

공항 PMS 구축을 위한 콘크리트 포장 FWD 조사 기준 수립 연구

Establishment of FWD Measurement Guideline for Development of Airport PMS in Concrete Pavement

양홍석* · 엄병식** · 권수인*** · 송종복****

Hong S. Yang · Byoung S. Eom · S.A. Kwon · Jong B. Song

1. 서 론

포장의 구조적 능력은 포장체가 일정 기간동안 교통 하중을 수용할 수 있는 능력으로서 표면결함과 더불어 공항 포장 평가의 중요 기준이 된다. 포장의 구조적 능력 측정 방법은 파괴 방법과 비파괴 방법으로 구분된다. 파괴 방법은 현장에서 채취된 코아에 대해 간접인장강도(Indirect Tensile Test) 시험을 실시하여 휨강도를 추정하고 추정된 휨강도와 노상반력계수(K-Factor), 코아 두께를 설계 차트에 입력하여 허용하중을 결정하는 방법이고 비파괴 방법은 FWD(Falling Weight Deflectometer)와 같은 포장 상태 자동 측정 장비를 이용하여 일정 하중 재하시 처짐량 값을 획득하여 역산(Backcalculation)과 구조해석을 통하여 탄성계수와 응력을 산출하고 피로 방정식에 대입하여 잔존 수명 및 허용하중을 결정하는 방법이다. 기존에는 파괴 방법을 이용하여 포장의 구조적 능력을 평가하였지만 최근에는 포장 평가에 역학적 방법이 도입되고 파괴 방법이 코아 채취로 인한 기존 포장을 파괴해야 하는 단점을 내포하고 있기 때문에 대부분 비파괴 방법으로 포장의 구조적 능력을 평가하고 있다.

포장체의 처짐량을 측정하는 방법은 하중 재하 방식에 의해 정적 하중 재하 방법, 진동 하중 재하 방법, 충격 하중 재하 방법으로 구분된다. FWD는 충격 하중 재하에 의한 처짐량 측정방법의 대표적인 장비로서 일정 하중을 충격 완화 장치를 갖춘 재하판에 낙하시켜 그때의 충격하중에 의한 포장체의 처짐량을 측정하는 장비이다. 기존의 처짐량 측정 장비인 Benkelmann Beam, Dynaflect, Deflectograph 등에 비해 FWD 충격하중이 실제 교통하중을 가장 잘 모사하기 때문에 최근 들어 거의 모든 기관에서 처짐량 조사 장비를 FWD로 대체하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 FWD를 이용하여 효율적으로 공항 포장의 구조적 능력을 측정하기 위해 FWD의

* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원(031-910-0541, freemind@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원(031-910-0541, bseom@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원(031-910-0174, sakwon@kict.re.kr)

**** 정회원 · 한국공항공단 토목처 과장 (02-660-2333, sjb@airport.co.kr)



조사 방법 및 조사 간격 등 FWD 조사 기준을 수립하고 향후 공항 PMS 구축을 위한 데이터 베이스 기초 자료로 활용하는데 목적이 있다.

2. FWD 조사 방법

FWD의 조사방법은 전술했듯이 일정 하중을 자유 낙하시켜 포장 표면의 처짐값을 측정하는 것이다. 처짐량 값을 측정하는 센서는 일반적으로 30cm 간격으로 7개를 설치하지만 조사 목적에 따라 임의로 조정이 가능하다. 각 센서에서 측정된 처짐량을 선으로써 연결하면 처짐 곡선을 만들어 낼 수 있는데 그 처짐 곡선의 모양이 Basin과 같다고 하여 Deflection Basin이라고 한다(그림 1 참조). Deflection

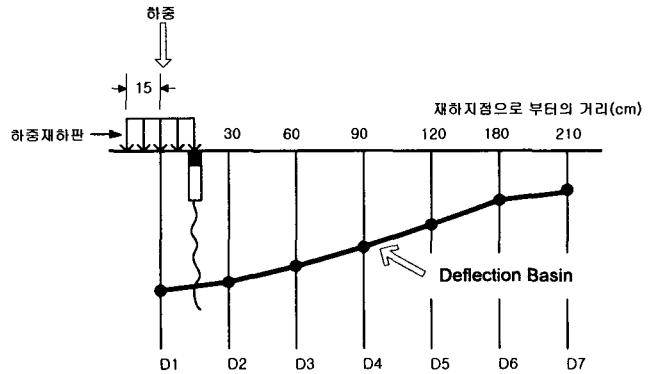


그림 1. 하중전달효과 조사 방법 및 Deflection Basin

Basin은 포장체를 구성하고 있는 포장체 각각의 단단함(탄성계수)에 따라서 그 모양이 다양하게 나타나기 때문에 분석기는 역산을 통하여 탄성계수를 추정할 수 있다.

콘크리트 포장의 경우 탄성계수 외에 하중전달효과(LTE : Load Transfer Efficiency)에 의해 구조적 능력이 평가된다. 하중전달효과는 그림 1과 같이 줄눈부에 하중 재하판을 접지시키고 측정하며 하중이 재하된 슬래브의 처짐량(D1)과 하중이 재하되지 않은 슬래브의 처짐량(D2) 비로 계산된다.

FWD 측정 결과물은 그림 2와 같은 텍스트 파일(확장자 fwd)로 출력되며 측정 날짜, 센서 위치, 하중 재하 수준 및 처짐량 등이 표시된다.

FWD 처짐량은 재하 하중 및 측정시 온도에 영향을 받기 때문에 이에 따른 하중보정 및 온도보정을 실시하여야 한다. 하중 보정은 도로의 경우 등가 단축 하중이 18kips(8.2ton)이므로 하중 수준을 2.5, 4.1, 5ton으로 하여 3개 수준의 처짐량을 외삽하여 4.1ton으로

Distance	Imp	Load	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Av	Pave
0	2	10818	134	125	127	124	117	109	98	87	76	21.8	25.4
0	3	8232	108	101	101	100	95	86	79	69	62	21.8	25.4
0	4	5195	71	59	56	56	52	54	50	44	39	21.8	25.4
3	2	10756	125	116	116	112	106	98	89	80	69	23.9	25.5
3	3	8300	104	94	94	95	87	79	71	63	52	23.9	25.5
3	4	5256	66	60	60	61	55	50	45	38	35	23.9	25.5
7	2	10529	123	114	114	112	107	96	86	76	66	23.2	25.1
7	3	8176	98	92	90	90	84	76	68	61	53	23.2	25.1
7	4	5191	64	58	58	57	53	49	42	37	33	23.2	25.1
11	2	10332	116	108	109	107	100	90	79	71	62	23.6	25.1
11	3	8293	94	86	86	85	79	71	64	55	49	23.6	25.1
11	4	5243	61	55	54	54	50	45	40	34	30	23.6	25.1
15	2	10522	122	113	113	112	107	96	86	76	66	23.7	25.6
15	3	8156	92	83	82	81	75	66	57	48	40	23.7	25.6
15	4	5148	65	57	57	56	51	46	41	35	31	23.7	25.6
18	2	10528	124	115	117	116	110	97	89	82	71	23.7	25.6
18	3	8275	101	92	92	93	87	78	71	65	59	23.7	25.6
18	4	5222	66	59	60	59	55	50	45	40	36	23.7	25.6

그림 2. FWD 측정 결과물



보정한다. 그러나 공항의 경우 각 공항의 설계 항공기의 륜하중을 기준으로 하중 보정을 실시해야 하지만 국내 대표 기종인 B737의 륜하중이 약 30,000lbs(13.6ton)이고 FWD 장비가 반영구적으로 사용할 수 있는 한계 하중 수준이 10ton임을 감안하여 하중 수준을 5.0, 8.1, 10ton으로 하여 3개 수준의 처짐량을 외삽하여 10ton으로 보정한다. 온도보정은 일반적으로 20℃(68°F)로 보정한다.

3. FWD 조사 기준 수립

FWD를 이용하여 포장의 구조적 능력을 평가할 경우 적절한 조사간격 결정이 선행되어야 한다. 조사간격이 짧으면 현 포장의 구조적 능력을 정확히 파악할 수 있는 장점이 있지만 조사물량이 많아져 포장 평가 기간이 길어지는 단점이 있다. 반면, 조사간격이 넓으면 조사결과의 대표성이 떨어지고 현 포장의 구조적 상태와 상이한 결과를 도출하여 부정확한 포장평가가 이루어질 가능성이 크다.

국내의 경우 공항포장의 구조적 지지력은 FWD를 이용하여 평가하고 있지만 FWD 조사 기준이 수립되어 있지 않고 조사 목적과 해당 관리 기관의 특성에 따라 임의적으로 정해지고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 외국에서 제시한 FWD 조사 기준 고찰과 국내 현장 조사 및 분석을 통하여 국내 공항 활주로 및 계류장(Apron)에 대한 FWD 조사 기준을 수립하였다.

3.1 외국의 FWD 조사 기준

ASTM(American Society for Testing and Material)에서 제시하는 FWD 조사 기준은 다음과 같다.

- Level 1 : 전반적인 포장 상태를 파악하기 위해 500~1,000ft(200~500m) 간격으로 측정한다.
- Level 2 : 덧씌우기 설계 등 일반적인 포장상태 분석을 위해 100~500ft(25~200m) 간격으로 측정한다.
- Level 3 : 줄눈 효율 분석, 슬래브 지지력 평가 등의 세부적인 포장상태 분석을 위해 10~100ft(3~25m) 간격으로 측정한다.

AFM(Air Force Manual) 규정에서의 제시하는 FWD 조사 기준은 다음과 같다.

- 활주로 및 유도로는 중앙선을 따라 좌우 메인 기어를 바꿔 가며 매 31m 마다 시험을 실시한다. 아스팔트 포장인 경우 보통 중앙선에서 3~3.5m를 떨어져 시험을 하고 콘크리트 포장인 경우는 슬래브 중앙에서 시험을 실시한다.
- 계류장(Apron)은 31~61m 정도의 격자 형태로 시험을 실시한다.
- 하나의 동결성 구간에는 최소한 3번의 시험이 실시되어야 한다.
- 콘크리트 포장에서 하중전달효과 조사는 전체 시험의 최소 20% 이상을 실시하여야 한다.

3.2 현장 조사

본 연구에서는 FWD 조사 간격을 산정하기 위해 공용연수가 상이한 3개 공항에 대해 FWD 조사를 실시하였다. FWD 조사 세부 내용은 표 1과 같다.



표 1. FWD 조사 세부 내용

조사 공항	포장 형식	공용 연수	조사 구간	조사 간격	
창주공항	무근 콘크리트	10년 미만	활주로	중앙	15m(슬래브 2개)
				끝단	30m(슬래브 4개)
원주공항	무근 콘크리트	10 ~20년	활주로	중앙	15m(슬래브 2개)
				끝단	30m(슬래브 4개)
대구공항	무근 콘크리트	20년 이상	활주로	중앙	15m(슬래브 2개)
				끝단	30m(슬래브 4개)

3.3 공항 PMS에 적용되는 FWD 조사 기준

본 연구에서는 공항 PMS에 적용할 수 있는 FWD 조사 기준을 수립하기 위해 먼저 누적차분법 (Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences)을 이용하여 포장의 구조적인 변동성을 최대한 고려하면서 조사 간격이 가장 넓은 이상적인 FWD 조사 간격을 결정하였다. 이 방법은 측정 최소 길이인 15m의 처짐량 누적차와 30, 60, 90, 120, 150, 300m 측정 간격의 처짐량 누적차를 비교하여 누적차의 형상이 변하는 간격을 측정 한계 거리로 정의하고 측정한계 거리 전 단계의 측정 거리를 FWD 조사 간격으로 결정하는 것이다.

원주공항 활주로 중앙 및 끝단부에서의 15m 처짐량 누적차와 30, 60, 90, 120, 300m 간격의 처짐량 누적차는 그림 3, 그림 4와 같다. 그림에서 보듯이 활주로 중앙부에서는 15m 간격의 처짐량 누적차와

90m까지의 처짐량 누적차는 유사한 형상을 나타내는 반면 90m 이상의 누적차는 상이한 형상을 나타낸다. 또한 활주로 끝단부에서는 조사 간격 60m까지의 누적차는 비슷한 형상을 나타낸 반면 60m 이상의 누적차는 상이한 형상을 나타내고 있다. 따라서, 원주공항 활주로 중앙 및 끝단부의 FWD 조사 간격은

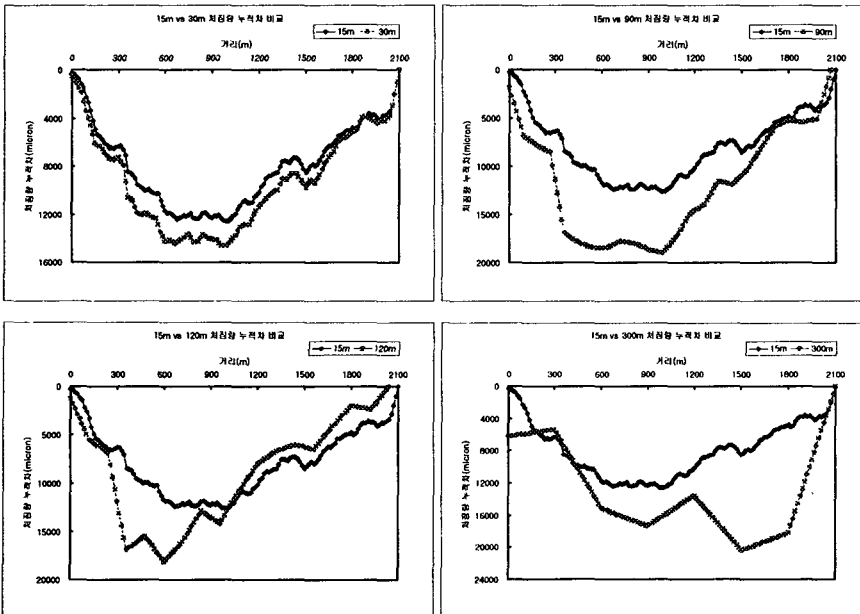


그림 3. 원주공항 활주로 중앙부에서의 누적차 비교

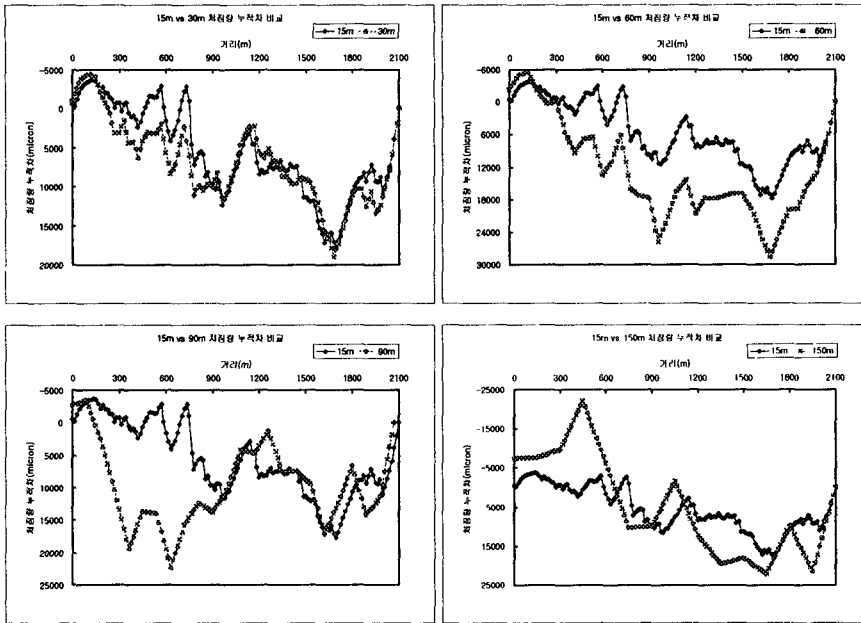


그림 4. 원주공항 활주로 끝단부에서의 누적차 비교

에 영향을 받는 것으로 나타났다. 재령이 10년 미만인 청주 공항의 경우 활주로 중앙 및 끝단 모두 FWD 조사간격은 120m로 나타났으며 포장 재령 10년~20년인 원주공항과 20년 이상인 대구공항의 경우 활주로 중앙 및 끝단 모두 90m로 나타났다. 다만 균열 발생이 심하고 치짐량 변동차이가 큰 원주공항 활주로 끝단의 경우 FWD 조사간격이 60m로 나타났다. 따라서, 공항포장 활주로에서의 FWD 조사간격은 포장 재령 10년 미만인 공항은 120m, 포장 재령 10년 이상인 공항은 90m이고 균열 발생이 심한 구간은 60m로 하였다.

각각 90, 60m이다. 원주공항 활주로 끝단부의 경우 종방향 균열이 연속적으로 발생되어 있어 치짐량의 변동폭이 크기 때문에 활주로 중앙보다 FWD 조사간격이 짧게 나타난 것으로 판단된다.

위와 같은 과정을 청주, 대구공항에 확대 적용한 결과는 표 2와 같다.

분석 결과 FWD 조사간격은 포장 재령, 치짐량 변동차 및 균열 발생 여부

표 2. FWD 조사간격 분석 결과

조사 공항	재령	조사위치	최소 조사간격	중앙 치짐량(micron)	FWD 조사간격(누적차분법 결과)
대구공항	20년 이상	활주로 중앙	15m	100~200	90m
		활주로 끝단	30m	100~200	90m
원주공항	10~20년	활주로 중앙	15m	100~250	90m
		활주로 끝단	15m	100~600	60m
청주공항	10년 미만	활주로 중앙	15m	100~180	120m
		활주로 끝단	30m	100~170	120m

외국 ASTM 및 AFM 규정과 국내 공항에서의 현장조사 결과를 근거로 하여 국내 공항의 FWD 조사 기준을 표 3과 같이 수립하였다.



표 3. 국내 공항에서의 FWD 조사 기준

조사구간	조사 내용	조사 간격	조사 방법	비 고
활주로	중양	재령 10년 이상 : 90m	중앙부를 따라 좌우를 바꿔가며 실시	○ 처짐량 조사는 동질성 구간에서 최소 3회 이상 실시한다. ○ 활주로 양쪽 끝 300m구간(A traffic)은 최소 3회 이상 처짐량 조사 및 하중전달효과 조사를 실시한다. ○ 균열발생이 심한 구간은 조사 간격을 줄인다.
		재령 10년 미만 : 120m		
	끝단	처짐량 조사의 20%이상	줄눈부에 재하판을 접지시킨 후 실시	
		재령 10년 이상 : 90m	끝단을 따라 일방향으로 실시	
계류장	재령 10년 미만 : 120m	줄눈부에 재하판을 접지시킨 후 실시		
	처짐량 조사의 20%이상			
계류장	처짐량	계류장의 크기에 따라 30~60m	격자형으로 실시	○ 균열발생이 심한 구간은 조사 간격을 줄인다.
	하중전달효과	처짐량 조사의 20%이상	줄눈부에 재하판을 접지시킨 후 실시	

콘크리트 포장에서 FWD를 이용하여 구조적 능력을 평가할 경우에는 FWD 처짐량 조사와 하중전달효과 조사를 실시하여야 한다. 하중전달효과는 처짐량 조사가 실시되는 5개 슬래브당 1회 이상(최소 20%) 실시하여야 하며 하중 재하판을 반드시 줄눈부에 접지시키고 조사하여야 한다. 처짐량 조사는 그림 5와 같이 활주로 중앙부에서는 좌·우 번갈아 가며 조사하여야 하며 끝단부에서는 일방향으로 조사한다. 균열 발생이 심한 구간에서는 표 3에서 제시한 조사 간격보다 짧은 간격으로 조사한다. 거리가 짧은 활주로 양쪽 끝 300m(A traffic) 구간에서는 자료의 대표성을 위하여 최소 3회 이상의 처짐량 및 하중전달효과 조사를 실시하여야 하며 계류장에서는 계류장의 크기에 따라 30~60m 간격으로 격자형으로 처짐량 및 하중전달효과 조사를 실시한다.

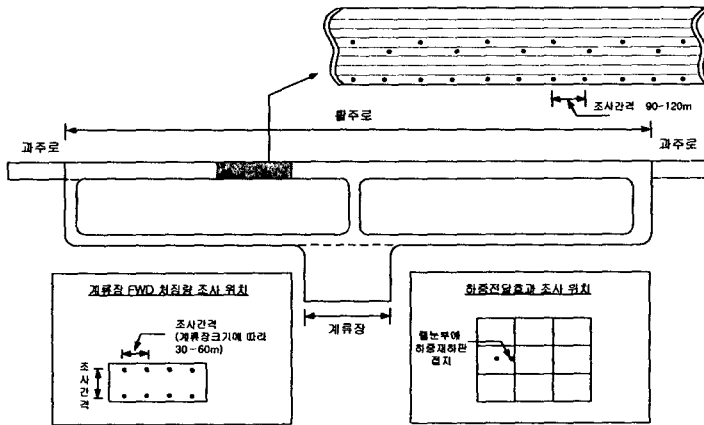


그림 5. FWD 조사 기준

4. 공항 PMS 데이터 베이스 연계

FWD 조사 따라 얻어진 처짐량 자료는 평가 당시 물성치(탄성계수, 하중전달효과, K값)를 파악하기



위해서 사용된다. 그러나 이러한 물성치는 역산 방법에 따른 변동성, 온도 변화 및 계절 등에 영향을 받는데 현재까지는 아무런 보정없이 사용되고 있으며 이를 개선하기 위한 연구가 진행되지 않고 있다. 따라서, 공항 PMS의 구조적 능력 데이터 베이스를 표 4와 같이 당해연도 포장평가에 사용된 값은 분석자료(물성치-탄성계수, 하중전달효과, K값)로, 향후 연구를 위한 자료는 원시자료(처짐량)로 구분하여 설계하였다.

<표 4> 공항 PMS 데이터 베이스 내의 FWD 자료 목록

자료 목록	사용 목적	표시 예	비고
조사 일자 및 시간	슬래브 평균 온도 추정	2001.7.3 18:00	
조사 위치	위치 파악	R1- 100m	
포장재 온도, 대기온도	슬래브 평균 온도 추정	32℃	○ 향후 공항별 DB 구축후 처짐량 변동 분석
각 센서의 처짐량	탄성계수 및 하중전달 파악	300(micron)	
재하 하중 크기	탄성계수 및 하중전달 파악	10000(kgf)	
하중 재하 위치	하중전달 또는 탄성계수 추정 구분	슬래브 중앙, 조인트	
추정된 탄성계수, K값	조사 당해연도에 추정된 탄성계수, K값	4,000,000 psi, 100 pci	○ 포장평가 목적 이용
하중전달효과	조사 당해연도에 사용된 하중전달효과	80%	

5. 결 론

본 연구의 범위 내에서 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 공항에서 포장의 구조적 능력은 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 측정한다. FWD 재하판의 직경은 30cm이고 처짐량 측정 센서 최소 7개이고 하중 재하판 중심으로부터 30cm 간격으로 이격되어 위치한다. FWD 처짐량은 재하 하중 및 측정시 온도에 영향을 받기 때문에 이에 따른 하중보정 및 온도보정을 실시하여야 한다. 하중 보정은 하중 수준을 5.0, 8.1, 10ton으로 하여 3개 수준의 처짐량을 외삽하여 10ton으로 보정하며 온도보정은 일반적으로 20℃(68°F)를 기준으로 한다.
- (2) FWD 조사간격은 포장 재령, 처짐량 변동차 및 균열 발생 여부에 영향을 받는 것으로 나타났다. 재령이 10년 미만인 청주 공항의 경우 활주로 중앙 및 끝단 모두 FWD 조사간격은 120m로 나타났다으며 포장 재령 10년~20년인 원주공항과 20년 이상인 대구공항의 경우 활주로 중앙 및 끝단 모두 90m로 나타났다. 다만 균열 발생이 심하고 처짐량 변동차이가 큰 원주공항 활주로 끝단의 경우 FWD 조사간격이 60m로 나타났다.
- (3) 국내 공항에 적용할 수 있는 FWD 조사 기준은 다음과 같다.
 - FWD를 이용하여 콘크리트 포장의 구조적 능력을 평가할 경우에는 처짐량 및 하중전달효과 조사를 실시한다.
 - 하중전달효과는 처짐량 조사가 실시되는 5개 슬래브당 1회 이상(최소 20%) 실시하여야 하며



하중 재하판을 반드시 줄눈부에 접지시키고 조사하여야 한다.

- 활주로 중앙부에서 처짐량 조사는 좌·우 번갈아 가며 조사하며 끝단부에서는 일방향으로 조사한다.
- 균열발생이 심한 구간에서는 (2)에서 제시한 조사간격보다 줄여서 조사한다.
- 거리가 짧은 활주로 양쪽 끝 300m(A traffic) 구간에서는 자료의 대표성을 위하여 최소 3회 이상의 처짐량 및 하중전달효과 조사를 실시한다.
- 계류장에서는 계류장의 크기에 따라 30~60m 간격으로 격자형으로 처짐량 및 하중전달효과 조사를 실시한다.

(4) FWD 조사자료는 공항 PMS 데이터베이스 내에서 분석자료(물성치-탄성계수, 하중전달효과)와 원시자료(처짐량)로 구분하여 설계하였다. 분석자료는 당해연도 포장평가에 사용된 값이고 원시자료는 향후 연구를 위한 자료이다.

5. 참고 문헌

1. D 4695-96 Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements., ASTM.
2. Airfield Pavement Evaluation Technical Instruction, US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1999
3. FWD に関する研究 (その 2) pp 69~85, FWD 研究會, 1995
4. AASHTO, "AASHTO GUIDE FOR Design of Pavement Structures 1993" appendix J1~J4,