

# 선상가열시 강판의 변형 추정도구 개발을 위한 기초연구

서도원 · 양박달치  
울산대학교 조선해양공학부

## A Study of the Development of a simulator for Deformation of the Steel Plate in Line Heating

DO-WON SEO, PACK-DAL-CHI YANG

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS:** Line Heating 선상가열, Curvature Deformation 곡률변형, Artificial Neural Network 인공신경망

**ABSTRACT:** During the last decade several different methods have been proposed for the estimation of thermal deformations in the line heating process. These are mainly based on the assumption of residual strains in the heat-affected zone or simulated relations between heating conditions and residual deformations. However these results were restricted in the application from the too simplified heating conditions or the shortage of the data. The purpose of this paper is to develop a simulator of thermal deformation in the line heating using the artificial neural network. Two neural network predicting the maximum temperature and deformations at the heating line are studied. Deformation data from the line heating experiments are used for learning data for the network. It was observed that thermal deformation predicted by the neural network correlate well with the experimental result.

### 1. 서 론

선상가열에 의한 강판의 변형추정은 곡가공 자동화를 위하여 중요한 부분이다. 이러한 이유로 선상가열에서 일어나는 판의 변형에 대한 역학적인 현상을 규명하고 이를 실제 생산에 적용하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다. 류철호 등(1997), 문성춘 등(1998), Ueda 등(1991)은 곡면의 곡률분석을 통하여 가열선의 위치를 찾아내는 방법을 제안 하였는데 이들은 방법은 공통적으로 곡면의 주곡률을 해석적으로 구한다음 가열선의 위치를 구하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 가공조건과 곡률의 상관관계를 규명하지 못하고 주곡률 간의 우선순위를 정하지 못하여 실질적으로 곡면의 정보를 적용하기에는 한계가 있다.

위의 연구를 고찰하여보면 선상가열에 의한 판의 변형을 예측하기 위해서는 가열선 주위의 변형정보를 보다 자세히 알아야 함은 물론 가열인자와 변형사이의 상관관계를 규명하는 것이 필요함을 알 수 있다. 이에 변형추정을 위한 연구로써 장창두 등(1997)은 고유변형도법을 이용한 간이 열탄소성 해석을 수행하였고 임동용 등(2003)은 간이 예측식을 통하여 열변형 추정을 시도 하였다. 또한 박성건(1996)과 전병재 등(2006)은 인공신경망을 이용하여 판의 열변형을 구하고자 하였다. 그러나 지금까지의 열변형 추정에 관한 연구는 주로 판의 중앙부를 가열하여 변형정보를 얻어내고 있다. 실제 조선소에서 행하고 있는 선상

가열은 판의 부분을 가열하는 등의 여러 가지 방법을 취하고 있는 것과 비교할 때 지금까지의 연구결과를 실제 문제에 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

본 연구에서는 인공신경망을 이용하여 판의 부분적인 가열에 의한 열변형 추정기구를 개발하였다. 판의 열변형 정보를 얻기 위한 방법으로 선상가열 실험을 수행하였고 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이들의 결과는 신경망의 학습 자료와 검증자료로 이용하였으며 NURBS를 이용하여 곡면을 표현하였다. 본 연구에서 구성한 인공신경망을 이용하여 판의 변형량을 추정하고 이를 실험결과와 비교해본 결과 만족할 만한 결과가 도출됨을 확인하였다.

### 2. 선상가열 실험

선상가열에 의한 실제적인 판의 거동을 살펴보고 Fig. 1과 같이 실제에 가까운 인공신경망의 학습자료 및 검증의 자료를 구성하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험 장치는 3축 자동 선상가열장치를 이용하였다. 실험에서 사용한 모델은 연강판으로 가로와 세로의 길이는 500×500mm이며 두께는 12mm, 15mm, 18mm, 20mm를 사용하였다. 열원은 산소와 프로판을 혼합한 가스를 사용하였고 산소압력은 0.3MPa, 프로판은 0.025MPa이다. 평판과 토치 사이의 간격은 50mm로 유지하였고 토치의 내부직경은 3mm를 사용하였으며 냉각방법은 공냉을 선택하였다.

서도원: 울산광역시 무거동 울산대학교

052-259-1641 hapi0907@ulsan.mail.ac.kr

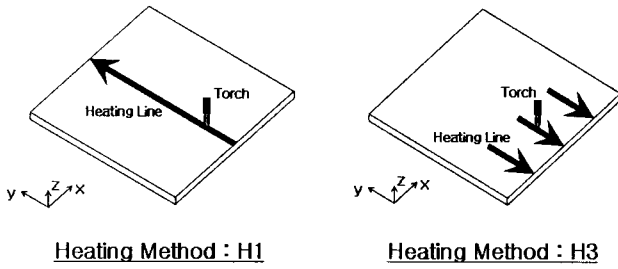


Fig. 1 Methods of Heating in Experiments

본 실험에서는 강판의 두께와 토치의 이동속도를 변화시켰다. 실험에서의 가열방법은 두 가지 종류로 나누어진다. Fig. 1에서 보는 것 과 같이 판의 가운데 부분을 1개의 가열 선으로 가열하는 방법(H1)과 판의 한 변에 국부적으로 3부분 가열하는 방법(H3)이다. H1가열방법은 선상가열 실험의 기본적인 실험으로 가열선 주위의 변형과 곡률분포를 알기 위한 실험이고, H3가열방법은 보다 실제적인 문제로 국부적인 부분의 가열에 의해서 전체적인 판이 어떻게 거동하는지 알 수 있는 실험이다. H3가열방법은 판의 한 변에 170mm를 가열하였고 이는 판의 한 변의 길이에 1/3에 해당한다. H3가열방법은 선상가열 이후 곡률이 부족한 경우에 수행하는 수정가열에도 사용되는 방법이기도 하다. 가열선이 판의 중앙부에서 바깥쪽으로 향하는 것은 단부효과를 통하여 더 큰 변형을 얻기 위함이다.

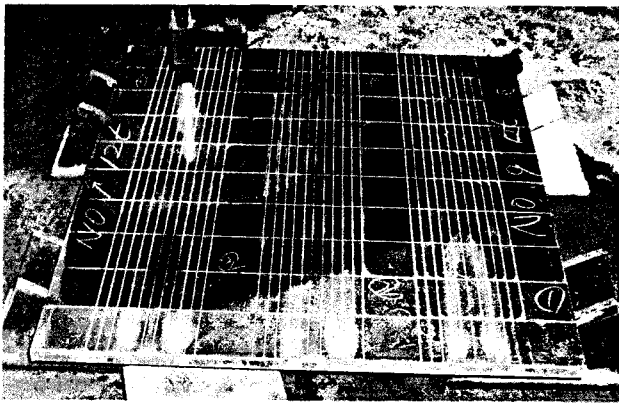


Fig. 2 Model of experiment

Fig 1은 모델 R09의 실험과정을 보여준다. F09와 같이 H3 가열조건에서 곡판인 경우에는 평판의 실험결과를 이용하여 기존 가열선의 맞은편 부분에 가열하는 방법을 택하였다. 이는 동일한 판이 동일한 입열량이 주어졌을 때 초기곡률의 차이에 따라 변형량의 차이를 알 수 있도록 하기 위해서이다. 본 실험은 가열에 의한 변형만을 계측하기 위한 실험으로 판에 별도의 구속은 주지 않았다. 가열선 주위의 곡률변화가 큰 것을 고려하여 가열선 주위를 중점적으로 계측하였다.

실험모델은 Table 1에 나타내었다. 모델명에서 평판은 이름의 첫 글자가 'F' 곡판은 'R'을 사용하여 구분하였다. F01~F04 모델은 H1가열조건으로 실험하였고 각각 2개의 시편을 사용하였다.

Table 1 Data of line heating experiments

Model	Thickness [mm]	Torch Speed [mm/min]	O <sub>2</sub>	Propane	Heating Method
F01-1, F01-2	15.0	100	0.030	0.0025	H1
F02-1, F02-2	15.0	125	0.030	0.0025	H1
F03-1, F03-2	15.0	150	0.030	0.0025	H1
F04-1, F04-2	15.0	200	0.030	0.0025	H1
F05	20.0	150	0.030	0.0025	H1
F06	20.0	150	0.030	0.0025	H3
F07	18.0	100	0.030	0.0025	H3
F08	20.0	100	0.030	0.0025	H3
F09	20.0	200	0.030	0.0025	H3
F10	12.0	150	0.030	0.0025	H3
F11	18.0	100	0.030	0.0025	H3
F12	12.0	100	0.030	0.0025	H3
F13	18.0	200	0.030	0.0025	H3
F14	12.0	200	0.030	0.0025	H3
R01	12.0	500	0.060	0.1500	H1
R02	18.0	400	0.060	0.1500	H1
R03	20.0	150	0.030	0.0025	H3
R04	18.0	150	0.030	0.0025	H3
R05	20.0	100	0.030	0.0025	H3
R06	20.0	200	0.030	0.0025	H3
R07	12.0	150	0.030	0.0025	H3
R08	18.0	100	0.030	0.0025	H3
R09	12.0	100	0.030	0.0025	H3
R10	18.0	200	0.030	0.0025	H3
R11	12.0	200	0.030	0.0025	H3

본 연구는 국부적인 가열에 의한 판의 거동을 추정하는 연구로써 H1가열방법을 사용하는 모델에 대한 열변형 정보는 비교 자료로써 사용하였고 H3가열방법을 사용하는 모델의 변형 정보 중  $y=0mm$ ,  $y=250mm$ ,  $y=500mm$ 에서의 변위정보를 이용하여 그래프로 나타내었다.

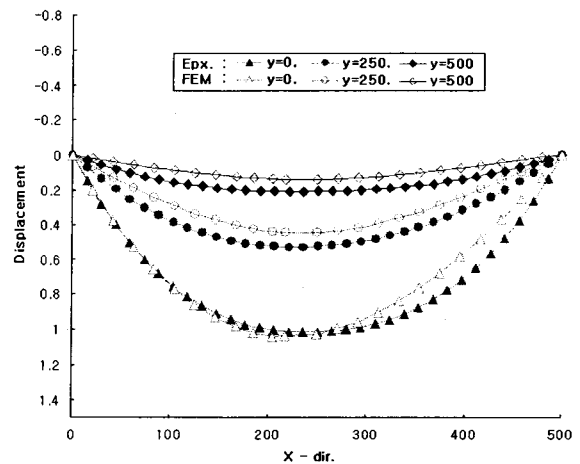


Fig. 3 Comparison of displacements between experiment and FEM result for model F06

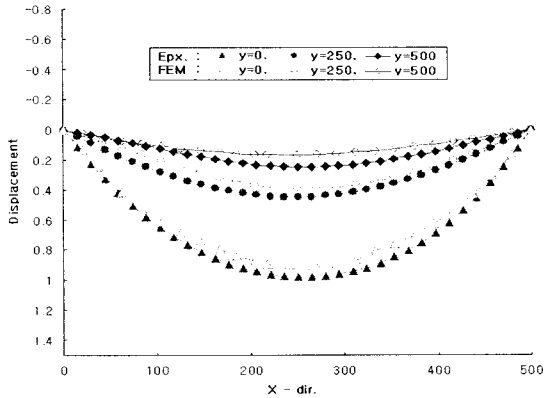


Fig. 4 Comparison of displacements between experiment and FEM result for model F07

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 F06, F07 모델에 대한 변형 결과를 나타낸 것이다. 가열선 방향이 판의 가운데 부분에서  $y=0$ 임에 따라 단부효과에 의해  $y=0$ 의 위치에서 가장 큰 변형이 발생하였다.  $y=250$ 과  $y=500$ 의 위치에서는 직접 가열되지는 않았으나 원거리( $y=0$ )변형에 의한 2차적인 변형이 발생하였음을 알 수 있다.

### 3. 수치해석에 의한 열변형 추정

선상가열에 의한 판의 변형을 수치해석으로 풀기 위해서는 가열과 냉각과정에서 일어나는 판의 온도분포를 알아야 한다. 온도분포는 열전달해석의 결과로서 나타나게 되는데 열전달 해석의 입력 항은 열속함수로 표현된다. 본 연구에서는 실험에서의 가열선 부위 최고 온도를 바탕으로 입열량을 산정하여 열속함수를 계산하였고 열속함수의 수학적 모델은 Gauss 분포로 가정하였다. 열속함수는 유한요소 모델에 표면열속의 형태로 각 시간대에 따라 입력되어 계산된다.

유한요소 모델은 3차원 8절점 요소를 사용하였다. 판의 모든 면에서 대류에 의한 열손실을 고려한 대류경계조건을 부여하였고 복사에 의한 열손실은 고려하지 않았다. 재료의 기계적인 물성치들은 온도 의존성을 고려하였다. 가열조건이 H1인 모델의 수치해석에서는 좌우 대칭성을 고려하여 가열선 부위를 반으로 나누어 해석하였지만 가열조건이 H3인 모델의 경우에는 판이 순차적으로 가열되어 온도분포가 대칭적이라고 할 수 없으므로 판 전체를 해석하였다. 본 연구에서 모든 수치해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

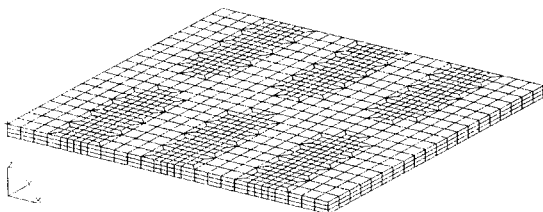


Fig. 5 FEM Model

Table 2 Comparison of the maximum displacement between experiment and analysis (mm)

Model	Contents	F06	F07
y=0	Exp.	0.980	1.019
	Num.	0.920	1.030
	Error	0.060	-0.011
y=250	Exp.	0.448	0.529
	Num.	0.389	0.447
	Error	0.059	0.082
y=500	Exp.	0.248	0.208
	Num.	0.163	0.141
	Error	0.085	0.067

열전달 해석을 수행하여 나온 판의 과도적인 온도분포를 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 해석결과를 NURBS곡면으로 표현하고 곡률해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. Table 2는 F06, F07 모델의 경우 실험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 각 지점에서 최대 변형량을 비교해본 결과 근소한 차이를 보이는 것으로 보아 유한요소 해석의 결과가 실험의 결과와 상당히 일치함을 확인할 수 있다.

### 4. 인공신경망

본 연구는 선상가열 자동화의 일환으로 판의 열변형 추정 신경망과 최고온도를 추정하는 신경망을 각각 구성하였다. 본 연구에서는 각 뉴런들이 아래층 뉴런에 전체 연결되어 있는 것으로 구성하였다. 온도추정 신경망의 경우 판두께와 가열속도

Table 3 Learning data of artificial neural network

Model	Max. temp. (°C)	Initial deform. (mm)			Final deform. (mm)		
		y=0	y=250	y=500	y=0	y=250	y=500
F06	737	0.000	0.000	0.000	0.980	0.480	0.248
F07	746	0.000	0.000	0.000	1.019	0.529	0.347
F08	803	0.000	0.000	0.000	1.008	0.379	0.198
F09	716	0.000	0.000	0.000	0.761	0.394	0.268
F10	753	0.000	0.000	0.000	1.040	0.796	0.391
F11	814	0.000	0.000	0.000	0.694	0.246	0.170
F12	834	0.000	0.000	0.000	0.633	0.262	0.172
F13	713	0.000	0.000	0.000	0.815	0.391	0.270
F14	728	0.000	0.000	0.000	0.820	0.360	0.214
R03	743	0.980	0.480	0.248	1.351	1.236	1.637
R04	751	1.019	0.529	0.347	1.391	1.211	1.585
R05	843	1.008	0.379	0.198	1.509	1.277	1.642
R06	703	0.761	0.394	0.268	0.940	0.718	0.871
R07	759	1.040	0.796	0.391	1.734	1.910	2.144
R08	809	0.694	0.246	0.170	1.215	1.085	1.462
R09	869	0.633	0.262	0.172	0.882	0.715	0.958
R10	722	0.815	0.391	0.270	0.962	0.741	0.927
R11	734	0.820	0.360	0.214	1.453	1.307	1.756

그리고 산소와 프로판 가스의 압력을 입력뉴런으로 선택하였고 최고 온도를 출력 뉴런으로 입력하였다. 열변형 추정 신경망의 경우는 판두께와 가열속도 그리고  $y=0$ ,  $y=250$ ,  $y=500$  지점에서 판의 변형을 입력하였으며 H1가열조건과 H3가열조건을 구분할 수 있도록 가열조건을 입력뉴런에 포함시켰다. 그리고 각 지점에서의 변형이 출력 뉴런이 되도록 하였다. Table 3는 학습자료의 일부를 나타낸 것이다. Table 3의 모델 중 F14 모델과 R10 모델은 인공지능망의 검증자료로 이용하였다.

Table 4는 인공지능망의 결과를 실험결과와 비교한 것이다. 최고온도를 추정하여 본 결과 F14 모델의 경우에는 오차가 0.8%이고 R10 모델의 경우에는 0.3%의 오차가 발생하였다. 이 결과로 보아 온도추정 신경망이 만족할 만한 결과를 보여주는 것을 확인 할 수 있다. 열변형 추정신경망을 이용한 결과는 F14에서  $y=500$ 인 경우를 제외하면 비교적 작은 오차를 보여준다. F14모델 중  $y=500$ 인 경우는 변형의 크기가 작아 오차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 인공지능망을 이용하여 변형추정을 하여본 결과 선상가열실험의 결과와 유사함을 확인하였고 만족할 만한 결과를 보여주는 것을 확인 할 수 있다.

**Table 4** Comparison of maximum temperature deformation between experiments and artificial neural network.

Model	Contents	Temperature	Deformation(mm)		
			y=0	y=250	y=500
	Experiment	728°C	0.820	0.360	0.214
F14	Neural network	721°C	0.815	0.388	0.237
	error	0.8%	0.6%	6.7%	10.7%
	Experiment	722°C	0.962	0.741	0.927
R10	Neural network	724°C	0.936	0.715	0.963
	error	0.3%	2.7%	3.6%	3.9%

## 5. 결 론

선상가열시 판의 한 변에 국부적인 가열을 한 경우에 대하여 강판의 열변형을 추정하기 위한 도구로써 인공지능망을 사용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 판의 한 변을 부분 가열한 실험과 ABAQUS를 이용한 수치 해석 결과를 비교해본 결과 선상가열에 의한 변형결과가 유사함을 확인하였다.
2. 선상가열 실험과 수치해석을 통하여 판의 한 변을 부분적으로 가열하였을 경우에 판의 가열하지 않은 부분에서도 원거리의 변형에 의한 2차적인 변형이 발생함을 확인하였다.
3. 본 연구에서 개발한 신경망을 통하여 선상가열에서 판의 최고온도와 변위를 추정하여 본 결과 실험의 결과를 잘 모사하는 것을 확인하였다.
4. 향후 더욱 다양한 방법의 선상가열의 변형정보를 데이터베이스화 하여 본 연구에서 개발한 인공지능망을 이용한다면 보다 정확한 변형 추론이 가능할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 류철호, 이장현, 신종계 (1997). "선상가열 자동화를 위한 판의 기하학적 변형률 분석", Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, 13-14, pp. 416-421.
- 문성춘, 장창두 (1998). "선상가열법에 의한 강판 가공의 가열 선 결정 알고리즘", 대한조선학회 논문집, 제35권, 제2호, pp. 104-113
- 박성진 (1996). "인공지능망을 이용한 선상가열 공정의 정보모델", 서울대학교 공학석사학위 논문.
- 임동용, 이주성 (2003). "강판의 선상가열시 변형률 예측 모델의 개발", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 121-126.
- 장창두, 서승일, 고대은 (1997). "간이 열탄소성해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형예측에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제34권, 제3호, pp 104-112.
- 전병재, 김현준, 양박달치 (2006). "인공지능망을 적용한 선상가열시 강판의 곡률변형 추정", 한국해양공학회, 제20권, 제4호, pp.23-30
- Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R. A., Okumoto, Y., Kamichika, R., Ishiyama, M., and Orawa, J. (1991), "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line-Heating (1st Report) Practice for Plate Bending in shipyard Viewed from Aspect of Inherent Strain", Journal of the society of naval Architects of Japan, Vol 170, pp. 577~586

2006년 10월 16일 원고 접수

2006년 0월 0일 최종 수정본 채택