

Desarrollo de la Primera Máquina Automática (Robot) para el Formado de las Placas Curvas del Casco de los Buques Utilizando Líneas de Calentamiento

Vega, Adan¹, Sánchez, Victor¹ y Murakawa, Hidekazu²

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, ² Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Resumen

Los autores han desarrollado la primera máquina automática (Robot) capaz de formar con gran precisión una superficie tridimensional cualquiera. Este robot conocido como IHI – α está siendo utilizado en astilleros de construcción naval en Japón y próximamente se desarrollarán modelos similares para su aplicación en otras industrias. En este reporte, se explica en detalles el funcionamiento de IHI – α y se detalla el proceso seguido para desarrollarlo. Se hace énfasis en la relación matemática entre la cantidad de calor y la deformación obtenida y se explica cómo se desarrollo los modelos matemáticos que se necesitaban para programar el robot.

Palabras Claves

Formado metálico, Líneas de calentamiento, Robots, Análisis termo-elástico-plástico, Elementos finitos.

1- Introducción

El formado de superficies tridimensionales por medio de líneas de calentamiento es uno de los procesos más importantes utilizados actualmente en la industria. Sus aplicaciones más comunes son en la construcción de barcos, vehículos espaciales, carros, trenes, etc. Tradicionalmente este proceso ha sido realizado por técnicos altamente calificado. Más sin embargo, el hecho de que se requiere de muchas habilidades y destreza y que se realiza en un ambiente a altas temperaturas y ruido extremo ha provocado que muy pocas personas jóvenes se interesen en aprenderlo. Como resultado, el número de trabajadores ha ido disminuyendo al punto que muchas empresas tienen que subcontratar a otras incrementando así los costos de producción. Es por eso que era de suma importancia el desarrollar una máquina automática (robot) que sin mucha ayuda humana fuese capaz de convertir una placa plana en una

superficie tridimensional cualquiera.

En este reporte los autores hacen un breve resumen de los pasos seguidos para el desarrollo del robot *IHI - α* , el único capaz de formar una superficie metálica tridimensional cualquiera utilizando el método de líneas de calentamiento (Line Heating). Primero se detalla las principales características de este robot, luego se presenta un resumen de cómo se desarrollaron los modelos matemáticos para relacionar la relación entre cantidad de calor y deformación obtenida. Después se presentan ejemplos de los modelos matemáticos desarrollados por los autores. Por último, algunas conclusiones de este estudio son presentadas.

2- Formado Termo-mecánico utilizando Líneas de Calentamiento

Aunque si bien existen otros procesos de formado de superficies tridimensionales, estos están limitados a formas específicas. Un típico ejemplo son los cilindros los cuales pueden ser fabricados por medio de rolado. En el caso de esferas o superficies más complejas, el formado por medio de pistones a presión o por medio de líneas de calentamiento son las únicas alternativas. Siendo el último el más efectivo debido a la limitante en espesor de placa existente en el primero.

Las figuras 1a y 2a muestran dos formas geométricas típicas (un cilindro y una esfera) formadas de una placa plana. La primera esta dentro de la clasificación de superficies fáciles de desarrollar mientras que la segunda entra en el grupo de las no desarrollables por medio de métodos tradicionales. En las figuras 1b y 2b, se muestra la magnitud del encogimiento y la deformación angular que se necesita para obtener las formas requeridas. Tal como se observa, en caso del cilindro, basta con aplicar deformación angular a la placa y esta se deformará. Esta deformación angular es fácilmente obtenible por medio de rolado u otro proceso mecánico. Mientras que en el caso de la esfera, se necesitó además de la deformación angular, cierto grado de encogimiento del metal. Este último es solo posible obtenerlo aplicando calor a la placa metálica o por medio de pistones a presión.

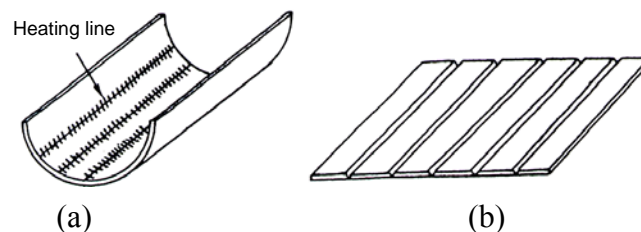


Figura 1 Formado de cilindros (a) Cilindro y líneas de calentamiento (b) Cortes necesarios para dar la forma cilíndrica a la lámina. ^[1]

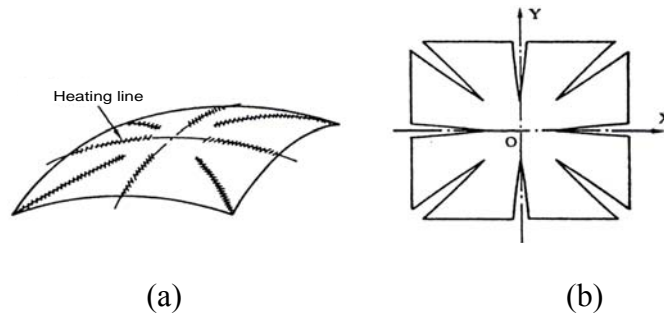


Figura 2 Formado de esfera (a) Esfera y líneas de calentamiento, (b) Cortes necesarios para dar la forma esférica a la lámina^[1]

Este último ejemplo nos demuestra que para formar superficies tridimensionales con curvatura en dos direcciones tales como las que forman los cascos de los buques, vehículos aeroespaciales, trenes, etc., es necesario utilizar un método de formado que controlado produzca una combinación de encogimiento y deformación angular que posibilite la obtención de la forma final requerida. El único método capaz de realizar estos dos trabajos al mismo tiempo es el popularmente conocido como de líneas de calentamiento (line heating).

El formado de placas curvas por medio de líneas de calentamiento se basa en el hecho de que los metales se expanden cuando se encuentran a altas temperaturas y se contraen cuando la temperatura es reducida. El proceso de expansión y contracción produce deformaciones en el metal. Si este proceso es bien controlado, el resultado final puede ser una perfecta superficie tridimensional. En sí, el proceso de formado por medio de líneas de calentamiento puede ser simplemente visto como un proceso de formar una placa metálica plana en una forma geométrica deseada haciendo uso del encogimiento y la deformación angular producida por la deformación plástica inducida por el proceso de calentamiento y enfriamiento.

3- Automatización del Proceso de Formado Utilizando Líneas de Calentamiento

Aunque si bien el formado metálico utilizando líneas de calentamiento es de común uso en la industria, este proceso se desarrolla manualmente. Esto trae consigo gastos adicionales y gran cantidad de horas hombre consumidas. Por otro lado, el trabajo en sí es sumamente complicado y requiere de mucha experiencia. Esto sumado al hecho de que se desarrolla en un ambiente de altas temperatura ha ocasionado que con el pasar del tiempo muy pocas personas se interesen por aprenderlo. Las anteriores son las principales razones por la que se hacía necesario el desarrollo de un máquina automática (robot) capaz de formar de una lamina plana una superficie tridimensional cualquiera sin significativa ayuda humana. En esta sección el proceso seguido para el desarrollo de esta máquina es presentado.

3.1 Desarrollo del primer robot para el formado de superficies metálicas tridimensionales (IHI – α)

Como requisitos básicos para que una maquina fuese aceptada como reemplazo de los especialistas en formado esta tenía que ser capaz de cumplir con los siguientes requisitos:

- 1- Dado una superficie tridimensional requerida:
 - a. Identificar la posición y la cantidad de calor necesaria para deformar la placa plana hasta transformarla en la forma final requerida.
 - b. Aplicar líneas de calentamiento en las posiciones identificadas en el punto anterior.
 - c. Medir y comparar la forma obtenida con la forma requerida.
 - d. Corregir errores hasta obtener la forma requerida.

Aunque parezca simple, este proceso estaba lejos de ser considerado automatizado, lo que resultaba en grandes pérdidas de tiempo y por ende dinero. La principal razón de esto es el hecho de que la relación existente entre la deformación requerida y la cantidad de calor que se necesita aplicar para obtener dicha deformación (la clave para la programación del robot) no había sido completamente desarrollada.

Para lograr estos objetivos el proyecto se dividió en tres: El diseño del mecanismo, el control y programación del robot y la aplicación del robot al formado de placas curvas. Las dos primeras etapas se desarrollaron en los primeros seis meses del proyecto. Más sin embargo, para finalizar la última etapa se requirió de cinco largos años. Es en esta etapa donde los autores dieron su aporte y es por ende en la que haremos más énfasis en este reporte.

3.1.1 Formado de placas curvas utilizando un robot

El primer reto para reemplazar el hombre por un robot en cualquier proceso es sin dudas el entender el proceso a tal punto de que se pueda reemplazar cada una de las actividades que se desarrollan durante la ejecución del trabajo por modelos matemáticos que puedan ser incluidos en una serie de códigos que formaran el hardware del sistema. En nuestro caso para resolver este problema primero era necesario desarrollar herramientas que permitiesen reemplazar los costosos experimentos (la principal limitante de cualquiera investigación sobre procesos termo-mecánicos). Esto se logro adaptando un programa de análisis por elementos finitos diseñado para el análisis de soldadura al análisis de deformación producida por líneas de calentamiento. Utilizando este programa el cual fue creado en nuestro laboratorio, se desarrollo un modelo tridimensional para el análisis de deformaciones producidas por líneas

de calentamiento. Luego de las correspondientes validaciones experimentales se estudio cada uno de los factores que afectan la relación entre cantidad de calor aplicado y deformación obtenida para una gran cantidad de modelos, espesores de lamina y condiciones de trabajo.

3.1.1.1 Desarrollo de los modelos matemáticos utilizados en la programación de IHI- α

Como se menciona anteriormente, el proceso de expansión y contracción del metal produce deformaciones. Estas deformaciones están directamente ligadas a tres factores. Primero a la cantidad de calor que se aplica, segundo a la velocidad con que se aplica el calor y por ultimo al espesor de la lámina. Aunque si bien se podría relacionar la deformación a estos tres factores, su comportamiento es no lineal y sumamente complejo. De aquí que no se había podido desarrollar una relación matemática que describiera la relación entre estas variables, esto sin lugar a dudas era el cuello de botella para lograr la automatización del proceso.

En el caso de una lamina cuya relación longitud/espesor sea grande, como es el caso de las placas que se usan en los casco de barco, solamente dos de las seis componentes de la deformación plástica inherente (inherent strain) ϵ_x^* (en la dirección de la línea de calentamiento) y ϵ_y^* (en dirección transversal a la línea de calentamiento), predominan [Ueda et al.,]. De aquí que se puede decir que la deformación producida por la línea de calentamiento está descrita por cuatro componentes de deformación como se muestra en la Figura 3.

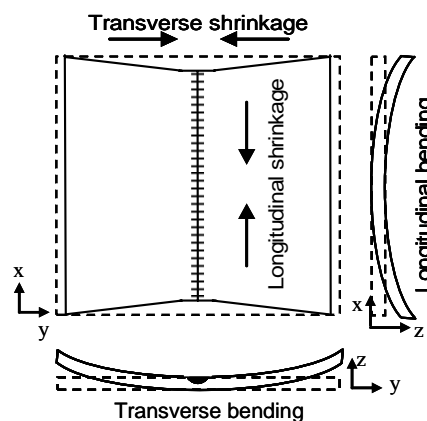


Figura 3 Tipos de deformación producido por el método de líneas de calentamiento

Estos componentes de deformación inherente (inherent deformation) llamadas: encogimiento longitudinal inherente (δ_x^i), encogimiento transversal inherente (δ_y^i), deformación angular longitudinal inherente (θ_x^i) y la deformación angular transversal inherente (δ_y^i) las definimos

como la integración de la deformación plástica inherente (inherent strain) a través de la sección transversal normal a la línea de calentamiento tal como se muestra a continuación:

$$\delta_x^i = \int \varepsilon_x^* dydz / h \quad (1)$$

$$\delta_y^i = \int \varepsilon_y^* dydz / h \quad (2)$$

$$\theta_x^i = \int \varepsilon_x^* (z - h/2) / (h^3 / 12) dydz \quad (3)$$

$$\theta_y^i = \int \varepsilon_y^* (z - h/2) / (h^3 / 12) dydz \quad (4)$$

En donde, x y y son las coordenadas de las direcciones de la línea de calentamiento y transversal a la línea de calentamiento respectivamente y h es el espesor de la placa.

3.1.1.2 Predicción de la deformación producida por líneas de calentamiento utilizando el método de elementos finitos

El proceso de formado de placas mediante líneas de calentamiento es un proceso termo mecánico no lineal, que hace el modelado numérico mucho más difícil. Sin embargo la simulación numérica es una alternativa para evitar realizar experimentos, y en el caso de las líneas de calentamiento los resultados obtenidos a través de programas de elementos finitos bien diseñados brindan resultados que utilizando otros métodos son imposibles de obtener.

El análisis termo elásto-plástico utilizado en la simulación del proceso de líneas de calentamiento es similar al del proceso de soldadura. El procedimiento básico seguido en el análisis está descrito en el diagrama esquemático mostrado en la figura 4. Las diferencias entre el proceso de soldadura y el proceso de líneas de calentamiento son más que nada debido a las altas temperaturas producidas durante el proceso de soldadura. Además el proceso de soldadura incluye otros aspectos como la fundición y la solidificación del material. Sin embargo mediante el uso adecuado del método de elementos finitos, el mismo programa puede ser utilizado para ambos análisis.

Utilizando un programa de elementos finitos desarrollado en nuestro laboratorio logramos modelar de una forma eficiente el complejo proceso de formado metálico con líneas de calentamiento. En la Figura 5 y 6 se muestran comparaciones de los resultados obtenidos con nuestro programa y otros obtenidos durante experimentos o con otros programas de elementos finitos. A simple vista se puede notar que los resultados obtenidos eran lo suficientemente buenos y por ende representaban de una manera clara el proceso de formado. Este programa fue luego utilizado para el desarrollo de los modelos matemáticos que se utilizaron para la programación del robot.

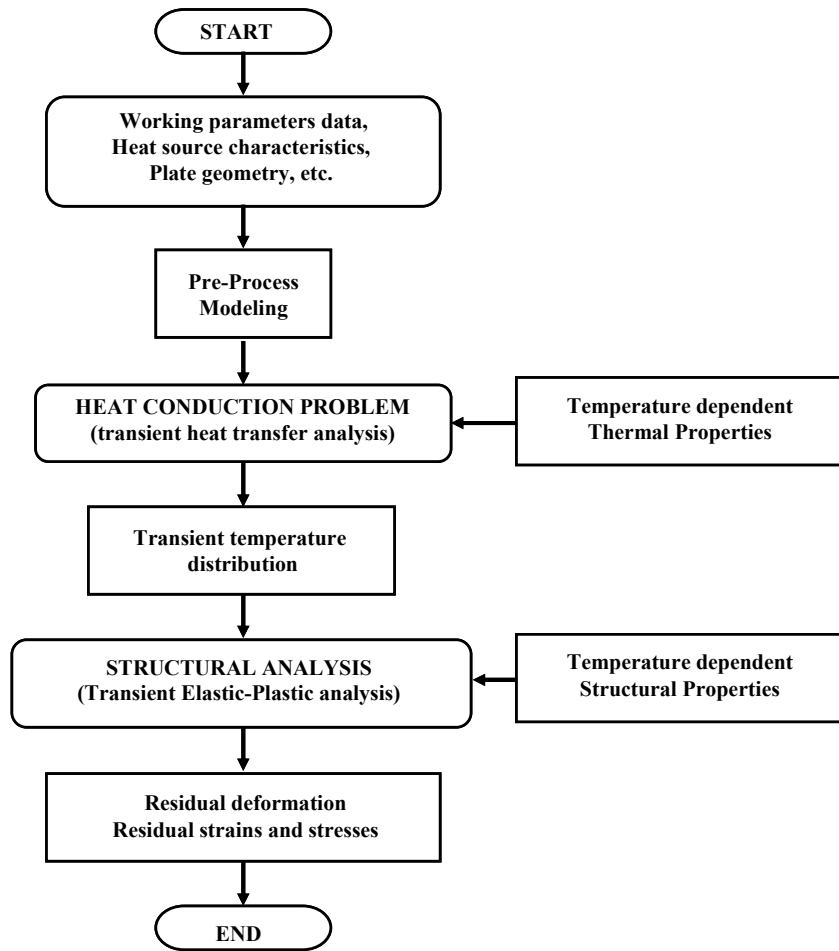


Figura 4 Diagrama esquemático del análisis termo elásto-plástico.

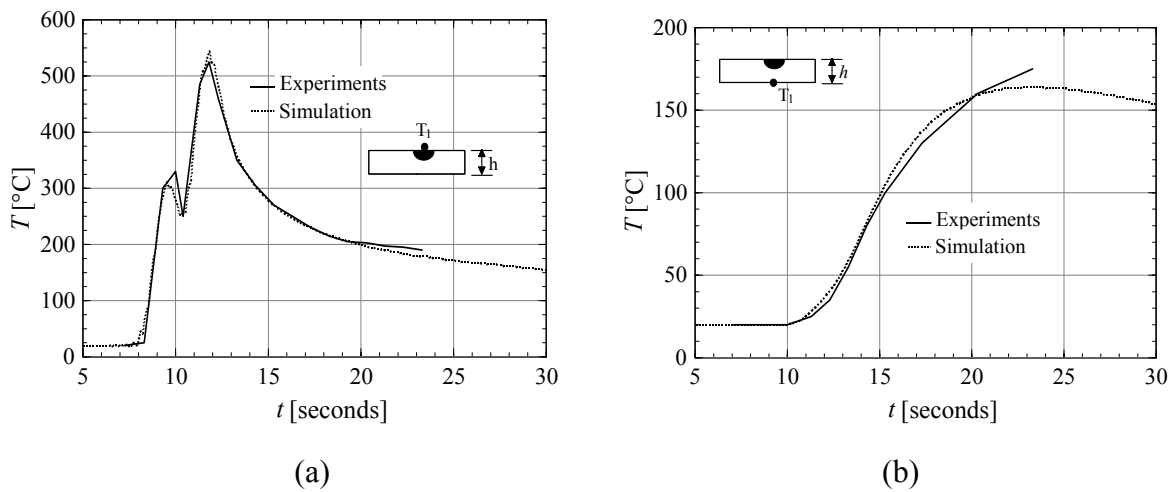
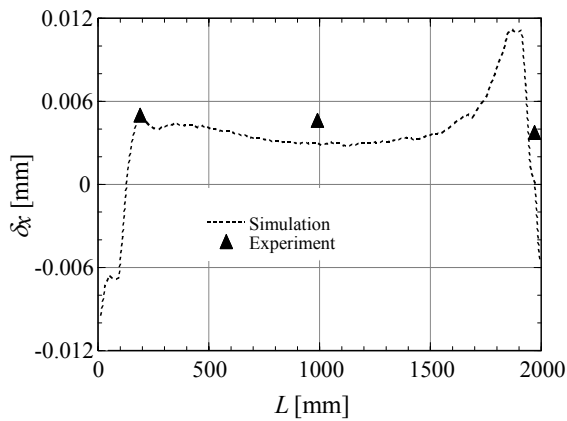
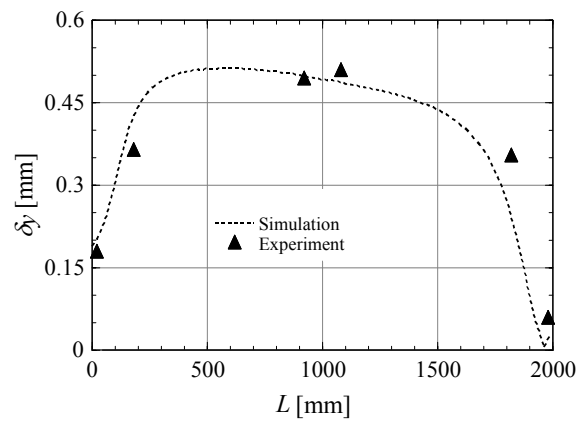


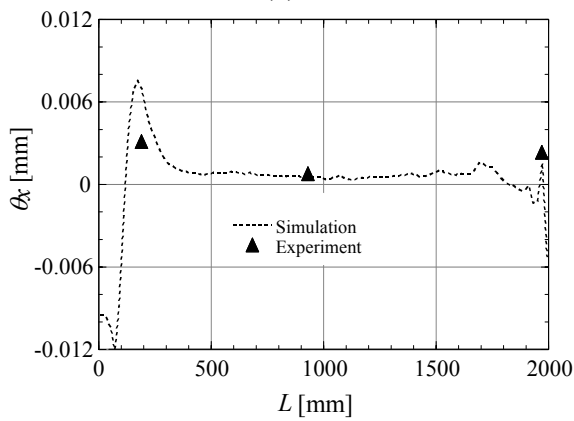
Figura 5 Comparación entre los resultados de temperatura experimentales y simulados (a) Superficie calentada (b) Superficie opuesta.



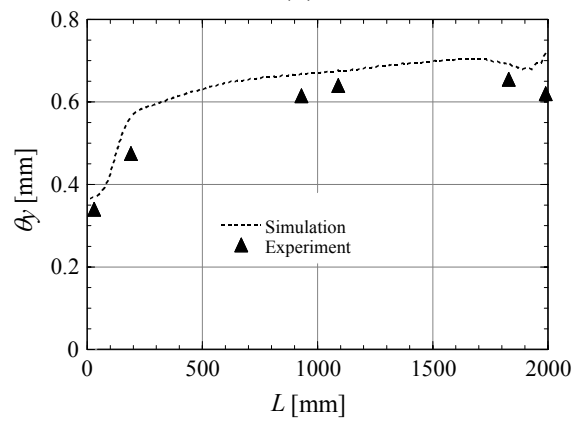
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6 Comparación entre resultados de deformación experimentales y aquellos obtenidos con nuestro programa de elementos finitos (a) encogimiento longitudinal, (b) encogimiento transversal, (c) deformación angular longitudinal y (d) deformación angular transversal

Luego de años de estudio y un sinnúmero de datos analizados logramos relacionar el proceso de formado con modelos matemáticos útiles para la programación del robot.

En vista de que las aplicaciones de este método de formado son variadas, los modelos matemáticos desarrollados en éste investigación se hicieron con el objetivo de poder ser utilizados en este y cualquier otro robot en el futuro. Para ello se desarrolló un modelo independiente de las características del robot y útil para un extenso rango de aplicaciones.

En la figura 7 se muestra un ejemplo de la relación matemática entre cantidad de calor aplicada y la deformación obtenida en el caso de líneas de calentamiento aplicadas en los extremos de la placa. Nótese que se logro, en una sola figura, relacionar al calor aplicado, el

espesor de la placa y la deformación obtenida de una forma simple y útil para la programación del robot.

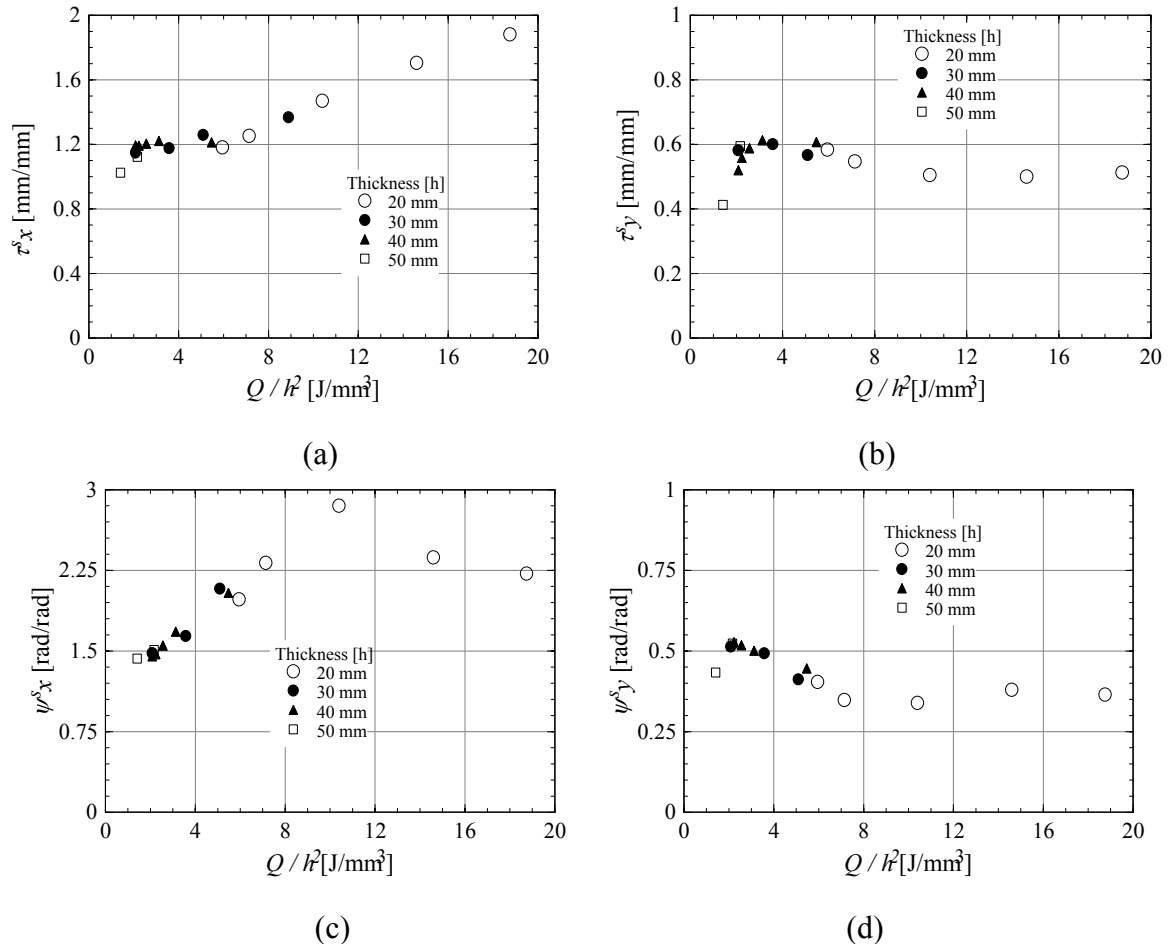


Figura 7 Relación entre el efecto en los extremos y el calor aplicado Q/h^2 al inicio de la línea de calentamiento, (a) Encogimiento longitudinal (b) Encogimiento transversal. (c) Deformación angular longitudinal y (d) deformación angular transversal.

3.1.2 Principales Características del Robot IHI- α

Las principales características de *IHI* – α las podemos simplificar como sigue:

1. Puede formar cualquier tipo de superficie tridimensional sin significativa ayuda humana.
2. Única capaz de formar cualquier espesor de lamina
3. Puede formar diferentes materiales
4. Posee sistema de medición de errores que permiten al robot corregir hasta lograr una aproximación de 95% con referencia al objetivo
5. Alta velocidad de trabajo. Se reduce el tiempo de formado aproximadamente cuatro

veces, reduciendo el costo y el tiempo de espera.

Conclusiones

Los principales logros productos de este trabajo fueron los siguientes:

1. Se logró predecir la deformación producida por líneas de calentamiento en placas metálicas gracias al modelo tridimensional de análisis termo-mecánico por medio de elementos finitos.
2. Una explicación detallada del efecto de borde de placa fue presentada y un nuevo método para el cálculo de este efecto fue dado.
3. La deformación causada por múltiples líneas de calentamiento fue clarificada y nuevos métodos fueron propuestos para predecir este tipo de deformación.
4. La deformación producida en placas de gran tamaño tales como aquellas utilizadas en los cascos de barcos fue clarificada.
5. La influencia de las propiedades físicas y mecánicas de los metales en la deformación fueron estudiadas y clarificadas.
6. La influencia de los esfuerzos residuales creados por los procesos de corte por ejemplo, fue clarificada.
7. La influencia de la curvatura inicial de la placa en la deformación final fue clarificada.
8. El efecto de la secuencia de calentamiento en la deformación final fue estudiada en detalles y métodos más eficientes fueron propuestos.
9. La influencia de los métodos de enfriamiento tales como aire, agua u otros fueron investigados y clarificados.
10. Finalmente un nuevo y más eficiente método fue creado para el análisis y predicción de la deformación causada por líneas de calentamiento.

Esto, sumado al aporte de otras personas que estuvieron ligadas al proyecto, permitió el desarrollo del primer robot capaz de formar una superficie tridimensional cualquiera con gran eficiencia, ahorrando costo, menos contaminante y reduciendo en gran medida el tiempo de construcción del buque.

Agradecimiento

Este trabajo no hubiese sido posible sin el aporte del gobierno japonés a través del programa MONBUKAGAKUSHO quienes desinteresadamente cubrieron todos los gastos de mis tres y medios años en que viví esta inolvidable experiencia. A ellos y muchos de mis buenos amigos que deje allá lejos les estaré eternamente agradecido.

Bibliografia

- [1] Vega, A., Osawa, N., Tango, Y., Ishiyama, M., Serizawa, H., Rashed S., Murakawa H.: Effect of the Heating Model on the Prediction of Inherent Deformation of Plates Formed by Induction Heating. *Transactions of the 8th International Symposium of the Japan Welding Society (8WS)*, 2008.
- [2] Vega, A., Rashed, S., Tango, Y., Ishiyama, M., Murakawa, H.: Analysis and prediction of multi-heating lines effect on plate forming by line heating. *CMES Journal: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, CMES, Vol. 28, No. 1, pp. 1-14, 2008
- [3] Vega, A., Rashed, S., Serizawa, H., Murakawa, H.: Analysis and Prediction of Overlapping Effect on Plate Forming by Line Heating. *Transactions of Asian Technical Exchanges and Advisory Meeting on Marine Structure (TEAM)*, 2008
- [4] Vega, A., Rashed, S., Serizawa, H., Murakawa, H.: Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 3) – The Effect of crossed heating lines. *Transaction of International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*. Vol. 4(pp. 301 - 308). 2008
- [5] Vega, A., Tajima, Y., Rashed, S., Murakawa, H.: Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 2) – The Effect of a previous heating line. *Transactions of Asian Technical Exchanges and Advisory Meeting on Marine Structure (TEAM)*, (pp.187-194). 2007
- [6] Vega, A., Rashed, S., Serizawa, H., Murakawa, H.: Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 1) – The Effect of Plate Size and Edge Effect, *Transactions of Joining and Welding Research Institute*, Vol.36, No. 2. 2007
- [7] Vega, A., Tajima, Y., Rashed, S., Murakawa, H.: Numerical Study on Inherent Deformation of Thick Plates Undergoing Line heating. *Transactions of International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*, Vol. 4(pp. 3472 - 3479). 2007
- [8] Vega, A., Liang, W., Serizawa, H., Murakawa, H.: Numerical Study on Edge Effect in Transverse Shrinkage under Line Heating. *Transactions of Asian Technical Exchanges and Advisory Meeting on Marine Structure (TEAM)*, (pp.283-290), 2006