

머신러닝을 활용한 자동차용 일체형 루프랙 성능 예측에 관한 연구

김태원¹⁾ · 심규호¹⁾ · 김판수^{*2)}

SECO ECOPLASTIC(주) 기술연구소¹⁾ · 경북대학교 경영학부²⁾

Study on Prediction of Automotive Roof Rack Performance Using Machine Learning

Teawon Kim¹⁾ · Gyuho Shim¹⁾ · Pansoo Kim^{*2)}

¹⁾Technology Research Institute, SECO ECOPLASTIC, 31 Gongdan-ro 57-gil, Gyeongju-si, Gyeongbuk 38071 Korea

²⁾School of Business Administration, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received 1 October 2025 / Revised 7 November 2025 / Accepted 9 November 2025)

Abstract : Recently, research on safety and weight reduction is being actively conducted due to the increase in demand for automobiles. In addition, various types of vehicles such as sedans, coupes, wagons, and sports utility vehicles (SUVs) are being developed to increase consumer satisfaction. Among them, as the demand for SUVs with high practicality has increased significantly, research on parts specialized for SUVs is being actively conducted. Roof racks are parts that allow additional cargo to be loaded outside in addition to the cargo space inside the SUV, and are essential for SUVs and are closely related to safety and weight reduction. Therefore, in this study, the static load analysis to confirm the performance of an aluminum integral roof rack was used to predict the load and displacement using data analysis techniques. The evaluation method is one of the lift resistance tests, where a load is applied toward the upper part of the vehicle, maintained for a certain period of time, and then removed to measure the elastic deformation. A verification test was conducted to verify the predicted results and compared them with the predicted analysis results. In this way, the reliability of the analysis and test was secured, and it is judged that the performance of the aluminum integral roof rack can be predicted through the data analysis interpretation technique, thereby partially replacing the test in the design and development of roof rack products.

Key words : Roof rack automobile(자동차용 루프랙), Finite elements analysis (유한요소해석), Performance prediction (성능 예측), Static load(정하중), Displacement(변위)

1. 서론

자동차용 루프랙의 개발과정에서 성능평가를 위한 정하중 강성 평가는 필수적이다. 루프랙의 강성 해석은 규격화된 시험법을 바탕으로 컴퓨터 유한요소해석을 수행한다. 루프랙의 단면 형상에 대한 두께와 루프랙의 모델링 요소를 반영하여 절점과 엘리먼트를 생성하고, 각 요소에 기계적 물성값을 반영하여 유한요소해석이 수행된다.¹⁾

본 연구에서는 루프랙의 단면 형상에 대한 두께 정보와 루프랙 모델링 요소에 따른 정하중 강성을 예측하는 머신러닝 네트워크 구조를 데이터화하고 검증하는 과정을 수행하였다. 또한 머신러닝 결과를 바탕으로 정하

중 강성 예측 다항회귀분석을 통한 특정 조건의 단면과 모델링에서 데이터 분석을 통한 해석 값과 유사한 정하중 강성을 예측하였다.²⁾ 입력변수는 루프랙 단면의 두께 및 모델링 요소를 포함한 정보와 각 부재에 사용되는 재료 물성이며, 종속변수인 출력값은 루프랙의 최대 변위이다.

본 연구에서 예측 모델로 사용된 루프랙은 3세대 일체형 루프랙으로 실용성을 극대화한 1세대 브릿지(Bridge) 형식, 디자인감을 살린 2세대 분리형 루프랙을 확대한 루프랙으로 Fig. 1에 세대별 루프랙 형식을 도식화하여 나타내었다.

*Corresponding author, E-mail: pskim@knu.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

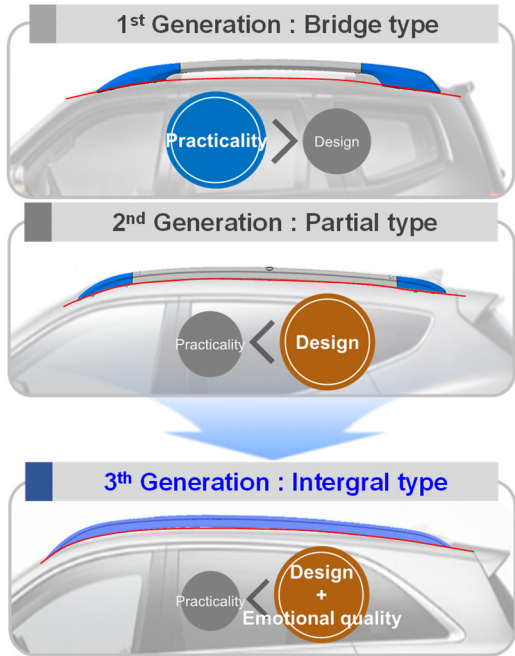


Fig. 1 Types of roof racks and which the prediction model

2. 루프랙 정하중 해석/시험 정합성

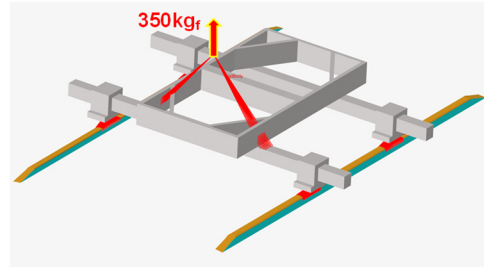
2.1 해석/시험 동일 조건 구현

루프랙의 정하중 성능을 예측함에 있어, 해석 기반 접근의 신뢰성을 확보하기 위한 선행 단계로서 해석과 시험 간 정합성 확보는 필수적인 요소로 판단하였다. 정합성 확보 방법은 해석과 시험의 조건을 동일하게 설정하는 방법을 채택하였으며, 해석 조건 설정을 시험에 적용된 하중 조건, 구속 조건, 접촉 조건, 재료 물성의 주요인자들을 시험 환경과 일치하도록 구성하였다. 시험에 사용된 루프랙의 형상 및 치수와 동일한 3D 데이터를 활용하여 모델링 및 전처리 작업을 수행하였고, 동일한 메쉬 품질 기준을 적용함으로써 해석 결과의 정밀도를 높였다.³⁾

재료 물성의 경우, 시험 데이터를 기반으로 한 응력-변형률 곡선을 도출하여 해석에 직접 반영함으로써, 실제 거동과의 차이를 최소화하였다. 해석과 시험의 조건을 동일하게 설정하여 정합성을 체계적으로 확보하여 해석과 시험의 예측이 보다 신뢰성 있게 수행될 수 있음을 확인하였다. Fig. 2에 해석조건과 시험조건의 동일조건에 대해 나타내었다.

2.2 해석/시험 동일 조건 검증

해석 기반의 정하중 성능 예측의 신뢰성을 확보하기 위해 8개 차종에 대해 해석 결과와 실제 시험 결과 간의 정합성 분석을 수행하였다.



[Analysis condition]



[Test setting]

Fig. 2 Analysis conditions and test settings

각 차종은 서로 다른 두께 및 모델링으로 구성되어 있으며 동일한 시험 조건 및 해석 조건 하에 정하중 성능 데이터를 확보하였다. 정합성 평가는 해석 결과와 시험 결과 간의 상관성을 정량적으로 분석하기 위해 상관계수 (Correlation coefficient, R-value)를 주요 평가 지표로 설정하였다. R²값은 두 데이터 간의 선형 상관관계를 나타내는 지표로, 값이 1에 가까울수록 두 결과 간의 정합성이 높음을 의미한다. 8개 차종에 대해 도출된 해석 결과와 시험 결과를 각각 비교 분석한 결과, 전체 데이터셋에 대한 R²값은 0.98로 산출되었다. 이는 해석 모델이 실제 물리적 거동을 높은 수준으로 체현하고 있음을 의미하며, 해석 조건 설정, 재료 물성 적용, 경계 조건 구현 등의 정합성 확보 절차가 유효하였음을 입증한다.⁴⁾

이러한 결과는 해석 기반 설계 평가의 활용 가능성을 뒷받침하며, 차후 신차 개발 과정에서의 비용 절감 및 개발 기간 단축에 기여할 수 있는 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 3에 R 벨류 산출 그래프를 나타내었다.

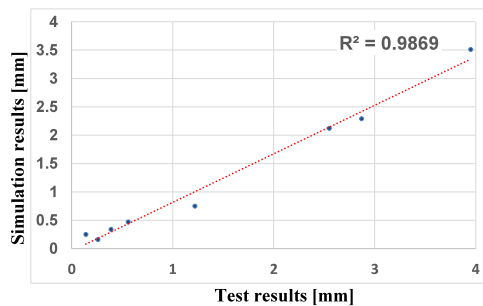


Fig. 3 R-value calculation graph

3. 머신러닝활용 예측 모델 개발 프로세스

3.1 연구 모형 구성

루프랙의 정하중 성능을 정량적으로 예측하여 설계 구조변경 등 해석 수행의 시간을 절감하여 설계자가 빠른 의사결정을 통해 설계 효율화가 가능하도록 머신러닝 기반의 연구모형을 구성하였다.

연구모형은 독립변수, 설계 변수 간 상호작용, 매개변수, 종속변수, 그리고 목적변수로 구성되어 있으며, 변수 간의 관계는 다음과 같이 정의된다.

독립변수로는 단면의 두께와 모델링 요소의 설계 요인들을 선정하였으며, 각 변수는 구조적 특성을 반영하고 있다. 독립변수들은 각각 단독 효과뿐만 아니라 상호작용 효과를 통해 종속변수에 영향을 미칠 수 있으므로, 설계 변수 간의 교호작용을 반영하여 모형을 확장하였다. 설계 변수들과 그 상호작용 효과는 매개변수인 회귀계수를 통해 수학적 형태로 정량화되며, 종속변수에 영향을 미치는 구조로 설정하였다. 종속변수는 제품의 기계적 강성 또는 변형 저항성을 나타내는 지표로서 기능하고, 정량화 설계 달성 여부를 평가하는 지표로 기능한다.

최종 목적은 이러한 종속변수의 값을 기반으로 한 최적화된 설계를 도출하는 것이다. 최소 변위와 최소 중량이라는 상충된 설계 목표를 균형 있게 고려하여 목적함수를 구성하고, 이를 통해 설계 변수 조합의 최적점을 도출하고자 한다. 이와 같은 연구모형은 DOE(Design of Experiments)를 기반으로 실험설계를 수행하고, 회귀분석 및 상관성 평가를 통해 변수 간의 관계를 정량화함으로써 실증적으로 검증될 수 있도록 구성하였다. Fig. 4와 Table 1에 연구모형을 도식화하여 나타내었다.

3.2 루프랙 단면 및 모델링 변수 항목 선정

루프랙 구조물의 정하중 성능 예측을 위한 해석 케이스를 체계적으로 설계하고자, 구조물 단면을 구성하는 주요 부위의 두께를 독립변수로 설정하였다. 루프랙은 상·하부 구조 및 보강 리브 등으로 구성된 복합 단면 구조물로서, 각 구성 요소의 두께는 전체 구조 강성과 중량에 직접적인 영향을 미치는 핵심 설계 변수라 할 수 있다. 해석 변수의 선정은 루프랙의 구조적 특성을 고려하여 다음과 같은 6개 단면 요소를 중심으로 이루어졌다. 루프랙 단면과 정보를 Table 2에 나타내었다.

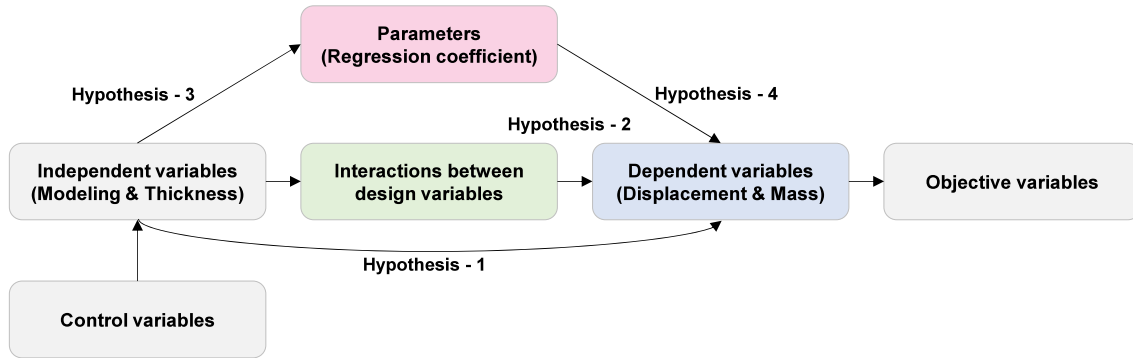
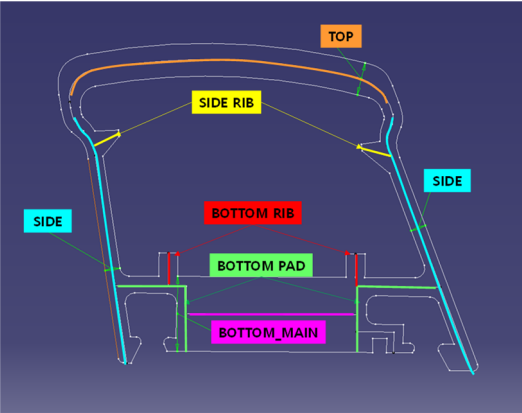


Fig. 4 Research model setting

Table 1 Hypotheses and variables setting

Hypothesis	Details
Hypothesis - 1	As the independent variable increases, displacement decreases while weight increases.
Hypothesis - 2	Design variable interaction reduces displacement but increases weight.
Hypothesis - 3	Regression coefficients mediate the relationship between independent and dependent variables.
Hypothesis - 4	Regression coefficients mediate the effects of interactions among design variables on displacement and weight.
Variables	Details
Independent Variables	Input variables that influence the roof rack design(Modeling & Thickness) are adjustable by the designer.
Dependent Variables	A variable that changes in response to the independent variable
Parameters	Regression coefficients are learned from data using machine learning algorithms.
Control Variables	Design Constraints for Stiffness Optimization(Ex. Thickness range)
Objective Variable	Minimize weight while keeping displacement within limits

Table 2 The roof rack cross-sections and information



TOP	Roof rack top thickness
SIDE	Roof rack side thickness
SIDE RIB	Side reinforcing rib
BOTTOM MAIN	Bottom center thickness
BOTTOM PAD	Bottom contact thickness
BOTTOM RIB	Bottom reinforcing rib

루프랙 정하중 성능 평가 예측을 위한 다른 중요한 요소로 실제 설계 단계에서 고려해야하는 모델링에 대한 정보가 다룰 수 있다. 차량 세그먼트에 따른 루프랙 길이와 구속조건에 따른 루프랙간 거리, 마운팅 지그 간 거리, 마운팅 개수를 변수로 선정하여 Fig. 5에 나타내었다.

각 설계 변수는 실제 제품의 설계 기준 및 제조 공정상의 제약 조건을 반영하여, 합리적인 수준(Level)으로 설정되었으며, 변수 간의 상호작용 가능성 또한 고려하여 실험계획이 수립되었다. 설정된 독립변수를 바탕으로, FEA(Finite Element Analysis)에 활용할 해석 케이스는 DOE(Design of Experiments)에 근거하여 구성되었다. 각 케이스는 설계 변수의 조합에 따라 정의되며, 해석은 LS-DYNA 솔버를 활용하여 수행하였다. 해석 결과는 종속 변수로 설정된 변위량 및 중량으로 정리되며, 이는 이후 회귀 분석 및 최적화 분석에 필요한 학습 데이터로서 활용된다.

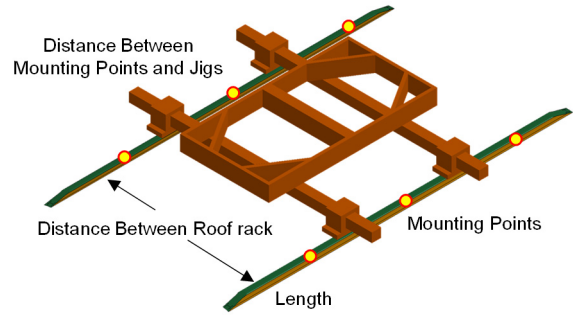


Fig. 5 The roof rack modeling variables

3.3 노이즈변수 제거 및 해석 케이스 선정

루프랙 구조물의 정하중 성능 예측을 위한 유한요소 해석(FEA)의 정확도와 반복성을 확보하고자, 설계 변수 중 실험 제어가 어려운 요인을 식별하고, 이에 해당하는 노이즈 변수를 제거함으로써 해석 모델을 정제하였다. 이는 통계적 회귀모형의 예측력을 향상시키고, 해석 결과의 일관성을 확보하기 위한 사전 정제 단계로 수행되었다. 두께 변수는 TOP, SIDE, SIDE RIB, BOTTOM MAIN, BOTTOM PAD, BOTTOM RIB의 총 6개 부위에 대해 노이즈 변수를 제거하고 4개의 두께 조건을 설정하였으며, 모델링 변수는 7개 항목중 3개 항목을 제거하였다. 이를 조합하여 총 5,184개의 머신러닝 케이스를 도출하였다. 선정된 노이즈 변수는 정하중 성능에 영향을 미치지 않고 캐리어 클램핑이나 제조 공정에 영향을 주는 변수로 판단하여 노이즈 변수(Noise variable)로 분류하고 분석 대상에서 제외하였다. Table 3에 노이즈 변수 선정과 제거에 대한 정보를 나타내었다.

3.4 유한요소해석 및 결과 도출 자동화

선정된 설계 변수 조합을 기반으로 루프랙 구조물의 정하중 성능을 정량적으로 예측하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 각 설계 케이스별 단면 두께 조건을 반영하여 모델을 수정하고, 일정한 하중 조건 및 경계 조건 하에 구조 응답을 도출하는 방식으로 진행되었다. 해석은 LS-DYNA 솔버를 기반으로 수행되었으며, 모

Table 3 Final cases after noise variables exclusion 5,184 cases

Type	Thickness(108 CASE)						Modeling(48 CASE)						
	TOP	SIDE	SIDE RIB	BOTTOM MAIN	BOTTOM PAD	BOTTOM RIB	Length	Width	Height	Angle	Mounting Points	Distance Between Roof rack	Distance Between Mounting Points and Jigs
Dimension [mm]	3.0	1.0	O	2.0	1.0	O	1000	30	30	50	3 EA	800	0
	4.0	2.0	X	4.0	2.0	X	1750	40	40	85	4 EA	1000	200
	5.0	3.0	↓	6.0	3.0	↓	2500	50	Effect of Carrier Clamp		1200	400	
	Stiffness of the Carrier Clamp			8.0	Bending Stiffness		Effect of Body Design			Varies by Segment		600	

텔링은 HyperMesh를 활용하여 전처리 작업을 수행하였다. 다수의 해석 케이스를 효과적으로 처리하기 위해 모델 수정 및 해석 수행 과정을 자동화하였다. 각 케이스의 두께 조건을 자동으로 변경하고, LS-DYNA 해석을 순차적으로 수행하는 Batch file을 작성하였다. 해당 배치파일은 Python 및 DOS 기반 명령어를 연동하여 구성하였으며, 결과 추출도 동일한 방법으로 진행하였다. Fig. 6에 영향이 큰 변수 조합에 따른 변위값 상관관계 그래프를 나타내었다.

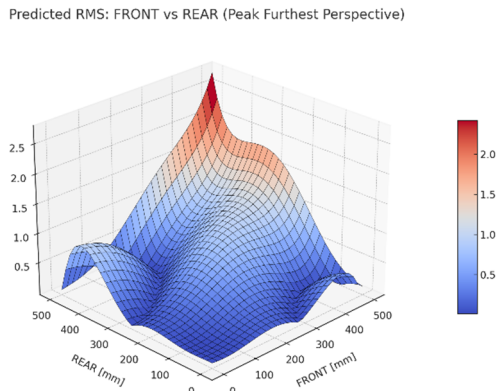


Fig. 6 RMS displacement values of variable combinations front and rear

3.5 다항회귀분석을 통한 루프랙 성능 예측 모델

루프랙 구조물의 정하중 성능을 설계 변수에 기반하여 정량적으로 예측하기 위하여, 다항회귀분석(Polynomial regression analysis) 기법을 적용하였다. 선형 회귀 모형은 변수 간 단순 관계를 가정하여 한계가 있어 2차 이상의 다항을 포함한 회귀식을 통해 보다 높은 예측 정확도를 확보하였다. 루프랙 강성에 가장 영향이 큰 두께 변수중 SIDE와 BOTTOM MAIN 그리고 BOTTOM PAD를 주요 변수로 하여 각 변수간 교호작용을 반영하여 회

Table 4 Regression coefficient

No.	Variable combination	Coefficient
1	SIDE2 * BOTTOM_MAIN * BOTTOM_PAD	0.00885
2	SIDE * BOTTOM_MAIN * BOTTOM_PAD2	0.00854
3	TOP * SIDE * BOTTOM_MAIN * BOTTOM_PAD	0.00649
4	SIDE * BOTTOM_MAIN2 * BOTTOM_PAD	-0.00635
5	TOP3 * SIDE	0.00504

귀분석을 진행하였으며, 회귀모델의 R²값은 0.9797로 매우 높은 신뢰도를 확보하였다. Table 4에 상위 5개 회귀계수를 나타내었다.

3.6 일체형 루프랙 정하중 성능 예측 프로그램

다항 회귀 분석을 통해 도출된 예측 모델을 기반으로 코드를 생성해 루프랙의 중량 및 최대 변위를 계산할 수 있는 GUI 프로그램을 개발하였다. Fig. 7은 해당 프로그램의 인터페이스 구성과 주요 계산 흐름을 보여준다. 좌측 ①은 입력정보 확인을 위한 참조도로서, 마운팅 지그 간 거리 및 단면 위치를 시각적으로 나타내었다. 하단의 중량 계산기 ②는 각 단면의 두께, 폭, 길이 및 소재 밀도를 기반으로 루프랙 전체 중량을 산출하며, 최대 변위 예측은 ③에 나타내었으며, 입력된 거리 및 단면 두께를 바탕으로 회귀모형을 통해 최대 변위를 계산한다. 본 GUI는 루프랙 설계 초기 단계에서의 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있다.

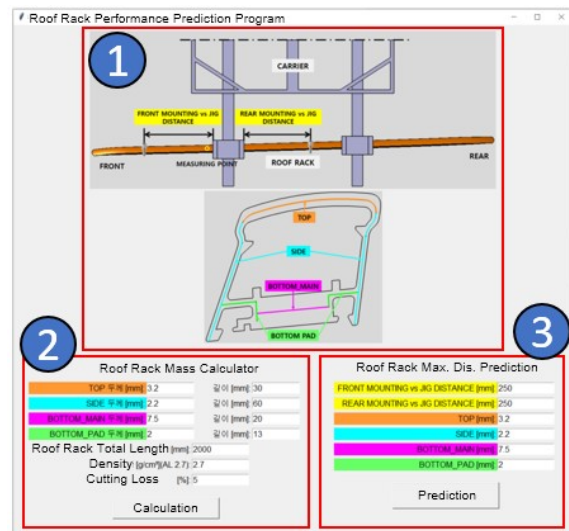


Fig. 7 Roof rack static load performance prediction program

개발된 일체형 루프랙 정하중 성능 예측 프로그램을 검증하기 위해 예측값과 실제 해석 값을 비교하여 신뢰성을 확보하였다. 해석은 2.1절과 동일한 방법으로 진행하였으며 임의의 모델링을 선정하였다. 마운팅과 지그 간 앞, 뒤거리는 250 mm로 결정하였고, 루프랙 단면의 두께는 3.2 mm, 2.2 mm, 7.5 mm 그리고 2.0 mm로 모델링하여 해석한 결과 측정위치에서 최대변위 0.746 mm가 나타났다. 예측 프로그램상의 예측결과는 0.0744 mm로 예측률 99%이상의 결과가 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 8에 유한요소해석 결과와 예측 결과 비교를 나타내었다.

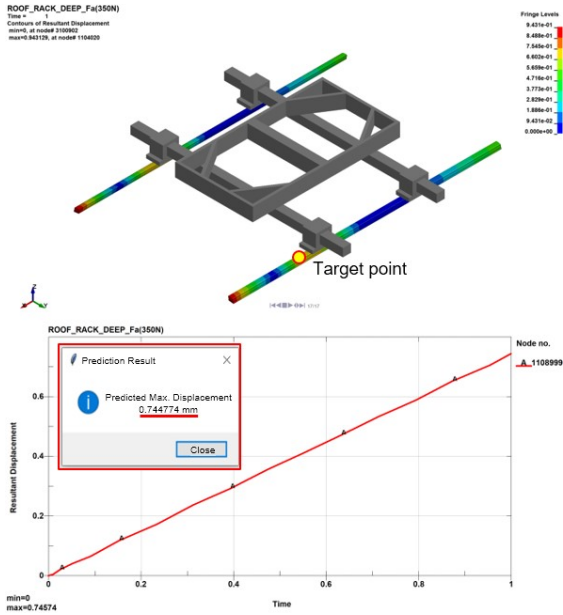


Fig. 8 Results of FE-simulation vs prediction program

4. 결론

루프랙 구조물의 정하중 성능을 정량적으로 예측하고, 설계 변수의 영향도를 분석하기 위하여 유한요소해석 기반의 실험설계 및 회귀분석 기법을 적용하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 루프랙 단면을 구성하는 주요 설계 변수를 독립변수로 정의하였으며, 실차 설계와 제조 제약을 반영하여 각 변수의 Level을 설정하였다.
- 2) 변수 간 상호작용을 고려한 해석 케이스를 구성하고, 이를 기반으로 유한요소해석을 수행하였다. 특히 반복적인 해석 프로세스의 효율성을 확보하기 위하여 두께 변경과 해석 수행을 자동화하는 배치파일을 구성함으로써 전체 해석의 일관성과 신뢰성을 확보하였다.

3) 해석 결과로부터 변위량을 종속변수로 설정하고, 다항회귀분석을 수행하여 각 설계 변수와 구조 응답 간의 수학적 관계를 모델링하였다.

4) 회귀모형을 기반으로 일체형 루프랙의 중량 계산기와 정하중 성능 예측 프로그램을 개발하여 그 결과를 바탕으로 신뢰성을 검증하였다.

본 연구를 통하여 실험설계와 해석 자동화, 통계모형을 통합하여 구조 성능을 예측하는 체계적인 접근 방식을 제시하였으며, 향후 실제 설계 및 시험 단계에서의 시간 및 비용 절감에 기여할 수 있는 정량적 기반을 제공하였다는 점에서 의의가 있다.

또한 향후 루프랙의 성능 예측을 바탕으로 최적 설계 측면에서 목표 성능과 목표 중량을 종속변수로 하여 최적의 루프랙 단면 두께를 도출하는 연구를 추가로 진행하여 연구를 이어갈 예정이다.

References

- 1) B. J. Kang, S. W. Cheon and H. S. Joe, “A Study on Prediction of Blade Cross-Sectional Stiffness Using Deep Learning Technique,” SASE Spring Conference Proceedings, pp.124-125, 2023.
- 2) J. H. Kim and J. W. Cha, “Mechanical Strength Prediction of Automotive Switch Mounting Components Using Machine Learning Methods,” KSAE Spring Conference Proceedings, p.473, 2024.
- 3) G. H. Shim, T. W. Kim and G. H. Cheon, “Study on Prediction of Roof Rack Performance Using Data Learning Finite Elements Analysis Technique,” KSAE Fall Conference Proceedings, p.1417, 2024.
- 4) G. H. Shim, C. J. Park and J. H. Park, “Evaluation of Force and Displacement According to Mounting Condition of Roof Rack for Automobile,” KSAE Fall Conference Proceedings, p.1078, 2019.