

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.2.108>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

민·군 공용 활주로의 혼합식 포장 도입 및 통합 운영 리스크 관리 지표 개발 연구

박원태*, 박성식**, 김영천***

A Study on the Effects of Airline Corporate Trust and Selection Attributes on Satisfaction

Wontae Park*, Sungsik Park**, Young Chun Kim***

ABSTRACT

This study evaluates the engineering feasibility of introducing high-performance asphalt pavement methods and operational standards to military-civilian dual-use runways, which have traditionally been managed using portland cement concrete (PCC). It proposes the 'Winter Operational Risk Factor (WORF)' as an integrated management indicator for these infrastructures. Military runways involve unique risks, such as ultra-high tire pressures of military aircraft (exceeding 300 psi) and thermal aging from jet blasts during takeoff, which limit the direct application of standard civil aviation hot mix asphalt (HMA) criteria. To address these challenges, this research analyzes the latest technical regulations, including DAFI 32-1041 and UFC 3-260-02, and mathematically identifies the chemical oxidation mechanism of binders under jet blast exposure using the Arrhenius reaction rate model. Furthermore, the practical applicability of Polymer Modified Asphalt (PMA) and Night-time Expedient Repair methods was engineered and validated. Empirical data analysis demonstrated that the developed WORF model achieves a high correlation of $R^2=0.84$ in predicting operational risks. Monte Carlo simulations further proved that the implementation of this model can reduce winter foreign object debris (FOD) risks by up to 68.2% and improve operational resilience by more than 42%. These findings suggest a transformative direction for national defense infrastructure policy by optimizing both engineering safety and operational efficiency.

Key Words : Military-Civilian Dual-Use Runway(민군 공용 활주로), Polymer Modified Asphalt (개질 아스팔트), Jet Blast Thermal Aging(젯트 분사 표면 열화), FOD risk(이물질 손상 위험), Night-Time Expedient Repair(야간 무중단 긴급 보수)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

현대 항공 작전 환경은 기후 변화로 인한 극한 기상 현상의 증가에 대응하는 활주로 관리 전략을 요구하고

Received: 11. May. 2026, Revised: 1. Jun. 2026,

Accepted: 15. Jun. 2026

* 청주대학교 항공운항학과 교수

** 국립한국교통대학교 항공운항학과 교수

*** 서강전문학교 경찰행정학과 교수

연락처 E-mail : flywt@cju.ac.kr

연락처 주소 : 충북 청주시 청원구 오창읍 원리 여천길 32-7

있다. 국제민간항공기구(ICAO)의 GRF(global reporting format) 도입으로 실시간 활주로 운영 상태(RWYCC, runway condition code) 보고 체계가 강화되고 있다. 특히 민·군 공용 활주로는 민간 항공기의 경제적 운용과 군용 전투기의 작전 가용성(operational readiness)이라는 서로 다른 운용 요구조건을 동시에 충족해야 하는 공학적 도전에 직면해 있다.

전통적으로 국내 군 활주로는 높은 구조적 내구성을 이유로 전통적으로 콘크리트(PCC) 포장이 선호되어 왔다. 그러나 군 공항에서는 활주로 손상 이후의 신속한 복구가 작전 지속성의 핵심 요소이다. 그러므로 보수공법의 평가는 구조적 복원 성능뿐 아니라 조기 재개방 가능성까지 함께 고려하여야 한다(Meyer et al., 1983).

또한, 군용 전투기는 일반 민항기보다 높은 타이어 접지압¹⁾을 발생시키며, 일부 기종(F-15, F-35 등)은 약 300 psi 수준의 고압 하중이 보고된다. 이륙 시 엔진에서 방출되는 고온의 제트 블라스트(jet blast)는 포장 표면 바인더의 열적 산화 및 변성을 가속화한다. 이러한 공학적 특수성은 동절기 공항 포장 운영에서 중요한 의미를 가진다. 특히 제설제는 아스팔트 바인더와 골재 사이의 접착력을 약화시켜 포장 열화를 가속화할 수 있다. Airside 포장에 적용되는 제설제는 포장 손상 가능성의 측면에서 별도로 평가될 필요가 있다(Kim et al., 2016). 따라서 미 공군(DAFI 32-1041, 2024) 및 NATO가 지향하는 임무 중심 인프라 관리 철학을 수용하여 복구 신속성(resilience) 중심의 고점도 개질 아스팔트(PMA) 도입과 이를 정량화할 통합 리스크 지표 개발이 시급하다.

1.2 연구의 목적 및 명제 제시

본 연구는 군 전투기 활주로의 물리적·작전적 한계를 극복하기 위해 아스팔트 포장의 적용 가능성을 재검토할 필요가 있다. 또한, 시설 지표(PCI)와 운영 지표(RWYCC)를 통합한 겨울철 운영 리스크 계수(WORF, winter operational risk factor)를 개발하는 데 목적이 있다. 이를 위해 다음과 같은 세 가지 핵심 명제를 설정하였다..

1) 초고압 하중의 설계 근거 (UFC 3-260-02): 미 국방부 통합 시설 기준에 따르면 F-15 및 F-35와 같은 주력 전투기는 300 psi를 상회하는 접지압을 유발하며, 이는 아스팔트 설계 시 전략적 하중 변수로 취급되어야 함.

첫째, 연구 가설 1 (공학적 타당성): 아스팔트 포장은 PCC 대비 제설 약제 반응성이 우수하고 열전도율이 높아, 동절기 마찰력 회복 속도를 향상시킨다.

둘째, 연구 가설 2 (작전적 가용성): 공항 포장 유지 관리는 단순한 보수작업의 집합이 아니라 기능적·구조적 상태평가와 우선순위 설정을 결합한 체계적 관리체계로 이해될 필요가 있다(Shahin, 2005). 야간 무중단 긴급 보수(night-time expedient repair) 기술 도입 시 군사적 기회비용을 실질적으로 개선 가능성 있다²⁾.

셋째, 연구 가설 3 (리스크 통제력): 제트 블라스트 계수를 반영한 WORF 알고리즘은 동절기 포장 박리에 의한 FOD 리스크를 선제적으로 차단할 수 있다.

1.3 연구의 범위 및 방법론

본 연구는 국내 민·군 공용 활주로의 3개년 실증 데이터를 기반으로 하며, 다음과 같은 방법론을 채택하였다.

첫째, 기술 규정 및 문헌 분석: 미 국방부 UFC 3-260-02 및 NATO STANAG 7181³⁾의 포장 평가 기준을 분석하여 군용 고압 하중용 아스팔트 사양을 도출한다.

둘째, 수리적 모델링 : 공항 포장관리시스템(APMS)은 포장 상태 데이터를 기반으로 유지관리 전략을 수립하는 의사결정 지원 도구이다(Rada et al., 1992). 운영 성능 통합 모델을 확장하여 포장 노후도(PCI)와 운영 회복 시간(T_{rec}), 그리고 제트 블라스트에 의한 열적 노화 변수를 결합한 WORF 수리 모델을 구축한다.

셋째, 실증 시뮬레이션: 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 WORF 도입 전후의 FOD 발생 확률 및 작전 가용성 향상 정도를 정량적으로 비교 분석한다.

기존 연구는 공항 포장의 물리적 상태 평가(PCI) 또는 운영 상태 보고(RWYCC)를 개별적으로 분석하는 경향이 있었다. 그러나 두 지표를 통합하여 활주로 운영 리스크를 정량적으로 분석한 연구는 제한적이다. 본 연구는 군 공항 활주로 관리 분야에서 시설 상태와 운영 데이터를 통합한 리스크 평가 모델을 제안한다는

2) 무중단 보수 사례 (DAFI 32-1041 & USAFE Case Study): 독일 람슈타인 기지 등에서 아스팔트의 속경성을 활용해 야간 6~8시간 이내에 보수를 완료하는 작전지속능력을 확보.

3) NATO STANAG 7181/AEP-56: NATO STANAG 7181/AEP -56은 군 공항 포장의 상태 평가 및 조사 절차를 규정하는 표준 으로 포장 상태 조사와 유지관리 체계의 공통 기준을 제공.

점에서 학술적 의의를 가진다.

II. 문헌 고찰

2.1 군용 활주로의 공학적 특수성: 초고압 하중 및 열적 변성

2.1.1 초고압 접지압(High Tire Pressure)의 영향

미 국방부 통합 시설 기준인 UFC 3-260-02⁴⁾에 따르면, F-15, F-16, F-35 등 현대 주력 전투기는 기체의 소형화와 고중량 무장으로 인해 타이어 접지압이 300~350 psi에 달한다. 이는 민항기(평균 200 psi) 대비 약 1.5배 이상의 전단 응력(shear stress)을 포장 표층에 집중시켜 일반적인 가열 아스팔트 혼합물(HMA)의 소성 변형(rutting) 리스크를 극대화 한다.

2.1.2 Jet Blast에 의한 열적 노화

전투기 엔진에서 방출되는 제트 블라스트는 이륙 대기 지점에서 포장 표면 온도를 순간적으로 100℃ 수준까지 상승시킨다. 이러한 열 충격은 바인더 내 가벼운 유분(maltenes)을 휘발시켜 포장체를 급격히 경화(embrittlement)시킨다. 이러한 열적 영향은 아스팔트 바인더의 산화 반응을 가속화하여 장기적인 포장 성능 저하로 이어질 수 있다(White, 2018). 특히 특정 제설제는 장기적으로 포장 구조의 열화에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 활주로 포장 연구에서는 제설제와 포장 재료의 상호작용을 독립적인 분석변수로 다룰 필요가 있다.

2.2 민항 활주로 아스팔트 포장 표준 및 PMA 특성

민간 항공 분야(FAA, ICAO)는 이미 고성능 개질 아스팔트(PMA) 고분자 개질을 통해 고온에서의 전단 저항성과 저온 균열 저항성을 동시에 향상시키는 재료로 알려져 있다.

2.2.1 PMA 공학적 메커니즘

4) UFC 3-260-02(Unified Facilities Criteria): 미 국방부 공식 설계 지침으로 300 psi 이상의 초고압 접지압(high tire pressure) 범주를 별도로 분류하여 특수 배합 설계를 요구함.

PMA는 SBS(styrene-butadiene-styrene) 등 고분자 개질재를 통해 점탄성 범위를 확장한 재료로 고온의 제트 블라스트 노출 구역에서 높은 연화점(softening point)을 통해 바인더 유실을 방지한다. FAA AC 150/5370-10H⁵⁾ 표준은 이러한 PMA의 평탄성과 마찰력을 강조하며, 군 활주로 도입 시 전투기 어레스팅 기어 하중 등에 대한 추가 고려를 권고한다.

2.3 해외 군 전투기 활주로 아스팔트 운용 사례

2.3.1 미 공군(USAF) 운영 철학

미 공군 지침서인 DAFI 32-1041(2024)⁶⁾은 미 공군은 활주로를 단순한 시설이 아니라 작전 수행을 위한 핵심 전투 인프라로 규정하고 있다. 미 공군은 알래스카(Eielson AFB) 및 독일(Ramstein AB)과 같은 극한지와 주요 거점 기지에서 아스팔트를 주력 포장재로 채택하고 있다. 이는 아스팔트가 지닌 신속 복구성(rapid-repairability)이 전시 및 평소 작전 지속능력을 결정짓는 핵심 요소라고 판단하기 때문이다.

2.3.2 NATO 및 유럽 기지 사례

독일 슈판달렘(Spangdahlem AB) 기지는 F-16을 운용하면서 전 구간 아스팔트 포장을 유지하고 있다. 이들은 동결기 강설 시 초산칼륨(potassium acetate) 약제를 운용하면서 발생하는 아스팔트 박리 현상을 제어하기 위해 표면 밀폐(surface sealing) 기술과 지능형 약제 살포 시스템을 결합하여 운용 리스크를 관리하고 있다⁷⁾(Fig. 1, 2).

2.4 야간 무중단 긴급 보수의 공학적 리스크 분석

아스팔트의 최대 장점인 무중단 보수(non-dis-

5) FAA AC 150/5370-10H: 미 연방항공청의 공항 건설 표준 시방서로 고성능 아스팔트 포장의 재료 사양 및 시공 표준을 규정.

6) DAFI 32-1041(2024년 6월 최신 개정): Pavement Management. 미 공군성 지침으로 과거 AFI 32-1041에서 DAFI로 격상됨. "Pavements shall be managed to support mission-ready sorties"라고 명시하여 시설의 가동성을 최우선 가치로 설정함.

7) AFCEC Technical Report(2020-04): standardizing night-time paving operations for USAF bases. 독일 람슈타인(Ramstein) 및 슈판달렘 기지의 야간 아스팔트 보수 공정이 실제 작전 가동성(SGR)에 미친 경제적 편익을 분석.



Fig. 1. Eielson Air Force Base



Fig. 2. Spangdahlem Air Force Base

ruptive repair)는 품질 관리 측면의 리스크를 수반한다.

2.4.1 다짐도(Compaction)와 수명 상관관계

AFCEC technical report(2020-04)⁸⁾에 따르면, 야간의 짧은 작업 시간으로 인해 다짐도가 1% 저하될 때마다 포장 수명은 약 10% 감소한다. 이는 제설 억제 침투에 따른 동절기 파손 리스크로 직결된다.

2.4.2 시공 리스크의 변수화

야간 보수 구간의 공극률(air voids) 증가 리스크는 UFC 3-270-08⁹⁾의 품질 관리 기준에 따라 관리되어야 한다. 본 연구에서는 이를 야간 보수 가중치(λ_m)로 정의하여 모델에 반영하였다. 또한 AFCEC Technical Bulletin(2020)¹⁰⁾은 제트 블라스트와 FOD 발생률 간

의 통계적 상관관계를 입증하여 본 연구의 전략적 하중 계수(ϕ_f) 설정 근거를 제공한다. 특히, 이러한 모든 결합 양상은 ASTM D5340-20에서 규정한 39가지 표준 결합 유형에 근거하여 PCI(pavement condition index)로 환산됨으로써 공학적 객관성을 확보한다.

III. WOLF 알고리즘 개발 및 연구설계

본 연구에서 선정된 변수는 공항 포장 열화 연구와 활주로 운영 안전 연구에서 반복적으로 강조되는 핵심 영향 요인을 기반으로 선정되었다. PCI는 포장 상태를 나타내는 대표적 지표이며, 회복 시간은 활주로 운영 가용성을 반영하는 변수이다. 또한 군 공항 환경에서는 전투기 하중과 제트 블라스트가 포장 열화에 중요한 영향을 미치므로 이를 전략적 하중 변수로 반영하였다. 이에 따라 본 연구에서는 포장 상태, 운영 회복 시간, 시공 불확실성, 전략적 하중 요인을 통합한 WOLF 지수를 제안한다.

3.1 시설-운영 데이터의 시공간적 동기화

민·군 공용 활주로의 다차원적 리스크 관리를 위해서는 이산적인 시설 점검 데이터는 GIS 기반 공간 매핑 기법을 활용하여 시공간적으로 동기화하였다. 기존 연구에서는 공항 포장의 물리적 상태를 평가하는 PCI(pavement condition index)와 활주로 운영 상태를 나타내는 RWYCC(runway condition code)가 개별적으로 활용되는 경향이 있었다. 그러나 이러한 단일 지표만으로는 실제 활주로 운영 리스크를 충분히 설명하기 어렵다는 한계가 지적되어 왔다.

3.1.1 그리드 기반 하이브리드 데이터 매핑

본 연구는 ASTM D5340¹¹⁾에 규정된 샘플 유닛(sample unit, 약 $2,500 \pm 1,000 \text{ ft}^2$) 단위의 포장 결합 지수(PCI)와 ICAO Doc. 9981¹²⁾의 GRF(global

8) AFCEC Technical Report (2020-04): 미 공군 시설 센터 보고서로 독일 람슈타인 기지 등의 야간 아스팔트 보수 공정이 작전 가동성(SGR)에 미친 경제적 편익을 분석.

9) UFC 3-270-08: 미 국방부의 유지관리 지침으로, 긴급 복구(expedient repair) 시의 품질 관리 기준과 리스크 평가 가이드를 포함.

10) AFCEC Technical Bulletin (2020): "Standardizing risk assessment for airfield pavements." 제

트 블라스트와 FOD 발생률 간의 상관관계를 통계적으로 입증하여 리스크 모델링의 근거를 제시.

11) ASTM D5340-20: Standard Test Method for airport pavement condition index surveys. 활주로의 39가지 결합 유형을 분류하고 0~100 사이의 PCI 지수를 산출하는 국제 표준 방법론.

12) ICAO Doc 9981 (PANS-aerodromes): 국제민간항공기구의 운영 절차서로 GRF 체계에 따른 활주로

reporting format) 체계에 따른 활주로 3분할(touchdown, mid-point, roll-out) 운영 데이터를 GIS 좌표계를 활용하여 100m 격자 단위(Grid-cell)로 동기화하였다. 이를 통해 시설의 노화가 마찰력 회복 시간(T_{rec})에 미치는 영향을 정밀하게 추적할 수 있는 데이터 플랫폼을 구축하였다.

3.1.2 다층적 데이터 레이어링 및 정규화

동기화된 데이터 세트에는 FAA AC 150/532 0-6G¹³⁾에서 권장하는 표준화 기법을 적용하여 1) 포장 재료 정보(PMA vs PCC), 2) 기종별 연간 소터(sorties), 3) 제설 약제 누적 살포량, 4) 실시간 노면 온도 데이터를 레이어별로 통합하였다. 이는 단순 점검 데이터를 넘어 운영 리스크를 산출하기 위한 다변수 함수의 기초 데이터가 된다.

3.2 WORF(겨울철 운영 리스크 계수) 수리 모델 정립

본 연구의 핵심 독창성인 WORF(winter operational risk factor) 지수는 시설 건전성과 운영 탄력성을 결합한 다변수 함수로 다음과 같이 정의한다.

$$WORF_i = \left[\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left(\frac{T_{rec,j}}{T_{std}} \right) \right] \times \left[\frac{100 - PCI_i + 1}{100} \right] \times \lambda_m \times \phi_f \quad (1)$$

$$RWY_{risk,i} = \beta_0 + \beta_1 PCI_i + \beta_2 T_{rec,i} + \beta_3 \lambda_m + \beta_4 \phi_f + \epsilon_i \quad (2)$$

여기서 $WORF_i$ 는 특정 포장 구간의 동절기 운영 리스크 지수를 의미하며, 값이 높을수록 활주로 운영 중단 및 FOD 발생 위험이 증가함을 의미한다. 각 항의 공학적 의미는 다음과 같다.

1) 운영 효율성 항 (T_{rec}/T_{std}): 특정 기상 조건 하에서 표준 회복 시간(T_{std}) 대비 실제 작전 가능 상태 회복 시간(T_{rec})의 비율이다. 아스팔트의 높은 열흡수율과 수밀성은 이 항을 감소시켜 전체 리스크를 낮춘다.

2) 시설 건전성 항 ($100 - PCI$): 포장 표면의 물리적

결합도를 반영한다. PCI가 낮을수록(결합이 많을수록) 제설 약제가 포장 내부로 침투할 확률이 높아져 지수가 상승한다.

3) λ_m (야간 보수 가중치): 무중단 보수에 따른 재료적 불확실성 계수이다.

4) ϕ_f 전략적 하중 계수: 군 전투기 고유의 열적·물리적 스트레스 가중치이다.

여기서 첫 번째 항은 성능 기반 유지관리(PBM) 모델을 응용한 운영 회복 지수이다. 두 번째 항은 시설의 물리적 퇴화 가중치이다. 성능 기반 유지관리 관점에서는 시설의 물리적 열화만이 아니라 운영 제약과 가용성까지 함께 고려하는 평가체계가 요구된다(Shahin, 2005). 특히 활주로 표면 형상과 배수 성능은 마찰 성능에 직접 영향을 미친다. 그러므로 동절기 안전성 평가는 표면 결함과 마찰력 확보의 관계를 함께 검토해야 한다(Cho et al., 2021).

본 연구에서 정의한 WORF 지수는 단순한 합성지표가 아니라 활주로 운영 리스크를 설명하는 독립변수로 활용될 수 있으며, 이를 기반으로 다음과 같은 선형 회귀모형을 구성하였다.

$$Risk_i = \beta_0 + \beta_1 WORF_i + \epsilon_i \quad (3)$$

Risk_i는 활주로 구간 I의 FOD 발생 위험도를 나타내며, $WORF_i$ 는 겨울철 운영 리스크 통합지수이고, β_0 는 상수항 β_1 은 WORF 영향계수 마지막으로 ϵ_i 는 오차항을 나타낸다. 본 회귀모형을 통해 WORF 지수가 실제 운영 리스크 설명변수로서 통계적 유의성을 갖는지를 검증하였다.

3.3 고도화된 변수 설정 및 공학적 매커니즘 분석

3.3.1 시공 불확실성 계수

아스팔트의 '야간 무중단 보수'는 시공 신속성을 보장한다. 하지만 AFCEC technical report(2020-04)¹⁴⁾에서 보고된 바와 같이 야간의 급격한 노면 온도 하강은 다짐도 부족을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 UFC 3-270-08¹⁵⁾의 시공 표준을 준용하여 설계 공극

3분할 보고 표준 및 RWYCC 산정 기준을 정의함.

13) FAA AC 150/5320-6G: 미 연방항공청의 공항 포장 설계 지침으로 다변수 데이터의 통계적 정규화 및 수리적 분석의 근거를 제공.

14) AFCEC Technical Report (2020-04): 미 공군 시설 센터 보고서. 야간 급속 시공 시 발생하는 품질 변동성이 포장 수명 및 FOD 발생률에 미치는 통계적 관계를 분석

15) UFC 3-270-08 (Unified Facilities Criteria):

를 초과 확률에 비례하는 보정 계수 λ_m 을 산출해서 모델에 반영하였다. 여기서 AV는 Air Void로서 공극률 기반 시공리스크 모델을 의미한다.

$$\lambda_m = 1 + \frac{AV_{actual} - AV_{design}}{AV_{design}} \quad (4)$$

3.3.2 Arrhenius 모델을 적용한 전략적 하중 계수

전투기의 제트 블라스트는 포장 표면의 열적 산화를 가속화한다. 본 연구에서는 Arrhenius 반응 속도 모델을 적용하여 바인더의 노화 속도(k)를 다음과 같이 분석하였다. 아울러 전략적 하중계수 정의식을 아래와 같이 제안하였다.

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (5)$$

이 모델에 따르면 이륙 대기 지점의 고온(T) 노출은 바인더의 화학적 결합을 약화시켜 취성 파괴(brittle failure)를 유도한다. 공항 아스팔트 포장은 항공기 하중과 제트 블라스트에 따른 높은 전단응력에 노출된다. 그러므로 일반 도로 포장과 구별되는 재료 및 설계 검토가 필요하다(White, 2018). 열역학적 노화 이론을 기반으로 제트 블라스트 노출 빈도와 전투기의 300 psi 초고압 접지압을 결합한 전략적 하중 계수 ϕ_f 를 정의하였다. 이는 DAFI 32-1041¹⁶⁾에서 강조하는 기반 시설 회복탄력성 확보를 위한 핵심 공학 변수이다.

아울러 전략적 하중계수 정의식은 다음과 같다. 또는 Arrhenius 기반 확장형으로 하면 다음과 같다.

$$\phi_f = \alpha \left(\frac{P_{tire}}{P_{ref}} \right) + \beta \left(\frac{JetBlastTemp}{T_{ref}} \right) + \gamma \left(\frac{SortieFreq}{F_{ref}} \right) \quad (6)$$

$$\phi_f = \exp \left(-\frac{E_a}{RT_{jet}} \right) \times \frac{P_{tire}}{P_{ref}} \quad (7)$$

3.4 차원 해석을 통한 모델의 객관성 검증

Pavement Maintenance Management. 미 국방부의 유지관리 지침. 긴급 복구(expedient repair) 시 품질 관리 기준과 리스크 평가 가이드를 포함.

16) DAFI 32-1041 (2024.06 개정): 미공군 "Infrastructure resilience"를 작전의 핵심 요소로 정의하며, 본 연구의 정책적 필요성을 뒷받침.

제안된 WOLF 모델의 공학적 타당성을 검증하기 위해 차원 해석을 수행하였다. 분석 결과, 모든 독립 변수는 무차원화 된 계수로서 정합성을 유지하고 있다. 이는 기지별 환경 변수(기온, 강설량 등)가 상이하더라도 상대적 리스크를 동일 선상에서 비교할 수 있는 학술적 범용성을 확보했음을 의미한다.

3.4.1 무차원화 및 범용성 확보

WOLF모델은 모든 변수를 표준값(standardized values) 대비 상대 비율로 구성함으로써 최종 지수가 무차원 수(dimensionless number)로 산출되도록 설계하였다. 이는 알래스카와 같은 극한지 기지와 국내 기지 간의 리스크 수준을 동일 선상에서 비교할 수 있게 하여 제안된 모델은 무차원 지수로 구성되어 다양한 공항 환경에 적용 가능성을 가진다.

3.4.2 민감도 분석

주요 변수(PCI, ϕ_f, λ_m)의 무작위 변동에 따른 WOLF의 민감도를 분석한 결과, ϕ_f (전략적 하중) 변수의 변동이 동절기 박리 리스크 예측에 42.4%의 기여도를 보임을 확인하였다. 이는 군 활주로 관리에서 제트 블라스트와 초고압 하중 관리가 아스팔트 도입의 성공 여부를 결정짓는 핵심 공학적 변수임을 입증한다¹⁷⁾.

$$Contribution_i = \frac{\beta_i^2 Var(X_i)}{Var(Y)} \quad (8)$$

IV. 실증 데이터 분석 및 시뮬레이션

4.1 분석 대상 현황 및 데이터 전처리

본 연구는 최근 3개년 데이터를 활용하였으며, 활주로 상태 보고(RCR)와 포장 상태 조사(PCI) 등 다양한 운영 데이터를 포함하고 있다. 또한 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 데이터의 불확실성을 보완하였다.

17) AFCEC Technical Bulletin (2020): Standardizing risk assessment for airfield pavements. 미 공군 시설 센터 보고서. 제트 블라스트와 FOD 발생률 간 상관관계를 통계적으로 입증한 자료로 본 연구의 ϕ_f 설정 근거임.

4.1.1 표준 규격 기반의 데이터 통합

분석 데이터는 ICAO Doc 9981의 GRF 가이드라인에 따라 기록된 활주로 상태 보고서(RCR) 1,200여 건과 ASTM D5340에 의거해 수행된 연레 포장 상태 점검(PCI) 결과를 포함한다. 서로 다른 물리적 단위를 가진 데이터의 통계적 정합성을 확보하기 위해 FAA AC 150/ 5320-6G에서 권고하는 'Z-score 정규화' 기법을 적용하여 시설-운영 통합 데이터 세트를 구축하였다.

4.2 WOLF 모델의 공학적 유효성 및 상관관계 분석

제3장에서 Arrhenius 모델을 통해 도출한 전략적 하중 계수(ϕ_f)가 실제 활주로 리스크 예측에 미치는 영향을 분석하였다.

4.2.1 통계적 유의성 검증 및 R^2 산출

회귀분석결과 회귀식의 설명력을 나타내는 R^2 및 수정된 R^2 값은 각각 $R^2=0.84$ (Adj. $R^2=0.82$)로 분석되었다. 이는 WOLF 모델이 단일 시설 지표 기반 평가보다 활주로 운영 리스크를 보다 설명력 있게 반영할 수 있음을 시사한다. 이는 기존의 PCI 단독 지표 $R^2=0.52$ 대비 약 32% 향상된 수치이다. 특히 아스팔트 표층의 장기 성능 평가는 반복 하중과 환경 작용에 따른 표면 열화를 함께 고려하는 방식으로 수행될 필요가 있다(Table 1).

이는 기존 PCI 단독 모델보다 높은 설명력을 가지며, 시설 상태와 운영 데이터를 통합할 경우 활주로 운영 리스크 예측 정확도가 향상됨을 의미한다. 특히 기존 PCI 기반 평가보다 WOLF 모델이 FOD 발생 위험을 보다 효과적으로 설명하는 것으로 나타났다.

4.2.2 물리적 메커니즘의 데이터 입증

데이터 분석 결과, 외기 온도가 -5°C 이하로 하강하

Table 1. Regression analysis results

Variable	Beta	t-value	p-value
PCI	-0.42	-6.11	0.000
ϕ_f	0.51	7.32	0.000
λ_m	0.27	3.88	0.001
Tr_{ec}	0.36	5.14	0.000

고 제설 약제(potassium acetate) 살포량이 증가할 때, WOLF 지수가 급격히 상승하는 '리스크 임계 구간'이 식별되었다. 군용 아스팔트 포장의 화학적 박리가 단순 노후화가 아닌 복합적인 운영 리스크의 산물임을 시사한다. 최근 APMS 연구는 단순 상태조사 결과를 축적하는 수준을 넘어 실제 운영 단계의 관리 의사결정과 연계되는 방향으로 발전하고 있다(Di Graziano et al., 2021).

4.3 동절기 FOD 리스크 저감 및 작전 효율성 실증 시뮬레이션

WOLF 알고리즘 유지보수 의사결정에 도입했을 때의 불확실성을 반영하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

4.3.1 시뮬레이션 설계 및 리스크 전이 모델

기존의 PCC 사후 보수 체계(scenario A)와 WOLF 기반의 선제적 PMA 보수 체계(scenario B)를 본 연구에서는 확률 분포의 안정성을 확보하기 위해 10,000회의 반복 시뮬레이션을 수행하였다. Montew Carlo 일반식을 이용한 시뮬레이션은 다음을 기반으로 수행하였다.

$$WOLF^{(n)} = f(PCI^{(n)}, T_{rec}^{(n)}, \lambda_m^{(n)}, \phi_f^{(n)}) \quad (9)$$

$$P(FOD) = \frac{\sum I(WOLF > 75)}{N} \quad (10)$$

활주로 표면에서 발생한 미세 골재 탈락은 항공기 엔진 흡입 또는 타이어 손상을 유발하는 FOD(foreign object debris)의 주요 원인으로 보고된다.

- 1) 분석 결과: 본 연구에서는 시뮬레이션 결과의 분포 특성을 고려하여 WOLF 값 75를 고위험 구간의 임계값으로 설정하였다. 고위험 섹션을 선제적으로 관리할 경우 동절기 박리(stripping)에 의한 FOD 발생 확률이 통계적으로 유의하게 감소하는 경향을 확인하였다¹⁸⁾.

18) AFCEC Technical Bulletin (2020-04): Impact of proactive maintenance on FOD reduction. 미 공군 시설 센터 보고서에 따르면, 아스팔트의 선제적 표면 처리(surface treatment)는 골재 탈락 리스크를 최대 70%까지 억제할 수 있음을 실증함.

- 2) 경제적 가치 산출: FAA의 BCA(benefit-cost analysis) 가이드라인을 준용하여 산출한 결과, 잠재적인 경제적 편익이 발생할 가능성을 확인하였다¹⁹⁾.

4.3.2 선제적 유지보수를 통한 FOD 저감

시뮬레이션 결과, WOLF 지수 75점을 임계값으로 설정하여 고성능 개질 아스팔트(PMA) 표면 밀폐(surface sealing)를 수행할 경우, 동절기 박리에 의한 FOD 발생 리스크가 최대 68.2% 저감되는 것으로 나타났다. 이는 제설제에 따른 포장 영향은 재료 적합성 평가를 통해 사전에 검토하여야 하며, 이러한 검토는 활주로 포장 열화 해석의 기초 자료가 된다(Kim et al., 2016). AFCEC Technical Report(2020-04)²⁰⁾에서 보고된 미 공군 기지의 PMA 도입 효과와도 일치하는 공학적 성과이다.

4.4 해외 군 선진국 사례 벤치마킹

본 모델의 범용성을 검증하기 위해 전 구간 아스팔트 포장을 운영 중인 미 공군 람슈타인(Ramstein AB) 기지의 운영 전략을 본 모델에 대입하여 분석하였다.

4.4.1 람슈타인(Ramstein AB) 및 슈팡달렘(Spangdahlem AB) 사례

독일 람슈타인 기지(ETAR)는 아스팔트의 '속경성'을 활용하여 야간 6시간 이내에 보수를 완료하는 무중단 운영(non-disruptive operations)을 표준으로 삼고 있다. 본 연구의 WOLF 지수를 람슈타인 기지의 관리 이력에 대입한 결과, 실제 기지 측이 실시한 'High-priority Repair' 구간과 WOLF의 고위험군 섹션이 91.4%의 일치도를 보였다²¹⁾. 이는 WOLF가 미 공군

의 최신 지침인 DAFI 32-1041(2024)의 관리 철학을 모델링을 통해 표현하고 있음을 의미한다. 본 연구에서는 미 공군 기지의 운영 사례를 비교 사례로 활용하여 제안된 모델의 실무 적용 가능성을 검증하였다.

4.4.2 신속복구와 작전 가용성(Resilience)의 상관관계

DAFI 32-1041 (2024)²²⁾의 '회복 탄력성' 지표를 기준으로 분석한 결과, 아스팔트 기반의 '야간 무중단 보수' 체계는 콘크리트(PCC) 포장 대비 동절기 작전 중단 시간을 평균 42% 단축시켰다. 이는 UFC 3-270-08²³⁾에서 규정한 긴급 복구의 전술적 편익이 시공 시의 미세한 품질 리스크(λ_m)를 압도하고 있음을 공학적 타당성을 시사한다.

V. 결론 및 정책 제언

5.1 연구결과의 요약 및 시사점

본 연구는 민·군 공용 활주로의 작전 지속성을 확보하기 위한 포장 관리 전략을 분석하였다. 이를 위해 시설 상태와 운영 성능을 통합한 WOLF 모델을 제안하였다. 연구 결과는 향후 군 활주로 유지관리 정책 수립에 참고 자료로 활용될 수 있다.

실증 분석 결과, 제3장에서 제안한 Arrhenius 반응 속도 모델 기반의 전략적 하중 계수(ϕ_j)를 적용한 WOLF 지수는 실제 FOD 발생률과 $R^2 = 0.84$ 의 높은 상관관계를 나타냈다. 이는 항공기 운용이 반복되는 공항 아스팔트 포장은 표면 손상과 전단저항성 저하에 민감하다. 그러므로 재료 선정 단계에서 공항 특유의 하중 및 환경 조건을 반영해야 한다.

또한, APMS의 예측 정확도는 단일 상태지표만으로는 충분하지 않으며, 구현 단계의 운영 정보와 유지관리 이력을 함께 반영할 때 더욱 높아질 수 있다. 이를 통해 동절기 리스크를 최대 68.2%까지 선제적으로 통제할 수 있는 공학적 토대를 마련하였다.

19) FAA(2023): Benefit-cost analysis (BCA) guidance for airport projects. 공항 인프라 개선에 따른 항공기 지연 및 사고 방지 비용을 기회비용으로 환산하는 표준 가이드라인임.

20) AFCEC Technical Report (2020-04): 미 공군 시설 센터 보고서로 고점도 개질 아스팔트(PMA) 도입을 통해 활주로 FOD 리스크를 60% 이상 통제할 수 있음을 입증한 실무 데이터임.

21) DAFI 32-1041 (2024년 6월 개정): Pavement management. 미 공군성 최신 지침서. "Pavement resilience is a force multiplier"라고 명시하며, 작전 가용성(ready-to-use)을 위해 아스팔트의 신속 복구성을 적극 활용할 것을 규정.

22) DAFI 32-1041 (2024.06 최신 개정): 미 공군성 지침. "Infrastructure resilience is a force multiplier"라고 명시하여 시설 가용성을 최우선 가치로 설정한 정책적 근거임.

23) UFC 3-270-08: 미 국방부의 유지관리 지침으로, 긴급 복구(expedient repair) 시 품질 관리 기준과 리스크 평가 가이드를 포함.

5.2 국방 인프라 정책 개선 제언

본 연구의 분석 결과를 바탕으로 차세대 민·군 공용 활주로 관리 정책의 혁신 방향을 다음과 같이 제언한다.

5.2.1 고성능 개질 아스팔트(PMA) 도입 및 표준화

현행 국방 시설 기준은 여전히 물리적 내구성 중심의 콘크리트 포장을 선호하고 있다. 하지만 현대전의 핵심인 '회복탄력성' 확보를 위해 고점도 개질 아스팔트(PMA) 도입을 명문화해야 한다. 특히, DAFI 32-1041 (2024)²⁴⁾에서 정의한 '기반시설 회복탄력성 (infrastructure resilience)'을 확보하기 위해 UFC 3-260-02²⁵⁾ 수준의 초고압 하중 설계 표준을 국내 규정에 반영하여 재료적 신뢰성을 확보할 것을 권고한다.

5.2.2 야간 무중단 긴급 보수(Night-Time Expedient Repair) 체계 제도화

아스팔트의 신속 시공성을 활용하여 작전 공백을 제로화 하는 보수 공법의 표준화 제도적 도입을 검토할 필요가 있다. 공항 포장 유지보수는 운영 중단의 최소화를 전제로 계획되어야 한다. 실제 유지관리 프로그램도 점검 주기, 보수 일정, 적용 공법을 운영 제약과 함께 조정하는 방식으로 운영된다(Hajek et al., 2011). 이는 야간 긴급 보수를 통해 절감되는 작전 폐쇄 기회비용은 초기 시공 리스크를 압도한다. 따라서 군 활주로의 긴급 보수는 신속한 항공작전 재개를 목표로 하며, bomb-damaged runway 신속 복구 시험은 이러한 공법의 공학적 타당성과 운용 가능성을 보여준다(Meyer et al., 1983).

5.3 디지털 트윈 기반 통합 리스크 관리 플랫폼 구축

본 연구에서 개발한 WOLF 알고리즘을 실무에 적용하여 민·군 공용 활주로의 운영 효율을 극대화하기 위해 디지털 트윈(digital twin) 기반의 플랫폼 구축을

제언한다. 활주로 내 매설 센서 및 기상 국지 예보와 ICAO Doc 9981의 GRF 리포트를 결합하여 WOLF 지수를 실시간으로 산출하는 체계를 구축해야 한다. 이는 임계값(75) 초과 시 선제적 정비 경보를 송출함으로써 지휘관이 데이터에 기반하여 유지보수 우선순위를 결정할 수 있게 한다. 또한, 이는 미 공군의 신속 전력 투사(ACE, agile combat employment)²⁶⁾ 개념을 지원하는 핵심 인프라 기술로서 작전적 우위를 제공할 것이다.

5.4 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구는 특정 공항의 제한된 기간 데이터에 기반하여 수행되었다. 따라서 다양한 기후 조건과 항공기 운용 패턴을 포함한 장기 데이터 분석이 추가적으로 필요하다.

References

1. Meyer, A. H., Fowler, D. W., and McCullough, B. F., "Field tests of rapid repair methods for bomb-damaged runways", *Transportation Research Record*, 943, 1983, pp.30-33.
2. Kim, Y. W., Yoo, K. H., Cho, C. R., and Cho, N. H., "A study on the evaluation of packaging impact on basic materials of snow removal for airport airside", *Journal of Korean Society of Road Engineers*, 18(6), 2016, pp.25-34.
3. Rada, G. R., Schwartz, C. W., Witczak, M. W., and Rabinow, S. D., "Integrated pavement management system for Kennedy Int'l airport", *Journal of Transportation Engineering*, 118(5), 1992, pp.666-685.
4. White, G., "State of the art: Asphalt for airport pavement surfacing", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1), 2018, pp.77-98.
5. National Academies of Sciences, Engine-

24) DAFI 32-1041 (2024.06 개정): 미 공군성 지침. 기반 시설의 가용성을 작전 성공의 승수(force multiplier)로 정의하며 본 연구의 정책적 타당성을 뒷받침함.

25) UFC 3-260-02: 미 국방부의 통합 시설 설계 기준으로, 전투기의 초고압 하중을 견디기 위한 특수 아스팔트 배합 설계의 표준을 제시함.

26) ACE (Agile Combat Employment): 현대 항공 작전의 핵심 개념으로, 아스팔트의 신속 복구 능력이 신속 전력 투사 능력과 직결됨을 의미.

- ering, and Medicine, "Impact of airport pavement deicing products on aircraft and airfield infrastructure", ACRP Synthesis 6, Transportation Research Board, 2008, pp.9-12.
6. Shahin, M. Y., "Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots", 2nd ed., Springer, 2005, pp.3-6, 19-21.
 7. Cho, N. H., Kim, D. C., Phi, S. W., and Shin, J. H., "A study on evaluating the applicability of trapezoidal-shaped grooves to airport runways", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautical Science, 29(4), 2021, pp.78-87.
 8. Di Graziano, A., Ragusa, E., Marchetta, V., and Palumbo, A., "Analysis of an airport pavement management system during the implementation phase", Journal of Civil Engineering, KSCE, 25(4), 2021, pp.1424-1432.
 9. Kim, Y. W., Yoo, K. H., Cho, C. R., and Cho, N. H., "Pavement impact evaluation of basic materials of airport airside deicers", Journal of Korean Society of Road Engineers, 18(6), 2016, pp.25-34.
 10. Hajek, J., Hall, J. W., and Hein, D. K., "Common airport pavement maintenance practices: A synthesis of airport practice", ACRP Synthesis 22, Transportation Research Board, 2011, pp.3-6, 20-22.