의 이동을 중점적으로 다루었다면 본 연구에서는 설계 파라미터의 불확실성을 설계에 반영하기 위해서 이에 관한 랜덤변수를 중심으로 U-V 영역에서의 구속조건의 이동을 고려하였다. 이러한 활용은 과정에 필요한 과도한 반복 계산을 1~2번의 확정론적 최적화 과정만으로 해결될 수 있는, 과도한 계산비용의 절감 효과를 얻을 수 있었다. 결국 하중 평균의 불확실성을 고려하는 큰 틀 속에서 설계 파라미터의 변동량까지도 구조 위상설계 최적화 과정에 추가시킬 수 있는 역할을 SORA가 담당하게 된다. 본 모듈의 출력은 DB에 보관된 하중 케이스들에 대응하는 최적 형상이고 이는 두 번째 모듈의 입력으로 작용한다.

두 번째 Disciplinary Module(최대하중 설계)은 주어진 형상을 대상으로 가장 치명적인 하중 패턴을 찾아내는 하중 설계과정이다. 즉 해당 구조물의 특성상 가장 큰 파괴를 가져올 수 있는 하중 패턴이 고유하게 존재한다는 가정을 하게 되는데, 물론 해당 하중 패턴이 다수 존재할 수 있고 만일 그렇다면 이들을 모두 DB에 보관한다. 두 번째 모듈의 경우 다양한 Formulation으로 구성될 수 있는데, 대표적으로 최대 용력을 극대

화 시키는 방법, 파괴확률을 극대화 시키는 방법 등, 문제 따라 적절한 파괴 양식을 적용한다면 무리가 없을 것이다. 다만 파괴확률로 파괴를 정의하는 것이 현 구조 위상에 새로 제시된 하중 패턴이 어떤 영향을 미치는가에, 보다 객관적인 판단 기준을 제시할 수 있으므로 이를 통해 하중을 평가하였으며 이는 알고리즘 종료 조건으로 활용된다. 구체적으로 언급하자면, 주어진 구조위상에 최대한의 악영향을 끼치는 하중 패턴에 관한 파괴 확률을 계산하여서 이 수치가 이미 설정된 기준 파괴확률보다 작게 된다면 알고리즘이 종료하게 된다. 본 하중설계 과정에서 확보된 하중 패턴은 DB에 보관하게 되는데, 여기서 반복된 하중패턴이 발견되면 알고리즘이 종료되는 조건으로 사용토록 하였다.

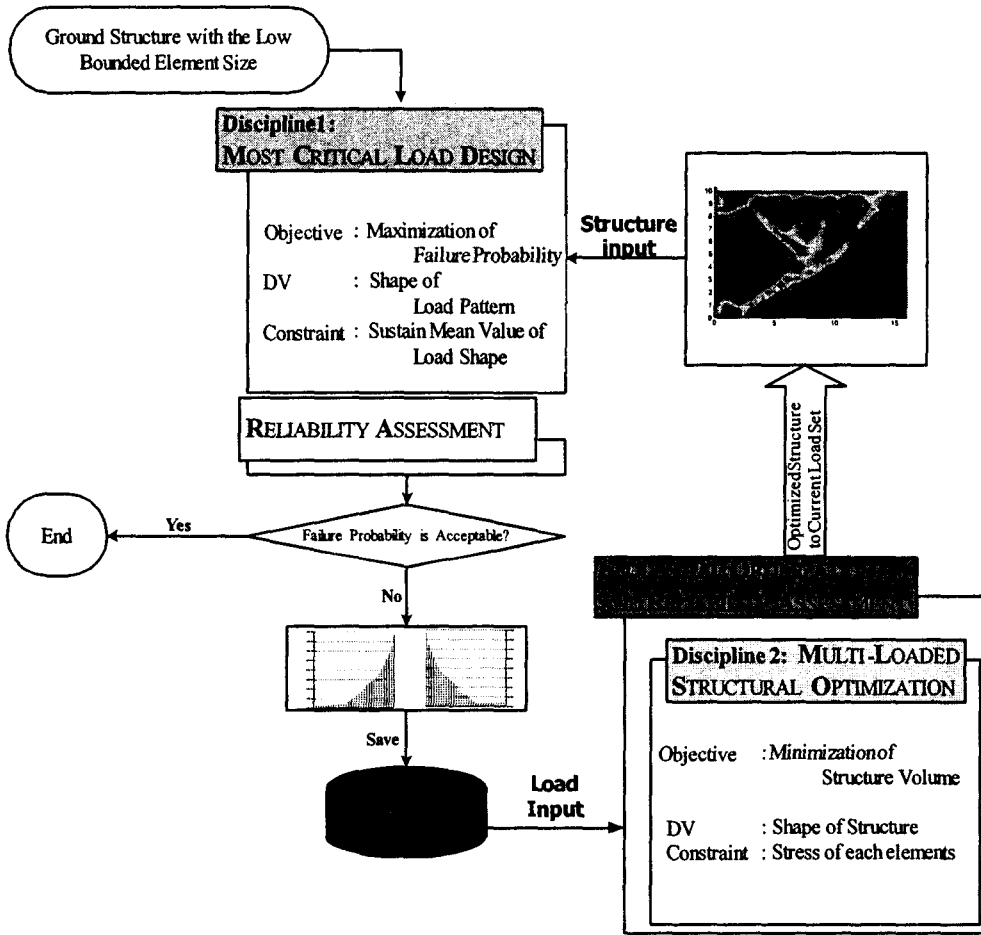


Figure 2 Overview of Co-Evolutionary Structural Design

서두에서도 설명되었듯이, 두 모듈은 완전한 연성관계를 가지고 있다. 첫 번째 모듈의 출력인 구조 형상은 두 번째 모듈의 출력인 하중 패턴을 구하는데 모태가 되며, 이렇게 구해진 하중 패턴은 다음 구조 형상의 구성에 입력으로 작용한다. 이는 MDO의 대표적인 문제인 비행체 날개 구조-동유체 해석과 흡사한 문제 구성을 상상하면 이해가 빠를 것이다. 본 연성을 풀어나가기 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 멈추는 원리로 진행된다. 결국, 각 Disciplinary module의 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 그것을 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 지칭될 수 있다. 물론 첫 번째 모듈에는 Taguchi의 강건설계와 확률론적 최적화 개념을 추가할 수 있으며, 두 번째 모듈은 신뢰성 해석의 과정을 포함할 수 있는 일반적인 Formulation 임을 확인 할 수 있다.

본 시점에서 다중 하중 경우를 처리하기 위한 Multi-Load Cases 최적화 방법과의 차이점을 설명하고자 한다. 본 설명은 기존의 접근 방식과의 구분을 위해서도 명확하게 언급할 필요가 있다. 물론 실제 환경에 노출된 구조물의 경우, 한 종류의 하중만을 받는 경우는 드물다. 이러한 경우를 고려하기 위해서 Multi-Load Case를 고려하게 되지만, 문제는 어떠한 하중 패턴을 고려해야 하는가에 관한 문제는 흔히 공학적 직관과 경험을 통한 정보를 활용할 수밖에 없고 이러한 방식으로 추가되는 하중 패턴 중에는 계산비용만 차지하고 설계에 영향력이 전혀 없는 경우가 있을 수 있다. 이점을 차치하고라도 가장 중요한 점은, 강건 구조물을 위해 꼭 필요한 하중 패턴이 간과되는 경우가 있을 수 있으며, 만일 이러한 하중이 작용하게 되면, 해당 구조물은 취약할 수밖에 없으며 파괴로 이어질 수 있다는 점이 기존 방식의 문제점이라 할 수 있다. Co-Evolutionary Structural Design의 접근 방식에서는 해당 구조물에 가장 치명적인 하중 패턴을 구하고, 이를 설계에 지속적으로 반영하고 있다는 관점에서, 결국, 하중 패턴을 인지하는가의 유무가 기존 방식과의 차이점이다.

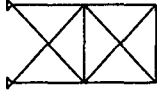
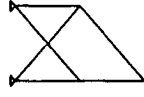
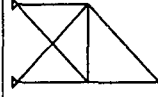
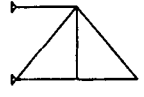
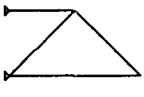
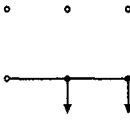
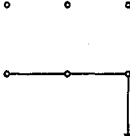

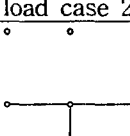
3. Example of 10-bar Truss Structure

흔하게 사용되는 10-bar 트러스 구조물을 통해, 하중 패턴의 평균 불확실성을 고려한 프레임워크의 구체적인 설명을 진행하였다. 2장에서 언급되었듯이 본 문제의 대상은 위상을 고려한 설계이다. 모든 위상 구조를 비교해 볼 수 없으므로 유망하다고 판단되는 4개의 위상을 대상으로 본 예제에서 생각할 수 있는 대표적인 하중 패턴 3가지에 따라 최적화된 결과를 Table 1에 보였다. 각 하중패턴 별로 서로 다른 결과를 보여 주며 해당 최적 위상이 다름을 확인 할 수 있다. 당연한 결과이지만 입력으로 작용하는 하중 패턴이 최적구조물 결정에 큰 영향을 미치는 것을 다시 확인할 수 있었으며, 이렇게 생성된 최적 구조물은 주어진 하중에 치우친 구조물이라고 유추해 볼 수 있다. 예를 들어, Table 1의 위상 4번째에 해당하는 구조물의 경우 하중 패턴 2에는 최적 구조물이지만, 기타 다른 하중 패턴에서는 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 구조물간에 관계에 관한 분석 없이 최적구조물을 제시하는 것은 위험한 설계 행위가 될 수 있다는 가정을 할 수 있다.

다양한 하중 패턴을 최적설계에 반영시킬 수 있는 방안을 생각해 보면 다음 세 가지 정도를 제시할 수 있을 것이다.

1. 각 하중 패턴에 관한 최적점을 확보한 후, 이들의 각 요소 치수의 $Sup(elem_size_i)$ 을 구해서 이들로 이루어진 구조물을 구성하는 방법
2. 설계에 직접적인 관련이 있는 모든 하중 패턴을 구해서 이들을 반영한 최적 설계안 도출 방안
3. Co-Evolutionary Structural Design Framework 방안

Table 1 Optimization Results of the prefixed topologies against the load cases

						
		Topology 1	Topology 2	Topology 3	Topology 4	Topology 5
	Obj.	1593.18	1584.00	1655.43	1728.00	-
	x_i	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	
	x_i	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	-
	x_i	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	-

첫 번째 방안, 즉 하중 패턴 별로 구해진 최적해의 위상과 사이즈를 누적하여 새로운 구조물을 구성(Table 2 참조)하고 이에 관한 분석을 시도해 본다. 여기서 분석이란 함은 이렇게 생성된 새로운 구조물에 각각의 하중을 작용하여 각 부재에 걸리는 응력 표시하는 것으로 Table 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 혼합하여 요소들이 구성되었으며, 이는 힘의 재분배 과정에서 허용응력을 넘어가는 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 정성적인 차원에서 이러한 현상은 Figure 3에서도

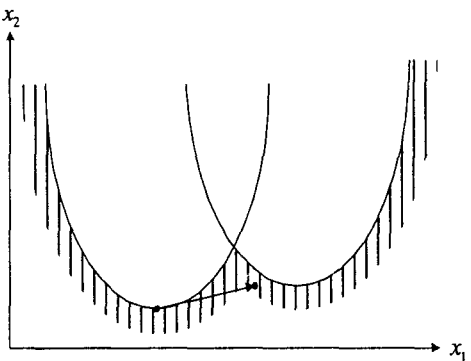


Figure 3 Risk of the reinforcement

확인해 볼 수 있듯이, 최적점에서 설계변수의 보강으로 발생된 새로운 점은 만족영역의 Non-Convex한 형상 때문에 불만족 영역으로 전이될 수 있음을 의미한다. 비슷한 현상은 Kim[5]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.

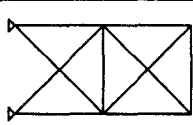
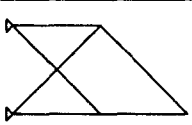
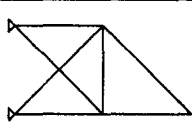
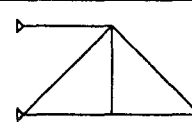
Table 2 Optimum of each load case

	X[1]	X[2]	X[3]	X[4]	X[5]	X[6]	X[7]	X[8]	X[9]	X[10]	OBJ
Case 1	0.10	0.10	3.94	0.10	5.57	0.10	7.94	8.06	5.75	5.57	1593.18
Case 2	0.10	0.10	7.94	0.10	11.22	0.10	15.93	8.07	0.1	11.21	2313.19
Case 3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	7.94	11.22	0.10	890.42
Total	0.10	0.10	7.94	0.10	11.22	0.10	15.94	8.07	11.22	11.21	2878.92

Table 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]
Case 1	-0.786	-0.786	-0.499	-0.697	-0.499	-0.529	-0.497	-0.012	-0.499	-0.492
Case 2	-0.001	-0.001	-0.005	0.412	-0.004	0.835	-0.01	0.026	-0.924	-0.027
Case 3	-0.429	-0.429	-0.992	-0.193	-0.993	1.777	-0.979	-0.050	-0.034	-0.957

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

					
		Topology 1	Topology 2	Topology 3	Topology 4
Multi load case	Obj.	2569.25	2880.04	2500.18	2592.09
	xi	0.10, 0.10, 7.91, 0.12, 11.19, 3.32, 13.18, 10.82, 6.78, 7.32	8.00, 11.31, 16.00, 8.00, 11.31, 11.31	8.00, 11.31, 5.43, 10.57, 13.43, 7.68, 3.65	8.00, 11.31, 8.00, 16.00, 8.00, 11.31

위에서 제시된 두 번째 방안의 결과가 Table 4에 제시된다. 주목해야 할 부분은 각 하중 패턴에 관한 최적화 구조물과는 다른 결과가 도출되었다. 하중 패턴의 변화에 따라 한번도 최적해로 제시된 바 없는 위상 3번 구조물이 주어진 모든 하중패턴 집합에 관한 최적해이다. 하중 패턴의 평균치를 고려한 강건한 최적 구조

형상은 각각의 하중 패턴에 관한 최적형상과 다를 수 있다는 것을 의미한다. 또 하나 흥미로운 점은 하중 패턴 1에 관한 모든 구속조건은 불활성화(Inactive)된 결과가 나와 결국 설계에 아무런 영향을 미치지 못하였다. 하중 패턴 1을 고려하지 않아도 같은 결과가 얻어진다는 의미이다. 1번 패턴을 제외한 나머지 하중 패턴 2, 3번이 다음에 보일 Co-Evolutionary Structural Design 의 접근방식에서 고려해야 하는 하중 패턴으로 밝혀진다. 가능한 모든 하중 패턴(치명적인 하중 패턴이던 중요하지 않은 하중 패턴이던)을 포함하여 최적해로 접근시키는 본 방안은 본 논문에서 설정한 문제에 최종해이며 목표이다. 하지만 문제는 특히 최종 최적해에 영향을 미치는 주요 하중 패턴, 다시 말해서 치명적인 하중 패턴을 어떻게 확보하는가에 관한 의문점이 본 방안에 남게 된다. 아무튼, 고려해야 하는 하중 패턴을 이미 안다면 Multi-Load 문제와 Co-Evolutionary Structural Design의 결과는 동일해야 한다.

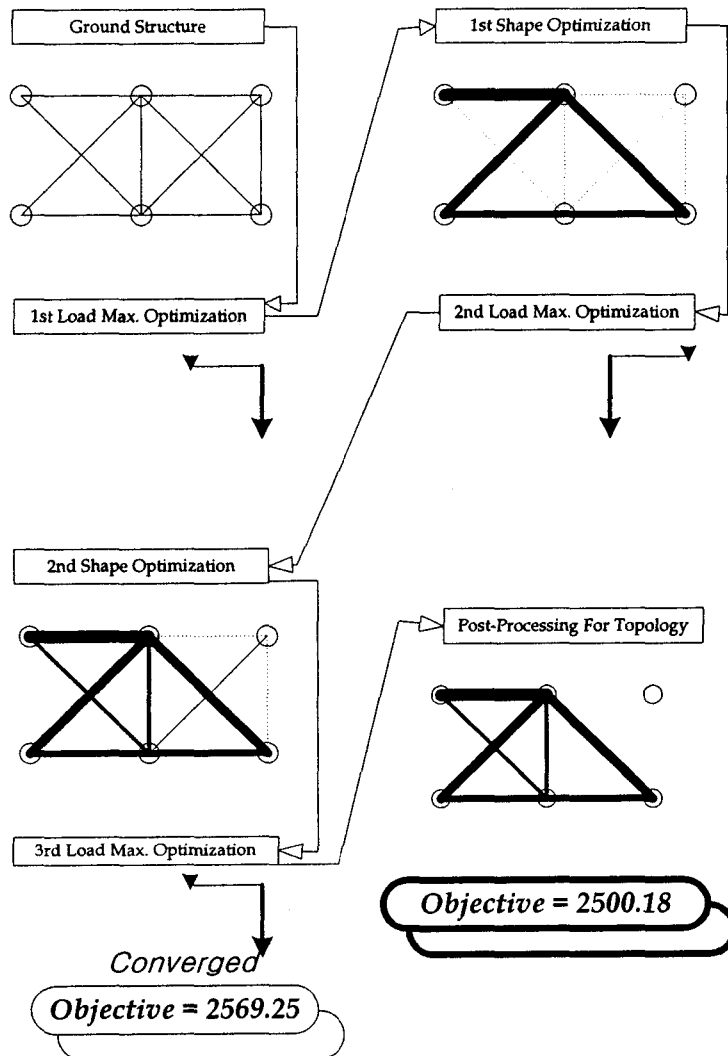


Figure 4 Co-Evolutionary Structural Design Overview of Ex. 1

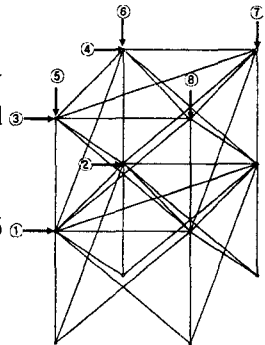
확정론적인 입장에서의 Co-Evolutionary Structural Design을, 본 예제를 이용해서 구체적으로 설명한다. 시작은 최소 사이즈로 구성된 Ground Structure를 대상으로 하중 설계(2nd Disciplinary Module)를 진행한다. 확보한 하중 패턴을 DB에서 추출하여 위상 설계(1st Disciplinary Module)를 시행하며 이를 기반으로 다시 하중 설계(Figure 4: 2nd Load max. Optimization)를 수행하며 2nd Shape Optimization에서는 보관된 총 2개의 하중 패턴을 바탕으로 Multi-Load Shape 최적화 과정을 진행한다. 이러한 과정을 수렴이 될 때까지 반복하는데, 확정론적 입장에서의 수렴조건은 새롭게 획득한 하중 패턴이 DB에 이미 보관된 하중의 그것과 일치하거나, 구조 형상(위상과 치수)의 변화가 없게 되는 조건이다. 이미 고려된 하중 패턴으로는 당연히 형상의 변화가 생길 수 없으며, 구조 형상에 영향을 미치지 못하는 하중은 설계에 영향을 주는 하중 패턴이 아니므로 더 이상의 반복 과정 없이 수렴으로 결정하였다.

각 형상설계 단계에서는 최적 위상을 위한 후처리 과정을 밝게 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 방식으로 진행되는데 본 논문의 논점과 거리가 있으므로 생략하도록 한다. 다만 Figure 4의 1st Shape Optimization의 결과를 살펴보면 기타 유망한 위상설계와의 비교를 제시하는 Table 1의 2번째 하중 case의 결과에서도 볼 수 있듯이, 적절한 정해를 탐색하고 있음을 확인할 수 있다. 예상했던 바와 같이 최종 구조 형상은 이미 하중 정보를 확보하고 접근 하였던 결과와 일치함을 확인할 수 있었다. 다만 이미 확보한 하중패턴을 입력으로 진행되었던 Multi-Load 최적화 기법과 달리 하중-형상 설계가 반복되면서 해당 설계에 중요한 하중 패턴을 스스로 찾아서 설계할 수 있다는 차이점이 존재한다.

다중 하중을 처리하기 위한 방안을 3가지로 분류하여 각각의 특징을 살펴보았다. 첫 번째 방식은 정해로 접근할 수 있는 방안이 아니며 계산비용도 많이 들 수밖에 없으므로 논의 대상이고, 두 번째 방식은 정해를 확보할 수 있는 잘 알려진 방안이지만 본 논문에서 언급하고 있는 주요한 하중 패턴을 미리 확보한 연후에나 가능한 방안이다. 이 문제는 첫 번째 방안의 공통된 문제이기도 하다. 본 논문에서 제시하는 Co-Evolutionary Structural Design 방안은 스스로 설계에 필요한 주요 하중 패턴을 찾아가면서 정해를 탐색할 수 있는 능력을 보유하고 있으므로, 알려지지 않은 다중 하중을 처리하는 문제에 있어서 유용한 접근방법이라 생각된다.

4. Example of Jacket-Type Structure

예상할 수 있는 하중 패턴을 가지는 예제에서 벗어나서 비교적 복잡한 형상을 가지는 Jacket-Type 구조물을 대상으로 수치 실험을 수행해 보았다. Ground Structure의 절점은 12, 가능한 연결 요소는 36개를 가지는 구조이다. 문제 설정에서 가장 핵심적인 것은 하중 패턴의 대상이 되는 절점의 결정이다. 하중 패턴의 다양화를 위해서 위쪽과 왼쪽 면에 존재하는 4개의 절점에 각 방향으로 $4.e5$ 에 해당하는 평균 하중을 가지도록 설정하였으며 경계조건은 바닥부분을 3차원 방향 모두 고정 형식을 택하였다.



Jacket-Type Structure에서 구체적으로 다루고자 하는 부분은 3장에서 설명된 하중 패턴에 관한 불확실성을 포함하고 확률론적 최적화와 강건설계 등에서 다루고 있는 평균에서의 변량에 관한 불확실성까지 추가된 Co-Evolutionary Structural Design의 설명이다. 우선 본 예제에서 선택한 랜덤 변수는 재료의 특성에 해당하는 Young's Modulus(E)와 허용 응력(σ_y)로서 각각 10%의 변동을 가정하였다. 구조 형상 설계 모듈에 추가된 SORA는 3장의 확정론적 최적화 모듈을 대체하는 일종의 확률론적 최적화 모듈이며 특히 설계변수가 아닌 설계파라미터만을 랜덤변수로 택함으로써 확정론적인 그것에 비해

2.8(13850/4949)배의 계산비용만을 요구함을 확인할 수 있었다. 계산비용의 절감을 위해서 확정론적 최적화 결과를 초기치로 선택하였으며 확정론적 최적화 모듈에서는 민감도 해석을 수행하였다. 이에 비해서, SORA 모듈을 연성이 존재하는 전통적인 확률론적 최적화 방법으로 대체한다면 확정론적 접근 방식에 비해 1022배(SORA에 비해서는 365배)의 계산비용이 소비됨을 확인하였다.(Table 5참조) 이는 설계변수의 개수가 많은 이유도 있겠지만, 본 문제구성의 특성상 Discipline 간의 반복이 진행되면서 한계상태방정식에 해당하는 구속조건의 수가 급격하게 증가하게 되는 성향을 가지게 됨에 원인이 있다. 참고로 전통적인 확률론적 최적화 방법에서는 한계상태방정식의 수치를 MPTP의 활용으로 확보하였으며 SORA의 경우와 마찬가지로 확정론적인 최적화를 통해서 초기치를 확보하였다. 반복수에 따른 함수호출 수와 그에 해당하는 목적함수의 수치를 표시하고 있는 GPO 행의 목적함수의 진행이 SORA의 그것과 첫 번째 수행 결과를 제외하고는 다른 방향을 나타내고 있는데, 이는 두 접근 방식이 다른 결과를 주는 것에 기인하는 것이 아니라 구조 형상에 변동이 가해질 때 해당하는 주요 하중의 결과를 조금씩 바뀌게 되고 이들이 누적되어서 서로 다른 경로를 따라가고 있는 경우이다.

Table 5에는 사용자가 종료조건으로 사용한 파괴확률이 0.02275($\beta=2$)이하가 되기까지 반복되는 과정 속에서 SORA가 결과를 배출하기까지의 반복해석 수를 표시하고 있다.

Table 5 Objective and No. of Iteration History

Iter.	Deterministic	SORA_1st	SORA_2nd	SORA_3rd	β/P_f	GPO*
	Iter./Obj.	Iter./Obj.	Iter./Obj.	Iter./Obj.		Iter./Obj.
1	173/5482	153/5666	38/5666	-	-8.00/1.00000	48478/5668
2	406/6410	152/6595	38/6595	-	-8.00/1.00000	96649/6500
3	446/7082	310/7325	38/7325	-	-8.00/1.00000	145764/7191
4	602/9403	308/9724	38/9724	-	-8.00/1.00000	271810/7819
5	601/9749	1952/9783	1952/9842	41/10086	-4.17/0.99998	291601/8792
6	349/9844	1442/10179	38/10179	-	-2.35/0.99061	295056/10065
7	448/10687	466/11052	38/11052	-	-8.00/1.00000	407949/10756
8	271/10957	425/11331	38/11331	-	-4.15/0.99980	1648161/11524
9	837/11316	309/11704	38/11704	-	-5.34/1.00000	1854200/11699
10	310/11317	506/11704	38/11704	-	0.96/0.16853	-
11	506/11317	505/11705	38/11705	-	2.06/0.01970	-
Total	4949	8901			13850	5059668

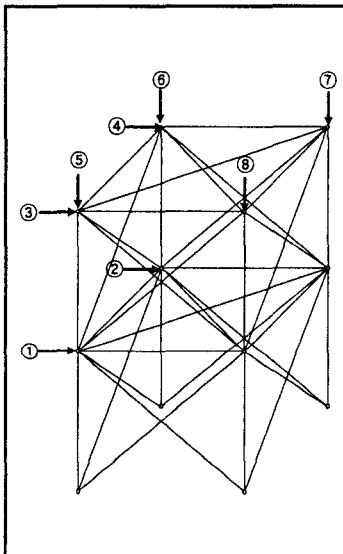
*GPO = General Probabilistic Optimization

참고로 SORA의 Target Performance Approach와 달리 Figure 3의 Reliability Assessment 부분에서는 MPPF(Most Probable Failure Point) 즉 Reliability Index Based Approach를 사용할 수밖에 없는데, 관심 설계점에 해당하는 신뢰도 지수의 값이 너무 작거나 큰 치수에 해당하는 곳에서는 탐색이 불가능한 단점을 가지고 있다[6][7]. 결국 해당 영역을 벗어나는 곳에서의 신뢰도지수 산정이 불가능하지만, 그 의미도 없는 구간이라고 할 수 있다. 본 수치실험에서는 신뢰도 지수가 -8이하로 떨어지는 구간은 신뢰성 해석을 수행하지

않고 -8로 설정하였다.

다양한 하중 패턴이 극한 하중으로 확보되었고 최종 구조는 이러한 하중 패턴을 모두 견딜 수 있도록 진화되었다. 간단하게나마 반복과정을 추적해가면 우선 설정된 절점을 모두 잇는 Ground Structure는 하중 설계 모듈에 입력되어서 해당 구조물에 가장 치명적인 하중 패턴을 탐색하고 이에 관한 초기 Ground Structure의 파괴확률은 1.0로 판명되었다. 종료조건을 만족시키지 못하였으므로 진 과정에서 구한 하중 패턴을 작용시켜서 구조형상 최적화 모듈을 수행하면 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 과정이 반복되게 되는데 하중 설계를 통해 확보된 치명적인 하중들은 DB를 통해 모두 다음 구조형상 최적화 모듈에 참여한다.

Table 6 Load Pattern History



	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
1	1.8E+04	1.8E+03	1.8E+05	2.0E+05	0.0E+00	3.8E+04	2.3E+05	1.3E+05
2	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	2.2E+05	0.0E+00	0.0E+00	1.8E+05
3	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	8.7E+04	1.1E+05	1.1E+05	9.8E+04
4	0.0E+00	4.6E+03	3.7E+05	2.6E+04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05
5	0.0E+00	1.3E+05	1.5E+04	2.5E+05	1.1E+05	9.1E+04	8.2E+04	1.2E+05
6	9.7E+04	6.5E+04	1.2E+05	1.1E+05	0.0E+00	2.0E+03	3.1E+05	8.4E+04
7	3.3E+03	0.0E+00	6.2E+04	3.3E+05	0.0E+00	0.0E+00	2.9E+05	1.1E+05
8	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	4.0E+05	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
9	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+05	0.0E+00	5.0E+04	7.6E+04	2.7E+05	0.0E+00
10	0.0E+00	5.6E+04	7.5E+04	2.7E+05	0.0E+00	0.0E+00	2.3E+05	1.7E+05
11	3.5E+04	5.6E+04	8.8E+04	2.2E+05	0.0E+00	3.3E+03	2.3E+05	1.7E+05

결과는 Table 6와 Figure 5에서 설명되고 있는데, 하중과 구조형상의 경쟁적 진화 관계가 흥미롭다. Table 6의 1번 하중은 Figure 5의 Ground Structure에 있어서 가장 치명적인 하중 패턴이고 본 하중은 다음 구조 형상을 위한 하중으로 작용한다. Figure 5의 2번 구조물을 파괴시키기 위한 하중이 Table 6의 2번 하중이며 이는 3번의 구조형상 생성을 위해 Table 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 진 과정에서 간과되었던 하중 패턴을 찾아가면서 구조형상의 진화를 돕는 경향이 뚜렷하다.

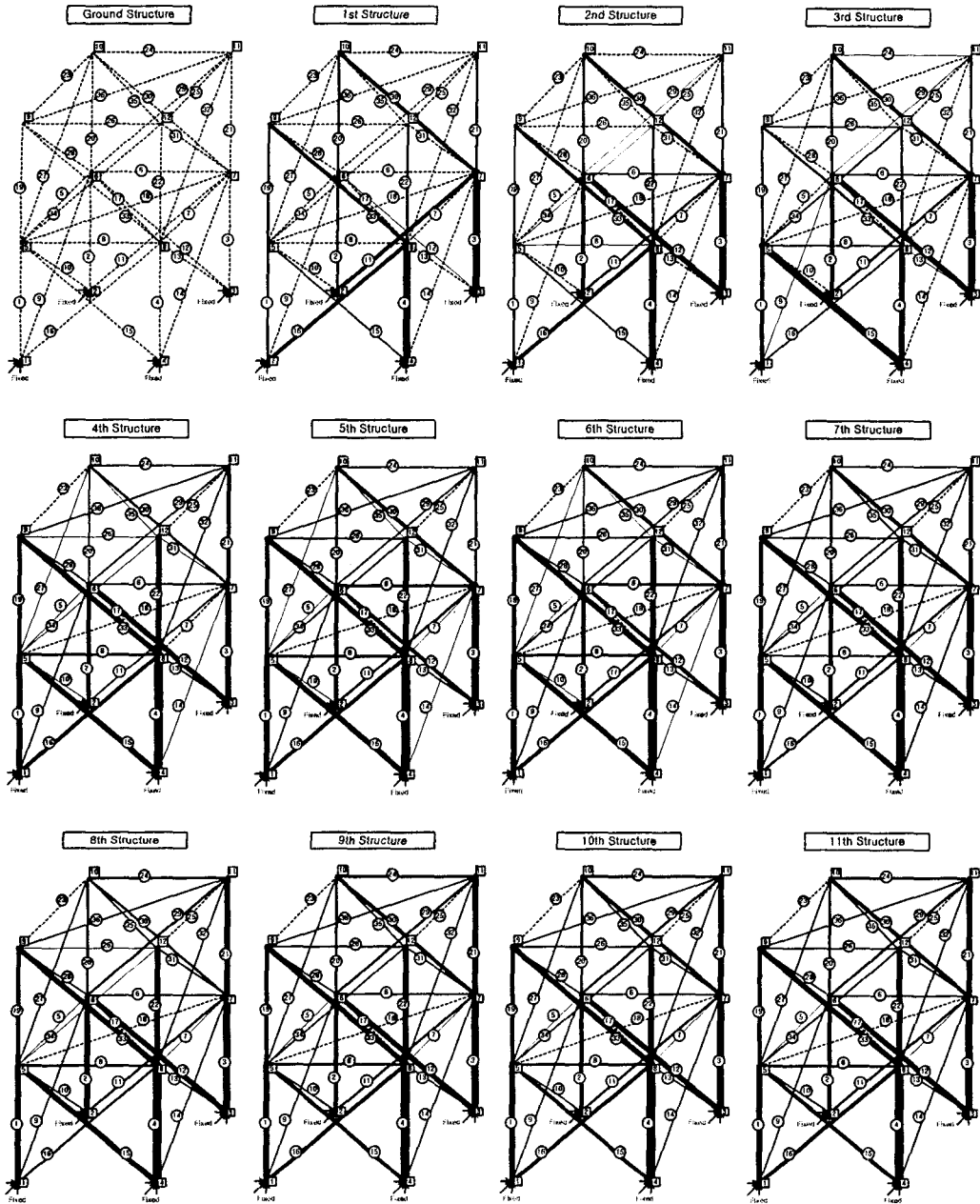


Figure 5 Evolutionary Process of Jacket Type Structure

5. 향후 작업과 결론

기존에 구조 최적화 과정은 치명적인지 혹은 최적화 결과에 영향을 미치지 못하는 하중(Inactive Load)인지 구분도 하지 않은 상태에서의 맹목적으로 가정된 하중 집합을 대상으로 하나의 구조 설계안을 제시하는 과정을 거친다. 이러한 구조 설계안은 경험이 많고 직관력이 뛰어난 설계자가 적절한 하중 패턴을 가정하였

다면 본 연구의 설계안과 비슷한 결과를 산출할 수 있겠지만 구조물에 치명적인 모든 하중 패턴을 기대하기에는 무리가 있음을 예상할 수 있다. 하나의 치명적인 하중 패턴의 제외에도 구조물 파괴의 결과를 가져올 수 있다. 결국 설계자는 완벽하지 못한 혹은 신뢰성이 떨어지는 구조물에 안전계수를 적용하여 비교적 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 하중 패턴의 결정과 구조물의 형상의 진화를 동시에 고려할 수 있는 Co-Evolutionary Structural Design Framework이란 새로운 구조 설계 접근 방식을 설명하였다. 상호 연성이 뚜렷한 하중설계와 구조형상설계, 두 Discipline 들을 대상으로 하는 MDO 문제로 접근하였으며, 최종 구조형상 설계는 어떤 하중도 견딜 수 있으며, 목적함수로 설정된 구조 성능을 최적화 시킬 수 있는 능력을 가진다. 또한 기존의 강건 설계 혹은 확률론적 최적화가 추구하는 평균치에서의 변동량을 고려하는 불확실성에 관한 개념을 포함하고 하중 평균치에 관한 불확실성을 구조설계에 반영함으로써 진정한 의미의 신뢰성 있는 구조물을 생성할 수 있다.

본 논문에서는 Grid-like 타입의 구조물들만 예제로 사용하였지만 문제 구성에 있어서 어떤 구조 종류에 구애 받는 특성이 없는 일반적인 개념정립으로 이해할 수 있으므로 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 계획을 가지고 있다.

5. 후기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다. 또한 Figure 1의 작성에 도움을 주신 서울대학교 조선해양공학과 CSML (조선훈 교수)에 감사드린다.

참고문헌

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., "Formalising 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, pp 1-28, 1995
3. A. Ben-Tal, A. Nemirovski, "Robust Truss Topology Design Via Semidefinite Programming," SIAM J. Optim., Vol. 7, No. 4, pp 991-1066, November 1997
4. Xiaoping Du, Wei Chen, "Sequential Optimization and Reliability Assessment Method for Efficient Probabilistic Design," Proceedings of DETC'02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference Montreal, Canada, September 29-October 2, 2002
5. 김기화, Genetic Algorithm에 의한 다목적함수 최적화 구조 설계, 서울대학교 대학원 조선해양공학과 공학박사 학위논문, 1994
6. 이재욱, Probabilistic Structural Optimization Based on Performance Approach, 서울대학교 대학원 조선해양공학과 공학박사 학위논문, 2001
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," Computer & Structure, Vol. 89, Issue 2-4, pp. 257-269, February, 2002