

재령과 온도에 따른 콘크리트의 압축강도와 탄성계수에 관한 연구

A Study of the Effect of Aging and Temperature on the Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete

안 남 식*

Ahn, Nam Shik

1. 서 론

현재 국내에서 사용 중인 도로포장 설계기준은 교통하중 및 환경하중 조건이 매우 다른 외국의 설계법을 근거로 하고 있어서, 도로공사 시방서와는 서로 상호 연관성이 결여된 부분이 많아 설계가 제대로 되는 지에 대해 검증할 수 없을 뿐만 아니라, 재료 및 설계가 포장의 공용성과 연결되지 않고 있는 실정이다. 이에 기본적인 설계의 규정을 체계적으로 재료부터 입력변수를 연구하고 설정하여 포장의 공용성과 연계시킬 수 있는 방안이 강구되고 있다. 본 연구는 그러한 포괄적 연구 중 하나로, 국내에서 사용되는 콘크리트 포장재료에 대한 물성 정량화를 위한 재령과 온도에 따른 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 변화에 대한 실험적인 연구이다.

콘크리트는 수화열에 의한 온도변화와 외부의 환경변화에 의해 초기재령에 기계적 특성에 큰 영향을 받으므로 이에 대한 정량화가 절실한 실정이다. 본 연구는 굵은 골재로서 화강암을 사용한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 양생온도(0, 23, 45℃)와 재령(1, 7, 28일)에 따라 비교, 분석하고 관계식을 유도하였다. 온도와 재령을 동시에 고려하기 위해 적산온도(Maturity)의 개념을 도입하였고, 탄성계수의 정량화를 위해 세가지의 다른 시험방법을 사용하여 비교하였다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

온도와 재령에 따른 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 변화를 고찰하기 위한 실험 계획은 표 1과 같다. 적산온도의 인자가 되는 재령과 온도는 각각 세가지의 수준을 변화시켜 실시하였다. 탄성계수 실험의 경우, 스트레인 게이지와 LVDT에 의한 정탄성계수를, Impact Echo 실험에 의한 동탄성계수를 각각 측정하였다.

표 1. 실험계획

구 분	실험 인자	수 준
재 령(일)	1, 7, 28	3
양생온도(℃)	0, 23, 45	3
실 험	압축강도 탄성계수	

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 한국도로공사 중부내륙고속도로 제1공구에 사용되는 포장용 콘크리트의 재료를 이용하였다. 잔골재로는 강모래(질건비중: 2.63, 흡수율: 1.52%, 조립율: 2.87)가 사용되었으며, 굵은 골재는 암종이 화강암(질건비중: 2.76, 흡수율: 0.77%)으로서, 19 mm와 32 mm를 합성하여 고속국도용 포장콘크리트에서 요구되는 입도 분포곡선에 준하여 조정, 사용되었다. 시멘트는 비중 3.15의 H사의 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었다.



2.3 배합설계 및 시험체 제작

본 연구에 사용된 모든 공시체는 표 2와 같은 한국도로공사 중부내륙고속도로 제1공구에 사용되는 포장용 콘크리트의 배합설계에 의해 제작되었다. 설계기준강도는 재령 28일의 휨강도를 기준으로 하였고, 물-시멘트비는 42.3%를 사용하였다.

표 2. 1m³당 콘크리트 배합설계

설계기준 강도 (kg/cm ²)	굵은 골재 최대입경 (mm)	공기량 (%)	단위수량 (kg)	단 위 시멘트량 (kg)	물- 시멘트비 (%)	질 대 잔골재율 (%)	단 위 잔골재량 (kg)	단위굵은골재량 (kg)		단 위 AE표준 감수제 (g)
								32mm	19mm	
45	32	4.5	144	340	42.3	37.7	682	660	532	510

2.4 실험방법

2.4.1 압축강도

일반적으로 크기효과에 의해 시편의 크기가 크면 강도가 작게 되므로(약 10% 이내의 오차) 시편보다 상당히 큰 포장용 콘크리트 슬래브에 대한 압축강도로 사용하기에는 안전하기 때문에, 압축강도용 공시체는 150×300 mm의 실린더 시편으로 제작되었다. 재령별 압축강도는 KS F 2405-2001 "콘크리트의 압축강도 시험방법"에 준하여 실시되었다.

2.4.2 탄성계수

도로포장 콘크리트의 탄성계수를 정량화하기 위해 정탄성계수 및 동탄성계수가 측정되었다. 정탄성계수 실험은 KS F 2438-1992 "콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 푸와송비 시험방법"에 준하여 컴프레서 미터(LVDT) 및 스트레인 게이지를 사용하는 전통적인 방법으로 실시하였다. 이러한 정탄성계수를 측정하는 방법은 실험자의 숙련도와 콘크리트 시험체의 불균질성 등의 이유로 시험체간의 오차가 비교적 큰데 반해, 오실로스코프(Oscilloscope)와 Impact Echo를 이용하여 측정하는 동탄성계수 실험은 절차가 간단하고 시험체간의 오차가 거의 없어 정탄성계수와 동탄성계수의 관계식을 안다면 보다 쉽고 정확하게 콘크리트의 탄성계수를 측정할 수 있다는 취지에서 실시하였다.

Impact Echo를 이용한 비파괴 시험방법은 시험체 표면에 충격을 주어 발생된 파가 시험체 매질간의 경계면에서 반사되어 오는 파형을 이용하여 탄성계수를 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 비구속 압축파(Rod 파)를 측정하여 공시체의 탄성계수를 측정하였는데, 비구속 압축파는 압축파의 일종으로 파의 진행방향으로 입자가 압축-수축의 과정을 반복하며 전파된다. 따라서 비구속 압축파의 속도는 비구속 탄성계수(Unconstrained Modulus) 즉, 영탄성계수(Young's Modulus)의 평가에 직접적으로 활용된다. 실험결과는 주파수의 정점의 주파수를 읽어서 이를 f_c 라고 놓고 비구속 압축파의 속도, V_c 는 식 (1)에 의해 구하였다.

$$V_c = f_c * \lambda = f_c * 2L \quad (1)$$

여기서, V_c : 비구속 압축파의 속도 (m/s)

f_c : 공진 주파수 (Hz)

L : 공시체 길이 (m)

구해진 비구속 압축파의 속도를 이용해 식 (2)에 의하여 공시체의 동탄성계수를 구하였다.

$$V_c^2 = \frac{\text{공시체의 동탄성계수}}{\text{공시체의 밀도}} \quad (2)$$



3. 실험결과

온도와 재령에 따른 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 변화를 고찰하기 위한 실험의 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 보는 바와 같이 양생온도가 0℃인 시험체는 스트레인 게이지에 의한 탄성계수 실험을 실시하지 않았다. 그 이유는 스트레인 게이지를 붙이기 위해서는 시험체 표면에 수분을 전부 제거해야 하는데 상온으로 나온 시험체의 내부에서 양생기간동안 얼었던 수분이 장시간동안 외부로 스며나와 실험이 불가능하였기 때문이다.

표 3. 실험 결과

양생 온도	압축강도 (kg/cm ²)			LVDT의한 탄성계수 (kg/cm ²)			스트레인 게이지에 의한 탄성계수 (kg/cm ²)			Impact Echo 실험에 의한 탄성계수 (kg/cm ²)		
	1일	7일	28일	1일	7일	28일	1일	7일	28일	1일	7일	28일
0℃	79	256	285	124399	140891	188271	-	-	-	249246	358510	390961
23℃	153	307	380	177486	251070	285546	210825	273560	295883	301667	397247	420429
45℃	233	354	419	208958	280737	291664	219519	277551	319736	325177	410592	432694

그림 1은 재령(1, 7, 28일)과 양생온도(0, 23, 45℃)에 따른 압축강도의 결과를 보여준다. 온도와 재령을 달리하여 측정된 압축강도는 재령 7일까지 압축강도의 변화가 크지만 그 후의 압축강도의 변화 폭은 작음을 알 수 있었다. 즉, 콘크리트의 압축강도는 재령초기에 양생온도의 변화에 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 양생온도 23℃와 45℃의 압축강도는 7일 이후 비슷해지는 모습을 보여주고 있지만, 0℃의 압축강도는 7일 이후 강도변화가 거의 없는 것을 볼 수 있었다. 이것은 0℃라는 양생온도가 충분한 강도발현을 위한 조건이 아님을 의미한다고 할 수 있다.

그림 2, 그림 3 및 그림 4는 각각 LVDT, 스트레인 게이지 및 Impact Echo 비파괴 실험에 의한 탄성계수를 재령(1, 7, 28일)과 양생온도(0, 23, 45℃)에 따라 측정된 결과이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 23℃와 45℃인 경우, 재령 1일과 7일의 탄성계수 값은 일정한 차이를 보여주지만 재령 28일인 경우에는 그 차이가 현격히 줄어들음을 알 수 있었다. 또한 LVDT와 스트레인 게이지에 의한 탄성계수는 실험의 특성상 압축강도와 밀접한 관련이 있으므로, 압축강도의 경우와 마찬가지로 양생온도 0℃의 탄성계수 값은 23℃와 45℃의 경우와 비교해 현저히 낮은 값을 나타내었다. 그림 3의 그래프 형태는 LVDT에 의한 탄성계수 그래프인 그림 2와 비슷하지만 그 값은 LVDT의 경우보다 약간 크게 나옴을 알 수 있었다. 이것은 LVDT와 스트레인 게이지에 의해 측정된 시험체의 변형이 다르기 때문에 일어나는 현상으로 그 차이는 별로 크지 않았다.

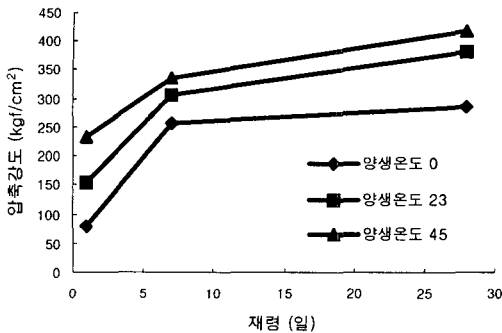


그림 1. 재령과 온도에 따른 압축강도

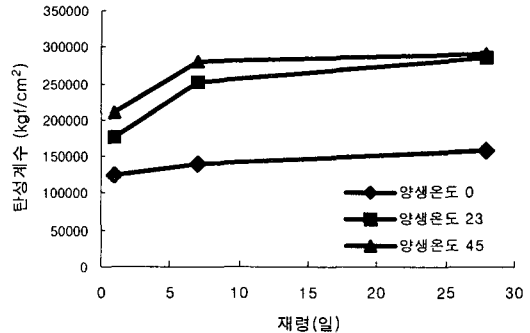


그림 2. 재령과 온도에 따른 탄성계수(LVDT)



그림 4는 Impact Echo 비파괴 실험에 의한 탄성계수를 보여주는데, 그림 2와 그림 3과는 달리 온도와 재령에 따라 일정한 격차로 탄성계수가 측정되는 것을 볼 수 있다. 이것은 파괴시의 압축강도를 바탕으로 하는 정탄성계수와 콘크리트 시험체의 밀도 및 파의 전달에 이론적 근거를 둔 동탄성계수의 차이라고 할 수 있는데, 그 차이는 Impact Echo 비파괴 실험에 의한 탄성계수가 LVDT와 스트레인 게이지로 측정된 전통적인 방법에 의한 경우보다 약 1.4 배 정도 크게 나오는 것을 볼 수 있었다.

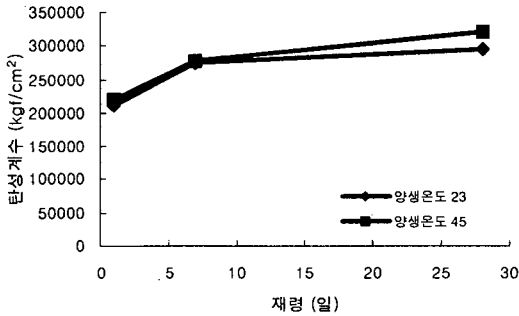


그림 3. 재령과 온도에 따른 탄성계수(게이지)

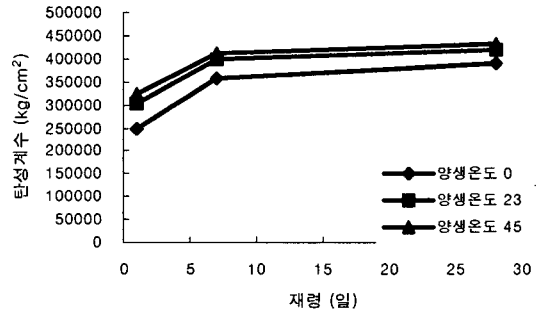


그림 4. 재령과 온도에 따른 탄성계수(비파괴)

4. 분석

4.1 압축강도와 탄성계수의 관계

그림 5는 LVDT, 스트레인 게이지 및 Impact Echo 비파괴 실험에 의해 측정된 탄성계수와 압축강도와의 상관곡선을 보여준다. 각각의 경우에 대한 탄성계수(E_c)와 압축강도(f_{ck})와의 관계를 식 (3)과 같이 표현하기로 한다.

$$E_c = a(f_{ck})^b \quad (3)$$

여기서 a, b는 상수이다.

그림 5의 각 그래프를 식(3)의 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다. 먼저 LVDT에 의한 탄성계수와 압축강도와의 관계식은 식 (4)와 같다.

$$E_c = 13000 * (f_{ck})^{0.5} \quad (4)$$

마찬가지로 스트레인 게이지와 Impact Echo 비파괴 실험에 의한 탄성계수와 압축강도와의 관계식은 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$E_c = 23000 * (f_{ck})^{0.43} \quad (5)$$

$$E_c = 53000 * (f_{ck})^{0.35} \quad (6)$$

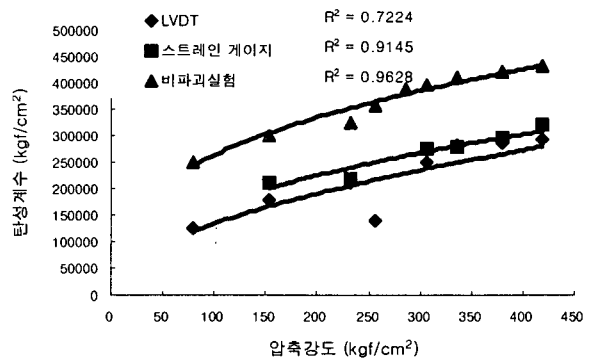


그림 5. 압축강도와 탄성계수의 상관곡선



4.2 적산온도와 압축강도 및 탄성계수의 관계

콘크리트 시험체의 임의의 재령 n (일)까지의 적산온도(또는 숙성도, maturity) M ($^{\circ}\text{C일}$)은 식 (7)과 같이 온도와 재령의 조합으로 정의할 수 있다.

$$M = \sum_{i=1}^n (T_i + 10) \quad (7)$$

여기서 T_i 는 하루 평균 양생온도로서 M 은 재령일에 따른 양생온도에 10을 더한 값의 합이다. 위의 4.1절과 마찬가지로 압축강도(f_{ck})와 탄성계수(E_c)를 적산온도 M 을 이용해 각각 식 (8), (9)와 같이 표현해 보자.

$$f_{ck} = a \cdot \ln(M) + b \quad (8)$$

$$E_c = a \cdot \ln(M) + b \quad (9)$$

그림 6과 그림 7은 각각 적산온도와 압축강도 및 탄성계수와의 상관곡선을 보여준다. 그림 6의 그래프를 식 (8)의 형태로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$f_{ck} = 65 \cdot \ln(M) - 53 \quad (10)$$

마찬가지로 그림 7의 그래프를 식(9)의 형태로 표현하면 식 (11)에서 식 (13)과 같다.

LVDT $E_c = 36000 \cdot \ln(M) + 43000 \quad (11)$

스트레인 게이지 $E_c = 28000 \cdot \ln(M) + 110000 \quad (12)$

비파괴 $E_c = 37000 \cdot \ln(M) + 180000 \quad (13)$

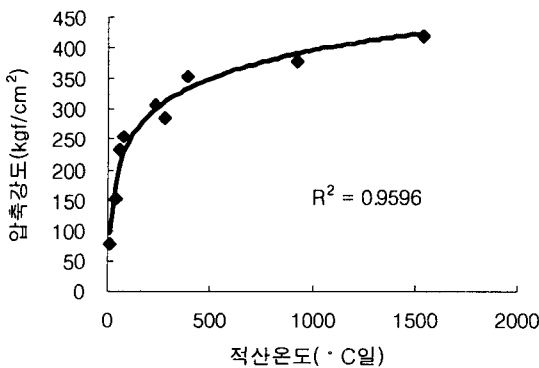


그림 6. 적산온도에 따른 압축강도

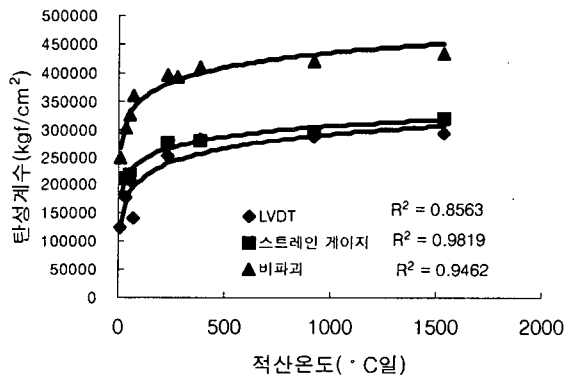


그림 7. 적산온도에 따른 탄성계수

4.3 정탄성계수와 동탄성계수와의 관계

그림 8은 전통적인 탄성계수 측정방법인 LVDT와 스트레인 게이지에 의한 탄성계수와 Impact Echo 비파괴 실험에 의해 측정된 탄성계수의 차이를 보여주고 있다. 먼저 전통적인 방법인 LVDT와 스트레인 게이지에 의해 측정된 탄성계수의 평균값(정탄성계수)과 비파괴 실험에서 얻은 탄성계수(동탄성계수)와는 비교적

큰 차이를 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 탄성계수의 절대값은 큰 차이를 보이지만 두 그래프의 전체적인 윤곽은 비슷함을 그림 8에서 확인할 수 있다. 즉, 두 그래프의 상관관계를 알 수 있다면 한쪽의 그래프만으로 다른 하나를 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 2.4.2절에서 전술한 바와 같이 실험이 간단하고 오차가 적은 동탄성계수를 측정하고 상관관계를 알고 있다면 정탄성계수를 쉽게 추정할 수 있다.

LVDT와 스트레인 게이지에 의해 측정된 정탄성계수(E_s)와 비파괴실험에 의한 동탄성계수(E_d)의 실험식은 각각 식 (14), (15)와 같다.

$$\text{전통적 방법 } E_s = 37000 \cdot \ln(M) + 45000 \quad (14)$$

$$\text{비파괴 실험 } E_d = 37000 \cdot \ln(M) + 180000 \quad (15)$$

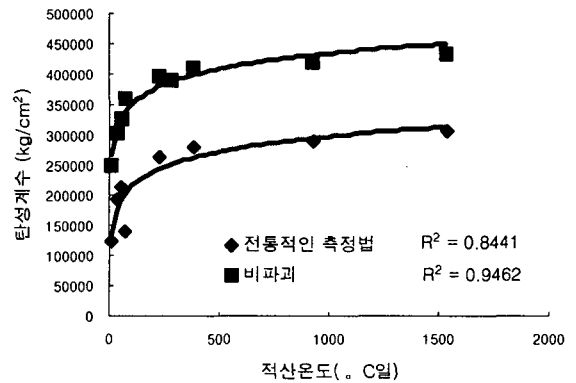


그림 8. 전통적인 방법과 비파괴 실험에 의한 탄성계수

이 두 실험식을 비교하면 동탄성계수(E_d)와 정탄성계수(E_s)의 관계식을 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = E_d - 135000 \quad (16)$$

5. 결론

온도와 재령에 따른 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 변화를 고찰하기 위해 적산온도의 개념을 도입하고 세가지의 다른 탄성계수 측정방법을 사용하여 검토한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 콘크리트 압축강도와 탄성계수는 양생온도와 재령에 따라 큰 차이가 있었고, 특히 재령초기(7일 이내)에 그 영향이 큰 것으로 나타났다.
2. 양생온도 0℃는 23℃와 45℃에 비해 충분한 강도발현을 위한 조건이 아님을 알 수 있었다.
3. 스트레인 게이지에 의해 측정된 탄성계수는 LVDT의 경우보다 약간 크게 나옴을 알 수 있었다. 이것은 LVDT와 스트레인 게이지에 의해 측정된 시험체의 변형이 다르기 때문인 것으로 추정되나 차이는 작았다.
4. 적산온도와 탄성계수 및 압축강도와 관계식을 각각 도출하였다.
5. 비파괴 실험에 의한 탄성계수 측정법은 LVDT와 스트레인 게이지를 사용하는 전통적인 측정법에 비해 간단하고 시험체간의 오차가 적은 것으로 나타났고, 비파괴에 의한 동탄성계수가 전통적인 측정법에 의한 정탄성계수에 비해 약 1.4배 정도 크게 측정되었다.
6. 비파괴에 의한 동탄성계수를 측정한 후 정탄성계수를 추정할 수 있는 정탄성계수와 동탄성계수와의 관계식이 제안되었다.

참고문헌

1. J. Kim, S. Han & Y. Song, Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete, Part I. Experimental results, Cement and Concrete Research, p 1087-1094, 2002
2. J. Kim, S. Han & S. Park, Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete, Part II. Prediction model, Cement and Concrete Research, p 1095-1100, 2002
3. 조운호등, 콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초물성 연구, 한국도로공사 연구보고서
4. 이용구, 박근배, 콘크리트 공학, 구미서관
5. 김재훈의 3인, 건축재료학, 문운당