한국환경생태학회지 33(6): 624-635, 2019 ISSN 1229-3857(Print) ISSN 2288-131X(Online)
Korean J. Environ. Ecol. 33(6): 624-635, December 2019 https://doi.org/10.13047/KJEE.2019.33.6.624

단일 및 다중 매트릭스 모델의 비교를 통한 항공기-조류 충돌 위험성 평가 모델 분석[1]

홍미진[2†] · 김면식[2†] · 문영민[2†] · 최진환[2†] · 이후승[3†] · 유정칠[4*]

A Comparison of Single and Multi-matrix Models for Bird Strike Risk Assessment[1]

Mi-Jin Hong[2†], Myun-Sik Kim[2†], Young-Min Moon[2†], Jin-Hwan Choi[2†], Who-Seung Lee[3†], Jeong-Chil Yoo[4*]

요 약

항공교통 수요 증가로 항공기의 운항이 증가하면서 항공기 동체와 조류가 충돌하는 조류 충돌 사고가 매년 증가하고 있다. 이에 각 공항에서는 조류 충돌 사고기록을 바탕으로 항공기에 피해를 줄 것으로 예상되는 조류 종을 파악하고 순위를 매겨 충돌 위험을 효과적으로 평가 및 관리할 수 있는 연구를 수행하고 있다. 본 연구는 김포, 김해 및 제주국제공항에서 2005년부터 2013년까지 수집된 통합운항정보시스템 (Integrated Flight Information Service, IFIS) 자료를 바탕으로 항공기에 피해를 줄 것으로 예측되는 조류 종을 파악하고, 단일 및 다중 매트릭스 모델 간 위험성 평가 결과를 비교 분석 및 고찰하기 위해 수행되었다. 단일 매트릭스 모델을 통한 평가 결과 김포국제공항 및 김해국제공항에서는 왜가리, 독수리 2종과 백로류, 기러기류, 오리류, 갈매기류, 비둘기류 및 까마귀류가, 제주국제공항에서는 독수리, 까치 2종과 기러기류, 오리류, 갈매기류, 비둘기류 및 까마귀류가 '매우 높음' 또는 '높음'으로 평가되었다. 다중 매트릭스 모델을 통한 평가 결과 김포국제공항에서는 왜가리, 독수리, 까치 3종과 백로류, 기러기류, 오리류, 도요류 및 비둘기류가, 김해국제공항에서는 왜가리, 독수리, 찌르레기, 까치 4종과 백로류, 기러기류, 오리류, 도요류 및 비둘기류가, 제주국제공항에서는 왜가리, 까치 2종과 오리류, 도요류, 비둘기류가 '매우 심각' 또는 '매우 높음'으로 평가되었다. 모델 간 예측 결과에 있어 김포국제공항과 김해국제공항은 차이가 없었으나, 제주국제공항은 유의한 차이가 있었다. 이는 김포와 김해국제공항은 모두 하천의 하류에 위치하고 있어 대형 수조류들이 주로 관찰된 것에 반해 제주국제공항은 바다와 도심에 가까이 위치하고 있어 몸무게가 작은 소형 조류들이 많이 관찰되었기 때문이다. 이러한 종들과의 충돌이 항공기 동체에 미치는 영향이 적어 모델 간의 공통된 변수의 영향은 적었고, 추가적인 변수에 의해 두 모델의 평가 결과 간 큰 차이가 발생한 것으로 판단된다.

주요어: 충돌 심각성, 충돌 가능성, 공항, 모델선택, 비행행동

ABSTRACT

Bird strike accidents, a collision between aircraft and birds, have been increasing annually due to an increasing number of aircraft operating each year to meet heavier demand for air traffic. As such, many airports

1 접수 2019년 8월 27일, 수정 (1차: 2019년 11월 18일), 게재확정 2019년 11월 28일
Received 27 August 2019; Revised (1st: 18 November 2019); Accepted 28 November 2019
2 경희대학교 생물학과 및 한국조류연구소 박사과정 Department of Biology and Korea Institute of Ornithology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea
3 한국환경정책·평가연구원 부연구위원 Korea Environment Institute, Sejong 30147, Republic of Korea
4 경희대학교 생물학과 및 한국조류연구소 교수 Department of Biology and Korea Institute of Ornithology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea
† co-first author
* 교신저자 Corresponding author: jcyoo@khu.ac.kr

have conducted studies to assess and manage bird strike risks effectively by identifying and ranking bird species that can damage aircraft based on the bird strike records. This study was intended to investigate the bird species that were likely to threaten aircraft and compare and discuss the risk of each species estimated by the single-matrix and multi-matrix risk assessment models based on the Integrated Flight Information Service (IFIS) data collected in Gimpo, Gimhae and Jeju Airports in South Korea from 2005 to 2013. We found that there was a difference in the assessment results between the two models. The single-matrix model estimated 2 species and 6 taxa in Gimpo and Gimhae Airports and 2 species and 5 taxa in Jeju Airport to have the risk score above "high," whereas the multi-matrix model estimated 3 species and 5 taxa in Gimpo Airport, 4 species and 5 taxa in Gimhae Airport, and 2 species and 3 taxa in Jeju Airport to have the risk score above "very high." Although both models estimated the similar high-risk species in Gimpo and Gimhae Airports, there was a significant difference in Jeju Airport. Gimpo and Gimhae Airports are near the estuary of a river, which is an excellent habitat for large and heavy waterbirds. On the other hand, Jeju Airport is near the coast and the city center, and small and light bird species are mostly observed. Since collisions with such species have little effect on aircraft fuselage, the impact of common variables between the two models was small, and the additional variables caused a significant difference between the estimation by the two models.

KEY WORDS: STRIKE SEVERITY, STRIKE PROBABILITY, AIRPORT, MODEL SELECTION, FLIGHT BEHAVIOR

서 론

‘항공기-조류 충돌’은 항공 산업 발달과 자연생태계 간 갈등이 발생하는 대표적 사례로서, 인명 손실과 더불어 막대한 경제적 손실 등의 심각한 피해를 유발하며 피해의 수준은 항공 산업의 발달과 동반하여 증가하는 추세이다 (Allan, 2000b; Dolbeer *et al.*, 2014). 미국 연방항공청 (Federal Aviation Administration, FAA)은 미국 내의 민간공항에서 항공기-조류 충돌로 인하여 연간 9억 5천 7백만 달러 이상의 경제적 손실이 발생하는 것으로 보고하고 있으며 (FAA, 2019), 유럽 항공안전청 (European Aviation Safety Agency, EASA)에서는 전 세계의 민간공항에서 연간 약 1억 유로 이상의 경제적 손실이 발생한다고 보고하였다 (Maragakis, 2009). 이와 같은 충돌의 발생을 예방하고 피해를 최소화하기 위해 국제적 차원에서 다각적인 대책을 수립하여 적용하고 있다. 국제민간항공기구 (International Civil Aviation Organisation, ICAO)가 고시하여 각 공항별로 적용하고 있는 관리 매뉴얼은 조류 서식 환경 관리 (예; 초지 높이 관리, 습지의 비율 조절 등)로 조류가 공항 내로 유입되지 않게 하여 항공기-조류 충돌을 예방하도록 하고 있다 (Barras *et al*., 2000; DeVault *et al*., 2011; ICAO, 2012).

항공기-조류 충돌에 따른 인명과 경제적 피해를 감소시키기 위한 조류 충돌 위험성 평가 기법은 크게 선택된 항로에서의 조류 충돌 위험성을 예측하는 조류 회피 모델 (예; Bird Avoidance Model, BAM)과 충돌 가능성 및 위험성을 평가하는 항공기-조류 충돌 위험성 평가 모델 (예; Bird Strike Risk Assessment Model)로 구분된다 (USDT, 2012). 현재 해외의 일부 민간 공항에서는 항공기-조류 충돌 위험성 평가 모델 (Bird Strike Risk Assessment Model)을 개발 및 도입하여 다년간 축적된 조류 관찰 자료의 수치적 분석을 통해 항공기-조류 충돌 사고 가능성을 예측하고 공항 내 조류 퇴치활동 및 충돌 사고를 최소화하기 위한 항공기 운항 계획에 활용하고 있는데 (Allan *et al*., 2003; Ruhe, 2005; Baker and Dungey, 2007; Chen *et al*., 2012; Wang and Herricks, 2012), 대부분 영국 민항청 (Civil Aviation Authority, CAA)에서 제안한 매트릭스 (Matrix) 기법을 사용한 평가방식을 따르고 있다. 매트릭스 기법은 위험성 평가를 조류충돌 가능성 (probability)과 충돌로 인한 심각성 (severity) 간의 교차 적용에 따라 보통 수준 이상의 위험성이 도출되면 이를 제거하거나 저감할 수 있는 추가적인 위험관리 방안을 시행토록 하는 것이다 (Searing, 2005; Group, 2008; Paton, 2010).

매트릭스 모델을 이용한 항공기-조류 충돌 위험성 평가는 모델에 속하는 요인의 종류와 수에 따라 크게 단일 매트릭스 (single-matrix)와 다중 매트릭스 (multi-matrix) 모델로 구분된다 (Allan, 2000a; 2006). 단일 매트릭스 모델은 조류 몸무게 (body mass) 및 개체수 (abundance)와 같은 기초적인 조류 생태 정보와 항공기-조류 충돌의 빈도 (bird strike frequency) 또는 공항에서 관찰된 빈도 (frequency of occurrence) 등 항공기의 운항에 영향을 줄 수 있는 공항 내 조류의 행동 정보를

이용하여 평가한다 (Tan *et al.*, 2010; Figure 1a). 즉, 물리적 충돌력을 결정짓는 조류의 몸무게와 충돌 가능성을 결정짓는 개체수, 관찰 및 충돌 빈도를 요인으로 하여 최종적으로 조류 종 수준에서의 충돌 위험성을 평가한다 (Searing, 2005; Allan, 2006). 다중 매트릭스 모델은 단일 매트릭스가 포함하는 생물학적 기초 정보와 더불어 항공기 운항에 대한 정보 그리고 현장 상황에 기초한 관찰자의 주관적 평가를 모델에 추가적으로 반영한다 (Paton, 2010; Figure 1b). 단일 매트릭스 모델이 직관적인 정보에 따른 평가 모델이라면, 다중 매트릭스 모델은 구체적인 정보가 다양하게 반영된 현장 중심적인 평가 모델이라고 할 수 있다 (Group, 2008; Paton, 2010).

세계 각국의 공항에서는 공항 상황 (예; 주변 환경, 인력배치 등)을 고려하여 적합한 모델을 선택하여 사용하고 있다 (Searing, 2005; Paton, 2010). 예를 들어, 캐나다 밴쿠버 공항에서는 단일 매트릭스 모델을, 호주 애들레이드 공항은 다중 매트릭스 모델을 이용하여 충돌 위험성을 평가하고 있다. 국내에서는 최근 Park (2012)이 다중 매트릭스 모델을 이용하여 제주국제공항의 항공기-조류 충돌 위험성 평가를 수행하였고, 2012년부터 '조류 및 야생동물 충돌위험 감소에 관한 기준 (국토해양부 고시 제2012-733호)'에 의해 조류 충돌 위험성 평가를 매년 1회 이상 정기적으로 실시하고 있으나, 매트릭스 모델 적용 결과에 대한 평가와 단일 및 다중 매트릭스 모델의 결과 차이를 비교·검토한 연구는 없었다.

본 연구에서는 1) 각 공항 별 항공기-조류 충돌 위험성을 평가하고, 2) 단일 및 다중 매트릭스 모델의 평가 결과가 각 공항별로 차이가 있는지 또는 모델 간의 차이가 있는지를 분석하였다. 그리고 3) 모델 평가 결과를 이용하여 지역 특이적 위험성 평가 모델의 필요성과 국내 상황에 적합한 항공기-조류 충돌 위험성 평가 모델의 개발 방향에 대해 고찰하였다.

연구방법

1. 연구지역 및 시기

항공기-조류 충돌 위험성 평가 모델 비교를 위한 연구지역은 한국공항공사가 관리하는 공항 중 항공기 운항이 빈번한 김포국제공항 (서울시 강서구), 김해국제공항 (부산시 강서구) 그리고 제주국제공항 (제주시 용담동) 세 곳이었다 (Figure 1). 본 연구의 분석에는 김포, 김해와 제주국제공항에서 2005년부터 2013년까지 통합운항정보시스템에 입력된 조류퇴치데이터를 이용하였다. 조류퇴치데이터는 비조류전문가에 의해 동정되어 세부종이 아닌 조류 분류군 별로 기록된 경우가 많지만 (예 ; 큰기러기, 쇠기러기는 종 구분 없이 기러기류로 기록됨) 자료 소실 방지를 위해 분류군별로 기록된 데이터를 모두 이용하였다.

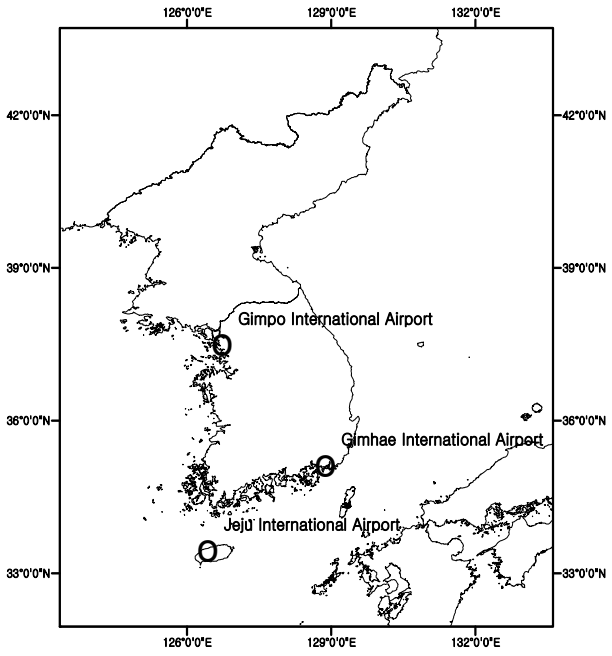

Figure 1. Study site (Gimpo, Gimhae and Jeju International Airport).

2. 연구방법

1) 단일 매트릭스 모델

단일 매트릭스 모델은 공항 내에 출현하는 조류의 종별 몸무게와 관찰 빈도를 요인으로 하여 항공기-조류 충돌 위험성을 예측한다. 모델 예측 값의 범주는 심각성과 가능성으로 구분되는데, 항공기-조류 충돌의 심각성은 조류의 몸무게를 통해 계산되고, 충돌 가능성은 관찰 빈도를 통해 계산한다(Figure 1a, Table 1). 각각 계산된 충돌 심각성과 충돌 가능성을 Table 1의 평가 매트릭스에 대입하여 최종적으로 항공기-조류 충돌 위험성을 예측한다(Searing, 2005; Allan, 2006).

조류 종별 몸무게 자료는 Dunning (2007)을 참조하여 암컷과 수컷의 평균값으로 계산하였다. 조류 몸무게에 따른 심각성은 아래의 5가지 범주로 구분하여 평가에 반영하였다 (MacKinnon, 2002):

>1,800g – 매우 높음 (very high)
1,001-1,800g – 높음 (high)
301-1,000g – 보통 (moderate)
101-300g – 낮음 (low)
≤100g – 매우 낮음 (very low)

항공기-조류 충돌 가능성은 캐나다 밴쿠버 공항과 동일하게 Searing (2005)이 제안한 BirdDays를 이용하여 계산하였다.

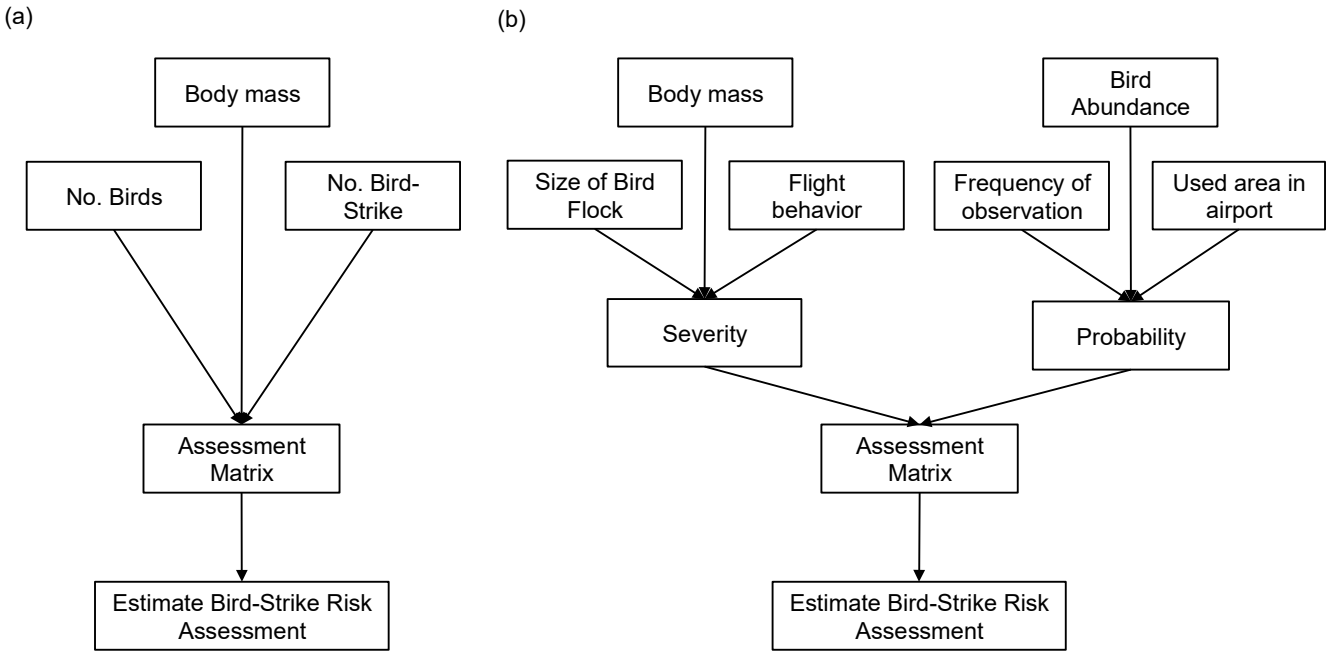

Figure 2. Illustration of single (a) and multi (b) matrix model for bird strike risk assessment models.

BirdDays는 공항에 출현하는 조류의 관찰 빈도를 정량화하기 위한 방법으로 하루 동안에 관찰된 조류의 총 개체수 또는 조류 1개체가 관찰되기까지 소요된 총 일수를 의미한다 (Searing, 2005). 예를 들어, 10 BirdDays는 하루 동안 10개체가 관찰되었거나 10일 동안 1개체가 관찰되었음을 의미한다. 먼저, 2005년부터 2013년도까지 각 공항별로 관찰된 조류의 총 개체수의 중앙값 (median)을 기준으로 하여 각각 0.5, 1, 2.5, 5배의 비율로 공항 특이적인 BirdDays를 산출하였다(Searing, 2005). 평가를 위한 BirdDays는 아래의 5가지 범주로 구분하여 평가하였다 (MacKinnon, 2002):

5배 이상 – 매우 높음 (very high)
5배 – 높음 (high)
2.5배 – 보통 (moderate)
1배 – 낮음 (low)
0.5배 – 매우 낮음 (very low)

2) 다중 매트릭스 모델

다중 매트릭스 모델은 조류 몸무게와 관찰빈도에 따른 단일 매트릭스 모델보다 공항 내 조류의 분포 및 이동 정보 등 더욱 구체적이고 현장 중심적인 자료를 이용하여 위험성 평가 시 예측의 정밀성을 높이기 위해 제안되었다 (Paton, 2010). 먼저 충돌 심각성은 조류 몸무게와 관찰된 무리의 크기 (flock size)

Table 1. A single matrix for assessing the risk of bird strike. Assessments for severity category and probability were based on body mass and BirdDays since 2005, respectively. This table was modified from Searing (2005).

Severity Category	Probability					Body mass (g)
	Very low	Low	Moderate	High	Very high	
Very high	High	Very high	Very high	Very high	Very high	>1800
High	Moderate	High	High	Very high	Very high	1001-1800
Moderate	Low	Moderate	Moderate	High	High	301-1000
Low	Very low	Low	Low	Moderate	Moderate	101-300
Very low	Very low	Very low	Low	Low	Low	≤100
BirdDays since 2005	0-1187	1188-2375	2376-5937	5938-11875	>11875	

그리고 조류 비행 행동 (flight behavior) (Table A1)을 공식 (1)에 대입하여 계산하였다.

Table A1. Simple ranking and scoring system for body masses (g), flock size and flight behavior of birds that may be involved in a bird strike (modified from Paton (2010)).

Category	Score
Body mass	
< 20g	1
21-50g	2
51-200g	4
201-1000g	8
1-5㎏	16
>5㎏	32
Flock size	
Usually solitary or widely spaced	1
Often in loose flocks	4
Often in tight flock	4
Flight behavior	
Rapid direct	1
Slow, meandering, erratic, hovering, maneuverable	2

충돌 심각성
= 몸무게에 따른 평가 × 무리의 크기 × 비행 행동 (1)

다중 매트릭스 모델에서 조류 몸무게에 따른 항공기-조류 충돌 심각성은 Table A1에 의해 평가되며, 평균 몸무게에 따른 점수화의 범주는 Paton (2010)의 방식을 따랐다. 또한, 조류 무리의 크기와 관찰된 조류의 비행 행동에 따른 충돌 가능성도 Table A1에 따라 평가되었다. 이를 공식 (1)에 대입하여 계산하였고, 계산된 충돌 심각성의 점수는 아래의 6개의 범주로 구분하여 평가하였다 (Table 2):

64-128점 – 매우 심각 (extreme)
32-63점 – 매우 높음 (very high)
16-31점 – 높음 (high)
8-15점 – 보통 (moderate)
4-7점 – 낮음 (low)
1-3점 – 매우 낮음 (very low)

다중 매트릭스 모델에서의 충돌 가능성은 1) 공항 활주로 부근에 조류가 얼마나 출현하는지에 대한 정량적 (quantitative) 및 정성적 (qualitative) 평가에 따른 조류의 풍부도 (abundance)와 2) 관찰된 조류가 항공기-조류 충돌사고를 일으킨 기록이 있었는지 여부 및 충돌 사고의 빈도로 계산하였다 (Paton, 2010; Table A2). 단일 매트릭스 모델과 달리 정량적 또는 정성적 평가 항목에 대한 세부적인 평가를 먼저 수행하고, 그 중 가장 높은 평가 점수가 항목의 평가 결과가 된다. 예를 들어, 공항에서 관찰된 비둘기류에 대한 정량적 풍부도가 '매우 높음'이고 정성적 풍부도가 '보통'으로 평가되었다면, 최종 풍부도에 대한 평가는 '매우 높음'이 된다. 이렇게 최댓값을 우선하는 평가 방법을 선택한 이유는, 첫째, 정성적 평가 항목에 있어서 평가자를 통한 현장 정보를 최대한 평가에 반영하기 위해서이며, 둘째, 다중 매트릭스 모델은 예방 차원의 접근 (precautionary approach)을 기초로 하기 때문이다 (Paton, 2010).

상대 풍부도 (relative abundance)는 관찰된 종의 개체수를 관찰된 전체 개체수로 나눈 값으로 다음과 같은 4개의 범주로 구분하여 평가하였다 (Table A2):

Table 2. A Multi matrix for assessing the risk of bird strike. Severity and probability were assessed by Tables A1 and A2, respectively (see Methods). This table was modified from Paton (2010)

	Probability			
Severity	Low	Moderate	High	Very high
Extreme	High	Very high	Extreme	Extreme
Very high	Moderate	High	High	Very high
High	Moderate	Moderate	High	High
Moderate	Low	Low	Moderate	Moderate
Low	Negligible	Negligible	Low	Low
Very low	Negligible	Negligible	Negligible	Negligible

>1 – 매우 높음 (very high)
>0.1 – 높음 (high)
>0.01 – 보통 (moderate)
<0.01 – 낮음 (low)

관찰 빈도 (frequency of occurrence, %)는 특정 종의 관찰 횟수를 전체 관찰 횟수로 나눈 값이며, 관찰지역 (area of occurrence, %)은 특정 종이 관찰된 면적을 전체면적으로 나눈 값으로 다음과 같은 4개의 범주로 구분하여 평가하였다 (Table A2):

>75 – 매우 높음 (very high)
51-75 – 높음 (high)
26-50 – 보통 (moderate)
≤25 – 낮음 (low)

항공기-조류 충돌사고 발생 횟수에 따른 정량적 평가는 특정 종의 충돌 횟수를 전체 충돌 횟수로 나눈 값으로 4개의 범주로 구분하여 평가하였다 (Table A2):

>5 – 매우 높음 (very high)
1.1-5 – 높음 (high)
0.1-1 – 보통 (moderate)
<0.1 – 낮음 (low)

풍부도와 관찰 빈도에 대한 정성적 평가는 아래와 같은 4개의 범주로 구분하여 평가하였다 (Table A2):

많음 (many) 또는 최대 (most) – 매우 높음 (very high)
약간 (some) – 높음 (high)
거의 없음 (few) – 보통 (moderate)
가끔 (occasional) – 낮음 (low)

항공기-조류 충돌사고 발생 횟수에 대한 정성적 평가는 아래와 같은 4개의 범주로 구분하여 평가하였다 (Table A2):

종종 (often) – 매우 높음 (very high)
약간 (some) – 높음 (high)
가끔 (occasional) – 보통 (moderate)
드뭄 (rare) 또는 없음 (none) – 낮음 (low)

마지막으로, 각각 평가된 충돌의 심각성과 충돌 가능성을 다중 매트릭스 (Table 2)에 대입하여 항공기-조류 충돌 위험성을 평가 및 예측하였다.

3) 통합운항정보시스템 데이터베이스

단일 및 다중 매트릭스 모델을 비교하기 위해 2005년부터 2013년까지의 한국공항공사에서 관리하는 통합운항정보시스템 의 조류퇴치 데이터베이스를 이용하였다. 한국공항공사에서

Table A2. Different methods of ranking species on the probability of those species being involved in a bird strike at a particular airport (modified from Paton (2010)).

Criteria	Very high	High	Moderate	Low
Abundance				
Quantitative				
(a) Relative abundance(% of total birds counted)	>1	>0.1	>0.01	<0.01
(b) Frequency of occurrence(% surveys species scored)	>75	51-75	26-50	≤25
(c) Area of occurrence(% airport land used)	>75	51-75	26-50	≤25
Qualitative				
(a) Abundance	Many	Some	Few	Occasional
(b) Frequency of occurrence	Most	Some	Few	Occasional
(c) Area of Occupation	Most	Some	Few	Occasional
(d) Seen close to runways	Often	Some	Occasional	Rarely
Bird strike				
Quantitative				
(a) Relative frequency(% all strikes at airport)	>5	1.1-5	0.1-1	<0.1
Qualitative				
(a) Apparent frequency	Often	Some	Occasional	Rare/None

는 항공기와 충돌 위험이 있는 조류를 대상으로 퇴치활동을 수행하고 있으며, 퇴치된 조류의 종명, 개체수 등을 통합운항정보시스템 데이터베이스에 기록하고 있다. 2005년부터 2013년까지 총 10종과 종 단위로 동정되지 않은 8개 분류군 등 총 156,980개체 (김포국제공항 46,239개체, 김해국제공항 43,492개체, 제주국제공항 67,249개체)의 퇴치 기록이 있다. 데이터베이스 자료는 퇴치된 조류만을 기록하고 있지만, 공항 내부에서 항공기와 충돌할 위험성이 있는 조류 군집의 시계열적 변화를 분석하고 이를 기반으로 한 단일 및 다중 매트릭스 모델을 비교 및 평가하는데 충분하다고 판단하였다.

4) 모델 비교와 통계 분석

두 모델의 차이를 비교하기 위하여 공항별로 예측된 조류 종별 위험성 평가 결과에 대해 교차 비교 분석을 수행하였다. 각각의 모델에서 계산된 충돌 심각성과 충돌 가능성의 평가를 비교하기 위해 Pearson Correlation analysis를 이용하였다. 공항별로 두 모델 간의 평가 결과의 차이를 비교하기 위해 먼저 공항별로 두 매트릭스 모델 간의 회귀선형모형을 계산한 뒤, 종별 회귀제곱합 (Sum of Square Regression, SSR)을 계산하였다. 공항별 평균 회귀제곱합을 통해 AIC (Akaike Information Criterion), ⊿AIC 그리고 AIC weight를 계산하여 두 매트릭스 모델 간의 차이를 비교하였다. 본 연구의 모든 분석은 R version 3.3.3과 Microsoft Excel 2011에서 수행하였다.

결 과

1. 단일 매트릭스 모델에 따른 위험성 평가

조류 평균 몸무게에 따른 항공기-조류 충돌 심각성은 기러기류 (Geese, GE), 독수리 (Cinereous Vulture, CV), 갈매기류 (Gulls, GU)가 '매우 높음'으로 평가되었으며, 왜가리 (Grey Heron, GH), 백로류 (Heronries, HR), 오리류 (Ducks, DU), 꿩 (Ring-necked Pheasant, RP)이 '높음'으로 평가되었다. 충

Table 3. Final scores of bird strike risk assessment in Gimpo, Gimhae and Jeju Airport assessed by single matrix model: very high (▲), high (△), moderate (○), low (▽), very low (▼).

		Gimpo		Gimhae		Jeju	
Species	Severity	NBD	Risk	NBD	Risk	NBD	Risk
GH	△	1370(▽)	△	2720 (○)	△	99 (▼)	○
HR	△	152048 (▲)	▲	273643 (▲)	▲	248 (▼)	○
GE	▲	1002223 (▲)	▲	105 (▼)	△	0 (▼)	△
DU	△	145216 (▲)	▲	18234 (▲)	▲	197 (▼)	△
CV	▲	181 (▼)	△	401 (▼)	△	8 (▼)	△
CK	▽	20070 (▲)	○	6272 (△)	○	394 (▼)	▽
SB	▽	17720 (▲)	○	9742 (△)	○	693 (▼)	▼
NP	▽	15 (▼)	▼	35912 (▲)	○	418 (▼)	▼
GU	▲	38 (▼)	△	1 (▼)	△	178 (▼)	△
DV	○	18287 (▲)	△	8270 (△)	△	38373 (▲)	△
SK	▼	104182 (▲)	▽	179672 (▲)	▽	246375 (▲)	▽
WS	▼	0 (▼)	▼	5981 (△)	▽	60 (▼)	▼
BU	▼	154 (▼)	▼	1 (▼)	▼	58 (▼)	▼
TS	▼	38681 (▲)	▽	2375 (▽)	▼	123342 (▲)	▽
CR	○	21352 (▲)	△	14885 (▲)	△	28325 (▲)	△
EM	○	4028 (○)	○	2039 (▽)	○	21930 (▲)	△
BS	▼	5828 (○)	▽	2017 (▽)	▼	60782 (▲)	▽
RP	△	808 (▼)	○	958 (▼)	○	418 (▼)	○

Note: GH − Grey Heron (*Ardea cinerea*), HR − Heronries, GE − Geese, DU − Ducks, CV -Cinereous Vulture (*Aegypius monachus*), CK − Common Kestrel (*Falco tinnunculus*), SB − Shorebirds, NP − Northern Lapwing (*Vanellus vanellus*),GU − Gulls, DV − Dove, SK − Skylark (*Alauda arvensis*), WS − White-cheeked Starling (*Sturnus cineraceus*), BU − Buntings, TS − Tree sprrow (*Passer montanus*), CR − Crows , EM − Eurasian Magpie (*Pica pica*), BS − Barn Swallow (*Hirundo rustica*), RP − Ring-necked Pheasant (*Phasianus colchicus*), NBD − Score of BirdDays.

돌 가능성을 평가하기 위한 BirdDays는 각 공항에 따라 상이하였다 (Table 3). 김포국제공항은 백로류, 기러기류, 오리류, 황조롱이 (Common Kestrel, CK), 도요류 (Shorebirds, SB), 비둘기류 (Dove, DV), 종다리 (Skylark, SK), 참새 (Tree Sparrow, TS), 까마귀류 (Crows, CR)가 '매우 높음'으로 평가되었으며 김해국제공항은 백로류, 오리류, 댕기물떼새 (Northern lapwing, NP), 종다리, 까마귀류 그리고 제주국제공항은 비둘기류, 종다리, 참새, 까마귀류, 까치 (Eurasian Magpie, EM), 제비 (Barn Swallow, BS)가 '매우 높음'으로 평가되었다 (Table 3). 마지막으로 몸무게와 BirdDays를 변수로 이용한 단일 매트릭스 모델에 따른 항공기-조류 충돌 위험성 평가는 김포국제공항에서는 백로류, 기러기류 및 오리류가, 김해국제공항에서는 백로류와 오리류가 충돌 위험성이 '매우 높음'으로 평가되었다 (Table 3). 그러나 제주국제공항의 경우, 충돌 위험성이 매우 높은 종은 없는 것으로 예측되었고, 대신 기러기류, 오리류, 독수리, 갈매기류, 비둘기류, 까마귀류, 까치가 충돌 위험성이 '높음'으로 예측되었다(Table 3).

2. 다중 매트릭스 모델에 따른 위험성 평가

조류의 평균 몸무게와 관찰된 무리의 크기, 비행 행동에 따른 항공기-조류 충돌 심각성은 왜가리, 기러기류, 오리류, 독수리, 도요류, 까치가 '매우 심각'으로 평가되었다 (Table 4). 충돌 가능성은 각 공항별로 상이하였는데, 김포국제공항은 백로류, 기러기류, 오리류, 황조롱이, 도요류, 비둘기류, 종다리, 참새, 까마귀류가 '매우 높음'으로 평가되었으며, 김해국제공항은 백로류, 오리류, 황조롱이, 도요류, 댕기물떼새, 비둘기류, 종다리, 찌르레기, 까마귀류, 그리고 제주국제공항은 비둘기류, 종다리, 참새, 까마귀류, 까치, 제비가 각각 '매우 높음'으로 평가되었다 (Table 4). 마지막으로 다중 매트릭스 모델 (Table 2)에 따른 항공기-조류 충돌 위험성 평가는 김포국제공항의 경우 기러기류, 도요류, 까치가 '매우 심각'으로 평가되었으며 김해국제공항은 왜가리, 오리류, 도요류, 까치, 그리고 제주국제공항은 도요류와 까치가 '매우 심각'으로 예측되었다 (Table 4).

Table 4. Final scores of bird strike risk assessment in Gimpo, Gimhae and Jeju Airport assessed by multi matrix model: extreme (▲▲), very high (▲), high (△), moderate (○), low (▽), very low (▼).

		Gimpo		Gimhae		Jeju	
Species	Severity	Probability	Risk	Probability	Risk	Probability	Risk
GH	▲▲	○	▲	△	▲▲	○	▲
HR	▲	▲	▲	▲	▲	○	△
GE	▲▲	▲	▲▲	○	▲	▽	△
DU	▲▲	▲	▲	▲	▲▲	○	▲
CV	▲▲	○	▲	○	▲	▽	△
CK	▽	▲	▽	▲	▽	○	▽
SB	▲▲	▲	▲▲	▲	▲▲	△	▲▲
NP	△	▽	○	▲	△	○	○
GU	○	▽	▽	▽	▽	○	▽
DV	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
SK	▽	▲	▽	▲	▽	▲	▽
WS	▲	▽	○	▲	▲	○	△
BU	○	▽	▽	▽	▽	○	▽
TS	○	▲	▽	△	○	▲	○
CR	▲	▲	△	▲	△	▲	△
EM	▲▲	△	▲▲	△	▲▲	▲	▲▲
BS	▼	△	▼	△	▼	▲	▼
RP	▲	○	△	△	△	○	△

Note: GH – Grey Heron (*Ardea cinerea*), HR – Heronries, GE – Geese, DU – Ducks, CV - Cinereous Vulture (*Aegypius monachus*), CK – Common Kestrel (*Falco tinnunculus*), SB – Shorebirds, NP – Northern Lapwing (*Vanellus vanellus*), GU – Gulls, DV – Dove, SK – Skylark (*Alauda arvensis*), WS – White-cheeked Starling (*Sturnus cineraceus*), BU – Buntings, TS – Tree Sparrow (*Passer montanus*), CR – Crows , EM – Eurasian Magpie (*Pica pica*), BS – Barn Swallow (*Hirundo rustica*), RP – Ring-necked Pheasant (*Phasianus colchicus*), NBD – Score of BirdDays.

3. 단일 및 다중 매트릭스 모델 비교

단일 매트릭스 모델의 충돌 심각성과 다중 매트릭스 모델의 충돌 심각성은 양의 상관관계를 보였다 (Pearson correlation, $r_{1,18}$=0.582, P=0.011). 또한 두 모델의 충돌 가능성 결과는 세 공항에서 모두 강한 양의 상관관계를 보였다(김포국제공항, $r_{1,18}$=0.979, P<0.001; 김해국제공항, $r_{1,18}$=0.921, P<0.001; 제주국제공항, $r_{1,18}$=0.893, *P*<0.001). 두 모델 간의 예측 결과는 김포 및 김해국제공항에서 큰 차이가 없었지만, 제주국제공항에서는 유의한 차이가 있었다 (Table 5; Figure 3). 김포국제공항은 2종 (댕기물떼새 , 찌르레기) 및 도요류, 까마귀류, 갈매기류 (검정색원)에서 두 모델 간 예측 결과에 차이가 있었으나 (residual > 0.2), 나머지 8종 (제비, 종다리, 참새, 꿩, 까치, 왜가리, 독수리, 황조롱이) 및 백로류, 비둘기류, 오리류, 기러

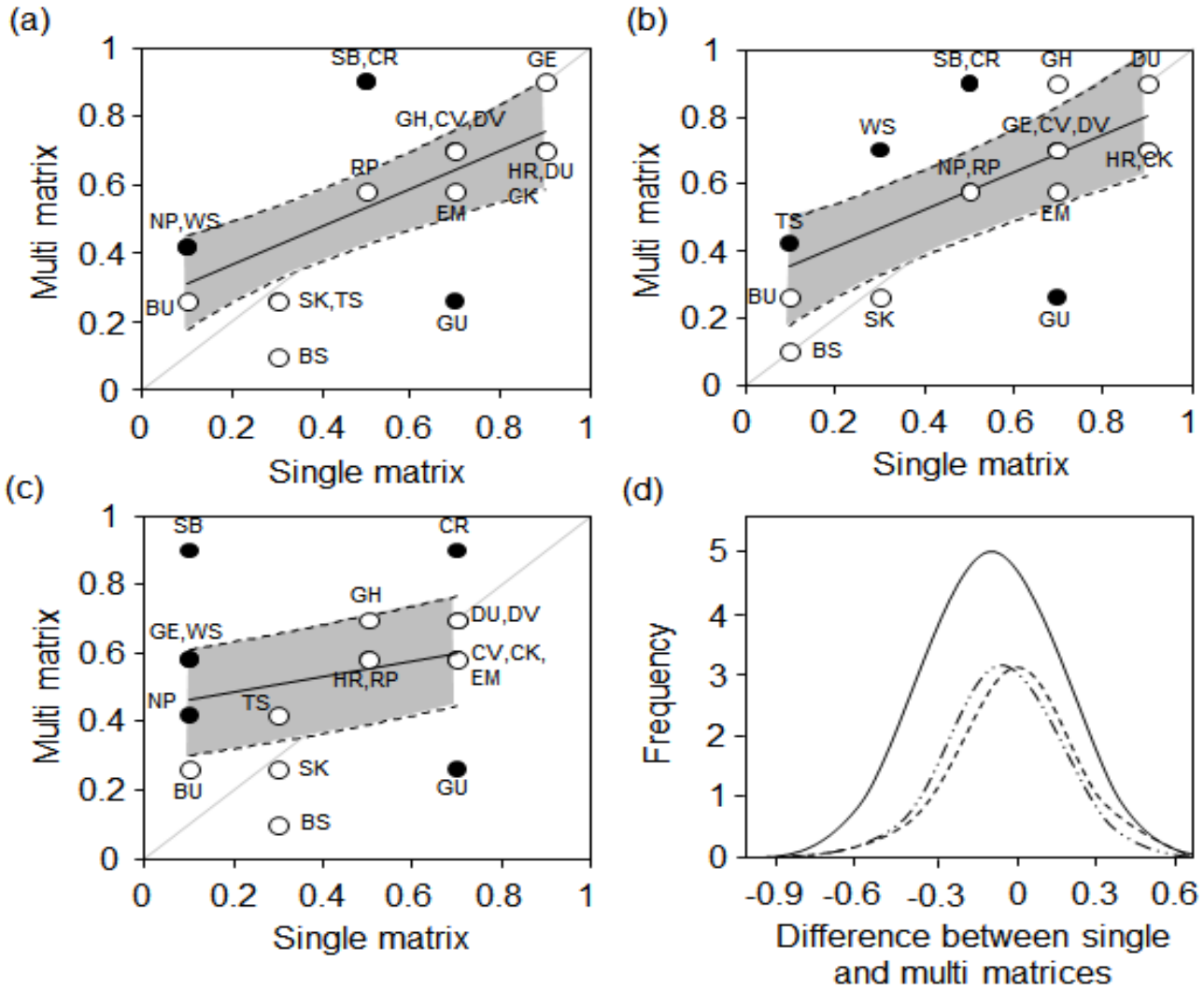

Figure 3. Comparison of single matrix and multi matrix in Gimpo (a), Gimhae (b) and Jeju (c) Airports (opened circle - <2 residual distance, closed circle - ≥2 residual distance). The solid line and dashed line in (a-c) indicate regression line and 95% confidence intervals, respectively. The frequency of difference between single and multi matrix in three airports (solid line - Jeju, Dashed line - Gimpo, and Double dashed line - Gimhae) (d). GH - Grey Heron (*Ardea cinerea*), HR - Heronries, GE - Geese, DU - Ducks, CV - Cinereous Vulture (*Aegypius monachus*), CK - Common Kestrel (*Falco tinnunculus*), SB - Shorebirds, NP - Northern Lapwing (*Vanellus vanellus*), GU - Gulls, DV - Dove, SK - Skylark (*Alauda arvensis)*, WS - White-cheeked Starling (*Sturnus cineraceus*), BU - Buntings, TS- Tree Sparrow (*Passer montanus*), CR - Crows, EM - Eurasian Magpie (*Pica pica*), BS - Barn Swallow (*Hirundo rustica*), RP - Ring-necked Pheasant (*Phasianus colchicus*).

기류, 멧새류 (흰색원)에서는 모델 간 예측 결과가 유사하였다 (residual < 0.2; Figure 3a). 김해국제공항은 2종 (참새, 찌르레기) 및 도요류, 까마귀류, 갈매기류 (검정색원)에서 두 모델 간 예측 결과에 차이가 있었으나 (residual > 0.2), 나머지 8종 (제비, 종다리, 꿩, 까치, 왜가리, 독수리, 황조롱이, 댕기물떼새) 및 백로류, 비둘기류, 오리류, 기러기류, 멧새류 (흰색원)에서는 모델 간 예측 결과가 유사하였다 (residual < 0.2; Figure 3b). 제주국제공항은 2종 (찌르레기, 댕기물떼새) 및 도요류, 기러기류, 까마귀류, 갈매기류 (검정색원)에서 두 모델 간 예측 결과에 차이가 있었으나 (residual > 0.2), 나머지 8종 (참새, 제비, 종다리, 꿩, 까치, 왜가리, 독수리, 황조롱이) 및 백로류, 비둘기류, 오리류, 멧새류 (흰색원)에서는 모델 간 예측 결과가 유사하였다 (residual < 0.2; Figure 3c). 전체적으로 충돌 위험성 평가 예측 결과의 모델 간 차이는 제주국제공항이 김포 및 김해국제공항에 비하여 유의하게 컸다 (Figure 3d; Table 5).

Table 5. Comparison of difference in each airport between single and multi matrix models

Airports	AIC	ΔAIC	AIC weight
Gimpo	-55.91	0	0.47
Gimhae	-55.67	0.25	0.41
Jeju	-53.27	2.65	0.12

고 찰

단일 매트릭스 모델과 다중 매트릭스 모델의 평가 결과를 비교한 결과 공항별로 정도는 달랐으나 세 공항에서 모두 차이가 있었다. 이는 조류의 크기 (몸무게)와 관찰된 빈도는 두 모델이 공통적으로 가지고 있는 변수이나 다중 매트릭스 모델에서는 비행 행동, 군집 크기 등의 조류의 행동 정보와 과거 충돌 사고의 경험 자료 그리고 관찰자의 주관적 평가 변수가 추가되어 두 모델 간의 변수 불균형이 발생한 결과이다. 특히 모델 간 평가 결과의 차이는 김포국제공항과 김해국제공항에 비해 제주국제공항이 더욱 유의한 차이를 보였다. 제주국제공항은 김포나 김해국제공항과 달리 전체 관찰 조류 군집의 종 구성이 상대적으로 다양하고 몸무게가 가벼운 중소형 조류의 비중이 높은 특성을 보였는데 이러한 종들과의 충돌이 항공기 동체에 미치는 영향 (손실)은 작아 단일 매트릭스 (몸무게 + 관찰 빈도)와 다중 매트릭스 (몸무게 + 관찰 빈도 + 무리의 크기 + 비행행동 + 주관적 평가 + 충돌사고 발생 횟수) 모델 간의 공통된 변수의 영향은 적었으나 추가적인 변수에 의해 두 모델의 평가 결과 간 큰 차이가 발생하였고 대체적으로 중소형 종들의 위험성 평가 결과가 단일 매트릭스 모델 대비 다중 매트릭스 모델에서 큰 변동을 보였다.

이러한 모델 간의 결과 차이를 최소화하기 위해서는 우선 모델에 추가되는 변수의 가중치 (weight), 즉 결과에 미치는 영향의 정도를 고려하고 적합성을 반드시 평가해야 한다 (Pascual, 2005). Hively (2011)는 생물학적 모델링에서 자료가 부족하다면 필요한 변수는 가상의 자료를 이용해서라도 반드시 모델에 포함시켜야 변수 간 비중의 균형이 맞추어져 목적하는 결과를 예측할 수 있음을 고찰하였다. 또한 몸무게나 조류 무리의 크기 그리고 비행 행동 등을 주요 변수로 포함했음에도 불구하고 공항 내부와 외부의 환경, 즉 경관요소에 대해서는 고려하지 않은 것도 모델 간 평가 결과 차이를 심화시킨 요인일 수 있다. 생물의 행동이나 분포 등을 모델링 하는데 있어서 모델에 삽입되어야 할 중요한 변수의 누락이 잘못된 예측을 유도할 수 있다는 것은 잘 알려져 있다 (Grafen, 1991; Sterne *et al*., 2009; Hively, 2011). 특히, 조류의 군집 구성은 서식지의 경관 요소나 환경 상태의 영향을 받을 수 있기 때문에 (Hennings and Edge, 2003; Mitchell *et al*., 2006), 각각의 환경 상태에 대한 정확한 정보를 얻기 위해 노력하고 있다. 두 매트릭스 모델의 위험성 평가 결과가 유사했던 김포와 김해국제공항은 모두 하천의 하류에 위치하고 있으며, 가까운 곳에 조류가 취식 또는 서식할 수 있는 평야를 포함하고 있다. 이러한 경관 요소는 기러기류, 오리류 또는 백로류와 같이 하천과 농경지를 주 서식지로 하는 대형 조류가 두 공항에서 많이 관찰된 원인으로 작용한다. 반면 모델의 예측이 달랐던 제주국제공항은 바다와 인접한 곳에 위치하고 있으며, 도심 가까이에 위치하고 있어 소형 조류가 주로 관찰되었다. 따라서 공항에서 관찰되는 조류군집의 차이는 공항 내부 환경뿐만 아니라 외부의 경관요소와도 밀접한 관련이 있기 때문에 두 모델 간의 예측 결과의 차이를 줄이기 위해서는 향후 공항 내·외부의 경관요소에 대한 변수가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

각 공항별 매트릭스 모델의 위험성 평가 결과는 공항 내부의 종 구성 등 조류 군집의 특성이 근본적으로 공항 주변의 경관 및 환경 특성 그리고 조류의 생태와 밀접한 관련이 있다는 것을 잘 보여준다. 김포국제공항에서 위험성이 높게 평가된 조류는 기러기류, 백로류, 오리류, 비둘기류 및 까마귀류였다. 김포 지역에서 오리·기러기류는 공항 남서쪽의 논을 취식지로 이용하며, 공항 북쪽의 하천을 휴식지로 이용하고 있어 일출 및 일몰 시 큰 무리를 지어 두 서식지를 오가는 행동특성을 보인다. 따라서 서식지 간 이동 시 공항 내부를 통과함에 따라 단일 및 다중 매트릭스 모델 모두에서 충돌 위험이 높게 평가되었다. 또한 번식 후 월동지로 무리를 지어 이동하는 백로류는 공항 주변의 논과 하천 및 수로를 취식지로 이용한다. 그중에서 황로는 취식을 위해 공항 내부 초지를 빈번하게 이용하는데, 특히 이동시기에는 큰 무리를 이루어 많은 수가 공항 내부로 유입되기 때문에 높은 충돌 위험성을 보이는 것으로 평가되었다. 김해

국제공항도 공항 동쪽의 낙동강 본류와 서쪽의 서낙동강을 취식 및 휴식지로 이용하는 오리류가 많이 관찰되고 있으며, 이동시기 전 백로류의 취식 지역으로 선호되어 위험성을 높이고 있다. 특히 댕기물떼새와 같은 도요·물떼새는 공항 내부의 초지를 취식지로 선호하여 관찰빈도와 위험성이 함께 높은 것으로 평가되었다. 반면, 제주국제공항은 단일 매트릭스 모델에서 충돌 위험성이 '매우 높음'으로 평가된 조류는 없었다. 이는 충돌 심각성이 높게 평가될 수 있는 겨울철 기러기류 및 오리류, 여름철 집단 번식하는 백로류 등이 선호하는 농경지와 강 하구, 하천 및 저수지 등이 김포 및 김해국제공항과 달리 매우 적기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 제주국제공항은 북쪽이 바다와 인접해 있어 겨울철 개체군 규모가 증가하는 갈매기류와 통과 시기에 한시적이지만 공항 내부의 초지 및 배수로 등을 집중적으로 이용하는 일부 도요류 그리고 월동기에 공항 주변의 초지 및 밭을 휴식 및 취식지로 이용하는 찌르레기 및 까마귀류의 충돌위험성이 높은 것으로 평가되었다.

한편 모델 평가에 이용한 통합운항정보시스템 데이터베이스의 모니터링 기법의 한계가 두 모델 간 예측의 차이에 영향을 미친 또 하나의 요인일 수 있다. 최근 Seoane *et al*.(2005)와 Santin-Janin *et al*.(2014) 은 생물학적 정보를 수집하기 위한 샘플링이나 모니터링 방법에서의 오류가 잘못된 예측을 초래함을 고찰하였다. 본 연구에서 이용한 통합운항정보시스템 데이터베이스는 공항 내에서 관찰되는 조류군집의 거시적 변화 패턴을 이해하기에는 부족하지 않지만, 공항에서 관찰된 모든 조류가 아닌 퇴치된 조류만을 기록한 자료이며, 그마저도 종 수준으로 동정된 자료가 아니라는 한계를 가지고 있다. 예를 들어, 크기 (몸무게)가 큰 기러기류와 작은 참새류가 동시에 관찰되었을 경우, 현장에서는 항공기-조류 충돌의 위험성이 높은 기러기류의 퇴치가 우선적으로 시행될 것이고 이는 참새류에 대한 정보가 데이터베이스에 누락될 가능성을 가지고 있다. 결국 이러한 모니터링 방법은 두 매트릭스 모델의 비교에 있어서 특정 지역에서의 모델 간의 결과 차이를 유도하는 이유가 될 수 있을 것이다 (Munson *et al*., 2010). 따라서 모델 간 발생할 수 있는 예측의 차이를 감소시키기 위해서는 기본적으로 보다 정밀하고 일관된 모니터링 방법 및 체계가 필요하다. 예를 들어, 조류의 이동방향이나 비행 고도와 같은 조류의 행동이나 공항 외부의 조류 군집의 분포와 외부 환경 및 서식지의 구조 등에 대한 자료들도 함께 수집되어야 할 것이다.

두 모델의 적합성을 절대적으로 비교 하긴 어려우나 Pascual (2005)에 따르면 구조가 단순한 모델이 예측의 경향성을 판단하는 데 유리하며, 복잡한 모델은 좀 더 상세하고 추가적인 결과를 예측할 때 유리한 경향이 있다. 특히 May (1976)는 복잡한 생태계의 동적 관계도 충분히 단순한 모델을 통해 분석할 수 있음을 보여주기도 하였다. 이렇듯 모델 선택에 있어 다수의 변수 추가가 결과의 적합성을 높이는 절대적 조건이 아닐 수 있기 때문에 자료의 실제적 특성과 부합하여 더욱 적합한 결과를 예측할 수 있는 변수가 반영된 모델의 선택이 중요하다 (Hart *et al*., 2009). 더불어 지역적 특이성에 영향을 받는 현재의 매트릭스 모델을 향상시키기 위해서는 첫째, 각 공항의 상황에 적합한 모델, 특히 공항별 조류 및 생태환경을 평가할 수 있는 다양한 요인 (고도, 비행 방향, 경관 요소, 이동시기 등)들을 포함하여 보다 정밀한 평가를 할 수 있도록 해야 할 것이며, 둘째, 모델의 정확성을 높이기 위해 공항 내·외부 서식 조류의 종을 정확히 동정하고 개체수를 파악하는 것이 필요하다. 따라서 종 동정이 가능한 조류 전문 인력의 확충과 지속적으로 정확한 데이터 수집이 가능하도록 조류 퇴치팀의 조류 전문 교육 및 기술적 지원이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경정책평가연구원 2019년도 연구프로그램 (RE2019-09)의 일부 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Allan, J.R.(2000a) A protocol for bird strike risk assessment at airports. Proceedings of the 25th International Birdstrike Committee, Amsterdam, Netherland.

Allan, J.R.(2000b) The costs of bird strikes and bird strike prevention. Proceedings of the 3rd National Wildlife, Special Symposium (ed. L. Clark), pp. 147-153. Research Center, Fort Collins, Colorado, USA.

Allan, J.R.(2006) A heuristic risk assessment technique for birdstrike management at airports. Risk Analysis 26(3): 723-729.

Allan, J.R., A. Orosz, A. Badham and J. Bell(2003) The development of birdstrike risk assessment procedures, their use on airports, and the potential benefits to the aviation industry. Proceedings of the 26th International Birdstrike Committee, Warsaw, Poland.

Baker, D. and K. Dungey(2007) The integration of risk management into the design of the airport metropolis. Inhabiting Risk IDEA Conference 2007 (eds C. McCarthy & G. Mattewson), Wellington, New Zealand.

Barras, S.C., M.S. Carrara, R.A. Dolbeer, R.B. Chipman and G.E. Bernhardt(2000) Bird and small mammal use of mowed and unmoved vegetation at John F. Kennedy International Airport, 1998 to 1999. Proceedings of the 19th Vertebrate Pest Conference, University of California, Davis.

Chen, W., H. Ning and J. Li(2012) Flying bird detection and hazard assessment for avian radar system. Journal of Aerospace Engineering 25(2): 246-255.

DeVault, T.L., J.L. Belant, B.F. Blackwell and T.W. Seamans (2011) Interspecific variation in wildlife hazards to aircraft: Implications for airport wildlife management. Wildlife Society Bulletin 35(4): 394-402.

Dolbeer, R.A., S.E. Wright, J.R. Weller and M.J. Begier(2014) Wildlife strikes to civil aircraft in the United States 1990-2013. Federal Aviation Administration, Washington, DC.

Dunning Jr, J.B.(2007) CRC handbook of avian body masses(2nd edn.). Taylor & Francis, Boca Raton.

Federal Aviation Administration(2019) Wildlife strikes to civil aircraft in the United States 1990-2018. FAA National Wildlife Strike Database Serial Report 25, Washington DC.

Grafen, A.(1991) Modelling in behavioural ecology. J.R. Krebs, N.B. Davies (Eds.), Behavioural ecology, an evolutionary approach, Blackwell, Oxford, pp. 5-31.

Group, C.S.R.(2008) CAP 772 Bird strike risk management for aerodromes. CAA Safety Regulation Group.

Hart, J.D., A. Colyer and J.R. Allan(2009) Developing bird-strike risk assessment models for open-water restorations. Human-Wildlife Conflicts 3(2): 186-198.

Hennings, L.A. and W.D. Edge(2003) Riparian bird community structure in Portland, Oregon: habitat, urbanization, and spatial scale patterns. The Condor 105(2): 288-302.

Hively, D.(2011) Biological modeling in data poor scenarios. M.Sc., University of California.

ICAO(2012) Part 3 Wildlife control and reduction. Airport Services Manual. International Civil Aviation Organization, Montreal, Quebec.

MacKinnon, B.(2002) Wildlife control procedures manual. Transport Canada, Ottawa, Canada.

Maragakis, I.(2009) Bird population trends and their impact on aviation safety 1999-2008. European Aviation Safety Agency, Cologne, Germany.

May, R.M.(1976) Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature 261: 459-467.

Mitchell, M.S., S.H. Rutzmoser, T.B. Wigley, C. Loehle, J.A. Gerwin, P.D. Keyser, R.A. Lancia, R.W. Perry, C.J. Reynolds, R.E. Thill, R. Weih, D. White and P.B. Wood(2006) Relationships between avian richness and landscape structure at multiple scales using multiple landscapes. Forest Ecology and Management 221: 155-169.

Munson, M.A., R. Caruana, D. Fink, W.M. Hochachka, M. Iliff, K.V. Rosenberg, D. Sheldon, B.L. Sullivan, C. Wood and S. Kelling(2010) A method for measuring the relative information content of data from different monitoring protocols. Methods in Ecology and Evolution 1(3): 263-273.

Park, S.H.(2012) Birdstrike risk assessment model for Jeju airport. Korea Civil Aviation Development Association 2: 121-135. (in Korean with English abstract)

Pascual, M.(2005) Computational ecology: From the complex to the simple and back. PLoS Computational Biology 1: e18.

Paton, D.C.(2010) Bird risk assessment model for airports and aerodromes. Australian Aviation Wildlife Hazard Group.

R Development Core Team(2016) R: a language and environment for statistical computing. [3.3.1] - Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. http://www.R-project.org/

Ruhe, W.(2005) Bird avoidance models versus realtime birdstrike warning systems: a comparison. Proceedings of the 27th International Bird Strik Committee, Athens Greece.

Santin-Janin, H., B. Hugueny, P. Aubry, D. Fouchet, O. Gimenez and D. Pontier(2014) Accounting for sampling error when inferring population synchrony from time-series data: A bayesian state-space modelling approach with applications. PLoS One 9: e87084.

Searing, G.F.(2005) Wildlife risk management at Vancouver International Airport. Bird Strike Committee-USA/Canada 7th Annual Meeting, Vancouver, BC.

Seoane, J., L.M. Carrascal, C.L. Alonso and D. Palomino(2005) Species-specific traits associated to prediction errors in bird habitat suitability modelling. Ecological Modelling 185: 299-308.

Sterne, J.A.C., I.R. White, J.B. Carlin, M. Spratt, P. Royston, M.G. Kenward, A.M. Wood and J.R. Carpenter(2009) Multiple imputation for missing data in epidemiological and clinical research: Potential and pitfalls. BMJ 338: b2393.

Tan, A., G. Searing and W.L. Keng(2010) A risk-based approach towards setting wildlife strike alert levels. Proceedings of the 29th International bird strike committee, Cairns, Australia.

USDT(2012) Current hazard assessment systems. U.S. Department of Transportation.

Wang, J. and E.E. Herricks(2012) Risk assessment of bird-aircraft strikes at commercial airports. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2266: 78-84.