



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](#)

2015년 8월
석사학위논문

비접촉 공중 초음파 탐상법에 의한 열전소자의 신뢰성 평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

고 가 진

비접촉 공중 초음파 탐상법에 의한 열전소자의 신뢰성 평가

Reliability Evaluation of Thermoelectric Module
By Non Contact Air Coupled Ultrasonic
Testing Method

2015년 8월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

고 가 진

비접촉 공중 초음파 탐상법에 의한 열전소자의 신뢰성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 04월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

고 가 진

고가진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 심재기 (인)

위 원 조선대학교 교수 윤성운 (인)

위 원 조선대학교 교수 김재열 (인)

2015년 05월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
NOMENCLATURE	vi
ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 방법	5
제 2 장 이론적 고찰	7
제 1 절 열전소자	7
1. 열전현상	7
2. 열전소자의 제조공정	15
3. 열전소자의 열성능 기초 이론 해석	18
제 2 절 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 시스템	21
1. NAUT 시스템 개요	21
2. 탐촉자의 특성 분석	24
제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 적용	30
제 1 절 시험편	30
제 2 절 열전소자의 내부결함 탐상 실험	33
1. 열전소자 비교 탐상 실험 및 고찰	33
2. 인공결함 시험편의 내부결함 검출 실험 및 고찰	42

제 4 장 열전소자 내부결함과 열성능의 관계 분석	45
제 1 절 실험 개요 및 실험 장치 구성	45
제 2 절 시험편의 서머커플 측정실험 및 고찰	49
1. 온도 측정실험 및 고찰	49
2. 온도차 비교 분석	54
 제 5 장 결론	 56
 Reference	 58

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	The structure of the thermoelectric module	5
Fig. 2-1	Seebeck Effect	8
Fig. 2-2	Peltier Effect	9
Fig. 2-3	ZT of thermoelectric materials	11
Fig. 2-4	Development of thermoelectric figure of merit	12
Fig. 2-5	The operating principle of thermoelectric energy conversion	13
Fig. 2-6	Thermoelectric modules for application	14
Fig. 2-7	The production process of thermoelectric module	15
Fig. 2-8	Thermoelectric module	16
Fig. 2-9	Thermoelectric module with defect	17
Fig. 2-10	Photograph of IR test	17
Fig. 2-11	Schematic diagram of thermoelectric cooling	18
Fig. 2-12	Auto image scanning equipment	22
Fig. 2-13	Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined	23
Fig. 2-14	Data output from NAUT21 system	23
Fig. 2-15	Comparison of flat type probe and line focus type probe	24
Fig. 2-16	Measuring method with Hydro hon	24
Fig. 2-17	Distance between point focus type probe and beam diameter	25
Fig. 2-18	Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe	25
Fig. 2-19	Application of near sound field from focus type probe	26
Fig. 2-20	Comparison of image between point focus type probe and flat type probe	27
Fig. 2-21	Image of CFRP VaRTM specimen	27
Fig. 2-22	Image of CFRP specimen having through pierce hole	28
Fig. 2-23	Comparison of image between normal IC chip and poor condition of IC chip	29
Fig. 3-1	Thermoelectric module specimen A, B	31
Fig. 3-2	Thermoelectric module specimen C	31
Fig. 3-3	Thermoelectric module specimen D and defect part	32
Fig. 3-4	Auto image inspection program execution	34

Fig. 3-5 Auto image inspection system	35
Fig. 3-6 Comparison of the waveform depending on the presence of defects	36
Fig. 3-7 Image inspection result of specimen A, B, C	37
Fig. 3-8 Color setting	38
Fig. 3-9 Image inspection result with color waveform(specimen A, B)	40
Fig. 3-10 Image inspection result with color waveform(specimen C)	41
Fig. 3-11 Comparison of the waveform on the presence of defect	42
Fig. 3-12 Image inspection result of specimen D	43
Fig. 3-13 Comparison of the color waveform on the presence of defect part	44
Fig. 3-14 Image inspection result of the defect's size and position	44
Fig. 4-1 Schematic diagram	45
Fig. 4-2 Photograph of cooling fan and heat sink Assy	47
Fig. 4-3 Schematic diagram of temperature measurement points (Cold Side)	47
Fig. 4-4 Schematic diagram of temperature measurement points (Hot Side)	48
Fig. 4-5 Photograph of experiment apparatus	48
Fig. 4-6 Temperature distribution of specimen A, B, E	51
Fig. 4-7 Temperature distribution of specimen A, B	52
Fig. 4-8 Temperature distribution of specimen A, E	53
Fig. 4-9 Temperature differential distribution of specimen A, B	54
Fig. 4-10 Temperature differential distribution of specimen A, E	55

LIST OF TABLES

Table 1-1	Application of the thermoelectric module	2
Table 1-2	Market trends of the application	3
Table 2-1	Material of n, p type semiconductor	11
Table 3-1	Materials of thermoelectric module	30
Table 3-2	Image inspection condition of thermoelectric module specimen A, B, C	35
Table 3-3	Image inspecting condition of thermoelectric module specimen D	42
Table 4-1	Performance specifications of thermoelectric module	46
Table 4-2	Performance specifications of heat sink	46

NOMENCLATURE

COP	: Coefficient of performance
I	: Current intensity
K	: Thermal conductivity
P	: Electric power
R	: Resistance of thermoelectric module
T	: Temperature
T_h	: Hot side temperature
T_c	: Cold side temperature
ΔT	: Difference between hot side temperature and cold side temperature
T_{ave}	: Average temperature $((T_h + T_c)/2)$
Q_c	: Absorbed by Peltier cold side heating power
Q_T	: Thomson heat flow
V	: Voltage
Z	: Figure of merit
α	: Seebeck coefficient
σ	: Electric conductivity
Π	: Peltier coefficient
Π_{AB}	: Peltier coefficient at the junction of materials A and B
κ	: Thermo-conductivity
λ	: Wavelength
ω	: Angle frequency
ρ	: Material density
γ	: Micro area ds , Distance of measuring location
t	: Transmission rate

ABSTRACT

Reliability Evaluation of Thermoelectric Module By Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing Method

By Gao Jia Chen

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

Dept. of Advanced parts and materials engineering

Graduate School of Chosun University

Because of the traditional CFC refrigeration gradually had a negative effect on the environment, so the environmental protection and green energy research is particularly important. The Thermoelectric Module is a new type of artificial refrigeration technology development on the basis of the discovery in 1834 of Peltier effect. The use of Thermoelectric Module is used as a heat pump has the advantages of no pollution, no noise, small size and other characteristics in line with environmental protection requirements, low power consumption has been widely used in many industries.

From the Thermoelectric Module was first applied to now, there have been more than half a century of time. International for Thermoelectric Module production from material to product assembly process has certain reference, but with the application of Thermoelectric Module is more and more widely,

people's requirement on the efficiency of Thermoelectric Module and reliability becomes higher and higher. Make people pay more and more deep research on the Thermoelectric Module. At present, the research for efficiency of Thermoelectric Module on the international is mainly concentrated in the material. However, the research of materials has certain limit, the research of materials had reached a bottleneck.

On the other side, from the process of the product, Assembled by materials without any damage and achieve the ideal state of joint in order to make the product to maximize performance and have a longer service life. At present, the common process for production only using IR cameras to detect product inside to see if there is any breakage, there are no rules for the detection of the joint situation.

NAUT (Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) is an inspection technique to remedy the existing contact inspection by supplementing energy loss created by differences of acoustic impedance between the solid and the air with high power ultrasonic Pulser Receiver, PRE-AMP, and high sensitivity probe, and enabling the ultrasonic inspection which uses the air as a medium. In order to overcome the weaknesses of the existing contact ultrasonic, it is possible to inspect ultrasonic waves in the air without couplant and even in materials of the low and high temperature, or in a specimen with a rough surface, compared to the existing contact ultrasonic inspection because it can transmit and receive them in a stable condition.

As explained above, in this thesis will show you the impact of the defects inside, and how to use the NAUT to check out the defects inside. According to the scanning picture to judge the position and the size of defects inside. From above results, solved the problem of the detection of the joint situation, and this method can give some help to improve the performance of Thermoelectric Module.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

현재 지구의 기후 변화는 화석연료의 급격한 사용과 산업화에 따른 에너지 수요 급증이 주원인이 되고 있으며 세계적으로 대체 에너지의 개발과 폐에너지의 유효 이용 등 향후 에너지 고갈에 대한 적극적인 대안이 요구되고 있다⁽¹⁾. 또한 후쿠시마 원전 사고 등으로 안전성 문제가 제기되면서 세계적으로 원자력발전소 건설 중단 및 축소되는 추세이며 이는 경제적으로 타격을 받는 부분이다. 그리고 태양광, 조력, 풍력 등의 대체에너지는 기술진보의 한계, 경제성부족 등으로 더 이상 큰 발전을 하지 못하고 있다⁽²⁾. 또한 최근에 에너지자원 고갈과 유가 급등, 다양한 에너지 수요증가에 따른 새로운 에너지자원의 확보를 위하여 폐열 에너지의 재활용과 기존 발전시스템과의 복합화가 요구되고 있으며 산업 고도화에 따른 정밀 온도 제어 및 친환경 냉각 기술의 수요가 급증하고 있다⁽³⁾.

이러한 폐에너지의 재활용 및 냉각 기술에 부응할 수 있는 유력한 기술 중의 하나가 열전(Thermoelectric)변환 기술이다. 열전현상은 온도구배가 전위차를 형성하는 Seebeck현상(1821년)과 전위차로 온도 구배를 야기하는 Peltier현상(1843년)으로 구분한다. 즉, 열에너지를 전기에너지로, 전기에너지를 열에너지로 직접 변환하는 것이다⁽⁴⁾.

열전현상을 이용한 에너지 변화기술은 냉각/발전방식에 비해서 환경/에너지 분야에 긍정적인 영향을 이끌어 낼 수 있는 중요한 기술로 큰 주목을 받고 있다. Table 1-1 에서 보듯이 열전소자는 자동차 온도조절 시트, 반도체, 바이오, 의학 분야, 광학분야, 컴퓨터(CPU 냉각), 가전제품, 발전(폐열발전기, 리모트 파워발전)등 다양한 분야에 적용되고 있으며 새로운 시장을 창출하고 있다⁽⁵⁾.

시장조사기관 IDTechEx에 따르면 바람이나 태양광, 온도 변화, 진동 등 주변 환경으로부터 에너지를 얻는 기술인 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)의 응용기기 시장규모가 2020년에 43억 7천만 달러에 달할 것으로 전망되며, 열전소자분야의 시장규모는 2억 3,600만 달러로 추정된다. IDTechEx에 따르면 열전 에너지 하베스트 시장은 2012년 3,168만 달러에서 2017년 1억 8,100만 달러로 증가하고 2022

년에는 7억4,600만 달러로 연평균 37.1%성장할 전망이다⁽²⁾.

Table 1-1 Application of the thermoelectric module

용도	기술 응용
가정용	제습기, 냉·온 정수기, 자판기, 차량용 냉장고, 에어컨, 가정용냉장고, 자동차 온도조절 시트등
사업용	공작기계 기판 냉각용, 분전반 냉각기, 열량계, 반도체용 설비
연구용	각종 실험기기, 항온조, 항온가열기, 냉각용기기
의료용	항온조, 혈액 보관기, 발열기 냉각용
항공용	블랙박스 냉각장치, 항공 전자제어장치의 냉각설비, 열 조절장치
우주용	발전기, 발열기, 냉각기
군사용	적외선탐지기, 미사일 유도용 회로 냉각기, 레이저 관측 장비

용도별로는 Table 1-2에서 보듯이 무선센서네트워크(WSN)용 열전소자 시장이 2012년 5만 달러에서 2017년6,600만 달러, 2022년 3억 600만 달러로 증가하면서연평균 139.2%로 고성장할 전망이다. 군사 및 우주·항공용 열전소자 시장은 2012년 3,000만 달러에서2017년 4,500만 달러, 2022년 6,400만 달러로 연평균7.9% 성장할 전망이다. 기타 산업용 열전소자 시장은2012년 100만 달러에서 2017년 3,500만 달러, 2022년1억 9,800만 달러로 연평균 69.7% 성장할 전망이다. 헬스케어용 열전소자 시장은 2012년 10만 달러에서 2017년 700만 달러, 2022년 3,300만 달러로 연평균 78.6%성장할 전망이다. 기타 소비자용 열전소자 시장은 2012년 2만 달러에서 2017년 1,900만 달러, 2022년 1억2,500만 달러로 연평균 139.7%의 가장 높은 성장을 기록할 전망이다. 기타 비(非)소비자용 열전소자 시장은2012년 50만 달러에서 2017년 900만 달러, 2022년2,000만 달러로 연평균 44.6% 성장할 전망이다⁽²⁾.

Table 1-2 Market trends of the application

(단위: 백만 달러)

구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2020	2022	CAGR (%)
무선센서네트워크(WSN)	0.05	0.2	1	9	25	66	156	213	306	139.2
군사&우주	30	32	35	37	41	45	53	58	64	7.9
기타 산업용	1	1.4	1.7	2	10	35	100	134	198	69.7
헬스케어	0.1	0.2	0.6	1	3	7	15	22	33	78.6
기타 소비자용	0.02	0.3	2	4	9	19	56	78	125	139.7
기타 비소비자용	0.5	0.9	2	4	6.5	9	13.5	16	20	44.6
합계	31.7	35.0	42.3	57.0	94.5	181	393.5	521	746	37.1

19세기 처음 열전현상을 발견한 이래 1950년대 반도체 소재 기술의 발전과 더불어 그 이용이 증가 되어온 열전소자 관련기술은 최근 열전소자 자체의 효율 향상을 위한 소재 개발 기술과 함께 열전효과를 효과적으로 활용하기 위한 이용기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 열전변화의 성능은 열전성능 지수(Figure of Merit, ZT)로 나타내고, $ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$ 로 표현된다. 여기서 α 는 지벡계수 [V/K], σ 는 전기전도도 [Ωm], κ 는 열전도도 [W/mK], T 는 절대온도를 나타낸다. 일반적으로 열전성능지수는 지벡계수가 클수록, 전기전도도가 우수할수록, 열전도도가 낮을수록 높게 되어 에너지변환효율이 향상된다. 그러나 일반적으로 열전도도와 전기전도도는 동일한 거동을 나타내므로 열전도도와 전기전도도의 특성을 동시에 제어하는 것이 불가능해 열전특성의 향상에 한계가 있었다. 즉 기존의 마이크로한 결정립을 갖는 소재로는 나노미터 파장을 갖는 전하의 이동과 포논의 이동을 동시에 제어해 원하는 열/전기적 특성을 확보하는데 어려움이 있었다. 나노구조 열전재료의 개발로 이 한계를 돌파하지만 현재 열전 나노분말의 불순물 첨가문제, 극미세 나노분말 제조의 어려움 등으로 대량생산이 쉽지 않다⁽⁶⁾.

상용화 된 열전소자는 여러 개의 p형, n형 열전소재 펠릿들을 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 조립한다. 이러한 열전소자는 제조방법이 용이하고 안정적인 열전성능 및 높은 구동 신뢰성 등의 이점을 가지고 있다⁽⁴⁾. 단, 제작과정 중 열

전소자 내부 p형, n형 열전소재와 전도체 등의 접합 시 결함 발생할 수 있다. 또한 현재 공정 중 열전소자 내부 각 재료부분 접합상태 검사 할 수 있는 공정이 없는 현실이며 내부 결함은 열전소자의 성능, 수명 등 큰 영향이 미친다. 열전소자 내부결함 검출하기 위해 비파괴 검사기술을 필요하다. 비파괴검사는 소재 또는 제품을 파괴하지 않고 형상, 성상에서 재료의 균열, 박리, 압입 등의 표면흠집 또는 개재물질, 내부균열, 공동(Blow Hole) 등 내부흠집의 유무 및 존재위치, 크기, 형상, 분포상태 등을 검출하여 기준에 따라 합부를 판정하는 방법이다⁽⁷⁾.

초음파 비파괴 검사 방법에는 접촉매질이 있어야 초음파 탐상이 가능한 접촉식 방법과 공기를 매질로 하여 접촉매질 없이도 초음파 탐상이 가능하도록 하는 비접촉식 방법이 있다. 초음파 비파괴 검사는 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 불연속부(결함-밀도차)를 검출하기 위해 초음파를 재료에 전달시켜 검사하는 비파괴 검사 방법 중 하나이다⁽⁸⁾.

시험편의 표면이 거칠고 매끄럽지 못하거나 저온·고온의 물질 등 좁은 지점에서는 couplant(접촉매질)의 적용이 불가능했던 기존의 접촉식 초음파 탐상 방법의 단점을 보완하기 위해 공기 중에서 비접촉식으로도 초음파 탐상이 가능한 NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) 방법을 이에 적용 하고자한다.

제 2 절 연구목적 및 방법

Fig.1-1는 상용화 된 열전냉각 소자의 일반구성을 나타낸다. p, n형 열전소재와 전도체, 전도체와 세라믹 전열층의 접합시키기 위해서 주로 압접방식으로 이용한다. 이러한 공정은 통상적으로 고온(450-550℃)에서 제작이 이루어지기 때문에 과도한 열이 시료에 가해지게 되면 각부분간에 결함 생길 수밖에 없다. 또한 압력과 시간이 조절이 부적절하면 접합 부분에 결함이 생기거나 p, n형 열전재료의 파손 현상이 발생 가능하다. 결함이 있는 열전소자를 검출 하지 못하면 열전소자의 성능 및 수명에 큰 영향이 미친다. 따라서 이러한 결함이 있는 열전소자는 냉각장치 또는 발전 시스템에 성능과 수명에 미친다. 이러한 문제점들은 산업적인 면과 상용화 측면에서 매우 불리한 요인으로 작용하기 때문에 반드시 이러한 문제를 해결해야한다. 현재 대부분 열전소자 제조 기업은 열화상 카메라로 p, n형 열전재료의 파손 및 결함부 검출을 하지만 육안이나 열화상 카메라로 검출이 불가능한 경우가 많다. 따라서 접합 부분간의 결함 검출에 대한 해결책이 필요하다.

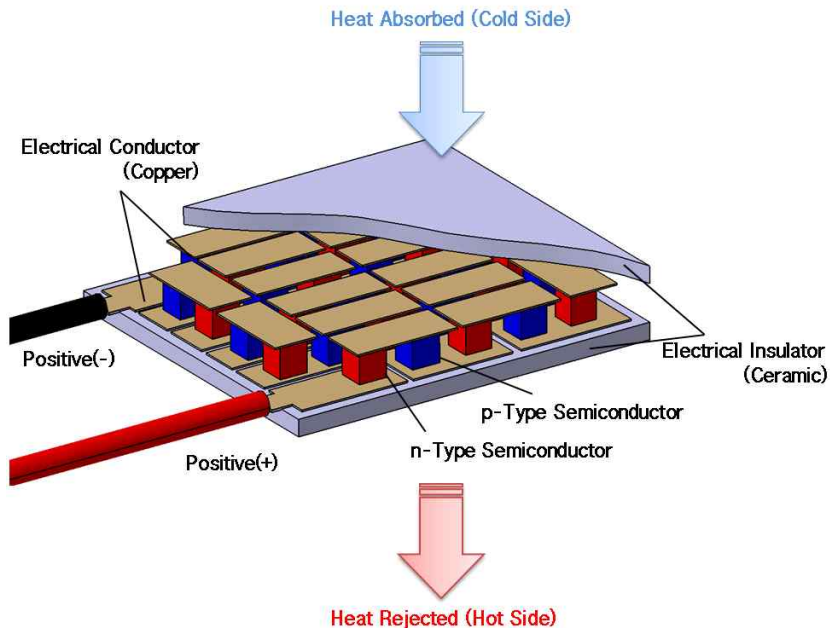


Fig.1-1 The structure of the thermoelectric module

한편, 열전소자의 성능향상을 위한 기술개발 부분에 다양한 노력이 이루어지고 있는데 주로 높은 열전효과를 얻기 위한 소재 개발에 집중 되고 있다. 하지만 열전재료의 불순물 첨가문제, 극미세 나노분말 제조의 어려움, 열전재료의 가격문제 등으로 성능향상이 어려운 실정이다⁽⁶⁾. 같은 열전재료로 같은 공정으로 제작하여도 성능이 분명히 동일하지 않으며, 열전소자 내부간 각 부분의 접합상태가 일정하지 않다.

본 연구에서는 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 정밀한 열전소자의 제조 품질 관리 및 성능 향상을 위한 비접촉 초음파 탐상기술을 적용한 내부결함 검출 및 열전소자 성능에 관한 연구를 수행하였다. 비접촉 공중 초음파 탐상법은 비파괴검사 기술 중의 하나로서 시험편의 표면이 거칠고 매끄럽지 못하거나 저온·고온의 물질, 좁은 지점에서는 couplant(접촉매질)의 적용이 불가능했던 기존의 접촉식 초음파 탐상 방법의 단점을 보완한다.

따라서 내부 접합결함이 열전소자의 성능에 미치는 영향검증을 하기 위해, 또는 열전소자 내부 결함검출에 NAUT의 유용성을 검증하기 위해 냉각용 열전소자에 대한 다음과 같은 연구를 수행 하였다.

첫째, NAUT 적용 시 열전소자 내부 결함 검출 가능여부를 확인하기 위해 양품과 불량품에 대한 비교 실험을 수행 하였다. 취득한 C-Scan 영상을 통해 열전소자에 NAUT의 유용성을 확인 하였다.

둘째, 열전소자의 내부 접합결함 형태를 확인하기 위한 열전소자에 인공 접합결함을 가한 후 NAUT를 적용하여 실험수행을 하였다. 탐상결과를 통해 결함의 형태, 크기 및 위치 등을 파악 하였다.

셋째, 접합부분의 결함이 열전소자의 성능에 미치는 양향을 연구하기 위해 결함이 없는 열전소자와 인공결함이 있는 열전소자의 성능비교 실험을 수행 하였다. 또한 같은 양품으로 판정된 열전소자 시험편을 성능비교 실험 하였으며 이를 바탕으로 성능과 내부결함의 관계를 파악하였다.

제 2 장 이론적 고찰

제 1 절 열전소자

1. 열전현상

열전현상(Thermoelectric Effect)은 열에너지와 전기에너지의 상호 가역적이며 직접적인 에너지 변환을 의미 하며, 온도차에 의한 소재 내부의 전자(Electron) 또는 양공(Hole)의 이동과 함께 열전달에 의해 발생하는 현상이다^(9,10). 제벡(Seebeck) 효과(1821년)와 Peltier 효과(1834년)로 대표되는 열전현상은 약 200년의 오랜 역사를 가지고 있다. 열전현상은 열(thermo)을 전기(electric)로(제벡 현상에 기반한 열전발전의 원리), 또는 전기를 열로(Peltier 현상에 기반한 열전냉동의 원리) 바꿀 수 있는 에너지 변환 현상이다⁽¹¹⁾.

가. 제벡 효과(Seebeck Effect)

1821년 독일의 물리학자 Seebeck은 서로 다른 두 금속선이 접합된 한쪽 끝을 가열하면, 전위차가 발생하여 전류가 흐르는 현상을 발견하였다(Fig.2-1). 이 현상은 접합부와 반대편 사이에서 생기는 온도차에 의해 전압 즉, 열기전력이 발생하여 폐회로(close circuit) 내에서 전류가 흐르는 현상으로 제벡효과로 불리며 열전발전(Thermoelectric generation)에 이용되는 기본 원리이다. 재료 양단에 온도차가 발생하였을 때 발생하는 기전력을 제벡 전압 (Seebeck Voltage)라며, 단위 온도차에 대한 기전력을 제벡 계수(Seebeck Coefficient)라하며 α 로 표시 한다. 제벡 효과는 식(2-1)과 같다^(12,13).

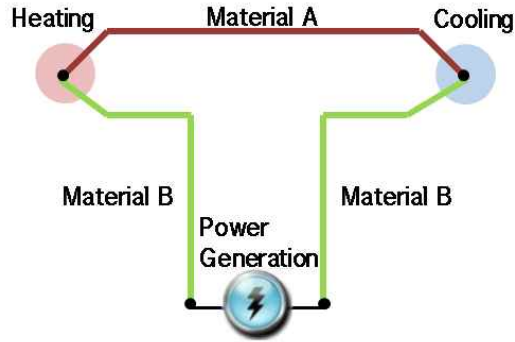


Fig.2-1 Seebeck Effect

$$\alpha = \Delta V / \Delta T [uV/K] \quad (2-1)$$

여기서 α 는 Seebeck coefficient라 불리는 값으로 단위 온도차에서 유도되는 전압을 의미한다. 일반적으로 금속에서는 uV/K 의 아주 작은 값을 가지며, 반도체에서는 ~수백 uV/K 의 값을 가진다. 이 Seebeck coefficient의 값이 클수록 당연히 열전효과에 의하여 발생하는 기전력이 커지므로 좋은 열전소자가 된다.

제벡 계수는 재료 내에서 이동하는 주 캐리어 종류에 따라 전류의 방향이 달라지기 때문에 그 재료가 p형 재료일 때, 양의 값을 가지고, n형 재료일 경우 음의 값을 가진다.

제벡 계수는 열전 물질의 효율과 직접 관련 있으므로 열전재료의 특성을 가능하는 열전 성능지수(Figure of merit)로 ZT 값을 사용한다. 열전효과를 위하여 사용되는 물질의 열전도도가 κ , 전기전도도가 σ 이며, ZT 는 식(2-2)와 같이 표현된다⁽¹⁴⁾.

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2-2)$$

나. 펠티어 효과(Peltier Effect)

열전발전분야보다 먼저 상용화된 기술은 열전냉각(Thermoelectric refrigeration) 기술로 1843년 프랑스의 물리학자 Peltier에 의해 발견된 펠티어효과를 이용한 것으로 서로 다른 두 금속선의 양 끝을 접합시키고 전류를 흘려주면 한쪽 접합부에서는 발열, 다른 접합부에서는 흡열이 일어나며 전류의 방향에 따라서 흡열과 발열이 반대로 일어난다(Fig.2-2)⁽¹²⁾.

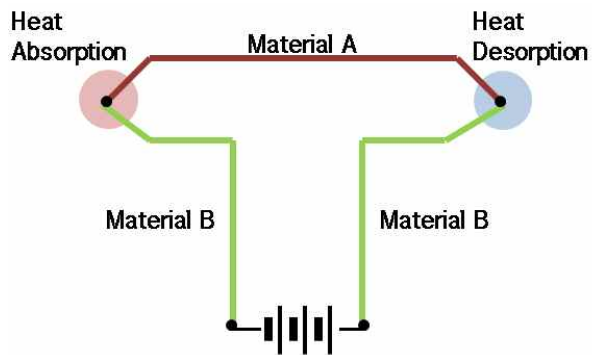


Fig.2-2 Peltier Effect

일반적으로 인가한 전류 I 에 대한 흡열량 q 비로 나타내어 재료의 냉각능을 평가하는데, 이를 펠티어 계수 Π 라 하면 식(2-3)과 같이 나타낸다.

$$\Pi = \frac{I}{q} \quad (2-3)$$

펠티에 계수는 재료의 반도체 형에 따라 부호가 다른데, p형 재료의 경우 양의 값을 가지고, n형 재료는 음의 값을 가진다. 한편 펠티에 계수는 켈빈관계에 의해서 지백 계수와 식(2-4)과 같은 관계를 가진다.

$$\Pi = \alpha T \quad (2-4)$$

여기서 α 는 지백 계수, T 는 절대 온도이다. 위의 관계식에서 나타낸 바와 같이

펠티어 계수가 지벡 계수의 함수가 되기 때문에, 열전재료의 냉각능은 지벡 계수에 직접적으로 관계가 있다⁽¹³⁾.

다. 톰슨효과(Thomson Effect)

온도구배가 존재하는 도체 또는 반도체에 전류를 흘렸을 경우 여기에는 열과 전류가 동시에 흐르게 되며, 이때 열과 전류는 서로 영향을 주게 되는 데, 이러한 현상을 Thomson 효과라고 한다. 온도구배와 전류의 양에 따른 열의 출, 입력 Q_T 를 수식으로 표현하면 다음의 식과 같다⁽¹⁵⁾.

$$Q_T = I(T \frac{d\alpha}{dT} \Delta T) \quad (2-5)$$

여기서, $T(d\alpha/dT)$ 는 Thomson 계수 (σ)라고 하며, Thomson 계수, Seebeck 계수, Peltier 계수 간에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{d^2 V_{AB}}{dT^2} = -T \frac{d}{dT} \left(\frac{\Pi_{AB}}{T} \right) \quad (2-6)$$

$$\Pi_{AB} = T \frac{dV_{AB}}{dT} = T\alpha_{AB} \quad (2-7)$$

다. 열전소재

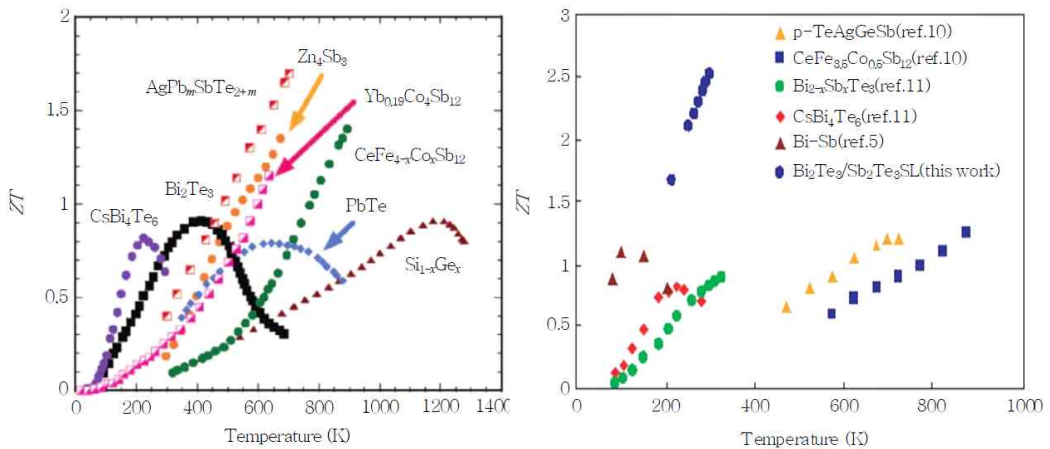
19세기 처음 열전현상을 발견한 이래 1950년대 반도체 소재 기술의 발전과 더불어 그 이용이 증가 되어온 열전소재 관련기술은 최근 열전소재 자체의 효율 향상을 위한 소재 개발 기술과 함께 열전효과를 효과적으로 활용하기 위한 이용기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

높은 열전효과를 위해서는 당연히 ZT (식 2-2)의 값이 클수록 좋은 것을 알 수 있다. 높은 ZT 를 위해서는 열전도도가 낮으며 전기전도도가 높은 물질이 유리하면

Table 2-1에서 보듯이 반도체 물질에 이러한 특징을 가지는 물질이 많은 것으로 알려져 있다⁽¹⁶⁾.

Table 2-1 Material of n, p type semiconductor

적용 온도℃	소자의 재료
227℃ 이하	Bi , Sb 등의 VB 족 TELLURIDE 계
227~527℃	Pb , Ge , Se 등의 IVB 족 TELLUDIDE 계
527~1027℃	Fe1-XSi2MnX, Fe1-XSiCoX 규화물계
기타 정상화된 열전소자 재료	ZnSb ,PbTe ,Bi2Te3 ,PbSe ,Bi2Se3,Sb2Te3,MnTe , GeTe , III-V 화합물



(a) General thermoelectric materials (b) Super lattice thermoelectric materials

Fig.2-3 ZT of thermoelectric materials

Fig.2-3(a)는 기존 반도체에 대해 온도에 따라 달라지는 ZT 를 나타낸 그림을 보여주고 있다⁽¹⁷⁾. 그림에서 보는바와 같이 ZT 값은 온도에 따라 달라지는데 Bi2Te3의 경우 400K근처에서 가장 높은 값을 가지고 SiGe의 경우 1,200K부근에서 가장 높은 값을 보임을 알 수 있다. 따라서 작동 온도 범위에 따라 그에 맞는 소재를 적절히

선정해야 함을 알 수 있다⁽¹⁶⁾. Bi₂Te₃계 화합물은 실온으로부터 약 450K까지의 비교적 낮은 온도영역에서 사용되는 최고의 열전재료로서 현재 주로 열전 소자 재료로 사용하고 있다.

Fig.2-4는 열전성능지수(ZT) 값 향상 추이를 나타낸 것으로, 1950년도 이전까지는 금속 혹은 Bi, Sb 등의 순금속의 열전효과에 대하여 연구되었으나, 1950년대에 Bi₂Te₃나 이에 Sb, Se 등을 첨가한 합금재료를 발견한 이래 이렇다 할 성과를 얻지 못하고 약 반세기에 걸쳐 $ZT=1$ 을 넘는 재료는 발견되지 않았다⁽¹⁸⁾. 그러나 1990년대부터 환경 친화적 에너지의 개발이 주목을 받게 되고, 1993년 미국의 MIT 물리학과 Dresselhaus 교수⁽¹⁹⁾가 열전소재를 양자점 및 초격자 구조의 저차원 나노구조로 제조함으로써 열전 성능의 향상을 이룰 수 있다는 것을 발표하면서 열전 현상은 재조명되기 시작하였다⁽¹¹⁾.

나노 구조체의 고효율 열전재료에 관한 실제 연구개발은 2001년 미국의 RTI (Research Triangle Institute, NC)의 Venkatasubramanian 그룹에서 p-type Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ super lattice를 이용하여 실온에서 열전 지수를 2.6까지 향상시킨 연구결과를 Fig.2-3(b)에서와 같이 발표한 이후로 많은 연구가 시작되었다⁽²⁰⁾. Fig.2-3(b)에서와 같이 bulk에서의 높은 ZT 를 가지는 Bi₂Te₃ 및 Sb₂Te₃을 초격자 구조로 형성하는 경우에는 현재까지 보고된 결과로서는 최고의 ZT 값을 달성할 수 있다. 그러나, 초격자 구조는 실제 적용을 위하여서 열전나노분말의 대량 제조 공정개발 시 재료에 불순물 첨가문제, 극미세 나노분말 제조의 어려움 등으로 대량 생산이 쉽지 않다⁽²¹⁾.

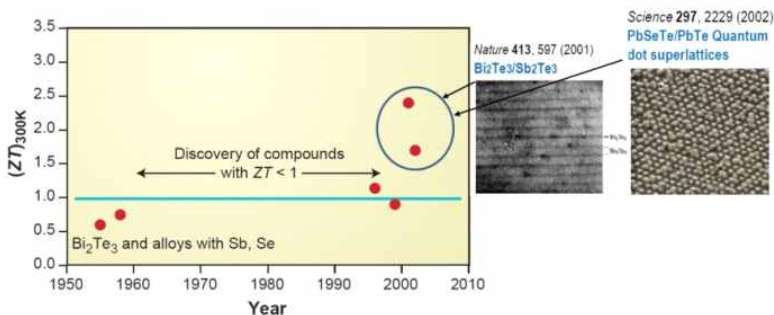


Fig.2-4 Development of thermoelectric figure of merit

또한, 현재까지 대부분의 연구는 열전도도 저감을 통해 ZT 값을 향상시키는 방법을 사용했다. 대부분 열전소재에 대한 연구결과도 결국은 열전도도 감소를 확보하기 위해 재료내부에 계면을 형성시키거나 새로운 결정립계를 형성시키는 것을 기본 원리로 채택하고 있다. 그러나, 실제로 ZT 값은 제벡 계수의 제곱에 비례하기 때문에 최근에는 제벡 계수를 향상시킬 수 있는 신소재개발이 주요한 이슈가 되고 있다.

이러 기술배경으로서 현재 주로 쓰고 있는 열전소재로 제조한 열전소자의 성능이 최대화하는 것을 중요하다. 즉 순도 높은 것 소재를 사용하고 열전소재 구성한 각 재료의 혼합비를 최적화 하고 제작 시 손실을 최소화해 해야 한다.

라. 열전현상의 응용

일반적으로 열전 에너지 변환 시스템은 Fig.2-5과 같은 열전소자를 기본 구성요소로 Fig.2-6처럼 열전 모듈을 이용한다. 열전소자는 n형 반도체 열전소재와 p형 반도체열전소재를 전기적으로는 직렬로, 열적으로는 병렬로 연결하여 만들고 여러 개의 소자를 사용 목적에 따라서 다양한 모듈로제작하여 실제 제품으로 이용하고 있다.

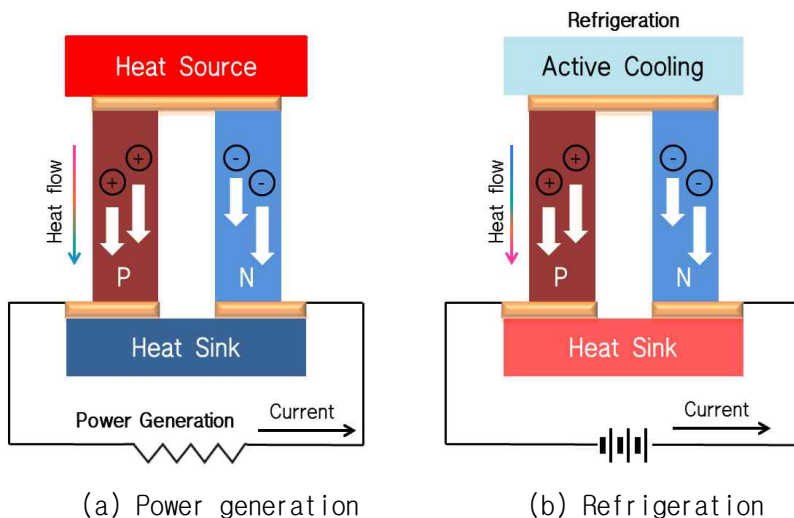


Fig.2-5 The operating principle of thermoelectric energy conversion

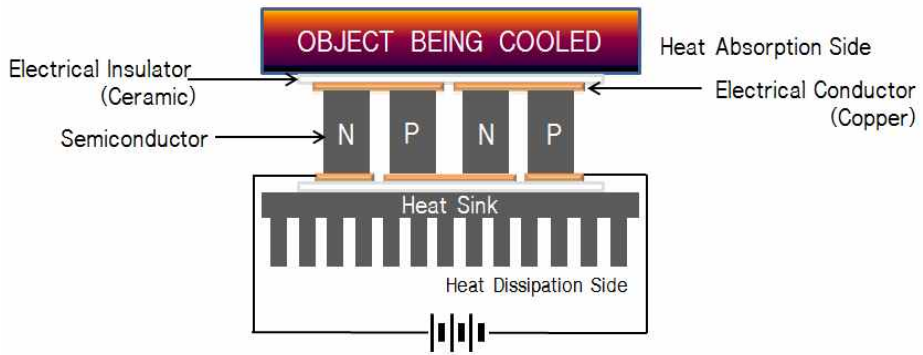


Fig.2-6 Thermoelectric modules for application

또한, p형과 n형의 두 반도체를 접하였을 경우 Peltier 계수와 Seebeck 계수는 다음의식과 같은 관계를 갖는다.

$$\Pi_{pn} = \Pi_p + \Pi_n \quad (2-8)$$

$$\alpha_{pn} = |\alpha_p| + |\alpha_n| \quad (2-9)$$

2. 열전소자의 제조공정

현재 주로 사용하고 있는 Bi₂Te₃계 열전재료로 열전소자를 제조한 공정은 제조업체 따라 차이가 있지만 주요한 공정 순서는 Fig.2-7와 같이 나타난다⁽²²⁾.

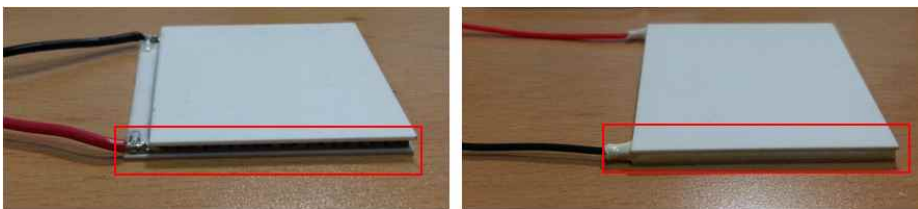


Fig.2-7 The production process of thermoelectric module

Fig.2-7와 같이 열전소자의 제조는 잉곳의 제조부터 조립 완성까지는 여러 과정을 필요 한다. 우선 잉곳의 제조 시 열전재료 분말의 순도 및 제조 방법, 또한 열전 재료 분말의 혼합비율은 이공정의 핵심 부분이다. 열전재료는 열전소자의 성능에 직접 관련이 있기 때문에 이공정은 열전소자 제조공정의 중요한 공정 이다.

잉곳이 제조하고 결정립 최적화 배열 시킨 후 열전성능 지수 최적부분을 선택하고 슬라이스 절단 한다. 일반적으로 잉곳의 양단 부분 열전성능 지수 낮고 중간 부분 성능 최적이다. 성능 측정 통해 잉곳의 양단에 성능 낮은 부분 제거 한다. 그리고 열전소자의 설계 따라서 일정한 두께로 절단 한다.

n, p형 열전재료와 구리 기판 용접시키기 위해 슬라이드 표면에 확산 배리어 처리 한다. 즉 도금 처리를 한다. n, p형 열전소재는 납땀하기 어려운 특성이 가지고 있어서 슬라이드 표면에 도금한다. 도금 완료 후 다이스 절단으로 n, p형 다이스 칩을 만들어진다. 그 다음 공정은 칩과 구리 전도체, 전도체와 세라믹 등의 접합 조립 공정이다. 이 공정에 층간 접합시키기 위해 주로 압접으로 작업한다. 압접 시 가열로의 온도제어 및 압력 조절 등은 n, p형 열전소재 파손 및 접합 부분 결함 발생의 요인이다. 접합 완료 후 열전소자 표면에 연마를 한다. 리드선을 연결한 후에 사용 환경 및 사용 요구에 따라 실링을 한다. 이에 따라서 열전소자를 Fig.2-8와 같이 만들어 진다. 마지막으로 열전소자의 검사 공정이다. 제작된 열전소자의 전기적 기본 데이터 확인 및 외관 치수확인, 또한 n, p형 열전소재 칩 상태를 확인 한다. 칩 상태 검사 시 열전소자 주변은 현미경로 이용하여 육안으로 칩 파손유무(Fig.2-9)를 확인하고 열전소자 내부는 열화상카메라로 칩 파손유무, 내부 큰 결함을 확인 한다(Fig.2-10). 단, 열화상카메라로 검사 할 때 입력전압, 작동시간, 내부 칩 수량 등에 따라 판정이 어렵다.



(a) Thermoelectric module without sealing (b) Thermoelectric module with sealing

Fig.2-8 Thermoelectric module

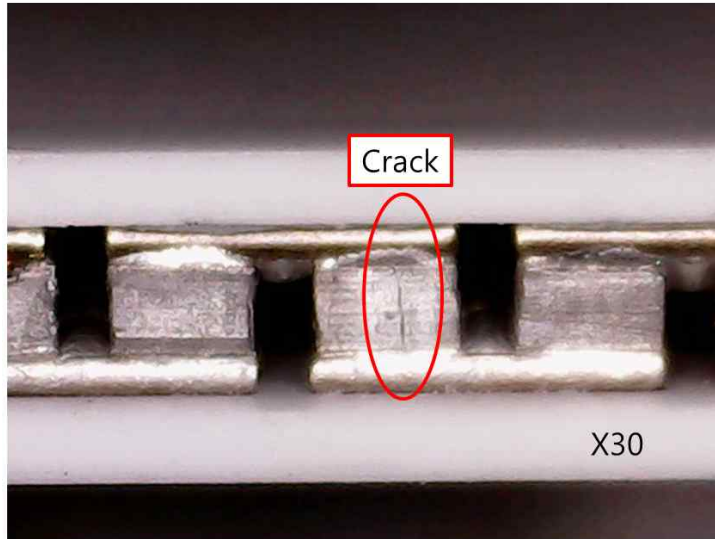


Fig.2-9 Thermoelectric module with defect

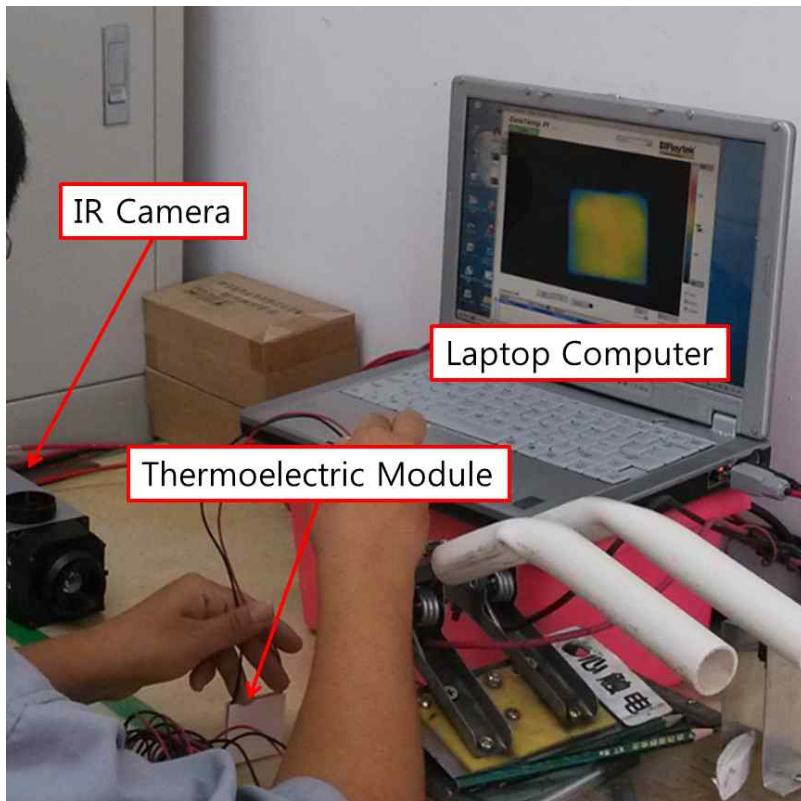


Fig.2-10 Photograph of IR test

3. 열전소자의 열성능 기초 이론 해석

Fig.2-11에서 보이는 바와 같이 p형과 n형 반도체를 조합한 소자에 전류를 흘리면, Peltier 효과를 이용한 열전냉각장치는 전기에너지를 직접 냉각에 이용하는 방식으로 n형과 p형 두 반도체를 접합하여 제작된 열전소자에 전위차를 주게 되면 냉각대상에 접한 접점 (저온접점, 냉각면)의 온도는 감소하고 반대편 접점 (고온 접점, 열방출면)의 온도는 증가한다⁽³²⁾.

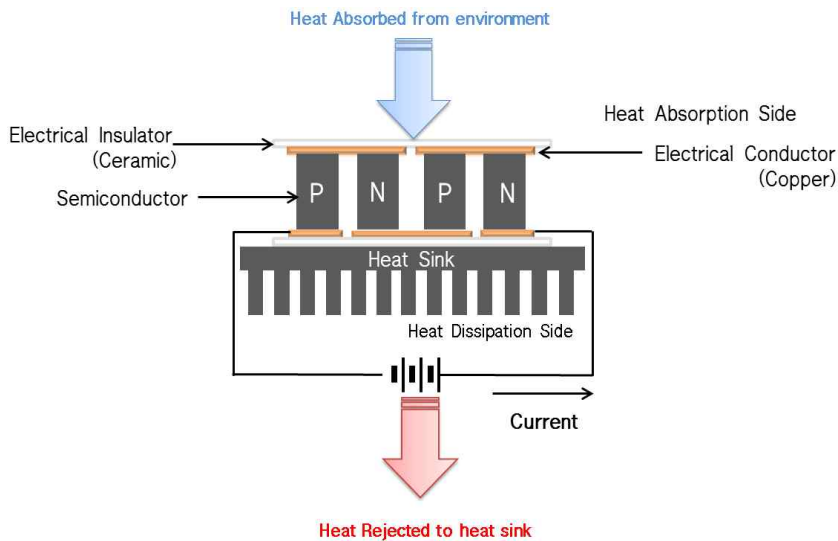


Fig.2-11 Schematic diagram of thermoelectric cooling

저온 접합부에서 제거되는 열의 양 Q_{cool} 는 Peltier 효과에 의한 것에 Joule 열에 의하여 발생하는 열의 반의 저온부로 흘러들어오는 것과 고온부와 저온부의 온도 차에 의한 열전도성 열전달량을 감하고 Thomson효과를 무시한다면 저온부의 흡열량 Q_{cool} 는 식(2-10)와 같다⁽¹⁵⁾.

$$Q_{cool} = \alpha T_{cool} I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (2-10)$$

여기서, α : Seebeck 계수

- R : 열전소자의 내부 저항
- I : 열전소자로 흐르는 전류의 세기
- K : 열전도도
- T_{cool} : 저온부 온도

그러므로 고온부의 발열량 Q_{hot} 는 식(2-11)과 같다.

$$Q_{hot} = \alpha T_{hot} I + \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (2-11)$$

또한 열전소자에 적용되는 전압 V 는 저항에 의한 것과 Seebeck 효과로 인한 것의 합으로 나타나면 식(2-12)로 표현 된다.

$$V = IR + \alpha \Delta T \quad (2-12)$$

이때 열전소자에 실제 입력은 아래식과 같다.

$$P = IV = I^2 R + \alpha I \Delta T \quad (2-13)$$

열전소자의 성적계수(C.O.P)를 열전소자에 입력 P 에 대한 저온부에서의 열흡수율 Q_{cool} 로 정의하면 아래 식과 같다.

$$COP = \frac{\text{cooling power}}{\text{input power}} = \frac{Q_{cool}}{P} = \frac{\alpha T_{cool} I - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T}{\alpha I \Delta T + I^2 R} \quad (2-14)$$

전류의 양이 증가함에 따라 Joule 열의 효과가 증가하기 때문에 성적계수가 증가하다가 감소한다. 따라서 최대의 성능계수가 존재하며 이를 구하면 식(2-15)과 같다.

$$\begin{aligned}
 COP_{\max} &= \frac{T_c}{\Delta T} \left[\frac{\sqrt{(1+ZT_{ave})} - \frac{T_{hot}}{T_{cool}}}{\sqrt{(1+ZT_{ave})} + 1} \right] \\
 &= \frac{T_{ave}}{\Delta T} \left[\frac{\sqrt{(1+ZT_{ave})} - 1}{\sqrt{(1+ZT_{ave})} + 1} \right] - \frac{1}{2}
 \end{aligned} \tag{2-15}$$

여기서 $T_{ave} : \frac{1}{2}(T_{hot} + T_{cool})$

Z : 성능 지수

식(2-10)로 통해 $dQ_{cool}/dI = 0$ 시 계산하면 최대 냉각량 Q_{cmax} 와 I_{max} 를 아래와 같이 구한다.

$$I_{\max} = \frac{\alpha T_c}{R} \tag{2-16}$$

$$Q_{cmax} = \frac{(\alpha T_c)^2}{2R} - K\Delta T \tag{2-17}$$

식(2-17)로 보이듯이 $Q_{cmax} = 0$ 때 온도차가 최대로 도달 할 수 있으며 이때의 온도차 ΔT_{\max} 는 아래 식과 같이 표현될 수 있다⁽³³⁾.

$$\Delta T_{\max} = \frac{\alpha^2 T_c^2}{2RK} = \frac{1}{2} Z T_c^2 \tag{2-18}$$

제 2 절 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 시스템

1. NAUT 시스템 개요⁽⁸⁾

초음파 비파괴 검사 방법에는 접촉매질이 있어야 초음파 탐상이 가능한 접촉식 방법과 공기를 매질로 하여 접촉매질 없이도 초음파 탐상이 가능하도록 하는 비접촉식 방법이 있다. 초음파 비파괴 검사는 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 불연속부(결함-밀도차)를 검출하기 위해 초음파를 재료에 전달시켜 검사하는 비파괴 검사 방법 중 하나이다.

수동탐상의 경우, 결함을 파악하는데 숙련된 기술자가 요구되며, 접촉매질 없이는 초음파 탐상이 이루어지지 않는다. 또한 시험편의 표면이 거칠고 매끄럽지 못하거나 저온·고온의 물질 등 좁은 지점에서는 couplant(접촉매질)의 적용이 불가능했던 기존의 접촉식 초음파 탐상 방법의 단점을 보완하기 위해 공기 중에서 초음파 탐상이 가능한 NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) 방법을 이용해야 한다.

비접촉 공중 초음파 검사에서 사용하는 구형 Burst 초음파는 기존 펄스 초음파보다 $400[kHz] \sim 800[kHz]$ 영역의 고주파수를 음압 손실을 최소화 할 수 있으며 주파수가 쉽게 변할 수 있는 최적탐상조건을 찾아내기 용이한 이점이 있어 High Power로 송수신이 필요한 NAUT에 적용하고 있다. 고체와 공기간의 음향 임피던스의 차이로 생기는 에너지 손실을 High Power 초음파 Pulser Receiver, PRE-AMP, 고감도의 탐촉자로 보완하여 공기를 매질로 하는 초음파 탐상이 가능하도록 하여 기존의 접촉식 방법을 보완한 탐상기술이다. NAUT 탐상 기술의 적용이 이루어진다면 couplant(접촉매질) 없이 공기 중에서도 초음파 탐상이 가능해짐과 동시에 안정된 상태에서의 초음파의 송·수신이 가능해져 기존의 초음파 탐상의 접촉식 방법으로는 불가능했던 한계를 최소화 할 수 있다.

본 시스템은 고감도 Air Probe, High power 초음파 신호 처리용 PXI 고속디지털 이터, 카운터 보드, Pulser Receiver, 주파수 필터가 장착된 Pre-amp 등으로 구성되어 있어 고속 대용량 디지털 데이터처리가 가능하며, 구형 Burst 파를 사용하여 고감도 송신 프로브와 수신 프로브를 통해 측정된 고체와 공기간에 음향임피던스

차이를 Labview 기반의 DLL소스가 코딩된 측정 프로그램에서 디지털 신호 처리된 초음파 투과율로 재료의 내부 결함 크기 및 위치 등을 검출 할 수 있다. 또한 2축으로 구성된 정밀스테이지를 통하여 최대 $400[mm] \times 400[mm]$ 의 평면을 $0.1 \sim 20 mm$ pitch($0.1mm$ step), $1 \sim 300mm/sec$ ($1mm/sec$ step)로 스캔하고 화상화가 가능하다.

탐상면에 결함이 있는 경우 결함 에코 높이에 대응하여 표시점의 휘도를 높인다. 컬러표시의 경우에는 색을 변화 시키고 결함 에코를 검출하기 위한 검사범위(탐상면으로 부터의 거리)를 게이트에 의해 이동시키거나 에코 높이 대신 결함 에코까지의 시간변화를 색별로 표시하면 탐상면으로부터 일정 깊이마다 표시한 결함의 평면도(C-Scan)가 얻어진다. 본 시스템은 A-Scan으로 얻어지는 시험체의 반응신호를 수합하여 영상을 구축하는 원리를 사용하였다.

점접촉탐촉자를 사용할 경우, 접촉거리를 설정하여 결함 부분에 접촉되므로 미세 결함 검출과 동시에 선명한 고해상력의 화상 취득이 가능하다. 따라서 본 시스템은 기존에는 적용이 곤란했던 항공기, 자동차용 탄소섬유 복합재료의 박리 검사 등을 물 등의 접촉매질을 필요로 하지 않고 비접촉으로 검사하는 것이 가능하다. 자동 스캔 화상 장치는 Fig.2-12과 같다. Fig.2-13에서는 Pulser receiver를 이용한 NAUT시스템의 구성을 나타내고 있다.



Fig.2-12 Auto image scanning equipment

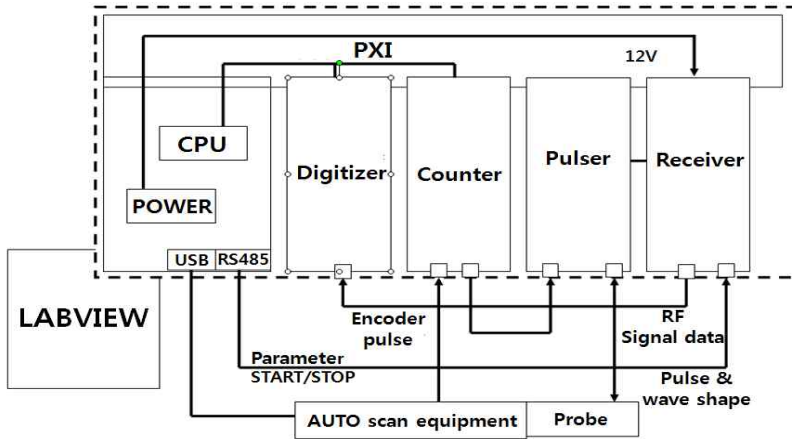


Fig.2-13 Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined

본 시스템은 PC와 Probe를 장착한 자동스캐너장치, 확장 하드웨어로 구성되어 있다. 초음파의 송신부터 triggering, 검사대상물을 고정시키는 스테이지의 X축, Y축 제어, 펄스신호의 송·수신, 해석, 데이터 출력 등 시스템의 다양한 채널화 대응이 가능하다. Fig.2-14는 NAUT21(Auto scan equipment)⁽⁴⁰⁾로부터 데이터 결과 값을 출력하기 위한 과정을 나타내고 있다.

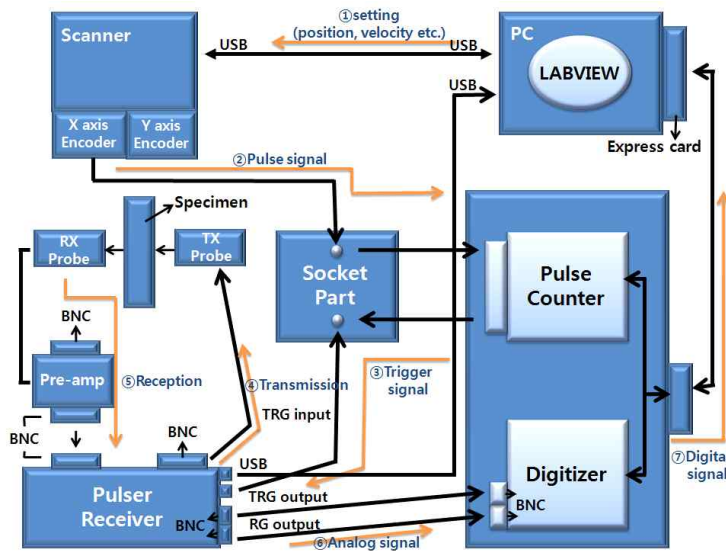
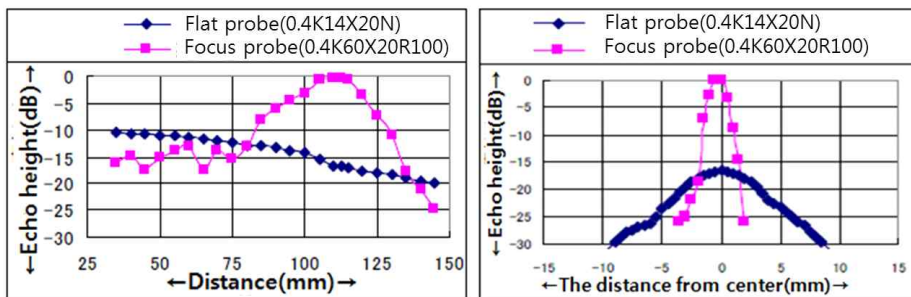


Fig.2-14 Data output from NAUT21 system

2. 탐촉자의 특성 분석⁽⁸⁾

가. 탐촉자의 특성 비교

현재 주로 사용하고 있는 탐촉자는 평면탐촉자와 선집속탐촉자로 구분 한다. 반사원⁽²³⁾은 $\phi 6 [mm]$ 의 파이프를 사용하였고 선집속탐촉자의 집점거리⁽²⁴⁾는 $R=110 [mm]$ 로 집속되고 있는데 집점 근방에서 평면탐촉자와 비교했을 때, 약 $15 [dB]$ 로 감도가 높게 나타나고 있다. Fig.2-15는 평면탐촉자⁽²⁵⁾와 선집속탐촉자⁽²⁶⁾의 특성을 비교한 결과를 보여주고 있다.



(a) Flat type probe

(b) Line focus type probe

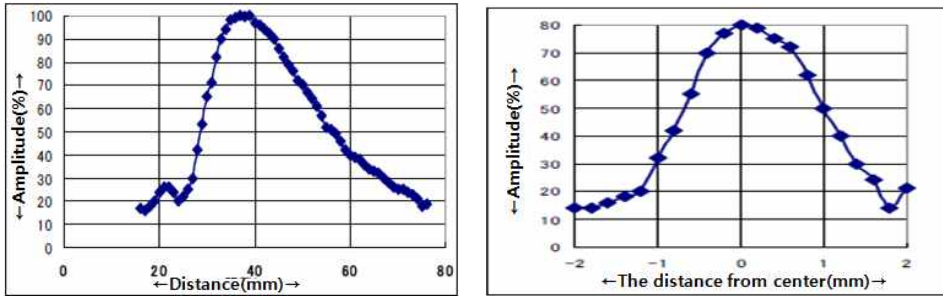
Fig.2-15 Comparison of flat type probe and line focus type probe

집속탐촉자는 공칭주파수 $400 [kHz]$, 진동자 직경 $20 [mm]$, 집속거리 $R=38 [mm]$ 의 것으로 사용하였고 거리특성 및 빔직경은 점집속탐촉자에서 방사되는 초음파를 Hydro hon으로 수신하고 측정하였다. Fig.2-16에서는 Hydro hon을 이용한 측정법을 나타내고 있다.



Fig.2-16 Measuring method with Hydro hon

Fig.2-17(a)의 거리특성은 Hydro hon과 탐촉자 사이의 거리를 mm 로 설정하였는데 수신된 초음파가 최대로 설정된 집속거리와 일치하고 있다. 집속근방 빔 직경($-6dB$)은 약 $2[mm]$ 이며, 주파수 특성이 $50[kHz] \sim 800[kHz] \pm 2[dB]$ 이내의 무지향성⁽²⁷⁾으로 사용하였으며, 다음 결과를 Fig.2-17(b)에 나타내었다.

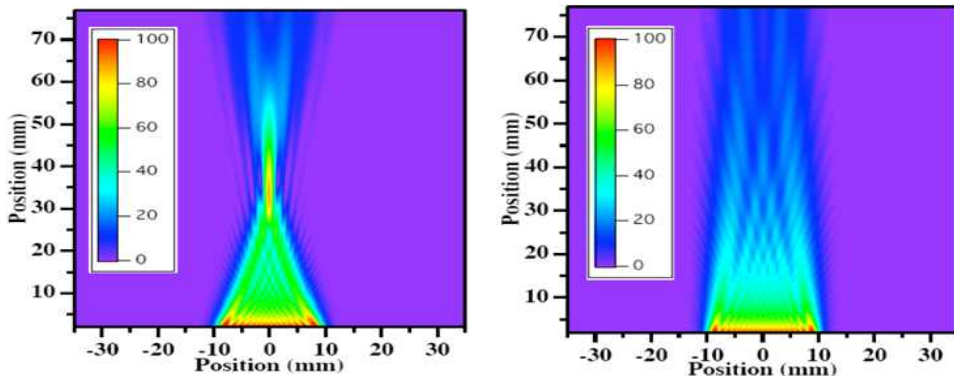


(a) Point focus type probe

(b) Beam diameter

Fig.2-17 Distance between point focus type probe and beam diameter

점집속탐촉자와 평면탐촉자의 음장을 계산한 결과를 Fig.2-18과 같이 나타내었다. Fig.2-18(a)를 통해 집점 근방의 음압이 높고 빔이 잘 집속되고 있음을 알 수 있다. 점집속탐촉자는 축대칭을 위한 편축 정도를 보이고 있으며, 근거리에서는 빔 직경이 크고 집속근방에서 빔 직경은 약 $2mm$ 가 된다.



(a) Point focus type probe

(b) Flat type probe

Fig.2-18 Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe

집속탐촉자의 집속점 근방 및 근거리에서의 음장 예⁽²⁸⁾를 Fig.2-19에 나타내었다. 빔 직경에서 계산값과 실험값(Hydro hon에 따른 측정값)이 거의 일치하고 있다. 레일리 적분에 따라 진동자의 미소요소로부터 원통파면⁽²⁹⁾이 출력되고 있어 음압을 모두 계산하였다.

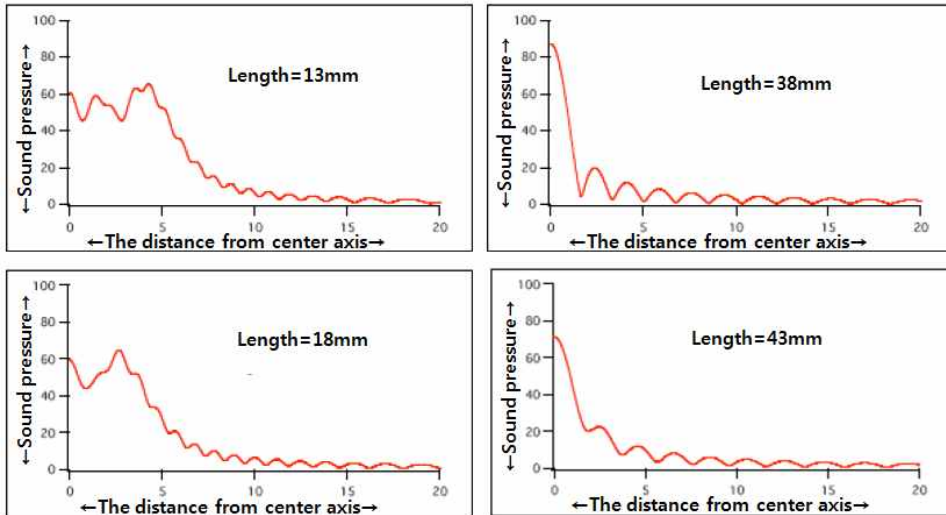


Fig.2-19 Application of near sound field from focus type probe

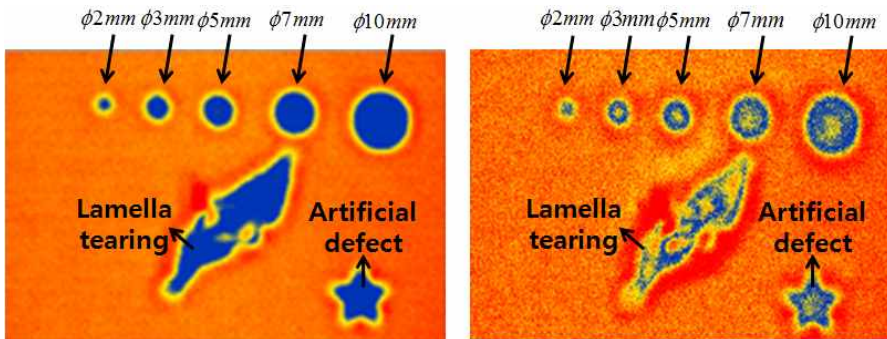
$$p = i\omega\rho \int_s \frac{e^{-ikr}}{r} ds \quad (2-10)$$

여기에서, ω : 각주파수, ρ : 재료밀도, S : 진동자면, r : 미소면적 ds 와 관측위치 거리이다.

나. 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT)의 일반 적용 실험

초음파 탐상을 수행하는데 있어서 투과법에 따라 점집속탐촉자⁽³⁰⁾를 이용한 탐상의 경우, 각 탐촉자 사이의 거리를 $L=72\sim 76[mm]$ 로 설정하여 송수신 탐촉자에 따른 거리특성을 구한 후, 이에 대한 최대 투과파⁽³¹⁾를 얻을 수 있다. Fig.2-20에 투과법으로 점집속탐촉자와 평면탐촉자를 사용했을 때의 화상 탐상결과를 비교하고

있다. 사용된 탐촉자는 점집속탐촉자(0.4K 20NR38)와 평면 탐촉자(0.4K7×10N)로 평면탐촉자는 진동자면적과 다른 것을 사용하였다. CFRP와 수신탐촉자의 거리는 3~4[mm]로 설정하고 송·수신 탐촉자 사이의 거리는 76[mm]로 하였다. 여기에서 사용된 CFRP는 중앙부에 충격에 따른 층간박리가 존재하는 시험편으로 화상에 따른 분해능 확인을 위해 원반과 성형수지⁽³⁵⁾를 시험편의 표면 위에 올려놓은 상태에서 화상스캔을 수행하였다.

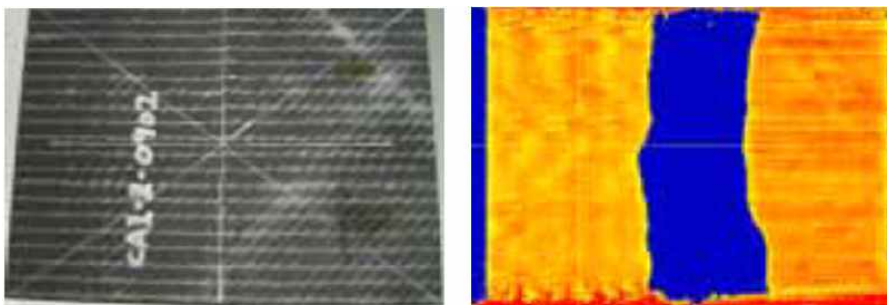


(a) Focus type probe

(b) Flat type probe

Fig.2-20 Comparison of image between point focus type probe and flat type probe

Fig.2-21에서는 두께 10[mm]의 CFRP의 VaRTM재에 존재하는 결함 층간박리 부분에 초음파를 투과시켜 화상탐상을 수행한 결과를 나타내었다. 초음파 투과율의 정도가 양호하여 층간박리부의 선명한 화상이 취득되었다.



(a) VaRTM specimen

(b) Image picture

Fig.2-21 Image of CFRP VaRTM specimen

CFRP 시험편에 1[mm]의 철이 고속으로 관통하는 경우에 관통철 주변의 박판의 거동 여부를 확인하기 위해 넓은 범위에서 화상탐상을 수행한 결과로 층간박리의 존재여부의 관찰이 가능하였다. 이에 따른 결과를 Fig.2-22에 나타내었다.

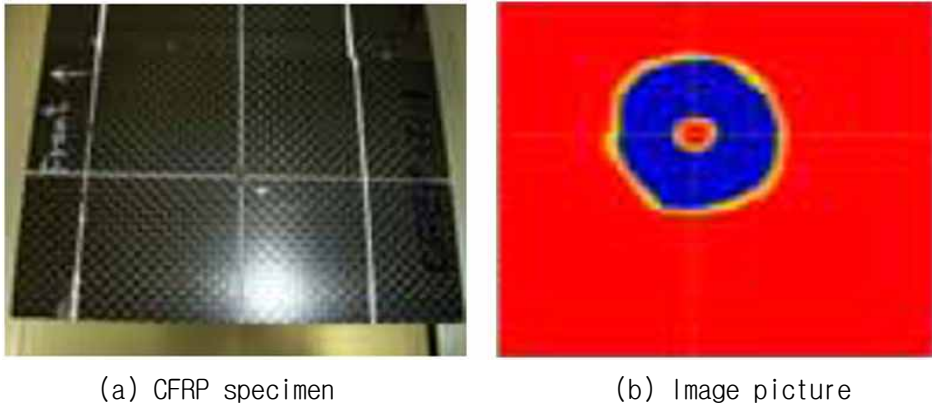
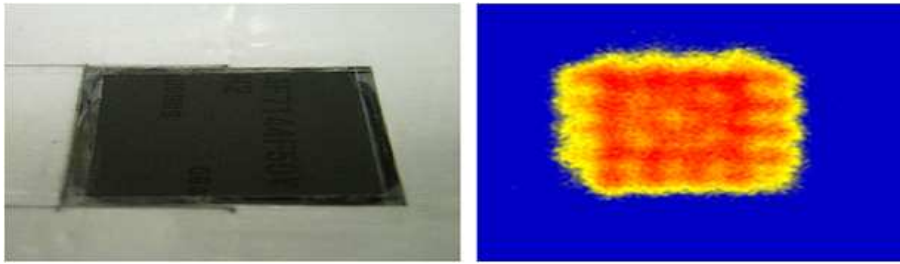
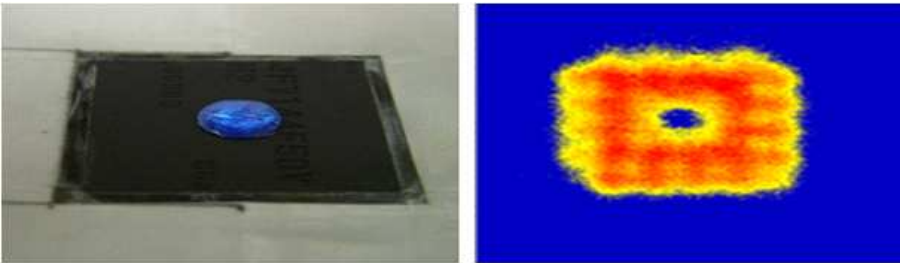


Fig.2-22 Image of CFRP specimen having through pierce hole

Fig.2-23(a)는 양품에 대한 IC칩 화상으로 초음파의 투과 정도는 양호함을 알 수 있다. Fig.2-23(b)는 박리를 가장하여 IC칩 위에 3[mm]의 원판상 수지를 둔 경우의 취득 화상을 나타내고 있는데 박리를 가장한 부분의 투과율이 낮아 청색 화상이 취득되었다.



(a) Normal IC chip



(b) Poor condition of IC chip

Fig.2-23 Comparison of image between normal IC chip and poor condition of IC chip

제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 적용

제 1 절 시험편

본 연구에 적용한 열전소자는 구조를 쉽게 파악 할 수 있는 일본 Z사 제조된 애폭시 실링 없는 냉각용 열전소자 199모델 이며, 열전소자의 외관 사이즈는 44×40×3.2[mm]이며 구조는 일반 열전냉각소자와 같다. 각 부분의 재질은 Table 3-1과 같다.

Table 3-1 Materials of thermoelectric module

Composition	Materials
Electrical Insulator	Al2O3 Ceramic
Electrical Conductor	99.9% Copper
p,n-Type Semiconductor	Bi2Te3 Alloy

시험편은 양품 시편 A, B, 불량품 시편 C, 인공결함 있는 시편 D로 구분한다.

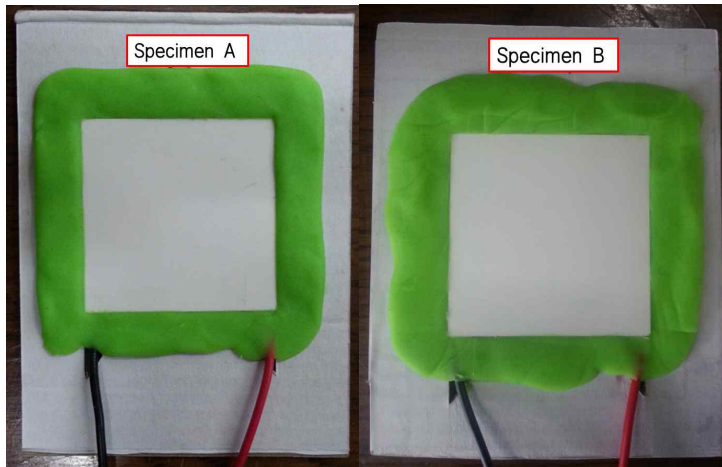
양품 A, B는 출하 검사 합격으로 판정된 199모델 제품이다. 탐상을 수행하기 위해 Fig.3-1과 같이 조건에 맞추어 마스킹지에 부착하였다. 마스킹지를 부착하는 것은 비접촉 공중 초음파 탐상 시 입사된 초음파가 시험편의 표면을 따라서 초음파가 방출되는 현상이 발생되어지며, 이는 투과율 손실이 발생되어 고출력 감도를 갖는 송신 부 초음파 프로브가 결함 신호를 검출할 수 없게 되어 진다⁽³⁷⁾.

따라서 열전소자 시험편의 표면을 따라 방출되어 지는 초음파 신호를 차단하기 위한 목적으로 마스킹지를 부착하고 시편의 주위와 경계부분을 클레이로 보강하였다. 마스킹지를 부착함으로써 고감도의 초음파 투과신호를 측정하여 내부 결함 검출을 용이할 수 있는 장점이 있는 것이다.

NAUT를 적용 가능여부를 검증 위한 양품 열전소자를 인공결함부를 만들어 불량 시편 C를 제작 하였다. 240℃ 고온 환경에서 양품 제품을 가동 시키고 약 200시간

경과 후 제품을 가동 하지 않았다. 이를 통해 열전소자 내부접합부분의 일부를 파괴하였다. 단 내부의 일부를 파괴한 부분은 육안으로 불량판정하기 어렵다 (Fig.3-2).

시편D는 시편A와 같은 양품을 이용하여 내부 전도체와 세라믹의 접합부분에 들뜸 결함을 인공적인 만들었다. 결함의 위치는 전자 현미경로 관찰 하며 Fig.3-3과 같이 보여 주고 있다.



(a) Specimen A (b) Specimen B

Fig.3-1 Thermoelectric module specimen A, B

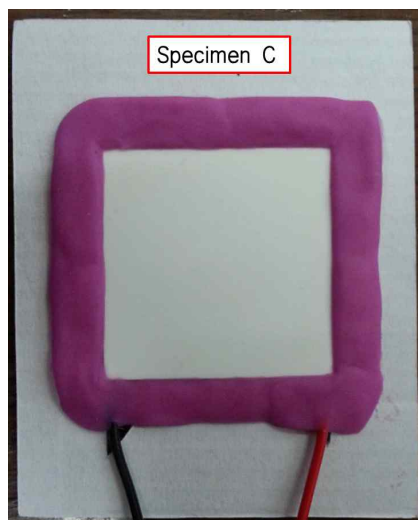
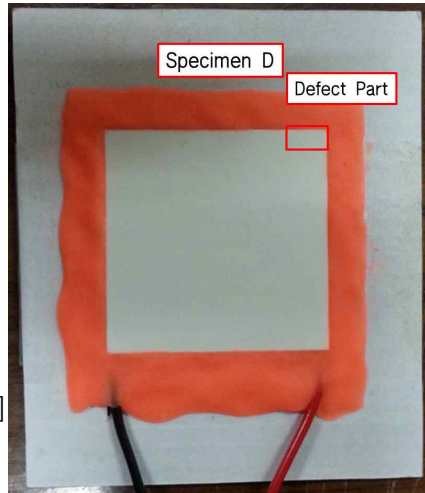
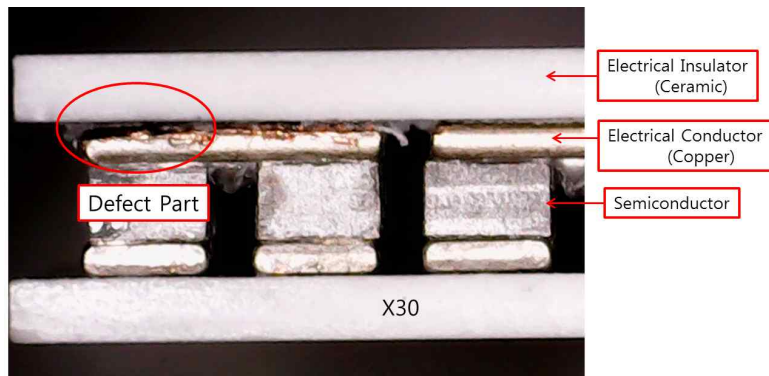


Fig.3-2 Thermoelectric module specimen C



(a) Photograph of specimen D



(b) Photograph of defect part by digital microscope

Fig.3-3 Thermoelectric module specimen D and defect part

제 2 절 열전소자의 내부결함 탐상 실험

1. 열전소자 비교 탐상 실험 및 고찰

실험 시, 비접촉 공중 자동 결함 scan 시스템을 이용한 결함 화상화 방법은 NI Controller 장치의 전원을 켜고 화상 S/W를 실행시킨 후 정밀스테이지 통신상태 설정, 디지털저 세팅, Pulse Counter 세팅, 측정 조건 설정값을 입력한다. 실행 프로그램을 통해 원점복귀, 기준위치 이동 등을 수행하여 결함 화상 탐상 이전의 조건과 일치시킨다. Pulser Receiver 설정 화면에서는 구형Burst 투과 신호를 A-Scope 로 검출하기 위해서 Gain Frequency, Voltage, Wave Number, LPF, HPF, 등을 조정하고 측정 범위 설정 화면에서 측정 원점, 대각점, pitch, 속도 등을 설정하고 위와 같은 조건이 충족되었을 때 화상 스캔을 수행하였다. 이와 같이 scan 이 시작되면 송신 전압, 주파수, 파수, 화상 수정위치, 수평시간, gate 위치를 통해 화상결과를 파악한 후 최종 화상을 취득하고 Fig.3-4에 화상탐상 수행 과정을 나타내었다⁽³⁶⁾.

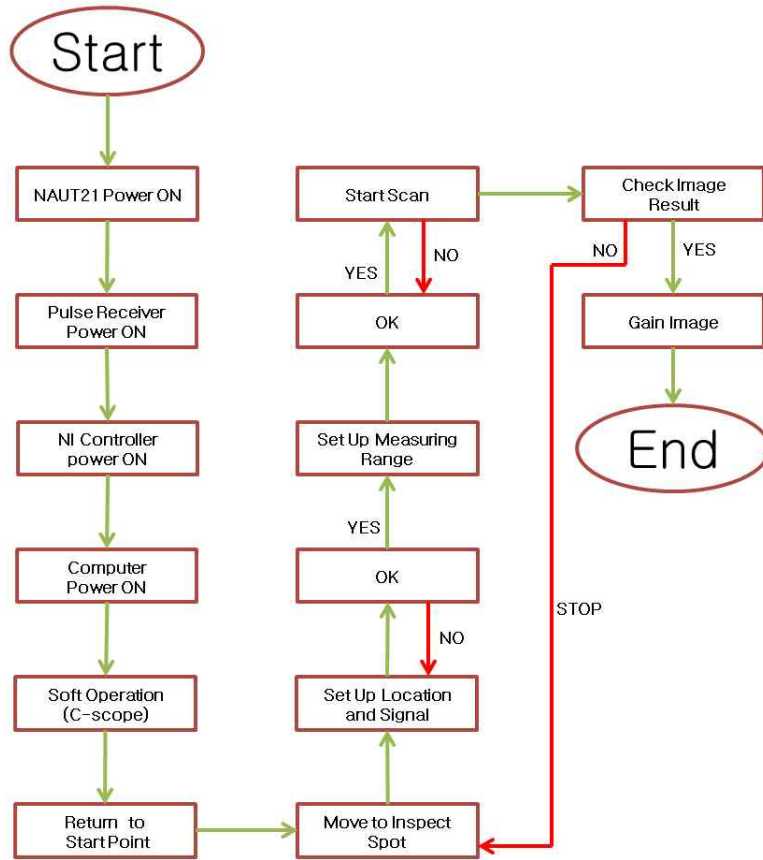


Fig.3-4 Auto image inspection program execution

또한 측정 범위 설정 시 Measuring Start Point, Measuring Opposite angle point, Measuring Pitch, Measuring Velocity로 설정 하였으며 탐상 이미지 결과 확인 시 Transmission Voltage, Transmission Frequency, Transmission Wave Count, Gain, Image Revising Location, Horizontal Time, Gate Location 로 확인 하였다.

화상탐상 수행에 앞서서 Measure Range, Gain 등과 같은 화상탐상조건⁽³⁰⁾을 정하였으며, 이를 Table 3-2에 제시하였다. Probe는 선집속탐촉자 0.4K20N R50를 사용하였고 초음파 집속 거리를 96[mm]로 설정 하여 송수신 탐촉자에 따른 거리특성을 구한 후, 이에 대한 최대 투과파를 얻을 수 있다. 선명한 화상 취득 위해 Scanning pitch는 0.1[mm], Scanning speed는 10[mm/sec]로 설정 하였다.

Fig.3-5에서는 자동스캔 화상탐상장비와 화상취득을 위한 시험편을 스캔하고 있는 상황을 보여주고 있다.

Table 3-2 Image inspection condition of thermoelectric module specimen A,B,C

Specimen	A	B	C
Inspection condition			
Gain(dB)	21.3	21.3	20.3
Probe	0.4K20N R50		
TX Frequency (kHz)	400		
Scanning pitch	0.1 mm		
Scanning speed	10 mm/sec		

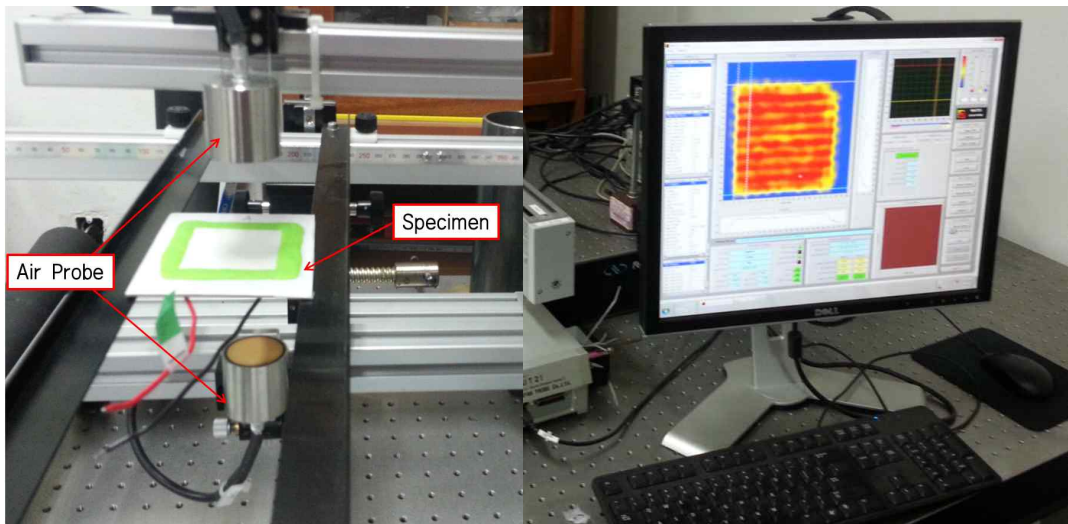


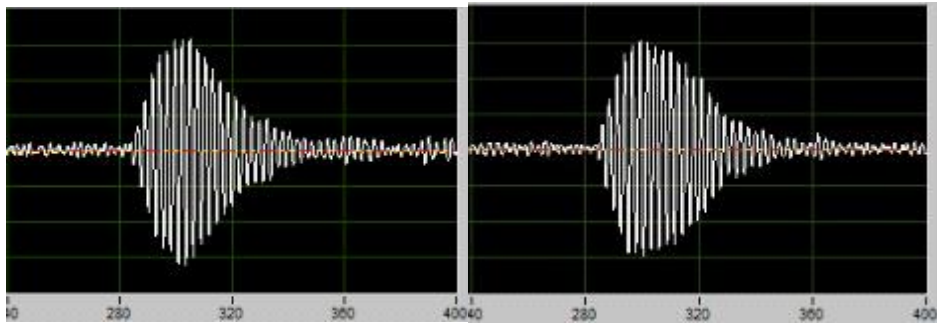
Fig.3-5 Auto image inspection system

가. 투과율 분석

Fig.3-6는 시편 A, B, C의 초음파 투과 파형을 비교한 것이다. 시편 A, B는 양품으로 초음파 투과율이 높은 것으로 확인되었고 불량 시편C과 양품 시편 A, B 비해 초음파의 투과율이 현저히 낮아지는 것을 확인 하였다. 이는 시편 C를 고온 가동 후 내부에 접합부분을 파괴 하기 때문에 생성된 공기층에 초음파를 투과하지

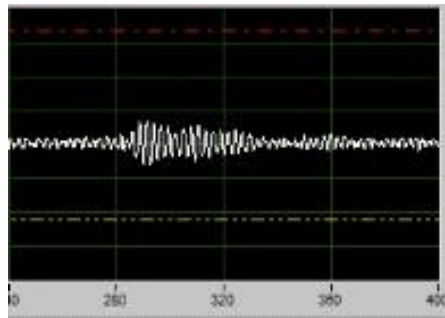
못하는 것으로 판단된다. 이를 이용한 시편C의 내부에 결함이 있는 것을 판단 할 수 있다.

즉, 열전소자내부 결함 유무는 초음파의 투과율로 판단이 가능하다.



(a) Specimen A

(b) Specimen B

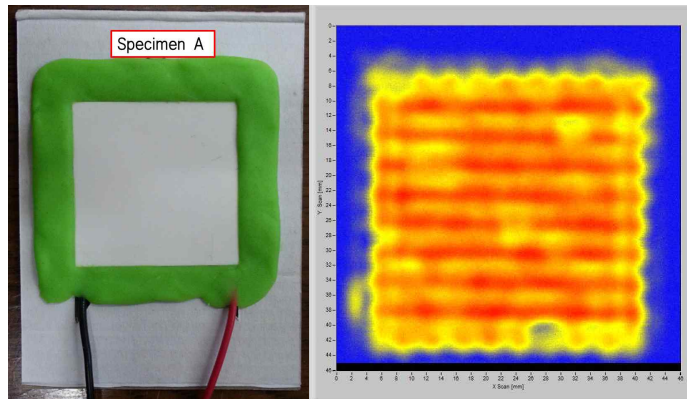


(c) Specimen C

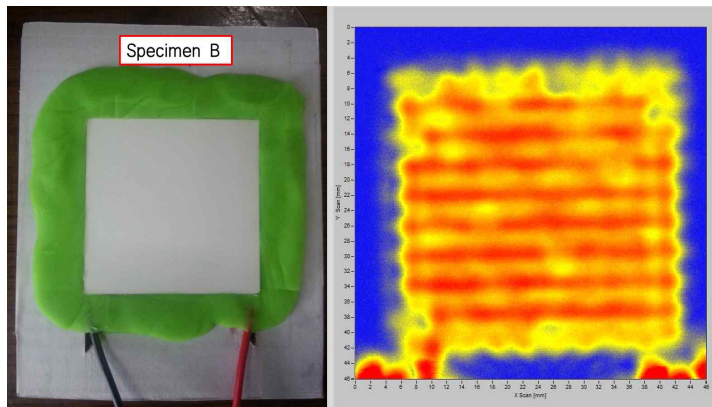
Fig.3-6 Comparison of the waveform depending on the presence of defects

나. 화상 결과 분석(C-Scan)

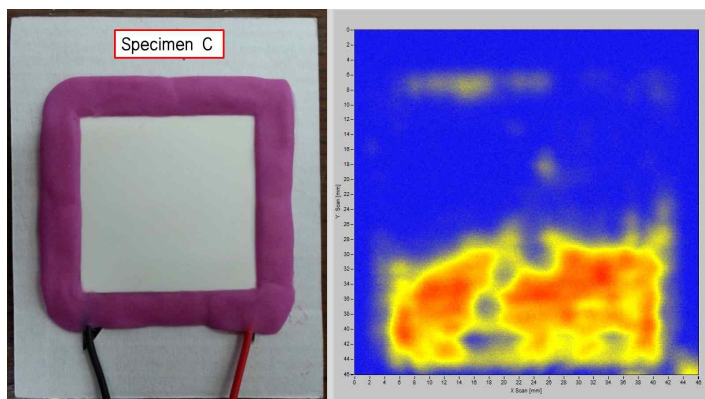
각 투과율은 취득C-Scan 화상에 따른 컬러를 통해 더 빠르고 정확한 결과값이 비교 가능하다. Fig.3-7는 자동 스캔 장치를 사용하여 취득한 열전소자 시험편A, B, C의 화상탐상 결과를 나타낸 것이다.



(a) Specimen A



(b) Specimen B



(c) Specimen C

Fig.3-7 Image inspection result of specimen A, B, C

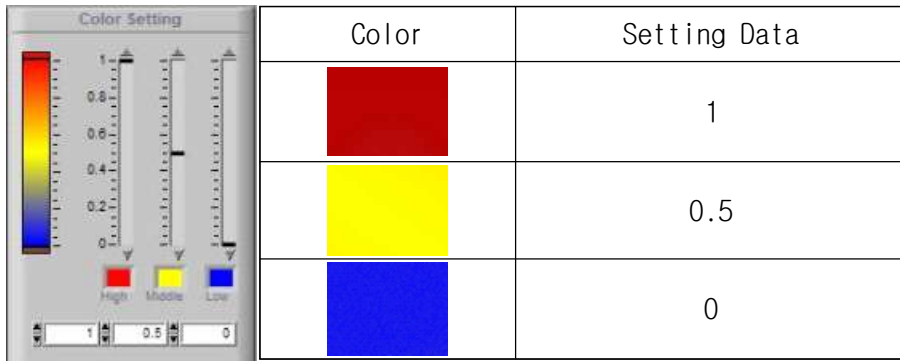


Fig.3-8 Color setting

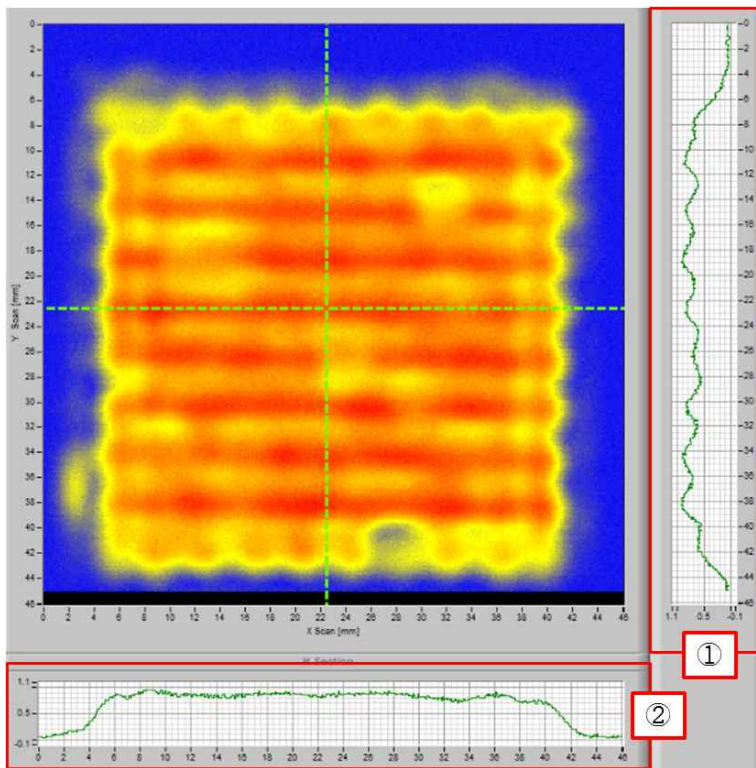
A, B시험편의 화상결과의 각 부분은 컬러로 구분 가능하며 컬러는 S/W 설정 값을 따라 크게 적색, 청색, 황색으로 나뉘어진다. 초음파 투과 상태로 보면 투과율이 높게 스캔된 곳은 적색 화상으로 표시되고 투과율이 낮게 스캔된 곳은 청색이다 (Fig.3-8). 즉 열전소자의 내부 접합부분은 적색으로 나타난다. 화상의 적색부분을 보면 열전소자 내부의 접합부분 배열을 확인 할 수 있다. 본 실험에 적용된 열전소자는 고성능 제품으로써 내부 n, p형 열전재료의 수량이 많고 열전재료 배열시 각 부분에 간격이 좁기 때문에 접합부분을 제외하고 대부분 황색으로 보인다. 단 화상 결과를 통해 시험편 A, B는 같은 양품이지만 컬러 분포는 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 즉 내부 접합 상태는 같지 않는 것을 판단 할 수 있다.

C시험편의 화상결과를 보면 대부분 청색으로 보였다. A, B시험편처럼 내부 접합부분 배열이 없는 것을 확인 하였고, 이를 통해 장시간 고온가열 후에 열전소자 내부의 용접부분이 이탈되고 결함이 생긴다는 것으로 보며 내부 접합 불량이라고 볼 수 있다.

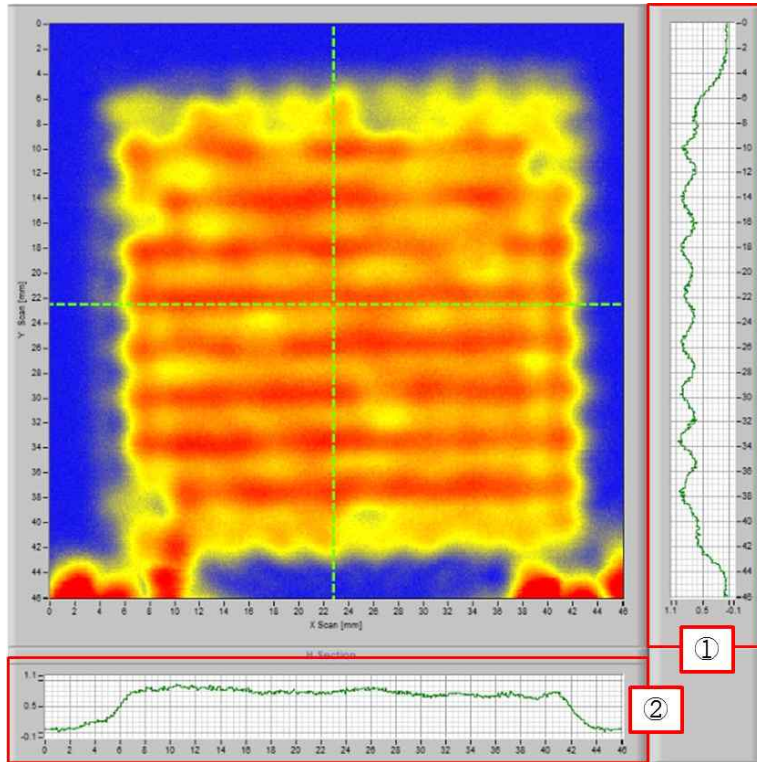
Fig.3-8과 같이 청색부터 적색 까지를 0에서 1까지 수치로 정의 하면, 투과 량이 가장 높은 수치는 1이고, 투과 량이 가장 낮은 수치는 0이고 중간 수치는 0.5이다. 이를 통하여 초음파의 투과상태는 수치적으로 표시 할 수 있으며 이 수치를 통해 화상결과에 각 부분의 초음파 투과상태와 위치를 정확히 파악 할 수 있다.

즉, 시험편A의 측정 범위는 46×46[mm] 이며, X축에 22.5[mm] 기준으로 Y축에 22.5[mm] 기준으로 분석하면 Fig.3-9(a)와 같은 결과가 나타난다. Fig.3-9(a)에 있는 초록색 점선은 X축, Y축의 기준선이며 이때 그래프①은 X축에 22.5[mm] 위치에 초음파의 투과 량이 최고 부분은 0.9로 나타나고 최저부분은 0 이고 황색부

분은 약 0.6을 나타낸다. 그래프②는 Y축에 22.5[mm] 위치에 초음파의 투과량이 가장 높은 부분은 1을 나타내고 투과량이 가장 적은 부분은 0을 나타낸다. 화상결과 중 주변에 있는 청색부분은 초음파가 투과 되지 않은 부분이며, 투과되지 않는 골판지는 투과 량이 0이다. 그래프①을 통해 X축 22.5[mm]위치에서 Y축은 0 [mm]에서 46[mm]까지 수치 변화를 볼 수 있으며 초음파 투과량을 파악 할 수 있다. 그래프의 높은 부분은 열전소자 내부 접합부분으로 스캔 가능하다. 그래프 ②를 통해 Y축 22.5[mm]위치에서 X축은 0[mm]에서 46[mm]까지의 초음파 투과량을 파악 할 수 있다.



(a) Specimen A



(b) Specimen B

Fig.3-9 Image inspection result with color waveform(specimen A, B)

시험편 B의 초음파 투과량은 Fig.3-9(b)와 같이 나타난다. 측정 범위는 46×46 [mm] 이며, X축에 22.5[mm]기준으로, Y축에 22.5[mm] 기준으로 분석하면 시험편 A와 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

같은 방법으로 시험편 C 각 부분의 초음파 투과량 그래프는 Fig.3-10와 같이 나타난다. 표시된 초록색 기준선은 X축에 23.4[mm], Y축에 36.7[mm]이다. 그래프①을 통해 Y축에 0[mm]~26[mm] 사이에 초음파 투과량이 0으로 판단 가능하다. 그래프②와 시험편 A, B의 그래프②를 비교해보면 시험편 C의 그래프 변화가 불규칙함을 볼 수 있다. 또한 X축 방향이 17[mm]위치의 투과량이 0.3임을 확인 할 수 있고, 그래프①, ②를 통해 시험편 C의 내부에 결함이 있는 것을 확인 하였다. 즉 고온 가열에 의해 파괴된 시험편 C는 내부에 결함이 존재 한다는 것을 확인 할 수 있다.

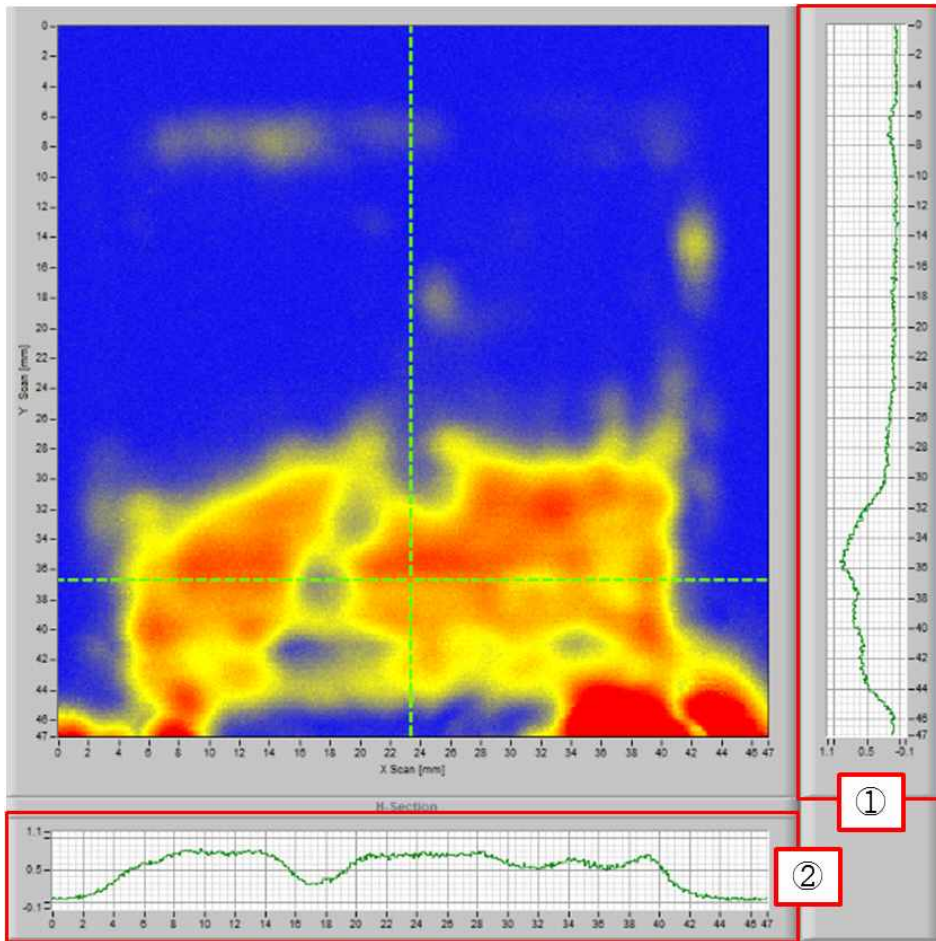


Fig.3-10 Image inspection result with color waveform(specimen C)

2. 인공결함 시험편의 내부결함 검출 실험 및 고찰

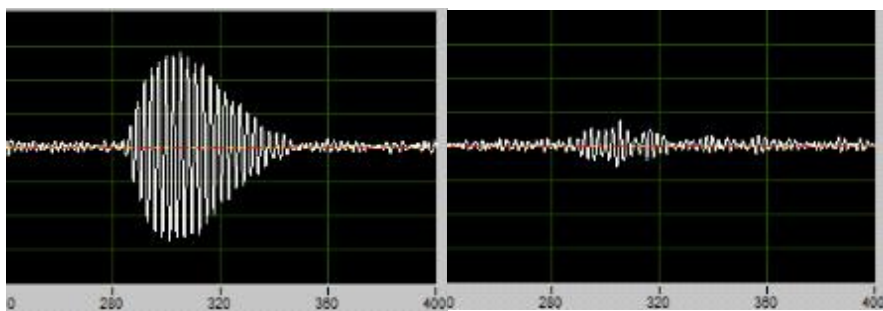
인공결함 시험편 NAUT 화상탐상 수행에 앞서서 Averaging count, Gain, Trigger mode 등과 같은 화상탐상조건⁽³⁰⁾을 정하였으며, 이를 Table 3-3에 제시하였다.

Table 3-3 Image inspecting condition of thermoelectric module specimen D

Specimen	D
Inspection condition	
Gain(dB)	21.0
Probe	0.4K20N R50
TX Frequency (kHz)	400
Scanning pitch	0.1 [mm]
Scanning speed	10 [mm/sec]

가. 투과율 분석

Fig.3-11은 시험편 D에 결함이 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분의 파형결과를 비교한 것이다. 결함 층간박리로 인해 생성된 공기층에 초음파를 투과시키면 결함이 존재하지 않는 부분에 비해 초음파의 투과율이 현저히 낮아지기 때문에 이를 통해 결함 검출이 가능하다.



(a) Non defect part

(b) Defect part

Fig.3-11 Comparison of the waveform on the presence of defect

나. 화상 결과 분석(C-Scan)

Fig.3-12는 자동 스캔 장치를 사용하여 취득한 열전소자 시험편D의 C-Scan 화상 결과를 나타낸 것이다. 시험편 D의 각 부분에 따른 컬러 상태로 보아 내부 구조를 분석 할 수 있다. 시편에 결함이 있는 부분이 청색으로 나타난 것을 확인 할 수 있다.

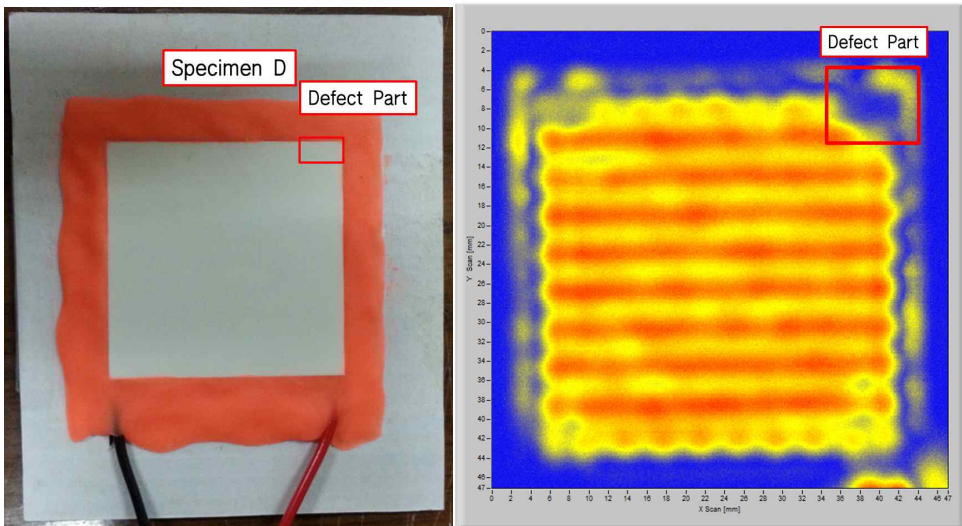
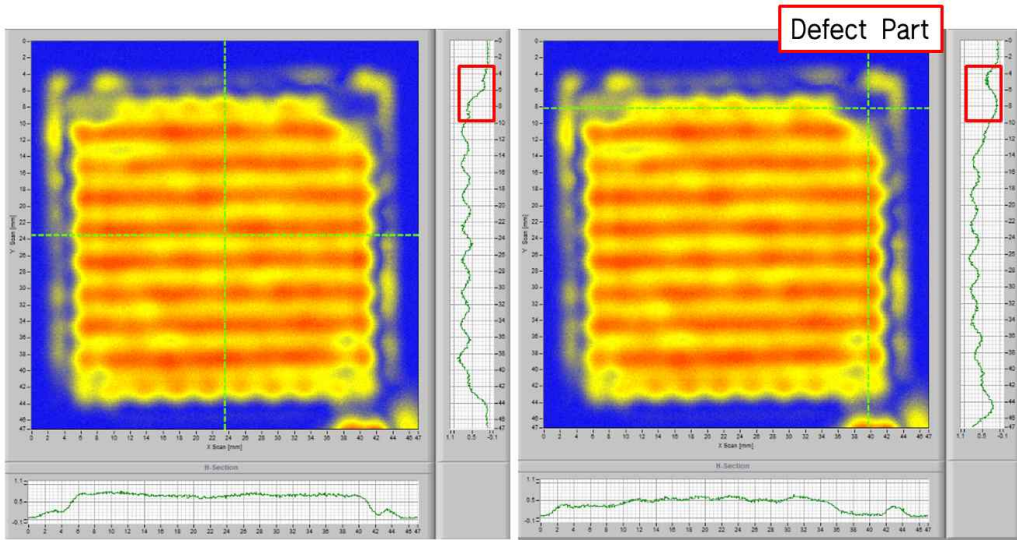


Fig.3-12 Image inspection result of specimen D

시편D의 측정 범위는 $47 \times 47 [mm]$ 이며, X축에 $23.5 [mm]$ 을 기준으로, Y축에 $23.5 [mm]$ 기준으로 분석하면 Fig.3-13와 같이 결과가 나타난다. 이 결과는 시편A의 결과와 일치 하여 접합이 양호하다고 판단 할 수 있다. 단 결함이 있는 부분과 비교 하면 결함이 있는 부분의 X축 방향, Y축 방향에 초음파 투과 량이 약 0으로 확인 되며, 결함이 있는 부분에 위치와 크기는 Fig.3-14과 같이 나타난다.

Fig.3-14에 있는 Area Specification Cursor을 통해 인공결함의 크기는 약 $5.8 [mm] \times 4.1 [mm]$, 인공결함의 면적은 약 $23.7 [mm^2]$ 임을 확인 하였다. 화상 탐상 전체 면적은 $2209.0 [mm^2]$ 이며 인공결함의 크기 비율은 1.07%로 확인되며, 또한 화상 결과를 통해 좌표 (36, 10)과 좌표(42, 6) 사이에 결함이 존재 하는 것을 판단 할 수 있다.



(a) Non defect part

(b) Defect part

Fig.3-13 Comparison of the color waveform on the presence of defect part

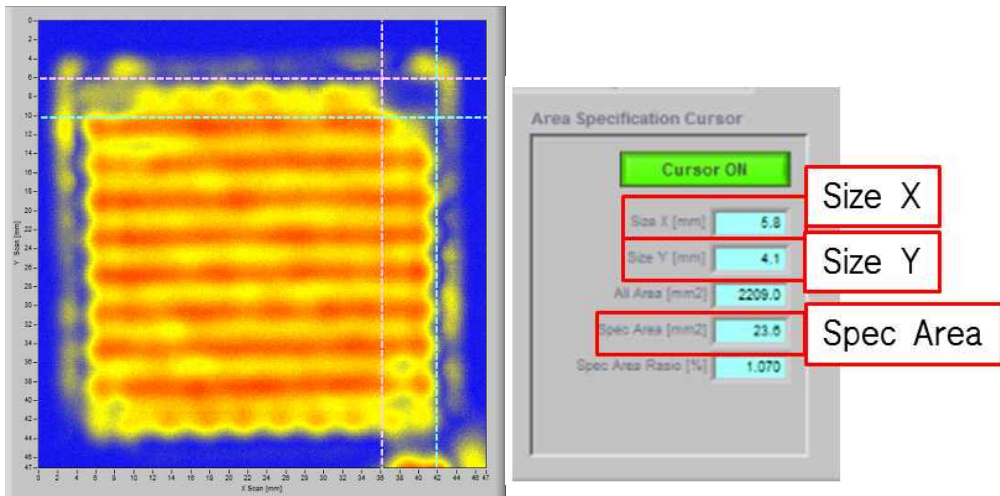


Fig.3-14 Image inspection result of the defect's size and position

제 4 장 열전소자 내부결함과 열성능의 관계 분석

제 1 절 실험 개요 및 실험 장치 구성

제 2장에서 서술한 열전소자의 열성능 분석으로 열전소자의 냉각성능은 ΔT 로 직접 표현 할 수 있고 ΔT 클수록 열전냉각소자의 냉각성능이 높아진다. 그래서 결함 없는 열전소자와 인공결함 만들어진 열전소자의 ΔT 를 비교하여 열전소자 내부의 결함과 냉각성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 실험 하였다⁽³⁴⁾.

열전소자 작동 시 ΔT 를 측정하기 위해 열전소자와 Heat Sink등 조립 하였고 Fig.4-1와 같이 실험 구성하여 실험을 수행하였다. 열전소자 냉각 표면 온도와 Heat Sink부의 온도를 Thermometer Data Logger로 수집 하고 ΔT 를 구한다. 이를 통해 ΔT 를 비교하였으며 열전소자 내부의 결함은 열전냉각성능에 영향을 미치는 정도를 확인 할 수 있다.

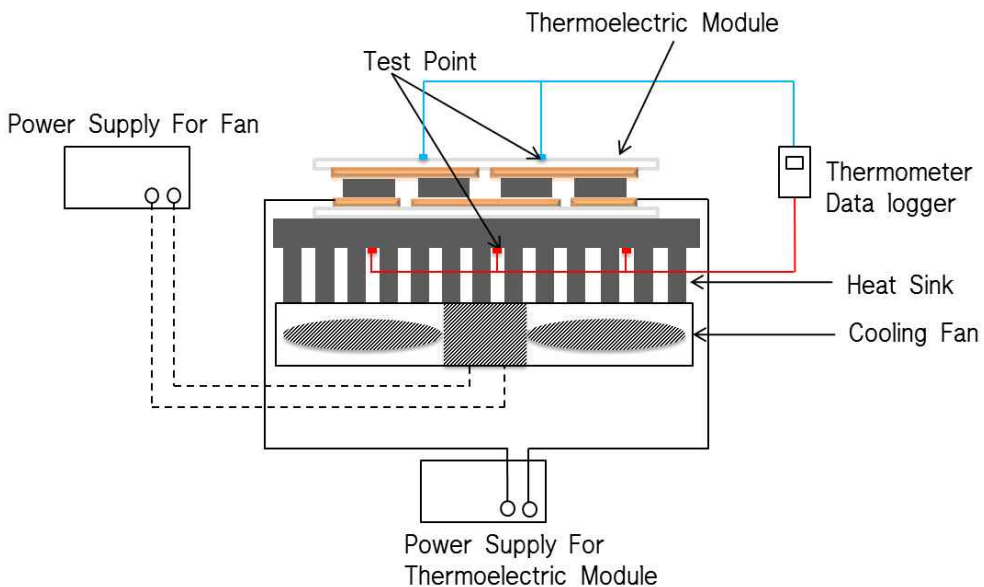


Fig.4-1 Schematic diagram

Fig.4-1은 냉각성능실험 구성을 보여주는 것으로, 열전소자(Thermoelectric module), 방열판(Heat Sink)과 냉각팬(Cooling Fan), 전원 공급 장치, 온도 측정 장치로 구성 되어 있다.

본 실험에 사용한 열전소자 시험편은 앞장에서 사용했던 시험편 A, B를 사용 하였다. 또한 열전소자 내부결함과 열성능 관계를 분석 하기위해 시험편 A를 이용하여 시험편D와 같은 인공결함 주었고 인공결함 시험편E를 제작 하였다. 단 같은 시험편에 인공결함을 만들고 전후의 온도 데이터를 비교 하기위해 시험편A의 온도측정완료 후에 인공결함을 제작 하였다. 열전소자의 기본 제원은 Table 4-1와 같다.

Table 4-1 Performance specifications of thermoelectric module

Specifications	Value
Size	40X44X3.2 [mm]
I_{max}	11.5 [A]
V_{max}	24.6 [V]
ΔT_{max}	70°C

열전소자 발열부에서 발생하는 열을 제어하지 못하면 열이 열전소자 내부로 전도 되어 소자가 파괴될 문제가 있어 열전소자 발열부의 온도제어는 매우 중요하며 이를 위해 방열판(Heat sink)과 냉각팬(Cooling fan)을 사용하였다. Fig.4-2에서 보는 바와 같이 ,방열판의 기본 제원은 Table 4-2에 정리하여 나타내었다. 방열판(Heat Sink)은 열전소자의 발열부에서 발생하는 열을 방열판 전체로 분산시켜 발열부의 냉각이 더 쉽게 이루어지도록 하기 위하여 열전소자와 Heat Sink 사이에 그리스를 도포하고 방열판에 장착하였다.

Table 4-2 Performance specifications of heat sink

Specifications	Value
Size	170X120X35 [mm]
Material	Al-alloy
Type	Fin

냉각팬은 열전소자 발열부의 냉각을 향상시키고 발열부의 온도를 일정하게 유지하기 위해 부착하였으며, 이러한 발열부 제어를 통해 열전소자 냉각부의 온도를 일정하게 유지시켜 측정부위에 냉각영역을 형성할 수 있도록 하였다. Fig.4-2와 같이 Heat Sink과 Cooling fan(12V,0.25A)의 실제 조립 형상을 보여주고 있다.

열전소자에 공급되는 전압은 열전소자의 최대허용전압 보다 낮은 12V로 설정하였다. 이는 열전소자 발열부에서 급속하게 발생하는 열이 열전소자에 미치는 영향을 최소화하고, 또한 일정하게 최저 온도를 유지하기 위하여 직류 전원 공급장치를 통해 12V 정전압을 열전소자에 공급하였다.



Fig.4-2 Photograph of cooling fan and heat sink Assy

온도 측정 및 수집 장치는 YOKOGAWA사 XL100모델 Thermometer Data logger를 사용하였으며, 냉각면과 방열면의 온도를 정확하게 측정하기 위해 측정 Point를 여러 위치로 선정 하였으며 열전소자 냉각면의 온도를 측정하기 위해 Fig.4-3와 같이 두 Point로 선정 하였고 열전소자 방열면의 온도를 측정 하기위해 Fig.4-4와 같이 방열판에 셋 Point로 선정 하였다. 온도 측정 부위에 온도센서를 붙여 넣었으며 Fig.4-5은 실험의 실제 구성을 보여주고 있다.

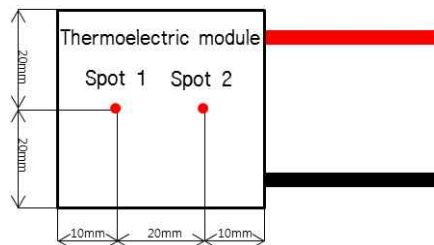


Fig.4-3 Schematic diagram of temperature measurement points (Cold Side)

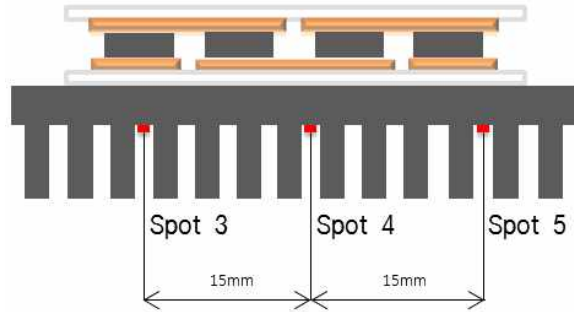


Fig.4-4 Schematic diagram of temperature measurement points (Hot Side)

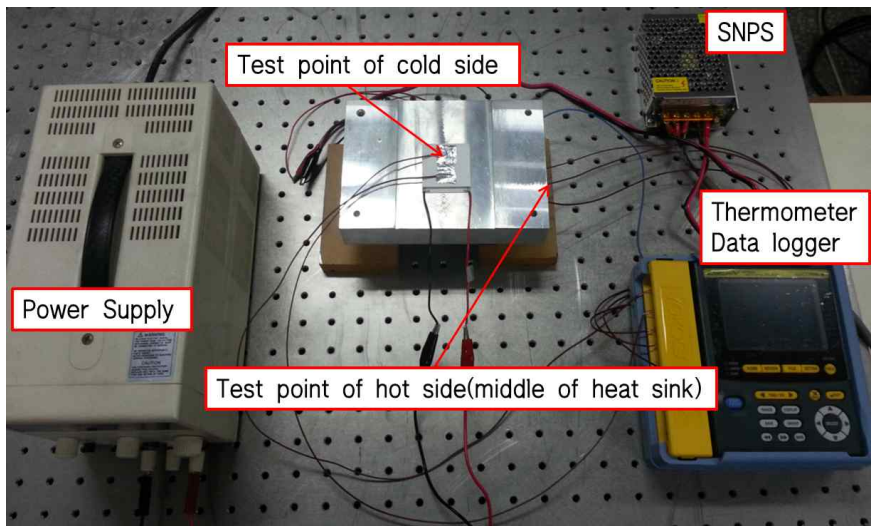


Fig.4-5 Photograph of experiment apparatus

실험 시 열전소자 방열부의 열을 빠른 시간에 방출 시키기 위해 Cooling Fan을 먼저 작동 시키고 10초 후에 열전소자에 전압을 인가하고 작동 시켰으며 Thermometer Data logger로 온도 측정 및 초당 단위로 데이터를 수집하였다. Thermometer Data logger를 통해 냉각면과 방열면 온도를 일정한 수준으로 유지할 때 까지 온도를 기록하였으며 시험편 A, B는 같은 측정 방법으로 측정하고 데이터를 수집하였다. 시험편 A, B 측정 완료 후 시험편 A를 이용하여 시험편D와 같은 인공결함 주었고 인공결함 시험편E를 제작 하였다. 시험편E는 위와 같은 측정 방법으로 측정하고 데이터를 수집하였다.

제 2 절 시험편의 서머커플 측정실험 및 고찰

1. 온도 측정실험 및 고찰

열전소자에 전압을 공급하면 열전현상(Peltier effect)에 의해 한쪽 면에서는 발열이 다른 한쪽 면에서는 냉각이 일어나게 된다. 열전소자의 발열이 일어나는 발열부에서 급속하게 발생하는 고온의 열원을 제어하기 위해 방열판과 냉각팬을 사용하였으며, 이러한 방열판과 냉각팬에 의해 발열부에서 발생하는 열원을 일정하게 유지시켜 줌으로써, 열전소자의 다른 한쪽 면에 냉각면이 형성됨과 동시에 일정한 냉각영역을 이루는 열전달 프로세스가 형성된다.

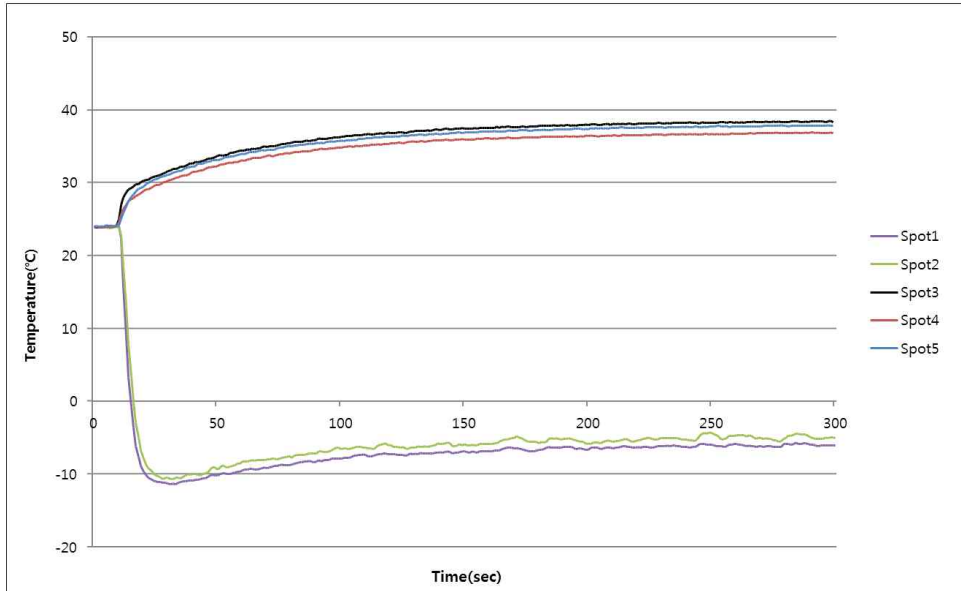
온도 측정 데이터는 실험 시작부터 일정한 온도 유지 할 때 까지 약 300초 동안 수집 하였다. Fig. 4-6은 시편 A, B, E에 12[V]의 정전압을 공급하고 냉각팬에 12[V]의 전압을 공급하였을 경우 냉각면에 있는 측정 포인트 Spot1,Spot2과 방열면에 부착한 방열판에 있는 측정 포인트 Spot3,Spot4,Spot5 일정한 온도 유지될 때 까지 약 300초 동안의 온도 측정결과를 나타나고 있다.

Fig. 4-6에 시편 A, B, E의 온도 측정 결과에서 보는 바와 같이, 열전소자를 작동 시킨 후 단시간에 냉각면 온도가 급격하게 낮아졌으며 방열면 온도가 상승 하였다. 약 100초 이후부터는 냉각면과 방열면의 온도가 일정하게 유지되었다.

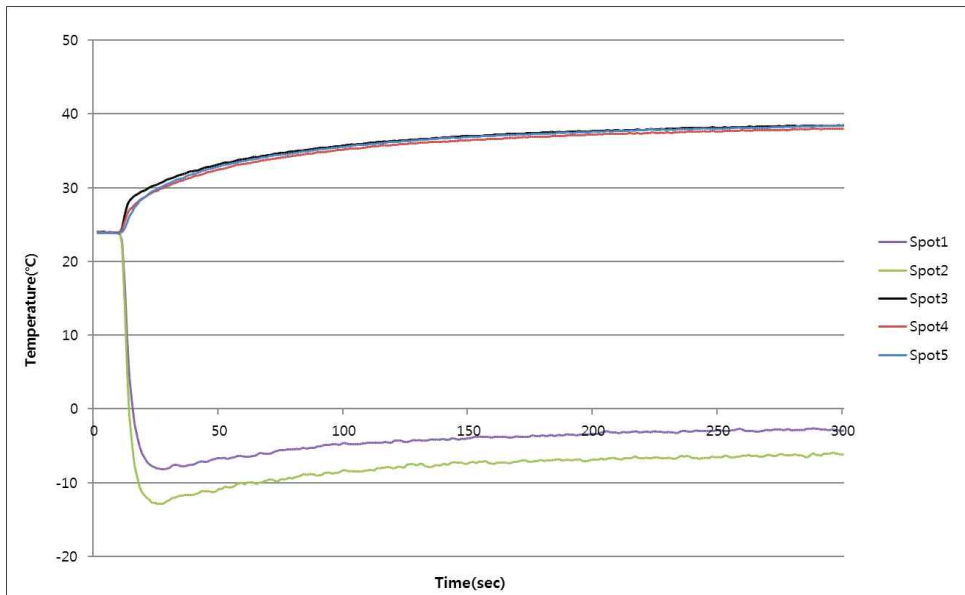
열전소자의 발열부에서 발생하는 고온의 열원을 제어하기 위해 사용한 방열판과 냉각팬에 의해 발열부가 일정한온도로 유지되며, 열전소자의 발열부에서 발생한 열원의 일부가 열전소자 내부를 구성하는 반도체와 열전소자의 표면재료인 세라믹을 통해 열전소자의 냉각부로 전도 되면서 발열부와 냉각부 사이의 열교환에 의한 열적평형 상태가 구성되어 열전달 프로세스가 형성되며, 이로 인해 열전소자의 방열면과 냉각면에서 급격하게 온도가 변동하다가 일정시간 이후 온도가 일정하게 유지되는 것이다.

또한 같은 시험편의 방열면과 냉각면에서 측정위치에 따라 온도변화가 같지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 4-6(a)은 보는 바와 같이 시험편 A을 일정한 온도로 유지한 후에 방열면과 냉각면에 있는 측정 포인트 온도를 비교해보면 약 1°C의 온도차를 확인할 수 있었다. 시험편 B의 냉각면에 약4°C의 온도차를 확인할 수 있었다. 시험편 E의 냉각면에 약 2°C의 온도차를 확인할 수 있었으며 ΔT 비교 분석

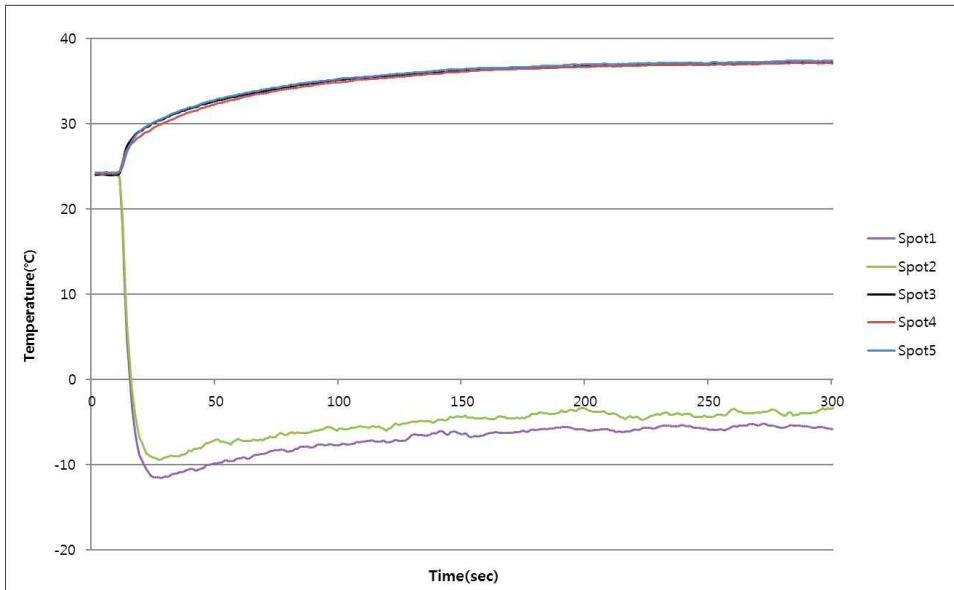
시 오차를 최소화 시키기 위해 방열면과 냉각면의 온도는 지정된 측정 포인트에 측정된 온도의 평균값으로 계산하고 비교 하였다.



(a) Temperature distribution of specimen A



(b) Temperature distribution of specimen B



(c) Temperature distribution of specimen E

Fig. 4-6 Temperature distribution of specimen A, B, E

수집한 데이터는 평균값으로 계산하여 냉각면과 방열면의 추산온도 값을 얻을 수 있다. Fig. 4-7은 열전소자 시험편 A, B에 12[V]의 정전압을 공급하고 냉각팬에 12[V]의 전압을 공급하였을 경우, 냉각면에서 발생하는 평균온도값 및 방열면에서 발생하는 평균온도값을 정리한 결과이다.

Fig.4-7을 통해 시험편A 작동시킨 후 냉각면에 약 20초 동안 급격하게 온도가 낮아졌으며 최저온도는 약 -11°C 에 도달되고 이때 방열면의 최고온도는 31.1°C 에 도달 하였으며 약 200초 이후 -5.8°C 에 유지 하였고 이때 방열면의 최고 온도는 37.4°C 에 도달 하였다. 시험편B의 냉각면에 약 20초 동안 급격하게 온도가 낮아졌으며 최저온도는 약 -10.4°C 에 도달되고 이때 방열면의 최고온도는 30.3°C 에 도달 되었다. 약 200초 이후 -4.4°C 에 유지 되었고 이때 방열면의 최고 온도는 38.1°C 에 도달 되었다.

시험편 A, B는 같은 양품으로써 동일 실험 조건에서 냉각면의 최저온도는 약 0.6°C 차이가 있고 이때의 방열면의 최고 온도는 약 0.8°C 차이가 있는 것을 확인 하였다. 이를 통해 같은 재료로 같은 공정에서 제작된 열전소자를 작동 시 온도변화 차이가 있는 것을 추측 할 수 있다.

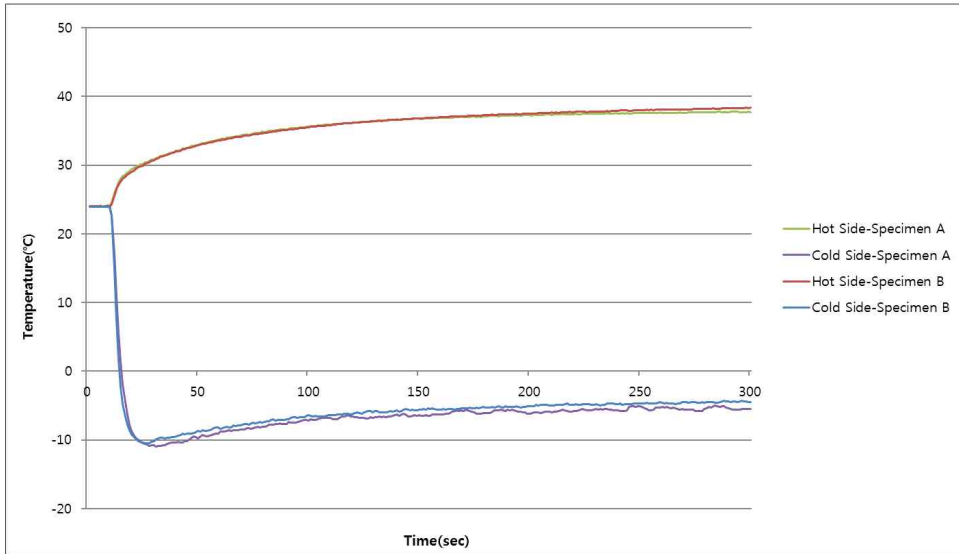


Fig.4-7 Temperature distribution of specimen A, B

Fig.4-8은 열전소자 시험편 A, E에 12[V]의 정전압을 공급하고 냉각팬에 12[V]의 전압을 공급했을 경우, 냉각면에서 발생하는 온도 평균값 및 방열면에서 발생하는 온도평균값을 정리한 결과이다.

Fig.4-8을 통해 시험편E를 작동시킨 후 냉각면에 약 20초 동안 급격하게 온도가 낮아졌으며 최저온도는 약 -10.3°C에 도달되고 이때 방열면의 최고온도는 30.1°C에 도달 되었으며 약 200초 이후 -4.1°C에 유지 하였고 이때 방열면의 최고 온도는 37.2°C에 도달 되었다.

인공결함을 만든 전/후 즉 시험편A, E의 온도 변화를 비교 해보면 시험편A보다 시험편E의 냉각면 최저온도는 0.7°C 떨어지는 것을 확인 할 수 있다.

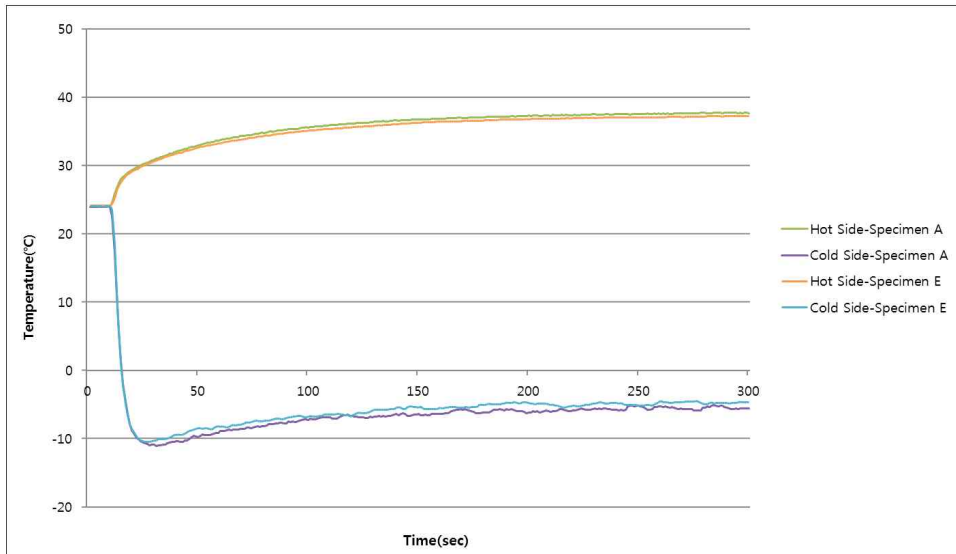


Fig.4-8 Temperature distribution of specimen A, E

2. 온도차 비교 분석

수집된 온도변화 데이터를 이용하여 온도차 계산공식 $\Delta T = |T_h| + |T_c|$ 로 계산 정리하고 Fig.4-9은 시험편A, B의 온도차 ΔT 변화 결과를 나타낸다.

Fig.4-9을 통해 시험편A, B를 작동 시킨 후 약 15초 동안 급격하게 온도차가 낮아진 후에 다시 증가하였다. 이는 열전소자 냉각면의 온도가 떨어지는 것에 따라서 ΔT 가 감소하는 것이다. 시험편A의 경우 약 50초 후에 ΔT 는 42.8°C까지 도달하였고 계속 42.8°C을 유지 하였다. 시험편B의 경우 약 80초 후에 ΔT 는 42.3°C까지 도달하였고 계속 유지 하였다.

이를 통해 같은 재료로 제작된 열전소자의 ΔT 가 약 0.5°C의 차이가 있는 것을 확인 되었으며, 이는 열전효율에 성능이 차이가 있다고 볼 수 있다. ΔT 차이의 근본원인은 식(2-18)을 통해 재료의 성능지수에 관련이 있으며, 또한 앞장에서 설명했듯이 초음파 탐상 실험 시 시험편A, B의 실험 결과를 보면 ΔT 차이의 원인이 내부접합상태와 관련 있다고 판단된다.

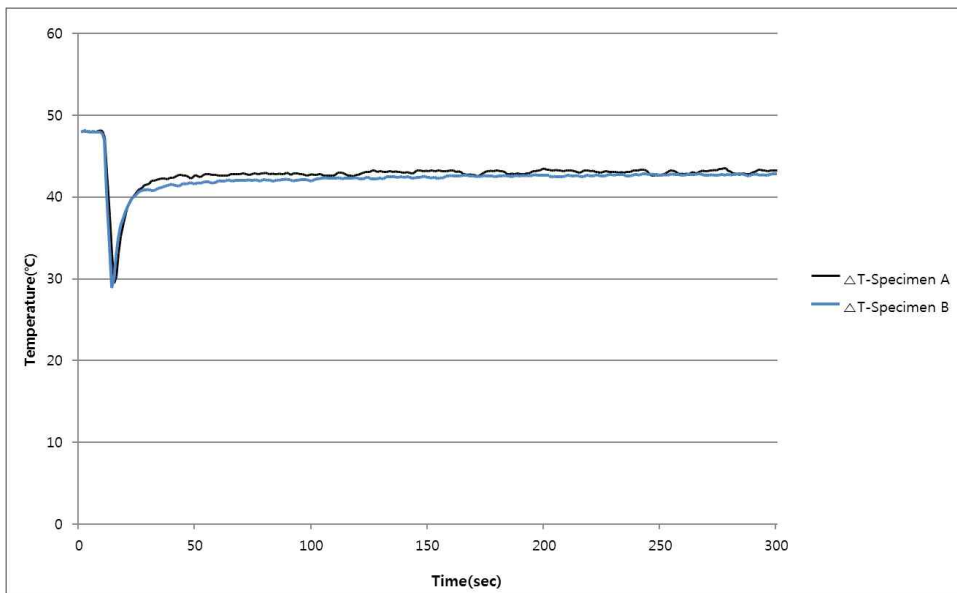


Fig.4-9 Temperature differential distribution of specimen A, B

Fig.4-10는 시험편 A와 시험편 E의 온도차변화 결과를 나타낸다. Fig.4-10를 통해 시험편E를 작동 시킨 후 시험편 A와 같이 약 15초 동안 급격하게 온도차가 낮아진 후에 다시 증가하였다. 약 50초 후에 ΔT 는 41°C까지 도달하였고 41°C를 계속 유지 하였다.

인공결함을 만들기 전에 시험편 A의 ΔT 를 비교 해보면 약 1.8°C, 4%정도 떨어진다는 것을 확인 할 수 있다. 결함의 크기 약 23[mm²] 시 열전소자의 성능이 약 4%정도 감소하며 이 는 열전소자 내부의 결함이 열전소자의 성능에 영향을 미친다고 판단된다.

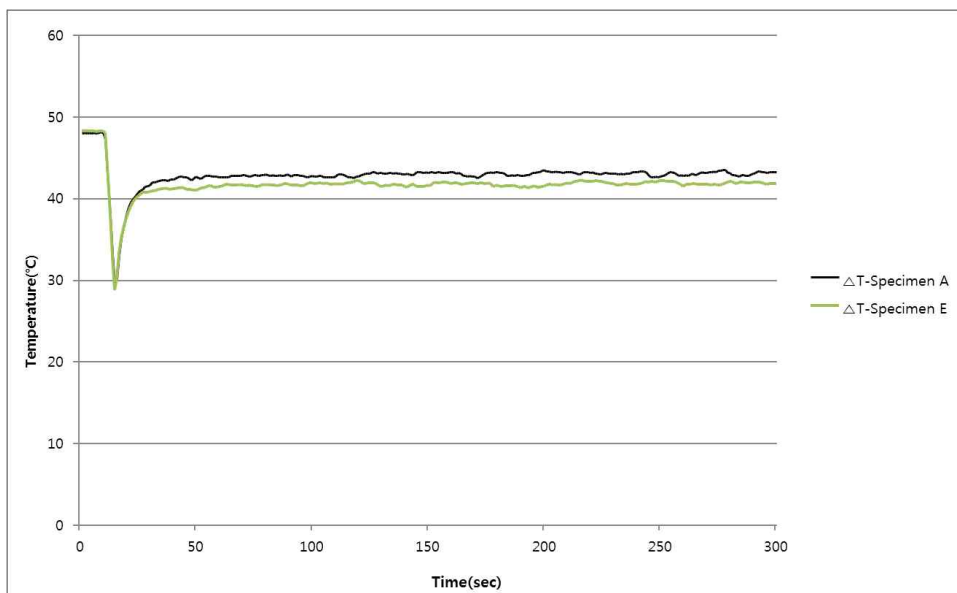


Fig.4-10 Temperature differential distribution of specimen A, E

제 5 장 결론

본 논문에서는 열전소자의 성능과 내부 접합상태의 관계를 검증 하였다. 열전소자 시험편에 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT)을 적용 하여 열전소자의 내부 결함 유무에 대한 검출능을 실험 하였으며, 열전소자의 성능분석을 위한 서머커플을 이용한 표면온도 분석을 수행 하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있었다.

1. 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT)을 적용 하였을 때 양품과 불량품에 초음파 탐상결과를 통해 결함이 있는 불량품 구분이 가능하였고 C-Scan 영상으로 결함 유무를 판단 할 수 있었다. 양품 화상 결과를 통해 열전소자 내부의 p,n형 반도체와 전도체, 세라믹의 접합부분은 들뜸, 이형, 접합불량이 없으므로 초음파 투과율이 높게 나타나고 C-Scan 화상 결과에서와 같이 Red Color Map영역으로 분석되었다. 불량품의 경우는 내부 결함부분에 들뜸 결함으로 인한 공기층이 형성되어 있으므로 초음파 투과율이 현저히 감소되었으며, Blue Color Map영역분포를 보이는 것으로 분석되었다. 열전소자 내부의 접합상태는 NAUT로 확인 가능 한 것으로 판단된다. 또한 같은 양품 열전소자의 화상 결과를 다르게 나타났으므로 동일한 사양의 열전소자 두 개 제품의 내부접합 상태의 차이가 있다는 것을 확인 하였다.

2. 인공결함이 있는 시험편이 NAUT 적용 시 검사범위는 $47 \times 47 [mm]$ 이며 인공결함의 시작 위치는 X축 방향 $36 [mm]$, Y축 방향 $6 [mm]$ 에 존재하였고 결함의 면적은 $23.8 [mm^2]$ 로 확인 하였다. 또한 결함이 있는 부분과 결함이 없는 부분은 초음파 투과율 파형으로 확인 가능하였다. 이를 통해 열전소자 내부를 육안으로 판별이 불가능한 접합부분의 결함을 검출 가능하고 결함 위치 및 면적 크기에 대한 분석을 수행 할 수 있었다.

3. 같은 재료로 같은 공정에서 제작된 열전소자의 성능 실험 수행 시 냉각부 최저온도는 약 $0.6^{\circ}C$ 정도 차이가 있고 온도차 ΔT 값은 약 $0.5^{\circ}C$ 차이가 있다는 것을 확인 하였다. 초음파 탐상 결과를 통해 같은 양품의 두개 제품의 열성능 차이의 원인은 내부 접합상태에 따라 추측 할 수 있었다.

4. 인공결함을 만들기 전후의 성능 비교 실험에 따라 결함이 없는 열전소자와 결함이 있는 소자는 같은 실험 조건에서 가동하고 온도를 측정 하면 인공결함이 있는 열전소자보다 인공결함이 없는 열전소자의 냉각부 최저온도는 약 0.7°C 정도 낮고 온도차 ΔT 값은 약 0.8°C 높다. 따라서 열전소자 내부 접합 결함은 열전소자의 성능에 영향을 미친다는 것을 확인 하였다.

5. 열전소자 내부 접합상태와 열 성능의 관계 분석결과를 NAUT 적용 하여 실험 한 결과를 종합적으로 분석하였을 때, 열전소자의 성능에 영향이 있는 내부 결함은 NAUT로 검출 가능하고 결함의 상태, 위치, 크기 등을 명확하게 검출 할 수 있었다. 열전소자 제조공정에 NAUT기법을 적용한다면 열전소자 제조 시 발생한 내부결함을 최소화 시키고 열전소자의 성능, 품질, 신뢰성에 대한 도움 될 수 있으며 패 에너지 활용, 환경문제에 크게 기여 할 수 있고, 산업발전의 고도화에 요구를 부흥하며 열전소자 분야의 발전에 도움 될 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

1. <http://blog.daum.net/e2rnd/16886218> 열전소자
2. H. W. Chun, M. G. Jang, "Market and Development Trend of Thermoelectric Materials", ETRI, Vol.29, No.6,2014, pp.104~112
3. 하국현, "열전 소재의 개발 동향 및 응용", "성장의 원천, 친환경 세라믹소재 재조명", 2013년 02월호, 통권 297호
4. 이득희, 김진상, "고성능 박막 열전소재 및 열전소자 기술동향", 세라미스트, 제15권, 제4호, 2012, pp.24~30
5. H. W. Chun, S. F. Moon, "Application Trends Thermoelectric Materials", ETRI, Vol.30, No.1, 2015, pp.144~153
6. <http://amenews.kr/>, "열전변환용 나노소재, 버려지는 에너지 잡는다", 신소재 경제
7. 김유상, "특수강의 열화상 비파괴검사 기술", 모니터링분석 2011, pp.1~5
8. S. Y. Na, "The application on NAUT method for reliability evaluation of eco-friendly components and materials", 2011
9. G. S. Nolas, J. Sharp and H. J. Goldsmid, "Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments", Springer, 2001
10. A. F. Ioffe, "Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling" Inforsearch Ltd. London, 1957

11. 노종욱, 강찬영, 김우철, 이우영, "나노 기술을 이용한 열전재료 연구 동향", Vol.49, No.9, 2009, pp.35~39
12. S.W. Kim, "Nanostructure-based High-performance Thermoelectric Energy Conversion Technology", 물리학과 첨단기술, MARCH 2013
13. S. J. Jung, "Thermoelectric performance of p-type Bi-Sb-Te based material prepared by strain-assisted, low-temperature synthesis", 2013
14. G. J. Snyder and E. S. Toberer, Nature materials, 7, 2008, pp.105
15. S. T. Ro and J. S. Seo, "Principles of Thermoelectric Refrigeration and System Design", Korean Journal of Refrigeration and Air Conditioning, Vol. 19, No. 3, 1990, pp.135-145
16. 이은도, "열전소자의 기술개발 현황", Machinery Industry, 2010, pp.71~77
17. Terry M. Tritt and M. A. Subramanian, "Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View", MRS BULLETIN, Vol.31, 2006, pp.188
18. Majumdar, A, "Thermoelectricity in semiconductor nano structures", Science, 2004. 303(5659): pp.777-778.
19. Hicks, L. D. and M. S. Dresselhaus, "Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor", Physical Review B, 1993. 47(24): pp.16631-16634
20. Rama Venkatasubramanian, Edward Siivola, Thomas Colpitts, and Brooks O' Quinn, "Thin-film Thermoelectric Devices with High Room-temperature Figures of Merit", Nature, Vol.413, 2001, pp.597

21. M. G. Jang, M. S. Jun, T. M. Roh, J. D. Kim, "Thermoelectric Power Generation with High Efficiency", ETRI, Vol.23, No.6, 2008, pp.12~21

22. "Technical Informaition at a Glance", Ferrotec Co., Ltd.

23. H. J. Lee, C. H. Cho, H. J. Cho, "Development of a Multi-Channel Ultrasonic Testing System for Automated Ultrasonic Pipe Inspection of Nuclear Power Plant", J.KSNT, Vol.29, No.2, 2009, pp.145-152

24. K. W. Nam, K. C. Lee, K.Akira, "A Feasibility Study on the Application of Ultrasonic Method for Surface Crack Detection of SiC/SiC Composite Ceramics", J.KSNT, Vol.29, No.5, 2009, pp.479-484

25. M. Y. Choi, S. S. Lee, J. H. Park, W. T. Kim, K. S. Kang, "Analysis of Heat Generation Mechanism in Ultrasound Infrared Thermography", J.KSNT, Vol.29, No.1, 2009, pp.10-14

26. M. S. Kim, G. S. Kim, H. M. Jung, K. B. Kim, "Nondestructive Quality Measurement System of Fruits Using Ultrasonic", J.KSPE, Vol.25, No.2, 2008, pp.7-14

27. Y. S. Shin, Y. H. Yoon, Y. H. Kim, "Measurement of Longitudinal and Transverse Wave Speed in Solid Materials Using Immersion Ultrasonic Testing", J.KSNT, Vol.28, No.1, 2008, pp.40-45

28. J. H. Lee, S. J. Lee, J. H. Byun, "Evaluation of Internal Defect of Composite Laminates Using A Novel Hybrid Laser Generation/Air-Coupled Detection Ultrasonic System" J.KSNT, Vol.28, No.1, 2008, pp.46-53

29. I. H. Choi, J. I. Lee, G. D. Kwon, K. Y. Jang, "Effect of System Dependent Harmonics in the Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter by

Using Contact Transducers", J.KSNT, Vol.28, No.4, 2008, pp.358-363

30. S. Y. Na, J. Y. Kim, "The Research on NAUT Characteristics Evaluation by Defection Image" J.KSTLE, Vol.26, No.6, 2010, pp.341-345

31. J. W. Cho, Y. C. Seo, S. H. Jung, H. G. Jung, S. H. Kim, "A Study on Real-Time Defect Detection Using Ultrasound Excited Thermography", J.KSNT, Vol.26, No.4,2006, pp.211-219

32. H. S. Yoon , "A Study on Cooling Performance using Thermoelectric Module in a Small Cooling System" , 2013

33. Hilbert, "The Principle and Applications of Semiconductor Cooler"

34. Y. T. Cho, C. H. Lee, S. D. Ma, "Improve the performance of thermoelectric module using", KSMTE, 2014, pp.103

35. D. C. Seo, J. H. Kwon, B. Y. Ahn, Y. S. Lee, "Study on a Particle Separator using Immersion Ultrasonic Transducer", KSNT, 2006, pp.148-151

36. N.S. Kwak, S.C. Lee, "Internal Defection Evaluation of Spot Weld Part and Carbon Composite using the Non-contact Air-coupled Ultrasonic Transducer Method", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No.11, 2014, pp.6423~6439

37. I. K. Park, "Ultrasonic C-scan Technique for Nondestructive Evaluation of Spot Weld Quality", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol.14, No.2, 1994, pp.112