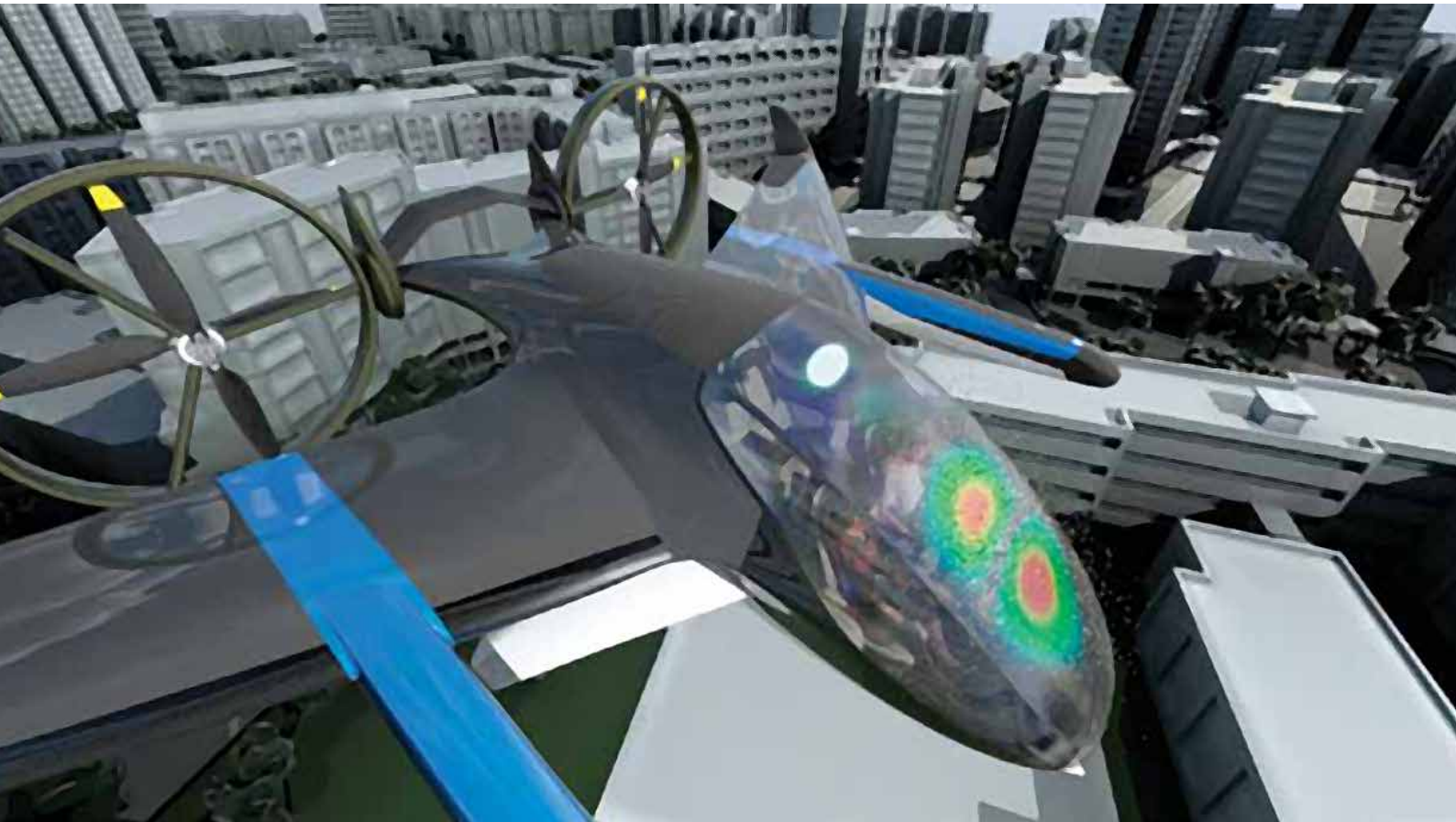


Charging Forward : THE eVTOL Journey into Urban space



충전 기술의 발전: eVTOL 도심 보급화 여정

3DEXPERIENCE가 지원하는 안전하고 소음 없는 eVTOL 항공기 설계

서론

도입 과제

시장 출시 기간 단축

사회적/법적 장애물 극복

항공기 혁신을 위한 **3DEXPERIENCE** 플랫폼의 접근 방식

요약

참고 자료

서론

기존 도시 지역과 개발 중인 도시 지역의 거주자들은 교통 혼잡이라는 성가신 문제에 직면해 있습니다. 교통 혼잡을 완화하기 위한 수백년 간의 노력과 수 십억 달러의 공공 지출에도 불구하고 상황은 갈수록 악화되는 듯 합니다. 도로 이용 차량의 증가, 미흡한 교통 관리 체계, 제한된 주차 공간 등으로 인해 도시 통근자들이 불편을 겪고 있으며, 이에 따라 응급 차량 이송도 점점 지연되고 있습니다. 설문 조사에 따르면 런던과 방콕 거주민들의 출퇴근 시간은 하루 평균 각각 74분과 72분[1][2]이라고 합니다. 1년으로 계산하면 출퇴근 시간으로 꼬박 14일을 허비하는 셈입니다. 이는 거주민의 피로감을 높일 뿐만 아니라, 탄소 배출과 기후 변화에도 영향을 미칩니다. 혁신가들은 출퇴근 시간을 활용하기 위해 MI(모바일 인터넷), IoT(사물인터넷), AV(자율 주행 차량) 기술, 몰입형 인터페이스 등 여러 가지 방법을 적용하고 있습니다. 그러나 도심지의 이동성을 개선하기 위해 PAV(개인용 항공기)나 AT(에어 택시) 같은 혁신 기술이 진지하게 논의되고 있습니다. 이러한 전기 및 하이브리드 eVTOL(전기 수직 이착륙) 항공기는 상공을 이용하므로 지상의 교통 혼잡을 완화할 수 있는 놀라운 미래를 약속합니다.

eVTOL은 항공 셔틀, 온디맨드 에어 택시, 에어 앰블런스 같은 도심지 이동 수단 시장에 가능성을 제시합니다. 헬리콥터는 이에 상응해 P2P(Point-to-Point) 수송에 사용할 수 있는 가장 근접한 기술이지만, 대중 교통 수단으로 이용하기에는 소음과 대기 오염이 심하고 비효율적이며 비용 또한 높습니다. 전기 추진 기술은 DEP(Distributed Electric Propulsion) 같은 개념을 추가하고 wing-borne VTOL에 새로운 접근 방식을 지원함으로써 VTOL 항공기 설계 영역을 열어줍니다. 도시 이동성의 새로운 시대가 열렸지만, 항공우주 업계에서는 민간 VTOL 시장을 개척하고 평가하기 위해 대기업들과 신생 기업들 간에 쟁탈전이 이미 벌어지고 있습니다. 이를 흔히 '3차 항공우주 혁명'이라고 합니다[3].

에어 택시 추진 프로젝트로는 Uber Elevate, NASA UAM Grand Challenge, Kitty Hawk 등이 있습니다. Uber는 2023년까지 온디맨드 에어 택시 서비스를 시범 운영할 계획이며, 테스트는 2020년에 시작됩니다. 이를 둘러싸고 항공기 및 자동차 제조업체, 규제 당국, 대행사, 연구 기관, 학계 등 여러 이해 관계자들이 주목하고 있습니다. 현재 Vertical Flight Society에는 155대의 eVTOL 항공기가 등록되어 있으며 현재 개발 단계에 있습니다. 여기에는 추력 편향 항공기 55대, 이륙-순항 겸용 플랫폼 17대, 날개 없는 멀티콥터 34대, 호버 바이크 및 개인용 항공 기기 30대, 전기 회전 날개 항공기 7대가 포함되어 있으며, 이 외에도 더 많은 항공기들이 주기적으로 등장하고 있습니다[4]. 공항 셔틀 및 에어 택시 시장은 제약이 없는 상황에서 총 유효 시장 가치가 5천 억 달러에 달하는 발전성 있는 시장입니다. 업계 대기업들과 신생 기업들은 eVTOL 항공기에서 추진력을 얻어, 10억 달러 이상의 투자 금액을 유치해왔습니다.

배터리 기반의 전기 모터 항공기를 위한 가장 전도 유망한 세 가지

컨셉으로 이륙-순항 겸용 구성, 틸트 윙, 틸트 로터를 들 수 있습니다. 전 세계적으로 전기 모터, 배터리, 컴퓨터 모델링/시뮬레이션 및 복합 재료 설계가 발전하면서 Boeing, Airbus, Bell, Embraer, Pipistrel Aircraft, Lilium 등의 기업들이 도시 출퇴근에 사용할 eVTOL의 시제품을 개발 중입니다. 비행기는 보통 자주 이용하지 않는 값비싼 교통 수단으로 여겨지며, 소형 항공기와 헬리콥터를 도시 교통 수단으로 이용하기에는 비용이 너무 큼니다. 이해 관계자들이 보기에 공항 셔틀 서비스는 실현 가능성이 있는 시장을 형성 중이며, 에어 택시는 대중 교통 시장으로 나아가고 있습니다. 하지만 eVTOL 항공기를 시장에 널리 보급하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 과제가 남아 있습니다. 바로, 소음이나 운영 효율성, 성능, 신뢰성, 안전성, 인프라 개발, 경제성 등의 문제를 해결해야 합니다. 도시 항공 교통 시장을 구현하기 위해서는 해결해야 할 중대한 과제들이 있습니다.

도입 과제

도시 항공 교통에 대한 야심찬 비전을 실현하기 위해서는 항공기 설계자들과 규제 당국, 도시, 지역 사회 및 네트워크 사업자들이 반드시 효과적으로 협력해야 합니다. VTOL 항공기가 낮은 고도에서 비행할 수 있으려면 미국 FAA(Federal Aviation Administration) 나 EASA(European Aviation Safety Agency) 같은 항공 당국의 검증을 거쳐야 합니다. 뿐만 아니라, 기존의 FAA 인증 표준 중 어떤 것을 VTOL에 적용할 것인지, 기존 인증의 개정 필요성을 판단하는 것도 문제입니다. 첨단 기술 업체의 CEO들은 규제 당국의 느린 행보로 인해 에어 택시의 도입이 늦어지고 있다고 불평할 수도 있겠지만, 최근 발생한 항공기 사고와 운항 중단으로 인한 비용 손실은 항공 업계의 안전 규정이 왜 엄격해야 하는지를 보여줬습니다.

도시 VTOL 네트워크를 지원하는 인프라의 개발은 도시 당국이 관심을 가져야 하는 또 다른 과제입니다. 소음이 적은 이착륙 절차를 위해서는 수직이착륙 비행장(대대적인 지원 인프라를 갖춘 대규모 VTOL 스테이션)과 수직이착륙 정류소(승객을 신속하게 승하차시킬 수 있는 보다 적은 규모의 스테이션)를 위한 최적의 위치를 확보해야 합니다. 주차장 옥상이나 기존 헬리콥터 발착장 및 소포물 테라스를 승객 승차 장소로 용도 변경하는 방법이 제시되고 있습니다. 현재로서는 도시들이 필요한 이착륙 부지를 갖추고 있지 못하기 때문에 기업들은 도시 및 인프라 계획, 물류, 지역 관리 및 환경 적응을 위해 '가상' 시나리오를 수행할 수 밖에 없습니다.

eVTOL을 시장에 배포하는 데 있어 사회적 장벽과 대중의 인식 역시 중요한 걸림돌로 작용하고 있습니다. NASA나 Airbus 같은 조직들은 UAM(Urban Air Mobility)에 대한 대중의 인식을 알아보기 위해 설문 조사를 실시했습니다. 교통 비용은 이동 시 항상 기본적으로 고려해야 하는 사항이며, 사람들은 자동 또는 원격 UAM 항공기보다는 조종 항공기를 선호합니다. 안전성과 프라이버시는 승객 입장에서 또 다른 우려 요인입니다[6]. 여기에는 항공기에 대한 신뢰도 포함되는데, 이는 시스템을 유명 기업이 제작하는지 여부와 머리 바로 위로 비행하여 승객들이 집과 마당을 훤히 내려다 볼 수 있다는

프라이버시 우려에 따라 좌우될 수 있습니다. VTOL을 운영하거나 UAM에 서비스를 제공하는 업체들이 곧 겪게 될 기술적 과제로는 ATM(Air Traffic Management), 배터리 기술, 항공기 성능, 효율성, 경제적 문제 등이 있습니다. DEP(Distributed Electric Propulsion)는 고정 윙 항공기(이륙 및 추력 로터가 장착)에서 운항 중에 배터리를 효율적으로 사용할 수 있게 해줍니다. DEP는 에지와이즈(edgewise) 로터 비행이라는 헬리콥터의 근본적인 한계점을 탈피할 수 있게 해주며, DEP를 장착한 VTOL은 60마일의 목표 거리를 비행할 수 있습니다. 틸트 로터, 수축 로터, 효율적인 배터리 사용의 이점을 가진 경량 비행기 같은 비행 전환 개념을 통해 운항 중 공기역학적 효율성을 한층 개선할 수 있습니다[7].

소음 문제는 제조업체와 대중이 공통적으로 우려하는 부분으로, 이는 VTOL의 도입을 저해할 수 있습니다. UAM에서 발생하는 소음은 전기 차량이 주류가 되는 미래 교통 환경에 큰 장애물이 될 수 있습니다. VTOL 개발자들은 지역 사회의 동의를 얻기 위해 소음 완화를 최우선 목표로 삼아야 합니다. 전기 추진은 엔진 소음과 추력 소음을 최소화한 설계를 가능하게 하므로 허용 가능한 소음 수준을 달성하는 데 중요한 역할을 합니다. VTOL의 설계와 저소음 궤적 및 기동 사용에 따라 가변 속도 오픈 로터와 덕티드 팬 같은 지원 기술을 통해 도시 지역에서의 저소음 운항과 목표 비행 범위에서의 효율적인 배터리 사용을 추가적으로 달성할 수 있습니다. Uber Elevate가 설정한 일반적인 소음 수준 목표는 고도 250피트의 VTOL에서 지상까지 67dB(A)에 불과합니다[8].

VTOL 소음 수준을 평가 및 최적화하려면 협업 환경에서 디지털 시뮬레이션/시제품 제작을 적용하는 것이 좋습니다. 이렇게 한다고 해서 물리적인 시제품 제작 과정을 완전히 없앨 수 있는 것은 아니지만, 값비싼 시제품을 개발하기 전에 가상 모델로 테스트해볼 수 있으므로 물리적 테스트 이후 놓친 부분으로 인해 개발 막바지 단계에서 많은 비용을 들여 재설계를 수행할 필요가 없습니다.

시장 출시 기간 단축

eVTOL 분야에서 경쟁이 치열해지는 가운데, 가장 먼저 시장을 개척한 기업이 대중성, 투자, 그리고 브랜드 인지도 측면에서 큰 수혜를 입을 것입니다. 또, 이들의 항공기는 후발 주자들의 제품을 판단하는 기준이 될 것입니다. 이와 같이 eVTOL 컨셉 항공기의 개발에 사용되는 엔지니어링 도구의 효율성과 연결이 매우 중요합니다.

3DEXPERIENCE 회사인 다쏘시스템은 수명 주기 관리(ENOVIA)부터 설계 및 시스템 엔지니어링(CATIA), 제조 관리(DELMIA), 모든 공학 분야에의 시뮬레이션(SIMULIA), 양자부터 분자 크기까지 아우르는 시뮬레이션(BIOVIA)에 이르기까지 브랜드 제품 내에 광범위한 기능을 제공합니다.

3DEXPERIENCE 플랫폼은 이러한 기술 포트폴리오를 하나로 통합하므로, 모든 엔지니어가 동시에 진행되는 협업 프로세스에서 단일

데이터 소스를 사용할 수 있습니다. eVTOL 항공기의 일반적인 개발 주기는 요구사항 수집, 계획, 초기 컨셉 설계, 세부 설계, 시제품 제작, 테스트, 인증 문서 작성, 그리고 마지막 단계인 제조 과정을 아우릅니다. 이러한 주기의 각 단계에서 디지털 데이터가 생성되기 때문에 이를 관리, 공유하고 적절하게 보관해야 합니다.

작성 수, 최대 비행 범위, 조종 또는 자율 운항, MTOW(Maximum Take-off Weight) 같은 요구사항이 결정되면 설계 엔지니어는 이륙 표면, 추진 장치(예: 로터, 슈라우드 로터) 또는 참조 추진 장치에 대한 초기 연산을 시작합니다. 이 과정에서 부품 수준에서 저충실도(low-fidelity) 최적화를 통해 예비 저소음 추진 시스템을 정의하기 위해 항공기 구성 및 기준 블레이드 정의를 설계하는 것이 관건입니다. 초기 설계 팀의 다음 목표는 정지 비행 상태에서 이륙 추력의 RPM을 확인하고, 최대 비행 범위와 공기역학적 효율성을 극대화하기 위해 운항 시 추력/전력을 결정하는 것입니다. 이를 위해서는 성능 파라미터와 소음 문제를 적절히 조율해야 합니다. 다음 단계에서 비행 메커니즘 엔지니어가 예비 추진 장치의 성능 특성과 공기역학적 극성을 이해할 수 있게 됩니다. eVTOL 시스템에서는 이착륙 전환 시 소음이 가장 적은 비행 방법, 운항 시 최소한의 배터리 소비, 하중 제약에 따른 하중 계수 감소 등을 고려해 항공기 구성을 설계하는 것이 중요합니다. 비행 영역에서의 전력 체제를 판단하기 위해 초기 기체 형상을 구축할 수 있습니다.

이러한 초기의 컨셉 설계 단계에서 초기 설계 및 비행 메커니즘 엔지니어에게는 여러 설계의 타당성을 판단하기 위한 파라미터 방식의 형상 모델이 필요합니다. CATIA를 사용하면 엔지니어가 파라미터 방식의 고급 CAD 기능을 이용해 원하는 유형의 3D 어셈블리를 모두 만들어낼 수 있습니다. **3DEXPERIENCE** 플랫폼을 기반으로 하는 CATIA는 복잡한 eVTOL 항공기를 개발하는 데 필요한 부서 간 모델링 작업과 검증 및 비즈니스 프로세스 지원을 완벽히 통합합니다. 엔지니어는 양력 면적 및 추진 장치를 정의하는 것 외에도, 다양한 기체 요소들에서 토폴로지 최적화나 구조 형태 발생을 탐색할 수 있습니다. CATIA와 SIMULIA의 설계 및 시뮬레이션 도구를 사용하면 파라미터 방식을 비롯한 비파라미터 방식의 최적화를 통해 설계 공간을 탐색할 수 있습니다. 다물체 역학 시뮬레이션은 추진 장치 성능 특성을 정의하는 데 중요한 역할을 하며, 이러한 기능들은 SIMULIA Simpack 도구에서도 사용할 수 있습니다. 이러한 초기 설계 단계에서 저충실도 및 고충실도 CFD 분석을 모두 수행하여 전환 기동 및 궤적에서 나타나는 소음 발생 수준을 예측할 수 있습니다.

세부 설계 단계에서는 추진 및 응용 공기역학 엔지니어가 시스템 최적화 설계를 할 수 있습니다. 추진 및 공기역학 효율성을 극대화하려면 세부적인 최적화를 수행해야 합니다. eVTOL 항공기의 여러 부품들은 작동 시 탄성 변형을 겪게 되는데, 이러한 부분을 감안하여 항공기 구성을 보다 정교하게 만들어야 합니다. 엔지니어는 정지 비행 상태에서 미 반영 추진 장치에 대해 최적화 작업을 추가로 수행하고, 전환시의 저소음 장치를 설계할 수 있습니다. 다중 로터 구성에서 BVI(Blade-

Vortex Interaction) 현상이 발생할 수 있으며, 저소음 방식을 통해 BV를 최소화할 수 있습니다. 이러한 모든 시스템 최적화를 위해서는 고충실도 CFD 분석을 통해 서로 다른 형상이 소음 수준에 미치는 영향을 이해해야 합니다. SIMULIA PowerFLOW 및 XFlow 도구를 사용하면 공기역학적/항공음향적 최적화를 수행할 수 있고, 각기 최적의 부하에서 제어 표면을 상세하게 설계할 수 있습니다.

마지막 단계에서 비행 메커니즘 및 항공음향 엔지니어는 g-factor 에 의해 제약을 받고 가장 소음이 적은 전환 궤적을 설계하는 것을 목표로 합니다. 항공기 구성이 정의되면 전체 구성에 대한 고충실도 CFD 계산과 더불어 설치된 추진 장치가 궤적 최적화를 위한 소음 데이터베이스를 생성하는 데 도움이 될 수 있습니다. SIMULIA 도구는 공기역학/항공음향적으로 시스템 최적화 및 전환을 고려하여 세부 설계를 수행함으로써 기체 설계를 최적화하고 소음의 영향을 최소화하는 데 유용합니다. 동적 트리밍과 전체 항공기에 대한 데이터베이스가 하나로 결합되도록 Simpack을 사용해 공기역학적 트림 루프에서 최소 하중 계수와 발생 소음을 서로 조율할 수 있습니다. 이제 eVTOL 컨셉의 타당성 및 디지털 시제품 제작 방법과 관련된 과제를 이해하여 이러한 항공기의 구조적, 역학적, 공기역학적, 항공음향적 성능을 개선할 수 있는 방법을 심층적으로 분석할 수 있게 되었습니다.

사회적/법적 장애물 극복

eVTOL을 성공적으로 시장에 보급하려면 사회적 장애물을 극복하여 대중에게 긍정적인 인식을 심어주는 것이 관건입니다. eVTOL의 안전성은 대중과 인증 당국 모두에게 기본적으로 중요한 부분입니다. SIMULIA의 시뮬레이션 도구 제품군은 항공우주 산업에서 이러한 과제를 해결하기 위해 수 십 년 동안 광범위하게 사용되어 왔으며, 이러한 신기술에서도 활용되고 있습니다. 소음은 eVTOL의 도입에 영향을 미치는 또 하나의 중요한 사회적 장애물이기 때문에 정확도가 높은 임시 CFD 솔루션 만이 전체 항공기 소음 수준을 예측할 수 있습니다. 이러한 엄격한 소음 요구사항을 비롯해 청정 에너지 교통 수단으로 나아가야 한다는 사회적 압박으로 인해 항공 산업에서 배터리 기술이 크게 발전하였고, SIMULIA 다중 스케일 시뮬레이션은 여기에 소개된 다양한 엔지니어링 과제를 해결하는 데도 도움이 될 수 있습니다.

안전성에 대한 우려는 대형 참사가 일어날 수 있는 상황에서 기체가 손상을 얼마나 견딜 수 있느냐와 주로 관련이 있습니다. eVTOL 항공기는 500 ~ 5000피트 고도를 날 수 있도록 설계되었기 때문에 버드 스트라이크(bird strike)나 우박으로 인해 심각한 구조적 손상이 발생할 수 있습니다. 윈드실드, 창틀, 레이돔, 기체 외피를 비롯해 날개의 리딩 에지 같이 전면을 향하는 모든 부품들은 일정 수준의 충격에 견딜 수 있는 저항력을 갖춰야 합니다. SIMULIA Abaqus/Explicit에서 제공되는 수치 해석 기법을 사용하면 서로 다른 항공기 부품에 버드 스트라이크가 미치는 충격을 시뮬레이션할 수 있습니다. 라그랑주, 오일러리안 및 meshless particle 모델링

(SPH) 해석이 모두 지원되고 널리 사용되고 있는데, 각각은 서로 다른 애플리케이션에서 특정한 이점을 가지고 있습니다. SIMULIA 시뮬레이션 결과, 버드 스트라이크나 새락눈에 의한 충격이 게시된 문헌의 실험 결과와 상당 부분 일치했습니다[9]. 이런 문제만으로 eVTOL 항공기의 안전성을 우려하는 것은 아니지만, 엔지니어는 이러한 충격 시뮬레이션 방법을 사용하여 BVID(Barely Visible Impact Damage) 같은 다양한 현상에 대한 안전성을 고려해 항공기를 설계할 수 있습니다.

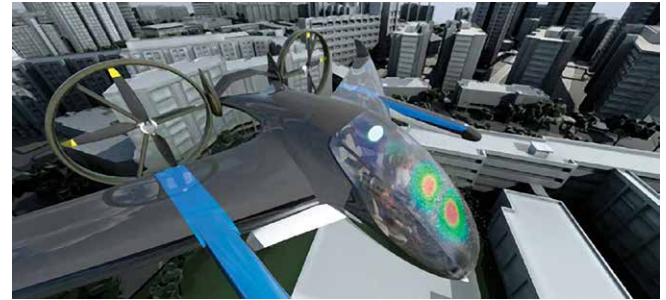


그림 1: 윈드 실드에 대한 버드 스트라이크(bird strike) 충격

eVTOL 항공기에 대한 또 다른 기본 안전성 요건은 번개와 같은 다양한 E3(Electromagnetic Environmental Effects)에 노출될 때도 계속 안전하게 운행되어야 한다는 것입니다. 항공기는 폭풍우 속에서 구름이 운집한 지역을 통과할 때 번개 낙뢰에 취약해집니다. 항공기는 전기 전도율이 높아서 번개를 유발할 수 있고 번개 경로를 비행하게 될 수도 있습니다. 따라서 통신 및 비행 통제 시스템이 손상되지 않고 계속 작동해야 합니다. 스케일 모델의 시제품에서 번개 낙뢰 테스트를 수행하려면 엄청난 비용과 시간이 소요됩니다. 또한 전자기에 대한 스케일 모델은 풀 사이즈 항공기에 비해 충실도가 낮기 때문에 이러한 테스트 결과를 세심하게 처리해야 합니다[10]. SIMULIA의 CST Studio Suite® 실험실 테스트에 대한 대안으로, 전자기(EM) 시뮬레이션을 수행하여 항공기가 번개 및 기타 E3 요인에 취약한지 분석할 수 있습니다.

번개 분석은 항공기를 둘러싼 자기장의 정전기를 분석하여 자기장이 밀집되어 있는 영역을 확인하는 것부터 시작하며, 이는 가장 가능성이 높은 번개 접촉 지점에 해당합니다. 이러한 종류의 분석을 흔히 부착 조닝(attachment zoning)이라고 합니다. 번개가 항공기에

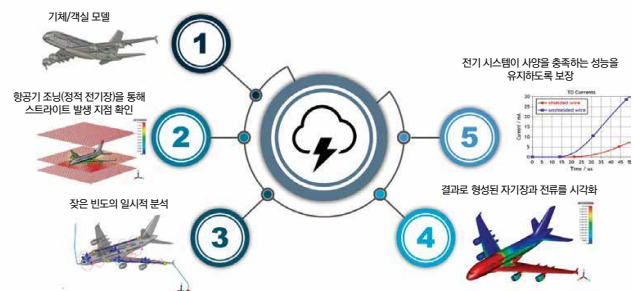


그림 2: 일반적인 번개 낙뢰 분석

달게 되면 채널이 형성되면서 일시적인 복귀 낙뢰 전류가 20만 amp의 엄청난 피크 전류로 흐르게 됩니다. SIMULIA 일시적 EM 시뮬레이션 기술을 사용하면 시간 도메인에서 복귀 낙뢰를 바로 시뮬레이션할 수 있습니다. 이러한 항공기 모델은 가상 번개 채널에 연결되고, 전체 항공기 및 케이블 시스템에 대해 전류 분배가 시뮬레이션됩니다. 복합 재료 같은 서로 다른 기체 재료를 사용할 경우의 영향을 평가할 수 있습니다. 금속 기체는 번개 전류를 항공기 외부에 유지시키는 경향이 있는 반면, 복합 재료는 외피를 통해 내부로까지 전류를 확산시켜 케이블 시스템에 커플링할 수 있습니다. 전자 시스템을 충분히 은폐 및 보호하려면 번개 낙뢰를 모델링하는 것이 중요합니다(워크플로는 그림 2를 참조).

CST Studio Suite에서는 가상 EM eVTOL 테스트를 위한 공동 사용자 인터페이스에서 전처리, EM 시뮬레이션, 후처리 등 세 가지 단계를 모두 수행할 수 있습니다. 특정 사례에 따라 고주파수 또는 저주파수 제형을 사용할 수 있습니다. 항공기의 서로 다른 지점에서 번개 낙뢰의 진행 정도를 계산하려면 필드 프로브와 전류 모니터가 반드시 필요합니다[11]. 가상 전자기 항공기 테스트는 항공기 개발 및 인증 프로세스에서 물리적 시제품에 대한 테스트를 보완합니다.

또 다른 사회적/법적 장애물로 eVTOL 항공기에서 발생하는 소음 수준을 들 수 있습니다. eVTOL은 도시 지역에 근접해서 머리 위를 직접 지나가기 때문입니다. 다쏘시스템은 그림 3에서와 같이 반경 1.17m의 프로펠러 8개로 이루어져 상반 회전을 통해 균형과 안정성을 유지할 수 있도록 eVTOL 항공기를 설계했습니다. 후면 프로펠러는 수직 비행에서 수평 비행으로 전환되는 동안 슈라우드 및 틸트가 가능합니다. 전체 날개의 길이는 15m이고 전체 기체의 길이는 약 7m입니다.

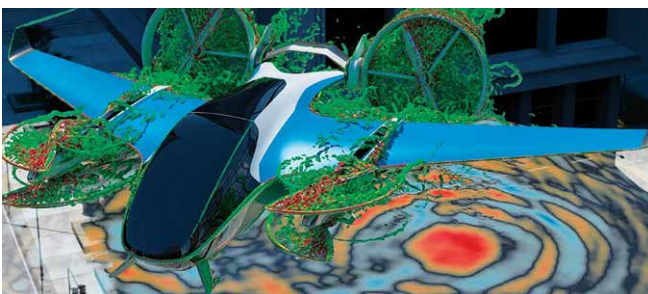


그림 3: 다쏘시스템 eVTOL 컨셉 항공기

Lattice-Boltzmann 기반 기술의 고정밀도 SIMULIA PowerFLOW CFD 솔버를 이용해 이 항공기의 소음 수준을 예측할 수 있습니다. 이러한 개념 증명에서는 NHD(Noise Hemisphere Database) 소음 외삽을 이용해 궤적 최적화를 수행할 수 있는 접근 방식이 제공됩니다. 이 경우, VR(Variable Resolution) 계층을 이용해 자세하고 정확한 모델링을 시뮬레이션할 수 있습니다. 비행 영역은 비행 마하 수, 충돌 각도, 후면 로터의 경사 각도, 4개 로터의 회전 속도의 서로 다른 조합을 고려하여 결정됩니다. Fowcs-Williams- Hawkins 방정식은 항공기를 둘러싼 반구체에서

협대역 소음 스펙트럼을 계산하는 데 사용되며, NHD(Noise Hemisphere Database)에 저장됩니다. 트리밍된 비행 궤적은 중간역, 피치(pitch), 요(yaw), 롤(roll), 경사 각도 및 로터 RPM의 시간 시퀀스로 정의됩니다. 궤도의 각 지점은 준정적 트리밍을 거친 조건, 무게, 이륙에 의해 균형이 맞춰지는 공기역학적 항력, 날개와 로터에서 발생하는 추력을 정의합니다. NHD 풋프린트 워크플로를 실행하면 직사각형 평면에서의 소음 예측값을 얻을 수 있습니다. 그림 4는 조사한 세 개의 궤적 경로 중 하나와 함께, OASPL(Overall Sound Pressure Level) 측면에서 소음 지도의 진화를 나타냅니다.

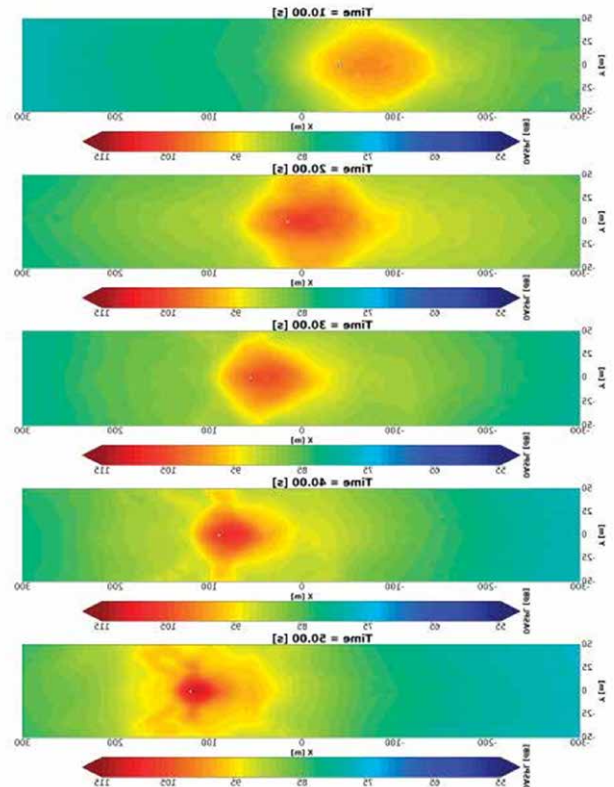


그림 4: 경로를 따르는 5회차 인스턴스의 OASPL 스냅샷

여기에서 고려한 세 가지 궤적은 지상 소음 수준에 있어 큰 변동을 보이므로, NHD와 분리된 몇 가지 사례를 보다 자세히 연구해 볼 필요가 있습니다. 관찰된 소음 증가 중 몇몇은 (i) 전환 기동이 시작될 때 로터 속도와 (ii) 주어진 마이크를 통한 항공기 주행 이후의 후면 로터 경사 각도와 상호 연관이 있을 수 있습니다. 아래의 그림 5는 비행 속도, 활공각 및 로터 RPM이 동일한 두 가지 하강 비행 사례에서 후면 로터 경사 각도가 미치는 영향을 나타냅니다.

전기 및 하이브리드 전기 에너지는 항공기 소음 저감을 비롯해 청정 에너지에 대한 대중적 요구를 충족하는 데 중요합니다. 충분히 높은 에너지 밀도를 달성하는 동시에 무게를 최소화하는 측면에서 배터리 기술의 발전은 eVTOL 항공기가 기본적으로 안고 있는 과제입니다. eVTOL 항공기 도입을 위해서는 열 관리, 배터리 안전성 및 신뢰성, 배터리 수명, 폐기 방법 등과 관련된 추가적인 우려 사항을 해결해야

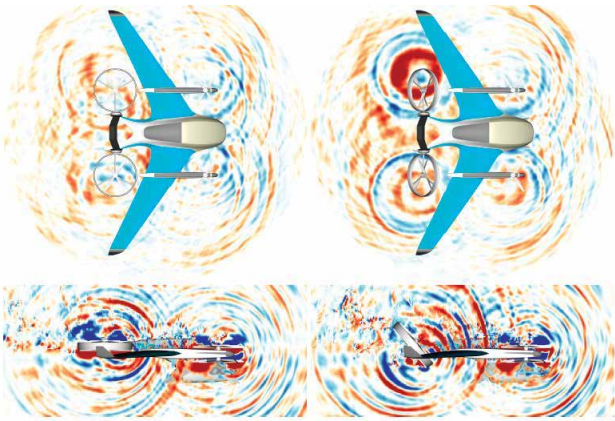


그림 5: 로터 경사 각도의 두 가지 사례에 대한 동시 팽창 필드

합니다. 배터리 기술을 완전히 최적화하려면 그림 8에서와 같이 BIOVIA의 분자 3D 모델링 솔루션을 시작으로 모든 스케일에서 배터리 거동을 고려해야 합니다.

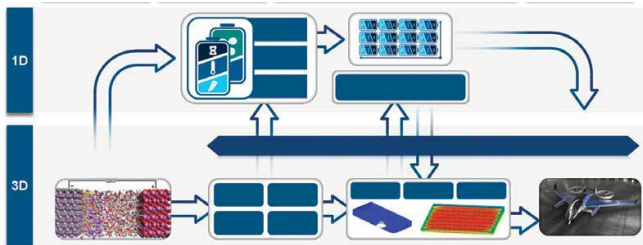


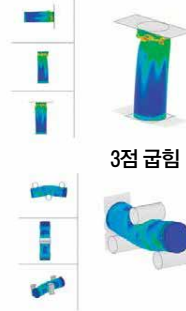
그림 6: 화학에서 시스템으로 배터리 엔지니어링

이러한 화학적 모델링 기능을 사용하면 서로 다른 전해질 제형을 테스트하여 리튬 금속 양극에서의 수지상(dendrite) 구성, 음극 실패 특성, SEI(Solid Electrolyte Interphase) 특성 분석을 예측하여 에이징에 가장 최적인 재료로 배터리를 설계할 수 있습니다. 이러한 분자 거동을 사용하면 일반적으로 전체 셀 모듈의 거동 방법을 보여주는 1D 모델을 보면서 새로운 차원의 시뮬레이션에 정보를 제공할 수 있습니다. 이러한 시스템 수준의 모델에서는 전체 셀 모듈의 거동을 이해하기 위해 함께 사용하는 지배 방정식 네트워크를 통해 각 셀에 대한 에이징, 열 및 전기 거동이 CATIA 모델에서 모델링이 됩니다.

분자 수준의 모델링 특성을 이용해 개별 셀의 기계, 열, 확산 및 전기 거동을 3D로 시뮬레이션할 수 있습니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼을 기반으로 하는 디지털 시제품은 배터리 셀에서의 열-전기 손실에 대한 분석 정보를 제공합니다. 가상 압축, 3점 굽힘 및 충격 테스트를 이용해 배터리 셀의 구조적 무결성이 평가됩니다. 배터리 충전 또는 방전 시 리튬화 및 탈리튬화가 일어나는 동안 핵심 재료가 팽창되기 때문에 양극 및 음극의 두께에 변화가 생깁니다. 그 결과 생성된 내부 응력은 셀의 기계적 반응에 영향을 미칩니다. 시뮬레이션은 셀 내의 반경 팽창에 대한 분석 정보와 압입(indentation) 테스트에 대한 지침을 제시합니다.

각 셀의 작동 방식을 3차원으로 분석하고 전체 배터리 모듈을 시뮬레이션하여 강도, 강성 및 안전성을 개선할 수 있습니다. 그림 8

축 방향 압축



방사 방향 압축

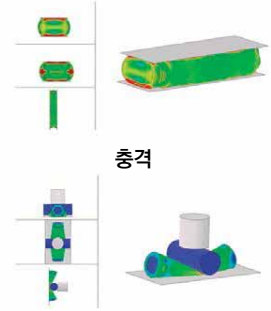


그림 7: 배터리 셀에 대한 구조 시뮬레이션

에서와 같이 조립이나 정비 중에 발생하는 오용에 대한 낙하 테스트 시뮬레이션을 통해 배터리 모듈의 충격 저항성을 평가할 수 있습니다. 이와 더불어, 열 관리 전략의 효율성도 알아낼 수 있습니다. Abaqus를 사용하면 이 외에도 다양한 테스트를 수행할 수 있습니다. 이를테면, SOC(State of Charge)로 인한 팽창, 초음파 용접 분석, 양극 및 음극의 변형으로 인한 단락 분석, 방전으로 인한 열 발생 등이 있습니다. 이러한 모든 워크플로는 배터리 엔지니어링을 최적화하는 데 필요한 분석 정보를 제공합니다.

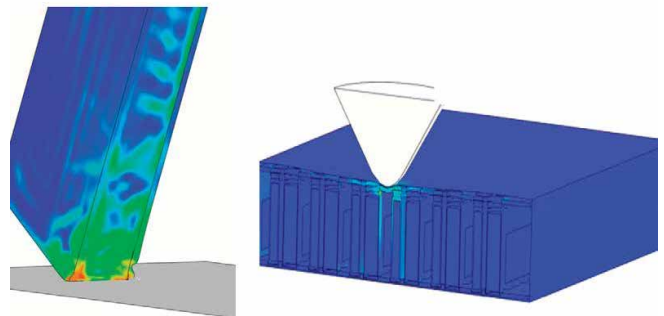


그림 8: 배터리 모듈에 대한 구조 시뮬레이션 테스트

항공기 혁신을 위한 3DEXPERIENCE 플랫폼의 접근 방식

기술 발전에 힘입어 eVTOL(electirc Vertical Take-off and Landing) 설계 및 개발 분야가 활기를 띠고 있습니다. OEM과 공급업체들이 최종 고객에게 최상의 경험을 제공하기 위해 센서, 칩, 배터리 및 재료의 발전을 이끌고 있습니다. 제조업체들이 시장을 선도하는 차세대 항공기를 개발하려면 제조사의 설계 팀이 서로 동떨어져 작업하는 일 없이 여러 공급업체의 의견을 조정 및 활용하여 기술력의 가치를 극대화해야 합니다. 다쏘시스템은 신생 기업들과 혁신적인 OEM들이 이처럼 새로운 모빌리티 환경을 개발하도록 지원하는 데 전력을 다하고 있습니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼은 팀들을 하나로 연결할 수 있는 능력을 제공하고, 정보를 관리하며, 성공의 필수 요소인 협업을 독려합니다.

3DEXPERIENCE는 CATIA의 최첨단 CAD 기능과 SIMULIA의 입증된 시뮬레이션 기술이 통합된 것으로, 설계 패러다임의 전환을 불러왔습니다. 설계가 요구 사항을 충족하는지 단순히 확인하는 것이

아니라, 기술을 사용하여 요구 사항에 가장 적합한 설계를 찾을 수 있기 때문에 고도로 최적화된 경량 구조를 만들 수 있습니다. 경량 구조는 eVTOL 항공기 설계의 핵심으로, 주행거리를 극대화합니다. 적층 제조(AM) 기술의 발전으로 설계자들은 경량화의 유기적 개념을 자유롭게 구상하고 이를 혁신시키고 실현할 수 있게 되었습니다. 다쏘시스템은 이 영역에 첨단 기술 솔루션을 제공하고 있으며, 이 솔루션은 위상 최적화를 통해 경량 부품의 개발 기간을 단축하는 데 활용되고 있습니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼에서의 Functional Generative Design은 잘 알려진 Tosca 솔버가 뒷받침하고 있으며, 이는 파트의 강성을 유지하며 설계 공간상의 영역을 인식하고 제거하는 위상 최적화 기법을 제공합니다. 경계 조건, 커넥션 및 프리텐션, 하중, 고정된 영역 등 설계 공간에 대한 기존의 구속조건을 따라 재료의 최적의 분배를 결정합니다. 최적화된 설계에 대해 검증할 수 있고, 상쇄 효과(trade-off) 연구 도구를 사용하여 최적의 설계 변형을 확실하게 선택할 수 있습니다. 설계에서 최적화 기술을 사용할 때 가장 큰 과제 중 하나는 시뮬레이션 결과를 토대로 CAD의 기본 모델을 재구성하기가 어렵다는 것입니다. Functional Generative Design 애플리케이션은 CAD 재구성 도구를 추가로 사용하여 토폴로지 최적화 결과를 CAD로 변환하는 원클릭 기능을 지원하며, 이를 통해 시뮬레이션 증강 설계를 직관적이고 간단한 프로세스로 만들어줍니다.

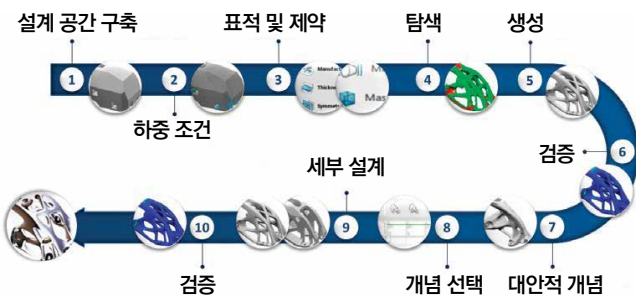


그림 9: Functional generative design 워크플로

또한 CATIA 및 SIMULIA 통합 솔루션은 복합재료를 사용하는 검증된 항공우주 기술에 엔지니어링 효율성을 제공합니다. 복합 재료는 날개 부품이나 동체 패널과 같은 항공기 설계의 기본 구조에 주로 사용되며, eVTOL 항공기에도 적용이 가능합니다. 최첨단의 VCCT(Virtual Crack Closure Technique) 복합 재료 시뮬레이션 기술을 상용화하기 위해 2004년 Boeing이 Abaqus를 선택한 이후로 SIMULIA는 항공우주 산업의 복합 재료 시뮬레이션 분야에서 10년 넘게 선두를 지켜왔습니다[12]. 복합 재료의 사용률이 증가하면서 VCCT 기법은 층간바리에 대한 우려를 완화하는 데 있어 현상 유지에 머물러 있습니다. 3DEXPERIENCE의 통합 CAD 및 시뮬레이션 기술 덕분에 설계 변경 시 적층 섹션 속성을 자동으로 업데이트함으로써 다운스트림 시뮬레이션 모델에 사용되는 CAD와 관련된 적층 정의를 손쉽게 해석할 수 있게 되었습니다.

CAD 통합 외에도 3DEXPERIENCE 플랫폼은 유체-구조 간 상호작용 (Fluid-structure interaction, 이하 FSI로 표기)

같은 다분야 시뮬레이션을 지원합니다. 목표 비행 거리 측면에서의 eVTOL 항공기 배터리의 효율적인 사용 여부는 공기역학적 효율에 달려 있습니다. 하지만, 건물 옥상의 수직 이착륙장과 같이 협소한 공간에서의 기동성 또한 함께 고려해야 할 사항입니다. SIMULIA XFlow는 항공기의 기동을 예측하기 위한 유체-구조 간의 상호 작용을 (FSI) 수치 해석적 시뮬레이션으로 제공합니다[13]. 기동성은 승강타 (elevator)의 구동, 보조날개(aileron), 틸트-로터 (tilt-rotor) 또는 접개 로터(retracting rotor)와 같이 움직이는 부품과 관련이 있습니다. 전반적인 개발 프로세스가 후반부에 접어들 때까지도 풍동 및 비행 테스트 데이터가 도출되지 않는 경우가 많은데, 이로 인해 설계를 뒤늦게 다시 구상하느라 많은 비용이 발생합니다. 이러한 가운데 XFlow는 설계 초기 단계에서 비행 조작에 필요한 공기역학적 데이터를 예측하는 데 유용한 도구로 인정받고 있습니다.

XFlow Lattice Boltzmann 입자 기반 접근 방식은 동적 안정성을 판단할 수 있습니다. 그림 10에서와 같이 프로토타입 단계에서 상방향자세제어(pitch capture), 가로 방향 불안정 (Dutch roll), 실속(Stall), 조종 불능 상태 (Spin) 등과 같은 기동 테스트를 평가할 수 있습니다. XFlow를 이용하면 개념 설계 단계에서 다양한 형상을 포함한 eVTOL의 비행 안정성을 확실하게 평가할 수 있으며, 동적 안정성 데이터를 이용해 풍동 테스트의 결과를 보완할 수 있습니다. 실제로 eVTOL 항공기는 비행 고도가 낮아 도심의 빌딩과 지상에 근접하여 비행하게 되므로 난류를 만나거나 속도 구배가 커질 가능성이 높습니다. 이는 곧 eVTOL 안정성에 영향을 미치며, 이렇게 도심과 가까운 불리한 환경에서는 비행기의 기동이 더욱 힘들어집니다. XFlow는 강체의 동적 거동을 최대 6의 자유도로 시뮬레이션할 수 있으므로, eVTOL의 동적 반응을 분석하고 안정적인 비행 자세로 복귀하는 데 걸리는 시간을 단축하기 위한 여러 가지 비행 시나리오와 바람의 미세한 변화를 시뮬레이션할 수 있습니다.

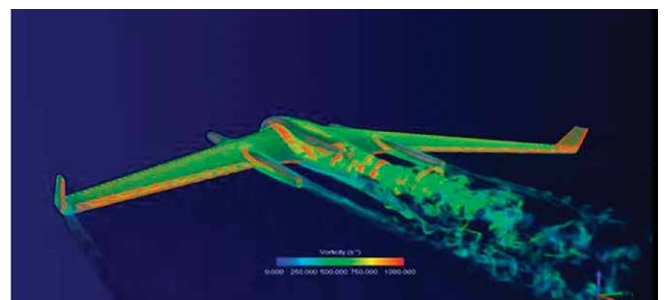


그림 10: 피치 진동에 대한 eVTOL의 동적 응답

프로펠러 설계 프로세스에서는 다분야 시뮬레이션도 필요합니다. 추진 구성(틸트 로터, 멀티콥터, 이륙-순항 겸용)에 따라 다양한 부하 조건에 대해 서로 다른 유형의 시뮬레이션이 필요할 수 있습니다. SIMULIA Simpack은 키네마틱이 복잡하고 상대 운동이 잦은 유연한 부품 외에도 다물체 시뮬레이션을 지원하는 포괄적인 도구입니다. Simpack에는 다물체 시스템 요소에 대한 광범위한 라이브러리가 제공됩니다. 연성 물체에 대해 선형 연성 거동부터 기하학적 비선형 연성 물체, 더 나아가 솔루션 타이밍 및 정확성을 제어하기 위한 임의의

비연성 유한 요소 모델과의 co-simulation에 이르기까지 다양한 추상화 수준을 적용할 수 있습니다.

eVTOL 로터 블레이드는 작동 중에 상당한 왜곡을 경험할 수 있으며, 이러한 문제는 블레이드 설계 단계에서 그 원인을 찾을 수 있습니다. ROM(Reduced Order Modeling) 기술은 다물체 시뮬레이션 시 MBS(Multibody System) 시뮬레이션의 유체 구조 커플링에서 발생하는 비선형 효과를 설명하는 데 반드시 필요합니다. 로터 블레이드는 그 모양 때문에 빔 구조로 추상화가 가능하며, Simpack은 3D 프리즘 분광 연속체를 빔에 가까운 형태로 만들 수 있는 복합 빔 기술을 지원합니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼 기반의 CATIA를 사용하면 로터 블레이드용 3D CAD 모델을 손쉽게 설계하여 재료 속성을 할당하고 이를 연성 빔 모델로 변환할 수 있습니다. 빔의 각 단면 메시에 대해 유한 요소 분석을 수행할 수 있으며, 도출된 빔 요소의 재료 지표를 토대로 로터 블레이드의 완전한 기하학적 비선형 빔 모델로 생성할 수 있습니다. 이렇게 도출된 로터 블레이드의 모델을 eVTOL 항공기의 전체 MBS 모델에 통합할 수 있습니다. 이러한 전항공기 모델을 공기역학 또는 항공역학 시뮬레이션과 결합하면 항공기의 동적 작용을 비롯해 블레이드 내에서 블레이드 굽힘으로 인한 코리올리 효과(예: 프로펠러 모멘트)와 원심 보강(centrifugal stiffening)을 예측할 수 있습니다.

극지 기반 접근 방식을 통해 수평 및 수직 꼬리 날개면에서 생성되는 힘과 모멘트를 비롯해 기체의 저항력을 계산할 수 있습니다. 이러한 시뮬레이션을 통해 집단적 제어 각이나 종적/횡적 제어 각과 같이 안정적인 전진 비행이나 정지 비행을 유지하는 데 필요한 파일럿 제어 기능을 결정할 수 있습니다. 시뮬레이션 모델의 높은 추상화 수준 덕분에 스틱의 움직임에 따라 다수의 기동 시뮬레이션을 수행하여 설계를 검증하고 개선할 수 있습니다. 이렇게 나온 결과를 토대로 설계 단계 자체에서 비행 제어에 대해 보다 정확한 정보를 얻을 수 있습니다.

도시에 eVTOL 항공기를 배치하는 데 있어서 가장 큰 운영상의 문제는 착륙지로 삼은 공간이 충분하지 않다는 것입니다. 제한적인 초기 VTOL 서비스를 제공하기 위한 출발점으로, 도시에 이미 운영 중인 헬리콥터 전용 비행장을 수직이착륙 비행장으로 사용할 수 있습니다. 단, 적절한 위치에 있고 지면에서 쉽게 접근할 수 있어야 합니다. 그러나 장기적으로 보면 도시 중심부나 시내에서 손쉽게 접근할 수 있는 수직이착륙 비행장을 마련해야 하는데, 이는 도시 행정 당국에게 큰 고민거리입니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼을 기반으로 하는 3DEXPERIENCity®는 지리적 복잡성을 관리할 수 있는 혁신적인 기술을 제공합니다. 이 솔루션은 시장, 교통 계획 관리자, 유틸리티 네트워크 사업자, 도시 의회, 지역 및 도시 계획 부서, 규제 당국, 설계자, 엔지니어, 협업 프로젝트에 참여하는 일반 계약업체 등 모든 관계자들을 하나로 연결해주므로 단일 데이터 소스 리포지터리에 액세스할 수 있습니다[14]. 다쓰시스템의 3DEXPERIENCE 플랫폼을 이용하는 3DEXPERIENCity는 업계 최고의 분석기술과 모델링, 시뮬레이션 및 수명 주기 관리 기능에 다양한 지리 데이터를

결합합니다. 가상 싱가포르 3DEXPERIENCity의 경우, 정부 리더, 시민, 기업 및 연구 단체를 대상으로 스마트하고 지속 가능하며 회복력 있고 성장하는 싱가포르를 만들 수 있도록 지원하고 있습니다.

eVTOL 항공기의 도심 지역 운항은 소음 문제로 인해 어려움을 겪고 있습니다. 도심에서 소음 영향 분석을 실시하여 소음이 적은 이/착륙 방법을 개발하고, 수직이착륙을 위한 최적의 위치와 항공 회랑을 위한 최적의 방향을 결정해야 합니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고성능 CFD 솔버인 SIMULIA PowerFLOW를 사용하여 소음의 출처를 예측할 수 있습니다. 정체된 공기 중의 음향 전파는 도시 전체와 항공기를 아우르는 영역에서 일시적인 CFD 시뮬레이션을 수행하여 직접 계산합니다. 그림 11은 eVTOL 항공기를 중심으로 필터링된 순간적인 음장(acoustic field)을 보여줍니다. 음파 패턴이 복잡한 것은 건물의 표면과 다수의 모서리 회절로 인해 여러 차례 반사되었기 때문입니다.

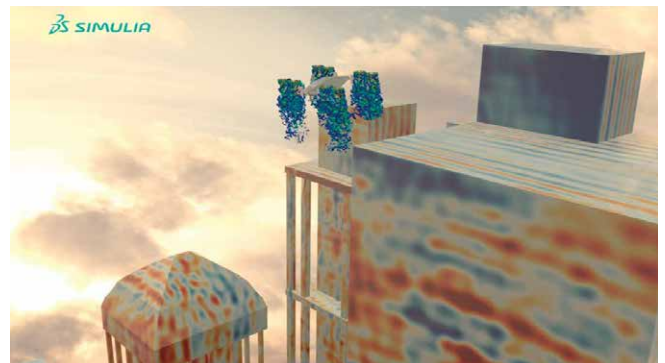


그림 11: 빌딩 표면의 음장 (sound field)

여러 신규 업체들이 eVTOL 기술을 상용화하기 위해 노력하는 가운데, IT 인프라 요건은 항공기 개발에 첨단 시뮬레이션 기술의 적용 여부를 결정하는 중요한 요소가 되었습니다. 시뮬레이션과 최적화는 복잡한 문제를 해결하고 작업을 적시에 완료하기 위해 전문화된 HPC(High-Performance Computing)가 필요한 경우에 해당합니다. 이를 위해서는 여러 개의 노드(클러스터의 개별 컴퓨터), 노드당 여러 개의 컴퓨팅 코어, 대용량 공유 메모리, 고속 스토리지, 지연 시간이 낮은 고속 상호 연결로 이루어진 아키텍처가 필요합니다. 비용 및 구성 옵션은 매우 광범위할 수 있습니다. 그림 12에서와 같이 HPC 시스템의 원시 하드웨어 비용 외에도 여러 가지 주변 장치 비용이 발생합니다.



그림 12: 온프레미스 HPC의 간접 비용

클라우드 기반의 SaaS(Software as a Service) 및 IaaS(Infrastructure as a Service)는 진입 장벽이 낮고 사용자 유지관리가 필요하지 않으며 신속한 확장과 유연한 가격 정책 덕분에 신규 업체들에게 매력적인 대안이 되고 있습니다. 여기에서 논의한 견고한 다중 물리/다중 스케일 시뮬레이션 애플리케이션 포트폴리오는 다쏘시스템이 제공하는 포괄적이고 협업적인 클라우드 기반 플랫폼에 포함되어 있습니다. 이 플랫폼은 SaaS, IaaS 및 PaaS(Platform-as-a-Service)를 제공하는 최신 통합형 프레임워크에서 도구, 데이터, 하드웨어 및 라이선싱을 관리합니다. 이러한 모든 온디맨드 서비스가 긴밀히 연동하여 확장 가능한 턴키 방식의 부서간 워크플로를 지원합니다.

SIMULIA 시뮬레이션 및 분석 알고리즘은 할당된 HPC 하드웨어를 수용하도록 손쉽게 확장됩니다. 그러나 HPC 시뮬레이션 워크로드의 피크 프로덕션 주기를 중심으로 전개되는 가변적이고 폭발적인 속성을 고려해 보면, 일상적인 워크로드 환경에서 값비싼 시스템의 사용률이 낮아질 수 있습니다. 하지만 3DEXPERIENCE의 버스트 클라우드 컴퓨팅 모델을 이용하면 사용률이 낮은 시간대에 영향을 주지 않고 가장 혼잡한 시간대에 필요한 리소스를 이용할 수 있습니다. 다수의 기업들이 백업이나 현지화를 위해 의도적으로, 혹은 빈약한 조직화로 인해 본의 아니게 데이터, 파일 및 결과가 여러 차례 저장 및 복제되고 있습니다. 이로 인해 디스크가 과잉 사용되어 점차 관리가 어려워지고 있습니다. 엄청난 수의 결과 파일이 생성될 수 있는 시뮬레이션 데이터의 경우 특히 그렇습니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼은 불필요한 복제 작업을 해소하고 효율성을 개선하며, 데이터 백업 및 재해 복구 기능을 기본적으로 지원합니다.

또한 클라우드 기반의 HPC가 플랫폼에 추가되어 제품 제조사에게 향상된 유연성을 제공합니다. 이들은 원 스톱 샵에서 버스트 또는 지속적인 방식으로 필요에 따라 소프트웨어, 하드웨어 및 모든 주변 장치 서비스에 액세스할 수 있습니다. 소기업들은 IT 설치 공간을 완벽히 없애거나 이를 유지할 수 있으며, 대기업들은 워크로드가 물리는 시간대에 클라우드 HPC를 필요에 따라 활용하여 시뮬레이션 리소스를 비용 효과적으로 확장할 수 있습니다.

요약

eVTOL이 성공적으로 보급된다면 이는 수송 체계에 큰 획을 그을 것입니다. eVTOL 항공기 개발 산업이 안고 있는 가장 큰 과제는 에어 택시(air-taxi)가 육상 교통 수단을 대체할 수 있는 안전하고 경제적이면서 현실적인 대안이라는 것을 대중에게 설득하는 일입니다. 디지털 프로토타입은 도시 모빌리티 시대에서 확실한 가치를 선사합니다. 다쏘시스템은 3DEXPERIENCE 플랫폼과 SIMULIA 포트폴리오를 기반으로 하는 다양한 제품을 통해 eVTOL 개발 주기를 단축하는 솔루션을 제공하고 있습니다. 3DEXPERIENCE 플랫폼은 모든 부서 간의 협업과 소통을 강화하는 등 추가적인 이점 외에도, 가상 환경에서 eVTOL 항공기를 모델링, 분석, 시뮬레이션, 시각화 및 체험할 수 있는 기능을 제공합니다. 클라우드 기반의

3DEXPERIENCE 플랫폼은 누구나 어디서든 자유롭게 이용하여 협업적 혁신을 강화할 수 있다는 점에서 그 매력을 더합니다. 규모에 관계없이 모든 기업들에게 공평한 경쟁의 장이 열린 것입니다.

참고 자료

- [1] <https://www.euronews.com/2018/02/07/which-european-commuters-spend-the-mosttime-in-traffic-jams->
- [2] <https://www.straitstimes.com/asia/se-asia/filipinos-spend-16-days-a-year-stuck-in-trafficstudy>
- [3] <https://aviation.aiaa.org/ThirdAerospaceRevolution/>
- [4] <http://evtol.news/2019/02/24/airbus-reveals-utm-blueprint-and-uam-perceptions/>
- [5] <http://evtol.news/aircraft/>
- [6] NASA, "Urban Air Mobility (UAM) Market Study", 2018
- [7] D. Casalino, W.C.P. van der Velden, G. Romani, "Community Noise of Urban Air Transportation Vehicles", AIAA SciTech Forum, 2019
- [8] Uber Elevate, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation", 2016
- [9] M. Al-Khalil, E. Kirtil, R. Rigby, "Use of Abaqus Explicit for Composite Sandwich Damage Prediction during Bird Impact", SIMULIA Community Conference, 2015
- [10] D. Morgan, C.J. Hardwick, S.J. Haigh, and A.J. Meakins, "The interaction with aircraft and the challenges of lightning testing", Journal AerospaceLab, ONERA, Issue 5, Dec. 2012
- [11] SIMULIA, "Simulating lightning attachment and strikes on aircraft", 2018
- [12] <https://www.businesswire.com/news/home/20040414005063/en/ABAQUS-Selected-Boeing-Commercialize-Composite-Structure-Design>
- [13] L. V. Bavel, D. M. Holman, R. Brionnaud, M. García-Camprubí, "Dynamic simulation of flight test maneuvers on the Diamond D-Jet", NAFEMS world congress, 2013
- [14] Dassault Systèmes, "Cities in the age of experience", 2016