



# 공항 콘크리트 포장의 피로모형 개발 연구

## Development of Fatigue Model for Airfield Concrete Pavement

권 수 안\*      양 흥 석\*\*      서 영 찬\*\*\*  
 Kwon, Soo-Ahn      Yang, Hong-Seok      Suh, Young-Chan

### Abstract

There are two methods in estimating the remaining life of in-service airfield concrete pavement. They are a method simply using the past accumulated traffic and a method using the theoretical mechanistic analysis. Since the former method is somewhat far from the actual condition, the latter method is widely used by most engineers and researchers.

The most essential component of the latter method is the fatigue model of the concrete slab. A fatigue model for airfield concrete pavement is developed in this study by a series of fatigue tests using 30 concrete cylinder specimens obtained from a 10 year old in-service airfield concrete slab. Strengths for the stress ratio calculation were obtained from the split tensile test of the cores sliced. Fatigue test mode was repeated split tensile test. The R2 of developed fatigue model was 0.5.

Specimens taken from another airport had been tested for validation of the model. The results showed a good fit to the model. It was also found that the fatigue life predicted from the model was a little greater when the stress ratio is greater than 80 percent than other fatigue models developed earlier in America.

*Keywords : fatigue model, airfield pavement, concrete pavement, remaining life*

### 요 지

공용중인 공항 콘크리트 포장의 잔존수명을 추정하는 방법은 크게 과거의 누적 교통량을 고려하는 방법, 이론적 해석을 통한 역학적 방법 등 두 가지로 구분할 수 있다. 단순히 과거의 누적교통량을 이용하는 방법은 노후포장의 잔존수명을 추정하기에는 현실과 많은 차이가 있기 때문에 최근들어 많은 연구자들은 역학적 해석에 의한 방법을 많이 채택하고 있다. 역학적 방법에서 피로식은 잔존수명산출의 핵심을 이루는 것으로서 그 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 국내 공항 콘크리트 포장의 피로식을 개발하기 위한 연구이다. 이를 위하여 재령이 10년된 공항을 선정하여 30개의 코어시료를 채취하여 피로시험을 실시하였다. 피로실험은 쪼갬인장 모드를 이용하여 수행하였으며 응력

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원  
 \*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원  
 \*\*\* 정회원 · 한양대학교 교통공학과 교수



비 산정을 위한 기준 강도도 코어시료의 쪼갬인장강도를 통해 얻었다.

본 연구에서 얻은 피로식의 상관계수값은 0.5였으며, 이 모델을 검증하기 위해 다른 공항에서 채취한 시료를 이용하여 실험을 수행하였으며 실험결과는 본 연구에서 제시된 피로식에 크게 벗어나지 않는 것을 확인하였다. 본 피로식을 기존의 외국 연구와 비교한 결과 응력비가 80%이상인 구간에서는 피로수명이 약간 큰 것으로 나타났다.

**핵심용어 : 피로모형, 공항 포장, 콘크리트 포장, 잔존수명**

### 1. 연구개요

공용중인 공항 콘크리트 포장의 잔존수명을 추정하는 방법은 크게 단순 과거 교통량의 누적을 이용하는 방법과 피로식에 근거한 역학적 해석방법 등 두 가지로 구분할 수 있다. 단순 교통량의 누적을 이용하는 방법은 포장을 평가하여 잔존수명을 추정하기에는 현실과 많은 차이가 있기 때문에 최근들어 많은 연구자들은 피로식에 근거한 역학적 방법의 활용을 많이 채택하고 있다. 역학적 방법에서 콘크리트 포장의 구조적 잔존수명 산출을 위한 피로식에 들어가는 인자로는 포장체의 탄성계수, 강도 및 포장에 가해지는 응력이 사용된다.

포장체의 강도 및 응력을 추정하기 위해서는 다양한 실내실험, 현장실험 그리고 포장구조해석 등을 수행하여야 한다. 이 응력 및 강도는 식 (1)의 형태와 같은 피로식을 통하여 포장체의 하중반복가능 횟수를 산정하며, 하중반복가능 횟수가 산정되면 wandering의 고려요소인 P/C(Pass to Coverage) 비를 이용하여 사용 가능한 항공기의 통과횟수를 추정하고, 이를 통해 포장체의 잔존수명을 산정하는 것이 공항 포장에서 역학적 방법에 따른 일반적인 절차이다.

$$N_f = K_f \left(\frac{\sigma}{f}\right)^c \quad (1)$$

여기서,  $N_f$  : 반복하중수  
 $K_f, c$  : 상수  
 $\sigma$  : 응력  
 $f$  : 강도

콘크리트 포장의 피로는 골재 및 혼합물의 특성 그

리고 주어진 환경여건에 따라 틀려질 수 있으므로 해당환경에 적합한 피로식을 개발하는 것은 매우 중요하다. 기존에 개발된 피로식들은 주로 새로 제작된 시료를 이용하여 실내에서 개발된 것이지만, 본 연구에서는 공용중인 공항 콘크리트 포장체의 잔존수명을 추정하기 위한 논리를 개발하는 것이므로 공용중인 콘크리트 포장체에서 채취된 시료를 이용하여 피로식을 개발하고자 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 실험 모드

기존에 수행되어 왔던 피로 실험들은 표 1과 같이 주로 신설포장재료를 이용하여 빔 피로실험 모드로부터 개발되어 왔다(NHI, 1994 ; Packard, 1984 ; McCullough, 1997). 최근들어 텍사스 교통연구소(CTR)의 McCullough(1997)는 쪼갬인장 모드로 피로실험을 수행하여 기존 피로 모형과 큰 차이가 없음을 보여주었으며, 신설포장재료와 공용중인 재료와의 피로실험 결과는 별다른 차이가 없음을 나타내었다.

표 1. 기존 피로모형의 실험 모드

개발자	실험공시체	실험 모드	실험범위(응력비)	기타
Darter	빔	휨 강도	0.45 이상	신설포장재료
Packard	빔	휨 강도	0.45 이상	신설포장재료
McCullough	원형	쪼갬인장강도	0.6~0.9	공용된 재료
본 연구	원형	쪼갬인장강도	0.6~0.95	공용된 재료



또한 기존의 연구에서 응력비가 0.5이하인 경우에는 피로에 대한 손상을 입지 않는다는 것이 입증되었으며, 주로 응력비 0.45~0.9의 범위에서 수행된 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 공용중인 콘크리트 포장 구조체에서 빔 모양의 시료를 채취할 수 없었으므로 원형의 코아를 채취한 후 쪼갠인장강도 모드로 실험하였으며, 제한된 실험시간을 감안하여 응력비를 0.6~0.9로 하였다.

## 2.2 시료채취

실험대상 공항은 공용중인 포장을 대표하기 위해 재령이 10년 된 국내 한 공항을 선정하였다. 공용중인 포장에서 피로실험에 이용되는 직육면체 모형을 채취하기가 불가능하였으므로 원형공시체를 채취하였다. 코아 채취는 직경 0.15m 코아 채취기를 이용하여 표 2와 같이 활주로 및 유도로 중앙 및 끝단 슬래브에서 교통구역별로 나누어 총 30개의 코아를 채취하였다.

표 2. 현장조사 세부내용

시설물	구 간	포장두께 (m)	수량	비 고
활주로	A traffic	0.4	4	• 임의의 지점 중앙 및 끝단 슬래브에서 코아 채취
	C traffic	0.3	8	
	A traffic	0.4	4	
유도로	평 행	0.4	8	• 중앙 슬래브에서 코아 채취
	직 각	0.3	6	

## 2.3 실내실험

본 연구에서는 현장에서 채취한 원형 코아 시료를 그림 1과 같이 코아 상·하부 0.025m를 절단하여 코아 상부시편에 대해서는 쪼갠인장강도 시험을 실시하고 피로시험은 코아 하부시편에 대해 실시하였다. 이

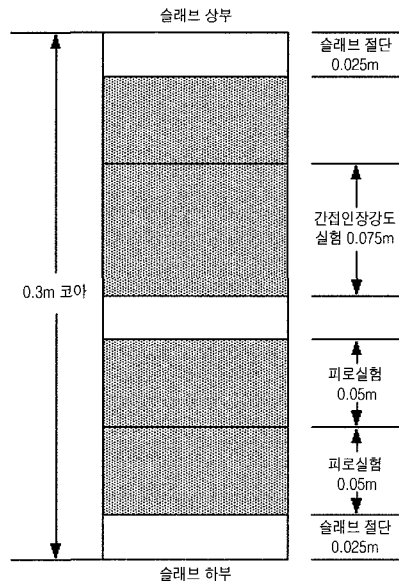


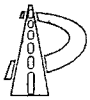
그림 1. 현장 코아의 위치별 용도

것은 일반적으로 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 10% 정도로 콘크리트 파손은 대부분 인장응력에 의해서 발생하는데 포장체에 하중이 재하되면 콘크리트 단면 상부에서는 압축력이 하부에는 인장력이 발생하므로 실제 인장응력을 받는 부분에 대해 피로시험을 실시함으로써 보다 현실적인 피로곡선을 도출하기 위해서였다.

### 2.3.1 쪼갠인장강도 실험

쪼갠인장강도 실험(Indirect Tensile Strength Test)은 ASTM C496-96 "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens"을 기준으로 실시하였다. 위 규정에서는 그림 2와 같이 패킹 스트립( $t/R=1/6$ )을 사용하여 등분 포하중으로 재하하여 실험하도록 하고 있다.

본 연구에서는 식 (2)에 근거하여 쪼갠인장강도를 산출하였다. 피로시험은 콘크리트의 극한인장강도는 하부에서 받으므로 피로시험은 하부의 시료 두 개를 이용하였다.



$$\sigma = \frac{2pt}{\pi R} \left[ 1 - \left( \frac{t}{R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$  : 쏘갠인장강도(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $p$  : 단위 길이 당 최대 등분포하중(kg/cm)  
 $t$  : 패킹 스트립의 폭(cm)  
 $R$  : 공시체의 반지름(cm)

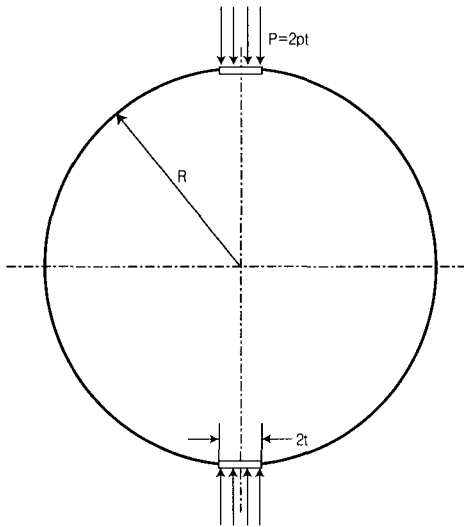


그림 2. 쏘갠인장강도 실험 모드

### 2.3.2 피로실험

콘크리트 코아 피로실험(Fatigue Test)에 대해서는 현재 명확한 규정이 없다. 콘크리트 피로실험은 빔 형태의 시편이 30 Hz 이하의 하중주기에서는 피로강도에 영향을 받지 않기 때문에 일반적으로 1~15 Hz 하중주기로 하버싸인 곡선을 이용하여 실시하였다.

본 연구에서는 코아 하부 0.05m 시편에 대해 하중주기 5 Hz, 하중곡선 하버싸인, 하중재하속도 2ton/min을 기준으로 한 개의 시편에 대해 동일한 응력강도비(sress/strength ratio)를 적용하여 그림 3과 같이 피로실험을 실시하였다. 피로실험 계획표는 표 3과 같으며, 시간이 오래 걸리는 응력강도비가 0.6인 것은 1개씩만 선정하였으며, 피로모형의 흐름을 파악하기 위해 각 응력강도비 수준별로 구분하였다.

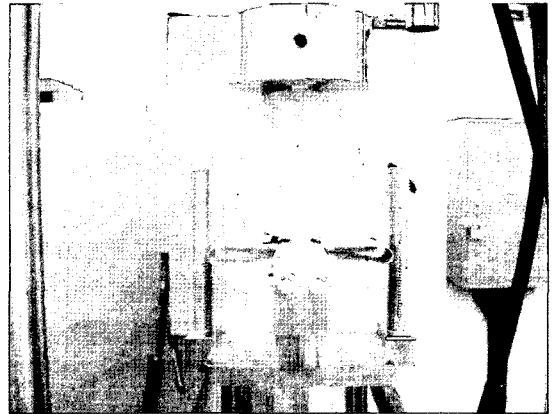


그림 3. 피로실험 전경

표 3. 동질성 구간별 피로실험 세부내용

동질성구간		코아 갯수(개)	응력/강도 비(%)	피로실험 비율(%)	피로실험 표본수(개)
활 주 로	A Traffic	14	95	10	2
			90	30	4
			80	40	5
			70	10	2
			60	10	1
	C Traffic	16	95	10	2
			90	30	5
			80	40	6
			70	10	2
			60	10	1
유 도 로	평 행	16	95	10	2
			90	30	5
			80	40	6
			70	10	2
			60	10	1
	직 각	12	95	10	2
			90	30	3
			80	40	5
			70	10	1
			60	10	1



### 3. 분석 결과

쪼갠인장강도 실험결과 및 피로실험결과를 표 4 및 표 5에 나타내었다. 일부 실험결과는 실험과정 중에 장비운영상 유압장치에 약간의 문제가 발생하기도 하기도 했는데 이때 실험한 시료들은 분석에서 제외하였다.

A 교통구역과 C 교통구역에서의 강도차이는 통계적으로 유의하지 않았으며, 하중반복 수 역시 교통구역에 따른 차이를 확인할 수 없었다. 쪼갠인장강도에 대하여 교통구역 및 시료위치별에 대한 t-검정을 실시한 결과를 표 4 및 표 5에 나타내었다. 본 연구에서 얻은 피로모형 및 자료의 분포도를 그림 4에 나타내었으며, 이를 회귀분석한 결과를 그림 5에 나타내었다.

본 연구 결과를 이용하여 회귀분석을 수행한 결과 상관관계수( $R^2$ ) 값이 0.5로 나타났으며, F값은 37.15, F 값의 유의수준은 0.001로 모형이 유의하다고 판단된다. 또한 계수의 신뢰구간과 검정에 대해서도 t값이 8.99와 -6.10 그리고 t 값의 유의수준이 0.001로 유의하다고 판단된다.

본 연구에서 제시한 피로식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\log N = 10.327 - 8.378\left(\frac{\sigma}{f}\right) \quad (3)$$

- 여기서,  $N$  : 잔존수명
- $\sigma$  : 콘크리트에 작용하는 응력
- $f$  : 콘크리트의 강도

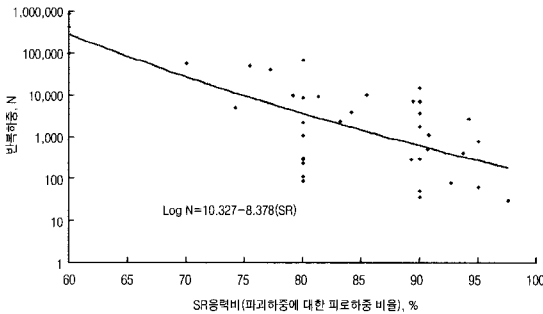


그림 4. 피로실험결과 분포도

Analysis of Variance					
Source	DF	Squares	Sum of Square	Mean F Value	Pr > F
Mode	1	25.13424	25.13424	37.15	<.0001
Error	37	25.03324	0.67657		
Corrected Total	38	50.16748			
Root MSE		0.82254	R-Square	0.5010	
Dependent Mean		3.36978	Adj R-Sq	0.4875	
Coeff Var		24.40934			
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	1	10.32746	1.14911	8.99	<.0001
bi	1	-8.37846	1.37464	-6.10	<.0001

그림 5. 회귀분석결과

모델의 타당성을 확인하기 위해 잔차 분석을 수행한 결과 그림 6과 같이 응력비와 잔차와의 관계에서 별다른 경향을 보이지 않았다.

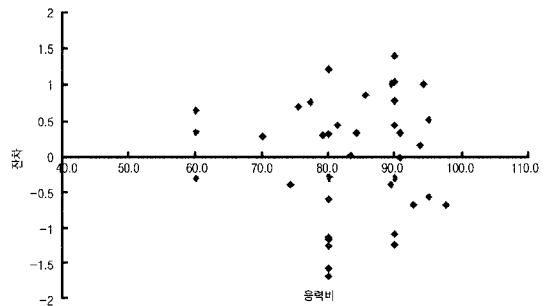


그림 6. 잔차도

### 4. 모델의 검증 및 다른 모형과의 비교

다른 공항의 코아 시료를 이용하여 본 연구에서 개발된 피로식을 검증하여 보았다. 재령이 20여년 이상



표 4. 쪼갬인장강도 실험결과

위 치			시 편 (코아)		쪼 갬 인 장 강 도 실험				
			번 호	반 경 (cm)	두 께 (cm)	파괴하중 (kg)	스트립 폭(cm)	단위길이당 하중(kg/cm)	강 도 (kg/cm <sup>2</sup> )
활주로	A Traffic	중양	R1-1C	7.5	5.13	4036.2	1.5	1345.4	31.4
			R1-2C	7.5	5.19	3722.0	1.5	1240.7	28.6
			R3-1C	7.5	5.37	3482.5	1.5	1160.8	25.9
		단부	R1-1E	7.5	4.69	4049.0	1.5	1349.7	34.5
			R1-2E	7.5	5.00	3664.3	1.5	1221.4	29.3
			R3-1E	7.5	5.00	4020.0	1.5	1340.0	32.1
	C Traffic	중양	R2-1C	7.5	4.86	3964.2	1.5	1321.4	32.6
			R2-2C	7.5	4.48	3964.0	1.5	1321.3	35.3
			R2-3C	7.5	4.22	3033.2	1.5	1011.1	28.7
			R2-4C	7.5	4.70	3120.0	1.5	1040.0	26.5
		단부	R2-1E	7.5	4.96	4052.3	1.5	1350.8	32.6
			R2-2E	7.5	5.33	3683.9	1.5	1228.0	27.6
유도로	평행	중양	PT-1C	7.5	4.69	3267.1	1.5	1089.0	27.8
			PT-2C	7.5	4.76	3526.8	1.5	1175.6	29.6
			PT-3C	7.5	4.81	3999.0	1.5	1333.0	33.2
			PT-4C	7.5	4.88	3456.3	1.5	1152.1	28.3
		단부	PT-1E	7.5	4.74	3133.8	1.5	1044.6	26.4
			PT-2E	7.5	4.93	3793.7	1.5	1264.6	30.7
			PT-3E	7.5	5.00	3902.5	1.5	1300.8	31.2
			PT-4E	7.5	4.46	3191.4	1.5	1063.8	28.6
	직각	중양	T1	7.5	4.76	3239.4	1.5	1079.8	27.2
			T2	7.5	4.93	4692.1	1.5	1564.0	38.0
			T3	7.5	4.78	3835.9	1.5	1278.6	32.0
			T4	7.5	3.98	2381.5	1.5	793.8	23.9
T5			7.5	5.08	4877.6	1.5	1625.9	38.3	
T6			7.5	5.12	3835.4	1.5	1278.5	29.9	

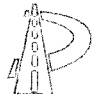


표 5. 피로실험결과

위 치			시편(코아)		피로실험(1회)			피로실험(2회)				
			번 호	직경 (cm)	두께 (cm)	응력비 (%)	피로하중 (kg)	하중 반복수	두께 (cm)	응력비 (%)	피로하중 (kg)	하 중 반복수
활 주 로	A Traffic	중앙	R1-1C	15	4.29	93	3,128.3	80	5.23	95	3,909.1	781
			R1-2C	15	5.09	91	3,310.6	1,124	5.17	90	3,336.9	1,755
			R3-1C	15	4.64	89	2,687.4	288	4.44	80	2,303.5	1,084
		단부	R1-1E	15	4.75	74	3,044.8	5,107	4.89	70	2,955.2	56,098
			R1-2E	15	4.98	100	3,648.3	274	5.07	90	3,344.0	15,317
			R3-1E	15	4.76	85	3,270.9	10,348	4.53	80	2,913.7	-
			R3-2E	15	4.92	75	2,891.5	49,922	4.72	60	2,205.7	879,150
	C Traffic	중앙	R2-1C	15	4.42	77	2,782.2	41,747	4.62	80	3,014.7	320
			R2-2C	15	4.68	103	4,272.6	8	4.97	90	3,957.8	303
			R2-3C	15	4.92	83	2,942.6	2,358	5.40	80	3,105.1	293
			R2-4C	15	-	-	-	-	4.88	80	2,591.6	-
		단부	R2-1E	15	4.76	98	3,796.7	30	4.92	95	3,818.6	2
			R2-2E	15	4.43	91	2,777.2	520	5.36	90	3,334.2	51
			R2-3E	15	5.41	89	2,779.1	7,251	4.66	60	1,606.0	102,000
R2-4E	15	4.85	84	3,604.2	3,980	4.81	70	2,973.8	-			
유 도 로	평행	중앙	PT-1C	15	4.79	60	2,002.1	-	4.44	70	2,165.1	438,150
			PT-2C	15	5.18	108	4,129.3	-	5.17	95	3,639.1	65
			PT-3C	15	4.90	90	3,666.4	6,926	4.74	90	3,546.7	3,658
			PT-4C	15	4.83	89	3,041.6	70,929	4.67	80	2,646.1	2,191
		단부	PT-1E	15	4.67	79	2,442.9	9,839	4.90	70	2,267.7	56,098
			PT-2E	15	5.08	80	3,127.3	115	4.54	80	2,794.9	236
			PT-3E	15	4.70	102	3,729.9	-	4.60	90	3,231.3	36
			PT-4E	15	4.64	80	2,656.2	114,639	4.89	80	2,799.3	70,070
	직각	중앙	T1	15	4.23	94	2,712.8	2,807	5.51	80	2,999.8	8,825
			T2	15	4.90	94	4,371.6	427	4.70	80	3,578.6	89
			T3	15	4.79	70	2,690.7	41,644	4.77	70	2,679.5	-
			T4	15	-	-	-	-	5.04	95	2,865.0	-
T5			15	5.06	102	4,944.4	-	4.55	90	3,931.8	1	
T6			15	4.60	81	2,801.7	9,344	5.07	60	2,278.8	-	

주) 본 실험 결과에서 “-”은 유압 및 장비운영상 문제로 인해 분석을 못한.

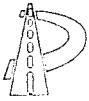


표 6. A, C 교통구역에 대한 쪼갬인장강도의 t-검정결과

구 분	A 교통	C 교통
평균	30.41	30.19
분산	7.65	19.9
t-통계량	0.116	
유의수준	0.05	
p	0.9094	

표 7. 중앙-단부 위치의 쪼갬인장강도의 t-검정결과

구 분	중 앙	끝 단
평균	29.86	30.67
분산	11.56	16.25
t-통계량	-0.42	
유의수준	0.05	
p	0.68	

이 된 공항의 활주로 및 유도로구간에서, 하중 받는 구간의 코아를 채취하여 이전과 동일한 방법으로 피로 실험을 수행한 결과 그림 7과 같았다. 그림 8에서 보는 바와 같이 새로 개발된 모형과 검증실험결과와 유사한 경향을 보였다.

표 1에서 나타낸 기존의 외국피로모형과 본 연구결과를 그림 8에 나타내었다. 본 연구에서 개발된 모형은 전반적으로 외국의 모형과 거의 유사한 경향을 보이나, 응력비가 큰 경우에 피로수명이 다른 모델보다 크게 나타났다. 즉, 응력비가 80% 이전인 구간에서는 외국모형들과 거의 유사하게 나타났으며, 응력비가 80% 이상인 구간에서는 외국의 모형들 보다 잔존수명을 길게 평가하는 모형으로 나타났다. 또한 본 연구와 동일하게 기존포장구조체에서 시료를 채취하여 실험을 수행한 McCollough 연구와는 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다. 그러므로 기존모형과 약간 차이가 있는 이유는 실험 모드의 차이 및 실험대상 시료의 재령으로 추정할 수 있었다.

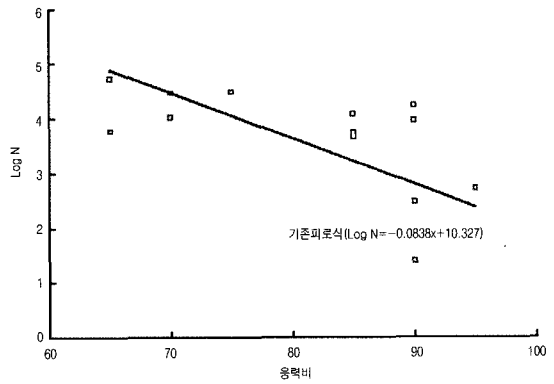


그림 7. 개발된 모형과 검증 피로실험결과

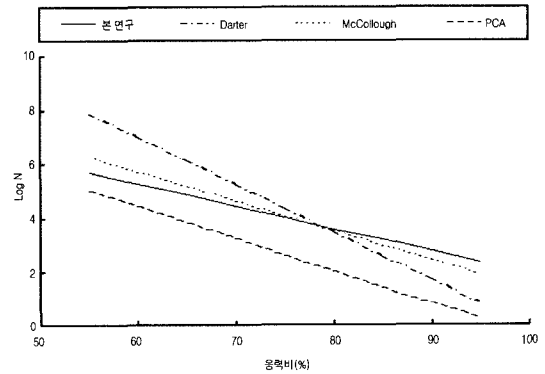


그림 8. 외국모형과의 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 공용중인 공항 콘크리트 포장 구간의 잔존수명을 추정하는데 있어 중요한 역할을 수행하는 피로식을 개발하였다. 이를 위해 현장에서 원형의 공시체를 채취하고 쪼갬인장강도 실험 모드를 이용하여 쪼갬인장강도와 피로실험을 수행하였다. 피로실험 수행을 위한 응력비는 0.6~0.95이었으며, 이를 통한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 피로모형의 개발을 위해 재령이 오래 된 공항에서 코아를 채취하여 쪼갬인장강도 실험을 수행한 결과 하중을 집중적으로 받는 A 교통구역과 C 교통구역에서의 강도차이 구분이 없었다.





.....

(2) 쪼갬인장강도 모드를 이용하여 응력비 0.6~0.95에 해당되는 구간에서의 피로실험을 실시하여 피로모형을 개발하였으며, 이를 다른 공항 및 외국의 모형과 비교한 결과 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구를 추진함에 있어 적극적으로 도와준 토목처 직원분들과 현장 지사의 기술진들 그리고 현장실험시 도움을 주신 한국건설기술연구원 공항 PMS 실험진들에게 진심으로 감사를 드린다.

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었습니다.

### 참고문헌

1. McCullough, B. F.(1997), *Analysis of Remaining Life for Runway 17-35L and taxiway L at DALLAS/FORT Worth International Airport*, ARC-702.
2. National Highway Institute(1994), *Pavement Deflection Analysis*, FHWA-HI-94-021.
3. Packard, R. G.(1984), *Thickness Design for Concrete Highway and Streets Pavements*, Portland Cement Association.
4. Rosler, J. R., Barenbarg, E. J.(1998), *Fatigue of Concrete Beams and Slabs*, Illinois Cooperative Highway and Transportation Research Program, UILU-ENG-98-2006.

〈접수 : 2004. 3. 26〉