

소형 트랙터용 전자제어 직접 분사식 디젤 엔진 고강도 실린더 블록의 설계에 관한 연구

A Study on Design of High strength Cylinder Block about Common Rail Direct Injection Diesel Engine for Small Tractor

남석주¹, 박성호², 김규태³, 김귀남^{4*}

Seock-Ju Nam¹, Sung-Ho Park², Gue-Tae Kim³, Gwi-Nam Kim^{4*}

〈Abstract〉

Recently, global warming has become severe, and regulation is established for carbon savings each field. its regulation is applied to various fields using IC engine such as automobile, ship, agricultural machine. Therefore engine block applied Common Rail Direct Injection(CRDI) technology, that carry out thermal-structure analysis to examine design. The thermal load about 900°C by explosion was applied in cylinder. And pressure about 9 MPa(90 Bar) was applied to structure analysis. As a result, it was the highest at 185.99°C at the top of cylinder. Static-structure analysis applied thermal load, that was shown maximum equivalent stress at 142.59 Mpa and Maximum principal stress 145.03 MPa, Minimum principal stress -149 MPa. When compare analysis results to material property, it design is safety structurally.

Keywords : Common Rail Direct Injection(CRDI), Theraml-structure Analysis, Small Tractor, Engine Block Design

1 정회원, ㈜델릭스, 대표이사
E-mail: dellics@hanmail.net
2 정회원, 창원문성대학교, 조교수
E-mail: psungho@naver.com
3 정회원, 창원문성대학교, 조교수
E-mail: tkdmir@naver.com
4* 정회원, 교신저자, 순천제일대학교, 조교수
E-mail: gnkim@suncheon.ac.kr

1 DELLICS Co., LTD. , 21-6, Gongdan-ro 474beon-gil, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do
2 Aviation Maintenance & Drone Engineering, Changwon Moonsung University
3 Aviation Maintenance & Drone Engineering, Changwon Moonsung University
4* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Suncheon Jeil College

1. 서론

디젤형 엔진은 자동차, 선박, 농기계 등 산업전 분야에 동력 발생 장치로써 다양하게 사용되고 있다. 하지만 최근 지구온난화가 심화되며 이산화탄소 배출 규제에 대응하여 배기량을 감소시킨 설계가 필수적이다.

Fig. 1은 소형 트랙터와 디젤엔진을 나타내고 있다. 소형 트랙터용 디젤엔진은 기존의 자연흡기/기계식 디젤엔진은 배기가스 규제에 의하여 CRDI(Common Rail Direct Injection)전자제어

고압 직접 분사 기술 및 터보차저(Turbo Charger) 기술을 적용하여, Tier-4 등의 배기가스 규제에 대응하고, 엔진의 소형/고출력화의 일환으로 배기량을 감소시키고 토크를 대폭적으로 증대시킨 트랙터용 전자제어 디젤 엔진을 개발하는 것을 연구되어지고 있다.

컴퓨터가 발달되면서 계산 능력 향상과 소프트웨어 부문의 발전은 엔진 개발에 컴퓨터를 활용하여 CAE설계의 접목을 가능하게 하여, 최적화된 솔루션을 제공하여 왔다.^{1~3)} 자동차 및 농기계 설계의 핵심인 엔진부분의 경우에도 설계에서부터 생산까지 CAE를 활용한 엔진 구조해석 및 설계는 비용 절감과 적합한 설계 데이터를 확보할 수 있다.^{4~6)}

엔진은 폭발을 통해 발생한 에너지를 회전력으로 전환하여 동력을 발생시킨다. 하지만 폭발로 인해 발생하는 열로 인하여 큰 열적 부하를 받고 있게 된다.⁷⁾



Fig. 1 Photo of tractor and diesel engine

따라서 본 논문에서는 소형 트랙터용 CRDI방식의 고강도 엔진블록을 설계하기 위하여 유한요소법을 활용하여 폭발 시 발생하는 고온의 열전도를 분석하고 이에 따른 열하중과 피스톤 로드에서 발생하는 구조적 하중을 적용하여 설계하고자 한다.

2. 유한요소 시뮬레이션

Fig. 2는 CRDI방식의 엔진블록을 3D모델링을 나타내고 있다. 소형 트랙터용으로써 실린더가 3개인 3기통 방식으로 설계가 되었으며, 냉각수에 따른 열 영향을 고려하기 위하여 냉각수로 모두 모델링에 표현하였다.

Fig. 3은 해석을 위한 유한요소 모델을 나타내

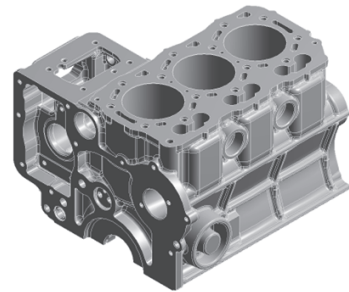


Fig. 2 3D modeling of CRDI type engine block

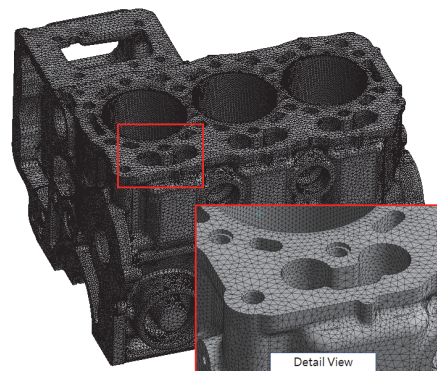


Fig. 3 Finite element model of engine block

고 있다. Mesh type으로는 Tetrahedral로 선택하였다. 사면체 요소를 사용한 이유는 엔진 블록의 모델링이 냉각수로의 미세한 흐름을 유한요소로

표현하기에 적합한 모델이므로 선택하였다. 유한요소 모델링의 결과는 Node는 1,889,260개, Elements는 973,142개 이다.

엔진블록의 재질은 실린더 블록에 주로 사용되는 주조용 재질인 FC25를 사용하였다. 금속재질은 온도의 변화에 따라 물성치가 변화하기 때문에 해석 물성치를 적용할 때에는 변화를 고려하여야 한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 온도에 따른 열팽창 계수와 열전달 계수를 그래프로 나타내었다. 열팽창 계수는 상온에서부터 800°C까지의 변화를 고려하였으며, 열전도율은 상온에서부터 1100°C까지의 변화를 고려하여 해석에 반영되도록 하였다.

Table 1은 구조해석을 위한 기계적 물성치를 나타내고 있다. 탄성계수는 123.5 GPa을 적용하였고, 프외송 비는 0.26, 인장강도는 210 MPa로 적용하였다.

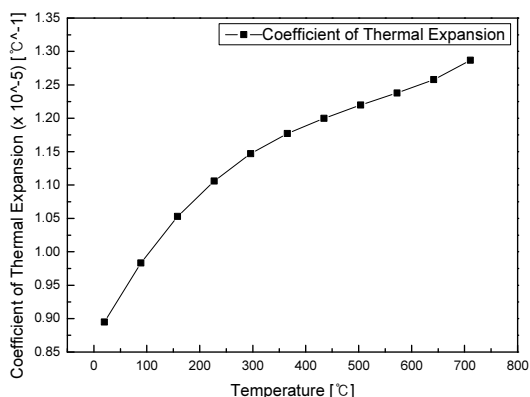


Fig. 4 Coefficient of thermal expansion of FC25 following temperature

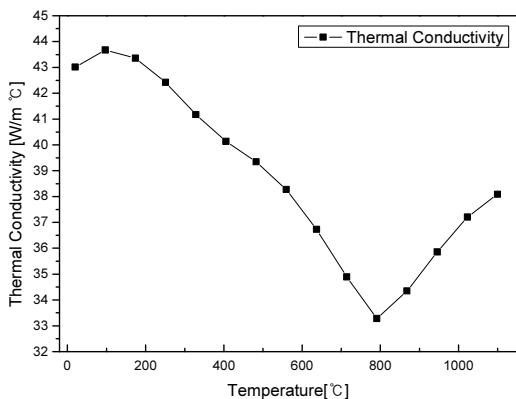


Fig. 5 Thermal conductivity of FC25 following temperature

Table 1. Material property of FC25

No.	Material property	Value
1	Young's modulus	123.5 GPa
2	Poisson's ratio	0.26
3	Tensile yield strength	210 MPa
4	Maximum tensile strength	250 MPa
5	Maximum compress strength	525 MPa

2.1 열 해석

실린더 블록에서 폭발이 발생할 때, 실린더 상부에서 폭발이 발생하여 실린더가 하강하므로 실린더 블록의 높이에 따라 온도가 달라진다. 따라서 열 해석에서는 정확한 온도조건 적용이 중요하기 때문에 높이에 따라 구분하여 온도를 적용하였다.

Fig. 6에 엔진 블록의 영역을 나타내고 있다.

H1은 가장 높은 열이 발생하는 곳으로 900 °C

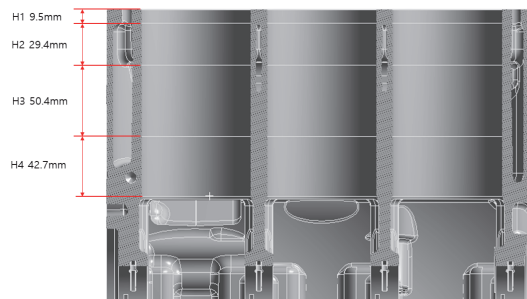


Fig. 6 Inside cylinder following temperature area

의 온도에 HTC(Heat Transfer Coefficient: 대류 열전달계수)을 $0.00065 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 를 적용 하였다. H2는 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 온도에 $0.00051 \text{ W/mm}^2\text{C}$, H3는 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 온도에 $0.0003 \text{ W/mm}^2\text{C}$, H4는 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 온도에 $0.00005 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 로 적용하였다. 다음 온도데이터는 실험을 통하여 얻어진 데이터를 기반으로 하여 적용하게 되었다.

실린더 블록에서의 냉각 효과를 적용하기 위하여 워터재킷(냉각수 경로) 영역은 냉각수 조건으로 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하였으며, HTC $0.0012 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 로 적용하였다. 오일경로 영역은 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 적용하였으며, HTC 조건으로 $0.00005 \text{ W/mm}^2\text{C}$ 로 적용하였다.

2.2 구조해석

구조해석에서의 하중은 2가지로 구분되어 진다. 앞서 진행되는 열 해석의 결과가 구조해석에서 열 하중으로 적용되기 때문에 각 node에서 발생하는 온도결과를 구조해석의 node에 Input하여 적용되며, Fig. 7에 나타내었다.

나머지 1가지는 Fig. 8(b)에 나타낸 것과 같이 폭발에 의한 구조적 하중발생 한다.

Fig. 8(a)는 전체 경계조건을 나타내고 있다.

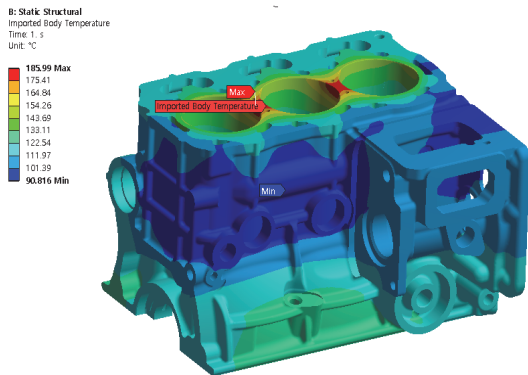
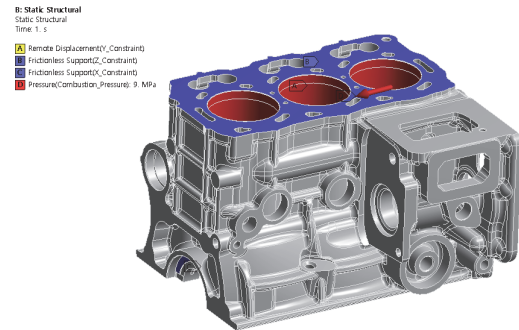


Fig. 7 Input thermal load by thermal analysis

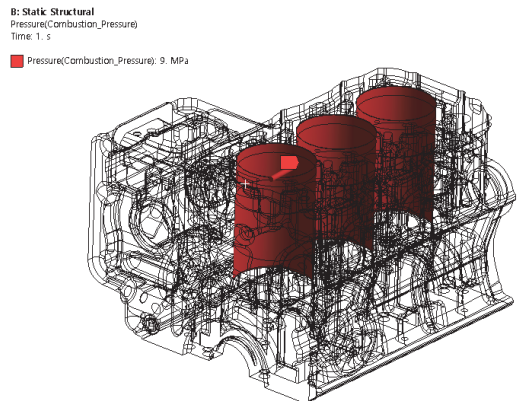
A에 해당하는 Remote displacement조건이 적용된 영역은 실린더 블록의 상부면으로 열팽창으로 인해 발생하는 변위를 억제하지 않으며 측면으로 발생하는 거동을 억제하고자 Y축 방향의 변위를 0으로 설정하여 제어하였다. 또한 Z축 방향으로의 팽창 역시 억제하기 위하여 0으로 설정하였고 나머지 축인 X방향은 Free로 설정하여 열팽창에 의한 변위를 허용하였다.

B와 C 조건은 Frictionless support로 실린더 블록고정 영역으로 열팽창으로 인하여 변위가 발생되지 않도록 제어하였다.

D영역은 폭발영역으로 Pressure 조건을 적용하여 내부압력을 9 MPa 로 적용하였다.



(a) Boundary conditions



(b) Pressure condition

Fig. 8 Boundary and pressure conditions of structure analysis

3. 해석결과

3.1 열해석 결과

열해석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 전체적인 온도분포를 확인하기 위하여 Temperature로 결과를 도출하였다. 최고 온도는 실린더 사이의 내벽 부분에서 185.99℃로 나타났다. 폭발에 따른 온도 900℃의 영향과 살 두께가 가장 얇은 부분으로써 열이 가장 높게 나온 것으로 사료된다.

그 외에 실린더 블록의 바깥쪽의 온도는 약

110~140 ℃ 온도 분포를 나타내고 있는 것으로 보인다.

좀 더 자세한 결과를 확인하기 위해 실린더 내부 온도를 확인하고자 단면에 대한 온도 분포를 Fig. 9(b)에 나타내었다.

H1에 해당되는 영역에서는 최고 온도인 실린더 내벽을 제외한 부분들에서는 약 140 ℃의 온도를 보이고 있다.

H2 영역에서는 약 130 ℃ 온도를 보이고 있으며, H3 영역에서는 약 110 ℃, H4의 영역에서는 약 95℃ 온도를 보이고 있다.

3.2 구조해석 결과

Fig. 10은 실린더 블록의 열-구조 해석 응력결과를 나타내고 있다. 응력에서 가장 크게 발생한 곳은 실린더 블록과 워터재킷의 내부에서 발생하는 것으로 보인다. 그 크기는 142 MPa로 FC25 재질의 항복강도에 비하여 낮은 수치로서 실린더 블록의 열과 압력에 대하여 구조적으로 안전하게 설계되었다고 판단된다.

Fig. 11은 열-구조해석 응력 결과에서 최대응력 발생위치를 제외한 고응력 영역에 대한 디테일 뷰

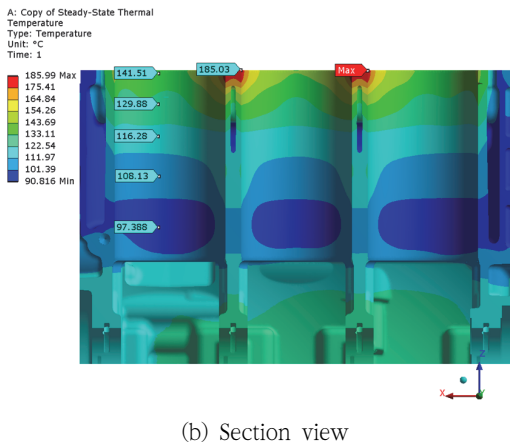
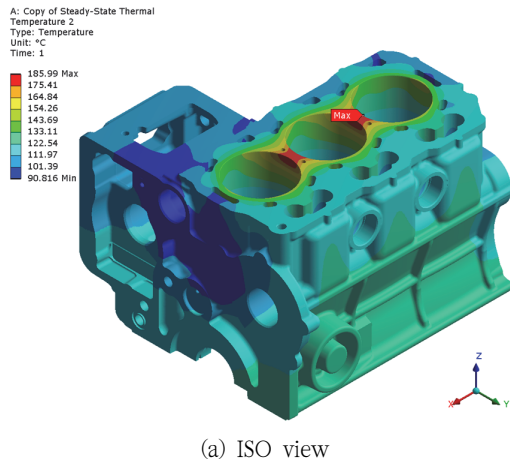


Fig. 9 Results of thermal analysis following view

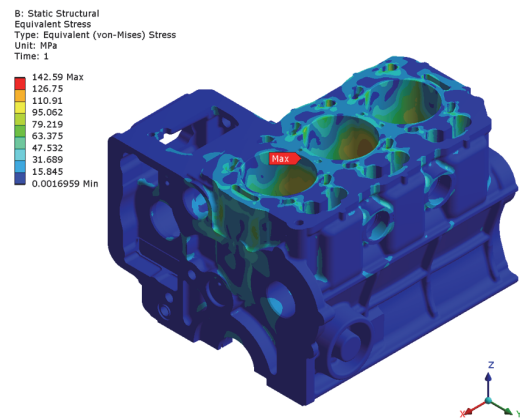
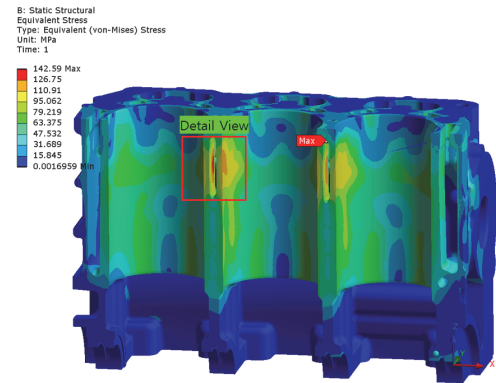
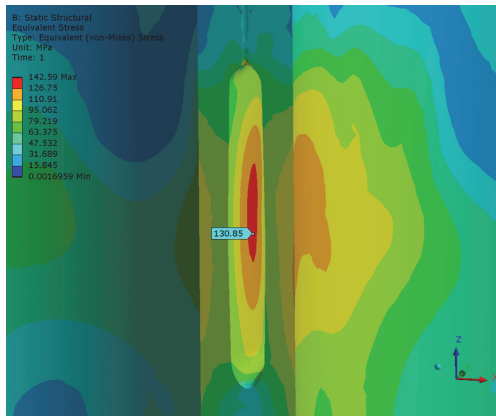


Fig. 10 Result of thermal-structure analysis



(a) Inside cylinder view



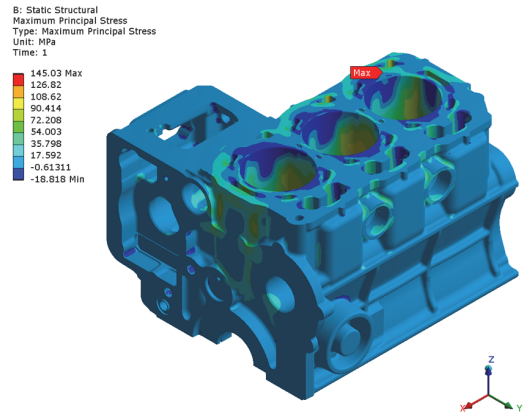
(b) Detail view

Fig. 11 Result of structure analysis following section view

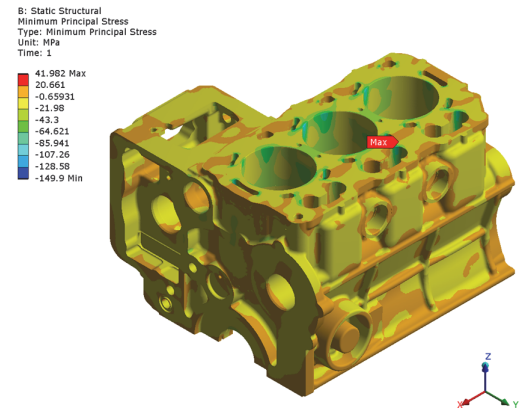
를 나타내고 있다. 실린더 블록에서 가장 얇은 측벽부에서 대부분의 높은 응력들이 발생하였다. H2와 H3의 높이에서 70~120 MPa로 나타났으며 특히 워터재킷이 위치한 곳은 측벽의 두께가 가장 얇은 곳으로 120 MPa 상당의 응력이 발생하였다.

이러한 결과들은 Von-mises(등방성)결과로서 실린더 블록의 재질인 FC25의 항복강도에 비하여 낮은 응력 결과를 보여주고 있다.

Fig. 12는 Max/Min Principal stress 결과이다. 보통의 일반 구조물의 재질의 경우 탄소재질을 사용하는 것이 일반적이므로 일반 구조해석에서는 앞서 확인한 Von-mises 결과를 토대로 평가를 하



(a) Maximum principal stress



(b) Minimum principal stress

Fig. 12 Results of principal stress

게된다. 하지만 실린더 블록의 재질인 FC25는 주물용 재질로서 취성적인 성질을 가지고 있기 때문에 주응력에 대한 최대응력(인장응력)과 최저응력(압축응력)에 대한 평가가 동반되어야 한다.

Fig. 12(a)은 Max Principal stress로 최대 인장응력이 145.03 MPa로 나타는 것을 볼 수 있다. 이는 재질의 최대 인장 강도인 210 MPa에 비하여 낮은 값으로 구조적으로 안정하다고 판단된다.

Fig. 12(b)는 Min Principal stress로 최대 압축응력이 149.9 MPa로 나타났다. 재질의 최대 압축강도인 525 MPa에 비해 매우 안정적으로 판단된다.

두 결과모두 실린더 H1 영역에서 발생하고 있으며, 특히 두께가 얇은 워터재킷 영역에서 나타나는 것을 확인하였다.

소형 트랙터의 고출력 및 배기가스 저감을 위한 전자제어 직접 분사식(CRDI) 디젤엔진용 고강도 실린더 블록 개발)와 관련하여 작성되었으며 지원에 감사드립니다.

4. 결 론

소형 트랙터용 CRDI방식의 고강도 엔진블록을 설계검토를 위하여 유한요소법을 활용한 해석을 진행하였다. 폭발에 의한 열은 H1~H4까지 구간별로 130~900℃의 온도와 대류열전달계수를 구간별로 적용하였으며, 폭발시 발생하는 실린더 내벽의 압력을 9 MPa(90 Bar)를 적용하여 열-구조 연성해석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 폭발로 인한 발열과 냉각조건을 고려한 열 해석 결과 실린더 측벽 상부위치에서 최대 온도로 185.99 ℃로 나타났다.
- (2) 열 하중과 폭발 압력을 고려한 구조해석 실시 결과 Equivalent stress(등방성 응력)의 최대값이 142.59 MPa로 나타났으며, 그 위치는 워터재킷 구멍 내부에서 발생하였다.
- (3) 취성 재료임을 감안하여 주응력을 검토한 결과 Maximum principal stress 는 145.03 MPa, Minimum principal stress 는 149.9 MPa로 나타났다.
- (4) 열-구조해석 결과와 재료의 물성치를 비교한 결과 폭발 열과 압력에 대하여 구조적으로 안정성을 만족하는 것을 확인하였다.

후 기

이 본 논문은 중소벤처기업부, 구매조건부신제품개발사업의 지원과제(과제번호: S3301709, 과제명:

참고문헌

- [1] G. H. Kim, J. K. Park and N. J. Kwon: Analysis & Measurement of Temperature Distribution of Head and Block of SI Engine. Autumn conference of The Korean Society of Automotive Engineering, Korea, pp. 337-342, (1995).
- [2] Chulho Yang, "A Review on the Structural Analysis of Engine Assembly", Transactions of KSAE, vol. 28, no. 1, pp. 87-92, (2020).
- [3] N.-H. Cho and J.-I. Lee : Numerical Analysis of Coolant Flow in An Engine Cylinder Block. Autumn conference of The Korean Society of Automotive Engineering, Korea, pp. 333-341, (1994).
- [4] J. S. Lee, K. M. Moon, E. J. Ha, S. Keung and J. I. Park. : Transient Heat Transfer Method for Engine Head/Block Thermal Fatigue Analysis. conference of The Korean Society of Automotive Engineering. Korea pp. 25-30, (2008).
- [5] Beomkeun Kim and Hoon Chang, "Finite Element Analysis of Cylinder Head/Block Compound", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 11, no. 3, pp. 28-38, (2003).
- [6] Chang Su Son, Ho Jeong Cheon, Hwal Gyeong Seong and Keon Sik Yoon, "A Study on the Dynamic Stress Analysis of an Engine Block using Flexible-body Dynamic Analysis", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 28, no. 7, pp. 805-813, (2011).

- [7] Byung Jin Son, Chin Sok You and Chang Hun Kim, "Development of a Program for Analyzing the Characteristics of the Temperature Distribution of the LPG Engine Cylinder Block", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 22, no. 12, pp. 1746-1754, (1998).

(접수: 2023.07.10. 수정: 2023.07.25. 게재확정: 2023.08.04.)