

# 경로최적화 기법을 이용한 회전익기 Category A 적합성 입증용 M&S 개발 및 비상 이착륙 성능 예측

## Development of M&S for Category A Means of Compliance using Trajectory Optimization and Performance Prediction of Emergency Takeoff & Landing

### 서론

FAR Part 29에 따라 모든 수송급 회전익기는 Category A 혹은 Category B (이하 Cat. A와 Cat. B)에 속하며 이를 기준으로 인증 받게 된다. 독립된 엔진 시스템을 갖춘 다중 엔진 회전익기는 Cat. A에 속하는 항공기이며 이에 대한 인증을 받은 회전익기는 지정된 공간에서 이착륙시에 엔진이 정지되더라도 안전하게 계속 비행하거나 착륙할 수 있는 성능을 갖는다는 것을 보장한다. Cat. A 인증에 대한 비행성능은 비행시험을 통해서 입증한 경우가 많았다. 이러한 비행시험은 엔진고장을 모사해야 하기 때문에 매우 위험하며, 사고가 발생할 경우 큰 물질적, 인명 피해를 볼 수 있다. 안전한 비행시험을 위해서 점진적인 Build up 프로세스를 통하여 비행시험을 진행해야 하며 이에 따른 시간과 비용이 크게 증가할 수 있다. 이러한 위험을 줄이기 위해 적절한 M&S의 사용은 안전한 비행시험 계획을 세워 사고를 예방할 수 있으며, 외삽 및 내삽(Extrapolation and interpolation)의 도구로 사용하여 비행시험 횟수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. M&S를 사용하기 위해서는 감항당국에 시현하여 그 적합성을 입증 후 사용 허가를 받아야한다. 이러한 과정은 VV&A절차를 통해 이루어질 수 있으며, 이러한 과정을 통해 항공기 개발자와 감항당국과의 협의를 통한 인정요구조건 설정과 과정에 대한 철저한 문서화는 M&S의 적합성과 신뢰성을 더욱 확보할 수 있다. 해석적 입증기법 중 경로최적화 기법은 약 30년간 회전익기의 기동비행성능 예측과 외삽 등에 활용되어왔다. 선행 연구조사 결과 회전익기의 종축운동과 메인로터의 RPM운동을 고려한 2차원 비행운동 모델인 Point-Mass 모델링 기법을 사용하여 경로최적화기법을 해석하는 연구가 주류를 이루었다. Point-Mass 모델은 로터의 운동을 고려하지 않기 때문에 매우 간단하고 모델을 구성하는 상태변수와 제어입력의 개수가 적어 경로최적화 기법에 적용하기 매우 용이하기 때문이다. 하지만 실제에 적용하기 위해서는 2차원 운동만을 고려하고 회전익기의 운동에 가장 큰 영향을 미치는 로터의 운동을 고려하지 않는 Point-Mass 모델을 이용한 해석결과는 부족할 수 있다. 로터의 운동과 3차원 비행운동을 모사할 수 있는 회전익기 비행동역학 모델은 실제운동을 더 정확하게 모사할 수 있지만 상태변수와 제어입력의 수가 증가하기 때문에 경로최적화 기법을 통한 해석이 쉽지 않다. 본 연구에서는 Cat. A의 인증기준을 분석하여 적합성을 입증하기 위한 해석적 예측기법을 제안하였다. 해석적 예측기법을 위하여 6-DOF 비행운동 모델과 경로최적화 기법을 유도하였으며, 인증기준을 적용하여 Cat. A 해석을 위한 경로최적화 문제를 정의하였다. 또한 고충실도의 회전익기 모델을 사용한 경로최적화 문제를 더 쉽게 해결을 위한 새로운 접근법인 Direct Dynamics-Simulation Approach를 개발하여 적용하였다. 이렇게 개발한 해석적 예측기법을 적용하여 BO-105 회전익 항공기의 Cat. A 비행성능을 예측하였다.

### Category A 인증 기준 및 적합성 입증 방법

Cat. A 인증은 허용된 모든 비행영역에서 임의의 지점에서 엔진고장이 발생하더라도 안전한 운용과 안전한 이착륙을 보장하는 비행능력을 갖출 것을 요구한다. 이러한 인증을 받기 위해서는 비행성능 이외에도 다중엔진(Multi-Engine), 전기 및 유압 시스템의 분리설계(Isolation) 등의 기체 설계 요구조건이 있으며 이 요구조건이 만족한다고 가정한 후 비행성능을 입증하는데 초점을 맞추었다. Part 29는 형식인증을 위한 최소한의 요구조건을 기술하고 있으며, 2가지 이착륙에서 이륙과 착륙에 대한 각각의 2가지 이착륙 절차를 개발하도록 요구하고 있다. 또한 추가적인 이착륙장에 대한 이착륙 절차를 포함할 수 있다.

그림1는 지면고도 이착륙장(Clear heliport)에서의 이착륙 절차와 융기된 이착륙장(Elevated heliport)에서 Backup technique를 사용한 이륙시 비상절차를 나타낸다. 인증에 대한 기술지침서에서는 Backup technique에 대한 경로는 기술하고 있지 않다. 따라서, Cat. A인증을 받은 항공기의 비행교범(RFM)과 참고문헌에 기술된 절차를 분석하여 정리한 경로이다. 나타났듯이 TDP 이전에 OEI가 발생된 회전익기는 이륙표면으로 안전하게 착륙하며, TDP 이후 OEI가 발생된 경우에는 이륙표면에서 적어도 35ft 이상, 이륙안전속도( $V_{Toss}$ )와 positive 상승률(ROC)에 도달하여야 하며 특정고도 이하로 하강을 금지한다. 이후  $V_{Toss}$ 와 Best ROC speed ( $V_y$ )의 속도와 파워조건에서 positive ROC로 상승 비행하여야 하며 이에 대한 ROC 성능을 RFM에 명시하여야 한다.

착륙 절차의 경우 이륙절차와 동일한 기준이 적용되며 LDP 회전익기가 착륙을 철회하고 다시 비행하는 BL을 수행할 수 있는 마지막 지점이다. 비상이착륙 절차에서 CDP는 조종사의 엔진 정지 인지시간을 포함하여

설정되어야 한다. TDP는 일반적으로 속도, 고도로 정의될 수 있으며, LDP는 일반적으로 속력, 하강속도, 그리고 착륙면으로부터의 고도에 따라서 정의된다. LDP에 대한 정의는 접근각(Approach angle)을 포함해야 한다.

기술지침서에서는 Cat. A 인증기준에 대한 적합성 입증방법에 대하여 기술하였으며, 비행시험, M&S를 이용한 해석적 방법, 체계적인 탐구(Systematic Investigation)으로 구분한다. 그중 M&S를 활용한 적합성 입증을 위해 사전에 감항당국에 M&S의 충실도에 대한 승인을 획득한 후 사용할 수 있다. 하지만 인증 신청인이 선택할 수 있는 옵션이기 때문에 AC 29에 세부적인 적용범위나 M&S를 활용한 적합성 입증절차에 대한 언급은 없다. 다만, 승인된 M&S를 사용할 경우에도 중량, 온도 및 고도를 포함한 비행조건들의 변화를 고려할 수 있는 외삽의 허용범위만을 AC에서 기술하고 있기 때문에 감항당국과의 충분한 협의와 적합성 입증을 통하여 승인을 받은 M&S의 활용이 유용한 입증 방법으로 활용될 수 있다. Cat. A 적합성을 입증하는 M&S를 개발하는 과정은 감항당국과의 협의를 거쳐 적용될 Cat. A 인증기준을 분석하여 M&S의 사용목적(Intended Use) 과 활용범위 (Use Case)를 정의하여 이를 바탕으로 M&S의 요구조건을 도출하는 과정이 필수적이다. 도출된 요구조건을 바탕으로 개념모델과 컴퓨터 모델을 개발함으로써 외삽 및 시뮬레이션 도구인 M&S를 개발할 수 있다. M&S의 개발과정은 비행시험 데이터를 활용한 검증과정이 필수적이며 적합성이 입증되면 여러 활동에 유용하게 사용될 수 있다.

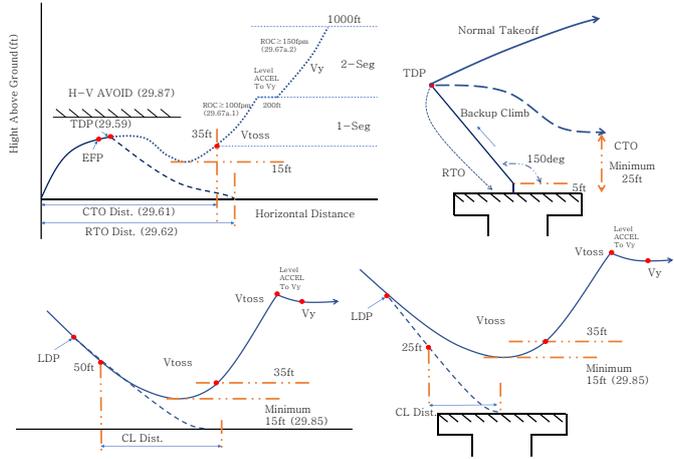


Fig. 1. Category A 이착륙절차

### 회전익기 6-DOF 비행동역학 모델

최종적으로 회전익기 비행동역학 모델을 구성하는 방정식은 RPM dynamics를 포함하는 13개의 강체 운동방정식과, 3개의 메인로터 플랩 방정식, 2개의 테일로터 플랩 방정식, 메인로터와 테일로터의 유입류 방정식이며 4가지 조종입력으로 구성된다. 이때 메인로터와 테일로터의 플랩 방정식(8)을 Steady-state 상태로 가정할 경우 대수방정식으로 플랩 운동을 표현할 수 있다. 이렇게 되면 최종적인 운동방정식은 다음 식과 같이 미분대수방정식(Differential Algebraic Equation, DAE) 형태로 나타난다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad t \in [t_0, t_f]$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$$

where

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_F, \mathbf{x}_{F-T}, \mathbf{x}_I]^T$$

$$\mathbf{x}_R = [u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi, x_N, y_E, h, \Omega]^T, \mathbf{x}_F = [\beta_0, \beta_{1C}, \beta_{1S}]^T, \mathbf{x}_{F-T} = [\beta_{1C-T}, \beta_{1S-T}]^T$$

$$\mathbf{x}_I = [\lambda_{MR}, \lambda_{TR}]^T, \mathbf{u} = [\delta_0, \delta_{1C}, \delta_{1S}, \delta_{TR}]^T$$

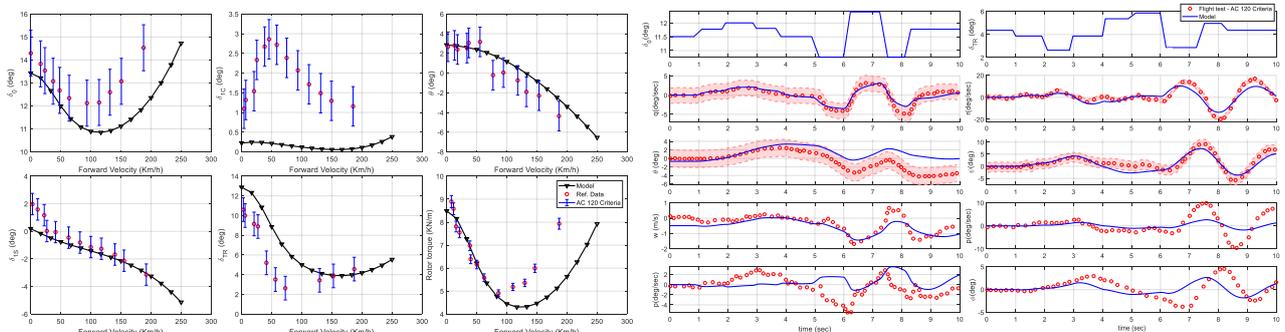


Fig. 2. 트림해석과 80knot 3211 응답특성을 통한 모델 검증.

Cat. A 인증관련 M&S의 적합성 인증기준은 명시되어 있지 않기 때문에 감항당국과의 협의를 통해 비행동역학 모델의 적합성 인증기준을 설정하여야 한다. Cat. A 적합성 입증용 M&S는 물리법칙 기반의 모델링 기법을

사용하며, 동일한 물리법칙 기법의 모델링 기법을 사용할 수 있는 훈련용 시뮬레이터의 검증 요구사항인 FAA AC 120-63을 적용할 수 있을 것으로 판단되었다. 본 연구에서 동역학 모델을 검증하기 위해서 전진비행에 대한 트림해석 결과와 트림비행시에 조종입력에 대한 시뮬레이션 결과를 비행시험 데이터와 비교하여 참고문헌에서 제시한 오차를 기준으로 비교, 검증하였다.

### 경로 최적화 기법

경로 최적화 기법은 다양한 이착륙 조건, 운용제한 및 성능 요구조건 등을 가격함수나 구속조건으로 정식화하고 동역학 구속조건을 갖는 문제를 해석하는데 유용하다. 경로최적화 문제는 비선형 최적제어 문제(NOCP)로 정의되어 해결된다. NOCP는 시스템의 동역학, 초기조건, 종말조건 등을 만족시키며 가격함수를 최소로 하는 제어입력과 비행경로를 계산하는 문제이다. Cat. A 인증기준을 만족하는 비행을 할 수 있는지 판단하기 위해 경로최적화 기법을 사용하는 것은 회전익기 동역학 구속조건을 만족하며 인증기준을 구속조건으로 하는 비행경로와 제어입력을 계산하여 비행가능 여부를 파악할 수 있기 때문에 NOCP를 이용한 M&S가 적합하다. 다음과 같은 DAE NOCP를 해결하기 위한 Direct Dynamic simulation approach(DDSA)를 개발하여 적용하였다.

$$\begin{aligned} \min J &= \phi(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_f, t_f) + J_{\text{img}} \\ \text{subject to} \\ \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) & \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad \mathbf{u} \in R^m \\ \dot{J}_{\text{img}} &= f_{\text{obj}}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) & J_{\text{img}}(t_0) &= 0 \\ \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) &= 0 & \mathbf{z} &\in R^{L_z} \\ \Psi(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{x}_f, \mathbf{y}_f) &= 0 & \Psi &\in R^{L_\Psi} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) &\leq 0 & \mathbf{g} &\in R^{L_g} \\ \mathbf{c}(\mathbf{x}_{f,k}, \mathbf{y}_{f,k}, \mathbf{x}_{0,k+1}, \mathbf{y}_{0,k+1}) &= 0 & k &= 0, 1, 2, \dots, M-1 \end{aligned}$$

Hermit interpolation을 통한 제어입력의 매개변수화(Parameterization)와 Index-1 DAE Integrator, Efficient recursive formula, Jacobian Transformation matrix를 사용하는 DDSA를 이용한 경로최적화를 다음과 같은 문제를 해결하여 검증하였다.

$$\begin{aligned} \min J &= \frac{1}{2} \int_0^{t_f} u^2 dt \\ \text{subject to} \\ \dot{x}_1 &= x_3 - 2x_1y_2 & 0 &= \left( \frac{x_3^2 - (x_1x_3 + x_2x_4)^2}{+x_4^2 - gx_2} \right) / 2 - y_1 \\ \dot{x}_2 &= x_4 - 2x_2y_2 & 0 &= (x_1x_3 + x_2x_4) / 2 - y_2 \\ \dot{x}_3 &= ux_2 - 2x_1y_1 & -2.7 &\leq u \leq 2.7 \\ \dot{x}_4 &= -g - ux_1 - 2x_2y_1 \\ \mathbf{x}_0 &= [1, 0, 0, 0]^T, \quad \mathbf{x}_f = [0, \text{free}, 0, \text{free}]^T, \quad g = 9.8, \quad t_f = 3 \end{aligned}$$

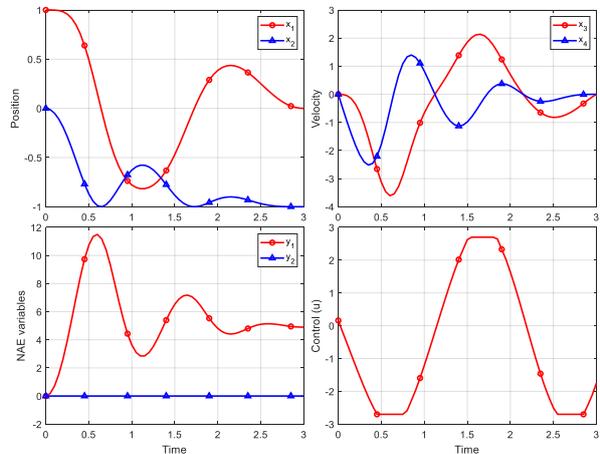


Fig. 3. Example problem and numerical optimal solution using DDSA.

### Category A 경로최적화 결과 및 분석

본 절에서는 앞절에서 기술되었던 BO-105의 6-DOF 모델을 이용하여 1초의 조종사 지연을 고려한 Cat. A 이착륙 성능을 2가지 이착륙장에 대한 4가지 기동비행의 경로최적화 문제를 정의하여 예측하였다. 각 절차에 대한 기동비행 해석은 엔진 정지 시 발생할 수 있는 여러 초기조건에 따라 이착륙 성능을 예측 및 분석하였다. DDSA를 통한 해석결과는 시간에 따른 회전익기의 위치, 속도, 각속도와 자세각, 제어입력, 로터의 운동 상태, 메인로터의 RPM과 파워 등 많은 결과를 얻을 수 있지만, 성능 분석을 위해 필요한 시간에 따른 제어입력과 메인로터의 RPM과 파워 그래프만 첨부하여 논문을 작성하였다. 위치와 자세각은 결과를 그래프로만 판단하기에는 직관적으로 보기 어렵기 때문에 MATLAB 프로그램을 이용한 3-D 경로와 자세각을 실제 scale로 가시화하여 표현하였다.

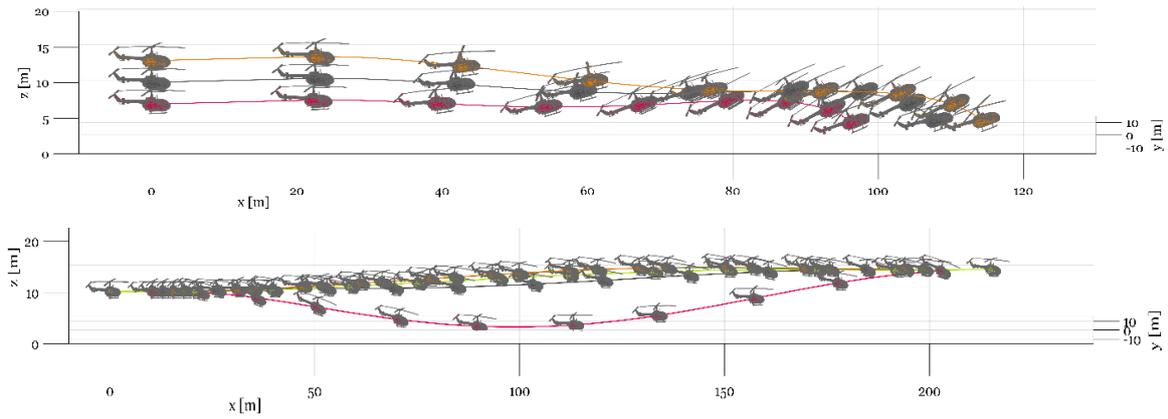


Fig. 4. Optimal trajectory of RTO(Up) and CTO(Down) procedure at clear heliport.

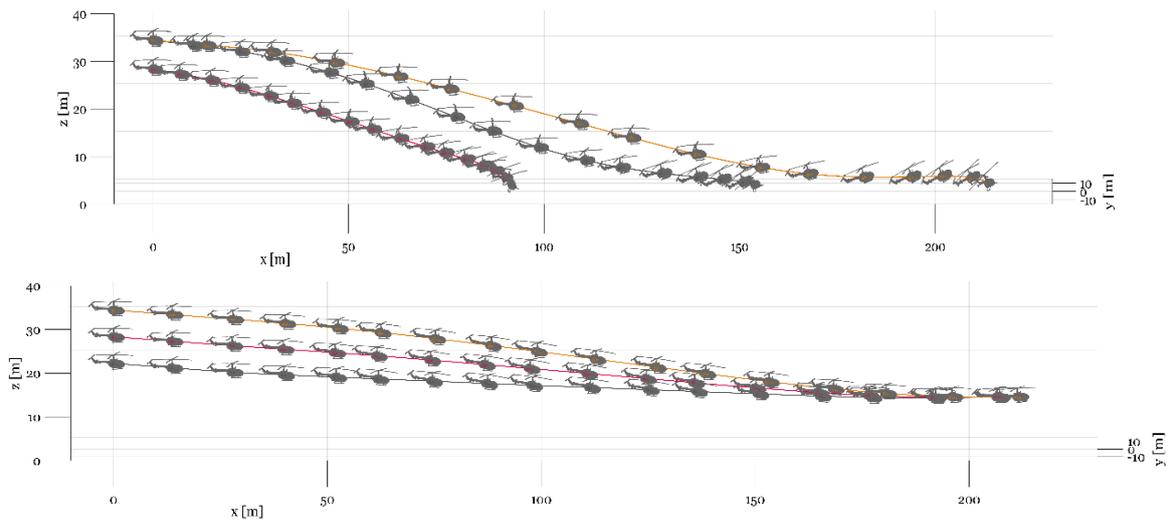


Fig. 5. Optimal trajectory of CL(Up) and BL(Down) procedure at clear heliport.

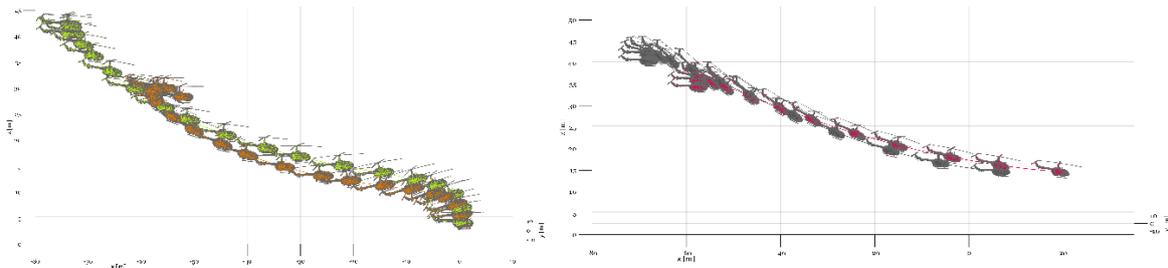


Fig. 6. Optimal trajectory of RTO(Left) and CTO(Right) procedure at elevated helipad.

**결론**

본 연구에서는 회전익기의 Cat. A 인증기준을 분석하였으며 Cat. A 이착륙 성능의 적합성 입증을 위한 해석적 입증 기법을 제안하였다. 기술 발전에 따라 회전익기 비행동역학 모델은 복잡해지고 있으며, 복잡한 동역학 모델을 사용한 경로최적화 문제는 해석하기에 현재 사용되는 기법은 어려움이 많다. 본 연구에서는 복잡한 회전익기 비행동역학 모델 해석을 위해 DDSA를 이용한 DAE 형태의 시스템의 경로최적화 기법을 개발하였으며, 비행동역학 모델은 비행시험데이터와 비교하여 검증하였으며 경로최적화 M&S를 이루고 있는 각각의 기법에 대한 검증 및 입증 과정을 진행하여 M&S의 신뢰성을 확보하였다. 또한, M&S를 이용하여 Cat. A 최소인증 요구조건인 2가지 이착륙장에서 각각 4가지 이착륙 절차에 대한 기동비행 해석 및 분석을 진행하였다. Cat. A의 기동비행 해석 결과는 실제 비행시험을 통한 검증 과정이 필요하며, 이를 통하여 경로최적화 문제의 가격함수, 구속조건 등의 설계변수를 조정하여 M&S의 정확도를 더욱 높일 수 있다. 개발된 M&S는 감항당국과의 VV&A 절차를 통해 적합성을 인정받으면 실제 인증 활동과 RFM에 명시하는 데이터를 생성하는 외삽 및 내삽 도구 등 여러 방면으로 활용할 수 있을 것이다.