







2016년 8월 석사학위논문

하이브리드 기어의 FEM해석 및 적외선 열화상기법을 적용한 건전성 평가

조선대학교 대학원 기계시스템공학과 노 치 성

Collection @ chosun



하이브리드 기어의 FEM해석 및 적외선 열화상기법을 적용한 건전성 평가

Integrity Evaluation By Infrared Thermography Technique And FEM Analysis Of Hybrid Gear

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

노 치 성





하이브리드 기어의 FEM해석 및 적외선 열화상기법을 적용한 건전성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 04월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

노 치 성





노치성의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	김 경 석 (인)
위 원	조선대학교 교수	<u>박설현 (인)</u>
위 원	조선대학교 교수	<u>김재열 (인)</u>

2016년 05월

조선대학교 대학원





목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
NOMENCLATURE	vi
ABSTRACT ·····	vii

저	1	7	장	서	로 _	••••••	1
	제	1	절	연구	배경		1
	제	2	절	연구	동향		2
	제	3	절	연구	목적		5

제 2 장 적외선 열화상 기술
제 1 절 적외선 열화상 기술의 개요 6
1 . 적외선(Infrared Radiation) 7
2 . 열화상 원리 및 이론 9
제 2 절 적외선 열화상 탐상 기법
1 . 수동적 방법(Passive method)
2 . 능동적 방법(Active method)
3 . 외부 에너지 제어방법에 따른 분류
가. 펄스 적외선 열화상(Pulse Thermography)
나. 펄스 페이즈 적외선 열화상(Pulse Phase Thermography) … 20
다. 위상잠금 적외선 열화상(Lock-in Pulse Thermography) … 21





제 3 장 하이브리드 기어의 최적설계 및 FEM해석 … 23
제 1 절 기어의 분류 및 종류
제 2 절 기어의 손상유형
제 3 절 하이브리드 기어 최적 설계
제 4 절 하이브리드 기어 FEM 해석
1. 전체 변위 해석
2. 폰 미세스 응력(Von-Mises Stress)해석 및 안전율 33
제 4 장 실험
제 1 절 실험장치 구성
제 2 절 시험편 제작 및 실험 방법
세 5 상 연구 결과 및 고잘 40
제 1 절 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 하이브리드
기어에 대한 실험 및 고찰 40
제 2 절 할로겐램프를 열원으로 적용한 하이브리드 기어에
대한 실험 및 고찰 47
제 3 절 열화상 결함 검출 기법에 따른 비교 분석 53
1. 열화상 이미지 결과 분석 53
2. 온도 데이터 결과 분석 54
제 6 장 결론
Reference





LIST OF FIGURES

Fig.	2-1	The electromagnetic spectrum
Fig.	2-2	Atmospheric transmission in different wavelength bands
Fig.	2-3	IR camera with addition of scanning element for imaging
Fig.	2-4	The flux incident $arPhi_i$ is equal to the flux reflected $arPsi'_r$, absorbed $arPsi_a$,
and	t r ansr	nitted Φ_t . 12
Fig.	2-5	Spectral radiance of a blackbody(Planck's law) 13
Fig.	2-6 f	Radiation contributions to the general measurement situation
Fig.	2-7	Passive method (jenoptik ag) 17
Fig.	2-8	Active method (jenoptik ag) 19
Fig.	2-9	Pulse thermography (PT, automationtechnology) 20
Fig.	2-10	Signal processing of lock-in infrared thermography 22
Fig.	2-11	Lock-in thermography (PT, automationtechnology) 22
Fig.	2-12	Torque capacity of gear set, Pitch line velocity graph
Fig.	2-13	Operation of gear26
Fig.	2-14	Standard spur gear
Fig.	2-15	Hybrid Gear Optimal Design
Fig.	2-16	Hybrid Gear Solid Model
Fig.	2-17	Hybrid Gear Solid Model Mesh Modeling
Fig.	2-18	Constraints of gears and static load
Fig.	2-19	Structural analysis full displacement
Fig.	2-20	Von-mises stress theory
Fig.	2-21	Von-mises Stress Distribution
Fig.	3-1	FLIR T640 Image
Fig.	3-2	Normal specimens and specimens of artificial defects
Fig.	3-3	IR camera software
Fig.	3–4	The composition of Halogen lamp experiment equipment
Fig.	3-5	Artificial production of defective specimens using hybrid gear cutting
wire		





FIY.	3–6	Infra	red therma	al in	naging t	ests …	•••••	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	39
Fig.	4-1	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear		40
Fig.	4–2	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.1 …	41
Fig.	4–3	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.2 …	41
Fig.	4–4	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.3 …	42
Fig.	4–5	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.4 …	42
Fig.	4-6	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.5 …	43
Fig.	4–7	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.6 …	43
Fig.	4–8	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.7 …	44
Fig.	4–9	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.8 …	44
Fig.	4-10	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.11 …	45
Fig.	4-11	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.12 …	45
Fig.	4-12	After	cooling,	the	thermal	image	of	the	test	hybrid	gear	Part.13 …	46
Fig.	4-13	The r	esulting	grapl	h of the	e tempe	erat	ure	of th	ne therm	nal te	est hybrid	gear
afte	r coo	lina …											16
unto		, mg											40
Fig.	4-14	Hybrid	d gear tes	st in	nage wit	n the I	nalo	ogen	lamp	part.1			··· 40 ··· 47
Fig. Fig.	4–14 4–15	Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes	st in st in	nage wit nage wit	n the l n the l	nalo nalo	ogen ogen	lamp lamp	part.1 part.2			··· 40 ··· 47 ··· 48
Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes d gear tes	st in st in st in	nage wit nage wit nage wit	n the n the n the	nalo nalo nalo	ogen ogen ogen	lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3			··· 40 ··· 47 ··· 48 ··· 48
Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes	stin stin stin stin	nage wit nage wit nage wit nage wit	n the n the n the n the	nalo nalo nalo	ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3 part.4	······		··· 40 ··· 47 ··· 48 ··· 48 ··· 49
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes	st in st in st in st in st in	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit	n the n the n the n the n the	nalo nalo nalo nalo nalo	ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5	······		··· 40 ··· 47 ··· 48 ··· 48 ··· 48 ··· 49 ··· 49
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes	st in st in st in st in st in st in	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit	n the n the n the n the n the n the	nalo nalo nalo nalo nalo	ogen ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6	······		··· 48 ··· 47 ··· 48 ··· 48 ··· 49 ··· 49 ··· 49 ··· 50
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes d gear tes	st in st in st in st in st in st in	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit	n the n the n the n the n the n the n the	nalo nalo nalo nalo nalo nalo	ogen ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6 part.7	······		 40 47 48 48 49 49 49 50 50
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20 4-21	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes	st in st in st in st in st in st in st in	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit	n the n the n the n the n the n the n the	nalo nalo nalo nalo nalo nalo	ogen ogen ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6 part.7 part.8	······		 48 47 48 48 49 49 49 50 50 51
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20 4-21 4-22	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid	d gear tes d gear tes	st in st in st in st in st in st in npera	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit	n the n the n the n the n the n the n the sult g	nalc nalc nalc nalc nalc nalc nalc	ogen ogen ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp lamp lamp	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6 part.6 part.7 part.8 e haloge	 	mp	 48 47 48 48 49 49 49 50 50 50 51 52
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20 4-21 4-22 4-23	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Simage	d gear tes d gear tes	st in st in st in st in st in st in npera aft	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit ature re er cool	n the n the n the n the n the n the sult g ing th	nalc nalc nalc nalc nalc nalc nalc nalc	ogen ogen ogen ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp lamp lamp th the	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6 part.6 part.7 part.8 e haloge tes and	 en lar	mp ogen lamp	48 47 48 49 49 50 50 51 52 test
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20 4-21 4-22 4-23 ar i sou	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Gimagan	d gear tes d gear tes e of the	st in st in st in st in st in st in npera aft	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit ature re er cool	n the n the n the n the n the n the sult g ing th	nalc nalc nalc nalc nalc nalc nalc raph	ogen ogen ogen ogen ogen ogen ogen ogen	lamp lamp lamp lamp lamp lamp lamp th the	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6 part.7 part.8 e haloge tes and	 en lar halo	mp ogen lamp	 40 47 48 48 49 49 49 50 50 50 51 52 test 54
Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig. Fig.	4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20 4-21 4-22 4-23 ar i son 4-24	Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Hybrid Gimage n	d gear tes d gear tes e of the asonic th	st in st in st in st in st in st in npera aft 	nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit nage wit ature re er cool	n the n the n the n the n the n the sult g ing th 	nalc nalc nalc nalc nalc nalc raph nalc alco	ogen ogen ogen ogen ogen ogen n wit ogra	lamp lamp lamp lamp lamp lamp th the phy	part.1 part.2 part.3 part.4 part.5 part.6 part.7 part.8 e haloge tes and temper	 	mp ogen lamp e result g	 40 47 48 48 49 49 49 50 50 50 51 52 test 54 raph



LIST OF TABLE

Table 2-1	Infrared classification with wavelength7
Table 2-2	Gear types and classification
Table 2-3	The type of gear damage
Table 2-4	The structure and specification of gear
Table 2-5	Materials of gear
Table 2-6	Results of displacement and stress
Table 3-1	FLIR T640 Specifications





NOMENCLATURE

В	: Spectrum parameter
C	: Speed of Sound in a Material of Horn
E	: Modules of Elasricaty
F	: Model parameter
F	: Frequency
I_m	: Thermal value of measured whole radiation
I(T)	: Thermal Value
Р	: 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
α	: Absorptivity
ϵ	: Emissivity
ρ	: Reflectivity
au	: Transmissivity
σ	: Stefan-Boltzman constant
λ	: Wavelength



ABSTRACT

Integrity Evaluation By Infrared Thermography Technique And FEM Analysis Of Hybrid Gear

Chi-Sung Roh Advisor : Prof. Kim jae-yeol, Ph.D. Dept. of Mechanical system engineering, Dept. of Graduate School of Chosun University

Gear from industrial society has long played an important role as one of the major mechanical components with bearings, screws. In addition to ensuring the gear power transmission to the 20th century today as efficiency favorite reduce greatly the gear for the watch hundreds of thousands of kW-class marine turbine reduction gear and deceleration devices for cars and aircraft, differential gear, wind generators, width the type also vary according to the application nor is being widely used.

Rotation to the automatic transmission is often caused major defects etc. bearing, the rotating shaft, of the gear parts, in particular, the defects in the gear used for power transmission occupies a large part. Hybrid gears will occur defects such as inevitably wear, deformation, cracking due to the frequent friction error, operation steps in the processing steps. Defect in the Hybrid gear is often the cause of the load, and generates a continuous relative to the Hybrid gear and by the impact of vibration and noise a factor to accelerate the reliability, reduced durability of the whole system damage.

In the overall analysis of the economic and quality of Hybrid gear by necessity hoping to be manufactured in accordance with need. With the recent rapid





development of the industry there is an increasing demand for ultra-precision complex shape machining of a variety of materials. Predicting the deformation of the structure according to the various states, and a reduced accuracy due to temperature changes, and predict the deformation of the structure, shall prevent accuracy degradation as a function of temperature through the rigidity of the structure. This background, this paper carried out a finite element analysis of the Hybrid gear. First was the 3D modeling using the CATIA program to construct a finite element model, structural analysis was performed by the finite element analysis program midas fx. Hybrid gear can weaken over time, and may be followed by transformation. In accordance with aspects of the structure it was modified to obtain the specimens were prepared to experiment with a method using a thermal imaging camera with a cooled thermography technique and a halogen lamp as a heat source.

With the thermography technique after cooling it was measured to be lower than the defect site other normal parts, the method using a thermal imaging camera to a halogen lamp as a heat source could see that the defective portion that is higher than other parts of the measurement. This structural analysis result that the temperature difference over the experimental part and receive large amounts of the load was found to substantially match a large part.





제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

산업사회에서부터 기어는 베어링, 나사와 함께 대표적인 기계요소의 하나로써 오 랫동안 중요한 역할을 담당하였다. 20세기인 오늘 날에도 기어는 동력전달을 확실 하게 할 뿐만 아니라 효율이 좋아 작게는 시계용 기어에서 크게는 수십만 kW급 선 박용 터빈 감속기어, 자동차와 항공기의 감속 장치, 차동기어장치, 풍력발전기 등 폭 넓게 이용되고 있을뿐더러 그 종류 또한 용도에 따라 다양하다.

자동변속기 회전 부품 중 베어링, 회전축, 기어 등에서 주요한 결함이 종종 발생 하는데, 특히 동력전달에 사용되는 기어의 결함이 많은 부분을 차지하고 있다. 기 어는 가공단계에서 오차, 운전단계에서는 잦은 마찰로 인해 필연적으로 마모, 변 형, 깨짐 등 결함이 발생한다. 기어의 결함은 하중 및 연속적인 상대기어와의 충 돌에 의해 진동 및 소음을 발생시켜 전체시스템의 신뢰성, 내구성 저하를 가속시 키는 요인으로 작용하여 손상의 원인이 되기도 한다.⁽¹⁾

이에 따라 경제적이고 고품질의 기어가 제조 될 수 있기를 바라는 필요성에 의해 기어에 대한 전반적인 해석이 필요하다. 또한 기어 제품들에 대한 안전성 및 향후 수명 연장을 위한 정량적인 적외선 열화상 검사(Infrared Thermography Test) 평 가법이 요구되어지고 있다. 기어 제품의 제조나 사용되어지고 있는 기어의 안전성 판단을 위해서는 재료의 성분을 정확히 파악하고 내부 결함 유무를 판단하는 것이 필요하다. 기어 내에 결함이나 불균질한 물질이 들어있는 경우는 기어의 성능과 수명을 현저하게 저하시킬 수 있기에 그것들의 유무, 형태, 위치 파악이 매우 중 요하다.

기어의 운전단계에서 약간의 손상이 발생하여도 기계에 심각한 손상을 가져올 뿐만 아니라 기계적 결함으로 인해 자칫 대형 사고로 이어질 수 있어 기어에 대한 주기적인 진단 및 건전성 평가는 매우 중요하다. 기어 결함검출 방법에는 여러 가 지가 있다. 초음파 탐상검사의 경우 일반 초음파 검사(Manual Ultrasonic Testing), 위상배열 초음파 검사(Phased Array Ultrasonic Testing : PAUT), 비접 촉 초음파 검사(Noncontact Ultrasonic Testing)가 적용 중에 있으나 초음파 검사 의 검사 범위의 한계로 인하여 기어를 검사하기에는 형태에 따른 결함 미 검출의





문제가 발생되는 단점을 지니고 있다.⁽²⁾

이러한 단점을 보완할 수 있는 기술로 적외선 열화상 검사법이 제안된다. 적외선 열화상 검사법은 원리적으로는 검사 대상인 대상체로부터 방사되는 적외선을 적외 선 측정기기에 의해 에너지를 감지하여 그 신호를 영상으로 매핑(Mapping)한 열화 상에 의해 대상제의 온도분포를 분석하여 물체의 내부 상태를 추정한다. 적외선 열화상 비파괴검사는 수동적 방법(Passive method)과 능동적 방법(Active method) 으로 크게 구분할 수 있다. 수동적 방법은 측정 대상물로부터 자연스럽게 방사되 고 있는 적외선 에너지를 검출하는 일반적인 측정 방법이고, 능동적 방법은 검사 체 고유의 적외선량에 의존하지 않고 제어 가능한 에너지를 공급하고 그 반응으로 검사체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 방법이다.⁽³⁾

제 2 절 연구동향

기어는 베어링과 함께 대부분의 기계 산업체 사용되는 범용 아이템이다. 산업용 기어는 대부분 산업 장비에 가장 중요한 부품으로 세계시장은 일반적으로 자동차 용, 일반 산업용, 항공우주용, 조선용 등 4가지로 분류된다. 그 중 자동차용과 일 반 산업용 기어가 산업 내 비중의 90%를 차지하고 항공우주용과 조선용이 나머지 10%를 차지한다. 자동차와 산업용 기어는 시장 수요의 75%를 몇몇 주요 업체에서 독점적으로 생산 중이다. 2000년대 후반과 2010년대 산업은 외국 업체들과의 무역 이 활발해졌고, 2009년에는 81개국에서의 수입액이 미국 내 생산액의 82%에 이르고 미국 업체의 158개국 수출액이 미국 내 생산액의 40%에 이르게 되었다. 미국 기어 산업은 미국 제조업체의 경쟁력 저하와 외국산 기어 수입 증가. 기술의 발달로 기 어의 용도 축소로 R&D 투자 기피. 지속적인 고용률 감소로 인한 기술력 미 축적 등 으로 점차 쇠퇴하며 성숙기에 접어든 산업이었다. 미국 업체들은 환경오염물질 감 소와 효율적인 에너지 사용에 대한 정부의 요구에 부합하기 위해 신기술을 적용한 제품을 개발하기 시작하였다. 2010년에 조사된 Dun & Bradstreet's 보고서에 의하 면 미국 내 약 273개의 제조업체가 설립됐고 약 9200명의 근로자가 이 산업에 종사 하였다. 2009년 시장 규모가 34억 달러로 제조업체의 82%가 50명 이하를 고용하는 중소규모 업체이다. 50명 이상을 고용하는 18% 업체가 판매량의 67% 이상을 차지하 였고, 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 여건 이 개선될 것으로 희망하며 전 세계적으로 기어 수요가 완만하게 증가할 것으로 전 망하였다. 미국의 산업 기어 주요 수입 국가는 독일, 일본, 중국 순이며 독일과 중 국에서의 수입량이 점차 증가하며 차지하는 비중도 꾸준히 증가해 두 국가가 2011 년 총 수입액의 60%를 차지하나 이탈리아, 스위스에서의 수입량은 감소하였다. 한 국은 400만 달러로 멕시코에 이어 수입국 중 9위로 2010년 대비 3배가량 증가했고 총 수입액의 1.48%를 점유하였다. 독일, 일본 등 기존의 주요 수입국들에서의 수입 량의 증가뿐만 아니라 한국을 비롯해 멕시코, 대만 등에서의 수입 증가 폭이 두드 러져 기존의 수출기업 외 미국 시장 진출을 고려하는 기업에도 잠재거인 가능성이 크게 나타나었다. 미국 산업 기어의 전체 무역수지는 2011년, 1200만 달러로 적자 폭이 커지며 독일, 일본과의 무역수지 적자가 가장 크며 적자의 대부분을 차지하였 다. 한국과의 교역은 수출입이 모두 활발히 이루어지며 한국과의 무역수지는 2011 년, 100만 달러의 흑자를 기록했고 2010년부터 흑자로 돌아섰다.⁽⁴⁾

기어분야 국내 제조업체수는 300여 업체이며 세계시장규모는 자동차용을 제외 하고 약 150억불이며 국내시장은 2,600억 원 규모이나 1억3,000만 불 정도를 수입 에 의존하고 있는 실정으로 국내에서 설계 및 제조능력을 확보할 경우 무역역조의 개선으로 약 1억불의 수입대체효과가 발생함으로 설계 및 제조기술 향상을 위한 대책이 시급하다.⁽⁵⁾

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.⁽⁶⁾

일본 비파괴 검사 협회 규격(NDIS 3005)에 의하면 적외선 카메라와 적외선 열화상 기술의 구분은 물체로부터 방사되는 적외선 강도분포를 영상으로 표시하는 것을 적 외선 카메라로 정의 하고, 이 강도분포를 온도로 환산하여 표시하는 기능이 부과되 어 있는 것을 적외선 열화상 기술이라고 정의 하고 있다. 적외선 열화상 카메라는 1930년대부터 군사용으로 개발되기 시작 하였고, 제2차 세계대전 당시 일본과 독일 에서 적외선 탐지기술을 연구하기 시작한 이래 전승국들 역시 군사용/민용의 적외 선 열화상 카메라의 핵심 기술인 적외선 센서 개발에 박차를 가하였다. 초전형 적







외선 센서와 비 냉각형 적외선 열화상 시스템에 대한 연구와 개발은 영국의 GEC-Marconi 연구소와 Malvern Institute를 중심으로 1960년대부터 본격적으로 시 작되었으며, 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 Inframetrix, 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.⁽⁷⁾

1950년대 초반에 검출재질의 개발과 냉각방식의 도입으로 짧은 시정수를 갖는 소 자가 개발되면서 활성화되었다. 초기의 적외선 열화상 기술은 단일 또는 소수의 적 외선 검출소자를 이용하여 1차원으로 측정영역을 스캐닝하여 열화상을 구성하였으 며, 고성능 검출소자에 의해 0.1℃의 온도분해능을 구현할 수 있었다. 그러나 스캐 닝 방식에 의한 열화상의 구현은 시간소요, 시간에 따른 온도장의 변화, 이동물체 의 온도변화 등의 문제가 있었다. 또한 적외선 검출소자가 질소 냉각방식으로 적외 선 열화상 시스템이 대형이고 재현성이 우수하지 못하였다. 1980년대 후반부터는 적외선 검출소자가 2차원 배열(array) 방식으로 온도를 계측하는 시스템이 개발되 었다. 어레이 센서의 도입은 기존 주사방식에 비하여 열화상 데이터의 동시성이 월 등히 향상되었다. 1990년대에는 어레이 센서의 화소(Pixel) 수도 증가하고 검출소 자로부터 전자신호의 획득기술이 진보하여 동시성이 우수하면서도 정밀한 온도분포 화상을 고속, 고분해능으로 계측하는 것이 가능해졌다. 현재 InSb(Indium Antimonide) 검출소자를 이용하고 있는 적외선 열화상 카메라의 경우 노이즈 등가 온도차 (Noise equivalent temperature difference:NETD)가 0.020 ℃이하이고 영상 획득속도(Frame rate)는 사용하는 카메라의 해상도에 따라 다르게 된다. 최근 상용 제품의 경우 640×512 화소와 420Hz이며 화소 수를 1/4로 감소 할 경우에 프레임 율은 약 4배가 된다. 최근 수년간 적외선 열화상 카메라의 개발은 비냉각 방식으로 급격히 진보하고 있으며 비냉각 방식의 적외선 검출소자 개발은 적외선 열화상 카 메라의 소형화, 경량화 및 저가격화를 가능하게 하고 있어 차후에 검사 분야의 응 용과 관련하여 현장성을 고려한 비파괴검사 분야의 적용 가능성을 제시하고 있 다.(8)

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 한 국의 표준과학연구원에서 수행하고 있어 글로벌 경제 체제에서 표준화 된 기술을 우리가 선도하고 국내·외의 표준화를 선도적으로 이끌어 나갈 수 있는 분위기 조 성이 완료된 상태이며 관련한 포럼의 활성화를 통하여 산업체의 적극적인 참여를 독려하는 상황인 관계로 적외선 열화상 비파괴검사의 산업 적용을 위한 연구개발 추진의 적기로서 판단된다.

물체 표면 온도 분포 계측에 기초한 비파괴평가·모니터링 기술은 적외선열화상의 응용이 성공을 얻은 분야 중 하나이다. 적외선열화상에 의한 비파괴평가기술은 결 함평가를 위한 비파괴검사 기술과 적외선응용측정 기술로 크게 나뉜다. 전자는 결 함의 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 계측함으로 써 재료에 작용되고 있는 응력분포를 가시화 계측하는 것이다. 최근 하이브리드 기술은 산업전반에 걸쳐 새로운 기술혁신의 대표적인 키워드로 급부상하고 있으 며, 적용 대상이나 산업분야에 따라 그 개념이 조금씩 다르나 근본적으로 이종의 두 대상을 결합하여 서로간의 장점을 유지하고 단점을 줄이는 기술이라는 개념은 동일하다.

제 3 절 연구목적

본 연구의 목적은 CATIA 프로그램을 통해 하이브리드 기어의 3D Modeling을 하 고 정확성이 검증된 구조해석 방법인 유한요소법을 midas NFX 프로그램을 통해 수 행하여 하이브리드 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 하이브리드 기어의 변위를 최소화하는 것과 하이브리드 기어의 제어성능을 함께 고려하여 설계하기 위함이고 하이브리드 기어에서 집중되는 응력부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판 단하고, 구조해석 결과 Crack 발생 가능 부분을 바탕으로 하이브리드 기어 시험 시편을 만들어 적외선 열화상 계측기술을 통하여 하이브리드 기어의 건전성을 평 가하고자 한다.



제 2 장 적외선 열화상 기술

제 1절 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 적 외선 영역에서의 에너지와 동일하다. 즉, 절대 온도 0[K] 이상에서 모든 물체는 적외선을 방출한다. 물체에서 방출되는 복사 에너지의 강도는 온도 및 복사되는 전자기파의 파장에 따라서 달라진다. 일반적으로 온도가 높을수록 많은 양의 복사 에너지를 방출하며, 이러한 이유로 적외선을 열선이라고도 부른다.

열화상(Thermography)은 빛이 갖는 다양한 파장대역으로부터 적외선 파장대역 중 에서도 1.3 µm으로부터 12 µm 범위의 적외선을 적외선 검출소자인 센서를 통해 물 체 혹은 대상체로부터 방사되어지는 적외선을 탐지하여 온도 혹은 그 자체를 화상 으로 보여주는 기술이다. 최근 공항이나 항만의 출입국 시 얼굴의 열을 실시간으 로 감지하여 이상 발열정도를 나타내는 기술은 우리가 일상생활에서 가장 흔하게 접할 수 있는 thermography 기술이다. 이를 발전시킨 적외선 열화상 기술은 단순 한 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.





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 에너지 의 파장은 가시광선에 비해 상당히 길어서 0.7µ에서 1000 µm사이의 길이를 가진 다. 모든 물체는 온도의 작용으로서 적외선을 복사(방사)한다. 적외선 열화상 측 정 기법은 대상체에서 방출되는 적외선 열에너지를 검출하고 측정하기 위해 사용 된다. 열 혹은 적외선 에너지는 파장이 너무 길어 육안으로 탐지할 수 없으므로 비 가시광선이며 가시광선과 달리 적외선 환경에서는 절대 영도를 초과한 온도의 모든 사물이 열을 방출한다. 즉, 모든 물체가 적외선을 복사한다는 의미이다. 이 러한 적외선 에너지는 원자와 분자의 진동과 회전으로 발생한다. 물체의 온도가 높을수록 더 많은 움직임이 발생하고 결국 더 많은 에너지를 복사한다. 이 에너지 가 적외선 열화상 카메라에 감지되는 것이다. 적외선 열화상 카메라는 온도를 보 는 것이 아니라 열의 복사, 즉 열에너지를 감지하는 것이다. 절대영도에서 모든 물체는 최저의 에너지 상태를 나타내며, 따라서 적외선 복사도 최소 수준으로 유 지된다.

Table 2-1	Infrared	classification	with	wavelength
-----------	----------	----------------	------	------------

Infrared Ray	NIR (Near Infrared Ray)	SWIR (Short Wavelength Infrared Ray)	MWIR (Mid Wavelength Infrared Ray)	LWIR (Long Wavelength Infrared Ray)
Wavelength	0.7~1.1µm	1.1~2.5µm	2.5~7.0µm	7.0~15.0µm

적외선 복사는 Fig 2-1에서와 같이 전자기 복사의 일종으로 가시광선보다 긴 파장 을 가지고 있음을 알 수 있다. 다른 형태의 전자기 복사로는 X-ray, 자외선, 라디



Collection @ chosun



오파 등이 있다. 전자기 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 전자 기 스펙트럼은 대역(band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다. 적외선 열화상 카메라는 1.3 /m ~ 12 /m 대역을 사용한다. 여기서 단파(SW : Short wave) 영역은 2/m ~ 5 /m의 대역에서 복사가 검출될 수 있는 범위를 말하며, 장파 (LW : Long wave) 영역은 8 /m ~ 12 /m의 대역의 복사가 검출될 수 있다. 그리고 중간에 5/m ~ 8/m의 대역에서는 대기에서의 낮은 투과율에 의해 전달률이 0%를 나 타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.⁽¹⁰⁾



Fig. 2-1 The electromagnetic spectrum



Fig. 2-2 Atmospheric transmission in different wavelength bands

2. 열화상 원리 및 이론

모든 물체는 절대온도 제로 캘빈(0 Kelvin) 이상에서 적외선 복사에너지를 방출한 다. 복사란 전도와 대류가 고체, 액체, 기체 등의 매질을 이용하여 열 이동을 하 는 것과는 달리 매질을 통하지 않고 복사선에 의하여 열을 이동하는 것을 말한다. 적외선 열화상 측정 원리는 Fig. 2-3에서 보이는 것처럼 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장의 적색으로, 낮은 곳 은 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. 2-3 IR camera with addition of scanning element for imaging

적외선 열화상 측정 순서를 살펴보면 다음과 같다.

- Infrared energy는 imager의 광학렌즈를 통과한다.
- Energysms imagerdmll 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 대응 하는 실제 길이를 구하고, 단위 화소에 대응하는 길이를 결함이 차지하는 화소수 에 곱함으로써 결함의 크기를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm) D 는 식 2-1과 같이 표현된다.

$$D = M \times \left(\frac{L}{P}\right) \tag{2-1}$$

여기에서, *L*은 지시자(calibrator)의 길이(mm), *P*는 지시자의 길이에 대응하는 화 소수(pixel), *M*은 결함이 차지하는 화소수(pixel)이다.

물질을 이루고 있는 입자(전자, 이온, 원자, 분자)들은 미세한 진동에 의해 복사 에너지를 방출한다. 이러한 열복사는 기체나 액체 고체사이에서 차이점이 존재한 다. 복사에너지의 운반을 설명하기 위해서는 두 가지 접근 방법 즉, 광자 복사와 전자파를 고려하는 방법이 있다. 광자 에너지 W는 물질내부의 진동 특성으로 인해 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.⁽¹¹⁾

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

여기서 h 는 Plank 상수(6.625 X 10⁻³⁴ *J* · *s*)이고, c 는 빛의 속도(2.998 X 10⁸ ms⁻¹)이다. 상기 식으로부터 광자 에너지는 파장에 반비례한다. 따라서 파장이 짧 은 복사는 많은 광자 에너지를 포함한다. 그러므로 파괴력이 큰 감마선이나 X선과 같은 파장이 짧은 복사를 피하려고 하는 것은 당연하다. 복사열전달은 유한한 온 도의 모든 표면이 전자기파 방식으로 에너지를 방출하여 생기는 열전달 현상으로, 유한한 온도의 물질에 의하여 방사(emission)되는 에너지로 진공에서 열 손실이 없으므로 가장 잘 이루어진다.

전자기파는 주파수 *f* 와 파장 λ에 의하여 표현되며, 하나의 매체 속에서 이들 두 성질은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2-3}$$

파장의 일반적인 단위는 마이크로미터(µm ; 1 µm = 10⁻⁶ m), 나노미터(nm ; 1 nm

- 10 -



= 10⁻⁹ m), 옹스트롬(Å; 1Å = 10⁻¹⁰ m)이다. 1864년 물리학자인 James Clerk Maxwell은 전하를 가속하거나 전류를 바꾸면 전기와 자기장이 생긴다고 가정하였 다. 빨리 움직이는 장을 전자기파 또는 전자기복사(electromagnetic radiation)라 고 부르며 이는 원자나 분자 내에서 전자의 분포가 변화되었을 때 물체가 방사하 는 에너지 이다. 1887년 Heinrich Hertz는 실험을 통해 이러한 파장이 존재함을 입증하였다. 전자기파는 다른 파장처럼 에너지를 전하고 모든 전자파는 빛의 속도 로 전파된다. 파장이나 전파속도와 달리 전자파의 주파수는 출처(source)에만 관 계되며 파가 통과한 매체와는 무관하다. 복사에서는, 1900년 Max Planck가 양자원 리(quantum theory)에서 제안한 것과 같이, 전자기복사를 광자(photon)나 양자 (quantum)라고 하는 불연속적인 에너지 묶음이 전파되는 것이라고 생각하면 도움 이 된다.

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

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \tag{2-4}$$

• ϵ : 방사율(emissivity), 복사 물성치, $0 \le \epsilon \le 1$

• *T_s* : 표면의 절대온도, K

여기서, σ는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수이며 5.67 X 10⁻⁸이고 단위는 W/m²K⁴, T_s는 표면의 절대온도로 단위는 K 또는 R이다.

복사열이 완전히 흡수되는 흑체(black body)의 복사강도를 기술한 플랑크(Planck) 법칙에 의해 물체로부터 방출되는 전체에너지는 스테판-볼츠만 법칙으로부터 흡수 율 1이므로(ɛ=1), 흑체에 대해 식 4-5와 같다.

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

상기 식에서 적외선에너지는 전자기적 스펙트럼의 일부로서 가시광선과 유사하게

- 11 -

Collection @ chosun

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*₀e^{- αx} 이다. 여기서 *x*는 통화한 두께, α는 감약계수 이다. 그러나 *N*_a는 같은 물질이라도 빛의 파장에 따라 다른 색이 생기게 된다. 빛의 굴절률은 일반적으로 파장의 함수로서 무한대의 파장에 대한 굴절률 *n*_∞는 그 물질의 유전율 ϵ의 제곱 근과 같다. 즉, *n*²_∞ = ϵ이다. 물체에 입사한 복사에너지는 빛의 성질에 의해 물체 로부터 3가지 형태로 나타난다. 조사된 복사열(incident flux : *Φ*_i)은 일부 흡수 (absorption)가 될 수도 있고, 일부는 물체에 의해 반사(reflection)되고, 일부는 물체를 투과(transmission)할 수 도 있다. 일반적인 경우 *Φ*_i의 흡수, 반사, 투과 는 파장(λ), 방향(*φ*,*θ*), 온도(T)에 의존한다. 이러한 에너지는 에너지 보존의 법 칙에 따라 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\Phi_i = \Phi'_r + \Phi_a + \Phi_t \tag{2-6}$$



Fig. 2-4 The flux incident Φ_i is equal to the flux reflected Φ'_r , absorbed Φ_a , and transmitted Φ_t .

상기 식 2-6의 물체에 입사한 복사 에너지로부터, 흑체로부터 방사된 에너지는 W_{bb} 이고 이상적인 흑체 방사체라는 것은 실제적으로 존재하지 않으며 실제 방사된 에너지가 W_{abi} 이면, 물체의 방사율 ϵ 는 다음과 같다.



$$\epsilon = \frac{W_{abj}}{W_{bb}}, \quad 0 \in \epsilon \leq 1$$
 (2-7)

식 2-7로부터 적외선 열화상에 적용되는 방사율은 적외선 카메라에 의해 사용되어 지는 적외선 파장간격에서 발생하는 ϵ_{λ} 의 평균값으로 서로 다른 물체의 온도에 따 라 적절한 방사율의 예측이 중요하다.

파장 흑체 방사력은 절대온도 T에서 단위시간당, 단위면적당 그리고 단위 파장 $_{\lambda}$ 에 서 흑체가 방사하는 복사이다. 흑체 방사도 $L_{\lambda,b}$ 는 1901년 Max plank에 의하여 양 자이론과 관련하여 개발되었다.

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



Fig. 2-5 Spectral radiance of a blackbody(Planck's law)

Fig 2-4에서 보면 주어진 온도에서 파장에 따라 방사가 달라짐을 알 수 있다. 식 2-8에서 첫 번째와 두 번째 복사 상수를 써서 나타내면 다음과 같다.

- 13 -





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

여기서, $C_1 = 2\pi h c_0^2 = 3.742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$, $C_2 = h c_0/K = 1.439 \times 10^4 \mu m \times K$ 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 의하 면, 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. 회 색체(graybody)는 모든 파장에 걸쳐 1.0이하의 일정한 방사율을 나타내는 물체를 지칭한다. 실물(realbody)은 파장에 따라 방사율이 달라지는 물체를 지칭한다.

적외선 열화상 카메라는 특정 파장에서 발생하는 적외선 방사 에너지를 감지한 다. 온도값을 얻기 위해 앞에서 설명한 결과치를 흑체를 사용하여 만들어낸 교정 표와 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 열역학적으 로 열역학 제1법칙인 에너지 보존의 법칙에 의해 다음과 같다. 흡수율(α)과 방사 율(ϵ)의 값은 같으며 식 2-10에서 흡수되는 적외선α(흡수율), ϵ(방사율), 투과하 는 적외선 τ(투과율), 반사되는 적외선을 ρ(반사율)라고 하면 물체에 입사되는 적 외선 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \ (\alpha \ge 0, \rho \cdot \tau \le 1)$$
 (2-10)

불투명체로 물체가 적외선을 투과하지 않을 때 $\tau = 0$ 이 되고 방정식이 식 2-11과 같이 간단히 나타낼 수 있게 되며, $\alpha = 1 - \rho$ 에서 반사율을 알면 흡수율도 알 수 있다.

$$\alpha + \rho = 1 \tag{2-11}$$





식 2-11은 매우 중요한 사실을 보여준다. 앞서 말한 것과 같이 간단하게 말하면 높은 방사율은 낮은 반사율을 의미한다. 반대로, 높은 반사율은 낮은 방사율을 의 미한다. 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.

계산식에 의하면 목표물의 방사율이 0.5이하로 내려갈 경우 측정오차는 수용할 수 없을 정도로 높아지게 된다. 다양한 방사율(emissivity)표가 있지만 방사율은 추 측하기가 쉽지 않다. 물체의 형상에 따라서도 방사율이 달라진다.

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.

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

산화된 정도는 물체의 방사율에 중요한 요인이 된다. 산화의 정도가 높을수록 방 사율이 높아진다. 불투명한 물체의 경우, 방사율 및 주변(반사된)온도를 알고 있 는 경우라면 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도 측정값이 수 % 이내로 정밀한 값을 얻을 수 있다. 올바른 온도를 측정하기 위해서는 적외선 열화상 카메라는 물 체로부터 방사되는 에너지로 인한 부분만을 추출해 낼 수 있어야 한다. 최근의 적 외선 열화상 카메라는 이러한 기능을 가지고 있다. 반사에 의한 오차부분을 제거 한 후 물체의 방사율에 따라 그 값을 변경 처리한다.

적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사 되어진 적외선 파 장을 검출하여 Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적 외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저 를 화상으로 보여주는 것이다.







Fig. 2-6 Radiation contributions to the general measurement situation 대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너 지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너 지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되 어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑 체 방사율의 함수와 같으며, 열 측정 공식은 식 2-12에서와 같이 표현된다. 여기 에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1 - \epsilon) \times I(T_{amb}) + (1 - \tau) \times I(T_{atm})$$
(2-12)



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 외 부 가열이나 냉각 등에 의해 열 유동이 생산되어 진다. 이러한 열 유동에 의해 일 시적 또는 지속적인 자극에 의해 표면의 온도 패턴을 분석함으로써 내부 결함까지 측정할 수 있다.⁽¹²⁾

1. 수동적 방법(Passive method)

수동 기법은 가열이나 냉각이 적용되지 않고, 측정 대상물로부터 자연스럽게 방사 되고 있는 적외선 에너지를 검출하는 일반적인 측정방법이다. 수동적 열화상 기법 은 일반적으로 온도 패턴을 기초로 산업 공정 및 제도 단계에서의 평가 및 모니터 에 적용된다.



Fig. 2-7 Passive method (jenoptik ag)







수동적인 방법으로의 결함탐지는 검사에 앞서 온도가 환경에 따라 일정하다. 따라 서 시험 대상체는 결함 부위에서 기록할만한 온도를 제공하기 위해 가열되거나 냉 각되어져야 한다. 이 방법은 제어할 수 없는 에너지(태양)와 상호작용으로 대상체 가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법으로 적외선을 방출하는 모 든 물체에 해당하는 사항으로 그 물체가 방출하는 고유의 적외선량을 감지하여 화 상으로 나타낸다. 또한, 수동적 방법은 물체 고유의 상태를 파악하는데 사용되는 가장 기본적인 방법으로 측정 대상체의 정량적인 미시적 정밀도를 요구하는 분야 보다는 거시적인 측정법에 속한다.

2. 능동적 방법(Active method)

능동적 검사기법(Active method)은 Fig 2-8과 같이 수동적 검사기법과 달리 검사체 고유의 적외선량에 의존하지 않고 제어 가능한 에너지를 입사하고 그 반응으로 검 사체가 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 검사기 법으로는 대표적으로 광적외선, 진동, 마이크로웨이브, 초음파, 와전류 등 에너지 의 입사 종류에 따른 분류와 제어 방법에 따른 분류로 나뉠 수 있는데 이러한 검사 기법을 통하여 검사체로부터 얻을 수 있는 결과 값이 더욱 정밀해 지는 효과가 있 다. 또한, 전류를 흘리는 방법이나 전류의 ON/OFF를 궁리하여 고장 위치를 알기 쉽 게 하는 방법도 이루어지고 있다. 액티브(능동)방식은 일반적으로 측정 대상물에 는 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 방법이 다.







Fig. 2-8 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.

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 때 문에 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 펄 스 적외선 열화상은 대체로 검출 민감도가 떨어지지만 열확산 속도가 빠른 금속재 질의 검사 시에 실시간으로 결함 검사 유무를 확인 할 수 있어 검사체의 유지보수 에 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 의 한 시험의 신속성 때문이다.



Fig. 2-9 Pulse thermography (PT, automationtechnology)

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

펄스 페이즈 적외선 열화상과 펄스 적외선 열화상과의 차이점은 펄스 적외선 열화 상보다 검사체에 더 오랜 시간 에너지를 입사하고 푸리에(Fourier) 변환을 통하여 데이터를 분석한다.

$$\begin{aligned} Fourier_s &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{1} T_n e^{2\pi j (n-1)(f-1)/n} = R(f) + jI(f), \\ M(f) &= \sqrt{R(f)^2 + I(f)^2}, \end{aligned} \tag{2-13} \\ \Phi(f) &= Arc Tam \Big[\frac{I(f)}{R(f)} \Big], \end{aligned}$$

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 하 다. 하지만 모든 주파수에서 에너지가 방출되고 실시간 검출이 불가능해 푸리에 변 환을 통한 데이터 분석 시 PT방법에 비하여 시간이 오래 걸리며, 적외선 입사 램프 가 제한적이다. 하지만 신호/노이즈(S/N) 비가 PT에 비하여 뛰어나 R&D분야에서 이 러한 방법을 사용하고 있다.

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 추출함으로서 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지 할 수 있 으며, 불균일한 표면 방사율의 영향을 적게 받게 된다. 관련된 변수는 열 발산 길 이 μ 로서 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

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

여기서 α는 열확산계수를 나타내고, ω는 변조된 각진동수이다. 신호진폭은 깊이 의 경계에 의하여 영향을 받는다. 이는 μ 보다는 작고, 신호 위상은 이러한 깊이 의 약 2배 정도까지는 응답한다.⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾ 이러한 배경에 대하여, LIT는 변조된 응답 의 시간 의존성에 대하여 픽셀 대 픽셀을 분석하고 이러한 변조에 대한 진폭과 위 상을 영상으로 표시한다. 위상영상의 장점은 더 큰 깊이 범위 외에도 광학적인 표 면 개체⁽¹⁶⁾, 표면 형상 그리고 적외선 방출 계수⁽¹⁷⁾의 다양성에 민감하지 않다는 것 이다. 그 이유는 위상 영상은 4개의 원 열상 (raw thermogram) 1 변조 사이클 동안 의 시간에 있어서 같은 거리인 S1부터 S4 에 의하여 계산되어질 수 있다.⁽¹⁸⁾

$$\varphi = \arctan \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2}$$
 (2-15)









Fig. 2-10 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 균일한 가열과 온도로부터 독립된 상태로 위상 측정이 가능하여 초음파, 마이 크로웨이브, 광학적 가열에 모두 사용할 수 있는 기술로 증폭을 통하여 깊은 침투 깊이를 얻을 수 있어 품질관리, 균열탐지, R&D와 정비에 사용하는 제어 기법이다.



Fig. 2-11 Lock-in thermography (PT, automationtechnology)




제 3 장 하이브리드 기어의 최적설계 및 FEM해석

기어(gear)는 한 축으로부터 다른 축으로 동력을 전달하는데 사용되는 대표적인 전동용 기계요소이다. 한 쌍의 원통과 원뿔에 이를 만들어 서로 맞물려 운동을 전 달하는 기계 요소로 동력을 주고받는 두 축사이의 거리가 가까운 경우에 사용되 며, 동력전달이 확실하고 속도비를 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있어 동력 전 달 장치에서 필수적인 부품으로서, 일반산업용, 자동차, 항공기, 선박, 철도, 농 업용, 건설기계, 공작기계, 터보기계 등 에 필수적으로 사용될 뿐만 아니라, 최근 에는 로봇등 자동화 기기에도 다수 사용되고 있으며 전동 장치, 변속 장치 등에 널리 이용된다. 맞물려 회전하는 한 쌍의 기어에서 이 수가 많은 쪽을 기어, 이수 가 적은 쪽을 피니언(pinion)이라 한다.⁽¹⁹⁾

제 1 절 기어의 분류 및 종류

기어의 종류는 원통기어(스퍼, 헬리컬 기어), 베벨기어, 하이포이드 기어, 웜 기어 등으로 매우 다양하며, 평행축, 교차축, 엇갈린축 등에 동력을 전달하는 요 소 부품으로, 평면상에서나 공간상에서 어떤 형태로든지 구동기와 피동기와의 사 이에 동력을 적절히 바꾸어 전달하는 요소이다. 많은 종류의 기어를 분류하는 방 법으로는, 기어축의 관계위치에 의한 것이 가장 일반적이며 평행 축, 교차 축, 어긋난 축의 3 가지로 분류된다.

Table 2-2 에는 대표적인 기어를 분류하여 나타낸 것이다 .

이 표에 나타낸 효율은 기어의 전동효율로 베어링 손실이나 윤활유와 관련된 손실 등은 제외했다. 평행축 및 교차축의 기어쌍의 물림은 대부분이 회전이고 상대적 으로 미끄럼은 적으므로 고효율이다.⁽²⁰⁾





Table	2-2	Gear	types	and	С	lassi	fi	catio	on
-------	-----	------	-------	-----	---	-------	----	-------	----

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

제 2 절 기어의 손상유형

기어 손상은 기어이의 피팅(pitting), 파손(breakage), 장시간의 마모(long-ran gewear), 소성변형(plastic deformation), 스코링(scoring) 그리고 비정상적인 파 괴적인 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 2-3과 같이 다섯가지 일반적인 분류로 구분하였다.



	Wear			
Dongo of	Plastic flow			
gear damage	Surface fatigue			
	Breakeage			
	Associated gear failure)			







각각은 정의에 의하여 다시 몇 가지 형태로 나눈다.



Fig. 2-12 Torque capacity of gear set, Pitch line velocity graph

Fig. 2-12는 피치선속도와 기어 쌍의 토크 용량과의 일반적인 상관관계이다. 각 영역은 가장 일어나기 쉬운 기어손상의 종류와 범위를 표시한다. 영역 1,2,3 은 마모(wear) 현상과 관련된 손상영역이다. 영역 1에는 유막을(oil film)을 형성할 수 있을 정도로 기어쌍이 빠르지 않다. 영역 2 에서는 유막을 형성할 정도로 충분 히 빠르며 윤활제에 이물질이 섞이지 않고 부식방지성이 있으면 무한한 기간 동안 작동된다. 영역 3 에서는 속도와 하중이 오일유막을 파괴 시킬정도로 충분히 크다 면 급격한 마모(wear)와 스코링(scoring)이 일어난다. 이상적으로는 기어가 2의 영역안에서 작동되도록 설계하여야 한다.⁽²¹⁾







(a) Start of contact (b) End of contact Fig. 2-13 Operation of gear

Fig. 2-13 (a)에서 두 기어는 막 맞물렸다. 구동기어의 1지점에서는 물체는 피 치점을 향해 회전하는 동작에 의해 압축이 일어나고 피치점에서 멀어지는 방향으 로 미끄러지는 마찰 저항에 의해 응력을 받게된다. 이러한 힘의 조합으로 인해 표 면 균열과 표면 피로가 발생하고 열이 발생하며 이 모든 요소들이 상당한 마모를 야기 시킨다. 피동기어의 2지점에서는 회전과 미끄러짐이 모두 피치 포인트 쪽으 로 일어나 이로 인해 2지점은 압축되고 3지점은 인장이 일어난다. 그러나 구동기 어에서 만큼은 가혹하지 않다. (b)에서는 두 기어의 접촉이 끝나는 것을 볼 수 있 다. 회전 운동은 계속 같은 방향으로 일어나지만 미끄러짐 운동은 방향이 바뀌었 다. 4지점에서 회전에 의한 압축과 미끄러짐에 의한 인장이 함께 발생하므로 피동 기어의 바닥 부분에 가장 큰 하중이 가해진다. 5지점에는 압축 응력이 가해지고 6 지점에는 인장 응력이 가해지므로 기어 치형 끝부분은 응력을 덜 받게 된다. 피치점에서는 미끄러지는 힘이 방향을 바꾸어 미끄러짐이 없이 피치점에서는 미끄 러지는 힘이 방향을 바꾸어 미끄러짐이 없이 회전 운동만 발생하는 지점이 생긴 다. 기어의 이 부분에는 표면 손상이 가장 적게 나타나지만 피치점에는 심각한 손 상이 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 기





어의 피치선 또는 피치선보다 약간 위쪽 부분이다. 일반적으로 이 지점에서는 한 쌍의 기어 치형이 모든 하중 또는 대부분의 하중을 전달하게 되며, 이로 인해 피 로손상, 열 축적 및 표면 손상이 발생할 수 있다.⁽²²⁾

제 3 절 하이브리드 기어 최적 설계



Fig. 2-14 Standard spur gear

Fig. 2-14는 대표적인 스퍼기어를 나타내고 있으며, 최적 설계 하려는 하이브리드 기어의 종류는 스퍼기어이다. 하이브리드 기어의 치형 곡선은 사이클로이드 곡선, 원호 곡선 등 여러 가지가 있으나 인볼류트 곡선을 채택하였다. 기어의 접촉에 의 하여 굽힘 강도를 최적화시킬 경우, 기어 모듈의 8~11배 정도면 된다. 기어의 치 폭이 너무 클 경우에는 기어의 치접합이 균등하게 물리도록 신경을 써야하며, 치 폭이 너무 작아도 면압강도 부족 등을 초래할 수 있다.⁽²³⁾

일반적인 감속기 등에서는 감속비와 중심거리(조립거리) 관계에서 대부분 전위 기 어로 설계하지만 표준 기어를 채택할 경우에는 호환성과 편의성을 위하여 전위를 주지 않는다. 기어의 압력각은 20°를 표준으로 하였고 소재는 SM45C 기계 탄소강





을 기본으로 채택하였다. 기어의 소재는 Table 2-4 와 같다.

Table 2-4 Materials of gear

Creative people	Sign	Applying heat treatment	Hardness HrC	Usage	
Carbon steel	SM45C	Standard gear materials			
Carbon stool	SMAEC	High	5055	Large gear	
	311430	frequency	50~55	side	
CrMo steel	SCM415	Carburizing	55~60	Pinion side	
	SCM440	High	50-55	Large gear	
	30M440	frequency	50~55	side	
NiCrMo steel	SNCM/15	Carburizing	60~65	Pinion side	
		or nitriding			

Fig. 2-15은 하이브리드 기어의 해석을 위한 하이브리드 기어의 최적설계 과정을 나타내었다. 부품의 재질은 SM45C로 이루어져 있으며 지름은 116mm, 두께는 11mm, 기어의 압력각은 20°, 잇수는 58개 이다.



Fig. 2-15 Hybrid Gear Optimal Design





Fig. 2-16은 CATIA를 이용하여 최적설계 완료된 하이브리드 기어의 Solid Model을 나타낸 것 이다.



Fig. 2-16 Hybrid Gear Solid Model

제 4 절 하이브리드 기어 FEM 해석

1. 전체 변위 해석

하이브리드 기어에 급격한 부하나 충격이 가해졌을 때 기어박스 내에서 하이브리 드 기어나 축, 베어링이 파손되면 기어박스 내의 대부분 부품이 파손되는 심각한 상황이 초래되며 안전사고까지 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 일정한 힘보다 큰 하중을 주었을 때의 해석이 필요하다.

본 연구에서는 산업현장에 널리 적용되어지고 있는 CATIA 프로그램을 이용하여 3D Modeling을 수행하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 midas NFX를 활용하여 해석을 수행하였다. 정확한 Mesh작업을 위해서 구조를 Fig. 2-17과 같이 Mesh 모 델링을 진행하였다.









Fig. 2-17 Hybrid Gear Solid Model Mesh Modeling

탄성힌지의 정확한 유한요소해석을 위하여 3D Auto mesh를 활용하였다. Fig. 2-18과 같이 하이브리드 기어의 축과 끼워 맞춤되는 안쪽 면에 고정 구속조건을 주었고 하중은 피니언 기어와 접촉하는 부분에 사용 하중을 부여하여 하이브리드 기어의 이중에 선접촉하는 구간을 파악하여 하이브리드 기어의 중심 축 을 기준으 로 하여 전체원통좌표계를 잡았고 원통좌표계를 기준으로 T방향으로 1000N의 집 중하중을 적용하여 해석을 실행하였다.

Table 2-5는 하이브리드 기어의 재질에 대한 물성치를 나타내고 있으며, Fig. 2-18는 midas NFX를 이용하여 구속조건 및 정적하중을 도시한 그림이다.

Material	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Poisson's ratio	Yield strength (N/mm^2)	Tensile Stress (N/mm^2)
HYBRID				
GEAR	205,128	0.29	490	686
(SM45C)				

Table 2-5	The	structure	and	specif	icatio	n of	gear
-----------	-----	-----------	-----	--------	--------	------	------







Fig. 2-18 Constraints Of Hybrid Gears And Static Load





본 연구에서 유한요소해석 적용목적은 하이브리드 기어의 회전 시 발생하는 힘 에 대한 변위를 최소화하는 것과 하이브리드 기어의 제어성능을 함께 고려하여 설 계하기 위함이고 하이브리드 기어에서 집중되는 응력부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고자 함이다. 따라서 하이브리드 기어의 변형과 응력분포에 대한 유한요소해석 결과는 Fig 2-19와 같다. Fig. 2-19는 회전 하중이 발생 할 때 에 최대 힘에 대한 하이브리드 기어의 전체적인 변형과 응력 집중 현상을 나타내 고 있으며, 최대 변위량은 1.16969 × 10⁻²mm 이다



Fig. 2-19 Structural analysis full displacement

4.87370e-003 4.87370e-003 22.0% +3.89896e-003 10.3% +2.92422e-003 10.3% +1.94948e-003 15.3% +9.74740e-004 11.3% +0.00000e+000

- 32 -





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 이름 을 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 본 미세스 항복조건에 사용되는 응 력으로 하중을 받고 있는 물체 각 지점에서의 비틀림 에너지(maximum distortion energy)를 나타내는 값이다. 수학적으로는 세 개의 주응력(principal stress) 혹 은 6개의 독립된 응력성분들로 정의된다. 예를 들어, 임의의 유한요소 해석 프로 그램으로 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.⁽²³⁾

Fig. 2-20은 폰 미세스 응력의 기본으론을 나타내고 있다.



Fig. 2-20 Von-mises stress theory

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$
(2-16)

하지만 이러한 응력 성분들만으로는 물체가 외부 하중에 의해 파괴를 일으킬 것 인지 아니면 안전한지를 판단할 수 없다. 왜냐하면 물체의 파괴는 각각의 응력 성 분들의 최대 값 만으로 유발되는 것이 아니라 응력 성분들의 조합에 의하여 야기 되기 때문이다. 폰 미제스 응력은 물체 각 지점에서 응력 성분들에 의한 비틀림





에너지의 크기를 나타내는 값으로서, 가장 정확하게 물체의 파괴를 예측하는 기준 으로 알려져 있다. 가공하중에 대한 하이브리드 기어에 발생되는 Von-Mises 응력 분포를 Fig. 2-21에 나타내었다.



Fig. 2-21 Von-mises stress distribution

Fig. 2-21을 검토해본 결과 응력집중 현상이 발생되었으며, 최대 Von-mises 응 력은 94.0584 N/mm² 으로 나타나 안전율은 7.293 정도 이며 다음 Table 2-6은 최 대 등가응력에 대한 결과 치이다.





Table 2-6 Results of displacement and stress

Material	Maximum Displacement	Maximum Von-mises stress	safety factor
HYBRID GEAR	$1.16969 imes 10^{-2} mm$	$94.0584N/mm^2$	7.293

구조해석 결과 본 연구에서의 유한요소해석 적용목적은 하이브리드 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 변위를 최소화하는 것과 하이브리드 기어의 제어성능을 함 께 고려하여 설계하기 위함이고 하이브리드 기어에서 집중되는 응력부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고자 함이였다. 회전 하중이 발생 할 때에 최대 힘에 대한 하이브리드 기어의 전체적인 변형 및 하이브리드 기어가 접촉하는 부분에 약 1mm의 Crack이 검출 되었으며, 고정구속과 하중을 준 부분에 응력집중 현상이 발생 되었다. 이 때의 최대 변위량은 1.16969 × 10⁻²mm,최대 Von-mises 응력은 94.0584 N/mm² 으로 나타나고 안전율은 7.293 정도 이며 다음 Table 2-6는 최대 등가응력에 대한 결과 치이다.

구조해석 결과를 바탕으로 적외선 열화상 실험을 통하여 Crack 부분과 하이브리드 기어에 대하여 건정성 평가를 하고자 한다.





제 4 장 실 험

제 1 절 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 적외선 열화상 카메라 FLIR T640은 포터블 형태로 이동성 이 좋다. 고 해상도, 대형 터치스크린, 높은 온도 분해능, 회전식 렌즈, 뷰 파인 더, Wi-Fi 및 블루투스(Bluetooth), USB등 연결 지원이 가능하다. 최고(640×480) 픽셀의 IR해상도를 가지고 있으며, 측정 온도 범위는 -40℃ ~ 2,000℃, 민감도는 30℃에서 0.035℃이다. 1~8× 연속 디지털 줌, 연속 자동 초점 및 수동 초점, 5메 가 픽셀의 실 화상 카메라를 내장하여 열화상/실 화상 이미지를 동시 저장이 가능 하여 실 화상 내 열화상 삽입(PIP) 및 합성이 가능하다. 또한 USB를 PC에 연결하 여 촬영 영상의 녹화 및 스트리밍 가능하다. 기본적으로 Li-Ion 배터리 2개를 이 용하여 외부 전원의 연결 없이 일정 시간 사용이 가능하며, 블루투스(Bluetooth) 를 이용해 타 측정 장치와 연계가 가능해 측정의 정확도와 신뢰성을 향상시킬 수 있다.⁽²⁴⁾ Fig. 3-1은 적외선 열화상 카메라 FLIR T640의 이미지를 보여주고 있으 며, Table 3-1은 FLIR T640의 성능을 표로 나타내었다.



Fig. 3-1 FLIR T640 Image

- 36 -





Table	3-1	FLIR	T640	Specif	ications
-------	-----	------	------	--------	----------

Common Features		
IR resolution	640×480pixel	
Temperature range	-40°C ~ 150°C, 100°C ~ 650°C, 300°C ~ 2,000°C	
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 \times W \times H)	143×195×95mm	
Weight	1.3kg	

Fig. 3-2는 실험하려는 두 개의 하이브리드 기어 시편이다. 열화상 이미지와 온 도 변화를 서로 비교하기 위하여 정상 시편과 결함 시편을 제작하여 준비하였다.



Fig. 3-2 Normal specimens and specimens of artificial defects







Fig. 3-3 IR camera software

Fig. 3-3은 실험에 사용되어지는 IR camera Flir 소프트웨어이다. 이 프로그램을 통하여 촬영 후 이미지 분석 및 온도 분석을 할 수 있다. Fig. 3-4는 열화상카메 라를 이용한 전체적인 실험 구성이다. 실험의 정확도를 위해 주변의 빛을 차단하 였으며, 할로겐램프를 이용하여 기어를 달군 후 IR camera를 이용하여 실험을 하 였다.



Fig. 3-4 The composition of Halogen lamp experiment equipment





제 2 절 시험편 제작 및 실험 방법

시험편은 하이브리드 기어의 구조해석결과와 비슷한 조건을 주기 위하여 Fig. 3-5와 같이 두 개의 하이브리드 기어중 하나의 하이브리드 기어에 와이어 컷팅기 를 이용하여 인공 결함을 주었다. 컷팅을 한 후 다시 접합을 시켰다. 두 개의 하 이브리드 기어를 각각 냉각 후 상온에서의 온도변화를 비교하기 위하여 두 개의 하이브리드 기어를 고정시켜놓고 열화상카메라로 실험을 하였고, Fig. 3-6 과 같 이 열원으로 할로겐램프를 비추어서 인공결함을 만든 하이브리드 기어에 대해서도 실험을 하였다.



Fig. 3-5 Artificial production of defective specimens using hybrid gear cutting wire



Fig. 3-6 Infrared thermal imaging tests





제 5 장 연구 결과 및 고찰

제 1 절 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 하이브리드 기어에 대한 실험 및 고찰

본 연구에서는 Horizontal방법으로 실험을 수행 및 분석 하였다. 기어의 접촉부 분에 임의의 결함을 주었으며, 냉각 후 상온에서의 두 개의 기어의 온도변화를 열 화상카메라를 이용하여 촬영을 하였다. 그 결과 Fig. 4-1과 같이 인공결함을 주었 던 부분이 정상시편과 비교하였을 때 뚜렷하게 차이가 있는 것이 보여졌다.



Fig. 4-1 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear

본 연구에서는 하이브리드 기어의 접촉 부분 결함에 대한 정확한 온도 데이터를 도출하기 위해 결함이 있는 부분과 결함이 없는 부분으로 나누어 4곳에 Spot을 지 정하였다. 그 결과 결함 부분인 Spot1에서는 주위보다 온도 낮게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 결함이 없는 정상 부분인 Spot2, Spot3, Spot4에서는 결함이 있 는 부위보다 온도가 높은 것을 적외선 열화상 카메라를 통하여 계측 할 수 있었 다.







Fig. 4-2 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.1

온도변화를 알아보기 위하여 30초에 한번 씩 데이터 값을 저장하여 비교하도록 하였다. 그 결과 결함부분 Spot1은 16.4℃에서 최대 19.6℃까지 온도가 상승하였 고, 나머지 Spot2, 3, 4는 각각 19.2℃, 19.5℃, 19℃에서 23.5℃, 24.8℃, 22. 8℃로 변화하였다. Fig. 4-2부터 Fig. 4-12까지는 30초에 한번씩 데이터 값을 저 장하여 비교한 이미지이다.



Fig. 4-3 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.2





Fig. 4-4 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.3



Fig. 4-5 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.4





Fig. 4-6 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.5



Fig. 4-7 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.6





Fig. 4-8 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.7



Fig. 4-9 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.8





Fig. 4-10 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.11



Fig. 4-11 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.12





Fig. 4-12 After cooling, the thermal image of the test hybrid gear Part.13



Fig. 4-13 The resulting graph of the temperature of the thermal test hybrid gear after cooling

본 연구의 결과는 Fig. 4-13 의 그래프와 같으며, 결함에 대한 정확한 온도 데이 터를 도출할 수 있도록 하이브리드 기어에 인공결함을 만든 부분과 정상 부분으로 나누어 총 4곳에 Spot을 지정하여 온도를 측정 분석하였다. 냉각 후 서모그래피 기법을 적용하여 실험을 진행한 결과 인공적인 결함을 만든 부분인 Spot1에서 최





고온도가 19.6℃까지 상승하는 것을 확인 하였고, 정상 부분 Spot1과 Spot2, Spot3같은 경우 최고 온도가 23.5℃, 24.8℃, 22.8℃ 까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 정상부분과 결함이 있는 부분과는 약 4℃의 온도차를 확인할 수 있었 다.

제 2 절 할로겐램프를 열원으로 적용한 하이브리드 기어에 대한 실험 및 고찰

본 연구에서는 할로겐램프를 열원으로 적용하여 실험을 수행 및 분석 하였다. 임의의 결함을 만든 하이브리드 기어에 1,000W 출력의 할로겐램프의 빛을 조사시 킴으로서 열을 전달하는 방법으로 비파괴 검사를 수행하였다. 탐상부위에 할로겐 램프의 빛이 잘 조사될 수 있도록 시험편과 할로겐램프의 사이의 거리는 1M, 조사 각도는 할로겐램프를 결함부를 향하도록 임의로 조정하여 설정하였으며 약 1분 동 안 할로겐램프를 시험편에 조사하였다. 그 결과 결함이 있는 Spot1에서 Hot spot 이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 결함이 없는 정상 부분인 Spot2과 Spot3, Spot4 에서는 결함부위 Spot1 보다는 낮은 온도지만 할로겐램프를 사용하는 동안 온도가 상승하는 것을 열화상카메라를 통해 알 수 있었다. Fig. 4-14부터 Fig. 4-21까지 는 할로겐램프를 열원으로 적용하여 계측한 열화상 이미지를 보여주고 있다.



Fig. 4-14 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.1







Fig. 4-15 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.2



Fig. 4-16 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.3







Fig. 4-17 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.4



Fig. 4-18 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.5







Fig. 4-19 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.6



Fig. 4-20 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.7







Fig. 4-21 Hybrid gear test image with the halogen lamp part.8





할로겐램프를 열원으로 사용하여 실험을 진행 하였으며, 하이브리드 기어의 결함 에 대한 정확한 온도 데이터를 수집 및 분석하기 위해 결함이 있는 부분과 정상 부분으로 나누어 4개의 Spot을 지정하여 온도를 계측하였다.





그 결과 Fig. 4-22 의 그래프와 같이 결함이 있는 Spot1에서는 할로겐램프 사용 을 시작한 후부터 꾸준히 온도가 상승하여 1분 후 66.9℃까지 상승함을 확인할 수 있었으며, 정상용접부인 Spot2의 경우 60.4℃로 결함부와 약 6.5℃ Spot3은 59. 3℃로 결함부와 약 7℃의 온도 차이, Spot4는 57.3℃로 결함부와 약 9℃ 온도차이 를 보임을 알 수 있었다.

결함이 있는 하이브리드 기어의 접촉부분과 정상부 모두 할로겐램프를 사용하였 을 때, 시험편 전체적으로 온도가 상승 하지만 결함이 있는 부위의 온도가 정상부 위보다 더 높아 Hot spot이 일어남으로 결함을 검출 할 수 있음을 알 수 있다.





제 3 절 열화상 결함 검출 기법에 따른 비교 분석

1. 열화상 이미지 데이터 결과 분석

본 연구에서는 냉각 후 서모그래피 기법과 할로겐램프의 열원을 적용한 실험을 수행하였고 그 열화상 이미지를 비교 분석한 결과이다. 냉각을 하여 실험을 수행 한 결과 결함이 없는 정상부위에서는 온도 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있었 으며, 결함이 있는 부위에서는 휘도가 낮은 어두운 영역으로 표현되는 것을 알 수 있었다. 할로겐램프를 열원으로 적용하였을 때 열전도에 의해 시험편 전체적으로 온도가 상승함으로 결함부위와 정상적인 부위가 모두 휘도가 높은 밝은 영역으로 표현되지만 결함부위의 온도가 정상적인 부분의 온도보다 높으므로 정상적인 부위 보다 더 밝게 표현되어 결함의 유무 판단은 가능하다. Fig. 4-23 (a)는 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 열화상 이미지를 보여주고 있으며, (b)는 할로겐램프를 열원으로 적용한 열화상 이미지를 보여주고 있다.



(a) Image of the after cooling thermography test





(b)test image with the halogen lamp Fig. 4-23 image of the after cooling thermography tes and halogen lamp test comparison

2. 온도 데이터 결과 분석

본 논문에서는 하이브리드 기어에 냉각 후 서모그래피 기법과 할로겐램프를 열 원으로 적용한 기법으로 실험을 수행하였으며, 실험결과 온도데이터를 분석하였 다. 냉각 후 서모그래피 기법을 적용한 실험의 경우 냉각 후 상온에서 온도가 상 승하는 것을 분석하였다. 그 결과 결함부에서 주위보다 온도가 낮게 발생하는 것 을 알 수 있었으며, 다른 정상부에서는 결함부보다 온도가 높게 측정되는 것을 알 수 있었다. 결함부에서의 온도가 낮게 발생하기 때문에 Fig. 4-23 (a)와 같이 결 함부의 정확한 결함 유무판단이 가능하였다. Fig. 4-24 (a)의 온도결과 그래프를 통해 결함부위와 정상부위의 온도 차이는 평균적으로 약4℃ 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

할로겐램프를 열원으로 적용한 기법의 경우에는 실험수행 1분 동안 할로겐램프 를 적용하여 시험편에 지속적으로 열원을 주어 결함부와 정상부에 모두 지속적로 온도가 상승하는 것을 확인 하였으며, 접합결함부에서는 정상부에서 보다 높은 온





도를 유지하며 상승하는 것을 확인하였다. Fig. 4-24 (b)의 그래프와 같이 온도가 꾸준히 상승함을 확인할 수 있으며, 정상부분 보다 결함부분이 온도가 평균 약 9℃ 더 높게 측정되는 것을 알 수 있다. 결함이 있는 하이브리드 기어의 접촉부분 과 정상부 모두 할로겐램프를 사용하였을 때, 시험편 전체적으로 온도가 상승 하 지만 결함이 있는 부위의 온도가 정상부위보다 더 높아 Hot spot이 일어남으로 결 함을 검출 할 수 있음을 알 수 있다.

생각 후 서모그래피 기법과 할로겐램프를 열원으로 적용한 기법을 비교 분석한 결과 두 기법 모두 결함의 유무판단이 가능하였으며, 적외선 열화상 카메라 이미 지와 온도결과 그래프 모두를 종합적으로 비교 분석하였을 때, 냉각후 서모그래피 기법을 사용하는 것이 하이브리드 기어의 결함의 유무를 더 명확하게 판단할 수 있었으므로 냉각 후 서모그래피 기법을 적용하였을 때 하이브리드 기어의 건전성 평가에 있어 정확한 진단이 이루어질 것으로 판단되므로 앞으로 냉각 후 서모그래 피 기법을 현장 적용하기 위한 장비개발 및 비파괴 검사기법에서 위치, 거리, 각 도 등 표준화 할 수 있는 다양한 후속연구 및 개발이 필요하다 판단된다.

Fig. 4-24 는 냉각 후 서모그래피 기법과 할로겐램프를 열원으로 적용한 실험결과 온도데이터를 비교 분석한 것이다.



(a)







(b)

Fig. 4-24 ultrasonic thermography and halogen lamp temperature result graph comparison





제 6 장 결 론

산업사회에서 많이 쓰이는 하이브리드 기어에 건전성 평가를 위해 FEM 해석 및 적외선 열화상 기법의 적용성 및 신뢰성을 검증하고자 시험편을 제작하여 접합부 의 결함에 대해 열화상 진단을 하였다. 하이브리드 기어의 접합부에 냉각 후 서모 그래피 기법을 적용하는 방법과 할로겐램프를 열원으로 채택한 방법으로 실험수행 결과 결함을 검출하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있었다.

- 하이브리드 기어의 회전 시 발생하는 힘에 대한 변위를 최소화 하고 하이브리 드 기어의 제어성능을 고려하여 하이브리드 기어에 집중되는 응력부를 사전에 검출하여 Crack 발생 가능성을 판단하고자 FEM 해석을 수행 하였으며 그 결과 약 10mm의 Crack이 검출되었다.
- FEM 해석 결과를 바탕으로 시험편을 제작하여 냉각 후 서모그래피 기법에서는 약 4℃, 할로겐램프를 열원으로 적용했을 때는 약 9℃ 온도차가 발생하였으 며, 결함부위에서 Hot spot을 확인 하였다.
- 할로겐램프를 열원으로 적용한 기법의 경우에는 실험수행 약 1분동안 할로겐램 프를 적용하여 시험편에 지속적으로 열원을 주어 결함부와 정상부 모두 지속적 인 온도 상승을 보여주었으며, 결함부에서는 정상부에서 보다 높은 온도를 유 지하며 상승하였다.
- 냉각 후 서모그래피 기법과 할로겐램프를 열원으로 적용하여 실험 한 결과를 종합적으로 비교 분석하였을 때, 냉각 후 서모그래피 기법을 사용하는 것이 기 어의 결함의 유무를 더 명확하게 판단할 수 있었다.





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" 비 파괴검사학회지 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 역 사"

8. 김원태 "적외선 열화상의 원리 및 기기 구성" 비파괴검사학회지 2011.04 pp. 181-188.

9. 최만용, 김원태 "비파괴 검사 이론 & 응용 9 적외선 열화상검사", 한국비파 괴검사학회 2012

10. "Level | 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)

 D. Wu, "Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung. Universität Stuttgart", Fakultät 13, Dissertation (1996)

19. http://blog.naver.com/starletzzang/, 초보기구쟁이의 기구설계공부하기 "기 어의 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

- 59 -





어의 작동"

22. http://blog.naver.com/starletzzang/, 초보기구쟁이의 기구설계공부하기 "표 준 스퍼기어의 소재, 선정"

23. http://kor.midasuser.com/, "Von Mises Stress"

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





감사의 글

먼저 석사 과정 동안 연구에 매진할 수 있도록 열과 성의를 다하여 아낌없는 격려와 지도를 해주신 김재열 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 시간을 내주시고 심사를 맡아주신 김경석 교수님, 박설현 교수님께도 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

대학원 생활을 하는 동안 많은 일들이 있었고 이를 통해 많은 것들을 배우고 한층 성장할 수 있는 유익한 시간이 될 수 있도록 도와주신 나노계측메카트로 닉스 실험실 선배님들과 후배님께 깊은 감사드립니다. 다들 친형제처럼 가족 같은 분위기 속에서 2년 동안 정말 행복했습니다. 저를 위해 많은 도움과 아낌 없는 조언을 해주며 물심양면으로 도와주시고 챙겨주신 최승현 선배님, 김성현 선배님, 곽남수 선배님, 박대광 선배님, 늘 친동생처럼 물심양면으로 도와주시 고 챙겨주신 고가진 선배님, 유란희 선배님께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 어려운 일, 즐거운 일 모두 같이 겪은 고가진 형, 유란희 누나, 이경일 형, 정 윤수 형, 그리고 자준이에게도 고맙다는 말을 전합니다. 그 동안의 즐거운 추 억들이 영원하길 바라며, 나노계측메카트로닉스 실험실에 소속된 모든 분들의 암날이 늘 화창했으면 합니다.

항상 곁에서 믿어주시고 응원해주시는 아버지와 어머니, 누나에게도 늘 감사 하고 사랑한다는 말을 전합니다. 이제는 이러한 가족들의 은혜에 조금이나마 보답할 수 있도록 노력하겠습니다.

마지막으로 일일이 언급을 하지 못했지만 그 동안 저를 아끼고 사랑해주신 모 든 분들께 다시 한번 진심으로 감사 드립니다.

2016년 6월 노치성

