

# 다단계 온도프리스트레싱 공법의 현장적용을 위한 실험적 연구

## Experimental Study on Application of Multi-Stepwise TPSM

안진희\*    김준환\*\*    김상효\*\*\*    이상우\*\*\*\*  
Ahn, Jin-Hee    Kim, Jun-Hwan    Kim, Sang-Hyo    Lee, Sang-Woo

### Abstract

Multi-stepwise Thermal Prestressing Method(TPSM) is a newly proposed prestressing method, which is combined the external prestressing method and the external bonding method. Multi-stepwise thermal prestressing force is induced by cooling process of cover-plate in the multi-stepwise temperature distribution after the cover-plate being bolted to the girder. In this study, the heating capacity test of the developed heating system for applying the multi-stepwise TPSM effectively and multi-stepwise TPSM inducing test of H-beam is performed. Also, a field test of the rhamen type temporary bridge is carried out to evaluate the effect and application of the multi-stepwise TPSM. Truck load was loaded and compared with the structure analysis results.

### 요 지

다단계 온도프리스트레싱 공법은 기존의 프리스트레싱 공법과 단면접합공법의 장점을 이용한 새로운 개념의 프리스트레싱 공법으로 프리스트레싱용 커버플레이트를 다단계로 가열하여 거더의 하부플랜지에 고장력볼트로 접합한 뒤, 열원을 제거하여 발생하는 다단계 수축력을 보강에 필요한 프리스트레싱력으로 이용한 공법이다. 본 연구는 다단계 온도프리스트레싱 공법의 실제적인 적용성 평가를 위하여 다단계 가열을 위한 가열장비의 가열성능 평가 실험을 실시하였으며, 라멘형 강거더 임시교량을 제작하고 다단계 온도프리스트레싱 공법을 적용하여 도입 프리스트레싱력을 확인하였다. 또한, 트럭을 이용한 하중재하 실험을 실시하여 구조해석 결과와 비교하였다.

**Keywords :** Heating capacity test, Heating system, Field test, Multi-stepwise TPSM

**핵심 용어 :** 가열성능 평가, 가열장비, 현장실험, 다단계 온도프리스트레싱

\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사 후 과정

\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*\*\* 정회원, (주)승화이엔씨 기술연구소 소장, 공학박사

E-mail : palanorange@yonsei.ac.kr 02-2123-2804

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

프리스트레싱은 효과적으로 구조물의 거동 개선이 가능하고 교량의 하중-저항성능을 향상시키므로 콘크리트 구조물에서는 일반적으로 사용되고 있으나, 강구조물에 대한 프리스트레싱은 상대적으로 그 적용사례와 연구가 부족하다. 현재 강교량의 프리스트레싱에 관한 연구는 프리스트레싱 강봉이나 강선을 이용한 공법, 구조물의 휨변형을 이용하는 방법 그리고 강재의 열 변형 특성을 이용하는 방법 등이 제시되고 있다.<sup>(1)-(4)</sup> 이러한 프리스트레싱 방법 중 강재의 열 변형 특성을 이용한 다단계 온도프리스트레싱 공법은 기존의 프리스트레싱 공법 및 단면보강 공법의 장점을 접목한 프리스트레싱 방법으로, 외부강봉이나 강선을 이용한 프리스트레싱 공법의 프리스트레싱 효과와 강관접합 공법의 단면보강효과를 동시에 얻을 수 있는 공법이다. 또한 열 변형 특성을 이용한 프리스트레싱으로 다단계 온도분포에 따른 다단계 프리스트레싱의 도입이 가능하므로, 기존 외부강봉이나 강선을 이용한 프리스트레싱 공법과 비교하여 정착부에서 발생하는 응력집중 문제를 감소시킬 수 있으며, 정착부에 고장력 볼트를 사용하여 상대적으로 정착부가 간단하다.<sup>(4)(5)</sup>

김상호 등에 의한 다단계 온도프리스트레싱에 관한 연구에서 이론 및 모형실험을 통한 프리스트레싱력은 검증되었으나 실제구조물에 이를 도입하기 위해서는 구조물 및 프리스트레싱 도입장비의 검증 및 적용성 평가가 필요하고 이를 이용한 실제구조물에서의 검토가 필요하다.<sup>(4)(5)</sup> 다단계 온도프리스트레싱력의 효율적인 도입을 위해서는 다단계 온도분포의 도입 및 프리스트레싱 도입을 위한 커버플레이트와 프리스트레싱이 도입되는 구조물간의 온도차를 일정하게 유지해야 하므로 프리스트레싱 도입을 위한 가열장비의 성능이 보장되어야 한다.

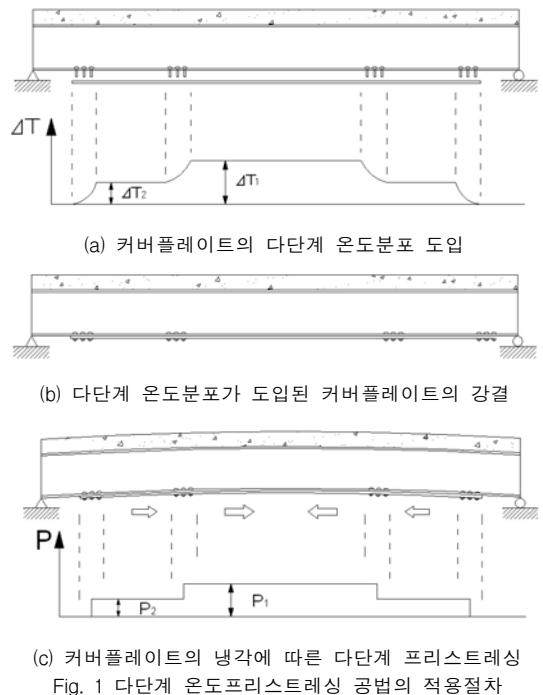
따라서 본 연구에서는 이론 및 모형실험을 통하여 응력도입이 확인된 다단계 온도프리스트레싱 공법의 효율적인 적용을 위하여 개발된 가열장비의 성능실험을 실시하였으며, 라멘형 강거더 임시교량을 제작하여 다단계 온도프리스트레싱 도입 및 개발된 가열장비의 실제적인 적용을 현장실험을 통하여 평가하였다. 또한

트럭하중을 제한하여 구조적 안전성을 평가하였다.

## 2. 다단계 온도프리스트레싱 공법

### 2.1 다단계 온도프리스트레싱 공법

강재의 열 변형 특성을 이용한 다단계 온도프리스트레싱 공법은 Fig. 1(a)와 같이 에너지 효율이 뛰어난 인덕션 타입 가열판(Induction type heater)을 이용하여 도입 프리스트레싱 수준에 따라 프리스트레싱용 커버플레이트를 다단계 가열한 후, Fig. 1(b)와 같이 다단계로 가열된 커버플레이트를 고장력 볼트를 이용하여 강거더와 강결시킨 후 가열판의 가열을 중지하였을 때, 커버플레이트의 냉각으로 인하여 발생하는 Fig. 1(c)와 같은 다단계 수축력을 프리스트레싱력으로 이용하는 공법이다. Fig. 1은 다단계 온도프리스트레싱 공법의 적용 절차로  $\Delta T$ 는 다단계 프리스트레싱 도입에 필요한 거더와 프리스트레싱용 커버플레이트의 상대온도차이며,  $P$ 는 가열된 커버플레이트의 냉각에 의하여 거더에 도입되는 다단계 프리스트레싱력이다.<sup>(4)(5)</sup>



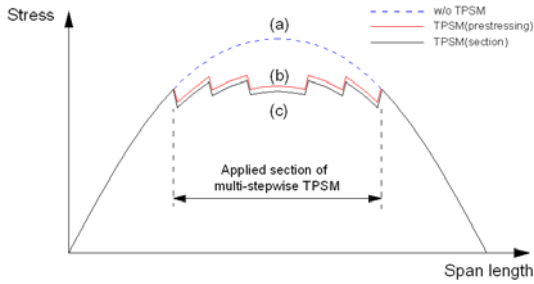


Fig. 2 다단계 온도프리스트레싱 공법에 따른 하부플랜지의 응력분포

거더에 도입된 다단계 프리스트레싱력은 교량의 하부플랜지에 설계하중에 의하여 발생하는 인장응력을 감소시키는 압축응력을 도입시키며, 단면증가에 따라 하부플랜지의 인장응력 또한 감소시켜 교량의 하부플랜지에는 Fig. 2와 같은 응력분포가 도입된다. Fig. 2에서 곡선 (a)는 온도프리스트레싱이 적용되지 않은 교량의 하부플랜지에서 작용하는 응력상태이며, 곡선 (b)는 다단계 프리스트레싱 효과에 의한 교량의 응력 상태, 곡선 (c)는 프리스트레싱용 커버플레이트의 단면증가에 따른 인장응력 곡선으로, 다단계 온도프리스트레싱에 의하여 교량의 하부플랜지에 도입되는 최종 응력상태이다.

## 2.2 프리스트레싱 커버플레이트의 열전달

온도프리스트레싱 공법은 커버플레이트의 가열과 냉각을 통하여 발생한 열팽창 및 수축 특성을 이용한 것으로 커버플레이트의 가열온도를 길이방향에 대하여 다단계로 가열하게 되면, 각각의 다단계 온도분포에 따른 다단계 열팽창이 발생하고, 이에 따라 다단계 수축력이 발생하게 된다. 이러한 다단계 수축력을 프리스트레싱으로 이용하기 위해서는 프리스트레싱용 커버플레이트에서 발생하는 다단계 열팽창을 계산하여야 하며, 이러한 열팽창량은 다단계 온도분포에 의하여 결정되므로 다단계 온도프리스트레싱의 도입을 위해서는 커버플레이트의 온도분포의 결정이 필수적이다.

다단계 프리스트레싱 도입을 위한 커버플레이트는 Fig. 3과 같이 가열판이 설치되는 가열구간과 거더와 커버플레이트의 접합을 위한 고장력 볼트의 체결구간

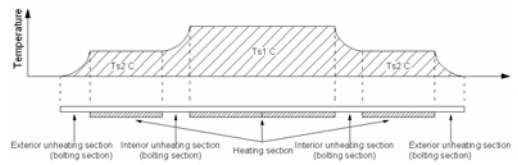


Fig. 3 커버플레이트의 열전달

으로 구분되며, 커버플레이트의 다단계 온도분포는 커버플레이트를 직접 가열하는 구간과 직접적인 가열이 없이 가열구간의 열전달에 의하여 비선형 온도분포를 가지는 고장력 볼트의 체결구간 온도분포에 의하여 결정된다.

비선형 온도분포를 가지는 고장력 볼트체결구간의 온도분포식은 열역학 제1법칙인 에너지보존법칙에 따라 2차 미분방정식으로부터 유도되며, 이에 대한 검증은 김상효 등에 의하여 유한요소해석 및 실험으로 검증되었다.<sup>(4)</sup> 열역학 제 1법칙에 따른 내측 고장력 볼트체결구간과 외측 고장력 볼트체결구간의 비선형 온도분포는 식(1), 식(2)와 같다.

$$T(x) = (T_{s_1} - T_{\infty}) \left[ \cosh(mx) - \frac{\cosh(mL_1)}{\sinh(mL_1)} \sinh(mx) \right] + (T_{s_2} - T_{\infty}) \frac{\sinh(mx)}{\sinh(mL_1)} + T_{\infty} \quad (1)$$

$$T(x) = (T_{s_2} - T_{\infty}) \times \left[ \cosh m(L_2 - x) + \frac{h_c}{mk} \sinh m(L_2 - x) / \cosh(mL_2) + \frac{h_c}{mk} \sinh(mL_2) \right] + T_{\infty} \quad (2)$$

여기서,  $m^2 = h_c p / kA_w$ ,  $h_c$ 는 대류열전달계수 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $k$ 는 열전도도 ( $W/m \cdot ^\circ C$ ),  $A_w$ 는 커버플레이트의 단면적,  $p$ 는 커버플레이트의 윤변장,  $T_s$ 는 커버플레이트의 가열온도 ( $^\circ C$ ),  $T_{\infty}$ 는 대기온도 ( $^\circ C$ )이다.

## 3. 다단계 온도프리스트레싱 도입을 위한 가열장비의 성능평가

### 3.1 온도프리스트레싱 도입 장비

온도프리스트레싱은 다단계 온도변형이 도입된 커버플레이트의 냉각에 의하여 발생한 압축력을 프리스트레싱력으로 이용하는 것으로, 실구조물에 대한 온도프리스트레싱의 도입을 위해서는 열변형 도입을 위한 가열장비의 가열성능이 중요하다. 따라서 커버플레이트의 다단계 온도변형을 도입하기 위한 가열장비는 커버플레이트와 강거더의 상대온도차를 빠른 시간에 도입하고, 커버플레이트에 도입된 상대온도차를 일정하게 유지할 수 있어야한다. Fig. 4는 온도프리스트레싱 도입을 위하여 개발된 가열장비로 커버플레이트의 가열과 교량과의 상대온도차를 일정하게 유지하기 위한 인덕션 가열판과 자동온도조절장치로 구성된다. 인덕션 가열판은 자신이 발열하여 그 에너지를 전도의 형태로써 피가열체에 전달하는 일반적인 가열장비와는 달리 전자기장 유도원리를 이용하여 피가열체를 가열하는 매우 안전한 방식의 가열장비이며, 자동온도조절장치는 교량과 커버플레이트의 상대온도차를 일정하게 유지하게 하는 장비로, 상대온도차를 일정하게 유지하기 위하여 거더와 커버플레이트의 온도 측정을 위한 온도센서가 부착되어 있다. Table 1은 온도프리스트레싱 도입 장비의 제원이다.<sup>(6)</sup>



(a) 인덕션 가열판



(b) 자동온도조절장치

Fig. 4 온도프리스트레싱 가열장비

Table 1 온도프리스트레싱 도입 장비의 제원

	길이(mm)	폭(mm)	높이(mm)	무게(N)
인덕션 가열판	990	330	32	85.5
자동온도 조절장치	210	300	300	85

### 3.2 가열장비의 가열성능 평가

온도변형을 이용하여 프리스트레싱력을 도입하기 위한 온도프리스트레싱 도입장비는 커버플레이트와 강거더의 상대온도차를 빠른 시간에 도입할 수 있어야 하고 상대온도차를 일정하게 유지하여야 하므로 가열장비의 가열성능은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 온도프리스트레싱 도입을 위하여 개발된 가열장비의 성능평가를 위하여 Fig. 5와 같이 길이 3,000mm, 폭 300mm의 강판에 온도센서(thermocouple)를 부착하여 온도분포 도입실험을 실시하였다. 또한 온도프리스트레싱은 커버플레이트의 두께 변화에 따라 프리스트레싱 도입력이 변화하므로, 커버플레이트의 두께에 따라 커버플레이트에 도입되는 온도분포의 균등성 및 온도분포 도입시간을 확인하기 위하여 두께 10mm, 15mm, 20mm의 강판을 대상으로 가열장비의 가열성능 실험을 실시하였다.

가열장비의 가열성능 평가를 위하여 커버플레이트의 가열온도는 상대온도차(강판과 강거더의 온도차)  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며, 상대온도차는 강판과 대기온도를 자동 계측하여 가열의 정도를 조절하

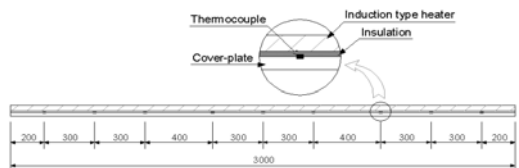


Fig. 5 온도계측위치 및 시험체 설치조건 (단위:mm)



Fig. 6 가열장비의 성능실험

는 자동온도 조절장치를 이용하여 유지하도록 하였다. 실험수행은 각 조건별로 3회씩 수행하였고, 각 조건별 계측데이터는 Data logger(TDS-601)를 이용하여 계측하였으며, 커버플레이트와 인덕션 가열관 사이에는 단열재를 설치하여 커버플레이트의 온도손실을 제한하였다. Fig. 6은 가열장비의 성능평가를 위하여 설치한 인덕션 가열관과 자동온도조절장치의 가열실험 모습이다.

Fig. 7은 가열시간에 따른 상대온도차인  $\Delta T=40, 60, 80^\circ\text{C}$ 에 대한 커버플레이트의 가열 곡선으로, Fig. 7에서 보이는 것과 같이 온도분포 도입장비를 이용함으로써 빠른 시간에 급격하게 목표온도에 도달하고, 목표온도에서는 요구되는 시간동안 일정한 온도분포를 유지하다 가열장비 제거시 온도분포가 대기온도수준으로 완만하게 낮아지는 것을 알 수 있다.

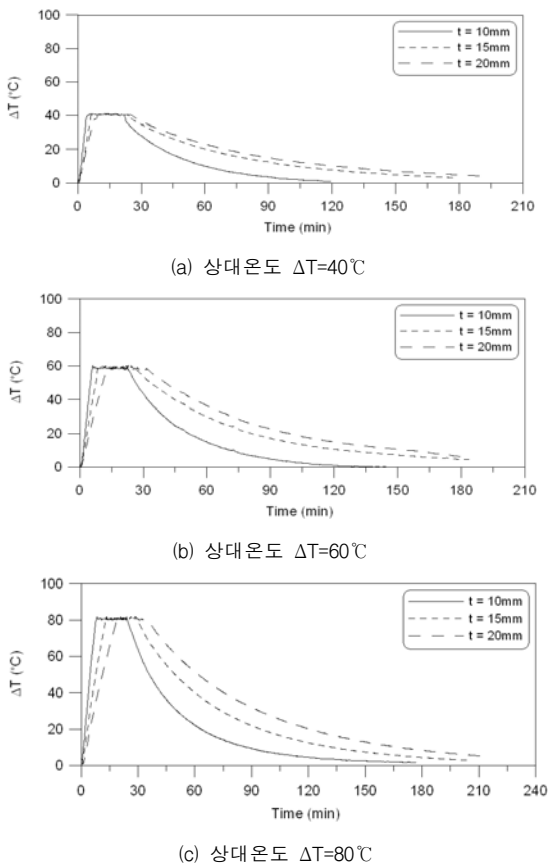


Fig. 7 가열시간에 따른 커버플레이트의 온도분포 변화

커버플레이트의 냉각속도는 재료특성 및 온도경사에 의한 열전도 특성과 커버플레이트 면적 및 상대온도차에 의한 대류 열전달 특성에 영향을 받게 된다.<sup>(8)</sup> 커버플레이트의 경우 재료특성이 일정하고 커버플레이트 내의 온도경사가 존재하지 않으므로 커버플레이트의 냉각속도는 전도에 의한 열전달 보다 커버플레이트의 두께 및 상대온도차에 의한 대류 열전달에 영향을 받게 되므로, Fig. 7에서와 같이 커버플레이트의 두께가 두껍고 상대온도차가 큰 경우 시간에 대한 냉각속도의 변화가 급격히 증가하게 된다. 또한 커버플레이트의 냉각으로 외기온도에 대한 커버플레이트의 온도차가 감소하게 됨에 따라 시간에 대한 냉각속도 변화 또한 감소하는 것으로 나타났다. 커버플레이트의 최종 냉각 시간은 상대온도차  $40^\circ\text{C}$ , 두께 10mm의 커버플레이트의 경우 100분, 15mm인 경우 180분, 20mm인 경우 220분으로 나타나, 커버플레이트의 두께가 두꺼울수록 냉각속도는 감소하여 외기온도와의 온도평형에 도달하는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 상대온도차가 큰 경우에서도 동일하게 나타나므로 커버플레이트의 두께가 두껍고, 상대온도차가 클수록 커버플레이트의 냉각시간이 증가함을 알 수 있다. 따라서 커버플레이트의 가열완료 후, 커버플레이트의 냉각에 따른 프리스트레싱의 도입완료 시간은 커버플레이트의 두께와 커버플레이트에 도입되는 상대온도차에 의하여 결정 될 수 있다.

Table 2는 커버플레이트의 두께에 따른 커버플레이트의 가열시간을 측정된 결과로 두께 20mm인 커버플레이트를  $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 까지 가열하는데 걸리는 시간은 약 20분으로 충분히 짧은 시간 내에 목표로 하는 온도분포 수준에 도달할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 2 커버플레이트 두께에 따른 가열시간

상대 온도 ( $\Delta T$ )	커버플레이트의 목표온도 도달시간 (분)								
	두께 10mm			두께 15mm			두께 20mm		
	실험1	실험2	실험3	실험1	실험2	실험3	실험1	실험2	실험3
$40^\circ\text{C}$	5.0	4.7	5.0	8.0	7.8	8.0	9.2	9.6	9.5
$60^\circ\text{C}$	6.5	6.5	7.0	10.0	9.8	10.2	13.8	13.7	13.8
$80^\circ\text{C}$	8.5	8.5	8.7	13.8	13.7	13.8	19.3	19.2	19.6

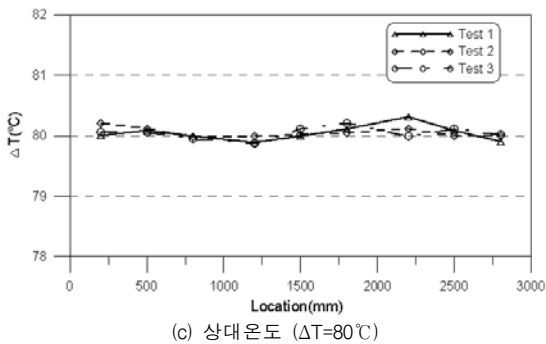
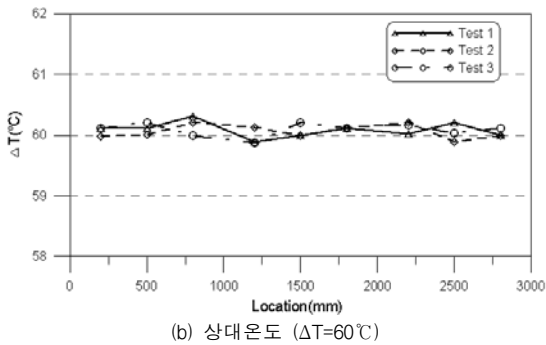
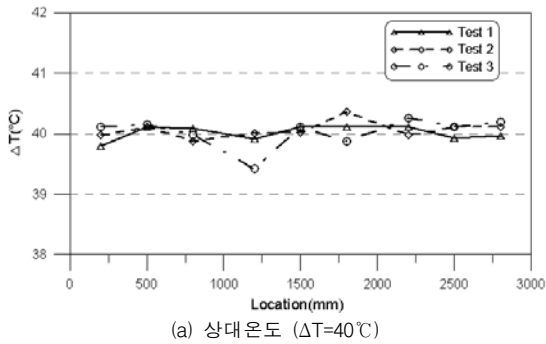


Fig. 8 커버플레이트의 길이방향 온도분포

가열장비의 성능실험이 콘크리트 바닥에 커버플레이트를 설치하고, 커버플레이트의 상면에 인덕션 가열판을 거치한 상태로 실험이 진행되어 커버플레이트 하부 콘크리트로의 열손실이 발생할 수 있다. 따라서 인덕션 가열판이 놓이는 반대편에 대류에 의한 열손실을 최소화 할 수 있는 단열재를 설치한다면 커버플레이트의 가열시간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 개발된 온도분포 도입장비를 이용하여 두께가 15mm인 커버플레이트를 상대온도차  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ ,

$60^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 후 커버플레이트의 길이방향 온도분포를 측정된 결과이다. 모든 실험에서 커버플레이트의 길이방향에 대한 온도분포는 거의 균등한 것으로 나타났으며, 목표온도가 높을수록 커버플레이트의 길이방향 온도분포는 더 균등해지는 것으로 평가되었다. 이는 목표온도가 높을수록 가열시간이 상대적으로 늘어나므로 가열 중에 커버플레이트 사이에서의 열전달에 의해 전체적인 커버플레이트의 온도분포가 균등해지기 때문이다. 따라서 다단계 온도프리스트레싱 공법을 위하여 개발된 인덕션 가열판 및 자동온도 조절장치는 온도프리스트레싱의 효과적인 조절을 위해 커버플레이트에 균등한 온도분포를 도입함은 물론 목표온도를 유지하기 위한 온도조절 효과 또한 뛰어나므로 강교의 프리스트레싱 도입을 위한 가열장비로 적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 라멘형 임시 강교량에 대한 온도프리스트레싱 도입 현장실험

다단계 온도프리스트레싱 공법의 프리스트레싱 도입 효과 및 그 적용성을 평가하기 위하여 라멘형 강거더 임시교량을 대상으로 다단계 프리스트레싱 도입 실험을 실시하였으며, 차량하중을 재하하여 구조적 안전성을 검토 하였다.

##### 4.1 실험개요

다단계 온도프리스트레싱 도입효과의 검토를 위한 대상교량은 프리스트레싱 효율 및 안전성 검토를 위한 임시교량으로 Fig. 9와 같은 총연장 31m(순경간장 25m), 교폭 6m의 라멘형 강거더교이다. 주거더는 SS400강종의 압연형강 H-800×300×14×26(mm)을 사용하였으며, 다단계 온도프리스트레싱 도입으로 커버플레이트에는 인장응력이 작용하게 되므로 커버플레이트의 강종은 거더의 강종보다 공칭허용응력이 큰 두께 20mm의 SM570강종을 사용하였다.<sup>(4)(5)(7)</sup> 대상교량의 경우 온도프리스트레싱 도입의 확인을 위한 임시교량으로 상부 콘크리트 슬래브 대신 1,900×750×200 (mm)규격의 복공판을 주거더 위에 단순 거치하

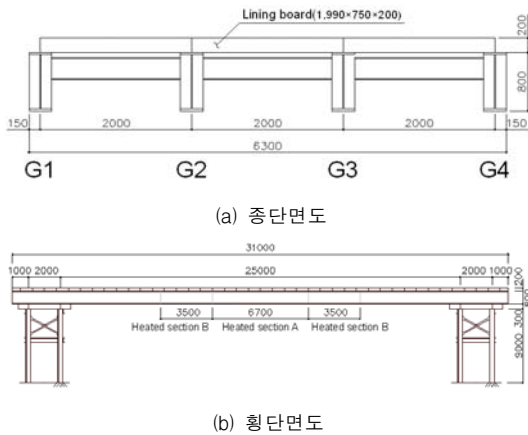


Fig. 9 다단계 온도프리스트레싱 도입을 위한 리멘형 강거더 임시교량

여, 차량하중을 재하할 수 있도록 하였다. 따라서 대상교량의 경우 프리스트레싱이 도입된 주거더만이 트럭하중 재하에 대하여 저항하는 단면이다. 온도프리스트레싱에 의한 응력도입 및 차량하중재하에 따른 실험 결과를 해석적인 결과와 비교하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 이용하여 구조해석을 실시하였으며, 대상교량과 커버플레이트는 frame 요소로 모형화 하였다.

다단계 프리스트레싱을 위하여 커버플레이트에는 각각  $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ (가열구간 A)와  $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ (가열구간 B)의 다단계 온도분포로 가열하였으며, 프리스트레싱의 도입은 내측에서 외측으로 대칭성을 유지하면서 2, 3, 1, 4 거더 순으로 진행되었다. 온도프리스트레싱에 의하여 주거더에 도입되는 프리스트레싱력은 구조해석을 통하여 774.28kN이 도입됨을 확인하였다.

대상교량에 도입되는 프리스트레싱력과 상향변위의 확인을 위하여 Fig. 10과 같이 상부 플랜지와 하부플랜지에 변형률게이지를 부착하고, 지간 중앙부에는 변위계를 설치하여 이를 계측하였으며, 다단계 온도프리스트레싱이 도입된 대상교량의 구조적 안전성 검토를 위하여 Fig. 11과 같이 지간 중앙부와 지점부에 트럭하중을 각각 재하 하였다. 재하트럭의 축중량은 Fig. 12와 같다. Fig. 13은 대상교량에 대한 다단계 온도프리스트레싱 도입모습으로 가설교량의 완성 후, 하부플랜지에 부착할 커버플레이트의 다단계 가열모습과 차량재하 모습이다.

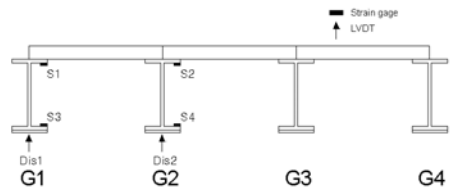


Fig. 10 변위 및 변형률 게이지의 부착위치

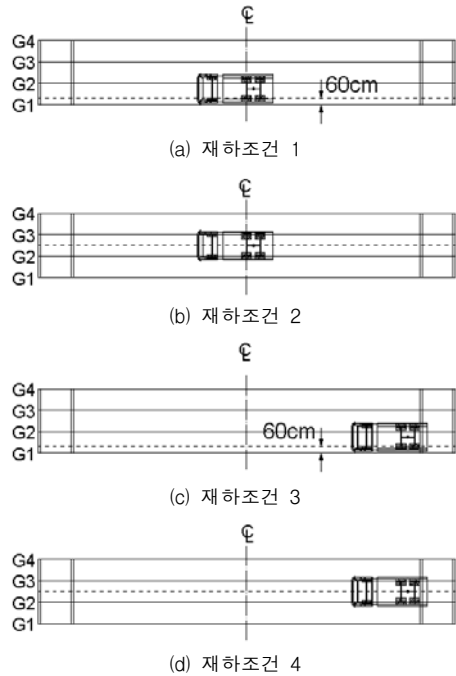
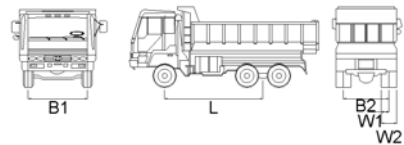
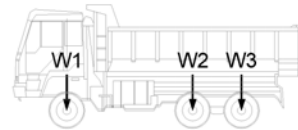


Fig. 11 하중재하위치



L	B1	B2	W1	W2
4,000 mm	2,060mm	1,860mm	240mm	580mm



총중량	W1	W2	W3
281.4 kN	65.9 kN	106.4 kN	109.1 kN

Fig. 12 재하차량의 제원 및 계중결과



(a) 다단계 온도프리스트레싱 도입



(b) 트럭하중재하

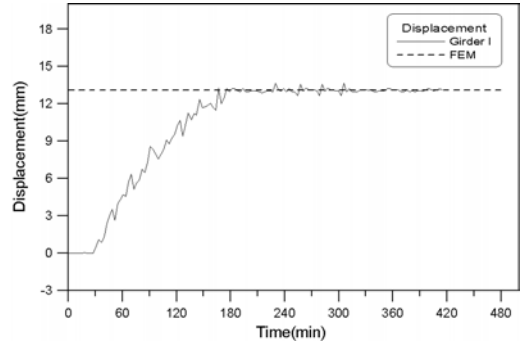
Fig. 13 대상교량의 온도프리스트레싱 및 하중재하

#### 4.2 실험결과 및 분석

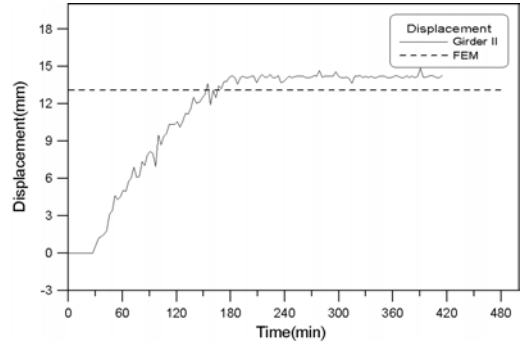
Fig. 14는 온도프리스트레싱에 의한 주거더의 변위 이력 곡선으로 프리스트레싱용 커버플레이트가 온도평형에 도달한 후, 제거된 열원에 의한 수축력의 도입으로 13mm의 상향변위가 도입되고 있음을 알 수 있으며, 구조해석의 결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 가열된 커버플레이트가 주거더의 온도와 동일한 수준으로 냉각되어 온도프리스트레싱력의 도입에 약 180분이 소요됨을 알 수 있다.

Fig. 15 및 Table 3, 4는 온도프리스트레싱 및 차량하중 재하조건에 따른 주거더의 변위 및 응력을 나타낸 것이다. 온도프리스트레싱에 의하여 주거더에 도입된 응력 및 트럭하중 재하에 따른 주거더의 처짐과 응력은 Fig. 14의 변위이력과 같이 구조해석결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 실내실험에서 검증되었던 온도프리스트레싱 도입효과는 현장실험에서도 구조해석 결과 동일한 거동특성을 나타내고 있음을 확

인 할 수 있으며, 구조해석을 통하여 온도프리스트레싱이 도입된 실구조물의 거동분석 및 설계가 가능한 것으로 판단된다.

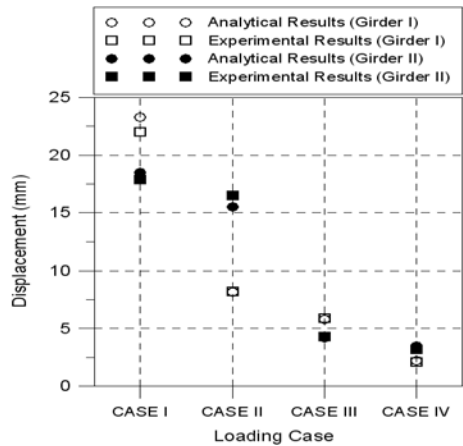


(a) 거더 1



(b) 거더 2

Fig. 14 프리스트레싱 도입에 따른 주거더의 변위



(a) 처짐



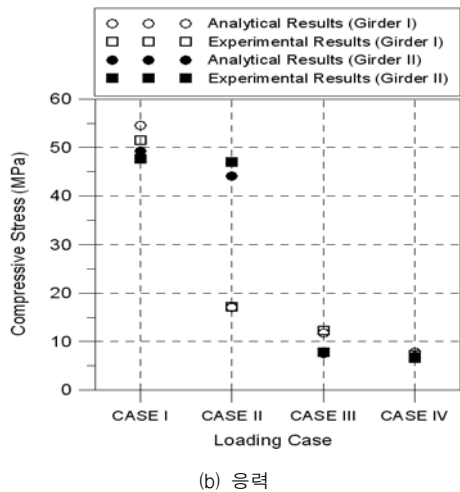


Fig. 15 차량 재하조건에 따른 주거더의 처짐과 응력

## 6. 결론

본 연구는 단단계 온도프리스트레싱 공법의 효율적인 적용을 위하여 커버플레이트의 단단계 온도분포 도입용 가열장비의 성능평가와 라멘형 강거더 임시교량을 통한 단단계 온도프리스트레싱의 도입효과 및 개발된 가열장비의 실제적인 적용성을 현장실험을 통하여 평가하였다. 또한 트럭하중을 재하하여 구조적 안전성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 제안된 보강공법의 적용을 위하여 개발된 가열장비의 성능평가 결과, 두께 20mm인 커버플레이트를  $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하는데 걸리는 시간은 약 20분으로 충분히 짧은 시간 내에 목표로 하는 온도분포 수준에 도달할 수 있는 것으로 나타났다. 모든 실험에서 커버플레이트의 길이방향에 대한 온도분포는 거의 균등하게 나타나며, 가열온도가 높을수록 커버플레이트의 길이방향 온도분포는 더 균등해지는 것으로 평가되었다. 따라서 단단계 온도프리스트레싱 공법의 개발을 위하여 개발된 인덕션 가열판 및 자동온도 조절장치는 커버플레이트에 균등한 온도분포의 도입이 가능하고, 프리스트레싱 도입을 위한 상대온도차를 일정하게 유지하기 위한 온도조절 효과가 뛰어나 강교의 프리스트레싱 도입을 위한 가열장비로 적합한 것으로 판단된다.

Table 3 프리스트레싱 및 재하조건에 따른 변위

	거더 1 (mm)			거더 2 (mm)		
	실험	해석	실험/해석	실험	해석	실험/해석
온도 프리스트레싱	+13.11	+13.09	1.00	+14.20	+13.09	1.08
재하조건 1	-22.00	-23.30	0.94	-17.90	-18.50	0.97
재하조건 2	-8.20	-8.14	1.01	-16.50	-15.5	1.06
재하조건 3	-5.90	-5.80	1.02	-4.30	-4.20	1.02
재하조건 4	-2.10	-2.20	0.95	-3.20	-3.50	0.91

Table 4 프리스트레싱 및 재하조건에 따른 상부플랜지 응력

	거더 1 (MPa)			거더 2 (MPa)		
	실험	해석	실험/해석	실험	해석	실험/해석
온도 프리스트레싱	-3.87	-3.86	1.00	-4.21	-3.86	1.09
재하조건 1	-51.49	-54.52	0.94	-476.2	-492.8	0.97
재하조건 2	-17.21	-17.08	1.01	-470.2	-440.4	1.07
재하조건 3	-12.25	-11.80	1.04	-77.50	-75.00	1.03
재하조건 4	-7.27	-7.86	0.92	-66.10	-70.30	0.94

- 2) 라멘형 강거더 임시교량의 온도프리스트레싱 도입 실험 결과,  $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ 의 단단계 온도분포에 의하여 주거더에 774.28kN의 프리스트레싱력을 도입하였으며, 프리스트레싱의 도입으로 주거더에는 13mm의 상향변위가 발생하였다. 프리스트레싱 도입결과 및 하중재하를 통하여 거더에 나타나는 변위 및 응력은 구조해석 결과와 비교하여 일치하는 것으로 나타나 단단계 온도프리스트레싱 공법이 현장에서도 충분히 적용가능함을 확인하였다. 따라서 구조해석을 통하여 실구조물의 온도프리스트레싱 해석과 설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)승화이엔씨의 연구비 지원 및 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원을 받아 연구된 것으로 본 연구를 가능케 한 (주)승화이엔씨 및 교육인적자원부에 감사드립니다.

---

### 참고문헌

1. 박용걸, 박영훈, 이승용, “외부 후 긴장 공법을 이용한 강합성보의 보강에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제12권, 제5호, 2000, pp. 594-558.
2. 임성순, 정찬택, “프리스트레스된 압연강재보(H-BEAM)의 휨 거동에 대한 실험적 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제18권, 제2호, 2006, pp. 239-250.
3. 조두용, 박대열, 박신규, “현장실험을 통한 외부 후긴장 Steel I-beam의 휨거동 특성”, 한국구조물진단학회 논문집, 제6권, 제3호, 2002, pp. 151-158.
4. 김상효, 안진희, 김준환, 김형주, “커버플레이트의 온도변형을 이용한 강구조물의 다단계 프리스트레싱”, 한국강구조학회 논문집, 제18권 제6호, 2006, pp. 783-792.
5. 김상효, 김준환, 안진희, “다단계 온도프리스트레싱을 이용한 강거더교의 보강에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제 18권 제6호, 2006, pp. 717-726.
6. 안진희, 김준환, 최규태, 김상효, “콘크리트 교량의 보강을 위한 온도프리스트레싱 공법의 실험적 연구”, 한국콘크리트 학회 논문집, 제19권 제4호, 2007, pp. 483-490.
7. 건설교통부, “도로교설계기준”, 2005.
8. Bejan, A., “Heat transfer, John Wiley & Sons. Inc.”, 1993.

(접수일자 : 2007년 4월 16일)