



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](#)

2017 년 2 월
석사학위 논문

다층적층 된 금속재료의
결함 방지를 위한
손상저감층 설계에 관한 연구

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 동 인

다층적층 된 금속재료의
결함 방지를 위한
손상저감층 설계에 관한 연구

A Study on Design of the Damage Diminution Layer
(DDL) for the Prevention of Defects of Multi-layer
Deposited Metallic Materials

2017 년 2 월 24 일

조선대학교 대학원

기계공학과

김 동 인

다층적층 된 금속재료의
결함 방지를 위한
손상저감층 설계에 관한 연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2016 년 10 월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 동 인

김동인의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수

한 길 영 (인)

위 원 조선대학교 교수

오 동 욱 (인)

위 원 조선대학교 교수

안 동 규 (인)

2016 년 11 월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
NOMENCLATURES	ix
ABSTRACT	x
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 선행 연구 결과 분석	2
1. 특성개선층 선행 연구 결과 분석	2
2. 열응력제어층 선행 연구 결과 분석	3
제 3 절 연구 목적 및 방법	4
제 2 장 손상저감층을 포함하는 다층적층 된 금속재료 의 열전달/열응력 해석모델 설계	6
제 3 장 다층적층 된 금속재료의 특성분석을 통한 손 상저감층의 재료 선정	9
제 4 장 손상저감층의 재료/두께/배치에 따른 열전달/ 열응력 해석 결과 분석	13
제 1 절 HastelloyX 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때	

두께와 배치에 따른 온도/주응력/주변형률 특성	14
1. HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 온도 특성 분석	14
2. HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 주응력 특성 분석	17
3. HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성 분석	22
제 2 절 SUS304 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 두께와 배치에 따른 온도/주응력/주변형률 특성	25
1. SUS304 의 두께와 배치에 따른 온도 특성 분석	25
2. SUS304 의 두께와 배치에 따른 주응력 특성 분석	28
3. SUS304 의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성 분석	33
제 3 절 P21 을 손상저감층 재료로 사용하였을 때 두께와 배치에 따른 온도/주응력/주변형률 특성	37
1. P21 의 두께와 배치에 따른 온도 특성 분석	37
2. P21 의 두께와 배치에 따른 주응력 특성 분석	39
3. P21 의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성 분석	45
제 4 절 열전달/열응력 해석을 통하여 온도/주응력/주변형률 분석을 통한 손상저감층의 재료, 배치 및 두께 선정	48
제 5 장 손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 시편 제작 및 실험 방법	50
제 1 절 열피로실험을 위한 다층적층 된 실험 시편 및 실험용 지그 설계/제작	50
1. 열피로실험 시편 제작	50

2. 제작 된 열피로실험 시편의 성분분석	52
3. 열피로실험 지그 제작	54
제 2 절 열피로실험 방법	54
제 6 장 손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 결과 분석	58
제 1 절 열피로실험 전/후 시편 외관 형상 분석	58
제 2 절 열피로실험 전/후 비파괴 검사를 통한 내부 균열 분 석	59
제 3 절 열피로실험 전/후 파괴 검사를 통한 내부 균열 분석	63
제 7 장 결론 및 향후 목표	67
References	68

LIST OF TABLES

Table 1	Chemical composition of materials	9
Table 2	Maximum temperatures for different thicknesses and designs of the DDL (Material of DDL = HastelloyX)	16
Table 3	Maximum major principal stresses for different thicknesses and designs of DDL (Material of DDL = HastelloyX)	19
Table 4	Maximum temperatures for different thicknesses and designs of the DDL (Material of DDL = HastelloyX)	28
Table 5	Maximum major principal stresses for different thicknesses and designs of DDL (Material of DDL = SUS304)	30
Table 6	Maximum temperatures for different thicknesses and designs of the DDL (Material of DDL = P21)	39
Table 7	Maximum major principal stresses for different thicknesses and designs of DDL (Material of DDL = P21)	40
Table 8	Conditions of the thermal fatigue experiment	53

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Failures of dies and moulds in the elevated temperature	2
Fig. 2 Heat treatment processes and equipments	2
Fig. 3 Concept of the hardfacing technology using a high density energy source	3
Fig. 4 Concept of thermal stress control layer	4
Fig. 5 Research procedure	5
Fig. 6 Model of finite element analysis	6
Fig. 7 Design alternatives of deposited region consisting of HL, TSCL and DDL	7
Fig. 8 Meshes of finite element analysis	7
Fig. 9 Boundary conditions of heat transfer analysis	8
Fig. 10 Stress-strain curves for different materials	10
Fig. 11 Relationships between temperature on the specific heat capacity for different materials	10
Fig. 12 Relationships between temperature and thermal expansion coefficient for different materials	11
Fig. 13 Relationships between temperature and thermal conductivity for different materials	11
Fig. 14 Estimated regions of temperature, thermal stress and thermal strain	13
Fig. 15 Influence of the thickness of and the design of the DDL on the temperature distribution (Material of DDL = HastelloyX)	14
Fig. 16 Effects of the thickness of the DDL on the temperature distribution in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)	15
Fig. 17 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal stress distribution (Material of DDL = HastelloyX)	17
Fig. 18 Effects of the thickness of DDL on the major principal stress dis-	

tribution in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)
 18

Fig. 19 Effects of the thickness and the design of DDL on the major principal stress in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)20

Fig. 20 Deviations of major principal stress for different thicknesses of DDL (Material of DDL = HastelloyX) 21

Fig. 21 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal strain distribution (Material of DDL = HastelloyX) 22

Fig. 22 Effects of the thickness of DDL on the major principal strain distribution in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)
 23

Fig. 23 Deviation of major principal strain for different thicknesses of DDL (Material of DDL = HastelloyX) 25

Fig. 24 Influence of the thickness of and the design of the DDL on the temperature distribution (Material of DDL = SUS304) 26

Fig. 25 Effects of the thickness of the DDL on the temperature distribution in the thickness direction (Material of DDL = SUS304) 27

Fig. 26 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal stress distributions (Material of DDL = SUS304) 28

Fig. 27 Effects of the thickness of DDL on the major principal stress distribution in the thickness direction (Material of DDL = SUS304) 29

Fig. 28 Effects of the thickness and the design of DDL on the major principal stress in the thickness direction (Material of DDL = SUS304) 31

Fig. 29 Deviations of major principal stress for different thicknesses of DDL (Material of DDL = SUS304) 32

Fig. 30 Effect of the thickness and the design of the DDL on the major principal strain distribution (Material of DDL = SUS304) 33

Fig. 31 Effects of the thickness of DDL on the major principal strain distribution in the thickness direction (Material of DDL = SUS304) ... 35

Fig. 32 Deviation of major principal strain for different thicknesses of DDL

(Material of DDL = SUS304) 36

Fig. 33 Influence of the thickness of and the design of the DDL on the temperature distribution (Material of DDL = P21) 37

Fig. 34 Effects of the thickness of the DDL on the temperature distribution in the thickness direction (Material of DDL = P21) 38

Fig. 35 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal stress distribution (Material of DDL = P21) 40

Fig. 36 Effects of the thickness of DDL on the major principal stress distribution in the thickness direction (Material of DDL = P21) 41

Fig. 37 Effects of the thickness and the design of DDL on the major principal stress in the thickness direction (Material of DDL = P21) .. 43

Fig. 38 Deviations of major principal stress for different thicknesses of DDL (Material of DDL = P21) 44

Fig. 39 Effect of the thickness and the design of the DDL on the major principal strain distribution (Material of DDL = P21) 45

Fig. 40 Effects of the thickness of DDL on the major principal strain distribution in the thickness direction (Material of DDL = P21) 46

Fig. 41 Deviation of major principal strain for different thicknesses of DDL (Material of DDL = P21) 48

Fig. 42 Design of specimens for a thermal fatigue experiment 50

Fig. 43 Fabrication procedure of specimens for a thermal fatigue experiment 51

Fig. 44 Fabricated specimens for the thermal fatigue experiment 51

Fig. 45 Region of area and line analyses 52

Fig. 46 Result of area and line analyses (Design of DDL = Type A) 53

Fig. 47 Result of area and line analyses (Design of DDL = Type B) 53

Fig. 48 Design and final shape of the jig for the thermal fatigue experiment 54

Fig. 49 Experimental set-up of the thermal fatigue experiment 55

Fig. 50 Procedure of the thermal fatigue experiment 56

Fig. 51 Thermal history of the thermal fatigue experiment 57

Fig. 52 Set-up of optical microscope (CAM Scope) 58

Fig. 53 Measured regions of morphology of specimens	58
Fig. 54 Morphologies of specimen	59
Fig. 55 Micro-focus X-ray computed tomography system	60
Fig. 56 Measurement scheme of specimen using micro-focus X-ray CT	60
Fig. 57 Tomograms for different measured regions (Before the experiment)	61
Fig. 58 Tomograms for different measured regions (Design of DDL = Type A)	62
Fig. 59 Tomograms for different measured regions (Design of DDL = Type B)	63
Fig. 60 Measurement scheme for the morphology of the inside of the specimen	63
Fig. 61 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type A, Before thermal fatigue experiment)	64
Fig. 62 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type A, After thermal fatigue experiment)	64
Fig. 63 Morphologies of specimen in the vicinity of boundary regions (Design of DDL = Type A, After thermal fatigue experiment)	65
Fig. 64 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type B, Before thermal fatigue experiment)	65
Fig. 65 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type B, After thermal fatigue experiment)	66
Fig. 66 Morphologies of specimen in the vicinity of boundary regions (Design of DDL = Type B, After thermal fatigue experiment)	66

NOMENCLATURES

HL : hardfaced layer (특성개선층)

TSCL : thermal stress control layer (열응력제어층)

DDL : damage diminution layer (손상저감층)

Q : heat flux (열 유량)

h : convection coefficient (대류 열전달계수)

T : maximum temperature of thermal fatigue experiment (열피로실험 최대온도)

Ht : heating time of thermal fatigue experiment (열피로실험 가열 시간)

Ct : cooling time of thermal fatigue experiment (열피로실험 냉각 시간)

ABSTRACT

A Study on Design of the Damage Diminution Layer (DDL) for the Prevention of Defects of Multi-layer Deposited Metallic Materials

Dong In Kim

Advisor : Prof. Ahn Dong-Gyu Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

One of hot issues of the manufacturer for the hot forging die is the improvement of the operation life through the diminution of the failure of the die. The hot forging die is damaged by mixed failure modes including the wear, the thermal crack, the impact crack, the corrosion crack, etc.. Hence, in order to extend the operation life of the hot forging die, the development of the diminution technology of the mixed failure modes is needed. Recently, the multi-layer deposition technology using the metal three-dimensional printing process is introduced as an alternative technology for the diminution of the mixed failure modes. The objective of this research work is to investigate the design of the damage diminution layer (DDL) for the prevent of defects of multi-layer deposition metallic materials.

Through the literature survey, Hestelloy X, SUS304 and P21 are chosen as the candidated material of the DDL. Two types of the DDL designs are chosen as a reference design of the DDL according to assignment of the DDL in the

multi-layer deposited region. In order to obtain proper material and thickness of the DDL, heat transfer and thermal stress analyses are performed using ABAQUS V6.12. In order to carry out the heat transfer and thermal stress analyses, temperature dependent material properties are used. From the results of the heat transfer and thermal stress analyses, influence of the material and the thickness of the DDL on thermal stress-strain distributions in the vicinity of the multi-layers deposited region and the deviation of major stress and strain in boundary regions of different materials are investigated. Through the results of the investigation, appropriate material and thickness of the DDL are estimated.

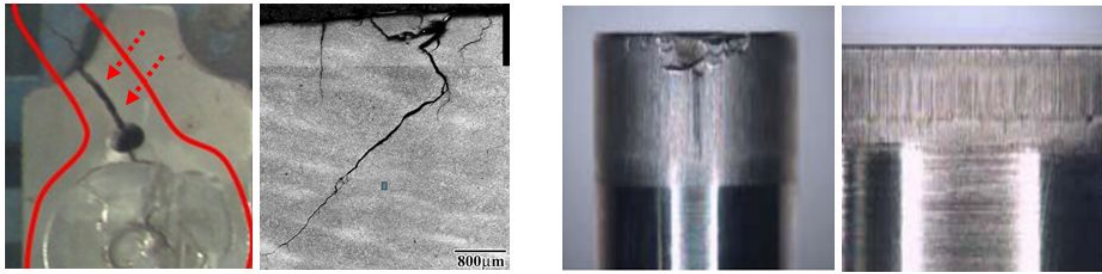
In order to obtain a proper assignment design of the DDL in the multi-layers deposited region, thermal fatigue experiments are carried out. Two types of specimens, including Type A and B, are designed according to the assignment of the DDL. Those specimens are fabricated from a laser-aided direct metal rapid tooling process and a post-processing. The morphology of the specimens is observed using a optical microscope, a micro-focus X-ray computed tomography system and a scanning electron microscope. From the results of the observation, the Type A design with the DDL between the hardfaced layer and the thermal stress control layer is determined as an appropriate assignment design of the DDL.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

18세기 중반 이후 영국에서 시작 된 산업혁명으로 전 세계의 산업화가 가속됨에 따라서 자원고갈 및 이산화탄소 증가로 인하여 다양한 환경오염 문제가 대두되고 있다.¹⁻³⁾ 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 분야에서 연구를 수행하고 있다.⁴⁻⁸⁾ 그 중 생산 및 제조 분야에서는 한정된 자원을 이용하여 생산 효율을 높일 수 있는 연구가 전 세계에서 지속적으로 수행되고 있다.^{9,10)}

일반적으로 금속 제품의 대량생산을 위한 고온성형 공정의 경우 제품 성형 온도가 600 ℃ 이상의 고온이고, 충격 하중이 반복적으로 부가되어 생산 공정이 매우 가혹한 조건에서 수행된다.¹¹⁾ 가혹한 생산 공정은 Fig. 1 과 같이 고온성형 금형의 과도변형, 고온마모, 고온침식, 열피로, 충격파손, 응력이완 균열 등 다양한 혼합손상패턴을 발생시킨다.¹²⁻¹⁵⁾ 이와 같은 가혹한 생산 공정으로 인하여 고온성형 금형의 수명은 매우 짧다. 고온 성형 금형의 혼합 손상 패턴 방지를 위하여 다양한 열처리 기법들이 사용되고 있다.¹⁶⁻²⁰⁾ 열처리 과정 및 열처리에 주로 사용되는 장비는 Fig. 2 와 같다.²¹⁾ 열처리는 금속재료나 부품 등의 기계적 성질을 변화시키기 위한 방법이다. 가열과 냉각을 반복해 상 변태를 유도하여 제품의 강도, 연성, 인성 및 내마모성과 같은 기계적 특성을 향상시키기 위한 기술이다.²²⁻²⁵⁾ 일반 열처리의 경우 금속재료 및 부품의 취성을 개선하기 위하여 제품 전체를 가열 및 냉각 하는 열처리 기술로 가열 및 냉각 조건에 따라 어닐링, 템퍼링 및 퀴칭 등으로 나뉜다.^{26,27)} 열처리 기법 중 표면 경화법은 국부적인 손상을 방지하기 위해 많이 사용된다. 표면경화법이란 국부적인 열처리로 제품의 특정 부분의 경도를 증가시키기 위한 방법이다.^{28,29)} 하지만, 일반적인 열처리의 경우 금형 전체에 적용하므로 금형의 변형이 생길 수 있다. 또한, 제품의 인성 감소로 인해 표면에 작은 균열이 생기면 균열이 번져 제품을 완전히 파손 시킬 수 있다.³⁰⁾ 표면경화 기술의 경우 경화층이 매우 얇고 극취성 조직으로 되어있으므로 고온의 환경에서 큰 하중이 부가 될 경우 경화층에 균열이 발생하는 문제가 생길 수 있다.³¹⁾ 이러한 열처리나 표면경화의 문제를 해결하기 위하여 기존의 금형에 특성이 우수한 이종재료를 적층하여 금형의 혼합손상패턴 제어 및 수명 향상을 위한 다양한 기술개발 연구가 진행되고 있다.³²⁻³⁵⁾



(a) Crack

(b) Wear

Fig. 1 Failures of dies and moulds in the elevated temperature



Fig. 2 Heat treatment processes and equipments

제 2 절 선행 연구 결과 분석

1. 특성개선층 선행 연구 결과 분석

모재에 이종재료를 적층하여 금형의 손상 방지 및 수명 향상을 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. Kashani 등은 TIG (Tungsten Inert Gas Welding) 용접을 통하여 열간 단조 금형인 H 11 표면에 초합금 층인 Stellite 21, Stellite 6 및 Inconel 625 를 적층한 뒤에 고온마모실험을 통하여 적층 시편의 마모 특성 및 고온 경도를 분석하였다.³⁶⁻³⁷⁾ Fouilland 등은 GSAW (Gas Shielded Arc Welding) 용접을 이용하여 55NiCrMoV7 열간 금형강 표면에 Stellite 21 을 적층한 뒤에 적층 방향과 희석률 변

화가 FIWH (Friction Induced Work Hardening) 에 미치는 영향을 분석하였다.³⁸⁾ Kim 등은 Laser Cladding 공정 과 TIG 육성 용접 공정으로 제품 표면에 초합금을 적층하한 뒤 미세조직, 화학 물성 및 마모 특성을 비교/분석 하여 우수한 재료 및 용접 방법을 도출하였다.³⁹⁾

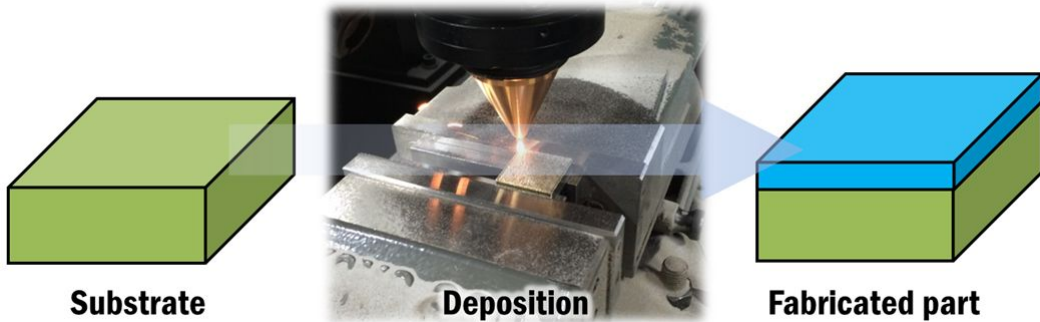


Fig. 3 Concept of the hardfacing technology using a high density energy source

금형의 마모현상을 개선시키기 위하여 하드페이싱 (Hardfacing) 공정이 사용되고 있다. 하드페이싱이란, Fig. 3 과 같이 고밀도 열원을 이용하여 모재 위에 초합금 재료를 적층하여 제품의 마모 및 마찰 특성을 향상시키는 공정이다.⁴⁰⁾ 본 연구를 진행하기에 앞서 Ahn 등은 제품의 마모 및 마찰 특성을 향상시키기 위한 층인 특성개선층에 관한 선행 연구를 수행하였다. 선행 연구에서는 3차원 열전달/열응력 해석을 통하여 온도, 유효응력 및 주변형률 분포 특성을 분석하여 하드페이싱 층의 재료와 두께를 예측하였다.⁴¹⁾ 또한 하드페이싱의 두께에 따른 고온마모 실험을 수행하여 마모량과 마모 체적 분석을 통하여 우수한 마모 특성을 가지는 하드페이싱 높이를 도출하였다.⁴²⁾

최종적으로 우수한 열 특성 및 마모 특성을 가지는 특성개선층의 재료와 높이를 각각 Stellite 21 및 2 mm 로 도출하였다.

2. 열응력제어층 선행 연구 결과 분석

모재에 이종재료를 적층하여 제작한 금형의 경우 적층 경계부에 손상이 발생하게 된다. Ocylok 등은 이러한 적층 경계부의 손상을 방지하기 위하여 1.2343 금속 위에 초합금 층인 Stellite 31, 1.2365 및 Dievar 을 적층하고 그 사이에 Marlok 을 적층하여

다층 적층 금형의 기공 특성, 화학 성분비 및 경도를 분석하였다.⁴³⁾ 그 중 열 피로로 인하여 적층 경계에서 손상이 발생하게 된다. Fig. 4 와 같이 적층 경계부의 열로 인한 손상을 방지하기 위한 층을 열응력제어층 (Thermal selective control layer) 이라 하며, 열응력제어층에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 본 연구를 진행하기에 앞서 Park 등은 적층 경계면에 발생하는 열 피로 문제를 해결하기 위하여 열응력제어층에 관한 선행 연구를 수행하였다. 앞선 특성개선층 관련과 연관 지어 STD 61 금형에 Stellite 21 재료를 2 mm 적층하여 해석 및 실험을 수행하였다. 해당 선행 연구에서는 3차원 열전달/열응력 해석을 통하여 온도, 열응력 및 주변형률 분포 특성을 분석하여 열응력제어층의 혼합비와 두께를 예측하였다.⁴⁴⁾ 또한 Ahn 등은 열응력제어층의 혼합비에 따른 고온마모 실험을 수행하여 마모량, 마모깊이 및 마모 폭을 분석하였다. 분석을 통하여 우수한 마모 특성을 가지는 열응력제어층의 혼합비를 도출하였다.⁴⁵⁾

최종적으로 우수한 열 및 마모 특성을 가지는 열응력제어층의 혼합비와 높이를 각각 Stellite 21 50 % + STD 61 50 % 및 1 mm 로 도출하였다.

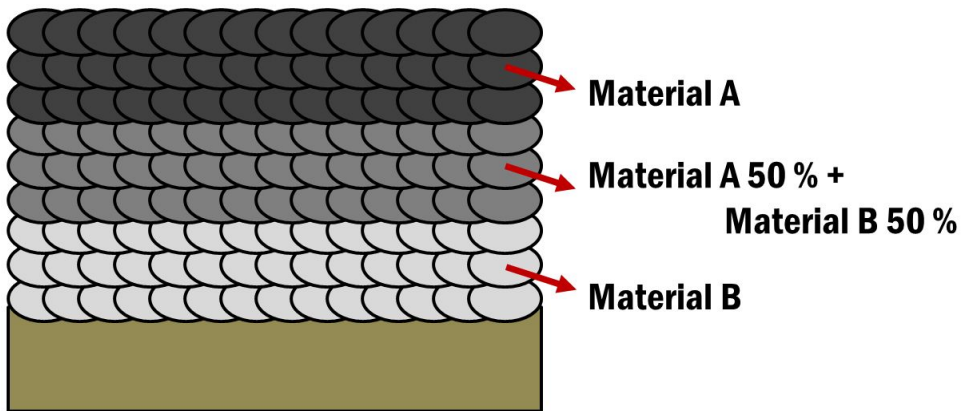


Fig. 4 Concept of thermal stress control layer

제 3 절 연구 목적 및 방법

본 연구에서는 다층적층 된 금속재료의 결합 방지를 위한 손상저감층 설계에 관한 연구를 수행하고자 한다.

첫째, 다층적층 된 시편의 열 특성 분석을 수행하기 위하여, 3차원 유한요소 해석 프

로그래를 사용한 열전달 해석 모델 설계를 수행하고자 한다.

둘째, 기저부, 특성개선층 및 열응력제어층의 특성을 고려하여 손상저감층 재료의 물성과 특성을 비교/분석 한 다음 다층적층 시 손상저감층에 적합한 재료를 선정하고자 한다.

셋째, 다층적층 된 시편 모델 표면에 동일한 열량을 부가하였을 때, 손상저감층의 재료, 배치 및 두께에 따른 온도, 주응력 및 주변형률 분포 분석을 수행하고 우수한 열 특성을 가지는 조건을 도출하고자 한다.

넷째, 열피로실험을 수행하여 다층적층 된 시편이 고온의 조건에서 어떠한 변화가 일어나는지 확인하고 열 특성이 우수한 손상저감층 재료를 선정하고자 한다.

연구진행 순서는 Fig. 5 와 같이 나타내었다.



Fig. 5 Research procedure

제 2 장 손상저감층을 포함하는 다층적층 된 금속재료의 열전달/열응력 해석 모델 설계

다층적층 된 금속재료의 열 특성 분석을 수행하기 위하여 열전달/열응력 해석 모델을 설계하였다. 다층적층 된 금속재료의 열전달/열응력 해석 모델의 형상은 Fig. 6 과 같다. 해석 모델의 높이는 150 mm 지름은 300 mm 로 원통형으로 일반 금형과 비슷하게 설계하였다.

다층적층 된 금속재료의 열전달/열응력 해석모델은 특성개선층, 열응력제어층, 손상저감층 및 기저부로 구성되어 있다. 특성개선층은 금형 표면 마모와 부식 방지를 통하여 금형의 수명을 향상시키기 위한 층이다. 마모나 부식 특성이 우수한 초합금 재료를 주로 사용한다. 선행연구를 통하여 특성개선층의 재료는 초합금인 Stellite 21 을 사용하였으며, 높이는 2 mm 를 적용하였다.

열응력제어층은 모재위에 이중재료가 적층 된 제품을 고온의 성형 공정에서 사용 할 때 서로 다른 재료의 열 특성 차이로 인하여 적층 경계부에서 발생하는 손상을 방지하기 위하여 적층하는 층이다. 선행연구를 통하여 열응력제어층은 해당 층을 기준으로 위층과 아래층의 재료를 각각 50 % 씩 혼합한 재료를 사용하였으며, 높이는 1 mm 를 적용하였다.

손상저감층은 열로 발생하는 손상뿐만 아니라 다양한 혼합손상패턴을 방지하기 위하여 특성개선층과 기저부 사이에 적층하는 층이다. 본 연구에서는 손상저감층의 높이를 1 ~ 3 mm 범위로 설계하여 열전달/열응력 해석을 수행하였다.

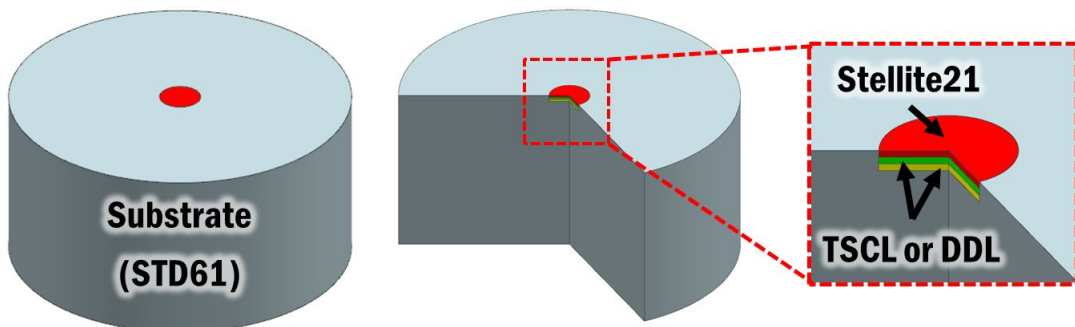


Fig. 6 Model of finite element analysis

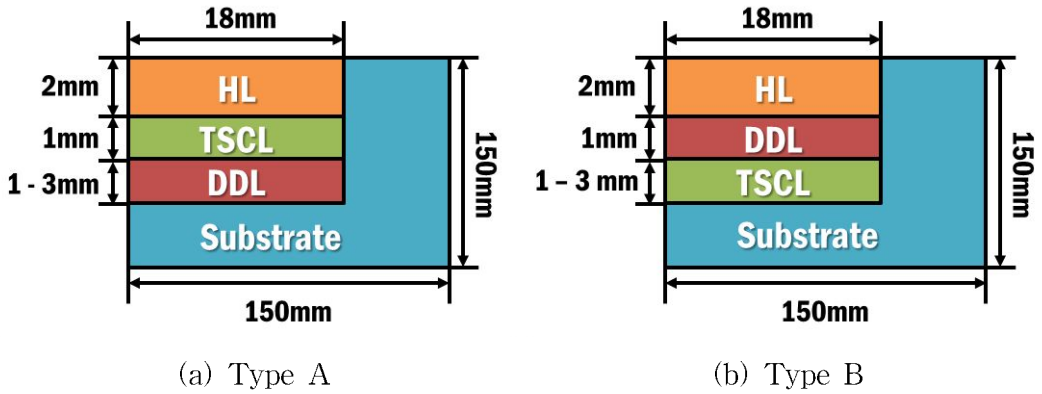


Fig. 7 Design alternatives of deposited region consisting of HL, TSCL and DDL

손상저감층을 포함하는 다층적층 된 열전달/열응력 해석 모델은 기저부의 중심에 특성개선층, 열응력제어층 및 손상저감층의 재료들을 배치하여 설계하였으며, 층이 있는 부분은 돌출되지 않은 형태로 설계하였다. Fig. 7 과 같이 적층 순서에 따라 두 가지 타입으로 나뉜다. Type A 는 위쪽부터 특성개선층 - 열응력제어층 - 손상저감층 - 기저부 순서로 설계하였다. Type B 는 위쪽부터 특성개선층 - 손상저감층 - 열응력제어층 순서로 설계하였다.

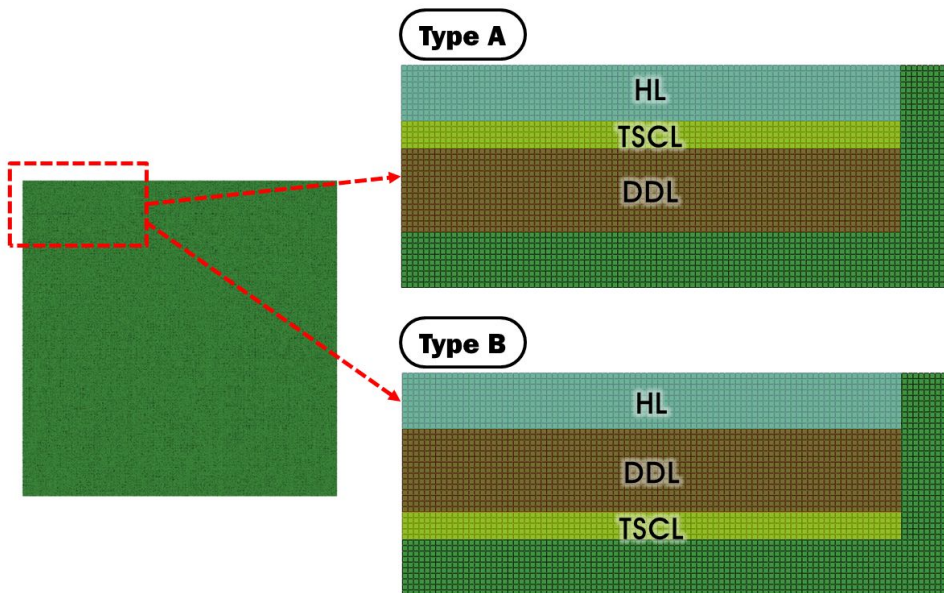


Fig. 8 Meshes of finite element analysis

다층적층 된 열전달/열응력 해석 모델 설계 후 정상상태 열전달 해석을 수행하였으며, 3차원 유한요소 해석 프로그램은 ABAQUS V6.12 을 사용하였다. 열전달/열응력 해석을 수행하기 위하여 금형의 유한요소 해석 모델 (Finite element model) 을 설계하였다. 설계 된 유한요소 해석 모델은 Fig. 8 과 같다. 유한요소 해석 모델의 요소 형태는 사각형 Shell 요소로 만들었으며, 요소의 크기는 0.2 mm 이다. 주어진 요소로 설계한 해석모델의 절점 개수는 564,001 개 이며, 요소의 개수는 532,500 개 이다.

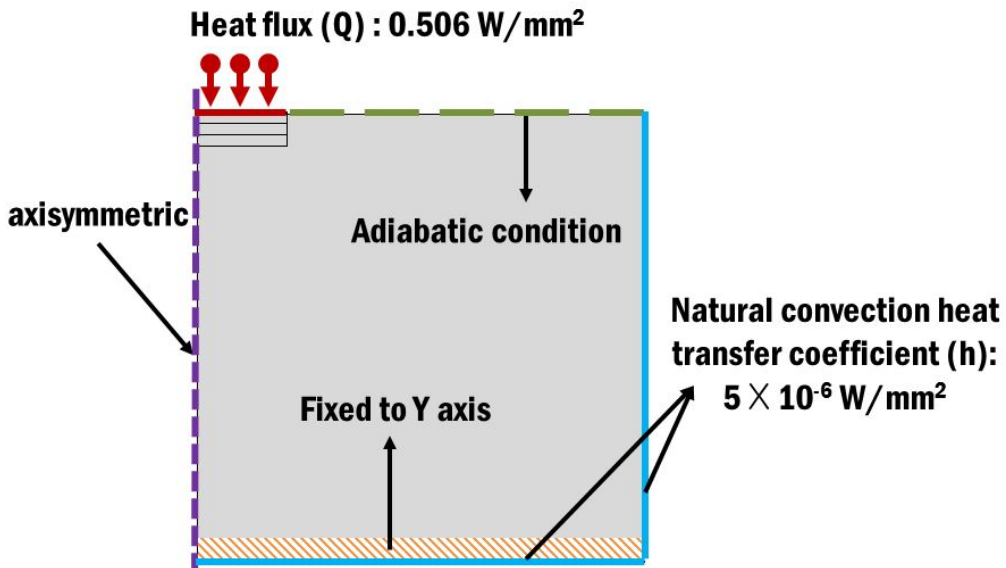


Fig. 9 Boundary conditions of heat transfer analysis

열전달 해석 모델의 경계조건을 Fig. 9 와 같이 나타내었다. 금형 표면에 적용 된 열 유량은 설계한 모델의 표면 온도가 800 °C 가 될 때의 열 유량인 0.506 W/mm² 를 적층부 표면에만 부가하였다. 적층부가 아닌 기저부 상면에는 단열조건을 적용하였다. 해석 모델은 축대칭 모델을 사용하였는데, 설계한 모델이 원통형상이며, 금형의 중심부에 열량을 주었을 때 모델 전체에 고르게 열전달이 일어나 동일한 특성을 보이므로 축대칭 모델을 사용하였다. 설계 모델의 바닥면과 벽면에는 자연대류조건을 적용하였으며, 적용된 자연대류계수는 5 × 10⁻⁶ W/mm² 이다.

제 3 장 다층적층 된 금속재료의 특성분석을 통한 손상저감층의 재료 선정

손상저감층의 재료를 선정하기 위하여 기저부와 특성개선층 이외에 3가지 재료를 선정하고, 선정 된 재료들의 물성데이터를 비교/분석 하였다.

다층적층 된 고온성형 금형의 기저부의 재료는 STD 61 를 사용하였다. STD 61 은 일반적으로 널리 사용되는 금형강이다. 열 충격과 열 피로에 강한 성질을 가지고 있으나, 변형이 심하기 때문에 사용 시 주의가 필요하다. 선행연구를 통하여 특성개선층의 재료는 Stellite 21 을 사용하였고, 열응력제어층은 열응력제어층을 기준으로 위층과 아래층의 재료를 각각 50 % 씩 혼합한 재료를 사용하였다. 해석모델 Type A 의 경우 열응력제어층이 특성개선층과 손상저감층 사이에 존재하므로 “특성개선층 50 % + 손상저감층 50 %” 의 혼합비를 적용하였고, Type B 의 경우 열응력제어층이 손상저감층과 기저부 사이에 존재하므로 “손상저감층 50 % + 기저부 50 %” 의 혼합비를 적용하여 열응력제어층을 설계하였다.

손상저감층의 재료는 HastelloyX, SUS304 및 P21 을 사용하였다. 각 재료의 화학 조성비는 Table 1 에 나타내었으며, Fig. 10 과 같이 재료별 응력-변형률 선도를 분석 하였다. 각각의 재료 별 온도에 따른 비열, 열팽창계수 및 열전도도를 각각 Fig. 11, 12 및 13 에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of materials

	Co	Cr	Mo	C	Ni	Fe
Stellite 21	Base	26.0 ~ 29.0	4.5 ~ 6.0	0.2 ~ 0.4	2.0 ~ 3.0	-
STD 61	-	5.1 ~ 5.3	1.3 ~ 1.4	1.3 ~ 0.4	-	90.9
HastelloyX	1.5	22.0	9.0	0.1	47.0	18.0
SUS304	-	18.0 ~ 20.0	-	0.1	8.0 ~ 10.5	66.3 ~ 74.0
P21	-	-	0.3	0.2	3.0	93.0

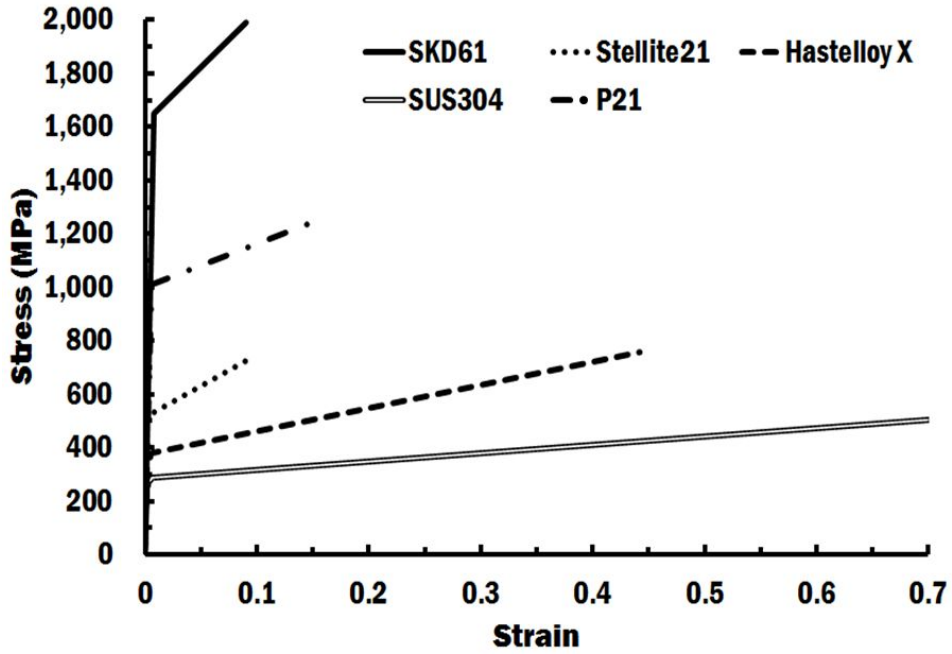


Fig. 10 Stress-strain curves for different materials

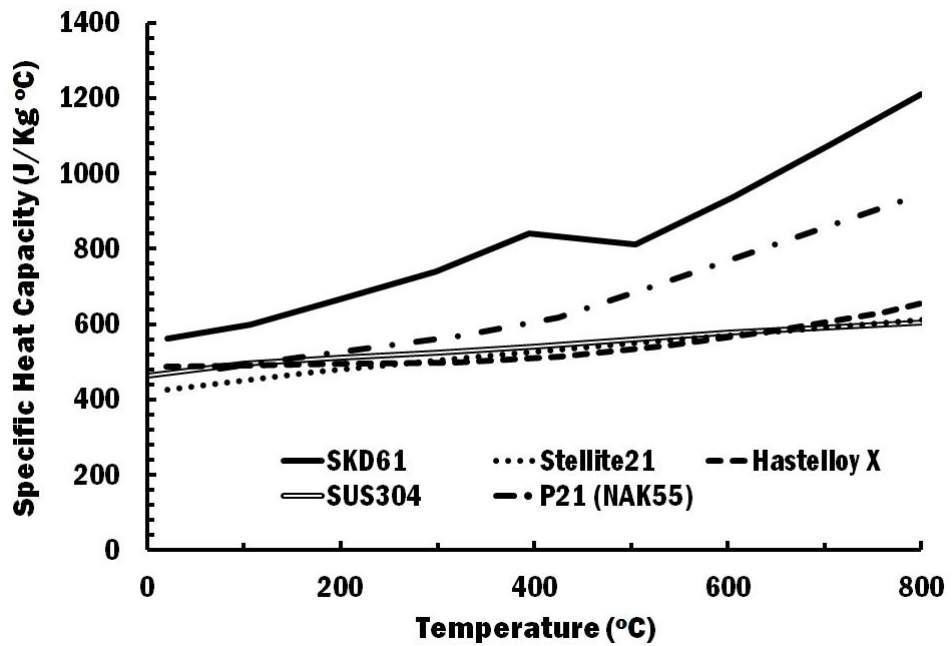


Fig. 11 Relationships between temperature on the specific heat capacity for different materials

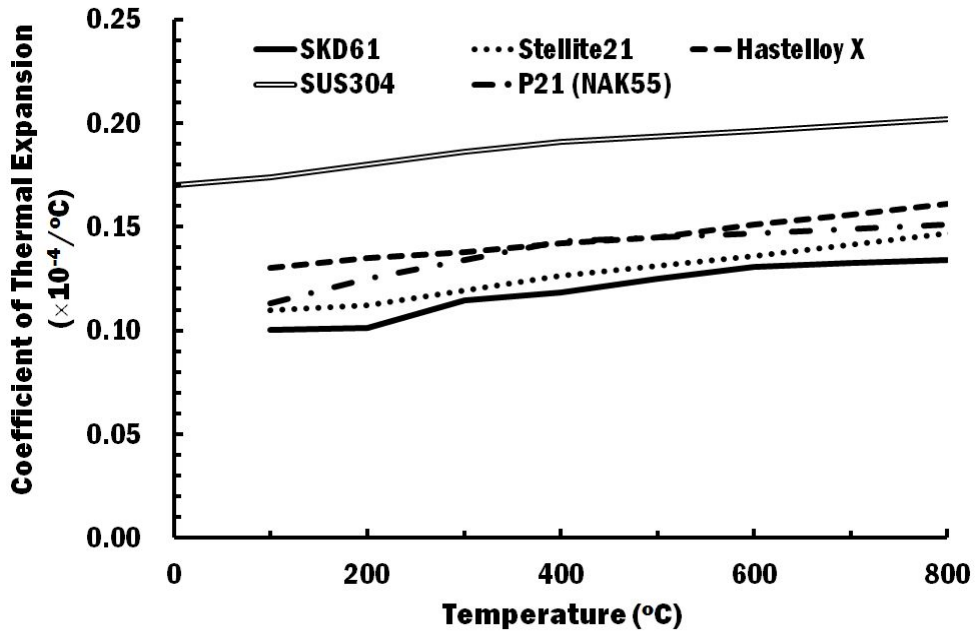


Fig. 12 Relationships between temperature and thermal expansion coefficient for different materials

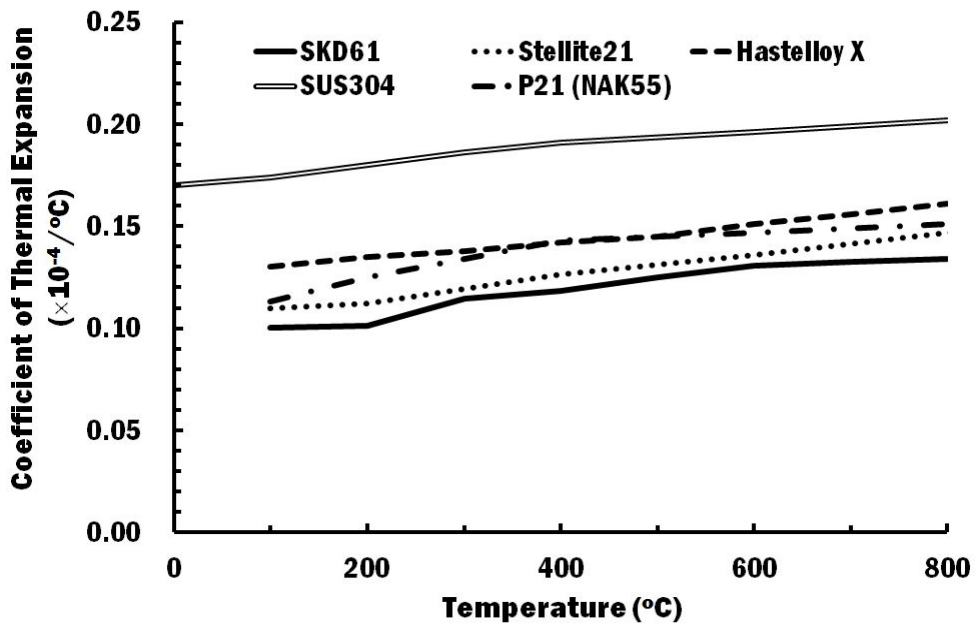
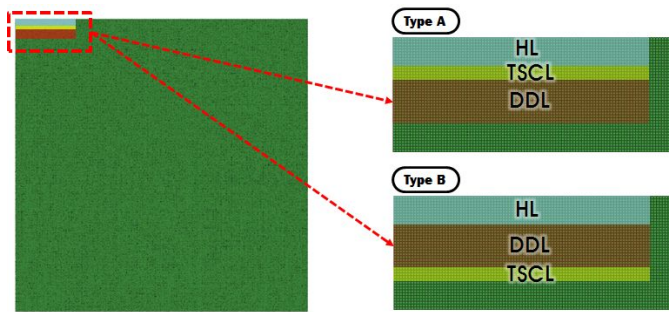


Fig. 13 Relationships between temperature and thermal conductivity for different materials

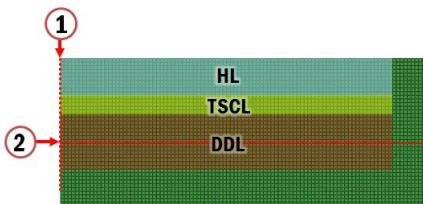
손상저감층 재료로 선정 된 HastelloyX 는 니켈 - 크롬 초합금이며, 뛰어난 고온경도 및 내산화성을 갖는다. HastelloyX 를 손상저감층 재료로 선정한 이유는 초합금임에도 불구하고 상대적으로 높은 연신율을 가지기 때문에 적층 경계부에서 발생하는 손상을 방지할 수 있을 것이라고 판단하였기 때문이다. SUS304 는 대표적인 오스테나이트계 (Austenite) 스테인리스 강 (Stainless steel) 으로 건축이나 자동차 부품 등에 널리 사용된다. SUS304 를 손상저감층 재료로 선정한 이유는 높은 연신율로 경계부에서 발생하는 균열을 방지할 수 있을 것이라고 판단하였기 때문이다. P21 은 열 저항력이 크고 치수변화가 적으며 경면성이 좋아 광택이 있는 표면을 얻기에 용이하여 플라스틱 사출 금형에 자주 사용된다. P21 을 손상저감층 재료로 선정한 이유는 기저부의 재료가 되는 STD 61 과 특성개선층 재료인 Stellite 21 의 재료별 응력-변형을 선도를 비교하였을 때 P21 의 선도가 중간에 위치하므로 두 재료의 물성 차이로 인해 발생하는 균열을 방지할 수 있을 것이라고 판단하였기 때문이다.

제 4 장 손상저감층의 재료/두께/배치에 따른 열전달/열응력 해석 결과 분석

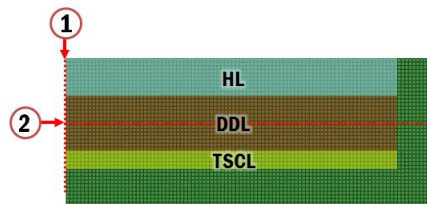
열전달/열응력 해석 수행 시 같은 면적에 동일한 열량을 주어도 손상저감층의 재료, 두께 및 배치에 따라 적층금형의 온도, 주응력 및 주변형률의 분포가 변한다. 전체적인 금형의 온도가 낮아지게 되면 상대적으로 열피로에 의한 금형의 손상을 방지 할 수 있다. 다른 재료를 적층하였기 때문에 금형의 적층 경계에서 물성차이로 인하여 응력과 변형이 발생하게 된다. 적층 경계부의 응력과 변형 작게 발생하면 다층적층 금형의 경계에서 발생하는 손상을 줄일 수 있게 된다.



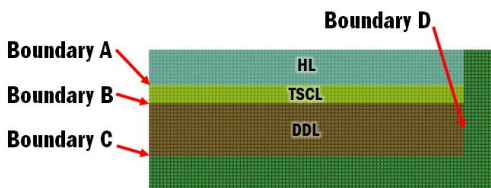
(a) Regions of analysis (Design of DDL = Type A and B)



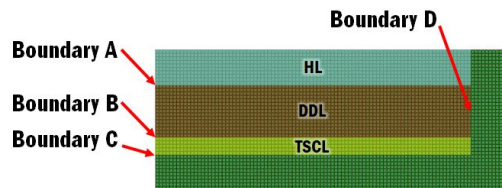
(b) Direction of data extraction (Design of DDL = Type A)



(c) Direction of data extraction (Design of DDL = Type B)



(d) Estimated regions of deviation (Design of DDL = Type A)



(e) Estimated regions of deviation (Design of DDL = Type B)

Fig. 14 Estimated regions of temperature, thermal stress and thermal strain

본 연구에서는 적절한 손상저감층의 재료, 두께 및 배치 도출을 위하여 해석 결과를 비교, 분석하였다. 열전달/열응력 해석 수행 후 Fig. 13 과 같이 데이터 도출 위치를 선정하였다. 설계한 모델에서 Fig. 13 (a) 와 같이 적층 된 주요 부분을 확대하여 특성을 분석하였다. Fig. 13 (b) 에서 1번과 같이 해석모델 중심에서 깊이방향으로 데이터를 추출하였다. 또한, 2번 방향의 주응력 데이터를 추출하였다. 재료가 다른 경계부에서 단차발생이 예상되어 Fig. 13 (c) 와 같이 재료 경계부의 단차를 분석하였다.

제 1 절 HastelloyX를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 두께와 배치에 따른 온도/주응력/주변형률 특성

1. HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 온도 특성 분석

손상저감층의 재료로 HastelloyX 를 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 온도분포 특성을 분석하였다. Fig. 15 는 손상저감층의 재료가 HastelloyX 일 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 Fig. 13 (a) 부분의 온도 분포 특성을 나타낸다. 동일한 열량을 주었을 때 두께 변화에 따른 온도분포를 비교하였다. HastelloyX 의 두께가 증가 할수록 적층 표면의 온도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

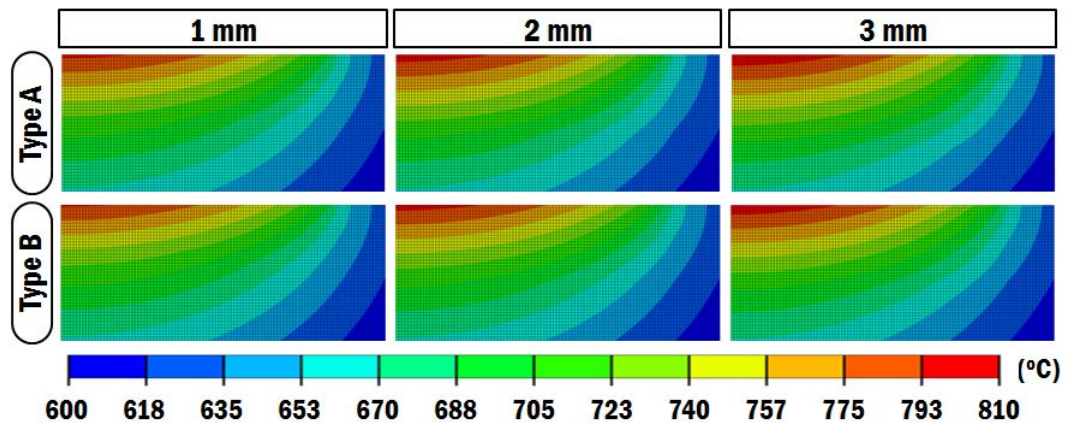


Fig. 15 Influence of the thickness of and the design of the DDL on the temperature distribution (Material of DDL = HastelloyX)

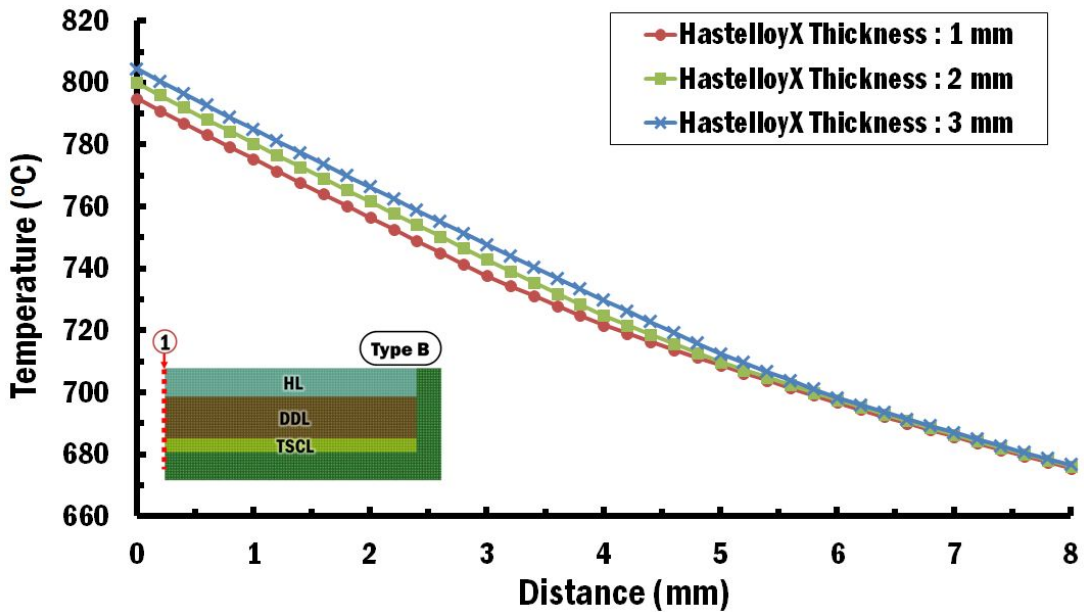
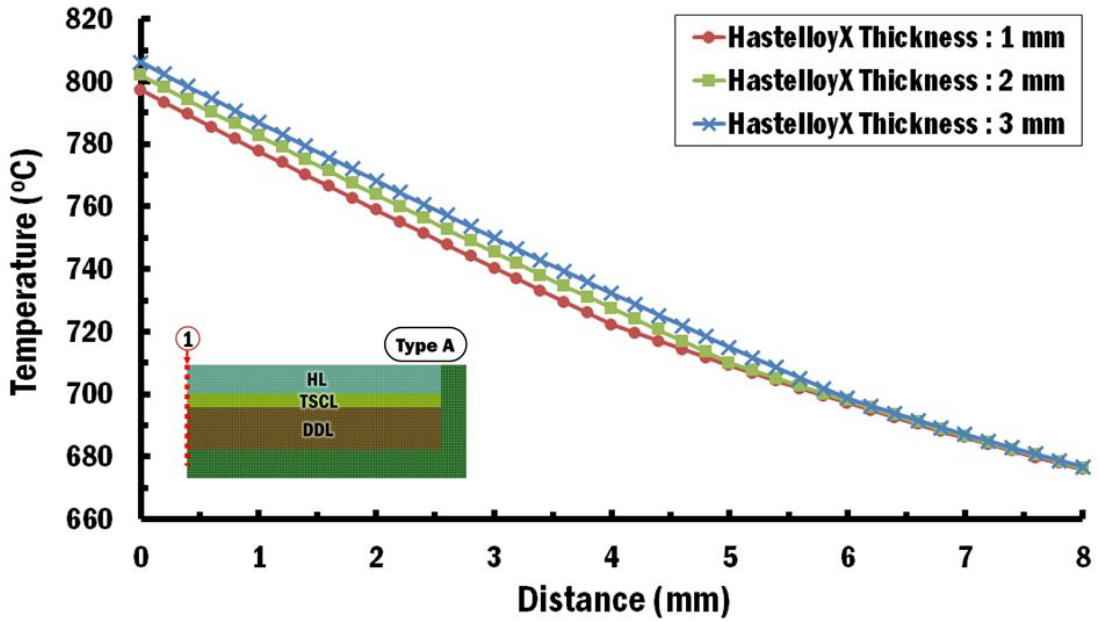


Fig. 16 Effects of the thickness of the DDL on the temperature distribution in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)

보다 정확한 온도분포 결과 분석을 위하여 Fig. 13 (b) 와 같이 1 번 방향으로 해석 모델의 중심에서 깊이방향으로 온도 변화를 측정하였다. 손상저감층의 재료가 HastelloyX 일 때, 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 온도분포 그래프를 각각 Fig. 16 에 나타내었다. HastelloyX 의 두께가 증가할수록 표면 온도가 높은 것을 해당 그래프를 통하여 확인 할 수 있었다. 또한 기저부로 갈수록 동일한 온도로 수렴하는 것을 알 수 있었다.

Table 2 Maximum temperatures for different thicknesses and designs of the DDL (Material of DDL = HastelloyX)

Thickness (mm)		1	2	3
Maximum Temperature (°C)	Type A	797	802	806
	Type B	795	800	804

손상저감층의 재료로 HastelloyX 를 사용하였을 때 해석모델 표면의 최대 표면온도를 Table 2 와 같이 정리하였다. HastelloyX 의 두께가 1 mm, 2 mm 및 3 mm 일 때 Type A 해석모델 표면의 최대 온도는 각각 797 °C, 802 °C 및 806 °C 로 나타났으며, Type B 해석모델 표면의 최대온도는 각각 795 °C, 800 °C 및 805 °C 로 도출되었다. 해석모델이 동일한 배치를 가질 때 HastelloyX 의 두께가 두꺼워 질수록 최대 표면온도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, HastelloyX 의 높이가 동일 할 때 Type A 의 배치로 적층하였을 때 보다 Type B 의 배치로 적층하였을 때 모든 높이에서 2 °C 낮은 최대 표면온도 결과를 가지는 것을 알 수 있었다. 이는 손상저감층의 재료로 사용 된 HastelloyX 가 특성개선층인 Stellite 21 과 기저부인 STD 61 의 재료보다 열전도도가 낮기 때문에 발생하는 현상이다. 손상저감층의 재료로 HastelloyX를 사용 할 경우, 온도분포 측면에서는 Type B 의 배치로 1 mm 적층 할 경우 우수한 온도분포 결과를 가진다는 것을 알 수 있었다.

2. HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 주응력 특성 분석

손상저감층의 재료로 HastelloyX 를 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주응력분포 특성을 분석하였다. Fig. 17 은 손상저감층의 재료가 HastelloyX 일 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주응력 분포를 나타낸다. 손상저감층과 기저부의 세로축 경계에서 응력집중이 발생하는 것을 확인하였다. HastelloyX 의 두께가 증가 할 수록 응력집중이 발생하는 범위가 넓어지는 것을 알 수 있었다.

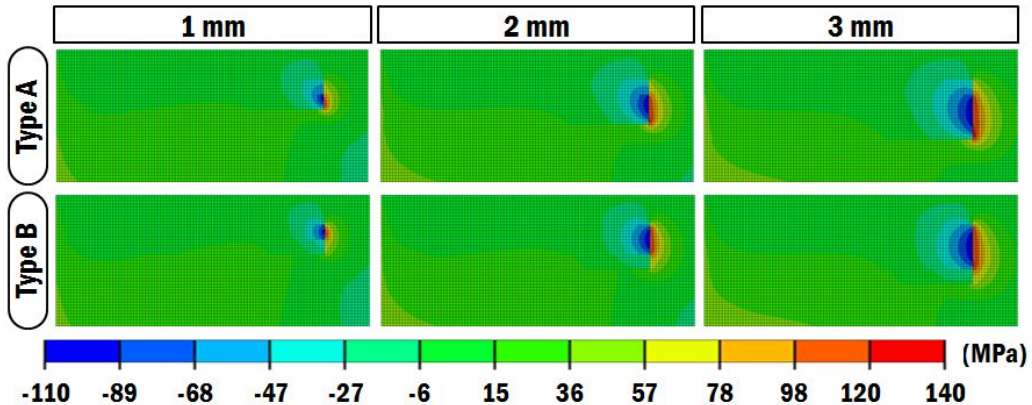
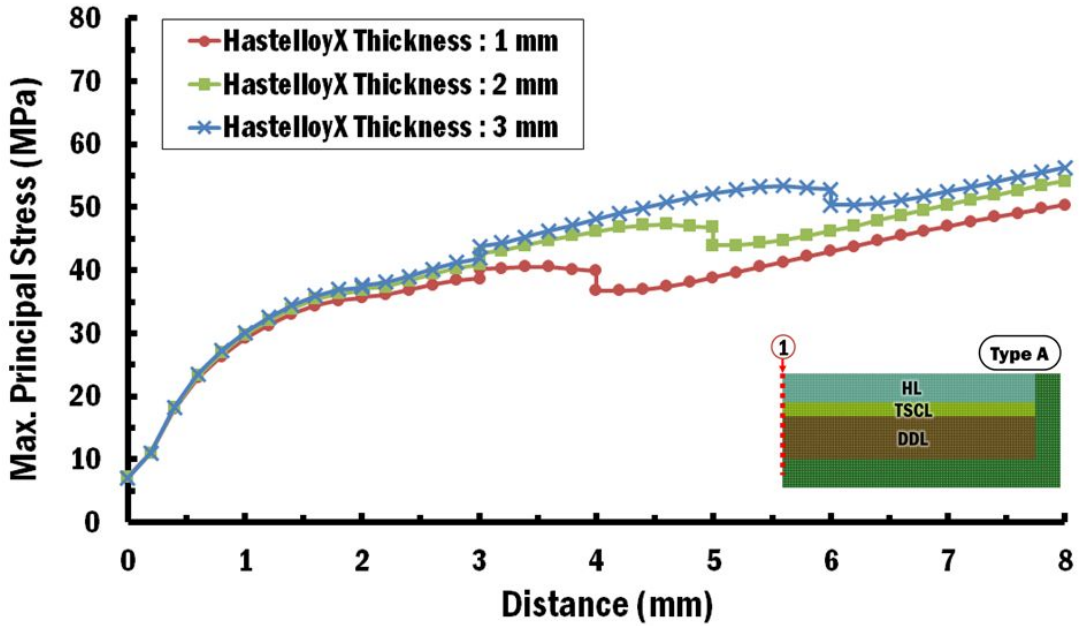


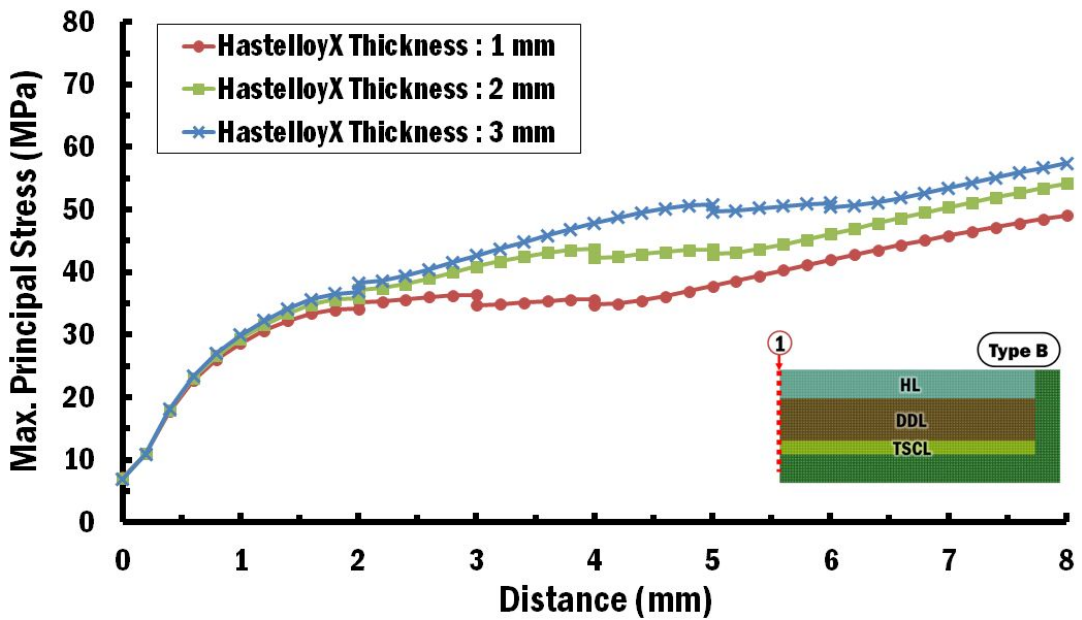
Fig. 17 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal stress distribution (Material of DDL = HastelloyX)

Fig. 13 (b) 의 1 번 방향과 같이 해석모델의 중심에서 깊이방향으로 주응력 분포를 측정하였다. 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 주응력을 Fig. 18 에 나타내었다. HastelloyX 의 두께가 증가할수록 주응력이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한, 적층 경계부에서 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 최대 주응력은 Table 3 과 같다. HastelloyX 의 두께가 증가할수록 최대 주응력이 높아지는 것을 알 수 있었다. Type A 배치를 가질 때, 손상저감층의 높이가 1 mm 에서 2 mm 및 2 mm 에서 3 mm 로 증가함에 따라 주응력이 각각 7.8 % 및 3.6 % 증가하였다. Type B 배치를 가질 때, 손상저감층의 높이가 1 mm 에서 2 mm 및 2 mm 에서 3 mm 로 증가함에 따라 각각 7.5 % 및 3.8 % 증가하였다. 또한, Type A 의 배치보다 Type B 의 배치를 일 때 주응력이 최대 6.5 % 감소하는 것을 알 수 있었다.



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 18 Effects of the thickness of DDL on the major principal stress distribution in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)

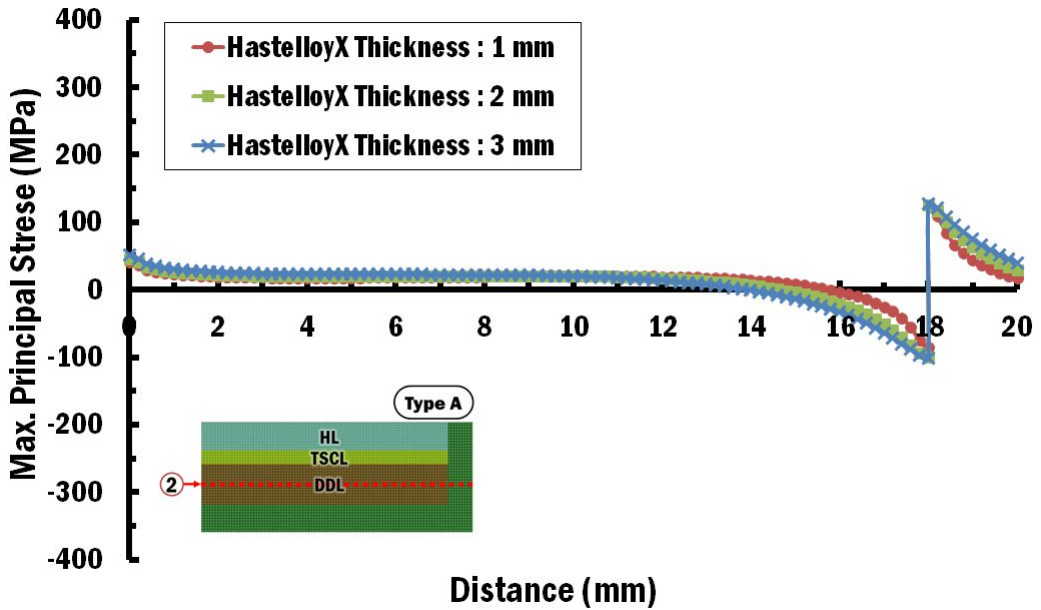
Table 3 Maximum major principal stresses for different thicknesses and designs of DDL (Material of DDL = HastelloyX)

Thickness (mm)		1	2	3
Maximum Major Principal Stress (MPa)	Type A	128	138	143
	Type B	120	129	134

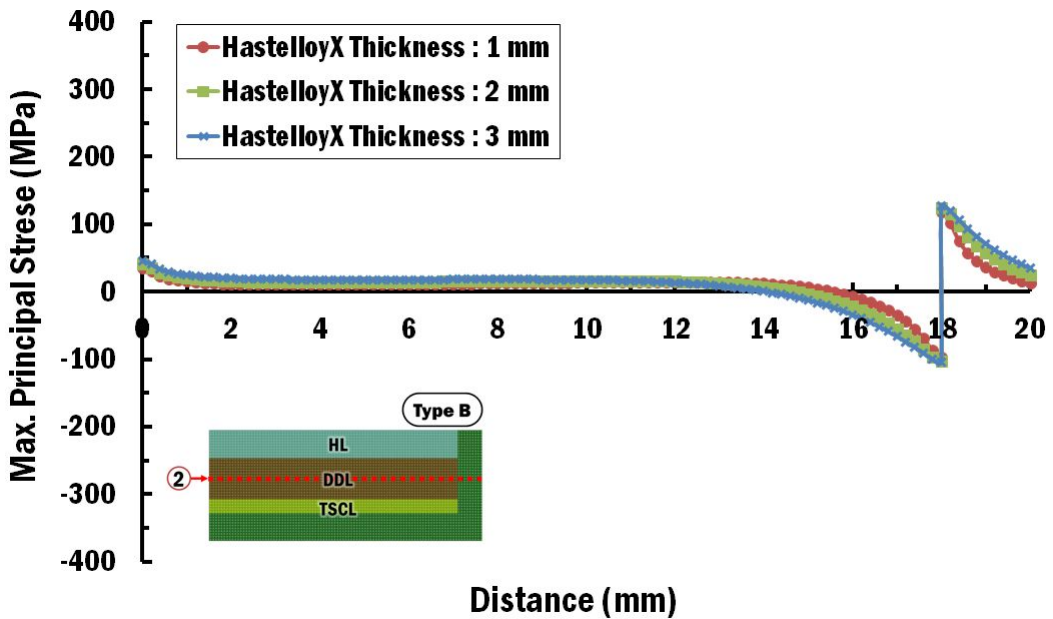
Fig. 17 분석을 통해 특정부분에 응력집중이 발생하는 것을 확인하고 단차값을 확인하기 위하여 Fig. 13 (b) 의 2 번 방향에서 주응력을 도출하였다. 재료가 손상저감층에서 기저부로 변하는 세로축 경계부분에서 최대 주응력이 발생하는 것을 확인하였다.

재료가 변하는 경계에서 주응력 단차가 발생하는 것을 확인하고, Fig. 13 (c) 와 같이 각 재료의 경계에서 주응력 단차를 도출하였다. Fig. 20 은 HastelloyX 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 손상저감층의 배치와 높이에 따른 주응력 단차를 비교한 결과이다. 배치와 관계없이 손상저감층과 기저부의 세로축 경계면인 Boundary D 에서 Type A, B 의 단차가 각각 최대 229 MPa 및 231 MPa 로 가장 큰 응력 단차를 가지는 것을 알 수 있었다. 또한, HastelloyX 의 높이가 증가 할수록 Boundary D 의 주응력 단차가 증가하는 것을 알 수 있었다. Type A, B 가 1 mm 에서 3 mm 로 증가 하였을 때 Boundary D 의 단차는 각각 10.1 % 및 7.4 % 증가하였다.

가장 큰 단차를 가지는 Boundary D 를 제외한 단차 분석을 수행하였다. Type A 배치의 경우 손상저감층과 기저부 사이인 Boundary C 에서 가장 큰 응력단차가 발생하였다. HastelloyX 의 두께가 증가할수록 열응력제어층과 손상저감층 사이인 Boundary B 의 단차는 증가하고, Boundary C 의 단차는 감소하는 것을 알 수 있었다. Type B 배치의 경우 손상저감층 재료인 HastelloyX 의 두께가 1 mm 일 때는 손상저감층과 열응력제어층 사이인 Boundary B 에서 가장 큰 응력단차가 발생하였다. 하지만, HastelloyX 의 두께가 증가할수록 Boundary B 의 단차는 작아지고, 특성개선층과 손상저감층 사이인 Boundary A 의 단차는 증가하여 HastelloyX 의 두께가 3 mm 일 때는 Boundary A 에서 가장 큰 주응력 단차가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

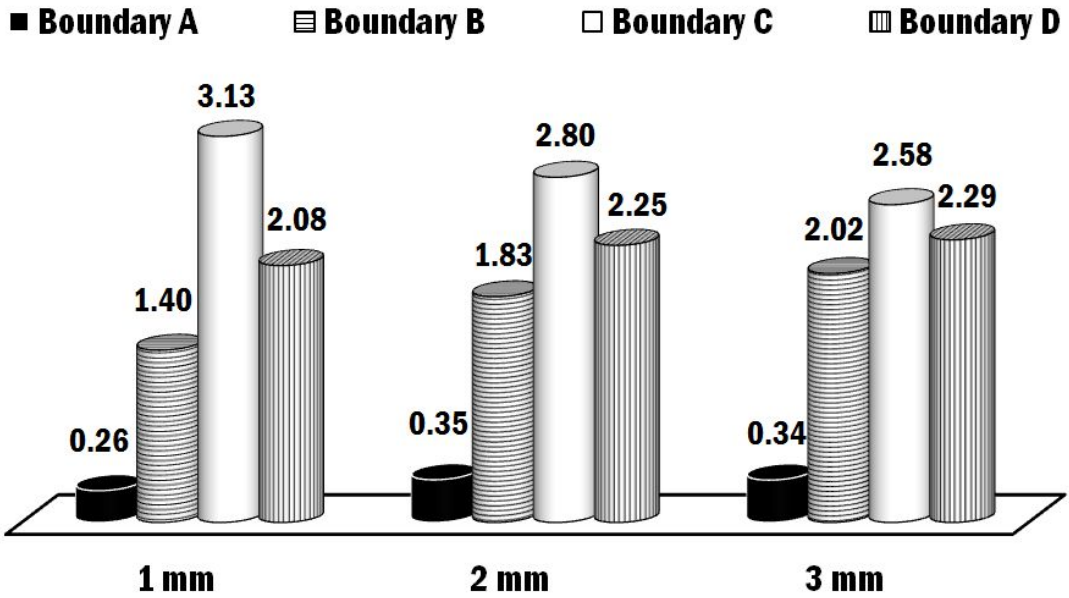


(a) Design of the deposited region = Type A

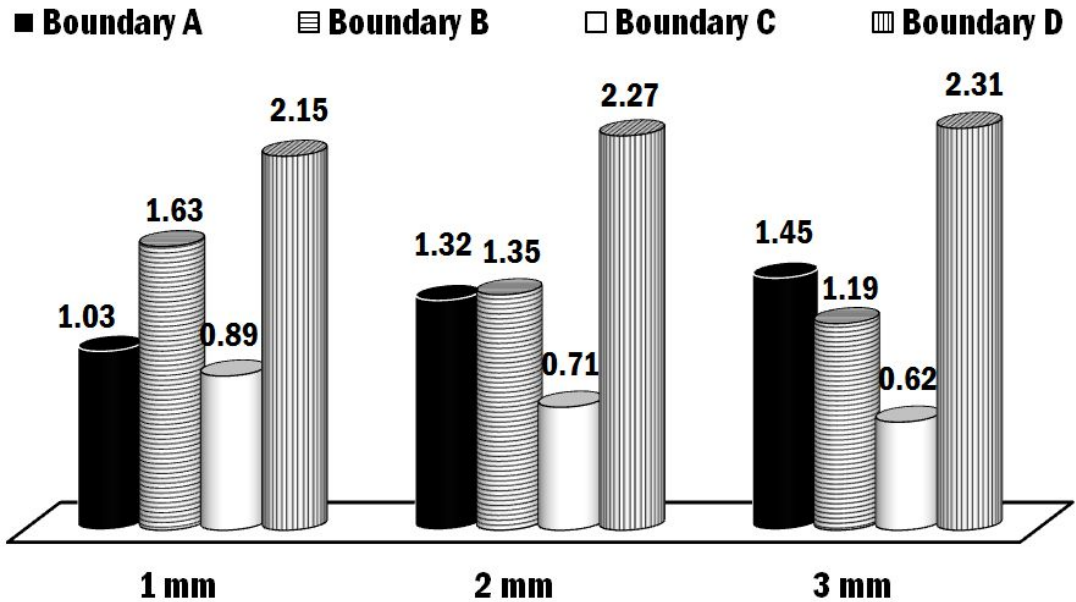


(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 19 Effects of the thickness and the design of DDL on the major principal stress in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 20 Deviations of major principal stress for different thicknesses of DDL (Material of DDL = HastelloyX)

3. HastelloyX 의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성 분석

손상저감층의 재료로 HastelloyX 를 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성을 분석하였다. Fig. 20 은 손상저감층의 재료가 HastelloyX 일 때 Fig. 13 (a) 의 위치에서 측정된 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주변형률 분포 특성을 나타낸 것이다. HastelloyX 의 두께가 증가 할수록 변형률이 큰 범위가 넓어지는 것을 알 수 있었다. 또한 Type B 에서 상대적으로 높은 주변형률 분포를 가지는 것을 확인하였다.

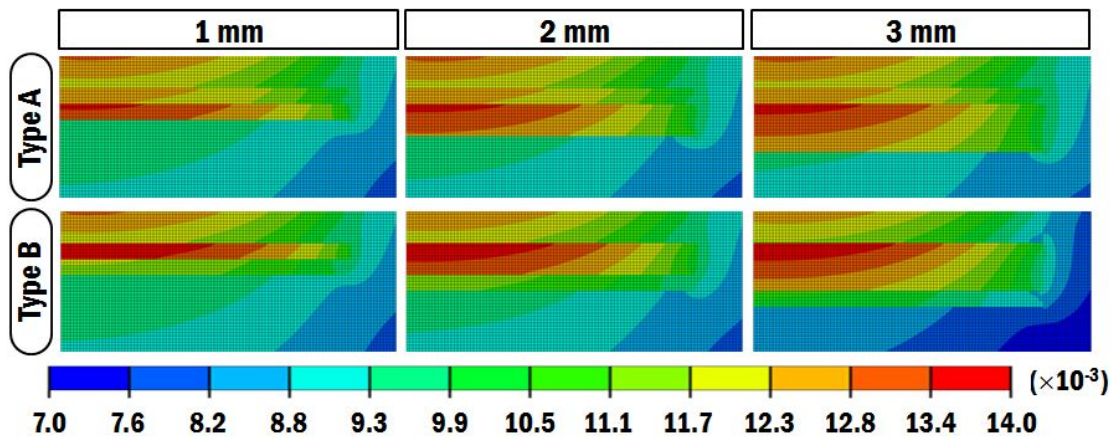
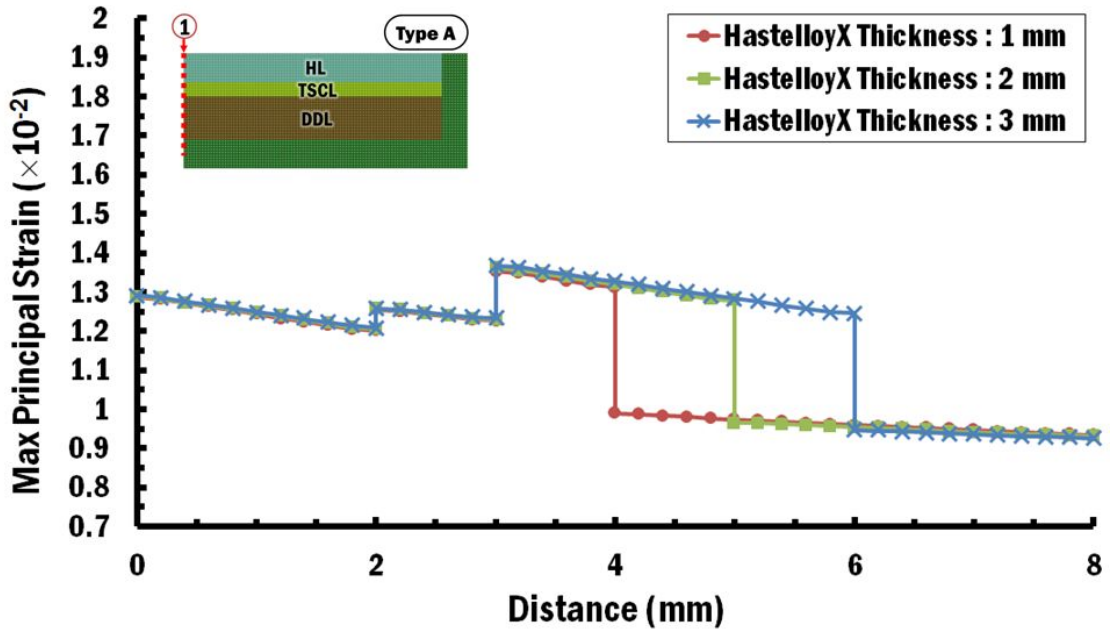
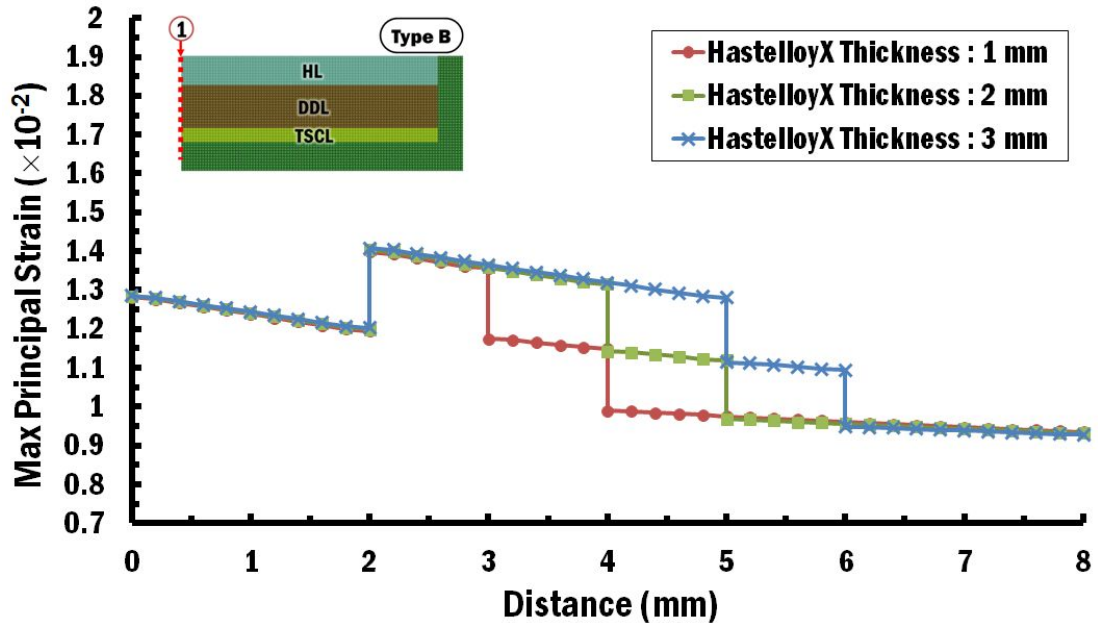


Fig. 21 Effect of the thickness and the design of the DDL on the major principal strain distribution (Material of DDL = HastelloyX)

보다 정확한 주변형률 분포 분석을 위하여 Fig. 13 (b) 의 1 번 위치와 같이 해석모델의 중심에서 깊이방향으로 주변형률 분포를 측정하였다. 손상저감층의 재료가 HastelloyX 일 때, 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 주변형률분포 그래프를 각각 Fig. 22 에 나타내었다. 손상저감층의 재료가 HastelloyX 일 때, 서로 다른 재료의 적층 경계에서 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다. HastelloyX 의 두께가 증가 할수록 변형률이 미세하게 큰 것을 알 수 있었다. Type A 의 경우 손상저감층과 기저부 사이인 Boundary C 에서 변형률 단차가 크게 발생 할 것으로 예상되었으며, Type B 의 경우 특성개선층과 손상저감층 사이인 Boundary A에서 변형률 단차가 크게 발생할 것으로 예상되었다.



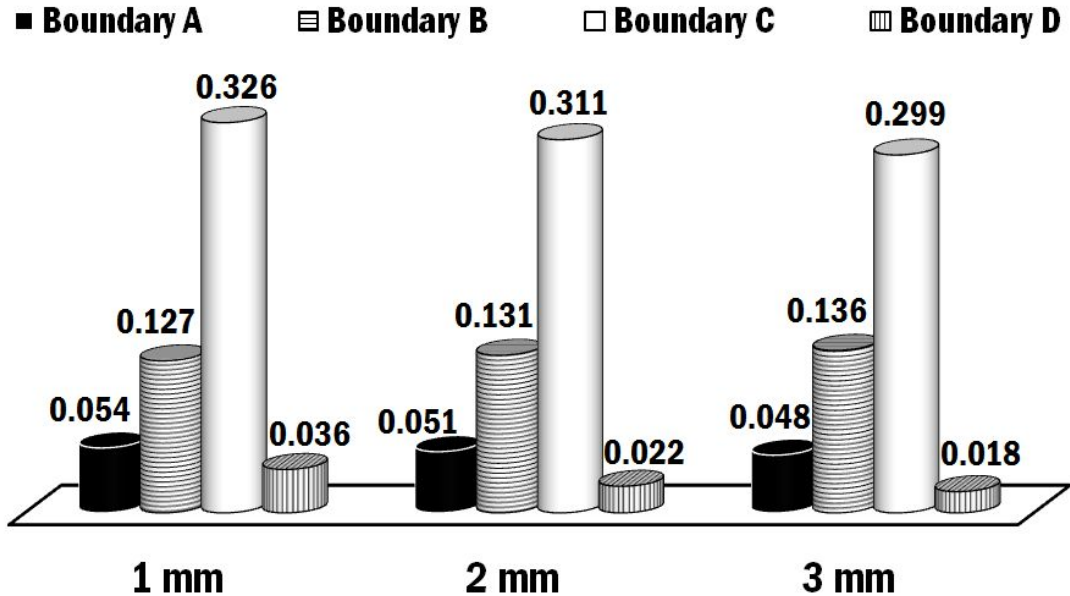
(a) Design of the deposited region = Type A



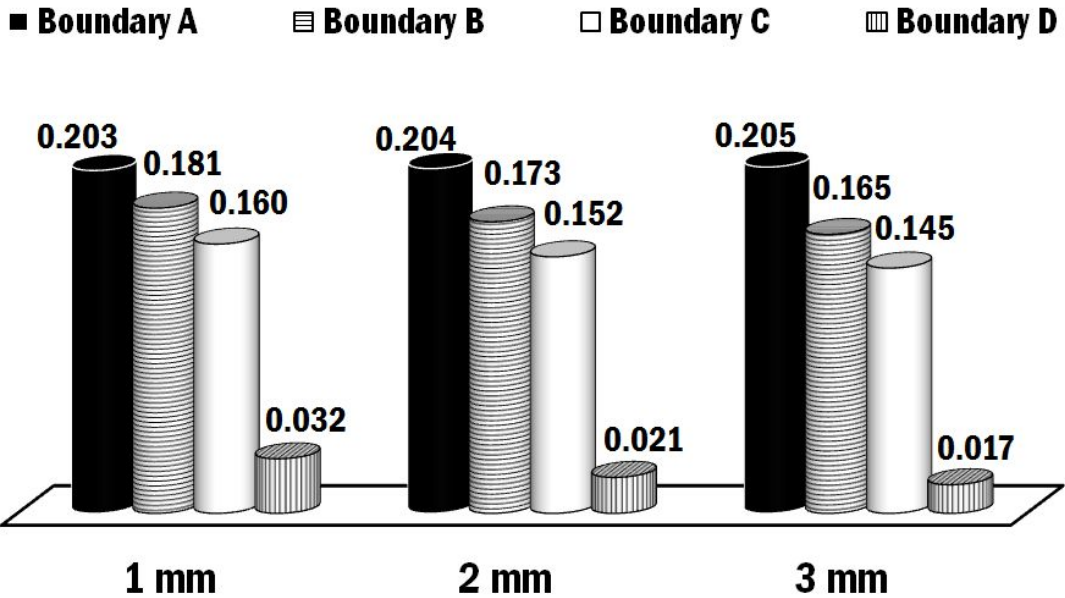
(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 22 Effects of the thickness of DDL on the major principal strain distribution in the thickness direction (Material of DDL = HastelloyX)

Fig. 22를 통하여 적층 재료가 변함에 따라 적층 경계에서 주변형률 단차가 발생하는 것을 확인하고, Fig. 13 (c) 와 같이 각 재료의 경계에서 주변형률 단차를 계산하였다. Fig. 23 은 HastelloyX 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 손상저감층의 배치와 높이 변화에 따른 주변형률 단차를 비교한 결과이다. Fig. 21 에서 Boundary D 부분에 눈에 띄는 변형이 발생하지 않아 Boundary D 의 변형률 단차는 측정하지 않았다. Type A 의 주변형률 단차의 경우, HastelloyX 의 두께가 증가 할수록 특성개선층과 열응력제어층의 경계인 Boundary A 와 손상저감층과 기저부의 경계인 Boundary C 의 주변형률 단차는 각각 11.1 % 및 8.3 % 작아지고, 열응력제어층과 손상저감층의 경계인 Boundary B 의 단차는 7.1 % 증가하는 것을 알 수 있었다. Type B 의 경우 특성개선층과 손상저감층 경계인 Boundary A 의 주변형률 단차는 1.0 % 증가하고, 손상저감층과 열응력제어층의 경계인 Boundary B 와 열응력제어층과 기저부의 경계인 Boundary C 의 주변형률 단차는 각각 8.8 % 및 9.4 % 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, Type A 의 경우에는 다른 경계부의 주변형률 단차는 작고 Boundary C 에서 가장 큰 변형률단차가 발생하였으나, Type B 의 경우 모든 경계에서 비슷한 주변형률 단차를 가지는 것을 확인하였다.



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 23 Deviation of major principal strain for different thicknesses of DDL
(Material of DDL = HastelloyX)

제 2 절 SUS304 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 두께와 배치에 따른 온도/주응력/주변형률 특성

1. SUS304 의 두께와 배치에 따른 온도 특성 분석

손상저감층의 재료로 SUS304 를 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 온도분포 특성을 분석하였다. Fig. 24 는 손상저감층의 재료가 SUS304 일 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 Fig. 13 (a) 부분의 온도 분포를 나타낸다. 동일한 열량을 주었을 때 손상저감층 재료인 SUS304 의 두께 변화에 따른 온도분포를 비교하였다. SUS304 의 두께가 증가 할수록 적층 표면 및 전체적인 해석모델의 온도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

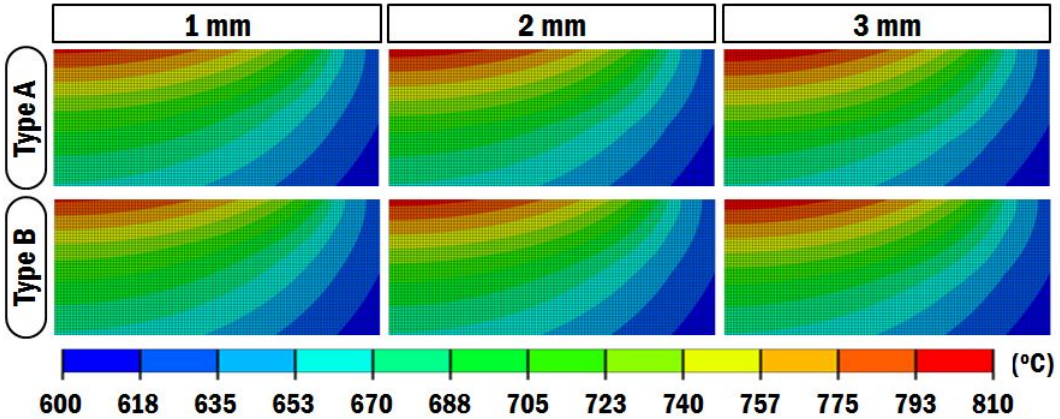
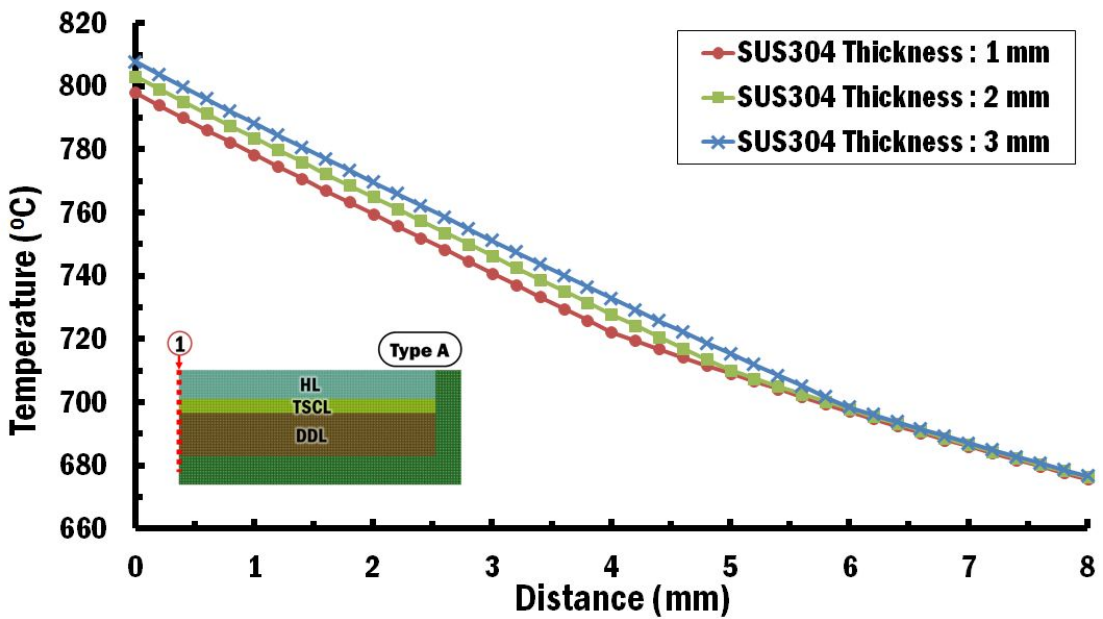
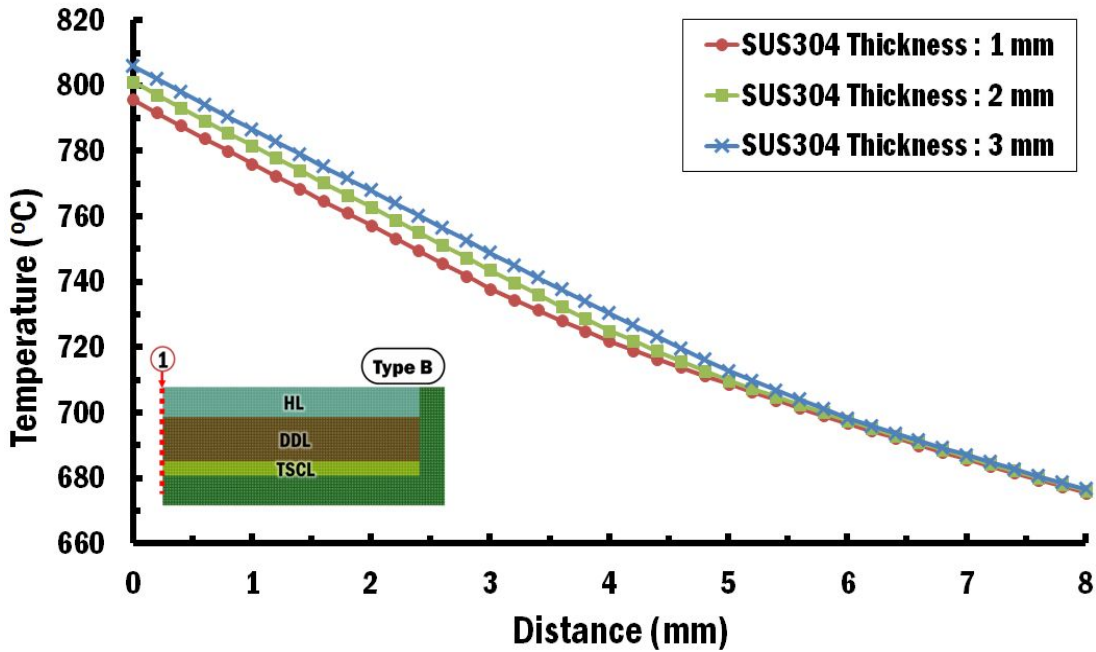


Fig. 24 Influence of the thickness of and the design of the DDL on the temperature distribution (Material of DDL = SUS304)

보다 정확한 온도분포 결과 분석을 위하여 Fig. 13 (b) 의 1번 방향으로 온도 분포를 측정하였다. 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 온도분포를 Fig. 25에 나타내었다. SUS304의 두께가 증가할수록 표면 온도가 증가하는 것을 그래프를 통하여 알 수 있었다. 또한 기저부로 갈수록 같은 온도로 수렴하는 것을 알 수 있었다.



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 25 Effects of the thickness of the DDL on the temperature distribution in the thickness direction (Material of DDL = SUS304)

손상저감층의 재료로 SUS304를 사용하였을 때, SUS304의 두께와 배치에 따른 해석모델 표면의 최대온도를 Table 4와 같이 정리하였다. SUS304의 두께가 1 mm, 2 mm 및 3 mm로 증가함에 따라 Type A 해석모델 표면의 최대 온도는 각각 798 °C, 803 °C 및 808 °C로 점점 증가하였으며, Type B 해석모델 표면의 최대 온도는 각각 796 °C, 801 °C 및 806 °C로 증가하는 것을 알 수 있었다. 해석모델이 동일한 배치를 가질 때 SUS304의 두께가 증가할수록 높은 최대 표면온도를 가지는 것을 확인하였다. 또한, 동일한 높이를 가질 때 Type A의 배치를 가질 때 보다 Type B의 배치를 가질 때 모든 높이에서 동일하게 2 °C 낮은 표면 온도를 가지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 손상저감층의 재료인 SUS304가 특성개선층 재료인 Stellite 21과 기저부 재료인 STD 61보다 열전도도가 낮기 때문인 것으로 사료된다. 손상저감층의 재료로 SUS304를 사용할 경우, 온도분포 측면에서는 Type B의 배치로 1 mm 적층할 경우 해석모델의 표면 최대 온도가 가장 낮은 796 °C로 우수한 온도분포 결과를 가진다는 것을 알 수 있었다.

Table 4 Maximum temperatures for different thicknesses and designs of the DDL (Material of DDL = HastelloyX)

Thickness (mm)		1	2	3
Maximum Temperature (°C)	Type A	798	803	808
	Type B	796	801	806

2. SUS304 의 두께와 배치에 따른 주응력 특성 분석

손상저감층의 재료로 SUS304 를 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주응력분포 특성을 분석하였다. Fig. 26 은 손상저감층의 재료가 SUS304 일 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주응력 분포 결과를 나타낸다. 손상저감층과 기저부의 세로축 경계에서 응력집중이 발생하는 것을 확인하였다. 응력집중이 발생하는 세로축 경계에서 손상저감층 재료 부분에서는 압축응력이 발생하였으며, 맞닿는 기저부에서는 인장응력이 발생하였다.

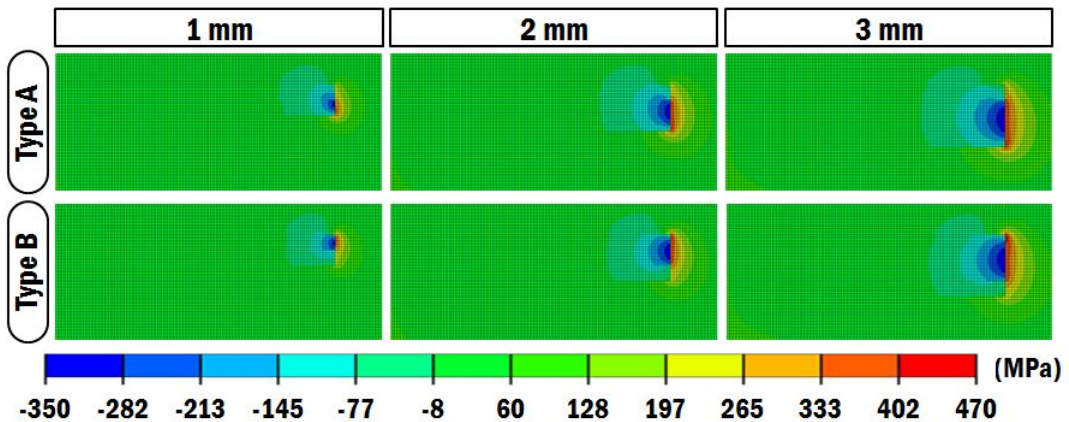
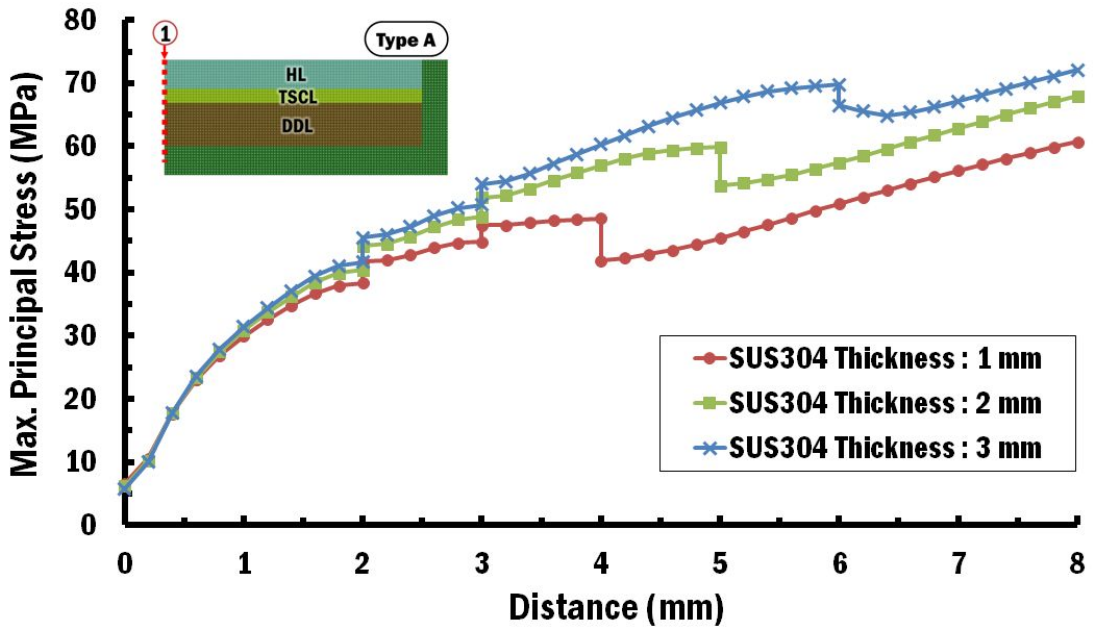
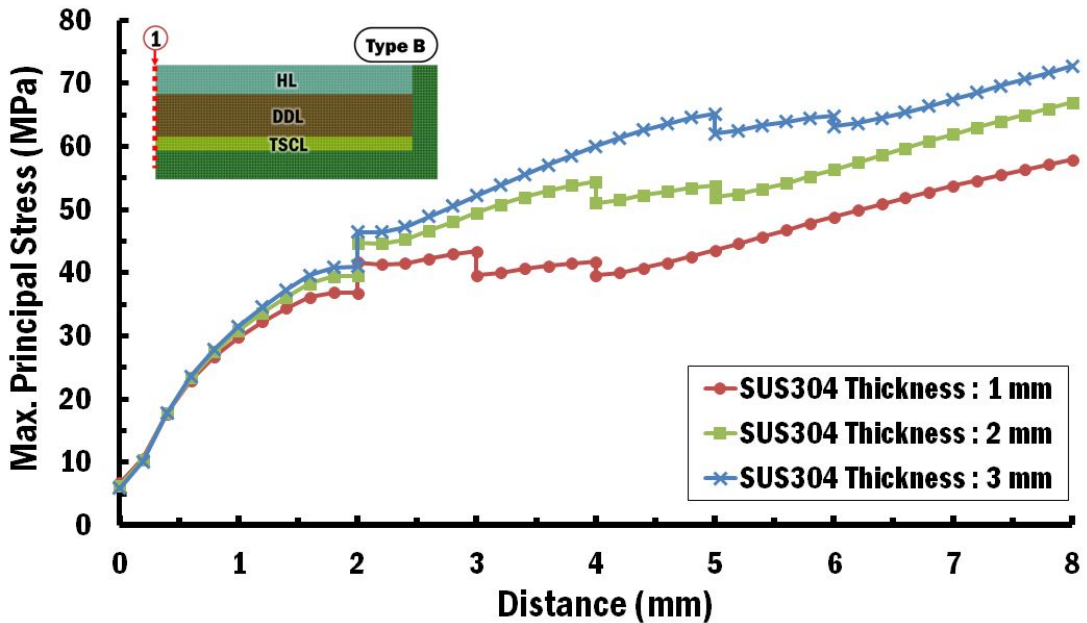


Fig. 26 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal stress distributions (Material of DDL = SUS304)



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 27 Effects of the thickness of DDL on the major principal stress distribution in the thickness direction (Material of DDL = SUS304)

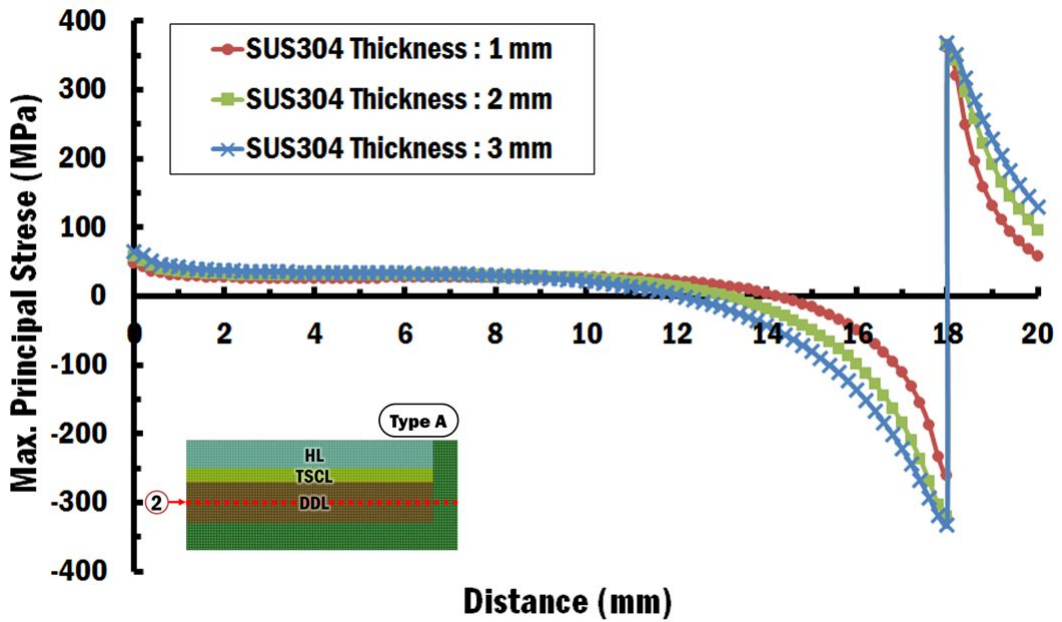
보다 정확한 주응력 분포를 분석하기 위하여 Fig. 13 (b) 의 1번 위치에서 해석모델의 중심에서 깊이방향으로 주응력 분포를 측정하였다. 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 주응력분포 그래프를 각각 Fig. 27 에 나타내었다. 손상저감층의 재료가 SUS304 일 때, 손상저감층의 두께가 증가할수록 주응력이 크게 나타나는 것을 해당 그래프를 통하여 확인 할 수 있었다. 또한, 재료가 변하는 경계부에서 주응력 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

Table 5 Maximum major principal stresses for different thicknesses and designs of DDL (Material of DDL = SUS304)

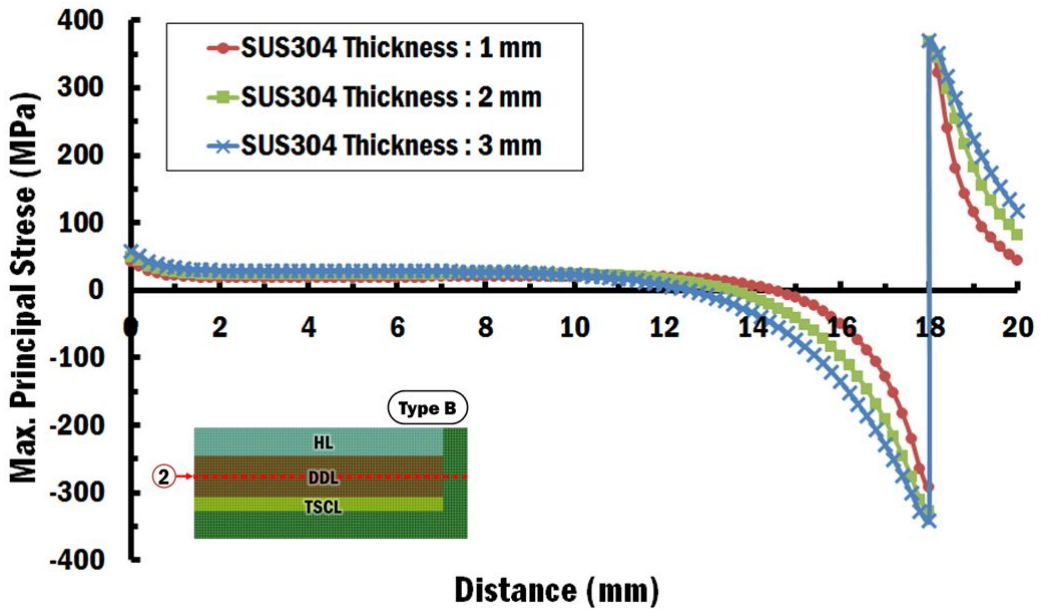
Thickness (mm)		1	2	3
Maximum Major Principal Stress (MPa)	Type A	378	413	434
	Type B	383	434	468

SUS304 의 두께와 배치에 따른 최대 주응력은 Table 5 와 같이 나타내었다. SUS304 의 두께가 증가할수록 최대 주응력이 높아지는 것을 알 수 있었다. Type A 배치를 가질 때, 손상저감층의 높이가 1 mm 에서 2 mm 및 2 mm 에서 3 mm 로 증가함에 따라 주응력이 각각 9.0 % 및 5.1 % 증가하였다. Type B 배치를 가질 때, 손상저감층의 높이가 1 mm 에서 2 mm 및 2 mm 에서 3 mm 로 증가함에 따라 각각 13.3 % 및 7.8 % 증가하였다. 또한, Type A 의 배치보다 Type B 의 배치를 일 때 손상저감층의 두께가 1 mm ~ 3 mm 로 증가함에 따라 주응력이 각각 1.5 %, 5.1 % 및 7.8 % 가 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 26 의 분석을 통하여 손상저감층과 기저부의 세로축 경계부분에서 응력집중이 발생하는 것을 확인하고, Fig. 13 (b) 의 2 번 방향에서의 주응력을 도출하였다. 2 번 방향에서의 주응력 도출 결과, SUS304에서 STD 61 로 재료가 변하는 경계부분에서 주응력이 크게 발생하며, 최대 주응력이 발생하는 것을 확인하였다. HastelloyX 의 두께가 증가할수록 인장 및 압축응력이 증가한다는 것을 해당 그래프를 통하여 확인 할 수 있었다.

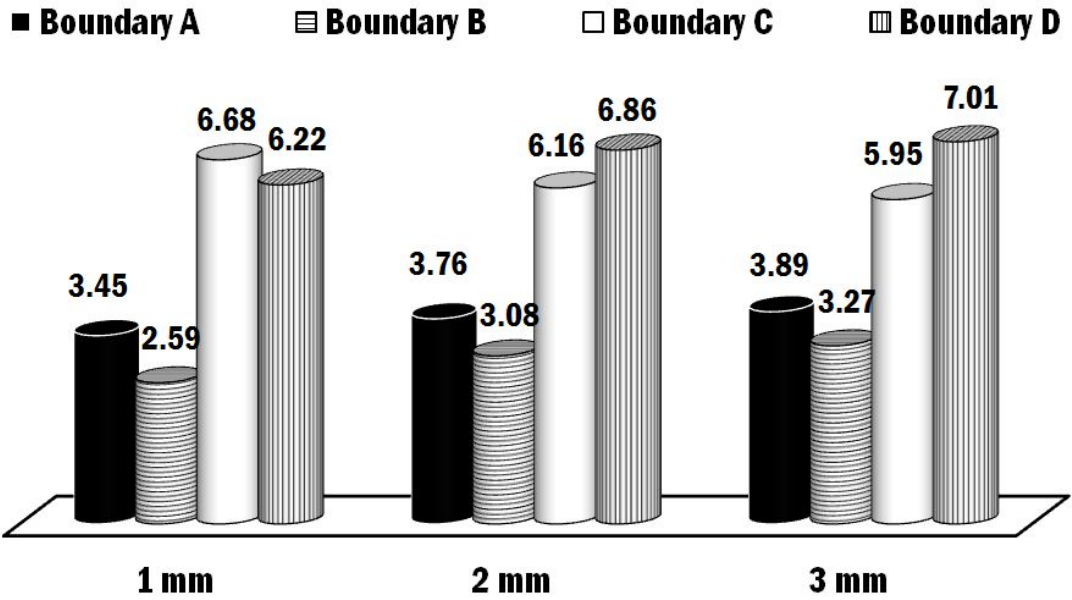


(a) Design of the deposited region = Type A

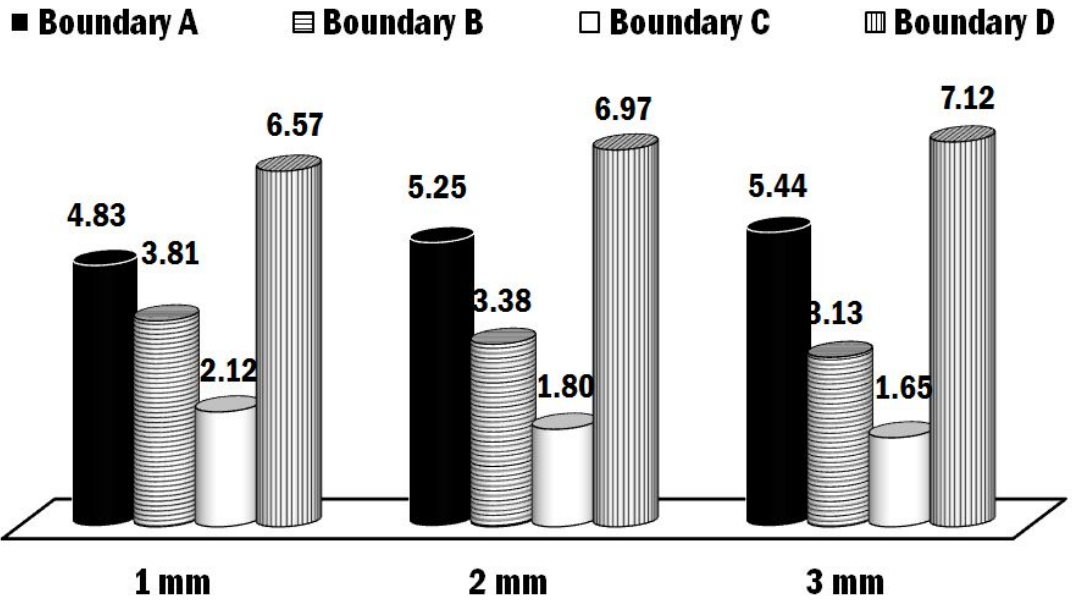


(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 28 Effects of the thickness and the design of DDL on the major principal stress in the thickness direction (Material of DDL = SUS304)



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 29 Deviations of major principal stress for different thicknesses of DDL (Material of DDL = SUS304)

재료가 변하는 경계에서 주응력 단차가 발생하는 것을 확인하고 Fig. 13 (c) 와 같이 재료 경계의 주응력 단차를 계산하였다. Fig. 29 는 SUS304 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 손상저감층의 배치와 높이 변화에 따른 주응력 단차를 비교한 결과이다. Type A, B 의 Boundary D 에서 각각 최대 701 MPa 및 712 MPa 로 가장 큰 응력 단차를 가지는 것을 알 수 있었다. 또한, HastelloyX 의 높이가 증가 할수록 Boundary D 의 주응력 단차가 증가하였다. Type A, B 가 1 mm 에서 3 mm 로 증가 하였을 때 Boundary D 의 단차는 각각 12.7 % 및 8.4 % 증가하였다.

Boundary D 를 제외한 주응력 단차 분석을 수행하였다. Type A 는 손상저감층과 기저부 사이인 Boundary C 에서 가장 큰 응력단차가 발생하였다. SUS304 의 두께가 증가 할수록 특성개선층과 열응력제어층 사이인 Boundary A 와 열응력제어층과 손상저감층 사이인 Boundary B 의 단차는 증가하고, Boundary C 의 단차는 점점 감소하는 것을 알 수 있었다. Type B 는 특성개선층과 손상저감층 사이인 Boundary A 에서 가장 큰 응력단차가 발생하였다. SUS304 의 두께가 증가 할수록 Boundary A 의 단차는 증가하고, 손상저감층과 열응력제어층 사이인 Boundary B 와 열응력제어층과 기저부 사이인 Boundary C 의 단차는 점점 감소하는 것을 알 수 있었다.

3. SUS304 의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성 분석

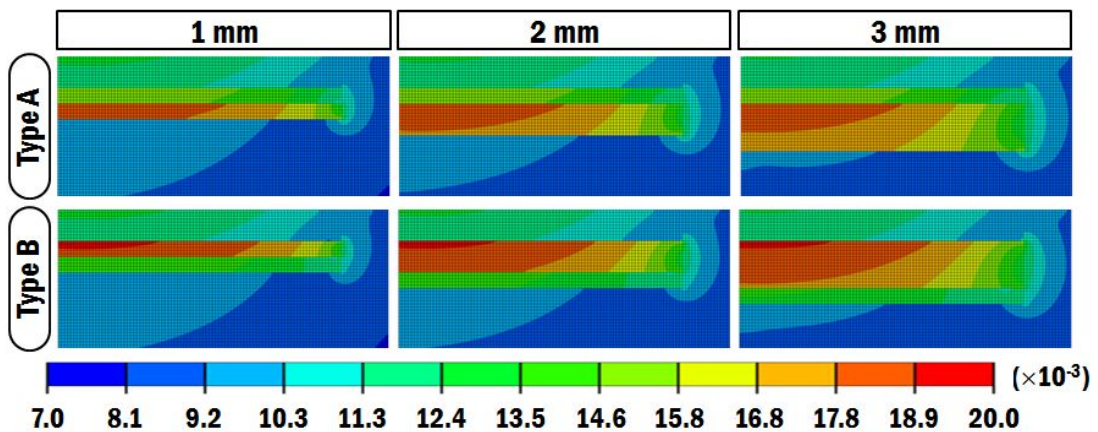
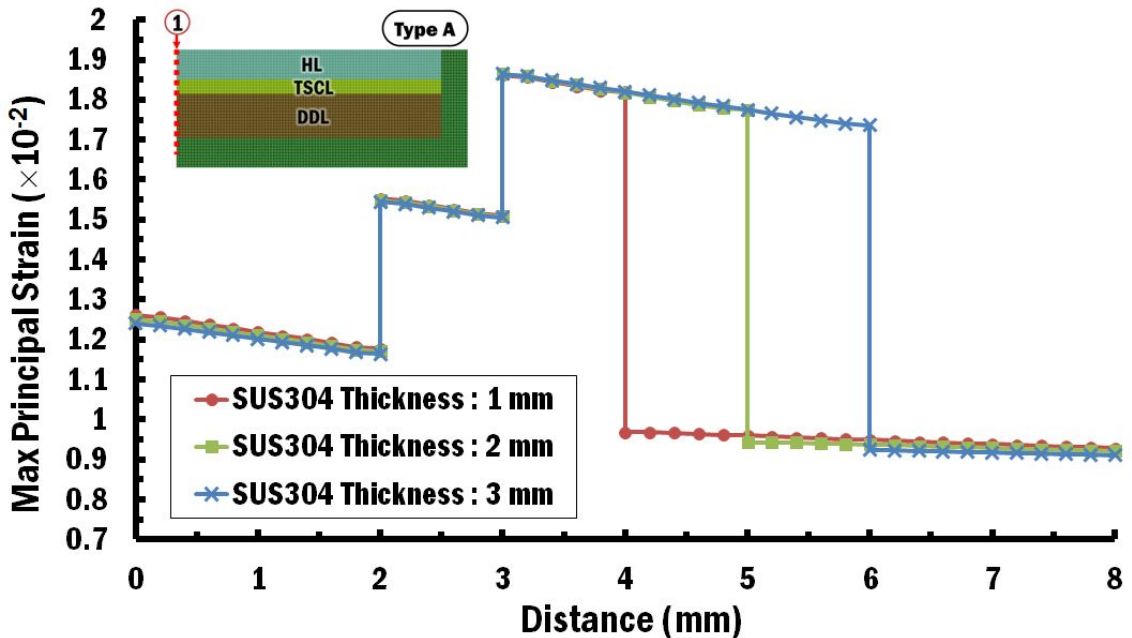


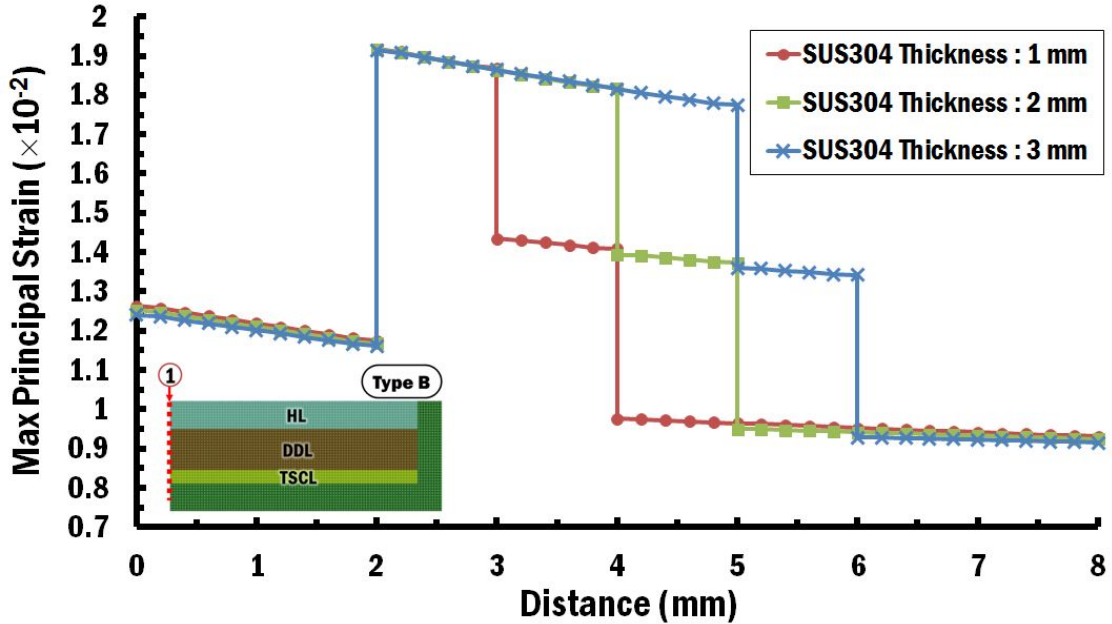
Fig. 30 Effect of the thickness and the design of the DDL on the major principal strain distribution (Material of DDL = SUS304)

손상저감층의 재료로 SUS304 를 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주변형률분포 특성을 분석하였다. Fig. 30 은 손상저감층의 재료가 SUS304 일 때 Fig. 13 의 1 번 위치에서 측정된 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주변형률 분포 특성을 나타낸 것이다. SUS304 부분에서 가장 큰 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, SUS304 의 두께가 증가 할수록 변형률이 큰 범위가 넓어지는 것을 알 수 있었다. 특성개선층과 SUS304 의 경계에서 SUS304 가 비교적 큰 변형률을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 주응력 분포 결과와 비교하였을 때 응력집중이 발생한 부분에서 변형률은 비교적 작게 나타나는 것을 알 수 있었다.

보다 정확한 주변형률 분석을 위하여 Fig. 13 (b) 의 2 번 위치와 같이 해석모델의 중심에서 깊이방향으로 주변형률 분포를 측정하였다. 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 주변형률분포 그래프를 각각 Fig. 31 에 나타내었다. 손상저감층의 재료가 SUS304 일 때 서로 다른 재료의 경계부에서 매우 큰 응력 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 변형률 변화 그래프를 통하여 Type A 의 경우 손상저감층과 기저부 경계에서, Type B 의 경우 특성개선층과 손상저감층의 경계에서 변형률 차이로 인한 균열발생을 예측할 수 있었다.



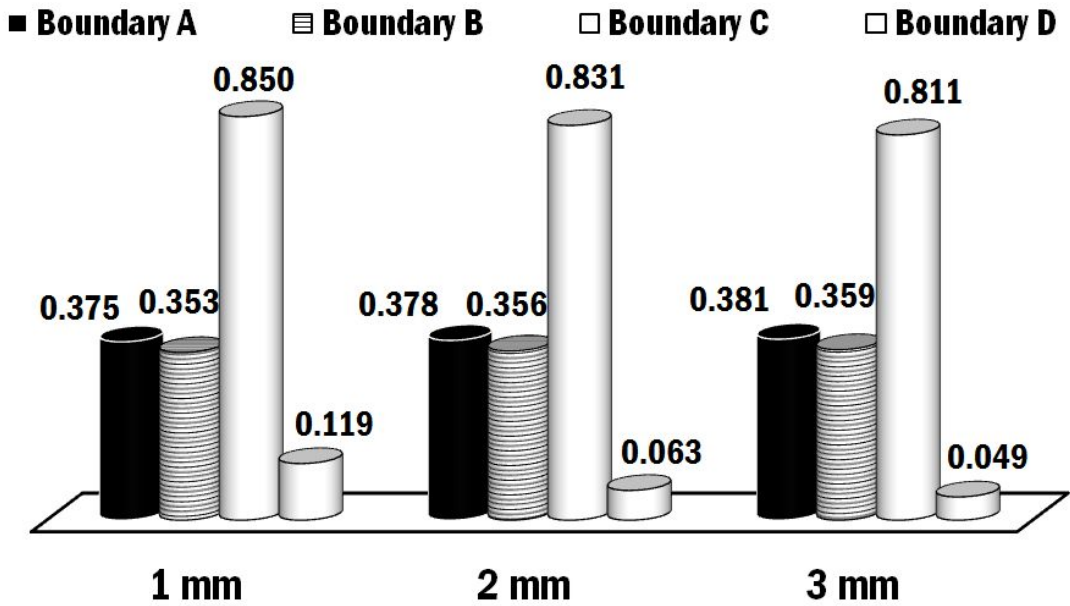
(a) Design of the deposited region = Type A



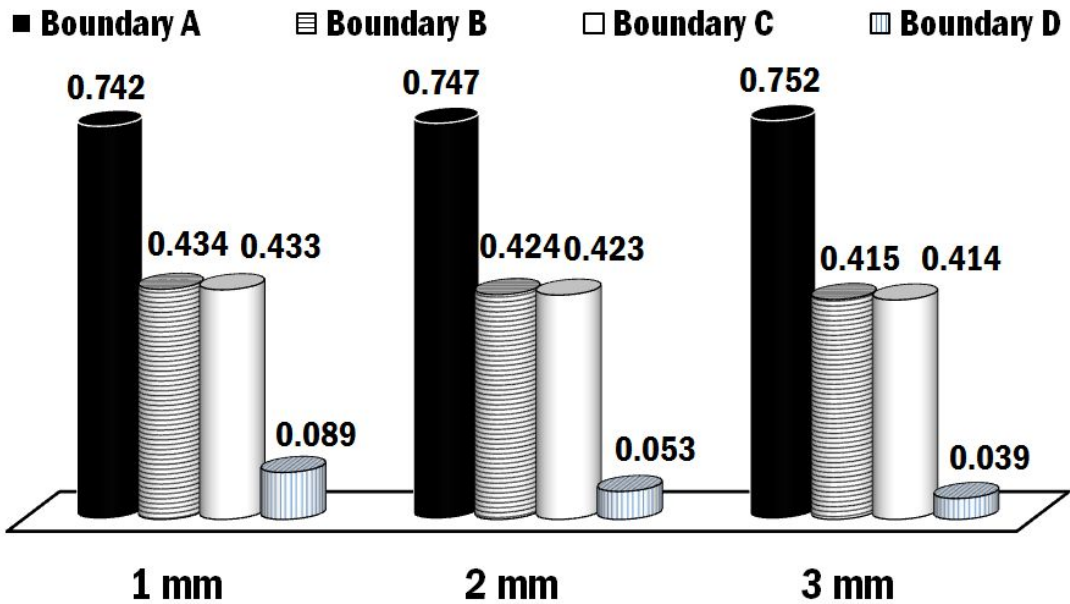
(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 31 Effects of the thickness of DDL on the major principal strain distribution in the thickness direction (Material of DDL = SUS304)

적층 재료가 변함에 따라 적층 경계에서 주변형률 단차가 확연하게 발생하는 것을 확인하고, Fig. 13 (c) 와 같이 각 재료의 경계에서 주변형률 단차를 계산하였다. Fig. 32 에서는 SUS304 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 손상저감층의 배치와 높이 변화에 따른 주변형률 단차를 비교한 결과이다. SUS304 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 Type A 의 경우 손상저감층과 기저부 사이인 Boundary C 에서 최대 0.850 으로 가장 큰 변형률 단차가 발생하였다. SUS304 의 높이가 증가함에 따라 특성개선층과 열응력제어층 사이인 Boundary A 와 열응력제어층과 손상저감층 사이인 Boundary B 의 변형률단차는 각각 1.6 % 및 1.7 % 증가하였으며, Boundary C 는 4.6 % 감소하였다. Type B 의 경우 특성개선층과 손상저감층 사이인 Boundary A 에서 최대 0.752 로 가장 큰 변형률단차가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. Boundary A 의 변형률 단차는 1.3 % 증가하였으며, 손상저감층과 열응력제어층 사이인 Boundary B 와 열응력제어층과 기저부 사이인 Boundary C 의 변형률단차는 각각 4.3 % 및 4.4 % 감소하였다.



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 32 Deviation of major principal strain for different thickness of DDL (Material of DDL = SUS304)

제 3 절 P21 을 손상저감층 재료로 사용하였을 때 두께와 배치에 따른 온도/주응력/주변형률 특성

1. P21 의 두께와 배치에 따른 온도 특성 분석

손상저감층의 재료가 P21 일 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 온도분포 특성을 분석하였다. Fig. 32 는 손상저감층의 재료로 P21을 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 Fig. 13 (a) 부분의 온도 분포를 나타낸 것이다. 손상저감층 재료인 P21 의 두께가 1 mm 에서 3 mm 로 증가 할수록 적층 표면의 온도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

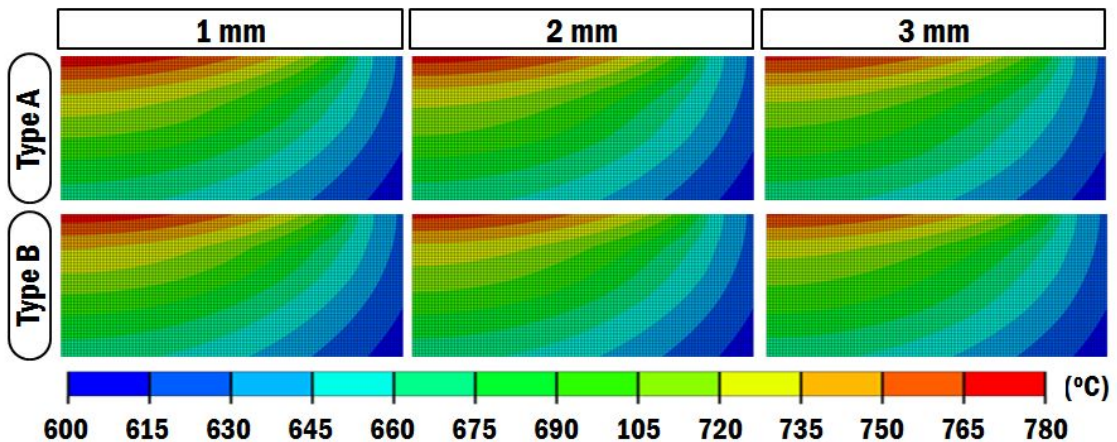


Fig. 33 Influence of the thickness of and the design of the DDL on the temperature distribution (Material of DDL = P21)

보다 정확한 온도분포 결과 분석을 위하여 Fig. 13 (b) 의 1번 방향과 같이 해석모델 표면의 중심에서 깊이방향으로 온도 분포를 도출하였다. 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 온도분포 그래프를 Fig. 34 에 나타내었다. 손상저감층의 재료로 P21을 사용하였을 때 그 두께가 증가할수록 표면 온도가 감소하는 것을 해당 그래프를 통하여 확인 할 수 있었다. 또한 특성개선층의 표면에서 기저부로 갈수록 같은 온도로 수렴하는 것을 알 수 있었다.

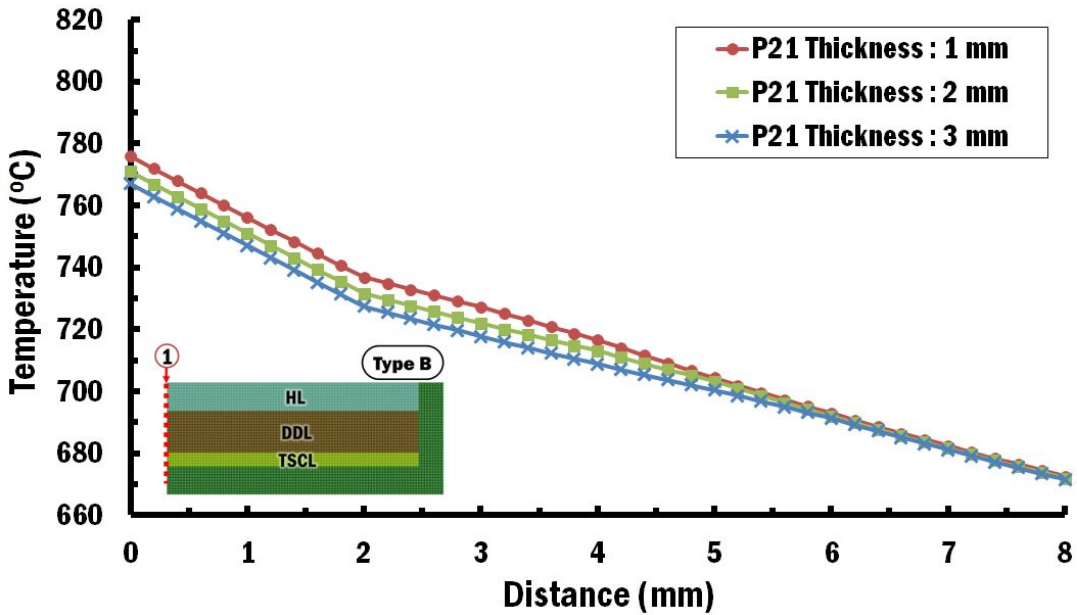
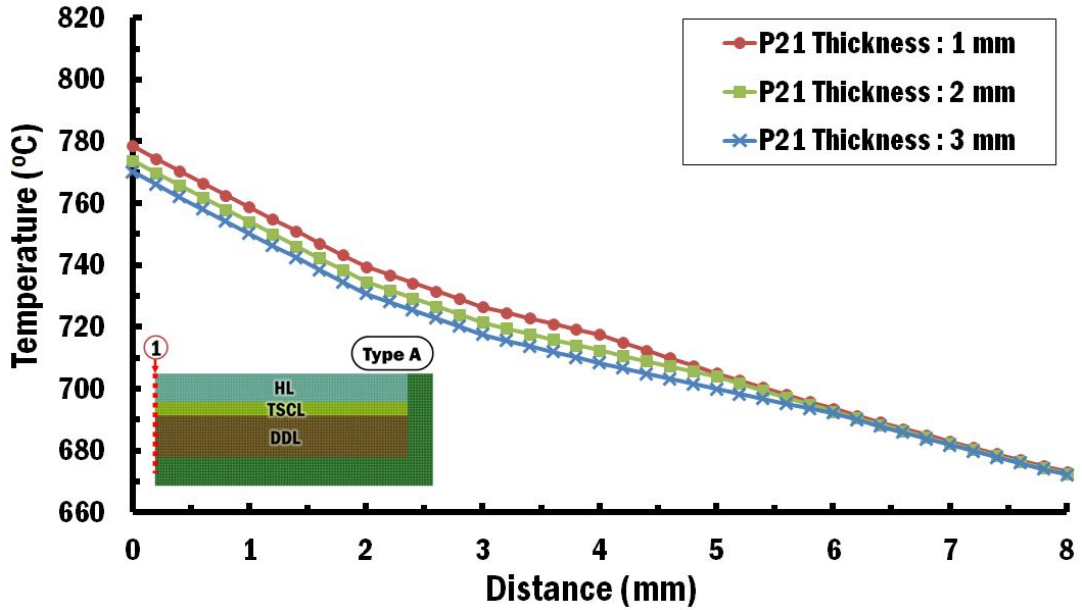


Fig. 34 Effects of the thickness of the DDL on the temperature distribution in the thickness direction (Material of DDL = P21)

Table 6 Maximum temperatures for different thicknesses and designs of the DDL (Material of DDL = P21)

Thickness (mm)		1	2	3
Maximum Temperature (°C)	Type A	779	774	770
	Type B	776	771	767

정확한 표면온도의 최댓값을 확인하기 위하여 두께와 배치에 따른 최대 표면온도를 Table 6 과 같이 정리하였다. 두께가 1 mm, 2 mm 및 3 mm 일 때 Type A 해석모델 표면의 최대 온도는 각각 779 °C, 774 °C 및 770 °C 로 나타났으며 Type B 해석모델 표면의 최대온도는 각각 776 °C, 771 °C 및 767 °C 로 도출되었다. 다른 손상저감층 재료들과는 다르게 동일한 배치를 가질 때 P21 의 두께가 두꺼워 질수록 낮은 표면온도를 가지는 것을 알 수 있었다. 또한, 동일한 높이를 가질 때 Type A 로 적층하였을 때 보다 Type B 의 배치로 적층하였을 때 모든 높이에서 동일하게 3 °C 낮은 최대 표면 온도결과를 가지는 것을 알 수 있었다. 이는 P21 이 특성개선층인 Stellite 21 과 기저부인 STD 61 의 재료보다 열전도도가 높기 때문인 것으로 사료된다. 손상저감층의 재료로 P21 을 사용할 경우, 온도분포 측면에서는 Type B 의 배치로 3 mm 적층할 경우 해석모델의 표면 최대 온도가 가장 낮은 767 °C 로 우수한 온도분포 결과를 가진다는 것을 알 수 있었다.

2. P21 의 두께와 배치에 따른 주응력 특성 분석

손상저감층의 재료로 P21 을 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주응력분포 특성을 분석하였다. Fig. 34 는 손상저감층의 재료가 P21 일 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주응력 분포 특성을 나타낸다. 손상저감층과 기저부의 세로축 경계에서 응력집중이 발생하는 것을 확인하였다. 응력집중이 발생하는 세로축 경계에서 손상저감층 재료 부분에서는 압축응력이 발생하였으며, 그와 맞닿는 기저부에서는 인

장응력이 발생하였다. 또한, P21 의 두께가 증가 할수록 응력집중이 발생하는 범위가 넓어지는 것을 알 수 있었다.

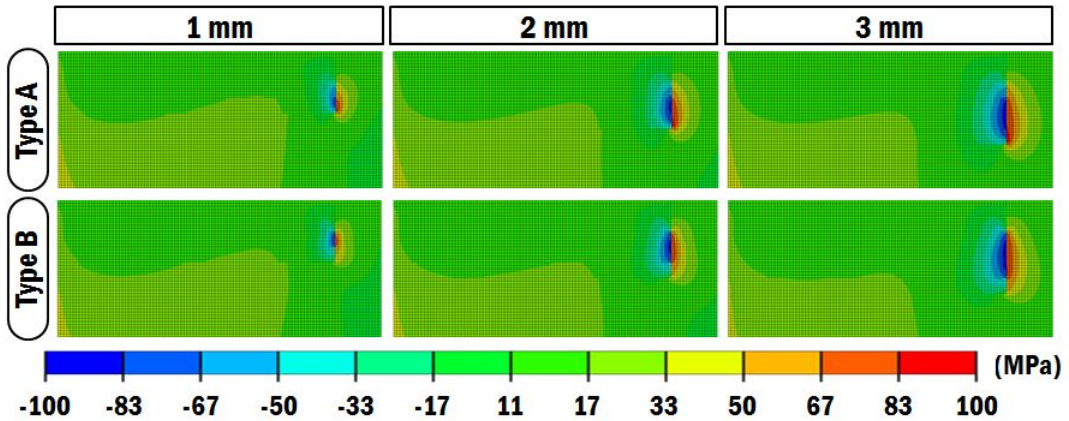
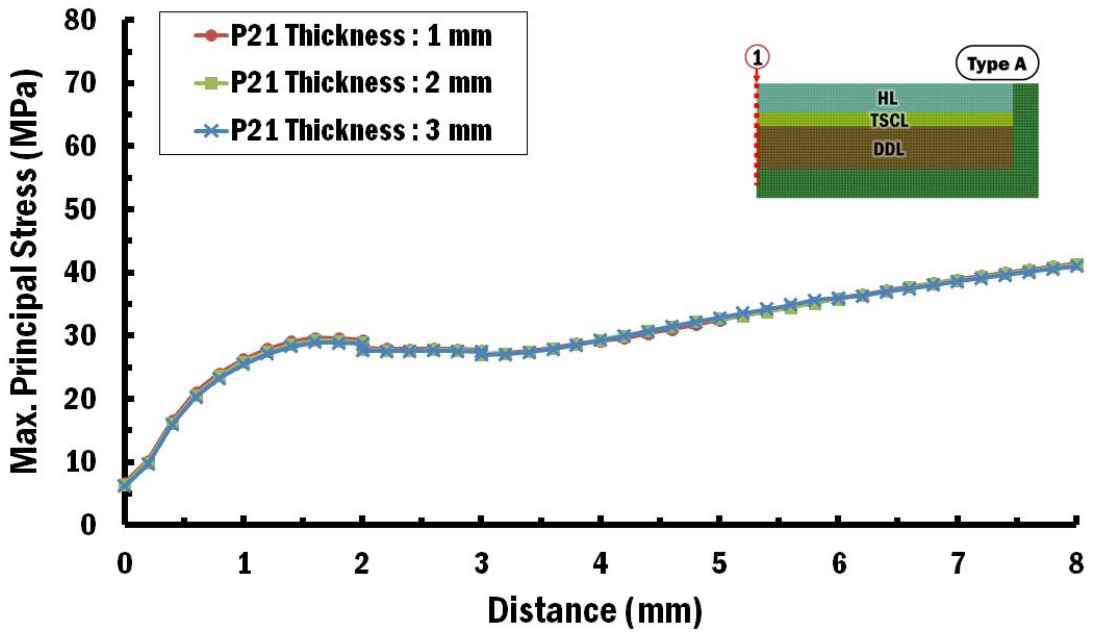


Fig. 35 Effects of the thickness and the design of the DDL on the major principal stress distribution (Material of DDL = P21)

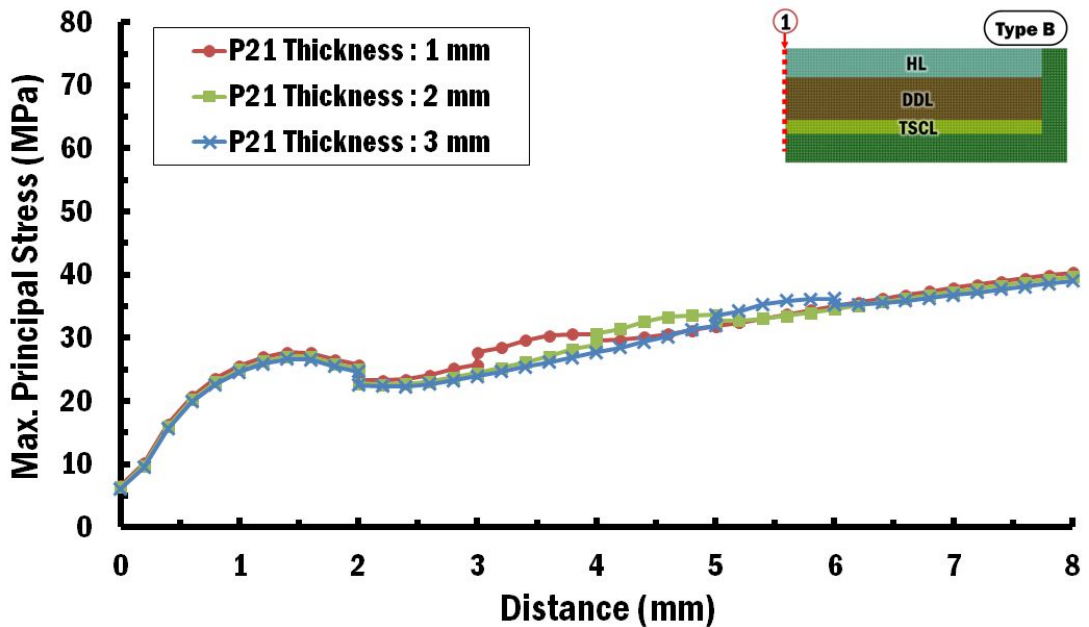
보다 정확한 주응력 분포를 분석하기 위하여 Fig. 13 (b) 의 1번 위치에서 해석모델의 중심에서 깊이방향으로 주응력 분포를 측정하였다. 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 주응력분포 그래프를 각각 Fig. 36 에 나타내었다. 손상저감층의 재료가 P21 일 때, 손상저감층의 두께가 증가할수록 주응력이 크게 나타나는 것을 해당 그래프를 통하여 확인 할 수 있었다. 또한, 적층 경계부에서 다른 재료에 비해 상대적으로 작은 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

Table 7 Maximum major principal stresses for different thicknesses and designs of DDL (Material of DDL = P21)

Thickness (mm)		1	2	3
Maximum Major Principal Stress (MPa)	Type A	89	94	97
	Type B	79	85	87



(a) Design of the deposited region = Type A

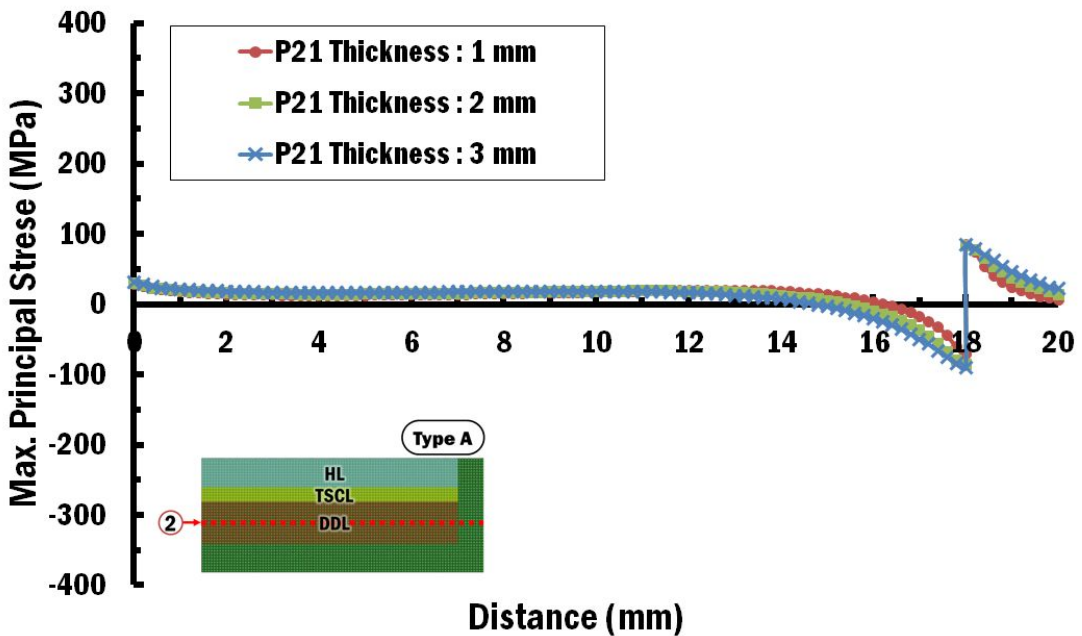


(b) Design of the deposited region = Type B

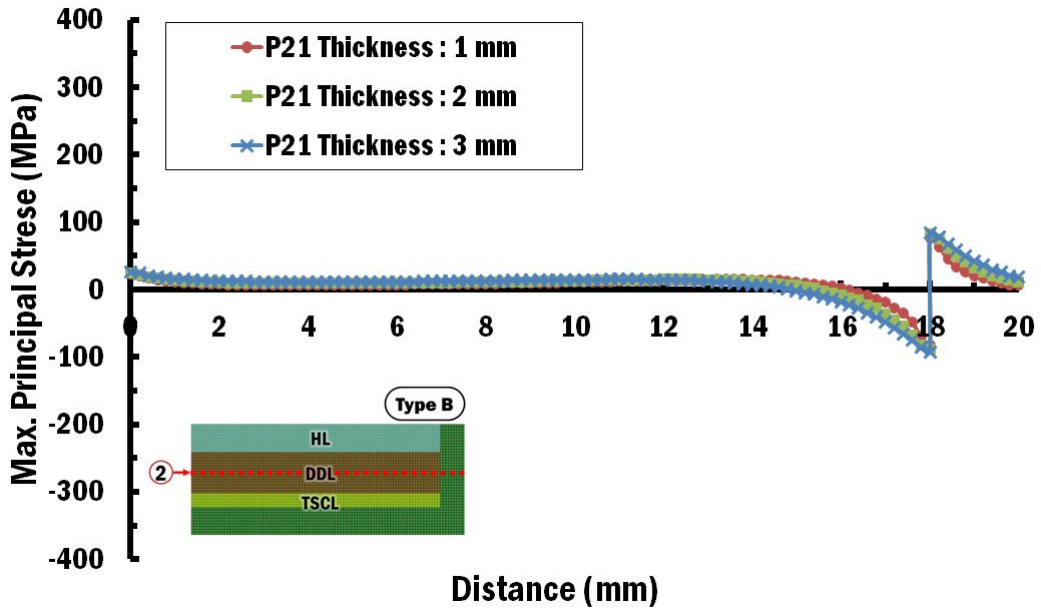
Fig. 36 Effects of the thickness of DDL on the major principal stress distribution in the thickness direction (Material of DDL = P21)

손상저감층 재료인 P21 의 두께와 배치에 따른 최대 주응력을 Table 7 과 같이 도출하였다. P21 의 두께가 증가할수록 최대 주응력이 높아지는 것을 알 수 있었다. 해석모델이 Type A 배치를 가질 때, 손상저감층의 높이가 1 mm 에서 2 mm 및 2 mm 에서 3 mm 로 증가함에 따라 주응력이 각각 5.2 % 및 3.2 % 증가하였다. 해석 모델이 Type B 배치를 가질 때, 손상저감층의 높이가 1 mm 에서 2 mm 및 2 mm 에서 3 mm 로 증가함에 따라 각각 7.6 % 및 2.4 % 증가하였다. 또한, 손상저감층이 Type A 의 배치를 가질 때 보다 Type B 의 배치로 열전달 해석모델을 설계하였을 때 손상저감층의 두께가 1 mm ~ 3 mm 로 증가함에 따라 주응력이 각각 11.2 %, 9.6 % 및 10.3 % 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 35 분석을 통하여 손상저감층과 기저부의 세로축 경계부분에 응력집중이 발생하는 것을 확인하고, Fig. 13 (b) 의 2번 방향에서의 주응력을 도출하였다. 다른 손상저감층 재료를 사용했을 때와 동일하게 재료가 변하는 경계부분에서 주응력이 크게 변하며, 해당 경계부분에서 가장 큰 주응력이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 손상저감층의 재료인 P21 의 두께가 증가할수록 인장 및 압축응력이 증가한다는 것을 해당 그래프를 통하여 확인 할 수 있었다.



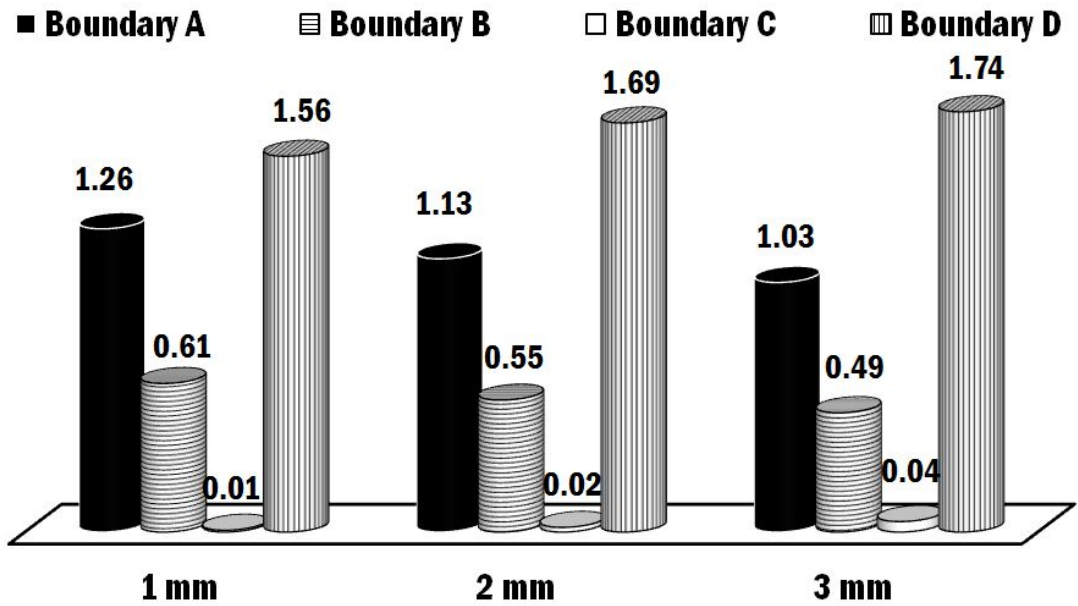
(a) Design of the deposited region = Type A



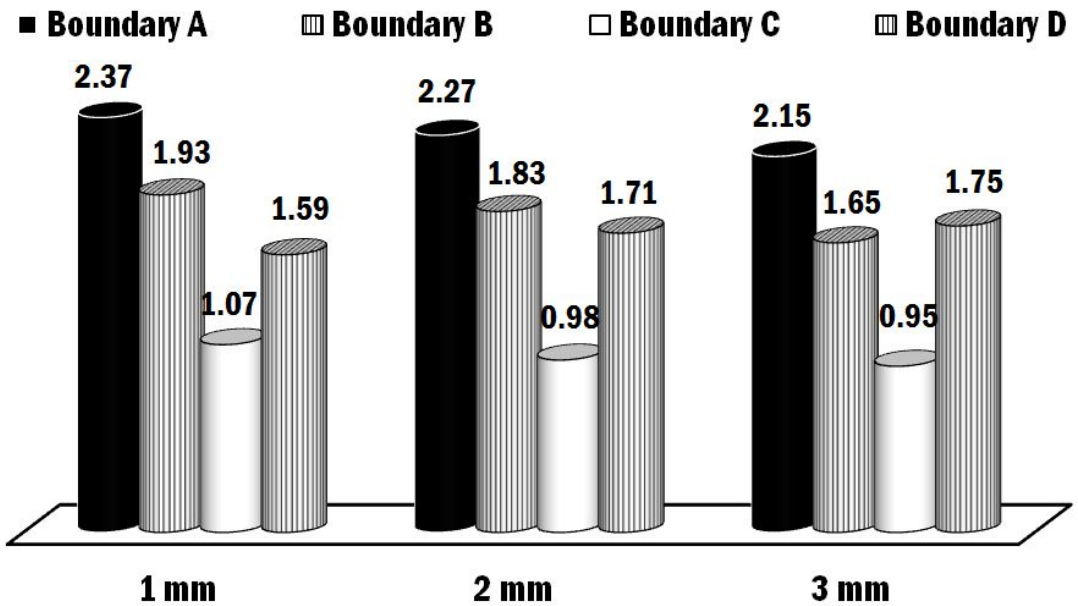
(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 37 Effects of the thickness and the design of DDL on the major principal stress in the thickness direction (Material of DDL = P21)

Fig. 38 는 P21 이 손상저감층 재료 일 때 배치와 높이 변화에 따른 주응력 단차를 비교한 결과이다. Boundary D 에서 Type A, B 각각 최대 174 MPa 및 175 MPa 로 가장 큰 응력 단차를 가지는 것을 알 수 있었다. P21 의 높이가 1 mm 에서 3 mm 로 증가 하였을 때 Type A, B 의 Boundary D 단차는 각각 11.5 % 및 10.1 % 증가하였다. Boundary D 를 제외하였을 때 Type A 는 특성개선층과 열응력제어층 사이인 Boundary A 에서 가장 큰 응력단차가 발생하였다. P21 의 두께가 증가 할수록 Boundary A 와 열응력제어층과 손상저감층 사이인 Boundary B 의 단차는 감소하고, 손상저감층과 기저부의 사이인 Boundary C 의 단차는 증가하였다. Type B 는 특성개선층과 손상저감층 사이인 Boundary A 에서 가장 큰 응력단차가 발생하였다. P21 의 두께가 증가 할수록 모든 경계의 단차는 점점 감소하였다. 해석모델 Type A 와 Type B 를 비교하였을 때 Type A 가 낮은 단차를 가지므로 상대적으로 우수할 것이라고 예상하였다. 손상저감층의 재료가 P21 일 때 주응력분포 측면에서는 Type A 의 배치로 1 mm 적층 할 경우 주응력 및 단차가 적게 발생하여 우수한 주응력 특성을 가진다는 것을 알 수 있었다.



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 38 Deviations of major principal stress for different thicknesses of DDL (Material of DDL = P21)

3. P21 의 두께와 배치에 따른 주변형률 특성 분석

손상저감층의 재료로 P21 을 사용하였을 때 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주변형률분포 특성을 분석하였다. Fig. 39 는 손상저감층의 재료가 P21 일 때 Fig. 13 (a) 의 위치에서 측정된 손상저감층의 두께와 배치에 따른 주변형률 분포를 나타낸 것이다. P21 의 두께가 증가 할수록 변형률이 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 특성개선층과 P21 의 위치에서 변형률이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

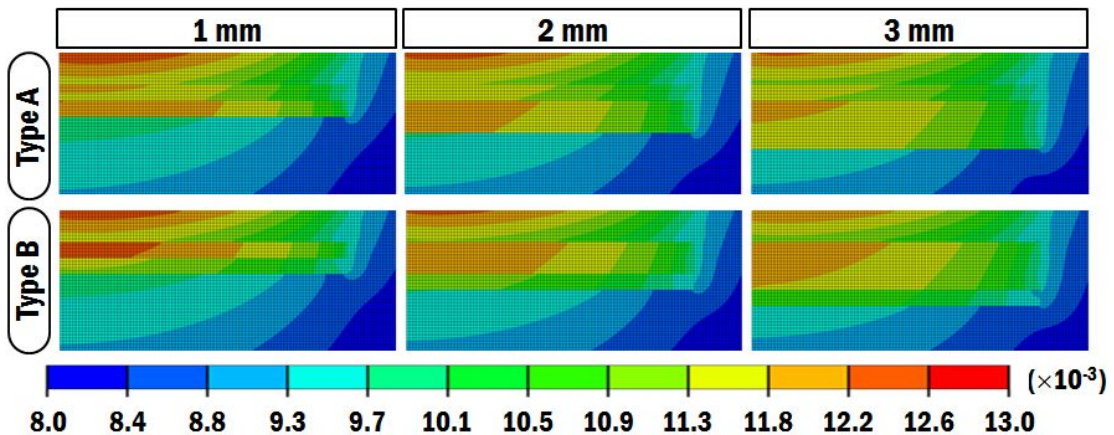
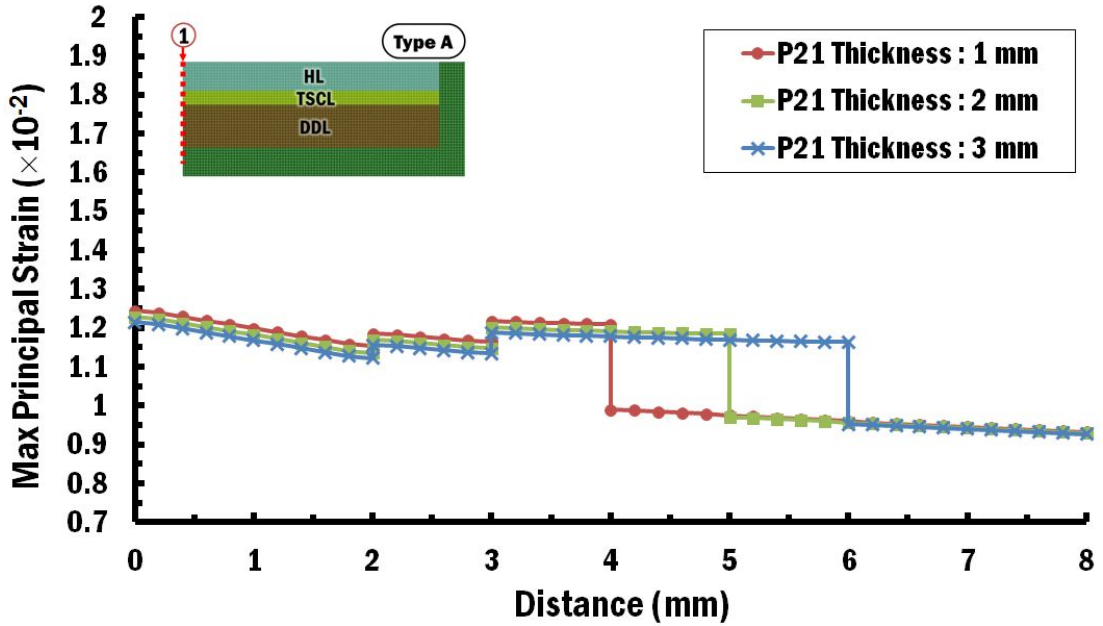
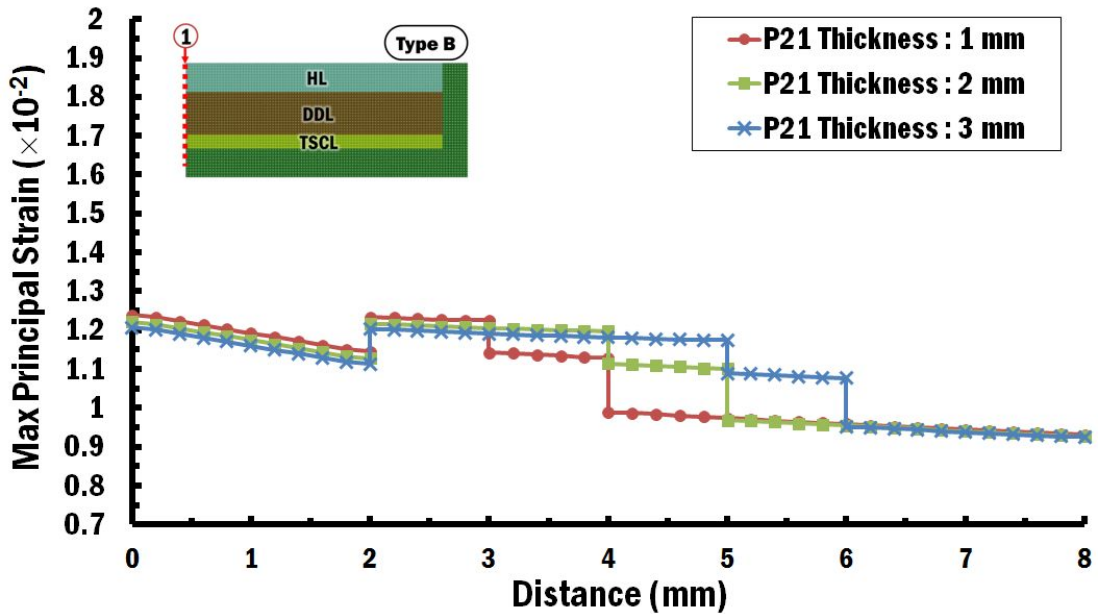


Fig. 39 Effect of the thickness and the design of the DDL on the major principal strain distribution (Material of DDL = P21)

Fig. 38 만으로는 배치에 따른 주변형률 분포 변화를 정확히 비교하기 어렵고, 보다 정확한 주응력 분석을 위하여 Fig. 13 (b) 의 1 번 위치와 같이 해석모델의 중심에서 깊이방향으로 주변형률 분포를 측정하였다. 손상저감층의 재료가 P21 일 때 손상저감층의 배치와 두께 변화에 따른 깊이방향의 주변형률분포 그래프를 각각 Fig. 39 에 나타내었다. 서로 다른 재료의 적층 경계부에서 확인한 변형률의 변화가 생기며, 21 의 두께가 증가 할수록 변형률은 미세하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 해석모델 중심에서 깊이방향으로의 변형률 변화 그래프를 통하여 Type A 의 경우 손상저감층과 기저부 경계에서, Type B 의 경우 특성개선층과 손상저감층의 경계에서 변형률 차이로 인한 문제가 발생 할 것으로 예측되었다.



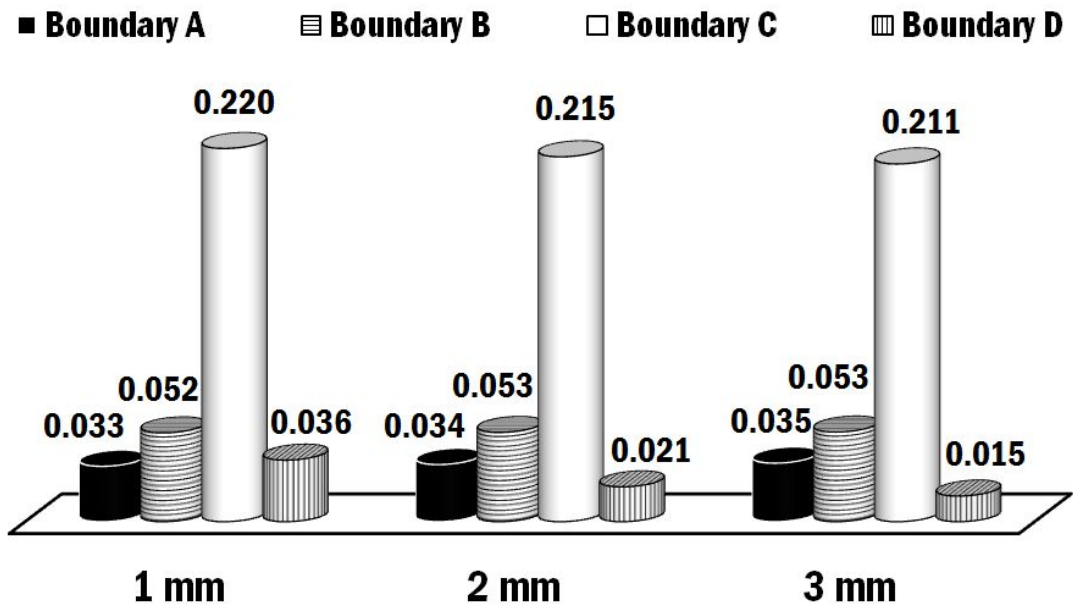
(a) Design of the deposited region = Type A



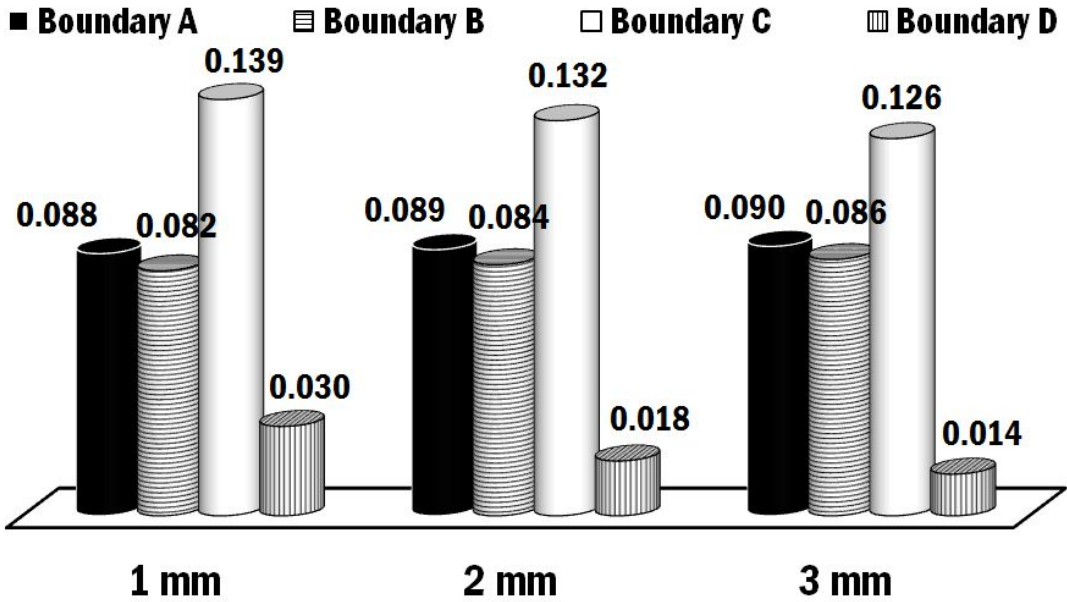
(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 40 Principal strain distribution in thickness direction of the analysis model for different arrangement and thicknesses of DDL (DDL = P21)

적층 재료가 변함에 따라 적층 경계에서 주변형률 단차가 확연하게 발생하는 것을 확인하고, Fig. 13 (c) 와 같이 각 재료의 경계에서 주변형률 단차를 계산하였다. Fig. 41 에서는 P21 을 손상저감층 재료로 사용하였을 때 손상저감층의 배치와 높이 변화에 따른 주변형률 단차를 비교한 결과이다. P21 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 Type A 의 경우 손상저감층과 기저부 사이인 Boundary C 에서 최대 0.220 으로 가장 큰 변형률 단차가 발생하였다. P21 의 높이가 증가함에 따라 특성개선층과 열응력제어층 사이인 Boundary A 와 열응력제어층과 손상저감층 사이인 Boundary B 의 변형률 단차는 각각 6.1 % 및 1.9 % 증가하였으며, Boundary C 는 4.1 % 감소하였다. Type B 의 경우 열응력제어층과 기저부 사이인 Boundary C 에서 최대 0.139 로 가장 큰 변형률 단차가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 특성개선층과 손상저감층 사이인 Boundary A 와 손상저감층과 열응력제어층의 변형률 단차는 각각 2.3 % 및 4.9 % 증가하였으며, Boundary C 의 변형률 단차는 각각 9.4 % 감소하였다. Type A 와 Type B 의 변형률 단차를 비교하였다. 해석모델이 Type A 의 배치를 가질 때 Boundary A 와 Boundary B 의 경우 약 57 % 낮고 Boundary C 의 경우 약 36 % 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.



(a) Design of the deposited region = Type A



(b) Design of the deposited region = Type B

Fig. 41 Deviation of major principal strain for different thickness of DDL (Material of DDL = P21)

제 4 절 열전달/열응력 해석을 통한 온도/주응력/주변형률 분석을 통한 손상저감층의 재료, 배치 및 두께 선정

다층적층 된 금속재료에 손상저감층의 재료, 높이 및 배치에 따른 열특성 분석을 위하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

유한요소 해석 결과 SUS304 를 손상저감층 재료로 사용하였을 때 다른 두 재료보다 높은 재료의 온도, 주응력 및 주변형률이 나타나기 때문에 SUS304 는 손상저감층 재료로 적합하지 않은 것을 알 수 있었다. P21 을 손상저감층 재료로 사용하였을 때, 표면의 온도분포가 상대적으로 낮게 나타났으며, 주응력, 주변형률 및 그 단차가 다른 두 손상저감층 재료에 비해 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 해석 결과를 통하여 손상저감층의 재료를 P21 로 선정하였다.

손상저감층의 재료가 P21 일 때 높이가 증가함에 온도는 약 1 % 정도 감소하며, 응

력 및 주응력 단차가 각각 약 11 % 및 10 % 증가하는 것을 알 수 있었다. P21 의 두께가 증가함에 따라 온도변화가 미친 영향보다 주응력 및 주응력 단차가 미친 영향이 더 크다고 판단되어 손상저감층의 높이가 1 mm 일 때 우수한 열전달특성이 나타날 것으로 판단하였다.

손상저감층의 배치에 따른 열 특성을 분석하였을 때 온도분포와 최대 주응력에서는 Type B 가 더 낮은 값을 가지며 우수하게 나타났다. 하지만 주응력 단차 결과를 비교하였을 때 Type B 의 응력 단차가 Type A 와 비교하였을 때 상대적으로 높게 나타났기 때문에 주응력 단차로 인한 적층경계부의 결함이 발생 할 것으로 예상되었다. 이러한 이유로 인하여 손상저감층 배치 설계안인 Type A 와 Type B 의 배치 중에서 우수한 열특성을 가지는 배치를 선정하기 어려웠다.

열피로실험을 통하여 손상저감층의 재료가 P21 일 때 우수한 열피로 특성을 가지는 배치 설계안을 도출하고자 한다.

제 5 장 손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 시편 제작 및 실험 방법

열전달/열응력 해석을 통하여 손상저감층으로 적합한 재료와 높이를 도출하였으나, 손상저감층의 배치에 따른 명확한 결과를 얻지 못하였다. 본 연구에서는 손상저감층의 배치에 따른 열피로 특성 분석을 위하여 열피로실험을 수행하였다.

제 1 절 열피로실험을 위한 다층적층 된 실험시편 및 실험용 지그 설계/제작

1. 열피로실험 시편 제작

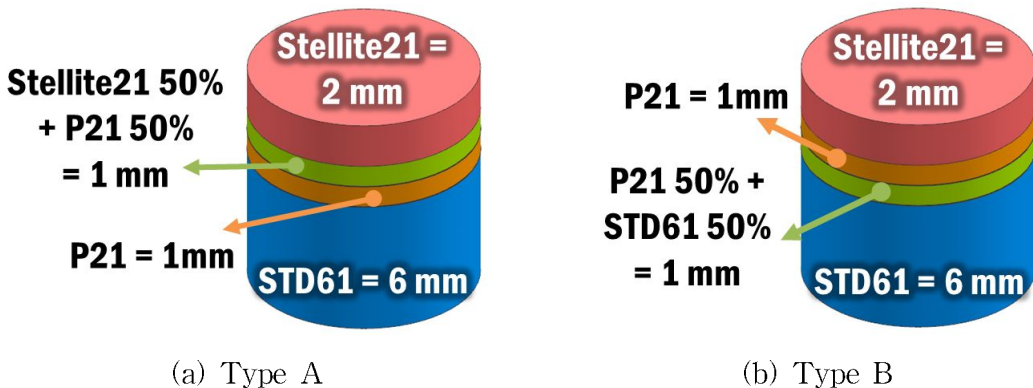


Fig. 42 Design of specimens for a thermal fatigue experiment

본 연구에서는 열피로실험을 위한 시편 제작을 위하여 Fig. 42 와 같이 열피로실험 시편을 설계하였다. 본 연구에서 수행한 해석을 바탕으로 DDL 의 재료와 높이를 각각 P21 및 1 mm 로 선정하였으며, 열피로실험 시편의 종류는 손상저감층의 배치에 따라 “특성개선층 - 열응력제어층 - 손상저감층 - 기저부” 순서로 배치되어 있는 Type A 와 “특성개선층 - 손상저감층 - 열응력제어층 - 기저부” 순서로 배치되어 있는 Type B 로 설계하였다. Type A 의 열응력제어층 재료는 Stellite 21 과 P21 을 50 % 씩 혼

합하는 것으로 설계하였고, Type B 의 열응력제어층 재료는 P21 과 STD 61 을 50 % 씩 혼합도록 설계하였다.

설계 한 시편을 토대로 Fig. 42 와 같은 순서로 열피로실험 시편을 제작하였다. 열피로실험 시편 설계 후 STD 61 재료를 사용하여 모재를 제작하였다. 모재 제작 시 후가공을 고려하여 모재의 크기를 1 mm 크게 제작하였다. 제작 된 STD 61 모재 위에 DED (Direct Energy Deposition) 공정 중 하나인 DMT (Laser-aided Direct Metal Rapid Tooling) 공정을 이용하여 특성개선층, 손상저감층 및 열응력제어층의 재료를 적층하였다. 적층 후 선반 및 밀링을 이용하여 시편의 상면과 옆면의 후가공을 수행하여 실험시편을 제작하였다.

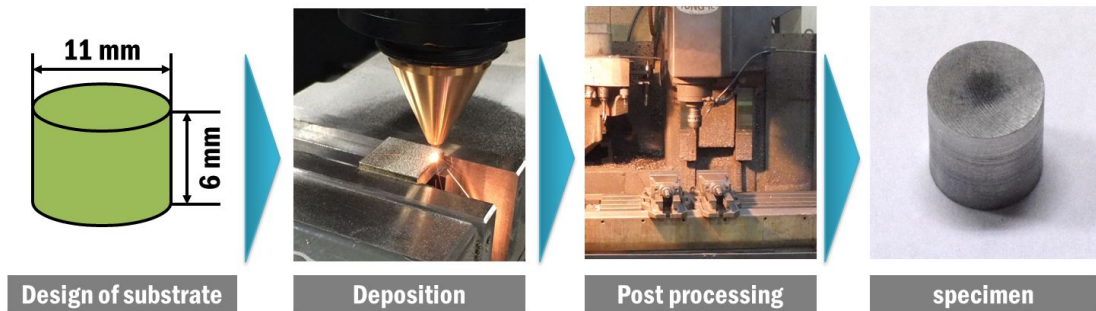


Fig. 43 Fabrication procedure of specimens for a thermal fatigue experiment

완성된 열피로실험 시편은 Fig. 43 과 같다. 제작 된 열피로실험 시편은 배치에 따라 외관상으로는 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다.

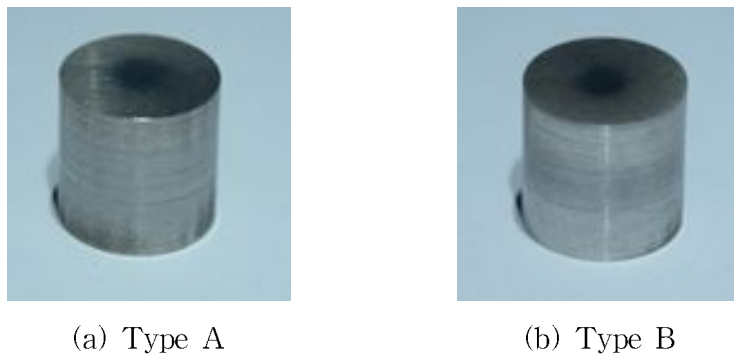
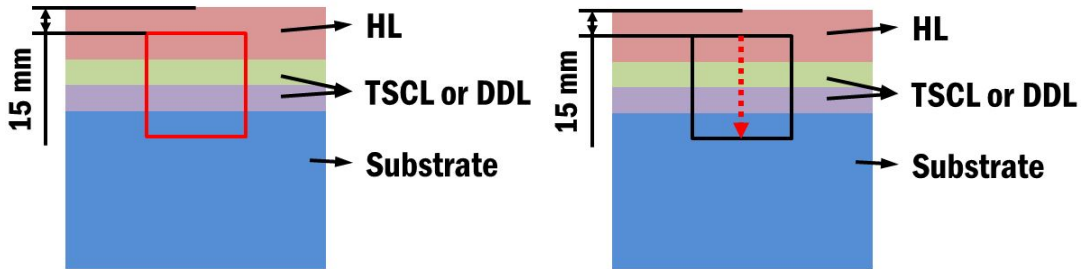


Fig. 44 Fabricated specimens for the thermal fatigue experiment

2. 제작 된 열피로실험 시편의 성분분석

열피로실험을 위한 시편 제작 후 시편의 성분분석을 수행하기 위하여 저진공 주사현미경 (Low vacuum Scanning electron microscope : LV-SEM) 장비를 사용하여 면분석 (Area analysis) 과 선분석 (Line analysis) 을 수행하였다. Fig. 45 와 같은 위치에서 성분분석을 수행하였다. 면분석은 이미지를 통해서 원소의 분포를 확인하는 방법이며, 선분석은 선을 통하여 길이에 따른 원소의 분포를 확인하는 방법이다. Fig. 45 와 같은 위치에서 성분분석을 수행하였다. 면분석의 경우 시편의 상면으로부터 15 mm 떨어진 위치에서 이미지 촬영을 수행하였으며, 선분석의 경우 면분석과 동일한 이미지에서 특성개선층에서 기저부 방향으로 원소분석을 수행하였다. 성분분석을 위하여 특성개선층의 재료인 Stellite 21 의 주요 성분인 크롬 (Cr) 원소와 손상저감층과 기저부의 주요 성분인 철 (Fe) 원소의 성분분석 결과를 정리하였다.

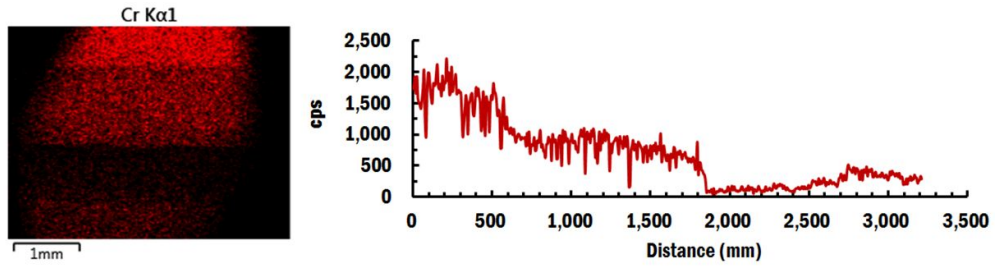


(a) Region of area analysis

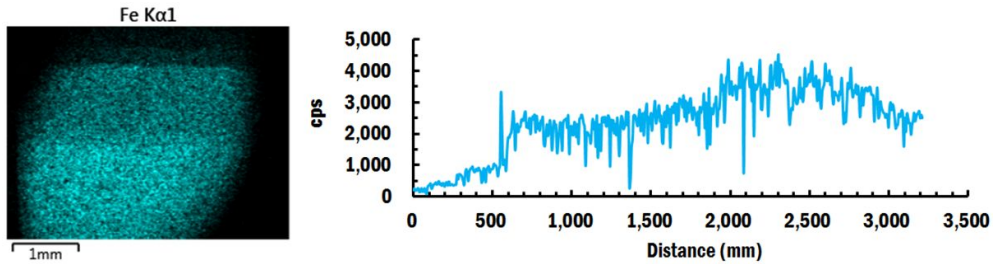
(b) Region of line analysis

Fig. 45 Region of area and line analyses

Fig. 46, 74 은 각각 실험시편 Type A 및 Type B 의 성분분석 결과이다. 크롬 원소의 경우 Stellite 21 이 재료인 특성개선층에서 가장 높은 원소분포를 확인 할 수 있었다. Type A 의 경우 열응력제어층이 Stellite 21 과 P21 의 조합이기 때문에 특성개선층 다음으로 크롬의 함유량이 높은 것을 알 수 있었다. P21 과 STD 61 의 경우 크롬을 거의 함유하고 있지 않는 것으로 나타났다. 철 원소의 경우 P21 과 STD 61 이 재료인 손상저감층과 기저부에서 가장 높은 원소분포를 확인 할 수 있었다. Type B 의 경우 P21 과 STD 61 조합이기 때문에 손상저감층과 기저부의 철 함유량과 큰 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.

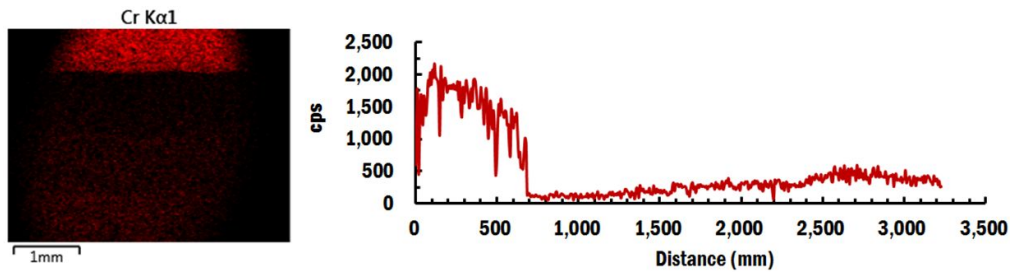


(a) Type A

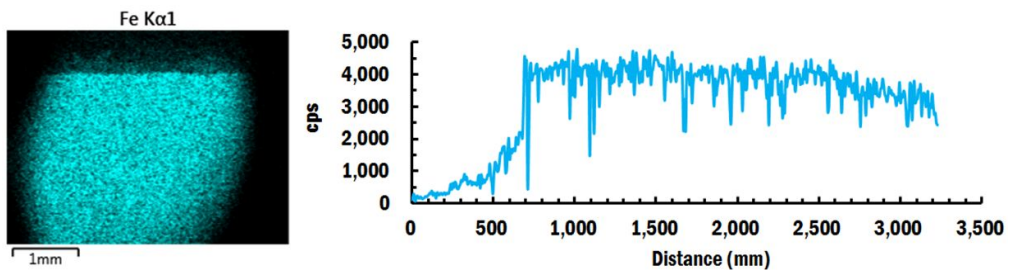


(b) Type A

Fig. 46 Result of area and line analyses (Design of DDL = Type A)



(a) Type B



(b) Type B

Fig. 47 Result of area and line analyses (Design of DDL = Type B)

3. 열피로실험 지그 제작

열피로실험을 위하여 Fig. 45 와 같이 열피로실험 지그를 설계 및 제작하였다. 지그 설계에는 Uni-graphics NX 7.5 를 사용하였다.

열피로실험을 위하여 설계한 지그는 총 8 개의 시편이 들어 갈 수 있는 홀을 가지며, 홀의 직경은 시편의 직경보다 약간 큰 10.5 mm 로 설계하였다. 지그의 높이는 70 mm, 직경은 48 mm 하여 설계하였다. 열피로실험 지그의 제작에 사용된 재료는 열 특성이 우수한 Inconel 600 을 사용하였다.

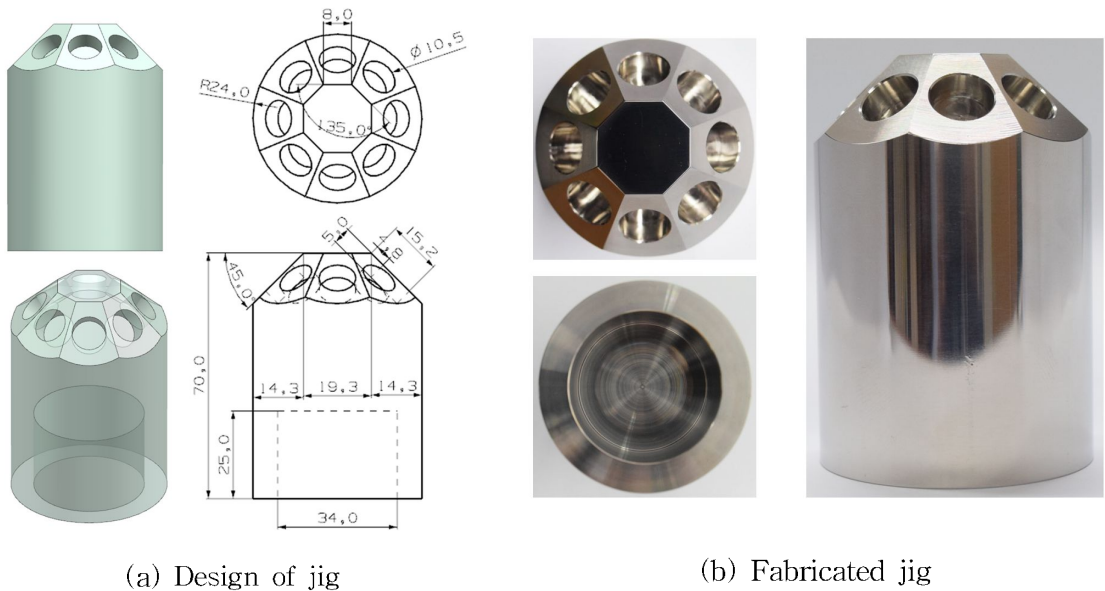


Fig. 48 Design and final shape of the jig for the thermal fatigue experiment

제 2 절 열피로실험 방법

본 연구에서는 적층 시편에 대한 열피로 특성을 분석하기 위하여 Fig. 46 와 같은 성균관대학교의 열피로실험 장비를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 장비는 크게 고온을 유지하는 퍼니스, 시편의 왕복운동을 돕는 로딩튜브, 퍼니스 내부의 온도를 조절하는 온도 조절장치 및 컨트롤 파트로 구성되어 있다.

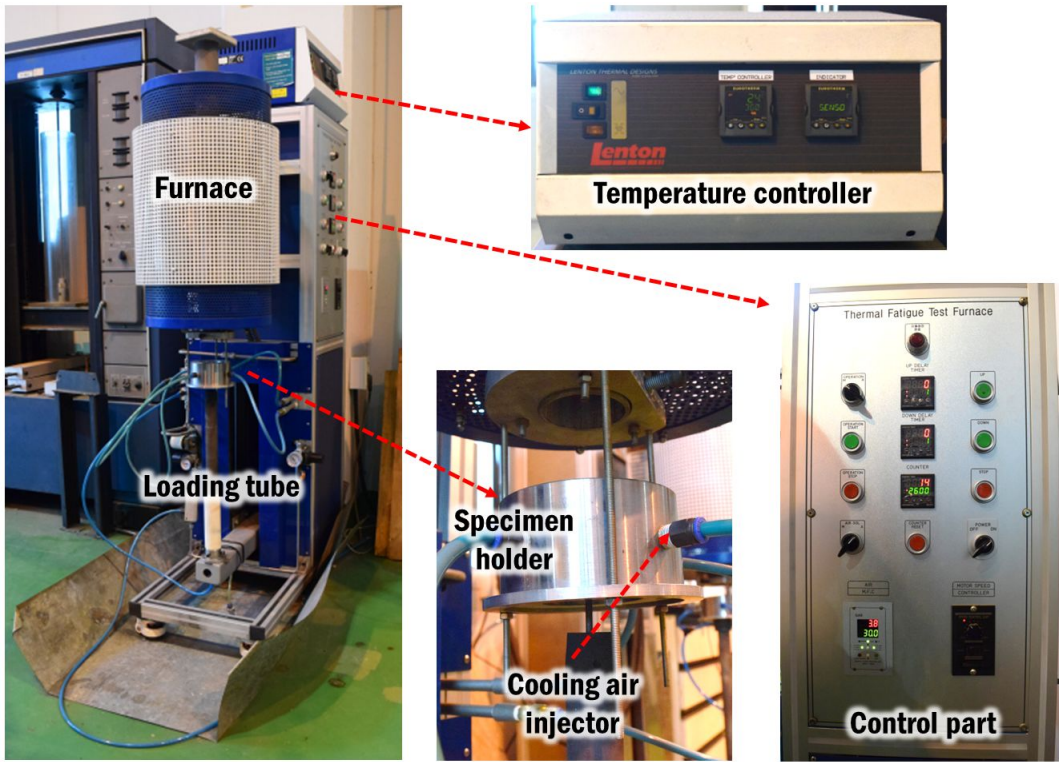


Fig. 49 Experimental set-up of the thermal fatigue experiment

열피로실험의 실험순서는 Fig. 47 와 같다. 퍼니스의 온도, 가열/냉각 시간 설정 등과 같은 열피로실험 장비 세팅 후 시편을 장착할 지그를 로딩튜브에 장착시킨다. 장착된 지그 안에 시편을 세팅하고 시험기를 작동시켜 열피로실험을 수행하는 것이 실험순서이다. 로딩튜브가 퍼니스의 내부와 외부로 상하로 왕복운동하며 시편의 가열/냉각을 수행하게 된다.

Table 8 Conditions of the thermal fatigue experiment

T (°C)	Ht (sec)	Ct (sec)	Cycle
800	13	19	10,000

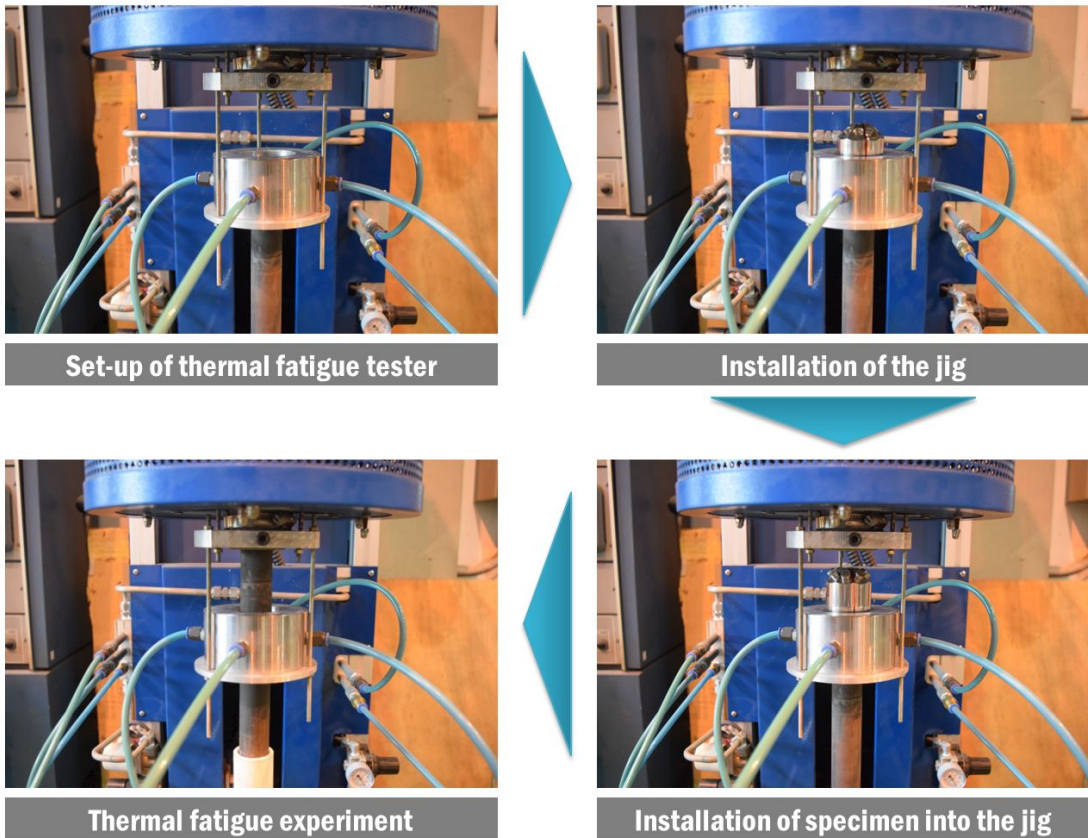


Fig. 50 Procedure of the thermal fatigue experiment

열피로실험을 위한 실험 조건은 Table 8 과 같다. 실험의 세팅은 시편의 온도가 800 °C 까지 올라가도록 퍼니스의 온도를 설정 한다. 퍼니스가 상/하로 이동하면서 16 초 가열, 16 초 냉각 과정을 반복하게 된다. 해당 열피로실험은 10,000 cycle 동안 수행하였다. 기초실험을 통하여 Fig. 47 의 온도 데이터를 얻을 수 있었다. 실험 시작 후 약 80 cycle (2500 초) 시점에서 시편의 표면 온도가 800 °C 에 도달 한 뒤 사이클이 증가하여도 최대 온도를 일정하게 유지하는 것을 알 수 있었다. 해당 온도데이터를 통하여 10,000 cycle 동안 실험을 수행하여도 시편의 최대 표면 온도가 800 °C 일 것이라고 예측 할 수 있었다.

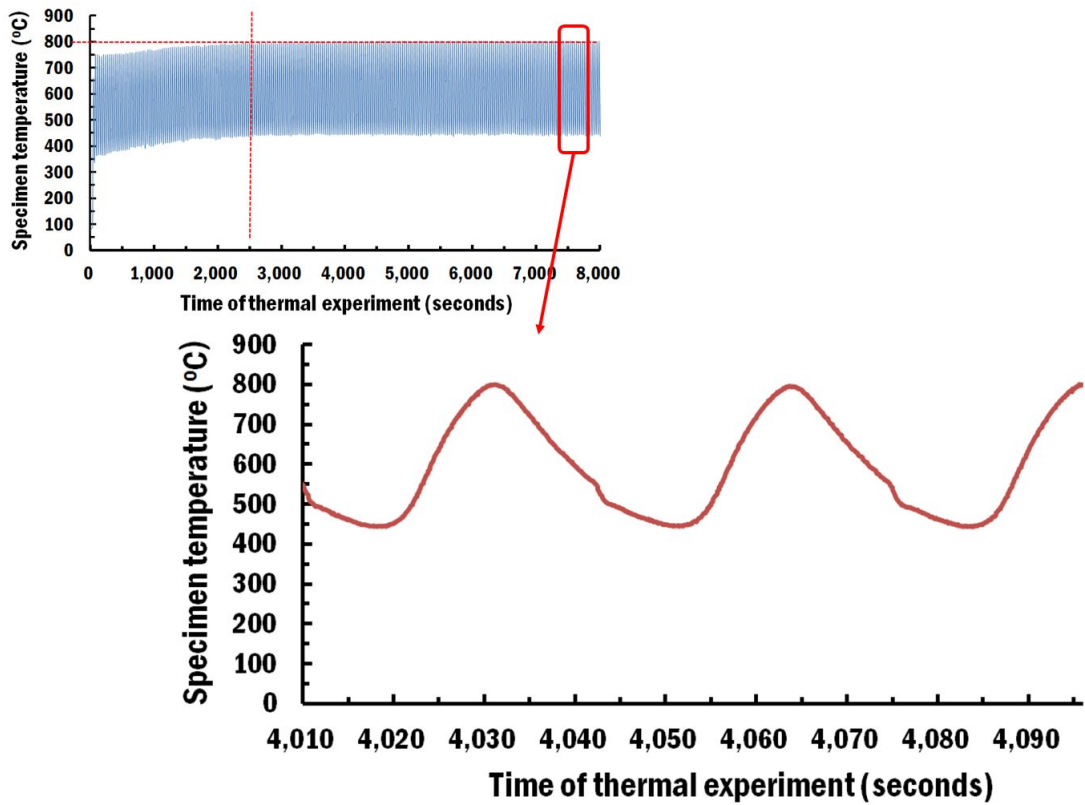


Fig. 51 Thermal history of the thermal fatigue experiment

제 6 장 손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 결과 분석

제 1 절 열피로실험 전/후 시편 외관 형상 분석

손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 수행 후 시편의 외관 형상 분석을 위하여 Fig. 50 과 같은 광학현미경 장비인 CAM SCOPE 를 이용하여 시편 외관 형상에 대한 관찰을 수행하였다. 열피로실험 후 시편의 촬영은 Fig. 50 과 같이 적층 표면으로부터 15 mm 떨어진 부분을 측정하였다.



Fig. 52 Set-up of optical microscope (CAM Scope)

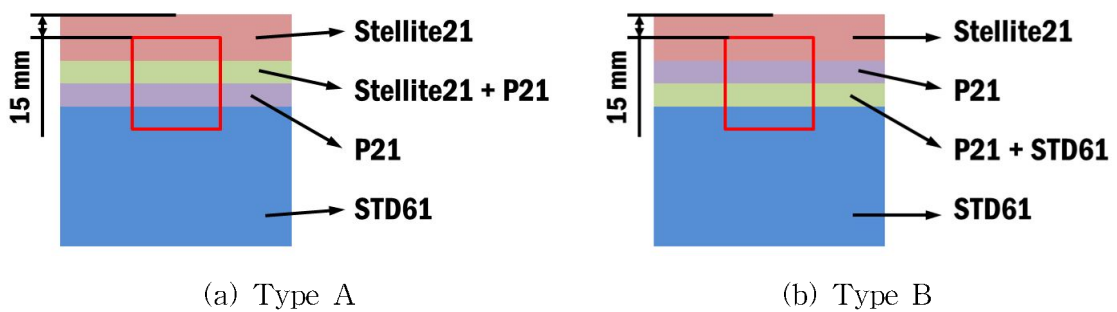


Fig. 53 Measured regions of morphology of specimens

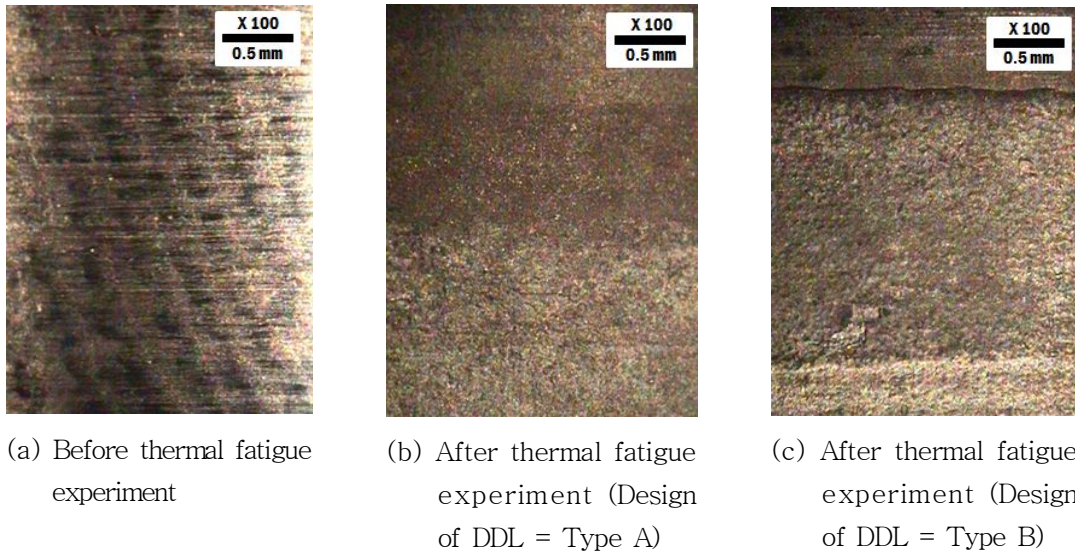


Fig. 54 Morphologies of specimen

Fig. 51 은 손상저감층을 포함하는 열피로실험 시편의 실험 전/후 표면 형상을 100 배율에서 촬영한 결과이다. Fig. 51 (a) 의 경우 열피로실험을 수행하지 않은 시편의 표면형상을 나타낸다. 실험 전 시편의 경우 시편의 표면이 적층 경계가 구분되어지지 않고 외관에 대한 결함을 찾아 볼 수 없었다. Fig. 51 (b) 는 Type A 의 배치를 가지는 시편의 열피로실험 후 표면을 나타낸다. 각 적층 재료별로 구분이 가는 것을 육안으로 확인 할 수 있었다. 또한, 재료가 변하는 적층 경계부분이 아래의 재료와 희석되면서 비교적 고르게 적층되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 51 (c) 는 Type B 의 배치를 가지는 시편의 열피로실험 후 시편의 표면을 나타낸다. Stellite 21 과 P21 의 경계에서 P21 이 팽창한 것을 확인 할 수 있었다.

열피로실험 후 광학현미경을 사용한 시편의 외관 형상 분석을 통하여 Type A 의 시편이 상대적으로 우수한 표면 형상을 나타내는 것을 알 수 있었다.

제 2 절 열피로실험 전/후 비파괴 검사를 통한 내부 균열 분석

손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 수행 후 시편의 내부균열 분석을 위하여 Fig. 52 의 미세초점 3차원 X 선 투시 검사 장치 (Micro-focus X-ray

computed tomography (CT) system) 를 이용하여 시편의 내부 균열에 대한 관찰을 수행하였다. 투시 검사장치의 경우 시편을 파괴하지 않고 X-ray 촬영을 통하여 시편의 내부에 존재하는 기공이나 크랙을 여부를 분석하기 위한 장비이다. 열피로실험 후 시편의 촬영은 Fig. 53 과 같이 적층 시편의 내부를 0.023 mm 단위로 단층촬영을 수행하여 내부 균열 분석을 수행하였다.



Fig. 55 Micro-focus X-ray computed tomography system

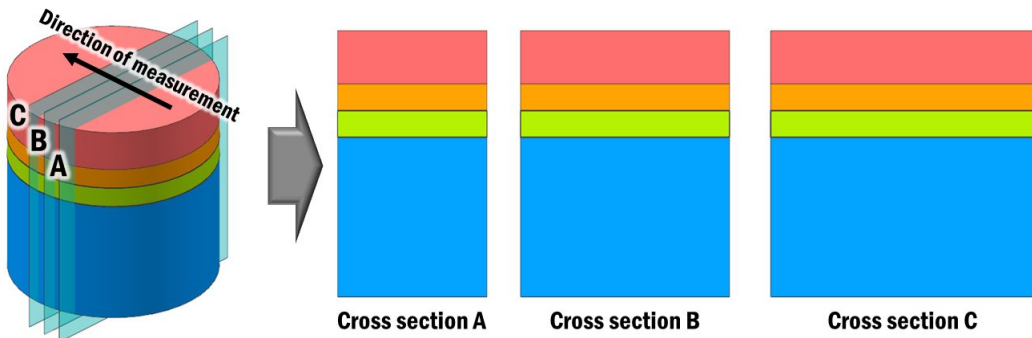
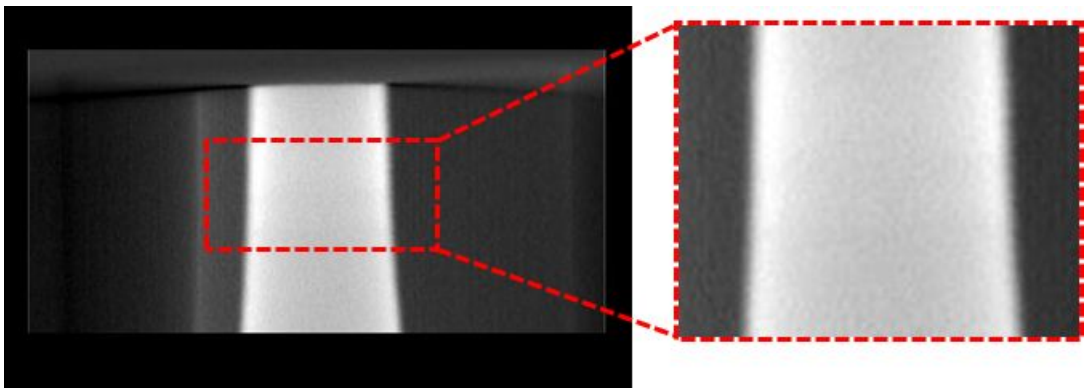


Fig. 56 Measurement scheme of specimen using micro-focus X-ray CT

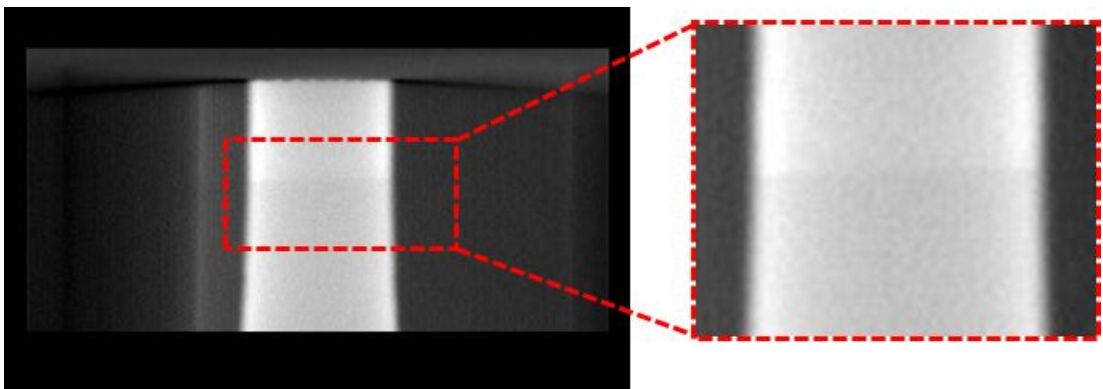
Fig. 57 은 열피로실험 전 시편의 X-ray 단층 촬영 후 0.253 mm 깊이에서의 결과 이미지를 나타낸 것이다. 실험 전 시편의 경우 거의 동일한 이미지 결과가 나왔기 때문에 실험 후 시편 기준의 촬영 위치를 토대로 이미지를 분석하였다. Type A 의 배치를 가지는 실험 전 시편의 경우 재료 변화로 인한 적층 경계나, 경계에서 발생 할 수 있는 균열이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. Type B 의 배치를 가지는 실험 전 시편의 경우 재료의 밀도차이로 인한 밝기의 차이는 약간 보이지만 경계부 균열은 보이지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 58 은 Type A 의 배치를 가지는 시편의 열피로실험

수행 후 X-ray 단층 촬영 결과이다. 0.253 mm 와 0.414 mm 의 위치에서 이미지를 확인하였을 때 실험 전에는 보이지 않았지만 적층 재료가 변하면서 재료의 밀도차이로 인해 밝기의 차이가 약간은 보이는 것이 확인되었다. Fig. 59 는 Type B 의 배치를 가지는 시편의 열피로실험 수행 후 X-ray 단층 촬영 결과이다. Stellite 21 과 P21 의 밀도차이로 인하여 시편의 밝기가 차이가 Type A 에 비해 선명하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 재료의 경계부분에서 어둡게 보이는 부분이 나타나면서 시편 내부의 미세균열이 발생 가능성이 확인되었다.

미세 초점 3차원 X 선 투시검사 장치를 사용하여 손상저감층 배치 Type A 와 Type B 의 내부 균열 검사를 수행하였을 때 Type A 의 배치가 상대적으로 우수한 것을 알 수 있었다.

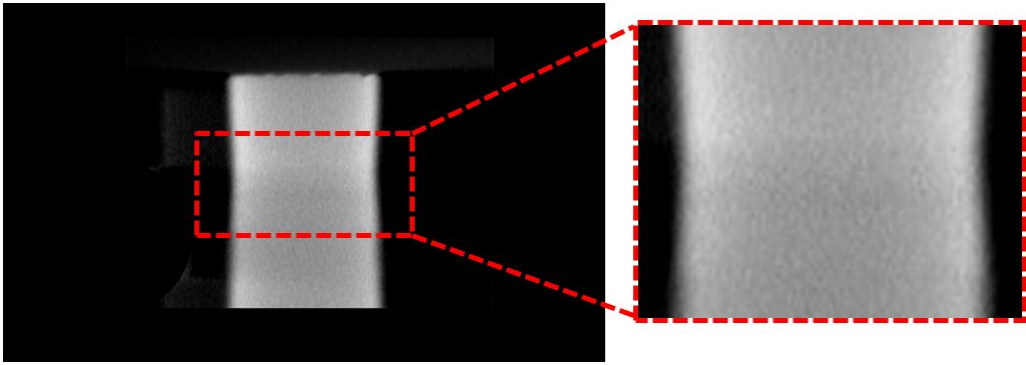


(a) Penetration depth = 0.253 mm (Design of DDL = Type A)

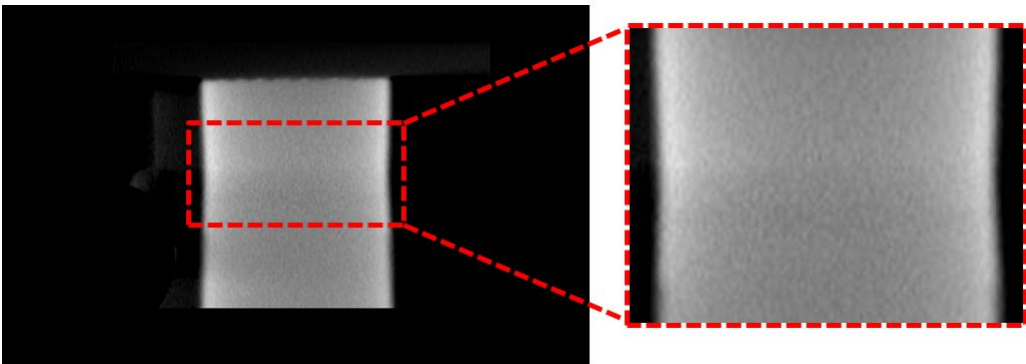


(b) Penetration depth = 0.253 mm (Design of DDL = Type B)

Fig. 57 Tomograms for different measured regions (Before the experiment)

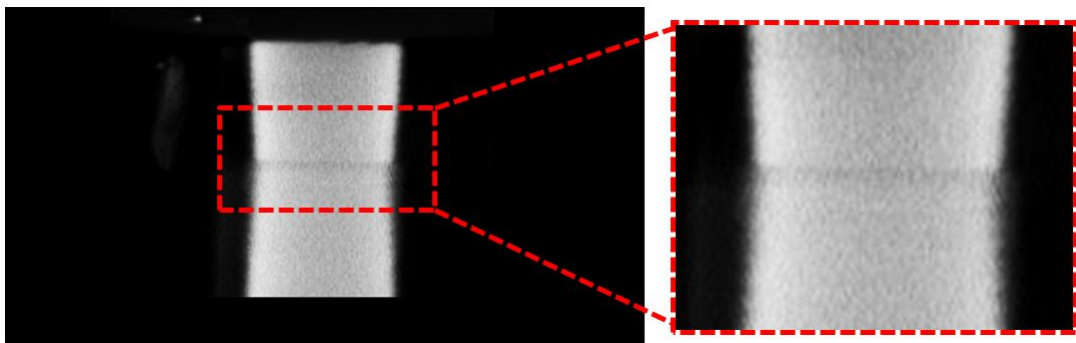


(a) Penetration depth = 0.253 mm

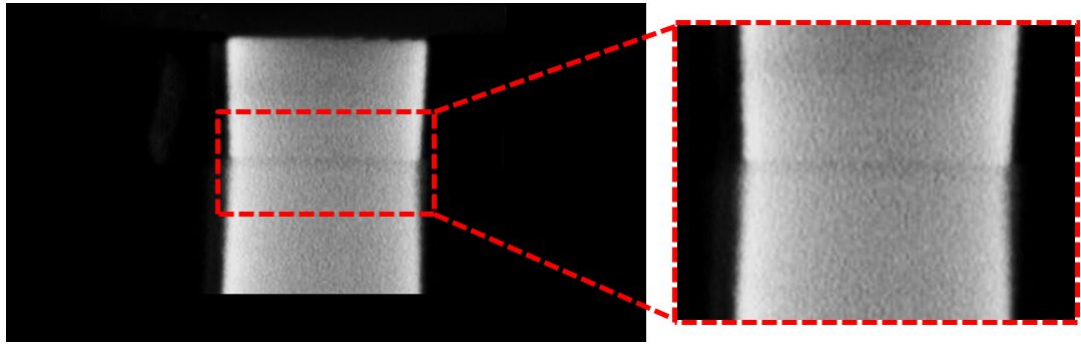


(b) Penetration depth = 0.414 mm

Fig. 58 Tomograms for different measured regions (Design of DDL = Type A)



(a) Penetration depth = 0.253 mm

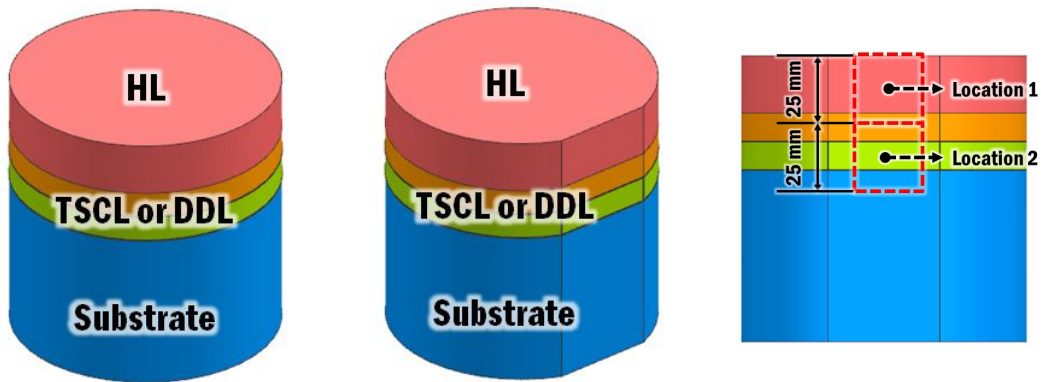


(b) Penetration depth = 0.414 mm

Fig. 59 Tomograms for different measured regions (Design of DDL = Type B)

제 3 절 열피로실험 전/후 파괴 검사를 통한 내부 균열 분석

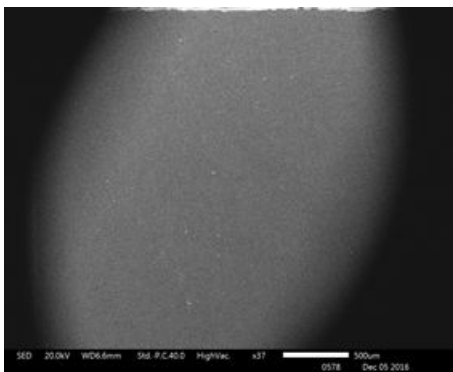
손상저감층을 포함하는 다층적층 된 시편의 열피로실험 수행 후 시편의 내부균열 분석을 위하여 시편 절단 후 LV-SEM 촬영을 수행하였다. 시편 절단은 비파괴 검사 결과를 토대로 하여 균열 발생이 의심되는 부분인 0.4 mm 까지 절단하였다. Fig. 60 은 시편 절단 전/후 형상 및 절단 후 SEM 촬영 위치를 나타낸다.



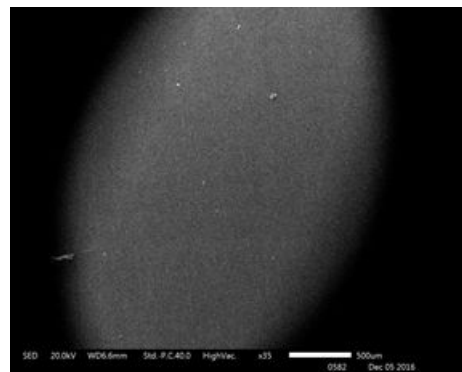
(a) Specimen before cutting (b) Specimen after cutting (c) Measure regions

Fig. 60 Measurement scheme for the morphology of the inside of the specimen

Fig. 61 은 Type A 의 배치를 가지는 열피로실험 전 시편의 절단면을 37 배 촬영한 결과를 나타낸다. 실험 전 시편의 SEM 촬영을 통하여 단면을 분석하였을 때 이중 재료를 적층한 경계부가 구분이 되지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 62 는 Type A 의 배치를 가지는 열피로실험 후 시편의 절단면을 37 배로 촬영한 결과이다. 다른 층의 경계와는 다르게 손상저감층과 기저부는 절단한 단면의 특성이 다르게 나타나면서 구분되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 63 은 Fig. 62 에서 나타난 경계부를 300 배 확대한 이미지이다. 재료의 차이로 절단면의 특성 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 내부에서 발생한 균열이라고 확인되는 부분은 보이지 않는 것으로 나타났다.

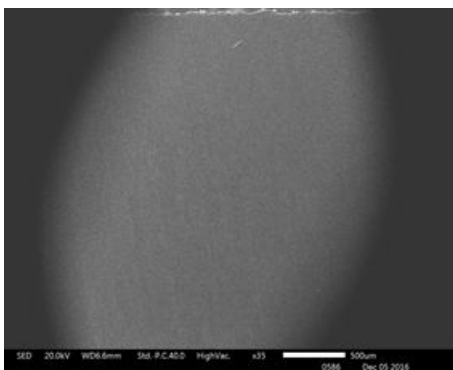


(a) Location 1 (×37)

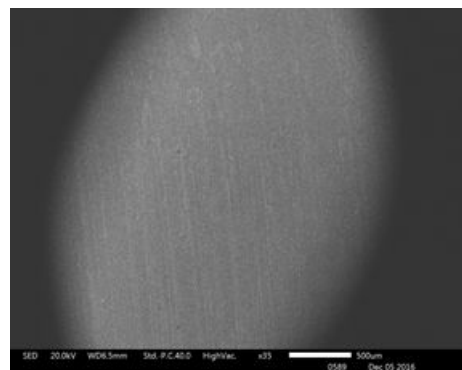


(b) Location 2 (×37)

Fig. 61 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type A, Before thermal fatigue experiment)

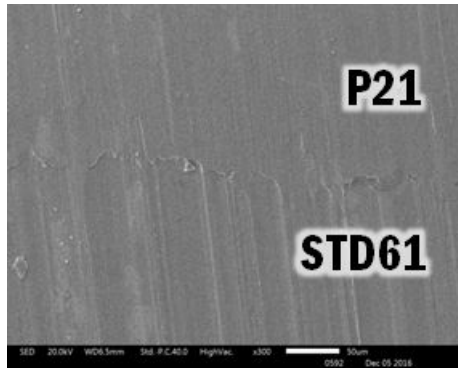


(a) Location 1 (×37)

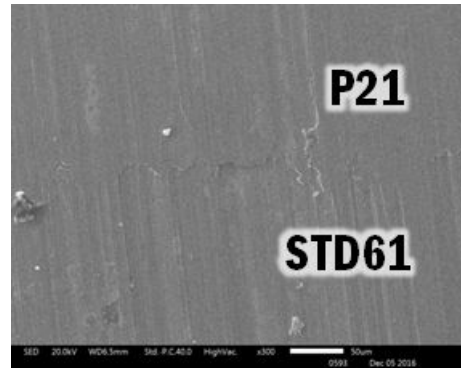


(b) Location 2 (×37)

Fig. 62 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type A, After thermal fatigue experiment)



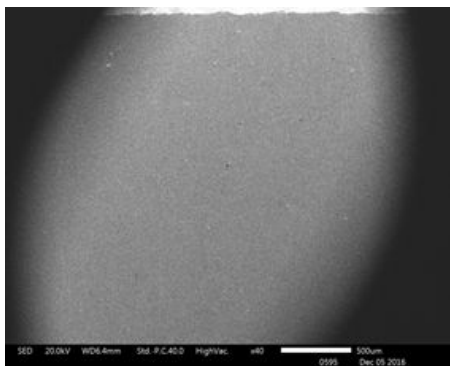
(a) Boundary 1 (×300)



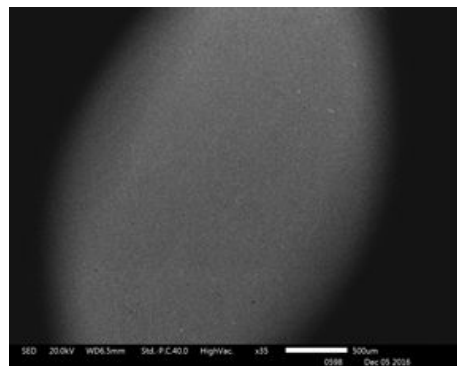
(b) Boundary 2 (×300)

Fig. 63 Morphologies of specimen in the vicinity of boundary region (Design of DDL = Type A, After thermal fatigue experiment)

Fig. 64 는 Type B 의 배치를 가지는 열피로실험 전 시편의 절단면을 37 배로 촬영한 결과를 나타낸다. Type A 의 실험 전 시편과 동일하게 이종재료를 적층한 경계부가 구분이 되지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 65 는 Type B 의 배치를 가지는 열피로실험 후 시편의 절단면을 37 배로 촬영한 결과이다. 다른 층의 경계와는 다르게 특성개선층과 손상저감층의 절단면의 특성이 다르게 나타나면서 구분되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 66 은 Fig. 65 에서 나타난 특성개선층과 손상저감층의 경계부를 300 배 확대하여 촬영한 이미지이다. 재료의 차이로 절단면의 특성 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

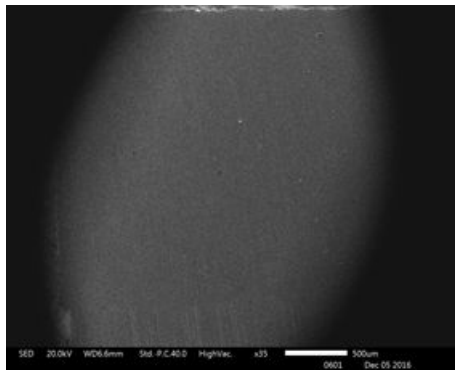


(a) Location 1 (×37)

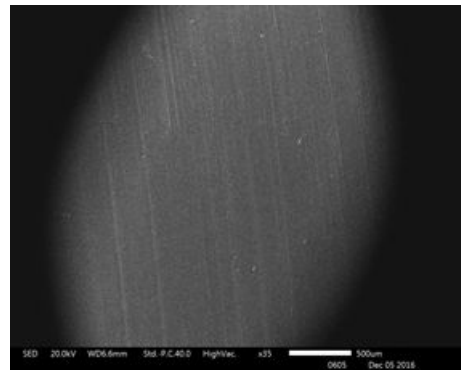


(b) Location 2 (×37)

Fig. 64 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type B, Before thermal fatigue experiment)

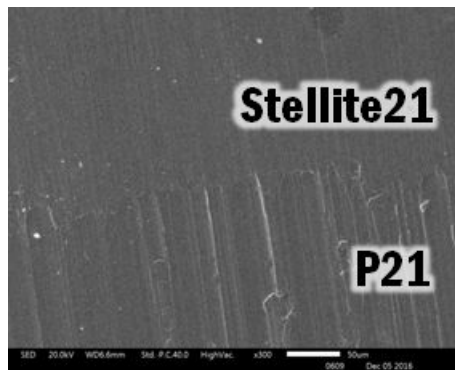


(a) Location 1 (×37)

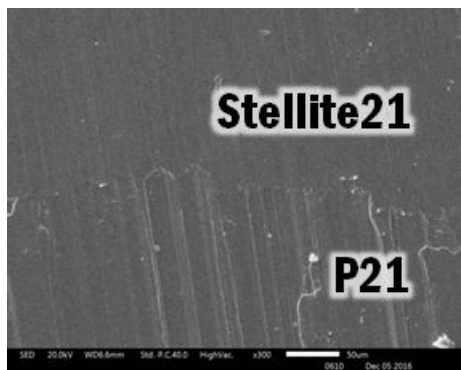


(b) Location 2 (×37)

Fig. 65 Morphologies of specimen in the vicinity of joined region (Design of DDL = Type A, After thermal fatigue experiment)



(a) Boundary 1 (×300)



(b) Boundary 2 (×300)

Fig. 66 Morphologies of specimen in the vicinity of boundary region (Design of DDL = Type A, After thermal fatigue experiment)

비파괴검사를 통하여 특성개선층과 손상저감층 사이에 미세한 균열이 발생할 것으로 예상하였으나 시편을 직접 절단하여 SEM 촬영을 통한 내부균열을 분석해본 결과 Type B 의 배치를 가지는 시편 또한 내부균열이 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

제 7 장 결론 및 향후 목표

본 연구에서는 다층적층 된 금속재료의 경계층에서 발생하는 혼합손상패턴을 방지하기 위한 손상저감층에 관한 연구를 수행하였다. HastelloyX, SUS304 및 P21 을 손상저감층의 재료로 사용하고, 손상저감층의 높이 및 배치 변화에 따른 열전달/열응력 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 도출된 결과를 토대로 열피로실험을 수행하여 손상저감층을 가지는 다층적층 재료의 열피로 특성을 비교/분석 하였다. 열전달/열응력 해석 및 열피로실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 열전달/열응력 해석을 통하여 손상저감층으로 가장 우수한 재료를 선정하였다. 해석모델 설계 후 열전달/열응력 해석을 수행하여 손상저감층의 재료, 높이 및 배치에 따른 온도, 주응력 및 주변형률 분석을 수행하였다. 해석 결과를 분석을 통하여 P21 이 가장 우수한 열전달 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

둘째, 동일한 해석 결과의 분석을 통하여 손상저감층의 높이를 선정하였다. 손상저감층의 재료가 P21 일 때 두께가 두꺼워 질수록 온도와 주변형률은 낮게 나타났으나 주응력은 증가하였다. P21 의 두께가 3 mm 일 때, 온도결과에서는 우수한 결과를 보여 주었으나, 주응력과 주응력 단차 결과에서는 P21 의 두께가 1 mm 일 때 우수한 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 최종적으로 손상저감층의 재료로 P21 을 사용하였을 때 그 높이를 1 mm 로 선정하였다.

셋째, 해석 결과만으로는 배치에 따른 우수한 결과를 선정하기 어려워 해석으로 도출된 결과를 토대로 열피로실험을 수행하였다. 열피로실험 수행 후 실험 재료의 배치 변화에 따른 외관형상 및 내부 균열 분석을 수행하였다. 열피로실험을 통한 분석 결과를 통하여 우수한 손상저감층의 배치를 Type A 로 선정하였다.

추후, 다층적층 된 금속재료의 결합방지를 위한 손상저감층의 개발을 위하여 다음과 같은 연구를 수행해야 할 것이다. 본 연구에서는 손상저감층의 열피로에 관련 된 분석만 수행하였기 때문에, 다층적층 된 금속재료의 혼합손상패턴 방지를 위해서는 열 뿐만 아니라 충격 및 열충격에 대한 연구를 추가적으로 수행해야 할 것이다. 이를 위해서는 충격실험과 열충격에 관한 해석을 수행하여야 할 것이다. 충격 관련 실험과 열충격 해석을 통하여 손상저감층이 충격특성에 미치는 영향을 분석할 것이다.

REFERENCES

1. O. Sebastian and E. O. Hermann, "The kyoto protocol : International climate policy for the 21st century", Springer-Verlag, pp. 1-136, 1999
2. Erine C. Trager. "Where we are now : The U.S. federal regulatory framework for alternative energy on the OCS", ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol. 4, pp. 1169-1179, 2009
3. 김성중, "알루미늄 선박용 재료와 용접기술", 한국마린엔지니어링학회지, 제 30 권, 제 5 호, pp. 540-551, 2006
4. A. Truitt and S. N. Mahmoodi, "A review on active wind energy harvesting design", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 14, No. 9, pp. 1667-1675, 2013
5. Anton, S. R. and Inman, D. J., "Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles," Proc. SPIE- Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, Vol. 6928, pp. 692824, 2008
6. S. A. Ansari, R. Zbikowski and K. Knowles, "Aerodynamic Modelling of Insect-Like Flapping Flight for Micro Air Vehicles", Progress in Aerospace Science, Vol. 42, No. 2, pp. 129-172, 2006
7. W. Shen and S. Zhu, "Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 10, pp. 799-807, 2005
8. 권영진, "특집 : 유기오염물질 배출 억제를 위한 환경친화형 보수재료 개발 방향", 건축, 제 47 권, 제 5 호, pp. 41-43, 2003
9. R. Andersson, E. Schedin, C. Magnusson, J. Ocklund and A. Persson, "The applicability of stainless steel for crash absorbing components", SAE Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, Vol. 111, No. 6, pp. 1918-1922, 2002.
10. K. J. Kim, M. H. Rhee, B. I. Choi, C. W. Kim, C. W. Sung, C. P. Han, K. W. Kang and S. T. Won, "Development of application technique of aluminium sandwich sheets for automotive hood", International Journal of Precision

- Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 4, pp. 71-75, 2009
11. P. F. Bariani, S. Bruschi and T. D. Negro, "Integration physical and numerical simulation techniques to design the hot forging process of stainless steel turbine blades", *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Vol. 44, Issue 9, pp. 945-951, 2004
 12. R. S. Lee and J. L. Jou, "Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, Issues 1-3, pp. 43-48, 2003
 13. B. W. Rooks, "The effect of die temperature on metal flow and die wear during high-speed hot forging", *Proceedings of the Fifteen International Machine Tool Design and Research Conference*, pp. 481-494, 1975
 14. D. H. Kim, H. C. Lee, B. M. Kim and K. H. Kim, "Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes", *Journal of Materials Technology*, Vol. 166, Issue 3, pp. 372-380, 2005
 15. E. Summerville, K. Venkatesan and C. Subramanian, "Wear processes in hot forging press tools", *Materials & Design*, Vol. 16, Issue 5, pp. 289-294, 1995
 16. C. Liu, Y. Xi, F. Tang and P. K. Chu, "Influence of heat treatment on degradation behavior of biodegradable die-cast AZ63 magnesium alloy in simulated body fluid", *Materials Science and Engineering : A*, Vol. 456, Issues 1-2, pp. 350-357, 2007
 17. D. M. Lal, S. Renganarayanan and A. Kalanidhi, "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels", *Cryogenics*, Vol. 41, Issue 3, pp. 149-155, 2001
 18. R. N. Lumley, R. G. Odonnell, D. R. Gunasegaram, and M. Givord, "Heat treatment of high-pressure die castings", *MEtallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38, Issue 10, pp. 2564-2574, 2007
 19. S. W. Kim, D. Y. Kim, W. G. Kim and K. D. Woo, "The study on characteristics of heat treatment of the direct squeeze cast 7075 wrought Al alloy", *Materials Science and Engineering : A*, Vol. 304-306, pp. 721-726, 2001
 20. K. K. Choi, W. J. Nam and Y. S. Lee, "Effects of heat treatment on the surface of a die steel STD11 machined by W-EDM", *Journal of Materials Processing*

- Technology, Vol. 201, Issue 1-3, pp. 580-584, 2008
21. http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2014/12/28/2014122801614.html
 22. S. Kalpakjian and S. Schmid, "Manufacturing process for engineering materials : 5th edition", 2007
 23. T. Dikova, R. Horiuchi, S. Yamaguchi and S. Seto, "Influence of overlapping passes on microstructure of hot-work tool steels treated by continuous CO₂ laser", Proceeding of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 2006
 24. T. M. Yue, L. J. Yan and C. P. Chan, "Stress corrosion cracking behavior of Nd:YAG laser-treated aluminum alloy 7075", Applied Surface Science, Vol. 252, Issue 14, pp. 5026-5034, 2006
 25. R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino and Y. Koizumi, "Ultragrain refinement of plain low carbon steel by cold-rolling and annealing of martensite", Vol. 50, Issue 16, pp. 4177-4189, 2002
 26. 강성훈, "상변태를 수반한 침탄강의 담금질 공정의 유한요소 해석", 박사학위 논문, 2006
 27. D. E. Lauring and B.Eng, "Hot isostatic pressing and heat treatment development of powder metallurgy beta gamma titanium aluminide alloys", MASc thesis : Carleton University, 2010
 28. Kim. J. D, Song. M. K and Hwang. H. T, "A study on the diode laser surface hardening treatment of cast iron for die material (Ⅱ) - Comparison of hardening characteristics by the parts applied heat treatment", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, Issue 8, pp. 1048-1054, 2011
 29. T. L. Chen, Y. H. Guan, H. G. Wang and J. T. Zhang, "A study on austenite transformation during laser heating", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 36, Issues 1-3, pp. 546-549, 1997
 30. 신호준, 유영태, 안동규, 신병현, "CW Nd:YAG 레이저에 의한 열간금형 공구강의 표면경화특성", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문 요약집, pp. 219-220, 2006
 31. 정원기, 전병철, 김재도, "구상흑연주철의 CO₂ 레이저 표면경화 특성", 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 998-1002, 1997
 32. H. Kashani, A. Amadeh and H. M. Ghasemi, "Room and high temperature wear

- behavior of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies", *Wear*, Vol 262, Issues 7-8, pp. 800-806, 2007
33. D. H. E. Persson, S. Jacobson and S. Hogmark, "Effect of temperature friction and galling of laser processed Norem 02 and Stellite 21", *Wear*, Vol. 255, Issues 1-6, pp. 498-503, 2003
 34. W. R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder and S. J. Skerlos, "Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing", Vol. 15, Issue 10, pp. 932-943, 2007
 35. Ahn. D. G, "Hardfacing technology for improvement of wear characteristics of hot working tools : A Review", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 7, pp. 1271-1283, 2013
 36. H. Kashani, A. Amadeh and M. R. Vatanara, "Improving wear resistance of hot work tool steel by hardfacing Part 1 - Effect of microstructure and hardness", *Materials Science and Technology*, Vol. 23, Issue 2, pp. 165-170, 2007
 37. H. Kashani, A. Amadeh and M. R. Vatanara, "Improving wear resistance of hot work tool steel by hardfacing Part 2 - Case study", *Materials Science and Technology*, Vol. 24, Issue 3, pp. 356-360, 2008
 38. L. Fouilland, M. El Mansori and A. Massaq, "Friction-induced work hardening of cobalt-base hardfacing deposits for hot forging tools", *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 209, Issue 7, pp. 3366-3373, 2009
 39. 김정수, 우성식, 서장훈 "원전 1차계통 부품의 내마모/내침부식 특성을 향상시키기 위한 레이저 Co-free 비정질 재료 cladding 연구", 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2001
 40. Ahn. D. G "Application of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools - state of the art", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 5, pp. 925-938, 2011
 41. Park. N. R and Ahn. D. G, "Estimation of hardfacing material and thickness of STD61 hot-working tool steels through three-dimensional heat transfer and thermal stress analyses", *Translation of the Korean Society of Mechanical Engineering. A*, Vol. 38, No. 4, pp. 427-436, 2014
 42. Ahn. D. G, Park. N. R and Oh. J. W, "A study on the effects of hardfacing layer

- thickness on wear characteristics of the Stellite 21 hardfaced part in the high temperature”, Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference, pp. 868-869, 2014
43. S. Ocylok, A. Weisheit and I. Kelbassa, "Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection", Physics Procedia 5, pp. 359-367, 2010
44. Park. N. R, Ahn. D. G and Oh. J. W, "Estimation of the thickness and the material combination of the Thermal Stress Control Layer (TSCL) for the Stellite21 hardfaced STD61 hot working tool steel using three-dimensional finite element analysis", Translation of Korean Society of Mechanical Engineering. A, Vol. 38, No. 8, pp. 857-862, 2014
45. Ahn. D. G, Guk. D. S and Park N. R, "Investigation of the effects of design of thermal stress control layer on wear characteristics of hardfaced specimen in the high temperature", Proceedings of Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 457, 2014

감사의 글

석사학위 논문을 완성하기까지 많은 도움을 주신 분들께 진심어린 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

실험실에 처음 아무것도 모르는 학부생으로 들어온 저에게 새로운 세상을 열어주시고 더 나아가 발전할 수 있도록 도와주셨으며 공학도가 갖춰야하는 자세에 대하여 알려주신 안동규 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 논문의 심사과정을 거치면서 여러 가지 조언과 지도를 해주시느라 고생하신 한길영 교수님과 오동욱 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

전산설계실험실의 초석이 되어주신 1기 이상훈 선배님과 김민수 선배님, 학술대회 뿐만 아니라 생산기술연구원으로 실험을 갈 때 항상 많이 챙겨주시는 김진석 선배님, 실험실원들에게 다양한 경험을 바탕으로 항상 좋은 말씀을 해주시는 문경제 선배님, 변경원 선배님, 항상 따뜻한 웃음으로 맞아주시는 정광운 선배님, 김대원 선배님, 광주에 근무하시면서 어려운 일이 있을 때 도움을 주신 김현우 선배님, 홈커밍데이에 오셔서 항상 좋은 말씀 전해주시는 남경흠 선배님, 박승화 선배님, 자주 뵙지는 못하지만 만나면 실험실원들의 일과 진로에 대해서 조언해주시는 송동한 선배님, 김세훈 선배님, 박민우 선배님, 조창규 선배님, 만나면 언제나 밝은 미소로 맞아주시는 선향선 선배님, 안영수 선배님 모두 감사드립니다. 실험실에 어려운 일이 생기면 직접 오셔서 적극적으로 도와주시는 우철이 오빠와 나라 오빠, 실험실 박사과정으로 계시면서 그동안 배운 다양한 노하우를 알려주시고 실험실원들을 가족같이 생각하며 힘들지 않도록 격려해주시고 챙겨주신 호진이 오빠, 졸업하고 나서도 모르는 부분이 있어서 연락하면 적극적으로 답변을 준 대선이 오빠에게 모두 진심으로 감사드린다는 말씀을 전하고 싶습니다. 대학원 생활을 함께 하면서 바쁠 때마다 옆에서 적극적으로 도움을 준 용훈이 오빠와 재국이 오빠에게 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 처음에는 반대하셨으나 진학 후 묵묵히 저를 지켜봐주신 아버지, 항상 저의 길을 응원해주시는 어머니, 곧 전역하는 든든한 큰동생, 집안의 비타민 막둥이 그리고 항상 응원해준 친구들과 정덕규 사장님께 모두 감사의 말씀드립니다.

2016년 12월

김 동 인