



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월
석사학위논문

차량용 고효율 에어컨 컴프레서 모듈 신뢰성 평가에 관한 연구

조선대학교 산업기술창업대학원

융합자동차공학과

강 복 순

차량용 고효율 에어컨 컴프레서 모듈 신뢰성 평가에 관한 연구

A Study on Reliability Evaluation of High Efficiency Air
Conditioner Compressor Module for Vehicle

2021년 2월 25일

조선대학교 산업기술창업대학원

융합자동차공학과

강 복 순

차량용 고효율 에어컨 컴프레서 모듈 신뢰성 평가에 관한 연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 산업기술창업대학원

융합자동차공학과

강 복 순

강복순의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 경 석 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 지 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 재 열 (인)

2020년 11월

조선대학교 산업기술창업대학원

목 차

LIST OF FIGURES	ii
ABSTRACT	iv
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 목적	1
제 2 절 연구 범위	3
제 2 장 이론배경	4
제 1 절 유한요소해석	4
제 2 절 적외선 열화상 기법	5
제 3 장 컴프레셔모듈 안정성검증 및 신뢰성평가	15
제 1 절 컴프레셔모듈 Modal해석	15
1. 해석조건	15
2. 해석결과 및 고찰	18
제 2 절 적외선 열화상 기법 적용 신뢰성평가	25
1. 실험결과 및 고찰	25
제 4 장 결 론	33
참고문헌	34

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Comparison with Existing Construction Methods	2
Fig. 1-2 Internal Combustion Engine Car Cooling System (Air Conditioner Structure)	3
Fig. 2-1 The electromagnetic spectrum	5
Fig. 2-2 Atmospheric transmission in different wavelength bands	6
Fig. 2-3 Incident radiation	6
Fig. 2-4 Exitan radiation	7
Fig. 2-5 Radiation contributions to the general measurement situation	8
Fig. 2-6 Infrared thermography (Pulse technique)	13
Fig. 2-7 Infrared thermography (Lock-in Technique)	14
Fig. 3-1 Compressor Module Mesh Generation	16
Fig. 3-2 Compressor Module Boundary Condition	17
Fig. 3-3 Compressor Module Analysis Result X-Axis(Mode. 1)	18
Fig. 3-4 Compressor Module Analysis Result X-Axis(Mode. 2)	19
Fig. 3-5 Compressor Module Analysis Result X-Axis(Mode. 3)	19
Fig. 3-6 Compressor Module Analysis Result Y-Axis(Mode. 1)	20
Fig. 3-7 Compressor Module Analysis Result Y-Axis(Mode. 2)	21
Fig. 3-8 Compressor Module Analysis Result Y-Axis(Mode. 3)	21
Fig. 3-9 Compressor Module Analysis Result Z-Axis(Mode. 1)	22
Fig. 3-10 Compressor Module Analysis Result Z-Axis(Mode. 2)	23
Fig. 3-11 Compressor Module Analysis Result Z-Axis(Mode. 3)	23
Fig. 3-12 Compressor Module Natural Frequency Graph	24
Fig. 3-13 Active Technique Applied Cooling Thermal Image	26
Fig. 3-14 Active Technique Applied Cooling Thermal Image Spline	26

Fig. 3-15 Apply Active Technique Cooling Thermal Imaging Graphs	27
Fig. 3-16 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(7Min)	29
Fig. 3-17 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Graph_(7Min)	29
Fig. 3-18 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(15Min)	30
Fig. 3-19 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Graph_(15Min)	30
Fig. 3-20 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(7Min)	31
Fig. 3-21 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Graph_(7Min)	31
Fig. 3-22 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(15Min)	32
Fig. 3-23 Active Technique Application Halogen Thermal Imaging Graph_(15Min)	32

ABSTRACT

A Study on Reliability Evaluation of High Efficiency Air Conditioner Compressor Module for Vehicle

Bok Soon-Kang

Advisor : Prof. Kim Jae-Yeol Ph. D.

Department of Convergence Automotive
Engineering,

Graduate School of Industrial Technology
and Entrepreneurship, Chosun University

Currently, aluminum alloys used in cars worldwide are about 8% of the weight of vehicles, but the proportion of body applications is expected to increase and be applied by more than 16% by 2025. On the other hand, the proportion of battlefields in automobile manufacturing costs is increasing year by year, and it is also a significant part of automobile purchase requirements. In particular, the battlefield is mainly responsible for enhancing the safety and convenience of passengers and pedestrians at a time when mechanical performance improvement of internal combustion engines and vehicles is seen to be limited. In particular, it is clear that as the proportion of eco-friendly cars whose power sources are replaced by electrical devices increases, the importance of the cost weight and functionality of the electronic components will increase, and demand for

aluminum parts used in compressors is also expected to increase.

In this study, the reliability of high efficiency air conditioning compressor applied with high vacuum local pressure die casting technique is to be analyzed through experiments using the true stability and infrared thermal imaging technique of high efficiency air conditioner compressor for vehicles.

The modal analysis of the air conditioning compressor module for automobiles verified the stability of the vehicle, and it was confirmed that the first natural frequency was 501.07 Hz and was out of the 20-30 Hz zone, thus avoiding vibration phenomena of the vehicle body became a seismic design. The possibility of non-destructive testing of prototypes produced by the development method was reviewed by applying the active infrared thermal imaging technique, and further research will be needed, but it is believed to be the basis for related research. In addition, it is estimated that the application of the relevant construction method will have the effect of manufacturing high-strength parts compared to the existing construction method, and the development method will reduce the use of fossil fuels, enabling the development of eco-friendly cars that meet pollution-free and low-pollution standards.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

현재 세계적으로 자동차에 사용되는 알루미늄합금은 차량 무게의 8% 정도의 규모이지만 점차 차체 적용 비중이 증가되어 2025년경에는 16% 이상 적용될 것으로 전망되고 있다. 한편, 자동차 제조원가에서 전장의 비중은 해마다 상승하고 있으며 자동차 구매 요건에서도 상당히 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히 내연기관과 차체의 기계적인 성능개선이 한계에 보이는 상황에서 탑승자 및 보행자의 안전과 편의를 고양시키는 기능을 주로 전장이 담당하고 있기 때문이다. 특히 동력원이 전기적인 장치로 대체되는 친환경 자동차의 비중이 증가할수록 전장부품의 원가비중과 기능적인 측면에서 중요성을 더해갈 것임은 명확해 보이며, 컴프레셔에서 사용되는 알루미늄 부품 수요도 증가할 것으로 전망되고 있다.

자동차용 알루미늄 부품소재 산업에서는 주로 공정개선을 통하여 소재 및 부품의 특성을 향상시키고자 하는 연구가 주로 진행되어왔다. 열간 단조 하이드로포밍, 반응고성형 기술, 주단조공법 등에 의해 제조되는 부품은 특성은 우수하나 형상에 제약이 심하다는 단점이 있으며, 제조 공정이 복잡하여 부품의 가격을 상승시키는 문제가 있다. 부품소재의 가격을 상승시키지 않고 복잡한 형상에 쉽게 대응할 수 있는 방법으로 알루미늄 합금을 저가형 공정인 다이캐스팅 등에 접목하여 부품을 제조하는 기술을 개발할 필요가 있다. 또한, 국내 기술은 다이캐스팅 장치 산업 전반에 있어서 기반기술의 확충보다는 외국기술의 응용에 의존하고 있는 경향이 있으며, 이는 다이캐스팅 제조업체에 있어서도 유사하다.

현재 국내에서 다이캐스팅 장치를 활용한 각종 부품 제조 공정에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 연구용으로 사용되고 있는 장치의 대부분이 수입에 의존하고 있어, 기계적 활성화를 일으킬 수 있는 장비의 개발에 관한 연구, 특히 사업화를 전제로 한 장치개발에 관한 연구는 매우 빈약한 실정이다. 자동차의 냉방장치의 핵심 부품인 컴프레셔에 사용하는 고강도 알루미늄 부품(Front Head, Cylinder, Rear Head, Rear Housing)을 고진공 다이캐스팅 공법과 국부가압 다이캐스팅법으로 제조하고자 한다. 가장 큰 차이점은 기존 공법에서 공기가 주입되지 않은 진공 다이캐스팅 공법을 적용한다. 해당 공법은 기존 공법대비 고강도 부품을 제조할 수 있는 효과가 있는 것으로 평가된다.^{(1),(2),(3)}

일반다이캐스팅 공법이 갖는 문제를 보완하기 위해 주로 유럽, 일본 등 해외 주조 선진국을 중심으로 다양한 형태의 특수다이캐스팅 공법이 개발되어 기존의 중력주조 및 저압주조 공법에 의해 생산되던 부품 중 상당부분을 다이캐스팅 공법으로 대체 생산해 오고 있다. 유럽에서 핵심 기술로 되고 있는 고진공 다이캐스팅 기술의 도달 진공도는 5 kPa 레벨이고, 지금까지 일반적으로 이야기 되어 왔던 진공주조에서의 진공한계 15 kPa 정도와 대비할 필요도 없이 그 레벨의 차는 크다. 이와 같이 고진공 다이캐스팅 기술에서의 도달 진공도는 5-7 kPa 매우 높은 레벨이어서, 유럽 다이캐스팅 업계에서는 각 사마다 그 높은 레벨에 도달 진공도를 유지하기 위하여, 독자적 고진공 seal 구조를 구축하고 있고 결과적으로 캐비티 내의 도달 진공도로서 5-7 kPa 레벨을 안정적으로 얻고 있다.

본 연구에서는 고진공 국부가압다이캐스팅 기법을 적용한 차량용 고효율 에어컨 컴프레셔의 진동안정성 및 적외선 열화상 기법을 활용한 실험을 통해 신뢰성을 분석하고자 한다.

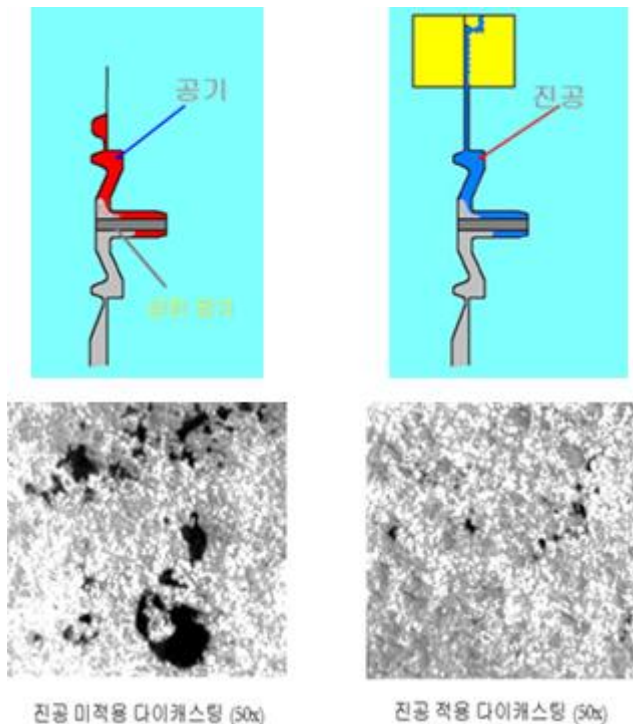


Fig. 1-1 Comparison with Existing Construction Methods

제 2 절 연구 범위

자동차용 컴프레서는 기체를 압축시켜 압력을 높여주는 기계장치로써, 자동차용 컴프레서는 피스톤의 왕복운동 또는 스크롤의 순환운동 등을 통하여 냉매가스를 압축하고 압축된 냉매를 자동차 에어컨 시스템을 통해 순환시키는 기능을 담당한다. 일반적인 가솔린 및 디젤 자동차의 경우 엔진이 컴프레서를 작동시킨다. 자동차 냉방장치의 핵심 부품인 컴프레서는 작동원리에 따라 사판식 컴프레서, 스크롤 컴프레서 및 로터리 컴프레서로 분류되며, 사판식 컴프레서는 실린더실의 개수에 따라 가변사판 컴프레서와 고정사판 컴프레서로 다시 분류된다.

본 논문에서는 고진공 국부가압을 활용한 차량용 고효율 에어컨 가변사판 컴프레서 모듈의 유한요소해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 모듈의 진동에 대한 안정성을 분석하기 위한 Modal해석을 진행하여 고진공 국부가압다이캐스팅 기법을 활용한 차량용 고효율 에어컨 컴프레서의 안정성을 확보 후 고진공 국부가압다이캐스팅 기법을 적용한 에어컨 컴프레서 모듈을 시제품을 제작하여 액티브 적외선 열화상 기법을 이용하여 신뢰성 분석을 하고자 한다.

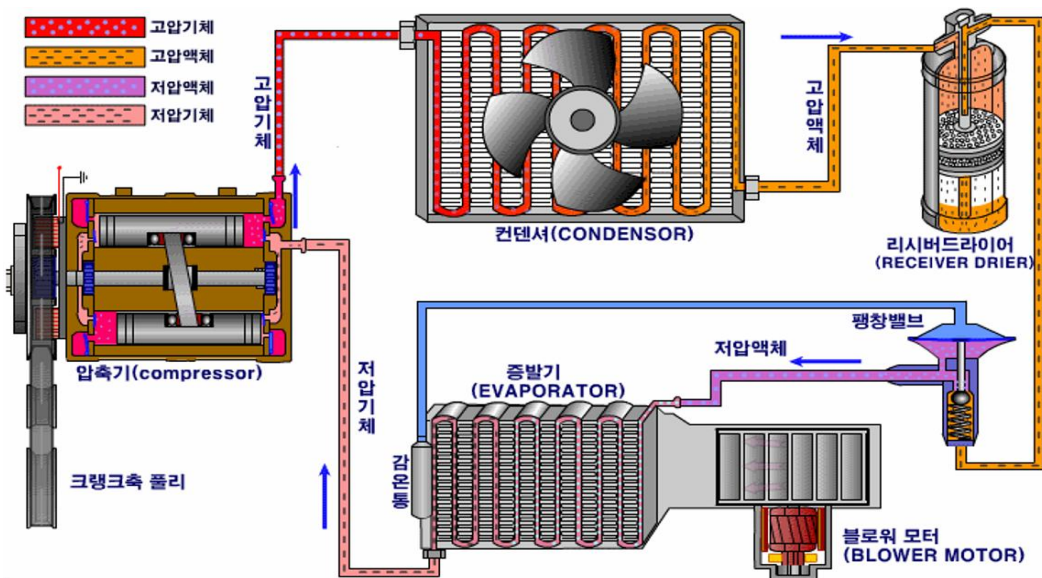


Fig. 1-2 Internal Combustion Engine Car Cooling System
 (Air Conditioner Structure)

제 2 장 이론배경

제 1 절 유한요소 해석

유한요소해석(Finite Element Analysis)은 어떠한 구조물을 유한요소법을 적용하여 실제 제작 과정 중 발생하는 비용과 시간 및 구조물의 변경된 설계안에 대해 안정성 및 성능을 분석하는 해석이다. 유한요소법은 수학에서 편미분 방정식, 적분, 열 방정식등의 근사값을 구하는 방법이다. 유한요소법이란 적용하고자 하는 구조물에 대해 유한개의 요소로 분할하는 것으로 시작 된다. 쉽게 말하자면 벽을 쌓기 위해 각각의 벽돌로 적용하여 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 각 유한요소는 질점을 가지는데, 이것은 벽돌의 꼭지점으로 보면 된다. 질점은 각 유한요소가 결합 하는 접점이 된다. 따라서 질점은 두 개 또는 그 이상의 요소들로 구성하게 된다. 역학 이론을 적용하면 한 유한요소가 힘을 받아 변형을 하면 결합된 유한요소도 힘을 받아 변형하게 된다. 대상물 전체에 대한 변형은 각 유한요소의 변형 결과에 따라 도출 된다.

유한요소법의 접근방식은 정적인 문제에서 미분 방정식을 제거 또는 편미분 방정식을 상미분 방정식으로 변환하여 접근한다. 접근 방법은 유한미분에서 사용되는 기법과 동일하다. 편미분 방정식을 풀기 위한 선행 작업으로는 대상 식을 예측할 수 있는 식을 만드는 것이다. 그러나 근사값의 안정의 경우에 입력값에서 발생 되는 오류가 지속적으로 축적되어 결과값을 의미없게 만드는 경우로 정확한 분석이 안되는 경우도 발생하는 등 단점이 있지만 가장 큰 특징은 구조물의 물성치를 소프트웨어 상에서 바꾸어 유한요소해석을 진행하여 앞서 말한 비용의 절감, 시간의 단축, 여러 가지 설계요소 변경을 마음대로 할 수 있다는 장점이 있다.^{(4),(5),(6)}

제 2 절 적외선 열화상 기법

적외선 열화상은 열복사로 실험체에서 방사되는 적외선 영역을 열화상 카메라를 통하여 가시적인 화상을 만들어 주는 기술이다. 적외선은 가시광선보다 파장이 긴 전자기적 복사의 한 형태이다. 기타 전자기적 복사 파로는 X-레이, 자외선, 라디오파 등이 있다. 전자기적 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 전자기 스펙트럼은 대역이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다. 적외선 열화상 카메라는 Fig. 2-1, Fig. 2-2 에 나타 낸 것과 같이 2 ~ 13 μm 대역이 사용 된다. 여기서 단파영역은 2 ~ 5 μm 대역에서 복사가 검출 가능한 범위를 말하며, 장파영역은 8 ~ 12 μm 대역의 복사가 검출 가능하다. 그리고 중간에 5 ~ 8 μm 대역에서는 대기에서의 낮은 투과율에 의해 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하다. 또한 단파영역에서는 고온의 적외선 검출에 적합하고 장파영역에서는 저온의 적외선 검출에 적합하다.^{(7),(8),(9)}

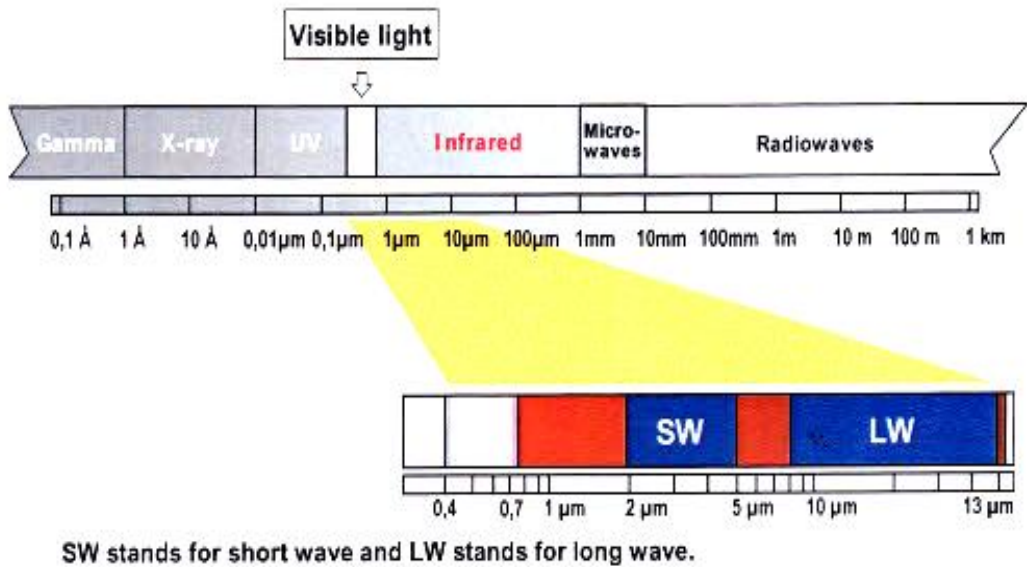


Fig. 2-1 The electromagnetic spectrum

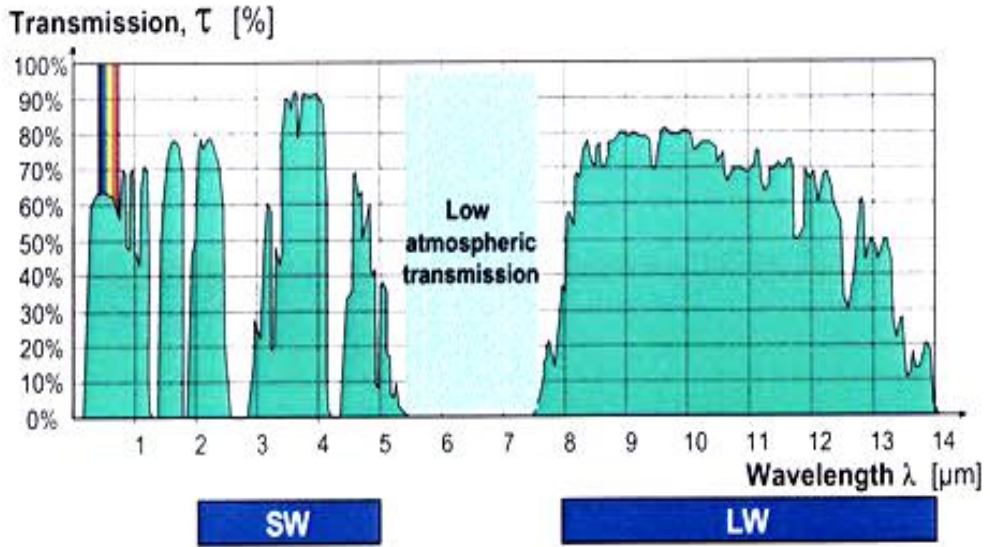
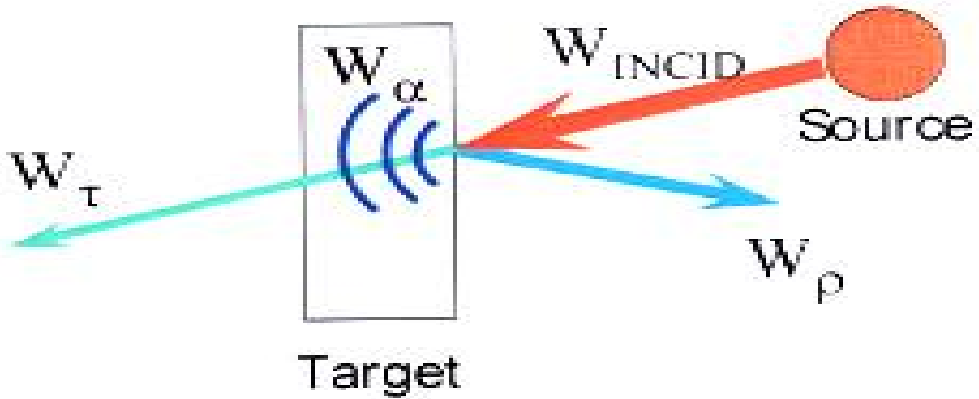


Fig. 2-2 Atmospheric transmission in different wavelength bands

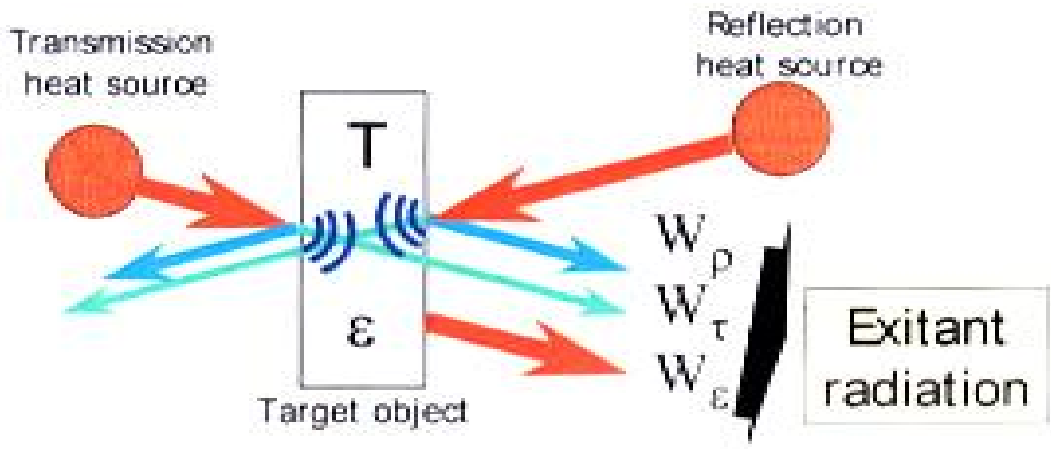
빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장 중에서 적외선만을 검출해 내어 온도분포를 측정하면 복사에너지는 Fig. 2-3, Fig. 2-4 에서 나타난 것과 같이 Incident 복사와 Exitan 복사로 세분화 시킬 수 있다.



$$W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{INCID} = 100\%$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Fig. 2-3 Incident radiation



$$W_\epsilon + W_\rho + W_\tau = W_{\text{EXIT}} = 100\%$$

$$\epsilon + \rho + \tau = 1$$

Fig. 2-4 Exitant radiation

Incident 복사란 물체의 주위 사물로부터 물체에 접촉하는 모든 복사에너지를 일컫는 말이며, 흡수율(α) + 반사율(ρ) + 투과율(τ) = 1로 나타낼 수 있고, Exitant 복사는 원래의 열원에 상관없이 물체의 표면에서 방출되는 모든 복사 에너지를 말하며, 방출율(ϵ) + 반사율(ρ) + 투과율(τ) = 1로 나타낼 수 있다.

즉, $\alpha = \epsilon$ 이므로 물체가 Incident 복사에너지를 흡수하는 용량 또는 능력은 그 물체 자신이 복사에너지를 방출하는 용량과 언제나 동일하다는 것을 알 수 있다.⁽⁶⁾

그리고 어떠한 파장이라도 그것에 접촉하는 모든 복사선을 흡수하는 물체를 흑체라고 정의하는데, 이는 모든 빛을 똑같이 방출시킬 수 있으며, 이 온도 검출은 흑체에 가까운 대상체를 제작하여 이 시편을 기준으로 하여 보정된 값으로 나타낸다. 여기서 중요하게 작용하는 요인은 각각의 물체와 온도, 거리에 따라 달라지는 방사율값의 차이에 따라서 온도를 측정이 가능하다는 것이다.

$$W = \sigma T^4 \text{ W/m}^2 \quad (2-1)$$

식 (2-1)에서, σ 는 스테판 볼츠만상수는 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$)이다.

방사율(Emissivity)이란 복사열이 완전히 흡수되는 흑체의 복사강도를 기술한 플랑크(Planck)법칙에 의해 물체로부터 방출되는 전체 에너지는 스테판 볼츠만 법칙으로 다음과 같다.

$$\text{스테판 볼츠만 법칙 : } E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2-2)$$

같은 온도 같은 파장에서 모든 파장의 방사를 완전히 흡수하는 가상의 물체에 대해 방출되는 복사에너지에 대한 방출되는 복사에너지의 비율로서 식으로 나타내면 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$\epsilon = \frac{W_{RB}}{W_{BB}} \quad , \quad W_{BB} = \frac{W_{RB}}{\epsilon} = T \quad (2-3)$$

또한 적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사 되어진 적외선 파장을 검출하여 스테판 볼츠만 법칙에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 검출기로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 이미지로 보여주는 것이다.^{(10),(11),(12)}

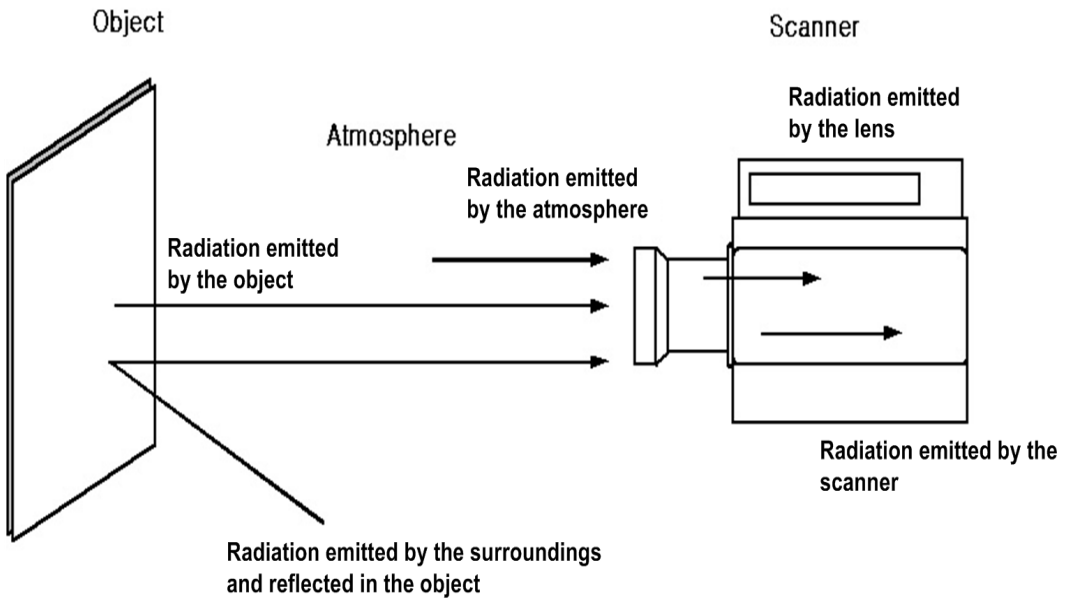


Fig. 2-5 Radiation contributions to the general measurement situation

Fig. 2-5에 나타난 것과 같이 대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 방사에너지와 대기에 의해 감소한 실험체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 실험체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같다. 이에 상응하는 측정공식은 식 2-1에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 실험체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1 - \epsilon) \times I(T_{amb}) + (1 - \tau) \times I(T_{atm}) \quad (2-4)$$

이 측정 공식은 자동적으로 계산되며, 실험체에 대해 입력해야 되는 매개변수는 대상체의 방사율, 실험체의 거리, 상대 습도, 대기 온도, 반사된 주위 온도 등이다.

식 2-4에서 $I(T)$ 는 온도 T일 때 흑체로부터 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이다. 식 3-4은 불투명 물체, Lambertian 표면, 일정 분

광 방사율(grey body)이라는 가정을 갖는다.

이것은 두 흑체 온도를 기준으로 4개의 온도센서 스캐너를 사용하는 마이크로프로세서로 컨트롤된 시스템에 의해 실행된다. 이러한 교정기능은 블랙바디온도와 스캐너의 신호 출력간의 비선형 관계를 표현해 주는 것이며 각 렌즈와 각 필터, 영역 조합은 그 자신이 교정 기능을 가지고 있다. 이 기능에 대한 상수는 스캐너에 저장되어 있고 시스템은 자동으로 사용된 조합에 대하여 적당한 상수를 선택한다. 또한 플랭크법칙과 스캐너 및 필터의 분광 응답을 이용하여 계산하지만 더 많은 정확한 결과는 측정에 의해서 얻을 수 있다. 이는 많은 흑체의 소스가 스캐너로 측정할 때, 측정 중에 이루어 질 수 있는 것이다.

교정기능은 일부 플랭크법칙과 일부 경험적인 것에 의존한다.

$$I = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - F} \quad (2-5)$$

식 2-5 에서 I 는 온도 값이고 R 은 대응인자, B 는 분광인자, F 는 모형인자를 나타낸다. T 는 물체의 온도이며 스캐너의 출력 신호는 입사된 방사에너지와 비례하는 것을 확인 할 수 있다.

검출기의 응답은 비선형이기 때문에 네 번째 측정 상승의 보정 기능이 작은 비선형 오차를 보정하여 준다.

$$I_s = \frac{U}{1 - (U \times L)} \quad (2-6)$$

식 2-6에서 U 는 스캐너 안에 아날로그/디지털 변환기로부터의 비디오 신호이며 L 은 비선형 상수, I_s 는 Object signal이다. 또한 Object signal은 측정 표시 단위이며, 이 신호는 비선형적인 교정을 거친 후 표시된다. 이 신호는 방사에너지와 비례한다.^{(13),(14),(15)}

실험체 매개변수들의 선정은 특정한 측정 상황을 설명한다. 그리고 대상물 온도에서 방사에너지 값의 전환에 앞서 실험체 매개변수들은 방사 계수, 대기온도, 주위 온도, 실험체거리, 상대 습도, 반사된 주위 온도에 영향을 미치는 것을 포함하고 있다.

방사율의 경우 실제 실험체는 거의 “검정색”이 아니기 때문에 방사요인은 측정 식으로 나타난 적외선 온도 측정으로 고려하여야 한다. 실험체 방사는 측정 될 수도 있고 표에서 찾을 수 있다. 보통 실험체 재질과 표면은 약 0.1~0.95 범위에서 방사율을 갖는다. 광택이 많이 나는 표면은 0.1이하로 떨어지고 산화 혹은 페인트 표면은 방사가 아주 크게 증가한다. 사람 피부 방사율은 1에 가깝게 표시된다. 반사된 주위온도에서 불투명한 실험체의 반사요인은 $\rho = 1 - \epsilon$ 로서 얻을 수 있다. 따라서 낮은 방사 요인은 실험체로부터의 방사율이 같은 온도의 흑체의 그 것보다 낮을 뿐만 아니라, 주위로부터 바람직하지 않은 복사가 실험체에서 반사되어 스캐너로 들어오게 됨을 의미한다. 측정 식은 이 복사를 보정하며, 이 보정은 반사된 주위온도에 근거한 것이다. 대부분 대기온도, 반사 주위 온도 값은 같은 것이라 생각한다. 대기온도는 실험체와 스캐너 사이의 대기의 온도를 말한다. 그 경로의 온도가 과도하게 변화한 경우, 그 때의 평균값이 사용 된다. 계산된 투과율은 스펙트럼 대역에서 대기흡수 적외선 복사의 구성을 사용하고 있다. 가장 중요한 가스들은 물과 이산화탄소이다. 이 흡수는 실험체에서의 측정은 적외선 복사를 알게 할 것이다. 이 대기 희박 효과는 측정 공식에 의해 보상된다. 측정 공식은 실험체와 스펙트럼 안의 복사에 의한 앞 렌즈사이의 대기 투과율을 의미하는 상수 τ 를 사용한다. 이 τ 는 실험체 거리, 대기 온도, 상대 습도의 기능으로

$$\tau = X \times \exp(-\sqrt{d}(\alpha_1 + \beta_1 \sqrt{W})) + (1 - X) \times \exp(-\sqrt{d}(\alpha_2 + \beta_2 \sqrt{W})) \quad (2-7)$$

식 2-7에서 τ 는 효과적인 대기 투과율이고, X 는 무게 요인, α_1 와 α_2 는 감쇠 계수, β_1 과 β_2 는 수증기와 관련된 감쇠 계수, d 는 물체와 스캐너 렌즈 앞쪽 사이의 거리, W 는 equivalent water content(소프트웨어로부터 계산된 상대습도와 대기온도의 함수)이다. 대기 상수 $X, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 는 수증기 함수와 실험체 거리 사이에 계산된 것으로 알고리즘에 알맞게 계산되며, Lowtran 대기 모델에서 모든 스펙트럼

은 전형적인 대기 안에 표준 필터에 의해 값을 이끌어내 사용된다. 이 모든 대기 상수는 새 필터를 선택했을 때 자동적으로 적재된 것과 스캐너 안에 포함된다.

추정 투과율에서 측정 조건은 트릭이 있을 수도 있고, 대기를 통한 전송 계산에 있어서 정상적인 연산 방식이 적용되지 않을 수 있다. 그와 같은 경우 그것은 종렬 추종 투과율로 값을 세팅하므로 자동적으로 계산된 대기 전송을 무시 할 수가 있다. 즉, 이는 측정통로에서 사파이어 윈도우가 있을 경우인 것이다. 이러한 윈도우는 0.87의 투과율을 갖고 있고, 이는 계산된 투과율을 곱해야 한다. 추정 투과율 값은 보통 전혀 값을 갖지 않으나 0은 사용되지 않는다.

상대습도는 실험체와 스캐너 사이의 대기의 상대 습도이다. 이 매개변수는 유효 대기 투과율의 계산에 사용된다.

$$I'_o = \epsilon_o \tau_o I_o + \tau_o (1 - \epsilon_o) I_\alpha + (1 - \tau_o) I_{atm} \tag{2-8}$$

$$I_o = \frac{R}{e^{b/T_o - F}} \tag{2-9}$$

식 2-8에서 I_o 는 물체 방사를 위한 디지털 값이고, I'_o 는 스캐너로부터 받아들인 총 방사량(디지털 값에서), R, B, F 는 보정 매개변수, T_o 는 물체의 온도, ϵ_o 는 물체의 방사율, τ_o 는 물체의 투과율, I_α 은 (a)에 의하여 변환된 주변의 온도, I_{atm} 은 식 2-9에 의하여 변환된 대기의 온도이며, 투과율 τ 는 공식에 의해 계산된다. 공식에서 W 인자는 다음 식에 의해 계산된다.

$$W = \text{RelHum} \times \text{precipitable water content} \tag{2-10}$$

Water content는 다음 식에서 표현할 수 있다.

$$\text{PrecWater} = \exp(k1 + k2 \times T + k3 \times T^2 + k4 \times T^3) \tag{2-11}$$

$$W = \text{RelHum} \times \exp(k1 + k2 \times T + k3 \times T^2 + k4 \times T^3) \tag{2-12}$$

식 2-11과 식 2-12에서 $k_1=1.5587$, $k_2=6.939E-2$, $k_3=-2.7816E-4$, $k_4=6.8455E-7$ 의 값을 갖는다.

적외선 열화상 기법은 기본적인 Pulse 적외선 열화상기법과 Lock-in 적외선 열화상 기법, Pulse-phase 적외선 열화상 기법이 있다. Pulse 적외선 열화상 기법은 적외선 열화상 기법에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 짧은 순간의 열 자극은 사용이 편리한 heating sources를 이용하여 평판에 직접 주사하는 방법을 취한다. 신속한 열 자극은 재료의 손상을 방지한다. 기본적으로 Pulse 적외선 열화상 기법은 시편에 순간의 열 자극을 주고, 이때의 온도 변화를 기록하는 것이다. 이러한 현상의 금속에서의 온도 변화는 금속 내부에서 전파의 산란으로 인하여 매우 빨리 변화한다. 이에 시편의 결함 검출에 있어서 깊이에 따라 표면 온도를 관찰하였을 때 주위의 온도가 달라질 것이다. 깊은 결함일수록 명암의 차이를 보여 검출하기 편리하다.

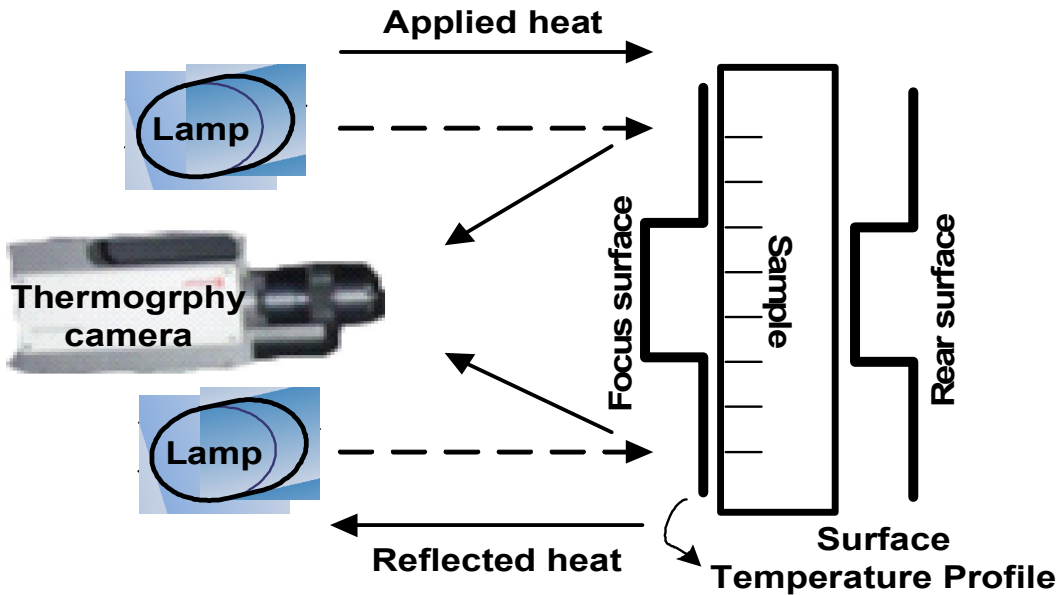


Fig. 2-6 Infrared thermography (Pulse technique)

Fig. 2-6은 Pulse 적외선 열화상 기법이며 Fig. 2-7은 Lock-in 적외선 열화상 기법이다. Lock-in 적외선 열화상 기법은 모듈레이터 램프의 레이저 공학에서 기초되

었다. 측정 실험체에 저주파의 열파장을 동시에 주사하여 적외선열화상카메라로 측정을 하는 원리이다. 또한 적외선열화상카메라 검출기로 주사된 물체에 대해서 수많은 점 중에서 단지 1개의 점에 대해서만 모니터링이 가능하다.^{(16),(17),(18)}

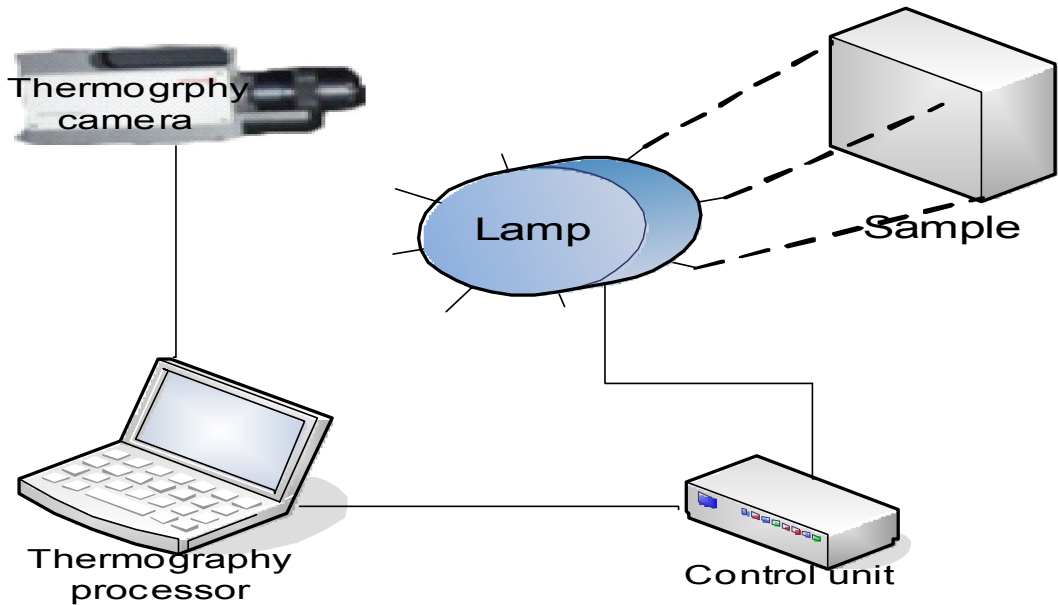


Fig. 2-7 Infrared thermography (Lock-in Technique)

제 3 장 컴프레셔모듈 안정성검증 및 신뢰성평가

제 1 절 컴프레셔모듈 Modal해석

1. 해석조건

컴프레셔 모듈의 안정성을 검증하기 위해 구조해석 중 Modal 해석을 진행하였으며, Modal해석은 반복되는 진동에 대한 피로 파괴 발생을 알아보기 위한 해석이며, 구조물의 진동 모드 현상과 고유진동수를 구하는 해석이다. 진동수란 주기적인 현상이 매초 반복되는 횟수로써 1초간 진동한 횟수를 말한다. 주기 진동수의 역수이며, 한 번 진동하는데 걸리는 시간이다. 진폭은 위아래로 흔들린 폭이며 진동을 변위와 시간의 함수로 나타낸 것이다. 고유진동수는 탄성체가 자연스럽게 진동하는 진동수이며 탄성물질로 이루어진 물체가 진동 시 그 물체에 해당하는 고유의 진동수로 진동하여 고유의 소리를 낸다. 물체의 재료 특성이나 모양에 의해 결정되는 특정 진동수를 말한다. 공진은 외부 가진 진동수와 고유진동수가 일치할 때 발생하는 현상이며 이로 인해 변형 과 파괴가 발생하게 된다. 공진이 발생하면 감쇄가 없는 경우 변위는 무한대가 되어 구조물을 파괴시킨다. 자동차 엔진은 정상적인 운전 조건에서는 공회전부터 운전자의 가속페달 조작에 따라서 빈번하게 회전수가 변화되는 특성을 가진다. 이는 일정한 회전수를 가지고 작동되는 일반적인 기계와 차별되는 자동차와 같은 수송기계가 가지는 독특한 운전방식 자동차 진동 소음 현상은 빈번한 회전수 변화에 따른 진동수 특성을 파악할 수 있어야한다. 4사이클 내연기관인 경우 엔진의 크랭크 샤프트 2회전하는 동안 각각의 실린더에서는 모두 한번씩의 폭발과정이 있다. 동일한 회전수라 하더라도 엔진의 실린더 수가 다를 경우에는 엔진의 흔들림으로 인하여 차체에 가하는 진동수는 많은 변화를 갖는다.

일반적인 4사이클 엔진에 있어서 4기통의 속도 범위는 공회전 회전수가 750rpm, 최대 회전수 6,000rpm 이다. 실린더 수가 많아질수록 주요 진동수 분포가 높아지면서 넓어지고 있다. 이는 한정된 영역에서 대표적인 진동형태(굽힘 및 비틀림 진동)들이 차체의 고유진동수가 대략 20~30Hz영역에 위치해 있기 때문에 실린더 수가 증가할수록 차체의 진동현상을 회피할 수 있는 기회가 많아진다고 볼 수 있다. 고

급 대형 차량일수록 많은 실린더를 가진 엔진이 채택되었던 것은 출력뿐만 아니라 이러한 엔진과 관련된 진동수 문제도 함께 고려되었기 때문이다. 4기통 엔진에서는 엔진 회전의 2차 성분(2nd order)이, 6기통 엔진에서는 엔진 회전의 3차 성분(3rd order)이 주 가진원이 된다. 여기서 2차 성분과 3차 성분은 엔진의 크랭크샤프트 회전수를 기준으로 2배 또는 3배의 회전속도로 진동 가진력이 발생된다는 것을 의미한다. 4기통 엔진인 경우에는 엔진 1회전당 가스 폭발력(토크발생)이 2번씩 6기통 엔진에서는 1회전당 3번의 가스 폭발력이 존재한다. 가진원의 주파수 성분이 엔진 회전수의 2배 또는 3배의 형태로 표현한다. 엔진에서 유발되는 진동수(f)와 차수(order)간의 관계 6기통 엔진의 경우에는 엔진에 작용하는 힘과 모멘트들이 모두 상쇄되므로, 4기통 엔진보다 훨씬 부드럽고 조용한 결과를 낳는다. 이에 비하여 3기통 엔진의 경우에는 근본적인 수직 불균형은 없으나, 1차 및 2차의 불균형 모멘트를 갖고 있어서 진동소음측면에서 불리하다고 볼 수 있다.^{(19),(20)}

Modal해석을 진행하기 위해 Fig. 3-1 은 자동차 적용되는 에어컨 컴프레셔 모듈의 MESH를 생성하였다. 에어컨 컴프레셔 모듈의 해석격자는 Nodes는 1,042,094, Elements는 679,725개로 생성되었다. Fig. 3-2 는 Modal해석의 경계조건을 나타낸다.

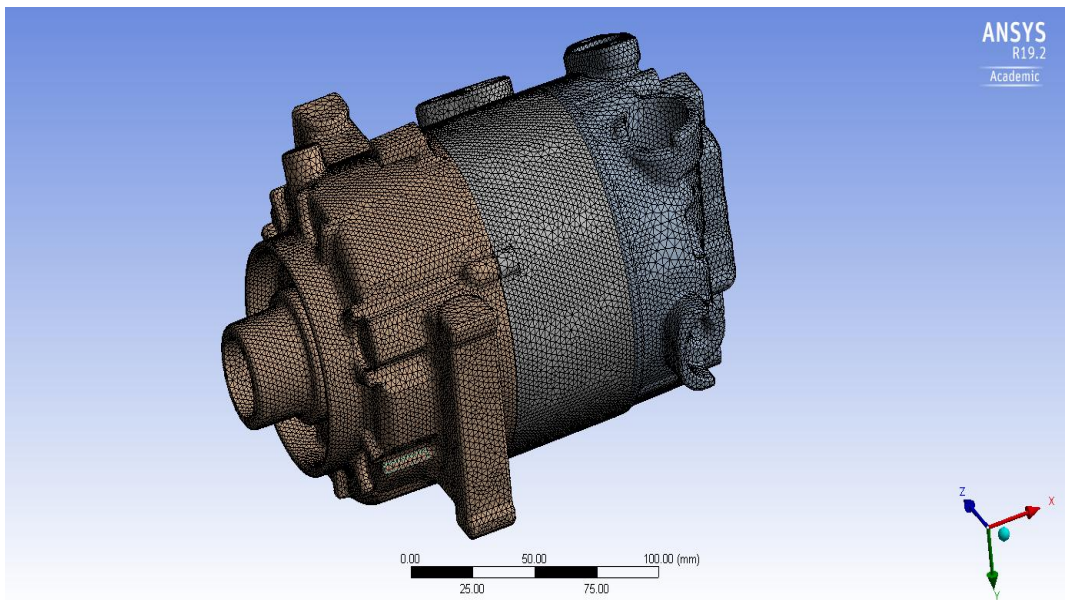


Fig. 3-1 Compressor Module Mesh Generation

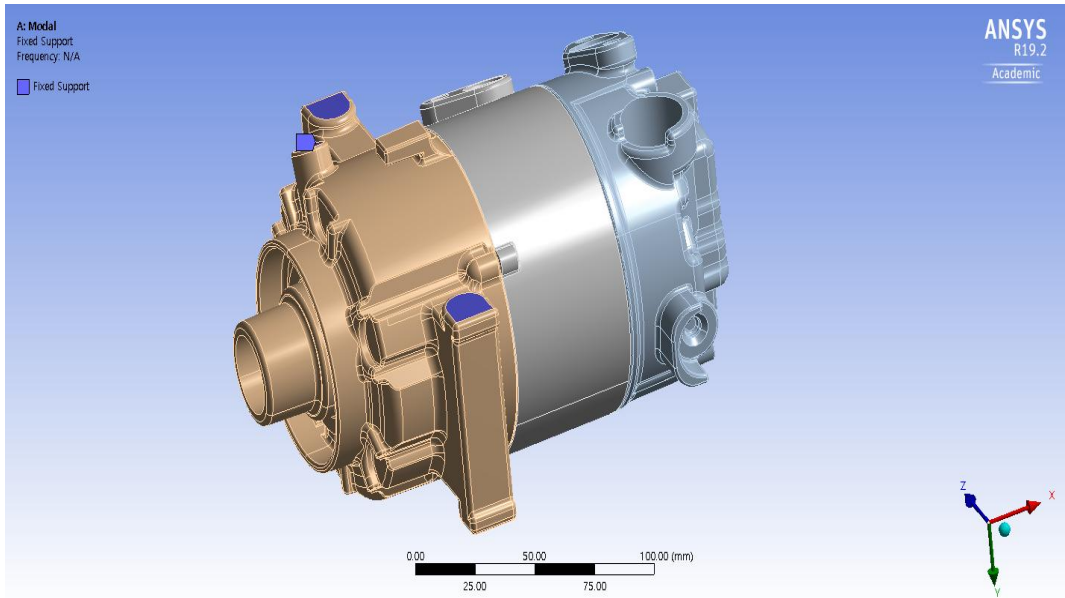


Fig. 3-2 Compressor Module Boundary Condition

2. 해석결과 및 고찰

Fig. 3-3 은 에어컨 컴프레셔 모듈의 1차 고유진동수 X축 변형량을 나타낸다. 최소 -22.559mm, 최대 6.4969mm, 평균 -8.5097mm, Cylinder 부품에서 최소로, Rear housing 부품에서 최대로 변형되며, 그 때의 주파수는 501.07Hz 이다. Fig. 3-4 는 에어컨 컴프레셔 모듈의 2차 고유진동수 X축 변형량을 나타내며, 최소 -15.138mm, 최대 18.805mm, 평균 0.71623mm, Cylinder에서 최소로, Front head 부품에서 최대로 변형되며, 주파수는 963.37Hz 이다. Fig. 3-5 는 에어컨 컴프레셔 모듈의 3차 고유진동수 X축 변형되며, 최소 -0.36908mm, 최대 23.896mm, 평균 18.887mm, Front head에서 최소, 최대 변형이 나타나며, 주파수는 1,954.6Hz 이다.

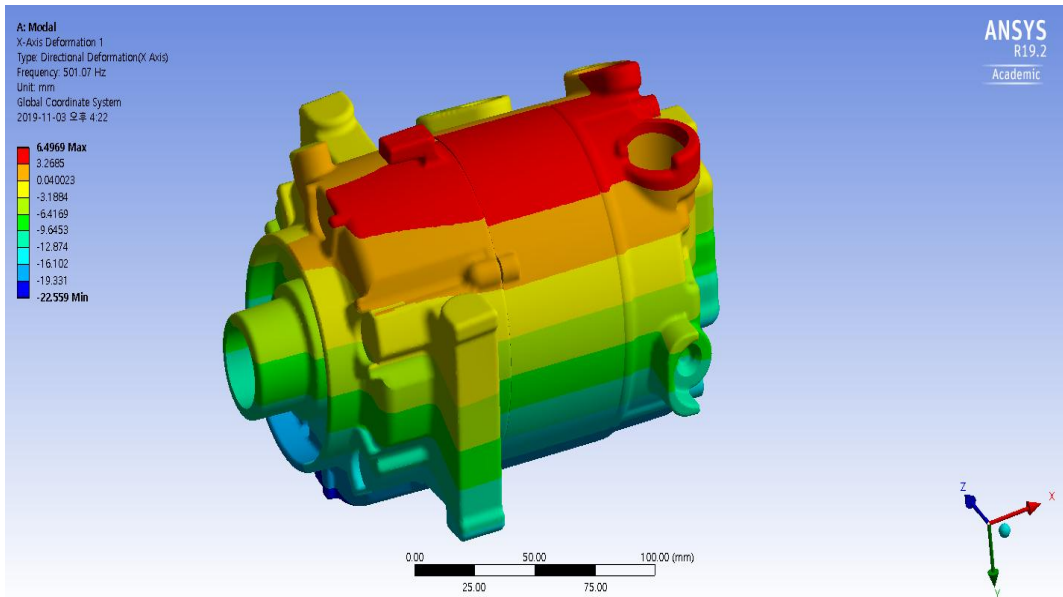


Fig. 3-3 Compressor Module Analysis Result X-Axis(Mode. 1)

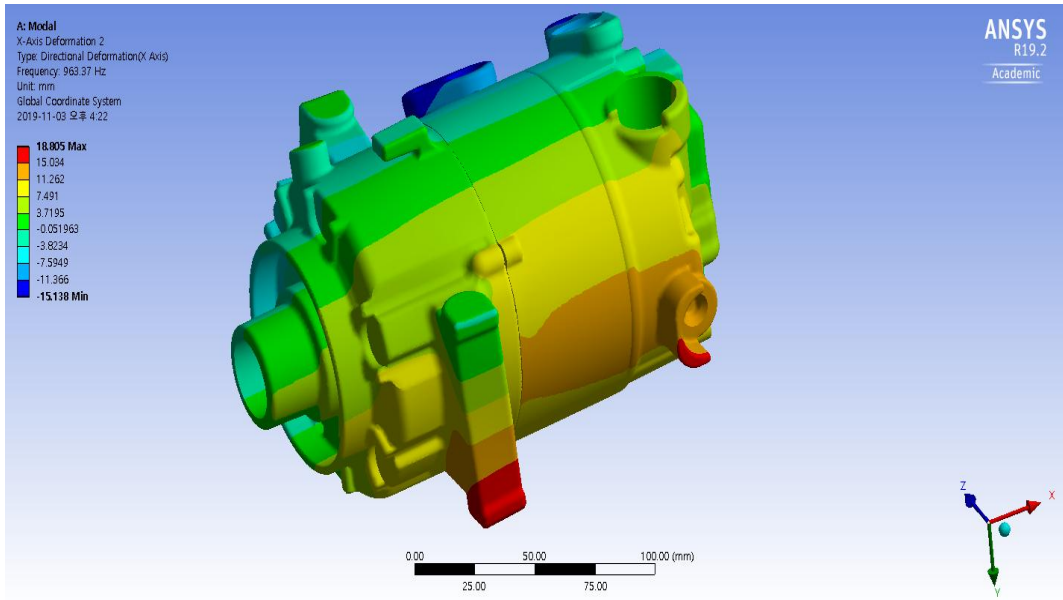


Fig. 3-4 Compressor Module Analysis Result X-Axis(Mode. 2)

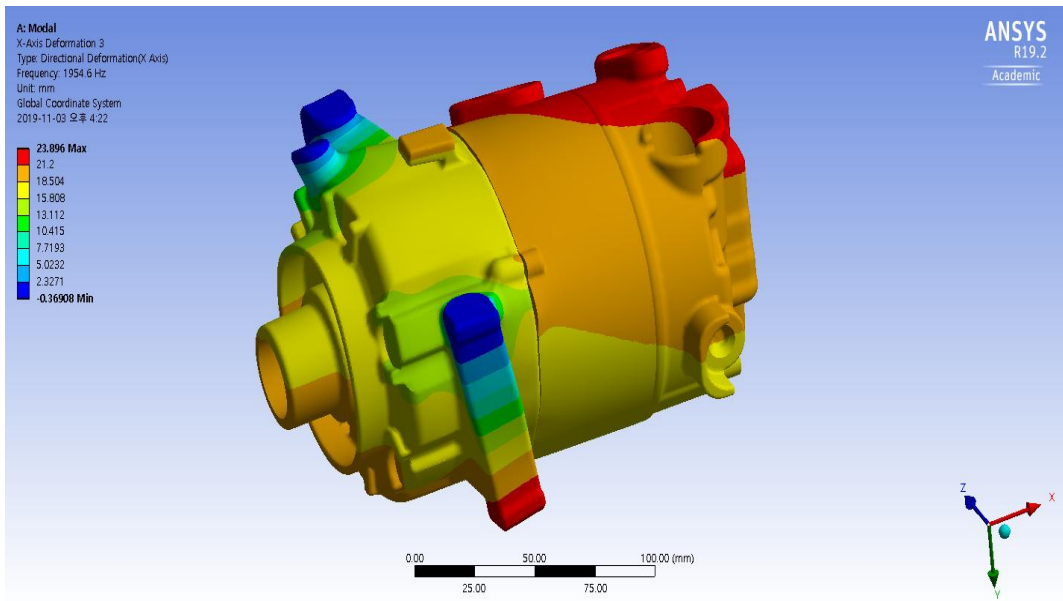


Fig. 3-5 Compressor Module Analysis Result X-Axis(Mode. 3)

Fig. 3-6 은 에어컨 컴프레서 모듈의 1차 고유진동수 Y축 변형량을 나타낸다. 최소 -12.706mm, 최대 36.031mm, 평균 13.03mm, Front head 부품에서 최소로, Rear housing 부품에서 최대로 변형되며, 그 때의 주파수는 501.07Hz 이다. Fig. 3-7 은 에어컨 컴프레서 모듈의 2차 고유진동수 Y축 변형량을 나타내며, 최소 -8.3448mm, 최대 3.5898mm, 평균 -2.4661mm, Rear housing 부품에서 최소로, Front head 부품에서 최대로 변형되며, 주파수는 963.37Hz 이다. Fig. 3-8 은 에어컨 컴프레서 모듈의 3차 고유진동수 Y축 변형량을 나타내며, 최소 -3.6833mm, 최대 16.458mm, 평균 9.154mm, Front head 부품에서 최소, Rear housing 부품에서 최대로 변형을 나타내며, 주파수는 1,954.6Hz 이다.

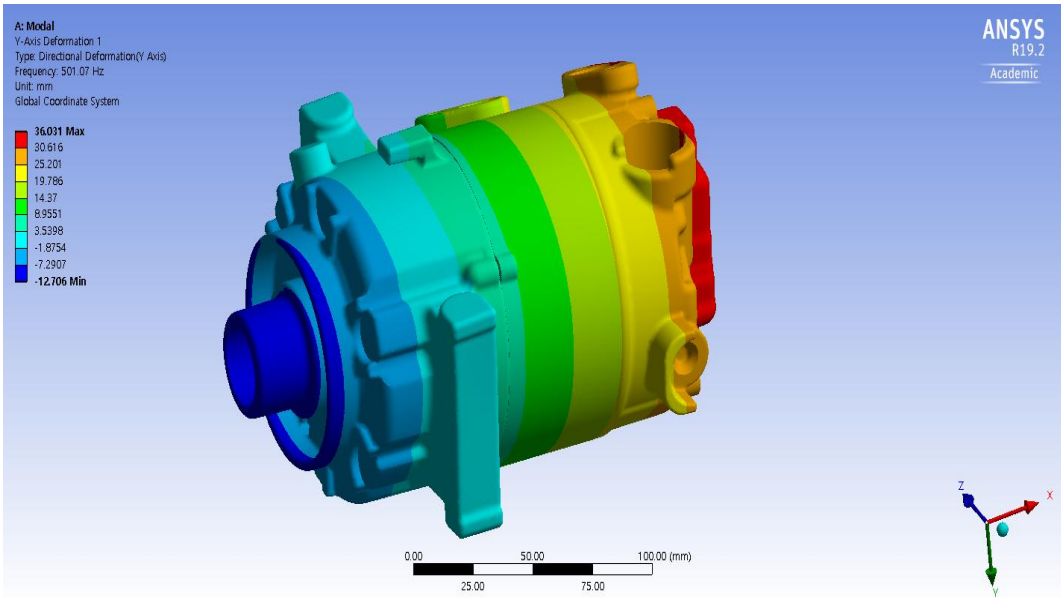


Fig. 3-6 Compressor Module Analysis Result Y-Axis(Mode. 1)

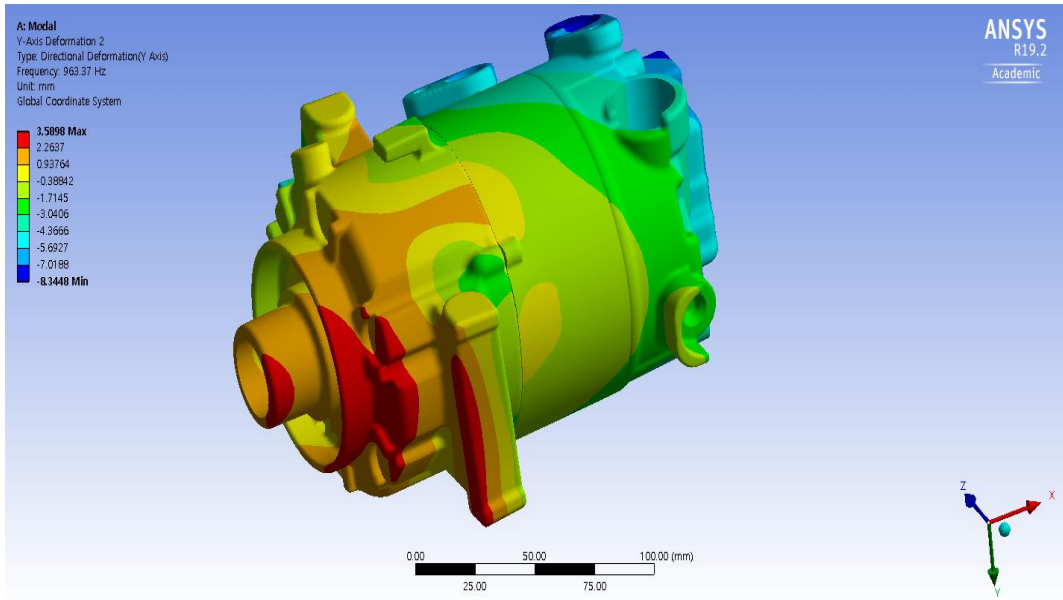


Fig. 3-7 Compressor Module Analysis Result Y-Axis(Mode. 2)

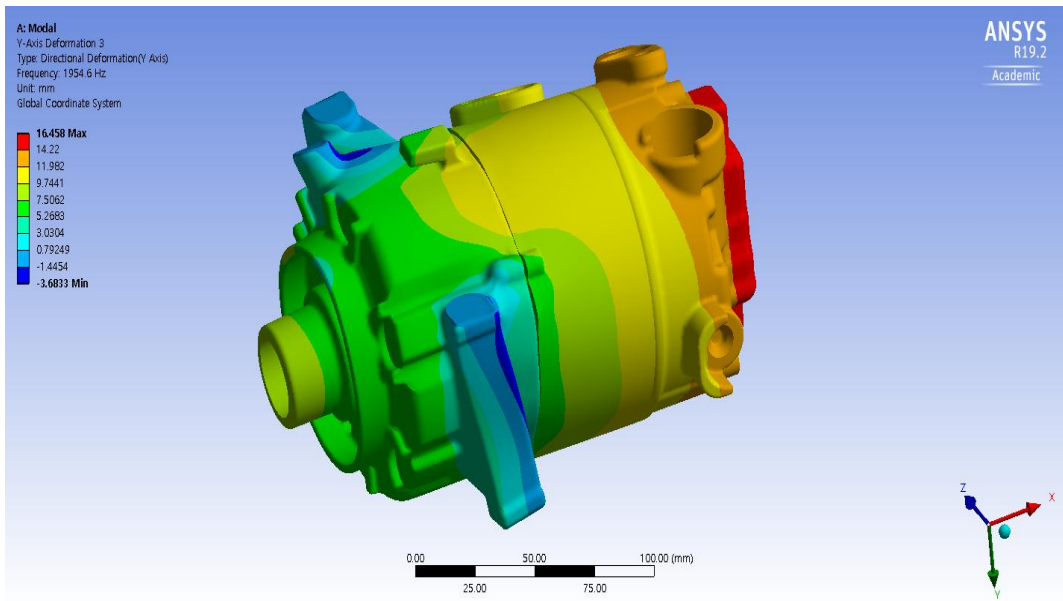


Fig. 3-8 Compressor Module Analysis Result Y-Axis(Mode. 3)

Fig. 3-9 은 에어컨 컴프레서 모듈의 1차 고유진동수 Z축 변형량을 나타낸다. 최소 -3.6478mm, 최대 7.443mm, 평균 2.3161mm, Front head 부품에서 최소로, Rear housing 부품에서 최대로 변형되며, 주파수는 501.07Hz 이다. Fig. 3-10 은 에어컨 컴프레서 모듈의 2차 고유진동수 Y축 변형량을 나타내며, 최소 -4.8819mm, 최대 38.709mm, 평균 16.891mm, Front head 부품에서 최소로, Rear housing 부품에서 최대 변형이 나타나며, 주파수는 963.37Hz 이다. Fig. 3-11 은 에어컨 컴프레서 모듈의 3차 고유진동수 Y축 변형량을 나타내며, 최소 -6.9292mm, 최대 6.2324mm, 평균 1.5459mm, Front head 부품에서 최소, 최대 변형이 나타나며, 주파수는 1,954.6Hz 이다. Fig. 3-12 는 1차부터 10차까지의 고유진동수를 그래프 이다. 자동차에서 발생하는 고유진동수 영역이 30Hz를 초과하여 진동에 대한 안정성을 확인 할 수 있었다.

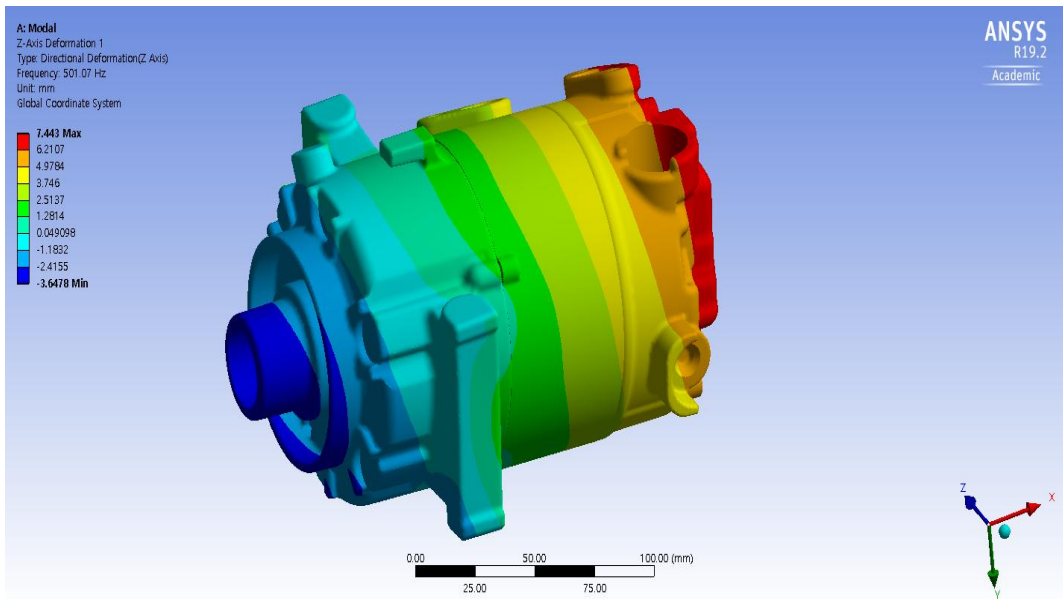


Fig. 3-9 Compressor Module Analysis Result Z-Axis(Mode. 1)

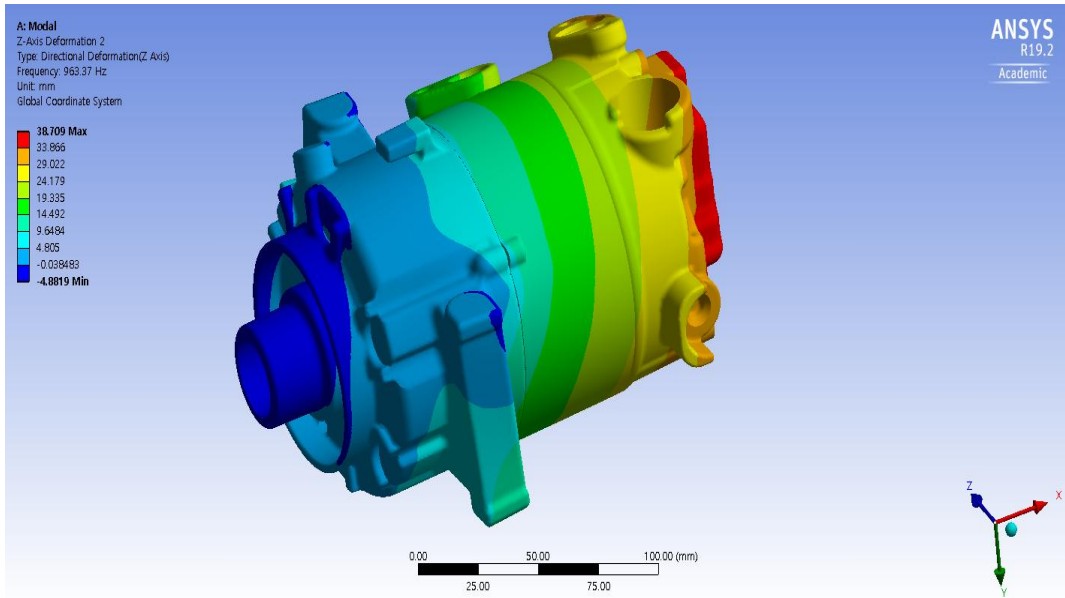


Fig. 3-10 Compressor Module Analysis Result Z-Axis(Mode. 2)

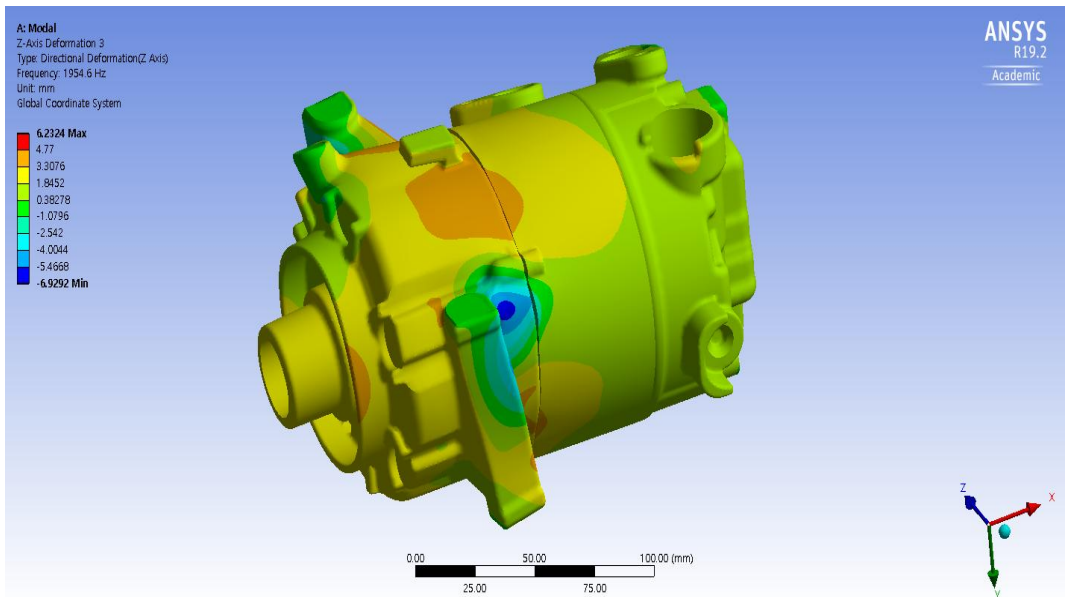


Fig. 3-11 Compressor Module Analysis Result Z-Axis(Mode. 3)

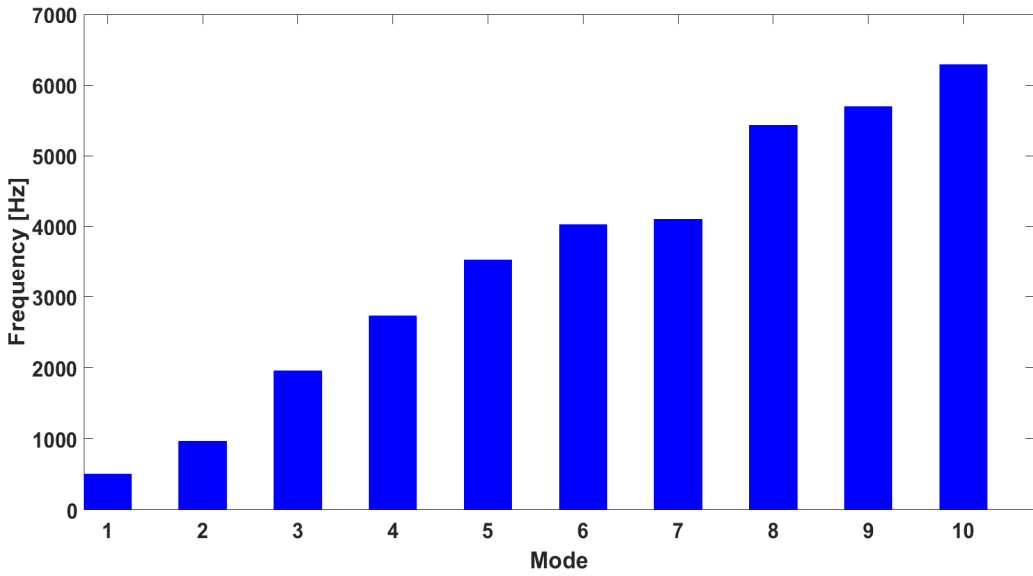


Fig. 3-12 Compressor Module Natural Frequency Graph

제 2 절 적외선 열화상 기법 적용 신뢰성평가

1. 실험결과 및 고찰

모든 물체는 절대온도 제로 켈빈(0 Kelvin) 이상에서 적외선 복사에너지를 방출한다. 복사란 전도와 대류가 고체, 액체, 기체 등의 매질을 이용하여 열 이동을 하는 것과는 달리 매질을 통하지 않고 복사선에 의하여 열을 이동하는 것을 말한다. 적외선 열화상 측정 원리는 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장의 적색으로, 낮은 곳은 단파장의 청색으로 나타낸 열화상이다. 따라서 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알 수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정이 가능하다. Fig. 4-1 ~ Fig. 4-3 은 결함이 있는 에어컨 컴프레서 모듈 시제품을 냉각하여 액티브 적외선 열화상 기법을 적용하여 아래와 같은 열화상 이미지와 온도 데이터를 획득하였다. Fig. 4-1 은 에어컨 컴프레서 모듈을 급속한 열화상 이미지로 파란색 원부분이 결함을 나타내고 있다. Fig. 4-2 는 Fig. 4-1 의 결함부분 위로 Spline을 적용하였다. Fig. 4-3 은 Fig. 4-2 의 Spline을 기준으로 온도데이터를 추출하여 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 X축을 기준으로 160~180 사이에서 Y축 온도가 19℃에서 21℃로 약 2℃ 정도 높음을 확인할 수 있는데 이 부분이 결함으로 사료된다.

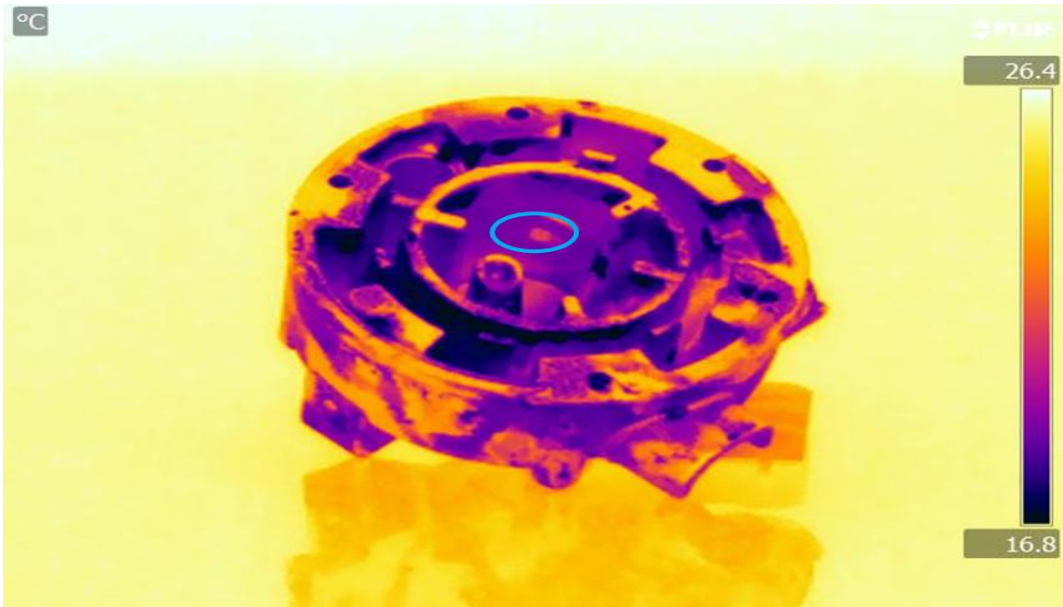


Fig. 3-13 Active Technique Applied Cooling Thermal Image

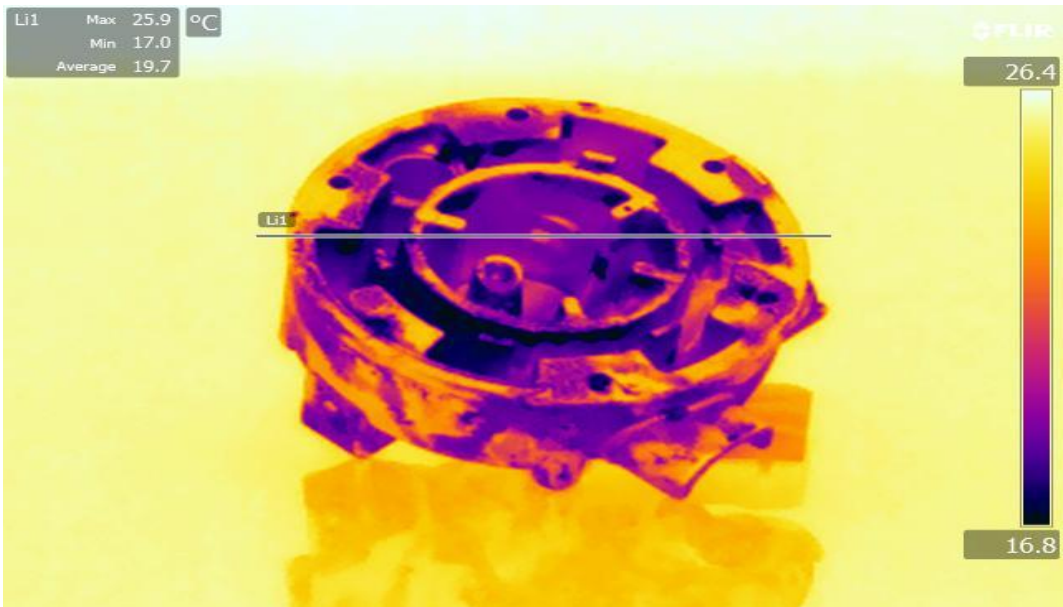


Fig. 3-14 Active Technique Application Cooling Thermal Image Spline

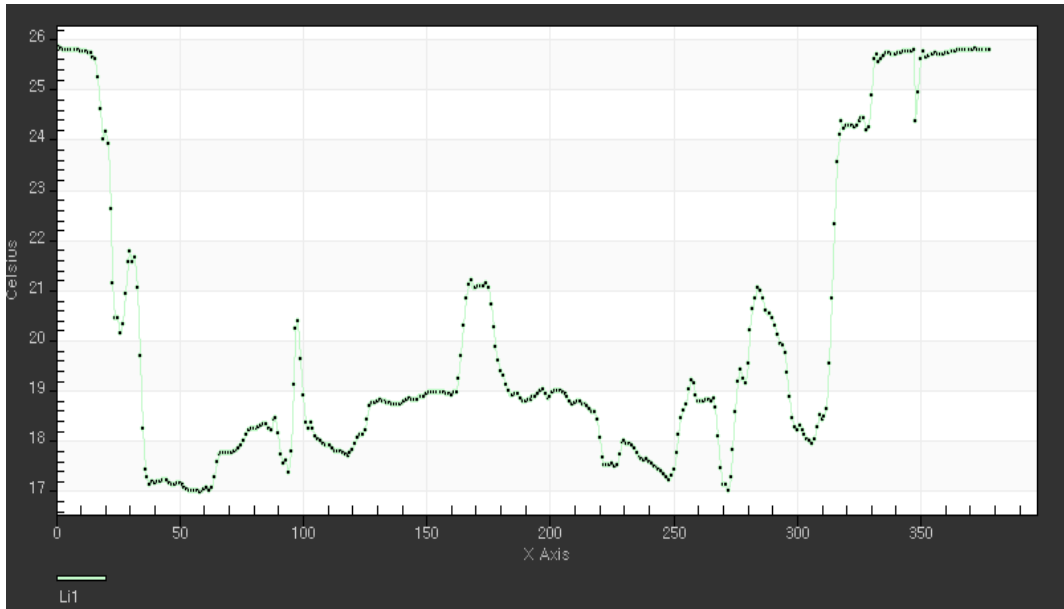


Fig. 3-15 Apply Active Technique Cooling Thermal Imaging Graphs

Fig. 4-4 ~ Fig. 4-7 은 결함이 없는 정상 에어컨 컴프레서 모듈 시제품을 1kW 할로겐램프 열원을 이용한 액티브 적외선 열화상 기법을 적용하여 아래와 같은 열화상 이미지와 온도데이터를 획득하였다. Fig. 4-4 는 에어컨 컴프레서 모듈을 할로겐 램프 열원을 가한지 7분 때의 열화상 이미지를 나타내며 Spline을 적용하였다. Fig. 4-5 는 Fig. 4-4 의 Spline을 온도데이터로 추출하여 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 정상제품이어서 온도변화가 크지 않음을 확인하였다. Fig. 4-6 은 에어컨 컴프레서 모듈을 할로겐 램프 열원을 가한지 15분 때의 열화상 이미지를 나타내며 Spline을 적용하였다. Fig. 4-7 은 Fig. 4-6 의 Spline을 온도데이터로 추출하여 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 정상제품이어서 온도변화가 크지 않음을 확인하였다. Fig. 4-8 ~ Fig. 4-11 은 결함이 있는 정상 에어컨 컴프레서 모듈 시제품을 1kW 할로겐램프를 열원을 이용한 액티브 적외선 열화상 기법을 적용하여 아래와 같은 열화상 이미지와 온도데이터를 획득하였다. Fig. 4-8 은 에어컨 컴프레서 모듈을 할로겐 램프 열원을 가한지 7분 때의 열화상 이미지를 나타내며 Spline을 적용하였다. Fig. 4-9 는 Fig. 4-8 의 Spline을 온도데이터로 추출하여 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 온도변화가 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 4-10 은 에어컨 컴프레서 모듈을 할로겐 램프 열원을 가한지 15분 때의 열화상 이미지를 나타내며 Spline을 적용하였다. Fig. 4-8 과 다르게 결함 부분이 육안으로 확인된다. Fig. 4-11 은 Fig. 4-10 의 Spline을 온도데이터로 추출하여 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 X축을 기준으로 200 부근에서 Y축 온도가 약 37°C에서 약 39°C로 약 2°C 정도 낮음을 확인할 수 있는데 이 부분이 결함으로 사료된다.

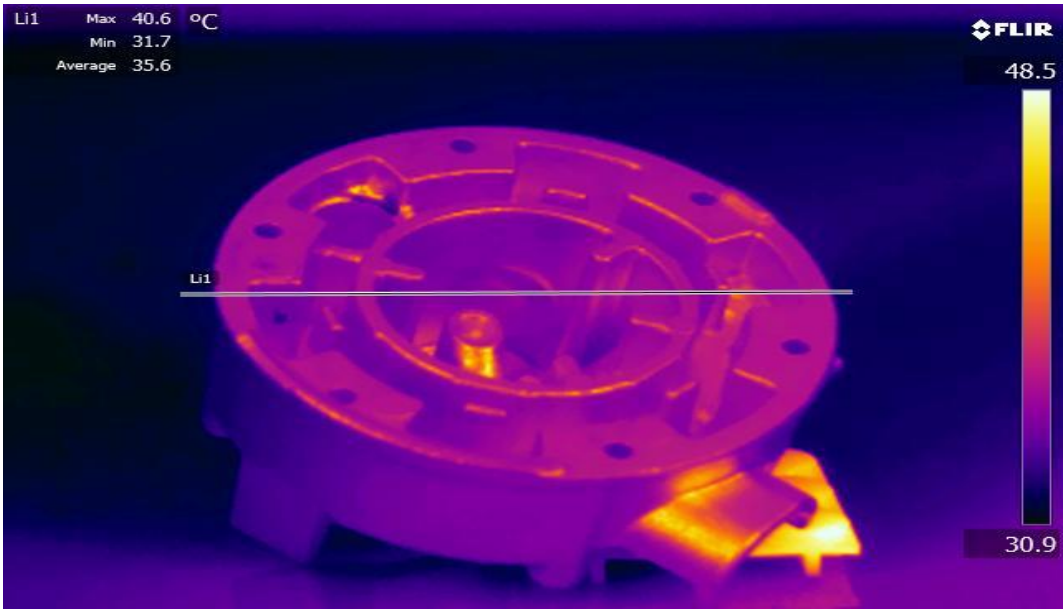


Fig. 3-16 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(7Min)

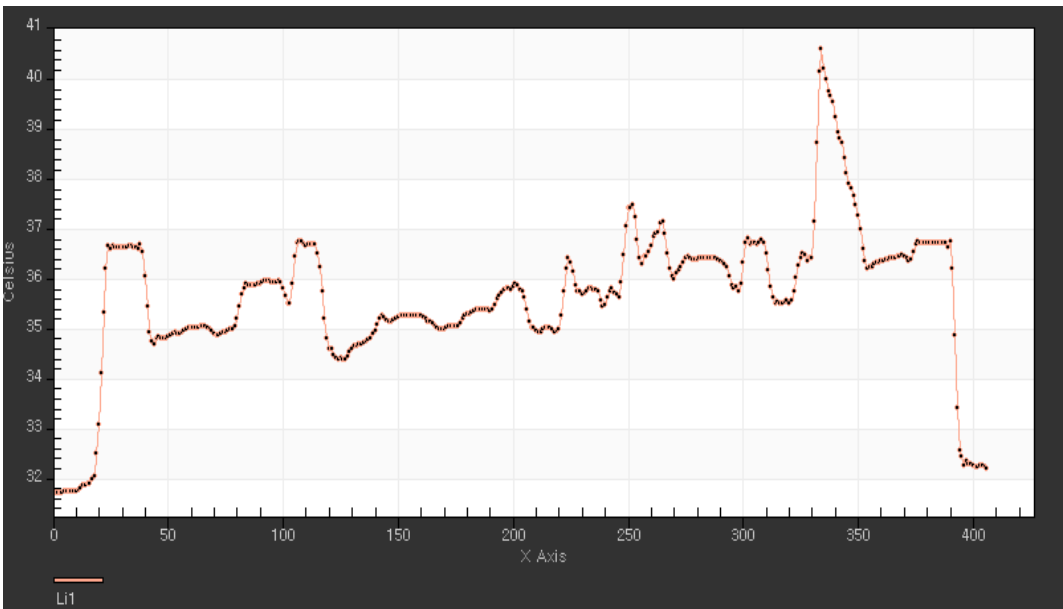


Fig. 3-17 Active Technique Application Halogen Thermal Imaging Graph_(7Min)

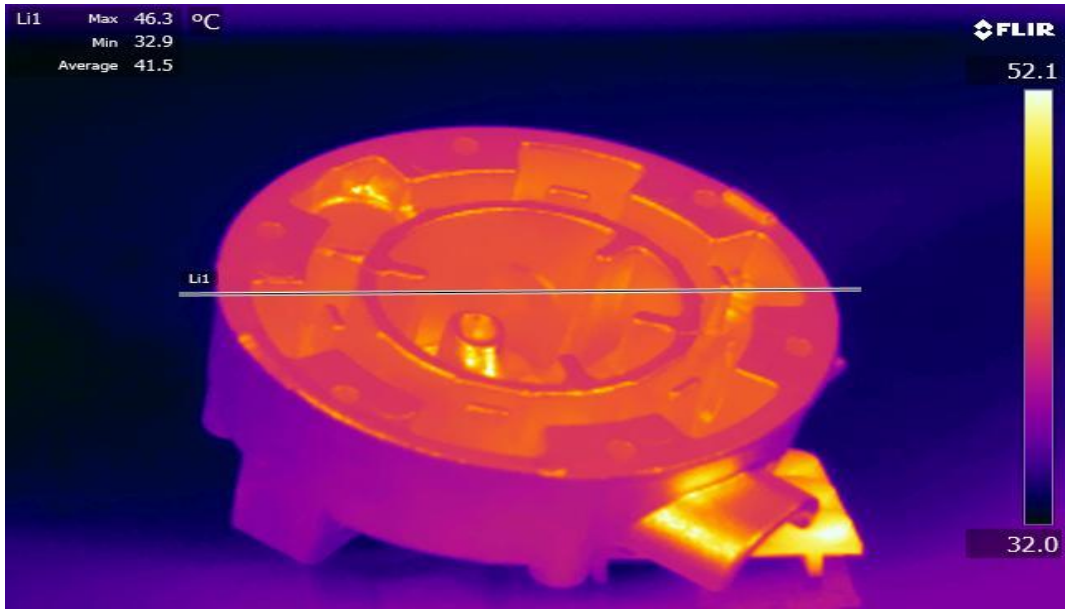


Fig. 3-18 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(15Min)

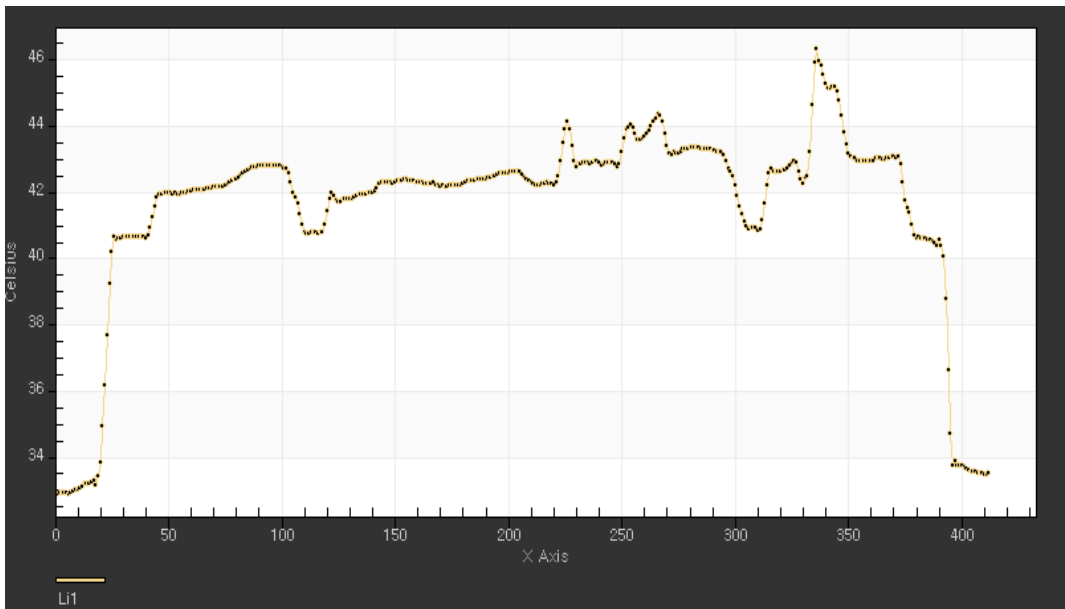


Fig. 3-19 Active Technique Application Halogen Thermal Imaging Graph_(15Min)

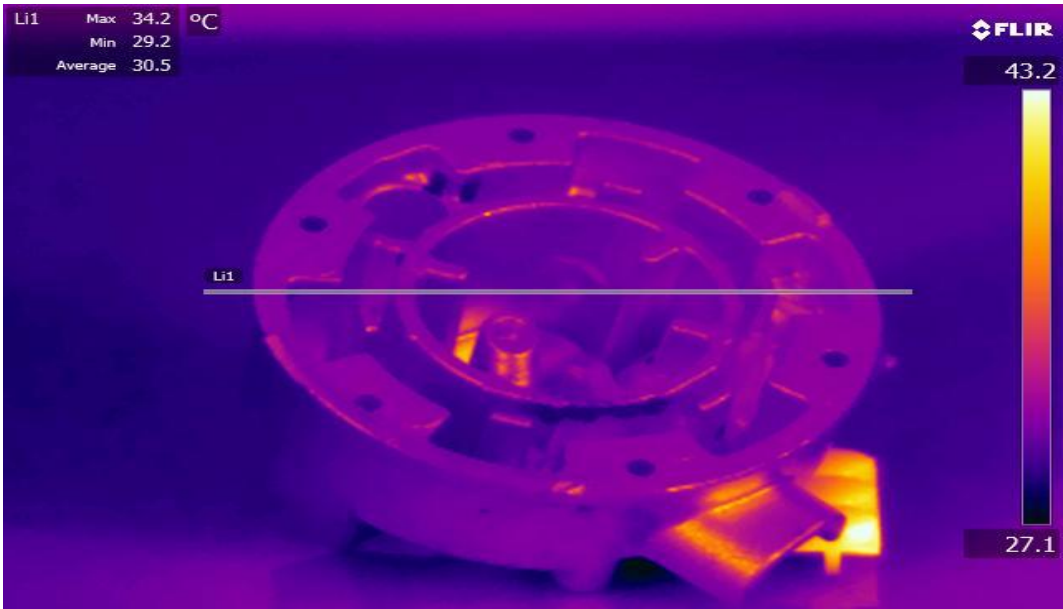


Fig. 3-20 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(7Min)

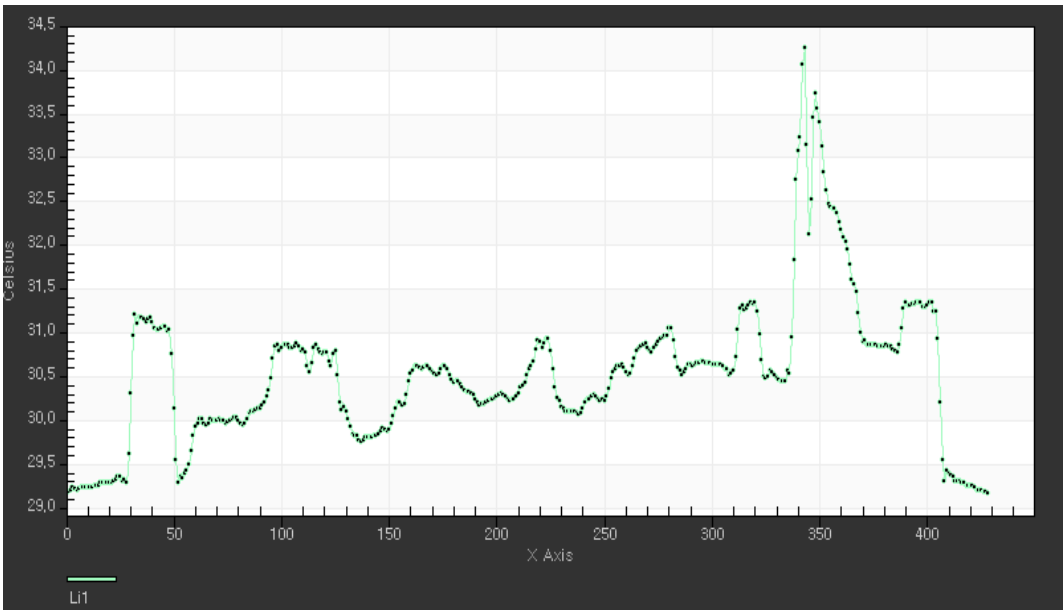


Fig. 3-21 Active Technique Application Halogen Thermal Imaging Graph_(7Min)

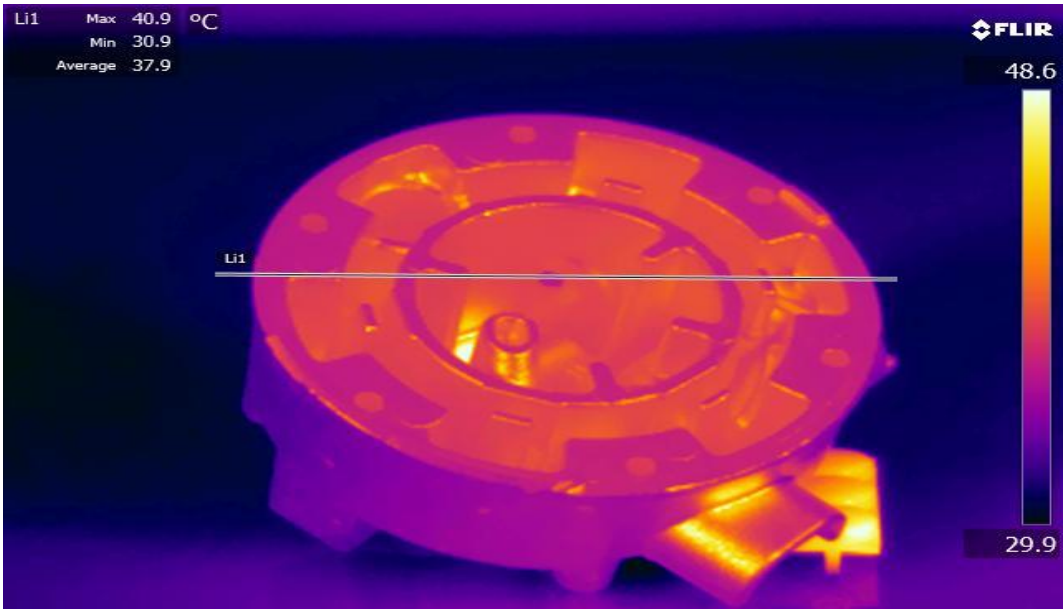


Fig. 3-22 Active Technique Application (Halogen) Thermal Image Spline_(15Min)

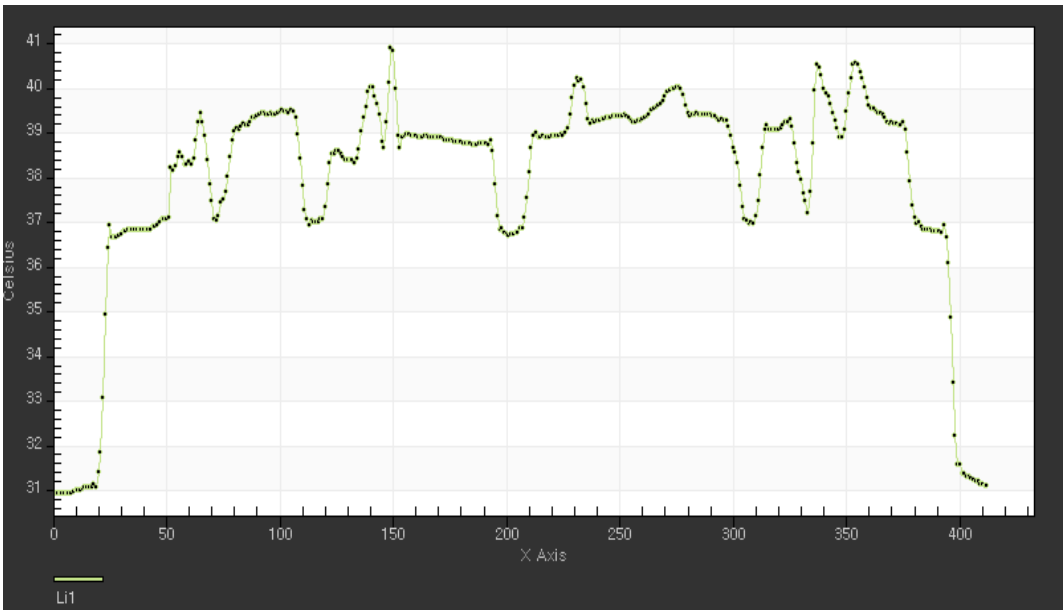


Fig. 3-23 Active Technique Application Halogen Thermal Imaging Graph_(15Min)

제 4 장 결 론

본 연구는 차량용 고효율 에어컨 컴프레서 모듈 신뢰성 평가로 Modal해석을 진행하여 모듈의 진동안정성을 검증하고 액티브 열화상 기법을 적용한 신뢰성 평가로 새로운 다이캐스팅 공법의 비파괴 검사 가능성을 검토 하였다.

1. 자동차용 에어컨 컴프레서 모듈의 Modal해석을 통해 진동안정성에 대해 검증하였으며, 1차 고유진동수가 501.07Hz로 나타나 20~30Hz 영역에 벗어나있기 때문에 차체의 진동현상을 회피하여 내진설계가 되었다는 것을 확인 할 수 있었다.
2. 액티브 적외선 열화상 기법을 적용하여 개발공법으로 제작한 시제품 비파괴검사 가능성을 검토하였고, 후속 연구가 더 필요하겠지만 관련 연구의 기초자료가 될 것으로 사료 된다.
3. 해당 공법을 적용하면 기존 공법 대비 고강도 부품을 제조할 수 있는 효과가 있는 것으로 평가 된다.
4. 개발공법으로 인해 화석연료의 사용을 줄여 무공해, 저공해 기준에 부합하는 친환경 자동차 개발이 가능할 것으로 사료 된다.

REFERENCE

1. Y. S. Kim, “Press Formabilities of Aluminum Sheets for Autobody Application”, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers 2(1), Vol. 1, p. 73~83, 1994.
2. S, H. W., “Development of Magnesium Seat Frames using the Vacuum Die Casting Process”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26 Issue 3 , p. 88~97, 2009.
3. M, H. Y., “Effect of Vacuum Level on Mechanical Property in High-Vacuum Die-Casting Process”, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 5 No. 21, p. 976~981, 2019.
4. J. M. K., “Seismic Response Analysis Method for 2-D Linear Soil-Structure Systems using Finite and Infinite Elements”, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 6 No. 13, p.231~244, 2000.
5. C, G. C., “Stochastic Finite Element Analysis of Semi-infinite Domain by Weighted Integral Method”, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 2 No. 12, p.129-140, 1999.
6. J. W. K., “Structural analysis and wearability evaluation of a vehicle’s swashplate A/C compressor”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12 No. 5, p.109~115, 2013.
7. T. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz and G. Busse, “Ultrasound Excited Thermography - Advances Due To Frequency Modulated Elastic Waves”, Quantitative Infrared Thermography, Vol. 2-1, p. 65~76, 2005
8. A. Dillenz, T. Zweschper and G. Busse, “Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features”, Insight, Vol. 42, No. 12, p. 815~817, 2000

9. M. Shepard, T. Ahmed and R. Lhota, "Experimental Considerations in Vibrothermography", SPIE Thermosense, Vol. 5405, p. 12-16, 2004
10. Choi, Man-Yong., "The Utilization of Nondestructive Testing and Defects Diagnosis using Infrared Thermography", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 24 Issue 5, p.525~531, 2004.
11. Song, Hyun-Seon, "A Study on Signal Circuit of the Triple Pyroelectric Infrared Flame Detector", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Volume 24 Issue 12, p.201~207, 2010.
12. Lee, Hankyung, "Analysis of Meteorological and Radiation Characteristics using WISE Observation Data", Journal of the Korean earth science society, Vol. 39 Issue 1, p.89~102, 2018.
13. Dong-min Kim, "New Definition of the Kilogram by Fixing the Numerical Value of the Planck Constant", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35 No.4, p.375-383, 2018.
14. Lee, Sanghyup, "Optical Diagnostic Study for Flame Characteristic Analysis in Aluminum Dust Clouds", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 17 Issue 5, p.47~53, 2013.
15. Lee, Jeon-Kook, "Characterization of Selectively Absorbing Properties of Indium Tin Oxide Thin Films by UV-VIS-IR Spectroscopy ", Analytical Science and Technology, Vol. 5 Issue 1, P.135~142, 1992.
16. Chul-Ku Lee, "Diagnosis and Evaluation of the Real Time Transformer by the Infrared Thermal Image Equipment", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 21 No. 4, p.666~671, 2012.
17. Han Joon Hwan , "Development of Thermal Image Processing Module Using Common Image Processor", Transactions on Software and Data Engineering ,Vol. 1 No. 9, p.1~8, 2020.

18. Y, S. J., "Soundness Evaluation of 120W LED Lighting using PassiveInfrared Thermal Imaging Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.16 No.4, p.140~146, 2017.
19. Jong-Sun Lee, "Structural and Modal Analysis of Treadmill Roller", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 14 No.2, p.62~69, 2005.
20. Myung-Soo Choi, "Forced Vibration Analysis of Plate Structures Using Finite Element-Transfer Stiffness Coefficient Method", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13 No. 2, p.99~107, 2003.

감사의 글

대학원 생활과 한편의 논문이 나오기까지 지도편달 해주신 김재열 지도 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

논문이 나오기까지 교정 및 심사를 하시느라 고생하신 김지훈 교수님 그리고 김경석 교수님께도 감사를 드립니다.

대학원 생활에 부족한 저를 격려 해주시고 가르침을 주신 나노계측메카트로닉스실 험실 정윤수 박사님과 김상유 박사과정의 선배님 그리고 실험실 선배님께도 감사드리며, 특히 정광택 선배님께도 감사를 드리고, 늘 저를 걱정해주고 많은 도움을 준 동기인 위성현씨께도 감사를 드립니다.

언제나 옆에서 든든한 버팀목이 되어준 남편 나상두씨와 큰딸 나은경, 작은딸 나누리 그리고, 아들 나형주에게도 사랑과 고마움을 전합니다.

2020년 11월 26일 강복순