

열응력 해석에 의한 블랭크 단조품 가열공정 평가

박상철*

¹거제대학교 조선해양공학과

Evaluation of Blank Heating Processes by Thermal Stress Analysis

Sang-Chul Park*

¹Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Kojje College

요약 선박용 디젤엔진 부품인 블랭크 단조품 가열 시 생산성 및 품질을 향상시키기 위하여 새로운 가열공정을 제안하였다. 본 연구에서는 새로운 블랭크 가열공정을 평가하고 가열공정 설계기준을 정립하기 위하여 수치해석 전용 프로그램인 ANSYS를 사용하여 재료의 비선형 온도분포, 열응력 해석을 수행하였다. 가열조건은 승온단계와 유지단계로 구성 되어 총 32시간이며 가열 시 시간경과에 따른 블랭크 내·외부의 온도분포와 열응력 변화를 평가하였다. 그 결과 가열 시 승온 단계에서 블랭크 내·외부 온도차는 시간이 경과함에 따라 점차 증가하여 최종 승온단계에서 최대 온도차가 발생하나 유지 단계에서 온도차는 점진적으로 감소하는 반면에 가열이 시작되어 10시간 경과 후 블랭크 내부에는 최대 등가응력 12.5kg/mm^2 가 발생한다는 것을 알 수 있다. 따라서 단조품 가열공정을 설계함에 있어서 가열 후 10시간 경과 시, 즉 노내 온도 650°C 에서 블랭크 내·외부 온도차는 150°C 이내가 되도록 관리해야 한다.

Abstract This study was performed to evaluate a newly proposed heating process of blank, which was used for Crank throw in the diesel engine, and provide design guidelines of heating processes. Non-linear numerical analyses were done using ANSYS program to investigate temperature and thermal stress distributions of blank during heating processes. The heating process consists of two stages; one is a heating stage with 20 hours, and the other is a holding stage with 12 hours, totaling 32-hour heating time. Based on analysis results, it was found that the temperature difference between the center and the surface of blank increased linearly during the heating stage but decreased gradually during the holding stage of heating processes, while max. equivalent stress, 12.5kg/mm^2 , was found at the center of blank after 10-hour heating time. As the guideline of blank heating process, it was recommended to keep the temperature difference between the center and the surface of blank to be within 150°C when the environment temperature in furnace reaches 650°C during a heating stage.

Keywords : Blank, Crank Throw, Forging, Heating Curve, Temperature, Thermal Stress

1. 서론

최근 국내 조선산업의 경쟁력이 전 세계적으로 크게 향상되어 선박생산량이 크게 증가함에 따라 선박의 추진 장치인 프로펠러와 선박용 디젤엔진의 생산량이 크게 증가하고 있다. 특히 디젤엔진은 피스톤, 실린더라이너, 크랭크샤프트, 커넥팅로드 등 수많은 주·단조 부품들이 정

밀하게 제작, 조립되어야 제 성능을 발휘하는 중요한 기관으로, 그 중에서 크랭크스로(crank throw)는 커넥팅로드의 상하 운동을 변환시켜 주는 장치로 크기가 크고 제작에 많은 공수가 소요되는 단조 부품이다. 크랭크스로 제작과정을 살펴보면 잉곳(ingot)을 가열한 후 업셋팅(upsetting), 블룸(bloom) 단조작업을 거쳐 블랭크(blank) 형태로 제작한 후 블랭크 소재를 노(furnace)에서 가열

*Corresponding Author : Sang-Chul Park(Koje College)

Tel: +82-55-680-1698 email: scpark@koje.ac.kr

Received April 8, 2015

Revised (1st June 12, 2015, 2nd July 2, 2015)

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

한 후 다시 단조작업으로 제작하고 있다. 이 때 블랭크 소재 가열 시 가열조건이 명확히 설정되어 있지 않아 기존 대형 잉곳 가열 시 사용 중인 가열조건을 사용하여 가열작업을 수행하고 있다. 그러나 기존 잉곳에 사용 중인 가열조건은 소재를 3단계에 거쳐 총 70시간을 가열하는 것으로, 블랭크의 형상이 주조상태인 잉곳에 비해 단면적과 중앙부 두께가 작으므로 잉곳과 동일한 조건으로 가열하는 것은 가열공정 측면에서 생산성이 낮은 것으로 판단되어 블랭크에 적합한 가열조건 정립이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 블랭크 가열시 수치해석적인 방법을 사용하여 온도분포, 열응력 해석을 통하여 가열 시간 경과에 따른 블랭크 내·외부 온도분포, 열응력 변화 양상을 평가함으로써 블랭크에서의 열전달 특성을 평가하고 블랭크 단조품에 대한 적정 가열공정 설계기준을 마련하여 엔진 부품 제작 시 단조품의 품질 및 생산성 향상에 기여하고자 하였다.

2. 본론

2.1 열전달 기본이론

연속체에서 내부에 열 생성이 없고 등방성재료인 경우 비선형, 비정상 상태의 3차원 열전도방정식은 Fourier 열전도법칙을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다[1].

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, T : 온도, t : 시간, λ : 열전도도(J/cm·°C·sec),

ρ : 밀도(g/cm³), C_p : 비열(cal/g·°C)

한편 열전도 지배방정식을 행렬형식으로 표현하면

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (2)$$

여기서 [C]는 비열행렬(specific heat matrix), [K]는 열전도행렬(thermal conductivity matrix), {T}는 절점에서의 온도벡터, {Ṫ}는 시간변화에 따른 온도변화벡터, {Q}는 열하중벡터(heat flow load vector)를 나타낸다.

위 식에서 비정상 해석을 위하여 온도벡터 {T}를 시

간경과에 따라 일반화하면

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1-\theta)\Delta t\{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t\{\dot{T}_{n+1}\} \quad (3)$$

여기서 θ는 Euler parameter이다. 식 (2)에서 시간증분 T_{n+1}에서 온도분포는

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q\} \quad (4)$$

이므로 식 (3)에서 {Ṫ_{n+1}}에 대해 정리한 후 식 (4)의 {Ṫ_{n+1}}에 대입하면 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[C] + [K]\right)\{T_{n+1}\} = \{Q\} + [C]\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\} + \frac{1-\theta}{1}\{\dot{T}_n\}\right) \quad (5)$$

한편 열변형률(thermal strain)은 온도가 상승하여 팽창하거나 온도가 감소하여 수축할 때 나타나며, 시간증분에서 온도가 결정되면 현재 온도(T)에서 열변형률 ε은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \alpha(T - T_0) = \alpha\Delta T \quad (6)$$

여기서 T₀는 초기 온도, T는 현재 온도, α는 열팽창 계수이다. 한편 탄성변형은 후크(Hooke)의 법칙을 만족하므로 열응력 σ는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 식 (7)에서 E는 탄성계수이다.

$$\sigma = E \cdot \epsilon = E \cdot \alpha\Delta T \quad (7)$$

2.2 수치해석

2.2.1 블랭크형상

크랭크스로는 실린더 커넥팅로드의 상하 직선운동을 크랭크축의 회전운동으로 바꾸는 역할을 하는 부품으로 대형 잉곳을 가열, 업셋팅, 블룸 단조작업을 거쳐 블랭크로 제작한 후 다시 블랭크를 가열, 2차 단조작업을 거쳐 크랭크스로로 제작한 후 정밀가공을 통해 완성된다. 본 연구에 사용된 블랭크 소재는 34CrNiMo6이며 형상은 47톤 잉곳을 가열, 1차 단조작업을 마친 제품으로 Fig. 1과 같이 길이 4,230mm, 폭 1,800mm, 높이 640~1,270mm인 단조품이다.

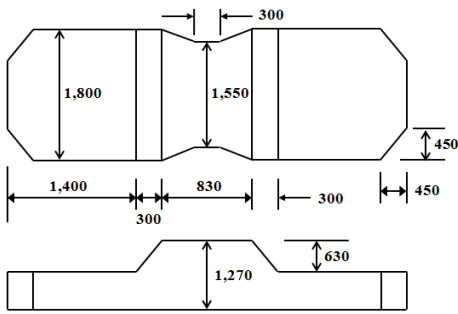


Fig. 1. Schematic of Blank(mm)

2.2.2 블랭크 가열조건

블랭크를 단조하여 크랭크스로 만들기 위해서는 우선 블랭크를 가열해야 하는데 가열조건이 현재 확립되어 있지 않아 기존 대형 잉곳 가열시 사용되는 가열조건을 그대로 사용하고 있다. 그러나 잉곳과 블랭크의 형상이 서로 크게 다르기 때문에 3단계 유지단계를 거쳐 총 70 시간을 가열하는 잉곳 가열조건을 블랭크에 그대로 적용한다는 것은 가열공정의 생산성 향상 측면에서 문제점으로 작용하고 있다. 따라서 새로운 가열조건을 제안하고 평가하고자 하였으며, Fig. 2는 기존에 사용하던 가열조건과 현장 경험을 참고로 하여 선정한 블랭크 가열곡선으로 20℃에서 1250℃까지 승온단계 20시간, 1250℃에서 유지단계 12시간으로 구성되며 총 가열시간은 32시간이다.

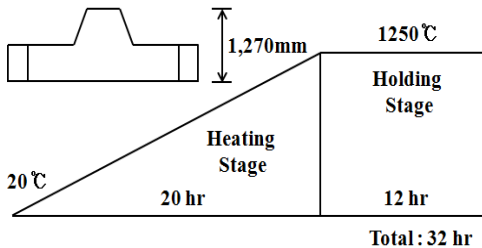


Fig. 2. Blank Heating Curve(hour, °C)

2.2.3 노내 열전달 특성

가열시 노내에서 발생하는 열전달은 가열된 공기의 흐름에 의한 대류와 공기 온도와 소재의 온도차에 따른 복사에 의한 열전달로 나눌 수 있다[2]. 식 (8)과 식 (9)는 각각 대류와 복사에 의한 단위면적당 열전달량을 나타낸다.

$$Q_C = h(T_{air} - T_{sur}) \tag{8}$$

$$Q_R = e\sigma(T_{air}^4 - T_{sur}^4) \tag{9}$$

여기서 h : 열전달 계수, T_{air} : 공기 온도
 e : emissivity, T_{sur} : 표면 온도
 σ : Stephen-Boltzman 상수

위 식 (8), (9)에서 수치해석을 하기 위해서는 계수 h, e 값을 결정해야 하는데 이 값은 물체의 표면상태나 노의 가열 상태에 따라 달라지므로 실제 노내에서 잉곳을 가열하면서 온도측정을 통하여 결정하였다.

2.2.4 열전달 및 열응력 해석

제안된 가열공정의 가열조건을 평가하기 위하여 수치해석적인 방법을 사용하여 열전달 및 열응력 해석을 수행하였다[3-5]. 우선 열전달 해석을 수행하여 가열 시 시간경과에 따른 블랭크의 온도분포를 평가한 후 각 요소의 절점 온도를 외부 하중으로 하여 열응력 해석을 수행하였으며, 해석에는 수치해석 분야에서 널리 사용되고 있는 ANSYS 프로그램을 사용하였다[6]. 열전달 및 열응력 해석을 위한 해석모델은 블랭크 형상이 상하좌우 대칭이고 해석시간과 비용을 고려하여 약 41,000개 절점과 약 12,000개 6면체 요소를 갖는 1/4 모델을 채용하여 Fig. 3에 나타내었다. 경계조건으로 대칭면에서는 절연조건과 변위 구속조건을 사용하였고, Fig. 4와 같이 온도에 따른 재료의 물리적 성질 변화를 고려하여 비선형 해석을 수행하였다[7-8].

한편 본 연구에 사용된 수치해석기법은 기존 유사한 연구에 사용되어 검증된 기법을 사용하였다. 즉 실제 잉곳 가열시 온도 실측 데이터와 수치해석 모델을 사용하여 얻은 온도해석 결과를 비교하여 가장 신뢰성이 높은 해석기법을 사용하여 본 해석을 수행하였다.

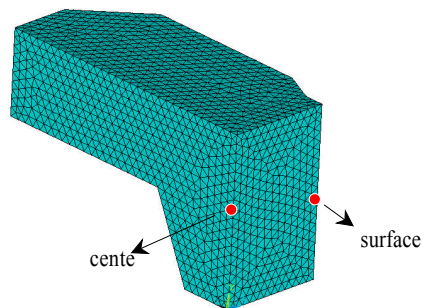
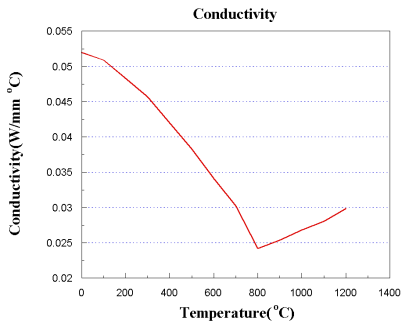
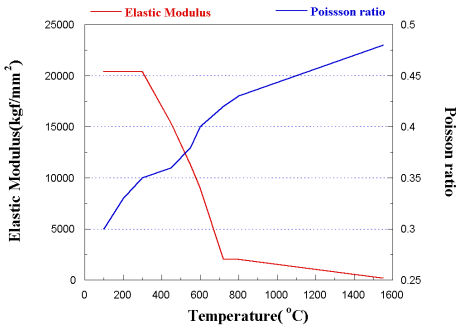


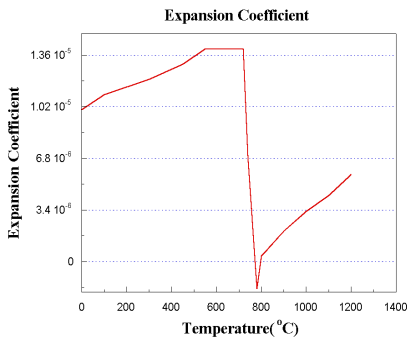
Fig. 3. Blank Analysis Model



(a) Thermal conductivity



(b) Elastic modulus & Poisson's ratio



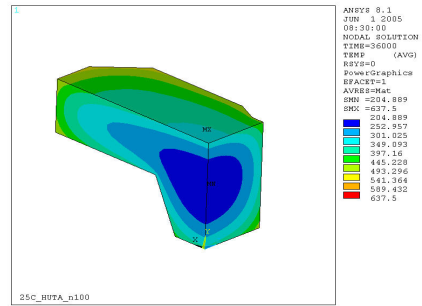
(c) Thermal expansion coefficient(/°C)

Fig. 4. Mechanical Properties of Blank

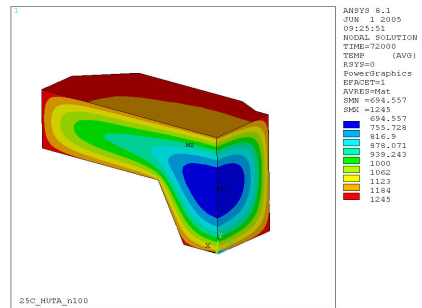
2.2.5 해석결과

가열로에서 블랭크를 가열하기 시작하여 10시간, 20시간, 32시간이 경과한 후 블랭크의 온도분포를 Fig. 5에 그리고 Fig. 3에 나타난 블랭크 내부 중심과 표면에서의 시간에 따른 온도변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5를 보면 가열에 의하여 뜨거운 공기가 직접 작용하는 표면 부분의 온도가 높고 내부는 간접적으로 열전달에 의하여 가열되므로 온도가 낮게 나타나며, 시간이 점차

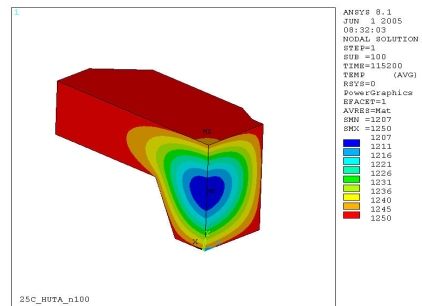
경과하더라도 전체적인 온도분포 양상은 비슷한 경향을 나타내나 가열시간이 증가하여 유지단계에 이르면 표면과 내부 온도차 범위는 점점 줄어들어 최종적으로 내·외부 온도차는 아주 작아짐을 알 수 있다.



(a) Elapsed time 10 hours



(b) Elapsed time 20 hours



(c) Elapsed time 32 hours

Fig. 5. Temperature distributions of blank with heating time(°C)

Fig. 6에서 보면 가열시간에 따른 블랭크 내부 중심과 표면의 온도차는 승온단계인 20시간까지 선형적으로 증가하다가 유지단계인 20시간에서 32시간까지는 점진적

으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉 10시간 경과 후 노내 온도 650℃에서 블랭크의 내·외부 온도차는 150℃, 20시간 경과 시 노내 온도 1250℃에서 블랭크의 내·외부 온도차는 최대인 470℃, 계속 가열하여 32시간 경과 시 온도차는 39.5℃로 1시간 증가시킨 33시간 경과 시 온도차는 30℃가 됨을 알 수 있다.

가열과정에서 블랭크에 발생하는 응력상태를 평가하기 위하여 가열 10시간 경과 후 블랭크의 불균일한 온도 분포에 의한 열응력 분포를 Fig. 7, 가열시간 경과에 따른 블랭크 내부 중심과 표면에서의 응력변화를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 6에 보면 승온이 완료되는 20시간 경과 시 블랭크 내·외부 온도차가 470℃로 가장 크게 발생하여 이 때 열응력이 가장 클 것으로 예상되나 Fig. 8에 보면 최대 등가응력은 10시간 경과한 시점에 발생함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4.(b)의 온도에 따른 탄성계수의 변화 때문으로 탄성계수 값이 300℃에서부터 700℃까지 급격히 감소하여 온도차가 발생하여 변형이 유발되더라도 별다른 저항 없이 변형되어 응력이 감소하게 된다. 따라서 10시간 이상이 경과하게 되면 블랭크의 표면 온도가 300℃이상으로 가열되어 탄성계수가 감소하기 시작하므로 내·외부의 온도차는 증가하지만 오히려 응력은 감소하게 된다. 따라서 가열공정 설계시 노내 온도 650℃이상에서 발생하는 온도차는 고려할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

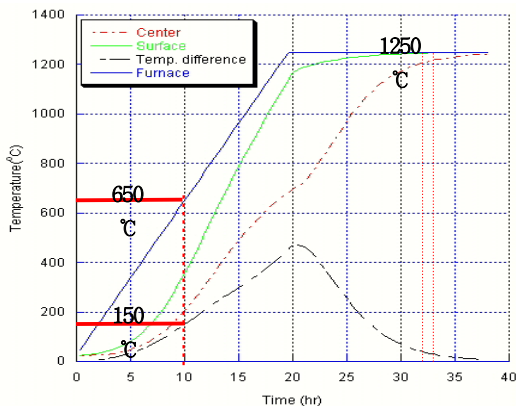
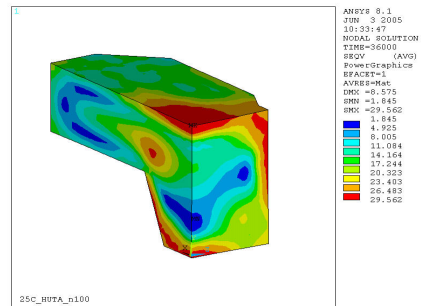


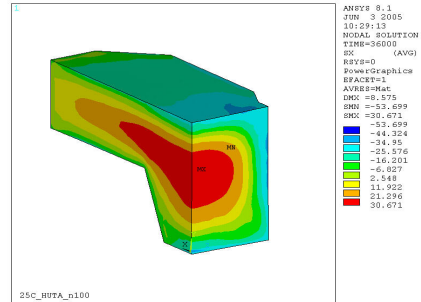
Fig. 6. Temperature distributions at the center & the surface of blank(℃)

Fig. 7로부터 가열 시 블랭크 내부는 표면보다 온도가 낮기 때문에 길이, 높이, 폭 방향 모두 인장응력이 발생

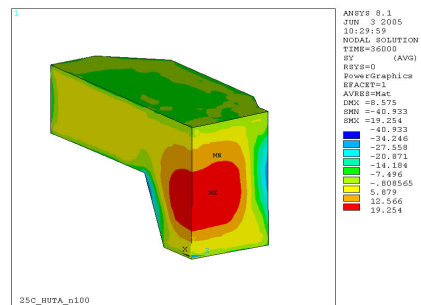
하고 표면에는 압축응력이 발생한다는 것을 알 수 있다. 블랭크 가열 시 10시간 경과 후 내부에 발생하는 최대 등가응력은 12.5kg/mm²로 현재 현장에서 사용하고 있는 가열곡선에 의하여 발생하고 있는 최대 등가응력 13.7kg/mm²보다 작다는 것을 알 수 있다. 즉, 블랭크 표면에는 압축응력이 작용하고 인장응력이 작용하는 내부의 응력 수준도 현재 현장에서 사용하고 있는 가열조건으로 가열 시 발생하는 응력보다 낮은 수준이므로 가열 조건에 문제가 없음을 확인할 수 있다.



(a) Equivalent thermal stress



(b) Thermal stress in x-direction



(c) Thermal stress in y-direction

Fig. 7. Thermal stress distributions of blank with elapsed time 10 hours(kg/mm²)

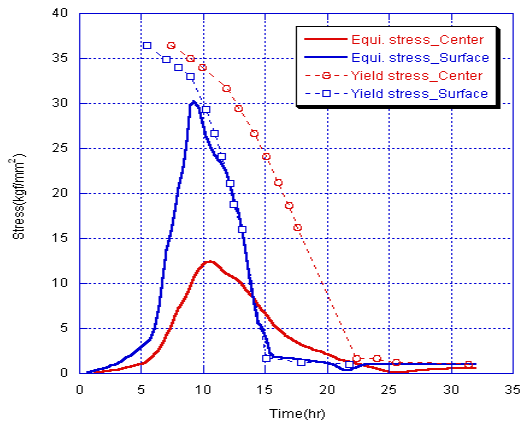


Fig. 8. Equivalent stress changes with elapsed heating time (kg/mm²)

3. 결론

본 연구에서는 디젤엔진에 사용되는 블랭크 단조품을 가열하기 위하여 제안된 가열공정을 평가하기 위하여 블랭크 가열 시 온도분포, 열응력 해석을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가열시 승온단계에서 블랭크 내·외부 온도차는 시간이 경과함에 따라 증가하여 최종 승온단계에서 최대 온도차 470℃가 발생하나 유지단계에서 온도차는 점차 감소하여 가열 후 33시간이 경과하면 내·외부 온도차는 30℃이내이다.
- 2) 가열시 블랭크 내부에 발생하는 최대 열응력은 블랭크 내·외부 최대 온도차가 발생하는 20시간이 경과한 후 발생하지 않고 가열하기 시작하여 10시간 경과 후 최대 등가응력 12.5kg/mm²가 발생한다.
- 3) 블랭크 단조품 가열공정 설계에 있어서 가열 후 10시간 경과 시, 즉 노내 온도 650℃에서 블랭크 내·외부 온도차는 150℃, 최종 유지단계에서 내·외부 온도차는 30℃이내가 되도록 관리해야 한다.

References

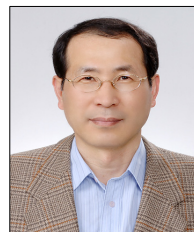
[1] F.P.Incropera & D.P. De Witt, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons Inc., 2007.
 [2] B.H.Choi, S.Y.Kwak, J.T.Kim and J.K.Choi : "Heat

Treatment Process Design of CrMoSC1 Steel by Prediction of Phase Transformation and Thermal Stress Analysis", Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 18, No. 4, pp. 247-255, 2005.

[3] T.W.Lim and D.H.Cho : "Study on Heat Transfer Characteristic of Shell-and-Tube Heat Exchanger with Plate Fin", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 10, No. 1, pp. 46-51, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.1.046>
 [4] B.Y.Lee, M.H.Im and J.Y.Shon : "Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of a Large LPLi Engine Piston", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 28, No. 3, pp. 538-550, 2004.
 [5] J.U.Cho and M.S.Han : "Study on Thermal Stress and Flow Analysis at Exhaust Manifold of Car", Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 2, pp. 23-28, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/ksae.2014.22.2.023>
 [6] ANSYS Users' Manual, Version 8.1, 2007.
 [7] S.C.Chu and S.S.Lian : "Numerical Analysis of Temperature Distribution of Plasma Arc with Molten Pool in Plasma Arc Melting", Computational Materials Science, Vol. 30, pp. 441-447, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2004.03.014>
 [8] Metal Handbook, Vol. 1, 10th Edition, ASM, 1990.

박 상 철(Sang-Chul Park)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (조선공학석사)
- 1998년 3월 : 오하이오주립대학교 용접공학과 (용접공학박사)
- 1987년 12월 ~ 2008년 8월 : 산업기술연구소 수석연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 거제대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

용접공학, 주·단조공학, 열탄소성 수치해석