

항공기 이착륙에 따른 활주로 포장의 미끄럼저항 변화

Changes in Skid Resistance of Runway Pavements by Takeoff and Landing of Aircraft

천성한* · 정진훈** · 임진선*** · 조윤호**** · 유주호*****

Cheon, Sung Han · Jeong, Jin Hun · Lim, Jin Sun · Cho, Yoon Ho · Yu, Joo-ho

1. 서 론

항공기 대형화 및 이·착륙 시 항공기 속도의 현저한 증가추세로 인해 활주로 포장 표면의 적정 마찰력 확보는 더욱더 중요시 되어왔다. 특히 우천 시와 같은 특수한 상황에서는 활주로 포장 표면의 수막현상으로 인하여 마찰력이 저하되어 항공기의 제동력이 현저하게 줄어든다. 이러한 이유로 많은 공항에서는 적정 마찰력 확보하고 우천 시 수막현상을 억제하기 위해 그루빙과 같은 표면처리 공법을 도입하였고, 지속적인 유지관리를 하는 실정이다.

항공기 착륙 시 활주로 포장 표면과 항공기 타이어 간 마찰로 인하여 활주로 포장에 항공기 타이어 고무 퇴적물이 쌓이게 되는데, 이러한 퇴적물은 활주로 포장의 마찰력을 감소시키고, 미끄럼을 유발하여 결국은 항공기 안전운항을 방해하는 요인이 된다. 활주로의 적정 마찰력 확보를 위한 고무퇴적물 제거 작업의 합리적인 방안이 강구되고 있으나, 현재 마찰계수 측정 빈도 및 고무퇴적물 제거 방안은 해외 기준에 근거한 국내 기준, 마찰계수 측정 결과에 의한 판단 및 육안판정에 의해 시행되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 국내 공항 실정에 적합한 활주로 마찰계수 측정 및 고무퇴적물 제거에 대한 합리적 기준 개발을 위해 공항 활주로 관련 해외 기준 및 연구사례에 대하여 문헌조사를 실시하였다. 그리고 2007년 8월 부터 2009년 7월까지 인천국제공항의 제 2 활주로(33R-15L)를 대상으로 ASFT(Airport Surface Friction Tester)장비를 이용하여 활주로 마찰계수를 측정하였으며, 고무퇴적물 누적에 따른 마찰계수의 변화를 관찰하였고, 고무퇴적물 제거 후의 마찰계수의 변화를 조사하였다.

2. 문헌조사

2.1 마찰 이론 및 측정

항공기가 지상을 주행할 때, 그 중량은 타이어를 사이에 두고 지면에 지지되며, 주행 중에 항공기가 정지하기 위해서는 타이어와 포장면사이의 마찰저항력이 필요하다. 그리고 노면과 타이어 사이에서 발휘할 수 있는 저항력에는 한계가 있으며, 그 한계를 초과하는 힘이 발생하는 경우에 타이어는 노면에서 미끄러지게 된다(박태순, 2001). 이와 같이 타이어가 노면 위를 미끄러질 때 타이어와 노면사이에서 작용하는 힘을 마찰저항력(F)이라 하며, 이 마찰저항력(F)과 자중(F_W)의 관계로 부터 식 (1)과 같이 마찰계수(μ)를 정의할 수 있다.

$$\mu = F / F_W \quad \text{식 (1)}$$

* 정회원 · 인천국제공항공사 차장 · 공학박사 · 032-741-5396(E-mail : wackoi@naver.com)
** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 032-860-7574(E-mail : jihj@inha.ac.kr)
*** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 032-873-5332(E-mail coreplay@hanmail.net)
**** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 02-820-5336(E-mail yhcho@cau.ac.kr)
***** 정회원 · 유퍼스텍 대표이사 · 02-801-8900(E-mail : juminok@empal.com)

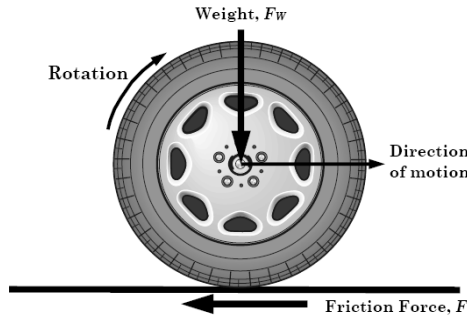


그림 1. 회전하는 차륜의 마찰저항력 개념도
(J.W. Hall, 2006)

공항에서 마찰계수 측정은 포장표면 마찰 상태를 결정하는데 가장 합리적인 기준을 마련해 주며, 마찰계수의 측정은 특정 미끄럼율 상태에서 측정된다. 미끄럼율은 다음과 식 (2)와 같이 정의된다(Meyer, 1982). 그림 2와 같이 활주로에서 미끄럼율과 마찰계수와의 관계를 보면 미끄럼율 20%에서 최대의 마찰계수 값을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 때문에 공항에서 마찰측정 장비로 마찰계수를 측정할 경우 최대 마찰계수가 유발되는 미끄럼율이 10~20% 범위에서 유지되도록 제안하고 있다(ICA0, 1999; Henry, 2000).

$$SR = \frac{V - V_p}{V} \times 100 = \frac{S}{V} \times 100 \quad \text{식(2)}$$

- 여기서, SR : 미끄럼율(%)
 V : 항공기 속도(km/h)
 V_p : 타이어의 평균 구름속도(km/h)
 S : 미끄럼속도(km/h)

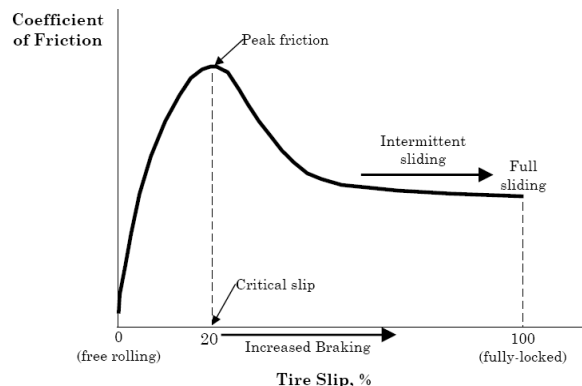


Figure 11. Pavement friction versus tire slip.

그림 2. 활주로에서 미끄럼율과 마찰계수와의 관계(Henry, 2000)

FAA 및 ICAO에서는 습윤상태를 재현하기 위해서 수막두께 1mm를 가지는 포장상태에서 마찰계수를 측정하도록 권고하고 있으며, 측정장비의 종류에 따라 측정속도를 40mph(64km/h)와 60mph(96km/h)의 두 가지에 대



하여 유지관리시의 적용기준, 신설된 활주로에서의 적용기준, 최소치의 적용기준에 대한 마찰계수의 값을 규정해 놓고 있다. 다음 표 1과 표 2는 FAA 및 ICAO에서 마찰계수 조사주기와 조사장비 종류별로 마찰계수의 관리기준을 규정한 것을 보여준다.

표 1. 마찰력 조사주기(FAA, 1997; ICAO, 1999)

활주로단에 터보제트 항공기가 착륙하는 횟수(회/일)	최소 마찰력 조사주기
15이하	1년
16 ~ 30	6개월
31 ~ 90	3개월
91 ~ 150	1개월
151 ~ 210	2주
210이상	1주

표 2. 측정장비 별 마찰계수 관리 기준(FAA, 1997; ICAO, 1999)

구 분	64km/h			95km/h		
	최소	유지 관리	신설	최소	유지 관리	신설
Mu Meter	0.42	0.52	0.72	0.26	0.38	0.66
K.J Law Runway Friction Tester	0.50	0.60	0.82	0.41	0.54	0.72
Airport Equipment Co. Skiddometer	0.50	0.60	0.82	0.34	0.47	0.74
Airport Surface Friction Tester	0.50	0.60	0.82	0.34	0.47	0.74
Airport Technology USA Safegate Friction Tester	0.50	0.60	0.82	0.34	0.47	0.74
Findlay, Irvine. Ltd Griptest Friction Meter	0.43	0.53	0.74	0.24	0.36	0.64
Tatra Friction Meter	0.48	0.57	0.76	0.42	0.52	0.67
Norsemeter RUNAR Operated at fixed 16% Slip)	0.45	0.52	0.69	0.32	0.42	0.63

2.2 그루빙

그루빙은 마찰저항을 증진시키고, 우천 시와 같이 습윤상태 때 수막현상을 저감시키는 목적으로 포장 표면에 일정 간격 및 깊이로 홈을 파는 공법을 말한다(유승권, 2003). 유럽과 미국에서는 1950년도에서부터 노면의 마찰저항과 수막현상에 대한 연구가 수행되어 왔고, NASA는 1960년대에 항공기 실물 크기의 차륜을 사용하여 항공기와 같은 속도로 시험을 수행하여 수막현상에 대한 연구 및 대처방안을 모색했다. 또한 1967년 이후 NASA, USAF, FAA에서 실제 항공기로 습윤 활주로에 수많은 마찰저항 실험을 실시하였고, 수막현상으로 인한 활주로 마찰저항을 개선시키는 방안으로써 그루빙을 적극 검토하였으며, 1970년대부터 워싱턴 국제 공항 등 많은 공항 활주로에서 그루빙이 시공되었다(박태순, 2001). 그리고 한국공항공단은 그루빙을 설치한 구간은 설치하지 않은 구간의 마찰계수보다 0.2~0.3 정도 증진되는 것을 보고하였다(한국항공공단, 2000).

2.3 고무퇴적물 제거

활주로 노면에 대한 마찰력 감소요인은 포장상태, 속도, 수막두께, 고무퇴적정도 등 여러 가지 있으나, 이중 항공기 착륙 시 발생하는 마찰열로 인한 타이어 고무의 표면 누적은 공항 포장의 마찰저항 능력을 상실하게 하는 주요 요인이다(이선구, 2002). 활주로의 포장면에 부착된 고무퇴적물과 홈에 메워진 고무찌꺼기를 제거하는 방법은 고압 살수에 의한 방법, 화학용제에 의한 방법, 고온압축공기에 의한 방법, 절삭기에 의한 방법 등이 있으나 주로 사용하는 방법은 고압 살수에 의하여 제거되며, 고무퇴적물을 제거하는 빈도는 FAA에 규정되어 있으며, 이는 대형항공기가 활주로를 착륙하는 횟수를 기준으로 한다.



표 3. 고무퇴적물 제거 빈도 기준(FAA, 1997; ICAO, 1999)

활주로 단부 터보제트 항공기가 착륙하는 횟수(회/일)	고무퇴적물 제거빈도
15 이하	2년
16 ~ 30	1년
31 ~ 90	6개월
91 ~ 150	4개월
151 ~ 210	3개월
210 이상	2개월

3. 인천국제공항 현황

인천국제공항 제 1단계 지역의 활주로, 유도로 및 계류장 지역 포장설계는 항공기의 최대 이륙중량 491.5ton, 단 차륜 중량은 29.2ton으로 하여 A380과 같은 장래 취항 초대형 항공기에 대비하였으며, 연평균 항공기 운항횟수를 154,000회로 1일 평균 운항은 1,500회를 기준으로 포장설계가 되었다. 2001년 3월에 제 1단계 공항시설이 활주로 2본과 평행유도로 4본등의 규모로 개항되었고, 2008년 6월에는 2단계 공항시설인 제 3활주로를 확장하여 운영하고 있다. 인천국제공항 활주로의 미끄럼저항 연구에 앞서 포장현황, 마찰측정 현황 및 고무퇴적물 제거 현황을 조사하였다.

3.1 활주로 포장현황

인천국제공항 활주로의 포장은 아스팔트 포장과 콘크리트 포장 2가지 유형으로 이루어져 있으며, 두 포장형식 모두 마찰력 향상 및 우천 시 신속한 배수를 위해 그루빙되어 있다. 제 1활주로(33L-15R)와 제 2활주로(33R-15L)은 총 길이가 3750m이며, 양 단부에서 300m구간이 콘크리트 포장으로 시공되어 있으며, 제 3 활주로(34-16)는 총 길이가 4000m이며 양 단부에서 700m구간이 콘크리트 포장으로 시공되어 있다.

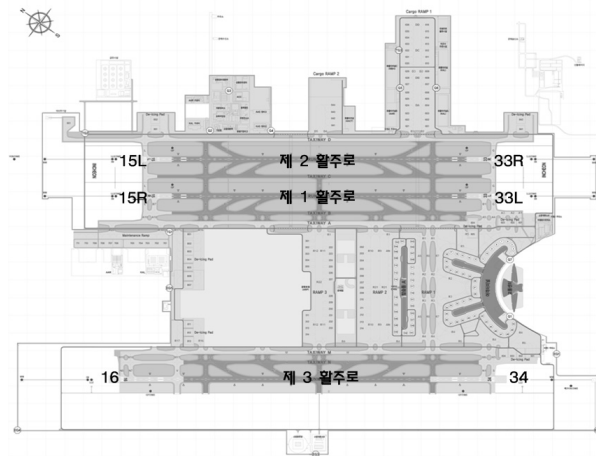


그림 3. 인천국제공항 평면도

3.2 마찰계수 측정 및 고무퇴적물 제거 현황

인천국제공항 활주로의 마찰측정 및 고무퇴적물 제거 작업은 FAA 및 ICAO의 기준을 따라서 활주로의 률빈도를 파악한 후, 그 기준에 따라 마찰계수를 측정 및 고무퇴적물 제거 작업을 하고 있다. 마찰측정은 맑은 날 포장표면에 이물질이 완전히 제거된 상태에서 그림 4와 같은 ASFT(Airport Surface Friction Tester) 장비로 수막두께 1mm가 유지되게 습윤상태를 만들어 64km/h 혹은 96km/h의 측정속도로 10m 간격마다 마찰계

수를 측정하고 있으며, 활주로를 세구간 즉 A, B, 그리고 C구간으로 나누어 각 구간의 평균값을 제시하고 있다. 고무퇴적물 제거 작업은 그림 5와 같은 장비로 작업 폭 2m, 작업속도 300m/hr로 그루빙 홈에 누적된 고무를 제거하며, 각 활주로 단부에서 약 36m 떨어진 지점부터 총 면적 21600m²(=9000m×24m)을 약 3주에 걸쳐 제거한다.



그림 4. 마찰계수 측정장치



그림 5. 고무퇴적물 제거 장비

4. 현장실험

국내활주로의 마찰계수 측정 및 고무퇴적물 제거에 대한 합리적 기준 개발을 위해 2007년 8월부터 2009년 7월까지 인천국제공항의 항공기 착륙 빈도 및 현황, 고무퇴적물 제거 빈도를 조사한 결과 그림 6과 같이 제 2 활주로(33R-15L)에서 착륙 횟수가 가장 많은 것으로 분석되었으며, 이에 따른 마찰계수 측정 및 고무퇴적물 제거 빈도 역시 잦은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 제 2 활주로(33R-15L)의 비행기 착륙지역에 대하여 ASFT(Airport Surface Friction Tester)장비로 활주로 포장면의 마찰계수를 측정하여 고무퇴적에 따른 마찰계수의 변화를 관찰하였고, 고무퇴적물 제거 후의 마찰계수의 변화를 조사하였다. 또한 마찰계수 측정 시의 대기온도를 측정하여 온도 변화에 따른 영향을 파악하였다.

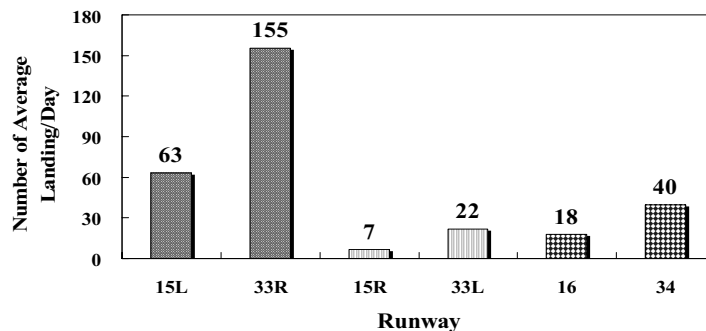
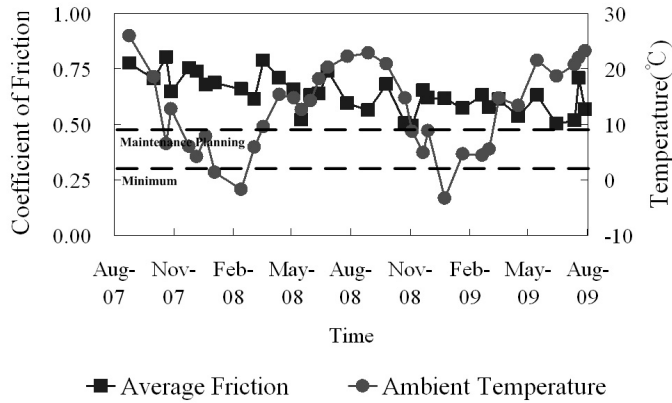


그림 6. 인천공항 활주로의 일평균 항공기 착륙 횟수

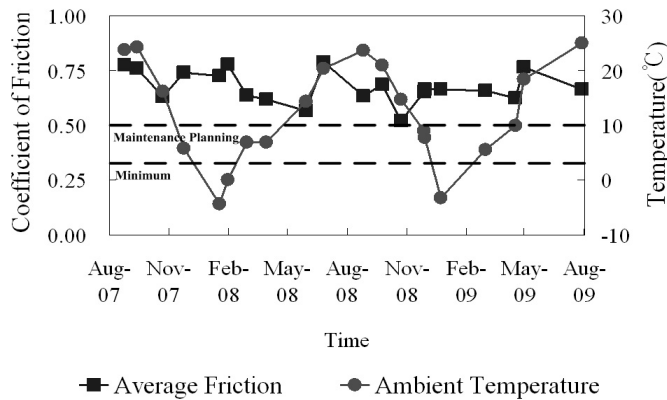
4.1 마찰계수 측정결과

2007년 8월 부터 2009년 7월까지 인천국제공항 제 2활주로의 15L과 33R에서 마찰계수 자료에 대하여 98km/h로 측정된 데이터에 대하여 분석을 실시하였고, 항공기가 집중적으로 착륙하는 집지구역의 착륙분포를 고려하여 단부로부터 300m~700m 사이의 아스팔트 포장구간 데이터의 평균값을 분석하였으며, 측정 당시의 대기온도 또한 살펴보았다. 33R은 그림 6에서와 같이 일 평균 착륙횟수가 155회 정도로 약 2주에 한번씩 마찰계수가 측정되었고, 2~3개월에 한번씩 고무퇴적물 제거 작업이 수행되었다. 15L은 1~3개월에 한번

씩 마찰계수가 측정되었으며, 3~6개월에 한 번씩 고무퇴적물 제거 작업이 수행되었다.



(a) 제 2활주로 33R 지역



(b) 제 2활주로 15L 지역

그림 7. 제 2활주로 착륙지점의 평균 마찰계수 및 대기온도

그림 7은 제 2활주로(33R-5L) 착륙 지점의 평균 마찰계수와 대기온도를 나타낸 것으로 조사기간 동안 마찰계수는 고무퇴적물 제거 작업 후에 어느정도 상승하였지만, 전체적인 경향은 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 5월에서 11월 사이의 즉 대기온도가 비교적 높을 때 마찰계수의 변화는 고무퇴적물 제거 후 마찰계수의 감소율이 매우 급격하였으나, 겨울철에는 기후조건 등의 이유로 고무퇴적물 제거 작업이 이루어지지 않았음에도 마찰계수의 변화율이 매우 적었다. 이는 겨울철에는 항공기 착륙 시 마찰열이 여름과 비교해 상당히 낮아 고무퇴적물 누적이 상대적으로 적었기 때문에 마찰계수 변화가 거의 없다고 추정되며, 사계절이 뚜렷한 대한민국 기후에서는 FAA 및 ICAO 마찰 측정 및 고무퇴적물 제거 기준에 대하여 재검토를 할 필요가 있다 사료된다.

4.2 결과비교 및 분석

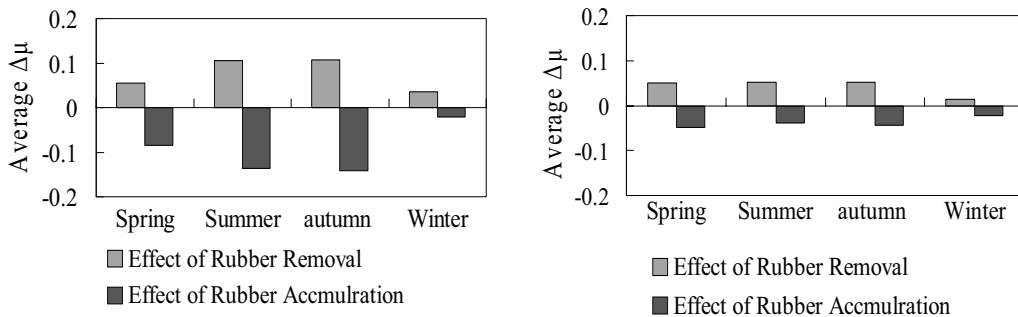
제 2활주로(33R-15L)의 착륙지점이 아닌 활주로 가운데 B구간은 항공기 착륙에 의한 고무퇴적물 누적이

착륙지역보다 낮은수준으로 누적되며 항공기 착륙으로 인한 포장 표면의 파손이 거의 없는 구간으로 항공기 주행으로 인하여 마찰계수값이 저하되는 구간이다. 제 2활주로 33R 및 15L의 착륙지점과 B구간의 마찰계수 변화량의 차이를 3개월 단위로 표 4와 같이 구분하여 고무퇴적물 제거 및 누적에 대한 효과를 비교 분석한 결과, 2009년 12월-2009년 2월 사이의 제 2활주로(33R-15L)의 착륙지점의 마찰계수 변화량이 가장 적었다.

표 3. 고무퇴적물 제거 및 누적에 따른 마찰계수 변화량

	33R		15L	
	고무퇴적물 제거로 인한 마찰계수 변화량	고무퇴적물 누적에 의한 마찰계수 변화량	고무퇴적물 제거로 인한 마찰계수 변화량	고무퇴적물 누적에 의한 마찰계수 변화량
2007.09-2007.11	0.074	-0.177	0.054	-0.088
2007.12-2008.02	0.028	-0.011	0.018	-0.044
2008.03-2008.05	0.085	-0.084		-0.030
2008.06-2008.08	0.077	-0.143	0.105	-0.036
2008.09-2008.11	0.140	-0.107	0.049	
2008.12-2009.02	0.024	-0.031	0.009	-0.001
2009.03-2009.05	0.045	-0.084	0.101	-0.068
2008.06-2008.08	0.135	-0.130		-0.042

계절별 고무퇴적물 제거 및 누적 효과가 마찰계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 계절별로 표 3의 마찰계수 변화량의 평균(Average $\Delta\mu$)을 살펴보았으며 그 결과는 그림 8과 같다. 다른 계절에 비하여 겨울철 마찰계수 변화량의 폭이 가장 적었으며, 항공기 착륙횟수가 더 많은 33R에서 그 경향이 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 고무퇴적물 제거로 인한 마찰계수 증가량에 비하여 고무퇴적물 누적으로 인한 마찰계수 감소량이 더 큰 것으로 보아, 활주로의 마찰계수 값이 점차 감소하고 있음을 알수있었다.



(a) 제 2활주로 33R 지역

(b) 제 2활주로 15L 지역

그림 8. 계절별 고무퇴적물 누적 및 제거 효과에 따른 마찰계수 변화

5. 결 론

본 연구에서는 공항포장의 마찰기준에 대한 문헌조사를 실시하여 FAA 및 ICAO 기준을 살펴보았으며, 인천국제공항의 제 2 활주로 33R 및 15L의 항공기 착륙지점의 마찰계수 측정결과로부터 다음과 같은 결론을



도출하였다.

- (1) 인천국제공항의 각 활주로의 착륙 빈도자료를 수집하여 분석한 그 결과 제2 활주로 33R지역의 항공기 착륙이 가장 빈번하였다.
- (2) 인천국제공항 제 2 활주(33R-15L)로 착륙 구간의 마찰계수는 고무퇴적물 제거 작업 후에 어느 정도 상승하였지만, 전체적으로 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 겨울철에는 기후조건 등의 이유로 고무퇴적물 제거 작업이 이루어지지 않았음에도 마찰계수의 변화율이 매우 적었다. 이는 겨울철에는 항공기 착륙 시 마찰열이 여름과 비교해 상당히 낮아 고무퇴적물 누적이 상대적으로 적었기 때문에 마찰계수 변화가 거의 없었다고 추정되며, 사계절이 뚜렷한 대한민국의 기후에서는 FAA와 ICAO의 마찰계수 측정 및 고무퇴적물 제거 기준에 대하여 국내 실정에 맞는 합리적 기준개발이 필요하다고 생각된다.
- (4) 제 2활주로 양 단부 착륙지점과 주행구간인 B구간 마찰계수 변화량의 차이를 3개월 단위로 구분하여 고무퇴적물 제거 및 누적에 대한 효과를 비교 분석한 결과, 겨울철이 다른 계절에 비하여 마찰계수에 미치는 영향이 크지 않음을 확인하였다.

참고 문헌

박태순 (2001), “건식그루빙을 사용한 공항 활주로의 마찰 및 수막현상 특성평가”, 한국도로포장학회지, 제 3권 3호, pp.111~118.

이선구 (2002), 활주로 포장상태에 따른 마찰력 변화에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.

유승권 (2003), “공항 포장의 그루빙 설치기준”, 도로 포장공학회지 제5권 제2호, pp. 33~43.

한국공항공단(2000), 활주로 그루빙 설치 타당성 종합보고서.

Federal Aviation Administration (1997), AC 150/5320-12C.

ICAO (1999), ANNEX 14 VOLUME 1 AERODEOME DESIGN AND OPERATIONS, 3rd.

Speidel, D. J. (2002), “Airfield Rubber Removal”, Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference.

Hall, J. W. et al. (2006) *Guide for Pavement Friction*, Final Guide, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Henry, J.J. (2000) “Evaluation of Pavement Friction Characteristics,” *NCHRP Synthesis 291*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C.

Meyer, W.E. (1982) *Synthesis of Frictional Requirements Research*, Report No. FHWA/RD-81/159, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.

Toan, D. V. (2004), “Runway Friction Performance in NZ”, Beca Infrastructure Ltd, Auckland, New Zealand.