한국전산구조공학회
2003년도 봄 학술발표회 논문집

인공신경망을 이용한 온도프리스트레싱 공법의 적정 가열구간 설정에 관한 연구

Determination of Optimum Heating Regions for Thermal Prestressing Method Using Artificial Neural Network

김 상 효* 김 준 환** 김 강 미***
Kim Sang-Hyo Kim, Jun-Hwan Kim, Kang-Mi

ABSTRACT

Thermal Prestressing Method for continuous composite girder bridges is a new design and construction method developed to induce initial composite stresses in the concrete slab at negative bending regions. Due to the induced initial stresses, prevention of tensile cracks at concrete slab, reduction of steel girder section, and reduction of reinforcing bars are possible. Thus, economical and construction efficiency can be improved. Method for determining optimum heating region of Thermal Prestressing Method, has not been established although such method is essential for increasing efficiency of the designing process. Trial-and-error method used in previous studies is far from efficient and more rational method for computing optimal heating region is required.

In this study, efficient method for determining optimum heating region in the use of Thermal Prestressing Method is developed based on artificial neural network algorithm, which is widely adopted to pattern recognition, optimization, diagnosis, and estimation problems in various fields. Back-propagation algorithm, which is commonly used as a learning algorithm in neural network problems, is used for training of the neural network. Through case studies of 2-span continuous and 3-span continuous composite girder bridges using the developed process, the optimal heating regions are obtained.

1. 서 론

온도프리스트레싱 공법은 강합성거더교 또는 강구조물의 시공시 인위적인 온도경사를 가함으로써 구조물의 거동을 개선할 수 있는 초기응력을 도입하기 위해 개발된 공법으로, 연속 강합성거더교에 적용할 경우 부모멘트 발생지점인 내부지점부 부근의 바닥판에 초기압축응력을 도입할 수 있으므로 콘크리트 바닥판의 인장균열을 억제하는 한편, 교축방향 보강 철근 사용량 및 강거더 단면을 감소시킬 수 있고 경제성과 시공성의

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
** 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 연세대학교 토목공학과 연구원, 석사

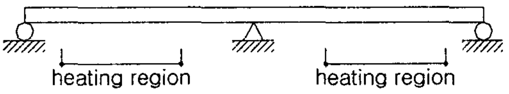
향상이 가능한 공법이다. 온도프리스트레싱 공법의 적용에 있어서 프리스트레싱 효과의 정도를 결정짓는 가열구간과 가열온도의 설정은 효율적인 설계·시공이 이루어지기 위해서 매우 중요한 사안이다. 기존의 연구에서 가열구간 및 가열온도를 설정하기 위해 사용된 시행오차법은 비효율적인 것으로 온도프리스트레싱 공법을 적용한 설계가 효율적으로 이루어지기 위해서는 보다 합리적인 적정 가열구간의 설정기법이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해서 패턴인식, 최적화, 진단 및 예측 등을 수행하는데 많이 사용되고 있는 인공신경망 이론을 적용하여 온도프리스트레싱 공법을 적용한 연속 강합성거더교의 가열구간을 효과적이고 경제적으로 설정하는 기법을 연구하였다. 적용된 인공신경망 이론을 학습시키기 위한 학습알고리즘으로는 일반적으로 널리 사용되는 오차역전파 알고리즘을 사용하였으며, 이를 이용하여 2경간 및 3경간 연속 강합성거더교의 가열구간을 예측하고 각 경간별로 학습알고리즘의 특성 및 예측의 정확도를 비교하였다.

2. 온도프리스트레싱 공법의 개요

온도프리스트레싱 효과는 기본적으로 인위적인 가열로 인한 강거더의 변형만을 이용하는 것이며 온도프리스트레싱 도입 후에는 온도에 의한 영향이 남아있지 않게 된다. 가열은 강거더의 하부에 실시하게 되며, 이때 거더 단면에 발생하는 온도경사로 인해 정모멘트 구간의 거더에 하향의 열변형이 발생하게 된다. 발생한 강거더의 열변형은 가열이 중지되는 시점에서 구조물에 초기응력을 도입하는 에너지로 전환된다.

연속 강합성거더교의 온도프리스트레싱 공법은 그림 1에서와 같이 프리스트레싱력 도입시까지 4단계의 작업단계로 나뉘어 시공되어진다. 먼저 기존의 시공절차와 마찬가지로 2경간 연속 강합성 거더교의 강거더를 거치한 후(1단계), 도입하고자 하는 응력에 따라 설정된 가열온도를 가열구간에 가하여 강거더의 열변형을 유도하고 열평형상태를 유지한다(2단계). 열평형상태가 유지된 상태에서 바닥판 콘크리트 타설한 다음, 일정강도 발현시까지 양생후(3단계) 열원을 제거하면 온도프리스트레싱이 도입된다(4단계).



(a) 1단계 : 강거더 거치

(b) 2단계 : 강거더 가열

(c) 3단계 : 콘크리트 바닥판 타설 및 양생

(d) 4단계 : 가열종료 후 압축응력도입

그림 1. 온도프리스트레싱 공법의 시공절차

3. 인공신경망 이론

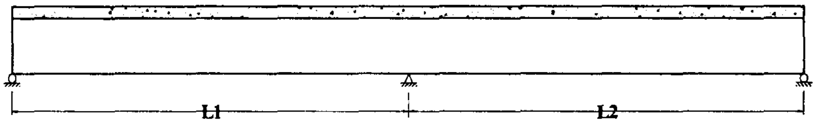
다층퍼셉트론은 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 중간층이 존재하고 입력층, 은닉층, 출력층의 방향으로 연결되어 있으며 각 층내에서의 연결과 입력층에서 출력층으로의 직접적인 연결은 존재하지 않는 신경망이다. 다층퍼셉트론에서 입력층은 다른층으로부터 들어오는 연결선없이 신경망의 외부로부터 입력을 받아 은닉층으로 전달시키며, 은닉층은 입력층과 출력층 사이에 연결되어 각 패턴마다 유사한 특성에 따라 필요한 정보를 학습시켜 저장한다. 출력층은 은닉층에서 출력된 값을 받아 신경망 전체의 최종 출력으로 사용된다. 다층퍼셉트론의 신경망을 학습시킨다는 것은 주어진 입력에 대해 미리 정해진 출력값을 만들어 내도록 각 유니트 사이의 연결강도를 적절히 조절한다는 것으로, 본 연구에서는 다층퍼셉트론을 학습시키기 위한 알고리즘으로 현재 가장 널리 응용되고 있는 오차역전파 학습알고리즘을 사용하였다.

4. 인공신경망을 이용한 최적 가열구간 설정

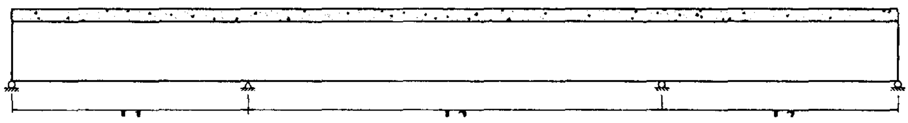
본 연구에서는 온도프리스트레싱 공법의 적용에 있어서 효율적으로 최적 가열구간을 설정할 수 있는 기법을 개발하였다. 개발된 기법은 대상구조물의 제원과 내부지점부 바닥판의 필요도입압축응력을 입력받아 최적의 가열구간을 출력할 수 있도록 구성되었다. 연구의 제한상 대상 구조물은 2경간 및 3경간 연속 강합성형교로 제한하였으나 인공신경망 학습자료의 구성에 따라 4경간 이상의 다경간 연속 강합성형교로 확장적용이 가능하다.

4.1 학습자료 구성

인공신경망의 학습자료는 대상 교량의 경간길이, 가열구간 위치, 가열구간 길이, 바닥판 도입 응력으로 구성된다. 본 연구에서는 학습자료의 구성을 위해 경간비가 1:1이고 각 지간장이 20m, 25m, 30m, 35m, 40m인 2경간 연속교 5개와 경간구성이 20m-35m-20m, 30m-50m-30m인 2개의 교량을 설계하였으며 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 사용한 해석으로 학습자료를 구축하였다.

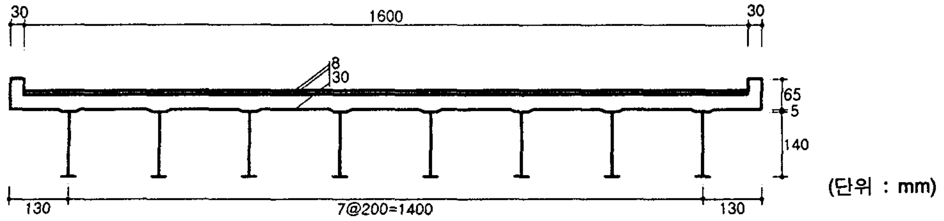


(a) 2경간 연속 강합성거더교의 종단면도



(b) 3경간 연속 강합성거더교의 종단면도

그림 2. 대상교량의 종단면도 (계속)



(c) 대상교량의 횡단면도

그림 2. 대상교량의 종단면도

2경간 연속 강합성거더교의 학습자료 구성시 가열구간길이는 1m씩 증가시키며 해석하였고, 가열구간위치는 내부지점부로부터 1m만큼 떨어진 곳에서부터 가열구간을 외측으로 1m씩 이동하며 해석을 수행하여 학습자료를 구성하였다. 3경간 연속 강합성거더교에서는 외측경간은 2경간 연속 강합성거더교에서와 동일한 방법으로 해석하였고, 내측경간은 대상교량이 내측경간의 중앙을 중심으로 대칭이므로 이를 중심으로 가열구간 길이를 1m씩 증가시켜가며 해석하였다.

또한, 온도와 가열구간의 위치가 응력에 미치는 영향을 알아보기 위해서 강거더 상·하부 플랜지의 온도차(△T)가 70℃, 80℃, 90℃인 경우를 각각 해석해본 결과, 가열온도와 무관하게 가열구간 종점의 위치가 내부지점부에서 1.5m~2.5m 이격된 경우 최대응력을 발생시키는 것으로 나타났다. 그림 3은 경간장이 30m인 2경간 연속교의 예로써 내부지점부에서 2.0m 이격된 경우에 최대응력이 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서는 강거더의 도장에 사용되는 도료의 내열성능을 감안하여 △T를 70℃로 가정하였다.

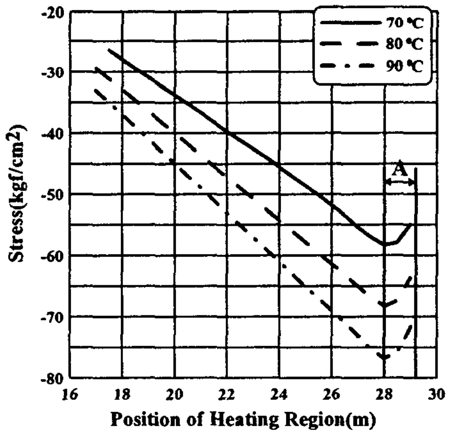


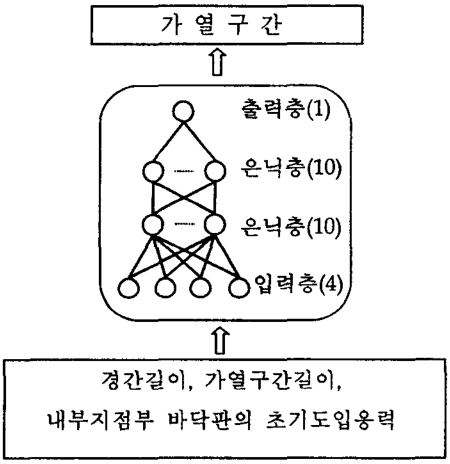
그림 3. 가열온도와 응력의 관계(2경간 연속교, 2@30m, 가열구간길이 17m)

설정된 가열구간으로 열응력해석을 수행하여 학습자료가 완성되면 학습을 시키기 전에 학습자료를 정규화(normalization)하는 과정이 필요하다. 이것은 유니트들의 집합으로 되어있는 신경망의 효율성을 높이기 위해 잡음이나 왜곡에 의해 변형된 것을 바로 잡는 연산처리과정이며, 신경망에서 출력된 값을 다시 역변환하여 사용하게 된다. 본 연구에서와 같이 인공신경망의 전달함수를 비선형함수인 Sigmoid함수로 사용할 경

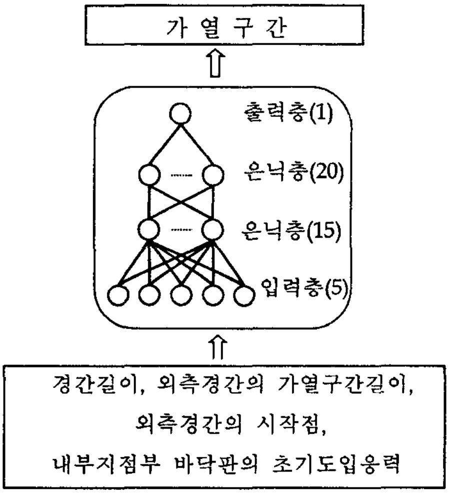
우, 효과적인 학습을 위한 학습자료의 입력값 범위를 0에서 1.0 사이에 분포되도록 변환을 한다.

4.2 인공신경망 구성 및 검증

신경망은 학습과 검증에 의해 완성된다. 학습단계에서는 각 입력패턴에 대해 출력을 먼저 계산한 후, 실제 출력과의 차이를 줄이는 방식으로 연결강도를 조정함으로써 수행되며, 하나의 입력패턴에 대한 조정이 끝나면 새로운 입·출력 조합이 주어지고, 이와 같은 과정을 통해 반복학습을 시행함으로써 입·출력 사이의 상관관계를 잘 묘사하는 가중치를 구한다. 학습이 반복되면서 출력값의 누적제곱오차(MSE, Mean Squared Error)는 급격히 감소하고, 학습이 계속되어감에 따라 출력값의 오차는 오차범위 한도 내에서 최소값을 갖게 된다. 검증단계에서는 필요로 하는 결과에 대한 입력으로부터 미리 결정된 입력층과 은닉층 사이의 상관관계에 의해 출력값을 산정한다.



(a) 외측경간의 최종 인공신경망 구조



(b) 내측경간의 최종 인공신경망 구조

그림 4. 인공신경망 구조

그림 4는 본 연구에서 구축한 인공신경망의 개념도로써 2경간 연속교의 경우는 그림 4(a)의 신경망만을 사용하여 가열구간을 산정하며, 3경간 연속교의 경우는 2경간 연속교의 경우와 마찬가지 과정을 통해 외측경간의 가열구간을 산정한 후, 4(b)와 같은 인공신경망을 반복하여 내측경간의 가열구간을 마저 산정하게 된다.

학습자료에 의해 구축된 인공신경망의 일반적 능력을 검증하기 위하여 미학습자료를 검증자료로 사용하여 검증한 결과, 2경간 연속 강합성거더교는 최대 0.8%의 오차를 보여줌으로써 훈련된 인공신경망이 초기도입응력에 대한 가열구간을 예측하기에 적합하게 구축되었음을 알 수 있었다. 또한, 인공신경망을 구성할 때 오차범위를 25cm로 제한하였는데 결과값이 모두 오차범위 내에서 수렴함을 알 수 있었다. 3경간 연속 강합성거더교의 경우 역시, 최대 1.2%의 오차를 보이고 오차한도로 설정한 25cm 이내의 정확한 값을 찾아낼 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 내측경간에 대한 인공신경망도 내측경간의 가열구간길이를 예측하기에 적합한 것으로 판단된다.

4.3 최적 가열구간 설정기법 개발

학습된 인공신경망을 이용한 최적 가열구간의 설정에 있어 우선적으로 외측경간의 가열구간을 결정하고, 결정된 외측경간의 가열구간을 기준으로 내측경간의 가열구간을 결정한다.

외측경간의 가열구간을 설정할 때 학습자료의 입력값으로 경간길이, 가열구간길이, 내부지점부 바닥판 상·하연의 초기도입응력값을 제시하도록 하였다. 하지만, 설계자의 입장에서 상연과 하연의 응력 모두를 입력하는 것은 번거로운 과정이므로 경간길이, 가열구간길이, 내부지점부 바닥판 상연의 초기도입응력값을 입력층으로 하고 내부지점부 바닥판 하연의 초기도입응력값을 출력층으로 갖는 또 하나의 인공신경망을 구성하여 내부지점부 바닥판 하연의 초기도입응력값을 자동으로 구하도록 하였다. 내부지점부 바닥판 하연의 압축응력값이 구해지면, 외측경간의 최적 가열구간을 찾기 위해 앞에서 구한 하연의 압축응력값을 포함한 입력층의 유니트들을 구성하여 학습된 인공신경망으로 가열구간을 설정한다. 경제적인 가열구간을 설정하는 것이 본 연구의 목적이므로 개발된 가열구간 설정기법을 적용하여 구한 가열구간길이 중에서 가장 짧은 가열구간길이가 최적 가열구간으로 결정된다.

개발된 알고리즘은 이와 같은 방법으로, 경간수가 증가하여도 한 경간씩 점진적인 검토를 하여 내부지점부 바닥판에 도입하려는 초기응력을 최대로 하는 최적 가열구간을 구하도록 구성되었다. 그림 5는 인공신경망을 이용한 다경간 연속 강합성거더교의 최적 가열구간을 설정하는 알고리즘의 흐름도이다.

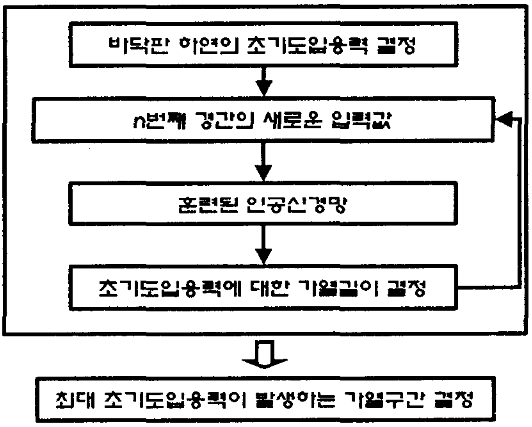


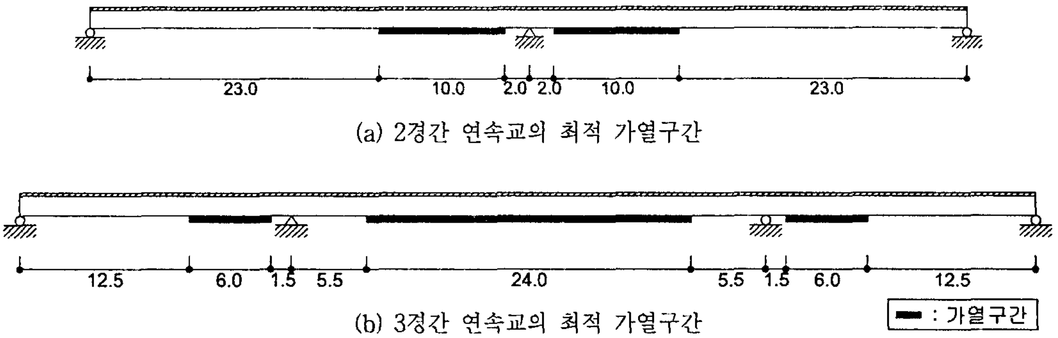
그림 5. 인공신경망을 이용한 적정 가열구간 설정기법의 흐름도

인공신경망을 이용하여 개발된 초기압축응력에 따른 가열구간 설정기법의 적합성을 검증하기 위하여 경간이 35m인 2경간 연속 강합성거더교와 20m-35m-20m인 3경간 연속 강합성거더교를 대상으로 최적 가열구간을 예측하는 예제를 수행하였다.

경간이 35m인 2경간 연속 강합성거더교의 경우, 내부지점부 바닥판의 상연에 온도프리스트레싱 공법(ΔT=70℃)으로 40kgf/cm^{2}의 초기압축응력을 발생시키고자 하는 경우를 가정하였다. 첫 번째 단계에서 바닥판 하연의 초기압축응력을 계산한 결과, 26kgf/cm^{2}으로 출력되었다. 이미 학습된 인공신경망에 구해진 초기압축응력을 추가한 새로운 입력패턴을 적용하여 가열구간을 설정하고, 다시 역변환을 통해 가열구간의 길이와 위치를 결정함으로써 최적의 가열구간을 설정하였다. 본 예제의 수행 결과, 그림 6(a)와 같이 가열구간이 교량시점으로부터 23m~33m일 때, 40kgf/cm^{2}의 초기압축응력을 얻을 수 있다는 것으로 예측되었다. 결과값을

확인하기 위해서 유한요소법에 의한 값(39.8kgf/cm^2)과 비교하여 본 결과, 오차가 0.8% 정도로 예측된 최적 가열구간이 매우 정확함을 확인할 수 있었다.

20m-35m-20m의 경간을 갖는 3경간 연속교의 경우 역시, 내부지점부 바닥판 상연에 온도프리스트레싱 공법(ΔT=70℃)으로 40kgf/cm^{2}의 초기압축응력을 발생시키고자 하는 경우를 가정하였다. 첫 번째로 외측경간의 최적 가열구간의 위치를 결정하는 인공신경망을 통해 가열구간 종점의 위치를 예측한 결과, 교량시점으로부터 18.5m 지점임을 알 수 있었다. 이를 기준으로 내측경간의 가열길이 설정하는 인공신경망에 새로운 입력값을 구성하여 내측경간의 가열길이를 예측하였다. 본 예제의 수행 결과, 그림 6(b)와 같이 외측경간은 교량시점으로부터 12.5~18.5m 구간, 내측경간은 중앙을 중심으로 24m를 가열하여 총 36m를 가열구간으로 하였을 때 40kgf/cm^{2}의 초기압축응력을 얻을 수 있는 것으로 예측되었다. 결과값을 유한요소법에 의해 구한 응력값(40.97kgf/cm^2)과 비교해 본 결과, 오차가 2% 정도로 역시 매우 정확한 최적 가열구간이 예측됨을 확인하였다.



(a) 2경간 연속교의 최적 가열구간

(b) 3경간 연속교의 최적 가열구간

그림 6. 2경간 및 3경간 연속교 최적 가열구간 선정 예제 수행 결과
(ΔT=70℃, 목표 내부지점부 바닥판 초기압축응력 = 40kgf/cm^2)

마찬가지 방법으로, 본 연구에서 대상 교량으로 선정한 2경간 및 3경간 연속 강합성거더교의 최적가열구간에 대한 경간장과 가열구간길이의 비를 구한 결과를 정리하면 표 1과 같다. 내부지점부 바닥판 상연에 40kgf/cm^{2}의 초기압축응력을 도입하고자 하는 경우를 가정하였으며 ΔT는 70℃로 고정하였다.

표 1. 최적가열구간에 대한 경간장/가열구간길이 비

대상교량	경간구성(m)	가열구간길이(m)	경간장/가열구간길이(%)
2경간 연속교	20 - 20	6.5 - 6.5	32.5 - 32.5
	25 - 25	8 - 8	32.0 - 32.0
	30 - 30	9.5 - 9.5	32.0 - 32.0
	35 - 35	10 - 10	28.6 - 28.6
	40 - 40	11 - 11	27.5 - 27.5
3경간 연속교	20 - 35 - 20	6 - 24 - 6	30.0 - 68.6 - 30.0
	30 - 50 - 30	10.5 - 35 -10.5	35.0 - 70.0 - 35.0

(※ ΔT=70℃, 목표 내부지점부 바닥판 초기압축응력 = 40kgf/cm^2)

5. 결 론

본 연구에서는 인공신경망(Artificial Neural Network)을 이용하여 온도프리스트레싱 공법을 적용한 연속 강합성거더교의 설계에 사용 가능한 적정 가열구간 설정기법을 개발하였다.

1. 본 연구에서 제시한 인공신경망 이론을 이용한 최적화 모델이 연속 강합성거더교의 최적 가열구간을 예측하는데 있어 효과적으로 적용됨을 확인하였으며 유한요소해석을 통한 검증결과, 오차가 최대 25cm 이내로 매우 타당한 것으로 판단된다.

2. 학습자료의 구성을 위해 구축한 데이터의 분석결과, 외측경간의 가장 효율적인 가열구간의 위치는 내부지점부에서 1.5m~2.5m 이격된 경우임을 알 수 있었으며 내측경간은 경간의 중앙을 기준으로 대칭으로 가열구간길이를 정할 경우가 효율적임을 확인하였다. 이와 같은 현상은 경간이 증가하여도 변함이 없는 것으로써, 본 연구에서 개발한 최적가열구간 설정기법은 본 연구를 통해 검증된 2경간 및 3경간 연속교 뿐만 아니라 3경간 이상의 다경간 연속교에도 충분히 적용 가능한 것으로 판단된다.

3. 가열구간의 길이는 필요한 바닥판의 초기압축응력, 가열온도, 거더와 바닥판의 강성비 등에 따라 달라질 수 있지만, 통상적으로 내측경간의 경우 경간장의 60~70%, 외측경간의 경우에는 경간장의 25~35% 정도면 충분한 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김병진 (1996), "인공신경망을 이용한 구조물 손상평가기법에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사학위논문.

2. 양성만 (1999), "동특성 변화에 대한 민감도분석기법과 신경망을 이용한 구조물의 손상추정", 연세대학교 대학원, 석사학위논문.

3. 김상효, 김종학, 김준환 (1999), "온도프리스트레싱 기법을 이용한 강합성형 연속 강합성거더교의 개선된 설계시공 기법에 관한 연구", **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 2124.

4. 김대수 (1996), 신경망이론과 응용(I), **하이테크정보**.

5. Fahlmann, S. E. (1988), "An empirical study of learning speed in back-paropagation network", *Technical Report CMU-CS-88-162.*

6. Haykin, S. (1994), Neural Networks - A Comprehensive Foundation, *Macmillan College Publishing Company*.

7. Pandey, P. C. and Barai, S. V. (1994), "Multilayer Perceptron in Damage Detection of Bridge Structures", *Computers and Structures*, Vol. 54, No. 4, pp. 597608.

8. Wu, X. (1991), "Neural Network-Based Material Modeling", Ph.D. thesis, *Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.*