

## 고유변형도법을 이용한 삼각가열에 의한 판 변형의 시뮬레이션

장창두\*, 고대은†\*\*, 하윤석\*\*\*

서울대학교 조선해양공학과\*  
동의대학교 조선해양공학과\*\*  
삼성중공업(주) 산업기술연구소 용접연구파트\*\*\*

### Simulation of Plate Deformation due to Triangle Heating Using Inherent Strain Method

Chang-Doo Jang\*, Dae-Eun Ko†\*\* and Yun-Sok Ha\*\*\*

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University\*  
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-Eui University\*\*  
Welding Research Part, Samsung Heavy Industries, Co., Ltd\*\*\*

#### Abstract

In the shipyard, line heating and triangle heating are two major processes for forming curved plates in various shapes. While there have been many studies on line heating, triangle heating has been rarely studied due to its complicated heating process with irregular multi-heating paths and highly concentrated heat input. As the triangle heating process is one of the most labor-consuming jobs in shipyards, it is essential to study the automation as well as improvement of triangle heating process in order to increase hull forming productivity. In this study, a pioneering attempt to simulate triangle heating was made. A circular disk-spring model was proposed for elasto-plastic analysis procedure of triangle heating and the inherent strain method was also used to analyze the deformation of plates. Simulation results were compared with those of experiments and showed good agreement. It is shown that the present approach including analysis model used in this study is effective to simulate the triangle heating for plate forming process in shipbuilding.

※Keywords: Line heating(선상가열), Triangle heating(삼각가열), Inherent strain method(고유변형도법), Circular disk-spring model(원판-스프링 모델), Elasto-plastic analysis procedure(열탄소성 해석 과정)

접수일: 2008년 8월 6일, 승인일: 2008년 11월 5일

†교신저자: deko@deu.ac.kr, 051-890-2594

## 1. 서론

복잡한 3 차원 곡면 형상을 갖는 선체 외판의 제작을 위한 국가공은 조선에 있어서 필수적인 공정이며, 대부분의 조선소에서는 프레스를 이용한 냉간가공으로 주된 1 차곡을 성형하고 최종 목적 곡면을 얻기 위한 2 차곡의 성형에는 가스토키에 의한 열간가공을 이용하고 있다. 선상가열과 삼각가열로 대표되는 열간가공은 가열과 냉각에 따른 열전도 및 불균일한 열응력 생성과정, 온도 변화에 따른 재료의 기계적 성질 변화 등의 복잡한 역학적 과정을 거쳐 생성되는 잔류소성변형을 이용하는 것으로서, 실제 조선 현장에서는 숙련된 기능공의 작업 경험에 전적으로 의존하여 시행되고 있는 것이 현실이다.

선상가열과 삼각가열은 그 변형특성이 상당히 다른데, 일반적으로 굽힘변형을 얻기 위한 목적으로 선상가열을, 굽힘변형과 수축변형을 동시에 얻기 위한 목적으로 삼각가열을 실시하게 된다. 곡량이 큰 선수미의 소형 후판에 주로 적용하는 삼각가열은 선상가열에 비해서 몇 배의 작업시간을 요하며 작업 난이도 또한 훨씬 높다.

최근 생산성 향상 및 작업 환경의 개선을 위한 자동화 요구의 증대로 국가공 특히, 열간가공에 대한 많은 연구가 국내외적으로 진행되고 있으나 최근까지의 연구는 주로 선상가열에 한정되어 있으며 상대적으로 복잡한 삼각가열에 대한 연구는 미미한 현실이다.

선상가열에 의한 변형의 예측 분야에서는 열탄소성 해석법과 고유변형도법의 장점을 조합하려는 연구 경향이 지배적이다. Nomoto et al.(1991)은 입열량과 각변형 및 면내 수축량의 관계를 실험으로 구하고 각변형과 수축량을 등가의 모멘트와 힘으로 치환하여 선상가열 과정을 시뮬레이션 하였으며, Ueda et al.(1991)은 곡면의 전개도와 평판의 차이만큼 고유변형도를 분포시키고 그 크기를 3 차원 비선형 유한요소 해석을 통해 역으로 산출하였다. Ko et al.(1999)은 고유변형도법에 기초한 열탄소성 해석법을 제시하고 탄성대변형해석을 통해 선상가열에 의한 판의 변형을 실시간으로 제어

할 수 있는 해석법을 제안하였다.

삼각가열과 관련하여서는, Jang et al.(2001a)이 삼각가열에 의한 변형의 효율적인 해석 기법 개발을 위한 기초연구를 수행하였다. 실제 조선소의 현장 조건대로 일련의 선상가열 및 삼각가열 실험을 수행하여 각각의 변형 특성을 비교 분석하였으며, 판 두께 및 가열길이 방향으로 상변태온도 이상의 고온영역 분포를 확인함으로써 그 변형 특성을 합리적으로 해명하였다. 또한, Jang et al.(2001b)은 삼각가열용 수치해석 모델을 개발하고 상용 구조해석 프로그램(ANSYS)을 이용한 열탄소성 해석을 통해 삼각가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션 하였으며, 이 기법을 이용하여 여러 가지 가열조건에 따른 판의 변형 특성을 정리하였다.

본 연구에서는 고유변형도법 기반의 삼각가열 해석 모델을 제안하고 고유변형도의 크기와 분포 형상 결정을 위한 계산 절차를 정립하였으며, 이를 통해 삼각가열에 의한 판의 변형을 실시간으로 제어 할 수 있는 해석법을 제안하였다. 또한, 삼각가열 실험 결과와 비교 검증하여 제안된 해석법의 유효성을 보였다.

## 2. 고유변형도법을 이용한 삼각가열 해석 모델

### 2.1 고유변형도 크기의 결정

Jang et al.(2001a)의 실험 결과에 의하면, 선상가열은 가열 진행 방향으로 고온 가열 영역의 폭과 깊이가 거의 일정한 반면, 삼각가열은 가열이 진행됨에 따라 고온 가열 영역의 폭과 깊이가 점차 증가하는 패턴을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 삼각가열을 가열 길이 방향으로 고유변형도 영역의 폭과 깊이가 점차 증가하는 선상가열의 집합으로 이상화하고 Ko et al.(1999)이 제안한 원판-스프링 모델(Fig. 1)을 이용하여 변형을 유발하는 고유변형도를 계산하였다. 원판-스프링 모델에서 가열에 의한 열탄소성 과정은 원판에 집중되며 원판을 제외한 영역은 항상 탄성상태에 있고 원판의 변형에 저항하는 스프링의 역할을 하는 것으로 가정하였다.

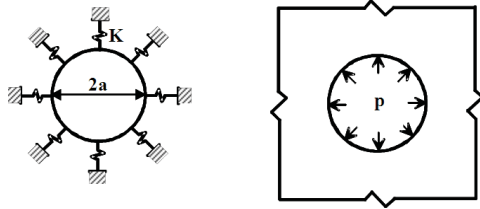


Fig. 1 Circular disk-spring model

2.2 고유변형도 영역의 결정

재료는 온도의 상승에 따라 변형에 대한 저항 능력을 잃게 되며 연강재의 경우 700℃ 이상에서는 통상의 인장시험에 의한 항복점이 극히 작으므로 사실상 변형에 대한 저항 능력을 상실한다고 해도 무리가 아니다(Ko 1998). 따라서 본 연구에서는 소성변형도가 집중되는 고유변형도 영역을 가열에 의한 판의 최고 도달 온도가 700℃ 이상인 영역으로 가정하였다.

Jang et al.(2001a)은 실험적 연구에서 삼각가열 된 시험편을 가열길이 방향으로 일정 간격마다 절단하여 상변태온도(A<sub>1</sub> 변태온도, 약 720℃) 이상의 고온 가열 영역을 종단면 및 횡단면에 대해 계측하여 보였으며, 또한 Jang et al.(2001b)은 삼각가열에 대한 과도 열전도 해석을 통해 유사한 고온 영역 분포 형상을 얻었다.

본 연구에서는 상기의 실험 및 해석 결과를 참조하여 삼각가열에 의한 고유변형도 영역을 Fig. 2 와 같이 가정하였다. 즉, 가열 길이 방향으로 고유 변형도 영역의 폭과 깊이가 점차 증가하는 선상가열 요소의 집합으로 가정하였고, 각 단위 요소에서 고유변형도 영역의 폭과 깊이는 계산의 편의를 위해 처음요소의 폭과 깊이에서 마지막 요소의 폭과 깊이로 선형적으로 증가하는 것으로 가정하였다.

또한, 열전도 해석 및 실험 결과를 보면 선상가열과는 달리 삼각가열에서는 가열의 종단부에 이르러 고유변형도 영역이 판 두께를 관통하게 되는데, 이는 가열의 종단부에서 최대 수축량을 얻으려는 삼각가열의 목적에 부합되는 결과이다. 본 논문에서는 고유변형도 영역이 판 두께를 관통하지 않는 경우와 관통하는 경우에 대해 각각 다른

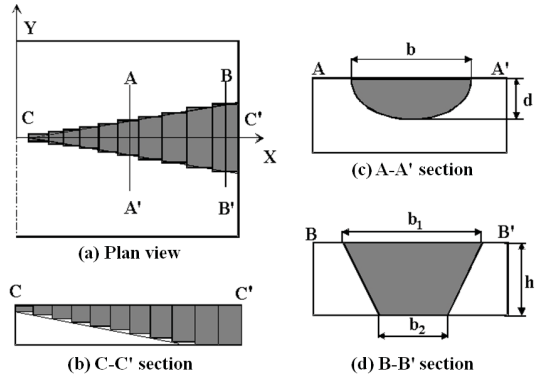


Fig. 2 Analysis model for triangle heating

고유변형도 단면 분포 형상을 가정함으로써 이러한 삼각가열 고유의 현상을 해석에 반영하였다. 즉, Fig. 2 에 보인 바와 같이, 고유변형도 영역이 판 두께를 관통하지 않는 A-A' 단면에 대해서는 타원 형상으로, 판 두께를 관통하는 B-B' 단면에 대해서는 사다리꼴 형상으로 각각 가정하였다.

고유변형도 영역의 폭과 깊이의 관계식은 타원형상(elliptical type)의 경우 식(1)과 같고, 사다리꼴 형상(trapezoid type)의 경우는 식(2)와 같다.

$$b_{ze} = b \sqrt{1 - \frac{l}{d^2} \left(z - \frac{h}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$b_{zt} = \frac{b_1 - b_2}{h} z + \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (2)$$

2.3 유한요소 해석을 위한 등가하중의 계산

삼각가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션하기 위한 과정으로 우선, 복잡한 열탄소성 과정을 간략하게 해석하기 위해 앞 절에서와 같은 고유변형도법에 의한 열탄소성 해석을 수행하였으며, 결국 문제는 고유변형도가 초기변형도로서 존재하는 탄성 문제로 귀착된다. 변형을 계산하기 위한 등가의 하중은 단면에 분포하는 고유변형도를 적분하여 구할 수 있다. 단위길이당 수축력(f)과 굽힘모멘트(m)는 고유변형도( $\epsilon^*$ )를 적분하여 각각 식(3), 식(4)와 같이 계산된다. 수축력과 굽힘모멘트의 분포 형상을 Fig. 3 에 보였다.

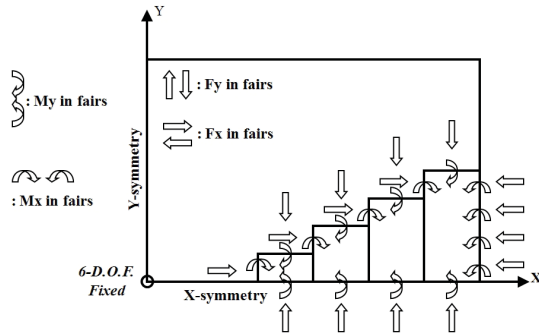


Fig. 3 Equivalent loads in the analysis model

탄성 변형을 구하기 위한 유한요소 해석에는 ANSYS 의 shell63 요소를 사용하였고, 재료 특성은 선급용 mild A-grade 강재에 대한 일반적인 값(포아송비=0.3, E=206GPa)을 사용하였으며, 경계조건은 강체 운동을 방지할 수 있도록 Fig. 3에 보인 바와 같이 해석 모델의 중앙점에 고정조건으로 주었고, 1/4 모델의 x 축과 y 축에는 각각 x 축 대칭, y 축 대칭 조건을 주었다.

$$f = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h-d}{2}} \frac{b_z}{b} E \varepsilon^* dz \quad (3)$$

$$m = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h-d}{2}} \frac{b_z}{b} E \varepsilon^* z dz \quad (4)$$

### 3. 해석결과와 실험결과의 비교

#### 3.1 평판에 대한 삼각가열 변형

선수미 외판 부재로 흔히 사용되는 30mm 두께의 후판에 대해 삼각가열을 실시하고 변형을 계측하여 해석 결과와 비교하였다. 삼각가열 시편의 제원은 Fig. 4와 같고, 가열조건은 Table 1과 같으며 사용된 강재는 mild A-grade 이다. 실험 시, 가열 폭이 좁은 쪽부터 넓은 쪽으로 빙글빙글 원을 그리면서 전진하는 weaving 방식으로 가열하였으며, 가열선마다 가열 완료 후 수냉하였다. 본 논문에서는 최고 도달 온도가 700℃ 이상인 영역을 고유변형도 영역으로 가정하고 있으므로 이의

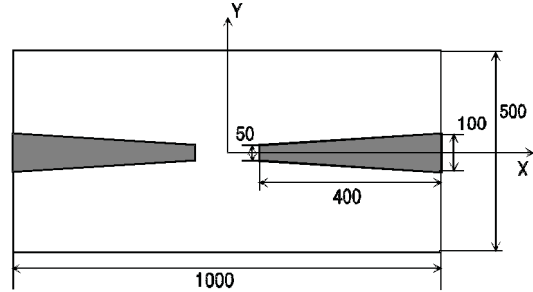


Fig. 4 Specifications of a flat plate specimen (unit: mm)

Table 1 Conditions for the triangle heating experiment for flat plates

Thickness	Heating speed	Heating conditions
30 mm	80 mm/min	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxygen pressure: 700 KPa</li> <li>• Propane pressure: 70 KPa</li> <li>• Water cooling</li> </ul>

결정을 위한 열전도 해석에서는 냉각조건을 따로 고려하지 않았다. 또한, 시험편에 변형 계측을 위한 표점을 미리 펀칭해 두고 가열 전후의 거리 변화로 수축량을 계측하였으며, 처짐 변위는 정반 위에서 계측자를 이용하여 계측하였다.

삼각가열에 의한 변형 결과의 척도는 판의 종방향 처짐량과 횡방향 수축량으로 볼 수 있다. 판 중앙선(y=0mm 인 지점)과 판 가장자리선(y=250 mm 인 지점)을 따라 종방향 처짐을 계측하였으며 해석결과와 비교하여 Fig. 5와 Fig. 6에 보였다. 실험결과와의 비교에서, 판 중앙선(y=0mm 인 지점)을 따른 종방향 처짐량은 가열 종반부(약 y=400mm 인 지점)에서 다소 차이를 보였으나 전반적으로는 그 크기와 경향이 잘 일치하였다. 실제 삼각가열 실험에서는 가열의 종반부에서 입열이 크기 때문에, 과도한 열팽창이 두께 방향의 변형저항을 이기지 못하고 표면으로 약간 부풀어 오르는 현상이 발생하는데, 가열 종반부(약 y=400 mm 인 지점)에서의 해석결과와의 차이는 이러한 이유 때문인 것으로 생각된다.

또한, 삼각가열에 의한 횡방향수축량을 해석 결과와 비교하여 Fig. 7에 보였다. 해석결과는 가열

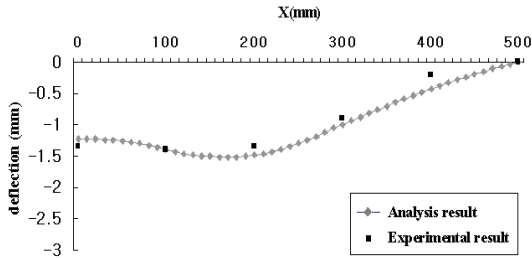


Fig. 5 Longitudinal deflection at y=0mm

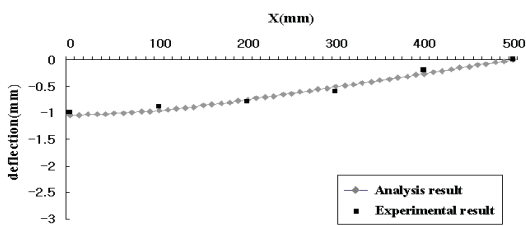


Fig. 6 Longitudinal deflection at y=250mm

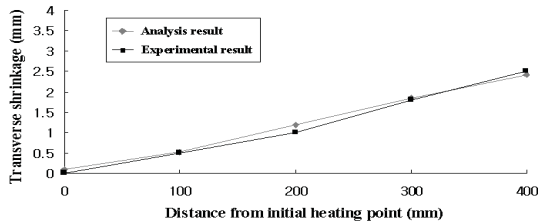


Fig. 7 Transverse shrinkage

의 종단부로 갈수록 수축량이 증가하는 실험결과  
의 경향과 일치하며 정량적으로도 상당히 잘 부합  
함을 볼 수 있다.

이상과 같이 평판에 대한 삼각가열 실험결과와  
의 비교를 통해, 제안된 삼각가열 해석 모델을 이  
용하여 삼각가열에 의한 판의 변형을 효율적으로  
정도 좋게 시뮬레이션 할 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 곡판에 대한 삼각가열 변형

본 절에서는 제안된 삼각가열 해석 모델을 이용  
하여 실제 조선소에서 오목형(concave type) 곡면  
을 만들 때 사용하는 실린더형 곡판의 삼각가열에  
의한 변형을 시뮬레이션하고 실험결과와 비교하였  
다. 냉간 가공을 통해 1 차곡이 이미 주어져 있는  
삼각가열 시편의 제원은 Fig. 8 과 같고, 가열조건

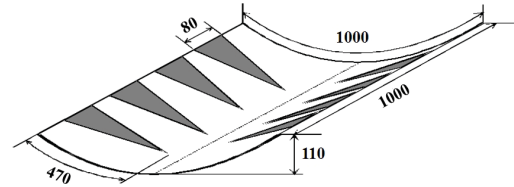


Fig. 8 Specifications of a cylindrical plate specimen (unit: mm)

Table 2 Condition for the triangle heating experiment for a cylindrical plate

Thickness	Heating speed	Radius of curvature	Heating conditions
30 mm	120 mm/min	1000 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxygen pressure: 700 KPa</li> <li>• Propane pressure: 70 KPa</li> <li>• Water cooling</li> </ul>

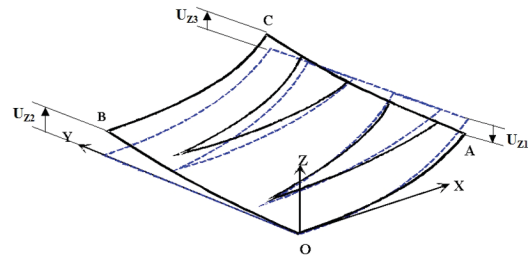


Fig. 9 Deformation of cylindrical plate

은 Table 2 와 같으며 사용된 강재는 mild A-  
grade 이다. 이 실험에서는 해석 결과와의 비교를  
위해 모든 가열영역(8 개의 삼각가열)에서의 가열  
조건(가열속도, 가스압력)을 동일하게 하여 실험하  
였다.

변형의 해석에는 대칭성을 고려하여 1/4 판 모  
델을 사용하였으며 변형 결과를 Fig. 9 에 보였다.  
결과를 살펴보면, A 점은 원래의 위치보다 아래로  
처지고, B, C 점은 원래의 위치보다 위로 솟아오르  
는 형태의 변형이 나타남을 볼 수 있다. 이처럼  
삼각가열에 의한 실린더형 판의 변형은 다소 복잡  
하게 3 차원적으로 나타난다. 본 논문에서는 실험  
결과와의 비교를 위해 종방향 처짐량(O-A, B-C)  
과 횡방향 처짐량(O-B, A-C)을 비교하였다. 즉,  
초기값에 대한 A, B, C 점의 변형 후의 상대적인

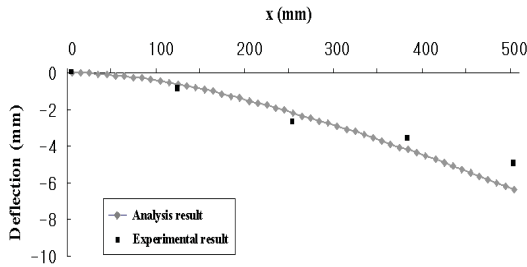


Fig. 10 Longitudinal deflection of cylindrical plate

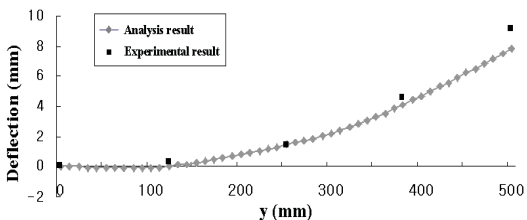


Fig. 11 Transverse deflection of cylindrical plate

z-변위만을 비교하였다.

가열 진행방향(X 축 방향)의 처짐량을 종처짐량이라 하였고, Fig. 9의 O-A 선과 B-C 선을 따라서 측정한 해석결과와 실험결과를 비교하였다. O-A의 종처짐량에 대한 결과를 Fig. 10에 보였다.

가열 진행방향에 수직인 방향(Y 축 방향)의 처짐량을 횡처짐량이라 하였고, Fig. 9의 O-B 선과 A-C 선을 따라서 측정한 해석결과와 실험결과를 비교하였다. O-B의 횡처짐량에 대한 결과를 Fig. 11에 보였다.

이상의 결과 비교로부터 본 논문에서 제시한 삼각가열 해석 모델에 의한 실린더형 판의 변형 해석 결과가 실험결과와 잘 부합함을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고유변형도법에 기반하여 삼각가열에 의한 판의 변형을 시뮬레이션 하였다.

우선, 고유변형도 기반의 삼각가열용 해석 모델을 개발하였다. 가열 진행 방향으로 고온 영역의 폭과 깊이가 증가하는 삼각가열의 특성에 맞추어

고유변형도 영역의 폭과 깊이가 선형적으로 증가하는 선상가열 요소의 집합으로 모델링 하였으며 가열의 종반부에서 판 두께를 관통하는 고유변형도 영역을 별도로 고려하였다.

삼각가열 해석 모델의 유효성을 검증하기 위해 평판 및 실린더형 곡판에 대한 삼각가열 변형 해석을 실시하고 실험 결과와 비교하였으며 해석결과는 변형의 경향뿐만 아니라 크기 면에서도 실험결과와 양호하게 부합하였다.

제안된 삼각가열 해석 모델을 이용하면 복잡한 열탄소성 과정을 간략하게 해석할 수 있고, 결국 고유변형도가 초기변형도로서 존재하는 탄성 문제로 치환하여 계산효율을 대폭 향상시킴으로써 삼각가열에 의한 변형의 실시간 제어가 가능하다.

#### 참 고 문 헌

- Jang, C.D., Ko, D.E., Kim, B.I. and Park, J.U., 2001a, "An Experimental Study of Characteristics of Plate Deformation by Heating Process," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 2, pp. 62-70.
- Jang, C.D., Ko, D.E., Moon, S.C. and Seo, Y.R., 2001b, "Simulation of Plate Deformation by Triangle Heating Process," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 4, pp. 66-74.
- Ko, D.E., 1998, A Study on the Prediction of Deformations of Plates due to Line Heating using a Thermal Elasto-Plastic Analysis Model, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
- Ko, D.E., Jang, C.D., Seo, S.I. and Lee, H.W., 1999, "Realtime Simulation of Deformation due to Line Heating for Automatic Hull Forming System," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 4, pp. 116-127.
- Nomoto, T., Takechi, S., Shouki, K., Aoyama,

K., Enosawa, M. and Saitoh, M., 1991, "Development of Simulator for Plate by Line Heating Considering In-Plane Shrinkage," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170.

- Ueda, Y., Murakawa, H., Mohamed, R. A., Neki, I., Kamachika, R., Ishiyama, M. and Ogawa, J., 1991, "Development of Computer Aided Process Planning System for Plate Bending by Line Heating(1<sup>st</sup> Report), Relation Between

Final Form of the Plate and Inherent Strain," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170.



< 장 창 두 >



< 고 대 은 >



< 하 윤 석 >