

자동차 연료펌프의 유동 및 진동 해석과 성능시험에 관한 연구

손재환¹, 배정섭¹, 김영석², 한창우^{3*}
¹대구기계부품연구원, ²경북대학교 기계공학부, ³영남이공대학 자동차과

A Study on Flow and Vibration Analysis, and Performance Test for Automotive Fuel Pump

Jae-Hwan Son¹, Jung-Sub Bae¹, Young-Suk Kim² and Chang-Woo Han^{3*}

¹Daegu Mechatronics & Materials Institute

²School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

³Division of Automobile, Yeungnam College of Science & Technology

요 약 엔진에 장착된 자동차용 연료펌프는 외부 및 내부 로터로 구성되어 있으며, 내부 로터는 입구로부터 연료를 흡입하여 출구로 배출한다. 본 연구에서는 로터가 장착된 연료펌프의 성능을 평가하기 위해 해석 및 시험을 수행하였다. 입출구 포트 각도가 0, 15, 30°에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 연료펌프의 유동 특성을 해석하였다. 가장 우수한 유동 특성을 가진 펌프를 결정한 후 진동 특성을 해석하였다. 그 결과 유량은 입출구 포트 각도가 0°에서 191.0 LPH로 가장 우수하게 나타났으며, 진동은 0.866 %로 계산되었다. 진동 시험 결과를 통해 연구된 펌프가 기존의 펌프에 비해 작은 진동을 가지고 있음을 알 수 있었다. 그리고 두 펌프의 고유진동수들은 거의 일치하였다. 따라서 연구된 펌프의 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

Abstract The fuel pump mounted on the engine in the vehicle is consist of the outer and inter rotors, and which inhales fuel from the inlet port and supplies it to the outlet port. In this study, it is carried out the analysis and test of the fuel pump with rotors to evaluate its performance. It is analyzed the flow characteristics of the fuel pumps with numerical simulation in their inlet-outlet angles of 0, 15, 30 degree. After it is determined whether it has the best flow characteristics, its vibration characteristics is analyzed. The flow rate of a pump in the inlet-outlet angles of 0 degree is 191.0 LPH(Liter per hour) which is the largest. and its vibration is calculated to be 0.866 %. In the results of vibration test, it is known that the vibration of the research pump is smaller than that of the existing one. And the natural frequencies of two pumps is nearly same. Therefore it is known that the performance of the research pump is superior.

Key Words : Rotors, Fuel Pump, Flow Analysis, Vibration Analysis, Vibration Test

1. 서론

내부 로터와 외부 로터로 구성된 자동차의 연료펌프(fuel pump)는 유량이 원활히 공급되어야 하며 진동으로 인한 성능저하가 방지되어야 한다. 따라서 큰 유량(flow rate)을 가지면서 그 맥동(pulsation)은 최소화되어야 한다. 그리고 연료의 흡·배출시 발생하는 진동도 억제되어

야 한다.

Colbourne[1]은 내부 로터와 외부 로터의 접촉을 시뮬레이션 하여 내부 로터 치형 형상에 대해 연구하였고, 내부 로터와 외부 로터의 치형 곡선으로 폐쇄되는 챔버(chamber)의 면적을 계산하였다. Sae-gusa[2] 등은 내부 로터를 고정시키고 외부 로터를 회전시켜 외부 로터 치형의 궤적을 구하였고, 내부 로터와 외부 로터의 물림 특

*Corresponding Author : Chang-Woo Han

Tel: +82-11-825-2620 email: cwihan@ync.ac.kr

접수일 12년 01월 30일

수정일 12년 03월 13일

게재확정일 12년 04월 12일

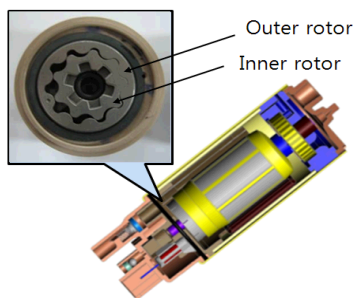
성으로부터 내부 로터의 치형을 구하는 식을 유도하였다. Tsay[3,4]는 내부 로터의 절삭과정을 시뮬레이션 하여 그 치형을 구하는 방법을 연구하였다. 이성철[5] 등은 내부 로터와 외부 로터의 운전 특성을 해석하였고, Mimmi[6] 등은 인벌류트 기어 펌프와 로터 펌프의 유량과 그 맥동을 비교 고찰하였다. 김충연[7] 등은 로터 설계변수에 따른 접촉응력의 변화를 관찰하였다. 또한 김철^[8-10] 등은 로터 펌프에서 외부 로터의 치형 형상이 트로코이드 원일 경우에 그 치형 방정식을 유도하였으며, 이를 토대로 내·외부 로터 및 접촉점의 궤적, 회전시뮬레이션, 유량 및 그 맥동 등을 계산하는 통합적 시스템에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 연료펌프의 성능을 평가하기 위해 유동 및 진동 해석을 수행하였다. 유동 해석에서는 입출구 포트각이 각각 0, 15, 30°인 3가지 모델에서 유량과 그 맥동을 예측하였다. 그리고 그 유량값들이 요구 토출량 190.0 LPH(Liter Per Hour)을 모두 만족하는지를 평가하였다. 3가지 모델 중에서 큰 유량을 가지면서 그 맥동이 적은 가장 만족할 만한 모델을 결정하였다. 진동 해석에서는 결정된 모델에서 발생하는 일정주기의 가속도 값을 예측하였다. 그리고 기존의 펌프 A와 그 성능 개선을 위해 유동과 진동특성을 해석한 펌프 B의 진동 및 고유진동수 비교 시험을 통해 진동 성능 개선을 검증하였다. 따라서 자동차 연료펌프의 유동 및 진동 해석과 성능시험에 관한 연구를 통해 그 성능이 개선되었음을 알 수 있었다.

2. 모델링 및 해석조건

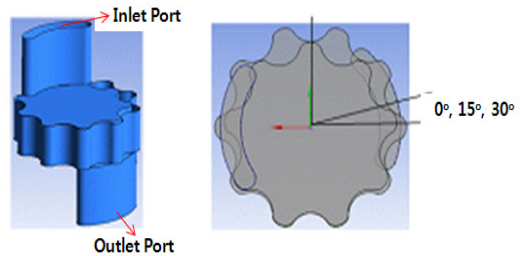
2.1 유동 해석

대상제품은 자동차 뒤쪽 하부에 위치한 연료탱크에 부착된 연료펌프로써 그림 1과 같이 내부 및 외부 로터로 구성되어 있다.



[그림 1] 연료 펌프의 형상
[Fig. 1] Scheme of fuel pump

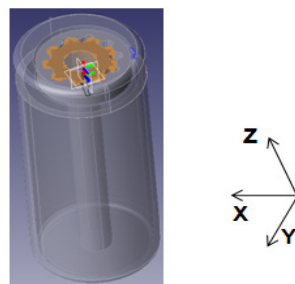
대상제품을 유동 해석하기 위해 그림 2와 같이 입출구 포트각을 0, 15, 30°로 변화시켜 3가지 유형으로 모델링 하였다. 유한요소 생성은 ANSYS ICEM CFD를 이용하였으며, 속도구배가 클 것으로 예상되는 작동유체의 경계층 부분은 요소분할(mesh) 층을 세밀하게 구성하였다. 입출구 포트, 작동 유체, 내부 로터의 요소 수(element)는 각각 78300, 180540, 145962 개로 하였으며, 작동유체는 디젤유로 설정하였다. 그리고 내부 및 외부 로터의 회전 속도는 각각 4800, 4325 rpm으로 설정하여 해석하였다.



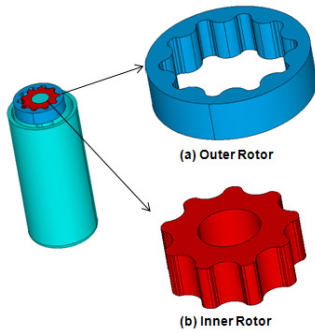
[그림 2] 유동해석 모델
[Fig. 2] The model in the flow analysis

2.2 진동 해석

진동 해석에 사용된 모델은 그림 3과 같으며, 내부 및 외부 로터와 이를 감싸고 있는 모터 케이스, 커버 등으로 구성되어 있다. 외부 커버 위에서 아래 방향으로 중력 방향을 작용시켰다. 고유진동수 해석의 모델은 그림 4에서 처럼 바닥면에 구속시키지 않았으며, 탄성계수 1.41 × 10⁶ MPa, 푸와송비 0.3, 밀도 7152 kg/m³의 물성치를 부여하여 해석하였다.



[그림 3] 진동해석 모델
[Fig. 3] The model in the vibration analysis

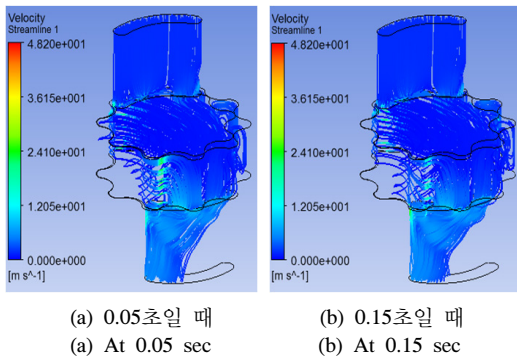


[그림 4] 고유진동수 해석 모델
[Fig. 4] The model in the natural frequency analysis

3. 해석결과

3.1 유동 해석

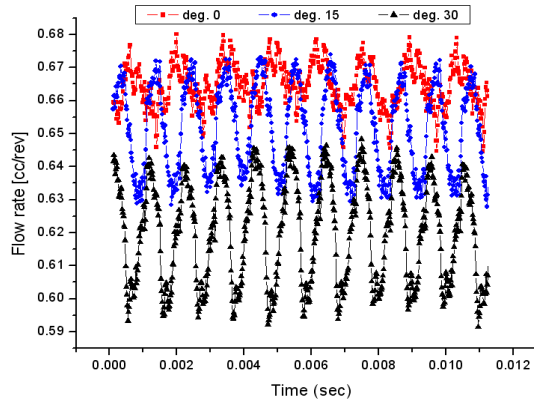
유동 해석결과 그림 5에서처럼 입출구 포트각 0°에서 입구와 출구 포트 사이에 유선이 형성됨을 알 수 있다. 출구 포트에서 유량은 0.644~0.681 cc/rev로 계산되므로, 평균 유량과 맥동은 각각 0.663, 0.037 cc/rev이다. 맥동은 평균 유량 대비 5.6 %로 비교적 낮으므로 소음이 작게 발생될 것으로 판단된다. 입출구 포트각 15, 30°에서 시간 경과에 따른 유속 분포, 유량, 맥동의 변화에 대한 해석결과는 0°에서의와 유사한 경향을 가진다.



[그림 5] 입·출구 포트 각 0°일 때 유속
[Fig. 5] Fluid velocity at inlet-outlet port angle of 0°

[표 1] 3가지 모델의 해석결과
[Table 1] The analysis results of 3 models

Inlet-outlet port angle [°]	Pulsation [cc/rev]	Flow rate [LPH]
0	0.037	191.0
15	0.047	188.6
30	0.056	178.6

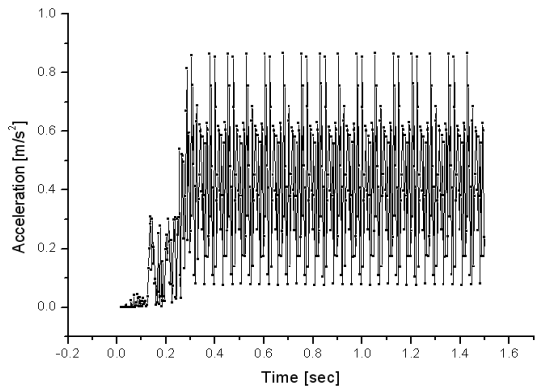


[그림 6] 3가지 모델의 유량 비교 결과
[Fig. 6] The results compared with flow rate of 3 models

이 3가지 모델의 유량 계산 결과는 그림 6에, 유량과 맥동의 결과는 표 1에 나타내었다. 입출구 포트각 0, 15, 30°에서 맥동은 평균 유량 대비 5.6, 7.2, 9.0 %로 미소하고 그 유량도 일정한 값에 수렴한다. 이 중 입출구 포트 각 0°에서 시간당 유량과 그에 대한 맥동률은 각각 191.0 LPH, 5.6 %로 가장 우수한 결과가 도출되었다. 그리고 190 LPH 이상인 허용 유량값을 만족하였다.

3.2 진동 해석

진동 해석의 결과는 그림 7에 나타내었다. 구동부의 특성과 재질에 의해 결정되는 병진력(translational force)과 회전력(rotational force)의 강성 및 감쇠 값은 제조사에서 제시한 값을 사용하였다. 가속도는 0.3초까지 과도상태를 유지하다가 이후에 0.085~0.866 % 범위에서 정상화되었다. 따라서 허용 가속도 1.3 % 이내의 진동 해석 결과를 얻을 수 있었다.

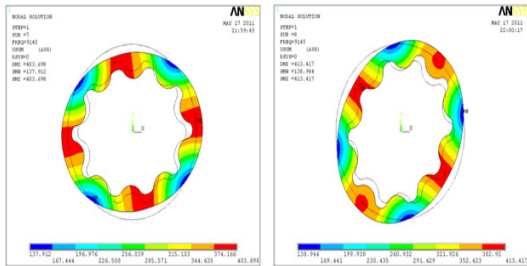


[그림 7] 진동 해석 결과
[Fig. 7] The result of vibration analysis

표 2에서와 같이 외부 및 내부 로터의 고유진동수는 1, 2차에서 각각 9140, 9145 Hz와 44250, 44298 Hz이다. 연료펌프는 80 Hz로 운전되므로 하모닉(harmonic) 성분을 고려해도 고유진동수와 일치하지 않으므로 공진은 일어나지 않는다고 판단된다.

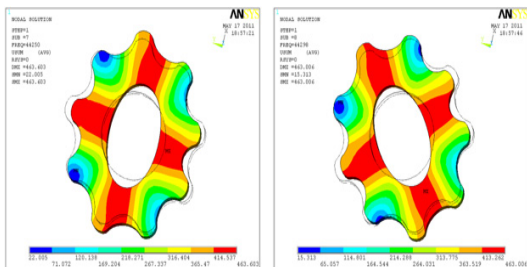
[표 2] 외부 및 내부 로터의 고유진동수
[Table 2] The natural frequency of outer and inner rotor

Mode	Natural frequency [Hz]	
	Outer rotor	Inner rotor
1	9140	44250
2	9145	44298



(a) 1차 모드 (a) 1st mode
(b) 2차 모드 (b) 2nd mode

[그림 8] 외부 로터의 진동 모드 형상
[Fig. 8] The mode shape in the vibration of outer rotor



(a) 1차 모드 (a) 1st mode
(b) 2차 모드 (b) 2nd mode

[그림 9] 내부 로터의 진동 모드 형상
[Fig. 9] The mode shape in the vibration of inner rotor

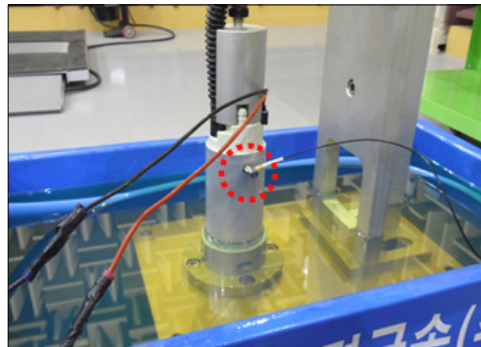
4. 성능시험

4.1 진동시험

그림 10과 같이 압소음 14 dBA의 소음 반무향실 시험 환경에서 가속도계(Rion: PV-90B)를 연료 펌프의 본체에 부착한 후 주파수분석기(LMS Test Lab)로 진동시험하였

다. 시험에는 기존의 펌프A와 연구된 펌프B가 사용되었으며, 연료펌프에 공급되는 전원 조건 12, 13V에서 실시하였다. 그리고 작동유 미공급 상태에서 약조건에서도 진동 성능을 확인하였다.

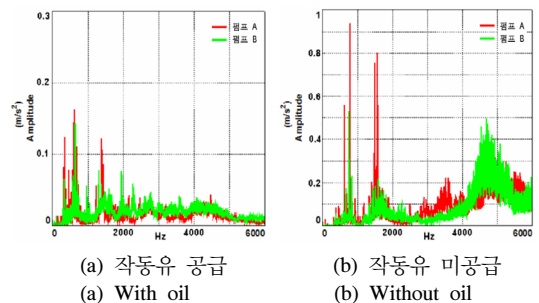
시험 결과 작동유 공급 유무에 관계없이 펌프 B의 최대 진동이 펌프A에 비해 작게 나타났다. 작동유 미공급 상태에서 펌프B의 최대 진동은 0.71 %로 펌프A의 최대 진동 0.97 % 보다 작게 나타나 그 성능이 우수함을 알 수 있었다. 이는 펌프A에 대한 펌프B의 로터 치형 프로파일의 치수변화에 대한 개선효과라 판단된다^[11].



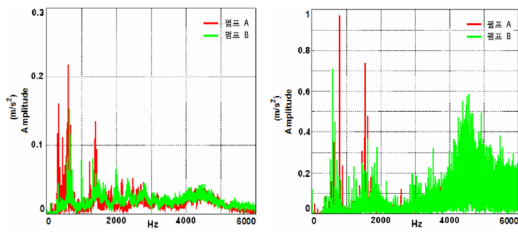
[그림 10] 진동시험 장치
[Fig. 10] Vibration test device

[표 3] 연료 펌프의 최대 진동
[Table 3] Maximum vibration of fuel pumps [unit : %]

Pump condition	Pump A		Pump B	
	12V	13V	12V	13V
With oil	0.16	0.22	0.14	0.15
Without oil	0.94	0.97	0.53	0.71



(a) 작동유 공급 (a) With oil
(b) 작동유 미공급 (b) Without oil
[그림 11] 12V에서의 펌프 A, B의 진동
[Fig. 11] Vibrations of pump A & B at 12V



(a) 작동유 공급 (a) With oil
(b) 작동유 미공급 (b) Without oil

[그림 12] 13V에서의 펌프 A, B의 진동
[Fig. 12] Vibrations of pump A & B at 13V

그리고 개발된 펌프B의 최대진동 시험값 0.71 %는 해석값 0.866 %보다 작게 나타나며, 그 차이는 22.0%로 해석과 시험 조건들을 일치시키기 어렵다는 점을 고려해 볼 때 비교적 우수한 해석 검증이 이루어졌다고 판단된다. 또한 그 시험값은 허용 가속도 1.3 % 이내로, 우수한 진동 성능을 얻을 수 있었다.

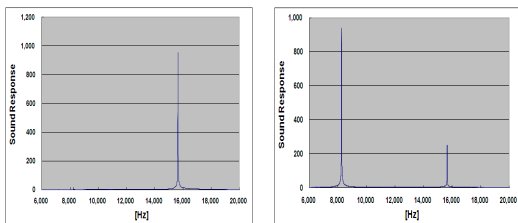
4.2 고유진동수 시험

그림 13과 같이 축 및 반경의 2가지 방향에서 로터를 충격 가진하고, 방사되는 음압을 측정하여 고유진동수와 감쇠 계수를 계산하였다. 임팩트 헤머 및 콘텐서 마이크 로폰을 사용하여 시험하였으며, 가속도 오버올(overall) 분석^[12]을 통하여 고유진동수를 추출하였다.



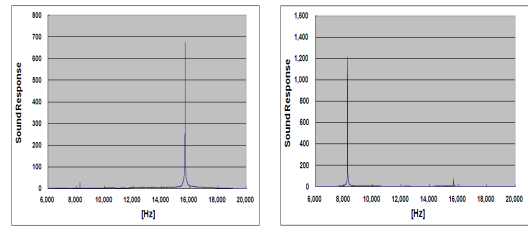
(a) 축방향 (a) Axial direction
(b) 반경방향 (b) Radial direction

[그림 13] 가진방향에 따른 고유진동수 시험
[Fig. 13] Natural frequency test for impact direction



(a) 축방향 (a) Axial direction
(b) 반경방향 (b) Radial direction

[그림 14] 펌프 A의 고유진동수
[Fig. 14] The natural frequency for pump A



(a) 축방향 (a) Axial direction
(b) 반경방향 (b) Radial direction

[그림 15] 펌프 B의 고유진동수
[Fig. 15] The natural frequency for pump B

그림 14 및 15와 같이 펌프A의 축방향 고유진동수는 15430 Hz로 나타났으며, 펌프B도 0.2% 차이를 보이고 있다.

그리고 펌프A의 반경방향 1, 2차 고유진동수는 각각 8250, 15660 Hz로 나타났으며, 펌프B도 0.1% 차이를 보이고 있었다. 따라서 펌프A와 B는 동등한 수준의 고유진동수를 가지고 있음을 알 수 있었다.

그리고 펌프B와 같은 구조물의 경우 반경방향으로 힘을 받으므로 그 방향의 1차 모드의 고유진동수가 큰 영향을 미친다. 따라서 해당 고유진동수 8258 Hz는 표 2의 해석치 9140 Hz와 10.7 %의 차이를 보이고 있어 해석과 시험 조건들을 일치시키기 어렵다는 점을 고려해 볼 때 비교적 우수한 해석 검증이 이루어졌다고 판단된다. 또한, 연료펌프 운전주파수 80 Hz의 하모닉(harmonic) 성분과 일치하지 않으므로 공진은 일어나지 않는다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차 연료펌프의 유동 및 진동특성 해석을 하였고, 기존의 펌프A와 연구된 펌프B의 비교 시험을 통해 성능을 검증하였다. 입출구 포트각 0, 15, 30°에서 유량과 그 맥동을 예측한 결과 포트각 0°에서 가장 만족할 만한 모델을 도출할 수 있었고 허용 유량값을 만족하였다. 또한 진동 해석을 통해 계산된 최대 가속도가 허용가속도 이내로 평가되었다. 또한 진동 시험에서는 본 연구에서 개발된 펌프B의 최대 진동값이 기존의 펌프A보다 작게 나타나 그 성능이 우수하게 평가되었다. 고유진동수 시험에서는 펌프B와 펌프A의 고유진동수가 동등한 수준을 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한 펌프B의 진동 및 고유진동수 시험을 통하여 비교적 우수한 해석 검증이 이루어졌을 뿐 아니라 허용치 값을 만족하였다. 따라서 연료펌프의 성능을 결정하는 유량과 맥동, 최대 가속도, 그리고 고유진동수 관점에서 볼 때 연구된 펌프B의 성능이 우수하다는 것을 판단할 수 있었다.

References

- [1] Colbourne, J. R., "Gear Shape and Theoretical Flow Rate in Internal Gear Pump," Transactions of the CSME, Vol. 3, No. 4, pp. 215-223, 1975.
- [2] Saegusa, Y., Urashima, K., Sugimoto, M., Onoda, M. and Koiso, T., "Development of Oil-Pump Rotors with a Trochoidal Tooth Shape," SAE Paper, No. 840454, 1984.
- [3] Tsay, C. B.. and Yu, C. Y., "Mathematical Model for the Profile of Gerotor Pumps," Journal of CSME, Vol. 10, No. 1, pp. 41-47, 1989.
- [4] Yu, C. Y.. and Tsay, C. B., "The Mathematical Model of Gerotor Pump Applicable to Its Characteristic Study," Journal of CSME, Vol. 11, No. 4, pp. 385-391, 1990.
- [5] Lee, S. C.. and Lee, S. N., "Design and Analysis of Gerotor for Hydraulic Motors," Journal of KSTLE, Vol. 11, No. 2, pp. 63-70, 1995.
- [6] Mimmi, G. C.. and Pennacchi, P. E., "Involute Gear Pumps Versus Lobe Pumps: A Comparison," Journal of Mechanical Design, Vol. 119, Issue. 4, pp. 458-468, 1997.
- [7] Kim, C. H., Kim, D. I., Ahn, H. S. and Chong, T. H., "Analysis of Tooth Contact Stress of Gerotor Hydraulic Motors," Journal of KSTLE, Vol. 15, No. 2, pp. 164-170, 1999.
- [8] Kim, J. H.. and Kim, C., "Development of an Integrated System of Automated Design of Gerotor Oil Pump," J. of KSPE Vol. 23, No. 2, pp. 88-96, 2006.
- [9] Kim, J. H., Kim, C., and Chang, Y. J., "Optimum Design on Lobe Shapes of Gerotor Oil Pump," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, Issue 9, pp. 1390-1398, 2006.
- [10] Chang, Y. J., Kim, J. H., Jeon, C. H., Kim, C.. and Jung, S. Y., "Development of an Integrated System for the Automated Design of a Gerotor Oil Pump," Journal of Mechanical Design, Vol. 129, Issue 10, pp. 1099-1105, 2007.
- [11] J. H. Son, H. Y. Lee, S. H. Park, J. H. Jung, D. J. Kim, and C. W. Han, "The Study on the Rotor Tooth Profile in Diesel Oil Pump with Metal Powder Sintering Process," 2010 Spring Proceeding of KSPE, pp.901-902, 2010.
- [12] Han, C. W., Son, J. H., Lee, S. R., and Lee. C. Y., "The Study on the Sheet Quality Estimation in the Horizontal Diecut Process," 2010 Spring Proceeding of KSME, pp .67-68, 2010.

손 재 환(Jae-Hwan Son)

[정회원]



- 2009년 2월 : 경북대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 11월 ~ 현재 : 대구기계부품연구원 메카트로닉스센터 책임연구원(팀장)

<관심분야>

기계설계, 정밀가공시스템, 토탈에너지링솔루션 기술개발

배 정 섭(Jung-Sub Bae)

[정회원]



- 2002년 2월 : 계명대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 12월 ~ 2007년 12월 : 평화산업 기술연구소 연구원
- 2007년 12월 ~ 현재 : 대구기계부품연구원 메카트로닉스센터 선임연구원

<관심분야>

소음진동분야, 방진고무

김 영 석(Young-Suk Kim)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 4월 : 일본 Kobe 대학교 기계공학 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1994년 2월 : 포항산업과학연구원 연구실장
- 1994년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

재료가공, 나노/마이크로역학, FEM 및 Biomechanics

한 창 우(Chang-Woo Han)

[정회원]



- 2010년 8월 : 경북대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 영남이공대학 기계자동차학부 자동차계열 부교수

<관심분야>

기계공학, 자동차 제어 시스템, 안정성 해석과 진단, 센서 및 활용, 하이브리드카 및 전기차