

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.3.261

복합재료 로터 블레이드 단면 모델링 프로그램 개발

도형수*, 조진연**, 박일주***, 정성남***, 김태주****, 김도형****

Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade

Hyung Soo Do*, Jin Yeon Cho**, Il-Ju Park***, Sung Nam Jung***, Tae Joo Kim**** and Do-Hyung Kim****

ABSTRACT

Generally, modeling procedure of cross section of composite rotor blade is complicated and time-consuming, because it is made up of various stiffeners and multiple layers of composite materials. For efficient modeling of cross section of composite rotor blade, a modeling program so called KSec2D, which provides a user friendly GUI, is developed by using a 2D modeling algorithm based on set operation. By the developed program KSec2D, a modeling of complicated cross section of rotor blade is carried out. Through the demonstration, the usefulness of developed program in modeling procedure of cross section of composite rotor blade is verified.

초 록

복합재료 로터 블레이드는 각종 보강재와 더불어 적층된 형태로 구성되어 있어 그 단면 구조가 매우 복잡하고, 이로 인해 모델링에 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 효율적인 로터 블레이드 단면 모델링을 위해 집합 연산에 기반 한 2차원 모델링 알고리즘을 활용하여 그래픽 사용자 환경을 갖춘 프로그램 KSec2D를 구현하였다. 구현된 프로그램을 이용하여 복잡한 로터 블레이드 단면 형상 모델링을 수행하고 이를 통해 복합재료 로터 블레이드 모델링 시 개발된 프로그램의 유용성을 확인하였다.

Key Words : Rotor blade(로터 블레이드), Composite material(복합재료), Cross section(단면), Modeling(모델링), Set operation(집합 연산)

1. 서 론

일반적으로 로터 블레이드의 해석은 1차원 보가정을 통해 수행[1,2]되며 이를 위해서는 여러 가지 단면 물성치가 필요하다. 단면 물성치를 얻

기 위한 단면 해석은 크게 단면 유한요소 이산화 를 적용하는 방법과 박벽 보 이론에 근거한 단면 중심선 기반 방법으로 나눌 수 있으며, 유한요소 법을 기반으로 한 대표적인 프로그램으로는 VABS[2,3]를 들 수 있고, 박벽 보 이론에 기반하여 개발된 대표적인 프로그램으로는 PreComp [4], NuMAD[5] 등을 들 수 있다. 그러나 이들은 복잡한 로터 블레이드의 단면 모델링 및 가시화를 위한 전/후처리 기능을 제공하지 않거나 제한적으로 제공하는 등 사용자 편리성을 갖추고 있지 않은 실정으로서 최근 들어 이를 위한 노력이 경주되고 있다[6]. 또한 상용CAD 모델링 프

† 2010년 2월 22일 접수 ~ 2011년 2월 15일 심사완료

* 정회원, 인하대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 인하대학교 항공우주공학과
교신저자, E-mail : cjoy@inha.ac.kr

인천광역시 남구 용현동 253

*** 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

**** 정회원, 한국항공우주연구원 로터팀

로그래밍의 경우 로터 블레이드 단면 모델링과 같은 특수한 목적으로 개발되지 않은 관계로, 실제 현장에서 초기 설계 시 다양한 형상에 대한 모델링을 신속히 수행하기 어려우며, 단면 해석코드와의 연동 시에도 어려움이 존재한다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 복합재료로 이루어진 복잡한 로터 블레이드의 단면 모델링을 편리하게 수행할 수 있는 모델링 프로그램을 개발하였으며, 개발된 로터 블레이드 모델링 프로그램은 협력연구를 통해 기 개발된 로터 블레이드 단면해석 모듈[7]과 통합하였다.

로터 블레이드의 단면 형상은 외피(skin), 스파(spar) 등으로 이루어져 있으며 특히 복합재료가 적용될 경우 적층에 대한 모델링을 손쉽게 할 수 있어야 하기 때문에 형상에 관계없이 외곽선과 두께 정보를 이용하여 내부 형상을 일관되게 생성할 수 있는 알고리즘이 필수적이다.

외곽선과 두께 정보를 이용하여 내부 형상을 생성하기 위해 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법은 외곽선의 내향 수직벡터를 이용하는 것이다. 즉, 외곽선을 이루는 각 선분의 끝점에서 두께만큼의 크기를 갖는 내향 수직 벡터를 만든 후 이들 벡터의 끝점을 모두 연결하여 내부 형상을 생성하는 것이다. 그러나 이 방법을 일반적으로 사용하기에는 많은 예외가 존재하며 간단한 모델의 경우에도 프로그래밍 수준에서 상당한 예외처리를 해주어야 하는 어려움이 존재한다.

예를 들어 Fig. 1과 같은 사각형 모델로부터 일정 두께를 갖는 모델을 구하기 위해 내부 형상을 구한다고 가정하자. 이때 각 내향 수직 벡터의 끝점을 따라 순서대로 연결할 경우, 연결된 곡선에는 불필요한 네 모퉁이가 포함되게 되며 올바른 내부 형상을 얻기 위해서는 예외처리를

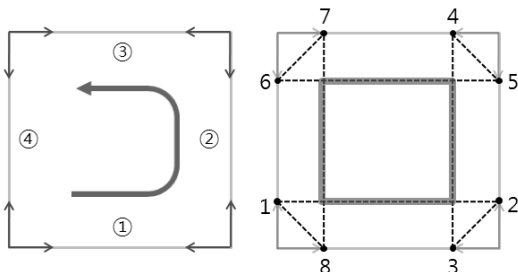


Fig. 1. 내향 수직 벡터를 사용하여 내부 형상을 구하는 경우의 문제점. (가운데 표시된 사각형이 구하고자 하는 폐곡선이며 점선은 실제 생성되는 폐곡선 1-2-3-4-5-6-7-8 이다.)

통해 이를 삭제해야만 한다. 이와 같이 경우마다 다를 수 있는 예외처리를 모두 구현하는 것은 한계가 있을 뿐만 아니라, 강건하고 일반적인 모델링 프로그램의 구성이라는 측면에서도 바람직하지 않다. 이에 본 연구에서는 로터 블레이드 단면 모델링뿐만 아니라 일반적인 형상에도 적용 가능한 집합연산 기반의 알고리즘을 채택하고, 이를 기반으로 그래픽 사용자 환경을 갖춘 단면 모델링 프로그램 KSec2D를 구현하였다.

II. 2차원 집합연산 기반 모델링

2.1 집합 연산을 통한 2차원 객체의 모델링

복합재료 로터 블레이드 단면 모델링을 위해서는 주어진 2차원 객체에 대해 안쪽으로 일정한 두께를 갖는 모델을 생성하는 과정이 필수적이다. 가장 직관적 방법으로는 2차원 객체의 외곽 선분을 내부 수직방향으로 전진시키는 기법을 생각할 수 있으나 앞서 서론에서 언급한 바와 같은 문제점이 발생할 수 있기 때문에 일반적인 경우에는 복잡한 예외처리가 뒤따르게 된다.

이에 본 연구에서는 2차원 차집합 연산을 이용하여 일정한 두께를 갖는 2차원 객체를 생성할 수 있는 기법을 활용하였다. 폐곡선 등으로 주어진 2차원 객체로부터 일정한 두께를 갖는 2차원 객체를 생성하기 위해서는 주어진 객체의 내부 방향으로 일정한 오프셋을 가진 내부 형상을 구해야 한다. 이러한 내부 형상은 Fig. 2에서와 같이 한 번은 주어진 객체의 선분과 같고 다른 한 번은 오프셋과 같은 크기를 가지는 직사각형을 주어진 객체 A의 각 선분에 대해 구한 뒤 이를 차집합 연산을 통해 객체 A로부터 차례대로 빼면 구할 수 있으며, 이 같은 개념을 이용해서 주어진 객체 A로부터 일정한 두께를 가지는 2차원 객체를 구성할 수 있다.

위와 같은 연산을 활용하면 일정한 두께를 가지는 2차원 객체를 구할 때뿐만 아니라 Fig. 3에서 보는 것과 같이 각종 형상을 가진 로터 블레이드 내부 구조물의 단면을 손쉽게 생성할 수 있는 장점을 갖게 된다.

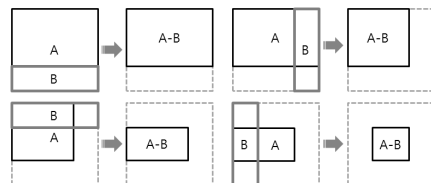


Fig. 2. 2차원 객체의 내부 형상을 구하는 과정

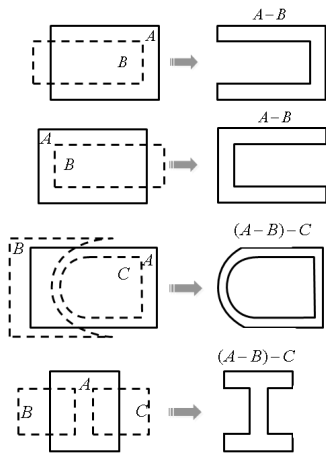


Fig. 3. 로터 블레이드 내부 구조물

2.2 2차원 객체 차집합 연산 알고리즘

앞서 언급한 바와 같은 장점을 갖는 2차원 객체 차집합 연산의 구현을 위해 알고리즘을 구성하였으며, 구성된 (A-B) 차집합 연산 절차는 아래와 같다.

① 우선 객체 A를 이루는 외곽 선분은 반시계 방향으로 내부 선분은 시계방향으로 정렬한 후 이들 선분의 집합을 A라고 한다. 객체 B를 이루는 외곽 선분과 내부 선분은 각각 시계방향과 반시계방향으로 정렬하고 이들 선분의 집합을 B라고 한다(여기서, 선분은 시점과 종점으로 이루어져 있다).

② 집합 A의 선분과 집합 B의 선분을 차례대로 하나씩 받아온 후 선분이 서로 교차하는지 검색한다. 두 선분이 2차원 공간에 놓일 수 있는 경우는 Fig. 4에 도시한 바와 같다.

③ 두 선분이 만약 교차한다면, 교점을 구한다. 두 선분의 교점을 구하는 알고리즘은 2.3절에 간략히 정리하였다. 집합 A와 집합 B의 모든 선분에 대하여 교점을 구한 후 교점이 내부에 존재하는 선분은 교점으로 분할하여 갱신하고 집합 A, B도 갱신한다(선분이 겹쳐지는 경우 무수히 많은 점에서 교차하지만, 이때는 선분의 끝점 중 다른 선분의 내부에 존재하는 점을 교점으로 삼고 선분을 분할한다. Fig. 4h, 4i, 4j의 경우 참조).

④ 객체 B의 외부에 위치하는 집합 A의 선분을 찾고 이들 선분의 집합을 C라고 한다. 이때 객체 B의 경계와 일치하는 집합 A의 선분은 검색에서 제외한다. 만약 객체 B의 외부에 위치하는 집합 A의 선분이 없으면 $A-B=\phi$ 이다. 이 경우 알고리즘은 종료한다(Fig. 5 참조).

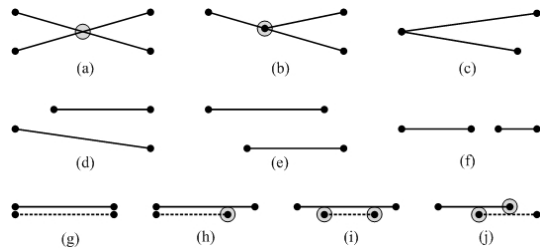


Fig. 4. 2차원 공간에서 두 선분의 상대적 위치 (회색 원은 선분을 분할시킬 교점을 의미)

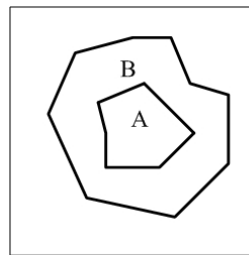


Fig. 5. $A-B=\phi$

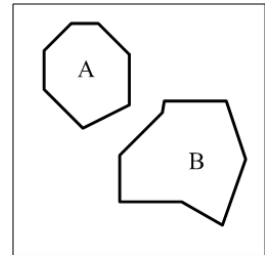


Fig. 6. $A-B=A$

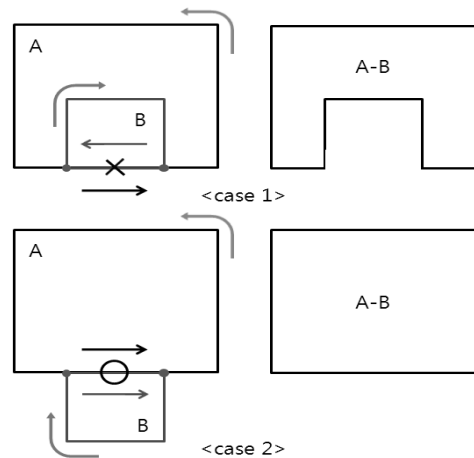


Fig. 7. 2차원 객체의 차집합 연산 시 겹치는 선분의 처리

⑤ 객체 A의 내부에 위치하는 집합 B의 선분을 찾고 이들 선분의 집합을 D라고 한다. 이때 객체 A의 경계와 일치하는 집합 B의 선분은 검색에서 제외한다. 만약 객체 A의 내부에 위치한 집합 B의 선분이 없으면 $A-B=A$ 이다. 이 경우 알고리즘은 종료한다(Fig. 6 참조).

⑥ 객체 A의 경계에 위치한 선분과 동일한 집합 B의 선분 중에서 선분의 방향이 같을 경우 이들을 모아 집합 E로 정의하고(Fig. 7 참조), 집합 C와 E의 합집합을 F라고 정의한다.

⑦ $A-B=\emptyset$ 인 경우와 $A-B=A$ 인 경우가 아니면 단계 ⑥에서 구성한 집합 F 의 선분과 ⑤에서 구성한 집합 D 의 선분을 연결한다. 남은 선분을 연결할 때는 남은 선분 중 집합 F 의 선분에 대해서는 집합 D 의 선분을 우선적으로 연결하고, 집합 D 의 선분에 대해서는 집합 F 의 선분을 우선적으로 연결한다(Fig. 8 참조).

⑧ 선분을 연결하다가 처음 시작된 선분과 연결되어 폐곡선이 만들어지면, 남아있는 선분 중에서 어느 한 선분을 선택하고 계속적으로 선분을 연결하며, 이 과정을 남아있는 선분이 없을 때까지 수행하여 $(A-B)$ 객체를 구성한다(Fig. 9 참조).

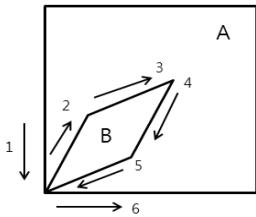


Fig. 8. 남은 선분의 연결 순서

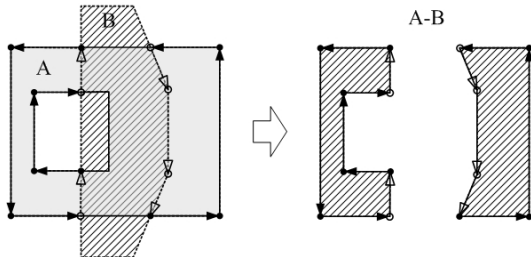


Fig. 9. $(A-B)$ 차집합 연산의 결과가 여러 개의 폐곡선으로 이루어진 경우의 구성 예

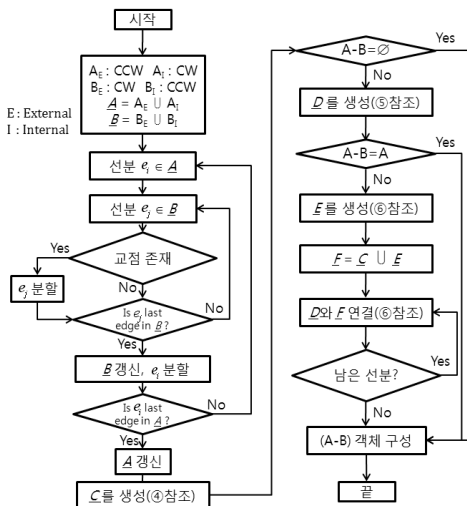


Fig. 10. 차집합 연산 알고리즘의 순서도

Fig. 10에는 차집합 연산 알고리즘의 순서도를 도시하였다.

2.3 선분 분할을 위한 교점의 판단

Fig. 11에 나타난 바와 같이 객체 A와 객체 B의 선분을 각각 선분 $\overline{x_1x_2}$ 와 $\overline{y_1y_2}$ 라고 하자. 그러면 각 선분을 품는 직선상의 임의의 점 p 와 q 는 각 선분의 끝점을 이용해 식 (1a), (1b)와 같이 표현될 수 있으며, 두 점 p 와 q 의 거리는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$p = (1-\lambda)x_1 + \lambda x_2 \quad (1a)$$

$$q = (1-\mu)y_1 + \mu y_2 \quad (1b)$$

$$dist(p,q) = \sqrt{(p-q) \cdot (p-q)} \quad (2)$$

여기서 λ 와 μ 는 임의의 실수이며, 그 값이 0 또는 1일 경우 선분의 시점 혹은 종점을 의미하고, 0과 1사이일 경우 선분의 내부 점을 의미한다.

각 선분 $\overline{x_1x_2}$ 와 $\overline{y_1y_2}$ 를 품는 직선이 평행하지 않을 경우 반드시 두 직선의 교점이 일의적으로 존재하며 그 교점은 아래 식 (3)과 같이 임의의 두 점 p 와 q 의 거리를 최소화하여 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \lambda \\ \mu \end{cases} = \frac{1}{\alpha} \begin{cases} (b \cdot b)(a \cdot c) - (a \cdot b)(b \cdot c) \\ (a \cdot b)(a \cdot c) - (a \cdot a)(b \cdot c) \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

$$\alpha = (a \cdot a)(b \cdot b) - (a \cdot b)(a \cdot b)$$

$$a = (x_2 - x_1), \quad b = (y_2 - y_1), \quad c = (y_1 - x_1)$$

두 선분의 위치 관계가 평행이 아닌 경우 (Fig. 4a, 4b, 4c, 4d의 경우) 식 (3)의 λ, μ 를 일의적으로 결정할 수 있으며, 구한 λ, μ 가 모두 0보다 크고 1보다 작으면 Fig. 4a와 같이 두 선분이 내부에서 교차함을 의미한다. λ, μ 중 하나가 0 또는 1이고 다른 하나가 0보다 크고

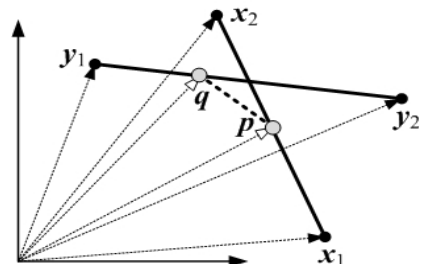


Fig. 11. 선분 위에 있는 두 점 사이의 거리

1보다 작으면 두 선분이 Fig. 4b와 같이 만나는 경우를 의미하며, λ, μ 모두 0 또는 1이면 Fig. 4c에 도시한 바와 같이 서로의 끝점에서 만남을 의미한다. λ, μ 둘 중 하나라도 0보다 작거나 1보다 크면 서로 교차하지 않는 Fig. 4d 경우를 나타낸다. 그리고 두 선분의 위치 관계가 평행한 경우에는 한 선분 내부에 다른 선분의 끝점이 존재하는지 판단하고 이를 만족하면 그 끝점을 선분 분할을 위한 교점으로 선택한다.

2.4 차집합 연산을 통한 내부형상

차집합 연산 알고리즘은 임의의 단면 형상에 대해서도 적용이 가능하다. Fig. 12에 도시한 바와 같이 이 알고리즘을 사용하면 임의의 외곽선 형상과 둔각과 예각을 교차로 가진 별 모양의 다소 복잡한 형상에 대해서도 내부 형상을 일관되게 구성할 수 있음을 알 수 있다.

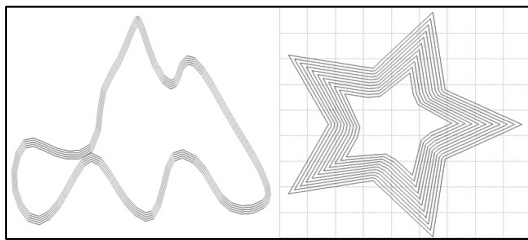


Fig. 12. 임의의 외곽선과 별 형상 외곽선에 대한 내부 형상의 구성

2.5 2차원 단면 모델링 프로그램 구성

전술한 알고리즘을 토대로 그래픽 사용자 환경을 갖춘 로터 블레이드 단면 모델링 프로그램 KSec2D를 개발하였다. 이 프로그램은 윈도우 기반으로 개발되었으며 이를 실행시키면 초기에 Fig. 13과 같은 화면을 볼 수 있다.

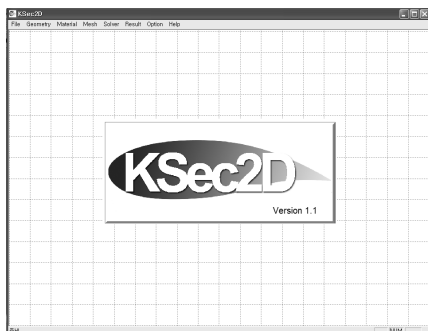


Fig. 13. 프로그램 실행 화면

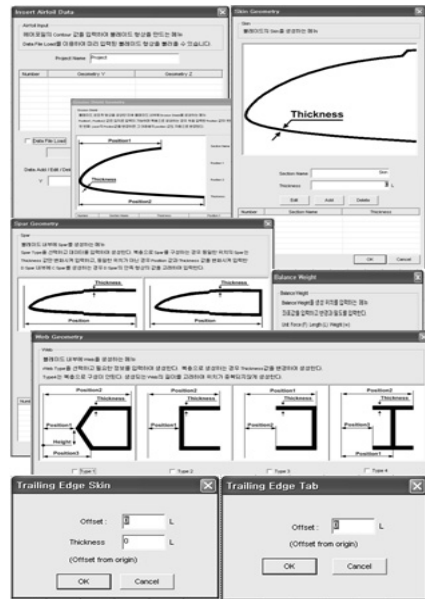


Fig. 14. 프로그램의 대화상자 모음

단면 해석을 위해서는 여러 가지 정보가 필요하기 때문에 단면 해석에 필요한 정보를 쉽고 간편하게 입력할 수 있도록 대화상자를 프로그램에 구현하였다. 모든 과정은 모델의 외곽선 정보를 입력하는 것으로 시작되며, 외곽선 정보는 사용자가 좌표를 직접 입력하거나 혹은 좌표가 기록되어 있는 파일을 통해 받아들일 수 있다. 로터 블레이드를 이루는 각종 내부 구조물은 몇 개라도 생성할 수 있으며, 이를 위해서는 대화 상자에서 요구하는 정보를 정확히 입력해야 한다. 단면 해석 모델링을 위한 메뉴는 모두 프로그램 창의 "Geometry" 탭에서 확인할 수 있다.

모델링이 완료되면 "Material" 탭에서 사용할 재료를 리스트로 작성할 수 있다. 리스트의 작성은 사용자가 직접 입력할 수도 있고, 파일로 작성된 리스트를 불러들인 후 각 구조물의 재료 물성치를 리스트에서 선택하여 입력할 수도 있다. Fig. 14에는 KSec2D에 구현된 각종 입력창(대화상자)을 도시하였다.

모델링이 완료되면 로터 블레이드의 내부 구조 형상은 각각의 객체로 저장되며, 저장된 객체에 대하여 요소망 생성을 진행하게 된다. 요소망을 생성하기 위해서는 영역기반 해쉬 구조를 이용한 삼각형 요소망 생성 알고리즘[8,9]이 사용되었으며 그 과정을 요약하면 아래와 같다.

① 객체의 정보와 생성할 요소의 크기를 받아들인다.

② 요소 크기의 정보를 통해 단위 해쉬 영역의 크기를 결정하고 각 자료구조에 대한 해쉬 테이블을 구성한다.

③ 객체의 경계를 요소의 크기에 맞게 분할한다.

④ Advancing Layer Method를 사용하여 객체 내부에 질점을 생성한다. 단 하나의 점도 생성되지 않을 때 까지 Layer를 늘려가며 적용한다.

⑤ 점을 생성한 후 Bower and Watson 알고리즘을 사용하여 요소를 생성하게 되는데 이때 각 해쉬 영역별로 요소를 생성하는 Local Mesh 알고리즘을 사용한다.

⑥ 전체 해쉬 영역에 대하여 ⑤과정을 반복하여 요소를 생성한다.

⑦ 요소를 생성한 후 내/외부 판단을 사용하여 객체의 외부에 생성된 요소를 제거한다.

⑧ 유희화정정을 통해 최종적으로 요소의 질을 향상시킨다.

요소망 생성이 완료되면 프로그램의 "Solver" 탭에서 Solver를 선택함으로써 단면 해석 모듈이 실행된다.

2.6 로터 블레이드 단면 모델링 예제

개발된 KSec2D 로터 블레이드 단면 모델링 프로그램을 통해 임의로 모델링한 로터 블레이드의 모습을 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 16에는 모델링된 로터 블레이드의 앞전과 뒷전 부분의 확대된 모습을 도시하였다. 앞전의 경우 여러 장의 외피가 겹치면서 윗면과 아랫면의 각이 좁아지기 때문에 내향 수직 벡터를 전진시켜 내부 형상을 구성하고자할 경우 형상의 꼬임이 발생할 수 있으며, 뒷전의 경우도 뒷전 외피 생성 과정에서 같은 문제가 발생할 수 있다. 그러나 2차원 객체 차집합 연산 알고리즘을 사용하면 Fig. 16에서 알 수 있듯이 형상의 꼬임 없이 성공적으로 모델링을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다.

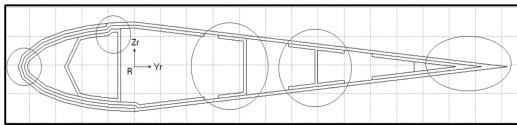


Fig. 15. 로터 블레이드 단면

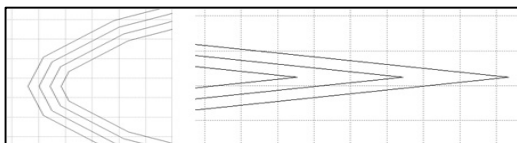


Fig. 16. 앞전과 뒷전의 확대 모습

Fig. 17은 보호막(erosion shield)과 외피의 경계를 확대한 모습이다. 외피가 꺾이는 다소 복잡한 형태도 자연스럽게 오류 없이 모델링할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 18에는 ㄷ형 스파(spar)와 I형 스파(spar)의 모습을 나타내었다. 차집합 연산 알고리즘을 사용하여 예외처리 없이 간단명료하게 구현할 수 있었으며, 스파(spar)는 모두 로터 블레이드 가장 안쪽의 폐곡선을 기반으로 Fig. 3의 방법으로 구현되었기 때문에 로터 블레이드의 외피와 완벽히 맞닿아 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 19에는 차집합 연산 알고리즘을 이용해서 모델링된 뒷전 외피와 뒷전 탭(tab)의 모습을 나타내었다.

로터 블레이드에 심재(core)가 존재하는 경우 단면 물성치에도 변화를 가져올 수 있기 때문에 심재를 모델로부터 찾아낼 수 있는 기능을 구현하였으며, 이기능을 통해 탐색된 로터 블레이드의 심재 부분을 Fig. 20에 도시하였다. 심재의 탐색기능은 로터 블레이드의 맨 안쪽 폐곡선과 내부 구조물을 이루는 폐곡선을 이루는 선분 중에서 서로 겹치지 않은 선분들을 모두 찾아서 객체로 저장하는 방법을 사용하였다.

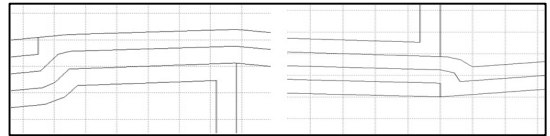


Fig. 17. 보호막(Erosion Shield)과 외피의 경계

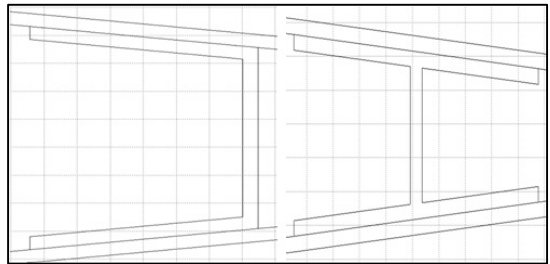


Fig. 18. 스파(spar)의 확대 모습

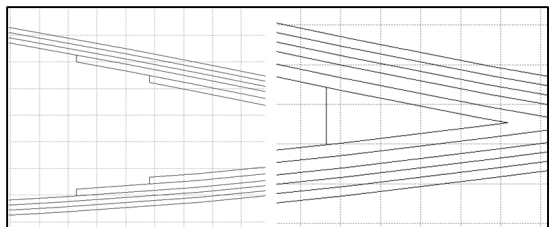


Fig. 19. 뒷전 외피와 뒷전 탭(tab)



Fig. 20. 탐색된 로터 블레이드의 심재

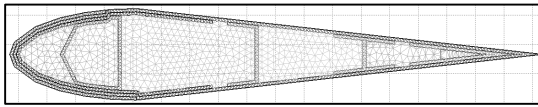


Fig. 21. 요소망이 생성된 로터 블레이드 모델

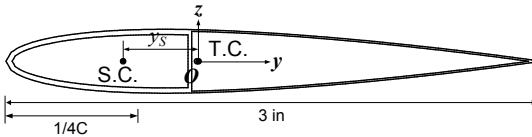


Fig. 22. NACA0012 에어포일 단면을 갖는 복합재료 블레이드 형상

Table 1. 복합재료 블레이드의 단면 강성치 비교 결과

		KSec2D	Experimental [10]	Difference (%)
$\theta = 15^\circ$	EI_y	27,664	26,879	2.9
	GJ	8,923	8,860	0.7
$\theta = 30^\circ$	EI_y	16,854	17,622	-4.4
	GJ	16,786	15,781	6.4
$\theta = 45^\circ$	EI_y	11,683	12,214	-4.3
	GJ	19,958	19,727	1.2

위와 같은 모델링이 끝나면 단면에 대한 유한 요소 해석을 위해 Fig. 21과 같이 요소망을 생성하게 된다. 이때 생성되는 요소망은 로터 블레이드 내부 구조의 경계면에서 요소가 서로 일치할 수 있도록 생성하게 된다. 또한 로터 블레이드의 심재 부분과 같이 세밀한 요소가 크게 필요하지 않은 부위의 요소 개수를 줄이고 이를 통해 해석 시간을 단축시키기 위해 요소망 생성 시 가중치를 부여하는 방법[9] 등을 활용하게 된다.

개발된 프로그램의 유효성을 확인하기 위해 Fig. 22와 같은 형상을 갖는 복합재료 블레이드를 모델링하여, 단면 해석 모듈을 이용한 해석을 수행하고 이를 실험결과[10]와 비교하였다. 블레이드 해석을 위해 2,185개의 3절점 삼각형 요소와 1,722개의 절점을 이용하였다. 복합재료의 적층각 변화($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)에 대한 굽힘 및 비틀림 강성치를 비교하여 Table 1에 보였다. 해석결과는 최대 약 6.4% 이내의 오차를 나타냈다. 그리고 구해진 단면 중심치 중에서 전단중심(S.C.) 및 인장중심(T.C.)의 위치를 Fig. 22에 도시하였다.

III. 결론

본 논문에서는 로터 블레이드 내부 구조의 단면 형상을 효율적으로 모델링하기 위해 차집합 기반의 모델링 알고리즘을 활용하여 그래픽 사용자 환경을 갖춘 윈도우 기반의 모델링 프로그램(KSec2D)을 구현하였다.

모델링 예제로부터 2차원 객체의 차집합 연산 알고리즘을 통해 임의의 2차원 외곽 형상으로부터 일정한 두께를 갖는 2차원 객체를 편리하게 생성할 수 있음을 확인하였으며, 복잡한 형상의 모델링 시 발생할 수 있는 예외처리에 의한 오류를 제거할 수 있음을 확인하였다. 또한 이를 통해 로터 블레이드를 구성하는 스파(spar), 외피 보호막(erosion shield) 등 각종 구조물의 모델링을 쉽게 수행할 수 있음을 확인하였다. KSec2D 프로그램을 사용하여 로터 블레이드 단면해석을 수행하고 실험결과와 비교하여 개발된 프로그램의 유용성을 확인하였다.

향후 회전익기 로터 블레이드 설계와 풍력 발전기 터빈 블레이드 설계 시, 개발된 로터 블레이드 단면 모델링 프로그램 KSec2D를 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 항공우주부품기술개발사업 위탁연구 결과 중 일부임.

참고문헌

- 1) Berdichevski, V. L., Armano, E. A., and Badir, A. M., "Theory of Anisotropic Thin-Walled Closed-Section Beams", *Composites Engineering*, Vol. 2, Nos. 5-7, 1992, pp. 411-432.
- 2) Cesnik, C. E. S., and Hodges, D. H., "VABS: A New Concept for Composite Rotor Blade Cross-Sectional Modeling", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 42, No. 1, 1997, pp. 27-38.
- 3) Yu, W., Volovoi, V. V., Hodges, D. H., and Hong, X., "Validation of the Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis", *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 10, 2002, pp. 2105-2112.
- 4) Bir, G. S., *User's Guide to PreComp*, NREL, 2005.

5) Laird, D. L. , *NuMAD User's Manual*, Sandia National Laboratories, 2001.

6) Chakravarty, U. K, "SectionBuilder: An innovative finite element tool for analysis and design of composite rotor blade cross-sections", *Composite Structures*, Vol. 92, 2010, pp. 284-294.

7) 정성남, 박일주, 김광식, 조진연, 김태주, 김도형, "복합재료 로터 블레이드의 단면 해석 프로그램 개발", 제 2회 헬리콥터 심포지움 초록집, 2008, p. 12.

8) 김한별, *영역 해쉬 그래프 분할 기법을 이*

용한 초대형 병렬 사면체 유한요소망 생성 기법 개발, 인하대학교 항공우주공학과 석사학위논문, 2006년 2월.

9) 김광식, 조진연, 정성남, 김태주, "영역기반 해쉬 구조와 4진 트리 구조를 이용한 가중치 부여 삼각형 요소망 생성기법 개발", *한국항공우주학회 2008년 춘계학술대회 논문집*, 2008, pp. 110-113.

10) Chandra, R., and Chopra, I., "Structural Response of Composite Beams and Blades with Elastic Couplings", *Composites Engineering*, Vol. 2, Nos. 5-7, 1992, pp. 347-374.