



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](#)

2017년 2월

석사학위논문

하이브리드 대형수  
기어 최적설계 및  
신뢰성평가

이경일

2017년 2월  
석사학위논문

# 하이브리드 대형특수 기어 최적설계 및 신뢰성평가

조선대학교 대학원  
기계시스템공학과  
이 경 일

# 하이브리드 대형특수 기어 최적설계 및 신뢰성평가

Hybrid large special gear optimum design and  
reliability evaluation

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 경 일

# 하이브리드 대형특수 기어 최적설계 및 신뢰성평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 경 일

## 이경일의 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)

2016년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	v
LIST OF TABLES .....	vii
NOMENCLATURE .....	viii
ABSTRACT .....	ix

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 동향 .....	2
제 3 절 연구 목적 .....	6

제 2 장 하이브리드 커빅기어의 최적설계 및 FEM해석	7
제 1 절 기어의 손상유형 .....	8
제 2 절 하이브리드 대형특수 기어 가공공정 .....	11
제 3 절 하이브리드 커빅 기어 최적 설계 .....	13
제 4 절 하이브리드 커빅 기어 FEM 해석 .....	16
1. 전체 변위 해석 .....	16
2. 폰 미세스 응력(Von-Mises Stress)해석 및 안전율 .....	20

제 3 장 적외선 열화상 기술 .....	24
제 1 절 적외선 열화상 기술의 개요 .....	24

1 . 적외선(Infrared Radiation) .....	24
2 . 열화상 원리 및 이론 .....	26
제 2 절 적외선 열화상 탐상 기법 .....	35
1 . 수동적 방법(Passive method) .....	35
2 . 능동적 방법(Active method) .....	36
3 . 외부 에너지 제어방법에 따른 분류 .....	37
가. 펄스 적외선 열화상(Pulse Thermography) .....	37
나. 펄스 페이즈 적외선 열화상(Pulse Phase Thermography) .....	38
다. 위상잠금 적외선 열화상(Lock-in Pulse Thermography ) .....	39
제 4 장 실험 .....	41
제 1 절 실험장치 구성 .....	41
제 2 절 시험편 제작 및 실험 방법 .....	44
제 5 장 연구 결과 및 고찰 .....	45
제 1 절 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 하이브리드 커빅기어에 신뢰성평가 및 해석 .....	45
제 2 절 열화상 결함 검출 기법에 따른 비교 분석 .....	51
1. 열화상 이미지 결과 분석 .....	51
2. 온도 데이터 결과 분석 .....	53
제 6 장 결론 .....	55
Reference .....	56



## LIST OF FIGURES

Fig. 3-1 Torque capacity of gear set, Pitch line velocity graph .....	8
Fig. 3-2 Operation of gear .....	9
Fig. 3-3 Hybrid large special gear processing process Flow chart .....	11
Fig. 3-4 Hybrid CURVIC Gear Forging mold .....	12
Fig. 3-5 Hybrid CURVIC Gear Hobbing Machine .....	12
Fig. 3-6 Standard spur gear .....	13
Fig. 3-4 Hybrid CURVIC Gear 2D Design .....	15
Fig. 3-5 Hybrid CURVIC Gear Solid Model .....	15
Fig. 3-6 Hybrid CURVIC Gear Solid Model Mesh Modeling .....	16
Fig. 3-7 Constraints Of Hybrid CURVIC Gears And Static Load .....	17
Fig. 3-8 Structural analysis full displacement .....	19
Fig. 3-9 Von-mises stress theory .....	20
Fig. 3-10 Von-mises stress distribution .....	22
Fig. 4-1 The electromagnetic spectrum .....	26
Fig. 4-2 Atmospheric transmission in different wavelength bands .....	26
Fig. 4-3 IR camera with addition of scanning element for imaging .....	27
Fig. 4-4 The flux incident $\Phi_i$ is equal to the flux reflected $\Phi'_r$ , absorbed $\Phi_a$ , and transmitted $\Phi_t$ . .....	30
Fig. 4-5 Spectral radiance of a blackbody(Planck's law) .....	31
Fig. 4-6 Radiation contributions to the general measurement situation .....	33
Fig. 4-7 Passive method (jenoptik ag) .....	35
Fig. 4-8 Active method (jenoptik ag) .....	37
Fig. 4-9 Pulse thermography (PT, automation technology) .....	38
Fig. 4-10 Signal processing of lock-in infrared thermography .....	40
Fig. 4-11 Lock-in thermography (PT, automation technology) .....	40
Fig. 5-1 Normal specimens and specimens of artificial defects .....	42
Fig. 5-2 IR camera software .....	42

Fig. 5-3 The composition of Halogen lamp experiment equipment ..... 43  
 Fig. 5-4 Hybrid CURVIC gear artificial defect specimen ..... 44  
 Fig. 6-1 below zero After cooling, the thermal image of the test hybrid CURVIC gear ..... 45  
 Fig. 6-2 A Fig. 6-1 below zero After cooling, the thermal image of the test hybrid CURVIC gear Spot ..... 46  
 Fig. 6-3 below zero temperature the resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling ..... 47  
 Fig. 6-4 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear ..... 48  
 Fig. 6-5 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Spot ..... 49  
 Fig. 6-6 the resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling ..... 50  
 Fig. 6-7 image of the after cooling thermography tes comparison ..... 52  
 Fig. 6-8 ultrasonic thermography result graph comparison ..... 54

## LIST OF TABLE

Table 3-1 Gear types and classification .....	7
Table 3-2 The type of gear damage .....	8
Table 3-3 Materials of gear .....	14
Table 3-4 The structure and specification of gear .....	17
Table 3-5 Results of displacement and stress .....	22
Table 5-1 FLIR T640 Specifications .....	41

## NOMENCLATURE

$B$	: Spectrum parameter
$C$	: Speed of Sound in a Material of Horn
$E$	: Modules of Elasticity
$F$	: Model parameter
$F$	: Frequency
$I_m$	: Thermal value of measured whole radiation
$I(T)$	: Thermal Value
$P$	: Density
$R$	: Correspondence parameter
$T_{amb}$	: Ambient air temperature
$T_{atm}$	: Atmosphere air temperature
$T_{obj}$	: Temperature of measurement target
$W_b$	: Exitance of whole radiant energy
$\alpha$	: Absorptivity
$\epsilon$	: Emissivity
$\rho$	: Reflectivity
$\tau$	: Transmissivity
$\sigma$	: Stefan-Boltzman constant
$\lambda$	: Wavelength

## ABSTRACT

# Development of Precision machining process method for hybrid large scale special gear Reliability Assessment

Gyung-II Lee

Advisor : Prof. Kim jae-yeol, Ph.D.

Dept. of Mechanical system engineering, Dept. of  
Graduate School of Chosun University

The gear has played the important roles for long time as the one of representative mechanical elements together with bearing and screw since the industrial society. The gear not only plays the role of transmitting the power and is widely used as the one for the wrist watches in small size and turbine reduction gear for vessel in thousands of kw class, reduction device in automobile and aircraft, differential gear and wind power generator in large size but also its kind and usage are various even today.

The gear that is developed in such various ways is developed to carry out the complex operations and its research and development are carried out in various types. The gear with such complex operations, special generation and shape is called as hybrid gear and its development is being carried out by the companies and academic society actively.

Some flaws are found in such hybrid gear sometimes, however, the flaw of gear that is used for transmitting power and changing the angle especially take the large portion. When it comes to gear, the internal crack is generated in case of forging process, error is done in process step and abrasion, strain and break are generated in the operation step due to the frequent friction. The flaw of gear may become the cause of damage as it generates the vibration and noise from

the load and continuous collision with the counterpart gear and it plays as the factor that accelerates the fall of reliability and durability of whole system.

So, the general interpretation about the gear is necessary by the necessity that the economic and high quality of gear is produced. The quantitative Infrared Thermography Test evaluation is required for the safety and lifetime extension of gear products. The ingredients of material should be grasped and the internal flaw should be monitored for manufacturing of gear product and the safety of the used gear. In case the flaw or heterogeneous material is in the gear, its existence, shape and location should be grasped because it may lower the performances and lifetime of the gear considerably.

As even small damage in the operation step of the gear may cause not only the severe damage to the machine but cause big accident due to mechanical defect, the periodic diagnosis and soundness evaluation against the gear are very important. There are many ways of detecting the flaw of gear. In case of ultrasonic flaw detecting test, Manual Ultrasonic Testing, Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) and Noncontact Ultrasonic Testing are under application currently, but they have the weakness that they are not able to detect the flaw along the shape.

Infrared Thermography Test and Vibration Durability Test are suggested as the technology that can supplement such weakness. Vibration Durability Test is the method that measures and analyzes the vibration values the testing object shows in principle way. Infrared Thermography Test detects the infrared ray radiated from the testing object as the energy with infrared ray measuring device, analyzes its temperature distribution with thermogram that is mapped in image and estimates its internal status

in principle way. Infrared Nondestructive Thermography Test can be classified into Passive method and Active method in large category. The Passive method is the general measuring method that detects the infrared energy naturally radiated from the testing object and Active method is the one that analyzes the infrared energy that provides the controllable energy and the testing object radiates as

the response without depending on its own amount of infrared ray.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

산업사회에서 기어, 베어링, 나사는 대표적인 기계요소 부품으로써 중요한 역할을 담당한다.<sup>(25)</sup> 오늘 날에도 기어는 동력전달이 확실하고 효율이 좋아 작게는 시계용 기어에서 크게는 자동차와 항공기의 감속기어, 수십만 kW급 선박용 터빈 감속기어, 풍력발전기 터빈기어 등 폭 넓게 이용되고 있으며 그 종류 또한 용도에 따라 다양하다.<sup>(25)</sup>

이렇게 다양한 용도로 발전중인 기어는 복합적인 운동을 할 수 있도록 개발이 되고 있으며 다양한 형태로의 연구 개발되고 있다. 이런 복합 운동과 특별한 운동 및 형태를 갖는 기어를 하이브리드 기어라 지칭하여 기업 및 학계에서 활발한 개발을 진행하고 있다.<sup>(1~25)</sup>

이러한 하이브리드 기어에서 대형특수기어는 가공정밀도의 문제로 해외수입에 의존하고 있다 이는 하이브리드 대형 기어를 사용하는 대형공작기계, 대형선박, 풍력발전기 등의 개발 및 생산 단가를 높이는 주요 원인이 된다.<sup>(25)</sup> 이를 해결하고자 대형 특수기어를 가공할 수 있는 가공공정을 개발과 하이브리드 대형 특수기어 개발이 필요하다.<sup>(25)</sup> 이러한 하이브리드 기어는 주요한 결함이 발생한다, 특히 동력 전달 및 각도변경에 사용되는 기어 치차에 결함이 많은 부분을 차지하고 있다. 기어는 단조가 공시 내부 크랙, 가공 단계에서 오차, 운전단계에서 잦은 마찰로 인하여 마모, 변형, 깨짐 등 결함이 발생한다. 기어의 결함은 하중 및 연속적인 상대 피니언과의 충돌에 의해 진동 또는 소음이 발생되어 전체시스템의 정밀도, 신뢰성, 내구성 저하 시키는 요인으로 작용하여 기어손상의 원인이 되기도 한다.<sup>(1~25)</sup>

이에 따라 경제적이며 고품질의 기어가 제조 될 수 있도록 기어에 대한 전반적인 해석이 필요하다. 또한 기어 제품들의 안전성 및 수명 연장을 위하여 적외선 열화상 검사(Infrared Thermography Test)를 이용한 신뢰성 평가가 요구되어지고 있다. 기어 제조나 사용되어지고 있는 기어의 안전성 및 수명을 판단을 위해서는 재료의 재질을 파악하고 내부 결함 유무를 판단해야한다. 기어 내에 결함 또는 불균질한 물질이 첨가되어있는 경우는 기어의 성능 및 수명을 현저하게 저하시킬 수



있기에 내부결함 유무, 형태, 위치 파악이 매우 중요하다.<sup>(25)</sup>

기어의 운전단계에서 미세한 손상이 발생하여도 기계에 심각한 손상이 생기며 기계적 결함으로 인해 대형 사고로 이어질 수 있다. 이에 기어의 주기적인 진단 및 건전성 평가가 매우 중요하다. 기어 건전성 평가 방법에는 여러 가지가 있다. 초음파 탐상검사의 경우 일반 초음파 검사(Manual Ultrasonic Testing), 위상배열 초음파 검사(Phased Array Ultrasonic Testing : PAUT), 비접촉 초음파 검사(Noncontact Ultrasonic Testing)가 적용 중에 있으나 초음파 검사의 검사 범위의 한계와 검사에 사용되는 접촉매질의 유해성 때문에 기어를 검사에서 형태에 따른 결함 미 검출과 인체유해성의 문제가 발생하는 단점을 지니고 있다.<sup>(2-25)</sup>

이러한 단점을 보완하는 기술로 적외선 열화상 검사법을 제안한다. 적외선 열화상 검사법은 원리적으로는 검사 대상체로부터 방사되는 적외선을 측정기기로 에너지를 감지하여 그 신호 데이터를 영상으로 매핑(Mapping)한 열화상으로 대상체의 온도분포를 분석하여 검사대상의 내부 상태를 측정한다.<sup>(25)</sup> 적외선 열화상 비파괴 검사는 수동적 방법(Passive method)과 능동적 방법(Active method)으로 크게 구분할 수 있다. 수동적 방법은 측정 대상으로부터 자연스럽게 방사되는 적외선 에너지를 검출하는 일반적인 측정 방법이고, 능동적 방법은 측정대상 고유의 적외선 량에 의존하지 않고 제어가 가능한 에너지를 공급하고 그 반응으로 측정대상이 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 방법이다.<sup>(3-25)</sup>

## 제 2 절 연구동향

기어는 베어링과 함께 기계 산업체 사용되는 범용 기계요소 부품이다. 산업용 기어는 대부분 장비에 가장 중요한 부품으로 세계시장은 일반적으로 자동차용, 일반 산업용, 항공우주용, 조선용 등 4가지로 분류된다. 그 중 자동차용과 일반 산업용 기어가 산업 내 비중의 90%를 차지하고 항공우주용과 조선용이 나머지 10%를 차지한다. 자동차 및 산업용 기어는 시장 수요의 75%를 소수의 주요 업체에서 독점 생산 중이다. 2000년대 후반과 2010년대에는 외국 산업체들과의 무역이 활발해졌고, 2009년에는 81개국에서의 수입액이 미국 내 생산액의 82%에 이르고 미국 업체의 158개국 수출액이 미국 내 생산액의 40%에 이르게 되었다. 미국의 기어산업은 미국 제조업체의 경쟁력 저하와 외국산 기어 수입 증가, 기술의 발달로 기어의 용도 축

소로 R&D 투자 기피, 지속적인 고용률 감소로 인한 기술력 미 축적 등으로 점차 쇠퇴하며 성숙기에 접어든 산업이었다. 미국 업체들은 환경오염물질 감소와 효율적인 에너지 사용에 대한 정부의 요구에 부합하기 위해 신기술을 적용한 제품을 개발하기 시작하였다. 2010년에 조사된 Dun & Bradstreet's 보고서에 의하면 미국 내 약 273개의 제조업체가 설립됐고 약 9200명의 근로자가 이 산업에 종사하였다. 2009년 시장 규모가 34억 달러로 제조업체의 82%가 50명 이하를 고용하는 중소기업이다. 50명 이상을 고용하는 18% 업체가 판매량의 67% 이상을 차지하였고, 그 중 산업 종사자 수는 1974년 2만7000여 명으로 가장 높았으며, 그 이후 점차 감소돼 2000년에 1만5477명, 2008년 1만4233명으로 감소하였다. U.S Census Bureau가 실시한 설문 조사에 따르면 미국 내 제조업체들의 65%는 향후 시장 여건이 개선될 것으로 희망하며 전 세계적으로 기어 수요가 완만하게 증가할 것으로 전망하였다. 미국의 산업 기어 주요 수입 국가는 독일, 일본, 중국 순이며 독일과 중국에서의 수입량이 점차 증가하며 차지하는 비중도 꾸준히 증가해 두 국가가 2011년 총 수입액의 60%를 차지하나 이탈리아, 스위스에서 수입량은 감소하였다. 한국은 400만 달러로 멕시코에 이어 수입국 중 9위로 2010년 대비 3배가량 증가했고 총 수입액의 1.48%를 점유하였다. 독일, 일본 등 기존의 주요 수입국들에서의 수입량의 증가뿐만 아니라 한국을 비롯해 멕시코, 대만 등에서의 수입 증가 폭이 두드러져 기존의 수출기업 외 미국 시장 진출을 고려하는 기업에도 잠재적인 가능성이 크게 나타났었다. 미국 산업 기어의 전체 무역수지는 2011년, 1200만 달러로 적자 폭이 커지며 독일, 일본과의 무역수지 적자가 가장 크며 적자의 대부분을 차지하였다. 한국과의 교역은 수출입이 모두 활발히 이루어지며 무역수지는 2011년, 100만 달러의 흑자를 기록했고 2010년부터 흑자로 돌아섰다.<sup>(25)</sup>

기어분야 국내 제조업체수는 300여 업체이며 세계시장규모는 자동차용을 제외하고 약 150억불이며 국내시장은 2,600억 원 규모이나 1억3,000만 불 정도를 수입에 의존하고 있는 실정으로 국내에서 설계 및 제조능력을 확보할 경우 무역역조의 개선으로 약 1억불의 수입대체효과가 발생함으로 설계 및 제조기술 향상을 위한 대책이 시급하다.<sup>(25)</sup>

적외선 열화상 계측 기술은 광범위한 적용과 편리성으로 최근에 많은 각광을 받고 있는 검사 방법이다. 적외선 검사방법은 물체의 단위 면적당, 단위시간당 방출되는 복사에너지 즉, 복사 에미턴스(Radiant emittance)의 차이를 영상화 하여 물체의 온도를 측정하는 방법이다.<sup>(6-25)</sup>

일본 비파괴 검사 협회 규격(NDIS 3005)에 의하면 적외선 카메라와 적외선 열화상 기술의 구분은 물체로부터 방사되는 적외선 강도분포를 영상으로 표시하는 것을 적외선 카메라로 정의 하고, 이 강도분포를 온도로 환산하여 표시하는 기능이 부과되어 있는 것을 적외선 열화상 기술이라고 정의 하고 있다. 적외선 열화상 카메라는 1930년대부터 군사용으로 개발되기 시작 하였고, 제2차 세계대전 당시 일본과 독일에서 적외선 탐지기술을 연구하기 시작한 이래 전승국들 역시 군사용/민용의 적외선 열화상 카메라의 핵심 기술인 적외선 센서 개발에 박차를 가하였다. 초전형 적외선 센서와 비 냉각형 적외선 열화상 시스템에 대한 연구와 개발은 영국의 GEC-Marconi 연구소와 Malvern Institute를 중심으로 1960년대부터 본격적으로 시작되었으며, 미국에서는 DOD의 DARPA를 중심으로 1970년대부터 군사적인 목적으로 연구개발이 본격화되었다. 1995년도까지 미국의 Texas Instrument와 영국의 GEC-Marconi에서 군사적인 용도와 상업적인 용도의 시제품을 경쟁적으로 발표한 바 있다. 또한 스웨덴의 AGEMA, 미국의 Inframatrix, FSI, Indigo 4개사가 FLIR사로 흡수 합병이 되었고, 이어서 프랑스의 Cedip사와 미국의 FLIR사로 양분되어 있던 주요 시장을 또 다시 FLIR사가 Cedip사를 합병하여 주요시장의 90%이상을 점유하고 있는 실정이다.<sup>(25)</sup>

1950년대 초반에 검출재질의 개발과 냉각방식의 도입으로 짧은 시정수를 갖는 소자가 개발되면서 활성화되었다. 초기의 적외선 열화상 기술은 단일 또는 소수의 적외선 검출소자를 이용하여 1차원으로 측정영역을 스캐닝 하여 열화상을 구성하였으며, 고성능 검출소자에 의해 0.1 °C의 온도분해능을 구현할 수 있었다. 그러나 스캐닝 방식에 의한 열화상의 구현은 시간소요, 시간에 따른 온도장의 변화, 이동물체의 온도변화 등의 문제가 있었다. 또한 적외선 검출소자가 질소 냉각방식으로 적외선 열화상 시스템이 대형이고 재현성이 우수하지 못하였다. 1980년대 후반부터는 적외선 검출소자가 2차원 배열(array) 방식으로 온도를 측정하는 시스템이 개발되었다. 어레이 센서의 도입은 기존 주사방식에 비하여 열화상 데이터의 동시성이 월등히 향상되었다. 1990년대에는 어레이 센서의 화소(Pixel) 수도 증가하고 검출소자로부터 전자신호의 획득기술이 진보하여 동시성이 우수하면서도 정밀한 온도분포 화상을 고속, 고분해능으로 측정하는 것이 가능해졌다. 현재 InSb(Indium Antimonide) 검출소자를 이용하고 있는 적외선 열화상 카메라의 경우 노이즈 등가 온도차(Noise equivalent temperature difference : NETD)가 0.020 °C이하이고 영상 획득속도(Frame rate)는 사용하는 카메라의 해상도에 따라 다르게 된다. 최근 상용

제품의 경우 640×512 화소와 420 Hz이며 화소 수를 1/4로 감소 할 경우에 프레임 율은 약 4 배가 된다. 최근 수년간 적외선 열화상 카메라의 개발은 비냉각 방식으로 급격히 진보하고 있으며 비냉각 방식의 적외선 검출소자 개발은 적외선 열화상 카메라의 소형화, 경량화 및 저가격화를 가능하게 하고 있어 차후에 검사 분야의 응용과 관련하여 현장성을 고려한 비파괴검사 분야의 적용 가능성을 제시하고 있다.<sup>(25)</sup>

비파괴 검사 기술 분야의 표준화는 ISO/TC 135에서 주관하고 있으며, ISO/TC 135 / SC 8은 적외선 열화상 비파괴검사 분야 국제 표준 규격 분과로서 국제 간사를 한국의 표준과학연구원에서 수행하고 있어 글로벌 경제 체제에서 표준화 된 기술을 우리가 선도하고 국내·외의 표준화를 선도적으로 이끌어 나갈 수 있는 분위기 조성이 완료된 상태이며 관련한 포럼의 활성화를 통하여 산업체의 적극적인 참여를 독려하는 상황인 관계로 적외선 열화상 비파괴검사의 산업 적용을 위한 연구개발 추진의 적기로서 판단된다.<sup>(25)</sup>

물체 표면 온도 분포 계측에 기초한 비파괴평가·모니터링 기술은 적외선열화상의 응용이 성공을 얻은 분야 중 하나이다. 적외선열화상에 의한 비파괴평가기술은 결함평가를 위한 비파괴검사 기술과 적외선응용측정 기술로 크게 나뉜다. 전자는 결함의 존재에 기인하는 재료 표면의 온도변화 영역을 검출·측정함으로써 그 변화의 원인인 결함을 검사하는 열적 비파괴검사 방법이다. 또한 후자는 재료에 하중이 부하되었을 때 의 열탄성효과에 의한 온도변동을 적외선열화상에 의해 계측함으로써 재료에 작용되고 있는 응력분포를 가시화 계측하는 것이다. 최근 하이브리드 기술은 산업전반에 걸쳐 새로운 기술혁신의 대표적인 키워드로 급부상하고 있으며, 적용 대상이나 산업분야에 따라 그 개념이 조금씩 다르나 근본적으로 이종의 두 대상을 결합하여 서로간의 장점을 유지하고 단점을 줄이는 기술이라는 개념은 동일하다.<sup>(25)</sup>

### 제 3 절 연구목적

본 연구의 목적은 국내화가 필요한 하이브리드 대형 특수 기어의 가공공정을 개발하고 CATIA 프로그램을 통해 하이브리드 대형 특수 기어의 3D Modeling을 하고 정확성이 검증된 구조해석 방법인 유한요소법을 UGNX Nastran 프로그램을 통해 수행하여 하이브리드 대형 특수 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 하이브리드 대형 특수 기어의 변위를 최소화하는 것과 하이브리드 대형 특수 기어의 제어성능을 고려하여 설계하기 위함이고 하이브리드 대형 특수 기어에서 집중되는 응력 부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고, 구조해석 결과 Crack 발생 가능 부분을 바탕으로 하이브리드 대형 특수 기어 시험 시편을 만들어 적외선 열화상 계측기술을 통하여 하이브리드 대형 특수 기어의 건전성을 평가하고자 한다. <sup>(9-25)</sup>

## 제 2 장 하이브리드 커빅기어의 최적설계 및 FEM해석

기어(gear)는 한 축으로부터 다른 축으로 동력을 전달하는데 사용되는 대표적인 전동용 기계요소부품이다. 한 쌍의 원통 및 원뿔에 이를 만들어 서로 맞물려 동력을 전달하는 기계요소로 동력을 주고받는 두 축사이의 거리가 가까운 경우 사용하며, 동력전달이 확실하고 속도 비를 일정하게 유지할 수 있어 동력 전달 장치에서 필수적인 부품으로서, 일반산업용, 자동차, 항공기, 선박, 철도, 농업용, 건설기계, 공작기계, 터보기계 등에 필수적으로 사용되며, 최근에는 로봇등 자동화 기기에다 다수 사용되고 있으며 전동 장치, 변속 장치 등에 널리 이용된다. 맞물려 회전하는 한 쌍의 기어에서 이 수가 많은 쪽을 기어, 이수가 적은 쪽을 피니언(pinion)이라 한다.<sup>(19-25)</sup>

기어의 종류는 원통기어(스퍼, 헬리컬 기어), 베벨기어, 하이포이드 기어, 웜 기어 등으로 매우 다양하며, 평행 축, 교차 축, 엇갈린 축 등에 동력을 전달하는 요소 부품으로, 평면상에서나 공간상에서 어떤 형태로든지 구동기와 피동기와의 사이에 동력을 적절히 바꾸어 전달하는 요소이다. 많은 종류의 기어를 분류하는 방법으로는, 기어축의 관계위치에 의한 것이 가장 일반적이며 평행 축, 교차 축, 엇갈린 축의 3 가지로 분류된다. Table 3-1 에는 대표적인 기어를 분류하여 나타낸 것이다.<sup>(25)</sup>

이 표에 나타낸 효율은 기어의 전동효율로 베어링 손실이나 윤활유와 관련된 손실 등은 제외했다.<sup>(20-25)</sup>

Table 3-1 Gear types and classification

Classification of gear	Type of gear	efficiency (%)
Parallel shaft	Spur Gear	98.0 - 99.5
	Rack gear	
	Internal gear	
	Helical gear	
	Double helical gear	
Cross-axis	Straight bevel gear	98.0 - 99.0
	Spiral bevel gear	
	Jerol bevel gear	
Displaced axis	Screw gear	70.0 - 95.0
	Cylindrical worm	30.0 - 90.0

## 제 1 절 기어의 손상유형

기어 손상은 기어이의 피팅(pitting), 파손(breakage), 장시간의 마모(long-ran gewear), 소성변형(plastic deformation), 스코링(scoring) 그리고 비정상적인 파괴적인 마모(destructive wear) 등의 원인에 의하여 망가진다. AGMA(American Gear Manufactures Association)는 ANISI/AGMA 110.04(1980) 규격에서 모든 기어 손상의 범위를 다음 Table 3-2과 같이 다섯 가지 일반적인 분류로 구분하였다.<sup>(25)</sup>

**Table 3-2 The type of gear damage**

<b>Range of gear damage</b>	Wear
	Plastic flow
	Surface fatigue
	Breakeage
	Associated gear failure)

각각은 정의에 의하여 다시 몇 가지 형태로 나눈다.

Fig. 3-1는 피치선속도와 기어 쌍의 토크 용량과의 일반적인 상관관계이다. 각 영역은 가장 발생하기 쉬운 기어손상 종류와 범위를 표시한다. 영역 1,2,3 은 마모(wear) 현상과 관련된 손상영역이다. 영역 1에는 유막(oil film)을 형성할 수 있을 정도로 기어쌍이 빠르지 않다. 영역 2 에서는 유막을 형성할 정도로 충분히 빠르게 윤활제에 이물질이 섞이지 않고 부식방지성이 있으면 무한한 기간 동안 작동된다. 영역 3 에서는 속도와 하중이 오일 유막을 파괴 시킬 정도로 크다면 급격한 마모(wear)와 스코링(scoring)이 발생한다. 기어는 이상적으로 2의 영역 안에서 작동되도록 설계해야 한다.<sup>(21~25)</sup>

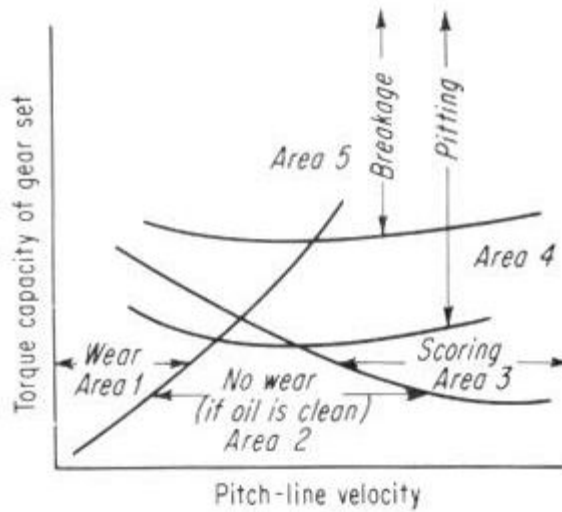
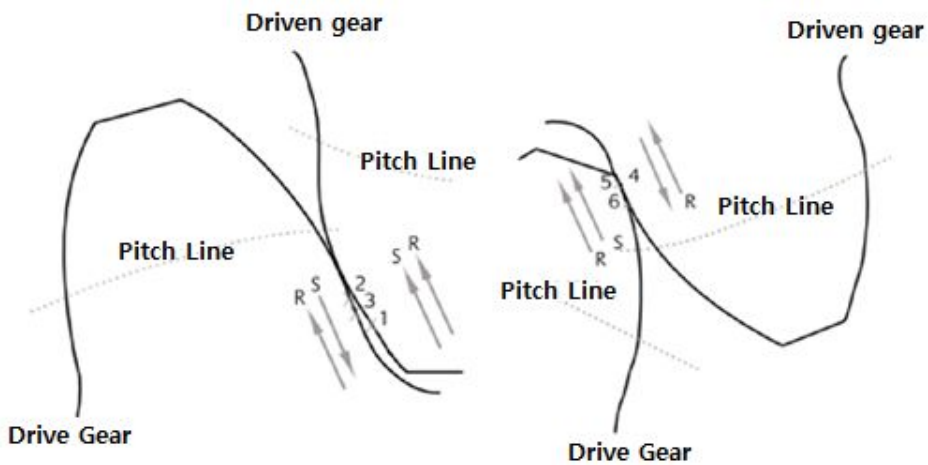


Fig. 3-1 Torque capacity of gear set, Pitch line velocity graph



(a) Start of contact (b) End of contact

Fig. 3-2 Operation of gear

Fig. 3-2 (a)에서 두 기어는 막 맞물렸다. 구동기어의 1지점에서는 물체는 피치점을 향해 회전하는 동작에 의해 압축이 일어나고 피치점에서 멀어지는 방향으로 미끄러지는 마찰 저항에 의해 응력을 받게된다. 이러한 힘의 조합으로 인해 표면 균열과 표면 피로가 발생하고 열이 발생하며 이 모든 요소들이 상당한 마모를 야



기 시킨다. 피동기어의 2지점에서는 회전과 미끄러짐이 모두 피치 포인트 쪽으로 일어나 이로 인해 2지점은 압축되고 3지점은 인장이 일어난다. 그러나 구동기어에서 만큼은 가속하지 않다. (b)에서는 두 기어의 접촉이 끝나는 것을 볼 수 있다. 회전 운동은 계속 같은 방향으로 일어나지만 미끄러짐 운동은 방향이 바뀌었다. 4지점에서 회전에 의한 압축과 미끄러짐에 의한 인장이 함께 발생하므로 피동 기어의 바닥 부분에 가장 큰 하중이 가해진다. 5지점에는 압축 응력이 가해지고 6지점에는 인장 응력이 가해지므로 기어 치형 끝부분은 응력을 덜 받게 된다.<sup>(25)</sup>

피치점에서는 미끄러지는 힘이 방향을 바꾸어 미끄러짐이 없이 피치점에서는 미끄러지는 힘이 방향을 바꾸어 미끄러짐이 없이 회전 운동만 발생하는 지점이 생긴다. 기어의 이 부분에는 표면 손상이 가장 적게 나타나지만 피치점에는 심각한 손상이 가장 먼저 발생한다. 피치점에서는 복합적인 응력을 받지 않지만 높은 단위 하중을 받는다. 기어가 처음 접촉하는 동안 또는 접촉이 끝날 때 이전 기어 치형, 또는 다음 기어 치형이 약간의 하중을 어쩔 수 없이 받게 된다. 최대 하중점은 기어의 피치선 또는 피치선보다 약간 위쪽 부분이다. 일반적으로 이 지점에서는 한 쌍의 기어 치형이 모든 하중 또는 대부분의 하중을 전달하게 되며, 이로 인해 피로손상, 열 축적 및 표면 손상이 발생할 수 있다.<sup>(22-25)</sup>

## 제 2 절 하이브리드 대형특수 기어 가공공정

하이브리드 대형특수 기어 가공공정은 원재료의 절감과 가공시간의 단축 정밀도의 향상을 목표로 개발을 진행하였으며 Flow chart는 Fig. 3-3으로 나타내었다.

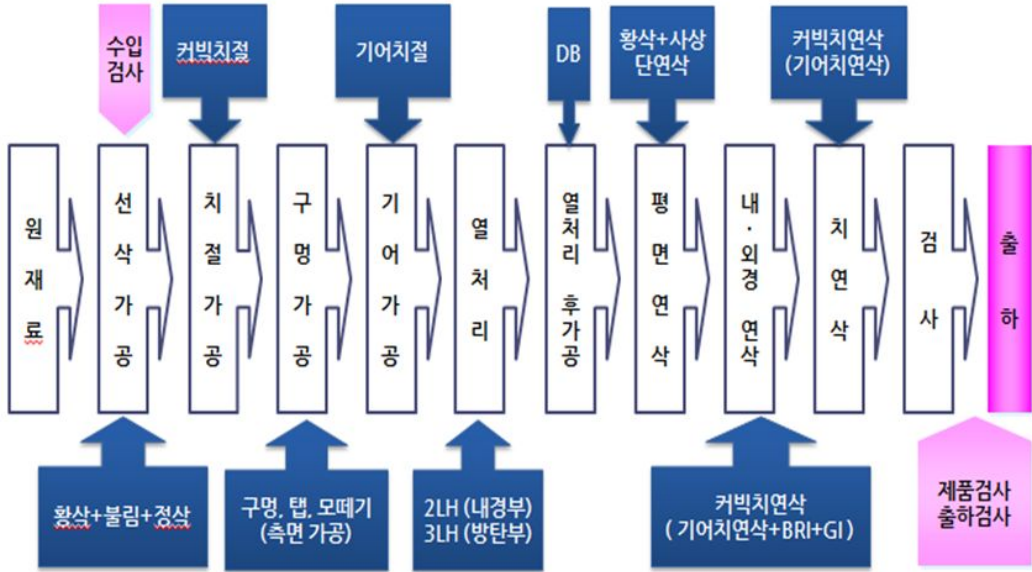


Fig. 3-3 Hybrid large special gear processing process Flow chart

공정설계에서 원재료는 기존 환봉을 사용하여 기어제품을 가공하는 형식에서 원재료의 절감과 제품 가공시간의 단축 및 정밀도 향상을 위하여 형단조를 이용하여 원재료를 가공하였다. Fig. 3-4는 하이브리드 커빅 기어 원재료 형단조금형이다. 형단조 소재는 내경부 잔류소재가 발생되지 않으며 제작시 조직을 안정화작업을 하기에 별도의 불림처리가 필요 없으므로 기어 제작기간이 약 2일을 단축시킬 수 있다.

또한 선삭 가공시 황삭 가공이 필요하지 않으므로 황삭가공 1일을 줄일 수 있는 장점이 있으며 커빅 치절 가공과 드릴가공을 머신 1대에서 동시에 진행함으로 체결 변화에 따른 가공정밀도 변경이 없다. 기어가공은 1회가공시 3개의 기어를 동시에 가공할 수 있는 호빙머신을 개발하여 가공시간당 생산량을 증대할 수 있도록 최적설계 하였다. Fig. 3-5는 개발된 호빙머신을 나타내었다.



Fig. 3-4 Hybrid CURVIC Gear Forging mold



Fig. 3-5 Hybrid CURVIC Gear Hobbing Machine

### 제 3 절 하이브리드 커빅 기어 최적 설계

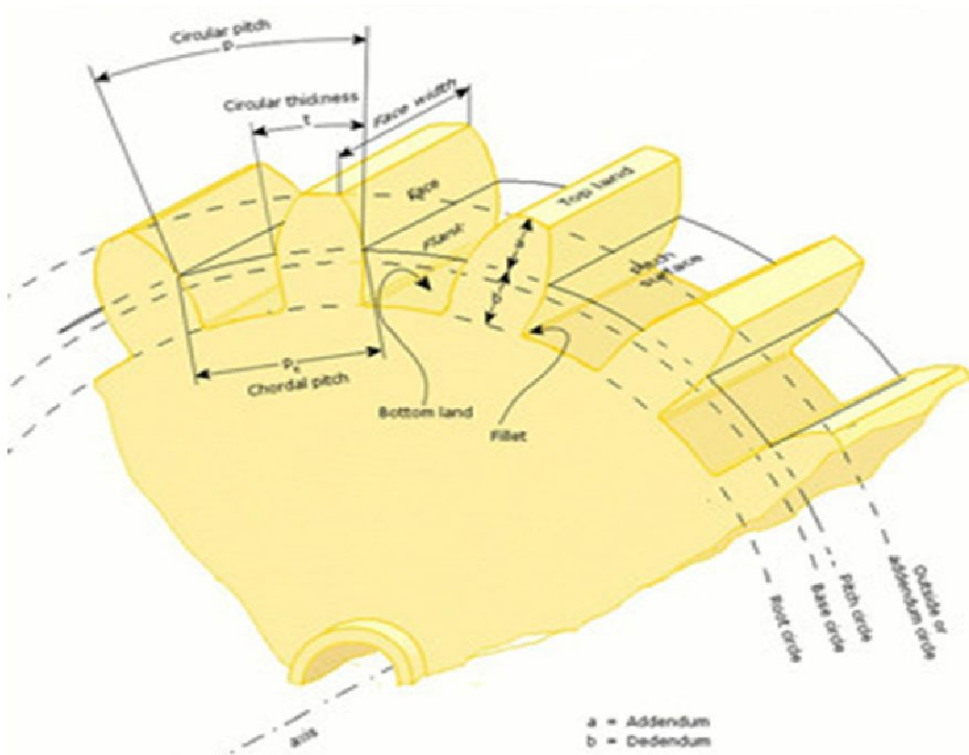


Fig. 3-6 Standard spur gear

Fig. 3-6는 대표적인 스퍼기어를 나타내고 있으며, 최적 설계 하려는 하이브리드 대형 특수 기어의 종류는 스퍼기어에 커빅 커플링을 조합한 형태이다. 하이브리드 대형 특수 기어의 치형 곡선은 사이클로이드 곡선, 원호 곡선 등 여러 가지가 있으나 인벌류트 곡선을 채택하였다. 기어의 접촉에 의하여 굽힘 강도를 최적화시킬 경우, 기어 모듈의 8~11배 정도면 된다. 기어의 치폭이 너무 클 경우에는 기어의 치접합이 균등하게 물리도록 신경을 써야하며, 치폭이 너무 작아도 면압강도 부족 등을 초래할 수 있다.<sup>(23-25)</sup>

일반적인 감속기 등에서는 감속비와 중심거리의 관계에서 대부분 전위 기어로 설계하지만 표준 기어를 선택할 경우에는 호환성과 편의성을 위하여 전위를 주지 않는다. 기어의 압력각은 20° 를 표준으로 하였고 소재는 SCM415 기계 구조용 합금강을 기본으로 채택하였다. 기어의 소재는 Table 3-3 와 같다.<sup>(25)</sup>

Table 3-3 Materials of gear

Creative people	Sign	Applying heat treatment	Hardness Hrc	Usage
Carbon steel	SM45C	Standard gear materials		
Carbon steel	SM45C	High frequency	50~55	Large gear side
CrMo steel	SCM415	Carburizing	55~60	Pinion side
CrMo steel	SCM440	High frequency	50~55	Large gear side
NiCrMo steel	SNCM415	Carburizing or nitriding	60~65	Pinion side

Fig. 3-7은 하이브리드 대형 커빅 기어의 해석을 위한 하이브리드 기어의 2D설계도를 나타내었다. 기어의 재질은 SCM415로 이루어져 있으며 지름은 335mm, 두께는 48.8mm, 기어의 압력각은 20° , 잇수는 132개 기준 피치원 지름 330mm 겹치기 이 두께 119.017mm 상대잇수 22개, 중심거리 192.5mm, 정밀도 JIS2급 이며 커빅부의 압력각은 30° , 전치높이 2mm, 치끝높이 0.8mm, 치저높이 1.2, 내,외주 진동 0.020, 평면진동0.020, 분할정도 ±5° 이다.

Fig. 3-8은 CATIA를 이용하여 최적설계 완료된 하이브리드 기어의 Solid Model을 나타낸 것 이다.

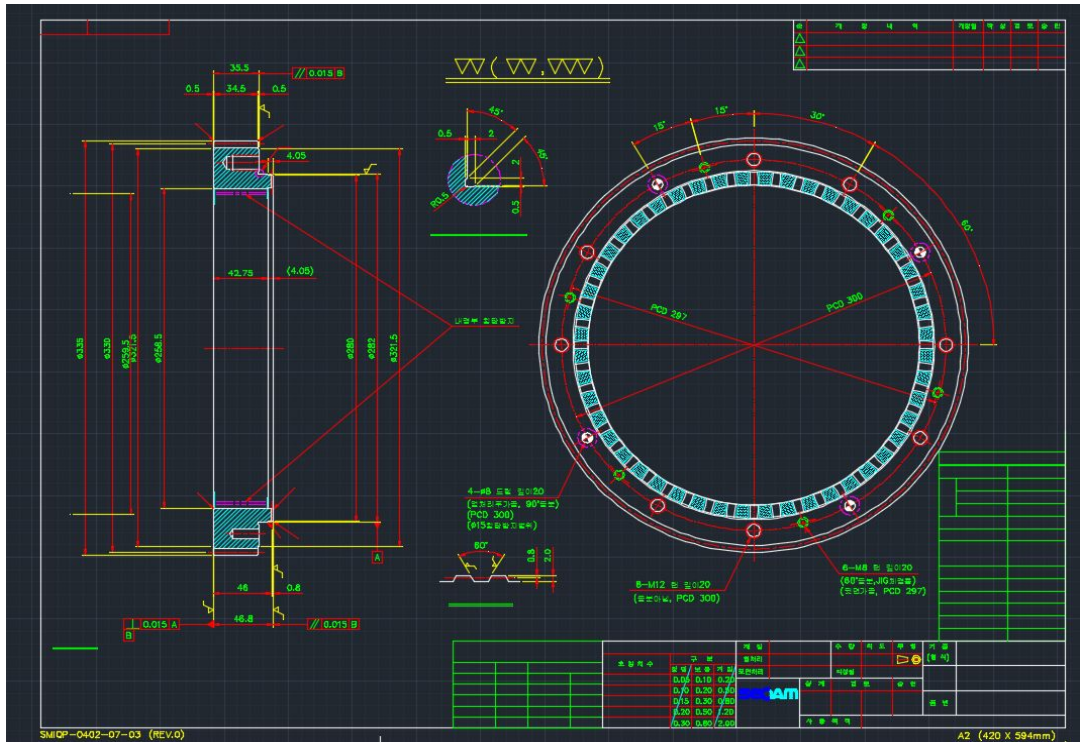


Fig. 3-7 Hybrid CURVIC Gear 2D Design

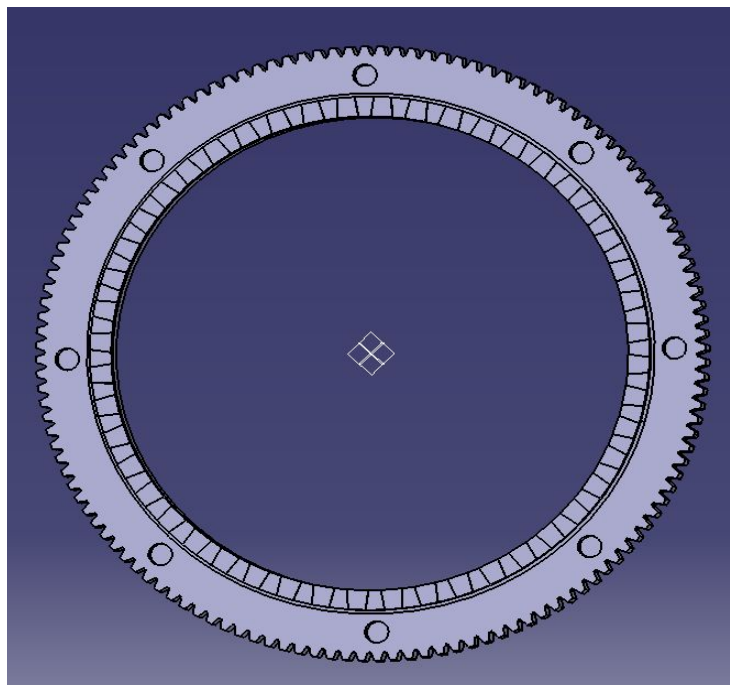


Fig. 3-8 Hybrid Gear Solid Model

## 제 4 절 하이브리드 커빅 기어 FEM 해석

### 1. 전체 변위 해석

하이브리드 대형 커빅 기어에 급격한 부하 또는 충격이 가해졌을 때 기어박스 에서 하이브리드 대형 커빅 기어나 축, 베어링이 파손되면 기어박스의 부품이 파손 되는 심각한 상황이 발생되며 안전사고가 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 일정한 힘보다 큰 하중을 가하였을 때의 해석이 필요하다.<sup>(25)</sup>

본 연구에서는 산업현장에 널리 사용되고 있는 CATIA 프로그램을 이용하여 3D Modeling을 수행하였으며, 유한요소해석 프로그램인 UGNX Nastran을 활용하여 해석을 수행하였다. 정확한 Mesh작업을 위해서 구조를 Fig. 3-9과 같이 Mesh 모델링을 진행하였다.<sup>(25)</sup>

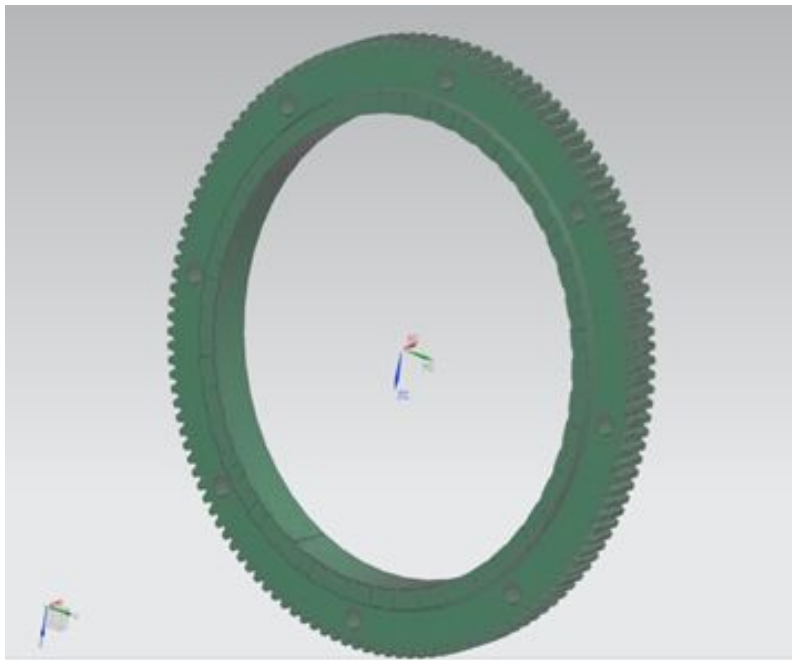


Fig. 3-9 Hybrid CURVIC Gear Solid Model Mesh Modeling

탄성힌지의 정확한 유한요소해석을 위하여 3D Auto mesh를 활용하였다. Fig. 3-10과 같이 하이브리드 대형 커빅 기어의 중심부에 고정 구속조건을 주었고 하중



은 피니언 기어와 맞물리는 기어치차에 1000N 하중을 부여하여 하이브리드 대형 커빅 기어의 이중에 선접촉하는 부분을 파악하여 하이브리드 대형 커빅 기어의 중심을 기준으로 전체원통좌표계를 잡고 원통좌표계를 기준으로 T방향으로 1000N의 집중하중을 적용하여 해석을 실행하였다.<sup>(25)</sup>

Table 3-4는 하이브리드 기어의 재질에 대한 물성치를 나타내고 있다.

**Table 3-4 The structure and specification of gear**

Material	Modulus of elasticity ( $N/mm^2$ )	elongation	Yield strength ( $N/mm^2$ )	Tensile Stress ( $N/mm^2$ )
HYBRID GEAR (SM45C)	$850 \times 10^3$	16%	1034	1034

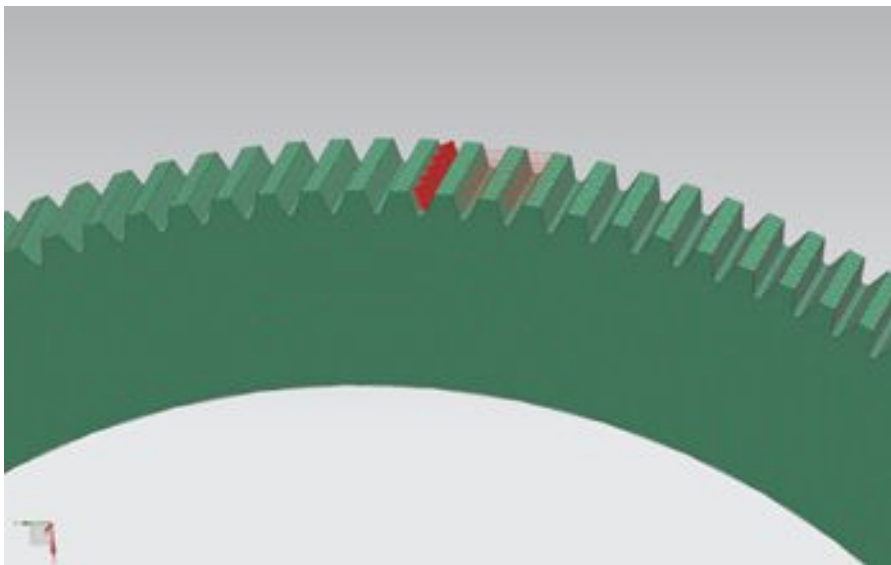
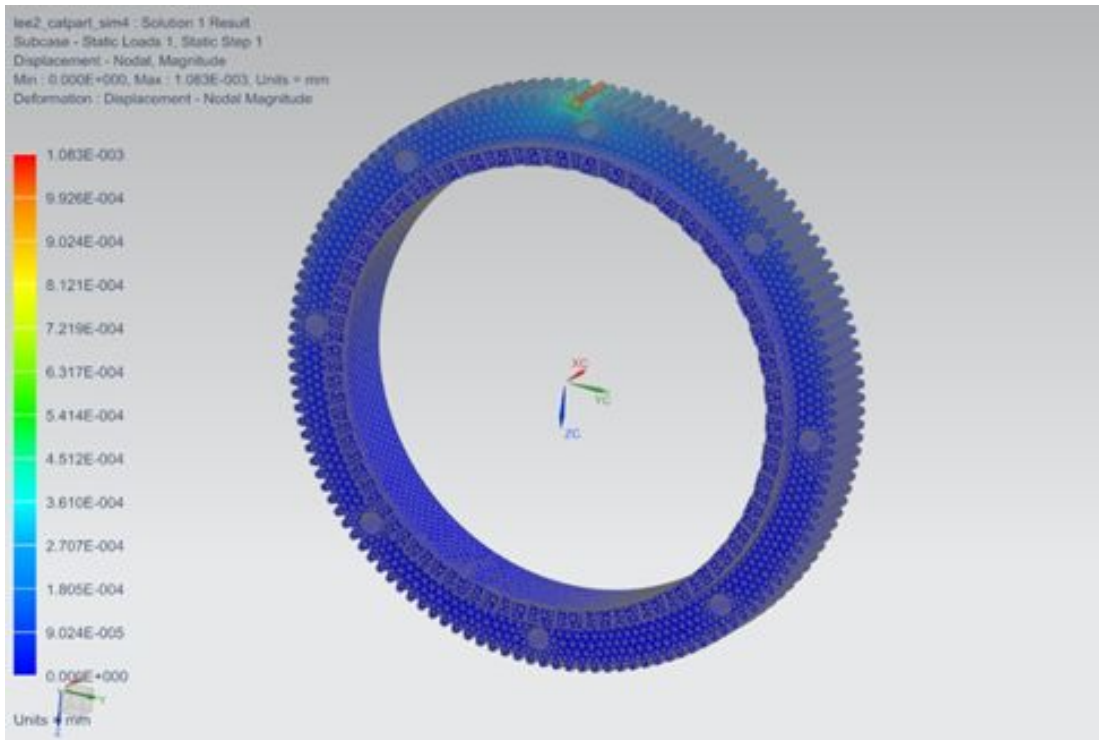


Fig. 3-10 Constraints Of Hybrid CURVIC Gears And Static Load

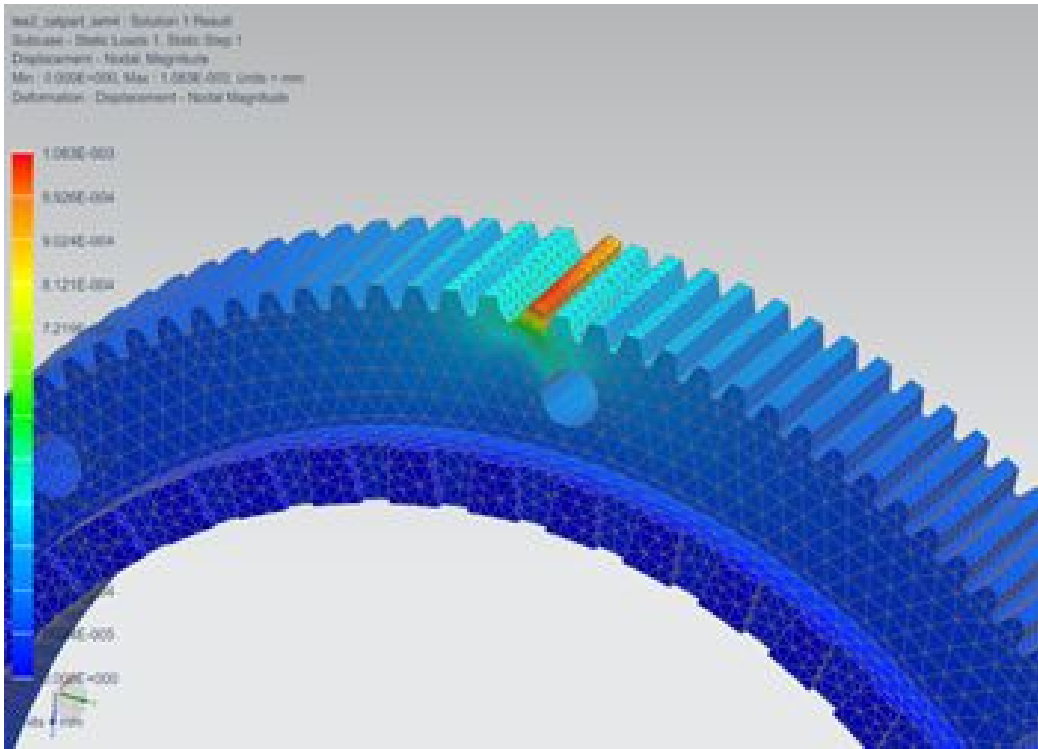
본 연구에서 FMA해석 적용목적은 하이브리드 대형 커빅 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 변위를 최소화하며 하이브리드 대형 커빅 기어의 제어성능을 함께



고려하여 설계하기 위함이고 하이브리드 대형 커빅 기어에서 집중되는 응력을 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고자 함이다. 따라서 하이브리드 대형 커빅 기어의 변형과 응력분포에 대한 유한요소해석 결과는 Fig 3-11와 같다. Fig. 3-11는 회전 하중이 발생 할 때에 최대 힘에 대한 하이브리드 대형 커빅 기어의 전체적인 변형과 응력 집중 현상을 나타내고 있으며, 최대 변위량은  $1.083 \times 10^{-3} mm$  이다<sup>(25)</sup>



(a)Structural analysis full displacement Overall view



(b)Structural analysis full displacement Magnification view

Fig. 3-11 Structural analysis full displacement

## 2. 폰 미세스 응력(Von-Mises Stress) 해석 및 안전율

폰 미세스 응력(Von-mises stress)은 등가응력(effective or equivalent stress)이라고도 부르며 영국의 과학자 폰 미세스(von Mises, 1883~1953)의 이름을 따서 불리게 된 특수한 유형의 응력이다. 물체는 외부로부터 힘이나 모멘트를 받게 되면 어느 정도까지는 견디지만 얼마 이상의 크기가 되면 외력을 지탱하지 못하고 파괴된다. 이러한 파괴를 예측하는 기준이 되는 조건을 항복조건(yield criterion)이라고 부르며, 폰 미세스 항복조건과 Tresca 항복조건(Tresca yield criterion)이 대표적이다. 폰 미세스 응력이란 폰 미세스 항복조건에 사용되는 응력으로 하중을 받고 있는 물체 각 지점에서의 비틀림 에너지(maximum distortion energy)를 나타내는 값이다. 수학적으로는 세 개의 주응력(principal stress) 혹은 6개의 독립된 응력성분들로 정의된다. 예를 들어, 임의의 유한요소 해석 프로그램으로 강도해석을 수행하면 물체 내부의 응력분포를 구할 수 있다. 그리고 각 지점에서 3개의 수직응력(normal stress)과 3개의 독립된 전단응력(shear stress)을 구할 수 있다.<sup>(23-25)</sup>

Fig. 3-12은 폰 미세스 응력의 기본이론을 나타내고 있다.

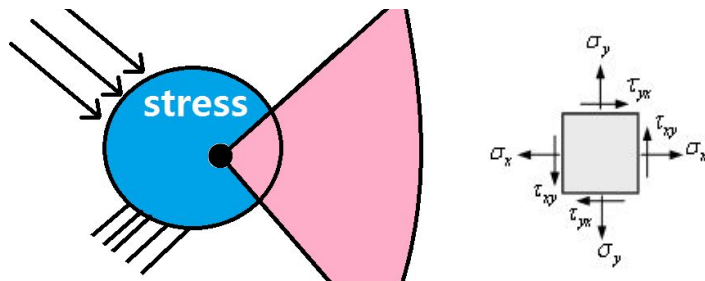
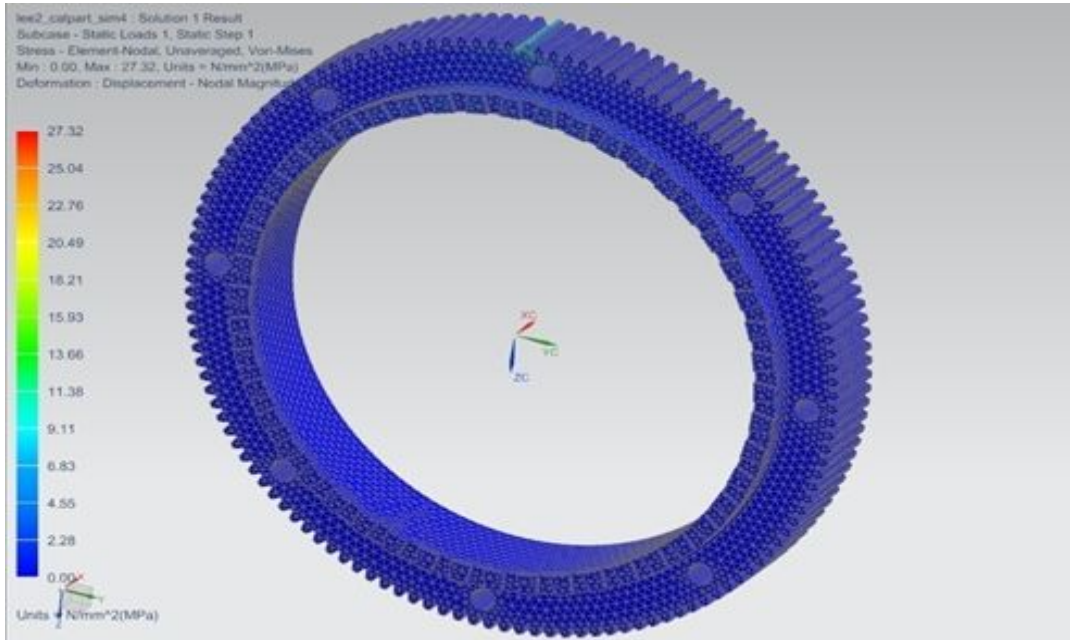


Fig. 3-12 Von-mises stress theory

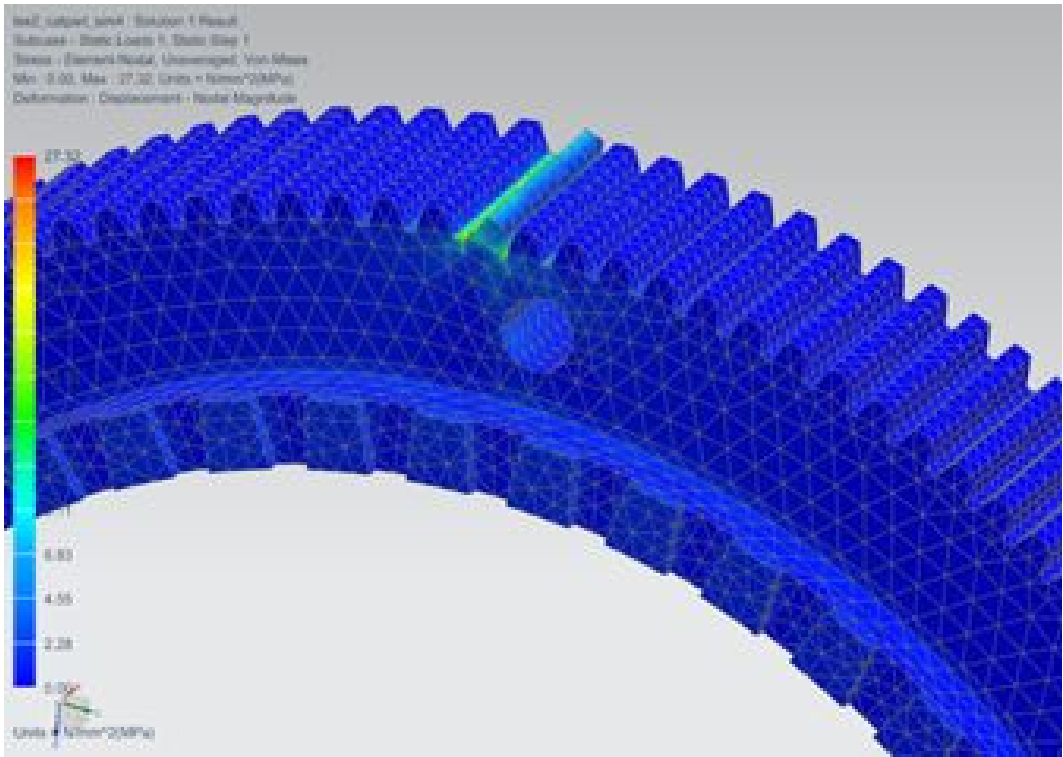
$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (3-1)$$

하지만 이러한 응력 성분들만으로는 물체가 외부 하중에 의해 파괴를 일으킬 것인지 아니면 안전한지를 판단할 수 없다. 왜냐하면 물체의 파괴는 각각의 응력 성분들의 최대 값 만으로 유발되는 것이 아니라 응력 성분들의 조합에 의하여 야기

되기 때문이다. 폰 미세스 응력은 물체 각 지점에서 응력 성분들에 의한 비틀림 에너지의 크기를 나타내는 값으로서, 가장 정확하게 물체의 파괴를 예측하는 기준으로 알려져 있다. 가공하중에 대한 하이브리드 대형 커빅 기어에 발생하는 Von-Mises 응력분포를 Fig. 3-13에 나타내었다.<sup>(25)</sup>



(a) Von-mises stress distribution Overall view



(b) Von-mises stress distribution Magnification view

Fig. 3-13 Von-mises stress distribution

Fig. 3-13을 검토해본 결과 응력집중 현상이 발생되었으며, 최대 Von-mises 응력은  $27.32 N/mm^2$  으로 나타나 안전율은 10.137 정도 이며 다음 Table 3-5은 최대 등가응력에 대한 결과 치이다.

Table 3-5 Results of displacement and stress

Material	Maximum Displacement	Maximum Von-mises stress	safety factor
HYBRID GEAR	$1.083 \times 10^{-3} mm$	$27.32 N/mm^2$	10.137

구조해석 결과 본 연구에서의 FMA해석 적용목적은 하이브리드 대형 커빅 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 변위를 최소화하는 것과 하이브리드 기어의 제어성능

을 함께 고려하여 설계하기 위함이고 하이브리드 기어에서 집중되는 응력을 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고자 함이었다. 회전 하중이 발생 할 때에 최대 힘에 대한 하이브리드 기어의 전체적인 변형 및 하이브리드 기어가 접촉하는 부분에 약 8mm의 Crack이 검출 되었으며, 고정구속과 하중을 준 부분에 응력 집중 현상이 발생 되었다. 이 때의 최대 변위량은  $1.083 \times 10^{-3} mm$ , 최대 Von-mises 응력은  $27.32 N/mm^2$  으로 나타나고 안전율은 10.137 정도이다<sup>(25)</sup> 구조해석 결과를 바탕으로 적외선 열화상 실험을 통하여 Crack 부분과 하이브리드 기어에 대하여 건정성 평가를 하고자 한다. <sup>(25)</sup>

## 제 3 장 적외선 열화상 기술

### 제 1 절 적외선 열화상 기술의 개요

모든 물질을 이루고 있는 기본 단위인 원자들은 절대 온도 0[K](-273.16°C, -459.72°F) 이상에서 미세한 진동을 하고 있다. 이러한 원자들의 진동에너지는 적외선 영역에서의 에너지와 동일하다. 즉, 절대 온도 0[K] 이상에서 모든 물체는 적외선을 방출한다. 물체에서 방출되는 복사 에너지의 강도는 온도 및 복사되는 전자기파의 파장에 따라 달라진다. 일반적으로 온도가 높을수록 많은 양의 복사 에너지를 방출하며, 이러한 이유로 적외선을 열선이라고도 부른다.<sup>(25)</sup>

열화상(Thermography)은 빛이 갖는 다양한 파장대역으로부터 적외선 파장대역 중에서도 1.3 μm로부터 12 μm 범위의 적외선을 적외선 검출소자인 센서를 통해 물체 혹은 대상체로부터 방사되어지는 적외선을 탐지하여 온도 혹은 그 자체를 화상으로 보여주는 기술이다. 최근 공항이나 항만의 출입국 시 얼굴의 열을 실시간으로 감지하여 이상 발열정도를 나타내는 기술은 우리가 일상생활에서 가장 흔하게 접할 수 있는 thermography 기술이다. 이를 발전시킨 적외선 열화상 기술은 단순한 온도뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴 진단 및 검사, 고장분석, 응력해석을 통한 피로파괴, 의료 임상진단, 바이오 및 식품저장, 기능성 의류 및 화장품 분야 등에 응용되고 있다. 또한, 고도로 집적화된 적외선 열화상 이미지는 군수산업 및 항공우주에서도 활용되어 항공기의 야간정찰, 기갑부대의 야간탐지, 해군의 원거리 적군 탐지, 우주 신호 탐사에 운용되어 왔으며 현재는 비파괴 탐지 기술의 한 영역으로 확고히 자리 잡으면서 지속적으로 그 범위가 확대되고 있다.<sup>(25)</sup>

#### 1. 적외선(Infrared Radiation)

열화상 측정 및 적외선 광선에 활용되는 적외선 에너지는 전자기 스펙트럼의 일부 분으로 가시광선과 유사한 형태의 특성을 나타낸다. 이러한 적외선은 빛의 속도로

공간을 이동하며 반사, 굴절, 흡수 및 방사 등의 현상을 나타낸다. 적외선 에너지의 파장은 가시광선에 비해 상당히 길어서 0.7 $\mu$ m에서 1000  $\mu$ m사이의 길이를 가진다. 모든 물체는 온도의 작용으로서 적외선을 복사(방사)한다. 적외선 열화상 측정 기법은 대상체에서 방출되는 적외선 열에너지를 검출하고 측정하기 위해 사용된다. 열 혹은 적외선 에너지는 파장이 너무 길어 육안으로 탐지할 수 없으므로 비가시광선이며 가시광선과 달리 적외선 환경에서는 절대 영도를 초과한 온도의 모든 사물이 열을 방출한다. 즉, 모든 물체가 적외선을 복사한다는 의미이다. 이러한 적외선 에너지는 원자와 분자의 진동과 회전으로 발생한다. 물체의 온도가 높을수록 더 많은 움직임이 발생하고 결국 더 많은 에너지를 복사한다. 이 에너지가 적외선 열화상 카메라에 감지되는 것이다. 적외선 열화상 카메라는 온도를 보는 것이 아니라 열의 복사, 즉 열에너지를 감지하는 것이다. 절대영도에서 모든 물체는 최저의 에너지 상태를 나타내며, 따라서 적외선 복사도 최소 수준으로 유지된다.<sup>(25)</sup>

적외선 복사는 Fig 4-1, Fig. 4-2에서와 같이 전자기 복사의 일종으로 가시광선보다 긴 파장을 가지고 있음을 알 수 있다. 다른 형태의 전자기 복사로는 X-ray, 자외선, 라디오파 등이 있다. 전자기 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 전자기 스펙트럼은 대역(band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다.<sup>(25)</sup>

적외선 열화상 카메라는 1.3  $\mu$ m ~ 12  $\mu$ m 대역을 사용한다. 여기서 단파(SW : Short wave) 영역은 2 $\mu$ m ~ 5  $\mu$ m의 대역에서 복사가 검출될 수 있는 범위를 말하며, 장파(LW : Long wave) 영역은 8  $\mu$ m ~ 12  $\mu$ m의 대역의 복사가 검출될 수 있다. 그리고 중간에 5 $\mu$ m ~ 8 $\mu$ m의 대역에서는 대기에서의 낮은 투과율에 의해 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.<sup>(10)</sup>



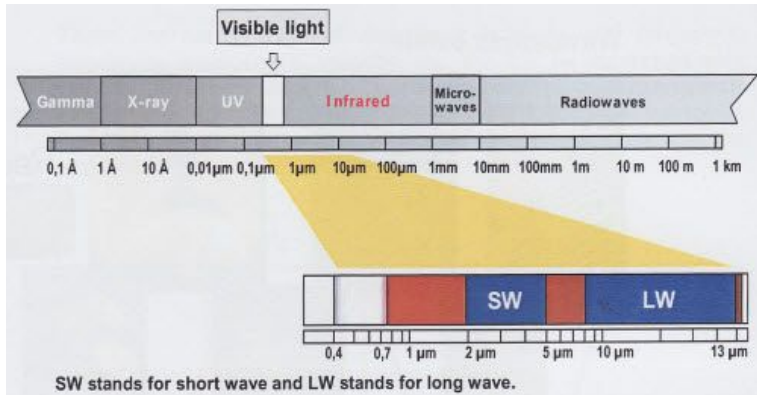


Fig. 4-1 The electromagnetic spectrum

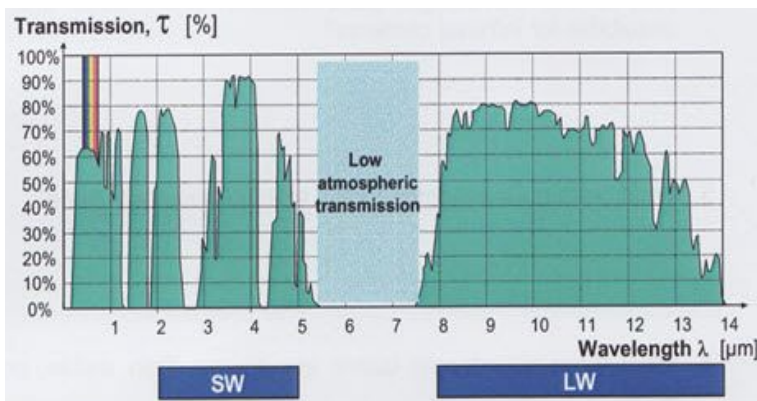


Fig. 4-2 Atmospheric transmission in different wavelength bands

## 2. 열화상 원리 및 이론

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 Fig. 4-3에서 보이는 것처럼 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.<sup>(25)</sup>

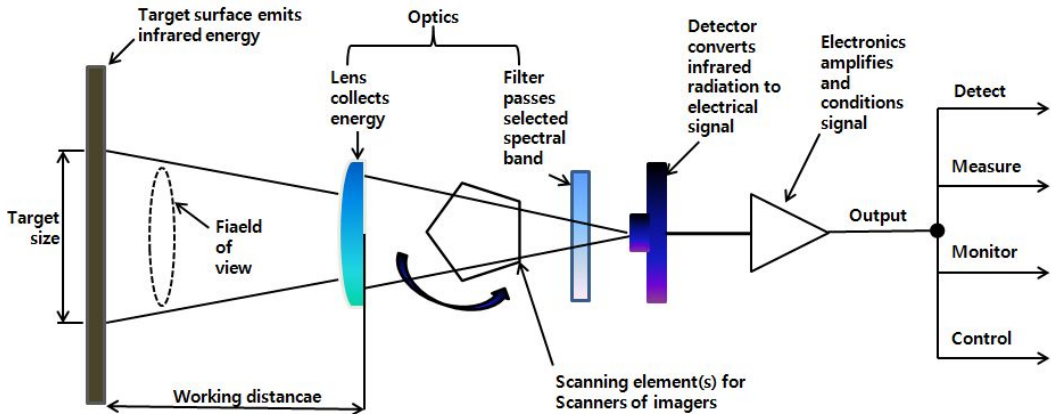


Fig. 4-3 IR camera with addition of scanning element for imaging

적외선 열화상 측정 순서를 살펴보면 다음과 같다.

- Infrared energy는 imager의 광학렌즈를 통과한다.
- Energysms imagerdml sensor에 모아진다.
- Sensor는 infrared energy를 electronic signal 변환한다.
- 열 영상은 물체 표면의 온도를 수천 개의 점으로 높낮이에 따라 표현된다.

적외선 열화상 기술에서는 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소 수(pixel)로 크기를 대략적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기측정을 위해서는 먼저 지시자를 이용하여 적외선 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 구하고, 단위 화소에 대응하는 길이를 결함이 차지하는 화소수에 곱함으로써 결함의 크기를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm)  $D$ 는 식 (4-1)과 같이 표현된다.<sup>(25)</sup>

$$D = M \times \left(\frac{L}{P}\right) \quad (4-1)$$

여기에서,  $L$ 은 지시자(calibrator)의 길이(mm),  $P$ 는 지시자의 길이에 대응하는 화소수(pixel),  $M$ 은 결함이 차지하는 화소수(pixel)이다.<sup>(25)</sup>

물질을 이루고 있는 입자(전자, 이온, 원자, 분자)들은 미세한 진동에 의해 복사

에너지를 방출한다. 이러한 열복사는 기체나 액체 고체사이에서 차이점이 존재한다. 복사에너지의 운반을 설명하기 위해서는 두 가지 접근 방법 즉, 광자 복사와 전자파를 고려하는 방법이 있다. 광자 에너지  $W$ 는 물질내부의 진동 특성으로 인해 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{joules} \quad (4-2)$$

여기서  $h$ 는 Plank 상수( $6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )이고,  $c$ 는 빛의 속도( $2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )이다. 상기 식으로부터 광자 에너지는 파장에 반비례한다. 따라서 파장이 짧은 복사는 많은 광자 에너지를 포함한다. 그러므로 파괴력이 큰 감마선이나 X선과 같은 파장이 짧은 복사를 피하려고 하는 것은 당연하다. 복사열전달은 유한한 온도의 모든 표면이 전자기파 방식으로 에너지를 방출하여 생기는 열전달 현상으로, 유한한 온도의 물질에 의하여 방사(emission)되는 에너지로 진공에서 열 손실이 없으므로 가장 잘 이루어진다.<sup>(25)</sup>

전자기파는 주파수  $f$ 와 파장  $\lambda$ 에 의하여 표현되며, 하나의 매체 속에서 이들 두 성질은 다음과 같은 관계가 있다.<sup>(25)</sup>

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4-3)$$

파장의 일반적인 단위는 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ;  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ), 나노미터( $\text{nm}$ ;  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), 앙스트롬( $\text{\AA}$ ;  $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )이다. 1864년 물리학자인 James Clerk Maxwell은 전하를 가속하거나 전류를 바꾸면 전기와 자기장이 생긴다고 가정하였다. 빨리 움직이는 장을 전자기파 또는 전자기복사(electromagnetic radiation)라고 부르며 이는 원자나 분자 내에서 전자의 분포가 변화되었을 때 물체가 방사하는 에너지이다. 1887년 Heinrich Hertz는 실험을 통해 이러한 파장이 존재함을 입증하였다. 전자기파는 다른 파장처럼 에너지를 전하고 모든 전자파는 빛의 속도로 전파된다. 파장이나 전파속도와 달리 전자파의 주파수는 출처(source)에만 관계되며 파가 통과한 매체와는 무관하다. 복사에서는, 1900년 Max Planck가 양자론리(quantum theory)에서 제안한 것과 같이, 전자기복사를 광자(photon)나 양자(quantum)라고 하는 불연속적인 에너지 묶음이 전파되는 것이라고 생각하면 도움

이 된다.<sup>(25)</sup>

이상적인 표면으로부터의 열복사가 일어날 경우 방출 가능한 최대 속은 그 표면 온도의 네제곱에 비례한다. 이를 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙이라 하고 다음과 같이 나타낸다.<sup>(25)</sup>

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (4-4)$$

- $\epsilon$  : 방사율(emissivity), 복사 물성치,  $0 \leq \epsilon \leq 1$
- $T_s$  : 표면의 절대온도, K

여기서,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수이며  $5.67 \times 10^{-8}$ 이고 단위는  $W/m^2K^4$ ,  $T_s$ 는 표면의 절대온도로 단위는 K 또는 R이다.<sup>(25)</sup>

복사열이 완전히 흡수되는 흑체(black body)의 복사강도를 기술한 플랑크(Planck) 법칙에 의해 물체로부터 방출되는 전체에너지는 스테판-볼츠만 법칙으로부터 흡수율 1이므로( $\epsilon=1$ ), 흑체에 대해 식 (4-5)와 같다.<sup>(25)</sup>

$$E_b = \sigma T^4 (W/m^2) \quad (4-5)$$

상기 식에서 적외선에너지는 전자기적 스펙트럼의 일부로서 가시광선과 유사하게 거동하며 광속으로 우주공간을 달리고 반사, 굴절, 흡수, 방사될 수 있다. 빛의 흡수는 다음 법칙에 따른다. 즉, 입사광의 강도를  $I_0$ , 투과광의 강도를  $I$  라 하면,  $I_0 = I_0 e^{-\alpha x}$  이다. 여기서  $x$ 는 통과한 두께,  $\alpha$ 는 감약계수 이다. 그러나  $N_\alpha$ 는 같은 물질이라도 빛의 파장에 따라 다른 색이 생기게 된다. 빛의 굴절률은 일반적으로 파장의 함수로서 무한대의 파장에 대한 굴절률  $n_\infty$ 는 그 물질의 유전율  $\epsilon$ 의 제곱근과 같다. 즉,  $n_\infty^2 = \epsilon$ 이다. 물체에 입사한 복사에너지는 빛의 성질에 의해 물체로부터 3가지 형태로 나타난다. 조사된 복사열(incident flux :  $\phi_i$ )은 일부 흡수(absorption)가 될 수도 있고, 일부는 물체에 의해 반사(reflection)되고, 일부는 물체를 투과(transmission)할 수도 있다. 일반적인 경우  $\phi_i$ 의 흡수, 반사, 투과는 파장( $\lambda$ ), 방향( $\phi, \theta$ ), 온도(T)에 의존한다. 이러한 에너지는 에너지 보존의 법

칙에 따라 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\Phi_i = \Phi'_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (4-6)$$

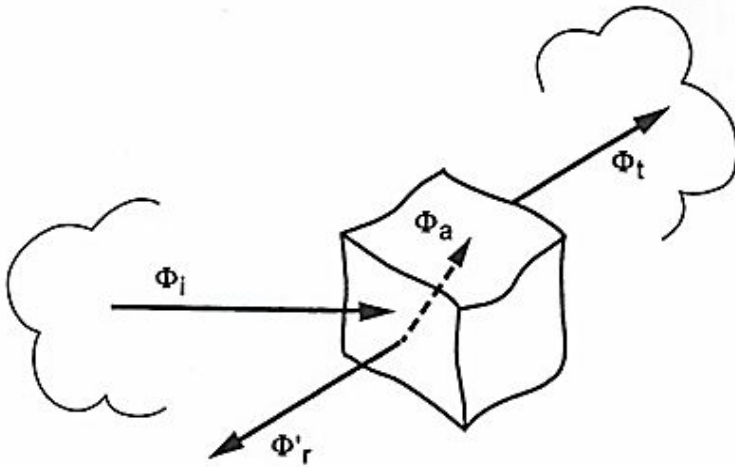


Fig. 4-4 The flux incident  $\Phi_i$  is equal to the flux reflected  $\Phi'_r$ , absorbed  $\Phi_a$ , and transmitted  $\Phi_t$ .

상기 식 (4-6)의 물체에 입사한 복사 에너지로부터, 흑체로부터 방사된 에너지는  $W_{bb}$ 이고 이상적인 흑체 방사체라는 것은 실제로 존재하지 않으며 실제 방사된 에너지가  $W_{abj}$ 이면, 물체의 방사율  $\epsilon$ 는 다음과 같다.<sup>(25)</sup>

$$\epsilon = \frac{W_{abj}}{W_{bb}}, \text{ 여기서 } 0 \leq \epsilon \leq 1 \quad (4-7)$$

식 (4-7)로부터 적외선 열화상에 적용되는 방사율은 적외선 카메라에 의해 사용되어지는 적외선 파장간격에서 발생하는  $\epsilon_\lambda$ 의 평균값으로 서로 다른 물체의 온도에 따라 적절한 방사율의 예측이 중요하다.<sup>(25)</sup>

파장 흑체 방사력은 절대온도 T에서 단위시간당, 단위면적당 그리고 단위 파장  $\lambda$ 에서 흑체가 방사하는 복사이다. 흑체 방사도  $L_{\lambda,b}$ 는 1901년 Max plank에 의하여 양자이론과 관련하여 개발되었다.<sup>(25)</sup>

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda KT) - 1]} \text{ W m}^2 \mu\text{m}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (4-8)$$

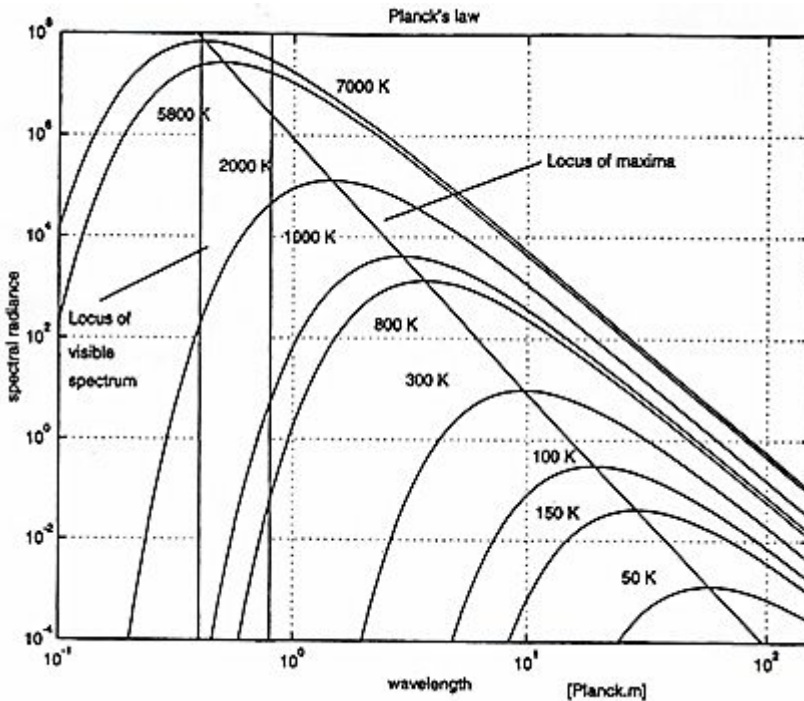


Fig. 4-5 Spectral radiance of a blackbody(Planck's law)

Fig. 4-5에서 보면 주어진 온도에서 파장에 따라 방사가 달라짐을 알 수 있다. 식 (4-8)에서 첫 번째와 두 번째 복사 상수를 써서 나타내면 다음과 같다.

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \text{ W m}^2 \mu\text{m}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (4-9)$$

여기서,  $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ ,  $C_2 = hc_0/K = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \times K$  이다.

앞서 언급한 바와 같이 흑체(blackbody)는 완벽한 방사체이다. 흑체는 투과율이 제로(0)이며 반사율 또한 제로(0)이다. 키리히호프 법칙(Kirchhoff's law)에 의하면, 이러한 흑체의 방사율은 1이다. 사실 흑체는 가시광선 방사에 대해 처음 정의

되었다. 가시광선 상에서는 어떤 물체가 빛을 전혀 반사하지도 투과하지도 않을 경우 검은색으로 보이게 된다. 따라서 이러한 물체가 흑체라고 불리게 되었다. 회색체(graybody)는 모든 파장에 걸쳐 1.0이하의 일정한 방사율을 나타내는 물체를 지칭한다. 실물(realbody)은 파장에 따라 방사율이 달라지는 물체를 지칭한다. <sup>(25)</sup>

적외선 열화상 카메라는 특정 파장에서 발생하는 적외선 방사 에너지를 감지한다. 온도값을 얻기 위해 앞에서 설명한 결과치를 흑체를 사용하여 만들어낸 교정표와 비교한다. 이 경우 대상물체가 회색체라는 가정이 포함되어 있다. 대부분의 경우 이 가정은 사실이고 의미 있는 측정치에 충분히 가까운 값을 구할 수 있다. 불투명한 물체의 경우 방사율과 반사율은 상호 보완되는 것으로 방사율이 높다는 것은 반사율이 낮다는 말이고 그 반대도 마찬가지다. 적외선 방사율은 열역학적으로 열역학 제1법칙인 에너지 보존의 법칙에 의해 다음과 같다. 흡수율( $\alpha$ )과 방사율( $\epsilon$ )의 값은 같으며 식 (4-10)에서 흡수되는 적외선 $\alpha$ (흡수율),  $\epsilon$ (방사율), 투과하는 적외선  $\tau$ (투과율), 반사되는 적외선을  $\rho$ (반사율)라고 하면 물체에 입사되는 적외선 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다. <sup>(25)</sup>

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (\alpha \geq 0, \rho \cdot \tau \leq 1) \quad (4-10)$$

불투명체로 물체가 적외선을 투과하지 않을 때  $\tau = 0$ 이 되고 방정식이 식 (4-11)과 같이 간단히 나타낼 수 있게 되며,  $\alpha = 1 - \rho$ 에서 반사율을 알면 흡수율도 알 수 있다.

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4-11)$$

식 (4-11)은 매우 중요한 사실을 보여준다. 앞서 말한 것과 같이 간단하게 말하면 높은 방사율은 낮은 반사율을 의미한다. 반대로, 높은 반사율은 낮은 방사율을 의미한다. 열화상 카메라 사용자들은 방사율이 가능한 최대로 높은 것을 선호한다. 이는 목표 대상체로부터 반사되는 방사에너지의 대부분을 가장 정확하게 읽을 수 있기 때문이다. 하지만 방사율이 낮아질 경우 측정오차는 점점 커지게 된다. <sup>(25)</sup>

계산식에 의하면 목표물의 방사율이 0.5이하로 내려갈 경우 측정오차는 수용할 수 없을 정도로 높아지게 된다. 다양한 방사율(emissivity)표가 있지만 방사율은 추측하기가 쉽지 않다. 물체의 형상에 따라서도 방사율이 달라진다. <sup>(25)</sup>

반투명체의 경우 두께에 따라 방사율이 달라진다. 이외에도 방사율에 영향을 주는 요소들로는 보는 각도, 파장 및 온도 등이 있다. 방사율의 파장에 따른 차이는 적

외선 열화상 카메라의 종류에 따라 같은 물체에 대해 서로 다른 방사율을 나타낼 수 있다는 의미이다. 사실, 이 경우 두 가지 모두 다 옳은 값으로 볼 수 있다.<sup>(25)</sup>

일반적으로, 절연체(전기적 비전도체)는 0.8~0.95의 상대적으로 높은 방사율을 나타낸다. 도색이 잘된 금속도 포함된다. 산화되지 않은 금속의 경우 약 0.3 이하의 방사율을 나타내므로 측정 자체를 하지 말아야 한다. 산화된 금속의 경우 0.5~0.9의 방사율을 나타내는데 그 값의 범위가 너무 커서 측정에 큰 문제점으로 부각된다.<sup>(25)</sup>

산화된 정도는 물체의 방사율에 중요한 요인이 된다. 산화의 정도가 높을수록 방사율이 높아진다. 불투명한 물체의 경우, 방사율 및 주변(반사된)온도를 알고 있는 경우라면 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도 측정값이 수 % 이내로 정밀한 값을 얻을 수 있다. 올바른 온도를 측정하기 위해서는 적외선 열화상 카메라는 물체로부터 방사되는 에너지로 인한 부분만을 추출해 낼 수 있어야 한다. 최근의 적외선 열화상 카메라는 이러한 기능을 가지고 있다. 반사에 의한 오차부분을 제거한 후 물체의 방사율에 따라 그 값을 변경 처리한다.<sup>(25)</sup>

적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사 되어진 적외선 파장을 검출하여 Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여주는 것이다. Fig. 4-6은 일반측정 상황에 대한 적외선 방사 영향을 나타내었다.<sup>(25)</sup>

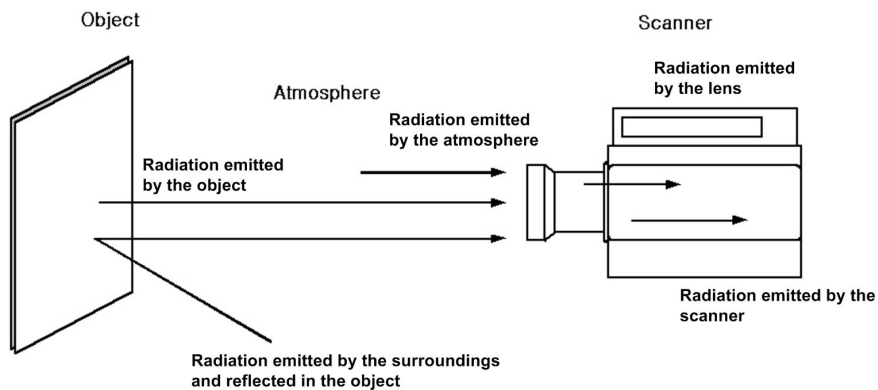


Fig. 4-6 Radiation contributions to the general measurement situation



대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같으며, 열 측정 공식은 식 (4-12)에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.<sup>(25)</sup>

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1 - \epsilon) \times I(T_{amb}) + (1 - \tau) \times I(T_{atm}) \quad (4-12)$$

## 제 2 절 적외선 열화상 탐상 기법

적외선 열화상 비파괴검사는 2가지의 다른 접근법인 수동적 방법(Passive method)과 능동적 방법(Active method)으로 크게 구분할 수 있다. 능동 서모그래피는 외부 가열이나 냉각 등에 의해 열 유동이 생산되어 진다. 이러한 열 유동에 의해 일시적 또는 지속적인 자극에 의해 표면의 온도 패턴을 분석함으로써 내부 결함까지 측정할 수 있다.<sup>(12)</sup>

### 1. 수동적 방법(Passive method)

수동 기법은 Fig. 4-7과 같이 가열이나 냉각이 적용되지 않고, 측정 대상물로부터 자연스럽게 방사되고 있는 적외선 에너지를 검출하는 일반적인 측정방법이다. 수동적 열화상 기법은 일반적으로 온도 패턴을 기초로 산업 공정 및 제도 단계에서의 평가 및 모니터에 적용된다.<sup>(25)</sup>

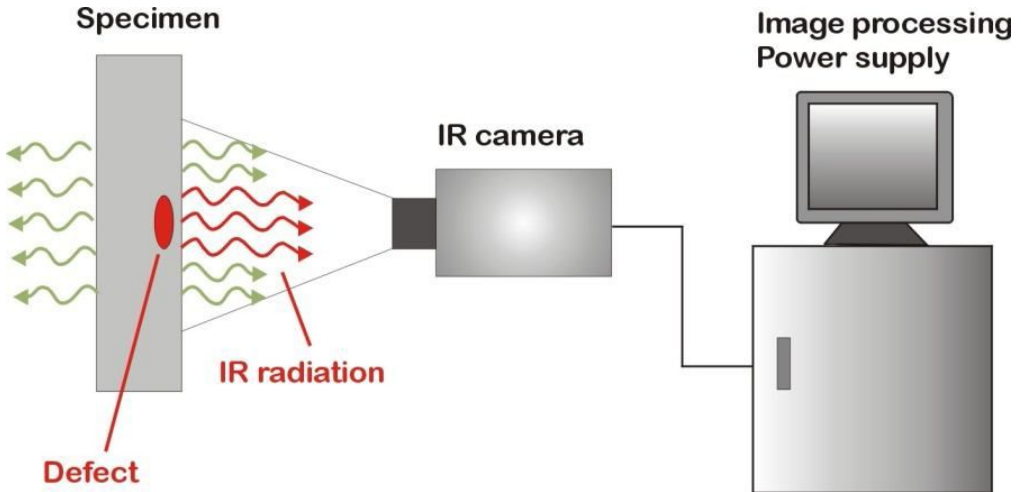


Fig. 4-7 Passive method (jenoptik ag)

수동적인 방법으로의 결함탐지는 검사에 앞서 온도가 환경에 따라 일정하다. 따라서 시험 대상체는 결함 부위에서 기록할만한 온도를 제공하기 위해 가열되거나 냉각되어야 한다. 이 방법은 제어할 수 없는 에너지(태양)와 상호작용으로 대상체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법으로 적외선을 방출하는 모든 물체에 해당하는 사항으로 그 물체가 방출하는 고유의 적외선량을 감지하여 화상으로 나타낸다. 또한, 수동적 방법은 물체 고유의 상태를 파악하는데 사용되는 가장 기본적인 방법으로 측정 대상체의 정량적인 미세적 정밀도를 요구하는 분야보다는 거시적인 측정법에 속한다.<sup>(25)</sup>

## 2. 능동적 방법(Active method)

능동적 검사기법(Active method)은 Fig. 4-8과 같이 수동적 검사기법과 달리 검사체 고유의 적외선량에 의존하지 않고 제어 가능한 에너지를 입사하고 그 반응으로 검사체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법이다. 이러한 검사기법은 물체표면 방사율, 주변온도, 측정각도, 풍속, 거리, 형상에 따른 영향을 제어하여 검사자가 얻고자 하는 결과를 정밀하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 능동형 검사기법으로는 대표적으로 광적외선, 진동, 마이크로웨이브, 초음파, 와전류 등 에너지의 입사 종류에 따른 분류와 제어 방법에 따른 분류로 나뉠 수 있는데 이러한 검사기법을 통하여 검사체로부터 얻을 수 있는 결과 값이 더욱 정밀해지는 효과가 있다. 또한, 전류를 흘리는 방법이나 전류의 ON/OFF를 공리하여 고장 위치를 알기 쉽게 하는 방법도 이루어지고 있다. 액티브(능동)방식은 일반적으로 측정 대상물에는 전혀 열이 가해지지 않아 온도 분포가 없거나 온도 또는 온도차가 매우 미소한 경우 외부로부터 열을 가함으로써 측정 대상물의 표면의 미세 결함(크랙 등)이나 내부 결함(내부 크랙이나 보이드=공극)을 온도 분포로서 부상시켜 검출하는 방법이다.<sup>(25)</sup>

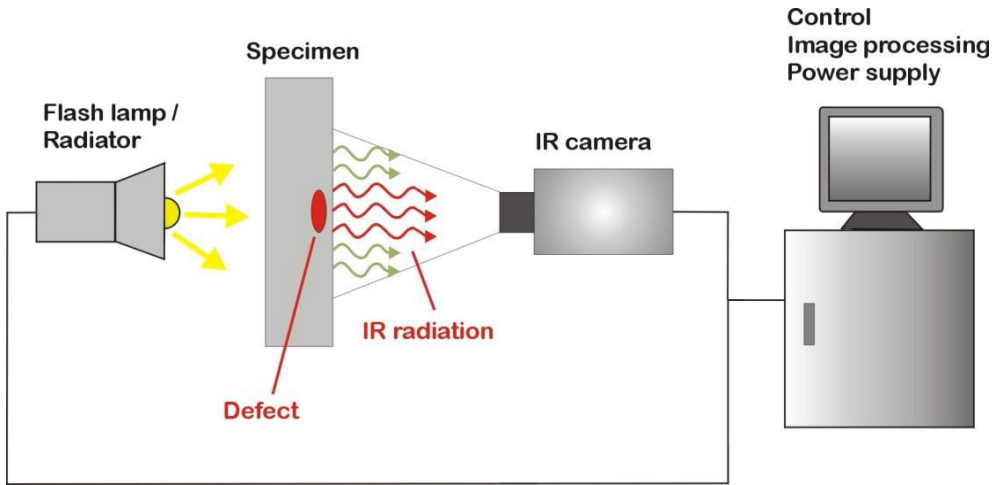


Fig. 4-8 Active method (jenoptik ag)

### 3. 외부 에너지 제어방법에 따른 분류

에너지 제어 방법으로 기본적인 Pulse 적외선 열화상 방법 그리고 Lock-in 적외선 열화상 및 Pulse-phase 적외선 열화상 방법이 있다.<sup>(25)</sup>

#### 가. 펄스 적외선 열화상(Pulse Thermography (PT))

가장 기본적인 에너지 제어 방법으로 램프 등을 사용한다. 외선 열 영상에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문에 신속한 열자극의 손상을 방지한다. 광원을 이용할 경우 매우 짧은 시간 제논(Xnon) 램프 등을 통해 20 kJ 정도의 열원을 신호 발생기(Function Generator)를 이용하여 Pulse 신호로 가열하는 방법이다. 이러한 방법은 일정한 시간동안 균일한 가열 온도가 입사되어야 하며, 입사시간에 따른 결과 값을 실시간으로 확인하여야 하는 어려움이 있으며 이를 저장할 경우에도 검출 민감도가 떨어지는 편이다. 또한 높은 온도로 표면 검사를 제어하기에는 적외선램프가 제한적인 점이어서 이러한 펄스 적외선 열화상은 대체로 검출 민감도가 떨어지지만 열확산 속도가 빠른 금속재료의 검사 시에 실시간으로 결함 검사 유무를 확인 할 수 있어 검사체의 유지보수에 활용되고 있다. 선호되는 이유는 높은 열전도도의 금속 시험에 대해서는 약 3ms

정도, 플라스틱과 흑연이 적층된 낮은 열전도도의 시편에 대해서는 4ms의 기간을 가지고 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이다.<sup>(25)</sup>

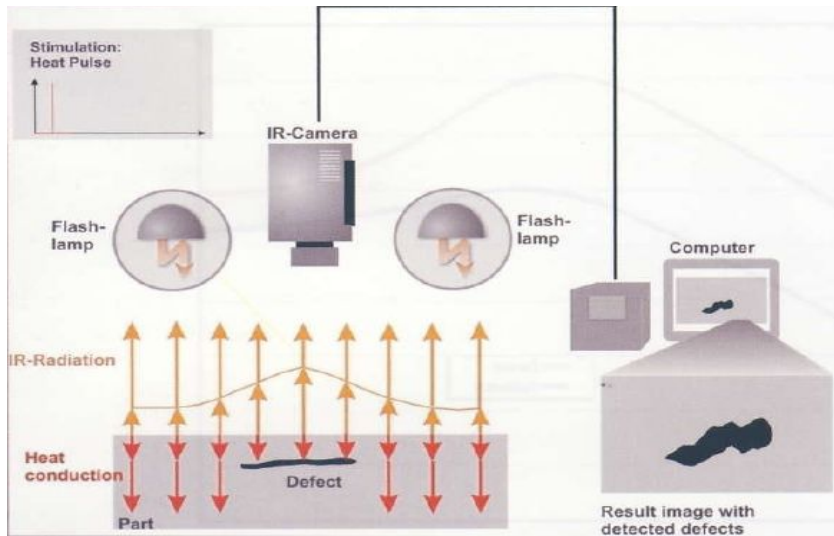


Fig. 4-9 Pulse thermography (PT, automation technology)

### 나. 펄스 페이즈 적외선 열화상(Pulse Phase Thermography (PPT))

펄스 페이즈 적외선 열화상과 펄스 적외선 열화상과의 차이점은 펄스 적외선 열화상보다 검사체에 더 오랜 시간 에너지를 입사하고 푸리에(Fourier) 변환을 통하여 데이터를 분석한다.<sup>(25)</sup>

$$Fourier_s = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N T_n e^{2\pi j(n-1)(f-1)/n} = R(f) + jI(f),$$

$$M(f) = \sqrt{R(f)^2 + I(f)^2}, \tag{4-13}$$

$$\Phi(f) = ArcTan\left[\frac{I(f)}{R(f)}\right],$$

PPT의 장점은 결함한계 평가 한계를 정의하는 열확산 길이  $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$ 를 조사하는 에너지량에 따라 조정하여 균일한 온도에서 독립적으로 위상을 처리할 수 있어 검

출 민감도를 높일 수 있어 PT방법에서 검출이 어려웠던 검사체의 검사가 용의 하다. 하지만 모든 주파수에서 에너지가 방출되고 실시간 검출이 불가능해 푸리에 변환을 통한 데이터 분석 시 PT방법에 비하여 시간이 오래 걸리며, 적외선 입사 램프가 제한적이다. 하지만 신호/노이즈(S/N) 비가 PT에 비하여 뛰어나 R&D분야에서 이러한 방법을 사용하고 있다.<sup>(25)</sup>

**다. 위상잠금 적외선 열화상(Lock-in Pulse Thermography (LIT, LPT))**

앞서 대상체를 자극하는 열원을 조화함수로 변조하여 입사하고 이 조화함수에 검출 소자를 동기화시켜 조화 함수의 위상변화를 복조하는 것이다. 위상잠금을 사용하여 위상변화를 추출함으로써 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지 할 수 있으며, 불균일한 표면 방사율의 영향을 적게 받게 된다. 관련된 변수는 열 발산 길이  $\mu$  로서 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.<sup>(25)</sup>

$$\mu = \sqrt{2\alpha/\omega} \tag{4-14}$$

여기서  $\alpha$  는 열확산계수를 나타내고,  $\omega$  는 변조된 각진동수이다. 신호진폭은 깊이의 경계에 의하여 영향을 받는다. 이는  $\mu$  보다는 작고, 신호 위상은 이러한 깊이의 약 2배 정도까지는 응답한다.<sup>(13-15)</sup> 이러한 배경에 대하여, LIT는 변조된 응답의 시간 의존성에 대하여 픽셀 대 픽셀을 분석하고 이러한 변조에 대한 진폭과 위상을 영상으로 표시한다. 위상영상의 장점은 더 큰 깊이 범위 외에도 광학적인 표면 개체<sup>(16)</sup>, 표면 형상 그리고 적외선 방출 계수<sup>(17)</sup>의 다양성에 민감하지 않다는 것이다. 그 이유는 위상 영상은 4개의 원 열상 (raw thermogram) 1 변조 사이클 동안의 시간에 있어서 같은 거리인 S1부터 S4 에 의하여 계산되어질 수 있다.<sup>(18)</sup>

Fig. 4-10은 위상잠금 적외선 열화상의 신호처리가 S1부터 S4를 나타낸 것이다.

$$\varphi = \arctan \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \tag{4-15}$$

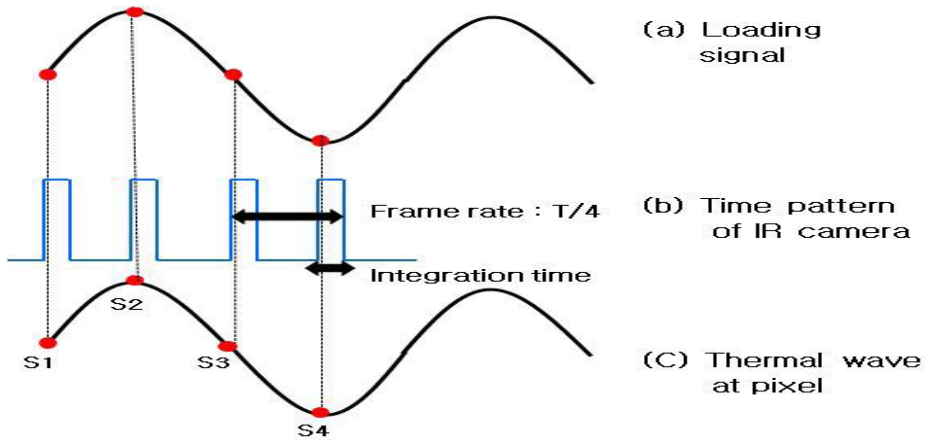


Fig. 4-10 Signal processing of lock-in infrared thermography

안정된 상태의 에너지를 입사할 때 각각의 프레임을 축적시켜 S/N 비가 향상되는 방법으로 하나의 주파수 신호에 에너지가 집중되며 실시간으로 측정이 가능하다. 또한 Fig. 4-11과 같이 균일한 가열과 온도로부터 독립된 상태로 위상 측정이 가능하여 초음파, 마이크로웨이브, 광학적 가열에 모두 사용할 수 있는 기술로 증폭을 통하여 깊은 침투깊이를 얻을 수 있어 품질관리, 균열탐지, R&D와 정비에 사용하는 제어 기법이다.<sup>(25)</sup>

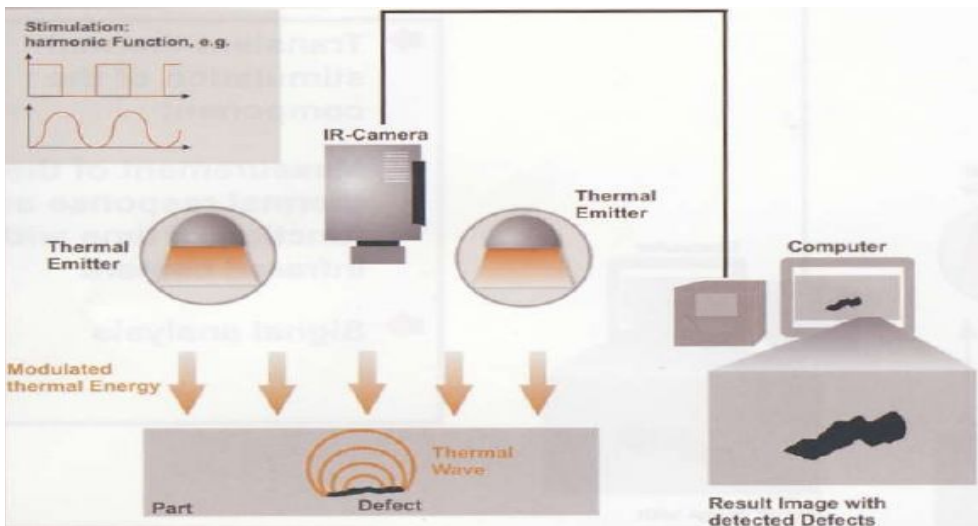


Fig. 4-11 Lock-in thermography (PT, automation technology)

## 제 4 장 실 험

### 제 1 절 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 적외선 열화상 카메라 FLIR T640은 포터블 형태로 이동성이 뛰어나다. 고 해상도, 대형 터치스크린, 높은 온도 분해능, 회전식 렌즈, 뷰 파인더, Wi-Fi 및 블루투스(Bluetooth), USB등 연결이 가능하다. 최고(640×480) 픽셀의 해상도를 가지고 있으며, 측정 온도 범위는 -40℃ ~ 2,000℃, 민감도는 30℃에서 0.035℃이다. 연속 디지털 줌, 연속 자동 초점 및 수동 초점, 5메가 픽셀의 실 화상 카메라를 내장하여 열화상/실 화상 이미지를 동시 저장이 가능하여 실 화상 내 열화상 삽입(PIP) 및 합성이 가능하다. 또한 USB를 PC에 연결하여 촬영 영상의 녹화 및 스트리밍 가능하다. 기본적으로 Li-Ion 배터리 2개를 이용하여 외부 전원의 연결 없이 일정 시간 사용이 가능하며, 블루투스(Bluetooth)를 이용하여 타 측정 장치와 연계가 가능해 측정의 정확도와 신뢰성을 향상시킬 수 있다.<sup>(24)</sup> Table 5-1은 FLIR T640의 성능을 표로 나타내었다.<sup>(25)</sup>

**Table 5-1 FLIR T640 Specifications**

List	specification
IR resolution	640×480pixel
Temperature range	-40℃ ~ 150℃, 100℃ ~ 650℃, 300℃ ~ 2,000℃
Thermal sensitivity/NETD	40mK @+30℃
Zoom	1-8× continuous, digital zoom, including panning
Focus	Automatic (one shot) or manual
Data communication interfaces	USB-mini, USB-A, Bluetooth, Wi-Fi
Size (L × W × H)	143 × 195 × 95mm
Weight	1.3kg



Fig. 5-1는 실험하려는 두 개의 하이브리드 커빅 기어 시편이다. 열화상 이미지와 온도 변화를 서로 비교하기 위하여 정상 시편과 결함 시편을 제작하여 준비하였다



Fig. 5-1 Normal specimens and specimens of artificial defects

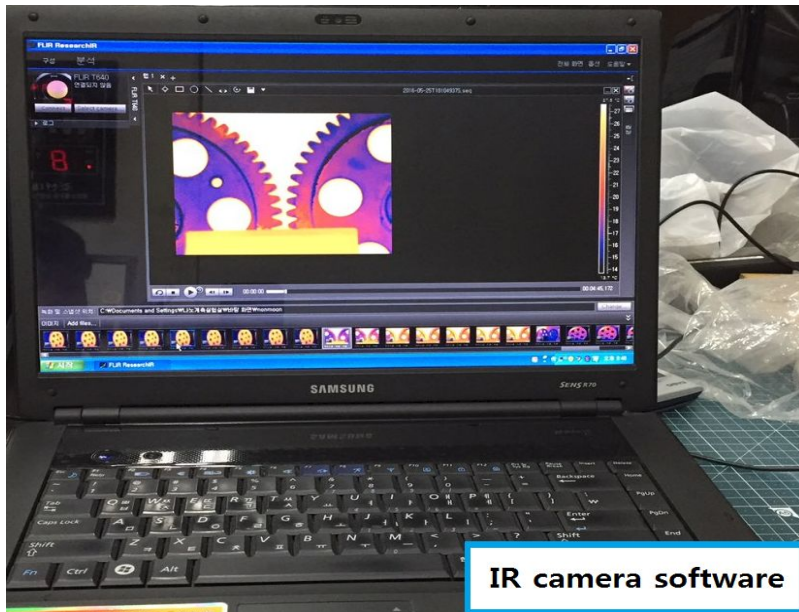


Fig. 5-2 IR camera software

Fig. 5-2은 실험에 사용되어지는 IR camera Flir 소프트웨어이다. 이 프로그램을 통하여 촬영 후 이미지 분석 및 온도 분석을 할 수 있다. Fig. 5-3는 열화상카메라를 이용한 전체적인 실험 구성이다. 실험의 정확도를 위하여 주변의 빛을 차단 후 실험을 하였다.<sup>(25)</sup>

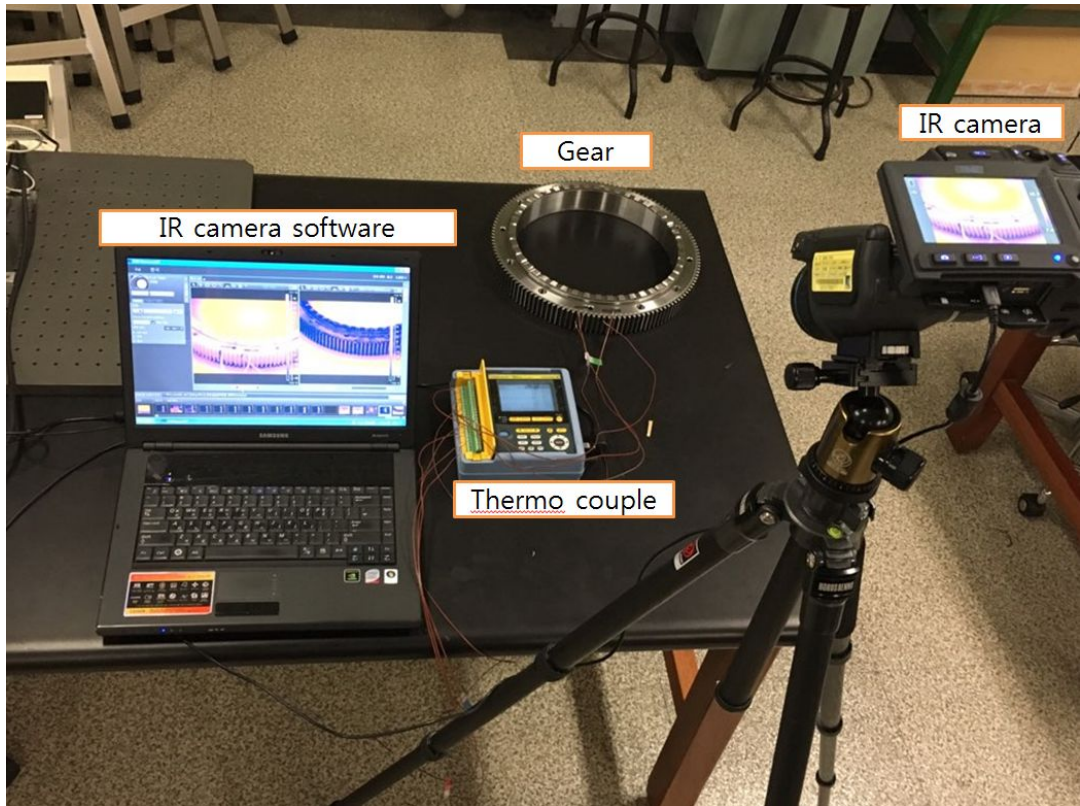


Fig. 5-3 The composition of Halogen lamp experiment equipment

## 제 2 절 시험편 제작 및 실험 방법

시험편은 하이브리드 대형 커빅 기어의 구조해석결과와 동일한 조건을 주기 위하여 Fig. 5-4와 같이 하이브리드 대형 커빅 기어에 와이어 커팅기를 이용하여 인공 결함을 주었다. 커팅을 한 후 다시 접합을 시켰다. 하이브리드 대형 커빅 기어를 냉각 후 상온에서의 온도변화를 비교하기 위하여 하이브리드 대형 커빅 기어를 고정후 열화상카메라로 실험을 하였다.<sup>(25)</sup>



Fig. 5-4 Hybrid CURVIC gear artificial defect specimen

## 제 5 장 연구 결과 및 고찰

### 제 1 절 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 하이브리드 커빅 기어에 신뢰성평가 및 해석

본 연구에서는 Horizontal방법으로 실험을 수행 및 분석 하였다. 기어의 접촉부분에 임의의 결함을 주었으며, 영하냉각 후 상온에서의 기어의 온도변화를 열화상 카메라를 이용하여 촬영을 하였다. 그 결과 Fig. 6-1과 같이 인공결함을 주었던 부분이 정상시편과 비교하였을 때 뚜렷하게 차이가 있는 것이 보여졌다.<sup>(25)</sup>

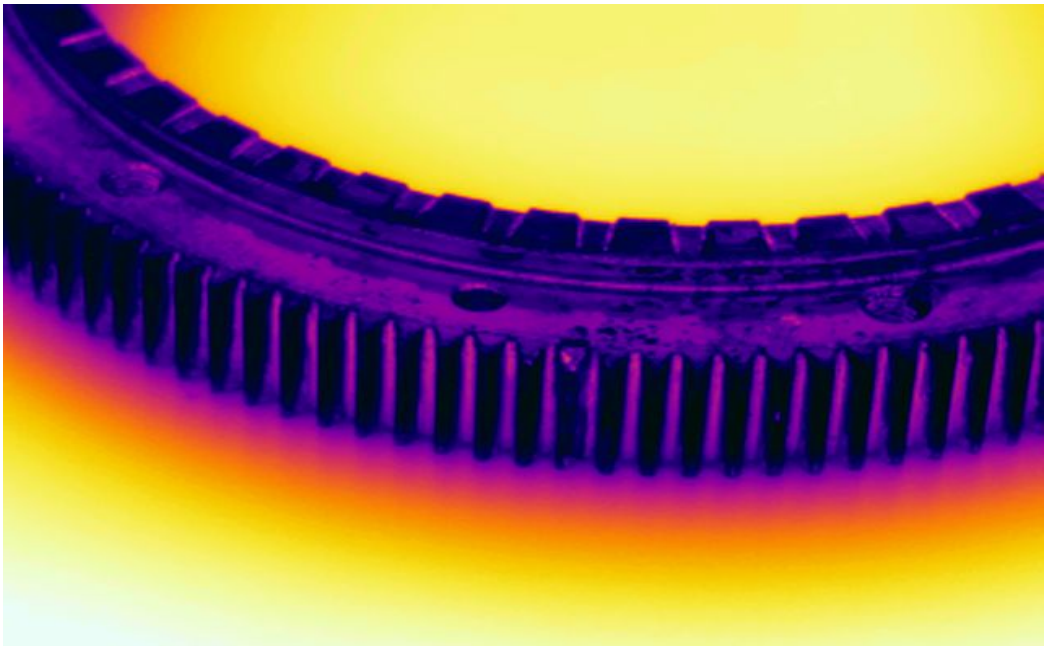


Fig. 6-1 below zero After cooling, the thermal image of the test hybrid CURVIC gear

본 연구에서는 하이브리드 대형 커빅 기어의 접촉 부분 결함에 대한 정확한 온도 데이터를 도출하기 위해 결함이 있는 부분과 결함이 없는 부분으로 나누어 Fig. 6-2와 같이 5곳에 Spot을 지정하였다. 그 결과 결함 부분인 Spot2에서는 주위보다



온도 낮게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 결함이 없는 정상 부분인 Spot1, Spot3, Spot4, Spot5에서는 결함부위보다 온도가 높은 것을 적외선 열화상 카메라를 통하여 확인 할 수 있었다.<sup>(25)</sup>

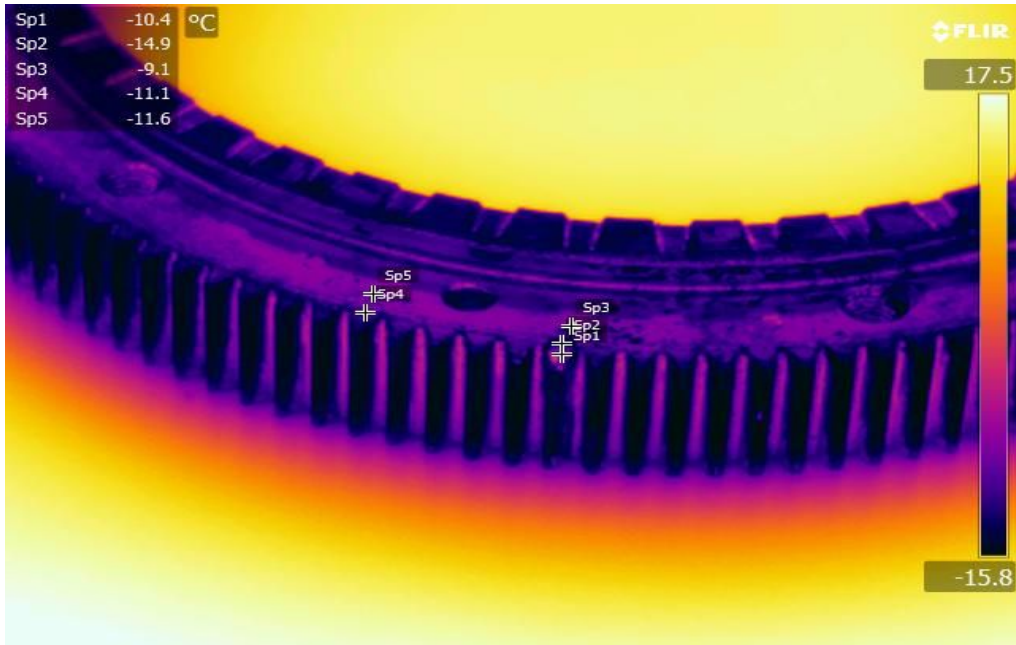
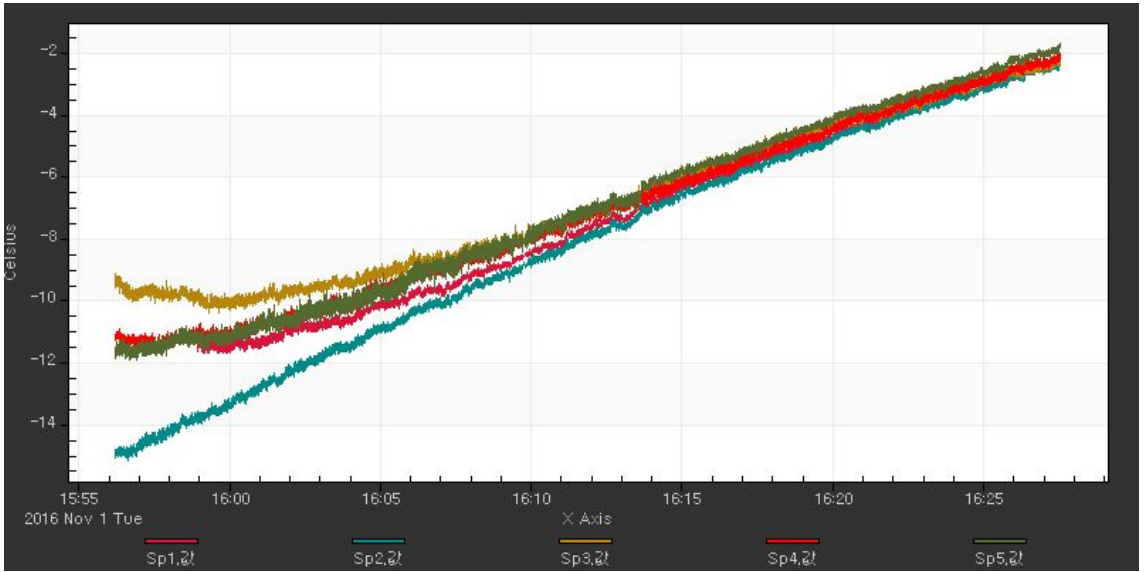
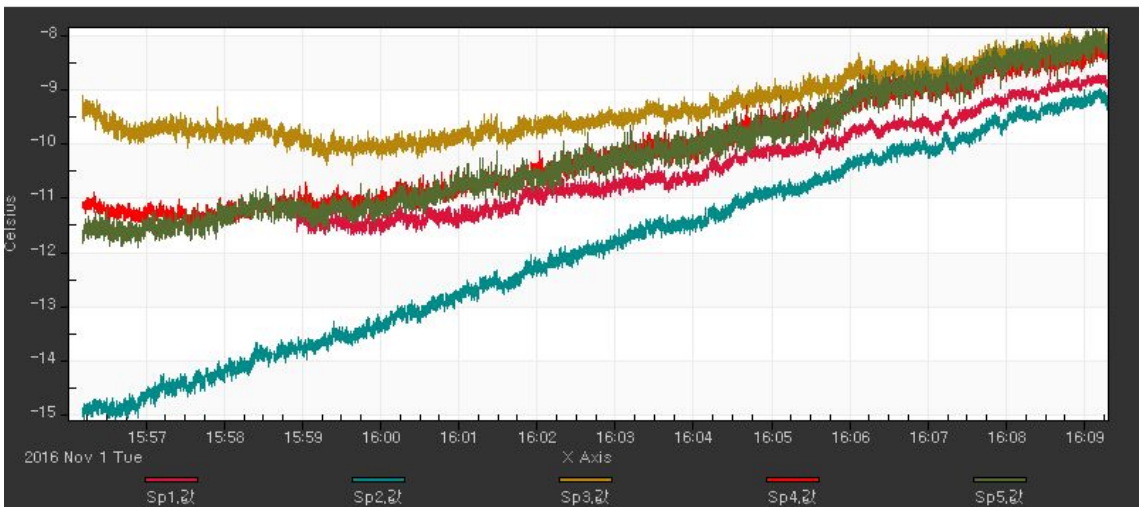


Fig. 6-2 below zero After cooling, the thermal image of the test hybrid CURVIC gear Spot

온도변화를 알아보기 위하여 시편을 영하의 온도에서 냉각하여 상온에서 30분동안 영상을 촬영하여 값을 저장하여 비교하도록 하였다. 그 결과 결함부 치차 끝부분인 Spot1은 -11.5°C에서 최대 -9.5°C까지 온도가 상승하였고, 인공결함부 Spot2는 -14.9°C에서 -10.5°C까지 상승하였으며 결함부 기어몸체 Spot3은 -9.5°C에서 -8.5°C 정상시편부 Spot4, 5 는 각각 -11.1°C, -11.6°C에서 -8.5°C, -8.7°C로 변화하였다.<sup>(25)</sup>



(a) Temperature graph Overall view



(b) Temperature graph Magnification view

Fig. 6-3 below zero temperature the resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling

본 연구의 결과는 Fig. 6-3 (a)의 그래프와 같으며(b)는 그래프의 온도변화부를 확대한 것이다. 결함부에 대한 정확한 온도 데이터를 도출할 수 있도록 하이브리

드 대형 커빅 기어에 인공결함을 만든 부분과 정상 부분으로 나누어 총 5곳에 Spot을 지정하여 온도를 측정 분석하였다. 냉각 후 서모그래피 기법을 적용하여 영하 온도일때 실험을 진행한 결과 인공적인 결함을 만든 부분인 Spot2에서 최고 온도가  $-10.5^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하는 것을 확인 하였고, 인공결함 치차의 끝 Spot1  $-9.5^{\circ}\text{C}$ 과 결함부 기어몸체 Spot3같은 경우 최고 온도가  $-9.5^{\circ}\text{C}$  정상시편부Spot4, Spot5같은 경우 최고 온도가  $-8.5^{\circ}\text{C}$ ,  $-8.7^{\circ}\text{C}$  까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. (25)

본연구에서 더욱 확실한 하이브리드 대형 커빅 기어의 건정성 평가를 위하여 Horizontal방법으로 실험을 수행에서 시편을 영상온도에서 냉각하여 적외선 열화상 카메라를이용하여 실온에서 온도변화를 관찰함으로 상온 온도변화실험을 하였다. 그 결과 Fig. 6-4와 같이 영하온도 냉각 시편보다 인공결함 부분이 정상시편과 비교하였을 때 뚜렷하게 차이가 있는 것이 보여졌다. (25)

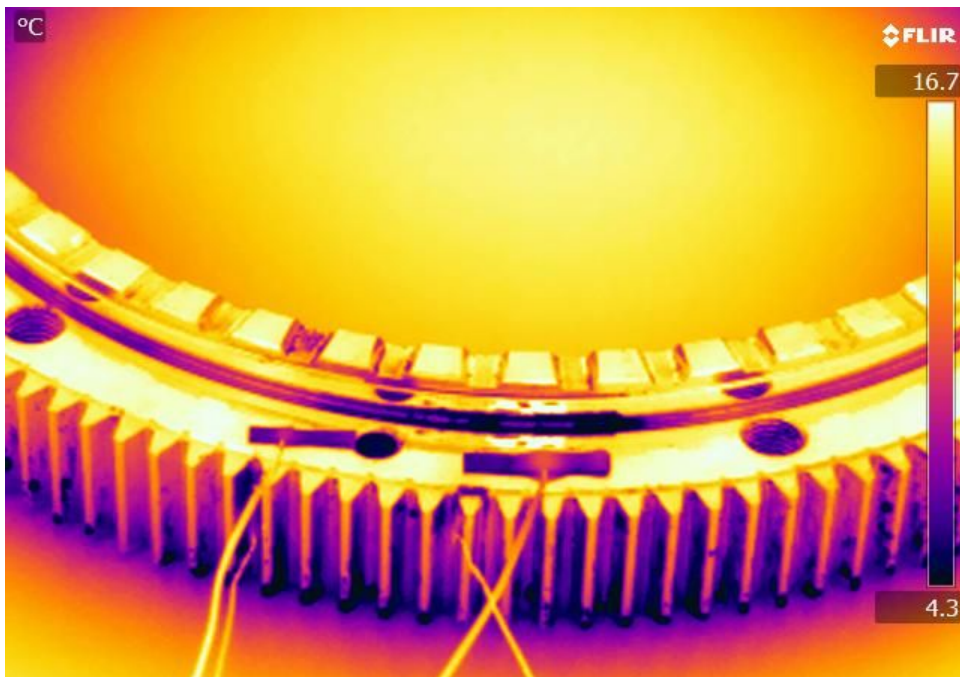


Fig. 6-4 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear

영하냉각 실험과 동일한 방법으로Fig. 6-5와 같이 5곳의 Spot지정하였다. 그 결과

인공결함부인 Spot2와에서 온도가 낮게 나타났으며 결함이 없는 정상 부분인 Spot1. Spot3, Spot4, Spot5에서는 결함이 있는 부위보다 온도가 높은 것을 적외선 열화상 카메라를 통하여 계측 할 수 있었다.

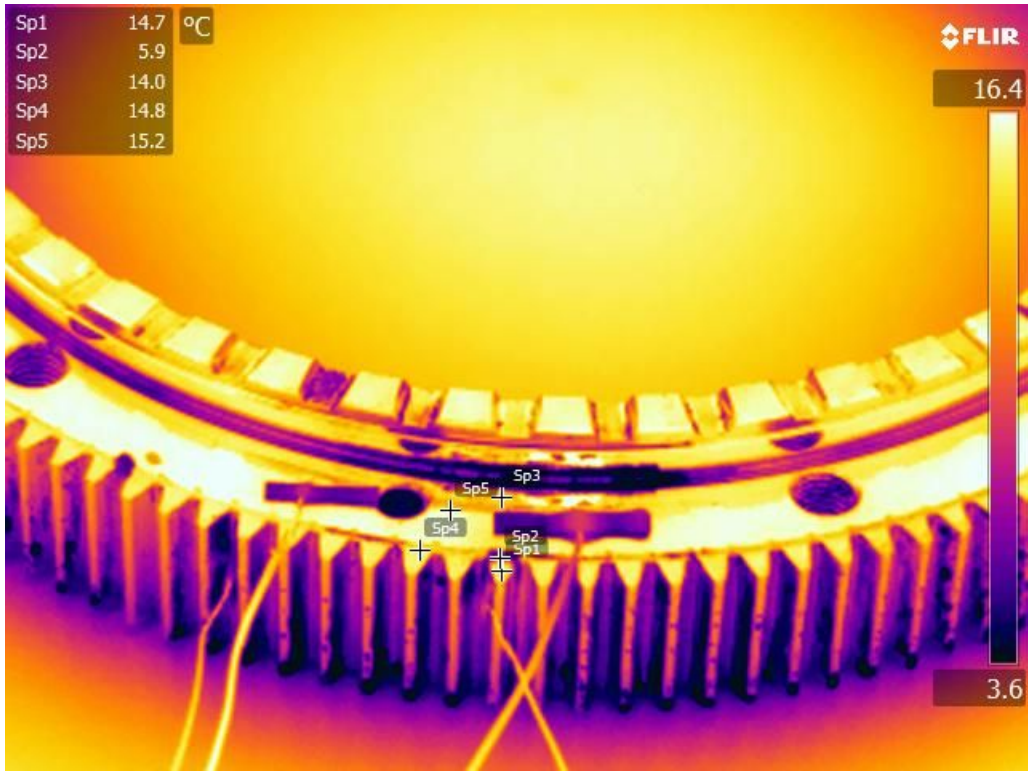


Fig. 6-5 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Spot

상온에서 30분동안 영상을 촬영하여 값을 저장하여 비교하도록 하였다. 그 결과 결함부 치차 끝부분인 Spot1은 14.7℃ 인공 결함부 Spot2는 5.9℃ 결함부 기어몸체 Spot3은 14℃ 정상 시편부 Spot4, 5 는 각각 14.8℃, 15.2℃로 나타났다.<sup>(25)</sup>

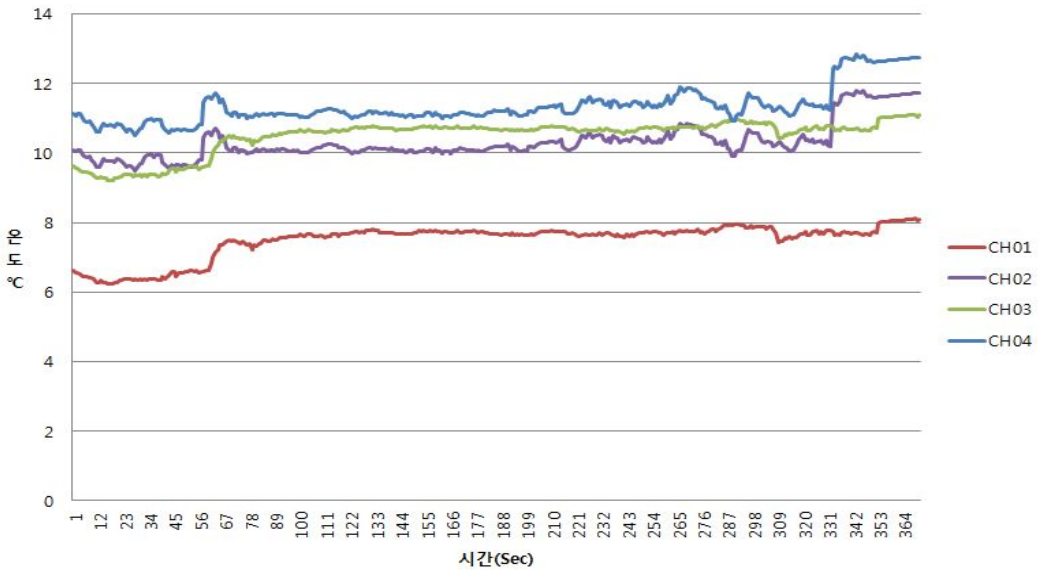
본 연구의 결과는 Fig. 6-6의 그래프와 같으며, 결함 유무에 따른 정확한 온도 데이터 도출을 위하여 하이브리드 대형 커빅 기어에 인공결함 부위와 정상 부분으로 나누어 총 5곳에 Spot을 지정하여 온도를 측정 분석하였다. 또한 서머커플러를 이용하여 정확한 온도를 측정함으로써 온도변화의 결과를 도출하였다. 냉각 후 서모그래피 기법을 적용하여 실험을 진행한 결과 인공결함을 만든 부분인 Spot2에서 최고온도가 5.9℃까지 상승하는 것을 확인 하였고, 인공결함 치차의 끝 Spot1



14.7°C 과 결함부 기어몸체 Spot3같은 경우 최고 온도가 14°C 정상시편부Spot4, Spot5같은 경우 최고 온도가 14.8°C, 15.2°C 까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 정상부분과 결함이 있는 부분과는 약 8°C의 온도차를 확인할 수 있었다. <sup>(25)</sup>



(a) IR camera Temperature graph



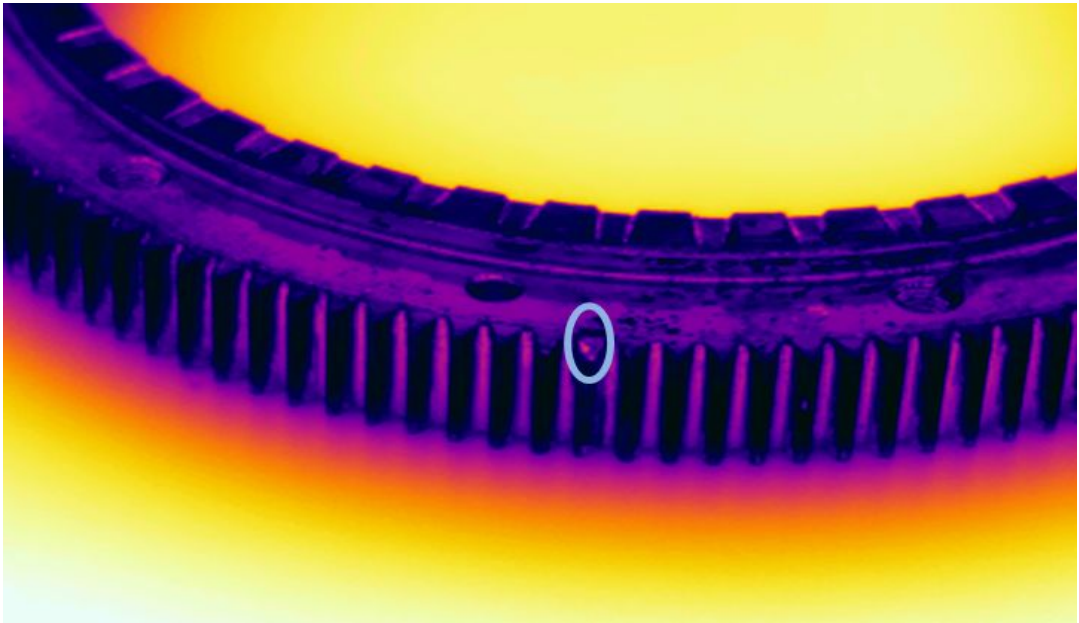
(b) thermocouple Temperature graph

Fig. 6-6 the resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling

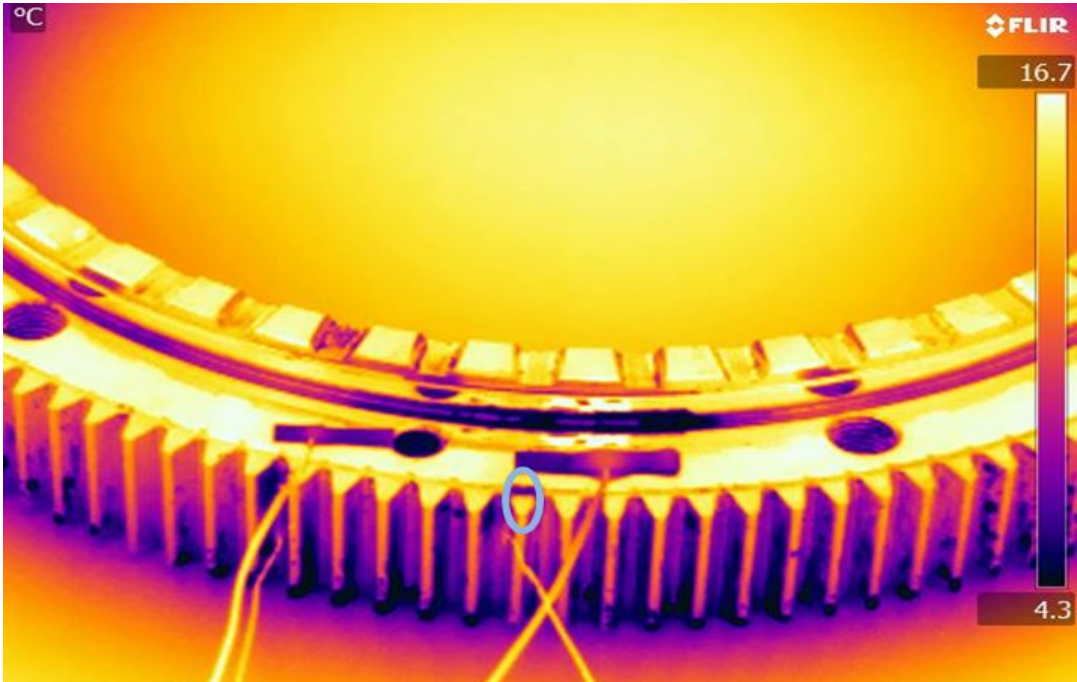
## 제 2 절 열화상 결함 검출 기법에 따른 비교 분석

### 1. 열화상 이미지 데이터 결과 분석

본 연구에서는 냉각 후 서모그래피 기법을 적용하여 실험을 수행하였고 그 열화상 이미지를 비교 분석한 결과이다. 하이브리드 대형 커빅 기어를 냉각 하여 실험을 수행한 결과 결함이 없는 정상부에서는 온도 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있었으며, 결함 부위는 낮은 휘도인 어두운 영역으로 표현이 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6-7 (a)는 영하냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 열화상 이미지를 보여주고 있으며, (b)는 영상냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 열화상 이미지를 보여주고 있다.<sup>(25)</sup>



(a)below zero After cooling, the thermal image of the test hybrid CURVIC gear Image



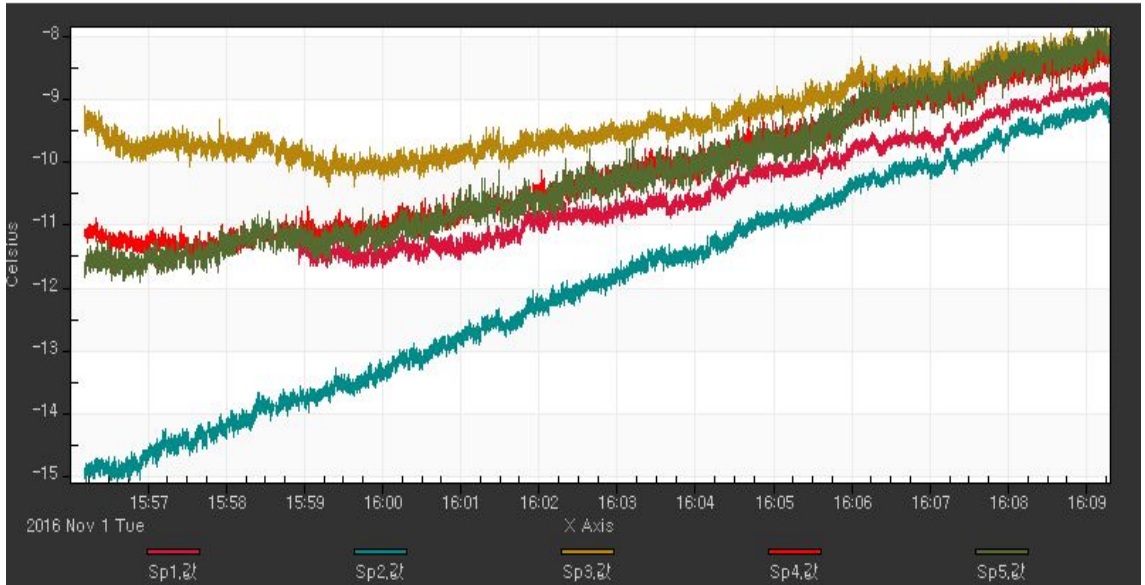
(b) After cooling, the thermal image of the test hybrid CURVIC gear Image  
 Fig. 6-7 image of the after cooling thermography tes comparison

## 2. 온도 데이터 결과 분석

본 논문에서는 하이브리드 대형 커빅 기어에 냉각 후 서모그래피 기법으로 실험을 수행하였으며, 실험결과 온도데이터를 분석하였다. 그 결과 결함부에서 주위보다 온도가 낮게 발생하며, 다른 정상부에서는 결함부보다 온도가 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 결함부에서의 온도가 낮게 발생하기 때문에 Fig. 6-8과 같이 결함부의 정확한 결함 유무판단이 가능하였다. 온도 그래프를 통해 결함부와 정상부의 온도 차이는 평균 약 $2^{\circ}\text{C}$ 에서  $8^{\circ}\text{C}$  차이가 나는 것을 알 수 있었다.

냉각 후 서모그래피 기법을 비교 분석한 결과 결함 유무판단이 가능하였으며, 적외선 열화상 카메라 이미지 및 온도결과 그래프를 종합적으로 비교 분석하였을 때, 영상 온도 냉각 후 서모그래피 기법을 사용하는 것이 하이브리드 대형 커빅 기어의 결함의 유무를 더 명확히 판단할 수 있었으므로 영상 냉각 후 서모그래피

기법을 적용하였을 때 하이브리드 대형 커빅 기어의 건전성 평가에 있어 정확한 진단이 이루어질 것으로 판단된다.



(a) below zero temperature the resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling



(b) the resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling

Fig. 6-8 ultrasonic thermography result graph comparison

## 제 6 장 결 론

산업사회에서 공작기계에 정밀도의 지표가 되는 하이브리드 커빅 기어에 건전성 평가를 위해 FEM 해석 및 적외선 열화상 기법의 적용 및 신뢰성을 검증하고자 시험편을 제작하여 인공결함의 열화상 진단을 하였다. 하이브리드 커빅 기어의 인공 결함부에 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 방법으로 실험수행결과 결함을 검출 하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있었다.

1. 하이브리드 대형 커빅 기어의 제어 성능을 고려하여 회전 시 발생하는 힘에 대한 변위의 최소화 하고 집중되는 응력부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 FEM해석을 통해 판단하였다. 그 결과 약 8mm의 Crack이 검출되었다.
2. FEM 해석 결과에 따라 시험편을 제작하여 냉각 후 서모그래피 기법을 통한 신뢰성 검사에서는 약 2℃ ~ 8℃ 온도차가 발생하였으며, 결함부위의 Hot Spot을 확인 하였다.
3. 냉각후 서모그래피 기법에서 시편을 영하온도 냉각 후에 실험하는 것보다 영상 온도에서 냉각 후에 실험하는 것에 Hot Spot이 뚜렷하게 보였으며 그 영상의 화질 또한 선명하였다. 또한 열온도 그래프도 확연한 차이를 보임으로서 영하온도 냉각보가 영상온도에서 냉각후 서모그래피기법의 실험이 하이브리드 대형 커빅 기어의 신뢰성 평가기법에 적합하였다.

## REFERENCE

1. Dennis P. Townsend, "Dudley's Gear Handbook", MacGraw - Hill, 1992
2. <http://www.kemco.or.kr/>, 비파괴 검사법의 종류 및 개요
3. 최만용, 김원태 “적외선 열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함 진단” 비파괴검사학회지 2004.10, pp. 525~531
4. <http://www.ois.go.kr/>, 산업용 기어 시장 동향
5. <http://www.mocie.go.kr/>, 기어의 설계 및 제조기술 향상 세미나
6. 최만용, 김원태, “적외선 열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함 진단” 비파괴검사학회지 2004.10, 525~531
7. <http://blog.naver.com/fluke6311/> “적외선 열화상 검사 및 적외선 기술의 역사”
8. 김원태 “적외선 열화상의 원리 및 기기 구성” 비파괴검사학회지 2011.04 pp. 181~188.
9. 최만용, 김원태 “비파괴 검사 이론 & 응용 9 적외선 열화상검사”, 한국비파괴검사학회 2012
10. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, 2006, Chapter 6
11. Xavier P.. Maldague, “Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing” , WILEY, 2001

12. Nondestructive Testing Handbook, third edition: vol. 3, American Society for Nondestructive Testing
13. G. Busse "Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal", Appl. Phys. Lett. 35, 759-760, (1979)
14. R. L. Thomas; J. J. Pouch; Y. H. Wong; L. D. Favro; P. K. Kuo; "Rosencwaig Subsurface flaw detection in metals by photoacoustic microscopy", J. Appl. Phys. 51, 1152-1156, (1980)
15. A. Lehto, J. Jaarinen, T. Tiusanen, M. Jokinen, M. Luukkala, "Magnitude and phase in thermal wave imaging", Electr. Lett. 17, 364-365, (1981)
16. A. Rosencwaig, G. Busse, "High resolution photoacoustic thermal wave microscopy", Appl. Phys. Lett. 36, 725-727, (1980)
17. G. Busse, D. Wu, W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography", Appl. Phys. 71, 3962-3965, (1992)
18. D. Wu, "Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung. Universität Stuttgart", Fakultät 13, Dissertation (1996)
19. <http://blog.naver.com/starletzzang/>, 초보기구쟁이의 기구설계공부하기 “기어의 제도법”
20. <http://www.khkgears.co.jp/>, “Gear Article”
21. <http://jeilreducer.co.kr/>, “Gear Failures”
22. <http://blog.naver.com/starletzzang/>, 초보기구쟁이의 기구설계공부하기 “기



어의 작동”

22. <http://blog.naver.com/starletzzang/>, 초보기구쟁이의 기구설계공부하기 “표준 스퍼기어의 소재, 선정”

23. <http://kor.midasuser.com/>, “Von Mises Stress”

24. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, pp. 12-56, 1998

25. 노치성, "하이브리드 기어의 FEM해석 및 적외선 열화상기법을 적용한 건전성 평가", 석사논문, 조선대학교 대학원, 2016