

열량계를 이용한 고로슬래그 혼입 페이스트의 겔보기 활성화 에너지 산정에 관한 연구

A Study on the Applicability of Estimation of Apparent Activation Energy of Blast Furnace Slag Contained Cement Using Calorimeter

김 한 솔*
Kim, Han-Sol

이 한 승**
Lee, Han-Seung

Abstract

It is necessary to calculate Apparent Activation Energy(E_a) in order to apply the equivalent age formula to predict compressive strength using the maturity method. For carbon reduction, it is necessary to consider the change of E_a by condition of GGBFS concrete, which is widely used today. In this study, as a basic study for the design of the compressive strength model of GGBFS concrete, the apparent activation energy of the GGBFS mixed paste was calculated through a calorimeter. The experiment was carried out at a hydration temperature of 10 to 30°C with a paste test specimen having a GGBFS content of 0 to 80%. As a result, the GGBFS replacement rate of the paste increased, and E_a tended to increase as the temperature decreased.

키 워 드 : 적산온도, 고로슬래그, 활성화 에너지

Keywords : maturity, ground granulated blast-furnace slag, apparent energy

1. 서 론

현장타설 콘크리트의 초기 압축강도를 예측하는 것은, 재령별 예측 강도를 토대로 거푸집의 탈형 시기를 정확히 판단하고 이를 통해 공사 기간을 줄이고 공사비를 절감시킬 수 있다는 점에서 중요하다. 적산온도법은, 콘크리트의 재령에 대한 콘크리트의 온도 이력의 곱(적산온도)과 겔보기 활성화 에너지 등 콘크리트의 수화 속도에 영향을 주는 계수들을 토대로 압축강도를 예측, 계산하는 압축강도 예측법으로 시멘트에 고로슬래그(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) 등 다양한 혼화재를 혼입한 콘크리트에 적용시키는 연구들이 진행되고 있다. 본 연구는 콘크리트의 강도예측 모델에 큰 영향을 미치는 계수인 페이스트의 겔보기 활성화 에너지를 GGBFS 혼입률, 양생 온도별로 등은 미소수화열량계를 이용해 산정한 후, GGBFS 혼입률 별 수화발열 특성을 분석하고 압축강도 예측모델에서의 겔보기 활성화 에너지 산정에 있어 열량계의 적용 가능성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 방법

활성화 에너지란 화학반응이 진행되기 위한 최소한의 에너지를 의미한다. 시멘트계 재료의 수화는 발열을 동반하기 때문에 수화도는 곧 누적 수화열로 가정할 수 있으며, 2개의 경화 온도에 대한 수화 속도(시간에 따른 수화도)를 알고 있다면, 각 온도 범위에 대한 겔보기 활성화 에너지를 식 1과 같이 구할 수 있다. 여기서, E_a 는 겔보기 활성화 에너지, R 은 가스상수(8.314J/mol·k), T_1 과 T_2 는 측정 온도(절대온도), α_1 과 α_2 는 각각 T_1 과 T_2 에서의 수화도이다. 표 1은 실험에 사용된 시멘트와 GGBFS 및 혼입 비율과

표 1. 실험수준 및 배합

Category	Experimental Level	Unit
W/B	40	%
Temperature	10, 20, 30	℃
GGBFS	20, 40, 60, 80	replacement ratio (% of B)
Measurement period	120	hours

$$E_a(\alpha) = R \left[\frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \ln \left(\frac{\frac{d\alpha_1}{dt}}{\frac{d\alpha_2}{dt}} \right) \right]$$

식 1. 겔보기 활성화 에너지 산정식

* 한양대학교 건축시스템공학과 박사과정

** 한양대학교 ERICA 건축학부 교수, 교신저자(ercleehs@hanyang.ac.kr)

등은 열량계의 온도 및 W/B비율을 나타낸 것이다. 시멘트는 KS L 5201 기준에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고로슬래그 미분말은 현장에서 주로 사용되는 KS F 2563에 규정된 3종 고로슬래그를 사용하였다.

시멘트의 수화도 이력을 측정하기 위한 수화발열은 미소수화열량계를 이용하여 측정할 수 있으며, 이를 TAM AIR사의 16구 8채널 등온 열량계를 이용하여 수행하였다. 수화열 측정에는 10℃, 20℃ 및 30℃ 온도에서 측정되었으며, 분말 샘플 및 물을 혼입할 수 있는 25ml 전용 앰플을 사용하였다. OPC와 GGBFS의 서로 다른 비율(8:2, 6:4, 4:6 및 2:8)의 페이스트를 배합하였으며, 10℃, 20℃ 및 30℃의 설정 온도에서 열량 측정을 진행하였다. 실험체는 ASTM C 1702 규정에 따라 제작하였다.

3. 실험 결과

그림 1은 10℃ 등온환경에서 120시간동안 측정한 페이스트 복합체의 GGBFS 혼입 비율에 따른 열유속 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림 2는 10℃, 20℃, 30℃에서의 수화열 이력을 적분하여 누적 수화열 이력을 구하고, 이를 통해 시간에 따른 수화도인 수화 속도를 계산한 후, 이를 식 1에 적용하여 얻은 온도 범위별 겔보기 활성화 에너지를 나타낸 것이다.

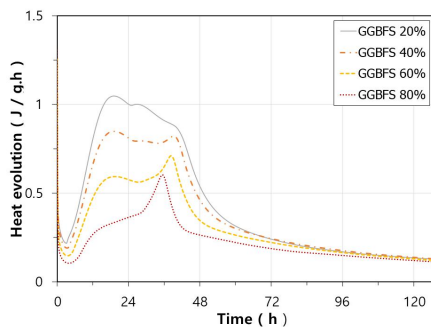


그림 1. 온도 측정 이력

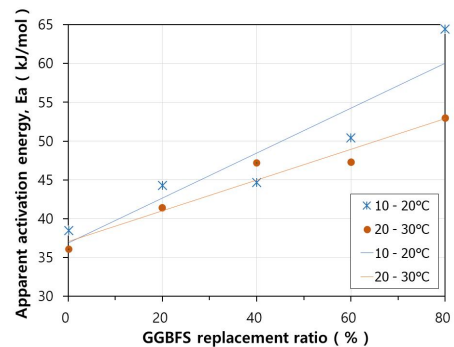


그림 2. 실측강도와 예측강도 비교 결과

열량계를 이용한 수화열 측정 결과, 모든 배합 조건에서 48시간 이내에 대부분의 수화반응이 진행되었으며, GGBFS 혼입률이 증가할수록, 총 수화열량과 초기 수화열은 감소하였다. GGBFS는 물과 접촉하더라도 수경성을 나타내지 않는 대신, 주변에 알칼리 촉매가 존재할 때 수경성을 나타내는 잠재수경성을 지닌 재료로서, 시멘트가 먼저 수화반응이 진행되면서 용출된 알칼리 촉매와 GGBFS가 반응하게 되기 때문이며, 이런 경향은 그림 1과 같이 고로슬래그 혼입률이 증가할수록 두드러졌다. 그림 2는 W/B 40%에서 GGBFS 치환율에 따른 온도 범위별 겔보기 활성화 에너지를 계산한 값이다. 온도가 낮을수록, GGBFS 혼입률이 증가할수록 페이스트의 겔보기 활성화 에너지가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 온도가 낮을수록 수화반응에 필요한 최소한의 에너지가 더 크다는 것을 의미하며 이는 온도가 높을수록 수화반응이 수월해짐을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 겔보기 활성화 에너지 산정에서의 열량계의 적용 가능성을 판단하기 위하여 배합 조건을 달리하여 열량계를 이용하여 Ea 산정실험을 진행하였다. GGBFS를 혼입한 시멘트 페이스트의 수화열을 미소수화열량계를 이용하여 실험한 결과 열량계를 통해 GGBFS 혼입 비율을 달리 하는 등 다양한 조건으로 배합한 페이스트의 겔보기 활성화 에너지를 산정할 수 있었으며, 열량계를 통하여 산정된 페이스트의 겔보기 활성화 에너지 값은 GGBFS 혼입률이 증가할수록, 측정온도가 낮아질수록 높아지는 경향을 보였으며 이는 이론과 일치한다. 압축강도 예측모델에 적용하기 위한 콘크리트의 겔보기 활성화 에너지를 구하는 추가 실험을 통해 충분한 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No.2015R1A5A1037548)

참 고 문 헌

1. 양현민, 조명원, 박원준, 이한승, 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 적산온도 산정과 압축강도 예측에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp443~444, 201