

항공기 구조 및 안전

- 항공기 구조동역학 및 공력탄성학을 중심으로 -

2009 항공우주공학 개론

신상준 교수

2009.03.12



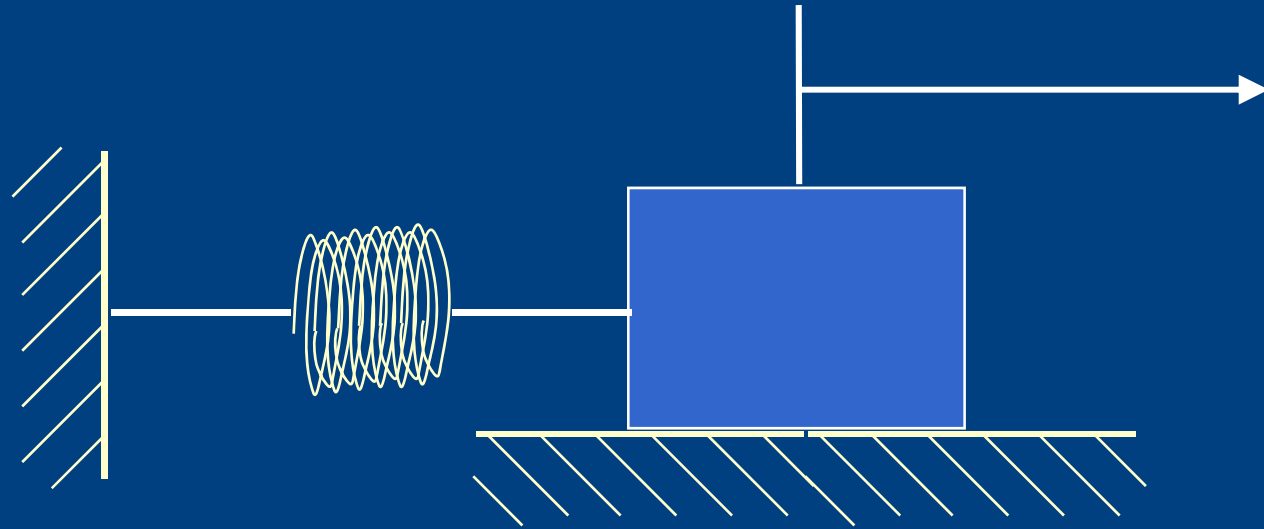
Contents

- 항공기 구조동역학
- 항공기 공력탄성학
- 토목 및 건축의 공력탄성학 문제
- 항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)
- 피로파괴 방지를 위한 노력
- 벌집 샌드위치 구조
- 유한요소해석, 복합재료



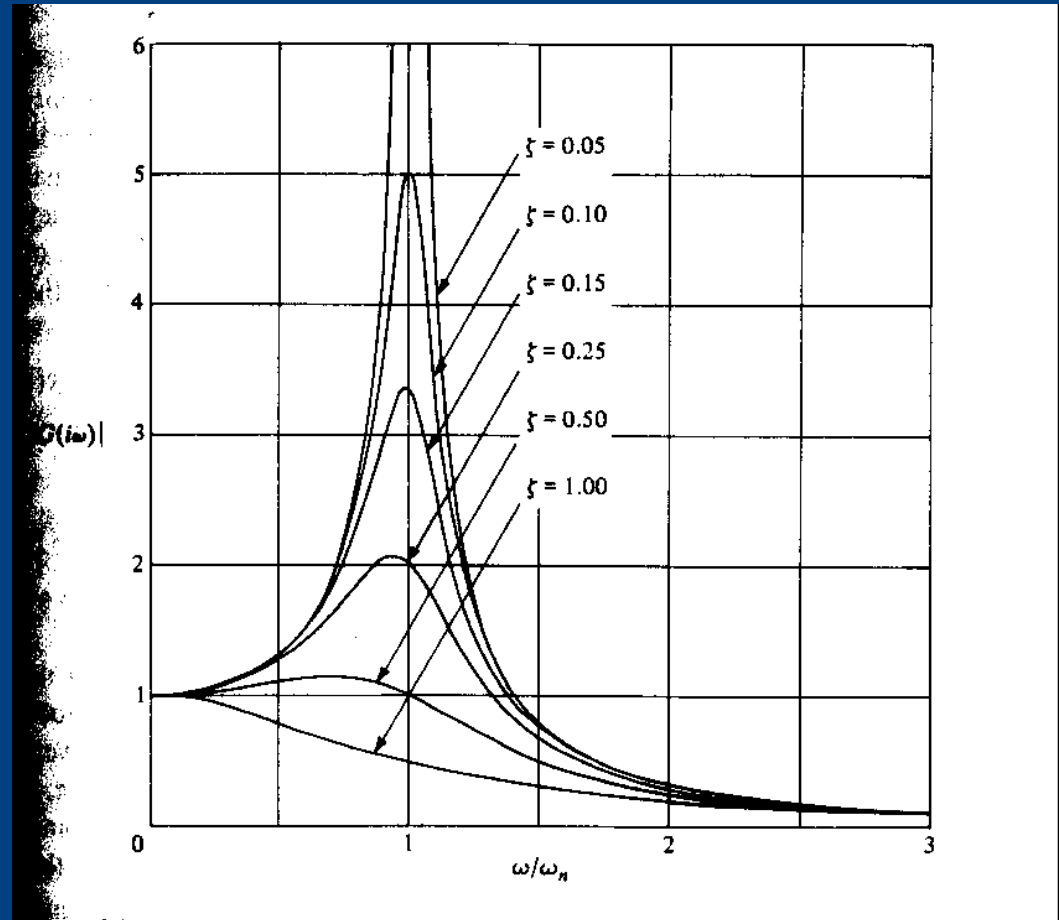
항공기 구조 동역학 (1)

- 구조물의 진동
 - 고유진동수
 - 진동 모드



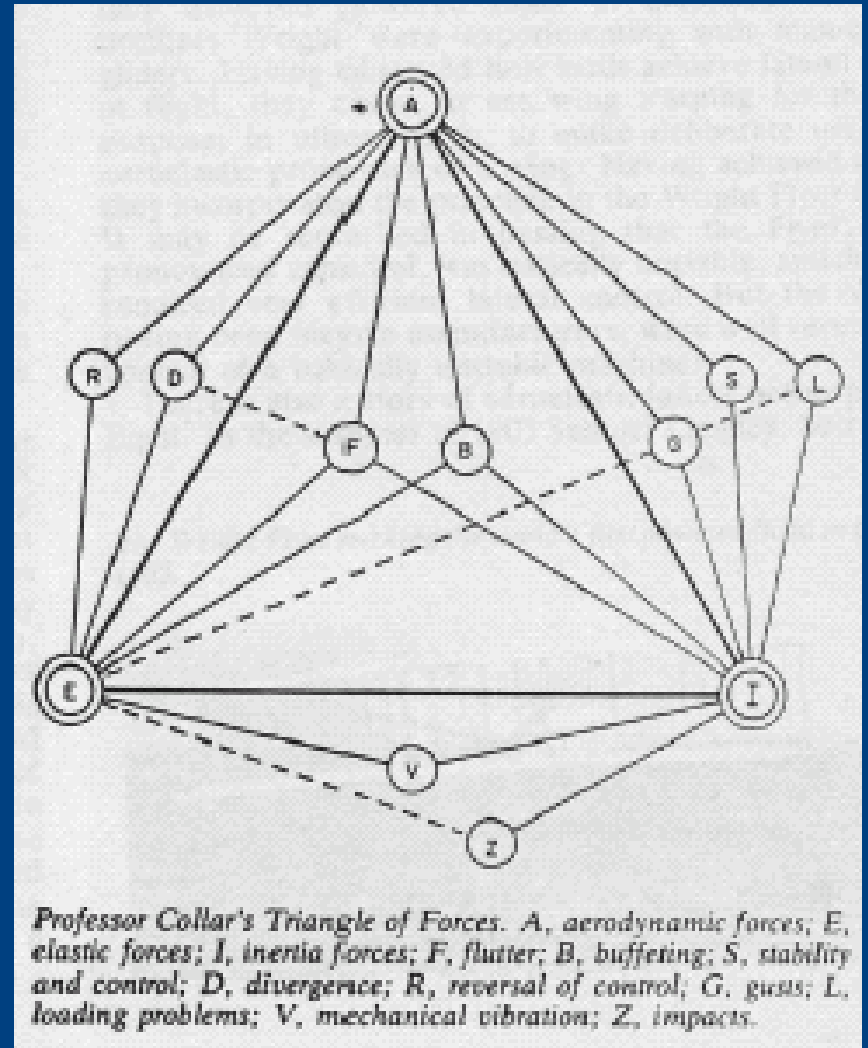
항공기 구조 동역학 (2)

- 구조물의 진동
 - 공진 (Resonance)
 - 구조적 감쇠



항공기 공력탄성학 (1)

- 항공기 구조물의 공력탄성학적 현상
 - 구조물의 탄성력
 - 구조물의 운동에 의한 관성력
 - 날개면에 작용하는 공기력

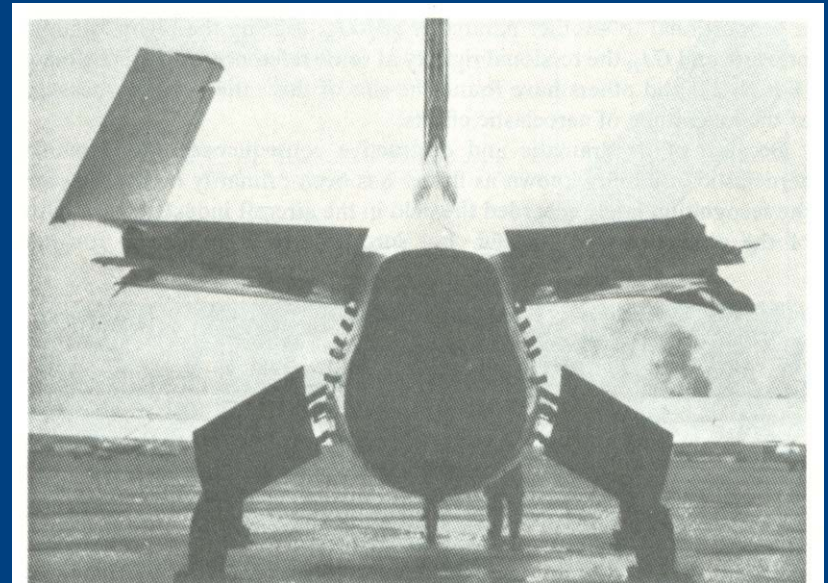


항공기 공력탄성학 (2)

- 항공기 공력탄성학적 불안정 현상
 - 정적 현상
 - 동적 현상
 - 난기류에 대한 응답 특성



- 고정익 항공기
- 회전익 항공기
- 터빈 엔진 블레이드
- 수력, 화력, 풍력 발전기



16세기의 공력탄성학 문제

- 풍차
 - 네덜란드
: 스파의 위치를 공기력의 중심인 $\frac{1}{4}$ 시위에 위치시킴으로써 발생하는 공력탄성학적 문제를 해결하였다.

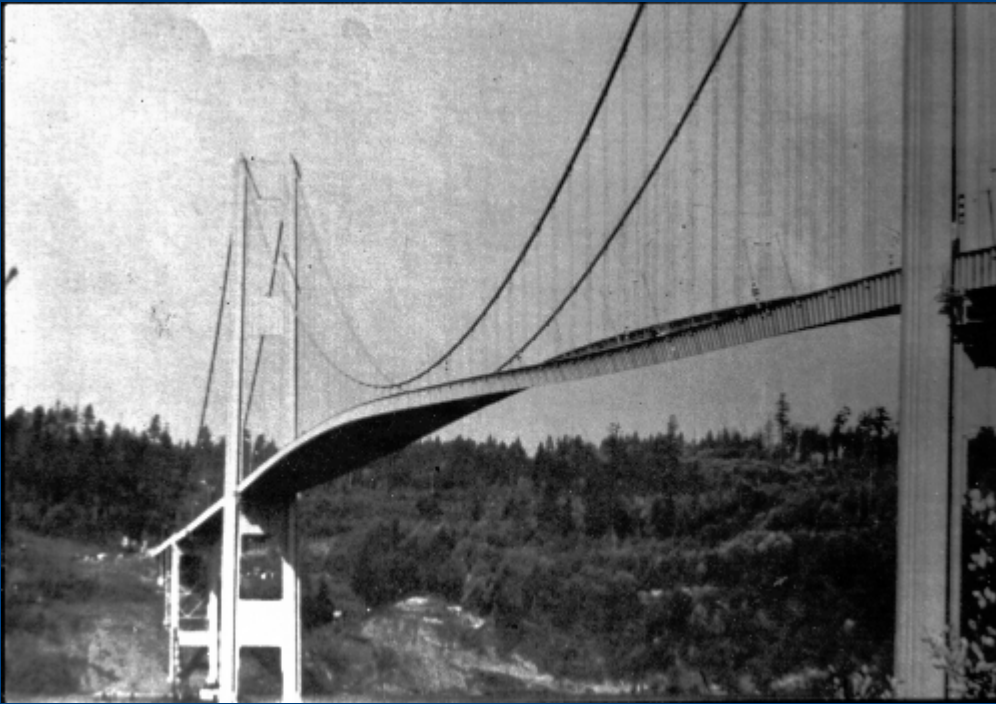


토목 및 건축의 공력탄성학 문제

- Tacoma Narrows 교

- 미국

- : 바람의 작용에 의해 비틀림 불안정이 심화되어 파괴에 이름.

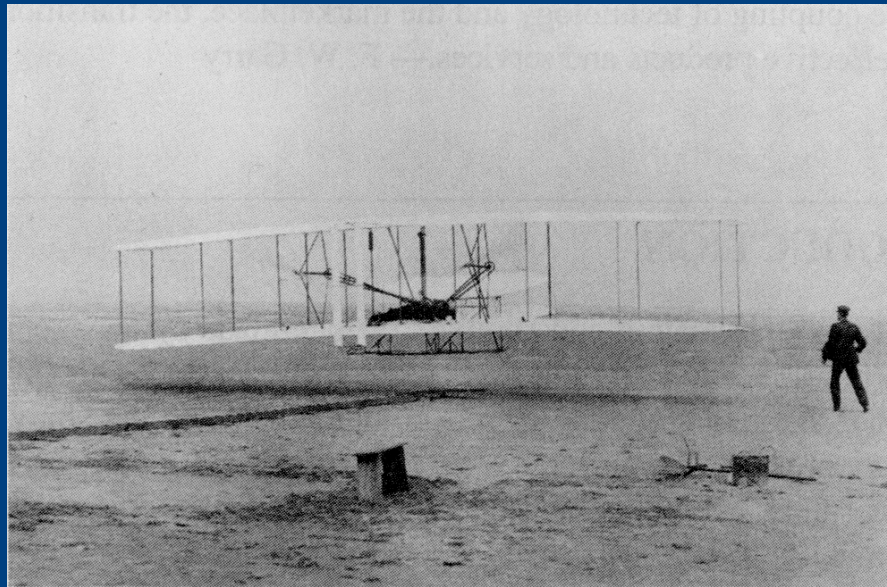


항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Wright brothers

- 1903년 12월 17일

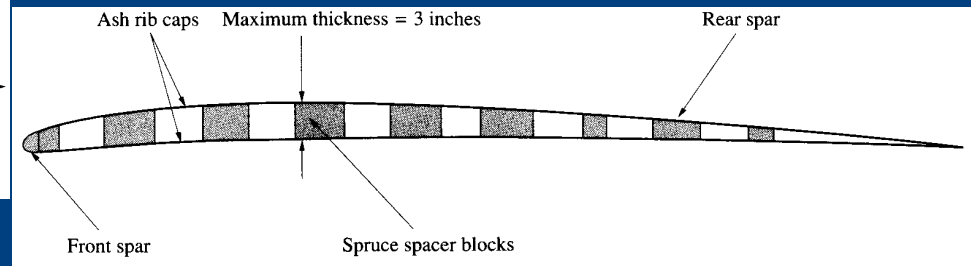
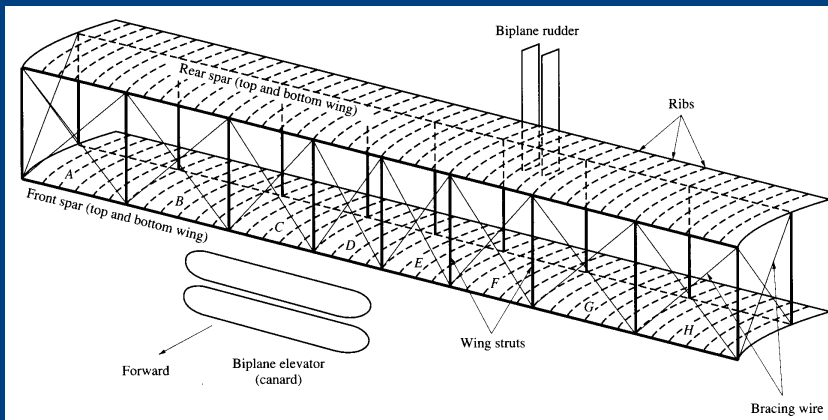
- : 자체동력에 의해 비행한 최초의 유인 비행체로 120피트를 제어 비행으로 날아가 이륙지점 이상의 고도에서 아무런 이상 없이 착륙하였다. 36세와 32세의 라이트 형제의 역사적인 성공으로부터 근대 항공비행의 시대가 시작되었다.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Wright brothers
 - Flyer I

: 라이트 형제는 강도 뿐만 아니라 넓은 양력 면을 얻을 수 있기 때문에 샤누트의 트러스 복엽 날개 구조를 선택했다. 각 날개마다 40개 가량의 나무 재로 만든 리브가 있으며, 각각은 증기를 쏘인 후 라이트 형제가 디자인한 에어 포일 형상으로 되어있다.

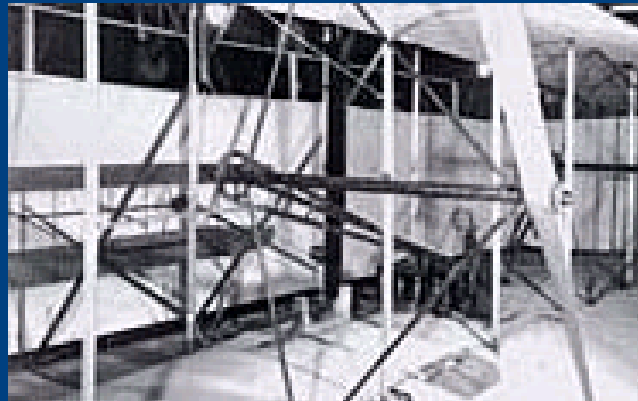


항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Wright brothers

- Flyer I 프로펠러의 공력탄성학적 현상

- : 프로펠러의 비틀림 유연성으로 인한 추진력의 감소를 발견하고, 블레이드 끝에 조그만 날개를 추가함으로써 비틀림 변형을 억제하고자 했다.

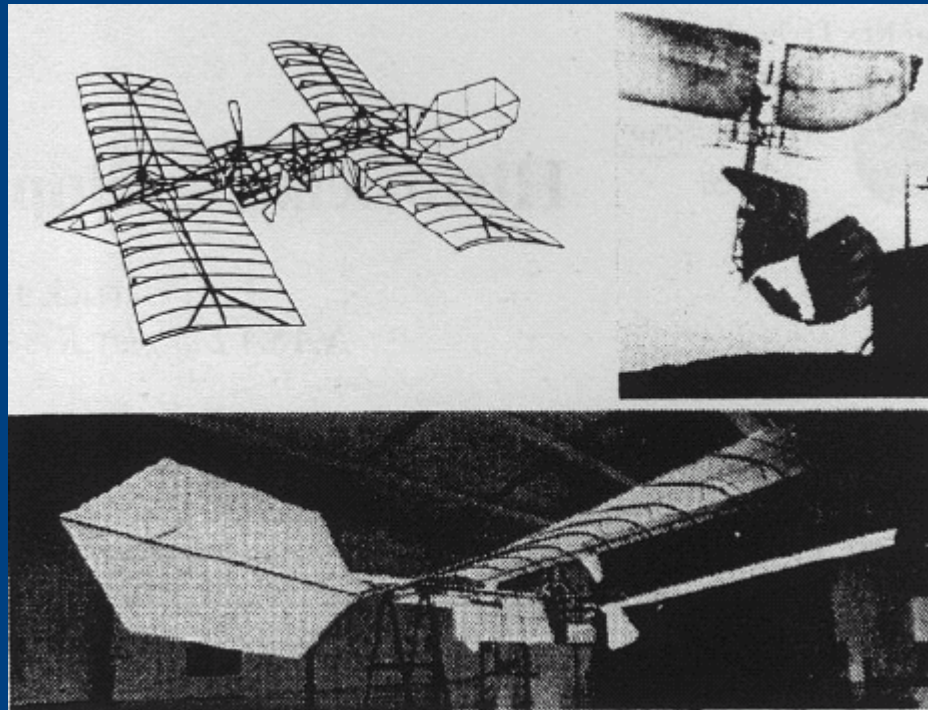


항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Langley

- Aerodrome, 1903년 12월 8일

- : 날개 끝에서의 부족한 비틀림 강성으로 인해 비틀림 다이버전스 발생하여 두 번의 시도에도 불구하고 실패함.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Wright brothers

- Flyer III

- : 1905년에 라이트 형제는 Flyer I의 디자인을 바탕으로 성능과 안정성, 제어 능력을 향상시킨 Flyer III 를 만들었다. 이것은 시속 35마일의 속력이 나왔다. 강력한 엔진과 커진 길이로 Flyer I에 비해 탁월한 제어능력을 가지고 있었다.

- Model B Military Flyer

- : 1911년에 만든 이 비행기는 카나드를 없애고 경첩을 단 보조날개 대신에 수평 꼬리 날개를 후방에 달았다. 그리고 이착륙을 위한 바퀴도 달았다.



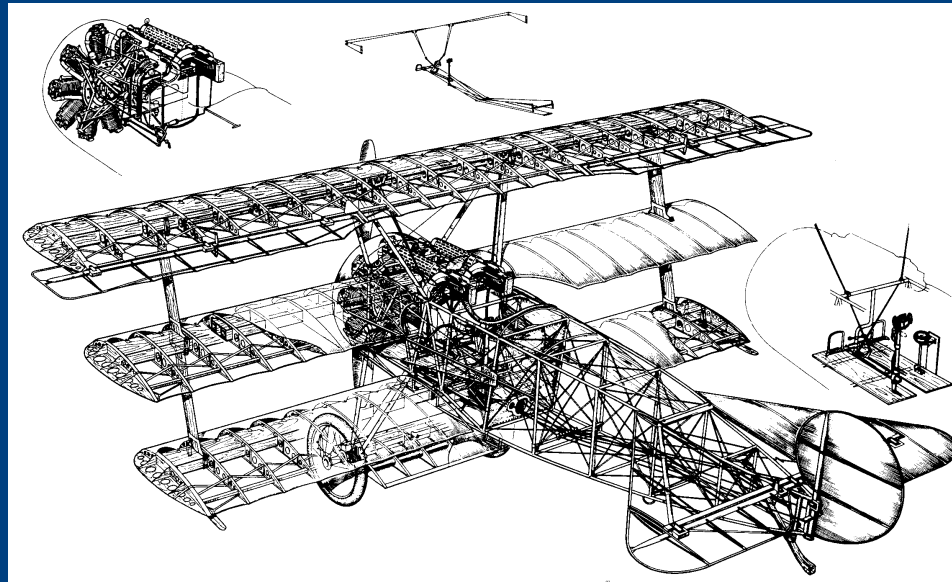
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 1903년 이후 십 여 년간 대부분의 비행기들은 라이트 형제의 Flyer를 모방하였다. 즉 트러스 형태의 카나드 복엽기로 파일럿, 엔진, 연료, 탑재물 등 실제로 거의 모든 것이 아래 날개 위의 개방된 공간에 얹혀 있었다.
- 유럽에서 도입된 새로운 개념의 구조물로 프랑스에서 개발하고 완성한 동체가 있었으며, 단엽기로의 이행 추세도 있었다.
- 실제로 1909년 블레리오 모델 11호 단엽기는 첫 비행에 성공하였으며 25마력 3기통 방사상 공기 냉각 엔진으로 시간당 최고 47마일의 속력을 낼 수 있었다.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 1918년 이후
 - 제1차 세계대전 중 독일에서는 최초의 외팔보 전투기인 포커 Dr-I가 처음으로 생산에 들어갔다.
 - 외팔보 비행기 : 날개를 고정시키기 위한 어떠한 외부의 보조물도 불필요한 비행기
 - 포커 Dr-I는 삼엽기였고, 시속 115마일을 낼 수 있었다.

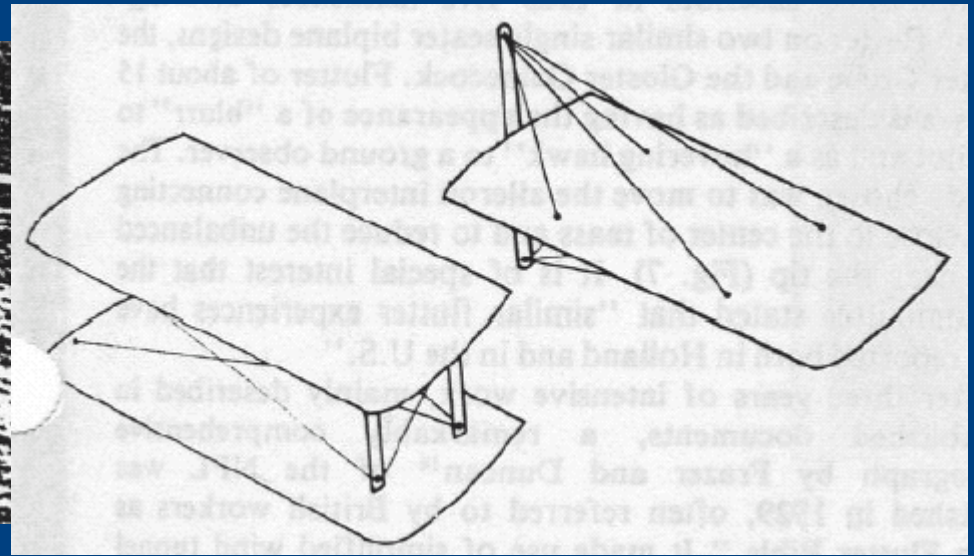
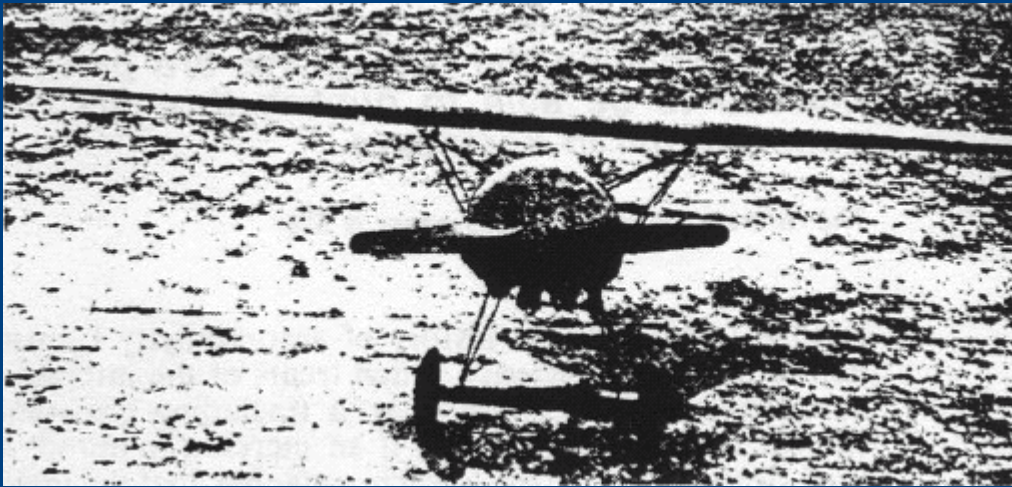


항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 포커 D-8

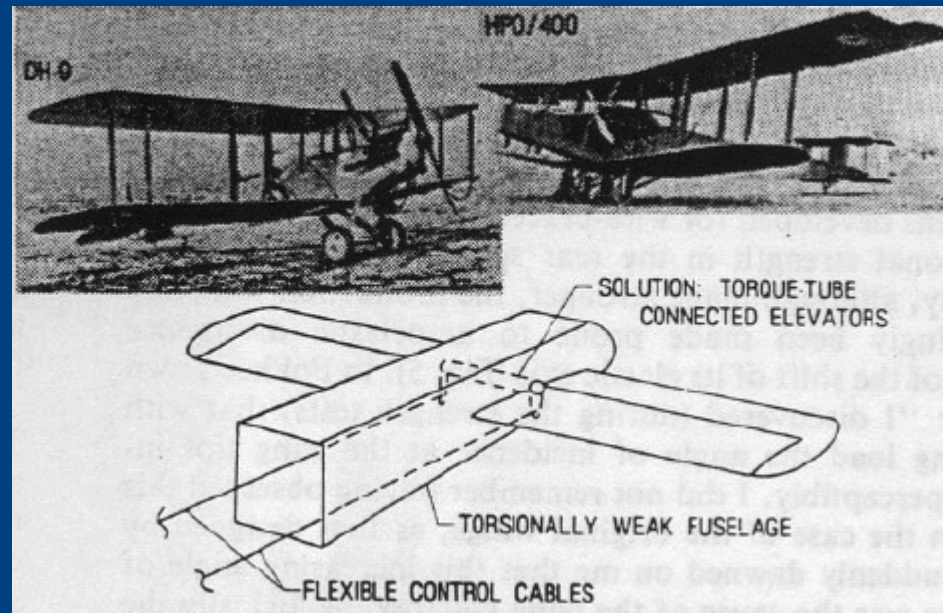
- 단엽기로 다이버전스 현상 발생

- 작용하는 공기력이 증가하자 날개의 비틀림 변형 발생.
- 이후 예측되는 공기력 분포와 다른 양상으로 진행됨.
- 와이어로 날개를 단단하게 매달아 문제 해결.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 핸들리 페이지 O/400 (1916년), 드 하빌랜드 DH-9 (1917년)
 - 폭격기로 동체와 꼬리에 격렬한 진동 발생 (플러터 현상)
 - 일정한 비행속도에 이르면 저절로 진동이 발생.
 - 꼬리날개를 보강함으로써 문제를 해결.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 1918년 이후
 - 금속으로 제작되는 비행기
 - 1914년부터 1918년 사이 가속화되던 항공기 구조 기술의 발달은 전쟁이 끝나고, 몇 년 후부터는 급속히 느슨해졌다.
 - 전쟁 기간동안 일급 목재와 천들이 급속히 고갈되어 더 이상 나무에 의존할 수 없게 되자 비행기를 금속으로 제작하려는 노력이 있었다.
 - 1919년에는 휴고 융커스가 단발기인 F-13 민항 정기 여객기를 생산하였다.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 휴고 융커스

- F-13 민항 정기 여객기

- : 모두 금속을 사용하였고, 물결 모양의 알루미늄 외피에, 외팔보 저익 단엽기였다. 2명의 승무원과 4명의 승객을 시속 90마일로 실어 날랐다. 1932년 경에는 350대의 융커스 F-13이 만들어졌다.

- 1930년, 꼬리 진동 현상 발생, 추락 (Tail Buffet 현상)

- Ju-52 정기 여객기

- : 15명의 승객을 시속 150마일로 실어 나르는 여객기로 매우 성공적이었다. 제2차 세계대전에서 독일 Luftwaffe 비행단의 주력 수송기로 사용되었다.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 경주용 항공기의 사고일지 (플러터 현상)
 - Loening P-4
 - : 1922년 추락사고 발생
 - 이후 날개를 플라이우드 베니어 판으로 보강
 - Curtiss R-6
 - : 1924년 갑작스런 진동으로 추락사고 발생
 - Supermarine S-4
 - : 역시 추락사고. 이후 날개를 와이어로 붙잡아 보강.



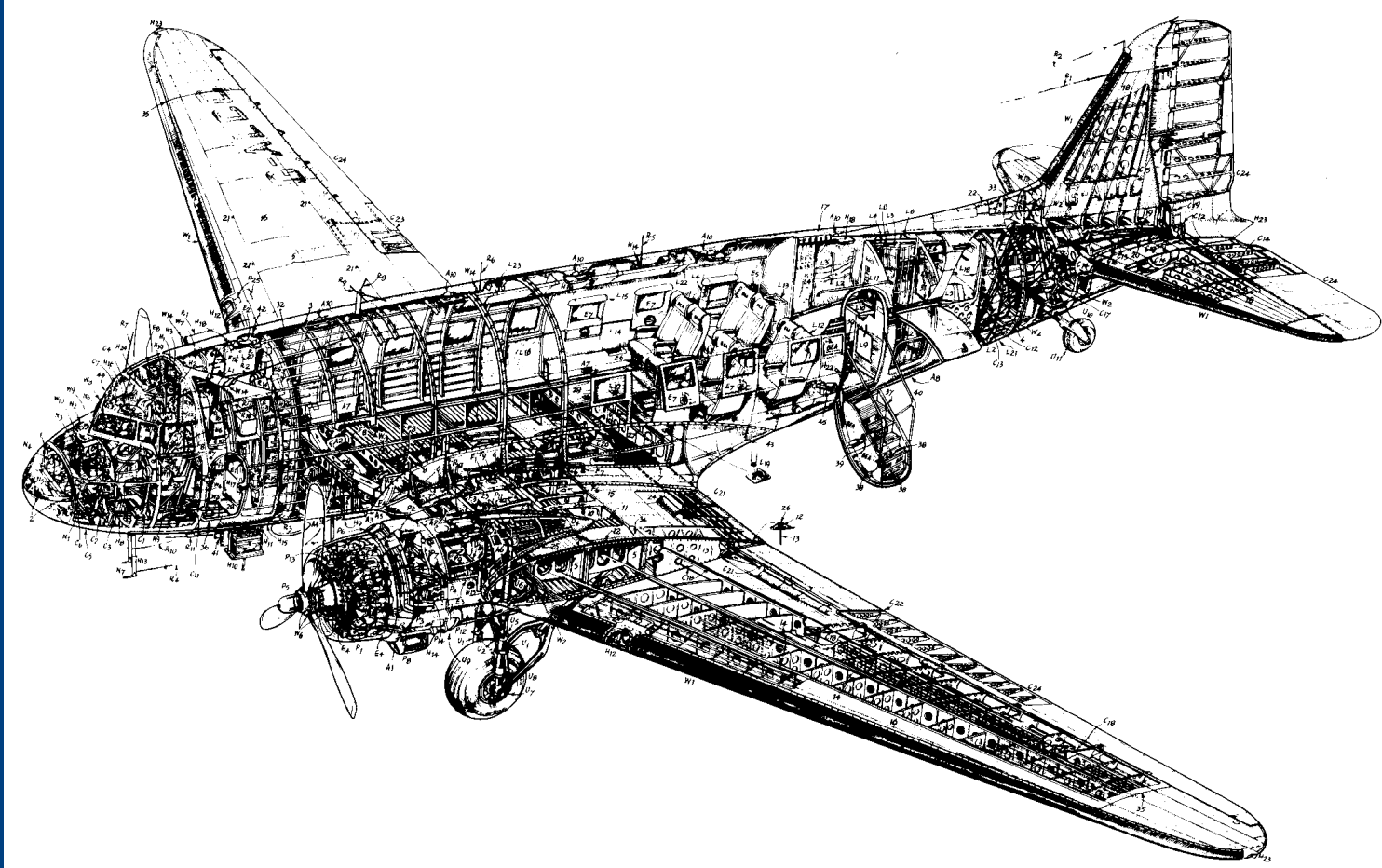
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 1930년대 중반

- 부품의 금속화, 반모노코크화, 단엽 디자인이 군 전투기까지 확대 적용
- 1932년 3월, Boeing, P-26 “Peashooter”
 - 전 부품의 금속재, 수평 리벳, 개방 조종실, 고정 착륙장치를 갖춘 저익형 단엽기
 - 날개는 완전한 외팔보는 아니었고, 외부에서 리프팅 줄과 랜딩 줄에 의해 보조를 받고 있었다.
 - 단엽 전투기의 필연성 대두
- 1932년 6월, French Dewoitine D-500
 - 최초의 외팔 저익형 단엽기



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)



더글러스 사의 DC-3, 반모노코크 설계의 원형



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

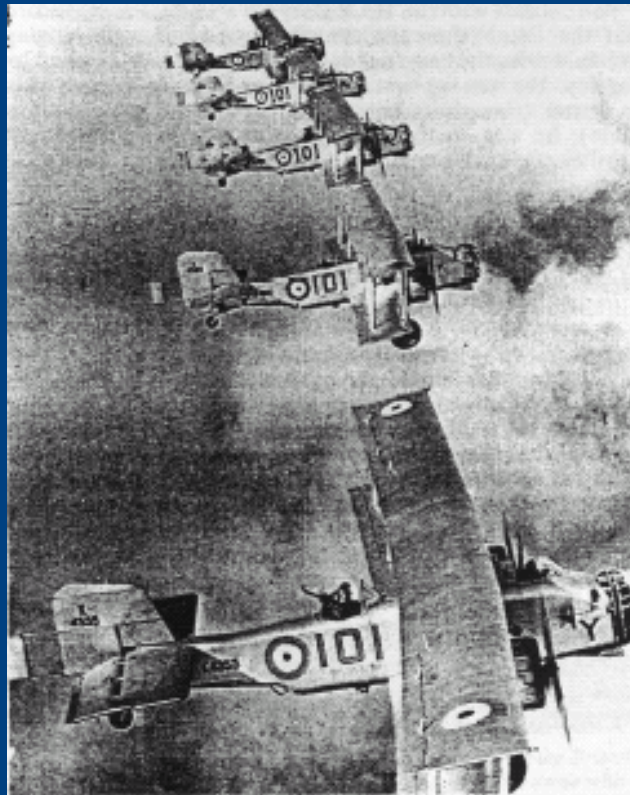
- 드 하빌랜드 Puss Moth
 - 1932년, 영국, 날개의 진동, 조종면 (에일러론) 의 진동 발생 (플러터 현상)



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Boulton Paul Sidestrands

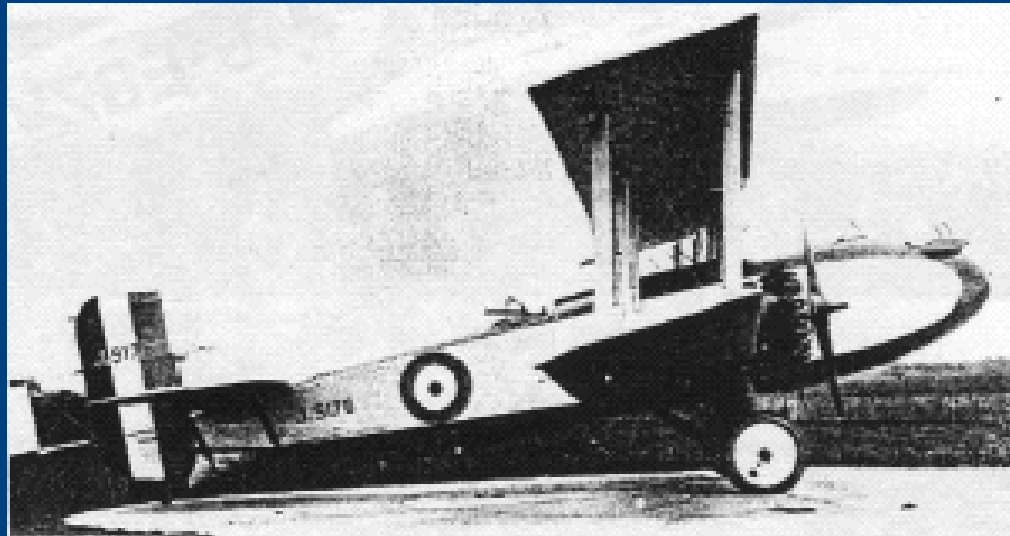
- 1933년, 영국, 러더에 부착된 서어보 탭에서 플러터 현상 발생



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Boulton Paul Overstrands

- 1933년, 영국, 러더에 부착된 서어보 탭에서 플러터 현상 발생



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- Aileron Reversal 현상의 발견
 - 1935년, 영국, Spitfire 전투기 시제품, 조종면의 효력 상실



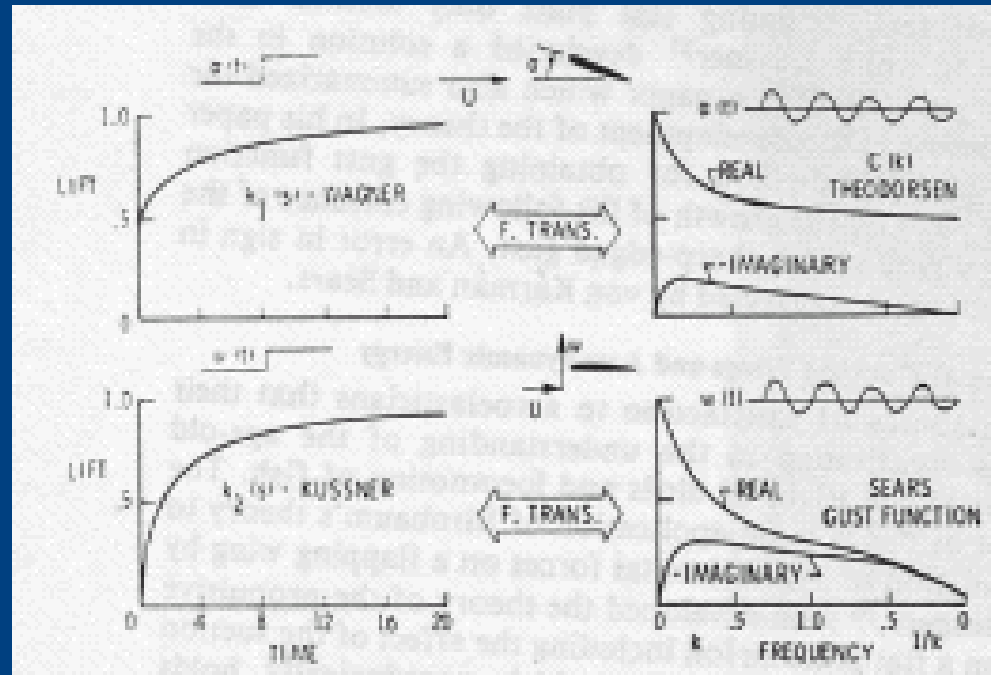
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 꼬리날개 플러터 현상의 발견
 - 1940년, 영국, Typhoon 전투기, 고속에서 꼬리날개 완전 상실.
이후 꼬리날개에 외부 보강재를 부착함.



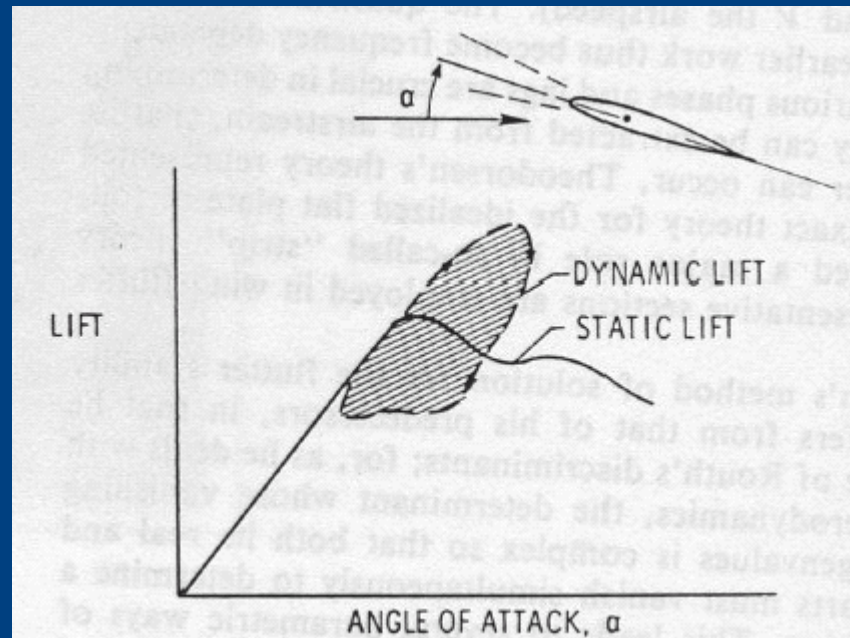
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 비정상 공기역학 이론의 발전
 - 1935년, 미국, 2차원 진동 날개 단면에 작용하는 비정상 공기력의 발전된 모델을 제시함.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 비정상 공기역학 이론의 발전
 - 1936년, 미국, 2차원 진동 날개에 작용하는 양력과 모멘트가 받음각이 증가할 때와 감소할 때 서로 다른 곡선을 경유함.
 - 경유하는 곡선이 반시계 방향이 될 경우 공기흐름의 에너지가 구조물의 변형 에너지로 축적되어 불안정을 유발함.



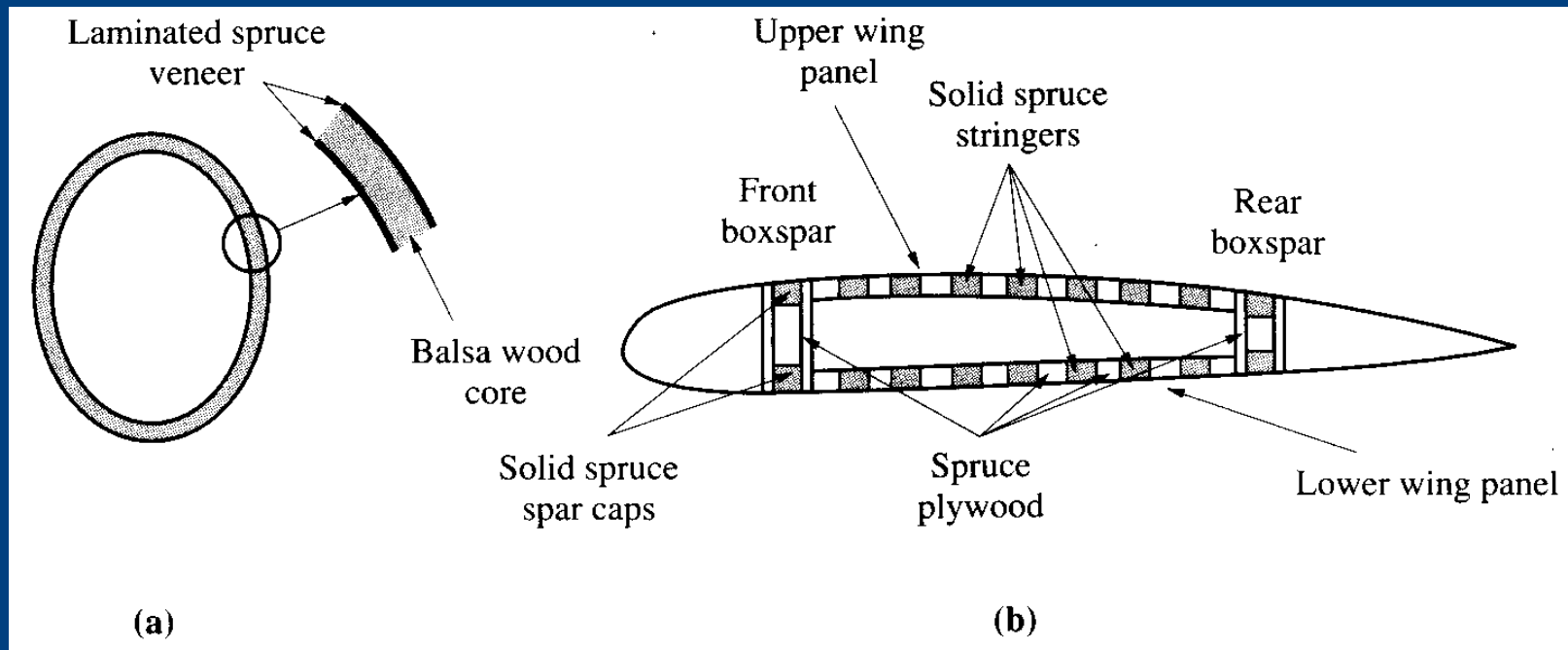
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 1930년대 중반
 - 1933년 말, 소련, Polikarpov I-16
 - Retractable gear 를 갖춘 외팔보 단엽기
 - 1935년, All Metal, Flush-Riveted, Semimonocoque, Retractable gear, 폐쇄형 조종석 등을 채용한 저익 단엽 전투기의 등장
 - 4월, 미국, Curtiss Hawk 75A/P-36
 - 5월, 독일, Messerschmitt Bf-109
 - 8월, 미국, Seversky P-35



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 2차 대전 중 비금속 항공기
 - 1940년 11월, 영국, De Havilland “Mosquito” : 목재로 구성



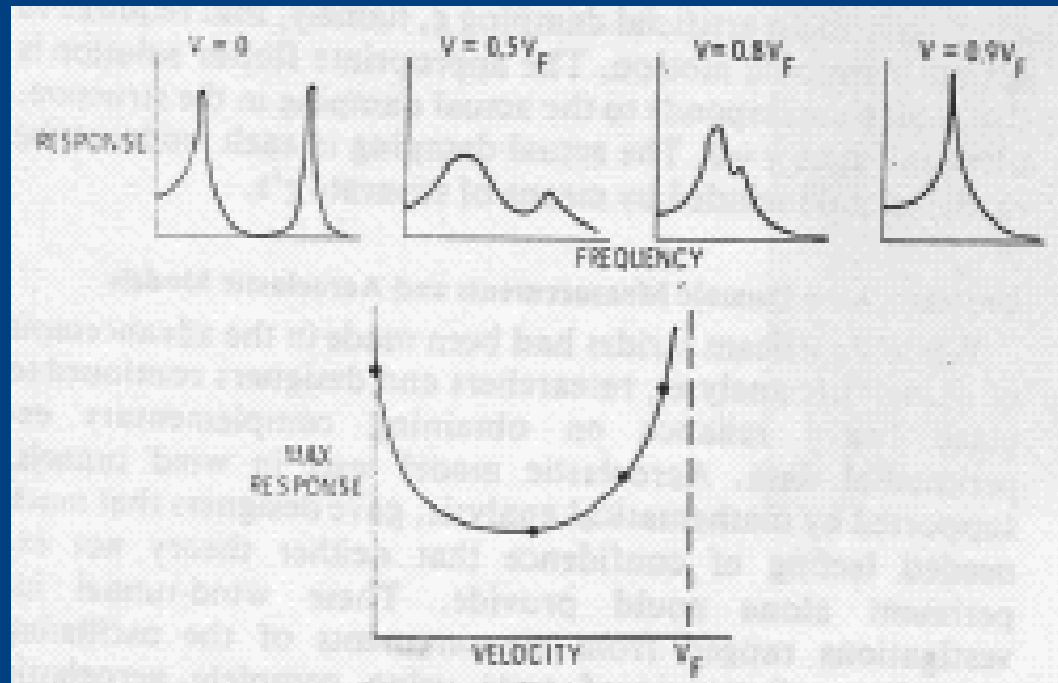
(a) Tapered, wooden monocoque fuselage

(b) Wing cross section



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 비행 플러터 시험의 시작
 - 1935년, 영국, 비행속도에 따른 공진 현상의 진폭을 도시화함.
 - Junker TU 90: 1938년, 400 마력 모터를 동체에 장착하여 비행 중 날개 및 동체를 가진함. 점차 필요한 시험 절차로 인식됨.



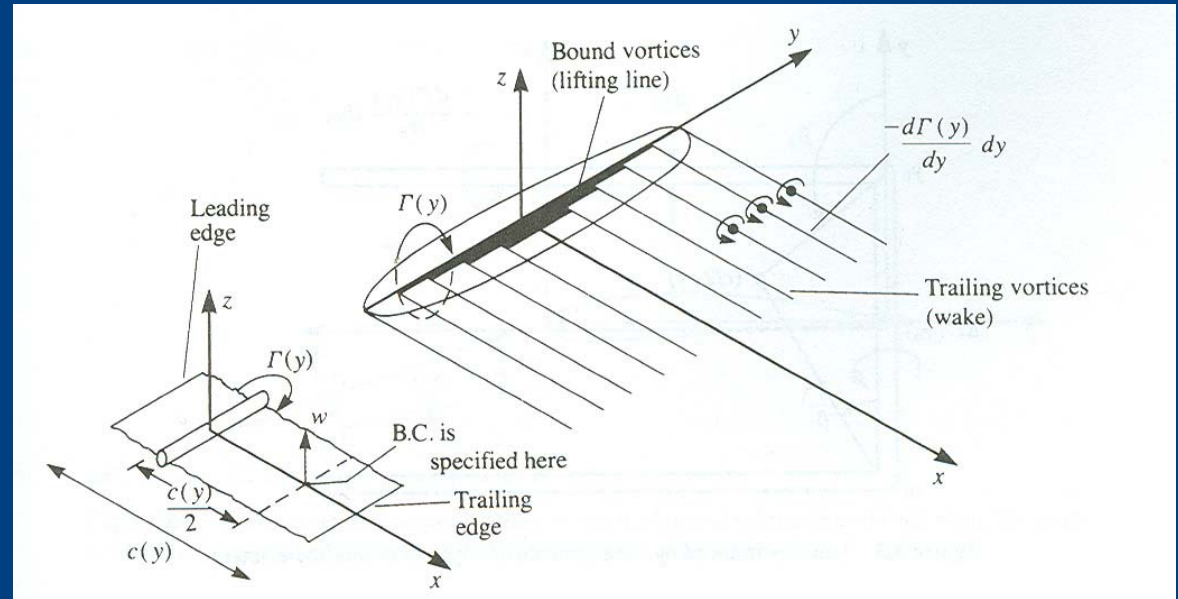
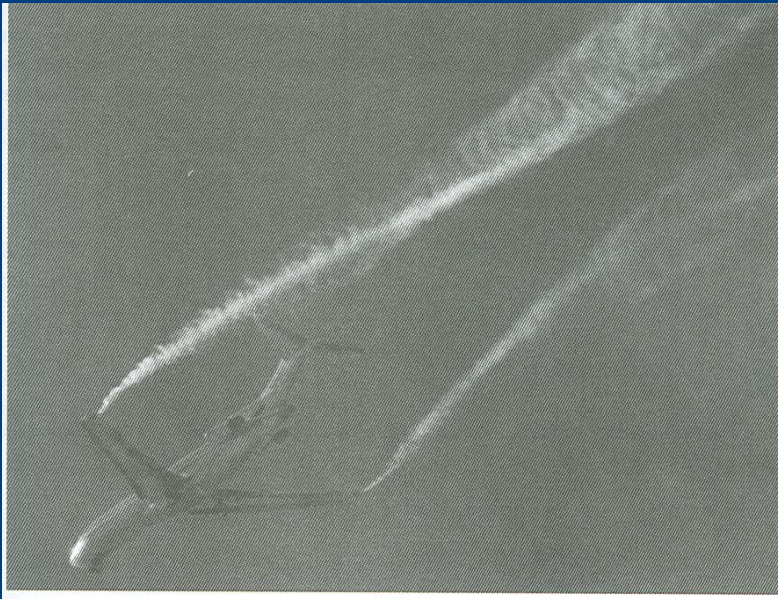
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 프로펠러 Whirl 플러터 현상의 발견
 - 1938년, 미국, 날개에 장착된 엔진 및 프로펠러의 마운트가 그 유연성으로 인해 일정 비행속도가 되면 격렬한 세차운동 현상을 보임.
 - 록히드 **Electra** 터보프롭 수송기: 1967년, 2대 추락, 프로펠러 Whirl 플러터 현상이 그 원인임.
 - 틸트 로터 항공기: 벨 XV-3, NASA XV-15, 벨-보잉 V-22 오스프리 등에서 최대속도에 대한 제한 인자로 등장함.



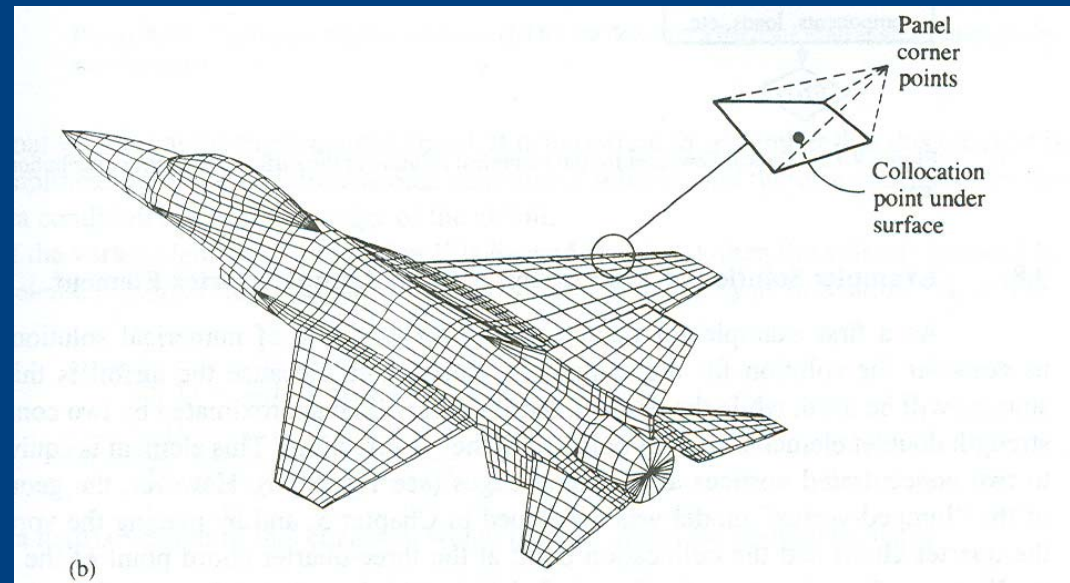
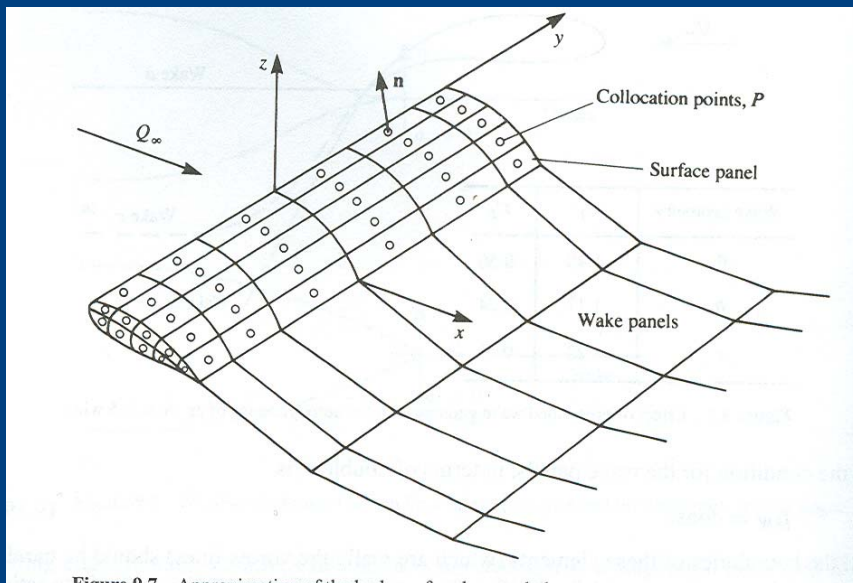
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 날개 공기역학 이론의 급발전
 - 1937년, 독일, 양력선 이론



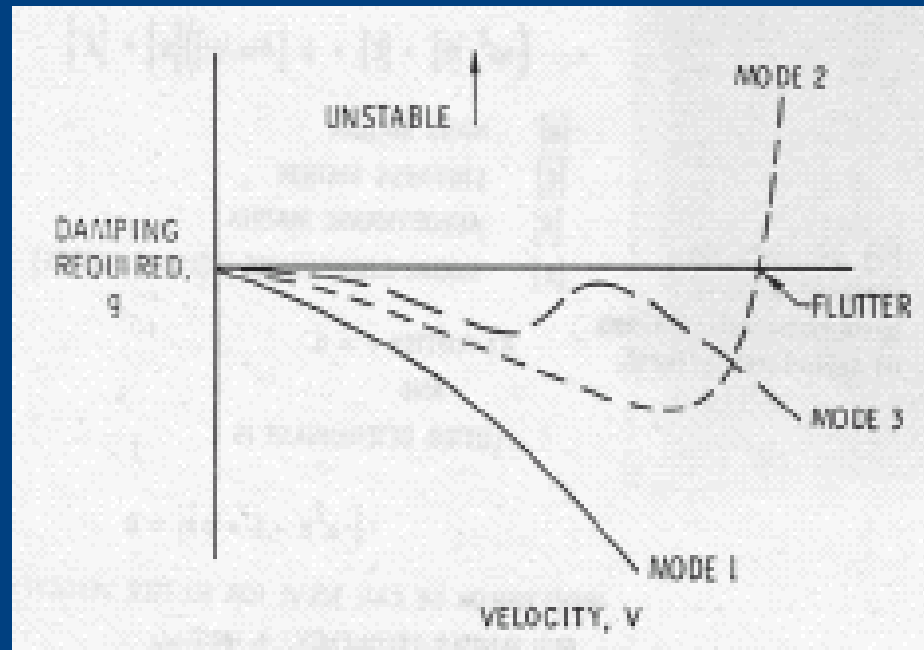
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 날개 공기역학 이론의 급발전
 - 1937년, 독일, 양력면 이론
 - 1945년, 미국, NASA Langley 연구소에 의해 더욱 발전됨.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 플러터 현상의 예측기법 발전
 - 1942년, 미국, 비정상 공기역학 이론의 체계화 진행됨.
 - V-g 플러터 선도: 플러터 예측을 위한 간단한 기법으로 오늘날까지도 중요하게 사용되고 있음.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 터보제트 혁명기

- 1930년대 후반 터보제트엔진의 소개
- 1939년 8월 27일, 독일, Heinkel He-178
 - von Ohain 의 840-pound-thrust engine
 - 세계 최초 제트 항공기
- 1941년 5월 14일, 영국, Gloster E-28/39
 - Whittle 의 860-pound-thrust centrifugal-flow engine
- 1944년 6월, Messerschmitt Me-262
 - 세계 최초 실용 제트기 (후퇴익)



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 터보제트 혁명기
 - 1944년 7월, 영국, Gloster “Meteor”
 - 가장 빠른 프로펠러 전투기보다 빠른 500mph
 - 1942년 10월, 미국, Bell의 XP-59A “Airacomet”
 - 미국 최초 제트기 (400mph)
 - GE에서 면허 생산한 두 개의 Whittle engine
 - 1944년, 미국, Lockheed P-80 “Shooting Star”
 - 1946년 4월 24일, 소련, Yakovlev Yak-15, Mikoyan-Gurevich MiG-9



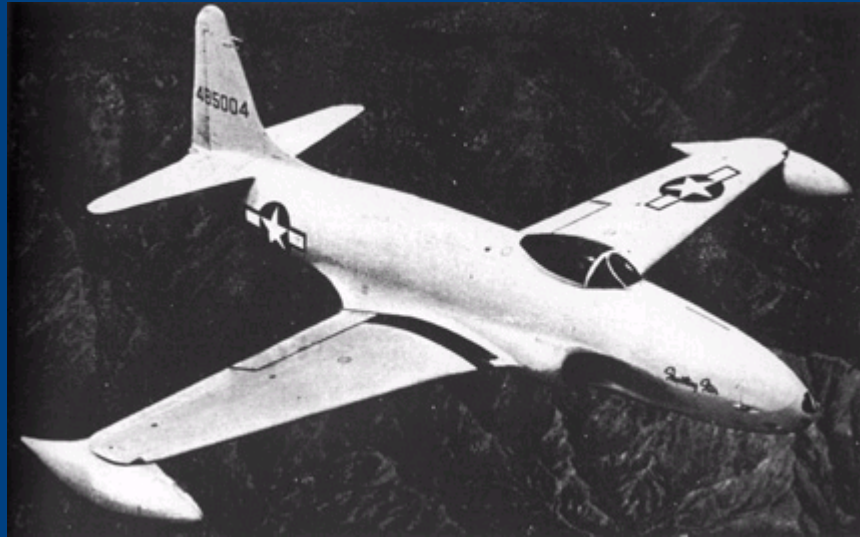
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

국가	항공기	종류	처녀비행
미국	McDonnell FH-1 “Phantom”	전투기	1945
미국	Republic F-84 “Thunderjet”	전투기	1946
미국	McDonnell F2H “Banshee”	전투기	1947
미국	North American B-45 “Tornado”	폭격기	1947
미국	Douglas F3D “Skynight”	전투기	1948
미국	Northrop F-89 “Scorpion”	전투기	1948
미국	Lockheed F-94 “Starfire”	전투기	1949
영국	Hawker “Sea Hawk”	전투기	1947
영국	English Electric “Canberra”	폭격기	1949
프랑스	Dassault MD-450 “Ouragan”	전투기	1949
소련	Tupolev Tu-14	폭격기	1947
소련	Yakovlev Yak-23	전투기	1947
소련	Ilyushin Il-2	폭격기	1948



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 터보제트기에서의 공력탄성학적 불안정
(천음속 플러터)
 - P-80 “Shooting Star”: 에일러론 “Buzz,” 에일러론의 운동과 날개 면에 발생한 충격파의 이동에 의한 떨림 현상 발생.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 터보제트기에서의 공력탄성학적 설계
 - B-47 “Stratojet”: 날개의 후퇴각 고려 및 공력탄성학적 테일러링 (재단)의 개념을 도입함.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 천음속 플러터 실험의 시작
 - 비행중인 항공기에서 모델을 직접 투하하여 시험.
 - 지상에서 로켓에 모델을 장착하여 발사 시험.
 - 항공기 날개 위에 모델을 장착하여 시험.
 - 천음속 속도의 지상 활주 로켓 위에서 시험.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 후퇴익의 발전
 - 1935년 10월, 독일의 Adolf Busemann
 - 저항감소를 위한 후퇴익 관련 논문 발표
 - 1944년, Willy Messerschmitt
 - 후퇴익을 가진 비행체 제작
 - 1945년 1월, NACA의 Robert Jones
 - 아음속 풍동 실험을 통하여 후퇴익 관련 이론 검증
 - 후퇴익기의 등장
 - 1947년, Boeing, B-47 “Stratojet” ; North American, F-86 “Sabre” ; 소련, MiG-15
 - 1948년, 스웨덴, SAAB-29 “Tunnan”
 - 1951년, 프랑스, Dassault “Mystere”
영국, Hawker “Hunter”
-



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- NACA와 미 공군, 해군의 음속이상 비행기 설계를 위한 공동 연구
 - X-1 : Bell, 세계최초 초음속 비행기
 - X-2 : 후퇴익과 스테인리스강 도입, 마하 3
 - X-3 : Douglas, 관성커플링에 관한 연구 시작
 - X-4 : Northrop, 후퇴익과 반무미익기를 시험
 - X-5 : Bell, 가변익(20 – 60도)
 - Convair XF-92A, Douglas D-558-1, D-558-2, Northrop YB-49A Flying Wing
 - 다양한 날개 평면에 관한 자료를 얻음
 - 후퇴익, 감소된 두께-시위비, 전작동식 꼬리날개 등에 관한 타당성 확보



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 1950년대 중반 이후 제트기
 - North American, F-100 “Super Sabre” : 마하 1 지속
 - 1956년, Lockheed, F-104 “Starfighter” : 마하 2 지속
 - 얇은 날개와 다중날개보, 다중셀 날개 구조 사용
 - Vought F-8 “Crusader”, Republic F-105 “Thunderchief”, Dassault-Breguet “Mirage” F-1, McDonnell-Douglas F-15 “Eagle”, F/A-18 “Hornet”, General Dynamics F-16 “Fighting Falcon”
 - North American, A-5 “Vigilante” : 완전한 스킨/스트링거 형태의 단일 플레이트로 가공된 날개 구조



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 초음속 영역에서의 플러터 현상
 - 공기력 중심이 날개 뒤쪽으로 이동, 고전적 플러터의 발생 가능성이 낮아짐. 하지만, 후퇴익 등의 영향으로 완전하게 그 가능성이 배제되지 않음.
 - 날개 구조의 두께가 감소함에 따라 대 변형 유발, 비선형 변형의 문제가 대두됨.



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 초음속 영역에서의 플러터 현상 – 패널 플러터
 - 독일 V-2 로켓, 미국 Saturn-V 로켓
 - 로켓의 외피 패널에 정상 또는 이동파가 발생하여 표면의 찌그러짐이 발생함.



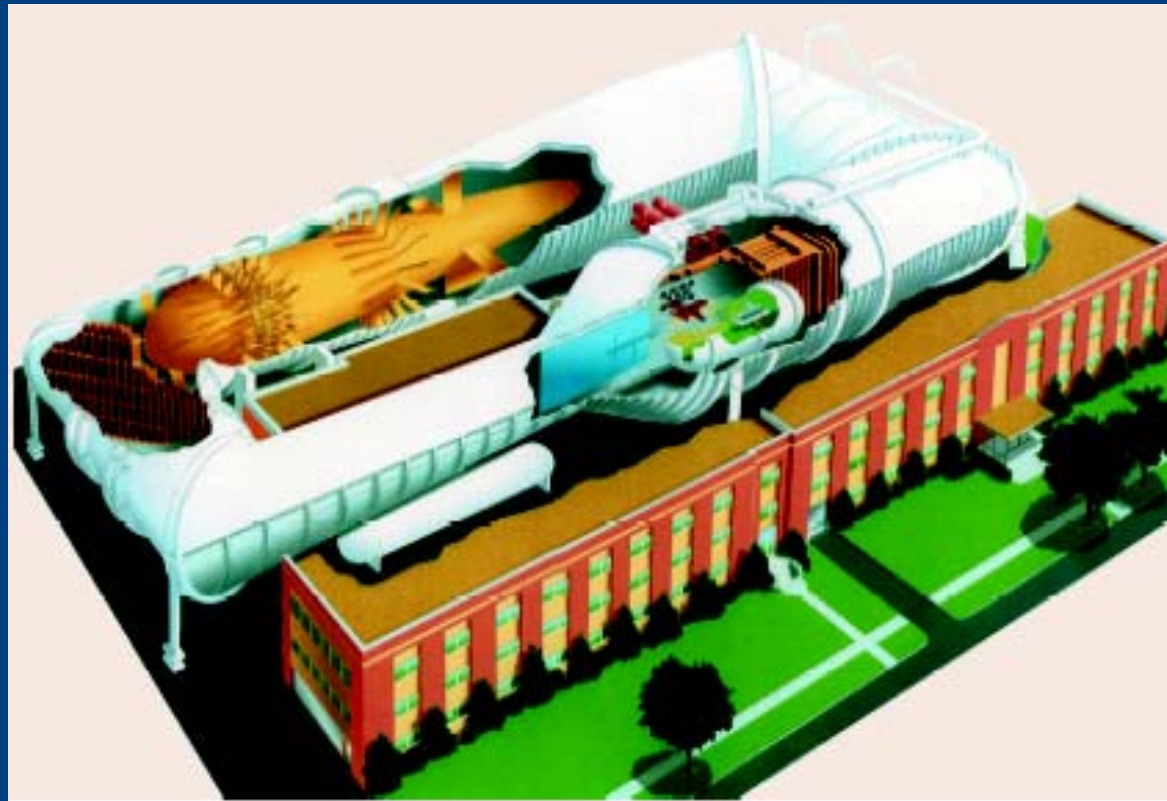
항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 플러터 원인에 의한 사고 일지
 - NACA 조사위원회, 1956년
 - 54건의 플러터에 의한 사고 또는 이상 진동 발생
 - 21건: 조종면에서 천음속 “buzz” 발생
 - 7건: 엔진 장착 파일론을 포함한 날개 외부 장착물에 의한 플러터 현상
 - 4건: 전작동식 꼬리날개에 플러터 현상 발생



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 천음속 플러터 시험 풍동
 - 1955년, 미국 NASA Langley 연구소



항공기 구조 발달사 개관 (1903 ~ 1950년대)

- 천음속 플러터 시험 풍동
 - 1955년, 미국 NASA Langley 연구소



상업 분야의 항공기 산업

- 영국의 상업용 제트 수송기
 - 1949년 7월 27일, De Havilland “Comet 1”
 - 4500 파운드 제트 엔진 4개
 - 4명의 승무원과 36명의 승객, 490mph로 35000피트에서 비행
 - 1952년 5월, 첫 정기 여객편 운항
 - 1954년, 두 번의 공중분해 사고로 중단됨
 - “Comet”의 사고 원인
 - 저주파 금속 피로도 때문
 - 높은 순항 고도로 상승, 하강하면서 동체는 가압, 감압되었고, 이것이 사각창의 코너에서처럼 스트레스가 집중되는 곳에서 미소 균열을 형성, 확대시킴



피로파괴 방지를 위한 노력

- 두가지 구조적 개념
 - “Fail-Safe” 구조
 - 하중전달 부재를 두개로 만들어서 하나가 파단하면 남은 구조들로 하중을 분배시킴 (Boeing 707)
 - “Safe-Life” 구조
 - 주요파단이 일어나기 전까지 주어진 시간동안 버티도록 설계
- 재료의 개발
 - 구리를 다량 포함한 알루미늄 합금 – 크랙의 전파를 막지만 강도가 낮다
 - 아연을 다량 포함한 알루미늄 합금 – 피로에 저항하지 못한다
 - Boeing 707 에서
 - 2024 알루미늄 : 날개 아래면, 날개보, 동체 외피, 꼬리날개 외피
 - 7178 알루미늄 : 압축에 강함. 날개 윗면, 인장 응력이 적은 부분



벌집 샌드위치 구조

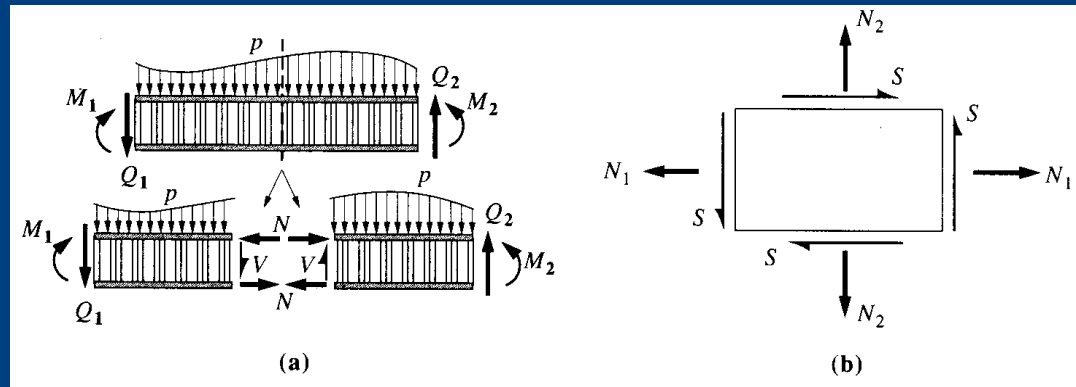
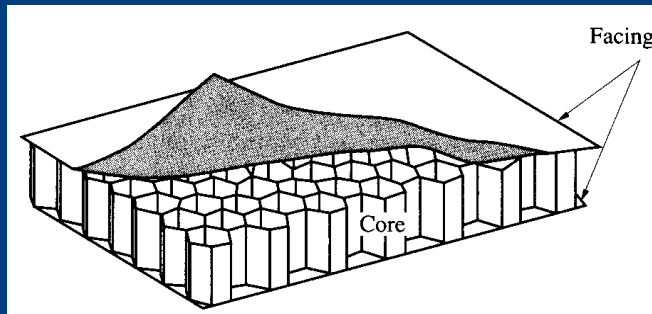
- Convair/General Dynamics B-58 “Hustler”
 - 미국 최초 초음속 폭격기 (1956년 11월 처녀비행)



벌집 샌드위치 구조

- Convair/General Dynamics B-58 “Hustler”

- 화씨 250도(공력가열)와 -70도(대기온도)의 극단적 온도변화와, 최소한의 무게를 유지하면서 필요한 강도, 강성을 제공하고, 외피 좌굴을 방지하기 위해서 알루미늄 벌집 샌드위치 구조 사용



- (a) 벌집 샌드위치 구조에서 코어는 횡단전단하중 V 를 지지하고, 페이싱은 압축, 인장굽힘하중 N 을 지지한다
- (b) 페이싱은 또한 비행기의 외피에 작용하는 전단력 S 와 수직력 N 에도 저항한다



유한요소해석

- XB-70A “Valkyrie”
 - 구조 설계 시 세계 최초로 컴퓨터 사용
 - 어셈블리어 사용
 - IBM 7094 사용
 - 주 메모리 : 192Kb, 하드 디스크 : 22.8Mb, 자기테이프
 - 기체의 주요 부품은 선형 탄성이론의 하중기법 사용



복합재료

- 종류

- 유리 섬유(1920년대) - 영국 왕립 항공 연구소
 - 유리 섬유/폴리에스테르 복합재료(2차 세계 대전)
 - 강하고 내구성 있는 항공기의 레이돔에 처음으로 사용되었다.
 - 쉘 모양으로 성형된 구조물들의 제조에 널리 사용되었다.
 - 너무 유연하여 고성능의 항공기나 우주 비행체 등의 기본구조로 사용하기에는 부적합하다.
 - 보론 섬유 (1958년)
 - 알루미늄만큼 가볍지만, 강철보다 20%정도 더 견고하며, 인장강도는 유리섬유의 2배이다.
 - 보강용 이중재인 24-ply 보론 복합재료가 제너럴 다이내믹스사의 F-111 가변 전투기의 임계응력 부분을 보강하기 위하여 강철날개의 선회축 표면에 부착 사용되었다.
-



복합재료

- 탄소섬유

- 최초 사용 : 1870년대 전구의 필라멘트 (토마스 에디슨)
- 1960년대 이후 활성화 : 역청 사용으로 생산비용 절감
- 탄소섬유 강화 합성수지(CFRP)가 비행체의 가장 보편적인 복합재료로 사용
- 강철 정도의 강성과 강도, 무게는 알루미늄보다 더 가볍다.
- AV-8B (헤리어) : 그래파이트/에폭시 복합재료 최초 응용, 전체 구조물 중량의 26% 에 해당하는 부분인 날개 전체와 수평 꼬리날개, 동체 전반부 등이 CFRP로 구성되어 있다.

- 아라미드

- 폴리아미드계 합성 중합체의 현대판 (일명, 나일론)
 - 케블라 섬유(섬유형태로 생산된 아라미드)는, 탄소보다 더 가볍고 경제적이며, 내 충격성이 좋으면서 인성이 월등히 좋다. 그렇지만 압축력에 대한 강도가 상대적으로 낮아서, 항공기의 주 구조물에 사용되는데 제한된다.
-



복합재료

- 복합재료의 응용 사례

- 원데커 이글 (1968)

- 기체 전체가 복합재료로 만들어진 최초의 상업적인 양산용 비행기
 - 77%의 CFRP, 단일 프로펠러 추진의 8인승
 - 구조적인 결함으로 FAA의 검증을 통과하지 못하여 생산되지는 못함



복합재료

- 복합재료의 응용 사례

- 레이시온 비치 크래프트의 스타쉽 2000 (1986)

- 양산에 들어간 전체가 복합재료로 된 두 번째 비행기
 - 기체 무게의 72%가 복합재료
 - 구조는 주로 에폭시 접착제와 최소한의 짐새를 사용하여 큰 조각들을 서로 연결하였다.
 - 대부분의 구조는 그래파이트/에폭시 적층판이나 노멕스 벌집구조의 핵심부와 핵심부의 양쪽에 그래파이트/에폭시를 부착하여 만들어진 샌드위치 패널 등을 사용



복합재료

- 복합재료의 응용 사례

- X-29A

- 복합재료의 공력탄성학적 테일러링 응용
 - 복합재료는 날개 굽힘과 날개 뒤틀림을 연결하는 방향 강성을 날개 표면에 부여하기 위해 사용될 수 있으며 이 방향 강성이 구조적 발산을 줄이거나 제거
 - 날개 외피는 직방성 적층판을 만들기 위해 각각 0도, 90도, ± 45 도 등으로 적층된 폭 12in, 두께 0.00525in의 그래파이트/에폭시 테이프를 사용하여 부착



NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection
<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/index.html>
NASA Photo: EC91-491-6 Date: September 13, 1991

X-29 at High Angle of Attack



복합재료

- 복합재료의 응용 사례

- 기타

- 보잉757 및 767 : 표피면적의 30%에 첨단 복합재료(그래파이트 또는 그래파이트/케블라 복합재)를 사용
 - MC-11 광폭동체 항공기 : 무게의 6%가 복합재료
 - 보잉777 : 무게의 15%가 탄소섬유 복합재료
 - A330/340 : 수평 및 수직 안정판 등의 기본구조에 사용

