

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.120>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

제·방빙 패드 배정 및 지상조업 운영방식에 따른 항공기 제·방빙 효율성 분석

조용수*, 안재형**, 백호중***, 이주환****

Analysis of Aircraft De-icing/Anti-icing Efficiency Considering Pad Allocation and Ground Handling Operations

Yongsoo Cho*, Jaehyung Ahn**, Hojong Baik***, Juhwan Lee****

ABSTRACT

This study analyzes aircraft de-icing/anti-icing operation strategies for reducing departure delays at Incheon International Airport. Aircraft de-icing/anti-icing is an essential winter operation for flight safety, but it can also become a major bottleneck in departure operations when demand is concentrated under snowfall conditions. Using departure flight schedules from 07:00 to 21:59 on January 21, 2025, this study evaluates alternative operational scenarios involving De-icing/Anti-icing Pad allocation, truck deployment, and integrated ground-handler operation. The analysis considers separate KAS-AAP operations under different AAP pad availability conditions, integrated KAS-AAP operation, and two-truck and four-truck deployment strategies under different snowfall conditions. The results indicate that De-icing/Anti-icing Delay is affected not only by the number of available trucks but also by pad allocation, truck utilization, snowfall intensity, and demand concentration by time period. In particular, flexible pad allocation and condition-based truck deployment are found to be important for improving operational efficiency. Integrated operation between ground handlers may also support peak-hour delay mitigation through more flexible use of de-icing/anti-icing resources. These findings provide practical implications for improving winter departure operations and supporting more resilient de-icing/anti-icing management at major hub airports.

Key Words : Aircraft De-icing/Anti-icing(항공기 제·방빙), Departure Delay(출발 지연), De-icing/Anti-icing Pad Allocation(제·방빙장 배정), Ground Handling(지상조업), Integrated Operations(통합 운영)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

Received: 5. Jul. 2026, Revised: 19. Aug. 2026,

Accepted: 19. Aug. 2026

* 인천국제공항공사, 운항본부장

** 인천국제공항공사, 운항계획팀 과장

*** 한국항공대학교, 항공교통물류학부 교수

**** 한국항공대학교, 항공교통물류학부 박사과정

연락처 E-mail : kokomoty97@gmail.com

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학교로 76-6

항공교통 수요가 회복되고 대형 허브공항의 운항 밀도가 증가함에 따라 항공기 운항지연과 공항 혼잡은 주요 운영관리 문제로 부각되고 있다. 특히 동절기 강설 상황에서는 활주로, 유도로, 계류장 제설뿐만 아니라 항공기 표면에 부착된 눈, 서리, 얼음 등을 제거하기 위한 항공기 제·방빙 작업이 필수적으로 수행된다. 제·방빙은 항공기 안전운항을 확보하기 위한 절차이지만, 동시에 출발 항공기의 지상이동 흐름과 이륙 순서에 영향을 미치는 주요 병목요인으로 작용할 수 있다. 항공기 표면에 눈이나 얼음 부착될 경우 항공기의

양력 생성이 저하되고 항력이 증가하며, 조종면의 정상적인 작동에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 항공기 제·방빙은 단순한 지상조업 서비스가 아니라 항공안전 확보와 공항 운영 안정성 유지를 위한 핵심 절차로 이해되어야 한다. 국제기준에서는 제빙을 항공기 중요 표면에 부착된 서리, 얼음, 눈 등을 제거하여 안전한 비행 상태를 확보하는 절차로 정의하며, 방빙은 일정 시간 동안 결빙의 재형성을 방지하기 위한 절차로 설명한다. 또한 모든 항공기는 오염물질이 없는 깨끗한 상태에서 비행하도록 설계되며, 날개 표면의 결빙은 양력 감소와 항력 증가를 유발할 수 있다(ICA0, 2018; Korea Civil Aviation Association, 2025).

인천국제공항은 국가 관문공항이자 동북아 항공물류 허브로서 대규모 국제선 출발 수요를 처리하고 있다. 일반적인 지방공항과 달리 인천국제공항은 강설 상황에서도 가능한 한 안정적인 운항을 유지해야 하며, 이를 위해 제설, 제·방빙, 관제, 지상조업, 항공사 운영이 유기적으로 연계되어야 한다. 그러나 인천국제공항의 운영구조에서 활주로, 유도로, 계류장 제설은 공항운영자가 직접 관리하는 반면, 항공기 제·방빙은 항공사와 계약한 지상조업사가 수행하는 방식으로 운영되고 있다(Incheon International Airport Corporation, 2024).

인천국제공항의 항공기 제·방빙은 특정 조업사 또는 항공동맹에 한정되지 않고 복수의 지상조업사가 항공사별 계약관계에 따라 수행하고 있다. KAS, AAP, SHP, SPI 및 JAS가 총 116개 항공사의 조업계약을 담당하고 있으며, 조업사별 계약 항공사는 KAS 34개사, AAP 21개사, SHP 30개사, SPI 30개사 및 JAS 1개사로 구성된다. 또한 항공동맹별 계약현황은 SkyTeam 11개사, Star Alliance 18개사, Oneworld 10개사 및 무소속 77개사로, 특정 항공동맹과 특정 조업사가 일대일로 대응하는 구조는 아니다. 특히 Oneworld 소속 항공사의 MAIN 조업계약은 KAS 3개사, SHP 3개사 및 SPI 4개사로 분산되어 있다(Table 1 참조).

따라서 제·방빙 작업 자체는 민간 지상조업사의 업무영역에 해당하지만, 제·방빙 지연의 결과는 공항 전체의 출발 처리능력, 계류장 혼잡, 여객 대기시간, 항공사 운항계획에 직접적인 영향을 미친다.

대설 상황에서의 대량 지연 및 혼잡은 폭설 대비 조업사 장비 및 인력 부족, 기상예보의 불확실성, 장시간 지속된 강설과 습설·강풍, 장비 1대당 용액 처리능력 저하, 출발 교통량 조절 절차 미비 등 복합적인 요인에

Table 1. Main contract airlines by de-icing/ anti-icing ground handler

조업사	스카이팀	스타 얼라이언스	원월드	무소속	합계
KAS	9	4	3	18	34
AAP	1	6	-	14	21
SHP	-	3	3	24	30
SPI	1	5	4	20	30
JAS	-	-	-	1	1
합계	11	18	10	77	116

* 출처: 인천국제공항공사, 24.12.19 MAIN 조업 계약현황 기준.

의해 발생할 수 있다. 특히 제·방빙 수요가 특정 시간대에 집중되는 경우, 제한된 제·방빙 패드와 장비는 출발 항공편의 병목으로 작용할 수 있다(Incheon International Airport Corporation, 2024).

2025년 1월 인천국제공항의 정기여객기 지연은 7,128편으로 지연율은 43.9%였으며, 이 중 제·방빙으로 인한 출발지연은 89편으로 나타났다. 특히 제·방빙 지연 중 60분 이상 지연은 42편으로 약 47.2%를 차지하였으며, 1월 28일에는 55편의 지연이 집중되었다(Table 2 참조). 이는 강설 시 특정 시간대에 제·방빙 수요가 집중될 경우 장시간 출발지연으로 이어질 수 있음을 보여주며, 제한된 제·방빙 패드와 장비를 효율적으로 운영하기 위한 전략의 필요성을 나타낸다(Milošević et al., 2024).

본 연구의 목적은 인천국제공항 항공기 제·방빙 운

Table 2. De-icing/anti-icing-related departure delays in January 2025

구분	15~30분	30~60분	60~120분	120~180분	180분 이상	합계 (편)
01-03	1	4	-	-	-	5
01-16	4	2	2	2	2	12
01-27	3	2	1	5	2	13
01-28	10	17	20	7	1	55
01-31	2	2	-	-	-	4
합계	20	27	23	14	5	89

* 출처: 인천국제공항공사.

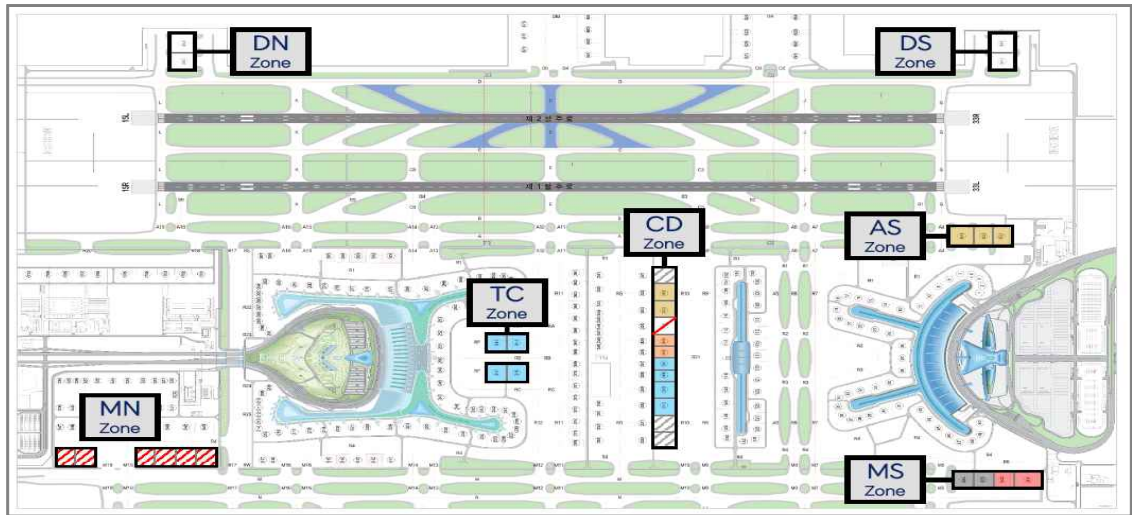


Fig. 1. De-icing/anti-icing zone layout at Incheon International Airport

영에서 발생하는 출발 지연을 완화하기 위해 주요 운영방식별 효과를 정량적으로 분석하는 데 있다. 구체적으로는 AAP(아시아나에어포트)의 가용 제·방빙 패드 수가 AS zone 4개에서 CD zone 6개로 확대되는 경우의 효과(Fig. 1 참조), 항공기 1대당 제·방빙 장비를 2대 투입하는 방식과 4대 투입하는 방식의 차이, KAS(한국공항)과 AAP의 장비를 통합 운영할 경우의 시간 대비 지연 완화 가능성을 분석한다. 이를 통해 인천국제공항 동절기 제·방빙 운영의 병목요인을 도출하고, 향후 공항운영자와 조업사가 활용할 수 있는 실무적 개선방안을 제시하고자 하였다.

1.2 연구 범위

본 연구의 시간적 범위는 2025년 1월 21일 07:00부터 21:59까지로 설정하였다. 분석에는 2025년 1월 21일의 출발 운항스케줄을 수요조건으로 적용하였으며, 해당 일자의 실제 강설상황을 재현하기보다 약한 강설과 강한 강설 조건을 시나리오로 적용하여 제·방빙 운영방식별 효과를 비교하였다. 또한, 확보된 항공편 및 제·방빙 장비 운영자료의 범위를 고려하여 KAS와 AAP를 분석대상으로 한정하였다.

공간적 범위는 인천국제공항의 주기장, 제·방빙장, 유도로 등 출발 항공기의 지상이동과 제·방빙 운영에 직접적으로 관련되는 이동지역으로 설정하였다. 본 연구에서는 항공기가 제·방빙을 요청한 이후 제·방빙장으로 이동하고, 제·방빙 조업을 수행한 뒤 제·방빙장을

이탈하기까지의 과정을 분석 범위에 포함하였다.

내용적 범위는 제·방빙 운영방식 변화에 따른 출발 지연 완화 효과를 분석하는 데 초점을 둔다. 구체적으로는 AAP의 제·방빙 패드 배정 조건 변화에 따른 효과, 2대 1편성과 4대 1편성 운영방식의 차이, KAS와 AAP의 통합 운영 가능성을 분석하였다. 다만, 본 연구는 제·방빙 조업 이후의 활주로 이륙순서 조정, 항공교통흐름관리, 항공사별 운항스케줄 회복전략 등은 직접적인 분석 범위에 포함하지 않았다.

1.3 연구 방법

본 연구는 인천국제공항의 항공기 제·방빙 운영방식에 따른 출발 지연 완화 효과를 분석하기 위해 자원배정 기반 제·방빙 운영 예측모형을 구축하였다. 모형은 항공기별 제·방빙 요청시간, 조업사별 담당 항공편, 제·방빙 장비 수, 가용 패드 조건, 강설강도별 용액 살포시간을 반영하여 제·방빙 요청부터 제·방빙장 이탈까지의 예상 소요시간을 산정한다(Bae, 2013; Yoon, 2014; Zhu et al., 2019; Alsalous and Hotle, 2024).

본 모형의 절차는 Fig. 2와 같다. 먼저 사용자는 제·방빙 시간 범위, 조업사별 구간 최소소요시간, 장비 대수, 사용 가능 제·방빙 패드, 항공사별 계약 조업사 정보를 입력한다. 이후 출발편의 출발시간이 제·방빙 시간 범위에 포함되면 해당 항공편을 제·방빙 요청 항공편으로 선정한다. 모형은 제·방빙 요청시간을 기준으로 패드 점

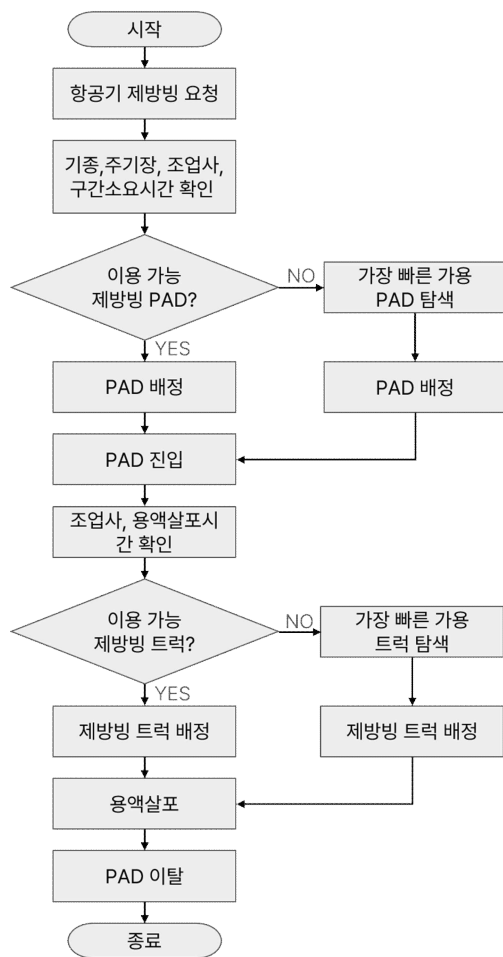


Fig. 2. Flow chart

유상태를 확인하여 즉시 이용 가능한 패드가 있으면 바로 배정하고, 없으면 가장 빠른 가용 패드를 배정한다.

패드 배정 후에는 제·방빙 트럭 점유상태를 확인한다. 즉시 이용 가능한 트럭이 있으면 바로 배정하고, 없으면 가장 빠른 가용 트럭을 배정한다. 이후 강설강도와 장비 편성 조건에 따른 용액 살포시간을 적용하여 용액 살포 시작시간, 종료시간, 제·방빙장 이탈시간을 산정한다. 작업이 완료되면 패드와 트럭의 점유상태를 업데이트하고, 이를 다음 항공편 배정에 반영한다.

따라서 본 모형은 패드와 장비의 점유상태를 시간 순서에 따라 갱신하는 순차적 스케줄링 및 지연 배정 모형이다. 이를 통해 제·방빙 예상 소요시간, 장비 가동률, 패드 점유 병목, 시간대별 혼잡도를 분석하고, 운영 시나리오별 효과를 비교하였다.

1.4 시나리오 설정

본 연구의 분석 시나리오는 제·방빙 운영방식에 따른 효과를 비교하기 위해 세 가지로 구성하였다. 첫째, KAS와 AAP를 분리 운영하고 AAP가 AS zone의 4개 패드를 사용하는 경우, 둘째, KAS와 AAP를 분리 운영하되 AAP가 CD zone의 6개 패드를 사용하는 경우, 셋째, KAS와 AAP의 장비를 통합 운영하고 AAP가 CD Zone의 6개 패드를 사용하는 경우이다.

각 시나리오에서는 항공기 1대당 제·방빙 장비를 2대 투입하는 2대 1편성과 4대 투입하는 4대 1편성을 비교하고, 약한 강설과 강한 강설 조건을 적용하였다. 이를 통해 가용 패드 수, 장비 편성방식 및 조업사 간 통합 운영이 제·방빙 운영효율에 미치는 영향을 비교하였다.

II. 본 론

2.1 항공기 제·방빙 운영의 이론적 배경

항공기 제·방빙은 제빙과 방빙을 포괄하는 개념이다. 제빙은 항공기 외부 표면에 부착된 눈, 서리, 얼음 등을 제거하는 절차이며, 방빙은 제빙 후 일정 시간 동안 항공기 표면에 결빙이 재발생하지 않도록 방지하는 절차이다. 항공기 표면의 결빙은 항공기의 공기역학적 성능을 저하시키고, 이륙 시 양력 감소 및 항력 증가를 유발할 수 있으므로 항공기 제·방빙은 안전운항을 위한 필수 절차이다(FAA, 2004)(ICAO, 2018).

제·방빙 작업은 공항 운영 측면에서도 중요한 의미를 가진다. 항공기가 제·방빙을 요청하면 주기장에서 제·방빙장으로 이동하고, 조업 대기, 용액 살포, 조업 완료 확인, 제·방빙장 이탈, 활주로 이동의 절차를 거치게 된다. 이 과정에서 제·방빙장 수가 부족하거나 장비 가동률이 낮을 경우 항공기는 제·방빙장 진입 전 또는 제·방빙장 내에서 대기하게 된다. 이러한 지연은 단순한 조업 지연을 넘어 출발순서 지연, 계류장 혼잡, 활주로 출발 처리를 저하로 이어질 수 있다.

인천국제공항은 A-CDM을 통해 항공기 이동 단계별 주요 정보를 이해관계자 간 공유하고 있으며, 목표주기장출발시간, 목표이동승인시간, 목표이륙시간 등을 활용하여 출발 흐름을 관리하고 있다. 그러나 제·방빙 조업 시간은 강설강도, 장비 수, 패드 수, 조업사별 운영방식에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 제·방빙 처리능력은 동절기 출발관리의 중요한 변수로 작용한다. 제·방빙 상

황에서는 계류장관제소가 강설예보를 접수하고, 항공사와 조업사에 상황 정보를 제공하며, 제·방빙 운영단계를 발령하여 공항 내 출발 흐름을 관리한다(Incheon International Airport Corporation, 2024).

2.2 분석 가정 및 세부 시나리오

본 연구는 2025년 1월 21일 07:00부터 21:59까지의 출발 운항스케줄을 수요조건으로 적용하였으며, 분석 대상은 총 364편으로 KAS 담당 218편과 AAP 담당 146편으로 구성하였다. 제·방빙 장비는 KAS 12대, AAP 8대로 설정하였으며, 장비 1대당 담당 항공편 수는 각각 18.16편과 18.25편으로 산정하였다(Table 3 참조).

제·방빙 운영 예측모형에는 항공기별 제·방빙 요청 시간, 조업사별 담당 항공편, 가용 패드 수, 제·방빙 장비 수, 항공기 이동시간 및 강설강도별 용액 살포시간을 적용하였다. 제·방빙장은 DN, DS, MN, MS, TC, CD, AS zone으로 구분되며, 본 연구에서는 KAS와 AAP의 운영조건과 관련된 TC, CD, AS zone을 중심으로 패드 배정조건을 설정하였다.

강설조건은 신적설 1cm 내외의 약한 강설과 15cm 내외의 강한 강설로 구분하였다. 용액 살포시간은 2대 1편성의 경우 약한 강설 11분, 강한 강설 23분을 적용하고, 4대 1편성은 각각 7분과 13분을 적용하였다(Table 4 참조). 주요 평가지표는 제·방빙 요청부터 제·방빙장 이탈까지의 평균 예상 소요시간이며, 장비 가동

Table 4. Fluid spraying time by snowfall intensity

강설 조건	2대 1편성	4대 1편성
약한 강설	11분	7분
강한 강설	23분	13분

률을 보조지표로 활용하였다(Bae, 2013; Yoon, 2014; Zhu et al., 2019; Alsalous and Hotle, 2024).

인천국제공항의 제·방빙 운영은 제·방빙장과 제·방빙 차량이라는 두 가지 핵심 자원에 의해 제약된다. 제·방빙장은 항공기 제·방빙 작업을 수행하기 위해 설치되는 전용 시설로서, 항공기 이동 및 주기공간, 제·방빙 작업구역, 폐용액 처리 등을 고려하여 계획·설계된다(FAA, 2020). 제·방빙 차량은 지상조업사가 보유·운영하는 장비로, 항공기 표면에 제·방빙 용액을 살포하는 실제 조업 능력을 결정한다. 인천공항은 강설 9cm 이상 기상 및 2030년 운항 수요에 대비하여 총 33개 제·방빙 Pad를 구축한 것으로 검토된다. 다만, 폭설 상황에서 모든 De-icing/anti-icing pad를 충분히 활용하기 위해서는 약 60대 이상의 제·방빙 장비가 필요할 수 있어, 조업사 보유 장비와 실제 필요 장비 간의 차이가 대량 지연의 원인이 될 수 있다.

본 연구의 시나리오 설정은 인천국제공항 제·방빙장의 zone별 가용 패드 수와 조업사별 패드 활용 가능성을 기반으로 구성하였다. 인천국제공항의 제·방빙장은 DN, DS, MN, MS, TC, CD, AS zone 등으로 구분되며, 각 Zone은 가용 패드 수, 활주로 및 터미널과의 연계성, 항공기 지상이동 경로, 제·방빙 폐액 수거시설, 조업사별 운영 여건에 따라 활용된다. 본 연구에서는 이 중 KAS와 AAP의 운영 조건과 관련성이 높은 TC, CD, AS zone을 중심으로 패드 배정 시나리오를 설정하였다(Fig. 1, Table 3 참조).

Fig. 1과 같이 인천국제공항의 제·방빙장은 복수의 zone으로 분산 배치되어 있으며, 각 zone에서 확보 가능한 패드 수와 항공기·장비의 이동 조건은 장비 가동률과 항공기 제·방빙 대기시간에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 AAP가 AS zone의 4개 패드를 사용하는 경우와 CD zone의 6개 패드를 사용하는 경우로 구분하여 시나리오를 설정하였다. 특히 AAP가 AS zone의 4개 패드를 사용하는 조건과 CD zone의 6개 패드를 사용하는 조건을 비교함으로써, Zone별 가용 패드 수 차이가 장비 가동률 및 제·방빙 소요시간

Table 3. Basic data and equipment conditions

구분	내용	
분석일	2025년 1월 21일	
시간대	07:00 - 21:59	
대상 항공편수	KAS	218편
	AAP	146편
합계	364편	
제·방빙 장비 대수	KAS	12대
	AAP	8대
합계	20대	
제·방빙 장비 1대당 담당 항공편수	KAS	18.16편/대
	AAP	18.25편/대
평가 지표	제·방빙 요청 - 제·방빙장 이탈 평균 예상 소요시간	

에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 강설 조건을 신적설 1 cm 내외의 약한 강설과 신적설 15 cm 내외의 강한 강설로 구분하고, 총 20대의 제·방빙 장비(KAS 12대, AAP 8대)를 기준으로 운영 효율성을 비교하였다(Table 3 참조). 또한 Table 4는 강설강도 및 장비편성별 용액 살포시간이다. 이때 2대 1편성의 용액 살포시간은 실제 관측값을 적용하였으며, 4대 1편성의 경우 제·방빙장 운영 담당자의 경험에 기반한 추정값을 적용하였다.

본 연구의 주요 평가지표는 제·방빙 요청부터 제·방빙장 이탈까지의 평균 예상 소요시간이다. 추가적으로 장비 가동률을 보조지표로 활용하였다. 장비 가동률은 조업사별 장비가 실제 용액 살포에 투입되는 시간의 비율을 의미하며, 동일한 장비 수를 보유하더라도 가용 패드 수, 항공기 진입·이탈 조건, 시간대별 수요 집중에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단순히 제·방빙 차량 대수만을 비교하지 않고, 패드 수와 장비 가동률을 함께 고려하여 운영 효율성을 분석하였다.

2.3 분석 결과

2.3.1 AAP 제·방빙 가용 패드 수 변화 효과

AAP가 AS Zone의 4개 패드를 사용할 경우와 CD Zone의 6개 패드를 사용할 경우를 비교한 결과, 가용 패드 수 확대는 제·방빙 소요시간 단축에 뚜렷한 영향

을 미치는 것으로 나타났다. 약한 강설 조건에서 AAP의 2대 1편성 기준 평균 예상 소요시간은 AS Zone 운영 시 1시간 3분이었으나, CD Zone 운영 시 43분으로 감소하였다. 이는 약 20분의 단축 효과이며, 비율로는 약 30%의 개선효과에 해당한다(Table 5 참조).

강한 강설 조건에서는 효과가 더욱 크게 나타났다. AAP가 AS zone을 사용할 경우 2대 1편성 기준 평균 예상 소요시간은 4시간 26분으로 산정되었으나, CD zone을 사용할 경우 2시간 2분으로 감소하였다. 이는 약 2시간 24분의 시간 단축 효과이며, 약 54%의 개선효과에 해당한다(Table 5 참조).

이러한 결과는 제·방빙 지연 완화를 위해 장비 수뿐만 아니라 실제 조업 가능한 가용 패드 수 확보가 매우 중요함을 보여준다. AS zone의 4개 패드는 AAP 장비 8대를 효율적으로 운용하기에 부족한 조건이며, 항공기 진입 및 이탈 과정에서 장비가 용액을 살포하지 못하고 대기하는 시간이 발생한다. 반면 CD zone의 6개 패드를 사용할 경우 가용 패드 수가 증가하여 장비가 보다 연속적으로 작업할 수 있으므로 장비 가동률이 향상된다(Fig. 3 및 Fig. 4).

2.3.2 제·방빙 장비 편성에 따른 효과

항공기 1대당 제·방빙 장비를 4대 투입하는 방식은 한 항공기에 동시에 더 많은 장비를 투입하여 용액 살포시간을 줄이는 방식이다. 따라서 직관적으로는 4대

Table 5. Comparison of estimated time from de-icing/anti-icing request to pad exit by operation type

운영조건 (패드개수)	강설 조건	2대 1편성	4대 1편성
AAP AS zone (4개)	약한 강설	1시간 3분	44분
AAP AS zone (4개)	강한 강설	4시간 26분	2시간 20분
AAP CD zone (6개)	약한 강설	43분	41분
AAP CD zone (6개)	강한 강설	2시간 2분	2시간 17분

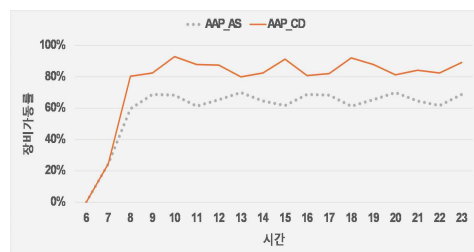
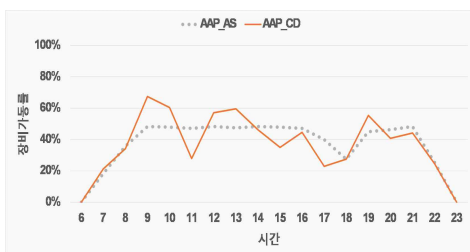


Fig. 3. Light snowfall, AAP equipment utilization Fig. 4. Heavy snowfall, AAP equipment utilization

1편성이 2대 1편성보다 항상 효율적일 것으로 예상할 수 있다. 그러나 분석 결과, 4대 1편성의 효과는 패드 수와 장비 가동률 조건에 따라 다르게 나타났다.

AAP가 AS zone의 4개 패드를 사용하는 경우, 4대 1편성은 2대 1편성보다 제·방빙 소요시간을 크게 단축하였다. 약한 강설 조건에서 AAP의 평균 예상 소요시간은 2대 1편성 기준 1시간 3분에서 4대 1편성 기준 44분으로 감소하였다. 강한 강설 조건에서는 4시간 26분에서 2시간 20분으로 감소하였다. 이는 각각 약 19분, 2시간 6분의 단축 효과이며, 패드 수가 부족한 상황에서는 항공기당 조업시간을 단축하는 것이 대기열 해소에 효과적임을 의미한다(Table 5 참조).

그러나 AAP가 CD zone의 6개 패드를 사용하는 경우에는 상반된 결과가 나타났다. 강한 강설 조건에서 2대 1편성의 평균 예상 소요시간은 2시간 2분이었으나, 4대 1편성은 2시간 17분으로 증가하였다. 이는 4대 1편성 적용 시 총 소요시간이 15분, 약 12% 증가한 결과이다. 약한 강설 조건에서도 2대 1편성과 4대 1편성의 차이는 크지 않았으며, 충분한 패드가 확보된 상황에서는 2대 1편성이 상대적으로 효율적인 운영방식으로 나타났다(Table 5 참조, Fig. 5~Fig. 8).

이는 장비 1대당 작업효율 차이로 해석할 수 있다. 약한 강설 조건에서 2대 1편성은 장비 1대가 항공기 절반 면적을 11분에 처리하는 구조인 반면, 4대 1편성은 장비 1대가 항공기 1/4 면적을 7분에 처리하는 구조로 가정된다. 즉, 4대 1편성은 항공기 1편당 용액 살포시간을 단축할 수 있으나, 동시에 투입 장비 수가 증가하여 항공기 1편당 총 장비 투입량이 증가할 수 있다. 이에 따라 충분한 패드가 확보된 조건에서는 운용 가능한 장비 편성 수가 감소하여 전체 제·방빙 처리효율이 오히려 저하될 수 있다.

따라서 4대 1편성은 모든 조건에서 적용할 수 있는 일반적 개선방안이라기보다, 패드 수가 제한되고 항공기당 점유시간 단축이 중요한 상황에서 선택적으로 적용해야 하는 운영전략으로 판단된다.

2.3.3 KAS·AAP 통합 운영 효과

KAS와 AAP를 통합 운영하는 경우, 전체 평균 소요시간의 단축 효과는 제한적인 것으로 나타났다. 이는 두 조업사의 장비 1대당 처리해야 하는 항공편 수가 거의 동일하기 때문이다. KAS는 218편을 12대의 장

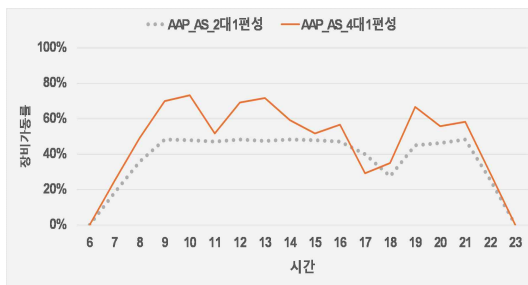


Fig. 5. Light snowfall, equipment utilization by truck configuration under (AS pad assignment)

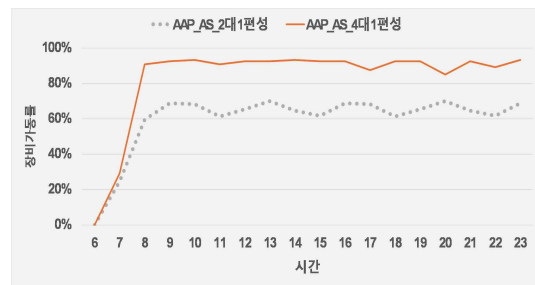


Fig. 6. Heavy snowfall, equipment utilization by truck configuration under (AS pad assignment)

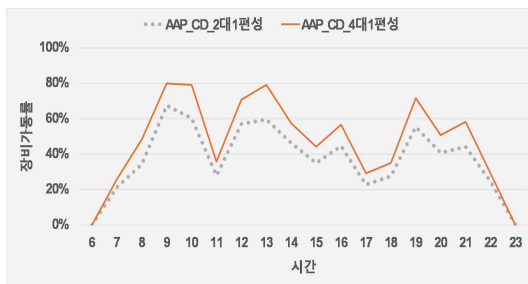


Fig. 7. Light snowfall, equipment utilization by truck configuration under (CD pad assignment)

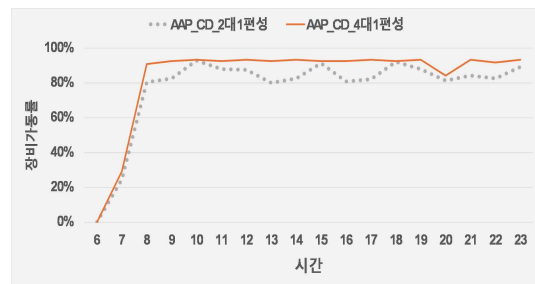


Fig. 8. Heavy snowfall, equipment utilization by truck configuration under (CD pad assignment)

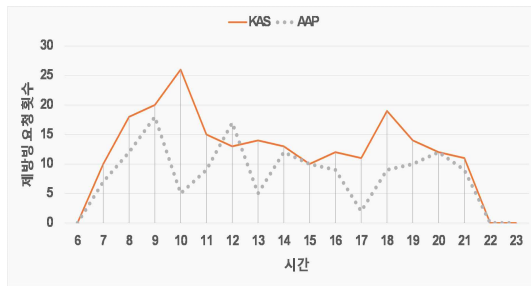


Fig. 9. Hourly de-icing/anti-icing request distribution by ground handler

비로 처리하여 장비 1대당 18.16편을 담당하며, AAP는 146편을 8대의 장비로 처리하여 장비 1대당 18.25편을 담당한다. 따라서 단순히 두 조업사의 장비를 통합한다고 해서 전체 처리능력이 크게 증가하기는 어렵다.

다만, 통합 운영은 시간대별 수요 불균형을 완화하는 데 의미가 있다. 시간대별 제·방빙 요청 분포를 보면 KAS와 AAP의 첨두시간대가 완전히 동일하지 않으며, 특정 시간대에는 한 조업사의 수요가 집중되는 반면 다른 조업사의 장비에는 상대적 여유가 발생할 수 있다(Fig. 9 참조). 조업사별 계약 항공사의 운항스케줄 차이로 인해 제·방빙 장비의 조업 대기시간이 발생할 수 있으며, 통합 운영은 장비 활용의 시간대별 불균형을 완화하고 제·방빙 소요시간을 단축하는 데 기여할 수 있다.

분석 결과, KAS와 AAP가 충분한 패드를 확보한 조건에서 통합 운영을 적용할 경우 약한 강설 조건에서는 KAS와 AAP 모두 약 1분 내외의 제한적인 시간 단축 효과를 보였다. 반면 강한 강설 조건에서는 KAS의 경우 약 16분, AAP의 경우 약 6분의 단축 효과가 나

타났다(Table 6 참조). 이는 강설강도가 높아질수록 작업시간이 증가하고 대기열이 길어지기 때문에, 조업사 간 장비의 시간대별 보완 효과가 상대적으로 커질 수 있음을 의미한다.

또한 KAS의 경우 10시대에 제·방빙 요청 첨두가 나타나는 반면, AAP는 해당 시간대에 상대적으로 여유가 있는 것으로 분석되었다. 이에 따라 KAS의 10 - 11시대 출발 항공기를 대상으로 상호 보완 운영을 적용할 경우, 강한 강설 조건에서 약 26분의 시간 단축 효과가 발생할 수 있으며, 약한 강설 조건에서도 약 8분의 단축 효과가 기대된다.

따라서 KAS·AAP 통합 운영은 상시적 통합보다는 강설특보, 제·방빙 지연 심화, 특정 시간대 출발 수요 집중과 같은 조건에서 제한적으로 적용하는 것이 현실적이다. 이를 위해서는 조업사 간 장비 지원 기준, 항공사 계약관계, 비용 정산, 안전책임, 작업자 자격, 통신체계에 대한 사전 합의가 필요하다.

2.3.4 분석 결과 종합

AAP가 AS zone의 4개 패드를 사용할 경우 가용 패드 수 부족으로 장비 8대의 연속적 투입이 제한되었으나, CD zone의 6개 패드를 사용할 경우 가용 패드 수가 증가하여 장비가 보다 연속적으로 작업할 수 있었고, 이에 따라 제·방빙 소요시간이 크게 감소하였다. 특히 강한 강설 조건에서는 패드 수 확대에 따른 효과가 매우 크게 나타났다. 이는 제·방빙 처리능력이 단순히 조업사 보유 장비 수로만 결정되는 것이 아니라, 해당 장비가 실제로 연속 작업을 수행할 수 있는 가용 패드 수와 패드 배정 구조에 의해 크게 영향을 받는다는

Table 6. Analysis results of estimated time from de-icing/anti-icing request to pad exit by scenario

구분	운영 조건	패드 배정	장비 편성	약한 강설 (KAS/AAP)	강한 강설 (KAS/AAP)
시나리오 1	KAS·AAP 분리 운영 AAP AS Zone 사용	(총 12개소) KAS 8개소, AAP 4개소	2대 1편성	45분/63분	151분/266분
			4대 1편성	40분/44분	165분/140분
시나리오 2	KAS·AAP 분리 운영 AAP CD Zone 사용	(총 15개소) KAS 9개소, AAP 6개소	2대 1편성	43분/43분	132분/122분
			4대 1편성	40분/41분	157분/137분
시나리오 3	KAS·AAP 통합 운영 AAP CD Zone 사용	총 15개소	2대 1편성	42분	116분
			4대 1편성	38분	143분

점을 보여준다.

둘째, 4대 1편성은 조건부로 효과적인 운영방식이다. 패드 수가 부족한 상황에서는 항공기당 제·방빙 점유시간을 단축하여 전체 대기열을 완화할 수 있다. 그러나 충분한 패드가 확보된 상황에서는 2대 1편성의 장비 가동률도 충분히 높게 유지될 수 있으며, 이 경우 4대 1편성은 장비 1대당 작업효율 저하로 인해 오히려 총 소요시간을 증가시킬 수 있다. 따라서 4대 1편성은 모든 강설 상황에서 일괄적으로 적용하기보다, 강설강도, 패드 여유도, 대기열 길이, 장비 가용상태를 고려하여 선택적으로 적용하는 것이 바람직하다.

셋째, 조업사 간 통합 운영은 전체 평균 처리시간을 크게 줄이기보다는 시간대별 수요 불균형을 보완하는 방식으로 활용될 수 있다. KAS와 AAP의 장비 1대당 처리 항공편 수가 거의 동일하기 때문에 통합 자체의 평균적 효과는 제한적이지만, 특정 시간대에 한 조업사의 수요가 집중될 경우 다른 조업사의 장비를 보완적으로 활용함으로써 침두시간대 병목을 완화할 수 있다.

III. 결 론

본 연구는 인천국제공항의 동절기 항공기 제·방빙 운영에서 발생하는 출발 지연을 완화하기 위해 제·방빙 패드 배정, 장비 편성 방식, KAS·AAP 통합 운영의 효과를 분석하였다. 분석 대상은 2025년 1월 21일 07:00부터 21:59까지 출발한 항공편 364편이며, KAS 218편, AAP 146편을 대상으로 시나리오 기반 분석을 수행하였다(Fig. 10 및 Fig. 11).

분석 결과, 첫째, 제·방빙 처리능력은 제·방빙 Zone의 공간적 위치보다 해당 zone에서 실제로 활용 가능한 패드 수에 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났

다. AAP가 AS zone의 4개 패드를 사용할 경우보다 CD Zone의 6개 패드를 사용할 경우 제·방빙 요청부터 제·방빙장 이탈까지의 예상 소요시간이 크게 감소하였으며, 강한 강설 조건에서는 4시간 26분에서 2시간 2분으로 단축되었다. 이는 동일한 장비 수를 보유하더라도 가용 패드 수가 부족할 경우 장비의 연속 투입이 제한되어 제·방빙 처리능력이 저하될 수 있음을 의미한다.

둘째, 4대 1편성은 패드 부족 상황에서 조건부로 효과적인 운영방식으로 나타났다. 가용 패드 수가 제한된 조건에서는 항공기당 제·방빙 작업시간을 단축하여 전체 소요시간을 줄일 수 있었으나, 충분한 패드가 확보된 조건에서는 운용 가능한 장비 편성 수가 감소하여 오히려 전체 소요시간이 증가할 수 있었다. 따라서 장비 편성방식은 강설강도, 가용 패드 수, 장비 가동률 및 대기열 길이를 종합적으로 고려하여 선택적으로 적용할 필요가 있다.

셋째, KAS·AAP 통합 운영은 전체 평균 소요시간을 크게 줄이기보다는 시간대별 침두수요를 보완하는 방식으로 효과를 가질 수 있다. 두 조업사의 장비 1대당 처리 항공편 수가 유사하여 평균적인 개선효과는 제한적이었으나, 특정 시간대에 한 조업사의 제·방빙 물량이 집중되는 경우 상대적으로 여유가 있는 조업사의 장비를 활용함으로써 병목을 완화할 수 있었다.

본 연구의 결과는 제·방빙 지연 완화를 위해 조업사별 고정 패드 배정보다는 가용 패드 수, 조업사별 장비 수, 시간대별 제·방빙 물량을 반영한 탄력적 패드 배정이 필요함을 보여준다. 또한 4대 1편성은 상시 적용방식이 아니라 패드 부족 및 대기열 증가 상황에서 선택적으로 적용되어야 하며, 조업사 간 통합 운영은 비상 상황 또는 침두시간대 공동대응 수단으로 설계될 필요

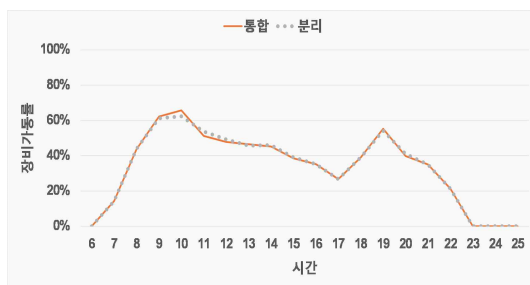


Fig. 10. Light snowfall, equipment utilization comparison between integrated and separate operations in the AAP CD zone

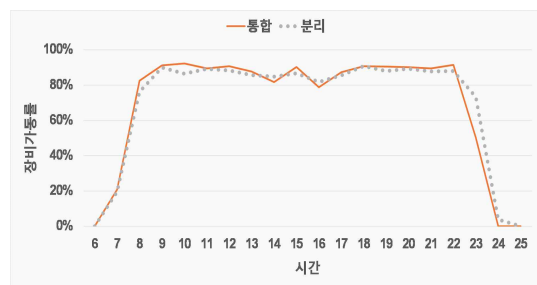


Fig. 11. Heavy snowfall, equipment utilization comparison between integrated and separate operations in the AAP CD zone

가 있다. 다만, 4대 1편성의 용액 살포시간은 제·방빙장 운영담당자의 경험에 기반한 추정값을 적용하였으므로, 향후 실제 운영자료를 활용한 추가 검증이 필요하다.

향후 연구에서는 실제 A-CDM 자료, 항공기별 제·방빙 요청시간, 제·방빙장 진입 및 이탈시간, 패드 간 장비 이동시간, 활주로 이륙순서, 기상자료를 연계하여 제·방빙 지연이 공항 전체 출발 네트워크에 미치는 영향을 보다 정밀하게 분석할 필요가 있다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 “데이터기반 항공교통관리 기술개발(과제번호 : RS-2021-KA163373)”의 연구지원으로 수행되었습니다.

References

1. ICAO, "Manual of Aircraft Ground De-icing/Anti-icing Operations", 2018.
2. Korea Civil Aviation Association, "Understanding Aircraft Deicing and Application Cases", Aviation Insight, 61, 2025.
3. Incheon International Airport Corporation, "Aircraft De-icing/Anti-icing Manual of Incheon International Airport", 2024.
4. Milošević, S., Šelmić, M., Nikolić, M., and Mirković, B., "Prediction of flight delays Due to the aircraft de-icing and anti-icing process using artificial neural network", Transportation Research Procedia, 81, 2024, pp.187-194.
5. Alsalous, O., and Hotle, S., "Deicing facility capacity and delay estimation using ASDE-X Data: Chicago O'Hare simulation case study", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2678(4), 2024, pp.455-467.
6. Bae, D. H., "A simulation study on effective aircraft ground de-icing/anti-icing operation strategy of Incheon International Airport", M.S. Thesis, Korea Aerospace University, Goyang, 2013.
7. Yoon, Y. S., "A study on airport operation optimization using simulation techniques", M.S. Thesis, Korea Aerospace University, Goyang, 2014.
8. Zhu, Z., Jung, Y., Eun, Y., Hosagrahara, V., Lee, H., and Jeon, D., "Modeling deicing operations in departure scheduling using fast time simulation", 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Diego, 2019, pp.1-10.
9. FAA, "Ground Deicing and Anti-Icing Program", 2004.
10. FAA, "Design of Aircraft Deicing Facilities", 2020.