

강판의 선상가열시 변형량 예측 모델의 개발

임동용* · 이주성*

*울산대학교 수송시스템 공학부

Development of Deformation Predicting Model for Line Heating of Steel Plates

DONGYONG LIM*, JOOSUNG LEE*

*School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan

KEY WORDS: 각변형(*angular distortion*), 곡면판 (*curved plate*), 변형량 예측 모델(*model for predicting deformation*), 선상가열(*line heating*), 열탄소성 해석(*thermo elasto-plastic analysis*)

ABSTRACT: This paper is concerns with the development of the formulae to predict deformation of curved plate due to line heating. For this purpose thermal elasto-plastic analysis has been carried out for both flat and curved plate models with varying parameters which affect the result of line heating. based on the results of numerical analysis, the formulae for predicting angular deformation has been derived through the regression analysis, which. It has been seen that the present model well agrees with the numerical analysis results and can reflect the curvature effect of plate to be heated. This paper ends with some comments on this formulae.

1. 서 론

선박제조공정의 가장 기반이며 고도의 기술을 요하는 강판의 곡가공은 선박의 외판뿐 아니라 교량, 해양구조물, 플랜트등의 대형구조물의 제작에 필수적인 기술이다. 선상가열법을 이용한 강판의 곡가공시 열변형으로 인한 변형량을 예측하는 모델들이 다수 개발되어 있으나 대부분이 평판에 대한 실험 또는 수치해석의 결과를 토대로 유도된 것들이다. 실제 가공공정에서는 어느정도 곡면이 형성된 상태에서 가열하여 곡면을 형성하므로 이 경우 평판에 대해 유도된 예측 모델 보다는 가열선 방향으로 곡률의 영향을 고려할 수 있는 예측모델을 사용해야 하는 것이 더 합리적인 것이다.

본 논문의 목적은 가열선의 곡률의 영향을 고려할 수 있는 선상가열의 예측모델을 개발하는 것이다. 이를 위하여 곡률이 다른 여러 모델에 대해 열 탄소성 해석을 수행 하였다. 열탄소성 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 이의 해석 결과를 토대로 회귀분석을 하여 선상가열로 인한 변형량을 보다 합리적으로 추정할 수 있는 모델을 개발 하였다. 또한 간이에측법의 타당성을 검증하기 위하여 수치해석 결과를 정량적으로 비교하였고, 이로부터 간이에측모델은 수치해석 결과와 비교하여 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있었다.

2. 열탄소성해석의 개요

선상가열에 의한 온도분포와 잔류변형의 계산을 위해서는 열탄소성문제를 풀어야 한다. 과거의 많은 연구에서는 이의 열탄소성문제를 유한요소법등의 수치해석법을 이용하여 다루어 왔으나, 선상가열이 가지는 재료 및 기하학적 비선형성, 온도에 대한 의존성 등 복잡한 물리적 성질과 사용된 가스의 유량, 가열속도, 가열순서, 구속조건 등 잔류변형의 결과에 영향을 주는 많은 인자들이 있어서, 이들의 효과를 반영하여 해석하는데는 방대한 계산 시간이 필요하다.

열하중은 분포열속(*distributed heat flux*)으로 주었고, 열전달 문제는 등속으로 이동하는 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 Time Step에서 계산한다. 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 선상가열에 의한 변형량을 계산하였다.

Fig.1에서 보인 바와 같이 열전도율(*thermal conductivity*) k , 비열(*specific heat*) c 등 열전달해석과 관련된 물성치들은 온도 의존성을 갖도록 하였고, 밀도(*density*) ρ 는 $7.85 \times 10^{-6}(\text{kg}/\text{mm}^3)$ 의 상수로 가정하였다. 탄성계수(*Young's modulus*) E , 항복응력(*yield stress*) σ_y , 열팽창계수 α 등 열탄소성해석과 관련된 재료적 특성치 역시 Fig.2와같이 비선형적인 온도 의존성을 반영하였고, Poisson의 비 ν 는 상수로 가정하였다. Fig.3은 좌표

축의 정의를 보여주는데, 대칭성을 고려하여 전체판의 1/2만을 해석 대상으로 선택 하였다. 냉각은 공냉으로 하였다.

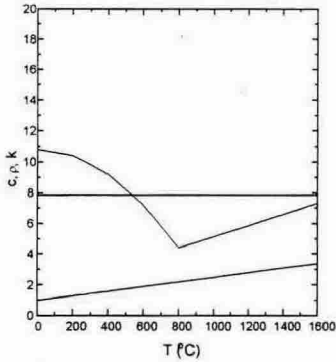


Fig.1 Temperature-dependent k, c, ρ of mild steel

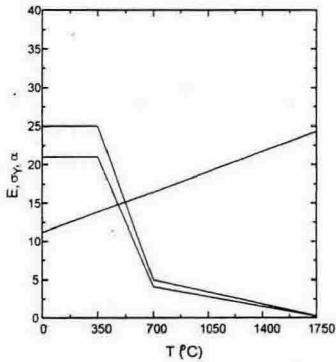


Fig.2 Temperature-dependent E, σ_Y, α of mild steel

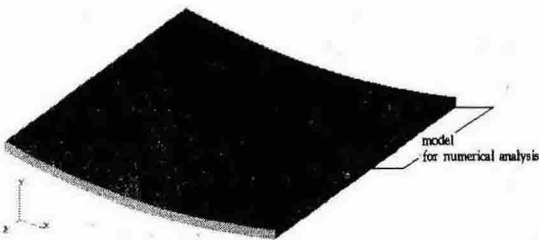


Fig.3 Definition of coordinate

3. 열탄소성해석 결과

3.1 해석 모델

수치해석 대상을 Fig.4에 보인바와 같이 3차원 고체요소 (three-dimensional solid element)로 모델링 하였다. 유한요소 모델에서 mesh 수를 같게 하고, 입열량(Q_{eff})에 대한 heating area의 크기를 같게 함으로써 표면열속(surface heat flux)의 크기를 같게 하였다.

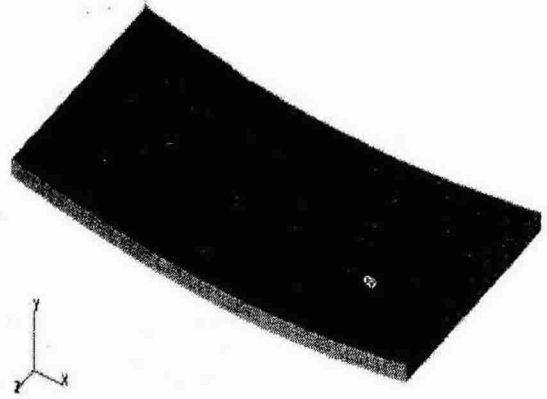


Fig.4 overall model (mesh)

이 때 이용된 표면열속(surface heat flux) p 의 크기는 아래의 식에 의해 계산한다.

$$p = \frac{Q_{eff}}{A}$$

(1)여기서, p : surface heat flux (cal/mm² · sec)

Q_{eff} : Effective thermal Power (cal/sec)

A : Unit heat input area (mm²)

Table.1에 해석 대상 모델들을 정의하였는데, 대상 모델은 가로 × 세로 = 600×600 mm 인 연강판이다. 차원은 Fig.3에서 보인 바와 같으며, 선상가열 조건은 Table.1에 열거된 바와 같으며 모델의 크기는 모두 600×600(mm)이다.

Table.1 Analysis model

MONEL NAME	곡률	두께	속도
		(mm)	(mm/min)
A1	∞	12	700
A2		15	600
A3		18	500
B1	5000	12	700
B2		15	600
B3		18	500
C1	4000	12	650
C2		15	550
C3		18	450
D1	3000	12	600
D2		15	500
D3		18	400

3.2 열전달 해석

여기에서는 평판과 곡판의 선상가열시 열전달 특성을 비교하고자 Table 1에 보인 모델 중 평판인 Model A1 (곡률반경, $\rho=\infty$)과 곡판인 Model D1 (곡률반경, $\rho=3000$ mm)에 대한 열전달 해석 결과를 비교하였다. Fig.5와 6는 각각 Model A1과 D1에 대한 결과로서 Fig.5(a)와 6(a)는 몇몇 time step에서 가열선

방향 (x축 방향)으로의 온도 분포이고, Fig.5(b)와 6(b)는 폭방향 (z축 방향)으로의 온도분포이다. 보는 바와 같이 평판과 곡판 모두 판의 양끝단에서는 가열시작과 가열 마지막 단계에서 단부효과로 750℃에 과도적인 응답을 보이고 있으나 그 사이에서는 균일한 온도분포를 보이고 있는 점에서 차이가 없고 단지 Model D1의 경우 가열속도가 Model A1보다 늦기 때문에 최고온도가 다소 높다는 차이만 있을 뿐이다. Fig.7과 8은 토치가 가열선의 중간점 근처에 왔을때의 등온선을 보여주는데 비교적 같은 형태의 분포를 보이고 있고 또한 선상가열로 인한 열영향부는 가열선을 중심으로 상대적으로 좁은 범위에 한정되어 있음을 알 수 있다. 이 두 모델에 대한 비교에서는 결국 평판이나 곡판이나 열전달 특성에 차이가 없어 보이는데, Model D1의 곡률반경이 $\rho=3000\text{mm}$ 으로 판의 길이와 폭에 비해 상대적으로 커서 곡률의 영향이 나타나지 않는 것으로 보인다.

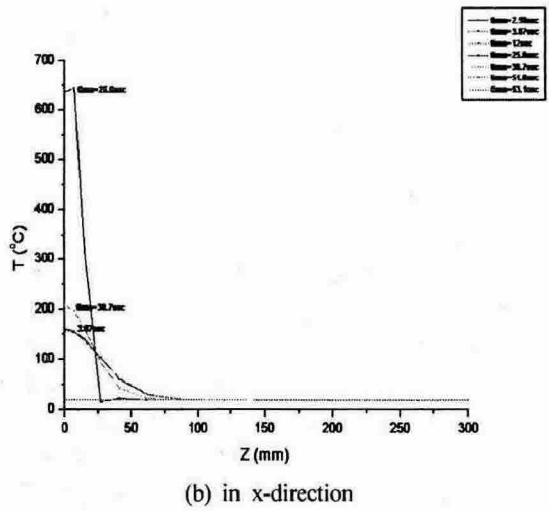
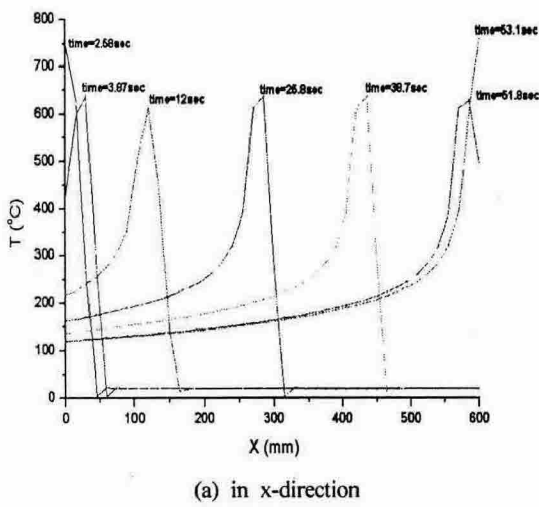
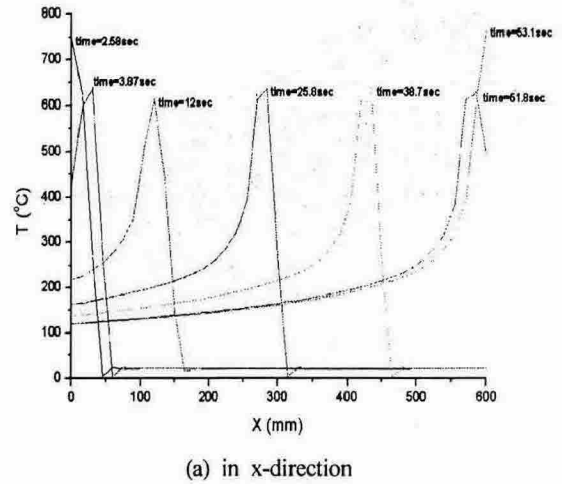


Fig.6 Transient temperature distribution for model D1

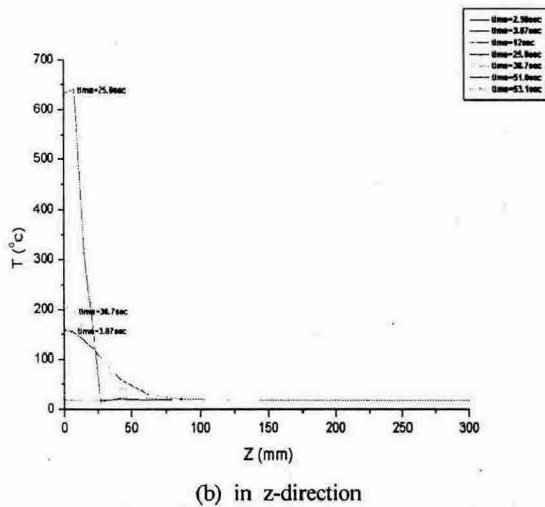
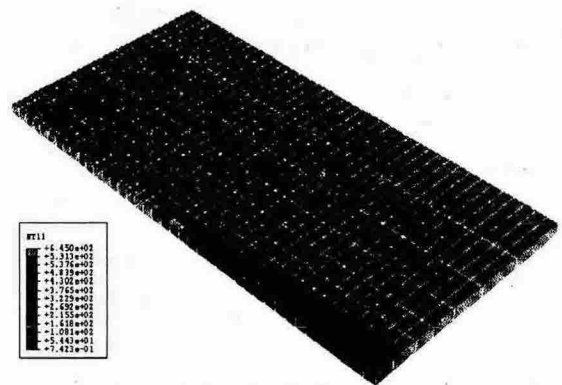


Fig.5 Transient temperature distribution for model A1



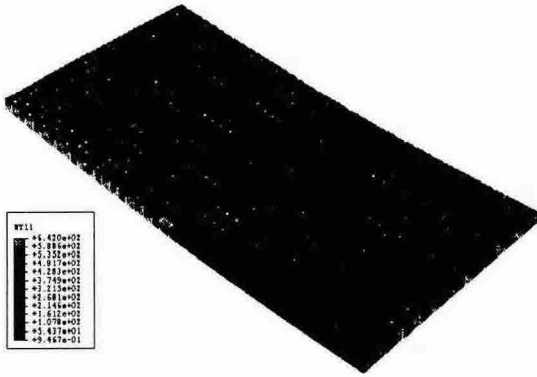


Fig.8 Temperature contour for model D1 when torch is located at $x = 300$ mm

3.3 탄소성 해석

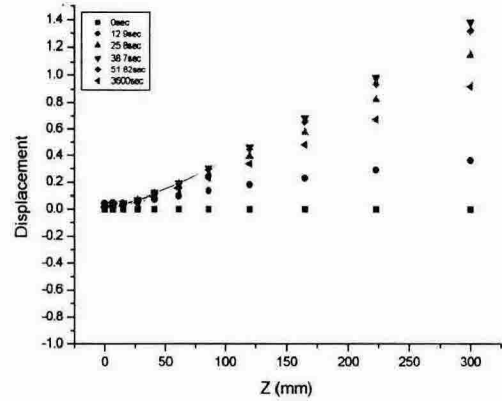
변형의 결과를 얻기위해 전절의 열전달 해석 결과를 하중으로 입력하여 구조해석을 수행한다. 여기에서도 평판과 곡판의 변형의 결과를 비교하기 위해 전절에서와 마찬가지로 평판은 model A1을 곡판은 model D1을 선택하였다. Fig.9와 10은 두 모델에 대해 가열시간대별 즉, 토치의 위치에 따른 폭방향(z 축 방향)으로의 변형형상의 변화를 보여주는 것인데 가열선방향으로 시작점($x=0$ mm)과 중간점($x=300$ mm) 그리고 끝점($x=600$ mm)에서 변형형상의 변화이다. Fig.9과 10을 비교해 보면 토치가 진행하면서 가열선에 법선방향으로 변형의 변화가 유사한 형상을 보이고 있으나 냉각과정이 완료된 후 (time = 3600 sec로 표시된 것) 평판과는 달리 곡판에서는 변형량이 급증하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 곡률의 영향때문으로 보이며 가열선의 끝단에서 이러한 경향이 뚜렷함을 볼 수 있다. 두 모델에 대한 최종적인 변형형상을 Fig.11과 12에 각각 표시하였는데, 평판인 model A1은 가열선에 연하여 비교적 균일한 변형을 보이고 있으나 곡판인 model D1의 경우에는 가열선의 시작점과 끝에서 더 많은 변형이 발생하는 것 즉, 가열선 방향으로 각변형량에 변화가 있음을 뚜렷이 볼 수 있다. 이는 각변형에 대한 간이에측식에서 곡률의 영향이 반영되어야 하고 또한 가열선의 길이방향으로 각변형의 변화가 고려되어야 한다는 점을 뒷받침해 준다.

Table 1에 보인 모든 모델에 대한 열탄소성해석결과로서 각변형량을 Table 2에 정리하였고 이를 도식적으로 Fig.13에 보였다. Fig.13에서 종축은 Radian으로 표시된 각변형량(angular distortion)이고, 횡축은

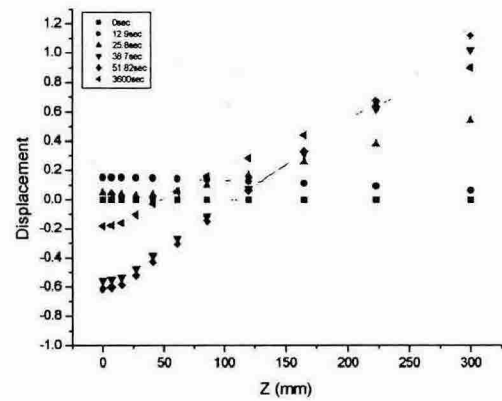
$$q = \frac{Q_{eff}}{N \cdot vt}$$

(2)

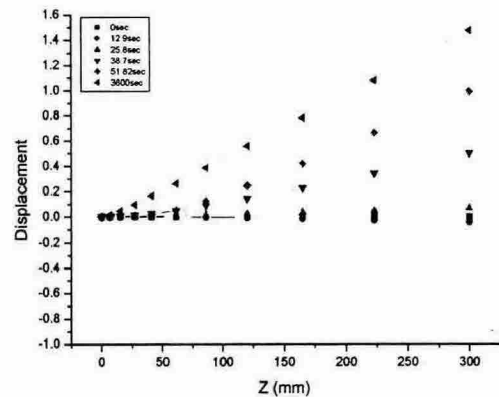
로 정의되는 입열량 계수(heat input parameter)이다. 여기에서 Q_{eff} 는 유효입열량이고, t 와 v 는 각각 판의 두께 (mm)와 가열 속도 (mm/sec)이다.



(a) A1 ($x = 0$)

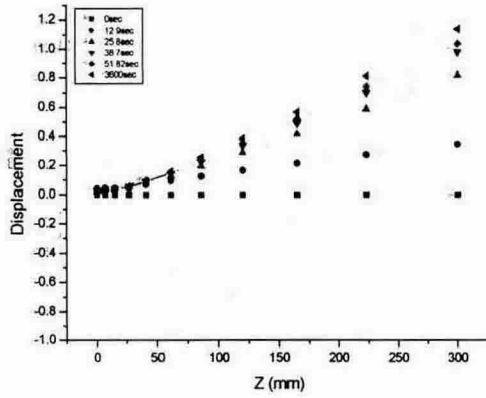


(b) A1 ($x = 300$)

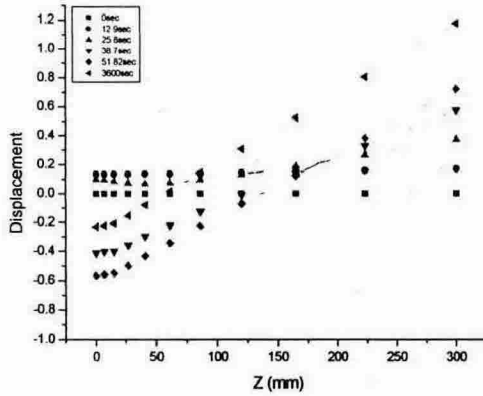


(c) A1 ($x = 600$)

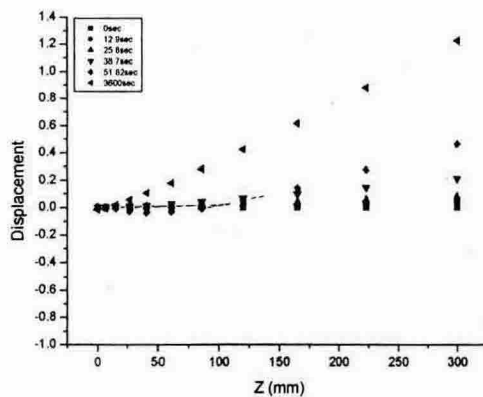
Fig.9 Deformation in z-direction for model A1



(a) A1 (x = 0)



(b) A1 (x = 300)



(c) A1 (x = 600)

Fig.10 Deformation in z-direction for model D1

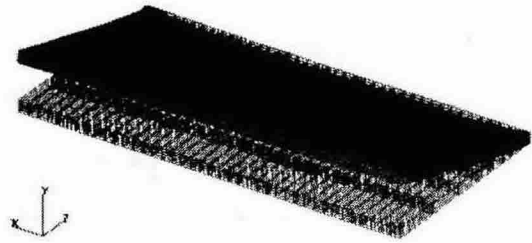


Fig.11 Deformed shape for A1

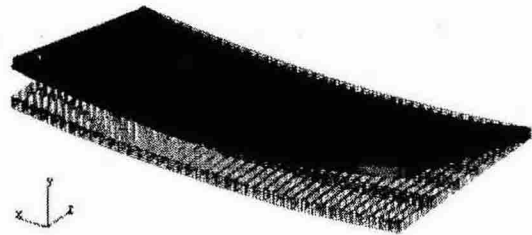


Fig.12 Deformed shape for D1

Table.2 Result of thermal elasto-plastic analysis

MONEL NAME	두께 (mm)	속도 (mm/min)	입열량 계수 ($q = \frac{Q_{eff}}{t\sqrt{vt}}$)	ϕ ($\times 10^{-3}$ rad)
A1	12	700	8.451	1.963
A2	15	600	6.532	1.442
A3	18	500	5.444	1.258
B1	12	700	8.451	1.650
B2	15	600	6.532	1.527
B3	18	500	5.444	1.201
C1	12	650	8.772	1.735
C2	15	550	6.821	1.476
C3	18	450	5.738	1.301
D1	12	600	9.129	1.742
D2	15	500	7.156	1.463
D3	18	400	6.084	1.451

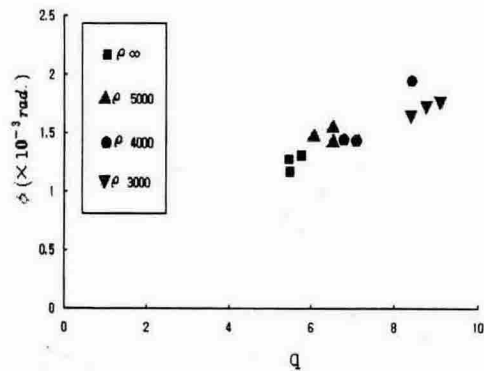


Fig.13 Angular distortion of analysis model

3.4 간이 예측 모델

본 연구의 수치해석을 도식적으로 표시한 Fig.13을 참고하면 각변형량은 Eq.(2)로 정의된 입열량 계수의 지수함수로 표현될 수 있는 것을 볼 수 있다. 여기에서는 이점을 감안하고 가열선에 따른 곡률의 영향을 고려할 수 있도록 각변형량 ϕ 에 대한 간이 예측식을 Eq.(3)과 같은 형태로 정의 하였다.

$$\phi = C_1 e^{a_1} (1 - e^{-a_2 \rho^n}) \quad (3)$$

이식의 두 번째 항인

$$F(\rho) = (1 - e^{-a_2 \rho^n}) \quad (4)$$

는 가열선에 따른 곡률의 영향을 반영하는 항으로써 가열전 곡률 반경이 $\rho=0$ 일때, $F(\rho)=0$ 이고, $\rho=\infty$ 일때, $F(\rho)=1$ 라는 조건을 만족하는 함수이다. 열탄소성해석 결과(Table.2)에 회귀 분석법을 적용하면 각변형에 대한 간이예측식이 Eq.(5)와 같이 유도된다.

$$\phi(g, \rho) = 0.744 e^{0.1g} (1 - e^{-0.102 \sqrt{\rho}}) \times 10^{-3} \text{ rad} \quad (5)$$

수치해석 결과와 Eq.(5)로 추정된 각변형량 사이의 관계를 Fig.14에 보였고, 각변형의 비를

$$z = \frac{\phi \text{ by Numerical Analysis}}{\phi \text{ by Eq. (5)}} \quad (6)$$

으로 정의 할때, 12개의 수치해석 모델에 대한 z의 평균과 COV (coefficient of variation)의 값은 각각 1.0007과 5.96%이다. Eq.(6)으로 정의된 z의 평균은 거의 1.0이고, COV는 6%정도로 분산의 정도가 비교적 작은 등, 여기에서 제안하는 각변형의 모델인 Eq.(5)는 수치해석 결과와 좋은 일치를 보이고 있다.

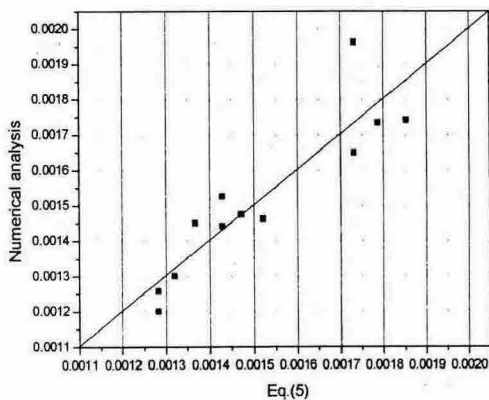


Fig.14 Comparison between numerical analysis results and the estimated value by Eq.(5)

4. 결론

본 연구에서는 곡률이 다른 다수의 모델에 대해서 가열조건과 판 두께를 변화시켜 열탄소성 해석을 수행하여 그 결과를 토대로 선상가열시 각변형에 대한 간이 예측 식을 유도하였다.

평판과 곡판의 열탄소성 해석결과로 열전달 해석시 평판과 곡판의 온도분포가 거의 일치하고 열탄소성해석 역시 유사한 변형량을 보이거나 최종변형을 보면 곡판의 경우 가열방향의 중심부에서의 각변형이 가열선 방향으로 불균일함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 가열 선에 따른 곡률의 이러한 영향을 고려할 수 있도록 간이 예측식을 유도 하였으며, 수치해석의 결과와 비교해볼때 좋은 일치를 보이고 있다. 이로써 본 연구에서 제안한 간이 예측식의 정당성을 확인할 수 있다.

본 논문에서 적용한 열탄소성 해석방법의 정당성은 다수의 모델에 대한 선상가열 실험을 통해 확인되어야 하며, 더 다양한 모델에 대한 열탄소성해석을 수행한 결과를 토대로 여기에서 제안하는 간이예측모델을 보완한다면 곡가공시 최적의 가열조건 산정에 이용될 수 있을 것이다. 또한 실제 현장에서의 냉각 법은 대부분 수냉에 의해 이루어지므로 향후에는 수치해석시 수냉효과를 반영할 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Tsuji, J. and Okumura, Y., "A Study on Line Heating Process for Building of Ship Steels," Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 76, 1988.
- [2] Ueda, Y., Murakawa, H., Rashwan, A.M., Okumoto, Y. and Kamichika "Development of Computer Aided Process Planing System for Plate Bending by Line Heating(1st Report)," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170, pp. 577-586, 1991.
- [3] 신 종계, 노 인식, 이 광한, "유한요소해석에 의한 선상가열 변형의 시뮬레이션," 대한조선학회논문집, 제32권, 제 2호, pp. 75-83, 1995.
- [4] 장 창두, 서 승일, 고 대은, "간이 열탄소성해석을 이용한 선상가열에 의한 판의 변형 예측에 관한 연구," 대한조선학회논문집, 제34권, 제3호, pp. 104-112, 1997.
- [5] 이 주성, 김 상일, 오 석진, "선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(I)," 대한조선학회논문집, 제 31권, 제 4호, pp. 139-146, 1994.
- [6] 이 중무, 신 종계, "대형 곡면 부재의 계측 및 비교 기술 개발", 대한 조선학회 논문집, 제39권, 제2호, 2002년, pp 28-33, 2002.

발표자 임동용 연락처: 울산대학교 수송시스템 공학부 대학원
052-259-2165 cash24@hanmail.net