

철도분야 응용을 위한 전문가 시스템을 이용한 복합적층판의 적층순서 최적설계

Stacking Sequence Optimization of Composite Laminates for Railways Using Expert System

김정석[†]
Jung-Seok Kim

Abstract

This paper expounds the development of a user-friendly expert system for the optimal stacking sequence design of composite laminates subjected to the various rules constraints. The expert system was realized in the graphic-based design environment. Therefore, users can access and use the system easily. The optimal stacking sequence is obtained by means of integration of a genetic algorithm, finite element analysis. These systems were integrated with the rules of design heuristics under an expert system shell. The optimal stacking sequence combination for the application of interest is drawn from the discrete ply angles and design rules stored in the knowledge base of the expert system. For the integration and management of softwares, a graphic-based design environment that provides multi-tasking and graphic user interface capability is built.

Keywords : Expert system(전문가 시스템), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Design rules(설계규칙), Composite laminates(복합적층판), Train carbody(철도차량 차체)

1. 서론

복합재 구조물은 일반적으로 임의의 적층각을 갖는 여러 층의 단층으로 구성되어 있기 때문에 복합재 구조물의 설계시 설계자는 요구조건에 적합한 구조요소를 설계하기 위해 적층순서를 최적화해야 한다. 복합재 구조물의 강성, 강도 및 구조적 안정성(structural stability) 등과 같은 구조적 성질들은 복합재의 각 단층의 적층순서에 의해 결정되며 강성, 강도 및 구조적 안정성 등을 동시에 최적화할 수 있는 적층순서는 존재하지 않는다. 따라서 설계의 요구조건에 따른 최적의 적층순서를 결정하기 위해서는 각 설계의 요구조건에 합당한 설계지침(design heuristics)을 따르는 것이 바람직하다. 이러한 설계지침들은 복합재 구조물에 대한 다양한 실험과 해석 및 오랜 경험을 통해서 얻어진 것들이다.

또한 최근에는 컴퓨터 언어의 발달로 구조시스템 설계시 기존의 알고리즘 형식으로 표현할 수 없는 비정형화(ill-structured)된 문제의 해결이 용이해졌다. 이러한 비정형화된 문제 영역에서 컴퓨터에 의해 자동적으로 문제를 해결하는 방법을 제시해 주기 위해 개발된 것이 전문가 시스템이다. 이러한 전문가 시스템은 비결정적인 해의 접근에는 적합한 반면에 설계 과정에서 반드시 필요한 구조해석과 같은 수치해석분야에는 효과적으로 대처하지 못하는 단점이 있다. 따라서 구조시스템 설계시 설계의 지식과 설계지침 등과 같은 경험적인 지식에 의존하는 부분은 전문가 시스템 도구를 이용하고 구조해석과 같은 수치해석부분은 기존의 순차적인 언어(procedural language)로 된 프로그램을 이용함으로써 구조시스템 설계에 적합한 전문가 시스템을 설계할 수 있다. 전문가 시스템을 이용한 복합재 구조물의 설계에 대한 연구로 Webber[1] 등은 최초층파손이론을 이용하여 파손모드에 따라 해당 층의 두께를 증가시켜 보강하는 방법으로 복합재 구조물 설계용 전문가 시스템을 개발하였다. Wu[2,3] 등은 CODEX라는 복합적층판 설계

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원
E-mail : jskim@krrri.re.kr
TEL : (031)460-5663 FAX : (031)460-5699

전문가 시스템을 이용하여 복합재 지지대에서의 볼트 조인트를 설계하였다. Akira[4] 등은 객체지향법(object-oriented approach)을 이용하여 복합적층판의 강성을 최적화 하였으며, 김정석[5-11, 16] 등은 유전자 알고리즘 및 유한요소기법을 전문가 시스템에 통합하여 복합재구조물의 강성 및 강도 최적화 연구를 수행하였다. 그 외 유전자 알고리즘을 이용한 복합적층판의 적층순서 최적화에 대한 연구는 다양하다[12-15].

최근에는 주로 항공분야에서만 이용되던 복합재료가 자동차를 비롯하여 철도차량분야로 적용을 확대되고 있다. 철도차량 분야에서 복합재의 적용사례는 내장재 뿐만아니라 Fig. 1과 같은 TGV 이층객차를 비롯하여 모노레일 등의 차체 구조물로도 적용되고 있다.

이러한 철도차량분야에서 복합재의 적용확대에 따라 복합재 구조물의 최적설계기법의 확립과 이와 관련된 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이와 관련하여 철도차량 적용 복합적층판의 최적설계에 적용하기 위한 사용자 편의성(user-friendly)을 갖춘 전문가 시스템 구축에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 본 연구에서는 복합적층판의 강도를 최적화하기 위한 전문가 시스템을 구축하고, 이를 이용하여 다양한 하중조건과 요구조건에 적합한 적층순서(stacking sequence)를 최적화 하였다. 복합적층판의 설계시 제한조건(constraints)으로는 복합재 구조물설계시 적용되는 경험적 지식(design heuristics)을 적용하였다.

2. 사용자 편의 전문가 시스템

어떤 특정한 전문영역의 지식을 표현하고 이들 지식을 처리함으로써 전문가와 동등한 혹은 유사한 일을 할 수 있는 시스템을 전문가 시스템이라 한다[9-11]. 전문가 시스템의 구성요소는 아래와 같다.

- 지식 베이스(knowledge base)
- 워킹 메모리(working memory)
- 추론기관(inference engine)
- 지식획득 시스템(knowledge acquisition system)

본 연구에서 구축하고자 하는 사용자 편의 전문가 시스템은 위와 같은 기능을 갖춘 CLIPS라는 전문가 시스템 구현 환경을 기반으로 하였다. 본 연구에서 개발한 사용자 편의 전문가 시스템은 Fig. 2와 같이 파일 뷰 메뉴(file view space), 그래프 뷰 윈도우(graph view window), 재료선택모듈(material selection module) 및 전문가 시스템(expert system)등 4개의 모듈로 구성되어 있다.

파일 뷰 메뉴는 파일과 디렉토리 리스트를 나타내는 부분이다. 그래픽 뷰 윈도우는 해석결과를 다양한 그래프로 표현하는 부분이다. 재료선택모듈은 사용자가 재료를 선택하고 선택된 재료의 물성을 확인하는 부분이다. 또한 적층판의 층수를 설정하는 부분이다. 전문가 시스템 모듈에서는 균일분포하중과 집중하중을 받는 복합적층판의 강도를 최적설계 알고리즘인 유전자 알고리즘과 전문가 시스템인 CLIPS를 통해 최적화 수행하는 부분이다.

2.1 재료선택모듈

재료선택모듈에서는 최적설계에 적용될 재료, 적층판의 형태 및 적층판의 층수를 입력하는 부분이다. Fig. 3은 재료선택모듈의 메뉴상자를 나타내고 있다. 재료선택 모듈에서 최적설계에 적용될 재료를 선택하는 절차는 다음과 같다.

- ① 재료명과 형태 선정 - Fig. 3에서 알 수 있듯이 최적설계에 적용될 재료의 형태 및 재료명을 사용자 편의 전문가 시스템의 데이터 베이스에서 선택하거나 사용자가 입력할 수 있다. 현재 구축된 시스템에서는 4개의 재료를 동

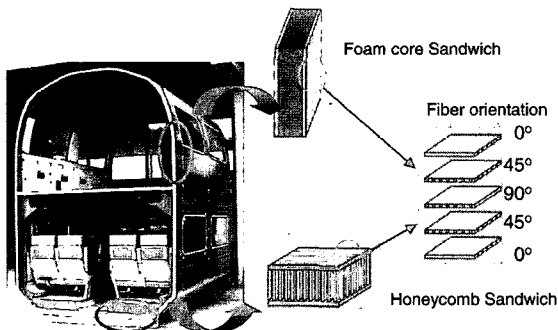


Fig. 1. Composite carbody of TGV Duplex

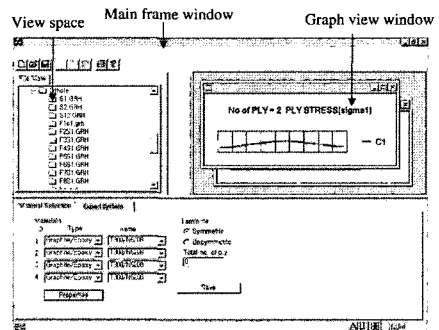


Fig. 2. Main menu of the user-friendly expert system

시에 설정할 수 있고, 선택된 재료는 고유의 ID가 부여된다. 이렇게 선택된 재료의 물성은 “Properties” 버튼을 선택함으로써 확인 가능하다.

- ② 적층판의 형태 선정 - Fig. 3의 적층판 형태 선택메뉴(laminate type selection menu)에서 사용자는 복합재 적층판이 대칭적층판인지 비대칭 적층판인지를 선택할 수 있다.
- ③ 적층수 결정 - 최적설계에 적용될 적층판의 층수를 입력하는 부분이다. 이상의 과정을 통해서 정의된 적층판의 정보는 Fig. 3의 “SAVE” 메뉴를 선택함으로써 전문가 시스템의 데이터 베이스에 저장된다.

2.2 유한요소모델 생성

최적설계에 적용될 재료의 선택이 완료된 후 복합적층판에 대한 유한요소 모델을 생성하게 된다. 본 연구에서 개발된 사용자 편의 전문가 시스템의 목적이 2차원 복합적층판의 최적설계이므로 적층판의 유한요소모델의 생성을 위해서는 길이와 폭방향으로 치수 및 요소수를 결정해야 한다. 이것은 Fig. 5의 메뉴에서 정의할 수 있다.

Fig. 5 메뉴의 Dimension메뉴에서 Length와 With는 각각 적층판의 길이와 폭을 정의하고, DX와 DY는 길이방향과 폭방향으로의 요소수를 정의하는 부분이다. 이상의 값을 입력 후 “Mesh Generation” 버튼을 누르면 유한요소모

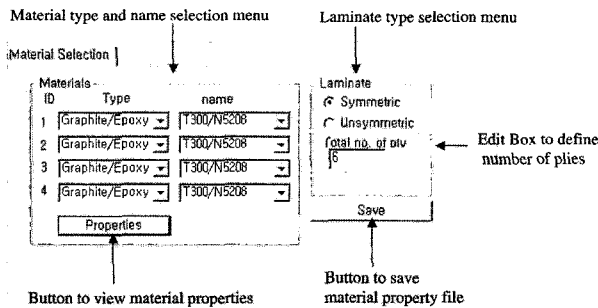


Fig. 3. Menu box of the material selection module

Fig. 4. Menu box for the material property check

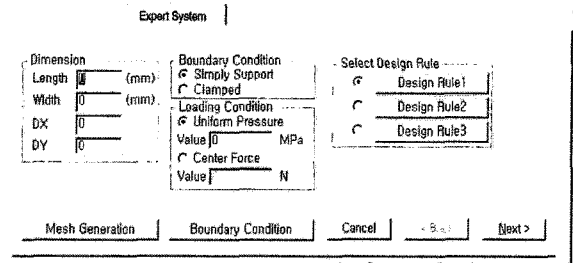


Fig. 5. Menu for the definition of the composite laminate dimension, boundary condition, loading condition and design rules

델이 생성된다. 이렇게 생성된 모델에 경계조건 및 하중조건을 부과하기 위해서는 Fig. 5 메뉴의 Boundary Condition과 Loading Condition메뉴에서 설정하게 된다. 경계조건 및 하중조건 부과 후 최적설계시 적용될 제한조건인 설계규칙은 Select Design Rule메뉴에서 3가지 설계규칙중 하나를 선택함으로써 가능하다.

2.3 설계규칙의 선정

본 연구에서 복합재 구조물의 강도 최적화시에 적용하는 설계지침의 목적은 하중조건, 기하학적인 조건과 같은 적용조건에 따라 연계강성효과의 방지 및 완화, 모재파손 및 층간분리의 방지를 위해 층간응력(interlaminar stresses)을 감소시킬 수 있는 적층을 구현하는 것이다. 복합재 구조물의 강도 최적화는 층간응력성분을 고려한 파손해석을 통해 수행되어야 한다. 그러나 층간응력성분을 고려한 해석을 수행하기 위해서는 3차원 유한요소해석을 수행해야 한다. 그러나 이 경우에는 상당한 계산시간과 계산용량이 요구되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 3차원 해석을 수행하지 않고 2차원 해석에서 고려되어야 하는 층간응력성분의 감소를 위한 적층규칙을 도입하여 단지 2차원 쉘요소를 이용한 해석만으로 최적화를 수행하고자 한다.

본 연구에서는 복합적층판의 설계를 위해 실제 복합적층판의 적층설계시 적용되어지는 설계지침들은 참고문헌 [5-11]과 동일하다. 사용자는 위의 경험적인 복합재 적층시 적용되는 설계규칙들을 최적설계시 제한조건으로 적용하기 위해 Fig. 5의 “Design Rule”중 하나를 선택하면 된다. 각 설계규칙버튼을 누르면 Fig. 6과 같이 적용되는 설계규칙의 조합이 나타낸다.

2.4 유전자 알고리즘의 변수설정

이상의 과정을 통해 최적설계를 위한 복합적층판의 재

료, 층수, 유한요소모델 생성, 경계조건부과 및 설계규칙선정이 완료되면 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계를 수행하게 된다. 유전알고리즘을 이용한 최적설계를 위해서는 최대 세대수(maximum generation number), 개체수(population size), 교배확률(crossover probability) 및 변종확률(mutation probability) 등이 설정되어야 하는데 이는 Fig. 7의 유전자 알고리즘 변수설정 메뉴에서 수행된다.

본 연구에서 이용된 유전자 알고리즘은 선택과 도태(selection & reproduction), 교배(crossover), 변종(mutation)의 세 가지 연산자로 구성되어 있습니다. 선택과 도태 연산자에서 각 설계 점에 적합성의 크기에 따라 교배와 변종에 선택될 확률을 부여하는 과정입니다. 그 확률의 부여 방법은 roulette wheel selection, stochastic remainder selection, tournament selection 등 다양한데, 본 논문에서는 tournament selection을 사용하였다. tournament selection은 설계 점들을 미리 정해놓은 개수의 그룹으로 임의로 나눈 다음, 각 그룹에서 가장 높은 적합성을 갖는 설계 점들을 골라내는 방법이다. 그리고 본 최적설계에 적용된 교배(crossover)와 변종(mutation)확률은 다음과 같은 범위를 갖습니다.

Crossover probability : 0.7 ~ 0.9
 Mutation probability : 0.02 ~ 0.06

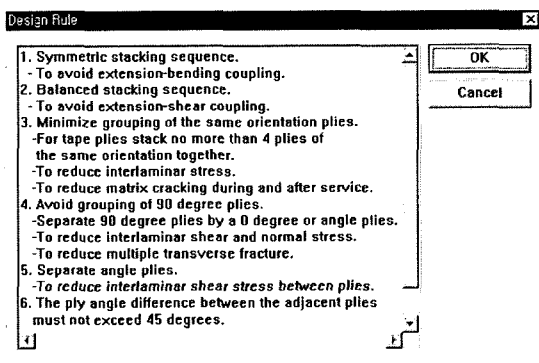


Fig. 6. Dialog box for the selected design rules

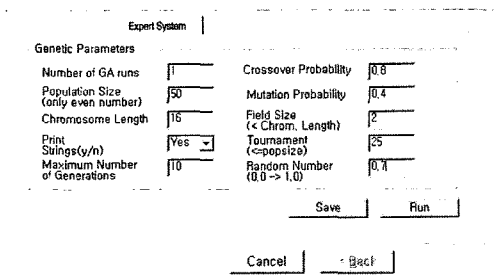


Fig. 7. Parameter-setting menu for the optimization processor

유전자 알고리즘에서는 설계 변수들을 이진 문자열 (binary string) 구조로 코딩해야 한다. 본 연구에서 설계변수가 단층(lamina)의 적층각이므로 유전자 알고리즘에서 다음과 같은 이진문자열로 정의하였다.

[0°] = 00, [45°] = 01, [-45°] = 10, [90°] = 11

이러한 설계절차를 수행하기 위해서는 지식베이스와 유전자 알고리즘과 유한요소 해석프로그램과 같은 알고리즘 부분을 통합해야 한다. 본 연구에서는 알고리즘 부분을 지식베이스와 통합하기 위해서 전문가 시스템 셸인 CLIPS를 이용하였다. CLIPS에는 이러한 외부 프로그램들을 아래와 같이 하나의 규칙(rule) 내부에서 외부함수(external function)로 정의할 수 있고, 또한 이러한 프로그램들을 필요에 따라 호출(call)하여 수행하고 수행이 종료되어지면 다시 CLIPS로 제어복귀(control return)하는 것이 가능하다.

```
(defrule Run_GA
?ml ← (2nd step)
=>
(retract ?ml)
(format t "----- Run GA ----- %n")
(system "sga in out") ← 유전자 알고리즘의 수행을 위한 명령
(format t "----- End of GA run ----- %n")
(assert (End of GA run 2nd)) ← 사실(facts)을 사실목록에 저장
```

(system "sga in out")명령에서 sga, in과 out은 각각 유전자 알고리즘의 수행파일, 입력파일과 출력파일을 의미한다. 따라서, CLIPS의 이러한 기능을 이용하면 지식베이스와 알고리즘 부분을 통합할 수 있다. CLIPS에서 유전자 알고리즘을 수행하면 유전자 알고리즘에서도 CLIPS와 유사한 방법으로 아래와 같이 유한요소 프로그램을 호출하여 수행한다. 본 연구의 최적설계과정에서 호출하는 유한요소해석 프로그램은 개발된 프로그램으로 본 프로그램은 참고문헌 [7-12] 등에서도 적용되어 검증된 프로그램이다.

```
{ printf("maxs run\n");
system("maxs.exe",0); ← 유한요소 프로그램 수행명령
printf("trans run\n");
system("trans.exe",0);
fscanf(out,"%f",&str);
fclose(out);
critter->fitness=str; } ← 유한요소 프로그램에서 얻어진 목적함수 값을 유전자 알고리즘의 fitness 값으로 치환하는 명령
```

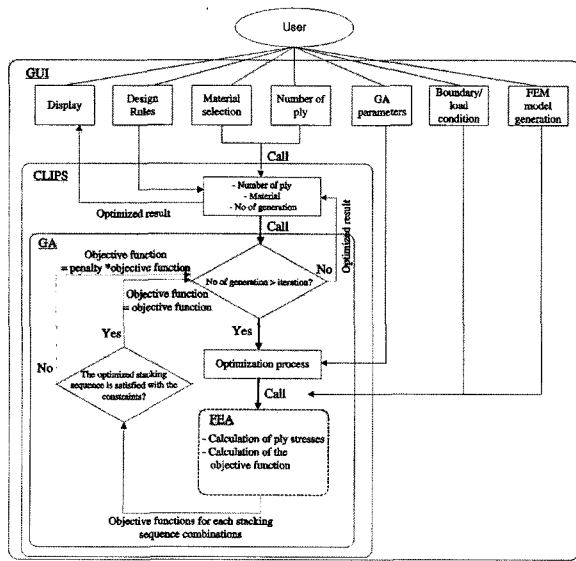


Fig. 8. Flow chart of the expert system

일반적인 최적화 문제의 경우 제한조건들은 등식(equality) 또는 부등식(inequality)의 형태로 주어진다. 그러나 본 연구의 경우 제한조건이 이러한 정형화된 수식의 형태가 아닌 층간응력의 감소나 연계강성의 방지 등과 관련된 비정형화된(ill-structured) 형태이므로 기존의 제한조건과 다른 형태를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 제한조건을 갖는 최적화 문제를 해결하기 위해 벌칙법(penalty method)을 도입하였다. 즉 이러한 구속조건을 갖는 문제의 경우 목적함수를 계산하고 구속조건의 위반여부를 검사하여 위반되지 않았다면 fitness값을 부여하고 위반했을 경우에는 위반 정도에 따라 fitness의 순위를 낮추는 방법을 사용하게 된다.

Fig. 8은 전문가 시스템의 흐름도이다. GUI환경하에서 CLIPS, 유전자 알고리즘(GA)과 유한요소해석 프로그램(FEA)사이의 상호 인터페이스 및 정보의 흐름을 알 수 있다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서 개발된 시스템의 검증을 위해 8층을 갖는 끝단이 고정지지된 100mm×100mm 적층판이 반대편 끝단에서 균일한 인장평면하중을 받을 경우 대해 강도 최적화를 수행하였다. 이 경우에 섬유방향이 하중방향 일치하는 적층으로 구성된 적층판 즉 0° 층으로 구성된 적층판이 최대의 강도를 갖게 된다. 설계의 목적함수는 식 (1)과 같이 Tsai-Hill 파손기준식을 이용하였다. 일반적으로 금속재료와 같은 균질재료의 경우에는 최적설계시 중량이나 비용 등이 목적함수로 정의됩니다. 그러나 복합재 구조물은 다양한 적층각

(0도, 90도, 45도 및 -45도 등)을 갖는 단층(lamina)을 원하는 강도나 강성을 만족시키도록 적층(layer)하는 구조입니다. 따라서 복합재 구조물의 경우 원하는 목적에 적합한 적층각의 최적조합을 도출하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 정해진 두께를 갖는 복합 적층판에 대해서 복합재의 강도를 최적화하기 위해 적층순서를 최적화 하였다.

$$\text{Minimize } f(\theta) = \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \quad (1)$$

subjected to $\theta = \{0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ\}$

여기서 X는 섬유방향의 강도, Y는 섬유에 수직인 방향의 강도 및 S는 전단강도를 의미한다. 사용된 재료는 HFG CU-125NS graphite/epoxy이고 물성치는 Table 1과 같다.

최적화 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 알 수 있듯이 최적해는 0° 층으로 구성되어지고 두 번째 세대에서 얻어진다.

본 연구에서는 이상의 과정을 통해서 검증된 유한요소프로그램과 유전자 알고리즘을 지식베이스 전문가 시스템의 모듈과 통합하여 단순지지(simply supported)조건과 고정지지조건(clamped)하에서 균일분포하중을 받는 적층판에 대해 설계지침이 부과되지않는 경우와 설계지침이 부과된 경우에 대해 강도 최적화를 수행하였다.

Table 1. Material property of HFG CU-125NS graphite/epoxy

Properties	Values
Elastic modulus in fiber-direction, E1	135.4 GPa
Elastic modulus in transverse-direction, E2	10.0 GPa
Shear modulus, G12	4.85 GPa
Poisson's ratio ν_{12}	0.31
Ply thickness	0.125 mm
Tensile strength in fiber direction, XT	1933 MPa
Compressive strength in fiber direction, Xc	1051 MPa
Tensile strength in transverse direction, YT	51 MPa
Compressive strength in transverse direction, Yc	141 MPa
Shear strength, S	61 MPa

Table 2. Result of maximum strength design of composite laminate under uniaxial loading, P=500MPa

Best Final Chromosome	Stacking Sequence	Objective Function	*
00 00 00 00 00 00 00 00	[0 _s] _s	0.27	2

*: Generation when best chromosome obtained

3.1 균일분포하중을 받는 복합적층판

강도 설계에 이용된 적층판은 Fig. 9와 같은 100×100mm 평판이고 층수는 총 16층이다.

경계조건은 4면이 고정지지된 조건과 단순지지된 경우 복합적층판이 0.5MPa의 균일분포하중을 받고 있는 조건이다. 이러한 조건하에서 최적화된 결과는 Table 3과 4에 나타내었고 Table 3는 고정지지조건이고 Table 4는 단순지지조건 하에서 최적화된 결과들이다. 해석결과는 준등방성 적층과 비교하였다. Table 3과 4에서 case1은 자유경계단이 존재하지 않는 경우의 조건이 가해진 경우이고 case2는 case1 조건

에 굽힘과 비틀림의 연계를 감소시키기 위해 $\pm\theta$ 층을 그룹화하는 조건이 첨가된 경우이다. Table 3와 4에서 0₃과 45₂ 등은 각각 섬유방향이 0도와 45도를 갖는 단층이 연속해서 3층과 2층이 적층되어 있다는 것을 의미한다. Table 3와 4에서 목적함수 값은 준등방성 적층인 [0₂/45₂/90₂/-45₂]_s의 목적함수 값으로 나눈 비로 나타내었다. 고정지지조건의 경우에는 case2조건에서 가장 낮은 파손지수(목적함수값)을 얻을 수 있었고, 최적의 적층순서는 [±45/90/0₂/90/0₂]_s였다. 최적화된 적층판들은 준등방성 적층에 비해 목적함수 값을 대체로 40~50% 정도 감소시킬 수 있었다. 단순지지의 경우

Table 3. Design results under uniform pressure P=0.5 MPa(All side clamped)

Design Heuristics	Best final chromosome	Stacking sequence	Obj.
CASE1 - Symmetry - Balance - homogeneous stacking sequence - Minimize grouping of the same orientation plies - Separate $\pm\theta$ plies - Avoid grouping of 90° plies - The difference of ply angle between adjacent plies must not exceed 45°	0111010000001010	[45/90/45/0 ₃ /-45 ₂] _s	0.66
CASE2 - Symmetry - Balance - Minimize grouping of the same orientation plies - Grouping $\pm\theta$ plies - Avoid grouping of 90° plies	0110110000110000	[±45/90/0 ₂ /90/0 ₂] _s	0.51
Quasi-isotropic	-	[(0/45/90/-45) ₂] _s	0.85
	-	[0 ₂ /45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂] _s	1.0

Table 4. Design results under uniform pressure P=0.5 MPa(All side simply supported)

Design Heuristics	Best final chromosome	Stacking sequence	Obj.
CASE1 - Symmetry - Balance - homogeneous stacking sequence - Minimize grouping of the same orientation plies - Separate $\pm\theta$ plies - Avoid grouping of 90° plies - The difference of ply angle between adjacent plies must not exceed 45°	0111101010110101	[45/90/-45 ₃ /90/45 ₂] _s	0.5
CASE2 - Symmetry - Balance - Minimize grouping of the same orientation plies - Grouping $\pm\theta$ plies - Avoid grouping of 90° plies	1011010101111010	[-45/45/(±45) ₃] _s	0.37
Quasi-isotropic	-	[(0/45/90/-45) ₂] _s	0.73
	-	[0 ₂ /45 ₂ /90 ₂ /-45 ₂] _s	1.0

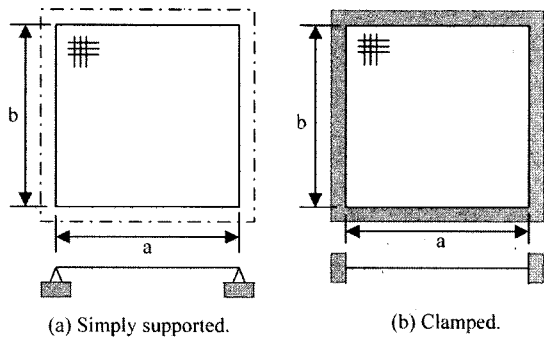


Fig. 9. The boundary conditions and the geometry of the plates.

최적화된 적층판들은 준등방성 적층에 비해 목적함수값을 대체로 50~60%정도 감소시킬 수 있었고 최적의 적층순서는 $[-45/45/(\pm 45)_3]_s$ 였다.

본 연구에서 수행한 2차원 해석과 설계지침들을 적용한 최적설계의 타당성은 Table 5에서 알 수 있다. Table 5에서는 Table 3과 4에서 얻어진 결과에 대해서 부과된 설계지침들의 영향을 검증하기 위해 최적화된 적층판들에 대한 굽힘-비틀림 연계강성($D_{16}=D_{26}$) 과 최대 층간 수직응력, $(\sigma_z)_{max}$ 를 비교하였다. 층간 수직응력 σ_z 는 일반적으로 3차원 해석을 통해서만 얻어지는 값이다. 따라서, 본 연구에서는 σ_z 를 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 3차원 해석을 통해서 얻었다. Table 5에서 굽힘과 비틀림의 연계강성 저감조건이 부과된 case2의 경우가 가장 낮은 연계강성값을 나타내었다. 특히 고정지지조건에서 연계강성 저감조건을 부과하지 않은 case1에서 얻어진 적층순서의 경우가 가장 높은 연계강성치를 나타내었다. 층간응력의 경우 단순지지조건인 case2에서 가장 낮은 값을 나타내었다. Table 5

에서 알 수 있듯이 연계강성 및 층간분리 저감 설계규칙이 적용된 최적화된 적층이 기존 준등방성 적층들에 비해 낮은 연계강성 및 층간응력값을 보이고 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 철도분야 응용을 위해 복합적층판의 최적설계에 적용하기 위한 사용자 편의성(user-friendly)을 갖춘 전문가 시스템 구축에 대한 연구를 수행하였다.

- (1) 기존의 독립적으로 존재하는 전문가 시스템, 유전자 알고리즘 및 유한요소 해석 프로그램을 VISUAL C++환경을 통해 Window 메뉴 방식으로 사용자 편의성을 높인 시스템을 구축하였다. 그리고 적용 가능한 재료들에 대한 DB를 구축하여 사용자가 쉽게 원하는 재료를 선택 및 최적설계시 적용가능하다.
- (2) 복합적층판의 주어진 하중조건과 요구조건하에서 강도를 최적화 하기 위해 적층순서를 설계할 수 있는 사용자 편의 전문가 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 복합재 구조물의 설계시 적용되는 경험적인 지식과 복합재 구조물에 대한 다양한 해석 및 실험을 통해서 얻어진 설계지침들을 제한 조건으로 하고 이산화된 적층각인 $0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ$ 으로 구성된 최적의 적층순서의 조합을 갖는 적층판을 설계하였다.
- (3) 층간응력성분 및 파손을 고려한 3차원 해석을 수행하지 않고 단지 설계지침과 2차원 해석만을 수행하므로써 계산시간이나 계산용량의 절감할 수 있었고 최적화 되지 않은 적층인 준등방성 적층에 비해 목적함수 및 층간 응력성분을 감소시킬 수 있었다.

Table 5. Bending-twisting coupling stiffness and interlaminar normal stress for design results.

Boundary conditions	Design results	Stacking sequence	Obj. function	D16=D26(Nm)	$(\sigma_z)_{max}(MPa)$
Clamped	CASE1	$[45/90/45/0_3/-45_2]_s$	0.66	10.4	21.38
	CASE2	$[\pm 45/90/0_2/90/0_2]_s$	0.51	1.73	23.29
	Quasi-isotropic	$[(0/45/90/-45)_2]_s$	0.85	3.45	24.79
		$[0_2/45_2/90_2/-45_2]_s$	1.0	5.92	25.11
Simply supported	CASE1	$[45/90/-45_3/90/45_2]_s$	0.5	-0.49	3.88
	CASE2	$[-45/45/(\pm 45)_3]_s$	0.37	0.49	3.14
	Quasi-isotropic	$[(0/45/90/-45)_2]_s$	0.73	3.45	6.0
		$[0_2/45_2/90_2/-45_2]_s$	1.0	5.92	20.27

참고문헌

1. Webber, J. P. H. & Morton, S. K., 1990, "An Expert System for Laminated Plate Design Using Composite Materials," *Comput. & Struct.*, Vol.37, pp.1051-1067.
2. Wu, C. M. L., Webber, J. P. H. & Morton, S. K., 1991, "A Knowledge Based Expert System for Laminated Composite Strut Design," *Aeronautical J.*, Vol.95, pp.1-20.
3. Wu, C. M. L., 1992, "Bolted Joints in a Laminated Composite Strut Design Expert System," *Composite Structures*, Vol.22, pp. 63-85.
4. Akira T., Naonobu S. and Mitsunori M., 1996, "Object-Oriented Approach to Optimize Composite Laminated Plate Stiffness with Discrete Ply Angles," *Journal of Composite Materials*, Vol.30, pp.1020-1041.
5. Kim J. S., Kim G. G., and Hong C. S., 1998, "Design of Composite Laminates Using Expert System and Enumeration Method," *J. of the Korean Society for Composite Materials*, Vol.11, pp.48-49.
6. Kim C. G., Kim J. S., and Hong C. S., 1998, "Stacking Sequence Design of Composite Laminate Using Expert System," *ICCE-5, Las Vegas, Nevada, 5th-11th July*.
7. Kim J. S., Kim G. G., and Hong C. S., 1999, "Knowledge-Based Expert System for Optimal Stacking Sequence Design of Composite Structures." *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No.13, pp.1244-1274.
8. Kim J. S., Kim G. G., and Hong C. S., 1999, "Optimum Design of Composite Laminates with Plydrop Using Patchwise Layup Design Method," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol.27, No.3, pp.43-52.
9. Kim J. S., Kim G. G., and Hong C. S., 1999, "Optimum Design of Composite Structures with Ply Drop Using Genetic Algorithm and Expert System Shell," *Composite Structures*, Vol.4, pp.171-187.
10. Kim J. S., Kim G. G., and Hong C. S., 2000, "Development of Concurrent Engineering System for Design of Composite Structures," *Composite Structures*, Vol.50, pp.297-309.
11. Kim J. S., Kim G. G., and Hong C. S., 2001, "Practical Design of Tapered Composite Structures by Considering the Manufacturing Cost Concept," *Composite Structures*, Vol.51, pp. 285-299.
12. Grant S., Zafer G., Christos K. and Darryl T., 2002, "Stacking sequence blending of multiple composite laminates using genetic algorithms," *Composite Structures*, Vol.56, pp.53-62.
13. Niranjana P., Auter K. and Michael W., 2003, "Optimization of laminate stacking sequence for failure load maximization using Tabu search," *Composites Part B*, Vol.32, pp.405-413.
14. Lin C. C. and Lee Y. J., 2004, "Stacking sequence optimization of laminated composite structures using genetic algorithm with local improvement," *Composite Structures*, Vol.63, pp.339-345.
15. Akira T. and Tetsuya I., 2004, "Design of experiments for stacking sequence optimizations with genetic algorithm using response surface approximation," Vol.64, pp.349-357.
16. Kim J. S., Kim N. P., and Han S. H., 2005, "Optimal stiffness design of composite laminates for a train carbody by an expert system and enumeration method." *Composite Structures*, Vol. 68, pp.147-156.