



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](#)

2019년 8월  
박사학위논문

# 고주파 유도가열 장치를 이용한 금형 공정 개선 연구

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

박 일 철

# 고주파 유도가열 장치를 이용한 금형 공정 개선 연구

A study on improvement of molding process  
using high frequency induction heating device

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

박 일 철

# 고주파 유도가열 장치를 이용한 금형 공정 개선 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2019년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

박 일 철

## 박일철의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	명예교수	<u>양인영 (인)</u>
위원	포항공과대학교	교수	<u>홍정기 (인)</u>
위원	조선대학교	교수	<u>김재열 (인)</u>
위원	조선대학교	교수	<u>정현철 (인)</u>
위원	조선대학교	교수	<u>김경석 (인)</u>

2019년 6월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	viii
Nomenclatures .....	ix
Abstract .....	xi
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목적 및 연구방법 .....	6
제 2 장 이론적 배경 .....	8
제 1 절 재료와 온도의 관계 .....	8
제 2 절 유도가열 .....	10
제 3 절 Von-Mises stress .....	15
제 4 절 적외선 열화상 카메라 .....	19
제 5 절 전단간섭법 .....	22
제 3 장 실험 장치 및 실험 방법 .....	26
제 1 절 고주파 유도가열 장치 제작 .....	26
1. 가열 코일 설계 및 제작 .....	26

2. 고주파 가열 발진기 및 제어 장치 제작 .....	28
제 2 절 실험 방법 .....	35
1. 고온 인장 실험 .....	35
2. 소재별 고주파 유도가열 실험 .....	38
3. 열응력 해석 .....	40
4. 광계측을 이용한 성형 제품 결함 검사 .....	43
제 4 장 실험 결과 및 고찰 .....	45
제 1 절 고온 인장 실험 결과 .....	45
1. STS304 소재 .....	45
2. SAPH400 소재 .....	52
제 2 절 소재별 고주파 유도가열 실험 결과 .....	59
1. STS304 소재 .....	59
2. SAPH400 소재 .....	61
제 3 절 소재별 열응력 해석 결과 .....	63
1. STS304 소재 .....	63
2. SAPH400 소재 .....	76
제 4 절 광계측 시스템을 이용한 결함 측정 결과 .....	89
제 5 장 결 론 .....	91
참 고 문 헌 .....	92

## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Correlation between temperature and material properties .....	9
Fig. 2-2 Strength change of materials according to temperature .....	9
Fig. 2-3 Principle of induction heating .....	13
Fig. 2-4 Schematic of high frequency induction heating device .....	14
Fig. 2-5 Criterion of Von-Mises stress .....	15
Fig. 2-6 Basic concept of infrared thermography .....	19
Fig. 2-7 Principle of speckle shearing Interferometer .....	22
Fig. 3-1 Various shapes of induction heating coil .....	26
Fig. 3-2 Dimension of induction heating coil .....	27
Fig. 3-3 Heating coil and oscillator .....	27
Fig. 3-4 Design drawing of water-cooled cable .....	29
Fig. 3-5 Design drawing of oscillator box .....	29
Fig. 3-6 Design drawing of main circuit .....	30
Fig. 3-7 Design drawing of control circuit .....	30
Fig. 3-8 Design drawing of control panel .....	31
Fig. 3-9 Design drawing of control box .....	31
Fig. 3-10 Assembled control box for induction heating device .....	32
Fig. 3-11 Configuration of high frequency induction heating device .....	33
Fig. 3-12 High frequency induction heating device applied to progressive molding process .....	33
Fig. 3-13 Practical use of high frequency induction heating device for producing knuckle bracket .....	34
Fig. 3-14 Specification of standard specimen (D512) .....	35
Fig. 3-15 Standard specimen for tensile testing under high temperature .....	35
Fig. 3-16 Heating equipment for high temperature material testing .....	36



Fig. 3-17 Tensile testing under high temperature .....	36
Fig. 3-18 Temperature control device for tensile testing under high temperature .....	37
Fig. 3-19 Panel specimen for measuring change of temperature by high frequency induction heating for 8 sec of heating time .....	38
Fig. 3-20 Experiment for heating panel specimen using high frequency induction heating device .....	39
Fig. 3-21 Window for material definition in MeshFree analysis software .....	40
Fig. 3-22 Knuckle bracket used for automotive parts .....	41
Fig. 3-23 Sample of progressive molding process sequence .....	41
Fig. 3-24 Modeling of knuckle bracket .....	42
Fig. 3-25 Product of progressive molding using high frequency induction heating device	43
Fig. 3-26 Detection of defect on a knuckle bracket using optical interferometer .....	43
Fig. 3-27 Comparison of defect location on knuckle bracket .....	44
Fig. 4-1 Stress-strain curve under 200 °C for STS304 .....	45
Fig. 4-2 Stress-strain curve under 300 °C for STS304 .....	46
Fig. 4-3 Stress-strain curve under 400 °C for STS304 .....	47
Fig. 4-4 Stress-strain curve under 500 °C for STS304 .....	48
Fig. 4-5 Stress-strain curve under 600 °C for STS304 .....	49
Fig. 4-6 Averaged stress-strain curve at each heating temperature for STS304 .....	50
Fig. 4-7 Stress-strain curve under 200 °C for SAPH400 .....	52
Fig. 4-8 Stress-strain curve under 300 °C for SAPH400 .....	53
Fig. 4-9 Stress-strain curve under 400 °C for SAPH400 .....	54
Fig. 4-10 Stress-strain curve under 500 °C for SAPH400 .....	55
Fig. 4-11 Stress-strain curve under 600 °C for SAPH400 .....	56
Fig. 4-12 Averaged stress-strain curve at each heating temperature for SAPH400 .....	57
Fig. 4-13 Result image of infrared thermography for STS304 panel heated by high frequency induction heating device .....	59

Fig. 4-14 Graph of temperature change on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device .....	60
Fig. 4-15 Result image of infrared thermography for SAPH400 panel heated by high frequency induction heating device .....	61
Fig. 4-16 Graph of temperature change on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device .....	62
Fig. 4-17 Von-Mises stress of STS304 at 100 °C .....	63
Fig. 4-18 1st principal stress of STS304 at 100 °C .....	63
Fig. 4-19 2nd principal stress of STS304 at 100 °C .....	64
Fig. 4-20 3rd principal stress of STS304 at 100 °C .....	64
Fig. 4-21 Von-Mises stress of STS304 at 200 °C .....	65
Fig. 4-22 1st principal stress of STS304 at 200 °C .....	65
Fig. 4-23 2nd principal stress of STS304 at 200 °C .....	66
Fig. 4-24 3rd principal stress of STS304 at 200 °C .....	66
Fig. 4-25 Von-Mises stress of STS304 at 300 °C .....	67
Fig. 4-26 1st principal stress of STS304 at 300 °C .....	67
Fig. 4-27 2nd principal stress of STS304 at 300 °C .....	68
Fig. 4-28 3rd principal stress of STS304 at 300 °C .....	68
Fig. 4-29 Von-Mises stress of STS304 at 400 °C .....	69
Fig. 4-30 1st principal stress of STS304 at 400 °C .....	69
Fig. 4-31 2nd principal stress of STS304 at 400 °C .....	70
Fig. 4-32 3rd principal stress of STS304 at 400 °C .....	70
Fig. 4-33 Von-Mises stress of STS304 at 500 °C .....	71
Fig. 4-34 1st principal stress of STS304 at 500 °C .....	71
Fig. 4-35 2nd principal stress of STS304 at 500 °C .....	72
Fig. 4-36 3rd principal stress of STS304 at 500 °C .....	72
Fig. 4-37 Von-Mises stress of STS304 at 600 °C .....	73

Fig. 4-38 1st principal stress of STS304 at 600 °C .....	73
Fig. 4-39 2nd principal stress of STS304 at 600 °C .....	74
Fig. 4-40 3rd principal stress of STS304 at 600 °C .....	74
Fig. 4-41 Von-Mises stress of SAPH400 at 100 °C .....	76
Fig. 4-42 1st principal stress of SAPH400 at 100 °C .....	76
Fig. 4-43 2nd principal stress of SAPH400 at 100 °C .....	77
Fig. 4-44 3rd principal stress of SAPH400 at 100 °C .....	77
Fig. 4-45 Von-Mises stress of SAPH400 at 200 °C .....	78
Fig. 4-46 1st principal stress of SAPH400 at 200 °C .....	78
Fig. 4-47 2nd principal stress of SAPH400 at 200 °C .....	79
Fig. 4-48 3rd principal stress of SAPH400 at 200 °C .....	79
Fig. 4-49 Von-Mises stress of SAPH400 at 300 °C .....	80
Fig. 4-50 1st principal stress of SAPH400 at 300 °C .....	80
Fig. 4-51 2nd principal stress of SAPH400 at 300 °C .....	81
Fig. 4-52 3rd principal stress of SAPH400 at 300 °C .....	81
Fig. 4-53 Von-Mises stress of SAPH400 at 400 °C .....	82
Fig. 4-54 1st principal stress of SAPH400 at 400 °C .....	82
Fig. 4-55 2nd principal stress of SAPH400 at 400 °C .....	83
Fig. 4-56 3rd principal stress of SAPH400 at 400 °C .....	83
Fig. 4-57 Von-Mises stress of SAPH400 at 500 °C .....	84
Fig. 4-58 1st principal stress of SAPH400 at 500 °C .....	84
Fig. 4-59 2nd principal stress of SAPH400 at 500 °C .....	85
Fig. 4-60 3rd principal stress of SAPH400 at 500 °C .....	85
Fig. 4-61 Von-Mises stress of SAPH400 at 600 °C .....	86
Fig. 4-62 1st principal stress of SAPH400 at 600 °C .....	86
Fig. 4-63 2nd principal stress of SAPH400 at 600 °C .....	87
Fig. 4-64 3rd principal stress of SAPH400 at 600 °C .....	87

Fig. 4-65 Detection of defect on knuckle bracket heated by high frequency induction heating device for 2 seconds (Surface temperature of knuckle bracket is 200 °C) ..... 89

Fig. 4-66 Detection of defect on knuckle bracket heated by high frequency induction heating device for 5 seconds (Surface temperature of knuckle bracket is 400 °C) ..... 89

Fig. 4-67 Detection of defect on knuckle bracket heated by high frequency induction heating device for 8 seconds (Surface temperature of knuckle bracket is 600 °C) ..... 90

## LIST OF TABLES

Table 2-1 Characteristics for the types of high-frequency induction heating device .....	10
Table 3-1 Mechanical and thermal properties of STS304 and SAPH400 .....	40
Table 4-1 Results of tensile testing under 200 °C for STS304 .....	45
Table 4-2 Results of tensile testing under 300 °C for STS304 .....	46
Table 4-3 Results of tensile testing under 400 °C for STS304 .....	47
Table 4-4 Results of tensile testing under 500 °C for STS304 .....	48
Table 4-5 Results of tensile testing under 600 °C for STS304 .....	49
Table 4-6 Average values of results of tensile testing at each heating temperature for STS304 .....	50
Table 4-7 Results of tensile testing under 200 °C for SAPH400 .....	52
Table 4-8 Results of tensile testing under 300 °C for SAPH400 .....	53
Table 4-9 Results of tensile testing under 400 °C for SAPH400 .....	54
Table 4-10 Results of tensile testing under 500 °C for SAPH400 .....	55
Table 4-11 Results of tensile testing under 600 °C for SAPH400 .....	56
Table 4-12 Average values of results of tensile testing at each heating temperature for SAPH400 .....	57
Table 4-13 Maximum temperature on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device under heating time condition .....	60
Table 4-14 Maximum temperature on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device under heating time condition .....	62
Table 4-15 Result of thermal stress analysis of STS304 .....	75
Table 4-16 Result of thermal stress analysis of SAPH400 .....	88

## Nomenclatures

$P_h$	:	Eddy current loss
$\eta$	:	Hysteresis coefficient
$f$	:	Frequency
$B_m$	:	Maximum magnetic flux density
$V$	:	Cubical of core
$I_x$	:	Electric current value at center of surface
$I_0$	:	Electric current value of cylindrical metal surface
$p$	:	Penetration depth
$\rho$	:	Depth at which the electric current value decreases to $1/\varepsilon$ of surface
$a$	:	Radius of core
$\mu_r$	:	Specific permeability of material
$\rho$	:	Resistivity
$n$	:	Coil of turn number
$I$	:	Electric current
$\sigma$	:	Stress
$\sigma_{rep}$	:	Scalar stress
$\sigma_{VM}$	:	Von-Mises Stress

- $n_o$  : Direction of investigate light
- $n_s$  : Vector of observation direction
- $\Delta\phi$  : Phase difference
- $\Delta\phi_Q$  : Phase difference at point  $Q$
- $\Delta\phi_P$  : Phase difference at point  $P$
- $\Delta x$  : Deformation in  $x$  direction

## ABSTRACT

### **A study on improvement of molding process using high frequency induction heating device**

Il-Chul Park

Advisor : Prof. Kyeong-Suk Kim, Ph.D.

Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering,  
Graduate School of Chosun University

Recently, the thermal process technology using high frequency induction heating has been partially applied to the body parts requiring high intensity, mainly for overseas low-speed car companies. However, the domestic research level is still in the current state because there is a lack of solution for the deformation generation and mechanical properties change of products due to heat treatment.

The high frequency induction heating has an advantage that the surface of the metal object can be rapidly heated. Because of this advantage, it is used in many fields. Recently, high-frequency induction heating is applied to a mold apparatus. Research is continuing to improve the moldability by rapidly heating the metal object.

The domestic mold industry continues to grow moderately. We continue to invest heavily in the mold industry to compete with overseas markets. The global mold technology is being converted into a form that is applied in a complex way. There is a growing demand for high-value-added dies that can be minimized, refined and mass-produced. Therefore, there is an increasing demand for reliability of production products. Many studies have been carried out to verify reliability in Korea.

In the process of forming progressive mold products, brittleness increases due to the cooling of the ingredients and winter materials, and cracks occur a lot in product molding.



As a result, the product molding causes an increase in the defect rate and a decrease in productivity. To solve this problem, the number of progressive mold processes is increased or the progressive mold is enlarged to overcome the problem. And, as a different solution, hot stamping process is used to improve moldability. Hot stamping technology is a technique that increases the strength of the product and the molding property by simultaneously heating the entire material at high temperature and molding and cooling in the mold. However, it is necessary to apply the hot stamping technology at a high cost. The method for instead of doing of the hot stamping process has the mold process of using the high frequency induction heater. High frequency induction heating devices are used in plastic processing fields such as extrusion, special molding and fine precision molding.

The high frequency induction heating apparatus heats the desired position or site and the moldability of material is improved. The failure rate is reduced and the unnecessary loss is reduced. Therefore, the production quality can be improved. If the desired part of the molding material can be heated to a desired degree by using the high frequency induction heating device, it will contribute greatly to the mold process. The results of simulation and actual experiment show that the temperature of the material with improved moldability is very interesting. This result will be a study that can be used in various manufacturing industries using molds.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

현재 국내 금형 산업은 세계 금형 생산량 5위, 세계 금형 수출량 2위를 기록하고 있으며, 금형 산업은 최근 5년간 연평균 생산율 5.5 %, 내수 4.8 %, 수출 4.8 %의 성장률을 기록하며 완만한 형세로 성장세를 이어가고 있다. 한국과 중국의 금형 산업 경쟁이 치열해지는 추세로 인건비 상승을 대비하여 생산 효율을 높이기 위한 연구에 많은 비용을 투자하고 있다. 매년 10% 안팎으로 상승하는 인건비에 대응하여 중국의 기업들은 생산 자동화에 속도를 높이고 있는 추세이며, 국내에서도 해외 시장과의 경쟁에서 밀리지 않도록 금형 산업에 많은 자본을 투자하고 있다. 특히 국내의 주력 금형 산업 분야인 자동차, 조선, 디스플레이, 석유화학 등의 4개 분야를 집중적으로 투자하여 금형 산업을 이끌어가려고 하고 있다[1].

국내 각 경제연구기관들이 우리나라 경기 상황을 2개월 연속 ‘부진’ 이라 진단한 가운데 내수·생산·투자 등 금형업계 주요지표도 둔화의 흐름을 이어나가고 있다. 우리 조합이 국제 산업 분류 HS Code를 기반으로 2019년 1/4분기 금형 수출입 실적을 분석한 결과 지난해 동기대비 5.6% 감소한 8억 1,541만 달러를 기록한 것으로 나타났다. 장기적인 내수시장 침체 속에 주요 수요산업 부진 및 대내외 수출환경 악화, 글로벌 경쟁심화 등으로 저성장 기조에 봉착한 금형업계의 어려움이 통계실적으로 확인되었다. 그나마 다행스러운 것은 6억 4,716만 달러를 수출한 2018년 4/4분기 대비 25.8%가 증가하며 하반기 수출실적이 다소 개선될 가능성이 생겼다는 점이다. 당분간은 금형업계 저성장 기조가 지속될 것으로 전망되는 가운데 2019년 1/4분기 금형 수출입 실적을 분석한 결과, 수출은 지난해 동기대비 5.4% 감소한 8억 1,541만 달러를, 수입은 10.3% 증가한 4,812만 달러, 무역수지는 6.5% 감소한 7억 6,729만 달러를 기록하였다. 품목별로는 지속적인 수출 증가세를 유지하던 프레스금형이 하락세로 전환되며 전 품목 수출이 감소한 것으로 나타났다. 특히 프레스금형의 경우 전 세계적인 자동차산업 불황 등의 영향으로 주요 수출국인 미국과 멕시코, 중국, 일본 모두 하락하였다. 이 같은 수출 지표 하락의 원인으로서는 지난해 금형 수출을 견인한 멕시코, 미국으로의 수출 감소가 영향을 미친 것으로 분석되며, 중국 수출 또한 21.9% 하락하

여 수출량 감소에 한 몫을 더하였다. 다만, 이와 같은 실적에도 불구하고 금형 수출 위기가 개선될 여지는 아직 존재한다는 의견이 다수이다. 실제 인도 및 브라질, 베트남 등 신흥국으로의 금형수출이 각각 인도 204.9%와 브라질 157.6%, 베트남 25%가 증가하며 급격한 수출하락을 막아 하반기에는 국내 금형 수출증가에 기여할 것으로 기대되고 있다[2-4].

국내 금형 업체의 가장 큰 문제점은 전용 장비 관련 기술의 낙후로 고품위 단조품 개발에 한계를 맞고 있다는 점이다. 금형 가공 기술들은 장비 의존도가 비교적 높아 전용 장비 관련 기술이 낙후된 상황에서는 기존 장비 범위를 넘어서는 공정개발이 어려워진다. 그리고 특수기술 등 고부가가치 공정 개발 능력이 부족하며, 연구개발 기반이 열악하다. 해외의 기술개발 수준 향상에 따라 전통적인 금형 가공 공정에서 추가적인 기술이 요구된다. 일본의 금형 가공 업체는 산업기술 전략제품 혁신의 강화, 공정혁신의 재활성화를 도모하고 있으며, 제품 혁신을 위해 산학연 연대의 강화, 국제경쟁력을 갖춘 대학의 육성, 종합적인 기술혁신 체제의 구축과 기술제도의 재구축 등에 투자를 아끼지 않고 있다. 일본·독일 등을 포함한 소성가공 기술 선진국은 경험에 의존하는 노동집약적 소성가공 산업에서 품질과 가격 경쟁력 향상을 위한 공정 개선과 성형 후 기계 가공을 최소화하는 준 정형(near net shape)가공 등을 통해 고부가가치 품질 우선 금형 가공 산업으로의 전환을 꾀하고 있다. 금형 가공 업계도 수작업 공정의 연속공정 자동화 구축 및 친환경·저에너지·유연 생산 공정 개선이 가능한 스마트 공장을 구축하여 생산성을 향상하고 작업 환경을 개선해야 한다. 스마트 팩토리(smart factory) 기업이라는 이미지 구축을 통해 금형 가공 산업의 장기적인 기술발전과 산업 발전을 기대할 수 있으며, 자동화·첨단화에 따른 원가 절감과 공정 라인 단순화에 따른 생산 리드 타임을 줄여 비용 절감 효과를 기대할 수 있다. 대부분의 금형 가공 업체들이 위험성 높은 작업을 수동으로 하며 인력 부족 현상을 겪고 있는데, 이는 프로그레시브 금형을 통해 해결할 수 있다[5][6].

프로그레시브 금형은 프레스 기계에서 가공할 소재를 연속적으로 이송 시키면서 여러 공정을 거쳐 하나의 제품으로 가공하는 공정으로 넓은 의미로는 트랜스퍼 금형(transfer die)을 포함하여 순차 이송금형이라 한다. 통상의 프레스에는 금형을 프레스 기계에 장착 후 작업을 하고 이후 작업을 완료하고 난 후 다음 작업을 위해 프레스 기계를 멈춘 뒤, 다른 금형을 교환 후 작업을 실시해야하는데 프로그레시브 금형

은 통상의 프레스와는 달리 프레스 기계를 멈추지 않은 상태에서 다음 작업을 할 금형을 별도의 장치 위에 미리 장착 한 후 기존 생산을 마친 금형을 바로 프레스 기계에 집어넣고 작업을 수행할 수 있다. 작업 도중 기계를 세우지 않고 다음 작업을 수행할 수 있기 때문에 금형 장착 시간을 줄 일 수 있으며, 대부분 금형의 크기가 큰 자동차부품 금형에 주로 사용된다[7].

프로그레시브 금형을 이용하여 생산 현장의 자동화·첨단화가 구축된다면 생산성이 향상되는 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 이미 여러 기업에서 프로그레시브 금형을 통한 자동화로 고객사와의 신뢰감이 두터워지고 수주도 증가한 것으로 나타났다. 또한 불량률을 감소시키고, 작업 인력 대비 대량 생산이 가능해져 납품 기한을 준수할 수 있다. 작업자 능력에 따른 생산 결과 대신 자동화를 통한 정밀도 향상으로 품질 관련 불량률이 감소해 기업들의 만족도가 높아진다. 또한 획기적인 품질관리 개선으로 마지막 검사과정의 인력을 다른 곳에 배치할 수 있어 효율적인 인력 배치도 가능한 장점이 있다. 프로그레시브 금형을 최적화하려면 소재 물성 데이터 확보 및 가공 프로세스 맵을 위한 유한요소 해석 적용, 피로 특성 평가 등을 포함한 CAE(Computer Aided Engineering) 기술 등이 매우 중요하다[8][9].

세계 금형기술은 재료, 설계, 가공, 성형, 측정 및 공정 설계기술 등이 IT 산업과 접목되어 복합적으로 적용되는 형태로 전환되고 있으며, 최소화, 정밀화, 대량생산화가 가능한 초정밀 고부가 가치의 금형에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 세계적 기술 동향에 따라 생산 제품의 신뢰성에 대한 연구들이 심화되고 있으며, 국내외에서는 신뢰성 있는 제품을 만들기 위한 방법들에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다 [10].

프로그레시브 금형 제품의 성형 공정 중 벤딩(bending) 공정은 재료를 재료의 중립면을 기준으로 굽힘축 주변을 움직임이게 함으로써 재료에 굽힘 변형을 주는 가공을 말하는데 가공에 있어서 굽혀진 안쪽은 압축을 받고 바깥쪽은 인장을 받는다. 이 벤딩 고정 도중 재료의 변형에 의해 터지거나 찢어지는 불량이 발생한다. 이러한 손상은 재료의 취성이 증가하여 발생하는 것으로 제품의 형상이 복합하거나 많은 하중을 주는 성형 가공 시 많이 발생하게 된다. 이러한 손상에 대한 문제 때문에 금형 산업 현장에서는 제품 성형 시 불량률이 증가하고 생산성 저하를 야기하여 큰 손해를 감수

하며 제품을 생산하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 금형의 공정 수를 증가 시켜 성형 단계를 나누어 대상체의 소성 가공에 대한 부담을 줄이는 방법을 사용하거나 금형 내에서 부품성형과 동시에 경질조직으로 변태시키는 일종의 가공 열처리 기술로서 형상가공과 고강도화를 동시에 달성하는 기술인 핫스탬핑 공정을 설비에 추가하여 많은 비용을 들여 문제를 극복하고 있다[11-15].

고비용의 설비를 들이지 않고 이 문제를 해결하기 위해 최근 해외 선진업체와 일본과 유럽의 자동차 분야에서 집중적으로 고주파 유도가열 장치를 사용하고 있으며, 열처리기술을 활용한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히 높은 강도를 요구하는 자동차 부품에 부분적으로 적용하고 있으며, 신뢰성을 높이기 위한 연구들을 계속 진행 중이다. 하지만, 국내에서는 고주파 유도가열 장치를 적극적으로 활용하는 사례가 드물고 열처리 시 발생하는 생산 제품의 변형 발생이나 기계적 특성이 변화하는 문제 대한 해결방안이 부족하여 연구 수준에 머물고 있는 실정이다[16].

고주파 유도가열(High frequency induction heating)은 금속 대상체에 고주파 전류를 인가했을 때 금속 대상체의 표면에 전류가 집중되는 표피효과를 이용하여 대상체의 표면을 급속으로 가열하는 방법으로 대상체에 원하는 부분에 열에너지를 짧은 시간 안에 인가할 수 있어 급속가열이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 초기에는 금속을 용해시키는 목적으로 사용되어 왔었지만 지금은 주조, 열간 단조, 열처리 등 다양한 금속의 가공에 이용되고 있다. 최근 들어 고주파 유도가열을 금형 장치에 적용하여 가공함으로써 금속 대상체를 급속으로 가열하고 생산성을 크게 저하시키지 않는 범위에서 성형성을 개선하기 위한 연구들이 계속 진행되고 있다[17].

고주파 유도가열 장치는 소성가공 분야의 주요 가공 공정으로 압출, 인발, 판재성형, 특수성형 및 미세정밀성형 등에서 많이 사용되고 있으며, 국내에서는 중소기업 중심이 시장이 형성되어 있다. 그리고 고부가가치 사업 영역인 자동차 소재용 알루미늄합금 및 마그네슘합금 압출분야의 연구개발 및 생산경쟁이 현재 치열하다. 국내 및 해외 정밀성형 관련 산업현황을 살펴보면, 제품 개발은 중소기업 위주로 성형성을 높이기 위한 기술들이 개발되고 있고 다양한 산업분야에 적용되고 있다. 국내 및 해외의 기술 트렌드는 경량화, 초정밀, 융합화 및 일체화이며, 이와 관련된 연구들이 계속되고 지금도 빠르게 진행 중에 있다. 국내 주조 소성가공산업은 해외의 환경에

비해 열악하며, 전반적인 경쟁력은 타 산업 및 선진국에 비해 크게 뒤쳐져 있는 상황이다[16][17].

본 논문에서는 고주파 유도가열 장치를 이용하여 금형 공정 개선을 위한 연구를 수행하였다. 기존의 성형성을 개선하기 위한 공정인 핫스탬핑 공정은 재료 전체를 가열해야하기 때문에 프로그레시브 금형 공정의 추가 시설비용 및 효율성에 대한 문제가 계속적으로 제기되어 왔다. 프로그레시브 금형을 통한 제품의 성형을 보다 고효율, 저비용으로 할 수 있으면서 원하는 가공 부위에 빠르게 원하는 온도로 가열할 수 있는 방법은 고주파 유도가열 장치를 프로그레시브 금형 공정에 추가하는 방법이 있다. 고주파 유도가열 장치는 원하는 부분을 원하는 온도로 빠르게 도달할 수 있게 하는 장점이 있으며, 고주파 유도가열 장치를 제작하고 금형 산업 전반의 생산 프로세스의 개선에 접목 시킬 수 있도록 하는 것을 목표로 연구하였다.

## 제 2 절 연구목적 및 연구방법

본 논문에서는 프로그레시브 금형으로 포밍(forming) 및 벤딩(bending) 공정을 통한 제품 생산 시 발생하는 제품의 주된 손상 부위를 고주파 유도가열 장치를 사용하여 복잡한 성형이 필요한 제품의 성형부에 급속가열을 수행한 후 소재의 연성을 증가시켜 성형성을 개선할 수 있도록 하는 연구이며, 기존의 금형분야의 성형성 개선을 위한 방법인 부득이한 핫스탬핑 공정의 가공 방법보다 더 고효율, 저비용으로 원하는 가공 부위에 성형성을 향상 시킬 수 있도록 소재 및 최적 가열 온도 조건 제시를 목표로 한다.

실험을 위해 산업 현장에서 많이 쓰이고 있는 STS 계열과 SAPH 계열의 소재를 시험편으로 선정하고, 고주파 유도가열 장치를 이용하여 소재별로 어느 정도 가열하였을 때 적절한 성형성을 보이는지 측정할 수 있도록 고온 인장 실험 및 성형 해석, 그리고 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도 변화를 관찰하여 최적 온도 구간을 도출한다. 또한 프로그레시브 금형으로 형상이 복잡한 자동차 부품을 실제 타발하였을 때, 온도 변화에 따라서 어떤 차이를 보이는지 광계측을 이용한 결함 검사를 통하여 이를 증명한다.

본 논문의 구성으로 2장에서는 실험에서 사용된 적외선 열화상 카메라의 원리 및 유도가열 장치에 대한 원리와 온도 변화에 따른 소재의 성형성 관계, 그리고 열응력 해석 시 사용된 Von-Mises Stress, 결함 검사에 사용된 전단간섭법에 대한 이론적 배경에 대해서 서술하였다.

3장에서는 먼저 실험 장치로 사용된 고주파 유도가열 장치를 제작하기 위한 가열 코일, 발전기, 제어 장치의 설계 및 제작에 대한 내용을 기술하였으며, 다음으로 실험 방법으로 먼저 온도에 따른 기계적 물성의 특성을 파악하기 위해 소재별 고온 인장 실험 방법에 대하여 기술하였고, 다음으로 고주파 유도가열 장치로 소재를 유도가열 하였을 때, 가열 시간에 따른 소재의 온도 변화를 알아보기 위한 소재별 고주파 유도가열 실험 방법에 대하여 기술하였다. 그리고 열응력 해석을 위한 모델링 대상 선정부터, 사용 시뮬레이션 프로그램, 열응력 해석의 재료에 대한 기계적 특성 및 열

적 특성 내용을 기술하였으며, 자동차 부품의 성형부에 제작한 고주파 유도가열 장치를 적용하여 가열 시간을 변경하여 제작한 제품의 광계측을 이용한 결함 검사 방법에 대하여 기술하였다.

그리고 4장에서는 소재별 고온 인장 실험 결과, 소재별 고주파 유도가열 실험 결과, 열응력 해석 시뮬레이션 결과, 광계측을 이용한 성형 제품 결함 평가 결과를 각각 기술하였다.

마지막으로 5장에서는 각 실험 결과를 바탕으로 한 도출한 분석 결과에 대하여 고찰 하였으며, 고주파 유도가열 장치의 효율적인 금형 공정의 적용을 위한 소재와 온도의 관계에 대한 결론을 제시 하였다.



## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 재료와 온도의 관계

탄소강의 경우 강선(강재)의 표면이 파랗게 변하는 온도의 범위는 약 200 ~ 300 °C 부근이며, 이때 탄소강 재료의 인장강도 및 경도가 최대치를 나타내고 연률 및 단면 수축률은 최소치를 보인다. 인장강도와 경도가 높아지고, 결과적으로 연신율이 떨어지게 되고, 성형성이 낮아져 변형 또는 가공할 때 손상되기 쉬운 현상을 청열취성(blue shortness 또는 blue brittleness)이라 한다. 강선(강재) 표면의 철 원소가 산소와 결합하게 되어 표면이 산화되며, 이렇게 형성된 산화막의 색깔이 파랗게 보이는 것에서 이름이 유래되었다. 청열취성은 항복(yield drop)이 일어나는 취성으로 C와 N 과 같은 격자간원자(interstitial atom)가 칼날 전위와 상호작용하여 전위의 움직임을 어렵게 하다가 어느 순간 서로 떨어져서 전위는 보다 쉽게 움직이므로 응력이 갑자기 떨어진다. 약 250 ~ 400 °C보다 온도가 올라가면, 다시 상온보다 강도가 떨어져 가공하기가 쉽거나 취성이 감소하게 된다. 이 현상이 생기는 온도 구간은 강의 종류, 즉 성분의 차이에 따라 약간씩 달라지며, 어떤 강은 특정 온도 구간에서도 취성이 생기기도 한다. 그 이유는 소재 성분 중에 포함된 탄소나 질소가 이동하기 쉬워져서 강선(강재)를 만들 때 소재 내부에 탄소나 질소 원자에 의한 전위의 고착 현상 때문에 더욱 강도가 증가되고 경도도 올라가게 된다. 본래 금속소재의 변형 또는 가공은 전위라고 부르는 결함이 이동하여 일어나는데 온도의 상승으로 탄소나 질소의 이동은 쉬워지는 반면에 전위는 이동하여 소멸될 수 있는 온도가 되지 못하였지 때문에 이러한 현상이 발생한다. 온도가 높아지면 이번에는 전위가 스스로 이동하여 없어지고, 원자끼리의 결합력이 느슨해지므로 소재의 강도나 경도는 떨어지게 되며, 탄소나 질소의 이동과는 상관없이 변형이나 가공이 쉬워지게 되는 연화현상이 발생한다. 따라서 청열취성 온도 구간에서 가공을 하게 되면 강선(강재)을 파단 시키기 쉬워지므로 그 온도 구간을 피해서 가공하는 것이 좋다[18][19].

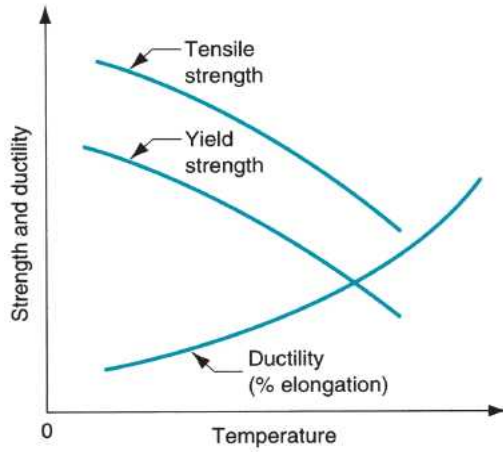


Fig. 2-1 Correlation between temperature and material properties

온도가 증가할수록 인장강도와 항복강도는 낮아지고 연성은 증가함을 Fig. 2-1를 통하여 알 수 있다. 온도에 따른 강성 및 연성은 서로 연관관계가 있으며, 온도에 따른 소재별 강도 변화는 소재를 구성하는 성분에 따라서 Fig. 2-2와 같이 각각 다른 양상을 보인다[20].

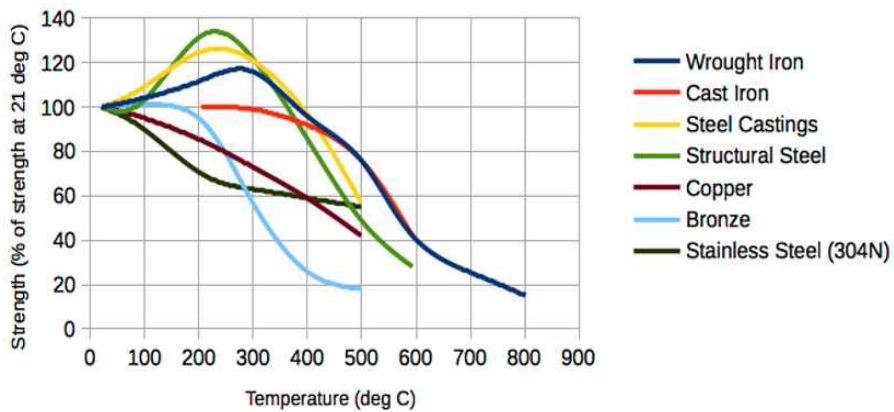


Fig. 2-2 Strength change of materials according to temperature

## 제 2 절 유도가열

고주파를 이용한 응용분야는 주로 열을 얻는데 사용되고 있다. Table 2-1과 같이 현재 산업 전반에 걸쳐 활용되며, 비금속 물질의 가공의 예로서 영화비닐 시트를 고주파로 용접하여 용기나 기타 잡화품으로 고주파를 이용하여 접착 가공하거나, 전화기 등의 고분자 분체로부터 성형하는 공정, 나일론 소재 등산용 밧줄이나 선박용 밧줄의 꼬임을 균질화 하는 공정에 유도가열이 사용된다. 그리고 베니어판이나 스키, 기타 목공품을 고주파 가열에 의해서 접착하는 가공 및 신속히 가열하는 식품가공 등에도 활용되고 있다. 금속가공으로는 고주파에 의한 발열이 표면에만 국한되는 것을 이용하여 강제품의 표면 담금질, 일반 금속제품 가공에 의한 응력제거 등에 쓰이고 있다.[21].

Table 2-1 Characteristics for the types of high-frequency induction heating device

Type Item	Induction heating	Dielectric heating	Conduction heating	Microwave heating
Heating object	Conductor, semiconductor	Insulators, plastic, Wood fiber	Non-conducting, High resistivity conductor	Food, medicine Non-conducting
Frequency	0 ~ 10MHz	0 ~ 50MHz	No limit	915MHz~ 2450MHz
Heat generation temperature distribution	Heating from the surface of the load	Heating from center of load	Relatively uniform heat	Heating from center of load
Heating electrode	Coil type	Condenser type	Contact type	Irradiation

고주파 유도가열은 무공해, 에너지 절약을 기본으로 하는 전기가열의 한 방법으로 에너지 절약과 환경보호, 품질의 균일화, 3D 기피 현상으로 자동화가 요구되는 현대 사회에 제품 손상 및 주변오염이 전혀 없이 제품에 단시간 국부적으로 열을 가할 수 있다. 이러한 유도가열 방식은 대부분의 금속체에 적용된다. 고주파 유도가열의 원리로 가열하고자 하는 도체에 코일을 감고 이 코일에 고주파 교류 전류를 흘리면 도체 내에는 고주파의 자속이 발생하게 되는데 이 자속은 전류의 교번에 의해 철심 중에 히스테리시스 손실과 유도전류에 의해 와전류 손실이 생기며 이 현상이 발생하면 자성체는 발열하여 온도를 상승시키게 된다. 몇 번 감은 코일 속에 금속체를 넣고 감겨 있는 코일에 교번전류(고주파 교류)를 흘리면 이 금속에는 자속이 생기며, 전류가 발생한다. 이 때 금속체에는 온도가 상승하는데 철손에 의한 발열이 발생한다. 이 금속이 자성체이면 자속은 전류의 교번에 의해 히스테리시스 루프(Hysteresis loop)를 그린다. 이 루프의 면적이 클수록 손실이 크며, 이 손실의 크기는 자성체에 따라 달라지고 이 히스테리시스 손실  $P_h$ 는 식 (2-1)로 표현되는 스테인메츠(Steinmetz) 식으로 구할 수 있다[21-23].

$$P_h = \eta f B_m^{1.6} V [W] \quad (2-1)$$

여기서,  $P_h$  : 히스테리시스 손실

$\eta$  : Hysteresis 계수

$f$  : 주파수 [Hz]

$B_m$  : 최대자속밀도 [wb/m<sup>2</sup>]

$V$  : 철심의 체적[m<sup>3</sup>]

이 코일 내에는 전자유도 작용에 의하여 금속체는 변압기의 2차 권선에 기전력이 발생하는 것과 같이 유도전류가 발생하여 와전류(eddy current)가 흐르게 되며, 이 와전류는 금속의 단면 각부에 균일하게 흐르지 않고 금속의 표면에 집중적으로 흐르게 되며 표피현상이 일어나 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소하게 된다. 표면에서  $x$ 만큼 떨어진 중심부의 전류는 식 (2-2)로 구할 수 있다.

$$I_x = I_0 \epsilon^{-\left(\frac{x}{p}\right)} j \epsilon^{\left(\frac{x}{p}\right)} \quad (2-2)$$

여기서,  $I_x$  : 표면에서 중심부  $x$ (m)지점의 전류 [A]

$I_0$  : 원통형 금속표면의 전류 [A]

$p$  : 전류치가 표면의  $1/\epsilon$ 로 감소한 깊이 [m]

$x$  : 표면으로부터의 깊이 [m]

이 와전류가 임의의 저항을 가진 금속체 내를 흐르면 그 금속체 내에 주울열이 발생하며 이것을 와전류 손실(Eddy current loss)이라 하며 식 (2-3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e = \frac{8\pi^5 a^4 f^2 \mu_r^2 n^2 I^2}{\rho} \times 10^{-14} \text{ [W/n]} \quad (2-3)$$

여기서,  $P_e$  : 유도전류에 의한 와전류 손실

$a$  : 철심의 반지름 [m]

$f$  : 주파수 [Hz]

$\mu_r$  : 재료의 비투자율 [H/m]

$\rho$  : 저항률 [ $\Omega$ /m]

$n$  : 코일의 턴수 [turn수/m]

$I$  : 전류 [A]

또한, 와전류는 금속의 표면에 전류 밀도가 집중하고 금속의 중심부에는 낮아지게 되는 데 이 현상을 표피효과라 하며, 이 현상은 금속체의 중심부 일수록 쇠교 자속(flux linkage)수가 많아져 유도용량(inductance)이 커지면서 교번 전류(alternating current)가 흐르기 어렵기 때문이다. 이 전류의 금속체 침투깊이는 주파수와 재료에 의해 결정되며 주파수에는 반비례하므로 금속의 표면 가열 및 금속가열을 할 수 있다 [23].

금속체 침투깊이  $p$ 는 식 (2-4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$p = 5.033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad [\text{m}] \quad (2-4)$$

- 여기서,  $p$  : 침투깊이 [m]  
 $\rho$  : 고유저항 [ $\Omega/\text{m}$ ]  
 $\mu_r$  : 재료의 비투자율 [H/m]  
 $f$  : 주파수 [Hz]

Fig. 2-3와 같이 고주파 유도가열은 전자유도작용을 이용하여 영구자석 대신 코일에 교류전류를 흘려 교번 자속이 발생하게 함으로써 피가열물에 유도전류(와전류)가 흐르도록 하는 것이다. 이 유도 전류는 주울 열을 발생시키며, 이렇게 발생된 열로 가열하는 것을 유도가열이라 한다[21-23].

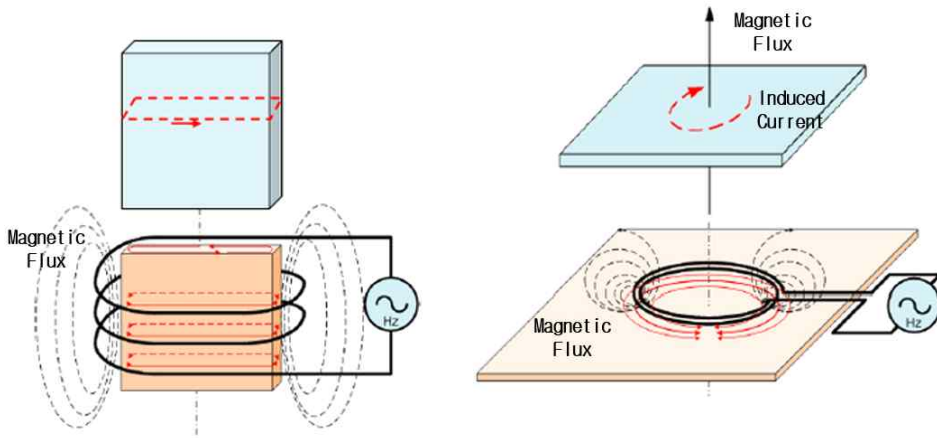


Fig. 2-3 Principle of induction heating

이로 인해 피 가열체의 필요한 부분에 에너지를 집중시켜 효율적인 급속가열이 가능하게 되며, 특히 가열온도의 제어는 가열 전원조정으로 간단하게 조절이 가능할 뿐만 아니라 가열물에 대해 신속하고 균일한 제어가 가능하다는 특징이 있다. 유도가열

은 피가열물을 직접 가열하므로 기타 열반사, 열전도 등의 가열법에 비교하면 열효율이 매우 좋다. 가열전력 및 시간을 일정하게 유지함으로써, 항상 균일하게 가열이 가능하며 굴곡은 극히 적다. 가열온도의 제어는 가열전원 조정으로 간단하게 조절이 가능하고, 가열물에 대해 신속, 균일한 제어가 가능하다. 유도가열의 또 다른 장점으로 는 극히 얇은 소입 깊이도 얻을 수 있으므로 정밀 처리가 가능한 것이다. 비접촉 가열로 가열금속에 상처를 주지 않으며 국부선택 및 표면만 급속 가열이 가능하다. 반도체 스위칭 회로에 의한 효율이 높아 전력절감 효과가 크다. 진공가열 등 분위기 제어가 용이하고 고전압에 의한 감전사고가 없다. 기존 생산라인에 부설이 용이하다. 제품의 변형과 스케일이 없는 고품질을 보장한다. 연기나 그을음에 대한 오염과 소음이 없어 쾌적한 작업환경을 유지한다. 작업준비 시간이 극히 짧아 생산성 향상이 있다. 시간제어, 출력제어, 온도제어가 간편하여 자동화에 적합하다. 안전하고, 소모성 부품이 없으며 수명이 반영구적이라 A/S가 용이하다. 다양한 출력과 폭넓은 주파수를 선택할 수 있으며, 설치 면적을 최소화할 수 있고 초보자도 쉽게 조작이 가능하다. 고주파 유도가열 장치는 교류를 직류로 변환하는 정류부, 그리고 필터부, 고주파 교류로 변환하는 인버터부, 가열부와 주변 장치로는 회로를 보호하는 보호회로, 인버터의 스위칭 소자를 구동하는 드라이브 회로, 출력을 검출하는 검출회로, 제어 신호를 발생하여 제어하는 제어회로가 있으며, 유도가열은 산업분야에서 금속의 열처리 등에 많이 응용되고 있으며 고주파 유도가열장치가 응용되는 구성도는 Fig. 2-4과 같다 [21-23].

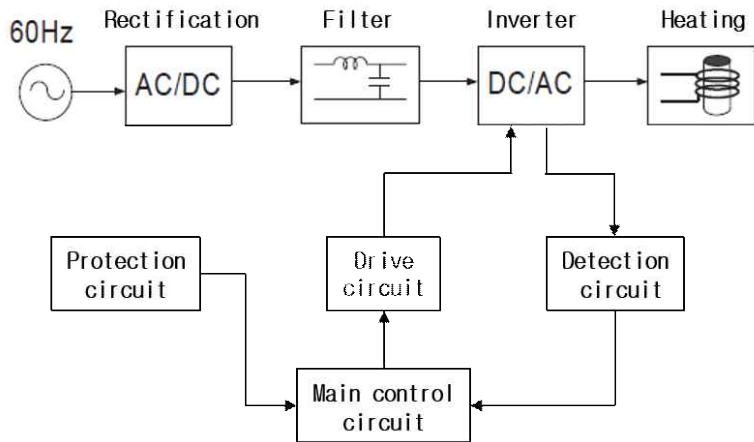


Fig. 2-4 Schematic of high frequency induction heating device

### 제 3 절 Von-Mises stress

등가응력(effective or equivalent stress)이라고도 부르며 영국의 과학자 Von-Mises(1883~1953)의 이름을 따서 불리게 된 특수한 유형의 응력이다. 물체는 외부로부터 힘이나 모멘트를 받게 되면 어느 정도까지는 견디지만 얼마 이상의 크기가 되면 외력을 지탱하지 못하고 파괴된다. 이러한 파괴를 예측하는 기준이 되는 조건을 항복조건(yield criterion)이라고 부르며, Von-Mises 항복조건과 Tresca 항복조건(Tresca yield criterion)이 대표적이다. Von-Mises stress에 대한 원리는 Fig. 2-5과 같으며, 방정식은 1904년 Huber에 의해 처음 제안되었지만, Von-Mises가 1913년에 다시 제안 할 때까지 거의 관심을 받지 못했다. 그러나 Huber와 Von-Mises의 정의는 수학 1924년 Hencky가 실제적으로 편차가 있는 변형 에너지와 관련이 있다는 것을 인식 할 때까지 물리적인 해석이 없는 등식이었다. 1931년에 Taylor와 Quinney는 구리, 알루미늄 및 연강에 대한 시험 결과를 발표했는데, Von-Mises stress는 최대 전단 응력 기준보다 금속 항복점의 시작을 더 정확하게 예측할 수 있음을 보여 주었다. 1864년에 Tresca 그리고 지금까지 항복하는 금속의 가장 좋은 예언자였다. 오늘날, Von-Mises stress는 Huber의 발전에 대한 공헌으로 Huber Mises stress라고도 한다. Fig. 2-5에서 정의된 Von-Mises stress란 항복조건에 사용되는 응력으로 하중을 받고 있는 물체 각 지점에서의 비틀림에너지(maximum distortion energy)를 나타내는 값이다[24-26].

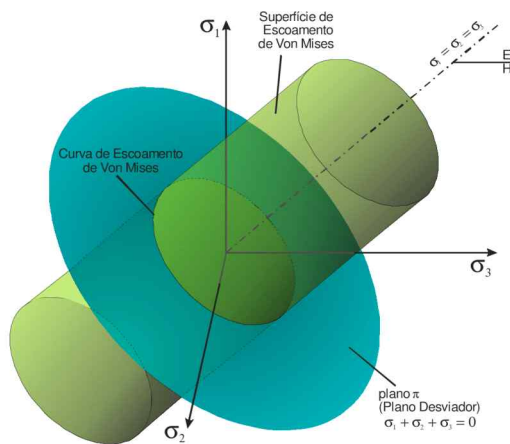


Fig. 2-5 Criterion of Von-Mises stress



수학적으로는 세 개의 주응력(principal stress) 혹은 6개의 독립된 응력성분들로 정의된다. 예를 들어, 임의의 유한요소 해석 프로그램으로 강도해석을 수행하면 물체 내부의 응력분포를 구할 수 있다. 그리고 각 지점에서 3개의 수직응력(normal stress)과 3개의 독립된 전단응력(shear stress)을 구할 수 있다. 하지만 이러한 응력 성분들만으로는 물체가 외부 하중에 의해 파괴를 일으킬 것인지 아니면 안전한지를 판단할 수 없다. 왜냐하면 물체의 파괴는 각각의 응력 성분들의 최대값으로 유발되는 것이 아니라 응력 성분들의 조합에 의하여 야기되기 때문이다. Von-Mises stress는 물체 각 지점에서 응력 성분들에 의한 비틀림 에너지의 크기를 나타내는 값으로서, 가장 정확하게 물체의 파괴를 예측하는 기준으로 알려져 있다[24].

Von-Mises stress에 대한 완전한 이해를 위해서는 응력과 변형 tensors, Hooke의 법칙 및 변형 에너지 밀도의 수압 및 편차응력(deviator stress)에 대한 이해가 필요하다.

$$W' = \frac{1}{2} \sigma' : \varepsilon' \quad (2-5)$$

Hooke의 법칙을 적용하면,

$$\varepsilon' = \frac{1}{2G} \sigma' \quad (2-6)$$

식 (2-5)에 대입하면,

$$W' = \frac{1}{4G} \sigma' : \sigma' \quad (2-7)$$

그래서 변형을 에너지 밀도의 벗어나는 부분은 편차 응력의 이중 내적과 직접 관련이 있다. 키네틱 에너지와의 유사성이 있다.

$$KE = \frac{1}{2} Mv^2, a \quad (2-8)$$

스프링의 내부 에너지  $E = \frac{1}{2} Kx^2$ , 전력,  $P = RI^2$  그리고 다른 어떤 형태들도 생각할 수 있다. 약 20% 낮지만 폰 미세스 응력에 비례하는 것으로 판명되는 등가 또는 유효 스트레스를 도입한다. 이 응력 값을 타나내기 위해 대표적인 응력에  $\sigma_{rep}$ 를 사용한다. 그리고 스칼라 응력 값으로 사용한다[24].

$$W' = \frac{1}{4G} (\sigma_{Rep})^2 \quad (2-9)$$

방정식의 형식은 위의 스칼라와 등가가 되도록 의도적으로 선택된다. 그것들을 서로 같게 설정하면,

$$W' = \frac{1}{4G} (\sigma_{Rep})^2 = \frac{1}{4G} \sigma' : \sigma' \quad (2-10)$$

분명히  $\sigma_{rep}$ 는 실제 3-D 응력 텐서와 동일한 편향 변형 에너지를 주는 스칼라 응력 값을 의미한다. 양쪽에서 4G를 취소하면,

$$\sigma_{Rep} = \sqrt{\sigma' : \sigma'} \quad (2-11)$$

마지막 단계는 단순한 편리성 중 하나로 단축 운동의 가장 간단한 직선 운동의 사례가 동기이다. 그것을 보려면, 이 경우  $\sigma_{rep}$ 에 대해 계산해야한다. 일축 장력에 대한 응력 상태는

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

수압 응력은  $\frac{1}{3}\sigma$ 이며, 편차 응력 텐서는

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\sigma}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\sigma}{3} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

그래서  $\sigma' : \sigma'$  는  $\frac{2\sigma^2}{3}$  과 같다. 따라서

$$\sigma_{Rep} = \sqrt{\sigma' : \sigma'} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \quad (2-14)$$

그리고 단축 인장에 대한 대표 응력은 단축 인장 응력  $\sigma$  와 같지 않지만 그 대신에 약 82 %이다. 이것은 대단히 불편하지만 해결 방법은 간단하다. 축 응력이 단축 인장 응력과 같아질 때까지 응력의 크기를 간단히 조정한다. 조정 방법은 단순히  $\sigma_{rep}$  에  $\sqrt{\frac{3}{2}}$  을 곱하면 된다.  $\sqrt{\sigma' : \sigma'}$  에 비례하는 어떤 것도 여전히 편차 에너지에 대한 관계를 반영하기 때문에 받아들일 수 있다[24].

최종 결과 Von-Mises Stress의 방정식은 식 2-15와 같다.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma' : \sigma'} \quad (2-15)$$

대체 식은 다음과 같다.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-16)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2-17)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{2} (\sigma_{kk})^2} \quad \sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (2-18)$$

## 제 4 절 적외선 열화상 카메라

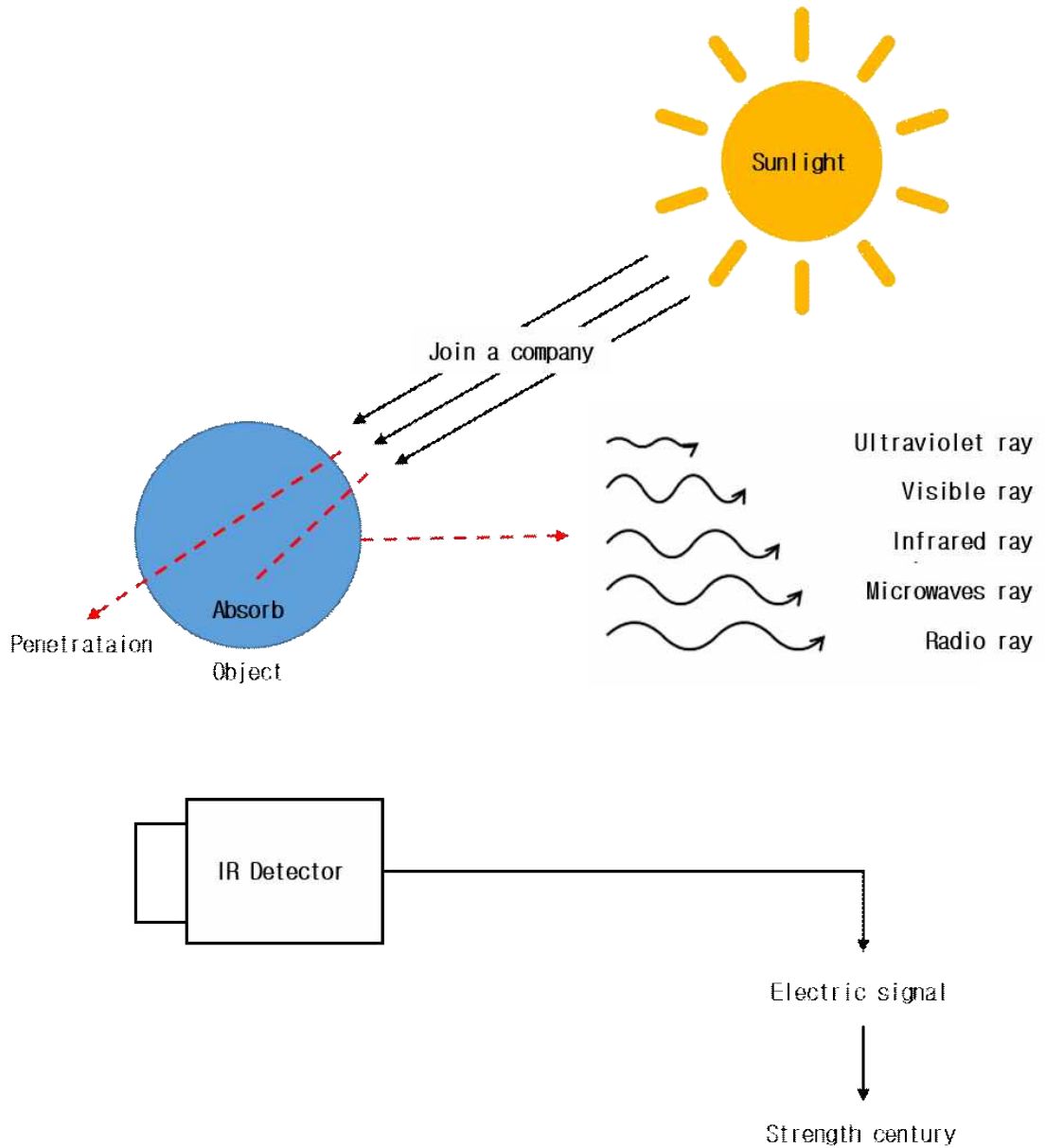


Fig. 2-6 Basic concept of infrared thermography

Fig. 2-6에서 보는 바와 같이 모든 물체는 온도의 작용으로서 적외선을 복사(방사)한다. 적외선 열화상 측정 기법은 대상체에서 방출되는 적외선 열에너지를 검출하고 측정하기 위해 사용된다. 열, 혹은 적외선 에너지는 파장이 너무 길어 육안으로 탐지할 수 없으므로 비가시광선이며 가시광선과 달리, 적외선 환경에서는 절대 영도를 초과한 온도의 모든 사물이 열을 방출한다. 다시 말해, 모든 물체가 적외선을 복사한다는 의미이다. 이러한 적외선 에너지는 원자와 분자의 진동과 회전으로 발생한다. 물체의 온도가 높을수록 더 많은 움직임이 발생하고 결국 더 많은 적외선 에너지를 복사한다. 이 에너지가 적외선 열화상 카메라에 감지되는 것이다. 적외선 열화상 카메라라는 온도를 보는 것이 아니라 열의 복사, 즉 열에너지를 감지하는 것이다. 적외선 복사는 전자기 복사의 일종으로 가시광선보다 긴 파장을 가지고 있음을 알 수 있다. 다른 형태의 전자기 복사로는 엑스레이, 자외선, 라디오 파 등이 있다. 흔히 말하는 열화상은 빛이 갖는 다양한 파장대역으로부터 적외선 파장을 적외선 검출소자인 센서를 통해 물체 혹은 대상체로부터 방사되어지는 적외선을 탐지하여 온도 혹은 열 그 자체를 화상으로 보여주는 기술이다. 적외선은 사람의 눈에는 보이지 않지만 적외선 카메라를 사용하면 눈으로 볼 수 있는 보통의 실화상으로 변환할 수 있으므로 대상 물체 또는 임의의 범위에 존재하는 열의 차이 또는 온도를 조사할 수 있다. 전자기파의 스펙트럼 중에 적외선의 영역은 대략 900~14,000 nm 부분이며, 온도가 절대 온도 이상인 모든 물체가 적외선을 방사하며, 그 방사하는 양은 온도에 높아질수록 증가한다. 여기서 방사된 적외선은 적외선 센서에 의해서 감지될 수 있는데 이를 이용하여 이미지 또는 영상으로 만드는 기술로 복사에너지의 파장 영역에 따라 서로 다른 검출 센서가 사용될 수 있다[27][28].

최근 비파괴 검사 및 응력해석분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있으며, 신호처리 기술이 응용된 위상 잠금 기술의 개발로 응력해석이나 결함 정량 해석 등이 가능해졌다. 그리고 의료분야 및 발전소 시설의 진단에 많은 활용이 되고 있다. 적외선 열화상 계측은 대상체를 비접촉, 실시간으로 넓은 영역의 온도 정보를 제공하며, 어두운 공간에서도 측정이 가능하다. 그리고 온도차이의 분석을 통해 예방 정비 기술로 활용 할수 있기 때문에 개선 전과 후의 효과를 보다 더 쉽게 확인 할 수 있는 장점이 있지만 장비 자체가 고가이며, 대상체의 방사율 및 표면 반사가 있을 경우, 그 반사로 인해 정확한 온도 계측이 어려운 경우도 있다. 적외선 열화상 카메라는 대상체나 계측 범위 안에 있는 온도 값의 차이를 이미지로 보여주는 방법이고 할 수 있다. 대상체의 방사율 및 표면 반사가 있기 때문에 적외선 열화상 카메라는 대상체의 온도를 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 것이다[29][30].

적외선 열화상 카메라의 구성은 디지털 비디오 카메라와 비슷하다. 주요 구성부분은 입사되는 적외선이 디텍터 즉, 센서 위에 초점이 맺히도록 하는 렌즈와 신호를 이미지화하여 처리하고 디스플레이 해주는 전자장치와 소프트웨어 등이다. 일반 비디오, 디지털 스틸 카메라에서 사용되고 있는 CCD(charge coupled device) 디텍터와 달리 적외선 카메라의 디텍터는 적외선 파장대에 민감한 다양한 물질로 만들어 지는 마이크로미터 크기의 픽셀로 구성되는 초점면 배열(focal plane array; FPA)이다. FPA의 분해능은 대략  $160 \times 120$  픽셀부터  $1024 \times 1024$  픽셀까지의 범위이다. 카메라 기종에 따라서 FPA상의 원하는 부분에 초점을 두고 그 부분을 집중적으로 온도를 계산할 수 있도록 해주는 소프트웨어를 내장하고 있는 모델도 있다. 또한 온도 분석을 지원하는 특수한 소프트웨어가 설치된 컴퓨터나 다른 데이터 시스템을 사용하기도 한다. 이런 방법들은 모두  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  이내의 정밀도로 온도를 분석할 수 있다. FPA 디텍터 기술은 열 디텍터(thermal detector)와 광자 디텍터(quantum detector)의 두 종류로 분류할 수 있다. 대표적인 열 디텍터로는 금속 또는 반도체를 소재로 제조되는 비냉각식 마이크로볼로미터(uncooled microbolometer)가 있다. 이 방식의 디텍터는 대개 광자 디텍터에 비해 가격이 저렴하며 더 넓은 범위의 적외선 스펙트럼을 검출할 수 있다. 마이크로볼로미터는 입사되는 적외선에 반응하며 광자 디텍터에 비해 그 반응 속도와 민감도가 훨씬 더 낮다. 광자 디텍터는 InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe(MCT) 등의 소재로 제조되며, GaAs/AlGaAs 층을 형성하여 QWIP(Quantum Well Infrared Photon) 디텍터가 만들어 진다. 광자 디텍터의 동작 원리는 결정 내에 있는 전자의 상태가 입사 광자에 의하여 달라지는 현상에 기반을 두고 있다. 광자 디텍터는 일반적으로 열 디텍터에 비해 속도와 민감도가 더 우수하다. 그러나 액화질소 또는 소형의 스텔링 사이클 냉각 장치를 사용하여 극저온까지 냉각시켜 주어야 하는 단점이 있다[27][28].

## 제 5 절 전단간섭법

전단간섭법에서 스페클 상관 간섭무늬(speckle correlation fringe pattern)는 물체변형에 따라 스페클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상점의 연결로 이루어진 것으로 볼 수 있으며, 상관간섭무늬는 화상처리장치를 이용하여 변형 전의 스페클 패턴을 기준으로 물체변형에 따른 스페클패턴의 변화를 연속으로 감산처리에 의해 실시간으로 관찰할 수 있다[31].

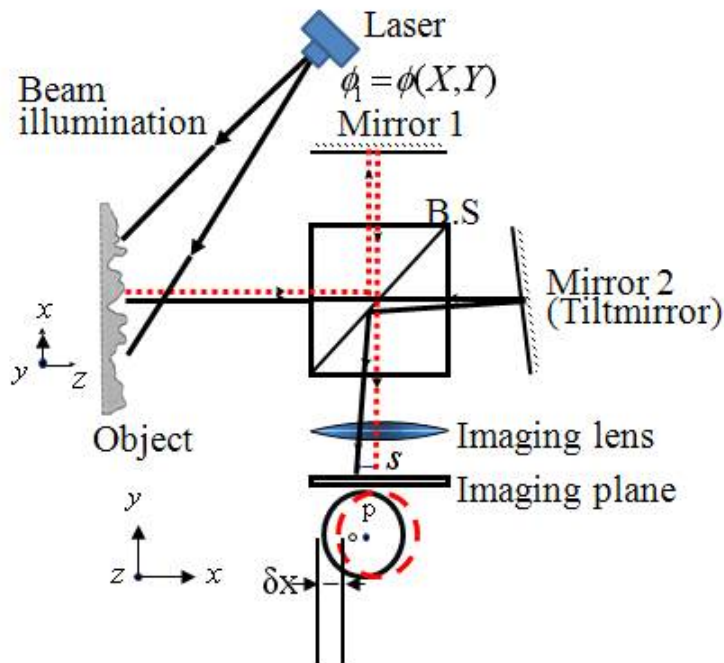


Fig. 2-7 Principle of speckle shearing Interferometer

Fig. 2-7은 전단간섭계의 원리를 개략적으로 보여주고 있다. 전단간섭계를 이용한 줄무늬 해석방법은 임의의 점 P에 물체빔이 조사 될 때 전단량에 의해 발생하는 두 점의 변형을 식(1)에서 보는 바와 같이  $d$ 와  $d'$ 에 의한 차이로 표현한다.  $n_o$ 는 조사방향이고,  $n_s$ 는 관측방향 벡터이다[31].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_0 - n_s) \cdot (d - d') \quad (2-19)$$

레이저 빔이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식 (2-19)를 식 (2-20)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta d \quad (2-20)$$

$\Delta d$ 는 테일러급수에 의해 식 (2-21)과 같이 표현할 수 있으며,  $x$  방향의 변형  $\Delta x$ 는 상면에서 전단량  $s$ 와 같다. 이 값은 매우 작기 때문에 식 2-21에서 2차 이상의 고차항을 무시할 수 있으며, 식 (2-20)를 식 (2-22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{d(x) - d(x_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial d}{\partial x} \right) s \quad (2-22)$$

Laser로부터 나온 광원은 Beam Expander를 통해 시험편에 확산 조사되고 대상체 표면으로부터 반사된 빛은 BS(Beam splitter)에 의해 두 개의 빔으로 나뉘게 된다. PZT Mirror와 Mirror 2로 각각 들어 온 빔은 다시 CCD카메라로 들어가며, 이때 PZT Mirror에서는 위상변화가 일어난 광원이 들어가게 되고 Mirror 2에서는 Shearing된 광원이 들어가게 되며 Image Plane상에서 만나는 두 광원은 서로 간섭을 일으키게 된다. Shearing에 따라 위상의 변화는 다음 식들로 나타낼 수 있으며, P점에서의 위상차는 식 (2-23)과 같이 나타낼 수 있다[31].

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{d}) \quad (2-23)$$



식 (2-24)는 Q점에서의 위상차를 나타낸다.

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{d} + \overline{\Delta d}) \quad (2-24)$$

전단간섭계는 두 점 P와 Q사이에서의 변형이 차이를 계측하기 때문에 전단간섭계에 서 간섭무늬가 나타내는 위상차  $\Delta\phi$  는 식 (2-23)에서 식 (2-24)를 뺀 결과 값과 같 고, 그 식은 식 (2-25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot [(\vec{d} + \overline{\Delta d}) - \vec{d}] \quad (2-25)$$

또한, P점과 Q점에서 변형 전후의 위상차를 직접 구해보면 식 (2-26)과 식 (2-27) 로 나타낼 수 있으며,

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 + \cos\theta)d_1 + \sin\theta d_2] \quad (2-26)$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 + \cos\theta)(d_1 + \Delta d_1) + \sin\theta(d_2 + \Delta d_2)] \quad (2-27)$$

위의 식 2-25에서  $\vec{n}_o$  와  $\vec{n}_s$  는 서로 법선 상에 놓여있고,  $\Delta d$ 는 테일러 정리를 이 용하여 정리하면 식 (2-28)과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (2-28)$$

또한,  $\Delta x$ 는 상면에서  $S_x$ 와 같고 이 값은 매우 작기 때문에 식 (2-28)은 식 (2-29) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = \sum_i \frac{\partial d_i}{\partial x_j} S_x \quad \text{단, } i=1,2,3 \quad (2-29)$$

그러므로, 식(2-29)에서  $\Delta d_1$ 과  $\Delta d_2$ 를 구해서 이 값을 식 (2-27)에 대입하면,

$$\begin{aligned} \Delta \phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(1 + \cos\theta)(d_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x) \\ + \sin\theta(d_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x} S_x)] \end{aligned} \quad (2-30)$$

식 (2-30)과 같이 정리할 수 있다. 또한,  $\theta$ 가 작으면  $\sin\theta \cong \theta$ 이므로, 식 (2-31)과 같이 정리할 수 있으며,

$$\begin{aligned} \Delta \phi &= \Delta \phi_Q - \Delta \phi_P \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta) \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \end{aligned} \quad (2-31)$$

$$\Delta \phi \cong \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \quad (2-32)$$

따라서, 식 (2-32)와 같은 결과식을 얻을 수 있다. 위 식 (2-32)에서 알 수 있듯이 Shearography는 작은 전단량의 경우에 면외 변위량에 대한 미분 값을 직접 측정할 수 있음을 알 수 있다. 전단량  $\partial x$ 가 작을수록 도함수에 가까워지게 되며, 전단량에 의해 광학계의 민감도(상대변위량)을 조절할 수 있다. Shearography는 간섭계의 특성으로 물체 면외 변위의 전단량 만큼 떨어진 두 점의 상대변위 값을 측정한다. 식 (2-32)에서 전단량이  $\text{Lim } \partial x \rightarrow 0$ 일 경우에 측정결과는 1차미분에 근접하게 된다. 일반적으로 Shearography의 측정결과를 1차도 함수로 표현하고 있으나, 미분조건( $\text{Lim } \delta x \rightarrow 0$ )을 만족하지 못하는 Shearography는 1차도함수보다는 전단량의 변화에 따라 두 점사이의 상대 변위량을 측정하여 결함을 판별할 수 있다[31][32].

## 제 3 장 실험 장치 및 실험 방법

### 제 1 절 고주파 유도가열 장치 제작

#### 1. 가열 코일 설계 및 제작

고주파 유도가열에 사용되는 가열 코일은 형태, 모양, 크기에 따라 매우 다양하게 제작될 수 있다. 가열 코일의 디자인은 보통 가열될 제품의 모양과 사용되는 발진기의 형태에 따라서 달라진다. 프로그레시브 금형 제품의 성형성 향상에 도움을 줄 수 있도록 가열 코일의 형상 교체를 고려하여 Fig. 3-1과 같이 다양한 모양으로 가열 코일을 설계 제작하였다.



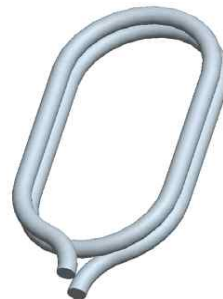
(a) Coil Type 1



(b) Coil Type 2



(c) Coil Type 3



(d) Coil Type 4

Fig. 3-1 Various shapes of induction heating coil

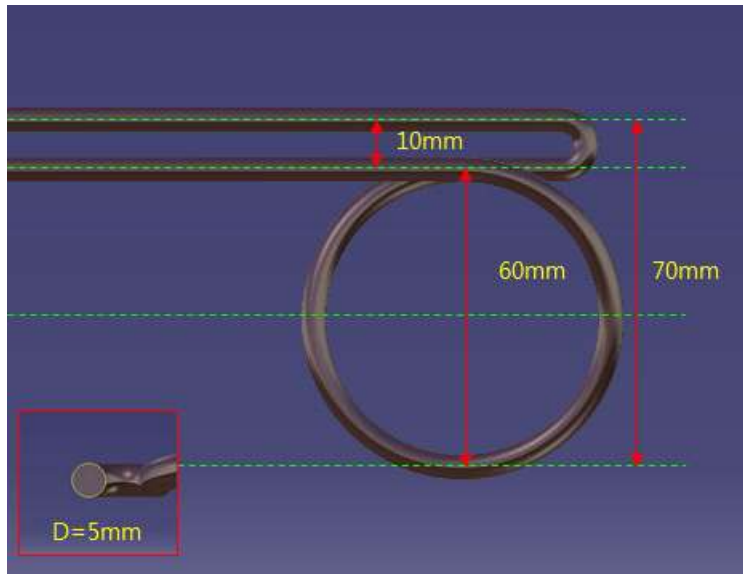


Fig. 3-2 Dimension of induction heating coil

가열 코일의 설계 사이즈는 Fig 3-2와 같으며, Fig 3-3은 가열 코일을 제작하여 단열재로 마감한 완성된 가열 코일의 이미지이다.

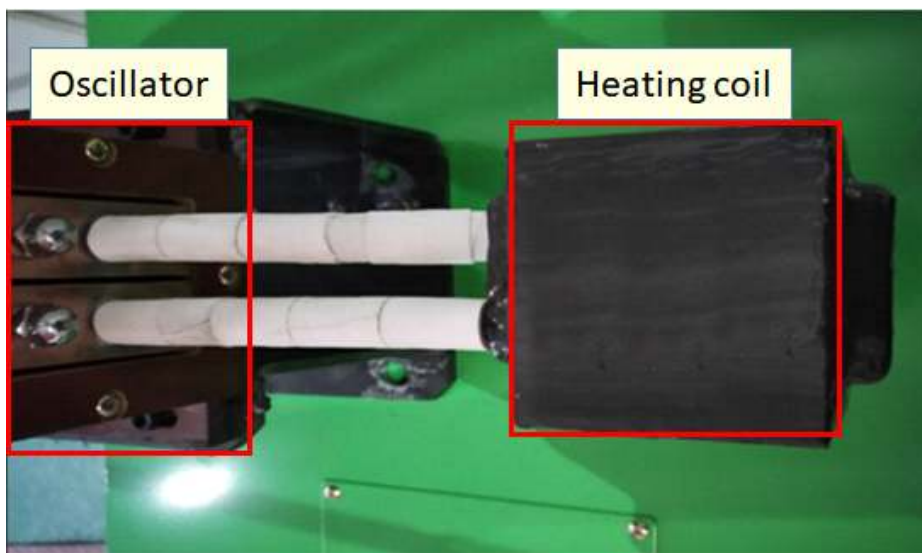


Fig. 3-3 Heating coil and oscillator

## 2. 고주파 가열 발전기 및 제어 장치 제작

가열 코일이 원하는 성형 부위를 가열할 수 있도록 발전기와 전압과 주파수를 제어할 수 있는 장치가 필요하다. 먼저 전압과 주파수를 제어할 수 있는 제어 장치의 회로 및 하우징을 설계 제작하고, 발전기 및 가열 코일의 발열을 제어하기 위해 연결되는 냉각 케이블 부를 설계 제작 하였다.

제작한 고주파 유도가열 장치의 출력 전압은 0 ~500 V, 출력 주파수는 20 ~ 30 kHz 까지 가변 할 수 있도록 제작하였으며, 출력제어 방식은 Voltage control(Thyristor 에 의한 전력 제어)방식으로 일반 사용 전원을 고주파 출력 전류로 변환하여 유도가열 할 수 있도록 제작하였다.

가열 시간과 고주파 출력을 조절할 수 있게 제작하였으며, 특히 고주파의 출력 조절은 입력 전력을 조절하여 고주파 발전기의 출력 전압과 주파수를 적절히 가변 시켜 유도가열 할 수 있게 제작하였다.

발전기는 반도체의 파워트랜스 회로 혹은, 고압회로라고 유사하며, 파워트랜스 회로는 반도체로부터 많은 전류가 흐르게 되므로 단자의 접촉 상태 등을 고려하여 설계 및 제작하였다. 그리고 발전기의 터미널 부위에 발열이 심하기 때문에 수냉식 케이블을 사용하여 발열에 대한 문제를 해결할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 3-4는 수냉식 케이블의 설계도이며, Fig. 3-5는 가열 장치의 발전기 박스에 대한 설계도이다. Fig. 3-6과 Fig. 3-7은 고주파 유도가열 장치의 제어를 위한 메인 회로와 제어회로 설계도이며, Fig. 3-8, Fig. 3-9는 입출력을 제어할 수 있는 패널과 제어 장치 박스의 설계도이다.

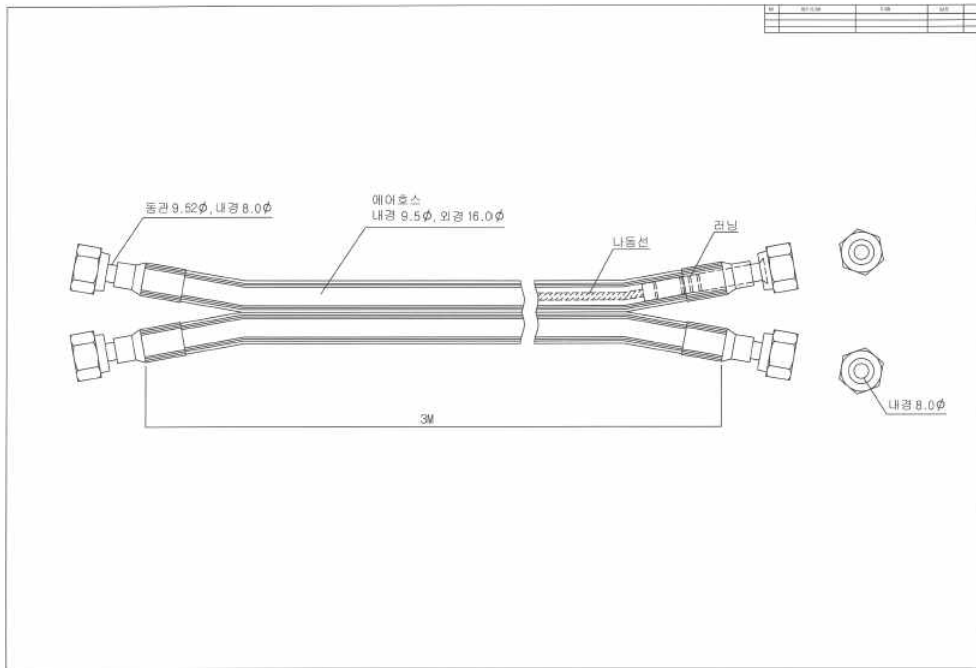


Fig. 3-4 Design drawing of water-cooled cable

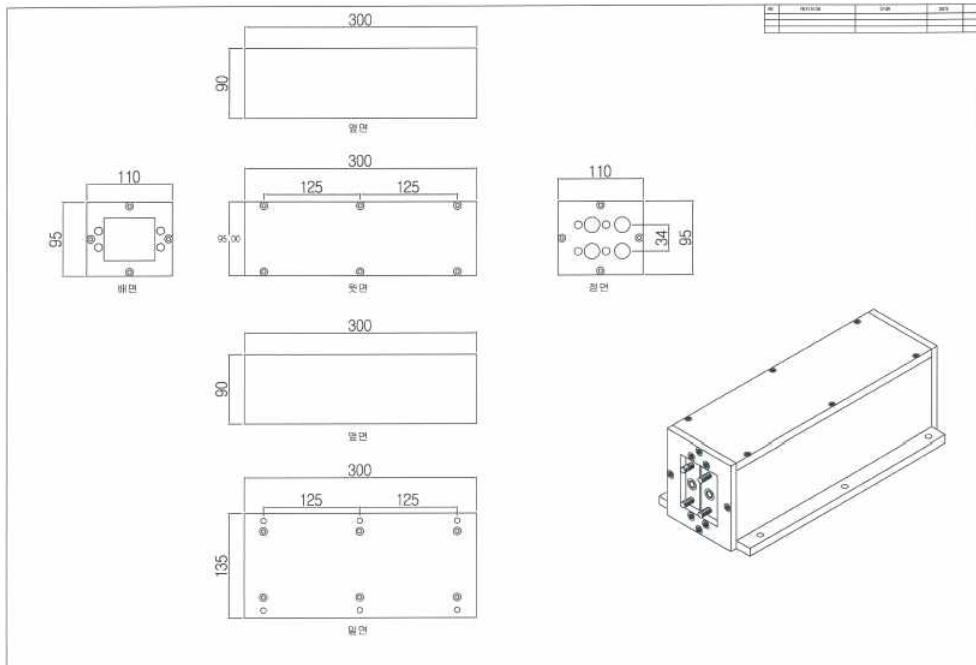


Fig. 3-5 Design drawing of oscillator box

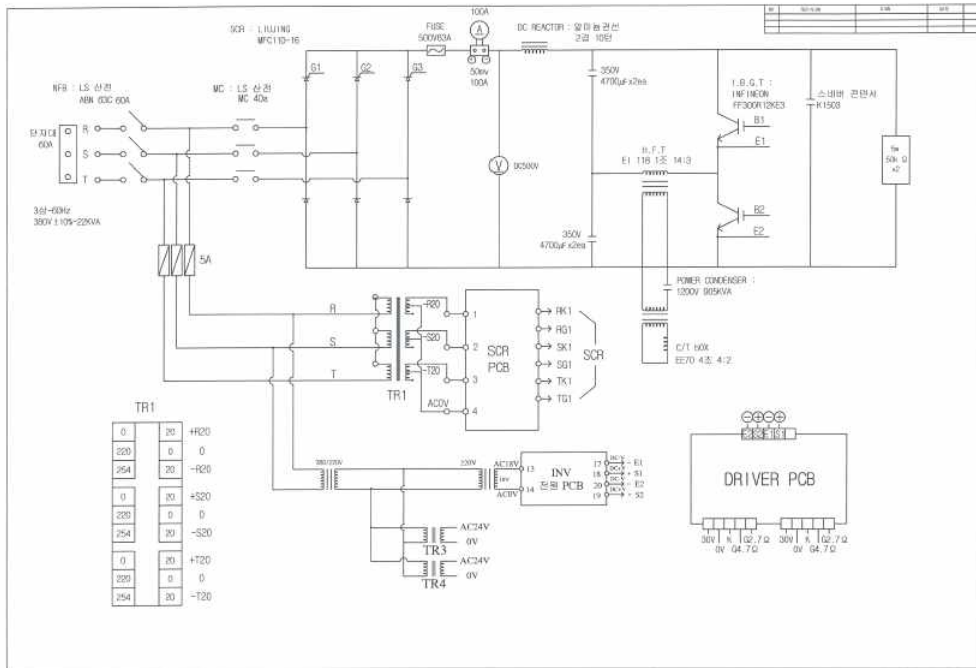


Fig. 3-6 Design drawing of main circuit

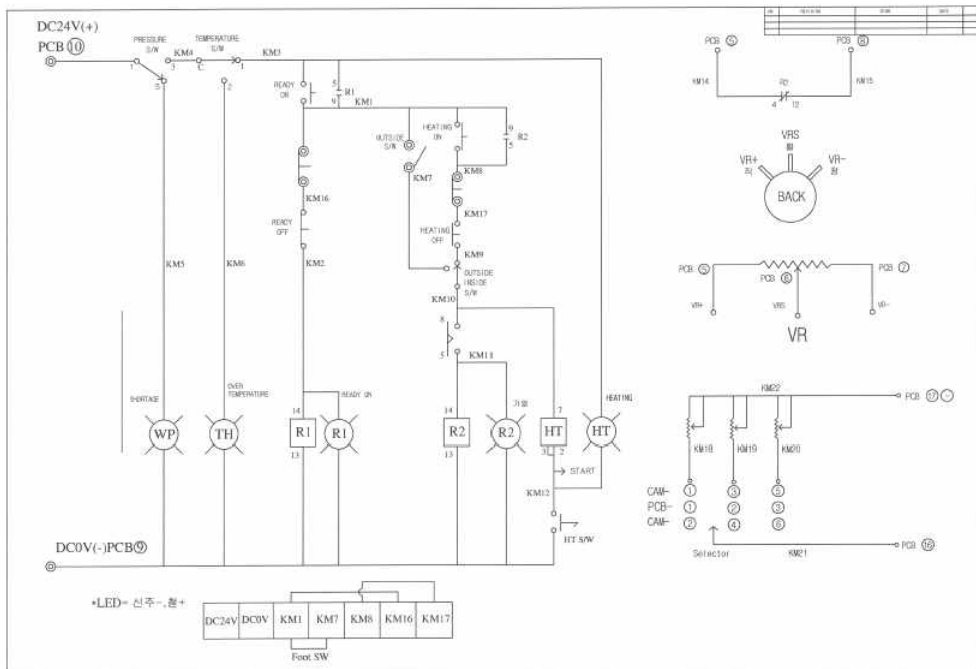


Fig. 3-7 Design drawing of control circuit

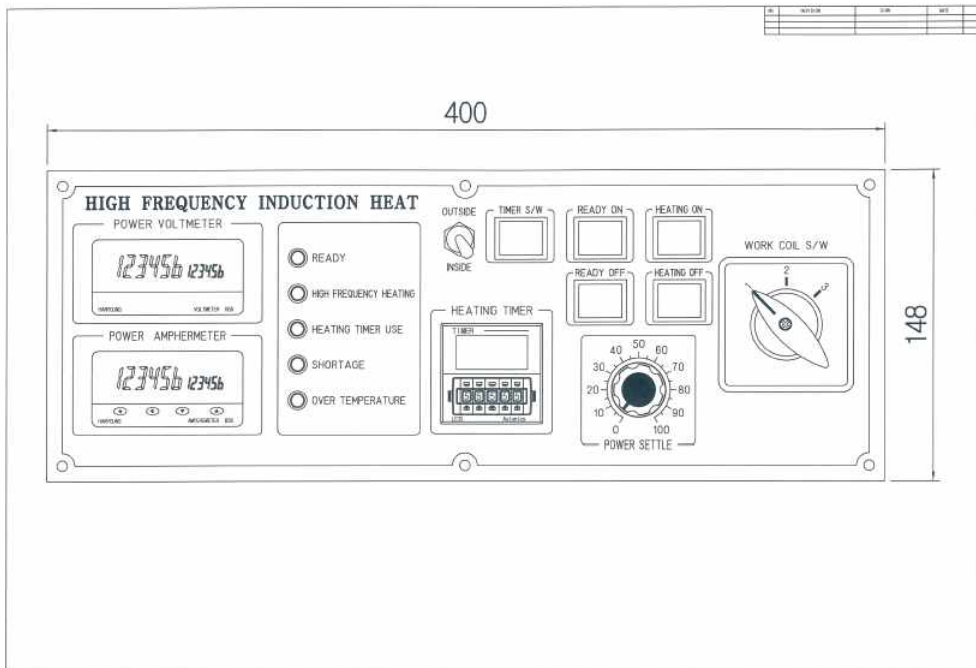


Fig. 3-8 Design drawing of control panel

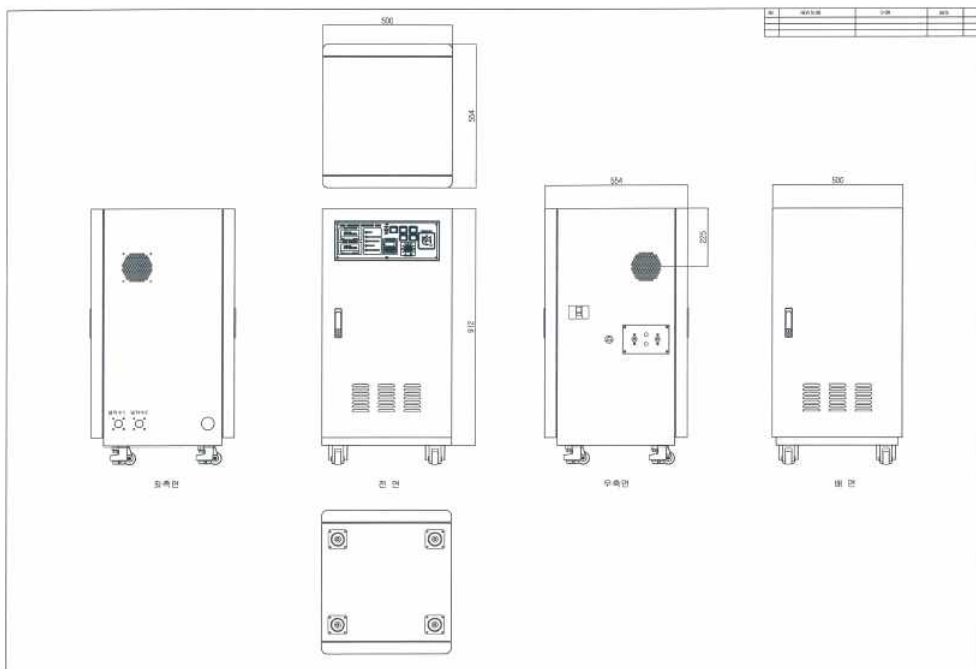


Fig. 3-9 Design drawing of control box





Fig. 3-10 Assembled control box for induction heating device

설계도를 기반으로 제어 장치 박스에 회로 및 기타장치들을 Fig. 3-10과 같이 조립하여 고주파 유도가열 장치의 제어 장치를 제작하였다.

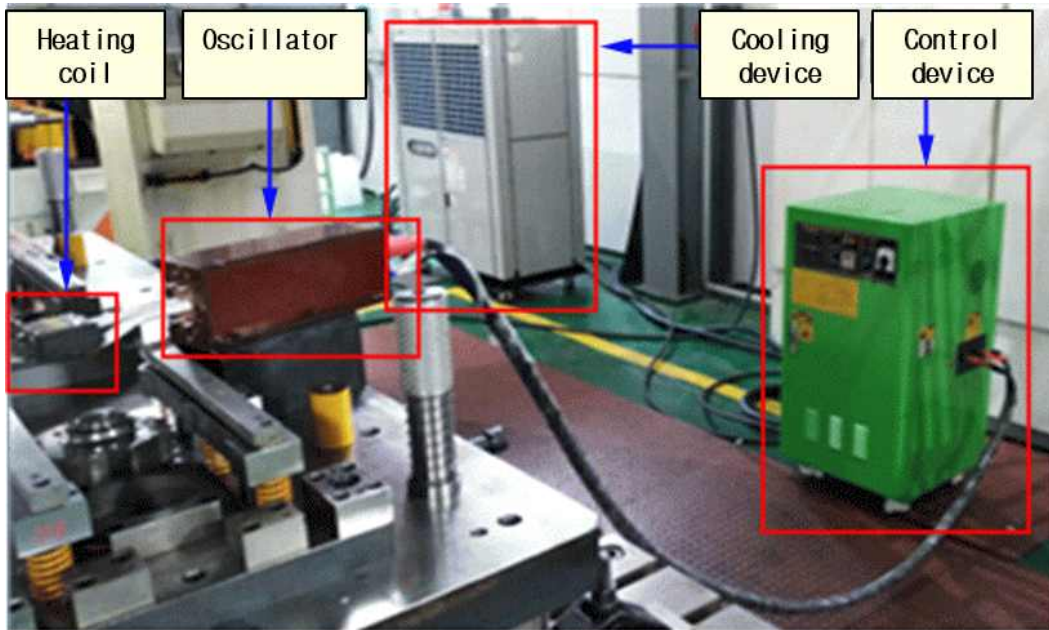


Fig. 3-11 Configuration of high frequency induction heating device

고주파 유도가열 장치의 전체적인 구성은 Fig. 3-11과 같다.

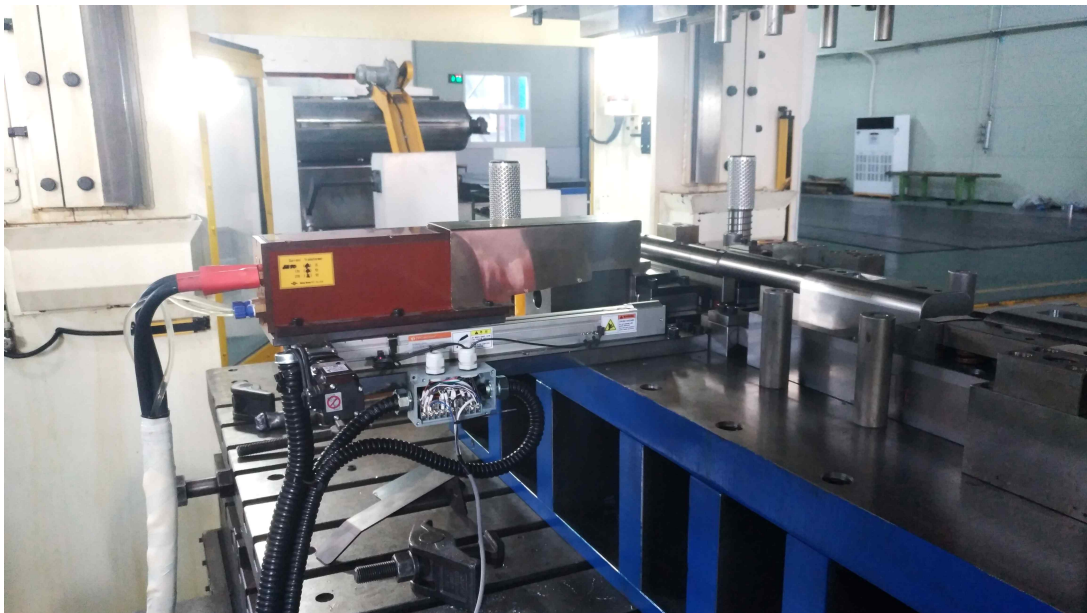


Fig. 3-12 High frequency induction heating device applied to progressive molding process



Fig. 3-13 Practical use of high frequency induction heating device for producing knuckle bracket

Fig. 3-12는 제작한 고주파 유도가열 장치를 실제 프로그레시브 금형에 적용한 모습이고, Fig. 3-13과 같이 고주파 유도가열 장치로 프로그레시브 금형 공정 중간에 제품의 연결부위를 급속가열하여 제품 성형 테스트를 수행하였다.







Fig. 3-16 Heating equipment for high temperature material testing

고온 인장 실험은 제작된 표준 고온 인장 시험편을 인장 시험기에 상단과 하단을 고정 시키고 Fig. 3-16의 고온 인장 시험기 챔버의 안쪽에 설치된 비접촉식 온도 센서를 통해 상단, 하단, 시험편의 온도를 계측하게 된다. 온도 조건이 낮을수록 승온 시간을 길게 하여 온도 조건을 맞추게 하였으며, 챔버 안 쪽 온도와 시험편의 온도가 일치하였을 때 15분간 유지 시킨 후 인장을 수행하였다. Fig. 3-17은 고온 인장 실험 전과 후의 모습이다.



(a) Before experiment



(b) After experiment

Fig. 3-17 Tensile testing under high temperature

Fig. 3-18은 고온 인장 실험 시 온도 조건을 제어하는 장치를 나타냈으며, 이 장치로 고온 인장 실험 온도 조건 200 °C일 때는 승온 시간을 약 70분으로 설정하였으며, 챔버 안의 온도는 약 205 °C, 시험편 자체 온도는 약 202 °C로 안정화 됐을 때 인장 속도 1.5 mm/min 으로 고온 인장 실험을 수행하였다.

온도 조건 300 °C일 때는 승온 시간을 약 40분으로 설정하였으며, 챔버 안의 온도는 약 305 °C, 시험편 자체 온도는 약 302 °C로 안정화 됐을 때 인장 속도 1.5 mm/min 으로 고온 인장 실험을 수행하였다.

온도 조건 400 °C일 때는 승온 시간을 약 33분으로 설정하였으며, 챔버 안의 온도는 약 400 °C, 시험편 자체 온도는 약 395 °C로 안정화 됐을 때 인장 속도 1.5 mm/min 으로 고온 인장 실험을 수행하였다.

온도 조건 500 °C일 때는 승온 시간을 약 25분으로 설정하였으며, 챔버 안의 온도는 약 500 °C, 시험편 자체 온도는 약 495 °C 로 안정화 됐을 때 인장 속도 1.5 mm/min 으로 고온 인장 실험을 수행하였다.

온도 조건 600 °C일 때는 승온 시간을 약 25분으로 설정하였으며, 챔버 안의 온도는 약 600 °C, 시험편 자체 온도는 약 595 °C로 안정화 됐을 때 인장 속도 1.5 mm/min 으로 고온 인장 실험을 수행하였다.



Fig. 3-18 Temperature control device for tensile testing under high temperature

## 2. 소재별 고주파 유도가열 실험

고주파 유도가열 장치로 소재를 가열하기 위한 시간별 온도 변화를 계측하기 위해 STS304 소재와 SAPH400 소재의 판재를 제작하였다.

Fig.3-19와 같은 판재 시험편에 고주파 유도가열 장치를 이용하여 약 8초 동안 가열하고 적외선 열화상 카메라를 이용하여 각 소재별로 유도가열 시간에 따른 온도 변화를 계측하였다.



Fig. 3-19 Panel specimen for measuring change of temperature by high frequency induction heating for 8 sec of heating time

고주파 유도가열 장치의 세팅 값은 전압 약 500V, 주파수 약 20 kHz로 설정하였으며, 약 8초 가열 하였을 때 600 °C 이상으로 소재를 가열할 수 있도록 가열 시간을 8초로 설정하고, 입력 전력을 조절하여 세팅 값으로 소재를 가열할 수 있도록 하였다.

Fig. 3-20과 같이 소재별 판재 시험편이 고주파 유도가열 장치의 가열 코일 부분 위로 올라오게 하여 적외선 열화상 카메라의 계측이 용이하도록 배치하고 소재별 고주파 유도가열 실험을 수행하였다.



Fig. 3-20 Experiment for heating panel specimen using high frequency induction heating device



### 3. 열응력 해석

열응력 해석을 위해 마이다스아이티와 삼성전자가 공동으로 개발한 MeshFree 프로그램을 이용하여 열응력 해석을 수행하였다.

Table 3-1 Mechanical and thermal properties of STS304 and SAPH400

Material	Elastic constant [N/mm <sup>2</sup> ]	Poisson's ratio	Mass density [kg/mm <sup>3</sup> ]	Coefficient of thermal expansion	Heat conductivity [W/mm·°C]	Specific heat [J/kg·°C]
STS304	203 × 10 <sup>3</sup>	0.30	7.96 × 10 <sup>-6</sup>	17 × 10 <sup>-5</sup>	0.0157	510
SAPH400	210 × 10 <sup>3</sup>	0.29	7.89 × 10 <sup>-6</sup>	1.24 × 10 <sup>-5</sup>	0.0890	481

열응력 해석을 위한 소재별 물성치는 Table 3-1에 정리하여 나타냈다.

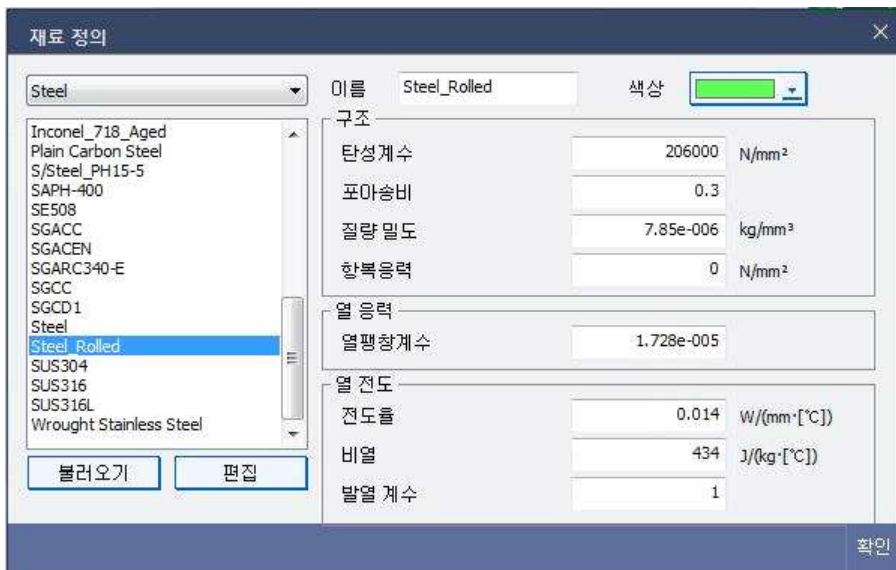


Fig. 3-21 Window for material definition in MeshFree analysis software

Fig. 3-21은 MeshFree 해석 시뮬레이션 프로그램에서 재료의 기계적, 열적 특성을 입력하여 소재를 정의하는 절차를 보여준다.

열응력 해석을 위해 성형성이 많이 요구되는 자동차 부품인 Fig.3-22와 같은 너클 브라켓을 대상으로 선정하였으며, 너클 브라켓을 모델링하여 Fig. 3-23와 같은 프로그레시브 공정 과정에서 너클 브라켓 연결 부위를 고주파 유도가열 장치를 이용해 국부 가열하였을 때, 밴딩 공정 중 그 성형부의 열응력 변화를 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

프레스 금형의 밴딩 공정 시 위에서 아래(z축 방향)로 147,100 N(15 t)의 집중 하중을 준다고 가정하고 하중 조건을 주었으며, 초기 온도 조건을 상온 20 °C라고 가정하였을 때, 너클 브라켓의 연결 부위의 고정 온도가 각 100, 200, 300, 400, 500, 600 °C 일 때 온도별 너클 브라켓 연결 부분의 열응력 해석을 수행하였다.

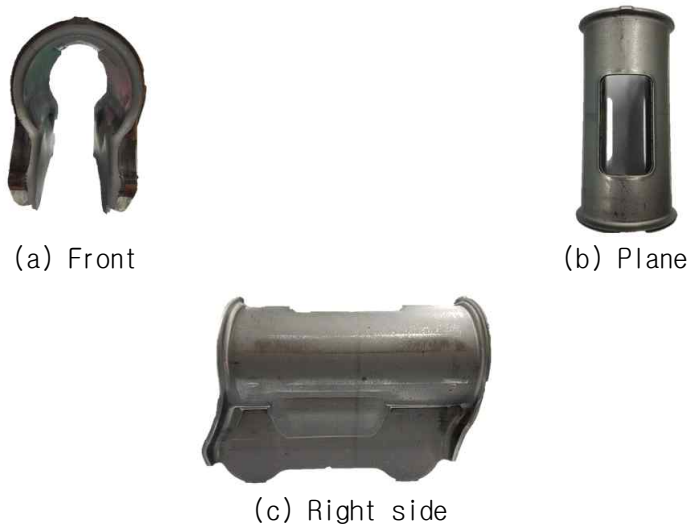
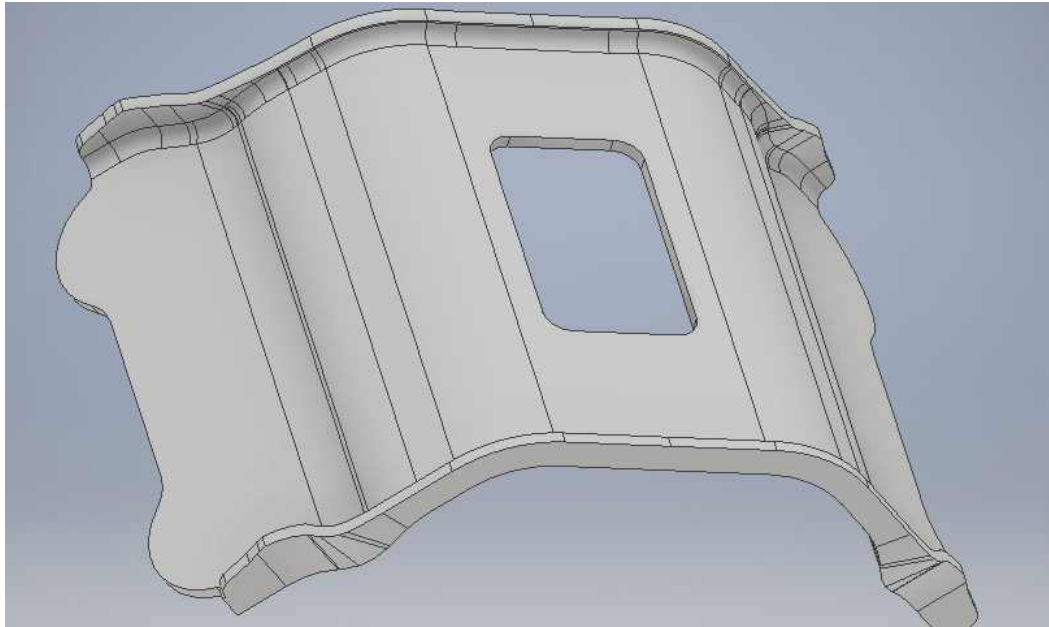


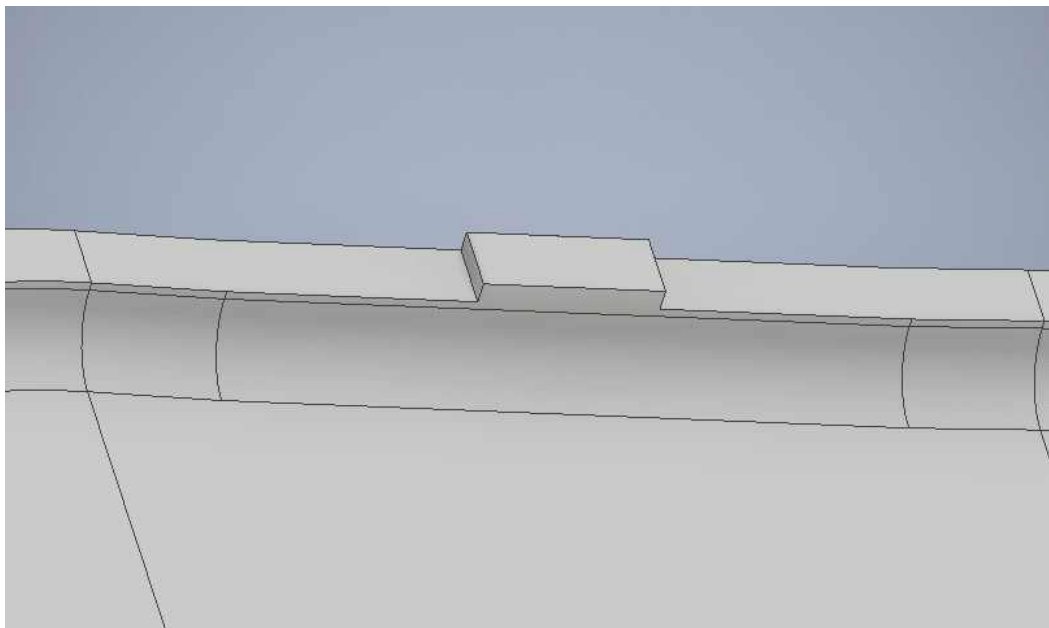
Fig. 3-22 Knuckle bracket used for automotive parts



Fig. 3-23 Sample of progressive molding process sequence



(a) Front



(b) Connection

Fig. 3-24 Modeling of knuckle bracket

Fig. 3-24는 열응력 해석을 위해 사용된 너클 브라켓 모델링의 전면과 연결부이다.

#### 4. 광계측을 이용한 성형 제품 결함 검사

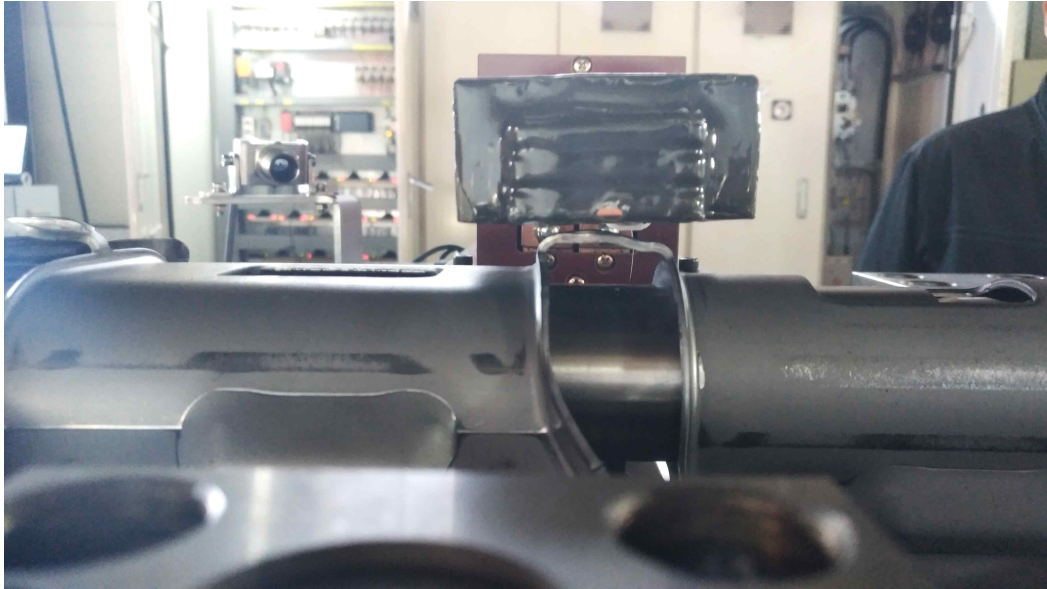


Fig. 3-25 Product of progressive molding using high frequency induction heating device

자동차 부품의 프로그레시브 금형 성형 중 불량률이 많이 발생하는 부분인 접합부에 Fig. 3-25와 같이 고주파 유도가열 장치를 적용하고, 가열 시간을 조절하여 성형부에 온도를 변경해가면서 자동차 부품을 타발하였다.

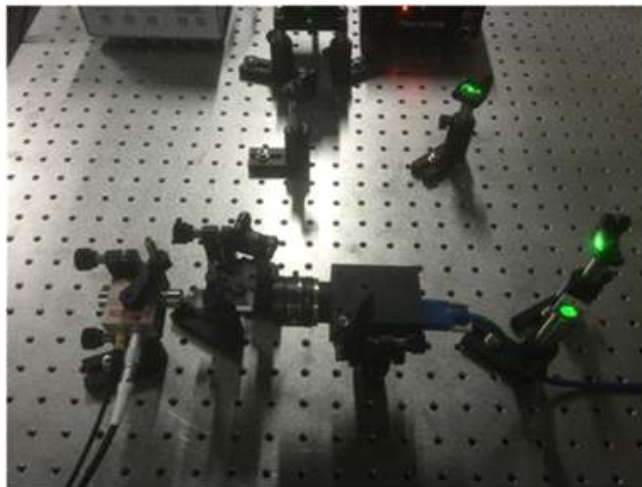


Fig. 3-26 Detection of defect on a knuckle bracket using optical interferometer

제작된 자동차 부품 주요 성형부에 제품 결함의 모양이나 원인을 평가하기 위해 Fig. 3-26과 같은 광계측 시스템을 이용하여 제품의 결함을 검사 하였다.

SAPH400 소재를 사용하여 실제 제품을 생산할 수 있는 프로그레시브 금형으로 타발하여 복잡한 성형이 필요한 자동차 부품인 너클 브라켓을 제작하였으며, 소재의 온도 별 차등을 주고 제품을 생산하였을 때 어떤 불량들이 발생하는지 판별하기 위해 금형에 적용된 고주파 유도가열 장치의 가열 시간을 조절하여 너클 브라켓 제품을 생산하였다.

Fig. 3-27에서 보는 바와 같이 정상적인 너클 브라켓 부품과 손상된 너클 브라켓 부품의 표시 부분(연결부)을 광계측을 이용한 결함 검사 방법으로 내부 및 외부의 결함을 평가하였으며, 가열 시간에 또는 가열 온도에 따른 결함의 발생이 어떠한지 비교 분석하였다.

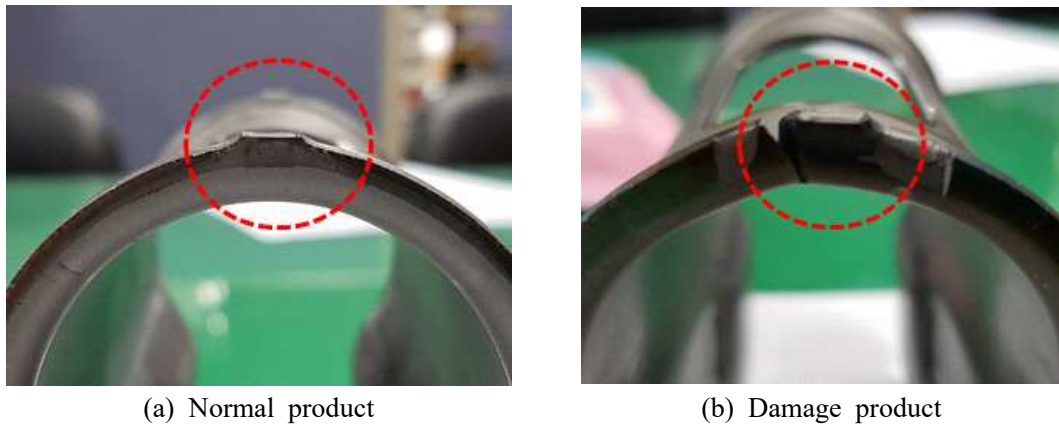


Fig. 3-27 Comparison of defect location on knuckle bracket

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

### 제 1 절 고온 인장 실험 결과

#### 1. STS304 소재

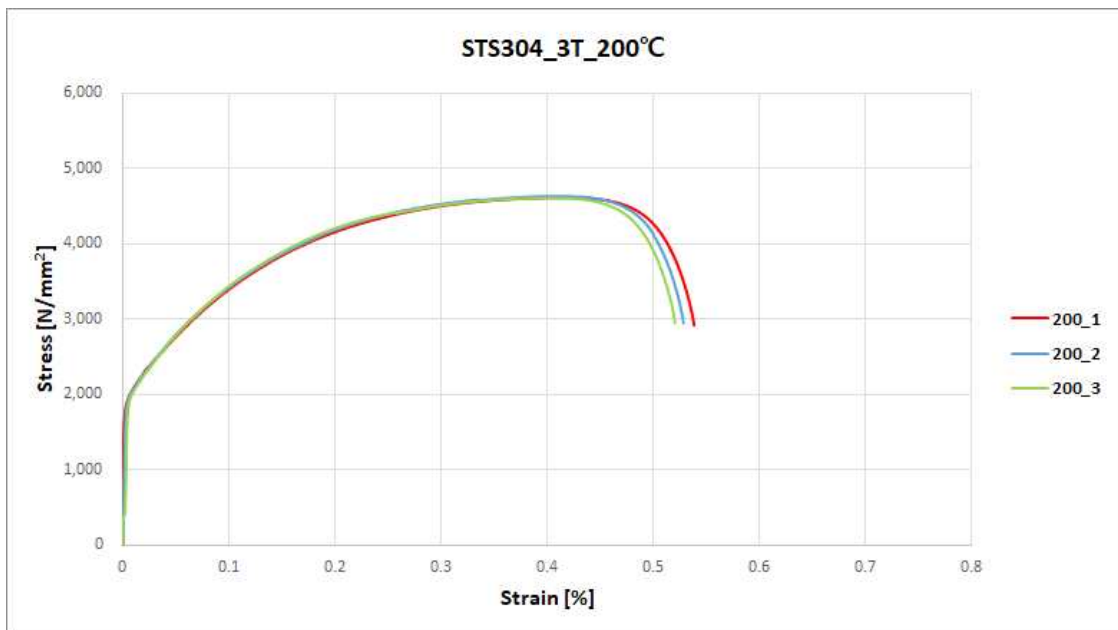


Fig. 4-1 Stress-strain curve under 200 °C for STS304

Table 4-1 Results of tensile testing under 200 °C for STS304

STS304 200 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
200_1	4,612.56	1,870.32	2,916.00	0.54
200_2	4,631.19	1,926.61	2,942.09	0.53
200_3	4,608.73	1,846.59	2,945.72	0.52
Avg.	4,617.49	1,881.17	2,934.60	0.53

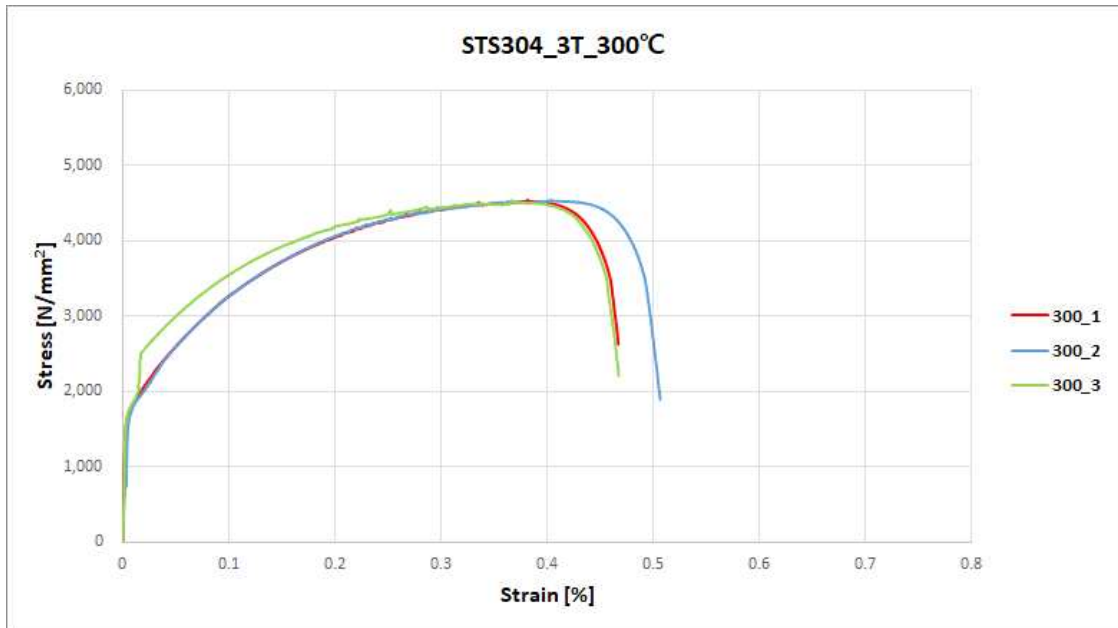


Fig. 4-2 Stress-strain curve under 300 °C for STS304

Table 4-2 Results of tensile testing under 300 °C for STS304

STS304 300 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
300_1	4,534.40	1,661.25	2,625.04	0.47
300_2	4,538.32	1,469.82	1,894.15	0.51
300_3	4,534.20	1,689.39	2,206.89	0.47
Avg.	4,535.64	1,606.82	2,242.03	0.48

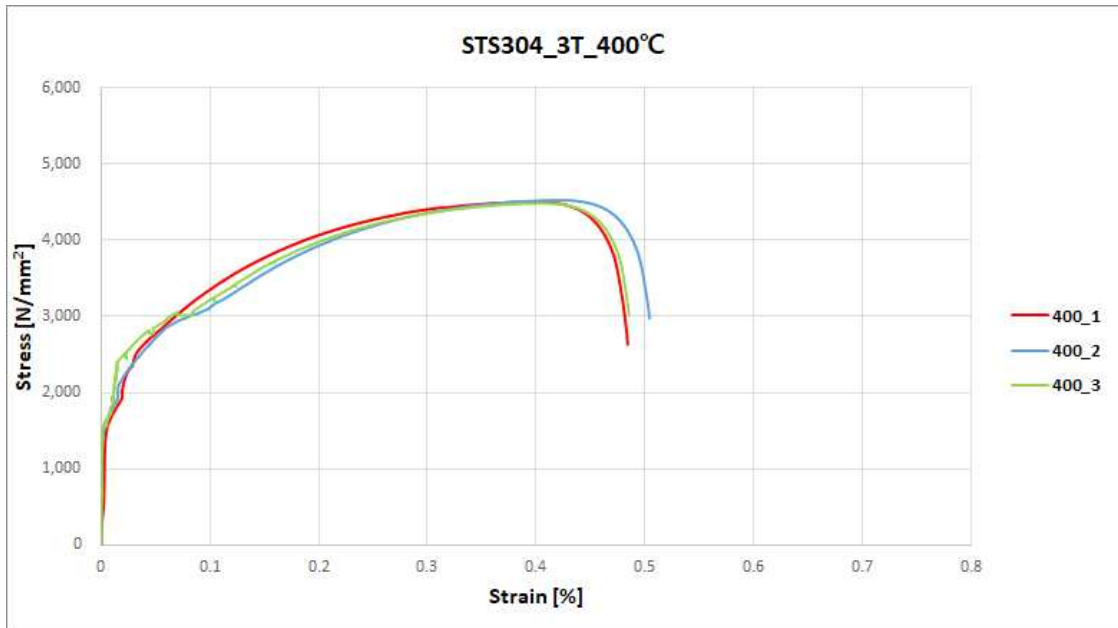


Fig. 4-3 Stress-strain curve under 400 °C for STS304

Table 4-3 Results of tensile testing under 400 °C for STS304

STS304 400 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
400_1	4,506.16	1,364.01	2,634.07	0.48
400_2	4,527.73	1,653.99	2,976.32	0.50
400_3	4,486.74	1,582.79	3,015.84	0.49
Avg.	4,506.88	1,533.60	2,875.41	0.49



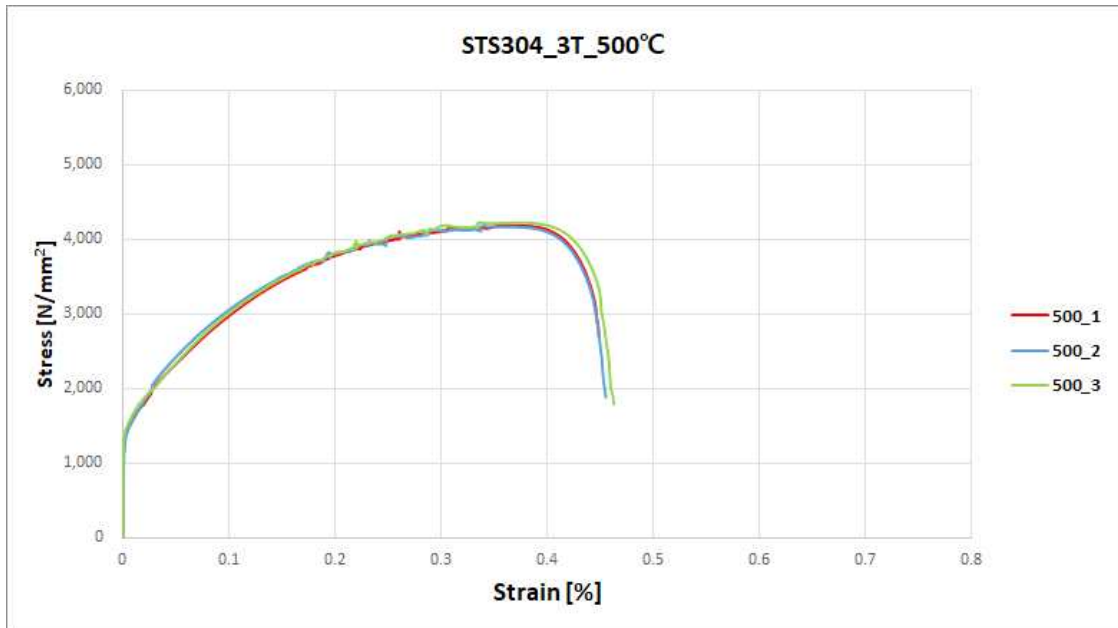


Fig. 4-4 Stress-strain curve under 500 °C for STS304

Table 4-4 Results of tensile testing under 500 °C for STS304

STS304 500 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
500_1	4,183.61	1,437.16	2,681.14	0.45
500_2	4,180.38	1,459.43	1,877.39	0.46
500_3	4,225.69	1,527.09	1,786.18	0.46
Avg.	4,196.56	1,474.56	2,114.90	0.46

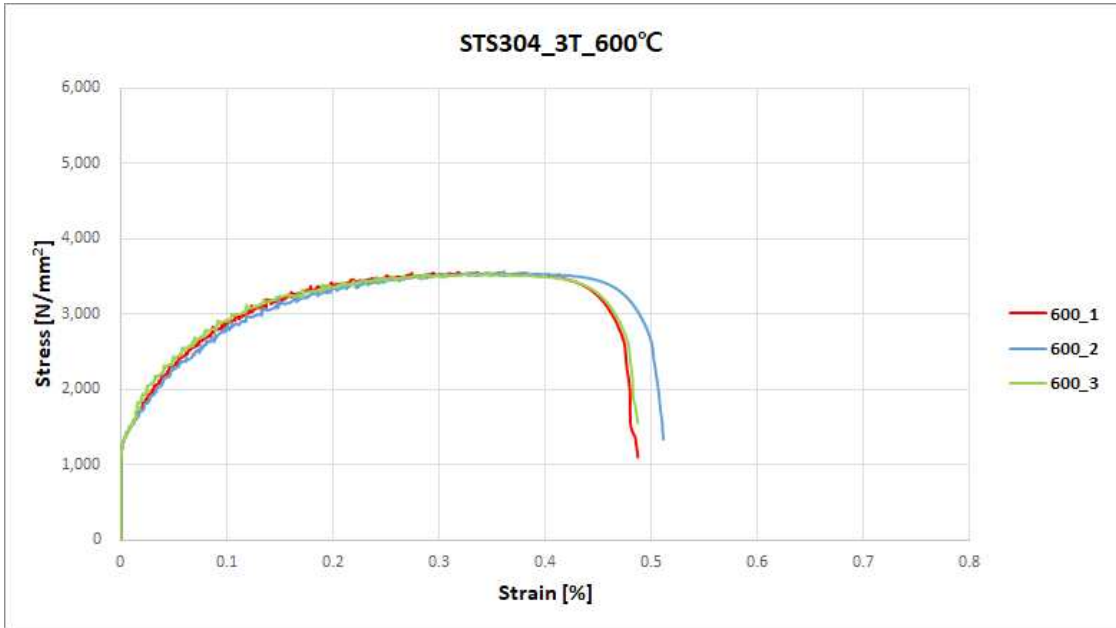


Fig. 4-5 Stress-strain curve under 600 °C for STS304

Table 4-5 Results of tensile testing under 600 °C for STS304

STS304 600 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
600_1	3,555.60	1,343.12	1,100.11	0.49
600_2	3,565.01	1,339.29	1,337.82	0.51
600_3	3,542.46	1,337.43	1,553.37	0.49
Avg.	3,554.36	1,339.95	1,330.43	0.50

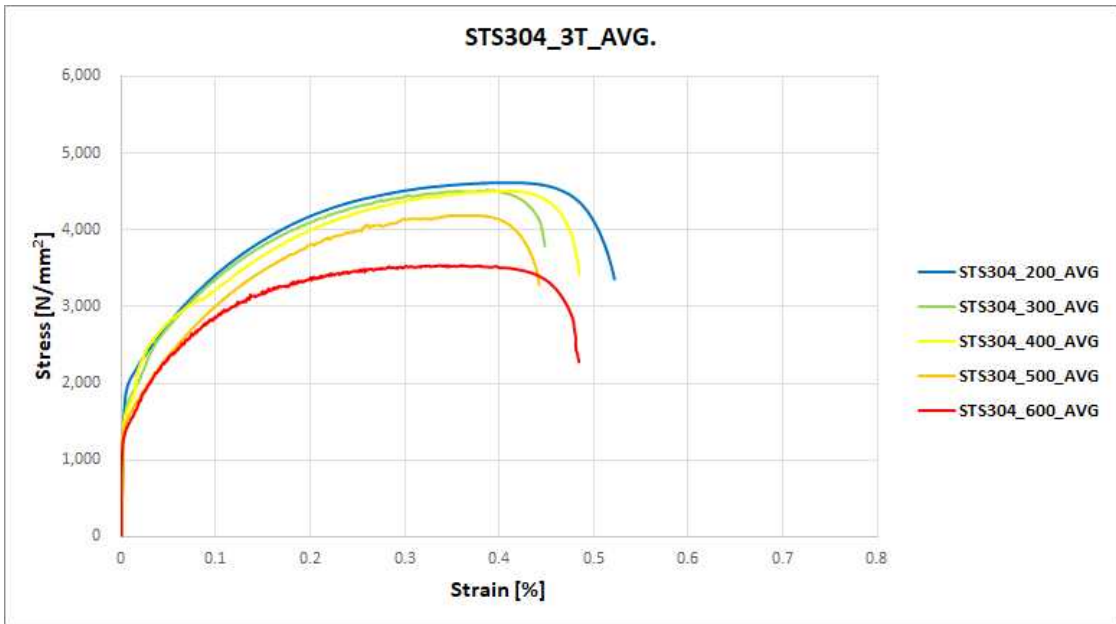


Fig. 4-6 Averaged stress-strain curve at each heating temperature for STS304

Table 4-6 Average values of results of tensile testing at each heating temperature for STS304

STS304 Average value	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
200 °C	4,617.46	1,881.21	2,934.64	0.53
300 °C	4,535.67	1,606.82	2,241.00	0.48
400 °C	4,506.84	1,533.56	2,875.41	0.49
500 °C	4,196.56	1,474.53	2,114.90	0.46
600 °C	3,554.32	1,339.98	1,330.47	0.50

Fig. 4-1부터 Fig 4-5까지 STS304 소재의 고온 인장실험 결과를 온도별로 그래프와 하였으며, Table 4-1부터 Table 4-5까지는 각 온도별, 시료별 고온 인장 결과 값을 표로 나타내었다. 그리고 Fig. 4-6과 Table 4-6은 STS304 소재의 각 온도별, 시료별 결과의 평균값을 각각 그래프와 표로 정리하였다.

STS304 소재의 고온 인장 실험 결과를 분석해보면 인장강도는 200 °C부터 300 °C까지는 약 81.79 N/mm<sup>2</sup> 낮아졌고 300 °C부터 400 °C까지는 약 28.83 N/mm<sup>2</sup> 낮아져 완만한 하향세를 보이는 반면 400 °C부터 500 °C까지 약 310.28 N/mm<sup>2</sup>, 500 °C부터 600 °C까지 약 642.24 N/mm<sup>2</sup> 만큼 인장강도가 급격하게 낮아지는 경향을 보였다.

항복강도는 온도가 올라갈수록 낮아지는 경향을 보였지만, 파단 강도는 200 °C에서 300 °C까지 약 693.64 N/mm<sup>2</sup> 낮아지다가 300 °C에서 400 °C까지는 약 760.51 N/mm<sup>2</sup> 만큼 반대로 높아졌고 다시 500 °C, 600 °C에서 약 760.51 N/mm<sup>2</sup>, 784.43 N/mm<sup>2</sup> 씩 거의 일정하게 낮아지는 경향을 보였다.

연신율은 200 °C부터 300 °C까지는 0.05 % 낮아졌다가 400 °C에서 0.01 % 증가하고 다시 500 °C에서 0.03 % 낮아졌다가 600 °C부터 0.04 % 다시 높아지는 경향을 보였다.

STS304 소재는 온도가 증가할수록 인장강도와 항복강도는 낮아지지만 파단강도와 연신율은 온도 구간에 따라 다른 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 온도가 증가할수록 인장강도가 크게 변하지 않았지만 500 °C와 600 °C 사이에 비교적 큰 변화가 있음을 확인하였다. 하지만 연신율은 온도 구간별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 이러한 실험 결과를 유추해 봤을 때 STS304 소재는 고주파 유도가열 장치를 이용한 가열 방법으로 큰 효과를 보기 힘들 것으로 판단된다.

## 2. SAPH400 소재

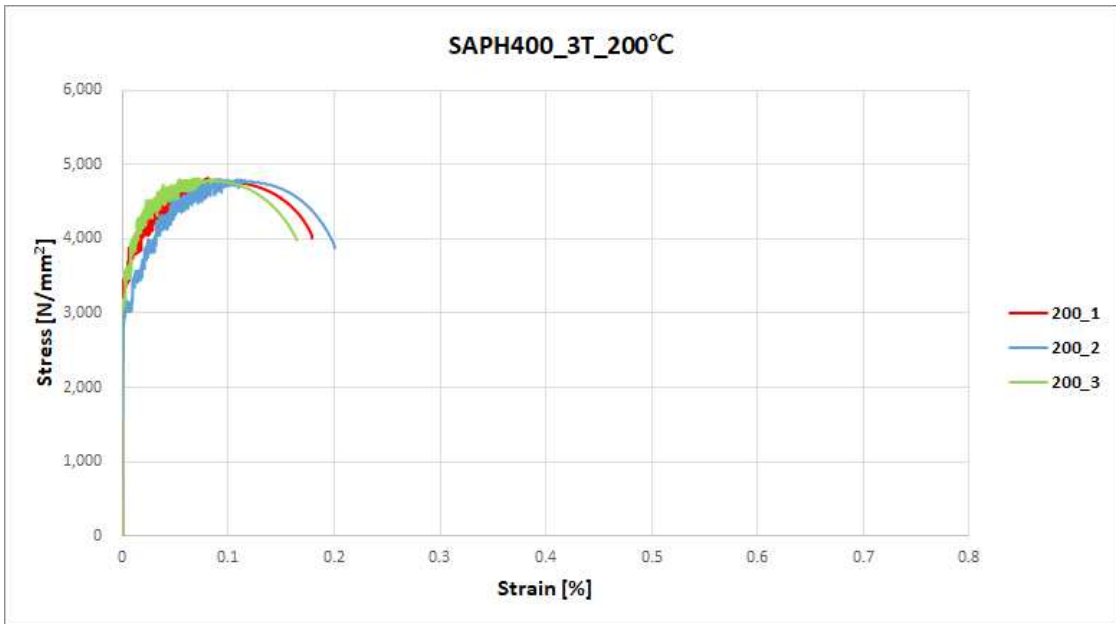


Fig. 4-7 Stress-strain curve under 200 °C for SAPH400

Table 4-7 Results of tensile testing under 200 °C for SAPH400

SAPH400 200 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
200_1	4,820.36	3,098.90	4,009.94	0.18
200_2	4,801.63	2,905.71	3,878.43	0.20
200_3	4,815.65	3,171.47	3,979.05	0.16
Avg.	4,812.55	3,058.69	3,955.81	0.18

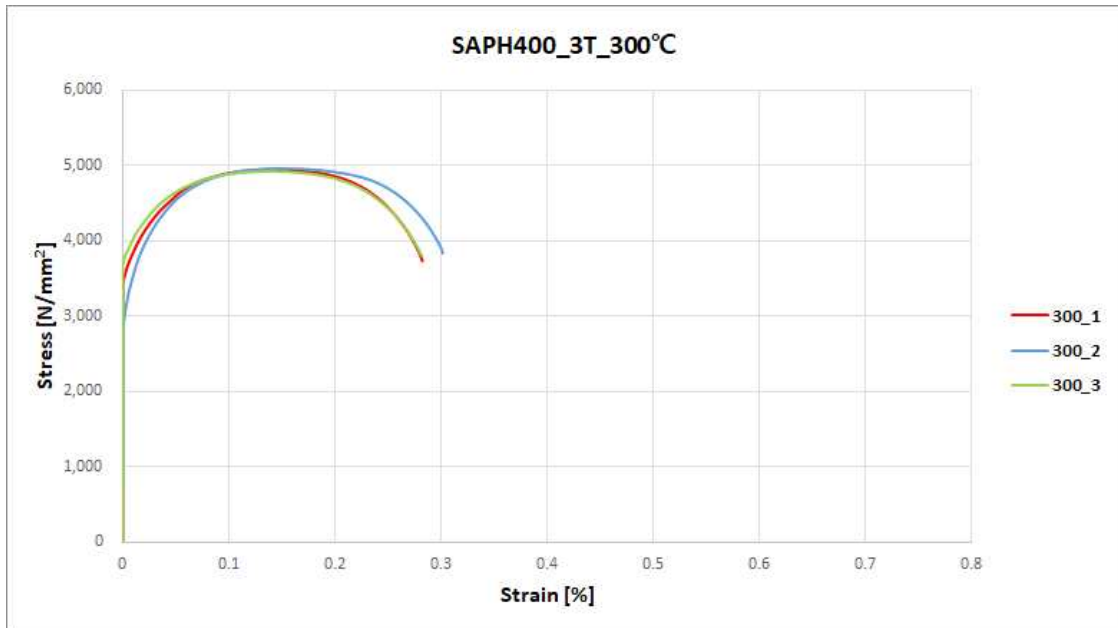


Fig. 4-8 Stress-strain curve under 300 °C for SAPH400

Table 4-8 Results of tensile testing under 300 °C for SAPH400

SAPH400 300 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
300_1	4,942.55	3,412.81	3,729.67	0.28
300_2	4,960.11	2,849.91	3,834.79	0.30
300_3	4,920.78	3,775.46	3,805.18	0.28
Avg.	4,941.15	3,346.06	3,789.88	0.29

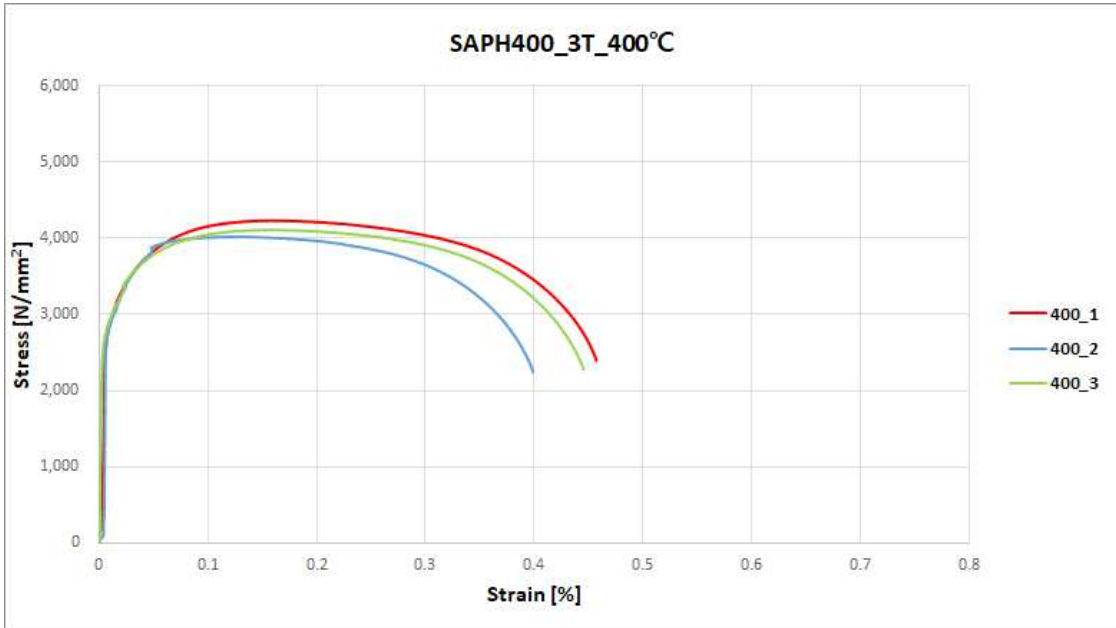


Fig. 4-9 Stress-strain curve under 400 °C for SAPH400

Table 4-9 Results of tensile testing under 400 °C for SAPH400

SAPH400 400 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
400_1	4,235.39	2,582.97	2,391.16	0.46
400_2	4,021.41	2,624.85	2,239.64	0.40
400_3	4,111.24	2,680.94	2,278.48	0.45
Avg.	4,122.68	2,629.59	2,303.09	0.44

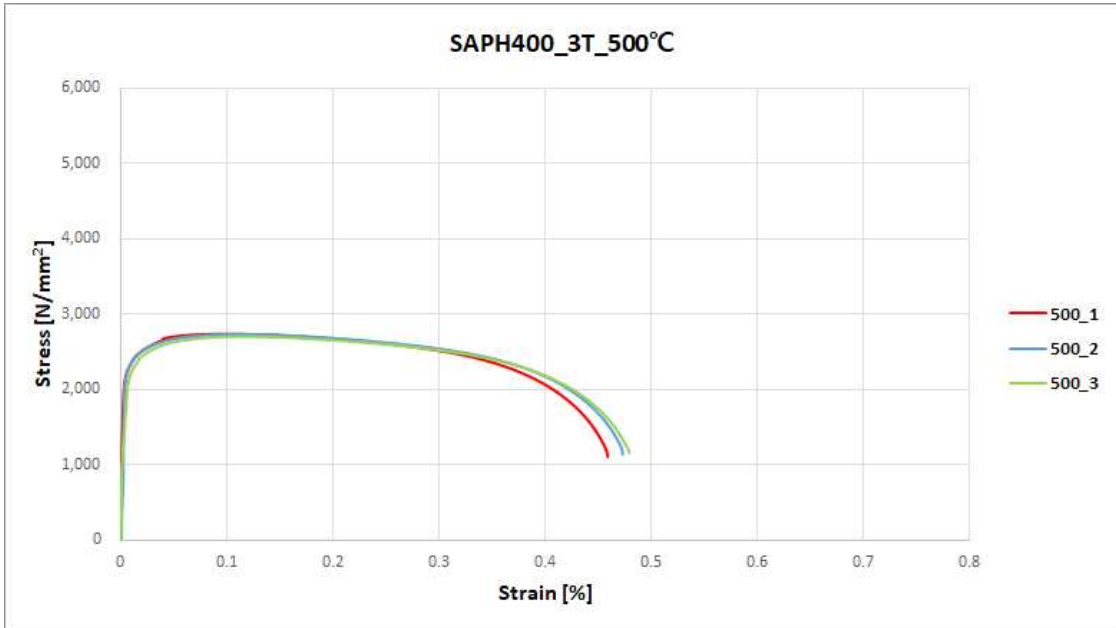


Fig. 4-10 Stress-strain curve under 500 °C for SAPH400

Table 4-10 Results of tensile testing under 500 °C for SAPH400

SAPH400 500 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
500_1	2,738.11	2,228.95	1,103.74	0.49
500_2	2,733.00	2,188.16	1,139.34	0.47
500_3	2,702.81	2,156.78	1,158.36	0.48
Avg.	2,724.64	2,191.30	1,133.81	0.48



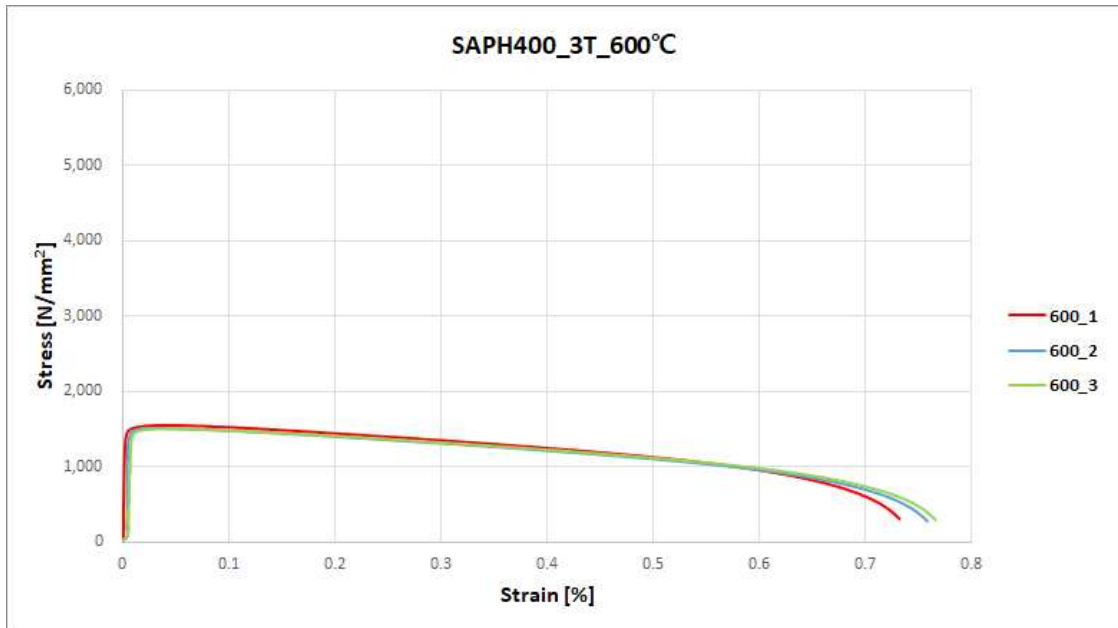


Fig. 4-11 Stress-strain curve under 600 °C for SAPH400

Table 4-11 Results of tensile testing under 600 °C for SAPH400

SAPH400 600 °C	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
600_1	1551.31	1462.76	306.46	0.73
600_2	1512.77	1385.19	279.40	0.76
600_3	1505.52	1364.50	295.47	0.77
Avg.	1,523.20	1,404.15	293.78	0.75

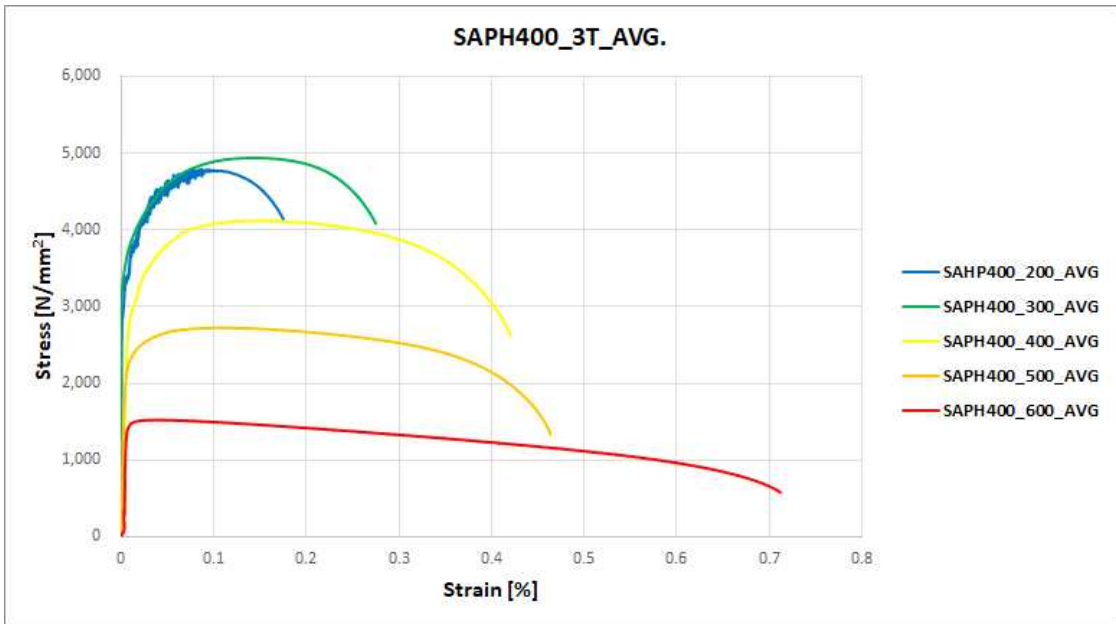


Fig. 4-12 Averaged stress-strain curve at each heating temperature for SAPH400

Table 4-12 Average values of results of tensile testing at each heating temperature for SAPH400

SAPH400 Average value	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Fracture strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
200 °C	4812.56	3058.69	3955.81	0.18
300 °C	4941.18	3346.03	3789.88	0.29
400 °C	4122.72	2629.56	2303.09	0.44
500 °C	2724.97	2191.30	1133.84	0.48
600 °C	1523.17	1404.12	293.81	0.75

Fig. 4-7부터 Fig 4-11까지 SAPH400 소재의 고온 인장실험 결과를 온도별로 그래프와 하였으며, Table 4-7부터 Table 4-11까지는 각 온도별, 시료별 고온 인장 결과 값을 표로 나타내었다. 그리고 Fig. 4-12와 Table 4-12는 SAPH400 소재의 각 온도별, 시료별 결과의 평균값을 각각 그래프와 표로 정리하였다.

SAPH400 소재의 고온 인장 실험 결과를 분석해보면 인장강도가 200 °C부터 300 °C까지 약 128.62 N/mm<sup>2</sup> 높아졌고, 300 °C부터 400 °C까지는 약 818.46 N/mm<sup>2</sup> 만큼 반대로 낮아졌으며, 그 이후부터 400 °C부터 500 °C까지 약 1,397.75 N/mm<sup>2</sup>, 500 °C부터 600 °C까지 약 1,201.80 N/mm<sup>2</sup> 만큼 인장강도가 급격하게 낮아지는 경향을 보였다.

항복강도는 인장강도와 비슷하게 300 °C 구간까지 높아졌다가 400 °C부터 낮아지는 경향을 보였지만 파단 강도는 온도에 따라 순차적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며 400 °C 구간에서부터 확연한 차이를 보였다.

연신율은 온도가 높아질수록 같이 높아졌고, 200 °C에서 600 °C까지 약 4배 증가한 것을 확인할 수 있었다.

SAPH400 소재는 400 °C 구간 이상의 온도부터 인장강도와 항복강도는 낮아지지만 파단강도는 온도 구간에 따라 점차 낮아졌고, 연신율은 온도 구간에 따라 점차 높아졌다. 이러한 실험 결과로 유추해 봤을 때 SAPH 소재는 고주파 유도가열 장치를 이용하여 500 °C이상 가열한다면 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

## 제 2 절 소재별 고주파 유도가열 실험 결과

### 1. STS304 소재

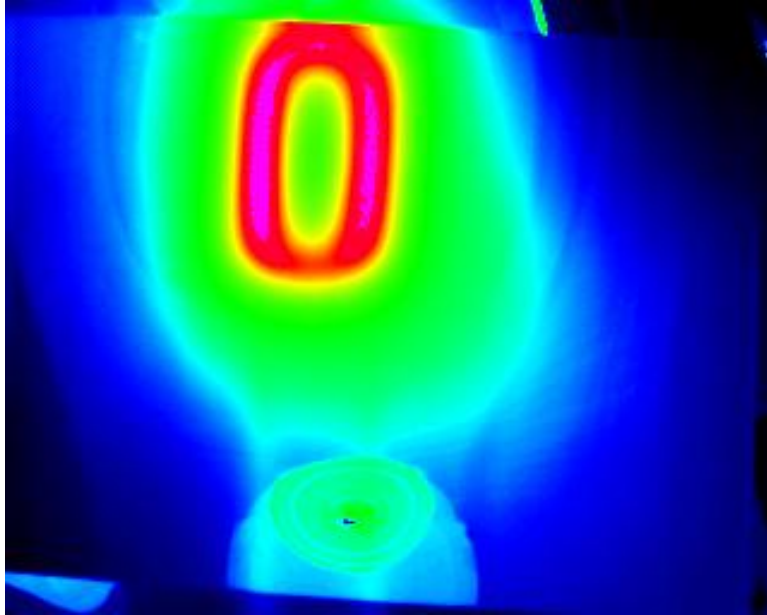


Fig. 4-13 Result image of infrared thermography for STS304 panel heated by high frequency induction heating device

Fig. 4-13은 적외선 열화상 카메라로 측정한 열화상 이미지로 측정된 열화상 이미지를 관찰한 결과 고주파 유도가열 장치의 코일 부분이 집중적으로 가열되는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 4-14 Graph of temperature change on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device

Fig. 4-14는 시간에 따른 계측 온도를 그래프로 표현한 결과이며, Table 4-13과 같이 시간별 최대 온도를 표로 정리하였다. 이 값들을 분석한 결과 고주파 가열장치로 8초까지 가열하였을 때 최고 온도는 약 605.26 °C로 측정되었으며, 온도가 일정한 속도로 계속 높아지는 것을 관찰할 수 있었다.

Table 4-13 Maximum temperature on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device under heating time condition

STS304 Heating time (s)	1 sec	2 sec	3 sec	4 sec	5 sec	6 sec	7 sec	8 sec
STS304 Maximum temperature (°C)	132.61	231.04	304.06	372.06	435.52	493.89	556.4	605.26

## 2. SAPH400 소재

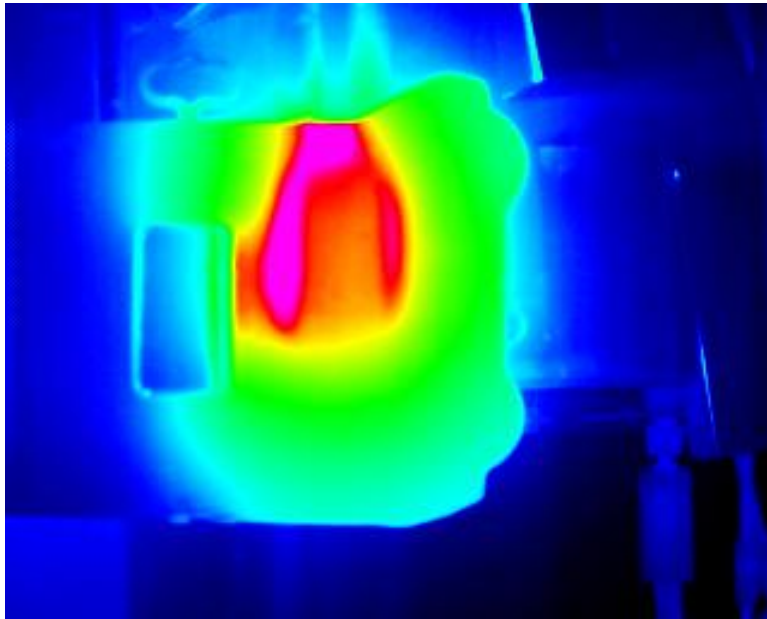


Fig. 4-15 Result image of infrared thermography for SAPH400 panel heated by high frequency induction heating device

Fig. 4-15는 적외선 열화상 카메라로 SAPH400 소재를 계측한 열화상 이미지로 계측된 열화상 이미지를 관찰한 결과 고주파 유도가열 장치로 가열하였을 때, 가열 코일의 안쪽 부분까지 가열되는 것을 확인할 수 있었다.

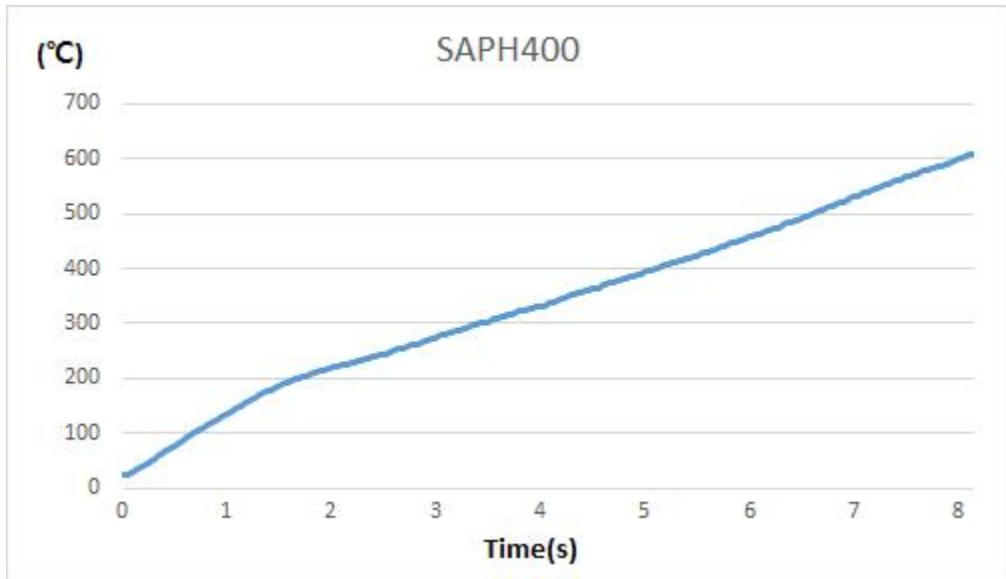


Fig. 4-16 Graph of temperature change on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device

Fig. 4-16은 시간에 따른 계측 온도를 그래프로 표현한 결과이며, Table 4-14와 같이 시간별 최대 온도를 표로 정리하였다. 이 값들을 분석한 결과 고주파 가열장치로 8초까지 가열하였을 때 SAPH400 소재의 최고 온도는 약 597.16 °C로 측정되었으며, 온도가 일정한 속도로 계속 높아지는 것을 관찰할 수 있었다.

Table 4-14 Maximum temperature on the surface of STS304 panel heated by high frequency induction heating device under heating time condition

SAPH400 Heating time (s)	1 sec	2 sec	3 sec	4 sec	5 sec	6 sec	7 sec	8 sec
SAPH400 Maximum temperature (°C)	131.11	216.12	271.59	330.63	391.12	445.04	527.9	597.16

### 제 3 절 소재별 열응력 해석 결과

#### 1. STS304 소재

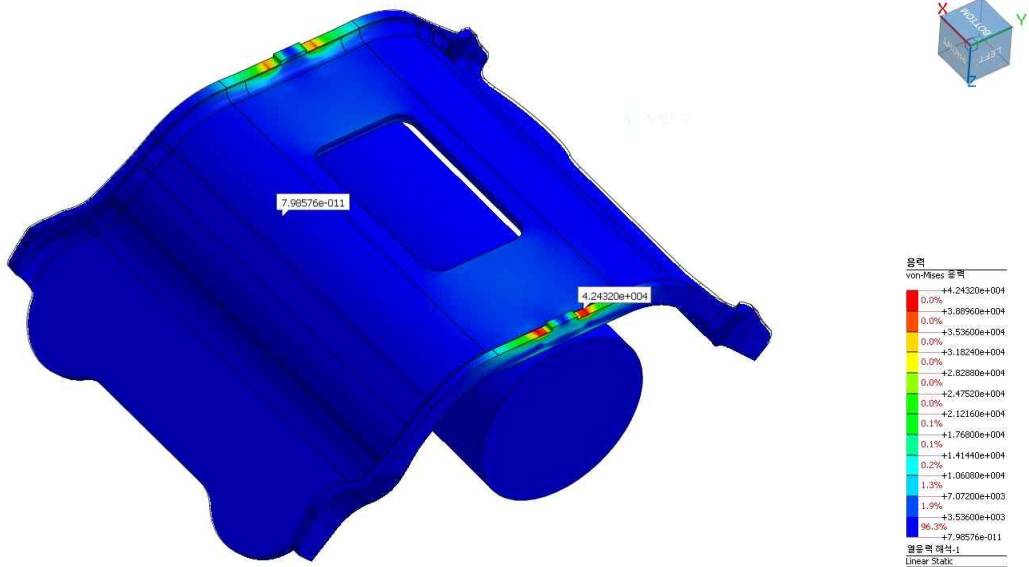


Fig. 4-17 Von-Mises stress of STS304 at 100 °C

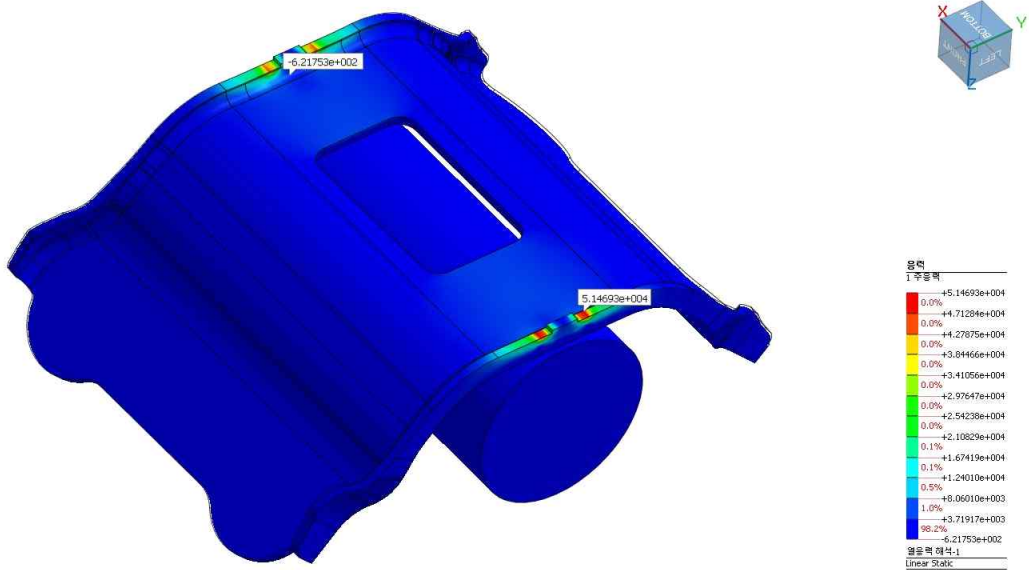
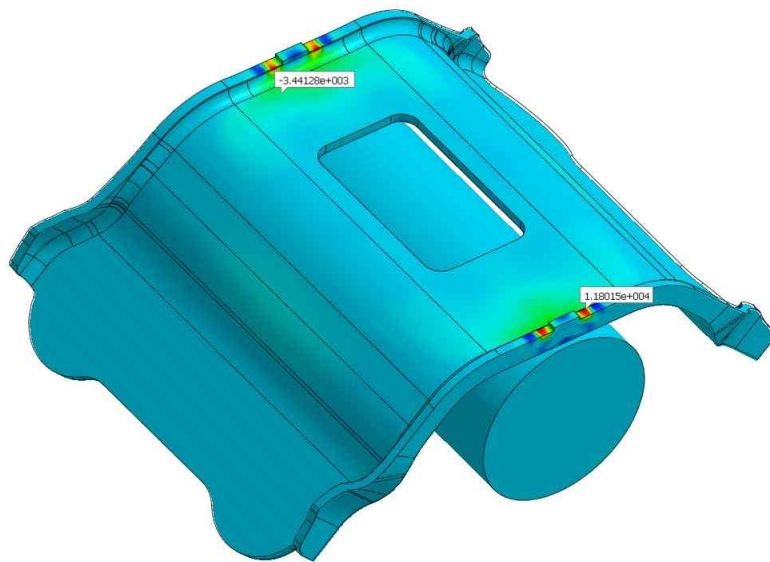


Fig. 4-18 1st principal stress  $\sigma_1$  of STS304 at 100 °C



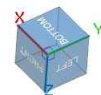
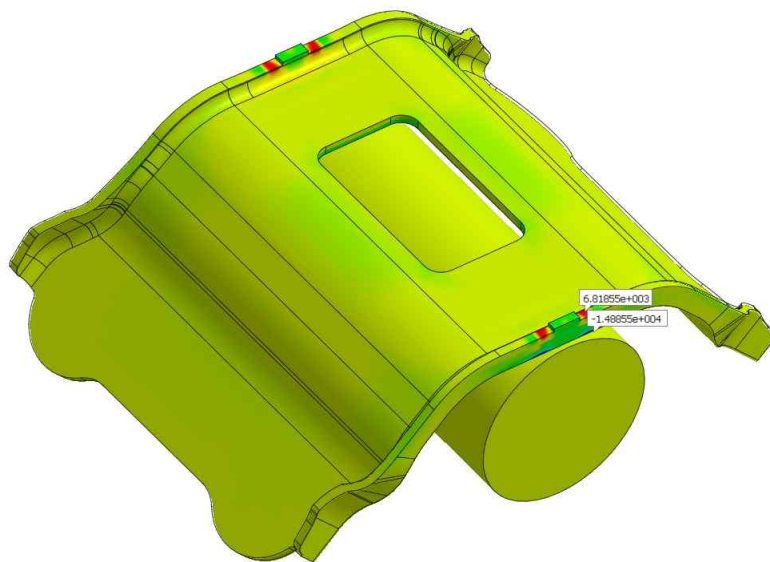


응력  
2 주응력

0.0%	+1.18015e+004
0.0%	-1.05313e+004
0.0%	+9.26104e+003
0.0%	+7.99081e+003
0.0%	+6.72058e+003
0.0%	+5.45034e+003
0.1%	+4.18011e+003
0.5%	+2.90988e+003
2.9%	+1.63965e+003
94.5%	-3.69413e+002
1.6%	-9.00819e+002
0.3%	-2.17105e+003
0.3%	-3.44128e+003

결과책 대쉬-1  
Linear Static

Fig. 4-19 2nd principal stress  $\sigma_2$  of STS304 at 100 °C



응력  
3 주응력

0.0%	+6.81855e+003
0.0%	+5.00980e+003
0.0%	+3.20121e+003
0.0%	+1.39254e+003
81.9%	-4.16128e+002
14.7%	-2.22480e+003
1.7%	-4.03347e+003
0.5%	-5.84214e+003
0.3%	-7.65001e+003
0.3%	-9.45948e+003
0.2%	-1.12682e+004
0.1%	-1.30768e+004
0.1%	-1.48855e+004

결과책 대쉬-1  
Linear Static

Fig. 4-20 3rd principal stress  $\sigma_3$  of STS304 at 100 °C

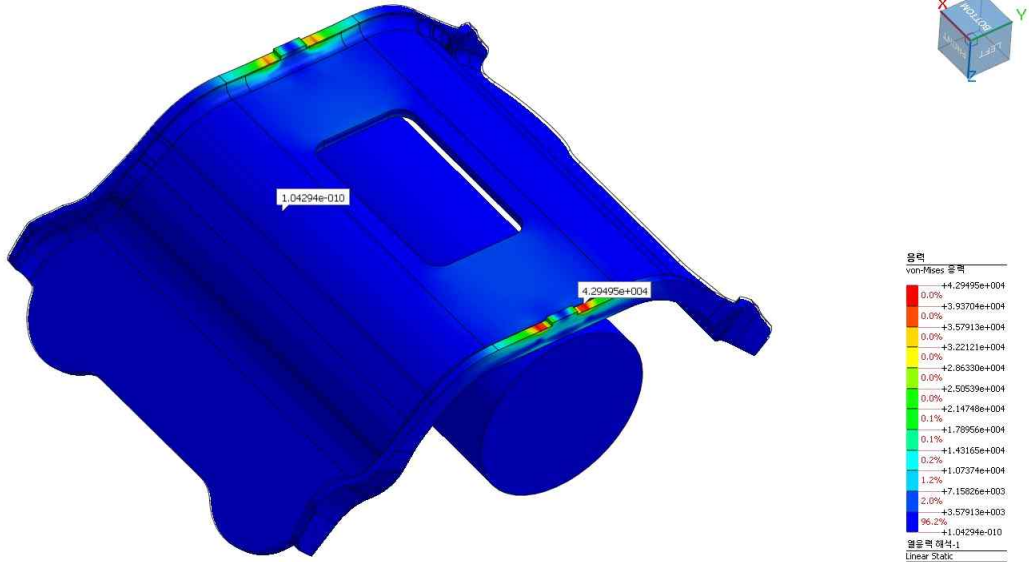


Fig. 4-21 Von-Mises stress of STS304 at 200 °C

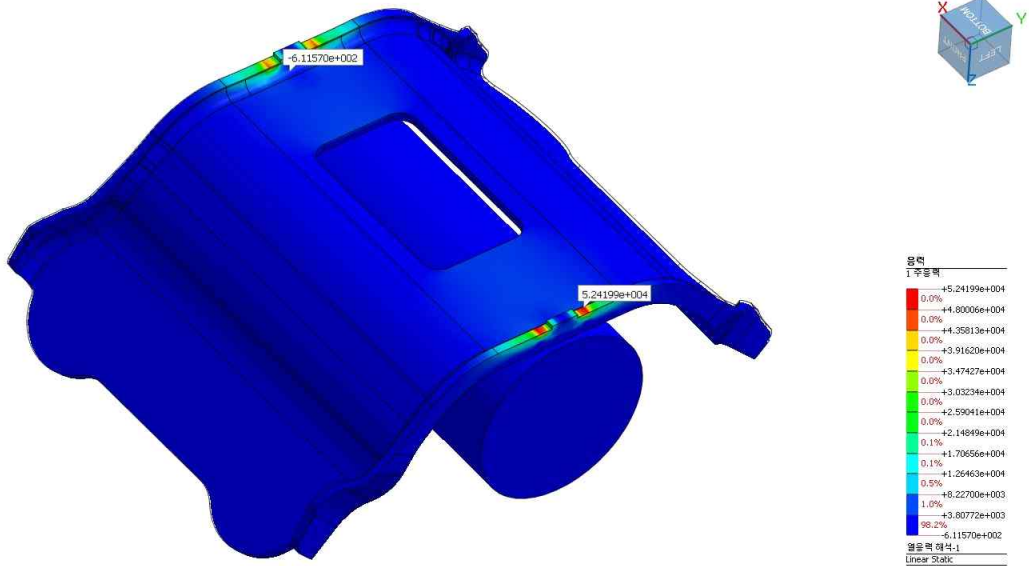


Fig. 4-22 1st principal stress  $\sigma_1$  of STS304 at 200 °C

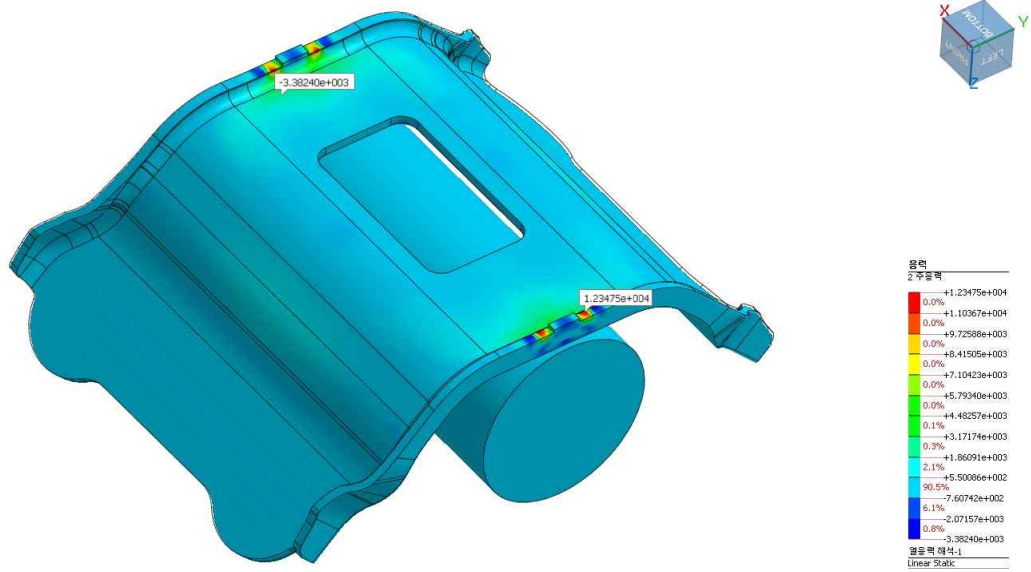


Fig. 4-23 2nd principal stress  $\sigma_2$  of STS304 at 200 °C

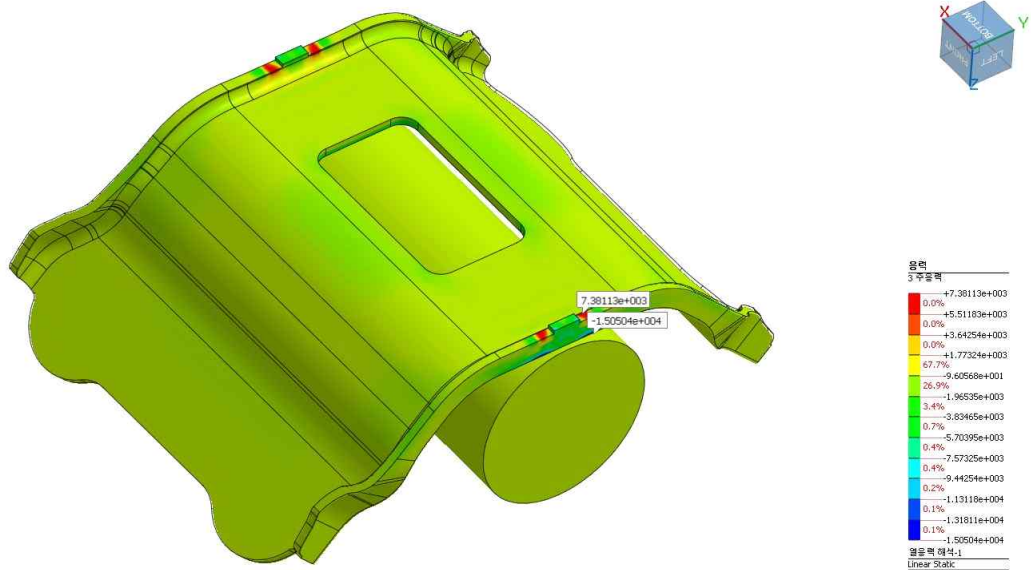


Fig. 4-24 3rd principal stress  $\sigma_3$  of STS304 at 200 °C

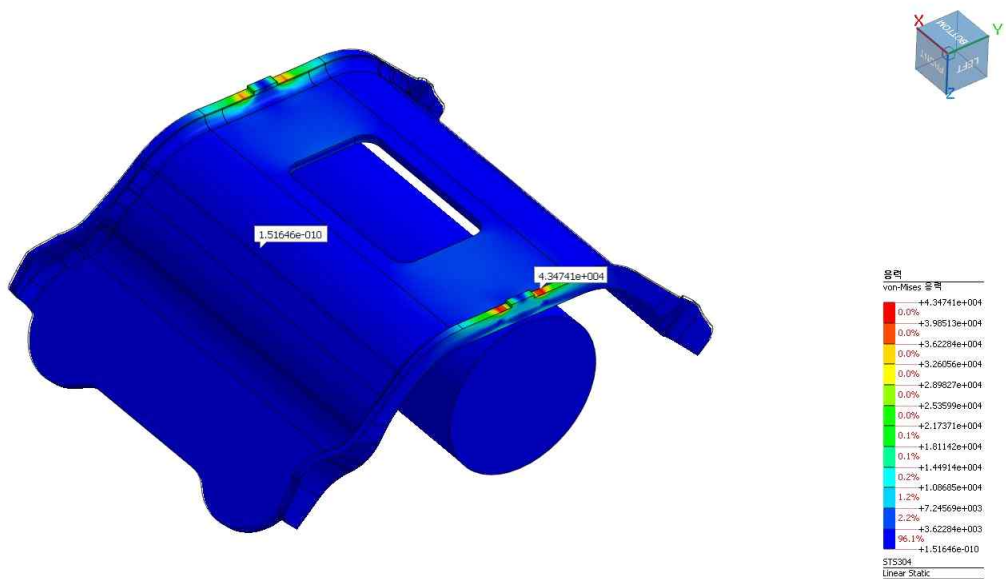


Fig. 4-25 Von-Mises stress of STS304 at 300 °C

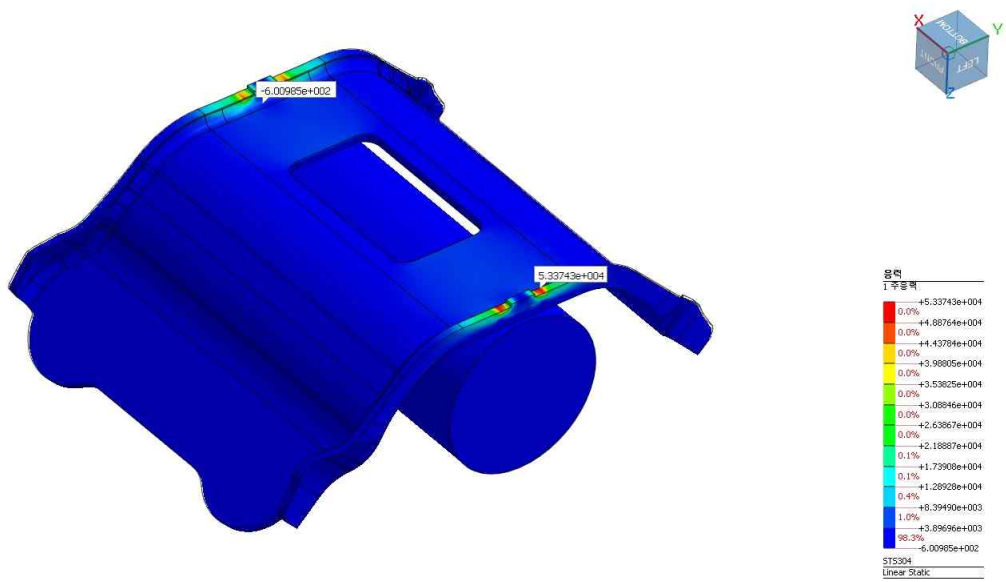


Fig. 4-26 1st principal stress  $\sigma_1$  of STS304 at 300 °C

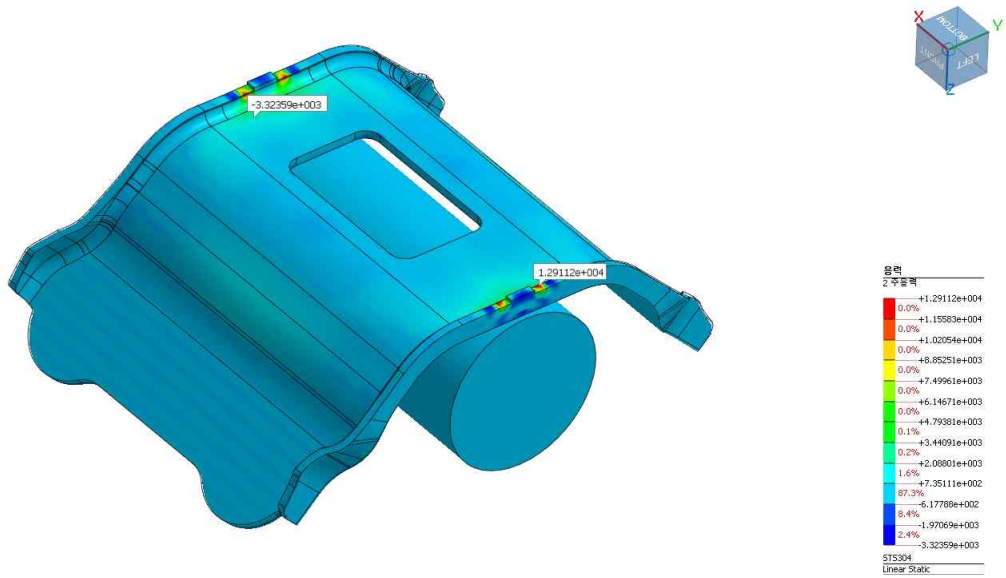


Fig. 4-27 2nd principal stress  $\sigma_2$  of STS304 at 300 °C

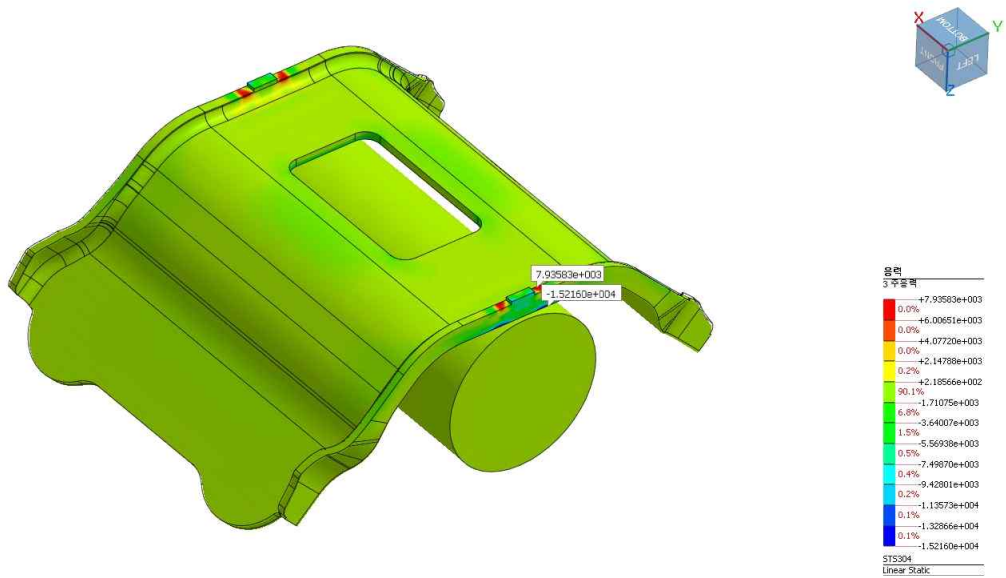


Fig. 4-28 3rd principal stress  $\sigma_3$  of STS304 at 300 °C



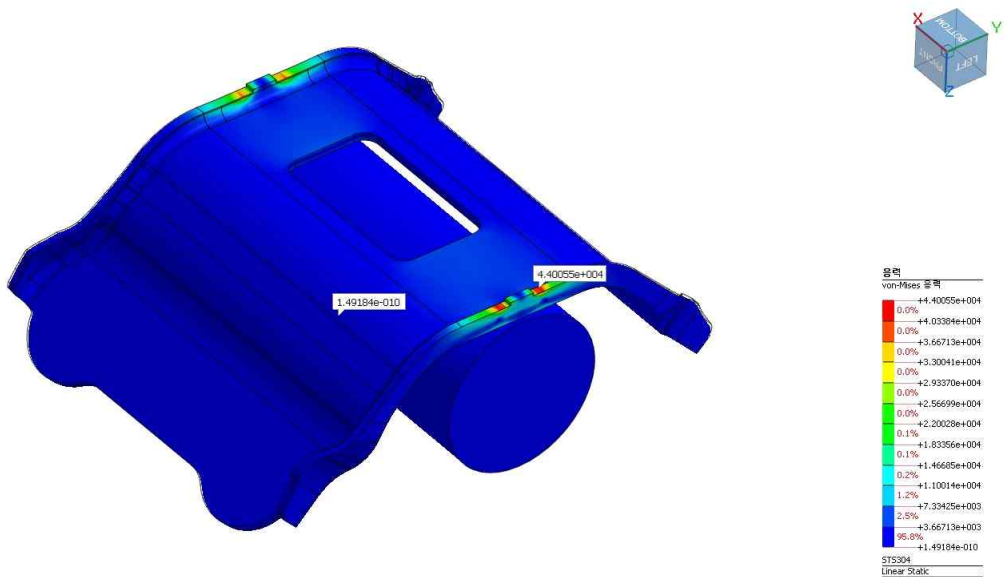


Fig. 4-29 Von-Mises stress of STS304 at 400 °C

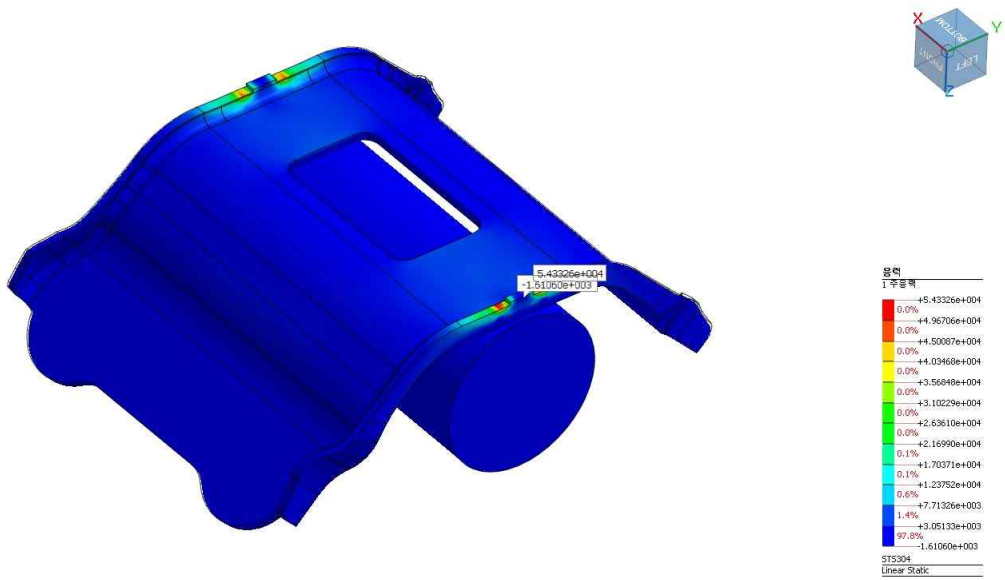


Fig. 4-30 1st principal stress  $\sigma_1$  of STS304 at 400 °C

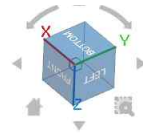
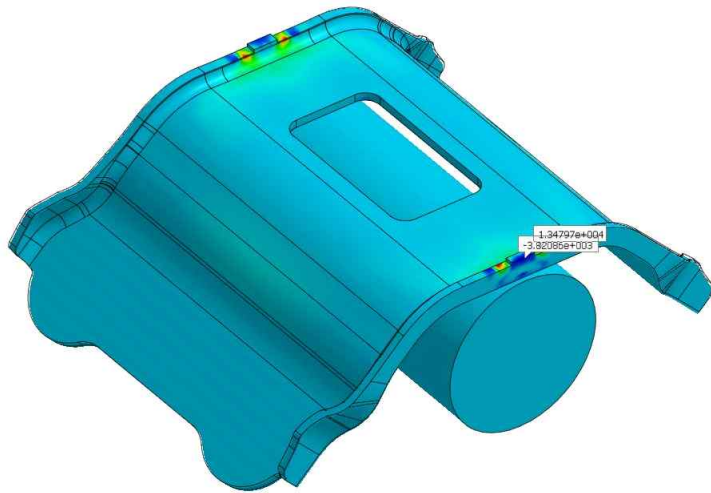


Fig. 4-31 2nd principal stress  $\sigma_2$  of STS304 at 400 °C

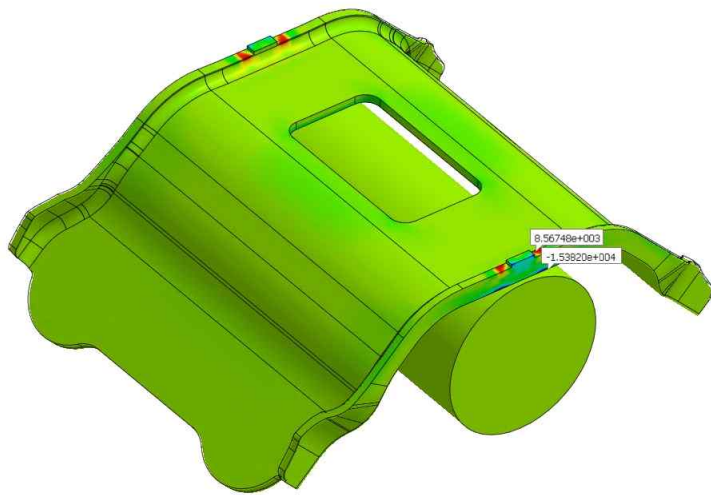


Fig. 4-32 3rd principal stress  $\sigma_3$  of STS304 at 400 °C

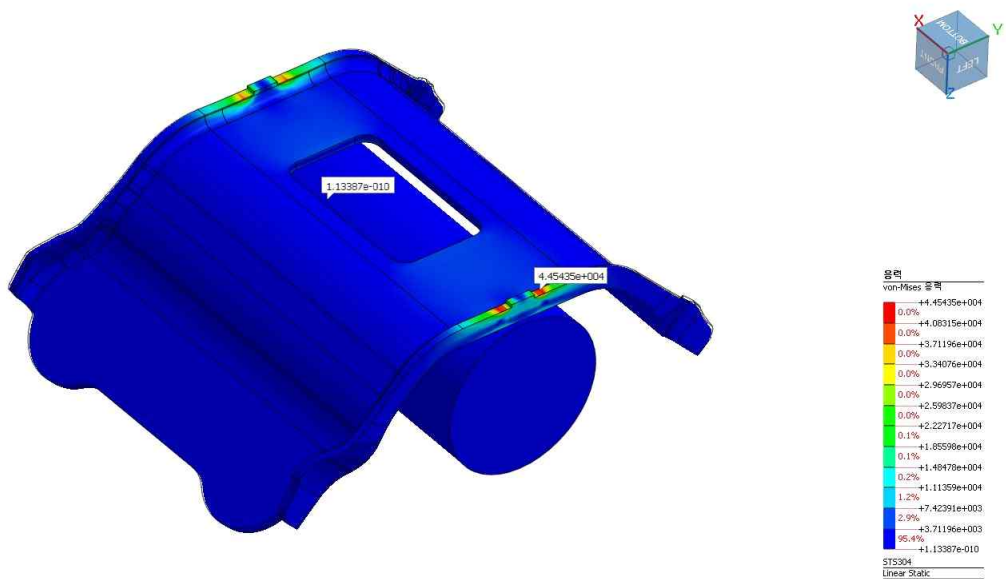


Fig. 4-33 Von-Mises stress of STS304 at 500 °C

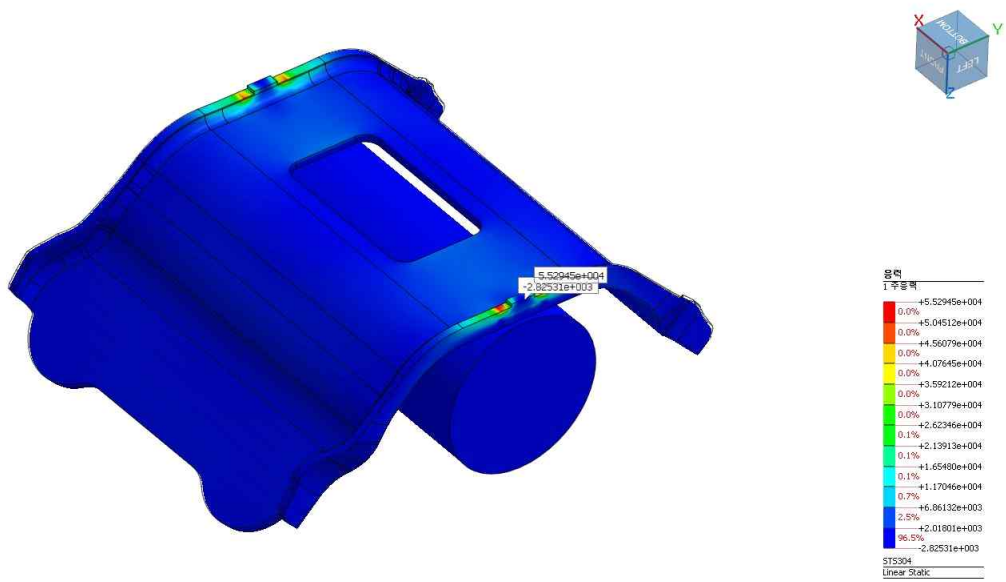


Fig. 4-34 1st principal stress  $\sigma_1$  of STS304 at 500 °C



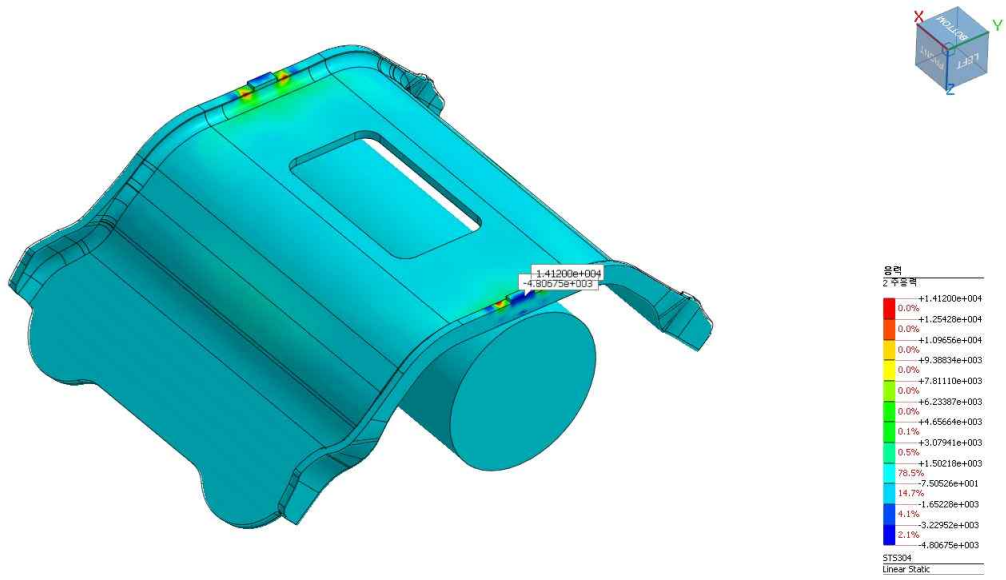


Fig. 4-35 2nd principal stress  $\sigma_2$  of STS304 at 500 °C

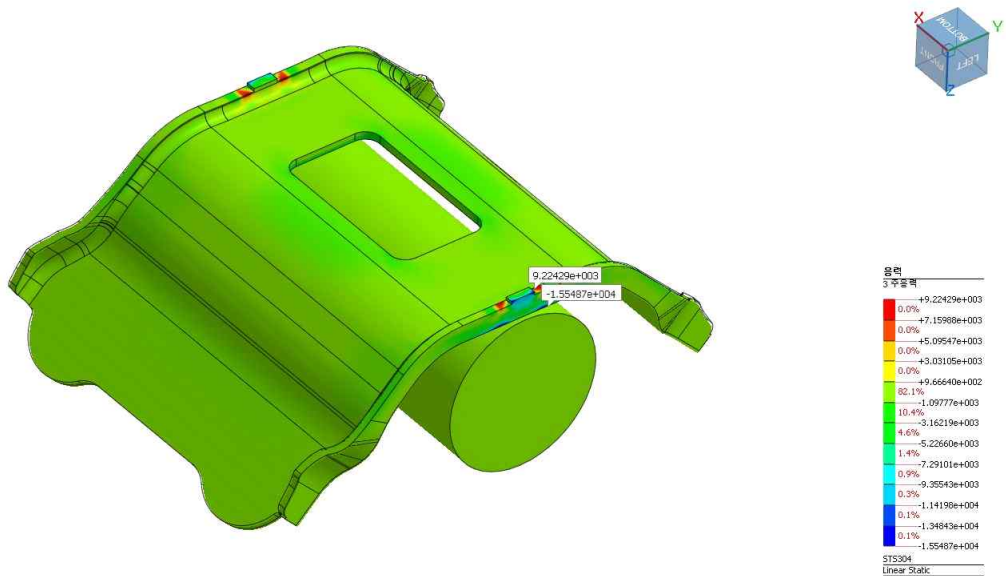


Fig. 4-36 3rd principal stress  $\sigma_3$  of STS304 at 500 °C

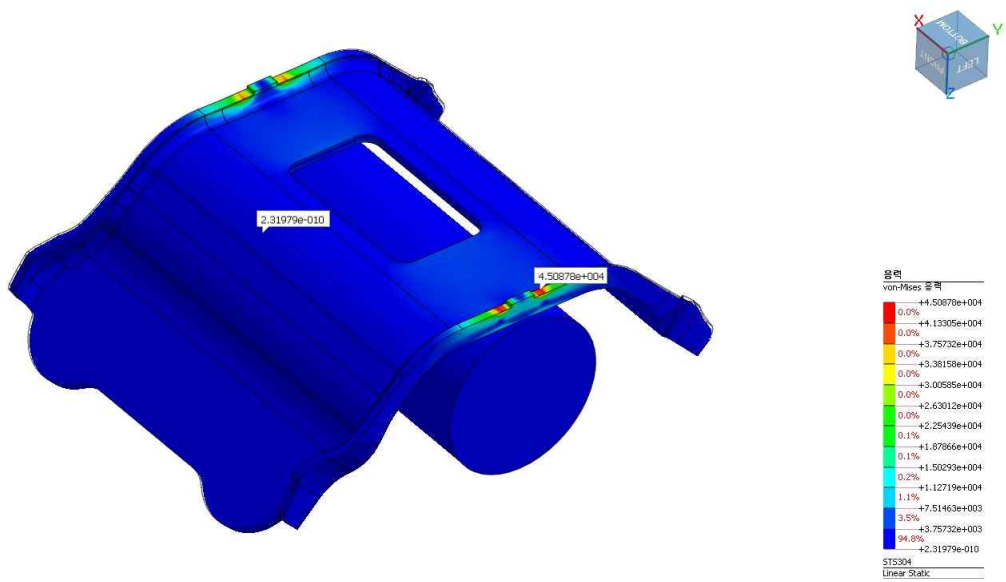


Fig. 4-37 Von-Mises stress of STS304 at 600 °C

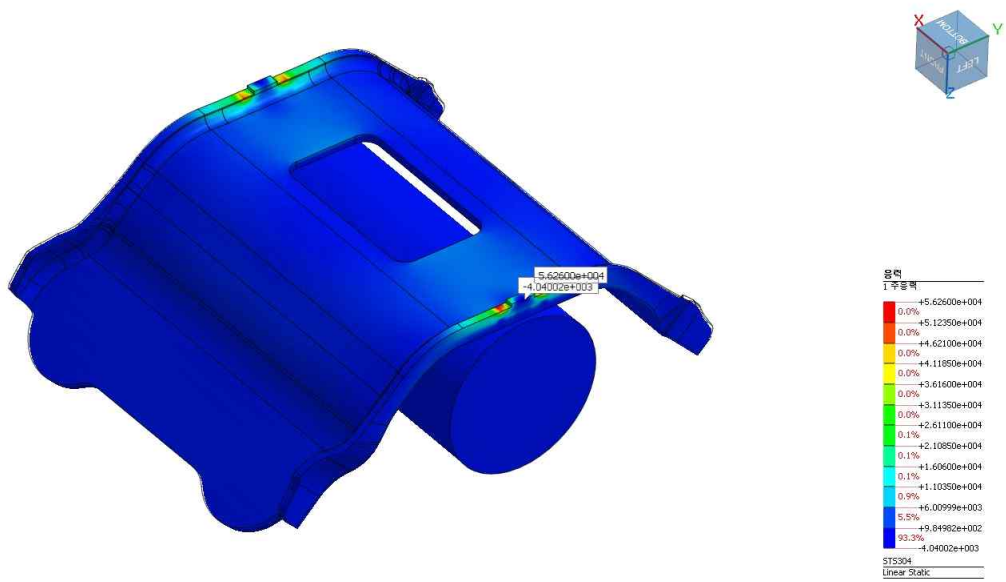


Fig. 4-38 1st principal stress  $\sigma_1$  of STS304 at 600 °C

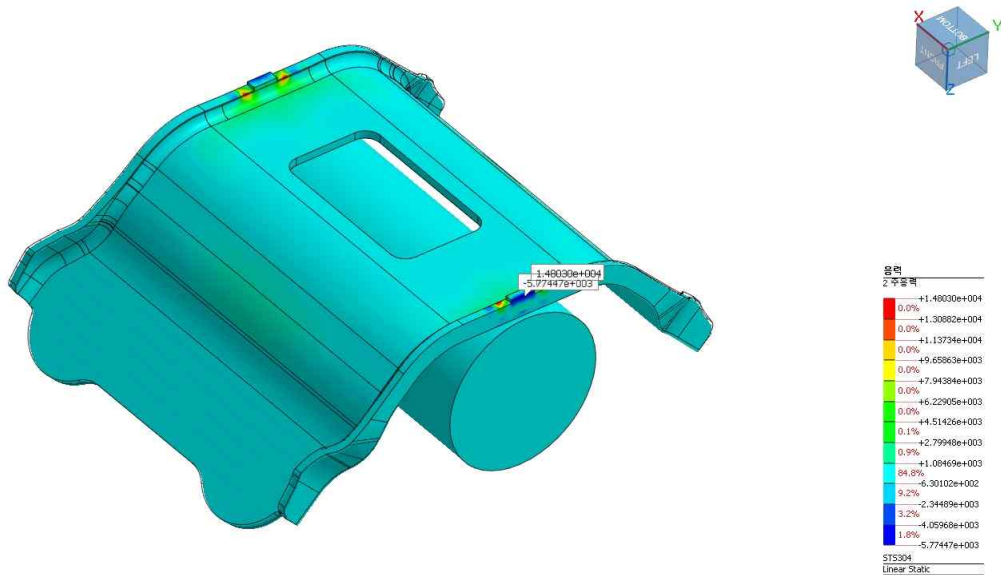


Fig. 4-39 2nd principal stress  $\sigma_2$  of STS304 at 600 °C

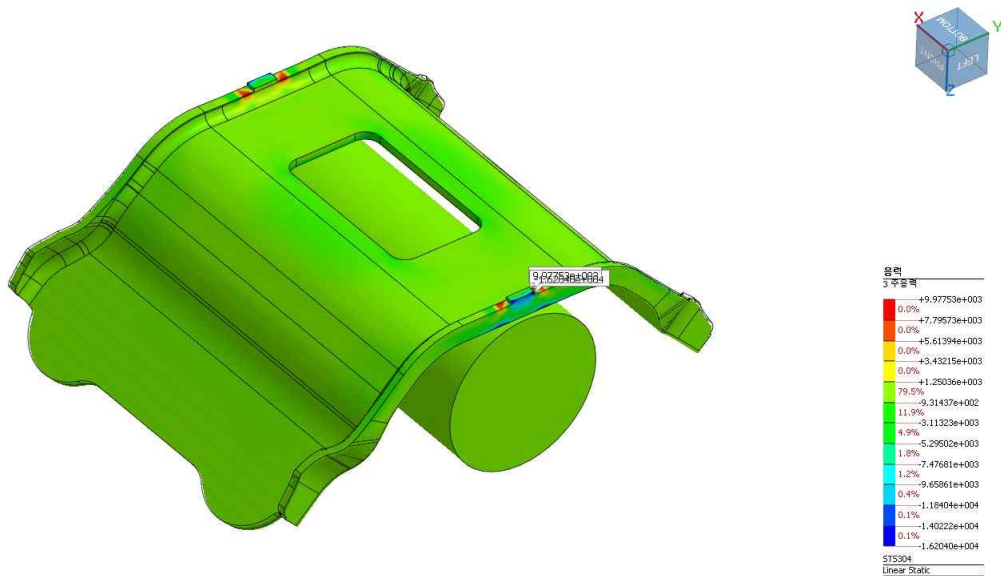


Fig. 4-40 3rd principal stress  $\sigma_3$  of STS304 at 600 °C

Fig. 4-17부터 Fig. 4-40까지는 STS304 소재의 열응력 해석 결과로 100, 200, 300, 400, 500, 600 °C까지의 각 온도별 Von-Mises stress, 주응력  $\sigma_1$ , 주응력  $\sigma_2$ , 주응력  $\sigma_3$ 을 이미지로 나타낸 결과이다.

Table 4-15 Result of thermal stress analysis of STS304

unit : [N/mm<sup>2</sup>]

Initial temperature [°C]	Fixed temperature [°C]	Von-Mises stress	Principal stress( $\sigma_1$ )	Principal stress( $\sigma_2$ )	Principal stress( $\sigma_3$ )
20	100	42,432	51,469	11,802	6,818
	200	42,950	52,420	12,348	7,381
	300	43,474	53,374	12,911	7,936
	400	44,006	54,333	13,480	8,567
	500	44,544	55,295	14,120	9,224
	600	45,088	56,260	14,803	9,978

Table 4-15는 STS304 소재의 열응력 분석 결과를 표로 정리한 것이다. STS304 소재 조건으로 수행한 열응력 해석 결과 고정 온도 증가에 따라 비틀림 에너지를 나타내는 Von-Mises stress 값도 증가하였다.

마찬가지로 x축의 응력을 나타내는 주응력  $\sigma_1$ 의 경우 열에 의한 팽창으로 인해 온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

y축 응력을 나타내는 주응력  $\sigma_2$ 는 벤딩 공정 시 하중에 의한 길이 증가로 인해 응력이 증가하는데, 가열을 할 경우에도 시뮬레이션 결과 응력이 증가하는 경향을 보였다.

실제 하중이 가해지는 방향과 관계가 있는 z축 응력을 나타내는 주응력  $\sigma_3$ 의 경우 600 °C 까지 계속 응력이 증가하는 경향을 보였다.

## 2. SAPH400 소재

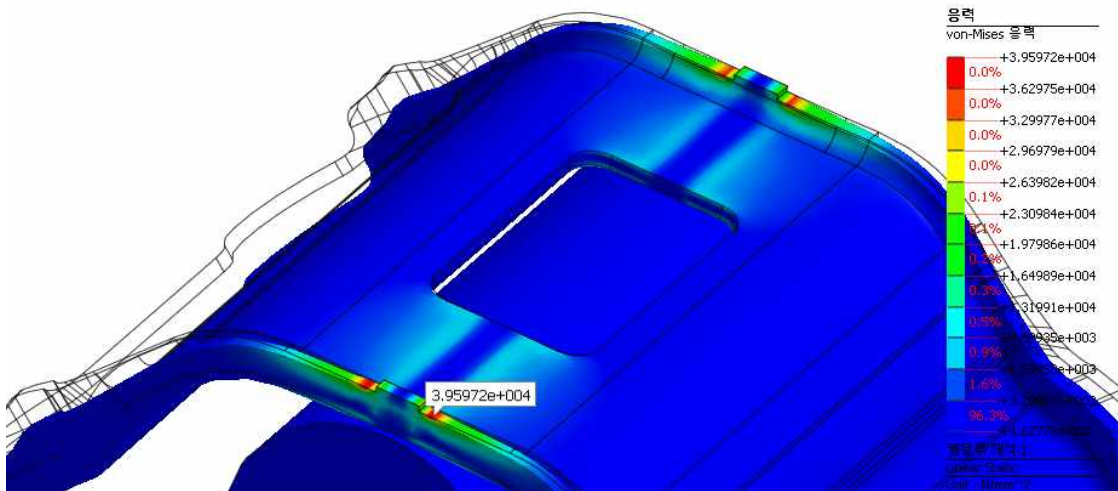


Fig. 4-41 Von-Mises stress of SAPH400 at 100 °C

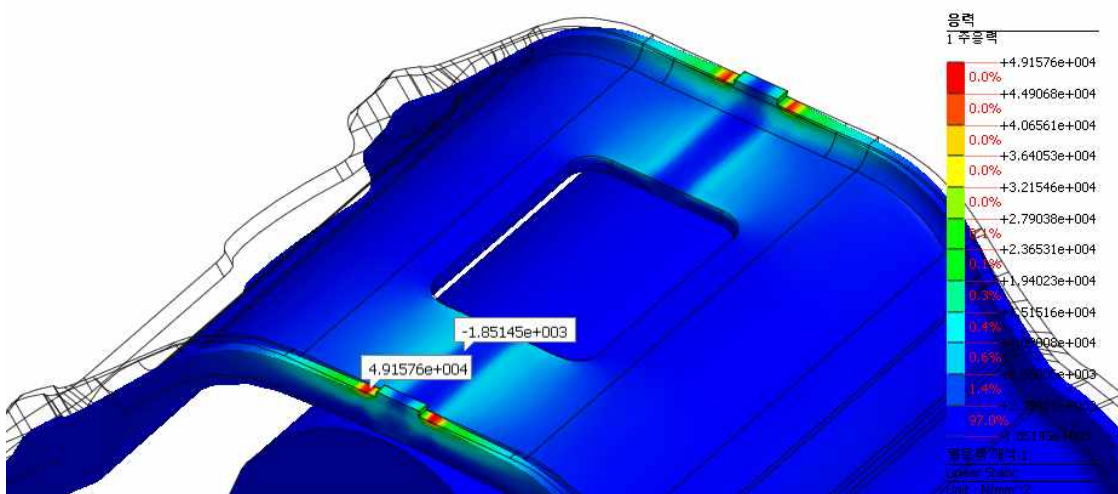


Fig. 4-42 1st principal stress  $\sigma_1$  of SAPH400 at 100 °C



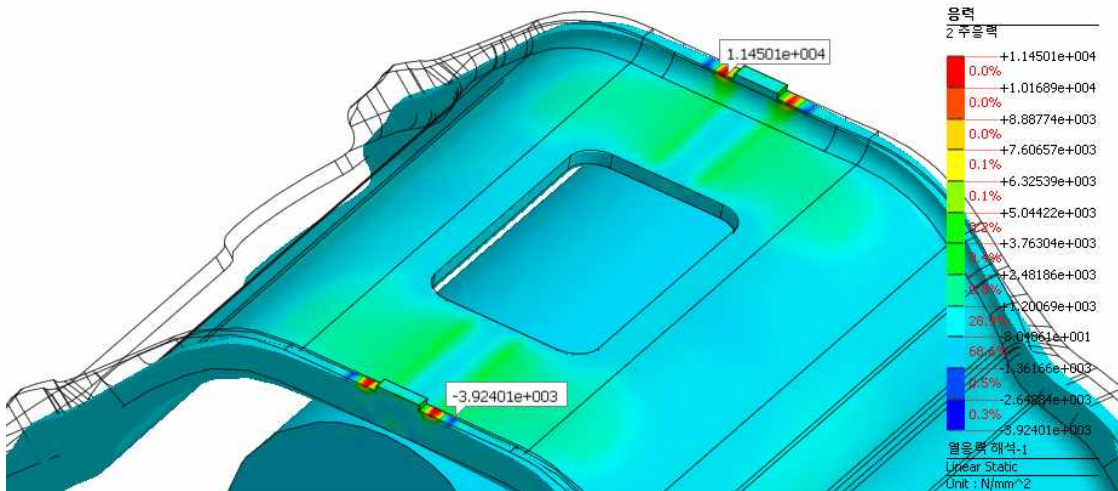


Fig. 4-43 2nd principal stress  $\sigma_2$  of SAPH400 at 100 °C

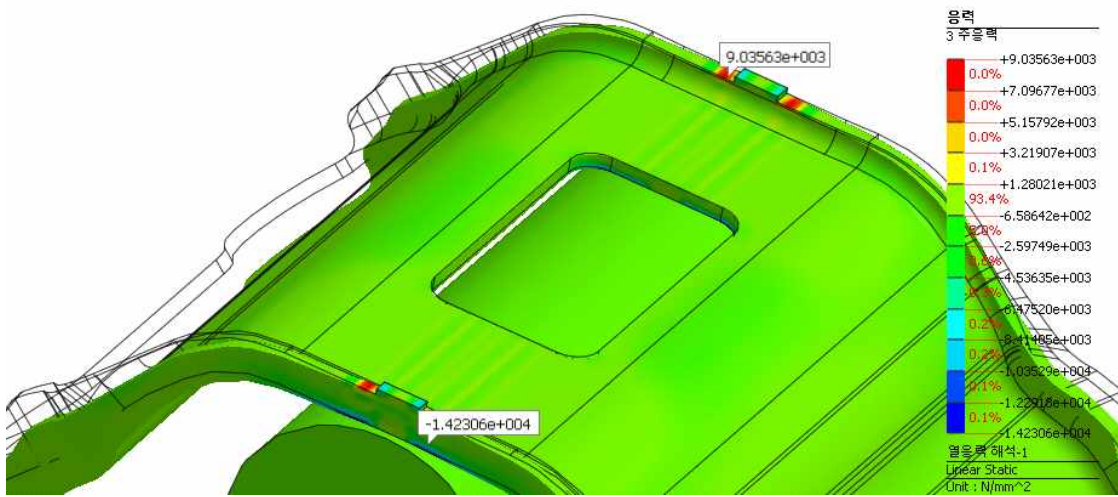


Fig. 4-44 3rd principal stress  $\sigma_3$  of SAPH400 at 100 °C

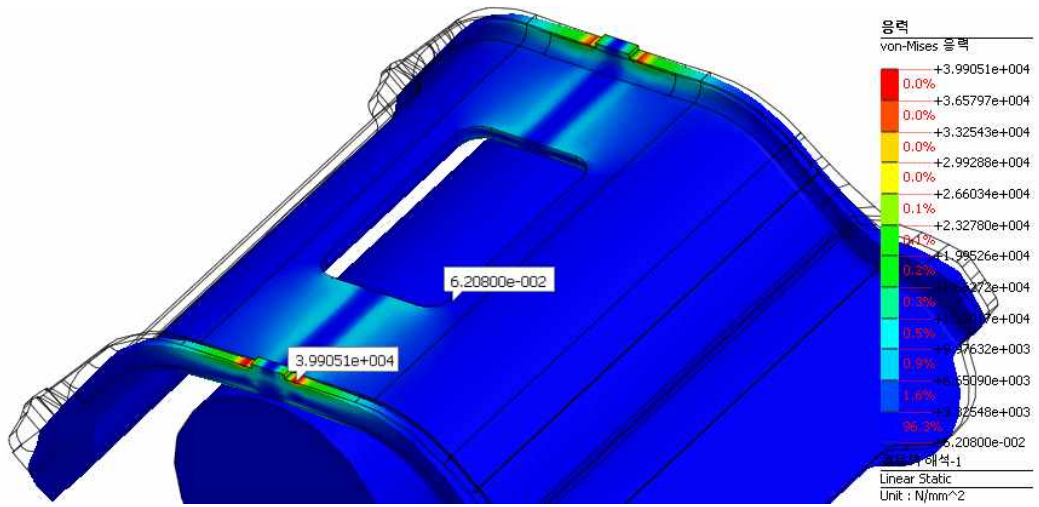


Fig. 4-45 Von-Mises stress of SAPH400 at 200 °C

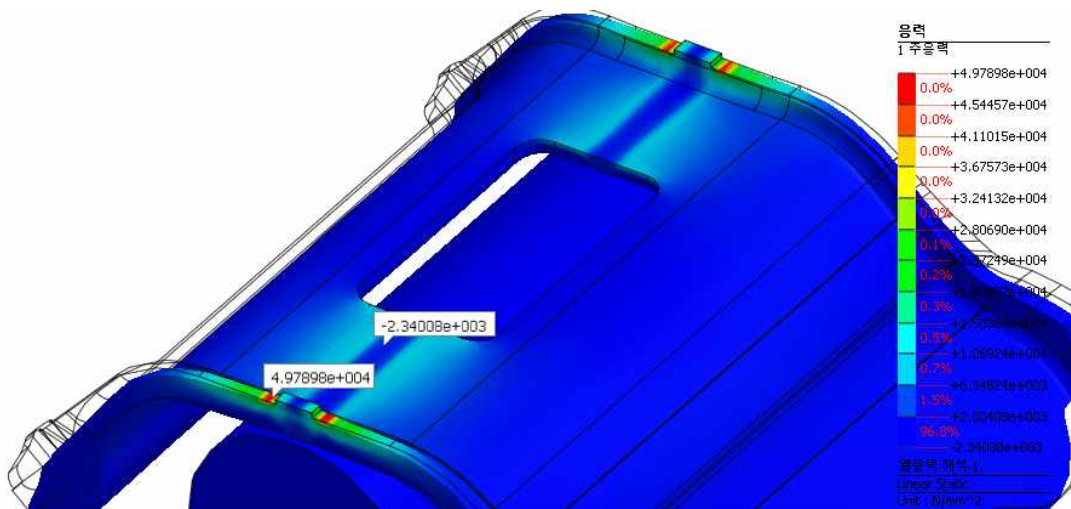


Fig. 4-46 1st principal stress  $\sigma_1$  of SAPH400 at 200 °C

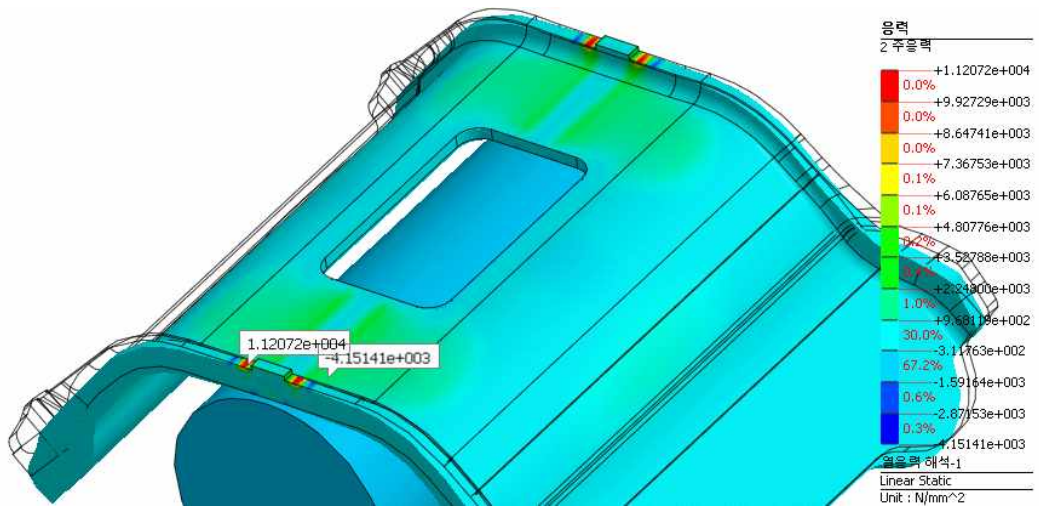


Fig. 4-47 2nd principal stress  $\sigma_2$  of SAPH400 at 200 °C

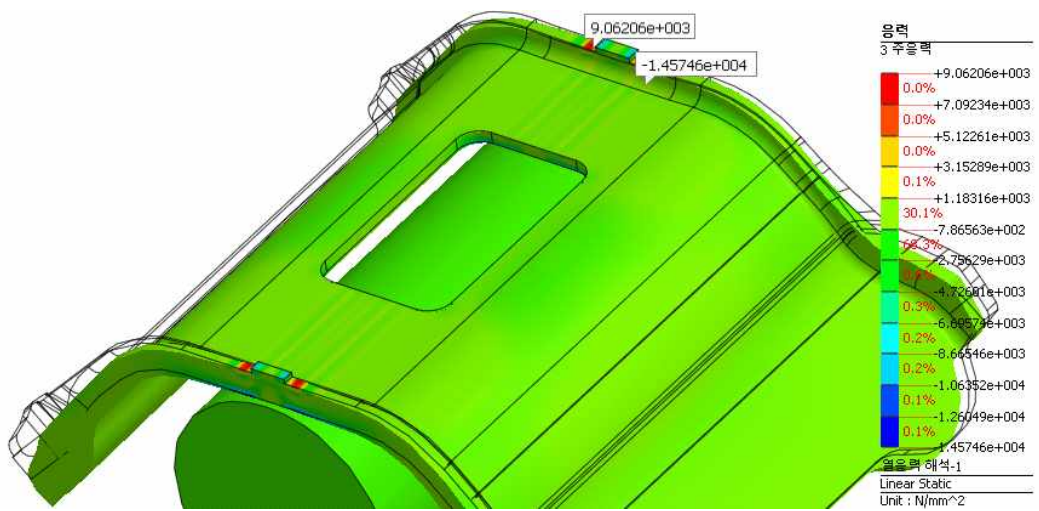


Fig. 4-48 3rd principal stress  $\sigma_3$  of SAPH400 at 200 °C



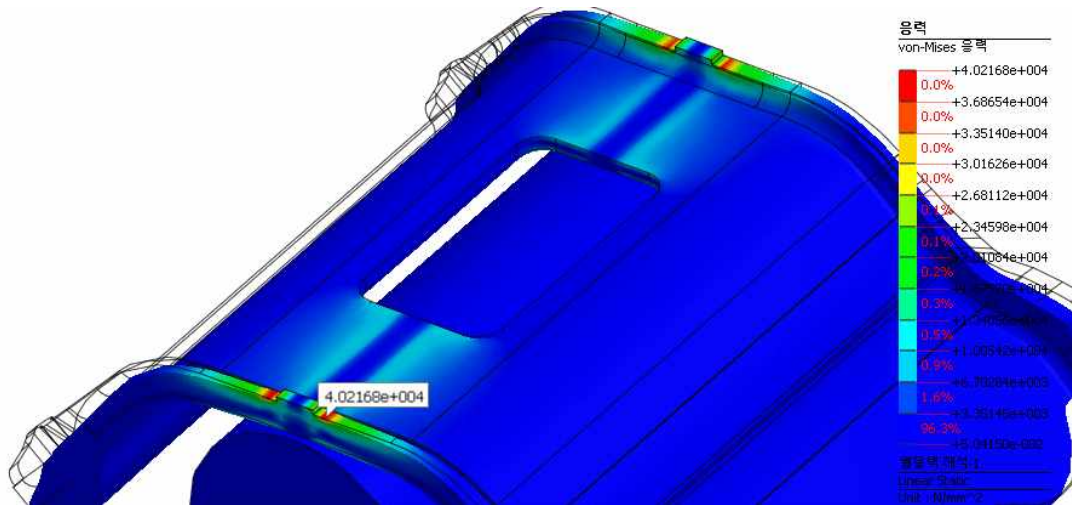


Fig. 4-49 Von-Mises stress of SAPH400 at 300 °C

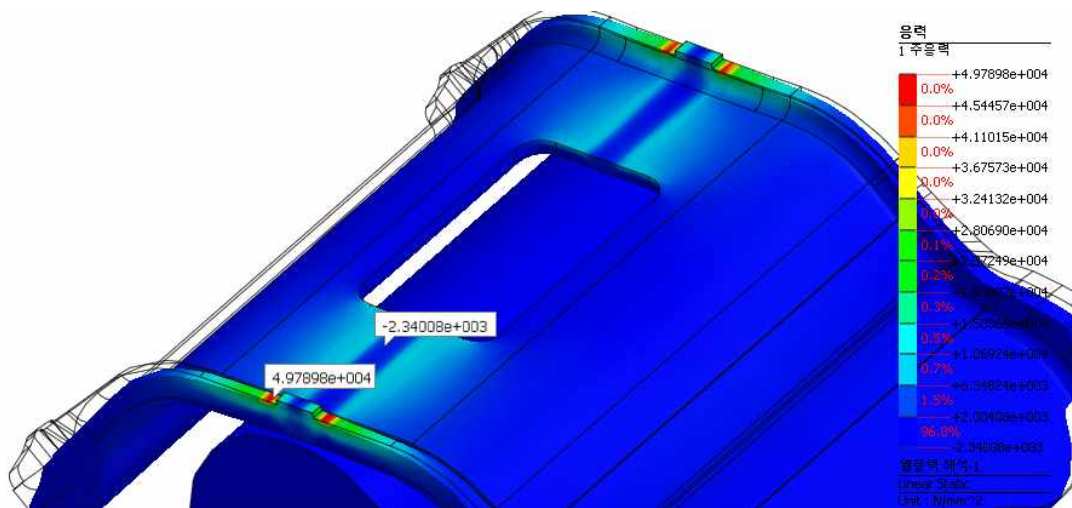


Fig. 4-50 1st principal stress  $\sigma_1$  of SAPH400 at 300 °C

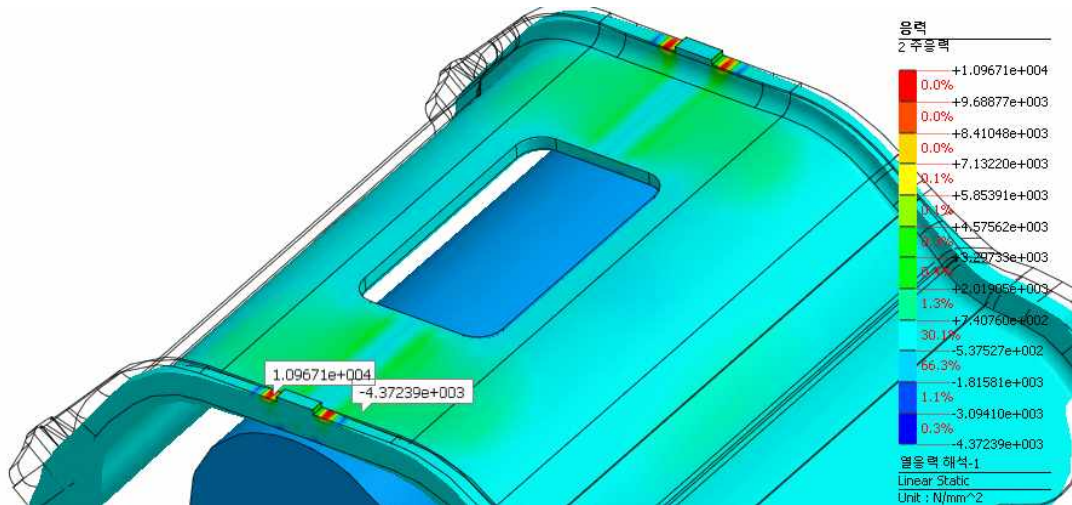


Fig. 4-51 2nd principal stress  $\sigma_2$  of SAPH400 at 300 °C

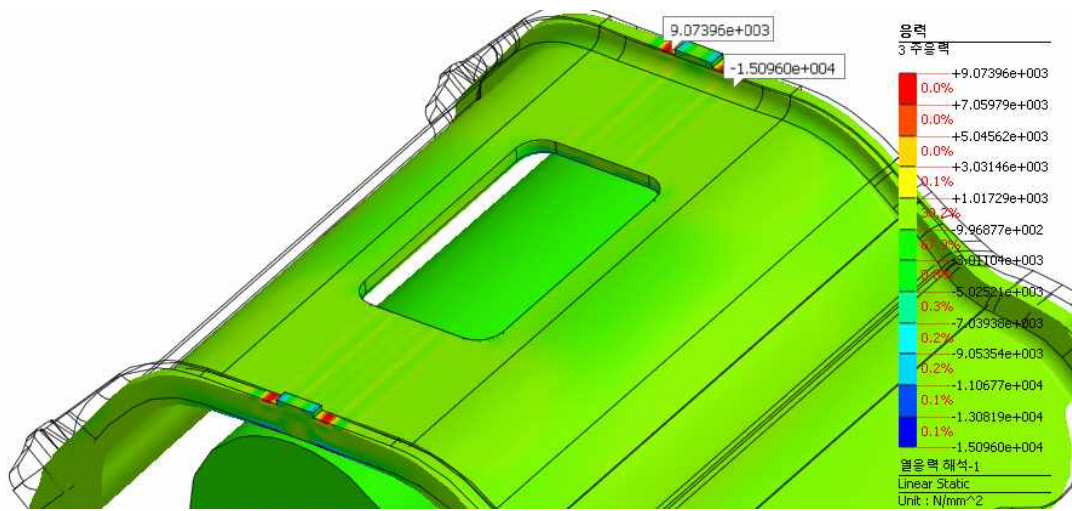


Fig. 4-52 3rd principal stress  $\sigma_3$  of SAPH400 at 300 °C

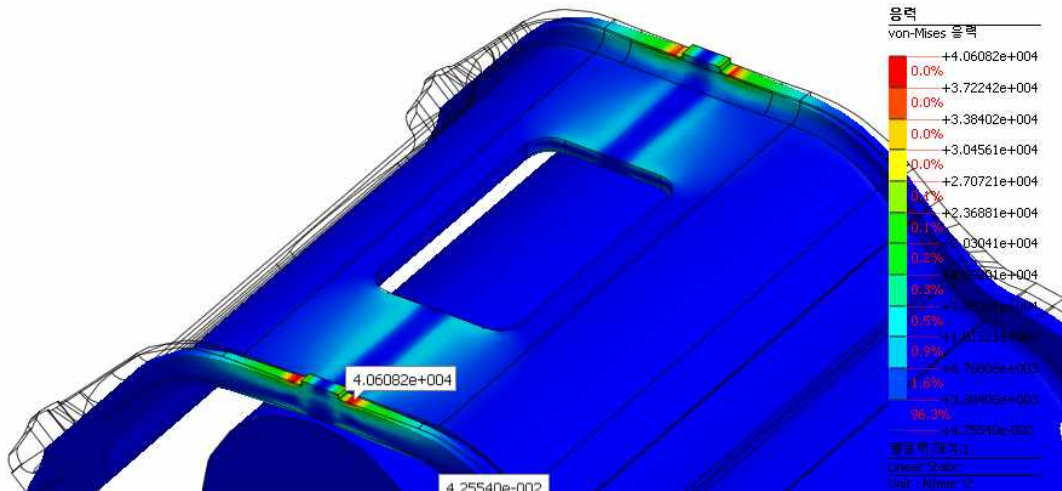


Fig. 4-53 Von-Mises stress of SAPH400 at 400 °C

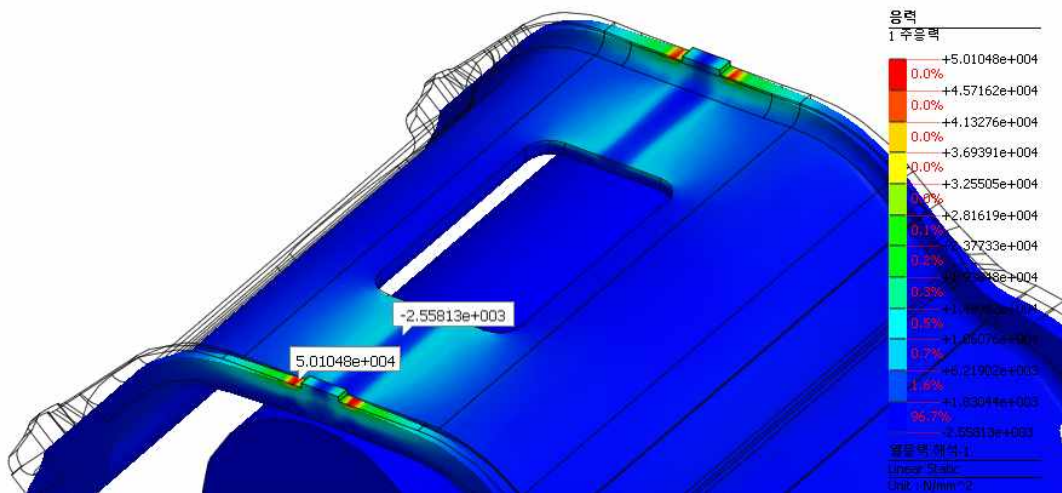


Fig. 4-54 1st principal stress  $\sigma_1$  of SAPH400 at 400 °C



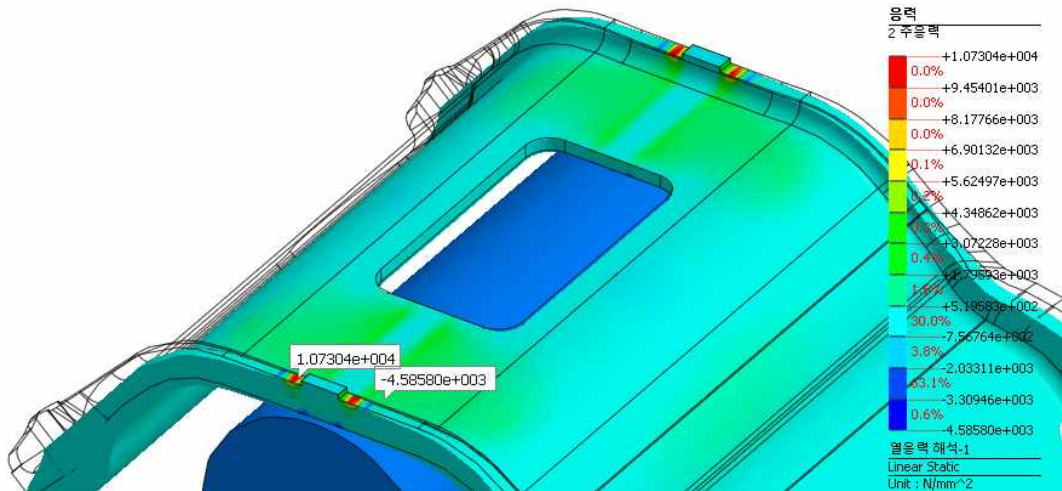


Fig. 4-55 2nd principal stress  $\sigma_2$  of SAPH400 at 400 °C

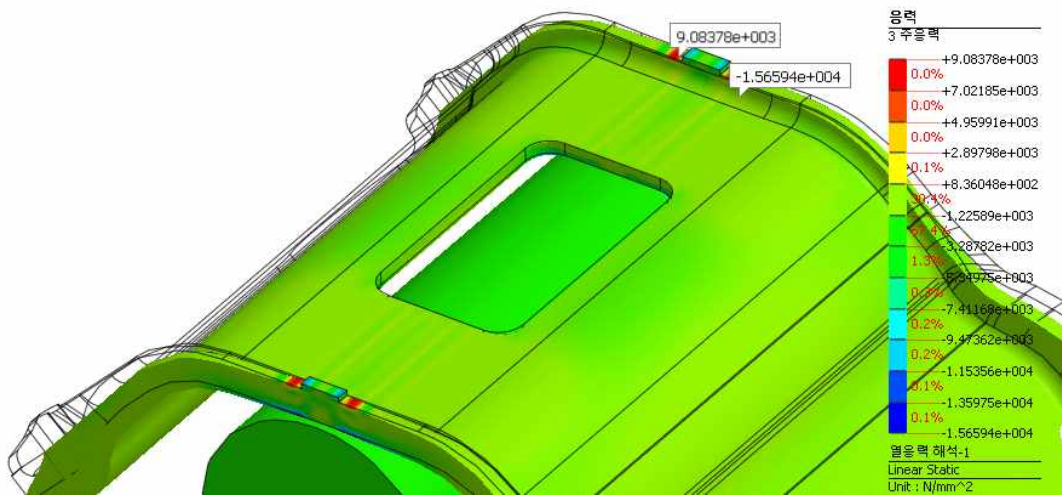


Fig. 4-56 3rd principal stress  $\sigma_3$  of SAPH400 at 400 °C

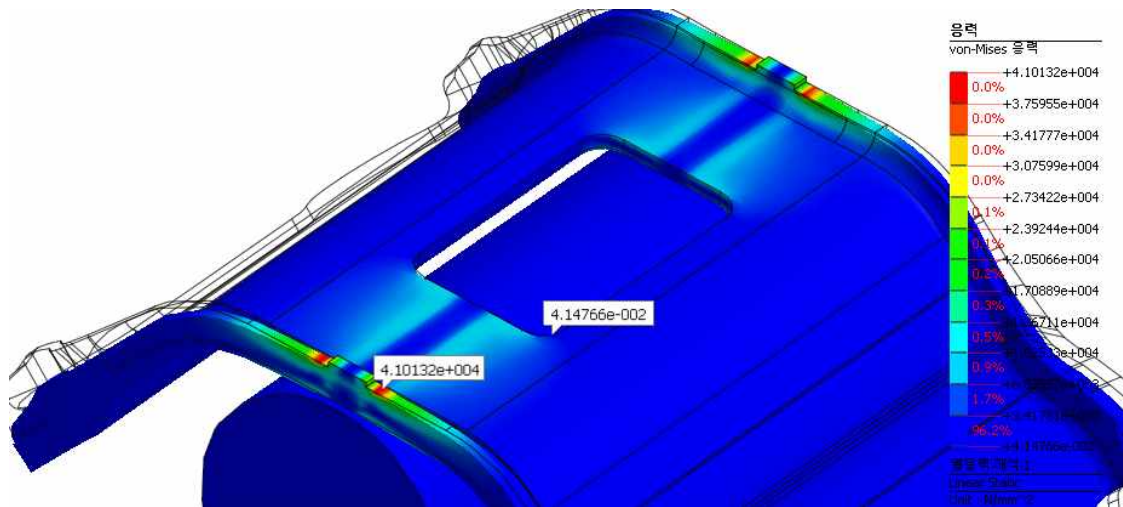


Fig. 4-57 Von-Mises stress of SAPH400 at 500 °C

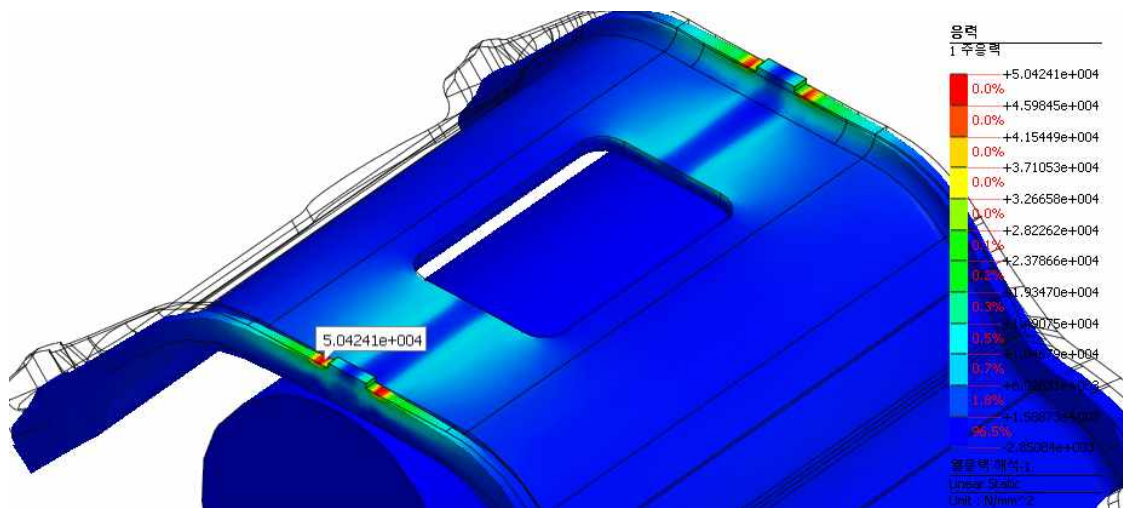


Fig. 4-58 1st principal stress  $\sigma_1$  of SAPH400 at 500 °C

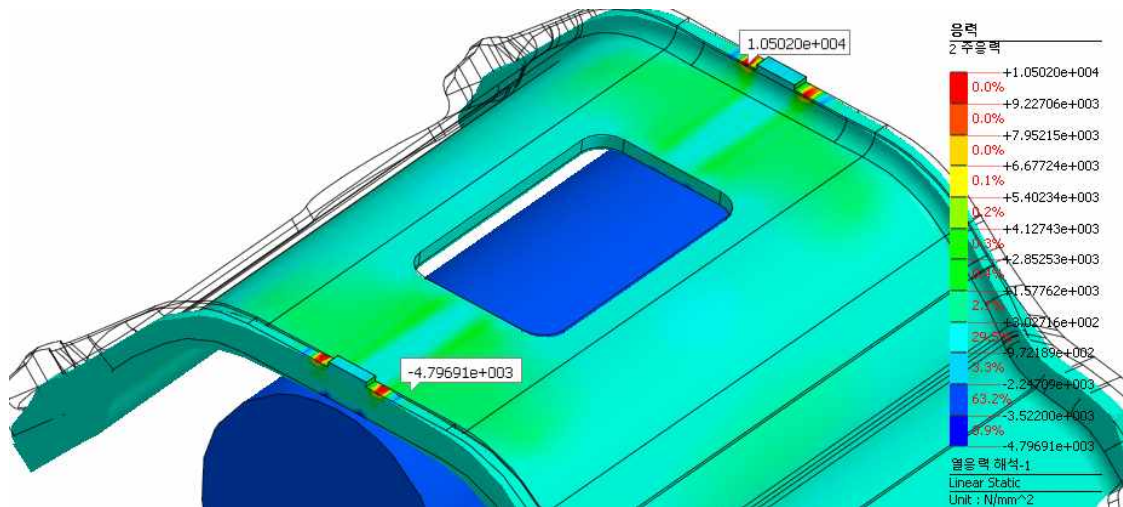


Fig. 4-59 2nd principal stress  $\sigma_2$  of SAPH400 at 500 °C

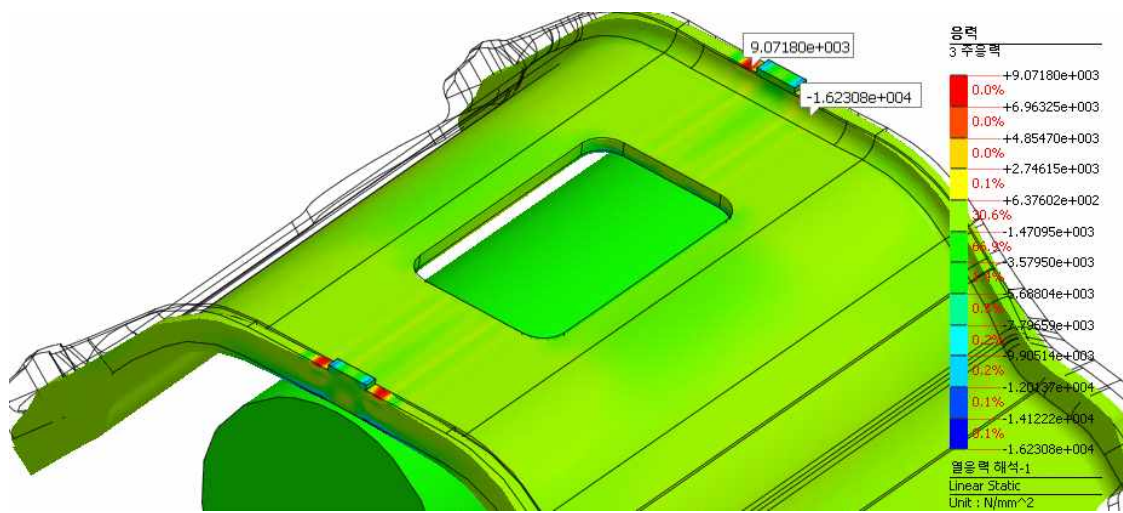


Fig. 4-60 3rd principal stress  $\sigma_3$  of SAPH400 at 500 °C



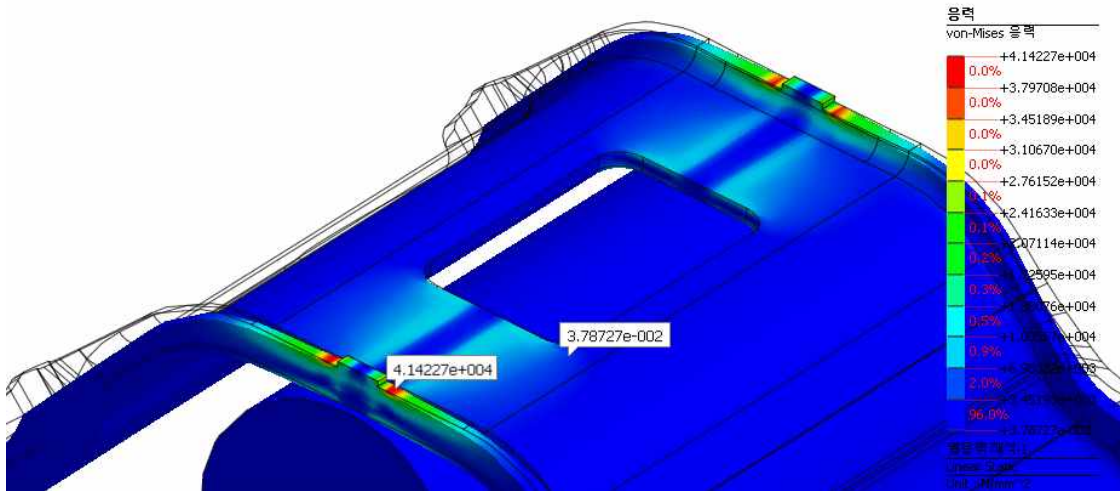


Fig. 4-61 Von-Mises stress of SAPH400 at 600 °C

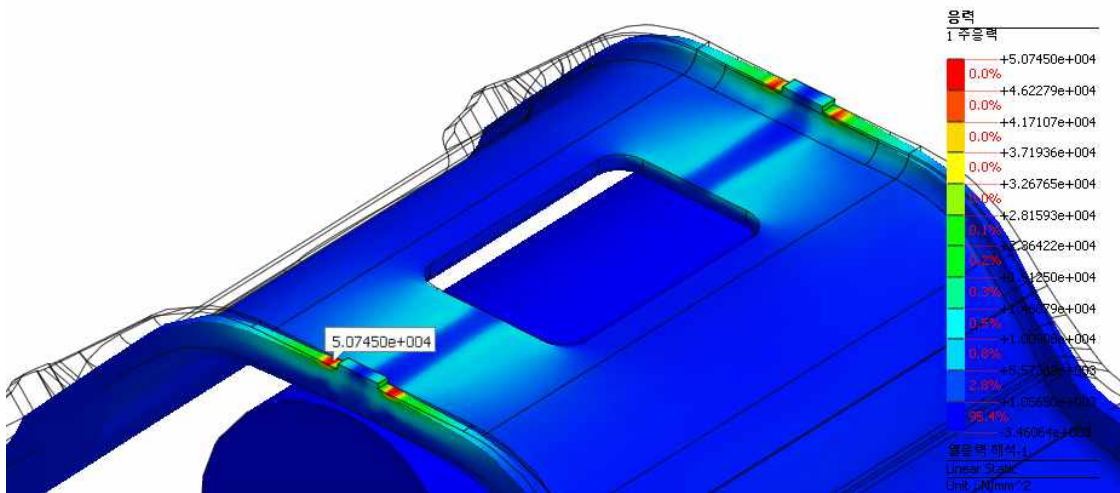


Fig. 4-62 1st principal stress  $\sigma_1$  of SAPH400 at 600 °C

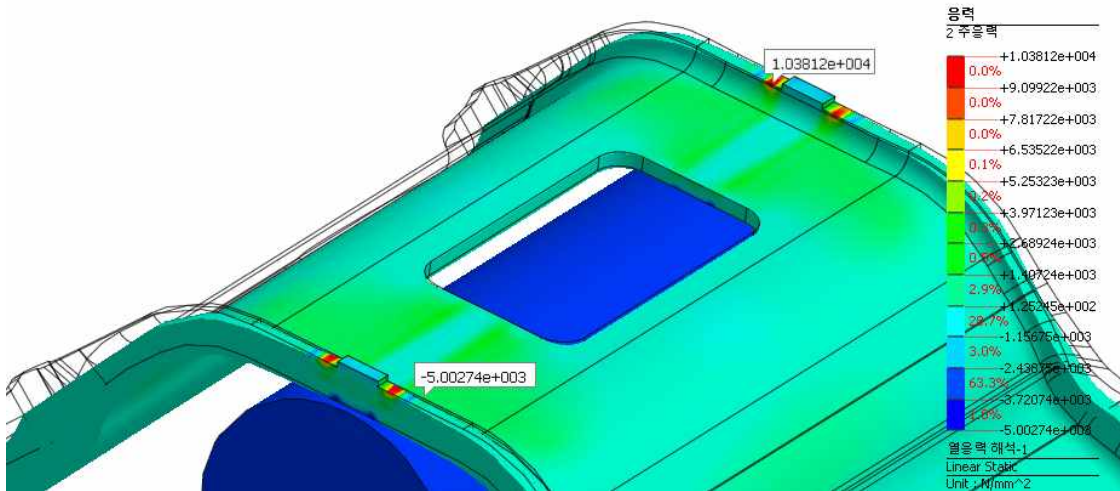


Fig. 4-63 2nd principal stress  $\sigma_2$  of SAPH400 at 600 °C

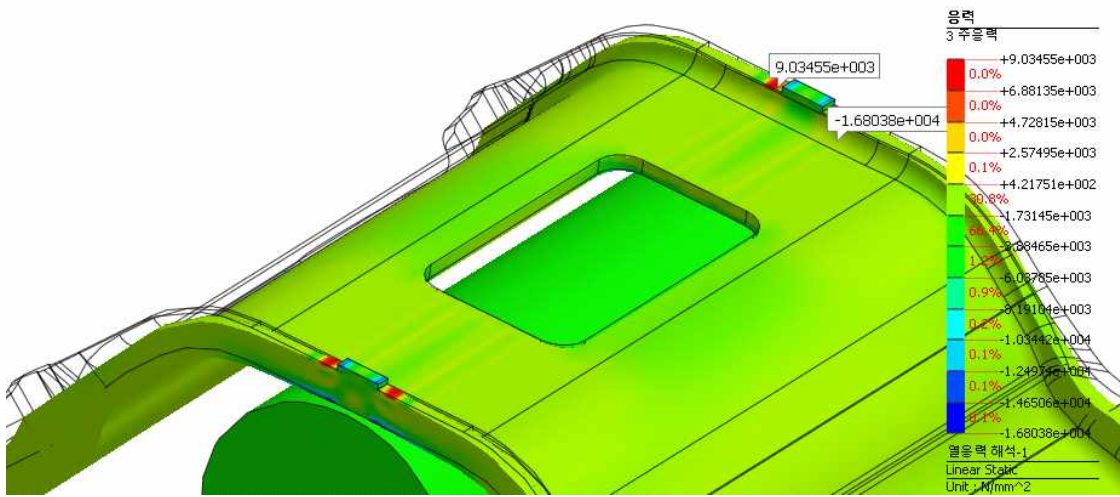


Fig. 4-64 3rd principal stress  $\sigma_3$  of SAPH400 at 600 °C



Fig. 4-41부터 Fig. 4-64까지는 SAPH400 소재의 열응력 해석 결과로 100, 200, 300, 400, 500, 600 °C까지의 각 온도별 Von-Mises stress, 주응력  $\sigma_1$ , 주응력  $\sigma_2$ , 주응력  $\sigma_3$ 을 이미지로 나타낸 결과이다.

Table 4-16 Result of thermal stress analysis of SAPH400

unit : [N/mm<sup>2</sup>]

Initial temperature [°C]	Fixed temperature [°C]	Von-Mises stress	Principal stress( $\sigma_1$ )	Principal stress( $\sigma_2$ )	Principal stress( $\sigma_3$ )
20	100	39,597	49,156	11,450	9,036
	200	39,905	49,474	11,207	9,062
	300	40,217	49,790	10,967	9,074
	400	40,608	50,105	10,730	9,083
	500	41,013	50,424	10,502	9,072
	600	41,423	50,745	10,381	9,035

Table 4-16는 SAPH400 소재의 열응력 분석 결과를 표로 정리한 것이다. 열응력 해석 결과 고정 온도 증가에 따라 비틀림 에너지를 나타내는 Von-Mises stress 는 증가했다.

마찬가지로 x축 응력을 나타내는 주응력  $\sigma_1$ 의 경우 열에 의한 팽창으로 인해 온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

y축 응력을 나타내는 주응력  $\sigma_2$ 는 비가열 상태의 경우 하중에 의한 길이 증가로 인해 응력이 증가하는 것으로 보였지만 가열 상태의 경우에는 응력이 감소하는 경향을 보였다.

실제 하중이 가해지는 방향과 관계가 있는 z축 응력을 나타내는 주응력  $\sigma_3$ 의 경우 400 °C 까지는 응력이 증가하지만 이후부터 감소하는 경향으로 STS304 소재와는 다른 열응력 해석 결과를 보였다.

## 제 4 절 광계측 시스템을 이용한 결함 측정 결과

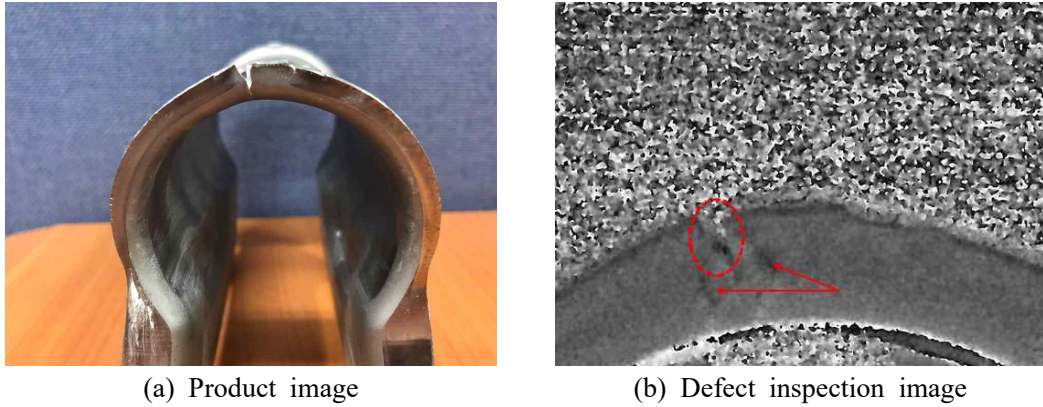


Fig. 4-65 Detection of defect on knuckle bracket heated by high frequency induction heating device for 2 seconds (Surface temperature of knuckle bracket is 200 °C)

Fig. 4-65의 (a)는 약 2초 가열하였을 때 성형한 제품 이미지이고, (b)는 광계측을 이용한 결함 측정 결과 이미지이다. 약 2초 가열 후 성형한 제품의 경우, 너클 브라켓 표면 온도는 약 200 °C로서 손상을 육안으로도 식별 가능함을 확인할 수 있었다. 광계측을 이용한 결함 검사 결과, 내·외부 손상을 모두 확인할 수 있었다.

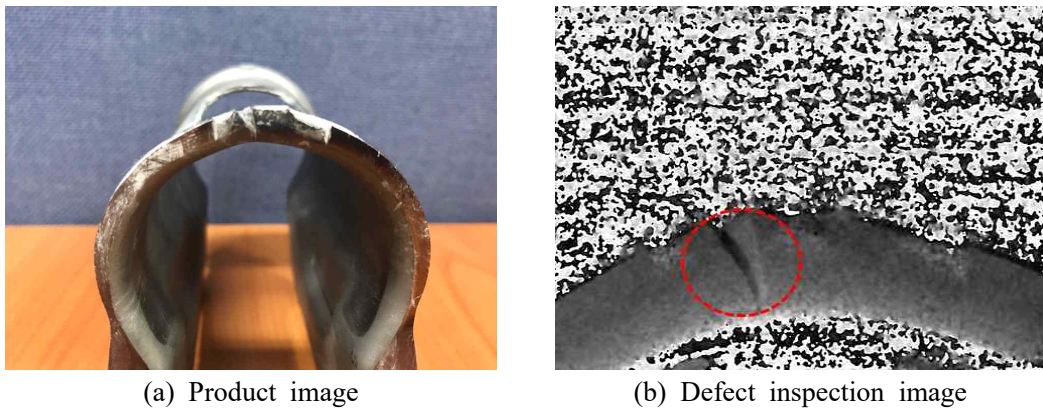


Fig. 4-66 Detection of defect on knuckle bracket heated by high frequency induction heating device for 5 seconds (Surface temperature of knuckle bracket is 400 °C)

Fig. 4-66의 (a)는 약 5초 가열하였을 때 성형한 제품 이미지이고, (b)는 광계측을 이용한 결함 결과 이미지이다. 약 5초 가열 후 성형한 제품의 경우, 너클 브라켓 표면 온도는 약 400 °C로서 표면 온도가 200 °C인 경우와 동일하게 손상을 육안으로도 식별 가능함을 확인할 수 있었다. 광계측을 이용한 결함 검사 결과, 내·외부 손상을 모두 확인할 수 있었다. 표면 온도 200 °C에서 성형한 제품의 경우와 비슷한 결과를 확인할 수 있었다.

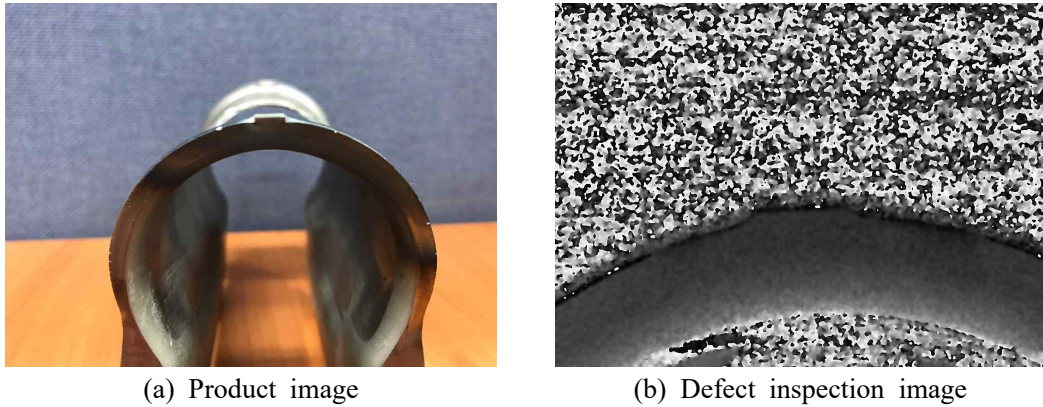


Fig. 4-67 Detection of defect on knuckle bracket heated by high frequency induction heating device for 8 seconds (Surface temperature of knuckle bracket is 600 °C)

Fig. 4-67의 (a)는 약 8초 가열하였을 때 성형한 제품 이미지이고, (b)는 광계측을 이용한 결함 결과 이미지이다. 약 8초 가열 후 성형한 제품의 경우, 너클 브라켓 표면 온도는 약 600 °C로서 성형 시 전반적으로 육안으로 확인 가능한 손상은 없었으나 연결 부위 절단 시 충격으로 인한 크랙 발생이 가능할 수 있음을 확인하였다.

광계측 시스템 이용한 결함 측정 결과, 표면 온도 200 °C에서 성형한 제품과 표면 온도 400 °C에서 성형한 제품의 경우에는 육안으로 판별 가능한 손상 외에 추가 손상 발생 가능성을 확인하였으며, 표면 온도 600 °C에서 성형한 제품은 전반적으로 양호한 상태로 성형된다는 것을 확인할 수 있었다.

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 고주파 유도가열 장치의 가열 시간에 따른 소재의 온도 변화를 계측하기 위해 열화상 카메라로 계측하였고, 소재의 열변화와 성형성의 관계를 찾기 위해 고온 인장 실험 및 열응력 해석을 수행하였으며, 실제 자동차 부품을 프로그레시브 금형을 통해 타발하여 광계측을 이용한 결함검사를 수행하고 관찰하였다. 본 연구를 통해 얻을 수 있는 결과는 다음과 같다.

1. 가열 시간에 따른 소재의 온도 변화 실험을 통해 본 논문에서 제작한 고주파 유도가열 장치의 성능으로 시간에 따른 소재의 가열 온도를 추정할 수 있었고, 가열 시간을 2초, 5초, 8초로 제어하여 추정 온도 200℃, 400℃, 600℃로 가열 할 수 있었다.
2. STS304 소재와 SAPH400 소재의 고온 인장 실험과 열응력 해석 시뮬레이션을 통해 성형성을 향상 시킬 수 있는 가열 온도를 500℃ 이상이라고 추정할 수 있었으며, 두 소재 중 큰 효과를 보기 위해서는 SAPH400 소재를 사용하여야 한다고 판단할 수 있었다.
3. 고주파 유도가열 장치를 적용한 프로그레시브 금형을 이용하여 가열 시간을 2초(200℃), 5초(400℃)로 하였을 때 성형한 자동차 부품의 성형부에서 눈에 띄는 손상들이 보여 졌는데, 이 손상들은 청열취성이 발생하기 때문이란 것을 알 수 있었고, 8초(600℃)로 가열하였을 때, 성형한 자동차 부품의 성형부에서 전반적인 손상은 없었으나 연결 부위의 절단 시 충격으로 인한 크랙 발생 가능성을 확인할 수 있었다.
4. 금형 분야에서 많이 사용되는 소재인 STS304 소재와 SAPH400 소재 중 고주파 유도가열 장치를 적용하여 큰 효과를 볼 수 있는 소재는 SAPH400으로 판단되며, 자동차용 부품 제조의 복잡한 성형 부분에 500℃ 이상 가열하여 성형한다면 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 첨단 헬로티, “2019년 국내 금형산업 경기 및 주요 산업 전망.” [http://www.hellot.net/new\\_hellot/magazine/magazine\\_read.html?code=201&sub=001&idx=44406](http://www.hellot.net/new_hellot/magazine/magazine_read.html?code=201&sub=001&idx=44406), 2019.
2. “금형산업 최근 동향 및 현황 진단.” 한국금형기술센터, 2018.
3. “기계산업 통계월보.” 한국기계산업진흥회, 2019.
4. 한국금형공업협동조합, “2019년도 1/4분기 금형 수출입 동향.” [http://www.koreamold.com/web\\_2017/magazine/article/View.asp?menuSeq=2](http://www.koreamold.com/web_2017/magazine/article/View.asp?menuSeq=2), 2019.
5. “소성가공산업 로드맵”, 중소기업청, 2013.
6. “소성가공 산업의 현재, 기술 동향과 미래 전망.” 국가뿌리산업진흥센터, 2018.
7. “2018 뿌리산업 백서.”, 국가뿌리산업진흥센터, 2018.
8. Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, W. R., Jong, W. R., “Simulations and verifications of induction heating on a moldplate”, International Communications in Heat and Mass Transfer, 33:4 529~535. 2004.
9. Erhardt, R.; Böke, J., “Industrial application of hot formingpress simulation”, 1st International Conference on Hot SheetMetal Forming of High-Performance Steel, Kassel, Germany, p. 83-88, 2008.
10. “중소기업 기술 로드맵.” 중소기업 기술정보화 진흥청, 2016.
11. 송광현, 이재동, 최이천, 서대교, “금형의 온도와 처리 상태에 따른 판재의 마찰 특성.” 한국소성가공학회, 8권, 3호, p.245-251, 1999

12. Turetta, A., Bruschi, S., Ghiotti, A., “Investigation of formability in hot stamping operations. Journal of Materials Processing Technology” , 177.1, p.396-400, 2006.
13. Kolleck, R., Veit, R., Koroschetz, C., “Hot stamping of carbody parts with local strength adjustment” In Proceedings of the IDDRG 2009 Conference, Golden, USA, p.825-834, 2009.
14. Karbasian, H., Tekkaya, A. E., “A review on hot stamping.” Journal of Materials Processing Technology, 210.15, p.2103-2118, 2010.
15. 김종원, 박옥조, 홍석무, “핫 프레스 포밍을 위한 고열전도성 금형에 대한 연구.” 한국기계가공학회지, 15(3), 130-134. 2016.
16. 김원혁, “고강도 차체부품 개발을 위한 고주파유도가열 기반연구.” 울산대학교 자동차선박기술대학원, 2008.
17. 박근, 김병훈, “고주파 유도가열기술을 이용한 사출금형 급속가열 응용사례.” 기계저널, 51(4), 50-54, 2011.
18. Andrew Pytel, Jaan Kiusalaas, “Mechanics of materials.” 2nd Ed., 2013.
19. GoDoK 블로그, “소성가공용어집.” <https://godok.tistory.com/31>, 2008.
20. David R. Gaskell, “Introduction to the Thermodynamics of Materials.” Routledge, 2007.
21. 김윤호, “알루미늄 박판 점착 복합 방수시트를 이용한 고주파 유도가열 방수공법 개발 및 현장 적용성 평가연구.” 서울과학기술대학교 산업대학원, 2011.

22. 고경학, “고주파 용접기를 이용한 스마트 카드 제작.” 수원대학교 대학원, 2007.
23. 황영호, “고주파 유도가열전원용 전류형고주파 인버터의 출력제어에 관한 연구.” 강원대학교 산업대학원, 2008.
24. Von Mises, R, “Mechanik der festen Korper im plastisch deformablen Zustand.” Gottin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, pp. 582-592, 1913.
25. WIKIPEDIA, “von Mises yield criterion.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Von\\_Mises\\_yield\\_criterion](https://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion).
26. MIDAS, “폰 미세스 응력(von Mises stress).” [https://kor.midasuser.com/civil/tech\\_paper/keyword\\_view.asp?pg=4&sk=&bid=70&nCat=&nIndex=&sHtml=&idx=576](https://kor.midasuser.com/civil/tech_paper/keyword_view.asp?pg=4&sk=&bid=70&nCat=&nIndex=&sHtml=&idx=576).
27. 최만용, 김원태, “적외선열화상검사.” 노드미디어, 2012.
28. (주)제일엠아이 블로그, “화력 발전소에 열화상 카메라를 이용한 화재 감시 시스템 구축 사례.” <https://blog.naver.com/whleej1/30160040135>, 2013.
29. 전소영, “적외선 열화상 기술을 이용한 배관의 최적 시험조건 결정에 관한 연구.” 조선대학교 대학원, 2012.
30. 김상채, “위상잠금 적외선 열화상 기술을 이용한 감육 결함의 최적화 측정에 관한 연구.” 조선대학교 대학원, 2018.
31. W. Steinchen and L. Yang, “Digital shearography, theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry” , SPIE Press, pp. 55-62, 237-241, 2003.
32. Igor A. Razumovsky, “interference-optical method of Solid Mechanics.” Springer, 2011.