

고정익항공기용 외부연료탱크 및 파일런 피로 해석

김현기
한국항공우주연구원

Fatigue Analysis of External Fuel Tank and Pylon for Fixed Wing Aircraft

Hyun-Gi Kim
Korea Aerospace Research Institute

요약 본 연구에서는 국내 고정익항공기 개발의 일환으로 고정익항공기용 외부 연료탱크와 파일런에 대한 피로해석을 수행하였다. 구조해석을 통해 외부 연료탱크와 파일런의 피로해석 부위들을 선정하고, 선정된 부위들에서 단위하중에 대한 전달함수를 구축하였다. 연속 하중 프로파일에 대해서 각 프로파일 하중과 전달함수와의 내적을 통해 선정 부위에서의 응력 성분을 계산한 후, Von Mises 등가응력을 사용하여 각 프로파일의 대표응력(Representative Stress)을 계산하였다. 그리고, 구축된 대표 응력 그룹에 Rainflow Counting 기법을 사용하여 초기의 방대한 하중 프로파일로부터 축소된 개별 프로파일과 그에 대한 진폭 및 평균값을 추출한 후, MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization)의 S-N 선도를 적용하여 수명싸이클을 계산하였다. 만약, 추출된 개별 프로파일들의 Stress Ratio가 선정된 S-N 선도의 Stress Ratio 범위를 벗어나는 경우 Modified Goodman 선도로부터 유도된 식을 사용하여 Stress Ratio가 해당 S-N 선도에서 요구하는 범위를 만족하도록 변환하는 과정을 거쳤다. 그리고, Miner's Rule에 의해 계산된 각 프로파일들의 손상값들을 더하여 선정 부위에서의 수명을 평가하였다. 최종적으로 수명 평가를 위해 선정된 외부연료탱크와 파일런의 관심 부위에서 요구 수명을 모두 만족하는 것으로 평가되었다.

Abstract In this study, a fatigue analysis of an external fuel tank and pylon for fixed-wing aircraft was carried out as part of the domestic development of fixed-wing aircraft. Through structural analysis, the analysis areas were selected, and the transfer function for unit loads was established in the selected parts. For each of the continuous load profiles, stress components in the selected areas were calculated using the load of each profile and the transfer function, and the Von Mises equivalent stress was employed as the representative stress of each profile. In addition, the rainflow counting technique was used to extract individual profiles obtained from the initial large load profiles and to calculate their amplitude and average values. For life evaluation, the S-N diagram of the Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS) was applied, and the damage value was calculated by Miner's rule to assess the life of the selected area. As a result of the life assessment, the life span requirement for the selected area of the external fuel tank and the pylon was assessed as being satisfied.

Keywords : External Fuel Tank(EFT), Fatigue Analysis, MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization), Pylon, Rainflow Counting Method

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Korea Aerospace Research Institute)

email: shotgun1@kari.re.kr

Received March 24, 2020

Accepted July 3, 2020

Revised April 3, 2020

Published July 31, 2020

1. 서론

본 연구에서는 국내 고정익항공기 개발의 일환으로 고정익항공기용 외부 연료탱크(External Fuel Tank, EFT)와 파일런(Pylon)에 대한 피로해석을 수행하였다. 피로해석을 수행하기 위한 사전작업으로 구조해석을 통해 외부 연료탱크와 파일런의 취약부위들을 선정하였다.

피로해석은 체계업체로부터 제공된 하중 프로파일을 사용하였는데, 단위하중에 의한 전달함수(Transfer Function)를 구축하여 각 하중 프로파일에 대한 대표응력(Representative Stress)를 계산하였다. 참고로, 본 논문에서는 각 하중 프로파일의 대표응력으로써 Von Mises 등가응력을 사용하였다.

각 하중 프로파일들의 대표응력이 계산된 후, Rainflow Counting 기법[1,2]을 적용하여 약 300개~2500개의 개별 프로파일에 대한 하중 진폭, 평균값, 출현횟수를 추출하였다. 추출된 하중진폭과 평균값을 사용하여 개별 프로파일의 최대응력과 최저응력을 환산하였다. 그리고, S-N 선도에 사용된 물성과 실제 적용된 재료 물성과의 차이를 반영하기 위한 Stress Factor를 반영하여 보수적인 해석을 수행하였다. 수명사이클 계산은 MMPDS에서 제공하는 S-N 선도를 적용하였고[3], Miner's Rule에 의해 손상값을 계산하여 취약부위의 수명을 계산하였다[4,5].

2. 피로해석 절차

본 논문에서 피로해석은 Fig. 1의 절차로 수행되었다. 각 절차에 대한 구체적인 설명은 2.1~2.4에 주어져 있다.

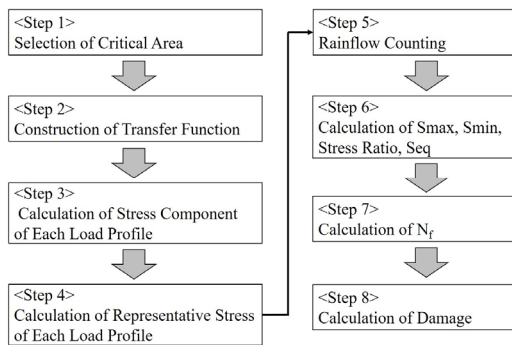


Fig. 1. Procedure of Fatigue Analysis

2.1 피로해석 부위 선정

Fig. 2는 고정익항공기용 외부 연료탱크와 파일런 조립체의 구조모델이다.

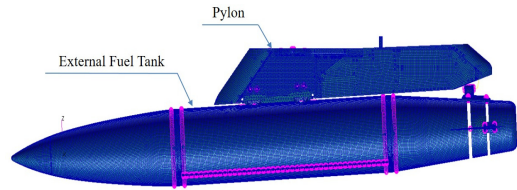


Fig. 2. Assembly of EFT and Pylon used in Fixed Wing Aircraft

피로해석 부위를 선정하기 위해서 MSC NASTRAN/PATRAN을 사용하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 3은 외부 연료탱크의 구조해석을 위한 하중 부가 방식으로써, 외부의 하중점과 외부 연료탱크의 전,후방 프레임을 RBE3 요소로 연결하여 하중을 가하게 된다. Fig. 4는 외부 연료탱크의 경계조건이 부가된 위치로써, 외부 연료탱크와 파일런이 체결되는 FWD Lug, AFT Lug, Pivot 이다. Table 1은 외부 연료탱크 FWD Lug, AFT Lug, Pivot에 적용된 경계조건이다.

파일런의 구조해석은 Fig. 5와 같이 외부 연료탱크 CG(Center of Gravity)와 체결 지점을 RBE3요소로 연결하여 하중을 부가하고, 주익과 체결되는 상부 지점에 Table 2에 주어진 경계조건이 부과되었다. 파일런의 경계조건 위치는 Fig. 6에 주어져 있다.

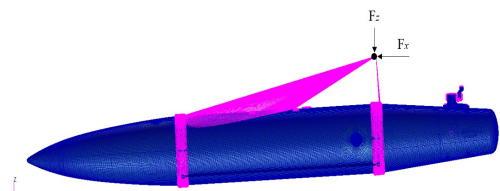


Fig. 3. Force imposed on EFT

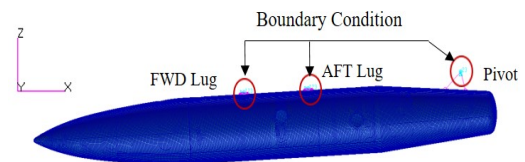


Fig. 4. Boundary Conditions of EFT

Table 1. Boundary Conditions of EFT

| | Constraints |
|---------|---------------|
| FWD Lug | X, Y, Z Fixed |
| AFT Lug | X, Y, Z Fixed |
| Pivot | Y, Z Fixed |

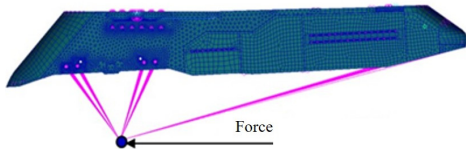


Fig. 5. Force imposed on Pylon

Table 2. Boundary Conditions of Pylon

| | Constraints |
|---------------|---------------|
| FWD In-board | Z Fix |
| FWD Out-board | Y, Z Fixed |
| AFT | X, Y, Z Fixed |

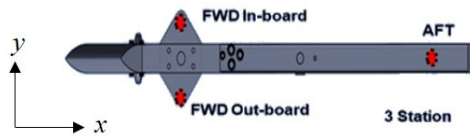


Fig. 6. Boundary Conditions of Pylon

Fig. 7~12는 구조해석 결과로부터 선정된 피로해석 부위들로서, Fig. 7과 8은 외부 연료탱크에서 선정된 피로해석 부위이고, Fig. 9~12는 파일런에서 선정된 피로해석 부위이다. 피로해석을 위해 외부 연료탱크에서는 Center Frame, Lug Support, 체결부를 선정하였고, 파일런에서는 BRU Pin Hole, BRU Cutout, BRU Connector, Bottom Frame을 선정하였다.

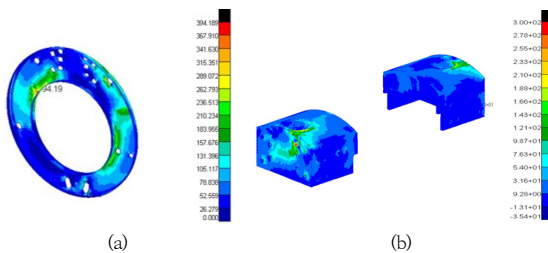


Fig. 7. Center Frame and Lug Support, Critical Area in EFT
(a) Center Frame (b) Lug Support

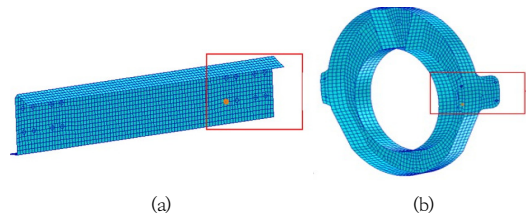


Fig. 8. Joint #01, #02 : Critical Area in EFT
(a) Joint #01 (b) Joint #02



Fig. 9. BRU Pin Hole : Critical Area of Pylon

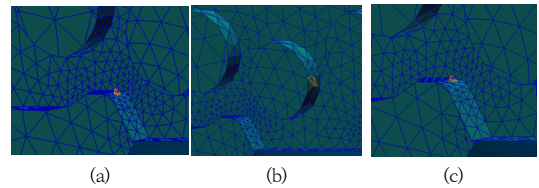


Fig. 10. BRU Cutout : Critical Area of Pylon
(a) #01 (b) #02 (c) #03

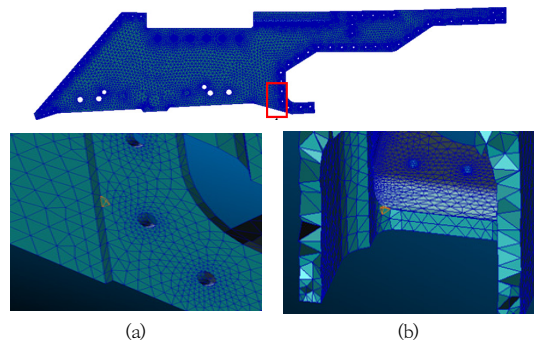


Fig. 11. BRU Connector : Critical Area of Pylon
(a) #01 (b) #02

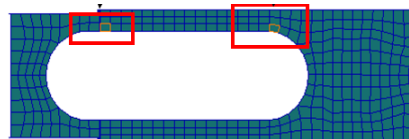


Fig. 12. Frame Bottom: : Critical Area of Pylon

2.2 전달함수와 대표응력

전달함수는 단위하중에 대해 피로해석을 위해 선정된 취약부위에서 발생하는 응력 성분을 정리한 표로써, 각 하중 프로파일에서의 하중들과의 내적을 통해 해당 프로파일에 의해 발생하는 응력 성분을 계산하는데 사용된다. 예를 들어, 전달함수가 Table 3과 같고, N번째 하중 프로파일이 Table 4와 같이 주어지는 경우, N번째 프로파일의 $\sigma_{11}^N, \sigma_{22}^N, \tau_{12}^N$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\sigma_{11}^N = (F_x_n \cdot \text{Unit_Fx1}) + (F_y_n \cdot \text{Unit_Fy1}) + (F_z_n \cdot \text{Unit_Fz1}) + (M_x_n \cdot \text{Unit_Mx1}) + (M_y_n \cdot \text{Unit_My1}) + (M_z_n \cdot \text{Unit_Mz1})$$

$$\sigma_{22}^N = (F_x_n \cdot \text{Unit_Fx2}) + (F_y_n \cdot \text{Unit_Fy2}) + (F_z_n \cdot \text{Unit_Fz2}) + (M_x_n \cdot \text{Unit_Mx2}) + (M_y_n \cdot \text{Unit_My2}) + (M_z_n \cdot \text{Unit_Mz2})$$

$$\tau_{12}^N = (F_x_n \cdot \text{Unit_Fx12}) + (F_y_n \cdot \text{Unit_Fy12}) + (F_z_n \cdot \text{Unit_Fz12}) + (M_x_n \cdot \text{Unit_Mx12}) + (M_y_n \cdot \text{Unit_My12}) + (M_z_n \cdot \text{Unit_Mz12})$$

Table 3. Transfer Function Table

| Component | σ_{11} | σ_{22} | τ_{12} |
|------------|---------------|---------------|-------------|
| Fx (1N) | Unit_Fx1 | Unit_Fx2 | Unit_Fx12 |
| Fy (1N) | Unit_Fy1 | Unit_Fy2 | Unit_Fy12 |
| Fz (1N) | Unit_Fz1 | Unit_Fz2 | Unit_Fz12 |
| Mx (1N.mm) | Unit_Mx1 | Unit_Mx2 | Unit_Mx12 |
| My (1N.mm) | Unit_My1 | Unit_My2 | Unit_My12 |
| Mz (1N.mm) | Unit_Mz1 | Unit_Mz2 | Unit_Mz12 |

Table 4. Nth Load Profile

| Profile No. | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| N th | Fx _n | Fy _n | Fz _n | Mx _n | My _n | Mz _n |

전달함수와 하중 프로파일과의 내적을 통해 프로파일에서의 응력 성분들이 계산되면, Von Mises 등가응력 계산을 통해 각 프로파일들의 대표응력을 계산한다. 식 (1)과 식 (2)는 2차원(plane stress, $\sigma_{33}=\tau_{13}=\tau_{23}=0$)과 3차원에서의 Von Mises 등가 응력식을 나타내고 있다.

$$\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + 3\tau_{12}^2} \tag{1}$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 \right\} + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2)} \tag{2}$$

2.3 Rainflow Counting Method

2.2절에서 계산된 각 하중 프로파일의 대표 응력 그룹에 대한 피로 손상 정도를 평가를 위해 널리 사용되고 있는 Rainflow Counting 방법을 적용하였다[1,2]. Fig. 13은 Rainflow Counting 방법을 보여주는 예제로써 응력의 흐름을 지붕에서 물방울이 흘러내는 모습으로 가정하고 몇 가지의 흐름 범칙을 적용하여 변형 사이클에 대응하는 피로응력 진폭들을 정의한다.

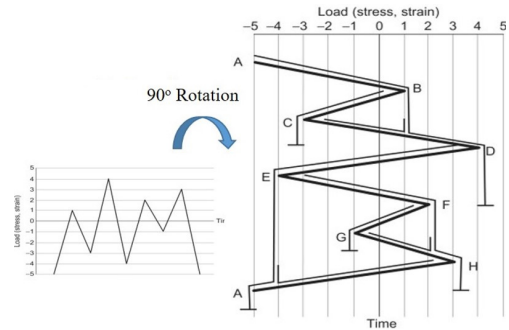


Fig. 13. Example of Rainflow Counting Method

Rainflow Counting 방법을 적용하게 되면 개별 프로파일들이 추출되고, 각 프로파일들의 Range, Mean 그리고 출현횟수를 의미하는 Cycle 값을 얻게 된다.

구해진 개별 프로파일 하중들의 Range, Mean, Cycle 값을 사용하여 수명계산에 사용하기 위한 S_{max} , S_{min} , Stress Ratio(R) 값을 계산한다. S_{max} , S_{min} , Stress Ratio(R)은 식 (3), 식 (4), 식 (5)로 각각 계산된다.

$$S_{max} = \frac{Range}{2} + Mean \tag{3}$$

$$S_{min} = Mean - \frac{Range}{2} \tag{4}$$

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} \tag{5}$$

여기서, S_{max} 은 개별 프로파일에서의 Maximum Stress Value, S_{min} 은 Minimum Stress Value를 의미한다.

본 논문에서는 보수적인 해석을 위해 식 (3)과 식 (4)에서 계산된 S_{max} , S_{min} 에 Stress Factor를 고려하였다. Stress Factor는 S-N 선도에 사용된 물성의 UTS(Ultimate Tensile Strength)와 실제 적용된 재료 물성의 UTS 비를 의미하며, 식 (6)으로 계산된다. 참고로, 본 논문에서는 취약부위의 수명평가를 위해 Fig. 14

에 나타난 MMPDS-11 3.7.5.2.8(f) S-N 선도를 적용하였고[3], 해당 S-N 선도의 Stress Ratio(R) 범위는 -1.00~0.50 이다.

$$Stress\ Factor = \frac{UTS_{SN}}{UTS_{Actual}} \quad (6)$$

그리고, 식 (5)에서 계산된 Stress Ratio가 S-N 선도에 주어진 Stress Ratio 범위 만족 여부를 확인하였다. 계산에 사용된 S-N 선도의 Stress Ratio 범위를 벗어나는 프로파일에 대해서는 Stress Ratio가 해당 범위에 들어오도록 S_{max} , S_{min} 변환이 필요하다. 만약, Stress Ratio가 S-N 선도 범위를 벗어나게 되면 Stress Ratio = 0이 되도록 식 (7)을 사용하여 S_{max} 를 변환하였다.

$$S'_{max} = \frac{S_{max} - S_{min}}{1 - \frac{S_{min}}{UTS_{Actual}}} \quad (7)$$

참고로, 식 (7)의 변환식은 Fig. 15의 Modified Goodman 선도로 부터 유도될 수 있다[6,7].

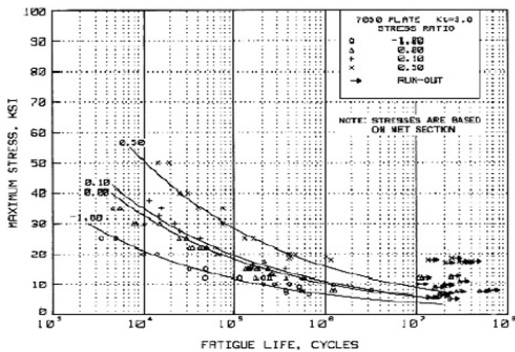


Fig. 14. MMPDS-11 3.7.5.2.8(f) S-N Curve

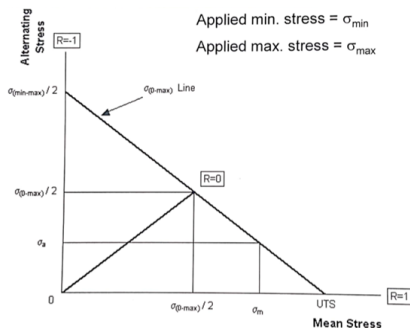


Fig. 15. Modified Goodman Diagram

$$\frac{\sigma_{0-max}}{2} = \frac{UTS - \frac{\sigma_{0-max}}{2}}{UTS - \sigma_m}$$

$$\frac{1}{2}\sigma_{0-max}(UTS - \sigma_m + \sigma_a) = \sigma_a UTS$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{를 대입하면,}$$

$$\sigma_{0-max}(UTS - \sigma_{min}) = UTS(\sigma_{max} - \sigma_{min})$$

$$\sigma_{0-max} = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{\left(1 - \frac{\sigma_{min}}{UTS}\right)} = S'_{max}$$

2.4 수명 및 손상 계산

2.3절에서 계산된 S_{max} 와 Stress Ratio(R) 값을 식 (8)에 대입하여 수명식에 적용할 S_{eq} 를 계산하였다.

$$S_{eq} = S_{max}(1 - R)^{0.64} \quad (8)$$

여기서, S_{eq} 는 식 (9)의 수명식에 사용되는 등가응력을 의미하며 실험을 통해 구해진 식이다.

Fig. 14에 주어진 MMPDS-11, 3.7.5.2.8(f)의 S-N 선도 수명식은 식 (9)와 같다. 식 (9)에 S_{eq} 를 대입하기 전에 단위 확인이 필요하며, 만약 MPa로 계산되었다면 KSI 로의 단위변환이 필요하다.

$$\log N_f^i = 10.0 - 3.96 \log(S_{eq}^i) \quad (9)$$

여기서, N_f^i 는 Rainflow Counting 방법에 의해 추출된 프로파일들 중에서 i 번째 프로파일의 수명을 의미한다. 최종적으로 식 (10)에 N_f^i 와 출현 횟수를 입력하여 i 번째 프로파일의 손상값이 계산된다.

$$Damage = \sum_{i=1}^m \frac{cycle^i}{N_f^i} \quad (10)$$

여기서, m 은 Rainflow Counting 방법을 통해 추출된 프로파일의 총 갯수, $cycle^i$ 는 i 번째 프로파일 출현 횟수를 의미한다.

3. 피로해석 결과

2장에서 계산된 손상값을 사용하여 예측 수명을 계산한 후 요구수명과 비교를 통해 외부 연료탱크와 파일런의 수명 요구도 만족여부를 평가하였다. 그 결과, 요구 수명을 모두 만족하는 것으로 평가되었고, 해당 결과는 Table 5와 Table 6에 제시하였다. 참고로, Cycle_P은

Predicted Cycle, Cycle_R은 Required Cycle을 의미한다.

Table 5. Result of Fatigue Analysis in EFT

| Critical Area | Cycle _p >Cycle _R |
|---------------|--|
| Center Frame | Satisfied |
| Lug Support | Satisfied |
| Joint 1 | Satisfied |
| Joint 2 | Satisfied |

Table 6. Result of Fatigue Analysis in Pylon

| Critical Area | Cycle _p >Cycle _R |
|-------------------|--|
| BRU Pin Hole | Satisfied |
| BRU Cutout #01 | Satisfied |
| BRU Cutout #02 | Satisfied |
| BRU Cutout #03 | Satisfied |
| BRU Connector #01 | Satisfied |
| BRU Connector #02 | Satisfied |
| Frame Bottom | Satisfied |

4. 결론

본 논문에서는 고정익항공기용 외부연료탱크와 파일런에 대한 피로해석 부위를 선정하고, Rainflow Counting 기법을 적용하여 수명 평가를 수행하였다. 수명 평가를 위해 MMPDS-11, S-N 선도를 적용하였고, Miner's Rule를 사용하여 수명을 계산하였다. 그 결과로 선정된 부위에서 요구수명을 모두 만족하는 것으로 평가되었다.

References

- [1] C. Amzallag, J.P. Gerey, J.L. Robert, J. Bahuaud, "Standardization of the rainflow counting method for fatigue analysis," International Journal of Fatigue, vol. 16, no. 4, pp. 287-293, 1994.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(94\)90343-3](https://doi.org/10.1016/0142-1123(94)90343-3)
- [2] S.D. Downing, D.F. Socie, "Simple rainflow counting algorithms," International Journal of Fatigue, vol. 4, no. 1, pp. 31-40, 1982.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(82\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0142-1123(82)90018-4)
- [3] Federal Aviation Administration(FAA), Department of Defense(DoD), National Aeronautics and Space Administration(NASA), "Metallic Materials Properties Development and Standardization(MMPDS) Handbook: MMPDS-11," Battelle Memorial Institute, pp. 532-563, 2016.
- [4] S.H. Baek, S.S. Cho., W.S. Joo, "Fatigue life prediction based on the rainflow cycle counting method for the end beam of a freight car bogie," International Journal of Automotive Technology, vol. 9, pp. 95-101, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0012-y>
- [5] S.J. Cho, Y.J. Park, J.W. Han, G.H. Lee, "Fatigue Life Prediction of the Carrier of Slewing Reducer for Tower Crane," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 14, no. 3, pp. 131-140, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.3.131>
- [6] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, "Metal Fatigue In Engineering," John Wiley & Sons, Inc., USA, pp.74-79, 2001.
- [7] Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall Inc., USA, pp.5-10, 1990.

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 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조해석, 구조최적화, 유체-구조 연성해석