

냉각수 가열장치의 체결 조건에 따른 안정화 설계

한대성*, 윤현진**,#

*(주)디에이치지, **한국섬유기계융합연구원

Stability Design of a Coolant Heater based on Fastening Conditions

Dae-Seong Han*, Hyun-Jin Yoon**,#

*DHG CO., LTD, **Korea Textile Machinery Convergence Research Institute

(Received 1 December 2021; received in revised form 20 December 2021; accepted 24 December 2021)

ABSTRACT

The vehicle industry requires superior technology that can increase the efficiency of the battery of an electric vehicle. A coolant heater that can optimize the temperature of the battery is one of the most effective techniques for cold environments. However, the vibrations generated by this device can cause major complications, such as leakage and system errors. Therefore, the vibrations of the device must be suppressed to improve the stability. In this study, the fastening conditions of a coolant heater were analyzed using a computer simulation to investigate the natural frequencies and mode shapes which reflect the primary reasons for the largest vibrations under the given operating conditions. The results showed that six-bolted joints could considerably improve the stability of the fastening device

Keywords : Coolant Heater(냉각수 가열장치), Fastening Condition(체결 조건), Design Alterations(설계 변경), Vibration Suppression(진동 억제), Stability Improvement(안정성 향상)

1. 서 론

국내/외 자동차 업체들은 이산화탄소 배출 총량 규제에 대응하기 위해 내연기관의 공급을 줄이고 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle), EV(Electric Vehicle) 등 친환경 자동차의 공급을 늘리고 있다. 이러한 친환경 자동차는 짧은 충전 시간과 긴 주행

거리를 가지도록 배터리의 효율성을 향상시키는 것이 핵심 화두이다. 일반적으로 차량용 배터리의 효율성을 향상시켜주는 기술 및 장치는 다양하지만, 영하의 기온에서 배터리의 효율성에 영향을 주는 기술 및 장치는 한정적이다.^[1] 그중 가장 효과적인 방법은 가열된 냉각수를 배터리에 투입시켜 최적의 온도로 제어하여 겨울철 배터리의 방전을 예방하는 것이다.

냉각수 가열장치는 인쇄된 발열기관으로 고압 직류를 공급하고 냉각수의 온도를 신속하게 가열

Corresponding Author : yo_on_96@naver.com

Tel: *** - **** - **** Fax: +82-53-819-3119

하여 배터리를 최적의 상태로 유지시킨다. 장치를 제어하는 전기기관과 냉각수가 유동하는 유로부의 위치가 밀접하여 누수에 의해 기관 쪽으로 냉각수가 유입될 경우 차량에 중대한 결함을 유발시킬 수 있다. 또한, 차체와 체결된 장치의 공진에 의한 진동은 시스템 오류에 큰 영향을 미친다. 그러므로 냉각수 가열장치의 진동을 제어할 수 있는 설계 기술이 절실히 요구되는 바이다.

본 연구에서는 자동차에서 발생하는 작동속도 영역인 0~5,000Hz에서의 공진을 회피할 수 있는 체결 조건을 선정함으로써 냉각수 가열장치의 진동을 효과적으로 억제하여 구조 안정성을 부여함을 그 목적으로 하였다. 구체적으로는 각 체결 조건에 대해서 유한요소해석을 진행하여 냉각수 가열장치의 동적 특성을 파악하고 진동을 최소화할 수 있는 설계안을 도출하여 효과를 확인함으로써 장치의 구조적인 안정성을 확보하는 연구를 진행하였다.^[2]

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 유한요소해석 모델

체결 조건에 따른 동특성을 파악하기 위해 전기자동차에 적용되는 냉각수 가열장치 형상의 모델링을 진행하였다. 실제 장치는 상·하부 커버와 결합되는 구조이나 앞서 결합된 전체 모델의 해석을 수행한 결과 커버의 영향은 미미하였으며, 장치와 차체간의 체결 조건이 주된 요인임을 파악하였다.

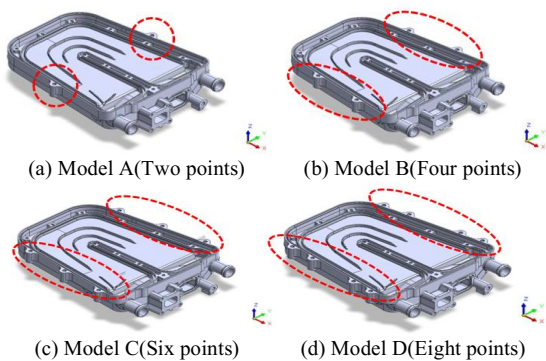


Fig. 1 3D modeling of the coolant heater

따라서 커버를 제외하고 구현된 모델은 Fig. 1과 같으며, Model A는 2개의 체결부, Model B는 4개의 체결부, Model C는 6개의 체결부, Model D는 8개의 체결부로 구성하였다.^[3]

2.2 유한요소해석 조건

시뮬레이션 모델의 재질은 다이캐스팅용 ADC12로 하였으며 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of ADC12

Properties	ADC12
Young's modulus [Mpa]	7.1×10^4
Tensile strength [Mpa]	310
Proof stress [Mpa]	150
Impact strength [kJ/m^3]	81

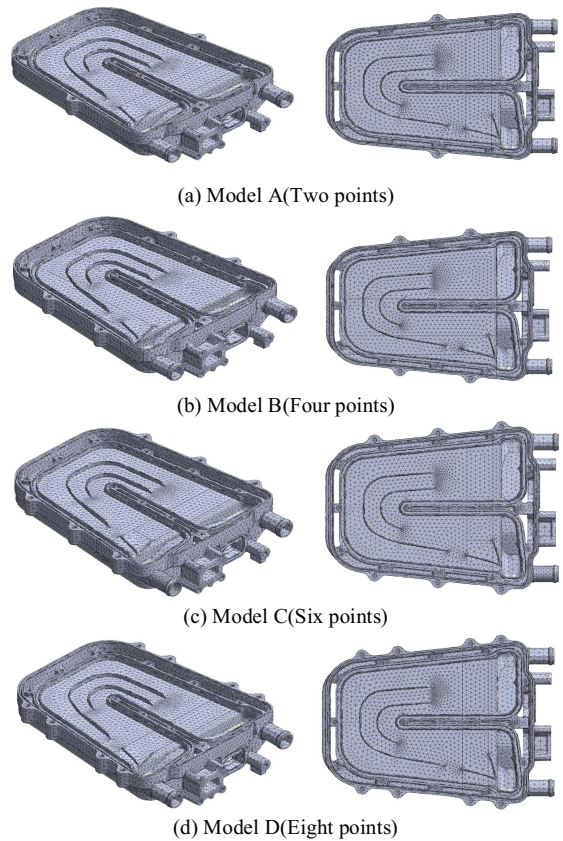


Fig. 2 Simulation models for the analysis

Table 2 Meshes of the simulation models

Model	Number of Nodes	Number of Elements
Model A	41,669	153,886
Model B	72,899	169,840
Model C	41,580	159,541
Model D	63,686	177,621

또한, 고속 사면체 요소망 생성 기능을 이용하여 Fig. 2와 같이 Model A~D에 4절점 사면체 요소망을 생성하였다. 생성된 절점(Nodes) 및 요소(Elements) 개수는 Table 2와 같다. 이후 반복적인 진동이 발생했을 때 공진여부를 확인할 수 있는 주파수응답해석을 하였으며, 차체에서 발생 가능한 작동속도 영역인 0~5000Hz에 1N의 외부를 부여하였다.

3. 유한요소해석 결과

3.1 Model A(Two points)

유한요소해석 프로그램(midas NFX 2021 R1)을 이용하여 구현된 2개의 체결부가 있는 Model A의 해석 결과를 정리하였다. 진동 형태 및 고유진동수는 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다.

Table 3을 통해 1~10차 고유진동수를 확인할 수 있으며, 1~8차 고유진동수의 진동은 0~5,000Hz 영역에 포함되어 있어 큰 진동을 일으킨다.

Table 3 Natural frequencies of the model A

Modes	Natural frequencies [Hz]
1st	319.68
2nd	1221.73
3rd	1235.12
4th	2467.61
5th	2520.77
6th	3860.10
7th	4137.56
8th	4876.63
9th	5017.23
10th	5367.87

또한, 2차와 3차(1221.73, 1235.12Hz), 4차와 5차(2467.61, 2520.77Hz), 6차와 7차(3860.10, 4137.56Hz) 고유진동수 간 공진 가능성이 있다.^[4] Model A의 주파수응답 변위결과는 Table 4, Fig. 4와 같다.

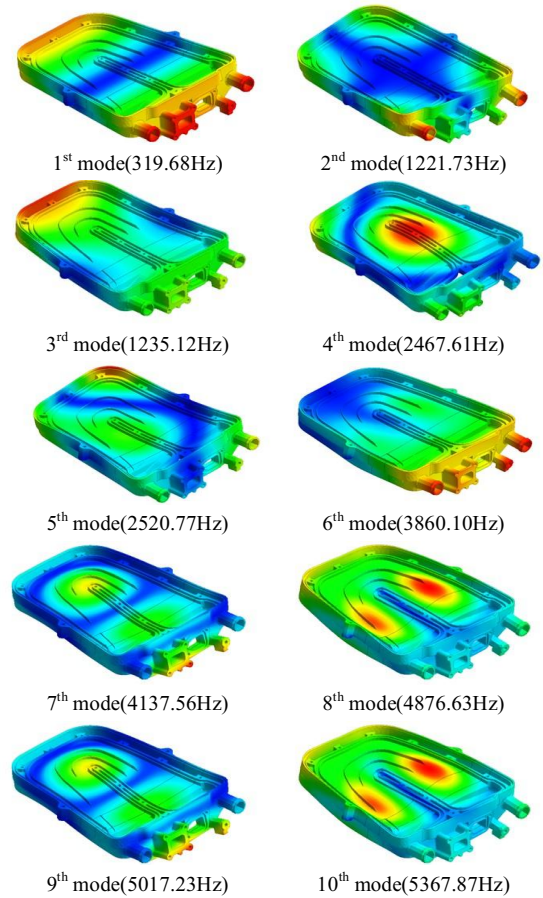


Fig. 3 Mode shapes of the model A

Table 4 Vibration magnitudes of the model A

Range [Hz]	Magnitude of vibrations [mm]
319.68	1.018E+01
1221.73	1.237E+01
1235.12	2.051E+01
2467.61	7.025E+00
2520.77	3.542E-01
3860.10	2.003E-01
4137.56	1.658E-01
4876.63	1.262E-01

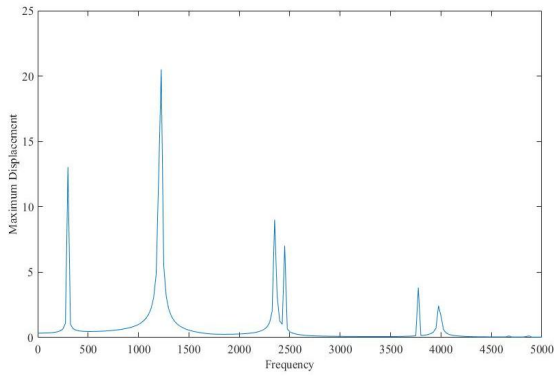


Fig. 4 Vibration magnitudes of the model A

3.2 Model B(Four points)

Model A의 해석 결과 1~8차 고유진동수가 작동 속도 영역에 포함되므로 강성을 키워 고유진동수를 상승시키기 위해 4개의 체결부가 있는 Model B를 적용하였다. 유한요소해석 결과 Model B의 진동 형태는 Fig. 5와 같고 고유진동수는 Table 5와 같다.

Table 5를 보면 1~7차 고유진동수가 자동차의 작동 속도 영역(0~5,000Hz)에 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 또한, 5차와 6차(3607.69, 4130.69Hz), 6차와 7차(4130.69, 4411.91Hz) 고유진동수 간 공진이 발생함을 알 수 있다. Model B의 주파수응답 변위결과를 Table 6, Fig. 6에 나타냈다.

Table 5 Natural frequencies of the model B

Modes	Natural frequencies [Hz]
1st	1372.96
2nd	1702.18
3rd	2349.55
4th	3076.46
5th	3607.69
6th	4130.69
7th	4411.91
8th	5480.50
9th	5593.67
10th	6761.83

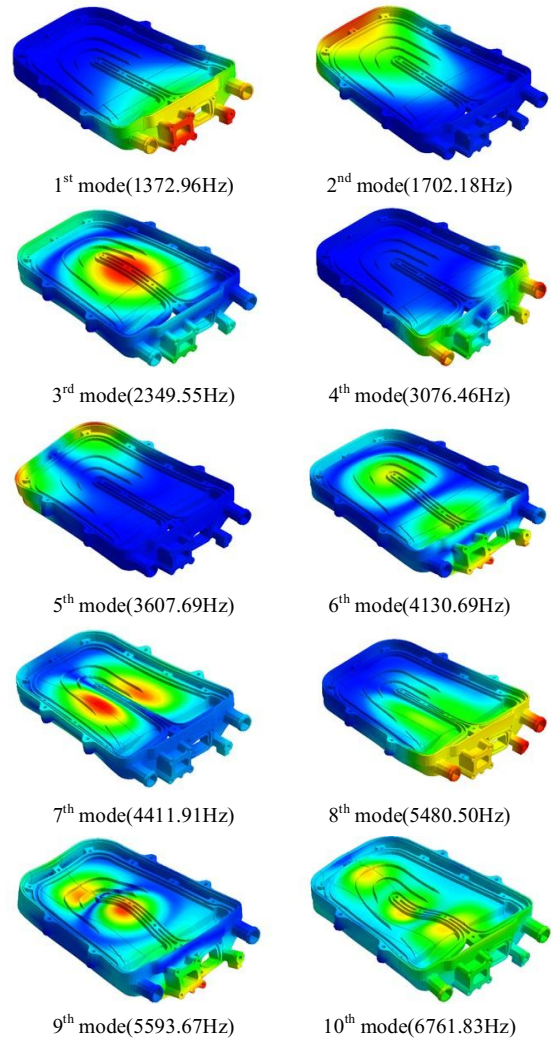


Fig. 5 Mode shapes of the model B

Table 6 Vibration magnitudes of the model B

Range [Hz]	Magnitude of vibrations [mm]
1372.96	1.550E+00
1702.18	9.982E-01
2349.55	4.334E-01
3076.46	8.526 E-02
3607.69	7.516 E-02
4130.69	6.738 E-02
4411.91	4.363 E-02

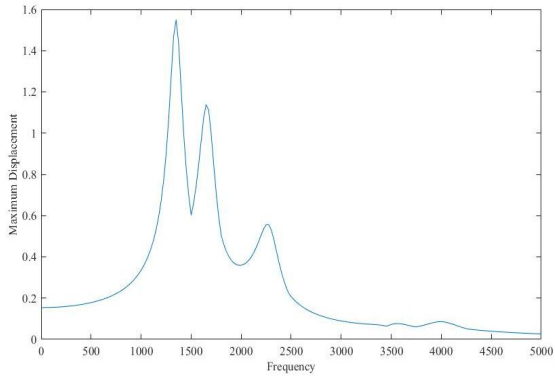


Fig. 6 Vibration magnitudes of the model B

3.3 Model C(Six points)

Model B를 적용한 결과 1~7차 고유진동수가 작동속도 영역에 포함되므로 강성을 더 키우고 고유진동수를 더욱 상승시키기 위해 기존 4개였던 체결부를 6개로 변경하였다. 변경된 Model C의 유한요소해석 결과 진동 형태는 Fig. 7과 같고 고유진동수는 Table 7과 같다.

Table 7을 통해 1~10차 고유진동수를 확인해 보면, 체결 조건을 변경한 Model C는 1~4차 고유진동수가 자동차의 작동속도 영역(0~5,000Hz)에 포함되어 있음을 알 수 있다. 해당 영역 내에 있는 고유진동수(1~4차)는 서로 다르게 분포하여 고유진동수 간의 공진이 억제되었다. 주파수응답해석 결과는 Table 8, Fig. 8과 같으며, 6개의 체결부로 이루어진 Model C의 진동 저감 효과가 크음을 알 수 있다.

Table 7 Natural frequencies of the model C

Modes	Natural frequencies [Hz]
1st	2082.16
2nd	2436.88
3rd	3035.80
4th	4420.49
5th	5031.20
6th	5554.68
7th	6151.91
8th	6370.15
9th	7634.32
10th	7698.15

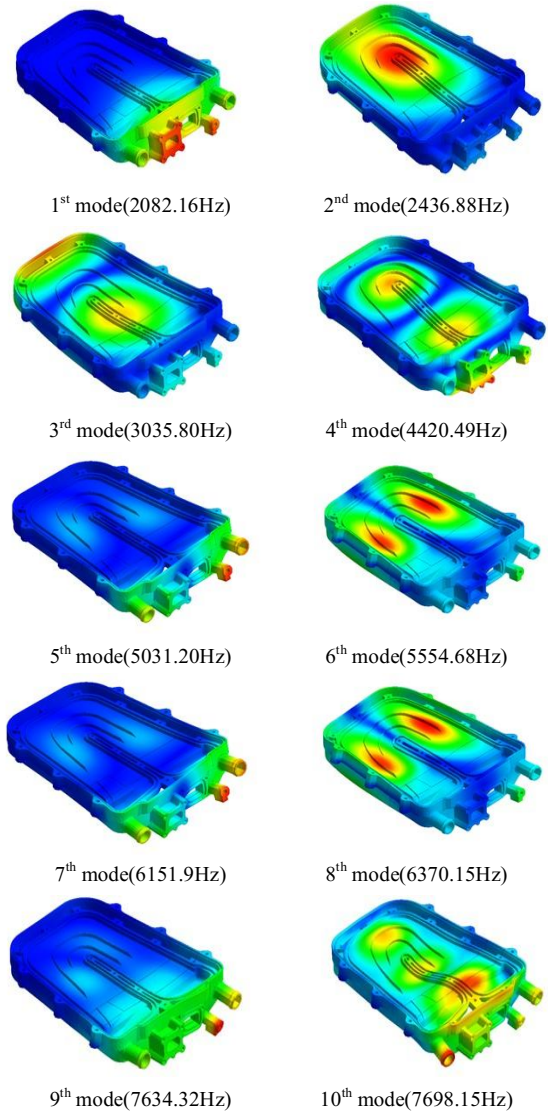


Fig. 7 Mode shapes of the model C

Table 8 Vibration magnitudes of the model C

Range [Hz]	Magnitude of vibrations [mm]
2082.16	5.798E-01
2436.88	2.978E-01
3035.80	3.023E-01
4420.49	5.400E-02

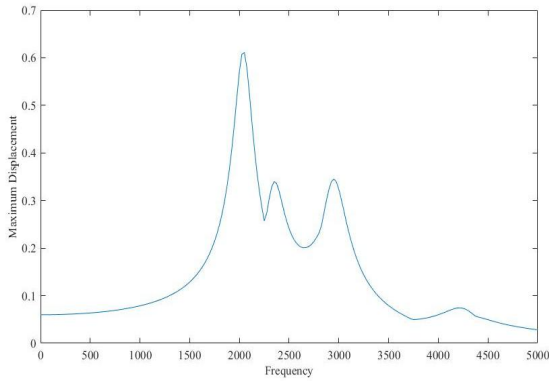


Fig. 8 Vibration magnitudes of the model C

Table 9 Natural frequencies of the model D

Modes	Natural frequencies [Hz]
1st	2208.50
2nd	2395.05
3rd	3226.71
4th	4411.26
5th	5045.55
6th	5343.00
7th	6046.87
8th	7040.12
9th	7776.40
10th	7853.51

3.4 Model D(Eight points)

8개의 체결부로 구성된 Model D의 유한요소해석을 진행하였으며 해석한 결과는 Fig. 9, Table 9와 같다.

Table 9를 통해 1~10차 고유진동수를 확인할 수 있으며, 1~4차 고유진동수가 자동차의 작동속도 영역(0~5,000Hz)에 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 이때 1차, 2차 고유진동수(2208.50, 2395.05Hz)가 서로 공진하여 큰 진동을 유발시킬 수 있다.^[4] 해석한 결과 Model D의 진동 크기는 Table 10, Fig. 10과 같다.

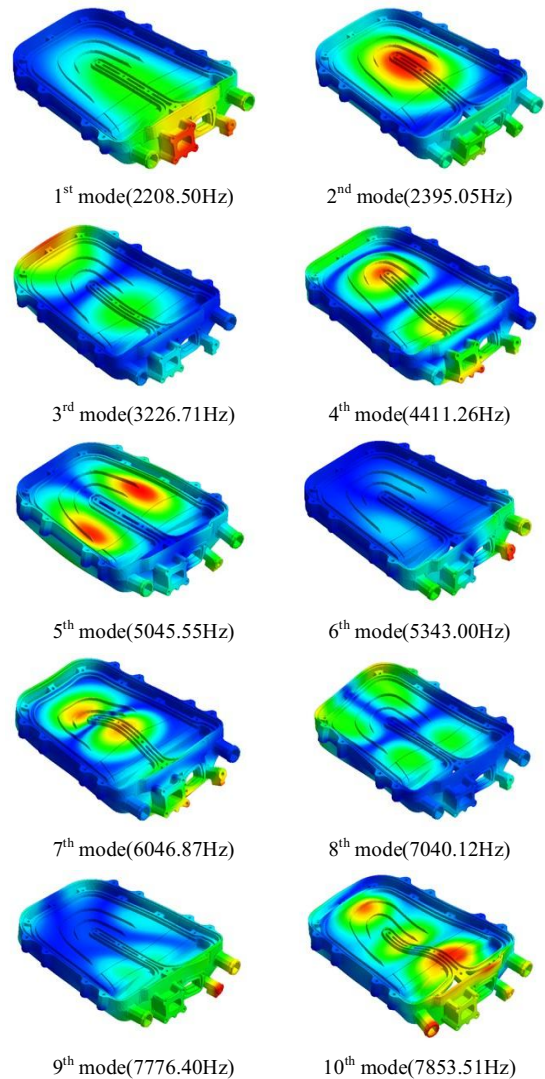


Fig. 9 Mode shapes of the model D

Table 10 Vibration magnitudes of the model D

Range[Hz]	Magnitude of vibrations [mm]
2208.50	3.415E-01
2395.05	1.748E-01
3226.71	2.506E-01
4411.26	6.696E-02

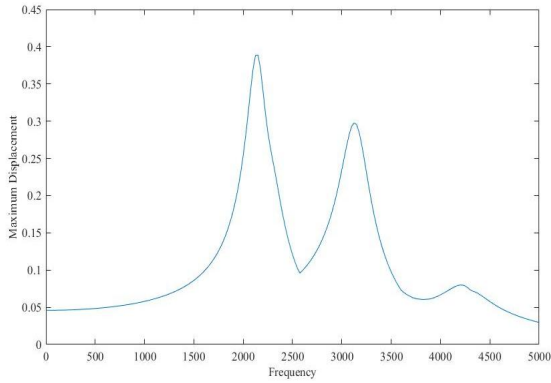


Fig. 10 Vibration magnitudes of the model D

Table 11 Natural frequencies of the model A~D

Modes	Natural frequencies [Hz]			
	Model A	Model B	Model C	Model D
1st	319.68	1372.96	2082.16	2208.50
2nd	1221.73	1702.18	2436.88	2395.05
3rd	1235.12	2349.55	3035.80	3226.71
4th	2467.61	3076.46	4420.49	4411.26
5th	2520.77	3607.69	5031.20	5045.55
6th	3860.10	4130.69	5554.68	5343.00
7th	4137.56	4411.91	6151.91	6046.87
8th	4876.63	5480.50	6370.15	7040.12
9th	5017.23	5593.67	7634.32	7776.40
10th	5367.87	6761.83	7698.15	7853.51

3.5 최종 설계안 도출 및 효과 확인

앞에서 다양한 체결 조건에 따른 냉각수 가열 장치의 동적 특성을 살펴보았다. Table 11은 Model A~D의 1~10차 고유진동수를 비교한 것이며, 냉각수 가열장치의 고유진동수가 체결 조건에 따라 변화됨을 확인할 수 있다.

체결 조건별 진동 크기를 Table 12에 나타냈으며, 이를 효과적으로 비교하기 위해 Fig. 11과 같이 비교 그래프를 도시하였다. 2, 4개 체결부와 비교하여 6, 8개 체결부가 있는 경우 진동이 크게 감소함을 알 수 있다.

Table 12 Vibration magnitudes of the model A~D

Range [Hz]	Magnitude of vibrations [mm]			
	Model A	Model B	Model C	Model D
1225	2.051E+01	7.692E-01	9.331E-02	6.607E-02
2550	4.412E-01	2.066E-01	2.408E-01	1.207E-01
3860	2.003E-01	7.208E-02	5.198E-02	6.067E-02
4875	1.262E-01	2.896E-02	3.198E-02	3.424E-02

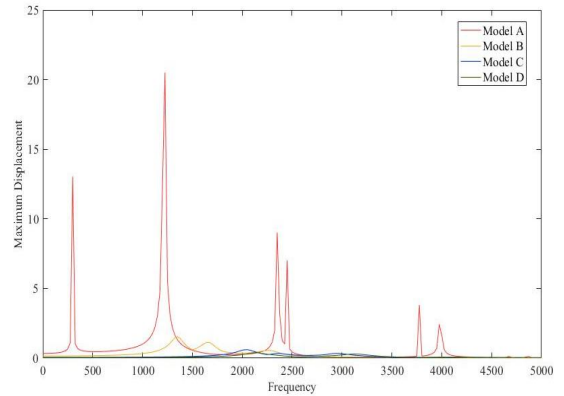


Fig. 11 Vibration magnitudes of the model A~D

그러나 Model D는 고유진동수가 서로 공진 영역에 존재하여 큰 진동을 유발시킬 위험이 있다. 따라서 최적의 체결 조건을 가진 Model C를 최적 설계안으로 확정하였으며, 해당 설계안이 적용될 경우 냉각수 가열장치의 진동이 크게 감소하여 차량 장치의 구조 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구는 냉각수 가열장치의 최적 체결 조건을 도출하여 전기자동차에서 발생 가능한 진동을 최소화하는 것을 목표로 진행되었다. 이를 위하여 유한요소해석을 통해 냉각수 가열장치의 체결 조건에 따른 진동 특성을 분석하고 이를 바탕으로 최적의 체결 조건을 선정하고 그 효과를 검증하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유한요소해석을 통해 전기자동차에서 발생 가능한 작동속도 영역(0~5000Hz) 내 체결 조건별 진동 특성을 분석하였다.
2. Model A, B, D는 고유진동수 간 공진 발생 가능성이 있음을 확인하였으며, Model C는 고유진동수가 서로 일치하지 않아 공진이 억제됨을 확인하였다.
3. 6개의 체결부가 있는 Model C가 최적의 체결 조건임을 확인하였다. 따라서 본 설계안을 바탕으로 냉각수 가열장치가 제조되면 공진 회피를 통해 시스템 오류와 운전자의 불편함을 초래하는 진동을 최소화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 2020년도 중소기업기술정보진흥원의 지원(2020년도 중소기업기술혁신개발사업(시장대응형), S2981667) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Mahesh, S. P., “Numerical analysis on heat transfer characteristics of cabin air heater for heating of EV,” The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 16-R-008, pp. 1031-1032, 2016.
2. Ro, S. H., Mechanical Vibrations with Applications, Chaosbook, pp. 22-58, pp. 219-223, 2013.
3. Hong, S. J., “Prediction of the Dynamic Characteristics of a Bolt-Joint Plates According to Bolting Conditions,” Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 29, pp. 1175-1182, 2005.
4. Lee, T. H., “Structural Design of a Li-Ion Battery Slitting Machine for the Improved Stability,” Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 17, pp. 46-52, 2018.