

사판식 유압 피스톤 펌프의 응력해석에 관한 연구

정봉수*

¹전북대학교 융합기술공학부

A Study on the Stress Analysis of Oil Hydraulic Piston Pump with a Swash Plate Type

Bong-Soo Jeong*

¹Division of Convergence Technology Engineering, Chonbuk National University

요약 유압 피스톤 펌프에서, 고속 상대운동을 하는 실린더 블록과 밸브 플레이트는 누설 및 마찰 손실의 최적화를 위해 극단적으로 제어되어야 하는 특성을 가지고 있으며, 내압 특성 설계는 고압 성능에 매우 중요하지만 이에 대한 응력 해석에 관한 연구가 활발하게 수행되지는 않았다. 따라서 본 논문에서는 CATIA V5를 사용한 정적 응력 해석을 통하여 사판식 유압 피스톤 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트의 응력과 변위를 해석하고자 하였으며, 실린더 블록의 최대응력은 실린더 뒷부분 동 재질의 접합 소재에 발생하며, 축방향에 비해 반경방향 작용압력이 응력과 변위에 더 큰 영향을 주고, 응력은 약 66%, 변위는 약 30% 더 크게 나타났다. 밸브 플레이트의 경우 재질 및 형상에 대한 검토가 요구됨을 알 수 있었다.

Abstract In an oil hydraulic piston pump, the cylinder block and valve plate in high speed relative sliding motion have the characteristics which should be extremely controlled for the optimization of leakage and friction losses, and pressure-resistance design of them is very important for high pressure performance. But the studies on the stress analysis of those parts have not been performed briskly. Therefore, in this paper, the stress and displacement distributions of the cylinder block and valve plate in the oil hydraulic piston pump with a swash plate type are discussed through the static stress analysis using CATIA V5. The stress and displacement of the cylinder block are more influenced by the axial pressure than by the radial pressure, and are larger by approximately 66% and 30%, respectively. The results show that a review of the material and shape of the valve plate is required.

Key Words : Cylinder block, Valve plate, Stress analysis, Finite element method, Oil hydraulic piston pump

1. 서론

유압시스템은 동력밀도가 높아 소형·경량화에 유리하기 때문에 건설기계 분야에서부터 선박, 자동차, 공작기계, 산업기계, 우주항공 등 광범위한 분야에서 사용되어 왔다. 유압 피스톤 펌프는 고압에 적합하고, 가변 토출 제어가 가능하다는 특성, 높은 효율, 높은 작동압력 특성 등 때문에 유압 펌프 중에서 가장 광범위하게 사용되고 있다[1].

유압 피스톤 펌프에 있어서 끊임없는 고성능화, 소

형·경량화, 신뢰성 향상, 저소음화 등의 연구를 통해 오늘에 이르렀고, 고성능·고출력화에 대한 끊임없는 요구로 인하여 보다 가혹한 조건하에서도 더욱 신뢰성 있는 운전이 가능하도록 하기 위한 많은 연구가 진행되어왔다[2].

유압시스템을 적용하는 모든 장비에 있어서 고압화는 꾸준히 진행되고 있는 부분이며, 따라서, 고압화를 위한 각종 소재의 개발, 기구의 개량 등이 필요하다.

현재 일본과 한국에서 생산하는 피스톤 펌프는 주로 35MPa까지 사용가능하나 주요 메이커들을 중심으로 끊

*Corresponding Author : Bong-Soo Jeong(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-4871 email: jbs5511@jbnu.ac.kr

Received November 26, 2014

Revised January 6, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

임없는 발전을 거듭해온 유럽의 경우는 이미 40MPa이상 까지 사용가능한 펌프를 생산하고 있다.

이와 같은 고압화에 대응하여 피스톤 펌프의 구조해석이 절실하게 필요한 상황이다. 구조체에 하중이 가해지면 그 구조체에는 변형이 일어나게 되며, 이러한 변형에 따라 구조체에 가해지는 외력과 평형을 이루는 내부 응력이 발생한다. 최적의 구조설계를 위해서는 정확한 구조해석이 선행되어야 하며, 최적설계를 얻기 위해서는 구조해석과 설계가 반복적으로 이루어져야 한다.

그러나 지금까지 유압펌프의 응력해석에 대한 연구는 그렇게 활발하게 이루어지지 않는 상태이다[3]. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 고압화에 대응하기 위해 사판식 유압 피스톤 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트에 대해 정적응력해석을 수행하였으며, 이 연구를 통해 실린더 블록과 밸브 플레이트에 있어서 응력분포와 변형의 형태에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 응력해석

2.1 유한요소해석과 해석프로그램

여러 수치해석 방법 중 FEM(Finite Element Method)은 그 우수한 특징 때문에 현재 다양한 공학 분야에서 가장 널리 사용되고 있으며, 시판되고 있는 소프트웨어도 상당히 많다. 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 통하여 전반적인 구조물이나 부품의 변형 모양이나 응력 분포를 빠르고 경제적인 방법으로 확인할 수 있으며, 설계의 초기나 설계 변경 단계에서 가장 경제적이면서 설계시간의 단축이 가능하여 널리 이용되고 있다 [4-9].

본 연구에서는 CATIA V5를 사용하였으며, 본 프로그램은 설계개념에서부터 제품생산까지 전 과정에 걸쳐 설계, 시뮬레이션, 구조해석 등을 수행할 수 있는 프로그램으로서 널리 사용되어지고 있다.

2.2 해석모델

실린더 블록과 밸브 플레이트의 상대 슬라이딩 부는 사판식 펌프에서 대표적인 윤활부로, 고정된 밸브 플레이트 위를 실린더 블록이 고속·고압의 상태로 회전할 때, 실린더 블록을 왕복 운동하는 피스톤에 의해 작동유가 밸브 플레이트의 흡입 및 토출 포트를 통해 흡입·토

출되기 때문에 액설 타입의 펌프 중 가장 중요한 부분이 되며, 최소마찰과 최소 누설, 높은 체적 효율을 위해 힘의 밸런스가 요구되는 부분이다[1].

본 연구에서 사용된 해석 모델은 배출용적 140cc/rev인 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트이다. 일반적으로 윤활적인 측면에서 서로 딱딱한 재질끼리 접촉운동을 하는 경우가 딱딱한 재질과 연한 재질끼리의 경우보다 마모가 심하기 때문에, 실린더 블록은 딱딱한 재질, 밸브 플레이트는 연한 재질을 사용하거나, 서로의 접촉부에 해당하는 실린더 블록의 뒷면에 어느 정도의 두께를 가진 동합금을 용착하여 사용하는 것이 대부분이며, 본 연구에 사용된 실린더 블록은 SCM440, 실린더 블록 뒷면의 접합 부위에는 황동, 밸브 플레이트는 SCM 420의 재질을 사용하여 해석을 수행하였다. 그 기계적 성질은 Table 1과 같으며, Fig. 1과 Fig. 2는 본 해석에 사용된 모델의 형상을 보여주고 있다.

Table 1. Mechanical properties of the models

Parts	Cylinder block	Cylinder block heterojunction	Valve plate
Material	SCM440	Yellow Brass	SCM420
Young Modulus	205GPa	105GPa	205GPa
Poisson Ratio	0.29	0.346	0.29
Density	7850kg/m ³	8470kg/m ³	7850kg/m ³
Yield Strength	580MPa	435MPa	435MPa

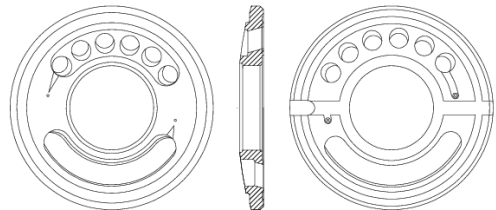


Fig. 1. Shape of the valve plate

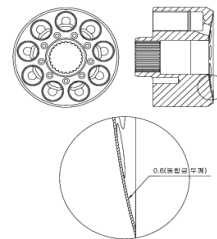


Fig. 2. Shape of the cylinder block

2.3 해석방법

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 본 해석을 위해 구성된 실린더 블록과 밸브 플레이트의 유한 요소 모델을 도시한 것이다. 요소의 수는 실린더 블록의 경우 187,782개이고 절점의 수는 41,937, 밸브 플레이트의 경우는 요소의 수는 22,702이고 절점의 수는 6,143개이다.

하중조건으로서 실린더 블록의 경우는 Table 2와 같이 4가지 경우의 압력 분포 조건을 정의하였다. 크게 2가지 경우로 분류하여 A의 경우는 9개의 실린더 보어 모두에 압력이 작용하였을 경우이며, B의 경우는 5개의 실린더 보어에 토출압력이 작용한다고 가정하였을 경우에 해당된다. 그리고 A의 경우는 3가지(실린더 보어 전면, 반경 방향, 수직방향)로 분류하였다.

물론, A-2, A-3와 같은 가정은 이론적으로만 가능하며, 압력의 작용 방향의 영향을 살펴보고 압력을 지지하는 방향을 정확하게 파악하기 위한 것이 그 목적이다. 밸브 플레이트의 경우에는 토출포트 부위에만 압력이 작용한다는 가정 하에 응력해석을 수행하였다. 작용압력은 40, 45, 50MPa로 주었다.

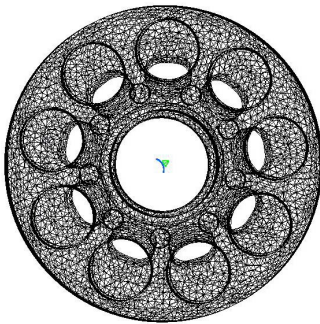


Fig. 3. Finite element model of the cylinder block

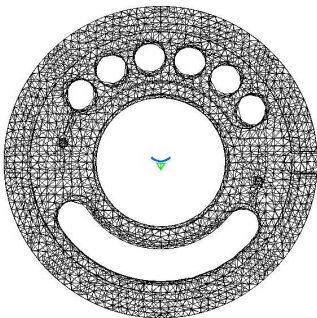


Fig. 4. Finite element model of the valve plate

Table 2. Analysis conditions

Case	Pressure conditions
A-1	The pressure acts in all directions to all nine of the cylinder bores
A-2	The pressure acts in only radial direction to all nine of the cylinder bores
A-3	The pressure acts in only axial direction to all nine of the cylinder bores
B	The pressure acts in all directions to only five of the cylinder bores(discharge region)

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 실린더 블록

위와 같은 해석조건을 설정한 후, 40, 45, 50MPa의 압력을 작용시켰을 경우에 실린더 블록에 발생하는 최대 응력을 Table 3과 Fig. 5에, 변위량을 Table 4와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Table 3. Maximum stress of the cylinder block(MPa)

Applied pressure Case	40MPa	45MPa	50MPa
A-1	68.2	76.7	85.2
A-2	51.1	57.5	63.9
A-3	30.8	34.7	38.5
B	86.7	97.6	108

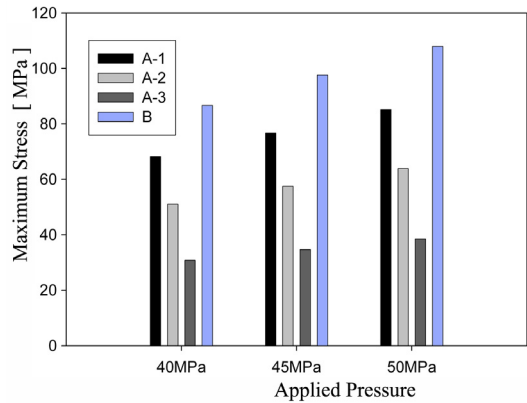


Fig. 5. Maximum stress of the cylinder block

각각의 경우에 대해 작용압력이 5MPa씩 증가할 때 최대 응력과 최대 변위량도 그에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 네 가지의 경우 중 5개의 실린더 보어에 토출압력이 작용한다고 가정한 B의 경우에 최대 응력 및

변위량이 가장 크게 나타나고 있다. 작용압력이 50MPa 일 때 최대응력은 108MPa이고 이것은 실린더 블록의 뒷면 동합금 부위에서 발생하며, 실린더 블록의 주 재질부인 SCM440에서는 실린더 보어 안에서 35-60MPa의 응력 분포를 보여주고 있다.

반복적인 응력을 받는 부품의 경우에 통상적으로 사용 재질 항복응력의 30-40%이내가 되고 최대 변위량이 설계허용치 이하가 되어야 함이 바람직하다. 50MPa이 작용했을 경우 황동 부위는 재질 항복강도의 24.8%정도로 안전하다고 할 수 있다.

9개의 실린더 보어에 압력이 작용한다고 가정했을 경우(A-1)보다 토출부에 해당되는 5개의 실린더에 압력이 작용한다고 가정한 경우(B)에 최대응력과 최대 변위량이 더 크게 발생함을 알 수 있으며, 이는 전체적으로 압력이 작용할 경우는 축을 중심으로 균형을 이루는 하중 및 모멘트를 받기 때문이고, 5개의 실린더 보어에만 압력이 작용하였을 경우에는 축을 중심으로 압력이 가해지는 토출부로 하중 및 모멘트를 치우치게 받기 때문이라고 여겨진다.

Table 4. Maximum displacement of the cylinder block(mm)

Applied pressure Case	40MPa	45MPa	50MPa
A-1	1.91	2.15	2.39
A-2	1.70	1.91	2.12
A-3	1.31	1.48	1.64
B	3.52	3.96	4.40

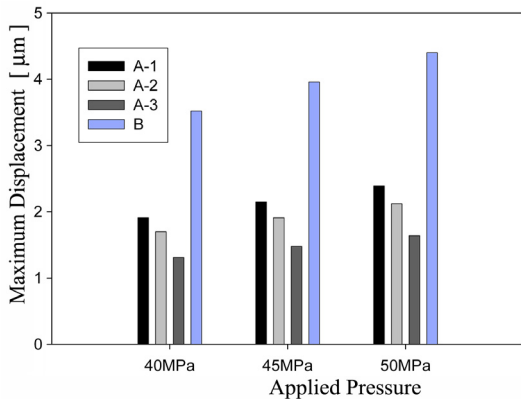


Fig. 6. Maximum displacement of the cylinder block

Fig. 5와 Fig. 6에서 A-2(실린더 보어의 반경방향으로만 압력을 가한 경우), A-3(실린더 보어의 밑 부분으로

축방향과 평행하게 압력을 준 경우)의 최대 응력값과 최대 변위량이 A-2의 경우가 더 크게 나온 것으로 보아 실린더 블록에서 발생하는 응력과 변위량은 반경방향으로의 작용압력이 더 큰 영향을 주고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 조건이 B일 때, 응력과 변위량을 각각 보여주고 있으며, Fig. 7의 A점은 최대응력이 발생하는 곳을, Fig. 8의 B점은 최대변위가 발생하는 지점을 나타내고 있다.

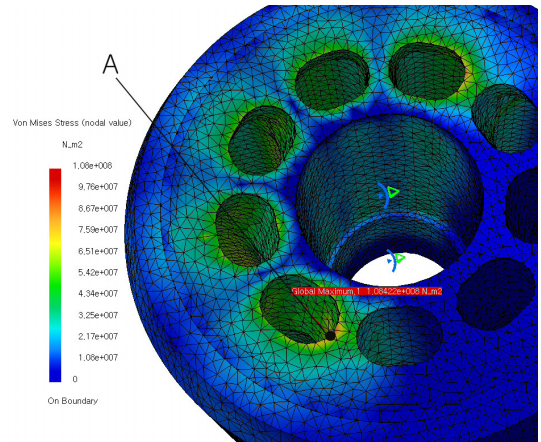


Fig. 7. The maximum stress point of the cylinder block(Case B at 50MPa)

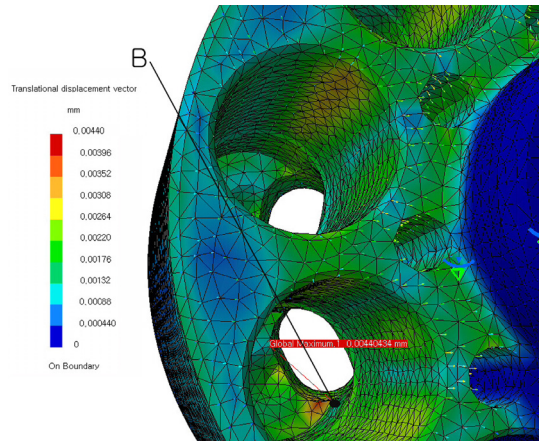


Fig. 8. The maximum displacement point of the cylinder block(Case B at 50MPa)

최대응력 발생 지점은 5개의 실린더 중 가장 바깥쪽의 실린더에서 나타나고, 실린더 블록의 뒤쪽, 밸브 플레

이트의 토출포트로 연결되는 부분이며 대략 실린더 중심에서 포트에 접점을 그었을 때의 접점 부근에서 최대응력이 발생한다. 최대 변위가 발생하는 곳은 역시 5개의 실린더 중 가장 바깥쪽 실린더의 밑 부분에서 발생한다.

3.2 밸브 플레이트

밸브 플레이트에 있어서도 실린더 블록의 해석과 마찬가지로 압력값에 40, 45, 50MPa의 압력을 적용하여 구한 최대응력과 최대 변위량을 Table 5에 표시하였다.

Table 5. Maximum stress and displacement of the valve plate

Applied pressure Item	40MPa	45MPa	50MPa
Max. Stress(MPa)	157	177	196
Max. Displacement(mm)	5.55	6.24	7.0

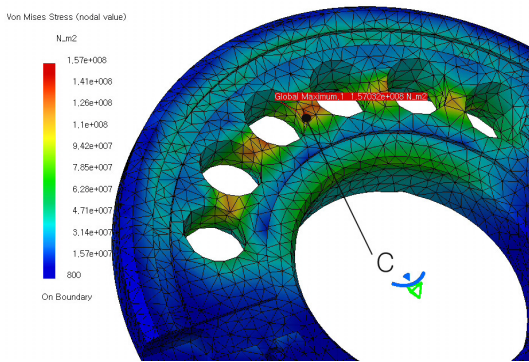


Fig. 9. The maximum stress point of the valve plate (at 40MPa)

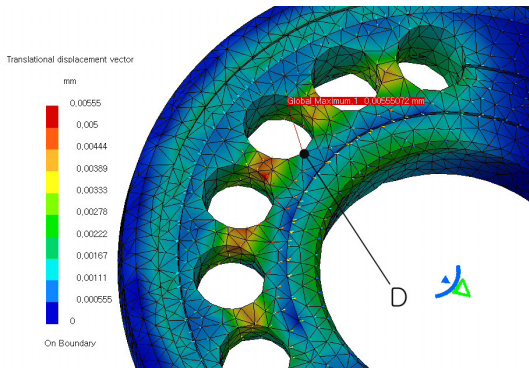


Fig. 10. The maximum displacement point of the valve plate(at 40MPa)

밸브 플레이트의 경우에는 최대응력 값이 실린더 블록에 비해 상당히 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 재질 및 기하학적인 형상의 영향으로 보여 진다. 사용 재질인 SCM420의 항복강도가 435MPa이므로 작용 압력 40, 45, 50MPa의 경우에 최대응력은 항복강도의 각각 36.1, 40.7, 45.1%를 나타내고 있다. 따라서 본 해석에 사용된 SCM420은 40MPa, 45MPa 정도까지는 어느 정도 안전하게 사용될 수 있을 것이라 생각되나 그 이상의 압력에서의 사용을 위해서는 재질의 변경이나 설계변경이 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 40MPa일 때의 응력과 변위 분포를 보여주고 있으며, Fig. 9의 C점에서 최대응력, Fig 10의 D점에서 최대변위가 발생한다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대응력과 변위는 모두 밸브 플레이트의 뒷면에서 나타남을 알 수 있다.

Fig. 11은 응력에 의해 변형이 일어나는 형상을 프로그램 내의 deformation scale factor라는 값을 조정하여 이해하기 쉽게 표현한 것으로 밸브 플레이트는 주로 뒷부분에서 실린더 중심쪽으로 쏠려 올라가는 형상으로 변형이 일어남을 볼 수 있다.

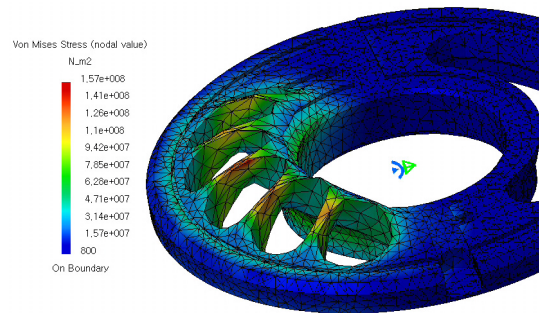


Fig 11. The shape of the deformation of the valve plate(at 40MPa)

4. 결론

사판식 유압 피스톤 펌프의 실린더 블록과 밸브 플레이트에 대하여 응력해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실린더 블록의 경우 5개의 실린더 보어에 압력이 작용한다고 가정했을 경우에 전체 실린더 보어에 압력이 작용한다고 가정했을 때보다 더 큰 응력과

변위가 발생함을 알 수 있었고, 이것은 축에 대해 비대칭에 의한 결과이며, 최대 응력은 실린더 뒷부분 동 재질의 접합 소재에 발생함을 확인할 수 있었다.

- (2) 실린더 블록에서 발생하는 응력과 변위는 축방향 작용압력에 비해 반경방향 작용압력에서 더 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었으며, 응력은 약 66%, 변위는 약 30% 더 크게 나타났다.
- (3) 벨브 플레이트의 경우 사용재질에 대해 50MPa이 작용 시에는 허용응력 값을 넘어 사용에 부적절함을 알 수 있었고, 재질 및 형상에 대한 검토가 요구됨을 알 수 있었다.

따라서 본 연구를 통하여 정적인 조건에서 사판식 피스톤 펌프의 실린더 블록과 벨브 플레이트에 발생하는 응력 및 변형량을 명확하게 얻어낼 수 있었고 이를 실제 설계 자료로 적용할 수 있을 것으로 여겨지며, 향후 고압조건에서의 최적설계를 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

References

- [1] J. Y. Jung and I. S. Cho, "The Tribology of Core Oil Hydraulic Pumps", *Journal of the KSFC*, Vol. 10, No. 1, pp. 38-45, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2013.10.1.038>
- [2] I. S. Cho, "Theoretical Analysis of the Slipper Hydrostatic Bearing Shape in the Swash Plate Type Axial Piston Pump", *Journal of the KSFC*, Vol. 10, No. 1, pp. 14-20, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2013.10.1.014>
- [3] C. T. Lee, "Development of Monolith Type Driving Pulley of Power Steering Hydraulic Pump", *Journal of the KFPS*, Vol. 7, No. 4, pp. 9-14, 2010
- [4] J. S. Lee, "Structure Improvement and New Product Development of Cleaning Machine", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 8, pp. 4784-4789, 2014
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.8.4784>
- [5] J. H. Choi and J. H. Kim, "Multi Degree of Freedom Linear Electric Generator for Structural Concerns and Electric Generation Improvement of the Linear Electric Generator in a Vehicle Suspension", *Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society*, Vol.

15, No. 9, pp. 5452-5459, 2014

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.9.5452>

- [6] K. H. Kim, Y. S. Lee and J. D. Han, "Stress Analysis of Plate-Spring-Type Landing Gear Materials", *Trans. KSME, Series A*, Vol. 38, No. 3, pp. 303-308, 2014
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.3.303>
- [7] J. H. Kang, D. Y. Lee, J. S. Kim, Z. Z. Xu and S. K. Lyu, "A Study on 3D Modeling & Stress Analysis of Helical Conical Involute Gear", *Journal of the KSMPE*, Vol. 13, No. 1, pp. 45-51, 2014
DOI: <http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.1.045>
- [8] J. G. Kim and J. K. Lee, "Three Dimensional Stress Analysis of a Dental Implant with Central Cavity", *Journal of the Korea Academia -Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 5, pp. 2197-2202, 2011
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.5.2197>
- [9] K. K. Jin, S. K. Ha, J. H. Kim, H. H. Han and S. J. Kim, "Life Prediction of Composite Pressure Vessels Using Multi-Scale Approach", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 11, No. 9, pp. 3176-3183, 2010
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.9.3176>

정 봉 수(Bong-Soo Jeong)

[정회원]



- 1978년 10월 ~ 1980년 2월 : 대우자동차 제품설계부 근무
- 1980년 3월 ~ 1984년 2월 : 호원대학교 기계공학과 조교수
- 1984년 8월 : 단국대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1990년 3월 : 일본 동북대학교 공학연구과 (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 융합기술공학부 교수

<관심분야>

파괴역학, 응력해석, Tribology