석사학위논문

# 병치된 변형률 계측치를 이용한 프리팹 PSC 거더 캠버 재구성

동아대학교 대학원

ICT융합해양스마트시티공학과

김 현 영

2021학년도

# 병치된 변형률 계측치를 이용한 프리팹 PSC 거더 캠버 재구성

지도교수 박 현 우

이 논문을 공학석사학위
청구논문으로 제출함

2021년 12월

동아대학교 대학원

ICT융합해양스마트시티공학과

김 현 영

# 김현영의 공학석사학위
# 청구논문을 인준함

2021년 12월

위 원 장 최광규 (인)

부 위 원 장 박현우 (인)

위 원 강원호 (인)

## 국문초록

# 병치된 변형률 계측치를 이용한 프리팹 PSC 거더 캠버 재구성

ICT융합해양스마트시티공학과 김 현 영
지 도 교 수 박 현 우

스마트 건설 기술의 도입으로 공장에서 일괄 대량생산이 가능한 프리팹 부재에 대한 관심이 높아졌다. 프리팹 프리스트레스 콘크리트(PSC) 거더는 가설단계에서 프리팹 바닥판과의 정합성이 매우 중요하다. 기존의 연구들은 PSC 거더의 하중이 주어졌을 때 형상관리에 대한 연구에 집중이 되어있다. 프리팹 PSC 거더는 제작부터 가설 전 단계까지의 시간 의존적 거동에 따른 거더 형상관리가 필수적이다. 거더의 형상을 관리하기 위해 거더의 상·하연에 병치된 변형률 계측치를 이용하여 프리팹 PSC 거더의 성능을 통계적으로 평가할 수 있는 캠버 재구성 기법을 제안한다. 시간 의존적 거동에는 크리프, 릴락세이션, 건조수축 등이 있다. 이를 고려한 PSC 구조 해석 모델을 구성하여 기존의 상용 유한요소 해석프로그램과의 비교를 통하여 타당성을 확인한다. PSC 구조 해석 모델에서 병치된 변형률 계측치를 수치적으로 모사하여 캠버 재구성에 사용한다. 최소자승오차법을 활용하여 변형률로 2차 곡률식을 구한 후 이중적분과 지점조건을 이용하여 캠버를 재구성한다. 몬테카를로 수치모사를 통해 계측오차, 센서 개수 그리고 비선형적 시간 의존적 거동들을 고려하여 재구성된 캠버에 대해 통계적 정확도를 분석하고 캠버 재구성 기법의 타당성을 검증한다.

주요어 : 프리팹 PSC거더, 캠버 재구성, 병치된 변형률 계측치, 시간이력거동, 몬테카를로 수치모사

# 목 차


**Ⅰ. 서 론** ····· 1

**Ⅱ. 프리팹 PSC 거더 구조 해석 모델** ····· 4

2.1 수치 해석 모델을 위한 가정 ····· 4

2.2 시간 의존적 거동 해석 정식화 ····· 6

2.3 시간 의존적 거동 해석 예제 ····· 12

**Ⅲ. PSC 거더 성능 평가** ····· 15

3.1 캠버 재구성 정식화 ····· 15

3.2 초기 유효휨강성 및 초기 텐던력 정식화 ····· 18

**Ⅳ. 수치예제** ····· 21

4.1 센서의 배치 ····· 21

4.2 몬테카를로 수치모사 ····· 22

4.3 일별 캠버 정확도·정밀도 ····· 23

4.4 캠버 통계적 정확도 ····· 29

4.5 초기 유효휨강성 및 초기 텐던력 통계적 정확도 ····· 33

4.6 프리컴 거더 인장 실험 검증 ····· 35

**Ⅴ. 결론** ····· 39

참고문헌 ····· 42

Abstract ····· 46

# 표 목 차

표-2.1 수치해석을 위한 30m 프리팹 PSC 거더 예제 제원 ····· 12
표-2.2 시간이력 거동을 위한 거더의 제원 ····· 12
표-4.1 유의수준 99% 초기 텐던력 통계적 정확도-식 (3.12)사용 ····· 33
표-4.2 유의수준 99% 초기 텐던력 통계적 정확도-식 (3.13)사용 ····· 33
표-4.3 유의수준 99% 초기 유효휨강성 통계적 정확도-식 (3.17)사용 ····· 35

# 그 림 목 차

그림 1.1 프리팹 PSC 거더의 QR코드를 이용한 스마트 변형률 측정 센서 · 2
그림 2.1 프리팹 PSC 거더의 등가하중모델 ····· 4
그림 2.2 프리팹 PSC 거더의 시간단계에서 변형률 및 곡률 변화 ····· 6
그림 2.3 30m 프리팹 PSC 거더의 초기 도입 긴장력 대비 수치해석모델과 상용프로그램 사이 텐던력 손실 비교 ····· 13
그림 3.1 프리팹 PSC 거더 단면의 측정 변형률 센서 ····· 15
그림 4.1 센서의 위치 ····· 22
그림 4.2 재구성 캠버의 정확도 오차 ····· 24
그림 4.3 재구성 캠버의 정밀도 오차 ····· 27
그림 4.4 중앙 지점에서 재구성 캠버의 통계적 정확도 ····· 30
그림 4.5 90일 기준 센서에 개수에 따른 재구성된 캠버 통계적 정확도 ····· 32
그림 4.6 실제 크기의 프리컴 거더의 정보 ····· 36
그림 4.7 프리컴 거더 단면형상 및 변형률 센서 위치 ····· 36
그림 4.8 상·하연 병치된 측정 변형률 ····· 37
그림 4.9 중앙지점의 캠버 형상 ····· 38
그림 4.10 중앙지점의 상대오차 ····· 38

# Ⅰ. 서 론

스마트 건설기술에 대한 관심이 높아짐에 따라 제작부터 시공단계까지 프리팹 부재의 현상관리를 위한 연구들이 진행되어 왔다. 콘크리트 부재를 공장에서 제작할 수 있는 공법으로 프리캐스트 공법과 프리팹 공법이 있다. 프리캐스트 공법은 몰드를 사용하여 콘크리트 부재를 공장에서 생산하는 방식이다. 프리팹 공법은 현장이 아닌 공장에서 조립되고 생산되는 모든 것을 총칭하는 용어이다. 프리팹 공법 중에 대표적인 공법이 프리캐스트라 지칭하는 자료도 존재한다(GoJeon et al. 1992). 프리캐스트 공법의 경우 공장에서 생산되는 콘크리트 거더를 현장에 거치 한 후 바닥판을 현장타설한다. 프리팹 공법의 경우 공장에서 생산된 콘크리트 거더와 바닥판을 현장에 거치한다. 프리캐스트 공법 달리 프리팹 공법이 공장에서 콘크리트 거더와 바닥판을 생산하기 때문에 현장에서 프리팹 부재들의 정합성이 더 중요하다. 그러므로 프리팹 공법에서는 제작부터 거치 전까지의 거더 형상관리가 중요하다(Culmo et al. 2017). 형상관리에 중요한 요소인 PSC 거더의 캠버는 시간 의존적인 요소인 크리프, 건조수축, 릴락세이션, 콘크리트 강도에 영향을 많이 받는다(Kim et al. 2003, 박문호 et al 2010). 따라서 PSC 거더의 긴장력 도입 이후부터 거치까지의 캠버를 관리를 위한 모니터링이 필요로 한다. 그림 1.1(a)과 같이 제작단계에서 영구 매립한 변형률 센서를 그림 1.1(b)와 같이 외부에서 QR코드를 통해 실시간으로 변형률을 측정할 수 있는 스마트 센싱 기법이 최근 제안되었다. 측정한 변형률을 통하여 프리팹 PSC 거더의 캠버를 실시간으로 재구성하여 가설 단계까지의 형상관리가 가능하다.



(a) 영구 매립된 변형률 센서 (b) 실시간 변형률 데이터 측정을 위한 QR코드

그림 1.1 프리팹 PSC거더의 QR코드를 이용한 스마트 변형률 측정 센서(Khan et al. 2021)

보의 변형률을 이용하여 보의 처짐을 재구성하는 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다(Glaser et al. 2012). 오일러-베르누이 보의 변형률-처짐 관계식을 사용하여 변형률 데이터를 통해 다양한 대상 구조물의 처짐을 재구성하는 연구들이 존재한다. 대상 구조물로는 보 구조물(Kang et al. 2007, Yau et al. 2013, Kliewer and Glisic 2019), 철도 침목 구조물(Gregory et al. 2019), 아치형 구조물(Zhang et al. 2019), 판 구조물(Li, et al. 2018), 초고층 구조물(Xia et al. 2014), 셀 박스 거더(Shen and Jiang 2018), 트러스 구조물(Song et al. 2021), PSC 구조물(Chung et al. 2008)이 있다. Kliewer와 Glisic은 보 형태의 구조물에서 다양한 변형률 계측치를 이용해서 정적 및 동적 상대 변위를 재구성하는 기법들에 대한 비교 연구를 수행하였다 (Kliewer and Glisic 2019). Vurpillot 등은 오일러-베르누이보 이론에 기반을 두고 PSC 연속교의 수직 처짐을 변형률 데이터와 경사계 측정치를 활용하여 재구성하였다 (Vurpillot et al. 1998, Moon et al. 2019). Luo등과 Palma등은 측정 변형률 데이터를 이용하여 구조물의 변위를 재구성할 때 대상 구조물에 작용하는 하중의 변화와 다양한 경계조건의 효과를 분석하였다 (Palma et al. 2019, Luo et al. 2020). Wang 등은 정적 및 동적 측정 변형률 데이터를 모두 고려하여 구조물의 처짐을 재구성하고 실제 측정된 처짐과 비교하였다 (Park et al. 2013, Wang et al. 2021). PSC 거더의 측정 변형률을 이용한 처짐을 재구성하는 기존의 연구는 거치가 완료가 된 후의 PSC 거더의 형상에

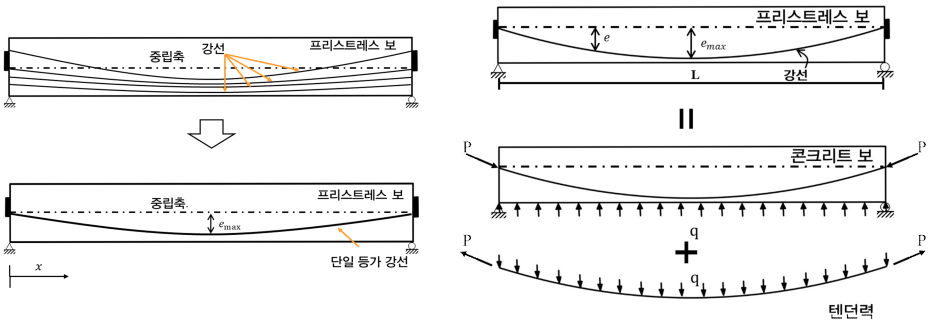
초점이 맞춰져 있다(Chung et al. 2008). 그러므로 프리팹 PSC 거더의 초기 기장단계부터 가설까지의 변형률을 통한 캠버 재구성 연구는 매우 드물다.

이 연구에서는 실제구조물을 통해 측정되는 변형률 데이터를 활용하기 하기 전 캠버 재구성 기법을 적용할 수 있는 가상의 모델인 PSC 거더 구조 해석 모델을 구성한다. PSC 거더 구조해석 모델을 통해 긴장부터 가설 전까지의 변형률을 수치 모사하여 제안된 캠버형상 재구성 기법의 타당성을 검증한다. 여기서 PSC 거더 구조 해석 모델은 캠버의 영향을 주는 시간 의존적인 요소를 정식화하여 구성 후 수치 모사된 변형률 데이터를 통해 오일러-베르누이 보의 변형률-처짐 관계식을 이용하여 캠버를 재구성한다. 예제로 30m 단경간 프로토타입 프리팹 PSC 거더에 대하여 변형률 센서의 변화와 계측오차를 고려한 재구성 캠버의 정확도와 정밀도 분석을 통해 캠버 재구성 기법의 통계적 정확도로 평가한다.

# Ⅱ. 프리팹 PSC 거더 구조 해석 모델

## 2.1 수치해석 모델을 위한 가정

긴장력 도입시점부터 가설 전 단계까지의 변형률 데이터가 수치 모사 가능한 프리팹 PSC 거더 구조해석 모델을 구성하기 위해 그림 2.1과 같은 초기 긴장 시 발생하는 프리스트레스에 의한 프리팹 PSC 거더의 탄성 거동 해석을 위한 등가하중모델을 나타냈다(신현묵 2008). 포물선으로 배치된 여러 가닥의 텐던을 그림 2.1(a)와 같이 단일 등가 텐던으로 치환이 가능하고 치환된 등가 텐던을 그림 2.1(b)와 같이 텐던에 작용하는 프리스트레스 텐던력을 콘크리트에 작용하는 등가상향력으로 치환할 수 있다고 가정한다. 그리고 텐던에서 발생하는 즉시손실에 해당되는 정착장치의 활동으로 인한 손실과 강재와 쉬스관 사이의 마찰 손실을 무시할 수 있다고 가정한다.




(a) 단일 등가 텐던 모델

(b) 포물선 배치 단일 텐던의 등가하중모델

그림 2.1 프리팹 PSC 거더의 등가하중모델

단일 등가 텐던은 단부에서는 콘크리트의 도심을 지나며 중앙지점에서 최대 편심량을 가지는 형상을 가진다. 여러 다발에 작용하는 프리스트레스가 단일 등가 텐던에 합력 작용하고 여러 가닥 텐던의 단면을 식 (2.1)

과 같은 단면 1차모멘트를 이용하여 구한 단일 등가 단면의 도심을 지난다. 오일러 베르누이 보의 이론을 기반으로 거더의 단면계수는 콘크리트 단면과 단일 등가 텐던과 위치에 따른 편심이 고려된 환산단면을 사용하며 거더의 지점조건은 단순지지 되어 있으며 자중을 추가적으로 고려한다.

단일 등가 텐던을 위한 단면 1차 모멘트 식은 다음과 같다.

$$\bar{y}(x) = \frac{\sum_{k=1}^{n} A_k \times y_k(x)}{\sum_{k=1}^{n} A_k} \tag{2.1}$$

여기서 아래첨자 $k$는 텐던의 번호를 나타내며 $x$, $\bar{y}(x)$,$A_k$ 그리고 $y_k(x)$는 각각 그림 2.1(a)에 표기된 거더의 단부로부터의 위치, $x$위치의 단일 등가 텐던의 도심, $k$번째 텐던의 단면적, $k$번째 텐던의 $x$위치의 도심은 나타낸다.

텐던의 위치에 따른 편심량을 구하기 위해 단일 등가 텐던의 배치를 2차 함수 형태의 포물선으로 가정하였다.

$$\bar{y}(x) = ax^2 + bx + c \tag{2.2}$$

식 (2.2)의 2차 곡선 방정식의 상수항을 구하기 위해 가정에 의해 단부에서는 콘크리트 도심과 텐던의 도심 사이 거리가 0이고 중앙지점에서는 콘크리트 도심과 텐던의 도심사이의 거리를 $e_{\max}$이다. 따라서 2차 곡선 방정식의 상수항을 정리하여 다음과 같은 위치에 따른 편심량 식을 표현가능하다.

$$\bar{y}(x) = -\frac{4e_{\max}}{L^2}x^2 + \frac{4e_{\max}}{L}x \tag{2.3}$$

여기서 $e_{\max}$ 그리고 $L$은 각각 거더중심에서의 최대 편심량 그리고 거더

의 경간 길이이다.

위의 가정에 따라 초기 긴장력 도입 후 가설 전 콘크리트 강도, 콘크리트의 탄성변형으로 인한 손실과 시간의존적인 손실을 고려하여 거더의 시간 의존적 거동은 비선형이므로 시간 단계 증분 해석의 정식화를 실시한다.

## 2.2 시간 의존적 거동 해석 정식화

시간 의존적 거동해석을 위해 시간단계법에 의한 정밀계산을 기반으로 실시하였다. 정밀계산은 크리프, 건조수축, 릴락세이션의 상호작용의 영향에 대한 프리스트레스 힘의 시간적인 변화를 고려한다. 그림 2.2는 단계적 방법을 통하여 근사적으로 계산하는 방법인 증분 시간단계법을 간략하게 표현한 그림이다.

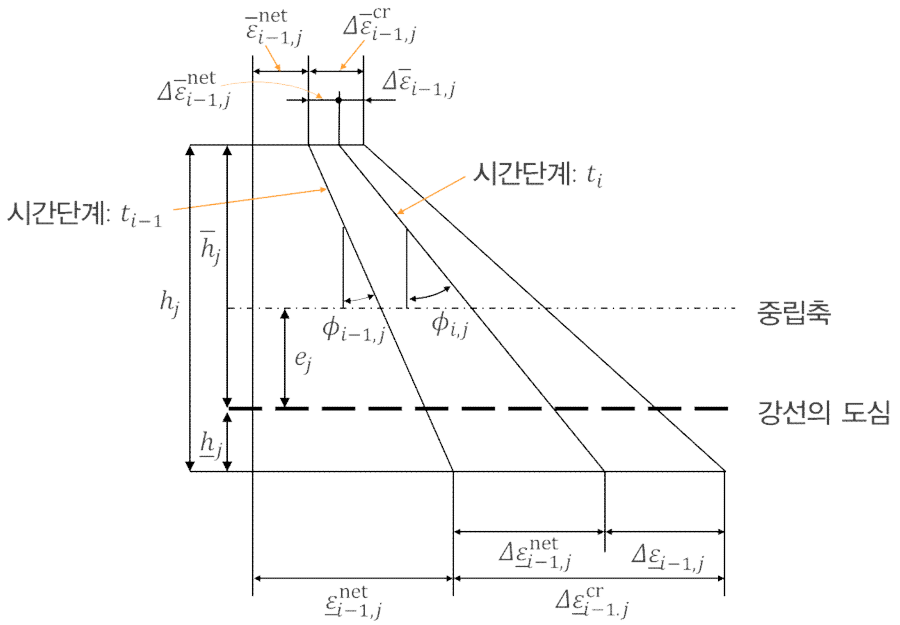



그림 2.2 프리팹 PSC 거더의 시간단계 $t_i$에서 변형률 및 곡률 변화

그림 2.1(a)를 기준으로 $x_j$에 위치한 프리팹 PSC 거더 단면에서 그림 2.2와 같은 증분 시간 단계법을 실시한다. $t_{i-1}$시점에서 $t_i$시점 사이에 발생하는 상·하연 총크리프 변형률 증분은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\bar{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j} = (\Phi_i - \Phi_{i-1})\bar{\epsilon}_{i-1,j} \tag{2.4}$$

$$\Delta\underline{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j} = (\Phi_i - \Phi_{i-1})\underline{\epsilon}_{i-1,j} \tag{2.5}$$

여기서 $\bar{\epsilon}^{\mathrm{cr}}$,$\underline{\epsilon}^{\mathrm{cr}}$,$\bar{\epsilon}$,$\underline{\epsilon}$ 그리고 $\Phi$는 각각 상·하연의 크리프 변형률, 상·하연의 탄성 변형률 그리고 크리프 계수를 나타낸다. 아래첨자 $i$와 $j$는 각각 시간단계 $t_i$와 기준점으로부터 거더의 단면 위치인 $x_j$를 나타낸다.

그림 2.2에서 총크리프 변형률 증분에 의해 총 긴장재 변형률 증분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\tilde{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j} = \bar{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j} + \frac{\bar{h}_j + e_j}{h_j}(\Delta\underline{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j} - \Delta\bar{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j}) \tag{2.6}$$

여기서 $\tilde{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j}$, $\bar{h}$, $h$ 그리고 $e$는 각각 텐던 도심 위치에서 크리프 변형률 증분, 도심으로부터 상연까지의 거리, 거더의 총 높이 그리고 콘크리트 도심으로부터 텐던 도심까지의 편심을 나타낸다.

콘크리트의 건조수축 변형률은 대기의 평균 상대습도, 부재의 크기 등을 고려하여 계산하며 텐던의 도심 위치에서 발생하는 건조수축의 변형률은 다음과 같다. (KCI 2012)

$$\tilde{\epsilon}^{\mathrm{sh}}_{i,j} = \epsilon_{sho}\beta_s(t_i - t_s) \tag{2.7}$$

여기서 $\tilde{\epsilon}^{\mathrm{sh}}_{i,j}$, $\epsilon_{sho}$, $\beta_s$ 그리고 $t_s$는 각각 텐던 도심 위치에서 건조수축 변형률, 개념건조수축계수, 건조수축 변형률 함수 그리고 콘크리트가 외기중에 노출되었을 때의 재령이다.

건조 수축 변형률 증분은 다음과 같이 나타낼 수 있다. (KCI 2012)

$$\Delta\tilde{\epsilon}^{\mathrm{sh}}_{i-1,j} = \epsilon_{sho}\beta_s(t_{i-1}-t_s) - \beta_s(t_{i-2}-t_s) \tag{2.8}$$

PS강재를 긴장한 채 일정 길이로 유지하였을 때 시간이 지남에 따라 인장응력이 감소하는 현상을 릴락세이션이라고 한다. 릴락세이션에 의해 텐던에 발생하는 응력 손실 증분은 다음과 같다. (신현묵 2008)

$$\Delta f^{\mathrm{relax}}_{i-1} = \log_{10}(\frac{t_i}{t_{i-1}})(\frac{f_{pi}}{f_{py}}-0.55)\frac{f_{pi}A_p}{C} \tag{2.9}$$

여기서 $\Delta f^{\mathrm{relax}}$, $f_{pi}$, $f_{py}$, $A_p$ 그리고 $C$는 릴락세이션 손실량, 초기 프리스트레스, 텐던의 항복강도, 텐던의 단면적 그리고 이완계수를 나타낸다. $C$는 일반 강재일 때 10, 저릴락세이션 강재일 때 45를 사용한다.

0일차 릴락세이션에 의해 발생하는 응력 손실 증분은 다음과 같다.

$$\Delta f^{\mathrm{relax}}_{0} = \frac{1.38}{C}(\frac{f_{pi}}{f_{py}}-0.55) \tag{2.10}$$

식 (2.6), 식 (2.8) 그리고 식 (2.9)를 통해 텐던에 발생하는 응력 손실의 증분의 합을 나타낸다.

$$\Delta\tilde{f}_{i-1,j} = E_p(\Delta\tilde{\epsilon}^{\mathrm{cr}}_{i-1,j} + \Delta\tilde{\epsilon}^{\mathrm{sh}}_{i-1,j}) + \Delta f^{\mathrm{relax}}_{i-1} \tag{2.11}$$

여기서 $\Delta\tilde{f}$와 $E_p$는 각각 크리프, 건조수축, 릴락세이션에 의한 텐던 손실 응력 증분의 합과 텐던의 탄성계수이다.

식 (2.11)의 텐던 응력 손실에 의해 응력에 변화가 생겨 거더 단면에 응력의 불균형이 발생한다. 이러한 불균형을 해소하기 위해 텐던 도심 위치에서 텐던과 콘크리트의 적합조건, 거더 단면의 축방향력과 휨 모멘트 평형방정식을 연립하여 다음과 같은 텐던 응력 복원 증분을 구한다.

$$\Delta\tilde{f}_{i-1,j}^{\text{recov}} = -\Delta\tilde{f}_{i-1,j}[1 - nA_p(\frac{1}{A_g} + \frac{e_j^2}{I_j^c})^{-1}] \tag{2.12}$$

여기서 $\Delta\tilde{f}^{\text{recov}}$, $n$, $I^c$ 그리고 $A_g$는 각각 텐던 응력 복원 증분, 탄성계수비, 환산단면에 대한 단면2차모멘트 그리고 콘크리트 총단면적이다.

식 (2.11)과 식 (2.12)로 텐던의 총손실 응력증분을 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta\tilde{f}_{i-1,j}^{\text{total}} = \Delta\tilde{f}_{i-1,j} + \Delta\tilde{f}_{i-1,j}^{\text{recov}} \tag{2.13}$$

여기서 $\Delta\tilde{f}^{\text{total}}$는 텐던의 총손실 응력 증분이다.

텐던의 총손실 응력 증분을 상·하연 콘크리트 응력 증분을 하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\overline{f}_{i-1,j} = -\frac{A_p}{A_g}(1 - \frac{\overline{h}_j e_j}{\gamma_j^2})\Delta\tilde{f}_{i-1,j}^{\text{total}} \tag{2.14}$$

$$\Delta\underline{f}_{i-1,j} = -\frac{A_p}{A_g}(1 - \frac{\underline{h}_j e_j}{\gamma_j^2})\Delta\tilde{f}_{i-1,j}^{\text{total}} \tag{2.15}$$

여기서 $\Delta\overline{f}$, $\Delta\underline{f}$ 그리고 $\gamma$는 각각 텐던의 총손실에 의한 상·하연 콘크리트 응력 증분, 그리고 거더 단면의 회전반경을 나타낸다.

텐던의 총손실에 의해 발생하는 콘크리트 상·하연 변형률 증분은 다음과 과 같다.

$$\Delta\overline{\epsilon}_{i-1,j} = \frac{\Delta\overline{f}_{i-1,j}}{E_i^{\text{ci}}} \tag{2.16}$$

$$\Delta\underline{\epsilon}_{i-1,j} = \frac{\Delta\underline{f}_{i-1,j}}{E_i^{\text{ci}}} \tag{2.17}$$

여기서 $\Delta\overline{\epsilon}_{i-1,j}$, $\Delta\underline{\epsilon}_{i-1,j}$ 그리고 $E^{\text{ci}}$는 텐던의 텐던력의 감소에 의해

상·하연 탄성 변형률 변화량 그리고 콘크리트 탄성계수를 나타낸다.

텐던의 텐던력의 감소에 의한 상·하연 순 크리프 변형률 증분은 다음과 같다.

$$\Delta\bar{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} = \Delta\bar{\epsilon}^{\text{cr}}_{i-1,j} + \Delta\bar{\epsilon}_{i-1,j} \tag{2.18}$$

$$\Delta\underline{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} = \Delta\underline{\epsilon}^{\text{cr}}_{i-1,j} + \Delta\underline{\epsilon}_{i-1,j} \tag{2.19}$$

여기서 $\bar{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j}$, $\underline{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j}$는 상·하연 순 크리프 변형률 증분이다.

식 (2.18)과 식 (2.19)의 상·하연 순 크리프 변형률 증분을 이용하여 거더의 곡률 증분을 구할 수 있다.

$$\Delta\phi_{i-1,j} = \frac{\Delta\underline{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} - \Delta\bar{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j}}{h_j} \tag{2.20}$$

그림 2.2의 시간 단계 $t_i$에서 상·하연 순 변형률은 식 (2.18)과 식 (2.19)로 표현이 가능하다.

$$\bar{\epsilon}^{\text{net}}_{i,j} = \bar{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} + \Delta\bar{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} \tag{2.21}$$

$$\underline{\epsilon}^{\text{net}}_{i,j} = \underline{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} + \Delta\underline{\epsilon}^{\text{net}}_{i-1,j} \tag{2.22}$$

그림 2.2의 시간 단계 $t_i$에서 상·하연 콘크리트 탄성 변형률은 식 (2.16)과 식 (2.17)로 표현이 가능하다. 이후 콘크리트의 탄성 변형률을 활용하여 캠버 재구성을 실시한다.

$$\bar{\epsilon}_{i,j} = \bar{\epsilon}_{i-1,j} + \Delta\bar{\epsilon}_{i-1,j} \tag{2.23}$$

$$\underline{\epsilon}_{i,j} = \underline{\epsilon}_{i-1,j} + \Delta\underline{\epsilon}_{i-1,j} \tag{2.24}$$

그림 2.2의 시간 단계 $t_i$에서 거더의 곡률은 식 (2.20)을 이용하여 표현이 가능하다.

$$\phi_{i,j} = \phi_{i-1,j} + \Delta\phi_{i-1,j} \tag{2.25}$$

식 (2.4)부터 식 (2.25)는 긴장력의 도입 이후 1일부터 가설 전 단계까지 시간 의존적 거동을 $x_j$에 위치의 단면을 증분 상태로 해석하는 방법이다.

긴장력 도입 시점인 0일에서 상·하연 순 변형률은 상·하연 콘크리트 탄성 변형률과 같다.

$$\bar{\epsilon}_{0,j}^{\text{net}} = \bar{\epsilon}_{0,j} \tag{2.26}$$

$$\underline{\epsilon}_{0,j}^{\text{net}} = \underline{\epsilon}_{0,j} \tag{2.27}$$

0일에서 상·하연 탄성 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\epsilon}_{0,j} = \frac{-\frac{P_0}{A_g}(1+\frac{\bar{h}_j e_j}{\gamma_j^2}) - \frac{M_j^{\text{d}}\bar{h}_j}{I_j^c}}{E_0^{\text{ci}}} \tag{2.28}$$

$$\underline{\epsilon}_{0,j} = \frac{-\frac{P_0}{A_g}(1+\frac{\underline{h}_j e_j}{\gamma_j^2}) - \frac{M_j^{\text{d}}\underline{h}_j}{I_j^c}}{E_0^{\text{ci}}} \tag{2.29}$$

여기서 $P_0$, $M^{\text{d}}$ 그리고 $\underline{h}$는 각각 초기 프리스트레스, 자중으로 인한 모멘트 그리고 하연으로부터 도심까지의 거리이다.

0일에서 거더의 곡률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{0,j} = -\frac{1}{E_0^{\text{ci}} I_j^{\text{c}}}(P_0 e_j - M_j^{\text{d}}) \tag{2.30}$$

## 2.3 시간 의존적 거동 해석 예제

2.1절에서 설명한 등가하중모델을 기반으로 2.2절에서 정식화 시킨 시간 의존적 해석을 이용하여 예제인 30m 프리팹 PSC 거더에 대한 수치해석을 실시한다. 표-2.1에 거더의 제원이고 표-2.2는 시간 의존적 해석에 필요한 제원을 작성하였다. 지점조건은 단순지지인 힌지-롤러 구조이다.

표-2.1 수치해석을 위한 30m 프리팹 PSC 거더 예제 제원

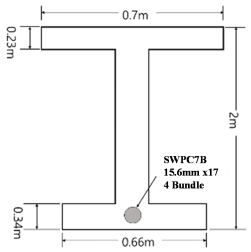
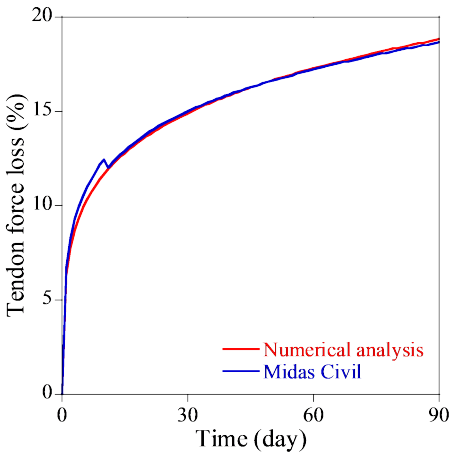
| | |
|---|---|
| 거더의 중앙단면 |  |
| 콘크리트 탄성계수($E_c$) | 29984MPa |
| 텐던 탄성계수($E_c$) | 205000MPa |
| 총단면의 단면 2차모멘트 | $0.330m^4$ |
| 콘크리트의 총단면적 | $0.662m^2$ |
| 초기 프리스트레스($P_0/A_p$) | 1440MPa |
| 콘크리트 강도 | 40MPa |
| 철근비($A_p/A_g$) | 0.0142 |
| 텐던의 최대 텐던비($e_{max}/h$) | 0.359 |

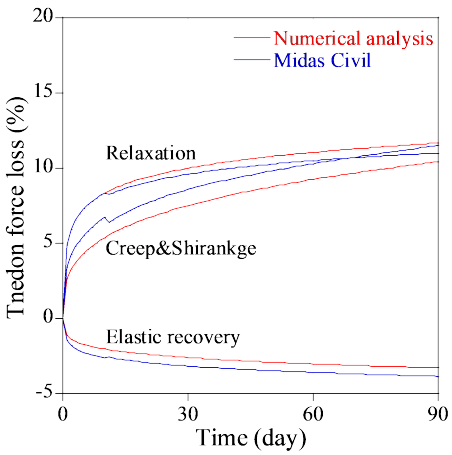
표-2.2 시간이력 거동을 위한 거더의 제원

| | |
|---|---|
| 시멘트 종류 | 1종 보통 시멘트 |
| 콘크리트 압축강도 발현 곡선 적용 코드 | KCI-USD12 |
| 콘크리트 평균 압축강도(28일) | C40(40MPa) |
| 콘크리트가 외기중에 노출되었을 때의 재령 | 7일 |
| 상대습도(RH) | 70% |
| 외기 또는 양생 온도 | 20℃ |
| 크리프 계수 | KCI-USD12 (KCI 2.2.2) |
| 콘크리트 건조수축 변형률 | KCI-USD12 (KCI 2.2.18) |
| 릴락세이션 | Magura 식 |

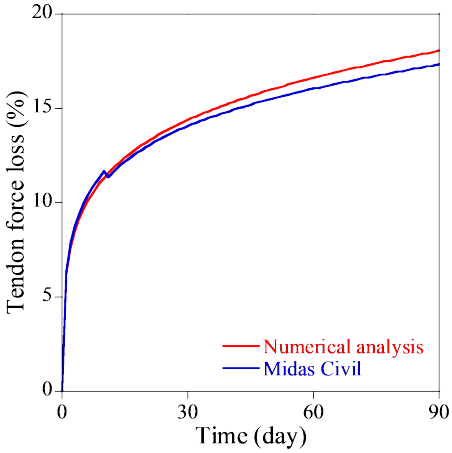
프리팹 PSC 거더의 텐던에 초기 긴장력을 도입 이후 가설까지 기간을 90일까지로 설정하여 수치해석을 실시하였다. 그림 2.3은 초기 긴장력을 도입한 이후 가설 전 단계인 90일까지 시간 의존적인 거동을 고려한 수치해석 모델과 상용화된 수치해석모델을 비교하기 위해 거더의 중앙($x = L/2$), 1/4 ($x = L/4$) 그리고 단부($x = 0$) 위치에서의 텐던력 감소비를 나타냈다. 여기서 0일차는 초기 긴장력 도입 시점을 의미하고 텐던력 감소비는 시간별 텐던의 손실력을 초기 텐던력으로 정규화한 값이다. 그림 2.3 (a),(c),(e)는 시간별 총 텐던력 감소비를 확인하면 전체 기간 동안 최대 상대오차 4% 이내로 기존의 상용프로그램과 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 2.3 (b), (d), (f)는 시간 의존적 거동에 영향을 주는 인자를 각각 비교하였다. 중앙부에서는 인자별 차이가 보이나 단부로 갈수록 인자가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 해석 결과 텐던력 손실이 초기에서부터 90일이 지나 거치 단계에서 초기 상대보다 15%이상 발생하여 시간 의존적 거동에 의해 손실이 많이 발생하는 것을 확인하였다.



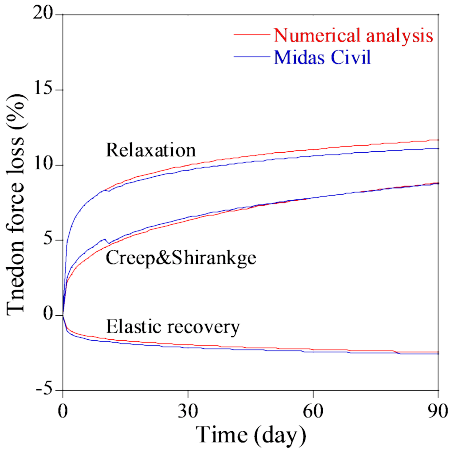

(a) $x = L/2$에서 시간에 따른 텐던력 손실량 비교



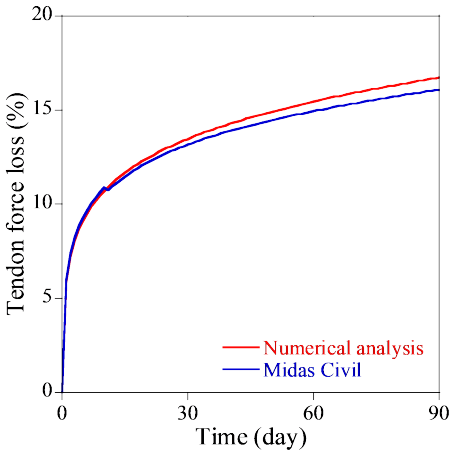

(b) $x = L/2$에서 시간 의존적 거동 요소에 따른 텐던력 손실량 비교



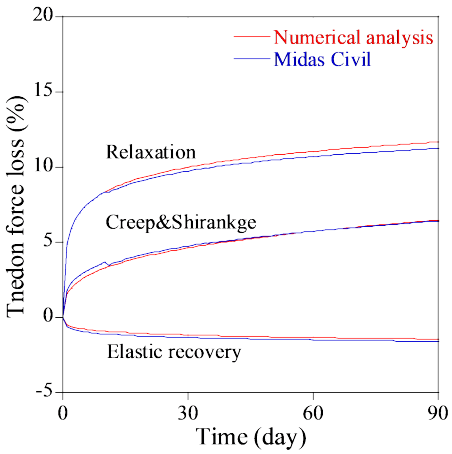

(c) $x = L/4$에서 시간에 따른 텐던력 손실량 비교




(d) $x = L/4$에서 시간 의존적 거동 요소에 따른 텐던력 손실량 비교




(e) $x = 0$에서 시간에 따른 텐던력 손실량 비교




(f) $x = 0$에서 시간 의존적 거동 요소에 따른 텐던력 손실량 비교

그림 2.3 30m프리팹 PSC 거더의 초기 도입 긴장력 대비 수치해석모델과 상용프로그램 사이 텐던력 손실 비교

# Ⅲ. PSC거더 성능 평가

## 3.1 캠버 재구성 정식화

0일차부터 가설 전 단계까지 거더와 바닥판과의 정합성을 평가하기 위해 PSC 거더의 캠버를 위한 재구성을 정식화를 한다. 단부를 기준으로 그림 2.1(a)와 같이 임의의 $x_l$에 위치한 프리팹 PSC거더 단면에서 그림 3.1과 같은 측정시점의 $\tau_k$의 상·하연에 병치된 센서를 이용하여 측정한 변형률을 이용하여 곡률 측정치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{k,l}^{\text{meas}} = \frac{\underline{\epsilon}_{k,l}^{\text{meas}} - \overline{\epsilon}_{k,l}^{\text{meas}}}{h_l} \tag{3.1}$$

여기서 $\phi_{k,l}^{\text{meas}}$, $\overline{\epsilon}^{\text{meas}}$, $\underline{\epsilon}^{\text{meas}}$는 각각 곡률의 측정치, 상·하연의 변형률 측정치를 나타낸다. 아래첨자 $k$와 $l$은 각각 센싱이 측정된 시점 $\tau_k$과 센서가 설치된 거더의 단면 위치 $x_l$을 지칭한다. 그림 3.1과 같이 상·하연의 병치된 변형률의 사이거리를 알 때 중립축의 위치를 모르는 상태에서도 단면의 곡률을 구할 수 있다.

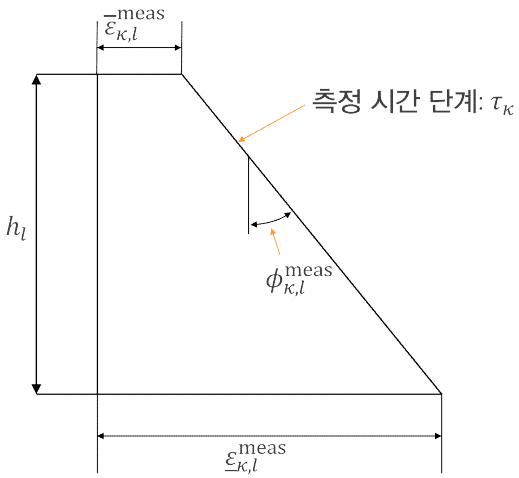



그림 3.1 프리팹 PSC 거더 단면의 측정 변형률 센서

식 (3.1)에서 구한 곡률 측정값을 이용하여 프리팹 PSC 거더 전 구간의 곡률을 최소자승오차법을 이용하여 재구성할 수 있다(Xu et al. 2015). 캠버를 재구성하기 위해 PSC 거더의 곡률의 형상함수를 $m$차 다항함수로 가정한다.

$$\phi_m^{\text{recon}}(\tau;x) = \sum_{p=0}^{m} a_p(\tau)x^p \tag{3.2}$$

여기서 $\phi_m^{\text{recon}}$,$a_p$ 그리고 $m$은 각각 재구성된 곡률, 다항함수의 상수항 그리고 다항함수의 최고차항을 나타내고 $x$와 $\tau$는 위치와 시간을 나타낸다. 다항함수의 상수항은 측정시점에서의 곡률 형상 함수이며 곡률의 형상함수를 구성하기 위해서는 최고차항 $m$임으로 $m+1$개의 미지수가 필요로 한다. 따라서 곡률 형상 함수를 구성하기 위해서는 각 시점별로 식 (3.1)에서 주어지는 측정 곡률의 개수가 미지수의 개수보다 크거나 같아야한다.

최고차항 $m$의 경우 지점의 종류와 하중의 경우에 따라서 결정이 된다. 이 연구에서는 단순 지지된 프리팹 PSC 거더의 초기 긴장력과 자중을 고려하여 초기 긴장력은 그림 2.1(b)의 등가하중모델에 따라 등분포하중이며 자중 또한 등분포하중으로 해석이 가능하다. 이러한 경우 곡률의 형상함수를 식 (3.3)과 같이 2차 곡률식을 구성할 수 있다.

$$\phi_2^{\text{recon}}(\tau;x) = a_0(\tau) + a_1(\tau)x + a_2(\tau)x^2 \tag{3.3}$$

식 (3.3)의 3개의 상수항($a_0$, $a_1$, $a_2$)을 구하기 위해서는 최소 3개 이상의 위치의 곡률 측정치가 필요하다. 현장에서 적용되는 제작단계의 프리팹 PSC 거더에 부착된 변형률 센서로 부터 측정되는 데이터는 여건상 한정적이고 제한적이라서 최소로 최적을 데이터를 측정할 수 있는 위치에 부착되어야 된다.

$\tau_k$시점에서 곡률 형상 함수는 식 (3.1)의 곡률 측정값과 식 (3.3)의 2차

다항 함수에 대한 최소자승오차법을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min_{a_p(\tau_k)} \Pi = \sum_{l=1}^{n^{\text{meas}}} \left| \phi_2^{\text{recon}}(\tau_k; x_l) - \phi_{k,l}^{\text{meas}} \right|^2 \tag{3.4}$$

여기서 $n^{\text{meas}}$는 측정된 곡률을 나타낸다.

식 (3.4)에서 얻은 측정시점 $\tau_k$에서 $a_p$를 식 (3.3)에 대입을 통하여 곡률 형상 함수 $\hat{\phi}_2^{\text{recon}}$를 구할 수 있다. $\hat{\phi}_2^{\text{recon}}$의 이중적분을 적용하여 거더 전체의 캠버 형상을 재구성할 수 있다.

$$\Delta(\tau_k; x) = \iint \hat{\phi}_2^{\text{recon}}(\tau_k; x) dx^2 + C_1 x + C_2 \tag{3.5}$$

여기서 적분상수 $C_1$과 $C_2$는 단순지지에 대한 경계조건을 이용하여 구한다.

경계조건은 단부($x = 0$, $x = L$)에서 곡률을 이용하여 다음과 같은 식 (3.6)과 식 (3.7)로 적분상수를 구할 수 있다.

$$\Delta(\tau_k; L) = \iint_0^L \hat{\phi}_2^{\text{recon}}(\tau_k; x) dx^2 + C_1 L + C_2 \tag{3.6}$$

$$\Delta(\tau_k; 0) = C_2 = 0 \tag{3.7}$$

## 3.2 초기 유효휨강성 및 초기 텐던력 정식화

프리팹 PSC 거더의 초기에 발생하는 성능을 평가하기 위한 측정된 변형률을 이용하여 초기에 발생하는 텐던력과 유효휨강성의 예측을 위한 정식화를 수행한다. 정식화를 위해 그림 3.1에서 측정시기를 0일차 초기에 발생하는 병치된 측정 변형률에 대응되는 응력식은 다음과 같다.

$$\overline{f}_{0,l} = -\frac{\overline{P}_{0,l}}{A_g} + \frac{\overline{P}_{0,l} e_l}{I_g} - \frac{M_l^{\mathrm{d}}}{I_g}\overline{h} \tag{3.8}$$

$$\underline{f}_{0,l} = -\frac{\overline{P}_{0,l}}{A_g} - \frac{\overline{P}_{0,l} e_l}{I_g} + \frac{M_l^{\mathrm{d}}}{I_g}\underline{h} \tag{3.9}$$

여기서 $\overline{\sigma}$, $\underline{\sigma}$, $\overline{P}$ 그리고 $I_g$ 각각 상연에서의 응력, 하연에서의 응력, 예측된 0일차에서의 텐던력 그리고 총단면의 단면 2차모멘트를 나타낸다.

후크의 법칙은 식 (3.10)과 식 (3.11)에 나타낼 수 있다. 식 (3.10)과 식 (3.11)을 식 (3.8)과 식 (3.9)에 각각 대입하여 정리한다.

$$\overline{f}_{0,l} = E^{\mathrm{ci}}\overline{\epsilon}_{0,l} \tag{3.10}$$

$$\underline{f}_{0,l} = E^{\mathrm{ci}}\underline{\epsilon}_{0,l} \tag{3.11}$$

식 (3.10)과 식 (3.11)을 각각 적용한 식 (3.8)과 식 (3.9)를 연립하여 초기 텐던력$\overline{P}_i$에 대하여 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\overline{P}_{0,l} = -\frac{E^{\mathrm{ci}} A_g}{\overline{h} + \underline{h}}(\underline{h}\,\overline{\epsilon}_{0,l} + \overline{h}\,\underline{\epsilon}_{0,l}) \tag{3.12}$$

여기서 측정된 변형률을 이용하여 3.1절에서 재구성된 캠버를 사용한 중앙지점($x = L/2$)에 초기 텐던력 예측식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{P}_0^{\text{camber}} = \frac{48\Delta(0;L/2)E^{\text{ci}}I_g}{5eL^2} + \frac{wL^2}{8eL^2} \tag{3.13}$$

여기서 $\overline{P}_0^{\text{camber}}$그리고 $w$는 재구성 캠버로 예측한 텐던력 그리고 자중에 의해 발생하는 분포하중을 나타낸다.

초기 텐던력을 예측에 필요한 초기 콘크리트의 탄성계수는 설계값으로 지정하여 사용하였다(KCI 2012).

초기 유효휨강성을 예측하기 위해 3.1절에서 재구성된 캠버식을 다음과 같은 구성으로 구분하였다.

$$\Delta(0;l) = \Delta_{0,l}^{\text{camber}} + \Delta_{0,l}^{\text{selfweight}} \tag{3.14}$$

여기서 $\Delta^{\text{camber}}$ 그리고 $\Delta^{\text{selfweight}}$는 초기 긴장력에 의해 생기는 상향력에 발생하는 캠버 그리고 자중에 의해 발생하는 처짐을 나타낸다.

식 (3.14)에서 $\Delta^{\text{camber}}$과 $\Delta^{\text{selfweight}}$를 중앙지점($x = L/2$)에서 발생하는 식은 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\Delta_0^{\text{camber}} = \frac{5P_0eL^2}{48\overline{EI}_0} \tag{3.15}$$

$$\Delta_0^{\text{selfweight}} = \frac{5wL^4}{384\overline{EI}_0} \tag{3.16}$$

여기서 $\overline{EI}$는 예측된 유효휨강성이다.

식 (3.15)와 식 (3.16)을 식 (3.14)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\overline{EI}_0 = \frac{5P_0eL^2}{48\Delta(0;L/2)} - \frac{5wL^4}{384\Delta(0;L/2)} \tag{3.17}$$

초기 유효휨강성을 예측하기 위해 제안된 텐던력 설계값을 초기 텐던력을 사용하였다.

# Ⅳ. 수치예제

## 4.1 센서의 배치

3장에서 캠버 재구성, 초기 텐던력 그리고 초기 유효휨강성의 예측을 위해서는 센서의 배치가 매우 중요하다. 그림 1.1과 같이 제작 단계에서 영구 부착되는 스마트 센싱 시스템의 경우 변형률 측정 개소를 최소화 시키고 최적으로 배치를 해야 한다. 이를 위해 그림 4.1과 같이 4가지의 경우의 센서 배치를 통해 수치모사를 실시하였다. 그림 4.1(a)의 경우 3점 센싱으로 상・하연으로 병치된 변형률 센서를 단부지점과 중앙지점에 배치하였다. 그림 4.1(b)의 경우 3점 센싱으로 상・하연으로 병치된 변형률 센서를 단부지점, 1/4지점과 중앙지점에 배치하였다. 그림 4.1(c)의 경우 7점 센싱으로 상・하연으로 병치된 변형률 센서를 단부지점, 1/6지점, 1/3지점과 중앙지점에 배치하였다. 그림 4.1(d)의 경우 9점 센싱으로 상・하연으로 병치된 변형률 센서를 단부지점, 1/8지점, 1/4지점, 3/8지점과 중앙지점에 배치하였으며 모든 센싱은 거더의 중앙을 기준으로 대칭으로 센서를 배치하였다. 4가지 경우의 센싱을 통해 3점 센싱, 5점 센싱, 7점 센싱과 9점 센싱을 통하여 변형률 데이터를 수집하였다. 여기서 3점 센싱은 캠버 재구성을 위한 최소한의 변형률 데이터 수집 센서 수 이다. 그 이유는 기존에 3.1절에서 초기 긴장력이 도입되는 프리팹 PSC거더를 등가하중모델로 가정을 하여 변형률을 캠버로 재구성하는 과정에서 2차 곡률식으로 설정했기 때문이다. 식 (3.5)를 이용하여 문제를 해결하기 위한 최소한의 미지수의 개수가 3개 임으로 3점 센싱이 최소한의 센서 배치로 설정 되었다. 센서의 개수에 따른 재구성 기법의 차이점을 비교하고 분석하기 위해 3점 센싱, 5점 센싱, 7점 센싱, 9점 센싱으로 캠버 재구성을 실시하였다.

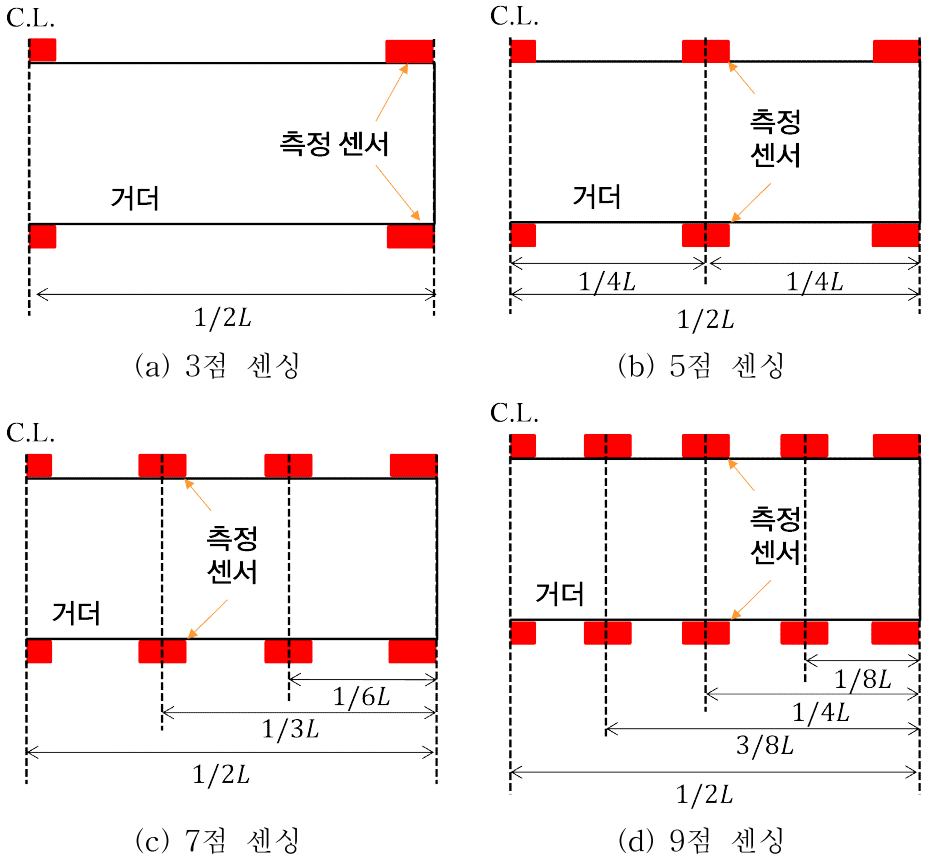



그림 4.1 센서의 위치

## 4.2 몬테카를로 수치모사

수치 모사 실험을 실시하기 위해 예제를 2.1절의 30m 프로토타입 PSC 거더를 사용하여 해석을 하였다. 그림 4.1과 같이 병치된 센서로 부터 초기 긴장부터 90일까지 일별로 식 (2.23)과 식 (2.24)으로 계산된 콘크리트 탄성 변형률을 모사하였다. 변형률 센서로 부터 발생할 수 있는 오차를 포함하기 위해 일별로 5%, 10% 그리고 20%의 계측오차를 추가하여 각각 몬테카를로 수치모사를 통해 10000회를 실시하였다. 5%, 10%, 그리고 20%의 계측오차를 일별로 10000개의 상·하연 데이터를 생성하였다. 5%, 10% 그리고 20%의 계측오차가 포함된 변형률 데이터를 3.1절에

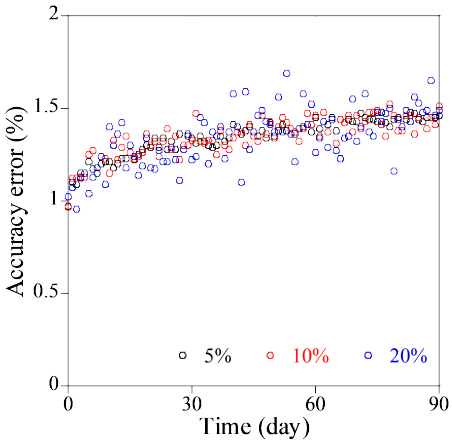
서 제시한 캠버 재구성 기법의 절차를 통해 캠버를 재구성하였다. 재구성된 캠버와의 비교를 위한 캠버 데이터는 2장에서 제시한 프리팹 PSC 구조 해석 모델에서 식 (2.25)의 곡률을 사다리꼴 공식을 이용해 두 번에 수치적분으로 구하였다. 수치적분을 위한 경계조건은 3.1절에서 캠버 재구성과 동일한 단순지지 조건으로 계산하고 수치 적분의 정확도를 위해 $L/2000$간격으로 실시하였다.

## 4.3 일별 캠버 정확도・정밀도

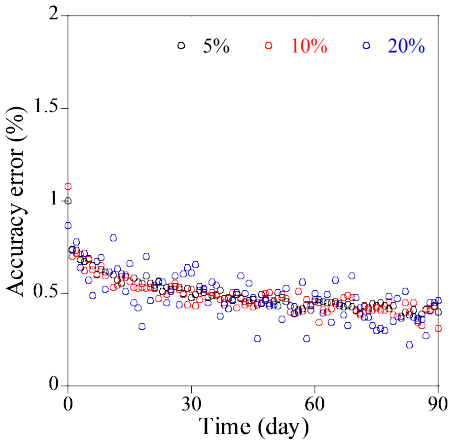
일별 캠버의 정확도 오차를 계산하기 위해 4.2절에 기술한 몬테카를로 수치모사를 통해 재구성된 캠버 평균값과 프리팹 PSC 구조 해석 모델에서 수치적분으로 계산된 캠버와의 일별 캠버의 정확도 오차는 다음 식으로 계산하였다. 재구성 캠버의 일별 정확도 오차는 지점별로 그림 4.2에 그래프로 나타냈다.

$$\text{Accuracy error}\,(\%) = \left| \frac{\Delta_{k,l}^{\text{mean}} - \Delta_{k,l}^{\text{exact}}}{\Delta_{k,l}^{\text{exact}}} \right| \times 100 \qquad (4.1)$$

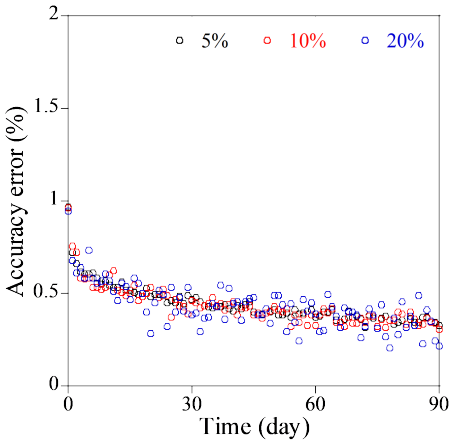
여기서 $\Delta^{\text{mean}}$과 $\Delta^{\text{exact}}$는 각각 일별로 10000회 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 재구성된 캠버의 평균과 이에 대응하는 PSC 구조 핵심 모델의 캠버값이다. 아래첨자는 $k$와 $l$은 시간과 위치를 나타낸다.



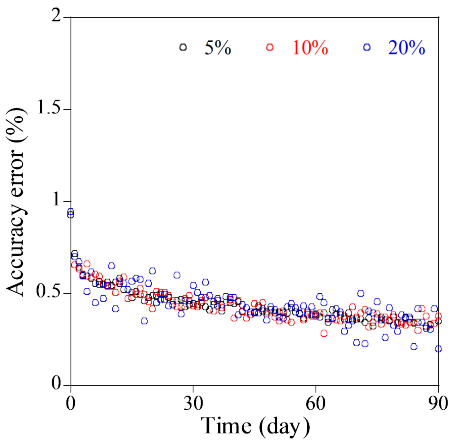

(a) 중앙지점($x = L/2$) 3점 센싱



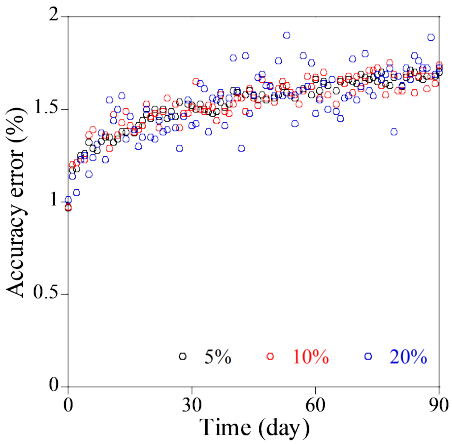

(b) 중앙지점($x = L/2$) 5점 센싱



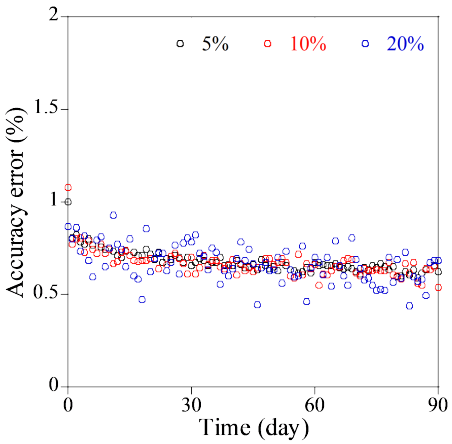

(c) 중앙지점($x = L/2$) 7점 센싱



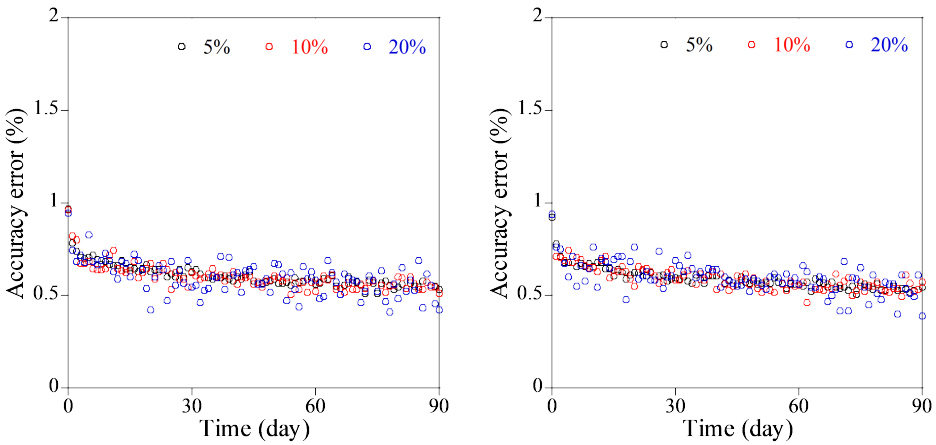

(d) 중앙지점($x = L/2$) 9점 센싱




(e) 1/4지점($x = L/4$) 3점 센싱




(f) 1/4지점($x = L/4$) 5점 센싱




(g) 1/4지점($x = L/4$) 7점 센싱 (h) 1/4지점($x = L/4$) 9점 센싱

그림 4.2 재구성 캠버의 정확도 오차

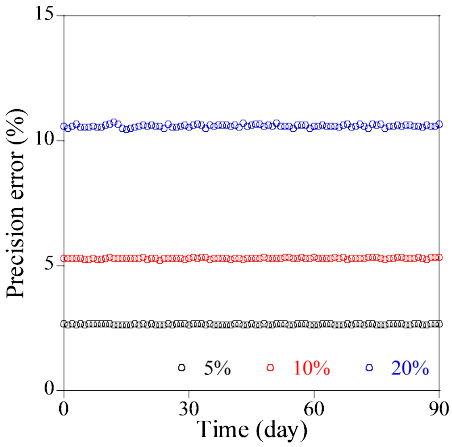
일별로 재구성된 캠버의 정확도 오차를 지점의 위치, 계측점의 개수 그리고 계측오차 크기에 대하여 분석을 실시하였다. 우선 지점별로 확인하였을 때 지점에 대한 차이가 없다. 계측오차의 경우 모든 경우에서 퍼짐의 정도의 차이는 보였으나 크게 변화는 없었다. 그러나 계측점의 개수의 차이는 그래프별 편향(bias)의 차이를 보여주었다. 3점 센싱의 경우 일별로 초기 약 1%에서 기간이 지남에 따라 약 2%로의 비선형적인 증가 현상을 보여주었다. 5점 센싱의 경우 일별로 초기 약 1%에서 기간이 지남에 따라 약 0.5%로의 비선형적인 감소현상을 보여준다. 7점 센싱의 경우 일별로 초기 약 1%에서 기간이 지남에 따라 약 0.2%로의 비선형적인 감소현상을 보여준다. 9점 센싱의 경우 일별로 초기 약 1%에서 기산이 지남에 따라 약 0.2%로의 비선형적인 감소현상을 보여준다. 이 비선형적인 현상은 일별로 발생하는 콘크리트의 시간 의존적 거동에 의해 발생한다. 캠버 재구성을 위해 식 (3.3)에서 2차 곡률식으로 가정하여 캠버를 재구성하는 과정에서 편향이 발생했다. 3점 센싱의 경우 5점 센싱, 7점 센싱 그리고 9점 센싱 보다 편향이 크게 발생하였다. 시간 의존적 거동을 증분으로 해석하는 과정에서 누적되어서 증가하였다. 9점 센싱, 7

점 센싱과 5점 센싱의 경우 3점 센싱 보다 편향이 감소하였다. 그러나 재구성 캠버의 정확도가 3점 센싱의 경우 2%이내로 발생하고 5점 센싱, 7점 센싱과 9점 센싱의 경우 1% 이내로 매우 작게 발생하였다. 5점 센싱 이상부터 시간이 지남에 따라 정확도 오차가 감소하였다. 7점 센싱이 9점 센싱이 되었을 때 90일 기준 정확도 오차 크기의 차이는 발생하지 않았다. 이를 통해 최적의 효율을 가질 수 있는 센서의 비용적인 측면과 현장에서의 상황이 잘 고려된 배치가 중요하다. 그러므로 재구성 캠버의 최소한의 센서 개수인 3점 센싱의 계측오차를 확인해 보았을 때 20%의 계측오차가 발생하고 콘크리트 비선형 거동에도 불구하고 식 (3.3)의 2차 곡률식을 기반을 둔 캠버의 재구성이 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 5점 센싱 이상의 센싱의 경우는 3점 센싱 보다 시간이 지남에 따라 최종 거치 단계에서 2배 이상의 정확도를 보여줌으로써 계측점이 증가함에 따라 캠버 재구성 정확도가 향상됨을 확인할 수 있었다.

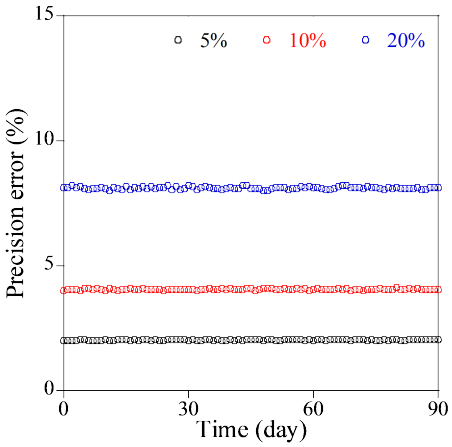
일별 캠버의 정밀도를 계산하기 위해 몬테카를로 수치모사로 재구성캠버의 표준편차비를 구하여 다음과 같은 일별 재구성 캠버 정밀도 오차식을 계산하였다. 재구성 캠버의 일별 정밀도 오차를 지점별로 그림 4.3에 그래프로 나타냈다.

$$\text{Precision error}\,(\%) = \left| \frac{\Delta_{k,l}^{\text{std}}}{\Delta_{k,l}^{\text{mean}}} \right| \times 100 \qquad (4.2)$$

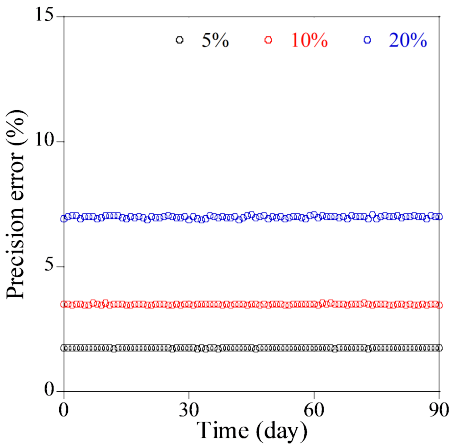
여기서 $\Delta^{\text{std}}$는 일별로 10000회 몬테카를로 수치모사에서 재구성 캠버의 표준편차이다.



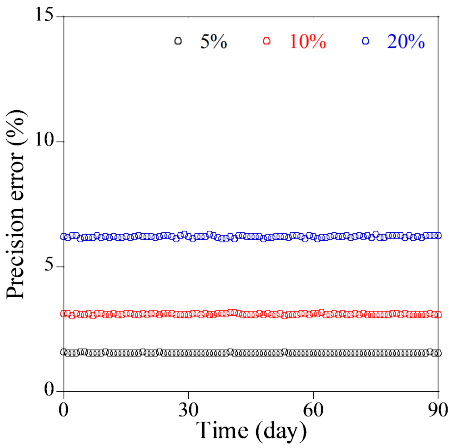

(a) 중앙지점($x = L/2$) 3점 센싱



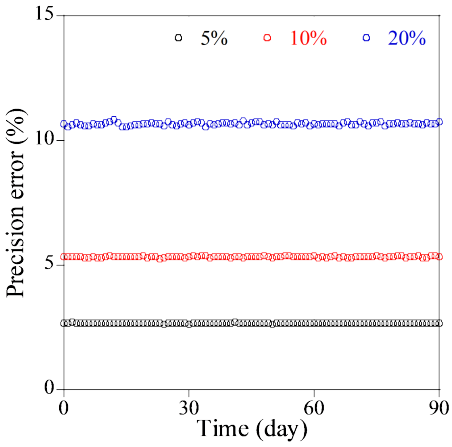

(b) 중앙지점($x = L/2$) 5점 센싱



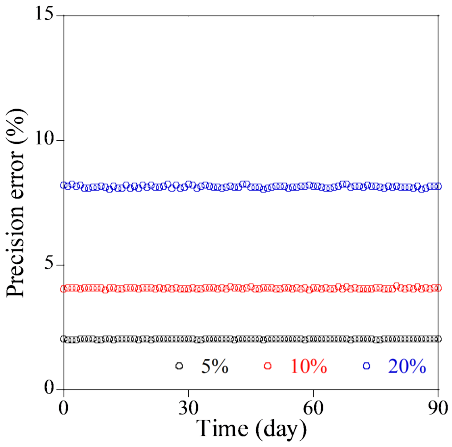

(c) 중앙지점($x = L/2$) 7점 센싱



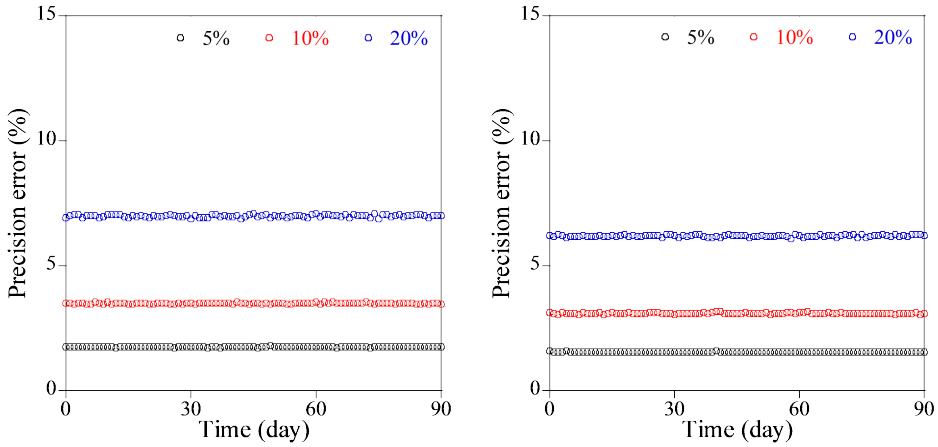

(d) 중앙지점($x = L/2$) 9점 센싱




(e) 1/4지점($x = L/4$) 3점 센싱




(f) 1/4지점($x = L/4$) 5점 센싱




(g) 1/4지점($x = L/4$) 7점 센싱 (h) 1/4지점($x = L/4$) 9점 센싱

그림 4.3 재구성 캠버의 정밀도 오차

일별로 재구성된 캠버의 정밀도 오차를 지점의 위치, 계측점의 개수 그리고 계측 오차 크기에 대하여 분석을 실시하였다. 우선 지점별로 확인하였을 때 지점에 대한 차이를 없다. 그러나 계측오차와 계측점의 개수의 경우 중 계측오차의 경우는 모든 그래프를 기준으로 계측오차가 5%, 10% 그리고 20% 증가함에 따라서 차이가 정밀도 오차가 커지는 현상을 보여주었다. 계측점의 개수의 차이는 계측점의 개수가 증가함에 따라서 정밀도 오차가 작아지는 현상을 보여준다. 3점 센싱의 경우 계측오차가 5%, 10% 그리고 20%의 경우 재구성 캠버 정밀도 오차가 각각 약 2.5%, 5% 그리고 11% 보여준다. 5점 센싱의 경우 계측오차가 5%, 10% 그리고 20%의 경우 재구성 캠버 정밀도 오차가 각각 약 2.0%, 4.0% 그리고 8.0%를 보여준다. 7점 센싱의 경우 계측오차가 5%, 10% 그리고 20%의 경우 재구성 캠버 정밀도 오차가 각각 약 1.7%, 3.5% 그리고 7.0%를 보여준다. 9점 센싱의 경우 계측오차가 5%, 10% 그리고 20%의 경우 재구성 캠버 정밀도 오차가 각각 약 1.5%, 3.1% 그리고 6.2%를 보여준다. 그림 4.3에서 계측점의 개수가 증가함에 따라서 정밀도 오차가 감소한다. 여기서 3점 센싱에서 5점 센싱의 정밀도 오차 감소량은 계측오차 20% 기준 약 3%이다. 5점 센싱에서 7점 센싱의 정밀도 오차 감소

량은 계측오차 20% 기준 약 1%이다. 7점 센싱에서 9점 센싱의 정밀도 오차 감소량은 계측오차 20% 기준 약 0.8%이다. 재구성 캠버의 정밀도 오차는 계측점의 개수보다 계측오차에 대한 영향을 많이 받는다는 점을 알 수 있다. 동일한 계측오차에 의해 발생한 정밀도 오차를 계측점 개수의 증가로 감소시킬 수 있다. 정밀도 오차를 감소시키기 위해 각각의 센싱에서 계측오차 사이의 감소량을 확인하였다. 3점 센싱의 경우 계측오차에 대한 차이가 약 8.5%를 보여준다. 5점 센싱의 경우 계측오차에 대한 차이가 약 6%를 보여준다. 7점 센싱의 경우 계측오차에 대한 오차가 약 6.3%를 보여준다. 9점 센싱의 경우 계측오차에 대한 오차가 약 4.7%를 보여준다. 계측점의 개수 증가로 계측오차 사이의 정밀도 오차가 감소한다. 3점 센싱보다 많은 센서를 부착한 5점 센싱, 7점 센싱과 9점 센싱이 계측오차 사이에 오차가 감소한 이유는 최소자승오차법을 통한 곡률 재구성 과정에서 계측점의 개수가 증가함에 따라 계측 오차를 상쇄시키는 효과가 발생하기 때문이다. 따라서 계측점의 개수가 증가하면 정밀도의 오차는 감소하고 무작위 계측오차가 발생할 때 계측점을 증가시켜 재구성 캠버의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 여기서 계측점의 개수가 많이 늘어난다고 하여도 계측점 증가에 따른 감소량의 감소폭이 크게 감소하지 않아 효율적인 센서의 배치가 필요하다. 일별 캠버는 시간이 지남에 따른 변동성이 없는 것으로 보인다. 이는 시간 의존적 비선형 거동이 정밀도 오차에는 영향을 주지 않기 때문이다.

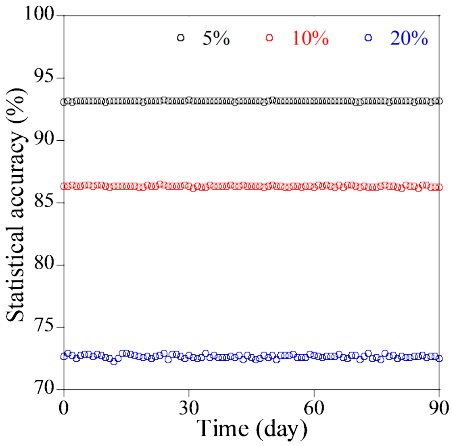
## 4.4 캠버 통계적 정확도

4.3절의 일별 재구성 캠버의 통계 분포가 정규분포를 따르면 정확도 오차식과 정밀도 오차 식을 통하여 통계적 유의 수준에 대한 재구성 캠버의 통계적 정확도를 계산할 수 있다.

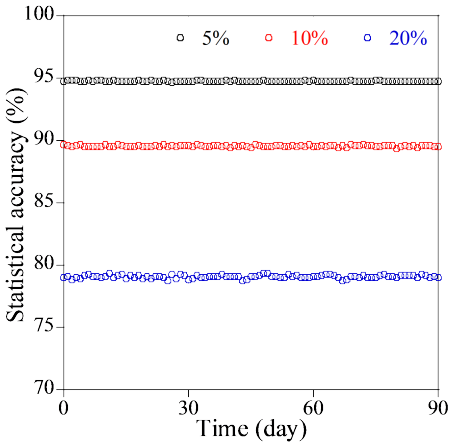
$$\text{Statistical accuracy}\,(\%) = \text{Min}\left[1 - \frac{\left\{\Delta_{k,l}^{\text{exact}} - (\Delta_{k,l}^{\text{mean}} \pm \sigma\Delta_{k,l}^{\text{std}})\right\}}{\Delta_{k,l}^{\text{exact}}}\right] \times 100 \qquad (4.3)$$

여기서 $\sigma$는 통계적 유의 수준에 따라 결정이 되며 95%와 99% 유의수준의 경우 각각 1.96과 2.58이다. 만약 그림 4.2와 같이 $\frac{\Delta_{k,l}^{\text{mean}} - \Delta_{k,l}^{\text{exact}}}{\Delta_{k,l}^{\text{exact}}} \approx 0$ 이면 식 (4.3)을 근사적으로 나타낼 수 있다.

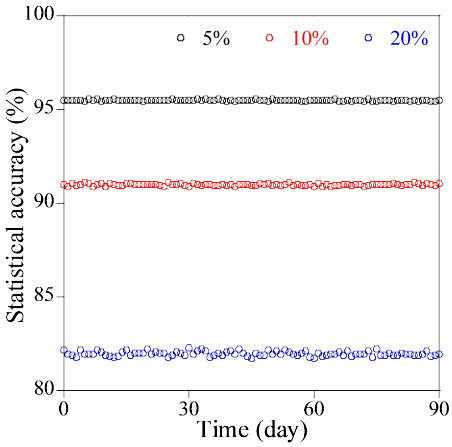
$$\text{Statistical accuracy}\,(\%) \approx (1 - \sigma \frac{\Delta_{k,l}^{\text{std}}}{\Delta_{k,l}^{\text{exact}}}) \times 100 \qquad (4.4)$$



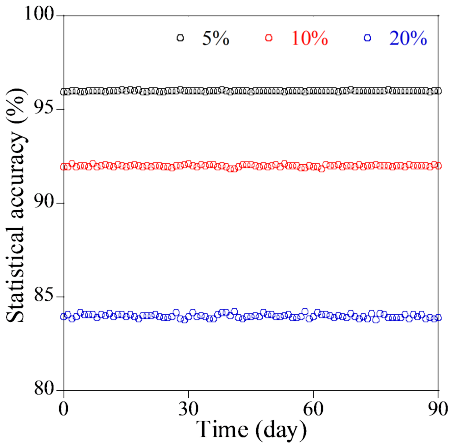

(a) 유의수준 99% 3점 센싱



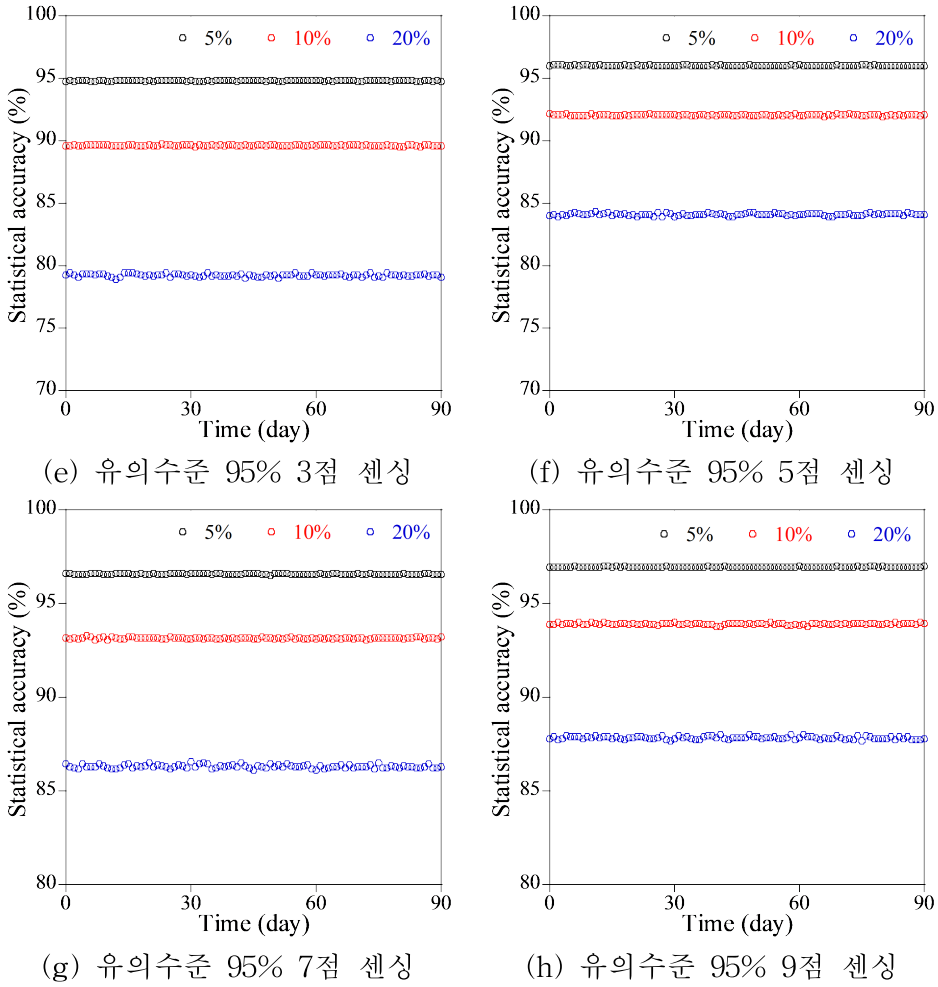

(b) 유의수준 99% 5점 센싱




(c) 유의수준 99% 7점 센싱




(d) 유의수준 99% 9점 센싱



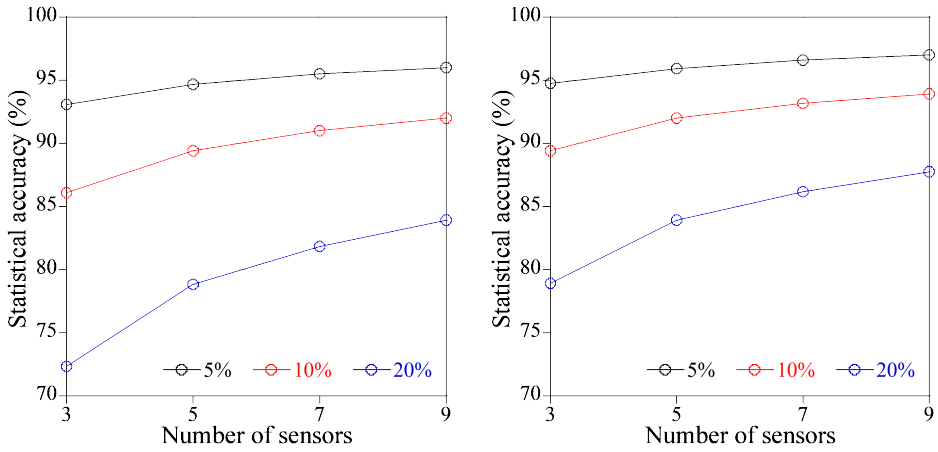

(e) 유의수준 95% 3점 센싱 (f) 유의수준 95% 5점 센싱

(g) 유의수준 95% 7점 센싱 (h) 유의수준 95% 9점 센싱

그림 4.4 중앙 지점에서 재구성 캠버의 통계적 정확도

그림 4.4은 중앙지점에서의 통계적 유의수준 99%와 95%의 재구성 캠버에 대한 통계적 정확도를 보여준다. 식 (4.4)에 의해서 유의수준만 주어진다면 재구성 캠버의 통계적 정확도는 재구성 캠버의 정밀도 오차를 따른다. 정밀도 오차는 지점의 위치에 영향을 받지 않음으로 거더 중앙 지점에서의 통계적 정확도만 그래프로 도시하였다. 3점 센싱의 경우 계측 오차 크기 5%, 10% 그리고 20%에 대하여 유의수준 95% 기준 각각 약 94%, 89% 그리고 79%이고 유의수준 99% 기준 약 93%, 86%, 72%이다. 5점 센싱의 경우 계측 오차 크기 5%, 10% 그리고 20%에 대하여 유

의수준 95% 기준 약 96%, 92% 그리고 84%이고 유의수준 99% 기준 약 94%, 89% 그리고 79%이다. 7점 센싱의 경우 계측 오차 크기 5%, 10% 그리고 20%에 대하여 유의수준 95% 기준 약 96%, 93% 그리고 86%이고 유의수준 99% 기준 약 95%, 90% 그리고 82%이다. 9점 센싱의 경우 계측 오차 크기 5%, 10% 그리고 20%에 대하여 유의수준 95% 기준 약 97%, 94% 그리고 88%이고 유의수준 99% 기준 약 96%, 92% 그리고 84%이다.




(a) 유의수준 99% (b) 유의수준 95%

그림 4.5 90일 기준 센서에 개수에 따른 재구성된 캠버 통계적 정확도

재구성된 캠버의 통계적 정확도의 90일차에 센서 각각의 평균값을 그림 4.5(a)는 유의수준 99%와 그림 4.5(b)는 유의수준 95%의 통계적 정확도 그래프이다. 계측오차가 20%일 때 유의수준 99% 기준 3점 센싱은 72%이고 9점은 84%이다. 계측오차 10%일 때 유의수준 99% 기준 3점 센싱은 86%이고 9점은 92%이다. 5%일 때 유의수준 99% 기준 3점 센싱은 93%이고 9점은 96%이다. 이를 통해 계측오차가 증가할수록 계측점의 증가가 통계적 정확도가 매우 증가한다. 재구성된 캠버의 분포가 정규분포를 따른다는 가정 하에 계측오차 20% 발생하고 3점 센싱하였을 때 약

70%이상의 통계적 정확도를 보여준다. 최소한의 조건에서 70%이상의 정확도를 보여주기에 최소한의 계측점과 계측오차를 고려할 때 제안된 캠버 재구성 기법이 높은 통계적 신뢰도로 정확한 결과를 구할 수 있다.

## 4.5 초기 유효휨강성 및 초기 텐던력 통계적 정확도

몬테카를로 수치모사로 생성된 변형률 데이터와 재구성 캠버를 이용하여 텐던력을 구하여 재구성 캠버와 같은 유의수준 99% 통계적 정확도를 이용한다. 변형률 데이터를 활용한 식 (3.12)을 통해 각각 센싱의 위치에서 계측된 변형률을 텐던력 평균의 통계적 정확도를 표-4.1에 나타냈다. 중앙지점에서 재구성된 캠버를 활용한 식 (3.13)을 통해 구한 텐던력의 통계적 정확도를 표-4.2에 나타냈다. 변형률을 통해 구한 텐던력에서 3점의 경우 단부와 중앙지점에서 구해진 텐던력의 평균을 사용하였다. 5점의 경우 단부, 1/4지점과 중앙지점에서 구해진 텐던력의 평균을 사용하였다. 7점의 경우 단부, 1/6지점, 1/3지점과 중앙지점에서 구해진 텐던력의 평균을 사용하였다. 9점의 경우 단부, 1/8지점, 1/4지점, 1/8지점과 중앙지점에서 구해진 텐던력의 평균을 사용하였다.

표-4.1 유의수준 99% 초기 텐던력 통계적 정확도-식 (3.12)사용

| | 5% | 10% | 20% |
|---|---|---|---|
| 3점 센싱 | 95.1% | 90.2% | 80.3% |
| 5점 센싱 | 95.5% | 91.0% | 82.1% |
| 7점 센싱 | 96.0% | 91.9% | 83.8% |
| 9점 센싱 | 96.3% | 92.6% | 85.5% |

표-4.2 유의수준 99% 초기 텐던력 통계적 정확도-식 (3.13)사용

| | 5% | 10% | 20% |
|---|---|---|---|
| 3점 센싱 | 94.4% | 88.9% | 77.8% |
| 5점 센싱 | 95.7% | 91.5% | 83.1% |
| 7점 센싱 | 96.7% | 92.7% | 85.5% |
| 9점 센싱 | 96.7% | 93.5% | 87.0% |

우선, 변형률을 이용하여 초기 텐던력 예측의 경우 3점 센싱에서 부터 9점 센싱의 1.2%~5.2%의 차이가 발생하고 캠버를 이용하는 방법은 9점 센싱이 3점 센싱보다 2.3%~9.2% 상승된 통계적 정확도를 보여준다. 변형률을 이용한 텐던력 예측의 경우 센싱의 개수가 증가하였을 때 통계적 정확도의 증가하였다. 그 이유는 계측점의 증가로 인한 표준편차비가 감소하여 정밀도 오차가 감소하기 때문이다. 재구성된 캠버를 이용한 텐던력 예측의 경우 4.4절의 재구성된 캠버의 통계적 정확도와 똑같은 경향을 보여준다. 두 가지의 텐던력 예측의 경우 모두 센서의 개수 증가가 통계적 정확도 증가로 이어진다. 3점의 경우 변형률을 이용한 방법이 재구성된 캠버를 이용한 방법보다 2.5% 높은 통계적 정확도를 보여주었다. 나머지 경우들은 재구성된 캠버를 이용한 방법이 변형률을 이용한 방법보다 통계적 정확도가 높았다. 3점 센싱의 경우 캠버를 재구성하는 과정에서 오차 상쇄효과가 발생하지 않으므로 변형률을 이용한 텐던력 예측 방법이 높은 통계적 정확도를 보여주었다. 5점 센싱 이상에서는 캠버 재구성 과정에서 오차 상쇄효과가 발생하여 변형률을 이용한 방법보다 높은 통계적 정확도를 보여주었다. 오차 상쇄효과는 5점 센싱 이상에서 2차 곡률함수를 최소자승오차법을 이용하여 상수항을 구할 때 미지수의 개수보다 계측점의 개수가 많아 오차를 감소시켜준다. 표-4.1을 통해 변형률을 이용한 텐던력 예측은 3점 센싱에서 20% 계측오차가 발생할 때 80% 이상의 통계적 정확도를 보여주며 표-4.2를 통해 재구성된 캠버를 이용한 텐던력 예측은 3점 센싱에서 20% 계측오차가 발생할 때 약 77% 이상의 통계적 정확도를 보여준다. 따라서 초기 텐던력을 예측할 때 두 가지의 방법 모두 높은 통계적 정확도를 보여준다. 3점 센싱에서는 변형률을 이용한 방법이 더 높은 통계적 정확도를 가지며 5점 센싱 이상에서는 재구성된 캠버를 활용하는 방법이 더 높은 통계적 정확도를 보여준다. 센싱의 개수에 고려한 방법을 선정하여 초기 텐던력을 예측하면 높은 통계적 정확도로 초기 텐던력이 예측 가능하다.

몬테카를로 수치모사로 생성된 변형률 데이터을 활용하여 식 (3.17)로 초기 유효휨강성을 구하여 재구성 캠버와 같은 유의수준 99% 통계적 정확도로 표-4.3에 나타냈다.

표-4.3 유의수준 99% 초기 유효휨강성 통계적 정확도-식 (3.17)사용

| | 5% | 10% | 20% |
|---|---|---|---|
| 3점 센싱 | 93.1% | 86.3% | 72.1% |
| 5점 센싱 | 94.8% | 89.5% | 78.9% |
| 7점 센싱 | 95.5% | 91.0% | 81.9% |
| 9점 센싱 | 96.0% | 91.9% | 83.8% |

재구성 캠버를 이용하여 초기 유효휨강성을 예측의 경우 3점 센싱, 5점 센싱, 7점 센싱과 9점 센싱을 비교하였을 때 약 1%~11%의 증가한 통계적 정확도를 보여준다. 재구성된 캠버를 사용하기 때문에 4.4절의 통계적 정확도와 동일한 경향을 보여준다. 그 이유는 정밀도의 5점 센싱 이상에서 2차 곡률함수를 재구성할 때 최소자승오차법을 이용하기 때문이며 오차 상쇄효과가 발생하여 3점 센싱보다 향상된 통계적 정확도를 보여준다. 3점 센싱의 계측오차가 20%일 때 약 70%이상의 높은 통계적 정확도로 초기 유효휨강성을 예측 할 수 있다.

## 4.6 프리컴 거더 인장 실험 검증

실제 크기의 프리컴 거더로부터 중앙지점 상·하연에 병치된 변형률 센서로 받은 변형률 데이터를 3점 센싱 데이터를 기반으로 긴장실험 시 발생하는 캠버를 재구성 기법을 적용하여 정확도를 예측하였다. 프리컴 거더의 경우 일반적인 프리스트레스 콘크리트 거더가 아닌 합성 거더임으로 계측된 변형률 데이터를 사용하여 캠버 재구성 기법만 적용하였다. 그림 4.5(a)는 거더의 형상을 보여주며 그림 4.5(b)는 거더에 영구 부착된 실제 센서의 위치와 LVDT 현장사진이다.




(a) 거더의 형상 (b) 영구 부착된 센서 및 LVDT

그림 4.6 실제 크기의 프리컴 거더의 정보

그림 4.6은 거더의 단면 형상, 제원 그리고 병치된 변형률 센서의 위치를 나타낸다.

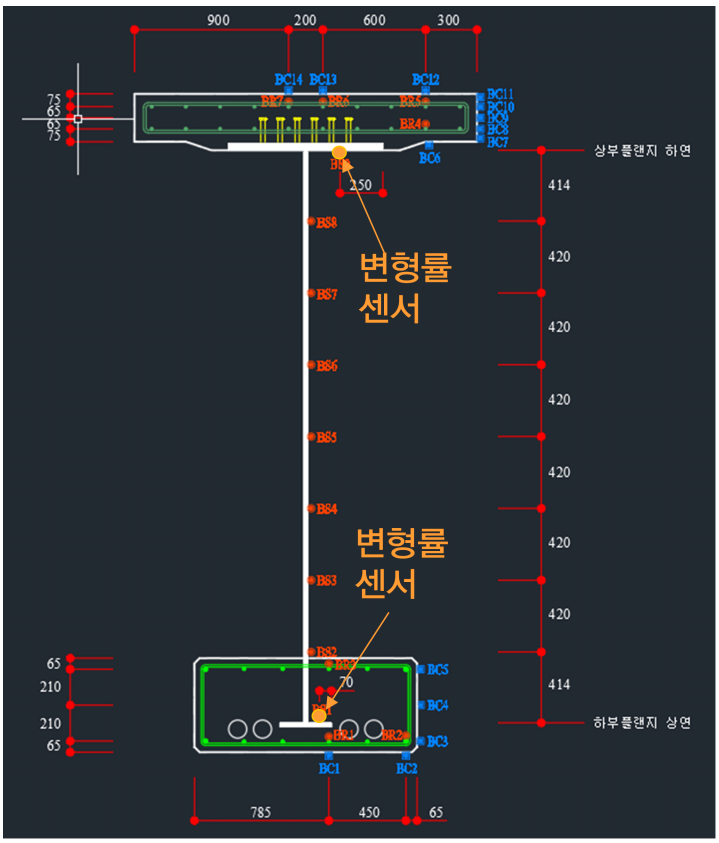
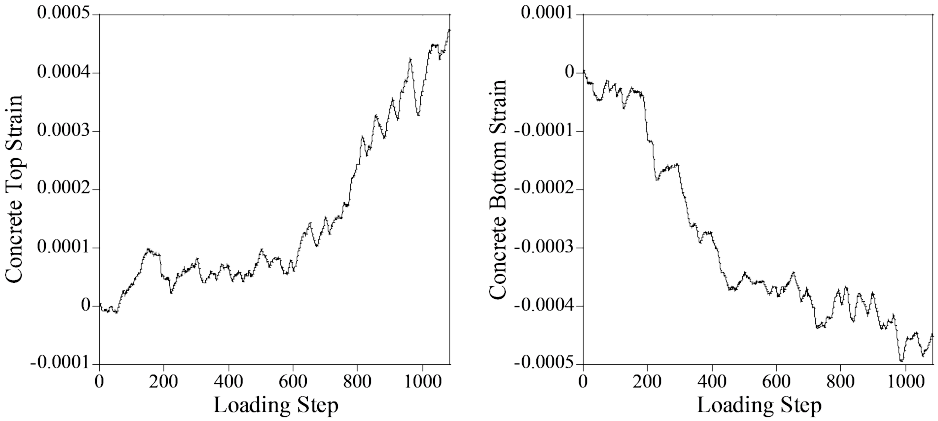



그림 4.7 프리컴 거더 단면형상 및 변형률 센서 위치

측정된 변형률 데이터는 그림 4.8(a)는 상연에서 측정된 변형률이고 그

림 4.8(b)는 하연에서 측정된 변형률 그래프이다. 여기서 상·하연 측정 변형률은 중앙지점이다. 3점 센싱을 위해 단부에서 측정되는 변형률은 0으로 설정하였다.




(a) 상연 변형률 (b) 하연 변형률

그림 4.8 상·하연 병치된 측정 변형률

재구성 캠버는 현장에서 변위 측정도구인 LVDT를 통해 거더의 중앙지점을 측정하여 비교를 실시하였다. 측정된 변형률 데이터는 거더의 긴장 실험을 기반으로 진행된 실험이라서 텐던의 긴장 단계부터 긴장의 종료단계까지 초단위로 측정된 변형률과 캠버를 사용한다.

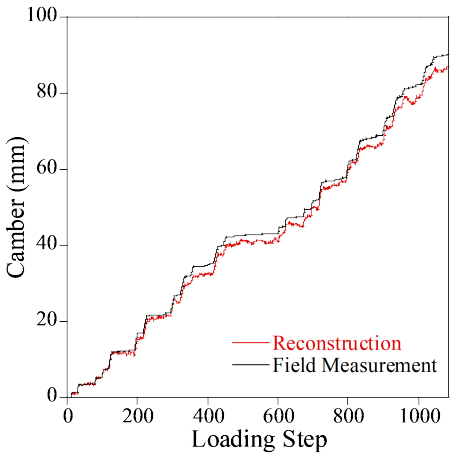



그림 4.9 중앙지점의 캠버 형상

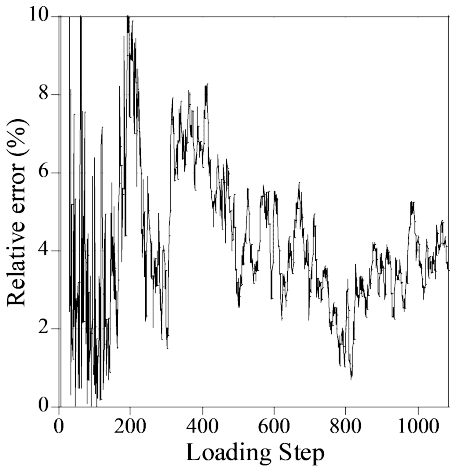



그림 4.10 중앙지점의 상대오차

약 1시간 10분가량의 긴장하는 실험이며 중앙지점에서 재구성된 캠버와 측정 캠버의 형상을 비교하였을 때 유사한 캠버 거동을 보여주었다. 상대오차의 경우 긴장 후 초반 30분 전(Loading Step 400이하)까지는 불안정한 모습으로 진행을 하다가 30분 이후부터 10%미만의 상대오차를 보여주며 진행이 된다. 이후 발생하는 상대오차는 계측오차에 의해 발생한다고 예측할 수 있다. 프리컴 거더에 부착된 병치된 변형률 센서를 이용하여 캠버를 예측함으로써 캠버의 재구성 기법은 거더의 특성에 상관없이 적용이 가능하단걸 알 수 있다. 현장 데이터를 통해 캠버의 재구성 기법이 통계적 신뢰도를 바탕으로 재구성된 캠버의 정확성을 예측할 수 있음을 확인하였다.

# Ⅴ. 결론

공장에서 일괄 대량 생산되는 프리팹 PSC 거더를 대상으로 제작부터 가설전 단계까지의 형상관리를 위한 캠버의 재구성 기법을 제시하였다. 최소한의 변형률 센서로 제작단계에서 영구 매립된 변형률 센서로 부터 데이터를 실시간으로 데이터를 측정할 수 있는 스마트 센싱 시스템을 고려한 센서의 배치 및 활용방안을 제시하였다.

긴장력 도입 시점부터 거치 전까지 프리팹 PSC 거더의 역학적 거동을 나타낼 수 있는 프리팹 PSC구조 해석 모델로부터 변형률 데이터를 수치모사하고 제안된 캠버 형상 재구성 기법의 타당성을 검증하였다. 구조해석 모델은 등가하중모델을 기반으로 초기 긴장 시 텐던력에 의해 발생하는 초기 탄성캠버와 거치단계까지 크리프, 건조수축, 콘크리트 강도와 같은 시간 의존적인 거동을 고려할 수 있도록 정식화를 하였다. 구조 해석 모델의 상·하연에 병치된 변형률을 이용하여 오일러-베르누이 보의 변형률-처짐 관계식을 이용하여 캠버 형상을 재구성하였다. 예제인 30m 단순지지된 프로토타입 프리팹 PSC거더에 대해서 측정점의 개수를 3점, 5점, 7점 9점으로 설정을 하고 무작위 측정 변형률 오차를 5%, 10% 그리고 20%로 고려하여 몬테카를로 수치모사 10000회를 통해 통계적 정확도를 분석하였다.

일별로 재구성된 캠버의 정확도 오차의 경우 콘크리트의 시간 의존적 비선형 곡률을 재구성하는 과정에서 발생하는 편향이 영향을 주었으나 2% 이내로 매우 작았다. 특히, 최소인 3점 센싱과 20%의 계측오차와 비선형 거동에도 불구하고 2차 곡률식에 기반한 캠버 재구성 기법은 만족스러운 결과를 얻었다.

일별로 재구성된 캠버의 정밀도 오차는 계측점의 개수와 계측오차의 크기가 영향을 준다. 정밀도 오차는 계측점의 개수는 적은 영향을 주고 계측 오차의 크기에 비례했다. 2차 곡률 함수로 가정을 하여 상수항을 최소자승법을 통한 곡률 재구성 과정에서 계측 오차의 상쇄효과는 9점 센싱, 7점 센싱 그리고 5점 센싱이 3점 센싱보다 크고 정밀도가 향상되

었다. 시간 의존적 비선형 거동은 정밀도 오차에 영향을 주지 않는다.

재구성 캠버의 통계적 정확도는 재구성된 캠버의 정밀도 오차와 통계적 유의 수준에 의해 결정되었다. 계측 오차 5%에서 계측점에 관계 없이 통계적 유의 수준 99%에 대해 재구성된 캠버의 통계적 정확도가 90%이상으로 평가되었다. 계측오차 20%에서 3점 센싱으로 통계적 유의 수준이 99%와 95%에서 통계적 정확도가 각각 약 70%와 약 80%수준으로 평가되었다. 충분히 최소 배치인 3점 센싱만으로 제안된 캠버 재구성 기법은 높은 통계적 신뢰도로 정확한 결과를 보여준다.

초기 텐던력의 통계적 정확도는 변형률을 이용하여 초기 텐던력 예측법과 재구성 캠버를 이용한 초기 텐더력 예측법은 두 가지의 방법 모두 77%이상의 통계적 정확도를 보여주었다. 변형률을 이용한 방법의 경우 센싱의 수가 증가함에 따라 표준편차가 감소하는 경향을 보여주었으며 캠버를 이용한 방법의 경우 캠버를 재구성하는 과정에서 영향을 받아서 캠버의 정밀도 그래프와 같이 9점 센싱, 7점 센싱과 5점 센싱이 3점 센싱보다 높은 정확도를 보여준다. 정밀도와 동일하게 캠버를 재구성하는 과정에서 오차 상쇄효과가 생긴다. 변형률을 이용한 초기 텐던력의 통계적 정확도는 약 80%이상이고 재구성된 캠버를 이용한 초기 텐던력은 통계적 정확도는 약 77%이상으로 정확한 초기 텐던력을 예측할 수 있다. 계측점의 개수가 5점 센싱 이상이 되면 재구성된 캠버를 이용한 초기 텐던력 예측의 통계적 정확도가 높기에 계측점에 개수를 고려하여 초기 텐던력 예측 방법을 선택하여야 한다.

초기 유효휨강성의 통계적 정확도는 센서의 수가 증가함에 따라 향상된 통계적 정확도를 보여준다. 그 이유는 캠버의 정밀도와 재구성된 캠버를 이용한 초기 텐던력과 동일하게 2차 곡률함수를 재구성하는 과정에서 오차 상쇄효과가 발생한기 때문이다. 센서를 최소로 배치하는 3점 센싱의 계측 오차가 20%일 때 약 70%이상의 통계적 정확도로 초기 유효휨강성을 계측할 수 있다.

캠버의 재구성 기법을 프리컴 거더 현장에서 병치된 변형률 센서을 이

용하여 캠버 측정값과의 비교를 통해 정확도를 확인하였다. 프리컴 거더는 합성 거더이고 긴장실험을 통해 중앙지점에 병치된 센서를 통해 변형률 데이터를 계측하였다. 긴장 후 30분 이후부터 10% 이하의 정확도 오차가 발생하였다. 캠버 재구성 기법이 일반적인 PSC 거더가 아닌 합성 거더에서도 높은 정확도를 확인하였다.

제안된 캠버 재구성을 기법을 통해 프리팹 거더와 바닥판과의 정합성을 관리할 수 있는 더욱 정밀한 형상관리가 가능할 것을 기대 된다.

# 참 고 문 헌

1) Chung, Wonseok, et al (2008). "Deflection estimation of a full scale prestressed concrete girder using long-gauge fiber optic sensors." Construction and Building Materials 22.3 : 394-401.

2) Culmo, Michael et al (2017). *Recommended guidelines for prefabricated bridge elements and systems tolerances and recommended guidelines for dynamic effects for bridge systems.* No. NCHRP Project 12-98.

3) Glaser, R., V. Caccese, and M. Shahinpoor (2012). "Shape monitoring of a beam structure from measured strain or curvature." *Experimental mechanics* 52.6: 591-606.

4) GoJeon, Park-Mi (1992). "건축의 프리캐스트화와 생산성 향상." Journal of the Korea Construction Safety Engineering Association 2.3: 76-86.

5) Gregory, Alastair, et al (2019). "The synthesis of data from instrumented structures and physics-based models via Gaussian processes." *Journal of Computational Physics* 392: 248-265.

6) Kang, Lae-Hyong, Dae-Kwan Kim, and Jae-Hung Han (2007). "Estimation of dynamic structural displacements using fiber Bragg grating strain sensors." *Journal of sound and vibration* 305.3: 534-542.

7) Khan, Suleman, et al (2021). "SSVM: An Ultra-Low-Power Strain Sensing and Visualization Module for Long-Term Structural Health

Monitoring." *Sensors* 21.6: 2211.

8) Kim Tae-Hoon, et al (2003). "An Analytical Study on the Time-Dependent Behavior of Prestressed Concrete Structures." Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers A 23.5A: 869-875.

9) Kliewer, Kaitlyn, and Branko Glisic (2019). "A comparison of strain-based methods for the evaluation of the relative displacement of beam-like structures." *Frontiers in Built Environment* 5: 118.

10) Li, Li, et al (2018). "Structural shape reconstruction of fiber Bragg grating flexible plate based on strain modes using finite element method." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 29.4: 463-478.

11) Luo, Zhicong, et al (2020). "Strain-based displacement field reconstruction method for thin rectangular plate through orthogonal deflection curves bridging." *Structural Control and Health Monitoring* 27.1: e2457.

12) Moon, Hyun Su, et al (2019). "Artificial neural network for vertical displacement prediction of a bridge from strains (Part 1): Girder bridge under moving vehicles." *Applied Sciences* 9.14: 2881.

13) Palma, Pasquale Di, et al (2019). "Bi-Dimensional Deflection Estimation by Embedded Fiber Bragg Gratings Sensors." *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. Vol. 15. No. 1.

14) Park, Jong-Woong, Sung-Han Sim, and Hyung-Jo Jung (2013). "Displacement estimation using multimetric data fusion." *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics* 18.6: 1675-1682.

15) Shen, Sheng, and Shao-Fei Jiang (2018). "Distributed deformation monitoring for a single-cell box girder based on distributed long-gage fiber bragg grating sensors." *Sensors* 18.8: 2597.

16) Song, Jun-Hyeok, Eun-Taik Lee, and Hee-Chang Eun (2021). "Optimal sensor placement through expansion of static strain measurements to static displacements." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 17.1: 1550147721991712.

17) Vurpillot, Samuel, et al (1998). "Vertical Deflection of a Pre-Stressed Concrete Bridge Obtained Using Deformation Sensors and Inclinometer." *ACI Structural Journal* 95.5: 518-526.

18) Wang, Zuocai, et al (2021). "Local bending deformation monitoring of bi-dimensional bridge deck based on the displacement–strain transfer matrix." *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 11.3: 809-832.

19) Xia, Yong, et al (2014). "Deformation monitoring of a super-tall structure using real-time strain data." *Engineering Structures* 67: 29-38.

20) Xu, Hui, Wei-Xin Ren, and Zuo-Cai Wang (2015). “Deflection estimation of bending beam structures using fiber bragg grating strain sensors” Advances in Structural Engineering 183 395-403

21) Yau, M. H., et al (2013). "Static vertical displacement measurement of bridges using fiber Bragg grating (FBG) sensors." *Advances in Structural Engineering* 16.1: 165-176.

22) Zhang, Qingqing, et al (2019). "Deflection distribution estimation of the main arch of arch bridges based on long-gauge fiber optic sensing technology." *Advances in Structural Engineering* 22.15: 3341-3351.

23) 신현묵 (2008). '프리스트레스콘크리트 제9판'. 동명사

24) 박문호, et al (2010). "크리프 및 건조수축을 고려한 PSC 교량의 시간의존해석." 한국산업융합학회 논문집 13.3: 125-131.

25) 한국콘크리트학회(KCI) (2012), 콘크리트 구조설계기준 해설 KCI-USD12

## Abstract

# Camber Reconstruction for a Prefab PSC Girder using Collocated Strain Measurements

*by*

*KIM HYUN YOUNG*

*Department of ICT integrated*
*Ocean-front Smart City Engineering*
*Graduate school, Dong-A University*
*Busan. Korea*

Prefab members have been paid attention to because they can be mass-produced in factories through smart construction technology. Prefab prestressed concrete (PSC) girder is very important in conformity with the prefab floor plate during the construction stage. Existing studies have focused on the shape management of PSC girder when the load is given. For the prefab PSC girder, it is essential to manage the shape of the girder according to the time-dependent behavior from fabrication to the stage before construction. To manage the shape of the girder, we propose a camber reconstruction technique that can statistically evaluate the performance of the prefab PSC girder using the collocated strain measurements on the top and the bottom of the girder. Time-dependent behaviors include creep, relaxation, shrinkage and so on. A PSC structural analysis model considering these time-dependent behaviors has been implemented and validated through the comparison to a conventional finite

element analysis program. The camber reconstruction has been conducted by using the collocated strain measurements which are numerically simulated from the PSC structural analysis model. After obtaining a quadratic curvature equation with strain using the least squares method, camber is reconstructed using double integral and support conditions. Through Monte-Carlo numerical simulation, the statistical accuracy of the reconstructed camber is analyzed and the validity of the camber reconstruction technique is verified by considering the measurement error, the number of sensors and non-linear time-dependent behaviors.

Key words: Prefab PSC girder, Camber reconstruction, Collocated strain measurements, Time-dependent behavior, Monte-Carlo numerical simulation