

잔골재 특성에 따른 콘크리트 건조수축 모델링에 관한 연구

A Study on Modelling for Prediction of Concrete Drying Shrinkage according to Properties of Aggregate

박도경*

양극영**

Park, Do-kyong

Yang, Keek-Young

Abstract

Drying Shrinkage has much complexity as it has relations with both internal elements of concrete and external factors. Therefore, experiments on Concrete Drying Shrinkage are carried out in this study under simplified circumstances applying temperature & Humidity test chamber which enables constant temperature and humidity. Comparative analyses have been made respectively according to the consequences aiming at modelling for prediction of Concrete Drying Shrinkage and making out measures to reduce it. As a result Strain Rate of Drying Shrinkage of concrete was measured to increase by average 10×10^{-5} in proportion to additional 4% increase in fine aggregate ratio, when water/cement ratio constant. Strain Rate of Drying Shrinkage in pit sand concrete increased 20% higher than measured when in river sand under the condition of 90-day material age. Strain Rate of Drying Shrinkage in sea sand concrete increased 10%~15% higher than measured when in river sand. The results of prediction of Rate of Drying Shrinkage by Response Surface Analysis are as follows. The coefficient of correlation of Drying Shrinkage in concrete was over 90%.

키워드 : 건조수축 모델링, 잔골재율, 콘크리트 배합

Keywords : Modelling of Drying Shrinkage, Aggregate Ratio, Concrete Mixing

1. 서론

콘크리트 또는 콘크리트 건축물에 있어서 건조수축은 측정과 예측이 가장 어려운 물성중의 하나이다. 그리하여 지금까지 콘크리트의 건조수축을 억제할 수 있는 방법에 대한 많은 연구가 진행 되어왔다. 균열의 주요한 원인인 건조수축 변형을 빠르게 예측하는 것은 콘크리트 설계법에 반드시 필요하다. 또한 콘크리트나 콘크리트 구조물 건조수축은 내구성, 균열과는 밀접한 관계가 있다. 건조수축 균열이 콘크리트의 열화 혹은 내구성 저하의 직결 되는 경우가 많다. 균열이 발생하면 균열을 통해 유해한 기체나 물이 침입하고, 콘크리트의 중성화나 철근의 부식이 진행되며, 콘크리트 내구성은 현저히 저하된다. 따라서 콘크리트 배합시 환경조건이 콘크리트 건조수축에 미치는 영향을 잘 이해하여야 한다. 건조수축의 예측은 콘크리트 공학기술의 기초적인 발전에 매우 중요하다. 따라서 건조수축 특성에 대한 정량적 연구가 절실하게 요구되고 있다. 또한 최근 골재의 부족은 굵은 골재의 경우 색석으로 잔골재의 경우 강모래, 바다모래 육지모래 혹은 부순 모래가 혼용되고 있는 실정이다. 또한 강모래의 고갈로 인해 콘크리트 잔골재를 육지모래, 바다모래로 대체함으로써 콘크리트의 건조수축 발생이 증대되고 있다. 그러므로 각각의 잔골재 특성에 따른 건조수축

변형을 측정해 보는 것이 필요하다. 콘크리트 건조수축 변형에 영향을 미치는 요인은 크게 온도, 습도, 물시멘트비, 골재량, 혼화제, 혼화재료등이 있지만 무엇보다도 동일 물시멘트비에서 환경적 요인의 변화와 골재량의 증감이다. 이 환경적 요인은 온도, 습도 등으로 구성되어 있는데 이들 개별적인 인자들은 콘크리트 건조에 미치는 영향이 복합적이기 때문에 이들의 영향을 개별적으로 평가하는 것은 큰 의의가 없다. 따라서 본 연구에서는 건조수축에 영향을 미치는 환경적 요인을 통합 온도와 습도가 고정되는 항온항습 기기를 이용하여 콘크리트의 건조수축 변형율에 대한 비교 실험을 행한다. 그리하여 잔골재량과 잔골재 특성 변화에 따른 건조수축 변형율을 측정하고, 비교 분석하여 실험 측정된 콘크리트의 건조수축 변형율의 측정값을 잔골재율과 잔골재 특성의 인자를 변수로 하여 건조수축율 변화의 복합적인 영향에 대한 반응표면 분석(Response Surface Analysis)을 행하고 이를 모델화 시켜 건조수축 예측식을 구축하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 실험은 잔골재의 종류와 잔골재율의 변화에 따른 콘크리트 건조수축 변형율 실험으로서, 물시멘트비를 50%, 잔골재율을 43%, 47%, 51%의 4% 간격으로 배합 설정하고, 강모래, 바다

* 원광대 건축학부 강사, 공학박사

** 원광대 건축학부 교수, 공학박사

모래, 육지모래를 사용한 공시체를 각각 제작하여 콘크리트 건조수축 변형율을 측정 비교하였다. 콘크리트 공시체의 크기는 10cm×10cm×40cm로 하고 건조수축의 측정기기는 1/1000mm의 콘택트 스트레인 게이지로 하였다. 그리하여 항온항습의 조건(온도 20±1℃ 습도 60±1%)에서 각각 잔골재율, 잔골재 변화에 따른 콘크리트의 건조수축 변형율을 비교 분석한다. 실험계획 및 배합 계획은 다음 표.1 표.2와 같다. 본 실험에서는 콘크리트 경화제 부재에 대한 실험방법은 KS F 2435, KS F 2424에 의해 콘크리트의 건조수축 변형율을 90일간 측정하였다.

표 1. 잔골재율과 양생조건에 따른 실험계획표

| 배합사항 | | | 측정조건 | 잔골재 |
|------|-----------|------|----------------------------|------|
| W/C | 슬럼프 | 잔골재율 | | |
| 50% | 12±2.5 cm | 43% | 온도 20±1℃ 습도 60±1% | 강모래 |
| | | 47% | | 바다모래 |
| | | 51% | | 육지모래 |

표 2. 잔골재 특성에 따른 배합표

| 시료 | W/C | S/a (%) | 중량배합(kg/m³) | | | | | 용적배합(ℓ/m³) | | | | |
|------|-----|---------|-------------|-----|-----|------|------|------------|------|-------|-------|------|
| | | | W | C | S | G | AE | W | C | S | G | AE |
| 강모래 | 50% | 43 | 175 | 350 | 777 | 1049 | 1.03 | 3.50 | 7.00 | 15.54 | 20.98 | 0.02 |
| | | 47 | 183 | 367 | 850 | 975 | 1.03 | 3.66 | 7.34 | 17.00 | 19.50 | 0.02 |
| | | 51 | 192 | 384 | 923 | 901 | 1.03 | 3.84 | 7.68 | 18.46 | 18.02 | 0.02 |
| 바다모래 | 50% | 43 | 175 | 350 | 777 | 1049 | 1.03 | 3.50 | 7.00 | 15.54 | 20.98 | 0.02 |
| | | 47 | 183 | 367 | 850 | 975 | 1.03 | 3.66 | 7.34 | 17.00 | 19.50 | 0.02 |
| | | 51 | 192 | 384 | 923 | 901 | 1.03 | 3.84 | 7.68 | 18.46 | 18.02 | 0.02 |
| 육지모래 | 50% | 43 | 175 | 350 | 777 | 1049 | 1.03 | 3.50 | 7.00 | 15.54 | 20.98 | 0.02 |
| | | 47 | 183 | 367 | 850 | 975 | 1.03 | 3.66 | 7.34 | 17.00 | 19.50 | 0.02 |
| | | 51 | 192 | 384 | 923 | 901 | 1.03 | 3.84 | 7.68 | 18.46 | 18.02 | 0.02 |

2.2 실험방법

콘크리트 공시체는 배합당 3개씩 제작하였다. 공시체의 건조수축 변형율은 공시체를 24시간 경화 후 탈형하고 Pfender(독)가 고안한 Contact Strain Gauge를 사용하여 1회 측정하였다. 건조수축 측정 재령은 24시간 경과한 시점을 기점으로 하여 1일, 3일, 7일, 14일, 28일, 50일, 70일, 90일로 하였다. 각 공시체 당 측정점은 3개소로 하여 총 9회의 측정값을 평균하고 표준편차 방법에 의거 상하 10% 이상 되는 측정값은 제거하였다. 표점거리 10cm에 대한 건조수축 길이를 구하여 표점거리 10cm로 나누어 단위길이당 건조수축 길이를 구하였다. 이 단위길이당 건조수축 길이가 건조수축 변형율이 된다. 건조수축 길이가

변화는 다음 식에 의해 건조수축 변형율을 산출하였다.

$$\Delta l = \{ (X_{01} - X_{02}) - (X_{11} - X_{12}) \} \times 10^{-3} \text{ (mm)}$$

$$\text{건조수축 변형율} = \frac{\Delta l}{l}$$

여기서,

- X₀₁ : 기점에서의 공시체 측정값(mm)
- X₀₂ : 각 재령에서의 공시체 측정값(mm)
- X₁₁ : 기점에서의 표준자 측정값(mm)
- X₁₂ : 각 재령에서의 표준자 측정값(mm)

3. 실험결과 및 분석

표 3. 잔골재 품질에 따른 건조수축 변형율

| 잔골재 | 잔골재율 (%) | w/c (%) | 건조수축율 (10 ⁻⁵) | | | | | | | |
|------|----------|---------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1일 | 3일 | 7일 | 14일 | 28일 | 50일 | 70일 | 90일 |
| 강모래 | 51 | 50 | 9.00 | 24.67 | 28.67 | 37.00 | 39.33 | 42.00 | 47.00 | 50.67 |
| | 47 | | 7.67 | 18.67 | 22.67 | 23.33 | 26.67 | 27.67 | 33.67 | 35.33 |
| | 43 | | 8.33 | 9.50 | 13.33 | 13.67 | 15.67 | 18.00 | 22.17 | 23.17 |
| 육지모래 | 51 | | 10.80 | 29.60 | 34.40 | 44.40 | 47.20 | 50.40 | 56.40 | 60.80 |
| | 47 | | 9.20 | 22.40 | 27.20 | 28.00 | 32.00 | 33.20 | 40.40 | 42.40 |
| | 43 | | 10.00 | 11.40 | 16.00 | 16.40 | 18.80 | 21.60 | 26.60 | 27.80 |
| 바다모래 | 51 | | 10.44 | 28.62 | 33.26 | 42.92 | 45.62 | 48.72 | 54.52 | 58.78 |
| | 47 | | 8.97 | 21.84 | 26.52 | 27.30 | 31.20 | 32.37 | 39.39 | 41.34 |
| | 43 | | 9.41 | 10.74 | 15.06 | 15.45 | 17.71 | 20.34 | 25.05 | 26.18 |

3.1 강모래의 건조수축 변형율 특성

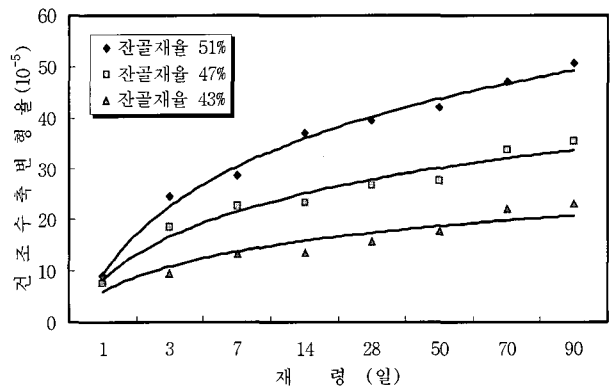


그림 1. 잔골재율에 따른 건조수축 변형율 비교 (강모래)

그림1은 잔골재를 강모래로 사용하여 콘크리트의 건조수축 변형율을 잔골재율 별로 나타낸 것이다. 재령 90일에서 잔골재율 51%일 때 50.67×10^{-5} , 잔골재율 47%일 때 35.33×10^{-5} , 잔골재율 43%일 때 23.17×10^{-5} 으로 측정되어 잔골재율이 작은 경우 건조수축 변형율이 가장 적게 나타나고 있다. 따라서 건조수축 변형율은 잔골재율이 작은 경우 적어짐을 알 수 있다. 이러한 이유를 분석하여 보면 잔골재율이 작은 경우 굵은 골재의 양이 상대적으로 많아지고 잔골재율이 많아지면 콘크리트의 시멘트 페이스트량도 함께 많아지게 된다. 따라서 굵은 골재의 수분 흡수량이 잔골재에 비해 작으므로 수분의 자유수가 증가하게 되어 콘크리트 수분의 확산이 더욱 크게 되기 때문으로 판단된다.

3.2 육지모래의 건조수축 변형율 특성

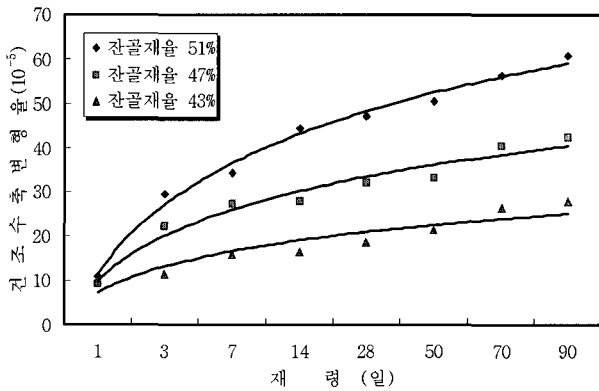


그림 2. 잔골재율에 따른 건조수축 변형율 비교 (육지모래)

그림2는 잔골재를 육지모래로 사용하여 물시멘트비 50% 배합에서 잔골재율에 따른 건조수축 변형율을 나타낸 것이다. 재령 90일에서의 건조수축 변형율을 보면 잔골재율 51%일 때 60.83×10^{-5} , 잔골재율 47%일 때 42.40×10^{-5} , 잔골재율 43%일 때 27.80×10^{-5} 으로 나타나 잔골재율이 높을수록 건조수축 변형율은 크게 나타나고 있다. 또한 육지모래 특성상 점토 미립분을 많이 함유하고 있어 시멘트 분말과 반응하여 수축 팽창에 대한 양도 다른 골재에 비해서 더욱 크게 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 육지모래 사용시 강도의 취약성을 보정하기 위해 시멘트량을 증가시키게 되면 오히려 초기 변형이 크게 일어날 수 있다. 따라서 이에 대한 고려와 함께 육지모래의 가장 주요한 인자인 유기 불순물 함유량에 대해서도 어느 정도 감소시키는 방안을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

3.3 바다모래의 건조수축 변형율 특성

그림3은 잔골재를 바다모래로 사용하여 콘크리트 공시체를 제작한 후 각각의 잔골재율에 대한 건조수축 변형율을 측정하는 것이다. 잔골재율 변화에 대한 건조수축 변형율을 측정하는 결과 잔골재율 51%일 때 58.78×10^{-5} , 잔골재율 47%일 때 41.34×10^{-5} , 잔골재율 43%일 때 26.18×10^{-5} 로 나타났다. 바다모래 사용 콘크리트의 건조수축 변형율은 강모래 사용의 경우 보다 크게 나타났다. 이러한 이유를 분석하여 보면 바다모래의 경우 가장 큰 특징은 염화물이나 염화물은 콘크리트 건조수축에 영

향을 미치지 않는다. 바다모래는 조립율과 입도, 입형이 강모래에 비해 좋지 않은 특성이 있고 이에 의해 골재 입자간의 마찰이 상대적으로 커지고 모래가 미사의 형태이기 때문에 동일 배합에서는 강모래에 비해 건조수축 변형율이 일반적으로 큰 것으로 판단된다.

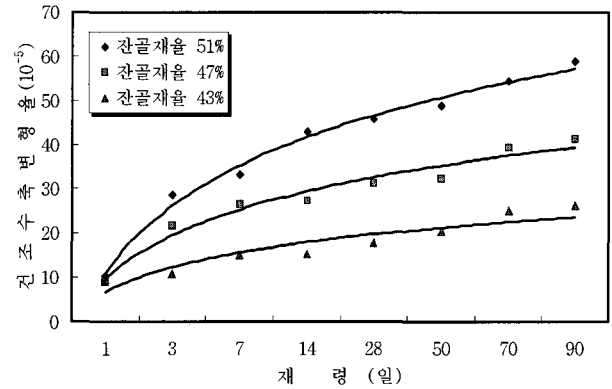


그림 3. 잔골재율에 따른 건조수축 변형율 비교 (바다모래)

3.4 골재품질별 건조수축 변형율 비교

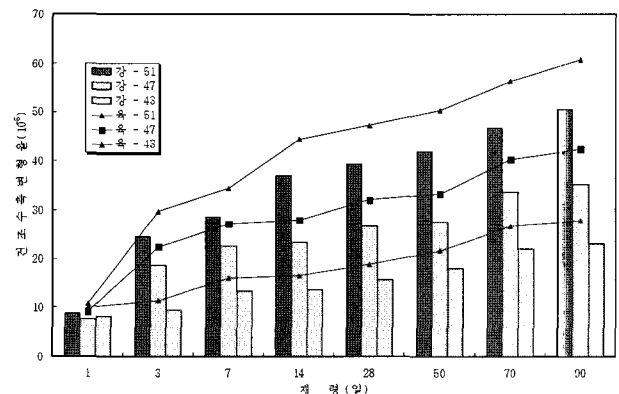


그림 4. 강모래와 육지모래의 건조수축 변형율 비교

그림 4는 물시멘트비 50%일 경우 잔골재를 강모래와 육지모래를 사용하여 콘크리트 공시체를 제작하여 각각 재령에 대한 건조수축 변형율을 비교한 것이다. 결과를 보면 각각의 잔골재율에서 강모래 보다 육지모래가 20~25% 정도의 건조수축 변형율이 크게 나타나고 있다. 이러한 원인은 콘크리트 속에 함유하고 있는 굵은골재의 영향으로 건조수축 변형율이 감소한 것으로 판단된다. 또한 육지모래 건조수축율의 증가는 육지모래 속에 포함된 미립분의 양에 의한 것으로 판단되며 육지모래 사용시 강모래 사용시보다 20% 정도 큰 수축율은 보임을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 이러한 측정값을 이용하여 수축균열이 발생할 수 있는 임계점을 찾아내는데 연구되어야 할 것이다.

그림5는 물시멘트비가 50%일 경우 잔골재를 바다모래로 사용하여 콘크리트 공시체를 만들어 강모래 사용의 경우와 비교한 것이다. 그 결과 강모래보다 바다모래 사용시 콘크리트의 건조수축 변형율이 10~15% 정도 증가를 보이고 있다. 이러한 이유는 바다모래의 경우 강모래 보다 모래 입자가 가늘기 때문에 시공성이 떨어지게 되고 바다모래에는 조개껍질도 포함되

어 있어 이로 인한 복합작용으로 바다모래의 수축율이 증가하기 때문에 판단된다. 따라서 바다모래 사용 콘크리트 사용시 내구성 문제로 골재의 품질과 잔골재율의 조절 등에 대해 세심한 주의가 필요하다. 또한 육지모래나 바다모래의 건조수축 변형율의 감소 방안으로 2종류의 모래를 혼합하는 방안도 좋은 대안이 될 수 있을 것이라고 판단된다.

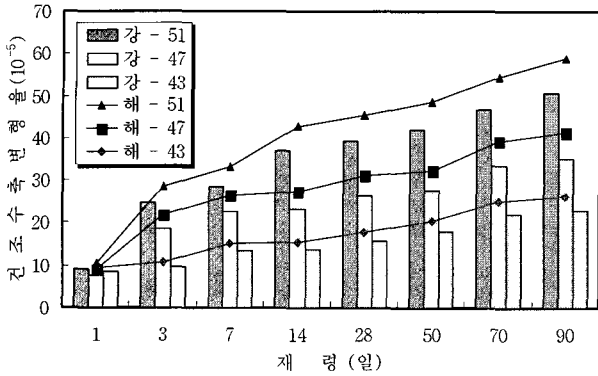


그림 5. 강모래와 바다모래의 건조수축 변형을 비교

4. 예측 모델링

위의 실험으로 측정된 건조수축 변형율을 잔골재율, 잔 골재 종류등을 인자로 반응표면 분석¹⁾(Response Surface Analysis)을 실시하였다. 건조수축 변형율의 변화는 비선형이므로 선형식으로 변환이 불가능하기 때문에 통계해석 프로그램인 SAS의 RSREG 프로그램을 이용하여 건조수축 변형율을 예측하여 3차원 모델링을 하였다.

4.1 잔골재 변화에 대한 건조수축 예측 모델링

그림6은 잔골재를 강모래로 사용하여 콘크리트 건조수축 변형율을 측정된 것이다. 잔골재율에 따른 건조수축 변형율은 20×10^{-5} 에서 50×10^{-5} 사이의 분포를 이루고 있어 잔골재율에 따라 건조수축 변형율이 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 이유로 잔골재율은 충분히 검토되어야 할 것이다. 건조수축의 변형 형태는 초기에서부터 일정한 형태를 이루며 증가를 보임을 알 수 있다.

그림 7은 건조수축에 대한 3차원 모델링을 보면 건조수축의 형태가 2차원의 형태와 거의 비슷하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 거의 일정한 변형의 형태를 보이고 있으며 상관관계를 나타내는 결정계수는 88.8% 아주 높게 나타나고 있다.

1) 반응표면 분석(Response Surface Analysis)은 여러개의 설명변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화를 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고, 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 반응을 나타내는 종속변수를 말한다. 이러한 통계 기법은 공업제품의 생산공정에서 인자들의 최적공정조건(Optimum Operation Condition)을 찾는 데 효과적으로 사용됨으로써 품질관리(Quality Control)에 유용하게 응용되고 있다. 반응표면 분석에 관한 연구는 1951년에 처음으로 Box와 Willson에 의하여 시작되어, 최근에는 많은 연구자들에 의하여 활발히 연구 발표되고 있다.

$$\varepsilon_y = 30.23 - 2.32x_1 - 0.59x_2 + 0.042x_1^2 - 0.023x_1x_2 - 0.003x_2^2 \quad (R^2 = 88.8)$$

여기서 x_1 = 잔골재율
 x_2 = 재령

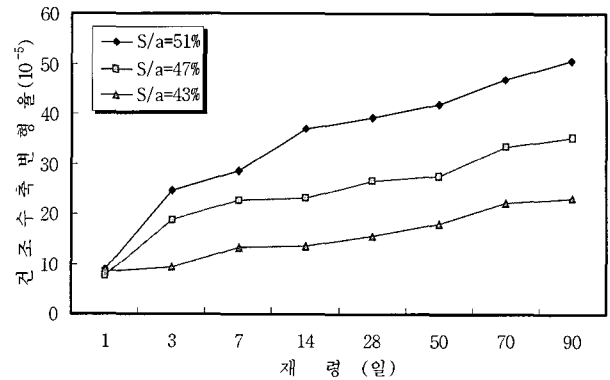


그림 6. 잔골재 변화에 따른 건조수축 변형을 (강모래)

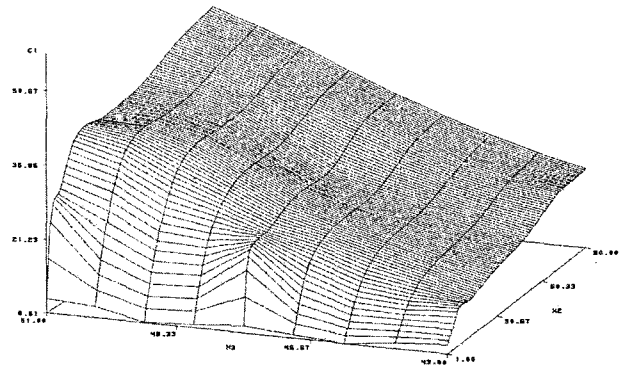


그림 7. 잔골재 변화에 따른 건조수축 모델링(강모래)

그림 8은 잔골재를 육지모래로 사용하여 잔골재율에 따른 콘크리트 건조수축을 측정된 결과로 건조수축 변형율의 범위는 30×10^{-5} 에서 60×10^{-5} 사이로 나타났다.

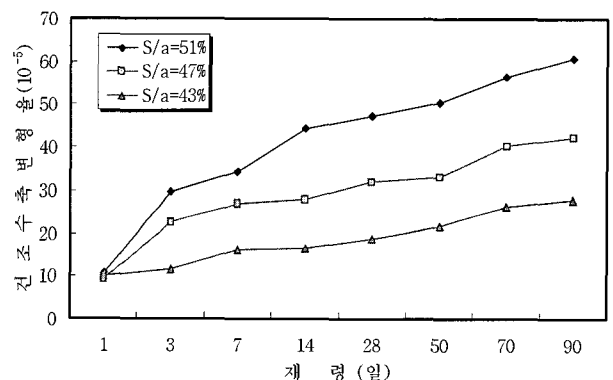


그림 8. 잔골재율 변화에 따른 건조수축 변형을 (육지모래)

건조수축 그래프는 잔골재율 변화에 관계없이 재령에 따라 유사한 형태를 이루며 증가하고 있다. 그림 9는 잔골재율과 재령을 이용한 건조수축 변형율을 측정하고 모델링을 구축한 것이다. 그 결과 88.7%의 높은 상관계수를 갖는 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$\varepsilon_y = 36.42 - 2.8x_1 - 0.72x_2 + 0.05x_1^2 + 0.028x_1x_2 - 0.0037x_2^2$$

($R^2 = 88.7$)

여기서 x_1 = 잔골재율
 x_2 = 재령

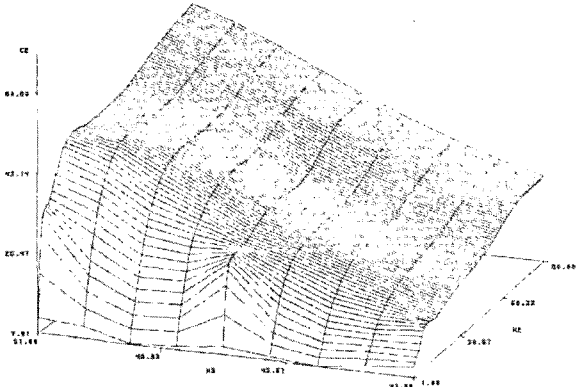


그림 9. 잔골재 변화에 따른 건조수축 모델링(육지모래)

그림 10은 잔골재를 바다모래로 사용한 콘크리트의 건조수축 변형율을 나타낸 것이다. 건조수축 변형율의 분포는 30×10^{-5} 에서 60×10^{-5} 사이로 육지모래 사용시와 유사하게 나타났다. 그림 11은 측정 데이터로 건조수축 모델링 한 결과 다음과 같은 식을 얻을 수 있었으며 상관계수는 88.9%로 나타났다.

$$\varepsilon_y = -31.9 + 0.126x_1 - 0.71x_2 + 0.019x_1^2 - 0.027x_1x_2 - 0.0036x_2^2$$

($R^2 = 88.9$)

여기서 x_1 = 잔골재율
 x_2 = 재령

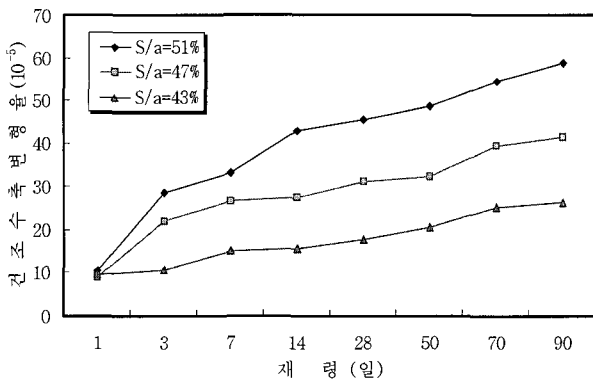


그림 10. 잔골재 변화에 따른 건조수축 (바다모래)

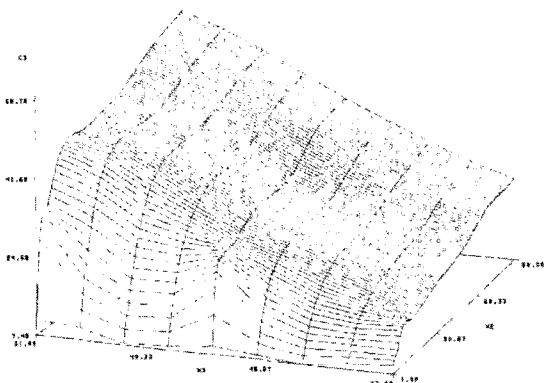


그림 11. 잔골재 변화에 따른 건조수축 모델링 (바다모래)

5. 결 론

본 연구는 콘크리트 건조수축 변형율에 대한 예측식을 3차원으로 구축하는데 목적이 있다. 이를 위해 잔골재 종류와 잔골재율에 따라 특성 실험을 하였고 이를 비교 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 물시멘트비에서 콘크리트 건조수축 변형율은 잔골재율이 4% 증가할 때마다 평균 10×10^{-5} 정도씩 증가하는 것으로 측정되었다.
- 2) 강모래 사용 콘크리트의 건조수축 변형율에 대해 육지모래 사용 콘크리트 건조수축 변형율은 재령 90일 조건하에 20% 정도 커짐을 알 수 있었다.
- 3) 강모래 사용 콘크리트에 대해 바다모래 사용 콘크리트의 건조수축 변형율은 10~15% 정도 크게 나타났다.
- 4) 반응표면 분석(Response Surface Analysis) 실험 계획법을 통하여 잔골재율과 재령의 2가지 요인에 따른 콘크리트 건조수축 예측식을 구축한 결과 90% 이상의 높은 상관관계를 나타냈다.
- 5) 시멘트 경화체 건조수축 변형 예측에 이용될 수 있는 식을 두 개 변수의 일반식으로 표시하고 3차원의 그래프로 나타내어 이를 실제 적용하여 건조수축 변형율의 예측을 가능하게 하였다.

따라서 반응표면 분석 기법(Response Surface Analysis)은 제조업의 공정에서 불량품의 최소화와 품질의 반응에 대한 예측을 측정하는 방법으로서 콘크리트 품질 향상과 거동에 반드시 필요한 품질관리 기법이므로 추후 콘크리트 품질향상에 대한 연구에 이 기법을 적용하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한만엽, 환경인자를 고려한 건조수축의 예측 모델 개발, 콘크리트 학회, 1996, 2.
2. 한만엽, 콘크리트 건조수축의 이론적 예측에 관한 연구, 콘크리트 학회, 1993, 3.
3. 김진근, 콘크리트 부등건조수축으로 인한 응력의 해석, 한국콘크리트 학회 논문집 제 6권 4호 1994, 8 pp 102~112.
4. 국립기술 품질원, 레미콘 배합설계 실태조사 결과, 연합회보 1998, 7.
5. 변근주, "염분이 콘크리트 제성질에 미치는 영향", 한국레미콘 공업협회 기술 분과위원회, 1991, 1.
6. 김형태, "해사가 콘크리트에 미치는 영향에 대한 소고", 대우엔지니어링 기술보, 제 8권, 제 1호, 1991, 10 pp 38~50.
7. 藤原忠司, セメント 硬化體 の 乾燥收縮 におよぼす配合の 影響, セメント コンクリート 報告集, 昭化 62.
8. 寺本尙夫外 3人, モルタルの 乾燥收縮 およびクリープ, セメント 콘クリート 報告集, 昭化 60.
9. 收角龍憲外 2人, モルタルの 乾燥收縮 におよぼす 骨材の 影響, セメント 콘クリート 報告集, 昭化 56.