

# 콘크리트 슬래브의 부등 건조수축에 대한 연구

## Study of Differential Drying Shrinkage in Concrete Slab

임진선\* · 정진훈\*\* · 조윤호\*\*\* · 김연복\*\*\*\*

Lim, Jin Sun, · Jeong, Jin Hoon · Cho Yoon Cho, Kim Yeon Bok

### 1. 서론

콘크리트 구조물은 시공 후 지속적으로 건조수축을 일으키며 변형이 진행되어 가는데, 이에 관한 연구는 미국 ACI나 유럽 CEB-FIP 등의 연구단체를 통해 오랜 기간동안, 여러 영향인자에 대하여 수많은 연구가 진행되어져 오고 있으며, 국내 또한 여러 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 이러한 연구 결과로부터 여러 가지 예측식이 제안되었지만, 대부분의 연구가 표준시편 위주로 실험이 수행되어져 콘크리트포장 슬래브의 건조수축과 비교하여 그 값이 상당히 크게 예측되어지고 있는 실정이다.

콘크리트포장의 경우 슬래브의 상부는 대기에 노출되어져 있고, 하부는 기층과 맞닿아 대기에 노출되지 않은 채로 구속되어 있어서 상·부 하부간의 건조수축에 의한 변형이 다르게 진행되어진다. 이에 대하여 Mn/Road의 시험도로 현장에서 매립형 스트레인게이지를 이용하여 부등건조수축을 측정하였고, 중앙부보다 줄눈부에서 건조수축이 크게 측정되었음이 보고되었다(Burnham et al, 2001). 또한, 국내 시험도로 계측 자료를 이용한 3차원 유한요소해석 결과 검증에서도 건조수축에 의한 영구컬링 현상이 보고되었다 (이동현, 2007).

이와 같이, 콘크리트포장 슬래브의 부등 건조수축에 의하여 발생되어질 수 있는 응력은 구조해석 프로그램에서는 구현하기 힘든 상황이다. 때문에, 본 연구는 현장실험으로 부터 계측되어진 부등 건조수축을 슬래브 상·하부간의 온도차의 형태, 즉 부등 건조수축에 대한 가상의 등가온도( $\delta\Delta T_e$ )로 변환하고, 이것을 구조해석 프로그램의 입력변수로 사용하여서, 실제에 더 가까운 콘크리트 슬래브를 모델링하고 해석을 하는데 그 목적을 지닌다.

### 2. 현장실험

콘크리트 포장 표층에 해당하는 배합조건을 이용하여 미국콘크리트협회(ACI)에서 제시한 배합설계 방법을 사용하였다. 굵은 골재는 사암을 사용하였으며, 배합결과는 다음과 같다.

표 2.1 배합결과

| W/C  | 시멘트<br>( $kg/m^3$ ) | 물<br>( $kg/m^3$ ) | 잔골재<br>( $kg/m^3$ ) | 굵은골재<br>( $kg/m^3$ ) | AE제<br>(g) |
|------|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|------------|
| 0.44 | 362                 | 165               | 664                 | 1098                 | 1101       |

\* 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332 (E-mail : coreplay@hanmail.net)

\*\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 032-860-7574 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 정교수 · 공학박사 02-820-5336 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 책임연구원 · 공학박사 · 031-910-0310 (E-mail : ybkim@kict.re.kr)

현장 실험을 위한 시험 시공한 슬래브는 6 × 3.7 × 0.31 m의 크기로 2개의 슬래브가 제작되었으며, 가운데에 다웰바를 위치시킨 뒤 타설하였다. 타설 후, 다웰바가 위치한 곳에 줄눈 컷팅을 실시하였다. 슬래브의 양생은 한 쪽은 양생포를 덮어서 실시하였으며, 다른 한 쪽은 양생제를 살포하여, 초기 양생조건이 미치는 영향을 고려하였으며, 슬래브의 상하부의 변형률 차이를 알기 위하여 상부 및 하부에서 2.5cm 떨어진 곳에 변형률 계측장치를 다음 그림과 같이 양쪽 슬래브 각각, 중앙부(Center), 종방향(longitudnal) 단부 그리고 횡방향(Transverse) 단부에 매설하였다.

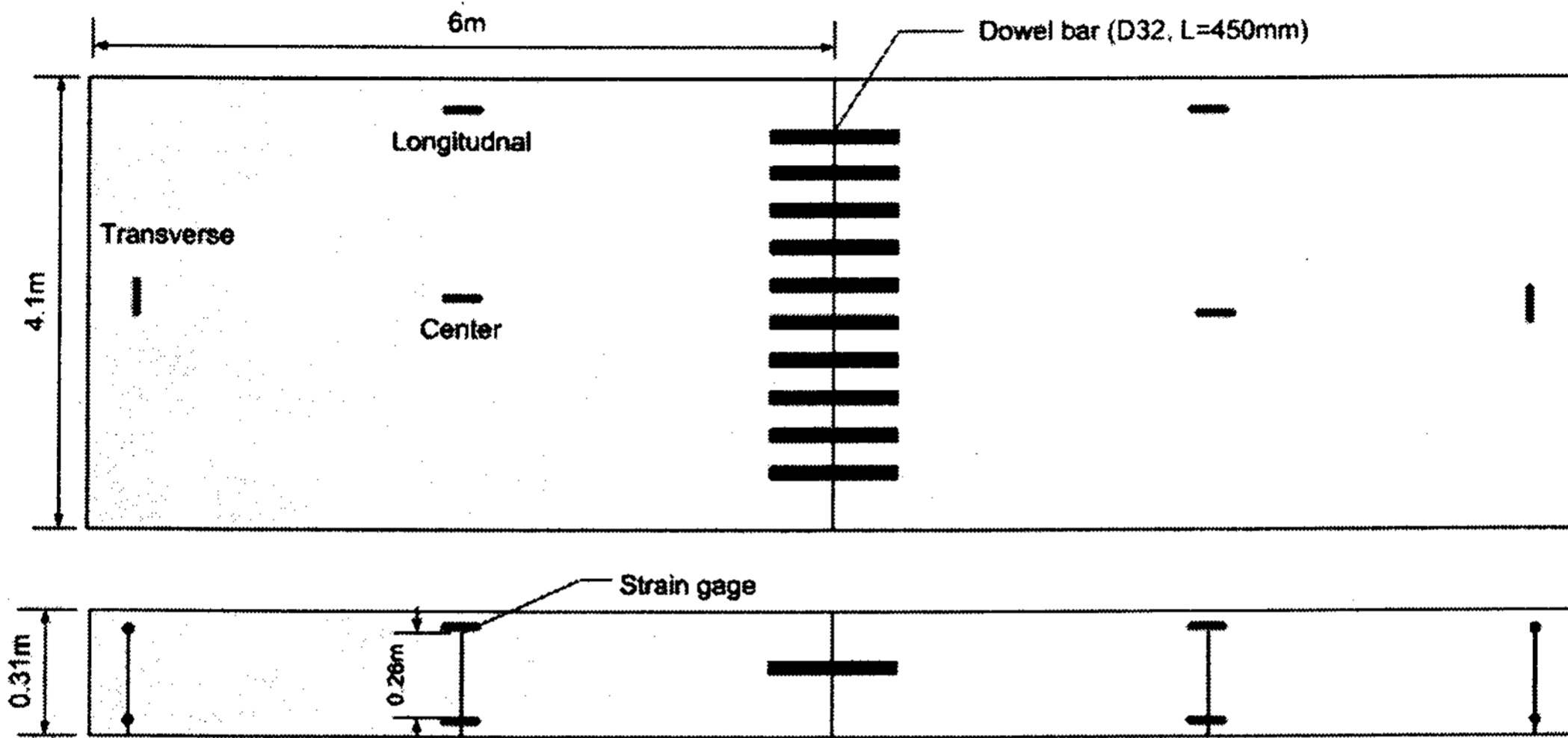


그림 2.1 시험시공 슬래브

변형률 계측장치는 Geokon사의 'vibrating wire strain gage model 4200'을 사용하였으며, 같은 회사의 Data logger를 이용하여 슬래브 상·하부에 각각 위치하고 있는 gage의 값을 측정하였다. 처음 7일 간은 2시간 간격으로 계측하였으며, 2주 후 부터는 일주일 간격으로 3시간에 한 번씩 한 달 동안 계측하였고, 2년 후에 동일한 방법으로 계측하여 장기적인 Data를 수집하였다.

### 3. 등가온도를 이용한 콘크리트 슬래브의 부등건조수축

#### 3.1 각 위치에서의 시간에 따른 총 변형률( $\epsilon_{sh}$ )

콘크리트의 총 변형률은 온도와 건조수축에 의한 영향으로 발생된다고 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{Total} = \epsilon_T + \epsilon_{sh} \dots \dots \dots (2.1)$$

여기서,

- $\epsilon_{Total}$  : 콘크리트슬래브의 전체 변형률
- $\epsilon_T$  : 온도에 의한 변형률
- $\epsilon_{sh}$  : 건조수축에 의한 변형률



슬래브의 온도에 의한 변형률( $\epsilon_T$ )은 콘크리트의 현장배합과 동일하게 공시체를 제작하여 실내실험을 통해 얻어진 열팽창계수 $\alpha_c$ 값인  $8.1\mu s/\text{C}$ 을 사용하여 구하였다. 그림 3.1 과 같이 슬래브 각 위치에서의 gage로 부터 측정된 변형률은 상부에서 그 변형율이 크게 측정되었고 하부에서는 상부보다 그 변형의 정도가 매우 적었다. 이 총변형률은 (식 2.1)에서 가정한 것과 같이 온도에 의한 변형율과 건조수축에 의한 변형율의 합이다.

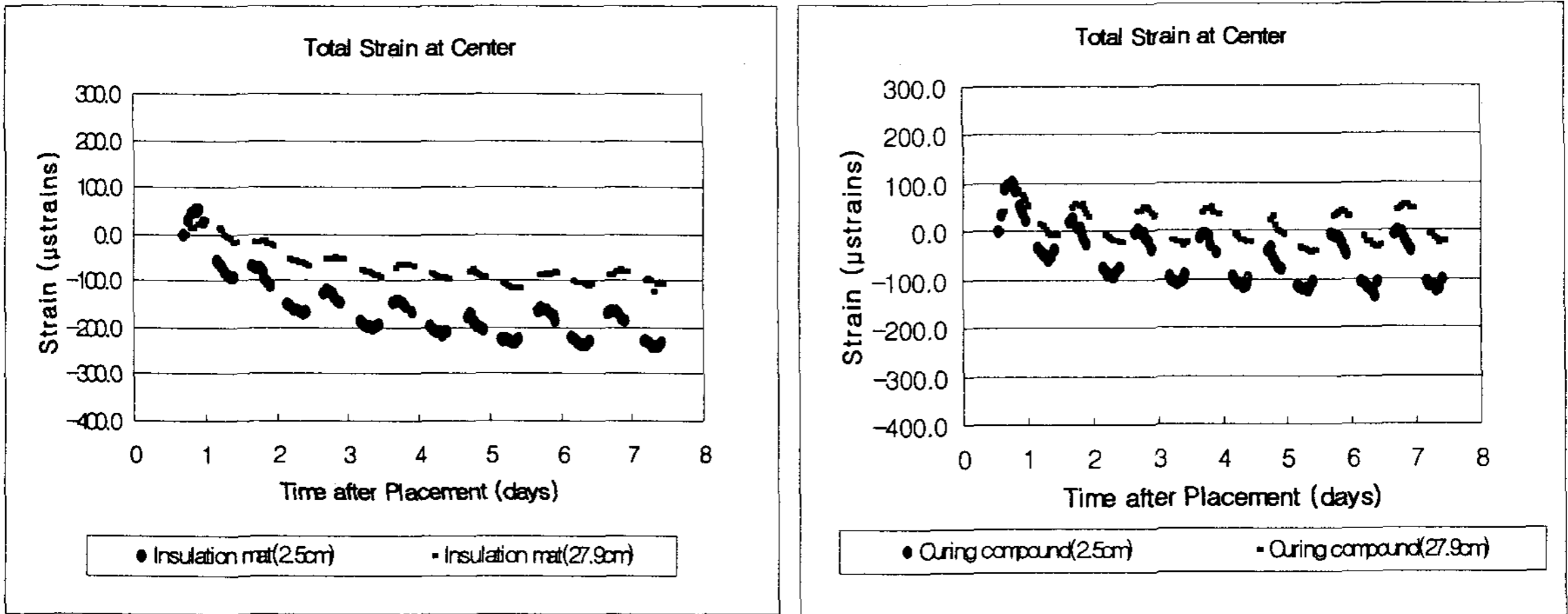


그림 3.1 슬래브 중앙의 상·하부에서의 총 변형율

### 3.2 각 위치에서의 시간에 따른 건조수축 변형율 차이( $\epsilon_{sh}$ )

슬래브 상하부 온도차에 의한 변형률 차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\epsilon_T = (\epsilon_{T-t} - \epsilon_{T-b}) = \alpha_c \times (T_t - T_b) = \alpha_c \times \Delta T \dots\dots\dots(2.2)$$

여기서,

- $\Delta\epsilon_T$  : 슬래브 상하부의 온도차에 의한 변형률 차이
- $\epsilon_{T-t}$  : 슬래브 상부의 온도에 의한 변형률
- $\epsilon_{T-b}$  : 슬래브 하부의 온도에 의한 변형률
- $\Delta T$  : 슬래브상하부 온도차
- $\alpha_c$  : 콘크리트 열팽창계수

식 2.1의 개념으로 시간에 따른 슬래브의 상하부의 건조수축으로 인한 변형률 차는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Delta\epsilon_{sh} = \Delta\epsilon_{Total} - \Delta\epsilon_T \dots\dots\dots(2.3)$$



여기서,

$\Delta \epsilon_{sh}$  : 콘크리트 슬래브 상하부의 건조수축에 의한 변형률 차이

$\Delta \epsilon_{Total}$  : 콘크리트 슬래브 상하부의 총 변형률 차이

$\Delta \epsilon_T$  : 콘크리트 슬래브의 상하부의 온도에 의한 변형률 차이

또한, 콘크리트포장은 시간에 따라 슬래브의 상부와 하부의 건조수축에 의한 변형이 다르므로 다음과 같이 상하부의 건조수축에 의한 변형률 차이를 정의할 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{sh} = \epsilon_{sh-t} - \epsilon_{sh-b} \dots \dots \dots (2.4)$$

여기서,

$\Delta \epsilon_{sh}$  : 슬래브 상하부의 건조수축에 의한 변형률 차이

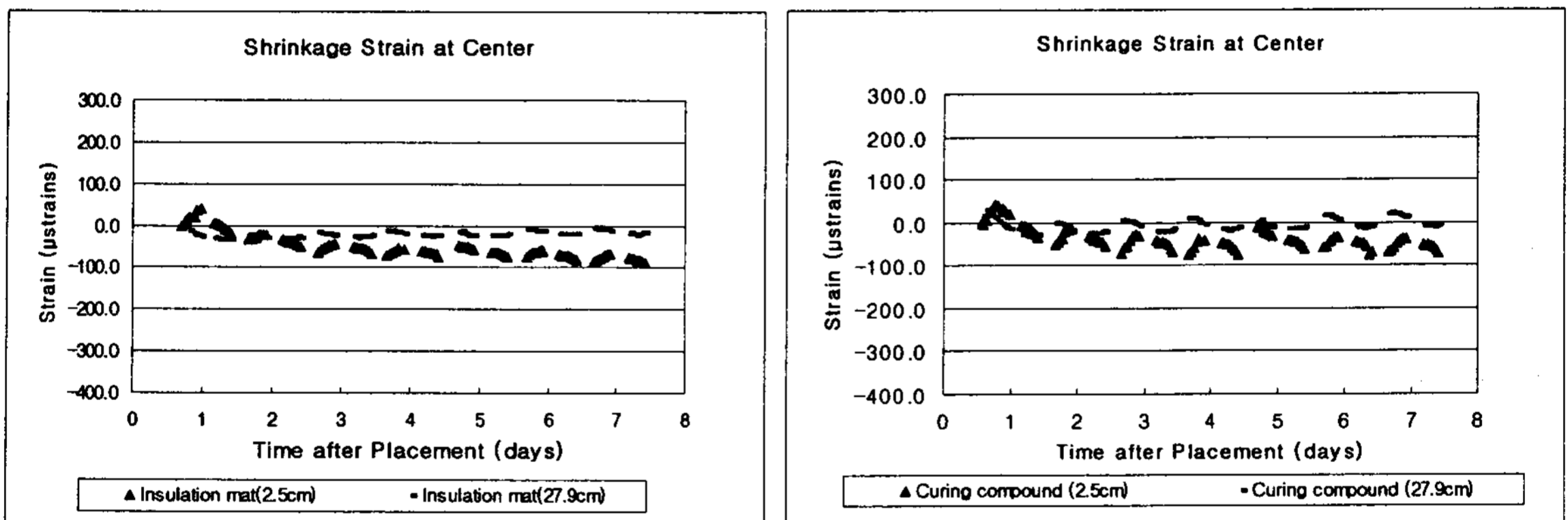


그림 3.2 슬래브 중앙의 상·하부에서의 건조수축 변형률

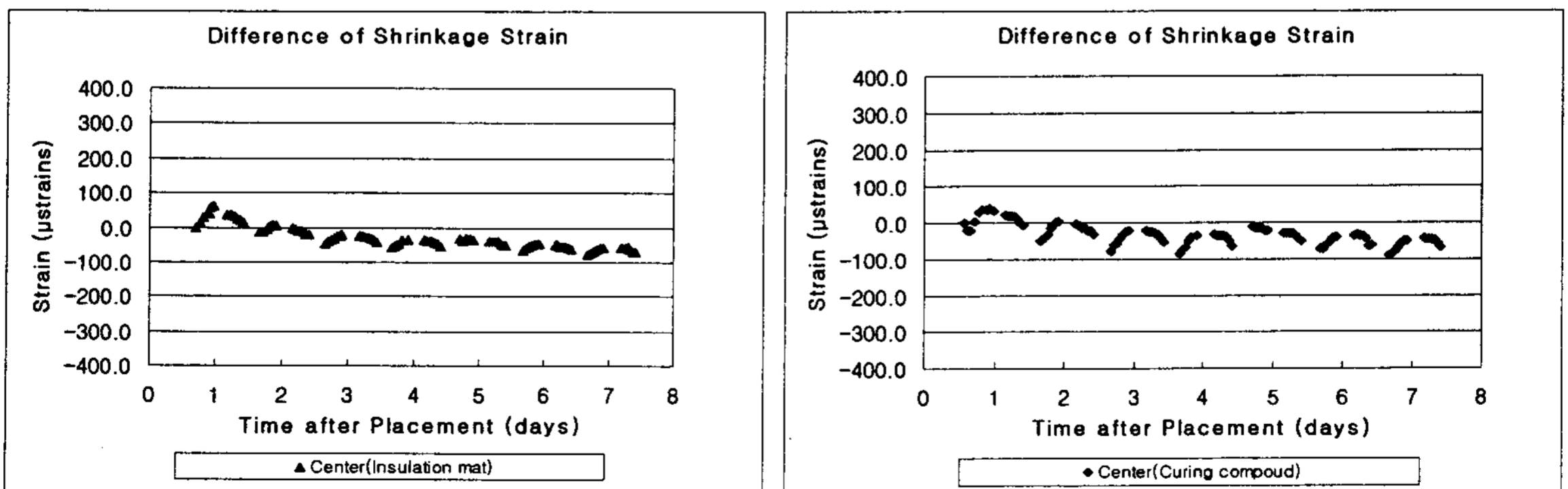


그림 3.3 슬래브 중앙의 상·하부에서의 건조수축 변형률 차이



### 3.2 각 위치에서의 부등 건조수축에 대한 등가온도( $\Delta T_e$ )

어떠한 열팽창계수  $\alpha$ 를 갖는 콘크리트 포장에 대하여, 슬래브 상하부의 건조수축 변형률의 차를 등가온도 ( $\Delta T_e$ , Equivalent Temperature)를 이용하여 나타낼 수 있다면, 이것을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{sh} = \alpha_c \times \Delta T_e \dots\dots\dots(2.5)$$

여기서,

- $\Delta \epsilon_{sh}$  : 슬래브 상하부의 부등 건조수축에 의한 변형률 차이
- $\Delta T_e$  : 부등 건조수축에 대한 슬래브상하부 등가온도
- $\alpha_c$  : 콘크리트 열팽창계수

$$\Delta T_e = \frac{\Delta \epsilon_{total} - \alpha \Delta T}{\alpha_c} = \frac{\Delta \epsilon_{sh}}{\alpha_c} \dots\dots\dots(2.6)$$

여기서,

- $\Delta T_e$  : 부등 건조수축에 대한 등가온도
- $\Delta \epsilon_{Total}$  : 콘크리트 슬래브 상하부의 총 변형률 차이
- $\Delta T$  : 슬래브상하부 온도차
- $\Delta \epsilon_{sh}$  : 슬래브 상하부의 건조수축에 의한 변형률 차이
- $\alpha_c$  : 콘크리트 열팽창계수

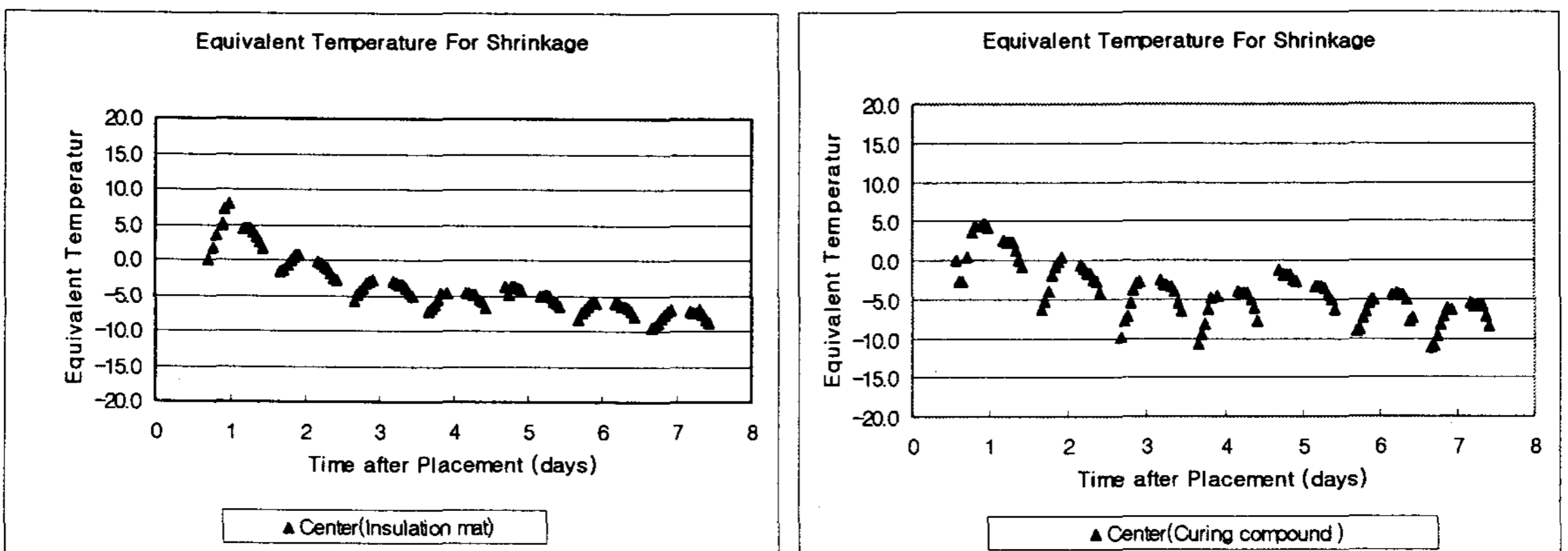


그림 3.4 슬래브 중앙의 건조수축에 의한 등가온도 ( $\delta \Delta T_e$ )



#### 4. 등가온도를 이용한 부등건조수축 구조해석

2년 동안의 장기거동을 측정한 결과로 다음 그림 4.1과 같이 슬래브의 중앙부에서 부등 건조수축으로 인한 건조수축 차이와 이에대한 등가온도가 다음과 같이 측정되었으며, 시공한지 2년후의 콘크리트 슬래브의 부등 건조수축에 대한 등가온도는  $-15^{\circ}\text{C}$  정도로 얻어졌음을 알 수 있다.

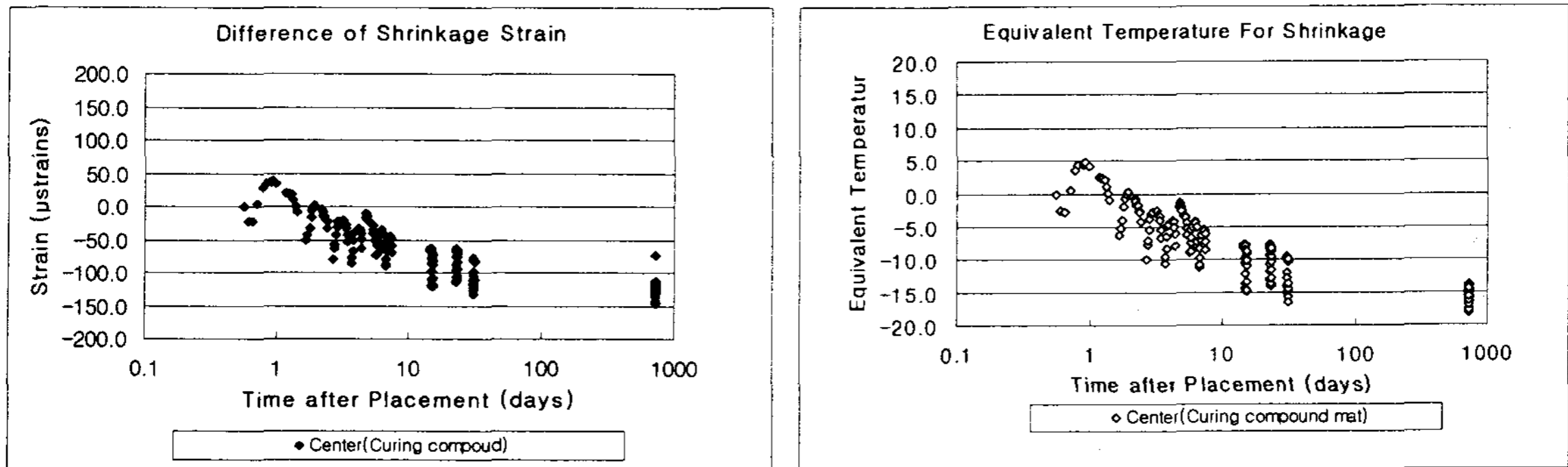


그림 4.1 슬래브 중앙의 건조수축에 의한 등가온도 ( $\delta\Delta T_e$ )

위에서 얻어진 등가온도에 대하여 다음 표 4.1과 같이 포장체의 재료물성 값을 가정하였고, 노상지지력계수 K를  $0.03 \text{ MPa/mm}$ 로 가정하였다. 슬래브와 기층사이의 경계조건은 Push-off test에 대한 문헌조사로 부터 입력변수를 결정하였다(Rasmussen and Rozycki, 2007). 그리고 현장실험과 함께 그림 4.3와 같이 단면제원을 가지게 콘크리트 슬래브를 모델링하였다.

표 4.1 구조해석을 위한 포장층의 재료물성

|       | E(MPa) | Nu   | density ( $\text{kg/m}^3$ ) | $\alpha(\mu\text{strain})$ |
|-------|--------|------|-----------------------------|----------------------------|
| slab  | 28000  | 0.17 | 2400                        | 8.1                        |
| Base  | 15000  | 2.0  | 2100                        |                            |
| Dowel | 200000 | 3.0  |                             |                            |

표 4.2 콘크리트 슬래브와 기층사이의 경계조건 (Rasmussen and Rozycki, 2001)

|                   | Initial Stiffness (MPa/mm) | Slip displacement |
|-------------------|----------------------------|-------------------|
| Cement Stabilized | 45                         | 0.025             |

부등건조수축으로 인한 켈링형상 및 이로 인한 콘크리트 중앙부의 응력을 현장에서 계측된 데이터로부터 얻은 등가온도 ( $\Delta T_e$ )  $-15^{\circ}\text{C}$ 를 유한요소해석 프로그램을 이용하여 해석하였다. 그 결과 부등건조수축으로 슬래브의 줄눈부가 말려 올라가는 상향켈링현상을 보여 주었으며, 이때



상향컬링으로 인한 슬래브의 중앙에서의 인장응력은 0.936 MPa로 해석되었다. 이 해석결과는 부등 건조수축으로 인한 컬링현상만을 모델링한 것이므로, 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮은 새벽시간에 슬래브 중앙에서는 더 큰 인장응력이 발생하여 Top-down균열이 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

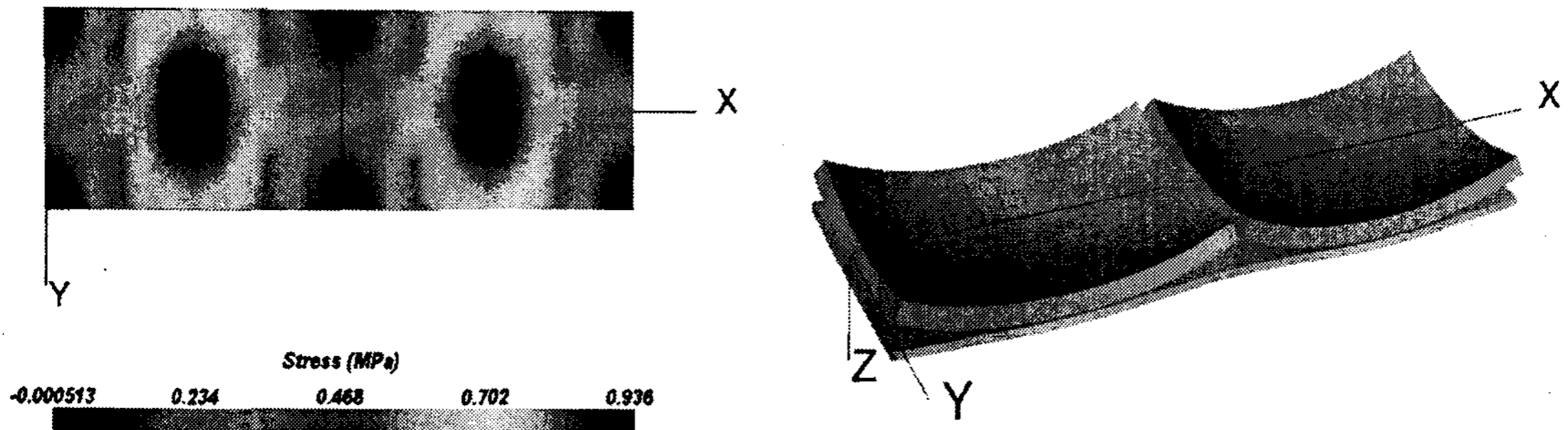


그림 42 등가온도를 이용한 슬래브 부등건조수축 유한요소해석 결과

### 5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브의 부등 건조수축으로 인한 상·하부의 변형률 차이를 현장실험을 통하여 측정하였고, 그 데이터로부터 통하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 현장실험을 통하여 슬래브의 건조수축이 하부에서보다 상부에서 더 활발히 발생하고, 장기적으로도 계속 진행됨을 알 수 있었다.
- 2) 재령에 따라 부등 건조수축이 진행되면서, 온도에 의한 컬링이 아닌 부등 건조수축으로 인한 상향컬링 현상이 발생함을 알 수 있었다.
- 3) 콘크리트 슬래브의 부등 건조수축에 대하여 이를 설계 입력변수화할 수 있는 등가온도 ( $\Delta T_e$ ) 개념을 제시하였다.
- 4) 등가온도 ( $\Delta T_e$ ) 를 이용한 구조해석의 결과로부터 슬래브 상부에 인장응력이 발생함을 알 수 있었으며, 이로 인한 Top-down균열이 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 ‘한국형 포장설계법 (KPRP)’ 과제의 일환으로 건설교통부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 김진근, 이철성 “ 자체건조를 고려한 초기재령 콘크리트의 부등건조수축”, 콘크리트학회 논문집 제 10권 5호 1998, 10, pp.197-204



2. 김진철, "콘크리트의 건조수축 메커니즘과 예측모델", 도로포장공학회지 제 5권 제 3호 2003, 9, pp.32-41.
3. 이동현, "시험도로 계측 결과를 이용한 3차원 콘크리트포장 유한요소해석 결과 검증", 한국도로학회 논문집, 1738-7159, 제9권1호, 2007, pp.1-15
4. ACI 209R-92 "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," 1997, pp.1-47.
5. Burnham, T. and Koubaa, A., "A New Approach to Estimate the In-situ Thermal Coefficient and Drying Shrinkage for Jointed Concrete Pavement, " Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements, Volume1, 2001. 9, pp. 313-332.
6. Calson, R. W., "Drying Shrinkage of Large Concrete Members", ACI Journal, Proceedings, Vol.33, No.3, Jan.-Feb. 1937, pp.327-336.
7. Hansen, T. C., and Mattock, A. H., "Influence of size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete", ACI Journal, Proceedings Vol.63, No.2, Feb. 1966, pp.267-290.
8. McDonald, D. "Development of a simplified Code Procedure for the Prediction of Shrinkage and Creep," Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the Fifth International Symposium, Barcelona, Spain, 1993. pp. 637-647.
9. Robert Otto Rasmussen, "Characterization and Modeling of Axial Slab-Support Restraint", Transportation Research Record, Volume 1778/ 2001, Friday, January 26, 2007, pp26-32.