Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 12 pp. 918-923, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.918
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

회전익항공기용 연료탱크 충돌충격시험에 대한 수치해석 신뢰성 검증

김성찬, 김현기*
한국항공우주연구원

Verification of the Reliability of the Numerical Analysis for the Crash Impact Test of Rotorcraft Fuel Tank

Sungchan Kim, Hyun-Gi Kim*
Korea Aerospace Research Institute

요 약 항공기용 연료탱크는 평상시에는 연료저장 등의 단순한 기능을 한다. 그러나, 항공기 추락과 같은 긴급 상황에서는 연료탱크 구조건전성은 승무원의 생존과 직결되므로, 관련 성능의 보유 여부를 충돌충격시험을 통해 입증하도록 규정되어 있다. 충돌충격시험은 높은 충격하중으로 실패 위험이 높기 때문에 설계 초기 실물시험에서의 시행착오 가능성을 최소화하기 위한 노력이 진행되어 왔다. 실제 시험 전에 수행하는 수치해석도 그러한 노력의 일환이다. 하지만, 수치해석 결과가 설계에 반영되기 위해서는 수치해석의 신뢰성 확보가 필요하다. 본 연구에서는 회전익항공기 연료탱크의 충돌충격시험 수치해석의 신뢰성 확보를 위해 수치해석 결과와 시험 데이타 간의 비교를 수행하였다. 수치해석은 충돌전용 소프트웨어인 LS-DYNA을 사용하였고, 해석방법은 유체-구조연성해석 방법 중 ALE(arbitary lagrangian eulerian) 방법을 적용하였다. 시험데이터 확보를 위해 연료탱크 금속 피팅부에 변형률게이지를 설치하고 데이터 획득장비와 연동시켰다. 수치해석 결과로써 연료탱크 피팅부의 변형률과 응력을 계산하였다. 그리고, 실물 연료탱크로 수행한 충돌충격시험을 통하여 확보한 상부피팅의 변형률 측정값과 수치해석으로 계산된 변형률과의 오차를 평가함으로써 수치해석의 신뢰성을 제고하였다.

Abstract The main function of a fuel tank is to store fuel. On the other hand, the structural soundness of the fuel tank is related directly to the survival of the crew in an emergency situation, such as an aircraft crash, and the relevant performance is demonstrated by a crash impact test. Because crash impact tests have a high risk of failure due to the high impact loads, various efforts have been made to minimize the possibility of trial and error in the actual test at the beginning of the design. Numerical analysis performed before the actual test is a part of such efforts. For the results of numerical analysis to be reflected in the design, however, the reliability of numerical analysis needs to be ensured. In this study, the results of numerical analysis and actual test data were compared to ensure the reliability of numerical analysis for the crash impact test of a rotorcraft fuel tank. For the numerical analysis of a crash impact test, LS-DYNA, crash analysis software, was used and the ALE (arbitrary Lagrangian Eulerian) technique was applied as the analysis method. To obtain actual test data, strain gages were installed on the metal fittings of the fuel tank and linked to the data acquisition equipment. The strain and stress of the fuel tank fitting were calculated by numerical analysis. The reliability of the numerical analysis was enhanced by assessing the error between the strain measurement of the upper fitting obtained from an actual fuel tank and the strain calculated from numerical analysis.

Keywords : ALE(arbitrary lagrangian eulerian), Crash Impact Test, Data Acquisition, Fuel Tank, LS-DYNA, MIL-DTL-27422D, Strain Gage

본 연구는 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업(헬기 항속거리 확장용 보조연료탱크 시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Korea Aerospace Research institute)
Tel: +82-42-870-3531 email: shotgun1@kari.re.kr
Received September 10, 2018 Revised October 8, 2018
Accepted December 7, 2018 Published December 31, 2018

1. 서론

회전익항공기용 연료탱크의 충돌충격시험 수치모사를 위해서는 연료탱크 내부에 유체가 들어있기 때문에 유체-구조 연성문제(Fluid Structure Interaction, 이하 FSI)를 풀어야 한다. 유체-구조 연성해석에는 라그랑지안(Lagrangian)과 오일러(Eulerian) 격자를 연동하여 해석하는 ALE(Arbitrary Lagrangian and Eulerian, 이하 ALE)와 입자법(Smoothed Particle Hydrodynamic, 이하 SPH)과 같이 라그랑지안 방법을 기반으로 하는 해석 방법이 있다. ALE는 구조격자와 오일러격자 간에 하중과 경계조건 정보 교환을 진행하면서 해석하는 방법인데, 정밀한 해석이 가능하다는 장점이 있는 반면, 수치해석 조건설정이 다소 복잡하고 계산시간이 상대적으로 많이 소요되는 단점이 있다. 라그랑지안 기반 해석방법은 각 입자들이 일정 영역의 물성을 대표하는 것으로 가정하는 방법으로 사전 연구에서 연료탱크 충돌충격시험과 내탄시험 등의 다양한 수치해석에 적용된 바 있다[1-2]. 이 방법은 ALE에 비해 수치해석 모델 설정이 간단하고 계산시간은 짧지만, 정밀한 유체 모사를 위해 많은 수의 입자가 필요하고, 공기입자를 모델링 하는 경우, 작은 밀도값 때문에 계산과정에서 발산 현상이 나타나는 등 공기 모사에 있어서 제약이 따르는 단점이 있다. 따라서, 각 방법의 장단점을 고려하여 수치해석의 목적에 따라 적합한 방법을 적용해야 하는데, 본 연구에서는 연료탱크 내부를 실제 시험과 동일하게 공기영역과 유체영역을 모두 모사하여 수치해석을 수행하고자 한다. 이를 위해 공기 모사가 가능한 ALE 방법을 적용하였다. 수치해석을 통하여 금속피팅부의 변형률(strain)과 등가응력(equivalent stress)을 계산하였고, 실물연료탱크로 수행된 충돌충격시험으로부터 획득된 변형률과 수치해석으로 계산된 변형률과의 비교를 통하여 수치해석의 신뢰성을 검증하였다.

2. 수치해석 모델 및 해석조건

충돌충격시험은 미군사 규격 등의 시험규격[3-4]에서 규정하는 절차와 조건을 적용하여 수행되었다. 해당규격에서 규정하는 주요 조건은 낙하높이 65ft, 내부 물충전 85% 그리고 충돌각 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 이다. 해당 조건을 적용하기 위해 연료탱크 바닥면 충돌 속도를 19.8m/s로 설정하고, 연료탱크 내부를 85%의 물로 충전되도록 프로그램에서 설정하였다. 실물시험에서는 통상 지면과 충돌할 때 약간의 경사를 갖게 되는데, 본 해석에서는 0°의 기울기로 바닥면과 충돌하는 것으로 가정하였다.

충돌충격시험 수치모사를 위해 구축된 연료탱크 유한요소 모델은 Fig. 1과 같다. 수치해석 형상은 연료탱크 외피와 피팅류(점검창, 하부피팅, 벤트(vent) 피팅, 측면피팅)로 구성되어 있다. 연료탱크 외피는 9,438개의 쉘요소, 피팅류는 3,001개의 쉘(shell)요소로 이뤄졌다. 점검창, 상부, 하부, 벤트피팅은 알루미늄 물성을 적용하고, 측면피팅은 고무물성을 적용하였다. 그리고, 연료탱크 소재와 피팅류 두께는 10t를 적용하였다. 연료탱크 내부부피 85%에 충전된 내부유체는 물로 모사되었고 중량은 222kg이다. 그리고, 쉘요소로 모델링된 연료탱크 외피와 피팅류의 중량은 41.9kg이다.

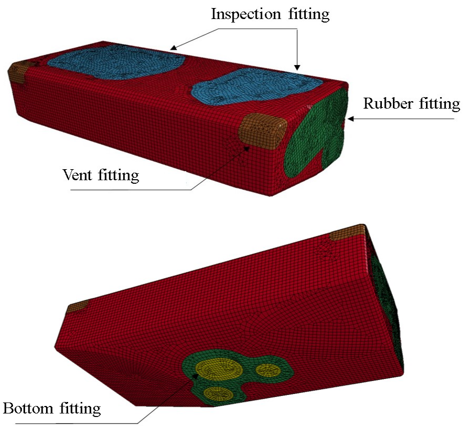

Fig. 1. Finite element model for numerical analysis

Fig. 2는 LS-DYNA에서 지원하는 volume fraction line을 사용하여 내부공기, 외부공기 그리고 내부유체를 설정하는 방법을 보여주고 있다. 먼저, 라그랑지안 모델(연료탱크)을 충분히 포함하는 솔리드(solid) 요소로 구성되는 오일러 모델을 구축하고, 유체 기준면에 volume fraction line을 생성한다. 그리고, 연료탱크 경계면 내부와 외부, volume fraction line 상부와 하부를 기준으로 외부공기, 내부공기 그리고 내부유체를 설정한다. Fig. 3은 앞에 설명한 과정을 통해 생성된 내부와 외부 공기 그리고 내부 유체를 보여주고 있다. 수치해석 과정에서 연료탱크 외피와 내부유체가 상호 접촉(contact)하게 되

는데, 이 때 구조물의 관통(penetration)이나 유체의 누유가 발생하지 않도록 접촉(contact) 조건이 적절히 적용되어야 한다. 연료탱크 자체의 접촉은 single surface를 적용하였고, 구조물과 내부유체의 접촉은 Constrained Lagrange in solid edge 조건을 적용하였다.

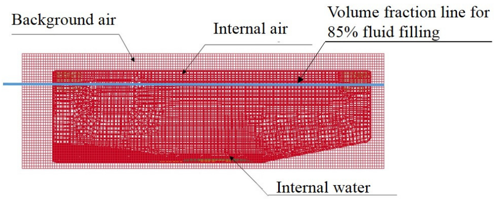

Fig. 2. Setting of internal fluid

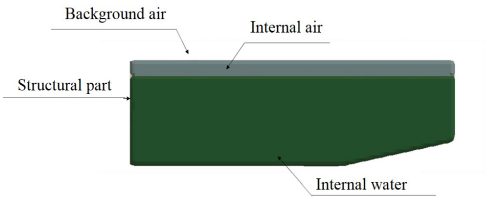

Fig. 3. Internal air and fluid in the fuel tank

3. 수치해석

Fig. 4는 연료탱크를 65ft 높이에서 자유낙하 시키고 바닥면과 충돌 후 연료탱크 내부의 유체거동을 보여주고 있다. 연료탱크 외피의 찌그러짐은 상부면 금속피팅의 이동거리를 통해 추정될 수 있는데, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 연료탱크의 최대 찌그러짐은 90mm로 예측되었으며, 이로 인해 발생하는 금속피팅의 최대 등가응력은 238MPa로 계산되었다. 최대 등가응력이 발생하는 순간의 응력 분포는 Fig. 6에 나타내었다.

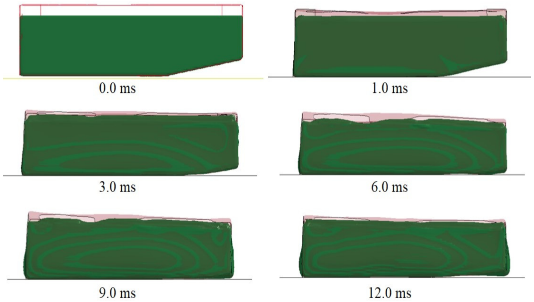

Fig. 4. Behavior of internal fluid in the fuel tank

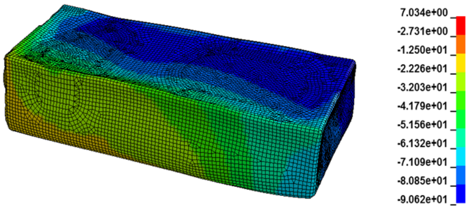

Fig. 5. Maximum deformation of fuel tank(unit: mm)

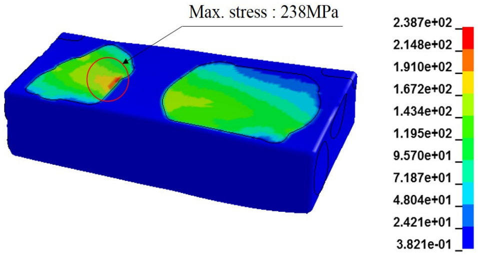

Fig. 6. Maximum equivalent stress by crash impact load (unit: MPa)

4. 신뢰성 검증

4.1 변형률 게이지 설치

연료탱크 충돌충격시험의 시험값 획득을 위해 연료탱크 상부 금속피팅 상의 네 지점에 1축 변형률 게이지(strain gage)를 설치하였다. 적용 게이지는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 교화(KYOWA) 社 1축 게이지이며 1m의 리드선이 부착되어 있다. Fig. 8과 같이 데이터 획득은 HBM 社의 MGCPLUS DAQ 장비와 Software는 Catma easy 4.0을 사용하였다.

변형률 게이지 설치를 위해서는 부착 부위의 마킹과 샌딩(sanding) 작업이 진행되는데, Fig. 9는 해당 작업에 사용된 사포, 세척액 등의 필요 도구 들이다.

Fig. 7. Strain gage used in the test

Fig. 8. Data acquisition equipment(DAQ)

Fig. 9. Equipments for installation of strain gage

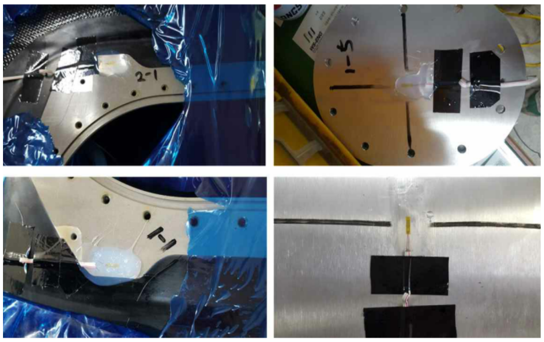
Fig. 10. Locations of strain gage and sealing

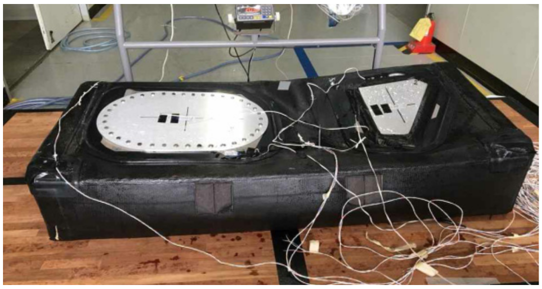
Fig. 11. Overall configuration of fuel tank with strain gage

Fig. 10은 각 금속피팅에 설치된 변형률 게이지와 방수 실링(sealing)이 완료된 결과를 보여주고 있으며, Fig. 11은 게이지 설치 작업이 완료된 연료탱크의 전체 형상을 보여주고 있다.

4.2 수치해석과 시험측정값 비교

Fig. 12는 실제 시험에서 변형률 게이지가 설치된 위치들을 수치해석 모델에 표시한 것이다. Fig. 13～Fig. 16은 Fig. 12에 표시된 no.1～no.4 위치에서의 변형률 수치해석 결과와 시험 측정값을 비교한 결과이다. 참고로, 충돌충격시험은 65ft 상공에서 자유낙하 되므로 연료탱크와 바닥면과의 충돌 각도를 가늠하는데 어려움이 있다. 이런 이유로 시험규격에서도 충돌각도를 -10^{o}～$+10^{o}$ 범위로 여유를 두고 있는데, 큰 충격하중 때문에 충돌각도에 따라 연료탱크 외피 및 피팅들의 거동은 큰 차이를 보이게 된다. 이로 인해 수치해석과 실제 시험과의 전체 거동을 동일하게 모사하는 데에는 상당한 어려움이 따른다. 따라서, 본 논문에서는 게이지들의 최대 변형률이 나타나는 순간의 거동을 비교하여 수치해석의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 13은 변형률 게이지 no.1에서의 비교 결과이다. 시험 측정값에서 게이지 no.1에서 최대 변형률은 823μs으로 측정되었고, 수치해석에서는 변형률의 최대값이 947μs 으로 계산되었다. no.1에서의 최대 변형률 오차는 약 15%(시험값 기준)으로 계산되었다. Fig. 14에 나타낸 게이지 no.2에서는 최대변형률은 1277μs로 측정되었고, 수치해석에서는 최대변형률이 1590μs 으로 계산되어 두 수치간의 오차는 24.5%로 계산되었다. 그리고, Fig. 15와 Fig. 16에 나타낸 게이지 no.3과 no.4에서 최대 변형률의 오차는 각각 14.9%, 40%로 계산되었다.

Fig. 17은 변형률 게이지 no.1～no.4에서 계산된 오차를 정리한 것이다. 네 지점에서의 최대 변형률에 대한 시험 측정값과 수치해석의 비교 결과, 오차 범위는 최소 15%～최대 40% 수준으로 계산되었다. 게이지 no.4에서의 오차가 40%로 계산되어 상대적으로 크게 나타났는데, 앞서 설명한 바와 같이 매우 큰 충격하중 때문에 충돌각도가 약간만 달라져도 부위별로 작용하는 하중이 크게 달라지기 때문인 것으로 파악된다.

그러나, 정적해석과 비교하여 충돌충격시험에 대한 수치해석이 다양한 변수와 불확실성이 존재하는 충돌 문제임을 고려할 때, 이 정도 수준의 오차에서도 연료탱크 초기 설계방향을 가늠할 수 있는 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 수치해석 결과를 토대로 설계방향을 가늠할 때 시험값과의 비교결과로 제시된 수준의 마진을 고려하는 것이 구조건전성 측면에서 적절할 것으로 사료된다.

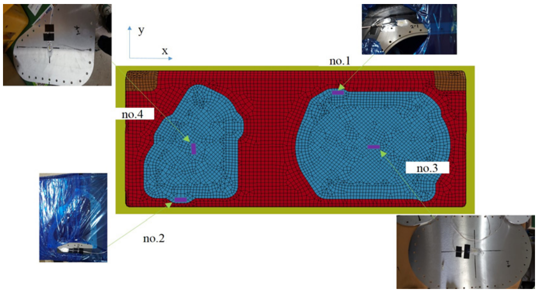

Fig. 12. Locations of strain gage (no.1~no.4)

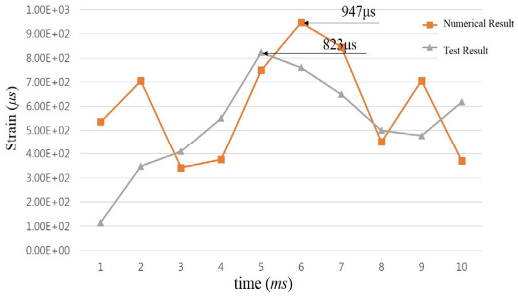

Fig. 13. Comparison of numerical result and test result (@strain gage no.1)

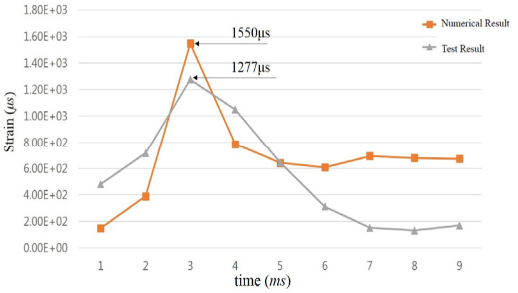

Fig. 14. Comparison of numerical result and test result (@strain gage no.2)

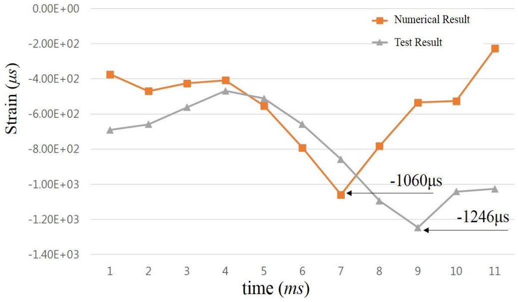

Fig. 15. Comparison of numerical result and test result (@strain gage no.3)

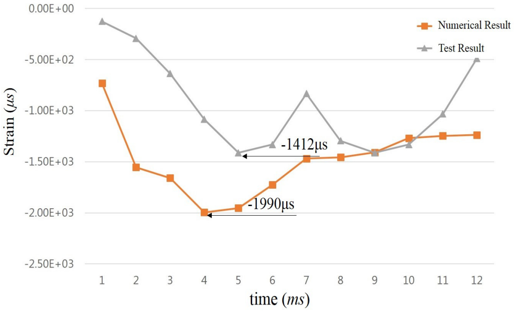

Fig. 16. Comparison of numerical result and test result (@strain gage no.4)

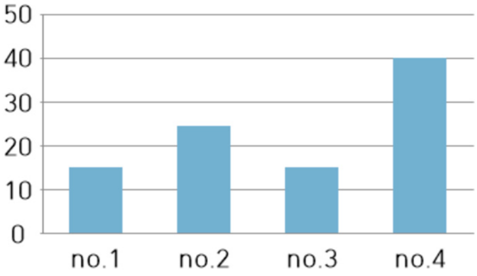

Fig. 17. Error between numerical result and test result in each gage (%)

5. 결 론

본 연구의 목적은 연료탱크 충돌충격시험 수치해석 결과와 실제 시험 획득값과의 비교를 통해 수치해석 데이터의 신뢰성을 검토하고, 연료탱크 기본 설계를 위한 데이터 획득 가능성을 살펴보는데 있다. 최대 변형률에 대한 수치해석과 시험값과의 비교 결과, 파악된 사항은 다음과 같다.

- 수치해석 결과와 시험값과의 오차수준을 고려하면, 수치해석 모델은 적절하게 잘 구축된 것으로 판단되며, 초기 설계방향을 가늠하는데 좋은 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료됨.
- 실제 항공기에 적용하기 위해서는 현재보다 더 정확한 해석 결과의 확보가 필요하며, 이를 위해서는 현재 해석모델의 개선과 적용 물성데이터의 개선이 필요함.
- 향후 충돌속도를 고려한 시편의 물성데이터 확보, 연료탱크 소재와 소재간 접착강도 데이터 그리고, 금속 및 연료탱크 소재 간 접착강도 데이터 확보가

수행되어야 함. 또한, 연료탱크 소재의 오버랩 두께 및 위치에 따른 구조 영향성 검토가 수행되어야 할 것으로 사료됨.

References

[1] Hyun-Gi Kim, Sung Chan Kim, Sung Jun Kim, Soo Yeon Kim, "Numerical Simulation of Full-scale Crash Impact Test for Fuel Cell of Rotorcraft", Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, vol. 26, no. 5, pp. 343-349, 2013.
DOI: https://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.5.343

[2] Hyun-Gi Kim, Sung Chan Kim, "Numerical Simulation of Bullet Impact for Fuel Cell of Rotorcraft", Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, vol. 27, no. 2, pp. 71-78, 2014.
DOI: https://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2014.27.2.71

[3] U.S.Army Aviation and Missile Command, "Detail Specification for the Tank, Fuel, Crash-Resistant, Ballistic-Tolerant, Aircraft", MIL-DTL-27422D, 2007

[4] Ministry of Defence, "Flexible Tanks for Use in Aircraft Fuel and Methanol/water System" Defence Standard 15-2/Issue 1, 1987.

김 성 찬(Sung chan Kim) **[정회원]**

- 1988년 2월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(학사)
- 1998년 8월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(석사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 항공우주공학과(박사)
- 1990년 3월 ~ 1994년 12월 : (주) 광림 과장
- 1995년 2월 ~ 2000년 7월 : 대우중공업 선임연구원
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>
항공기 구조설계 및 세부계통

김 현 기(Hyun-Gi Kim) **[정회원]**

- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 12월 : 현대중공업 선임연구원
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원

<관심분야>
항공기 구조해석, 구조최적화, 유체-구조 연성해석