

선박용 축류 단조품 냉각공정 평가

박상철
거제대학교 조선해양공학과

Evaluation of Cooling Process for Marine Shaft Forging Products

Sang-Chul Park

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Kojee University

요약 본 연구는 선박용 디젤엔진 부품인 축류 단조품을 단조작업에 의하여 제작하는 과정에서 발생하는 품질문제를 해결하기 위하여 수행되었다. 1차, 2차 가열 및 열간 단조를 거쳐 완성된 단조품은 최종 후열처리공정을 거치게 되는데 이 과정에서 발생하는 것으로 알려진 내부 결함문제를 해결하기 위하여 냉각공정을 평가하였다. 자유단조작업을 거쳐 제작된 축류 단조품에는 2차 열간 단조작업 후 냉각과정에서 소재 내부에 존재하고 있던 잔류 수소가 기공이나 미세 균열, 입계, 계면 등으로 확산, 집적됨으로써 균열을 유발하여 내부 결함이 발생하는 것으로 알려져 있으며 실제 작업현장에서 균열발생 사례가 보고되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수치해석 전용 프로그램인 ANSYS를 사용하여 열전달 수치해석을 수행하였으며, 해석모델은 축류 단조품의 특성상 축대칭요소를 사용하여 구성하였고 단조품 초기 온도 1250 °C에서 단조작업 완료 후 냉각과정에서 시간이 경과함에 따른 온도변화를 평가하였다. 주어진 4종류의 축류 단조품에 대하여 온도이력을 평가한 결과 단조품 내부에 수소유기균열 발생이 예상되는 250 °C까지 냉각되는데 소요되는 시간을 알 수 있었으며, 이러한 냉각시간은 추후 열처리 작업의 작업표준으로 적용함으로써 축류 단조품 제작 시 품질과 생산성을 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

Abstract This study was performed to solve the quality problems of forging propeller shaft components in the marine diesel engines during the final cooling process and provide reasonable guidelines to increase the production of forging products. Residual hydrogen existing on the inside of forging products begins to diffuse and accumulates at the pores, micro-fissures, and grain boundaries as the temperature of forging products begins to decrease and reaches a critical temperature range, and finally transforming into internal defects. These defects were easily found near the surface of products after milling the surface of forging products. In this work, four types of forging products (shaft flange, shaft journal, thrust shaft, and propeller shaft) were chosen to evaluate the temperature history of products during the cooling process, employing non-linear numerical analyses with the ANSYS program. The times elapsed to reach 250 °C after cooling were approximately 9 ~ 23 hours for each forging product. These times can be used as cooling process guidelines on the quality and productivity of products after heat treatment.

Keywords : Open Forging, Cooling Process, Temperature, Heat Treatment, Defects, Numerical Analysis

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

email: scpark@koje.ac.kr

Received May 29, 2020

Accepted September 4, 2020

Revised July 30, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

선박에서 추진기인 프로펠라는 내연기관의 크랭크 축 상하운동에 의하여 발생하는 회전동력을 전달받아 회전함으로써 선박을 추진하는 역할을 한다. 최근 국내 조선산업의 선박생산량이 점차 증가함에 따라 선박의 내연기관인 저속 디젤엔진과 추진기관인 축류 단조품의 생산량이 증가하고 있는 실정이다. 디젤엔진은 실린더프레임과 실린더라이너, 피스톤, 크로스헤드, 크랭크샤프트, 크랭크축, 커넥팅로드 등 수많은 주 단조 부품들이 정밀하게 제작, 조립되어야 하는 제품으로 그 중에서 축류 단조품인 샤프트플랜지, 샤프트저널, 쓰러스트샤프트, 프로펠러샤프트 등은 크기가 크고 제작이 어려워 제품생산에 많은 공수가 소요되고 있다. 이러한 단조품의 제작과정을 살펴보면 Fig. 1에 나타난 바와 같이 우선 잉곳(ingot)을 노(furnace)에서 1차 가열한 후 업셋팅(upsetting), 블룸(bloom)작업과 같은 1차 단조작업을 거쳐 블랭크(blank) 형태로 제작한 후 냉각된 블랭크 소재를 다시 노에서 2차 가열한 후 최종 2차 단조작업에 의하여 여러 모양의 축류 단조품으로 제작되고 있다. 이러한 2차 단조작업을 마친 단조품은 최종적으로 후열처리 과정을 거치는데 이 때 냉각과정에 대한 작업공정 기준이 마련되어 있지 않다. 생산현장에서는 축류 단조품이 2차 단조작업과 후열처리 과정을 거친 후 비파괴검사, 황삭/정삭과 같은 가공공정에서 제품 내부에 균열이 존재하고 있다고 보고되고 있으며, 이러한 균열을 처리하는데 많은 추가 공수 및 비용이 발생하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 생산현장에서 샤프트플랜지, 쓰러스트샤프트, 프로펠러샤프트 등 여러 가지 축류품에 대하여 2차 단조작업 후 후열처리 장입 전의 냉각공정에서 잔류 수소의 확산에 의한 내부 결함 발생의 위험에 노출되지 않고 이를 제어하기 위한 냉각공정을 정립함으로써 축류 단조품의 품질 안정 및 생산성 향상에 기여하고자 하였다.

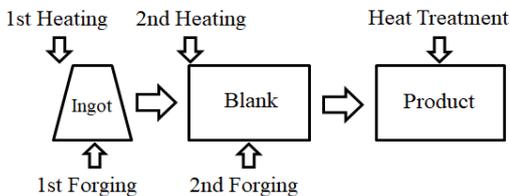


Fig. 1. Forging procedure of forging products

2. 본론

2.1 자유단조 및 열처리작업

선박의 추진시스템에 사용되는 많은 축류 단조품을 제작하는 과정은, 노에서 1차 가열된 원기둥 모양의 잉곳을 1차 단조작업을 통하여 블룸 형태로 단조한 후 2차 가열작업 그리고 2차 단조작업을 통해 축류 단조품으로 제작된다. 이렇게 제작된 단조품은 마지막으로 후열처리공정을 거치게 되는데 후열처리 노에 장입될 때까지 자연 냉각과정을 거치는 과정에서 단조품 내부에 수소균열이 발생할 가능성이 높다는 사실이 알려지게 되었다. 일반적으로 단조작업 후 후열처리는 단조작업에 의하여 변형된 미세조직을 안정화시키고 소성변형에 의하여 발생한 잔류응력을 제거하기 위한 것으로 알려져 있다. 한편 단조품에서 발생하는 수소유기결합의 발생 메커니즘은 소재 내부에 존재하고 있는 잔류 수소가 기공이나 미세 균열, 입계, 계면 등으로 확산, 집적되어 균열을 유발시키는 것으로, 확산성 수소 원자가 비확산성 수소 분자로 되면서 발생하는 압력이 주요한 요인이라고 알려져 있다. 특히 MnS와 같은 개재물은 가열시 팽창에 의해 모재에 밀착되어 있지만 냉각시에는 수축되어 모재와 공극을 형성하게 되어 결국 수소가 집적될 수 있는 장소를 제공하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 수소유기결합은 단조작업 후 냉각과정에서 단조품의 온도가 약 250 ℃ 이하에서 많이 발생하는 것으로 알려져 있는데, 이는 약 200 ℃ 부근에서 수소의 확산 계수가 급격히 감소하는 것으로부터 비확산성 수소가 형성된다는 것에 근거하고 있다.

따라서 본 연구에서는 단조작업으로 제작된 축류품에 대하여 단조 후 냉각공정에서 수소유기결합 발생의 임계 온도인 250 ℃에 도달하는 시간을 열전달 해석을 통해 평가함으로써 후열처리를 위한 작업공정을 정립하고자 하였다.

2.2 온도분포 해석

본 연구의 대상인 축류 단조품은 여러 종류의 축류 단조품 중에서 가장 문제가 많이 발생하고 있다고 보고되는 제품으로, 재질은 HF601인 샤프트플랜지, 샤프트저널, 쓰러스트샤프트 그리고 프로펠러샤프트로 선정하였으며 각각의 전체적인 형상은 Fig. 2, 상세한 제품 치수는 Fig. 3에 나타내었다.

냉각과정에서 단조품의 열전달은 주로 주변 공기의 대

류에 의한 열전달과 공기 온도와 소재의 온도차에 의한 복사 열전달 두가지로 나눌 수 있으며 아래의 Eq. (1)과 Eq. (2)는 각각 대류와 복사에 의한 단위면적당 열전달량을 나타내고 있다[1].

$$Q_C = h(T_{air} - T_{sur}) \quad (1)$$

$$Q_R = e\sigma(T_{air}^4 - T_{sur}^4) \quad (2)$$

Where h : 열전달 계수, T_{air} : 공기 온도

e : emissivity, T_{sur} : 표면 온도

σ : Stephen-Boltzman 상수

한편 Eq. (1)과 Eq. (2)에서 수치해석을 수행하기 위하여 결정해야 하는 계수는 물체의 표면상태 및 온도에 따라 달라지는 값이므로 본 연구에서는 수치해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 수행한 예비연구에서 실제 샤프트질 단조품에 대하여 냉각시간에 따른 온도변화를 실험적으로 측정하고 그 결과를 수치해석 결과와 비교하여 결정된 계수를 사용하였으며, 대표적으로 Fig. 4에 온도에 따른 열전달계수의 변화를 나타내었다[2-3].

열간 단조 후 축류 단조품에 대한 열전달 해석을 위한 수치해석 모델은 단면이 축대칭인 제품의 특성을 고려하여 4절점, 가로, 세로 약 25 mm인 축대칭 사각형 요소를 사용하여 Fig. 5와 같이 메쉬모델을 구성하였다. 경계조건으로는 축류 단조품 전체가 초기 단조 온도 1250 °C에서 냉각하기 시작하여 단조품 표면에서 주변 공기에 의하여 발생하는 대류와 복사에 의하여 열전달이 발생하며 또한 축대칭의 중심축인 회전축에 대해서는 온도 절연조건을 적용하였다. 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 해석을 수행하였으며, 축류 단조품의 냉각과정에서 온도변화를 중점적으로 평가한 위치는 여러 위치 중에서 수소유기균열과 같은 내부 결함 발생의 위험이 가장 높은 편석대의 위치를 고려하여 Fig. 6과 같이 단조품 표면과 끝단부에서 반경의 1/3R 지점(A)이며 이 지점에 대하여 시간 경과에 따른 온도이력을 x-y좌표로 도시하여 평가하였다[4].

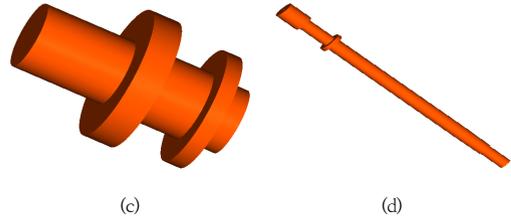
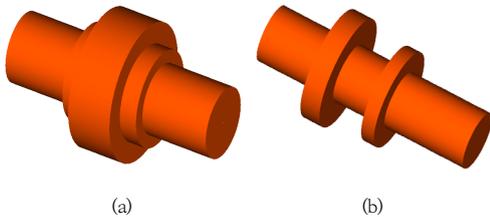


Fig. 2. Schematics of forging products
(a) Shaft flange (b) Shaft journal (c) Thrust shaft (d) Propeller shaft

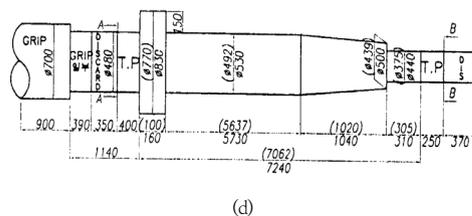
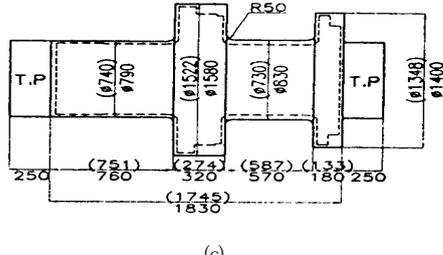
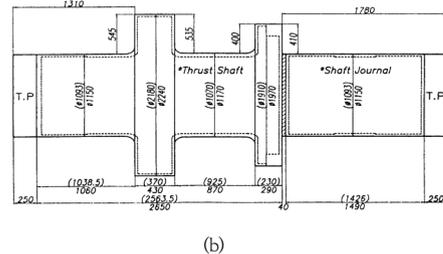
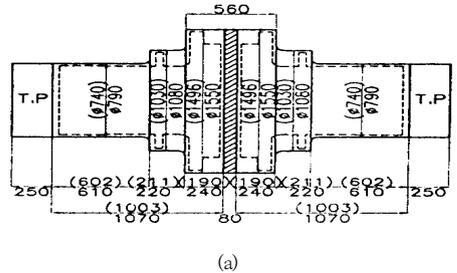


Fig. 3. Dimensions of forging products
(a) Shaft flange (b) Shaft journal (c) Thrust shaft (d) Propeller shaft

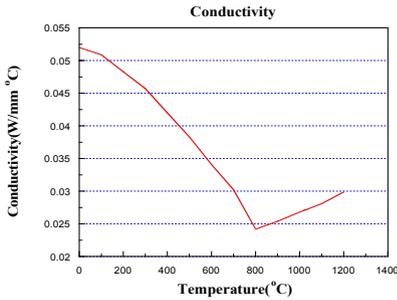


Fig. 4. Thermal conductivity of forging products

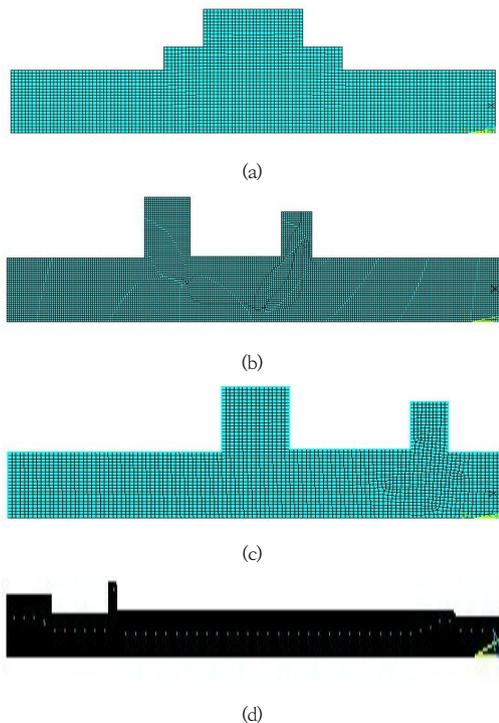


Fig. 5. Numerical analysis models
(a) Shaft flange (b) Shaft journal (c) Thrust shaft (d) Propeller shaft

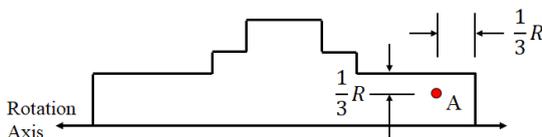


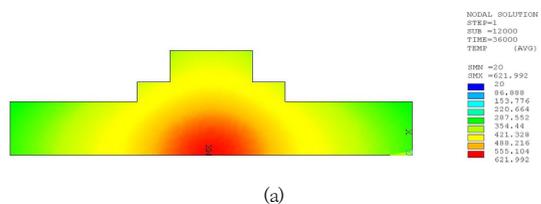
Fig. 6. Evaluation point for temperature history

2.3 해석결과

축류 단조품의 자연 냉각시 온도분포를 평가하기 위하

여 수치해석 모델을 사용하여 열전달 해석을 수행하였으며, 그 결과 중 일부분을 Fig. 7, A지점의 시간경과에 따른 온도변화를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 2차 열간 단조 후 10시간동안 자연 냉각이 진행되어 후열처리 공정 대기상태에 있는 단조품의 전체적인 온도분포를 나타내고 있다. 좌우 대칭 형상의 샤프트플랜지 온도분포는 중앙을 기준으로 좌우 대칭적인 분포를 나타내고 있으며, 예상한 바와 같이 단면형상에서 모서리 외부보다 내부, 직경이 작은 부분보다 직경이 큰 부분이 온도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 단면 직경이 큰 샤프트플랜지, 샤프트저널, 쓰러스트샤프트와 단면 직경이 작은 프로펠러샤프트의 온도분포를 비교하면 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 8에는 각 축류 단조품의 A지점에서의 시간경과에 따른 온도이력 그리고 Fig. 9에는 4가지 축류 단조품에 대하여 시간경과에 따른 온도이력을 종합적으로 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 A지점의 냉각속도는 800 °C에서 샤프트플랜지 -1.86 °C/min., 샤프트저널 -1.20 °C/min., 쓰러스트샤프트 -1.86 °C/min., 프로펠러샤프트 -2.69 °C/min.이다. 냉각곡선의 기울기는 길이가 길고 단면 직경이 큰 샤프트저널이 가장 작아 온도 변화가 작으며, 샤프트플랜지와 쓰러스트샤프트는 거의 동일한 온도변화 양상을 나타내고 있으나 반면에 길이가 가장 길지만 단면 직경이 가장 작은 프로펠러샤프트가 온도변화가 가장 크다는 것을 알 수 있다[5-8].

위와 같은 결과를 종합하여 4가지 축류 단조품에서 A 지점이 냉각이 시작되어 수소유기균열과 같은 내부 균열에 민감한 임계온도인 250 °C까지 도달하는 시간을 평가하여 Table 1에 나타내었다. 단조품 길이와 특히 두께 및 위치에 의한 영향으로 가장 짧은 9시간부터 가장 긴 23시간이 소요되었으며 이러한 냉각시간은 축류 단조품에 있어서 내부균열을 방지하기 위하여 2차 단조작업을 마친 후 후열처리까지 대기상태에서 허용될 수 있는 최대 시간을 나타내는 것으로 생산현장에서 각각의 축류 단조품에 대한 냉각공정의 작업표준으로 사용될 수 있다 [9-10].



(a)

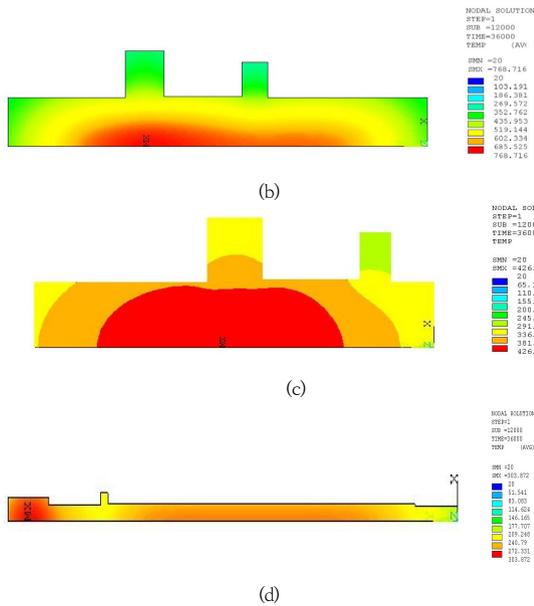
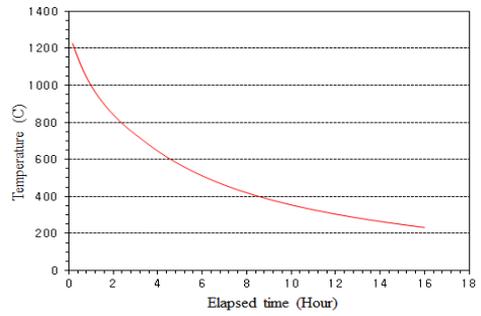
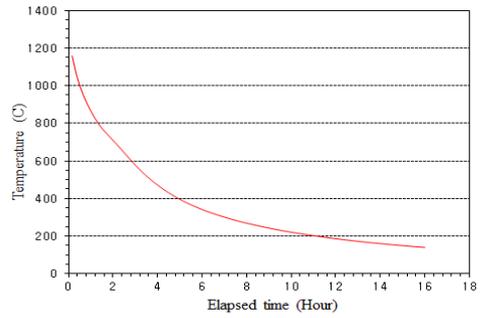


Fig. 7. Temperature distributions after 10 hr elapsed
(a) Shaft flange (b) Shaft journal (c) Thrust shaft (d) Propeller shaft

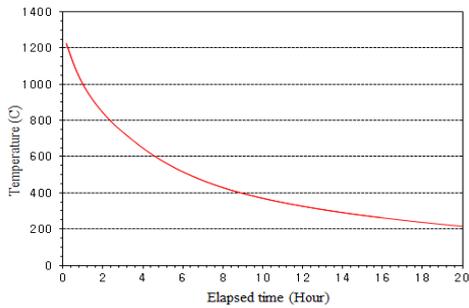


(c)

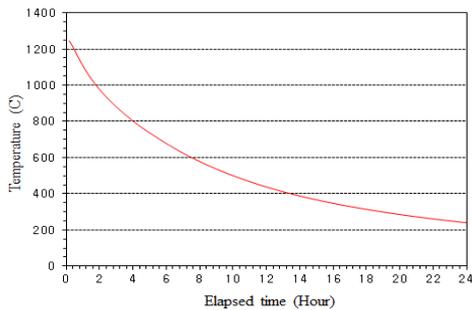


(d)

Fig. 8. Temperature history with elapsed times
(a) Shaft flange (b) Shaft journal
(c) Thrust shaft (d) Propeller shaft



(a)



(b)

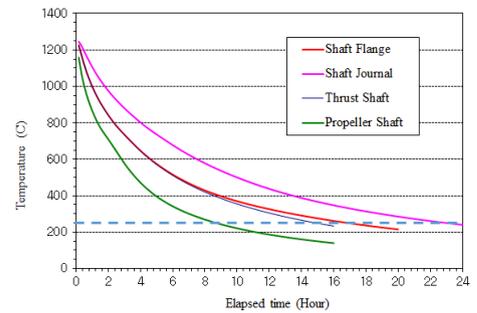


Fig. 9. Temperature histories of four forging products at location A after cooling

Table 1. Elapsed time to reach 250 °C after cooling

Materials	Elapsed time to reach 250 °C after cooling
Shaft flange	17hr
Shaft journal	23hr
Thrust shaft	15hr
Propeller shaft	9hr

3. 결론

본 연구는 선박용 디젤엔진에 사용되는 축류 단조품에 대한 냉각공정을 평가하기 위하여 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 4가지 축류 단조품에 대하여 열간 단조 후 자연 냉각과정에서 온도 변화를 평가한 결과 샤프트플랜지, 쓰러스트샤프트는 800 ℃에서 냉각속도가 -1.86 ℃/min.로 동일한 반면에 샤프트저널은 -1.20 ℃/min.로 가장 온도 변화가 작고 프로펠러샤프트는 -2.69 ℃/min.로 온도 변화가 가장 크다.
- 2) 축류 단조품의 냉각공정에서 수소유기균열 발생 임계온도(250 ℃)까지 냉각되는데 소요되는 시간은 샤프트플랜지 17시간, 샤프트저널 23시간, 쓰러스트샤프트 15시간, 프로펠러샤프트 9시간으로, 이러한 냉각시간을 생산현장에서 각각의 단조품에 대한 냉각공정 작업표준으로 사용함으로써 축류 단조품의 수소유기균열 발생을 방지하고 품질향상으로 인한 생산성 향상에 크게 이바지할 수 있다.

References

- [1] F.P.Incropera & D.P. De Witt, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [2] Internal Technical Report, 2005.
- [3] Metal Handbook, Vol. 1, 10th Edition, ASM, 1990.
- [4] ANSYS Users' Manual, Version 8.1, 2007.
- [5] 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.
- [6] 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>
- [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/i.commatsci.2004.03.014>
- [8] 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>
- [9] S.P.Dudra and Y.T.Im : "Analysis of Void Closure in

Open-die Forging", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 30, No. 1, pp. 65-75, 1990.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90042-H](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90042-H)

- [10] M.S.Chun, J.S.Ryu and Y.H.Moon : "FEM Analysis of Void Closure Behavior during Open Die Forging of Rectangular Billets", Transactions of Materials Processing, Vol. 13, No. 2, pp. 148-153, 2004.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSP.2004.13.2.148>

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