

재령과 온도가 콘크리트의 쪼갬인장강도에 미치는 영향

The Effect of Aging and Temperature on the Splitting Tensile Strength of Concrete

강 승 민* 안 남 식** 양 성 철***
Kang, Seoung Min Ahn, Nam Shik Yang, Sung Chul

ABSTRACT

Used domestic aggregate for concrete pavement, the splitting tensile strength of concrete were investigated and quantitative analyses for the characteristics of the experimental factors were evaluated. This paper reports the results of curing temperature and age on the splitting tensile strength and it suggests a prediction model based on these experimental results. Tests of cylindrical specimens made of granite as a coarse aggregate, cured in isothermal conditions of 0, 23, and 45°C and tested at the ages of 1, 7, and 28 days are reported. Based on the experimental result, the relationships between the splitting tensile strength and maturity were analyzed and proposed.

1. 서 론

국내의 도로 포장 설계법은 환경하중 조건 등이 다른 외국의 설계법을 근거로 설계되고 있고, 더욱이 외국에서 이미 실용화된 설계법을 사용하면서도 국내의 기술적 차이에 의해 비용에 대한 효과적 성능을 확보하지 못하고 있는 실정이다. 또한 외국에서는 보다 정확한 콘크리트 포장 해석을 위한 경험적-역학적 모형에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 기술적/경제적 측면에서 가치적인 결과를 나타내고 있는 실정이다. 이에, 국내에서 진행되고 있는 한국형 포장 설계법 개발도 실내/시험도로에서 얻게되는 재료물성과 환경하중 및 교통하중의 정량화 등 설계 입력 변수 정량화를 바탕으로 콘크리트 피로 파손 모형 등을 근간으로 하는 포장구조해석을 통해 그 뼈대가 구성되리라 사료된다.

본 연구는 국내의 여건 (사용재료 및 환경조건)을 고려한 도로포장설계법의 개발을 위해 한국도로공사에서의 콘크리트 도로포장 배합설계를 사용한 콘크리트의 기초물성실험의 일부분으로, 콘크리트의 쪼갬인장강도를 양생온도(0, 23, 45°C)와 재령(1, 7, 28일) 및 습도(80, 100%)에 따라 비교, 분석하였고 온도와 재령을 동시에 고려하기 위해 적산온도(Maturity)의 개념을 도입하였다.

* 정회원, 홍익대학교 건축공학과 박사과정
** 정회원, 홍익대학교 건축공학과 전임교수
*** 정회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수

표 1. 실험계획

구 분	실험 인자	수 준
재 령(일)	1, 7, 28	3
양생온도(℃)	0, 23, 45	3
양생습도(%)	80, 100	2
실 험	조깅인장강도	

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험변수

실험변수는 재령, 양생온도, 양생습도로 나눌 수 있고, 이 실험변수들은 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

적산온도의 인자가 되는 재령과 양생온도는 각각 세 가지의 수준으로 변화시켜 실시하였고, 조깅인장강도에 대해 양생습도(공기중, 수중)의 변수를 사용하여 실험하였다.

2.2 실험재료

본 연구에 사용된 재료는 한국도로공사 중부내륙고속도로 제1공구에 사용되는 포장용 콘크리트의 재료를 이용하였다. 잔골재로는 강모래(절건비중: 2.63, 흡수율: 1.52%, 조립률: 2.87)가 사용되었으며, 굵은 골재는 암종이 화강암(절건비중: 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 강 도 (kg/cm ²)	굵은 골재 최대입경 (mm)	공기량 (%)	단위수량 (kg)	단 위 시멘트량 (kg)	물- 시멘트비 (%)	절 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

실린더 몰드를 사용하여 콘크리트를 타설하였다. 타설된 공시체들을 각 실험온도로 설정된 항온항습조 내부에 넣어 1일동안 양생한 후, 공시체를 항온항습조에서 꺼내어 탈형하였다. 탈형한 공시체들은 비닐로 싸서 외기와의 수분이동을 차단하고 다시 실험온도로 설정된 항온항습조에서 꺼내어 실험을 실시하였다. 모든 실험은 3개의 150×300 mm 공시체에 대해 동일하게 실험을 수행하여 그 값들을 평균하였다.

2.4.1 조깅인장강도

조깅인장강도 그림 1과 같이 실시되었다. KS F 2423-2001 "콘크리트의 조깅 인장 강도 시험 방법"은 패킹스트립을 사용하지 않고 식 (1)에 의해 조깅인장강도를 구하지만, ISO 4108에서는 $t/R = 1/6$ 의 패킹 스트립을 사용하여 $2t$ 폭의 등분포하중으로 재하하여 시험하고 식 (2)에 의해 조깅인장강도를 정의하고 있다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi d} \quad (1)$$

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

여기서, f_{sp} : 인장강도 (kg/cm²)

p : 단위길이당 최대 등분포하중 (kg/cm)

t : 패킹스트립의 폭 (cm)

R : 공시체의 반지름 (cm)

본 연구에서는 ISO 4108에 준하여 실험하였고, 탄성론을 근거로 하여 $2t$ 폭을 고려한 조깅인장강도에 대한 식의 유도과정은 다음과 같다.¹

반지름이 r 인 실린더의 표면에 압축력 P 가 작용하고 있을 때 임의의 한 점에 대한 수직응력성분을 일반식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi} \frac{\cos \theta}{r}, \quad \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0 \quad (3)$$

여기서, θ : 압축력의 작용선과 임의의 점과 힘의 작용점과 연결한 선의 각도

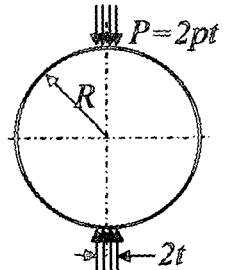


그림 1. 조깅인장강도실험

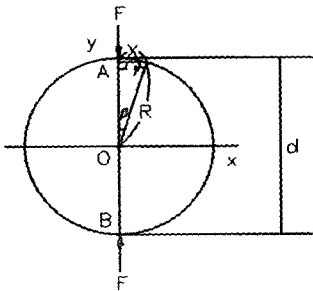


그림 2. 실린더의 압축력

이 표현할 수 있고,

식 (3)을 이용해 그림 2와 같이 실린더의 양 끝단에서 압축력 F 를 받고 있는 상태에서 최대인장력을 구해보면 다음과 같다. AB 에 동등한 힘 F 가 작용하고 있을 경우 내부에서 작용하는 전체의 수직응력은 압축력에 의한 수직응력과 실린더의 표면에 작용하는 인장력을 중첩의 원리를 이용해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{xx}' = -\frac{4F}{\pi R} \cos \beta \cos^2 \gamma + \frac{F}{\pi R} \sin \gamma \quad (4)$$

또한, 실린더의 중심에서 기하학적인 관계로부터 식 (5)와 (6)과 같

$$\sin \beta = \cos \gamma = \frac{x}{R} \quad (5)$$

$$\sin \gamma = \cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 식 (4)에 대입하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{xx}' = \frac{F}{\pi R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \left[1 - 4\left(\frac{x}{R}\right)^2\right] \quad (7)$$

그림 2에서 힘 F가 집중하중이 아닌 dx만큼의 폭을 가지고 P라는 등분포하중이 작용한다고 하면, 원의 중심 O점에서 x방향의 수직응력은 식 (7)에서 F를 Pdx로, σ 를 $d\sigma$ 로 바꾸어 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$d\sigma_{xx}' = \frac{P}{\pi R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} \left[1 - 4\left(\frac{x}{R}\right)^2\right] dx \quad (8)$$

패킹스트립의 폭을 t라고 하면 dx는 -t에서 t까지 변화함을 알 수 있다. 따라서 식 (8)을 -t에서 t까지의 구간으로 적분하면 식 (9)를 얻을 수 있고 이 식은 ISO 4108에서 사용하는 조깅인장강도의 식 (2)와 같음을 알 수 있다.

$$\sigma_{xx}' = F_{sp} = \frac{2Pt}{\pi R} \left[1 - \left(\frac{t}{R}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험결과

온도와 재령에 따른 콘크리트 조깅인장강도의 변화에 대한 실험결과는 표 3과 같다.

그림 5를 보면 알 수 있듯이 공기중의 양생은 온도가 높을수록 초기 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 재령이 증가할수록 강도의 변화율은 저온에서의 강도가 더 크게 나타난다. 이 사실은 그림 6에서도 잘 나타난다. 수중양생시에 실험결과를 보면 초기재령에서의 강도는 온도가 높을수록 강도가 크게 발견되고, 28일강도에서는 $23 > 45 > 0$ °C 순의 강도 크기를 나타내었다.

공기중 양생과 수중양생의 결과는 20% 내외의 습도차이로 별 강도 차이를 보이지 않았다.

표 3. 실험결과

양생조건		조깅인장강도(kgf/cm ²)		
양생상태	온도	1일	7일	28일
공기중	0°C	2.75	16.9	26.9
	23°C	18.2	30.7	32.6
수중양생	0°C	2.36	18.9	26.9
	23°C	13.4	26.6	33.7
	45°C	21.4	28.2	31.8

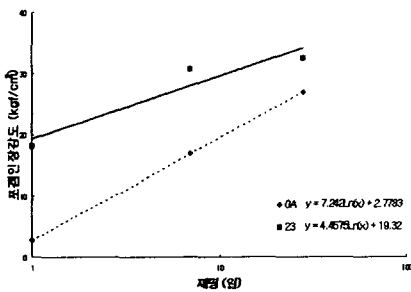


그림 5. 재령과 온도에 따른 조깅인장강도(공기중 양생)

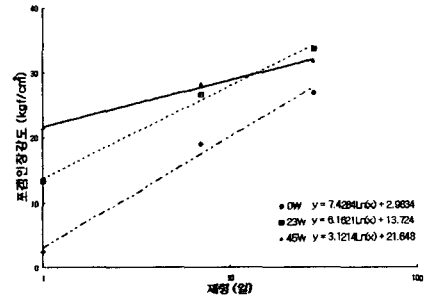


그림 6. 재령과 온도에 따른 조깅인장강도(수중양생)

3.2 적산온도에 의한 쪼갬인장강도

양생이 최적의 조건하에서 행해진 경우 콘크리트의 강도는 주로 적산온도와 적산기간에 의하여 결정되게 된다. 이들 두 인자를 조합시킨 효과를 구하려는 시도에 있어서 콘크리트의 '적산온도'라는 개념이 도입되었다. 적산온도는 양생기간 n 과 -10°C 를 기준으로 하여, 즉 수화가 완전히 정지하리라고 예상되는 온도를 기준으로 하여 측정된 양생온도 T_i 와의 곱으로써 정의되고 있다. 따라서 적산온도 M 은 다음식에 의하여 구할 수 있다.

$$M = \sum_{i=1}^n (T_i + 10) \quad (\text{식 2})$$

여기서, n 은 어떤 재령 n (일), T_i 는 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타낸 온도를 나타낸다.

적산온도와 쪼갬인장강도 사이의 관계는 그림 7과 같이 나타난다.

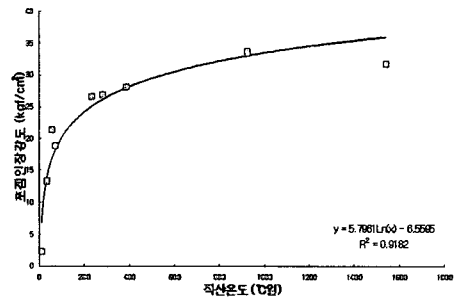


그림 7. 적산온도와 쪼갬인장강도의 관계

3.3 규준에 따른 쪼갬인장강도의 비교

KS F 2423-2001 콘크리트의 쪼갬인장강도 시험방법은 패킹스트립을 사용하지 않고 식(1)에 의해 쪼갬인장강도를 구하지만, ISO 4108에서는 $t/R = 1/6$ 의 패킹 스트립을 사용하여 $2t$ 폭의 동분포하중으로 재하하여 시험하고 식(2)에 의해 쪼갬인장강도를 정의하고 있다. 본 연구에서는 ISO 4108에 준하여 실험하였고 표 4에 ISO 4108와 KS F 2423-2001에 따른 쪼갬인장강도를 나타내었다. 규준에 따른 쪼갬인장강도와 적산온도는 그림 8에 나타난 바와 같은데 KS F 2423-2001에 의한 쪼갬인장강도는 ISO 4108에 따른 쪼갬인장강도보다 평균 4.3% 크게 나타났다. KS F 2423-2001의 쪼갬인장강도는 공시체에 선하중을 재하하는 것을 가정하여 탄성론을 근거로 하여 유도되었다. 하지만, 이 규격에서는 패킹 스트립을 전혀 사용하지 않고 공시체를 직접 가압판에 의해

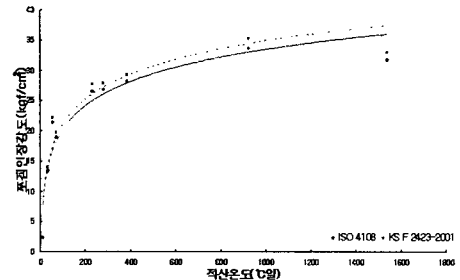


그림 8. 쪼갬인장강도의 비교

재하하도록 규정되어 있다. 이로 인해 공시체에 정확한 선하중을 재하하기가 사실상 불가능하다. 이와같은 반면에 ISO 4108에서는 공시체와 가압판 사이에 패킹 스트립을 삽입하도록 규정하고 있으며, 탄성론을 근거로 하여 패킹 스트립 폭을 고려한 쪼갬인장강도식을 유도하였다. 따라서, ISO 4108 규격이 좀더 정확한 쪼갬인

표 4. 쪼갬인장강도의 비교(ISO와 KS)

실험조건		ISO 4108 (kgf/cm²)			KS F 2423-2001 (kgf/cm²)		
양생상태	온도	1일	7일	28일	1일	7일	28일
공기중	0°C	2.75	16.9	26.9	2.87	17.7	28.0
	23°C	18.2	30.7	32.6	19.0	32.1	34.0
수중양생	0°C	2.36	18.9	26.9	2.46	19.8	28.0
	23°C	13.4	26.6	33.7	14.0	27.8	35.2
	45°C	21.4	28.2	31.8	22.3	29.4	33.1

장강도를 나타내는 것으로 사료된다.

3.4 고찰

본 연구에서의 양생조건중 습도에 관한 실험은 실제 외부에서 양생이 이루어지지 않고 실내에서 이루어졌다. 하지만 실내에서 실험하는 데에는 한계가 있었다. 실험시 실험실내 공기중 양생과 수중양생의 습도 차이가 20%밖에 나지 않아 최초 실험하고자 하였던 습윤상태와 공기중 상태에서의 강도비교를 하기엔 부적합하였다. 확실한 습도차이에서 실험을 하였다면 좀 더 정확한 습도-강도 관계를 알 수 있었을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 한국도로공사 시험도로에 사용된 동일한 배합설계를 사용한 시편에 대해 재령(7일, 28일)과 양생온도 (0, 23, 45℃)를 달리하여 조깅인장강도, 휨강도를 시험한 연구로서 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재령에 의한 강도는 재령이 증가할수록 증가하고, 양생온도에 의한 강도 실험에서는 온도가 저하할수록 초기강도는 저하되고, 장기강도에서는 23 > 45 > 0 ℃ 순의 강도 크기를 보였다. 초기재령에서는 온도가 높은 만큼 시멘트의 수화반응이 빨리 진행되어 강도가 커지게 되는 것이다.
- 2) 공기중 양생의 강도는 수중양생의 상대습도 차이가 얼마나지 않아 별 차이를 보이지 않았다. 실험 결과를 보면 초기강도에서는 공기중의 강도가 습윤상태보다 높게 나왔고, 28일강도에서는 습윤강도가 높게 측정되었다.
- 3) 조깅인장강도를 구하는 강도는 KS F 2423-2001 "콘크리트의 조깅 인장 강도 시험 방법"에 의한 식을 이용하여 구하였으나, 이것은 패킹스트립을 사용하지 않았기 때문에, $t/R = 1/6$ 의 패킹 스트립을 사용하여 $2t$ 폭의 등분포하중으로 재하하여 시험하도록 하고 있는 ISO 4108에 의해 조깅인장강도는 탄성론을 근거로 하여 $2t$ 폭을 고려한 다음식을 사용하여 구하였다.

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

- 4) 적산온도와 조깅인장강도는 $y = 5.7961\ln(x) - 6.5595$ 의 관계를 보였다.
- 5) 각 규격에 따른 조깅인장강도를 비교해본 결과 KS F 2423-2001규격이 ISO 4108규격보다 평균 4.3% 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Theory of Elasticity Third Edition, McGRAW-HILL, S.P.Timoshenko and J.N.Goonier.
2. Cement and Concrete Research 32(2002) 1087-1094, jin-keun kim.
3. Master's thesis, T. Tang, 1994 Sep.University.
4. 콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초물성 연구, 한국도로공사 연구보고서, 조윤호등.