



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](#)

2016년 8월
석사학위 논문

열응력 제어층을 가진
하드페이싱층의 특성분석

조선대학교 대학원

기계공학과

국 대 선

열응력 제어층을 가진
하드페이싱층의 특성분석

A Study on Characteristics of the Hardfaced
Layer with Thermal Stress Control Layer

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

국 대 선

열응력 제어층을 가진 하드페이징층의 특성분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 4월

조선대학교 대학원

기계공학과

국 대 선

국대선의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조규재 (인)

위원 조선대학교 교수 한길영 (인)

위원 조선대학교 교수 안동규 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
ABSTRACT	viii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구목적 및 방법	2
제 2 장 열응력 제어층에 대한 3 차원 유한요소 해석	4
제 1 절 열응력 제어층 3 차원 모델링	4
제 2 절 열응력 제어층 열전달/열응력 해석 방법	6
제 3 장 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 열전달/열응력 해석...7	
제 1 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 온도 분포 특성 분석.....7	
제 2 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 주변형률 분포 특성 분석...9	
제 3 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 주응력 분포 특성 분석.....11	
제 4 장 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도에 따른 3 차원 유한요소 해석 결과 및 고찰	14
제 1 절 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도에 따른 온도 분포 결과 및 고찰	14
제 2 절 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도에 따른 주응력 분포 결과 및 고찰	15
제 3 절 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도에 따른 주 변형률 분	

포 결과 및 고찰	17
제 5 장 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 경도/잔류응력 및 미세조직 특성 분석	20
제 1 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모 시편 경도 시험 ...	20
제 2 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 잔류 응력 특성 분석	23
제 3 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 시편 조직 비교	25
제 4 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 EDS (Energy Electron Microscopy) 성분 분석	35
제 6 장 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 충격 특성 분석	37
제 1 절 하드페이싱된 열간금형강 시편 제작 및 충격 실험.....	37
1. 하드페이싱된 열간금형강 시편 제작.....	37
2. 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 충격 실험.....	37
제 2 절 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 제작 특성 분석	39
제 3 절 절 반복 충격하중에 따른 하드페이싱층을 가진 열간금형강 시편 하중 및 외관 형상 특성 변화 분석.....	39
제 4 절 절 반복 충격하중에 따른 적층 시편의 내부 균열/결함 특성 분석	41
제 7 장 결론	42
【References】	44

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1 Properties of the hardfaced layer and the substrate at the room temperature	5
Table 2 Number of elements and nodes for the FE model	6
Table 3 Thermal conductivities for material of TSCL	7
Table 4 Thermal expansion coefficient , thermal conductivity and Young's modulus of TSCL at the room temperature	9

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Design of thermal stress control layer	4
Fig. 2 Boundary conditions of FE model	6
Fig. 3 Influence of the material combination of TSCL on the temperature distribution	8
Fig. 4 Influence of the material combination of TSCL on the temperature distribution in the thickness direction	8
Fig. 5 Influence of the material combination of TSCL on the major principal strain distribution	9
Fig. 6 Influence of the material combination of TSCL on the major principal strain distribution in the thickness direction	10
Fig. 7 Influence of the material combination of TSCL on the deviation of the major principal stress in the vicinity of boundary regions	11
Fig. 8 Influence of the material combination of TSCL on the maximum principal stress distribution	12
Fig. 9 Influence of the material combination of TSCL on the maximum principal stress distribution in the thickness direction	13
Fig. 10 Influence of the material combination of TSCL on the deviation of the maximum principal stress in boundary regions	13
Fig. 11 Influence of the protruded height and the inclined angle on the temperature distribution	14
Fig. 12 Influence of the protruded height and the inclined angle on the maximum principal stress distribution	15
Fig. 13 Influence of the protruded height and the inclined angle on the maximum principal stress distribution in the thickness direction	16
Fig. 14 Influence of the protruded height and the inclined angle on the deviation of the maximum principal stress in the vicinity of boundary regions	17
Fig. 15 Influence of the protruded height and the inclined angle on the major principal strain distributions	18

Fig. 16 Influence of the protruded height and the inclined angle on the major principal strain distribution in the thickness direction 18
 Fig. 17 Influence of the protruded height and the inclined angle on the deviation of the major principal strain in the vicinity of boundary regions 19
 Fig. 18 Micro-vickers hardness tester 20
 Fig. 19 Variation of surface hardness of specimen according to wear experiments in the elevated temperature 21
 Fig. 20 Variation of surface hardness of specimen according to wear experiments in the elevated temperature 21
 Fig. 21 Friction induced work hardening(FIWH) for different specimens 22
 Fig. 22 Residual stress measurement system 24
 Fig. 23 Influence of the design of in the vicinity of the boundary region ... 25
 Fig. 24 Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) 26
 Fig. 25 Morphologies on the worn surface 28
 Fig. 26 Morphologies in the vicinity of the worn section 29
 Fig. 27 Worn depth and worn width of specimens for different TSCL designs 30
 Fig. 28 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 1) 30
 Fig. 29 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 1) 31
 Fig. 30 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 2) 31
 Fig. 31 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 2) 32
 Fig. 32 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 3) 33
 Fig. 33 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 3) 33
 Fig. 34 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 4) 34

Fig. 35 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL
and the substrate (Type 4) 34

Fig. 36 Low vacuum scanning electron microscope 35

Fig. 37 Results of line and area analyses 36

Fig. 38 Manufacturing procedure of the specimen for drop impact test 37

Fig. 39 Set-up of drop impact test 38

Fig. 40 Formation of cracks in the vicinity of joined regions 39

Fig. 41 Variation of impact load according to number of impact 40

Fig. 42 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the
deposited layer and the substrate 40

Fig. 43 X-ray CT images of specimens in the vicinity of joined regions 41

ABSTRACT

A Study on Characteristics of the Hardfaced Layer with Thermal Stress Control Layer

Guk Dae Seon

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

Dept of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun
University

The purpose of this study is to analyze characteristics of hardfacing layer with thermal stress control layer(TSCL). This study designed 4 type of finite element analysis(FEA) model to analyze heat transfer and thermal stress characteristics according to the material combination of TSCL, as well as the protruded height and the inclined angle TSCL. Materials of the hardfaced layer and the substrate were stellite 21 super alloy and STD 61 hot working tool steel, respectively. The TSCL was created by mixing of stellite 21 and STD 61. The inclined angle and protruded height of thermal stress control layer were 0° - 90° and 0-2 mm, respectively. Heat transfer and thermal stress analyses were performed using a commercial software, ABAQUS V6.12. The material combination of TSCL was deduced through investing of temperature, stress distributions and strain distributions according to the material combination of TSCL. In addition, variation of temperature, stress and strain distributions in the hardfaced layer, TSCL and substrate according to the protruded height and the inclined angle of the TSCL were investigated.

In order to investigate the variation of the hardness according to the wear

experiment at the elevated temperature, the hardness after the wear experiment was compared to that before the wear experiment. The friction induced work hardening(FIWH) was estimated to examine the work hardening ration via the wear experiment. In addition, wear characteristics, involundy worn width, worn depth and the morphologies of worn region, were investing added using field emission scanning electron microscope(FE-SEM). The valuation of material composition in the thickness direction was observed using low vacuum scanning electron microscope(LV-SEM).

The impact resistance of the hardfaced specimen was investigated using the repeated drop impact test. From the results of the impact test, proper hardfacing material and the hardfacing thickness were estimated.

Based on the above results, proper the material combination and the design of TSCL as well as the material and the thickness of the hardfaced layer were obtained.

NOMENCLATURES

T_SCL : Thermal stress control layer (열응력 제어층)

H : 열응력 제어층의 돌출높이

θ : 열응력 제어층의 형상각도

$\rho_{mixture}$: 열응력 제어층 재료의 밀도

ρ_{std} : 기저부층 재료의 밀도

$\rho_{Stellite21}$: 하드페이싱층 재료의 밀도

$C_{P,mixture}$: 열응력 제어층 재료의 비열

$C_{P,std}$: 기저부층 재료의 밀도

$C_{P,Stellite21}$: 하드페이싱층 재료의 밀도

$k_{mixture}$: 열응력 제어층 재료의 열전도도

k_{std} : 기저부층 재료의 열전도도

$k_{Stellite21}$: 하드페이싱층 재료의 열전도도

$\alpha_{mixture}$: 열응력 제어층 재료의 열팽창계수

α_{std} : 기저부층 재료의 열팽창계수

$\alpha_{Stellite21}$: 하드페이싱층 재료의 열팽창계수

FIWH : 마찰 유도 가공경화 지수

$HV_{initial}$: 재료의 경도

HV_{ws} : 마모면의 경도

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

최근 전 세계적으로 자원 고갈과 지구온난화 문제가 대두되고 있다. 이 문제가 미치는 영향을 줄이기 위하여 기계 및 생산 공학 분야에서 녹색 생산기술, 자원 재활용 기술, 제품 수명 향상 기술 등에 대한 연구가 폭 넓게 진행되고 있다.^{1,2)} 특히 제품 수명 향상 기술은 자원 원소재의 사용량을 현저히 감소시킬 수 있음 뿐만 아니라 제품 제작시 사용되는 에너지 사용량을 줄일 수 있어 전 세계적으로 다양하게 연구가 진행되고 있다.^{3~9)} 열간 성형 공정 금형은 표면에 고온이 반복적으로 부가될 때 금형과 재료 사이에서 고온 마모/열 피로 등이 발생하여 금형이 손상되는 문제가 발생한다.^{9~12)} 열간 성형 공정 금형의 손상을 줄이기 위하여 표면 열처리 및 표면경화 기법들이 많이 사용되고 있다. 하지만 현재 표면 열처리 및 표면경화는 큰 하중이 부가되거나 고운동량이 필요할 때 경화층에서 균열이 발생하는 문제점들이 있다.^{13, 14~17)} 이러한 문제를 해결하기 위하여 금형표면에 이중재료를 적층하여 열간 성형 금형의 수명을 향상시키는 하드페이싱 기술 연구가 진행되고 있다.^{18~21)} 하드페이싱 기술이란 금속재료의 표면을 마모나 부식을 방지하기 위하여 표면에 각종 합금층을 만드는 기술이다. 이러한 하드페이싱 기술은 적층 방법에 따라 레이저를 이용한 레이저 파우더 기술 및 용접 공정을 이용한 금속 3차원 프린팅 공정 기술로 분류된다.²²⁾ 하드페이싱 기술중 임의 형상 및 경사 기능 구조를 가장 적합하게 제작할 수 장점이 있는 레이저 클래딩 기술이 많이 사용되고 있다.²³⁾ 이러한 레이저 클래딩 기술은 하드페이싱 공정중 레이저 파우더를 이용한 기술로서 금형 표면을 가열시킨 후 그 위에 기계적 성질이 우수한 금속 재료를 적층시켜 마모/열피로 현상을 감소시키는 공정으로 사용되고 있다. 레이저 클래딩 공정을 이용하여 제작된 금형 및 제품의 경우는 표면층에서 잔류응력 이완에 의한 경도가 감소하는 문제가 발생하며 이러한 문제를 해결하기 위하여 국내외적으로 활발히 연구가 진행되고 있다.^{24,25)} 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

Mingxi 등은 레이저 클래딩기술을 이용하여 Co 계 합금을 금속 표면에 적층하여 주사형 전자 현미경 (FE-SEM : Field Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하여 표면의 미세조직을 분석하였으며, EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer)을 이용하여 두께에 따른 성분을 분석하였다. 또한 층 두께에 따른 경도를 분석하였다.^{26,27)} 마모시험 전 시편의 경도와 마모 시험 후 경도를 비교하여 FIWH (Friction-Induced Work hardening)을 도출하였다.²⁸⁾ 열간 성형 공정에 사용되는 금형강의 표면에 기계적 성질이 우수한 재료를 하드페이싱 기술을 이용하여 적층시켜 고온에서의 내마모성 및 층간 결합, 열간 성형공정 금형 및 제품의 수명을 향상시키는 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{29~34)}

제 2 절 연구목적 및 방법

최근 열간 성형 공정 금형의 경우 성형 재료에서 전달되는 열로 인한 금형의 열연화 현상이 발생하고 이로 인하여 금형면에 마모발생과 금형 수명 단축되는 문제가 발생되고 있다. 이러한 열간 성형 공정에서 발생하는 문제를 해결하기 위하여 금형면에 고온에서 기계적 특성이 우수한 재료를 적층시켜 금형의 수명을 향상시키는 하드페이싱 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 하드페이싱 기술을 열간 성형 금형에 적용할 경우 하드페이싱 층 재료와 기저부 재료의 열적 물성 차이로 인하여 하드페이싱층과 기저부 사이의 경계층에서 균열이나 층간 분리 등 문제가 발생하고 있다. 하드페이싱에서 발생하는 문제를 해결하기 위한 연구가 필요한 실태이다. 이러한 기저부 재료와 하드페이싱 재료의 열적 물성 차이로 인한 문제를 해결하기 위하여 하드페이싱층과 기저부 사이에 열응력 제어층을 부여하여 성형 금형의 수명을 향상시킬 수 있는 연구와 하드페이싱층 적층특성을 분석하고자한다. 3 차원 유한 요소 프로그램을 이용하여 열응력제어층 재료 혼합비에 따른 온도 분포/응력 분포/변형률 분포에 대하여 분석 및 고찰하여 열응력 제어층에 가장 적합한 재료 혼합비를 도출하고자한다. 하드페이싱 표면에 열량이 부가될 때 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도에 따른 온도 분포, 응력 분포 및 변형률 분포에 대한 분석을 수행하였다. 열응력 제어층을 갖는 하드페이

싱된 열간 금형강의 마모 특성을 분석하기 위하여 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모 시편을 이용하여 경도 실험 전/후의 경도를 도출하여 비교 분석하였다. 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 시편내부에 발생하는 잔류응력을 프론틱스사의 잔류응력 분석 장비를 이용하여 비교 분석하였다. 주사형 전자현미경 (FE-SEM : Field Emission Scanning Electron Microscope) 을 이용하여 층간 결합과 마모면을 비교/분석하였다. 또한 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer)분석을 이용하여 열응력제어층의 재료 혼합비에 따른 두께방향에 대한 성분 분석을 수행하였다. 하드페이싱 적층 특성을 알아보기 위하여 충격 낙하시험을 1,000 실시하여 충격횟수에 따른 하중변화를 분석을 수행하였다. 그리고 X-ray CT 장비를 이용하여 충격 낙하 시험을 1,000 수행시 시편 내부에 발생하는 내부 균열 분석을 수행하였다.

제 2 장 열응력 제어층에 대한 3 차원 유한요소 해석

제 1 절 열응력 제어층 3 차원 모델링

하드페이싱된 열간금형강 사이에서 발생하는 열 물성 차이로 인한 열간금형 균열 및 파손을 방지하기 위하여 열응력제어층의 설계가 이루어져야한다. 열응력 제어층의 설계하기 위해서는 열응력제어층의 재료 선정이 중요하다. 열응력 제어층의 재료는 하드페이싱층의 재료인 Stellite 21 과 기저부 재료인 STD 61 의 열물성차이를 줄이기 위하여 하드페이싱층과 기저부층 재료를 체적비로 혼합하여 제작하는 것을 고려해야한다. Fig. 1 은 열응력 제어층의 기초 설계안이다. 초기 설계시 열간금형강 상면 표면에 열응력 제어층 과 하드페이싱층 갖도록 설계하였다. 열응력 제어층과 하드페이싱을 갖는 열간 금형의 크기는 150 mm × 150 mm 이며 하드페이싱층과 열응력 제어층의 두께는 Fig. 1 과 같다.

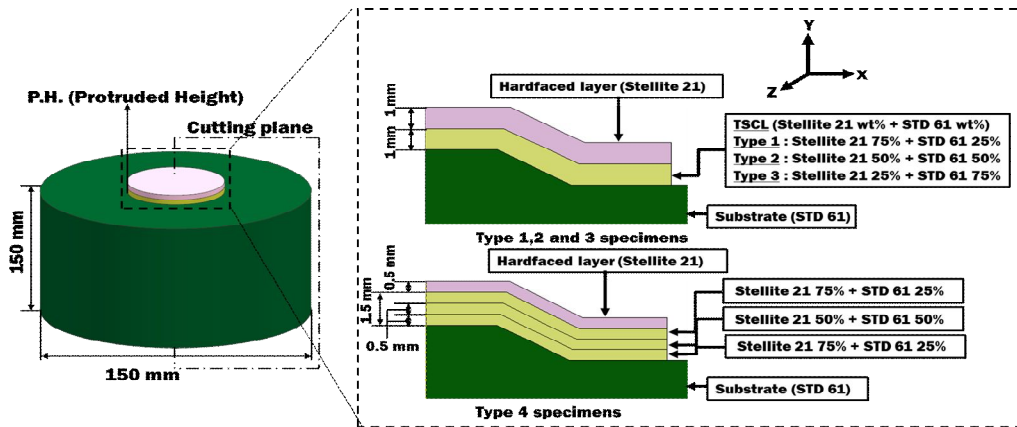


Fig. 1 Design of thermal stress control layer

Table 1 의 열응력 제어층의 재료 물성은 혼합법칙(Mixing Law) 와 맥스웰 모델(Maxwell)을 이용하여 산출하였다. 열응력 제어층의 재료 물성 데이터 중 밀도, 열팽창계수 및 포아송비 식 (1) 의 혼합법칙 (Mixing Law)을 이용하여 산출하였다. 비열 및 열전도도는 맥스웰 모델(Maxwell)을 이용하여 각각 식 (2) 와 (3)를 이용하여 산출하였다.

$$\rho_{mixture} = \rho_{STD} \cdot (1 - \phi) + \rho_{Stellite21} \cdot \phi \quad (1)$$

여기서 $\rho_{mixture}$, ρ_{STD} , $\rho_{Stellite21}$, ϕ 는 각각 재료 혼합에 따른 밀도, STD 61 의 밀도, Stellite 21 의 밀도 및 Stellite 21 의 부피비 이다.

$$C_{p, mixture} = \frac{(\rho \cdot C_p)_{std} \cdot (1 - \phi) + (\rho \cdot C_p)_{stellite21} \cdot \phi}{\rho_{std} \cdot (1 - \phi) + \rho_{stellite21} \cdot \phi} \quad (2)$$

여기서 $C_{p, std}$, $C_{p, stellite21}$, ϕ 는 각각 STD 61 의 비열, Stellite 21 의 비열 및 Stellite 21 체적비 이다.

$$\frac{K_{mixture}}{K_{std}} = \frac{K_{stellite21} + 2K_{std} + 2\phi \cdot (K_{stellite21} - K_{std})}{K_{stellite21} + 2K_{std} - \phi \cdot (K_{stellite21} - K_{std})} \quad (3)$$

여기서 K_{std} , $K_{stellite21}$, ϕ 는 각각 STD 61 의 열전도도, Stellite 21 의 열전도도 및 Stellite21체적비 이다.

$$\alpha_{mixture} = \alpha_{std} \cdot \phi_{std} + \alpha_{stellite21} \cdot \phi_{stellite21} \quad (4)$$

여기서 α , ϕ_{std} 및 $\phi_{stellite21}$ 는 각각 열팽창 계수, STD 61 의 밀도에 따른 부피비 및 Stellite 21 의 밀도에 따른 부피비 이다.

Table 1 properties of the hardfaced layer and the substrate at the room temperature

Material	Density (g/cm ³)	Coefficient of thermal expansion(/°C)	Specific heat (J/g·°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)
STD 61	7.76	0.0000104	0.46	25
Stellite 21	8.33	0.0000143	0.423	17
Stellite 21(25%)+STD 61(75%)	7.89	0.0000112	0.451	23.1
Stellite 21(50%)+STD 61(50%)	8.03	0.0000119	0.442	21.1
Stellite 21(75%)+STD 61(25%)	8.19	0.0000127	0.433	19.1

제 2 절 열응력 제어층 열전달/열응력 해석 방법

본 연구에서는 열응력제어층의 재료 혼합비에 따른 열전달/열응력 특성을 분석하고자 한다. 열전달/열응력 해석을 수행하기 위하여 Fig. 2 와 같이 열응력 제어층의 유한요소 모델 및 재료 혼합비에 따른 해석 조건을 부여하였다. 절점 격자 생성은 해석 시간 및 해석 메모리가 커지는 문제를 줄이기 위하여 Axis-symmetric 조건의 사면체 쉘 메쉬를 이용하여 격자를 생성하였다. 열전달/열응력 해석을 수행하기 위하여 모델 우측 옆에 축대칭 경계조건(Axis-symmetric)을 부여하였다. 바닥면 y 축 방향을 움직일 수 없도록 고정시켰으며, 바닥면 좌측옆면에 자연대류 $5 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ 를 부여 하였다. 본 연구에서 설계된 열응력 제어층의 설계안에 대하여 3 차원 유한 요소 해석을 진행하여 열응력 제어층의 온도 및 주응력/변형률 특성을 분석하였다. 유한 요소 해석을 진행하기 위하여 상용 프로그램인 ABAQUS V6.12를 사용하였다. 열응력 제어층을 가진 하드페이징된 STD 61 금형강의 열전달/열응력 해석에 사용된 격자수는 Table 2 과 같다.

Table 2 Number of elements and nodes for the FE model

Inclined angle ($\theta, ^\circ$)	0	30	60	90
Node(EA)	252,811	260,580	233,094	233,094
Element(EA)	251,800	259,560	232,080	253,600

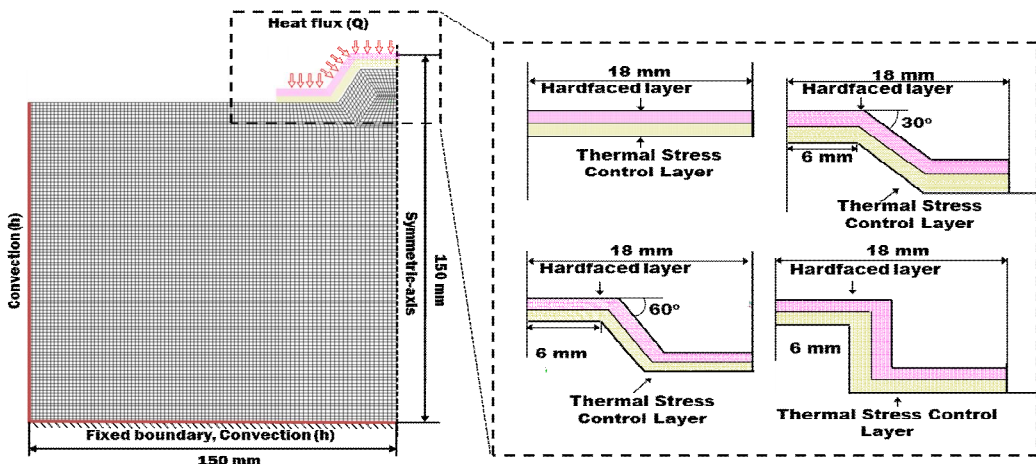


Fig. 2 Boundary conditions of FE model

제 3 장 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 열전달/열응력 해석

제 1 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 온도 분포 특성 분석

열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 온도 분포 특성을 비교 분석하기 위하여 유한 요소 해석 모델의 상단부의 세로 6 mm, 가로 22 mm 표면에서 온도 분포를 측정하여 Fig. 3 같이 비교 하였다. 유한해석 모델에 동일한 대류 조건 과 하드페이싱층에 동일한 온도 800 °C를 부가한 결과 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 온도분포 차이는 없는 것을 알 수 있었다. 이 와 같은 결과는 동일한 체적을 가지고 있는 모델에 동일한 온도를 부가하는 경우 온도 분포에 영향을 주는 주요 변수는 재료의 열전도도이다. 열응력 제어 층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 증가하여도 Table 3 와 같이 열전도도의 차이가 미세하기 때문에 혼합비에 따른 온도분포 차이도 미세한 것으로 보인다.

Table 3 Thermal conductivities for material of TSCL

Stellite 21 (75%) + SID 61 (25%)		Stellite 21 (50%) + SID 61 (50%)		Stellite 21 (25%) + SID 61 (75%)	
Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/mm°C)	Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/mm°C)	Temperature (°C)	Thermal conductivity (W/mm°C)
20	0.019105	20	0.02114	20	0.023105
200	0.02	200	0.0229	200	0.0257
300	0.02135	300	0.02382	300	0.0262
400	0.02265	400	0.02464	400	0.02655
600	0.02538	600	0.02653	600	0.027635
2000	0.03147	2000	0.03096	2000	0.030475

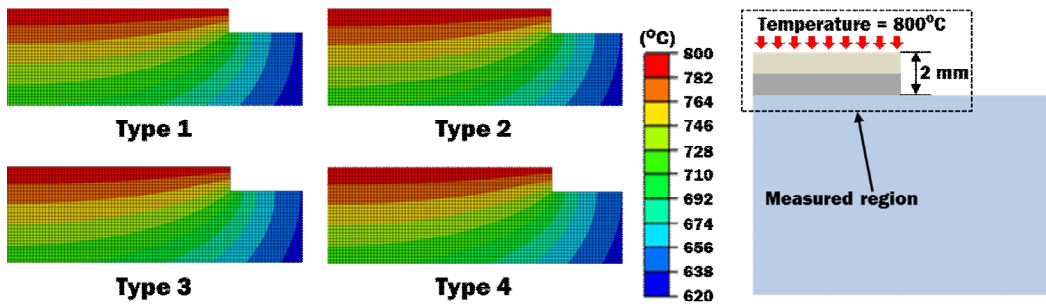


Fig. 3 Influence of the material combination of TSCL on the temperature distribution

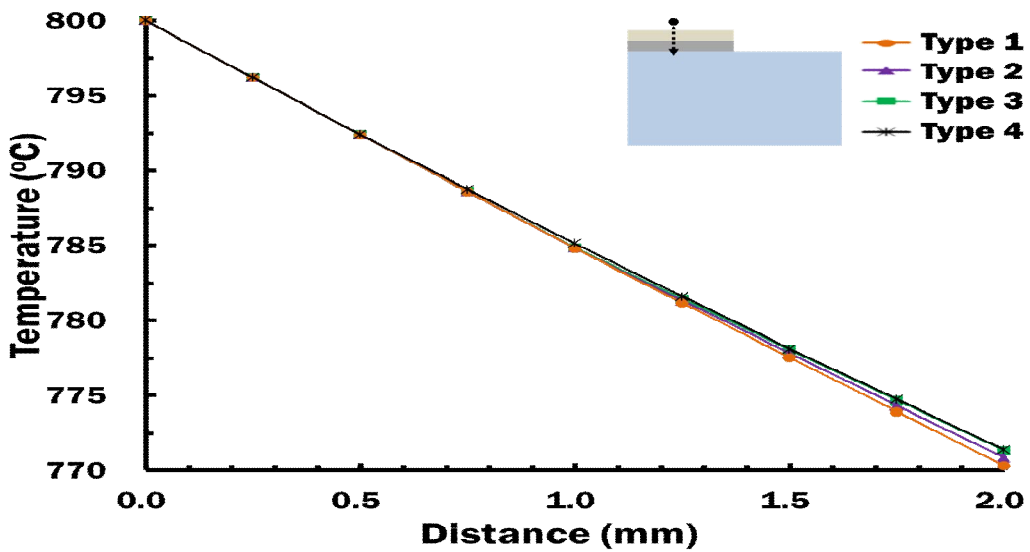


Fig. 4 Influence of the material combination of TSCL on the temperature distribution in the thickness direction

열응력 제어층의 재료혼합비별 깊이 방향에 대한 온도 분포 결과를 Fig. 4 로 표시하였다. 이결과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 체적비가 증가하여도 약 2 mm 깊이에서는 온도차는 1 °C 내외로 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 이 결과를 통해서 재료 혼합비에 따ms 온도변화는 적은 것을 확인할 수 있었고 이유

는 열물성인 열전도도의 차이가 재료 혼합비에 따라 크게 변화하지 않기 때문이다.

제 2 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 주변형 률 분포특성분석

열응력 제어층의 재료 혼합비에 따라 하드페이싱층과 기저부 층에 미치는 영향 및 열물성에 따라 변화하는 주변형률 변화를 비교 분석하기 위하여 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 5 은 하드페이싱에 동일한 온도가 부가될 때의 주변형률 분포에 대한 결과이다. 이 결과 열응력 제어층의 혼합 재료인 Stellite 21 의 체적비가 증가함에 따라 최대 주변형률이 증가하였고 Type 4 인 4 Layer 층을 가질 때 가장 낮은 주변형률을 갖는 것을 알 수 있었다. 이결과를 통해 주변형률 증가 및 감소는 Table 4 과 같이 열응력 제어층의 혼합재료인 Stellite 21 체적비가 증가 할수록 열적 물성인 열팽창계수가 증가하기 때문으로 예측이 된다.

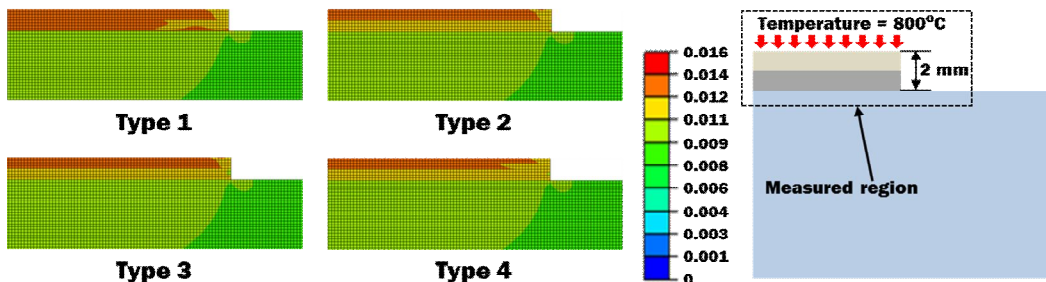


Fig. 5 Influence of the material combination of TSCL on the major principal strain distribution

Table 4 Thermal expansion coefficient , thermal conductivity and Young's modulus of TSCL at the room temperature

Properties	Coefficient of thermal expansion(/°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)	Young's moduls
Stellite 21(25%)+STD 61(75%)	0.0000112	23.1	222,820
Stellite 21(50%)+STD 61(50%)	0.0000119	21.1	230,920
Stellite 21(75%)+STD 61(25%)	0.0000127	19.1	239,310

Fig. 6 은 깊이 방향에 따른 주변형률 결과이다. 이 결과 하드페이싱과 기저부 층에서의 주변형률 차이는 미세하지만 재료 혼합비에 따라 달라지는 열응력 제어층에서는 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비율이 증가할수록 변형률이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 재료가 바뀌는 경계면에서 열물성차이로 인한 주변형률 단차가 발생하는 것도 확인할 수 있었다. 깊이 방향에 대한 해석 결과를 통해 동일한 재료가 분포하고 있는 하드페이싱 과 기저부 층에서 주변형률 차이가 미세하였고 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따라 열물성이 달라지는 열응력 제어층에서 주변형률 차이가 증가하는 것을 통해서 열응력 제어층의 재료혼합비에 따라 달라지는 열물성인 열팽창계수 인해서 주변형률이 증가하거나 감소하는 것을 확인하였다.

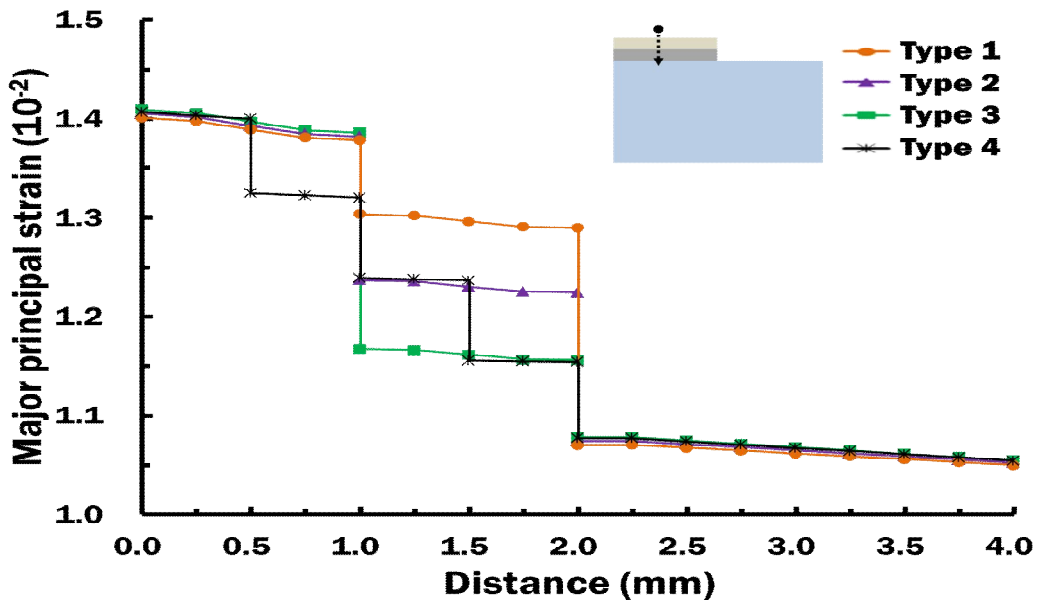


Fig. 6 Influence of the material combination of TSCL on the major principal strain distribution in the thickness direction

Fig. 7 은 깊이 방향에서 측정한 주변형률 단차 결과이다. 이 결과 통해서 Boundary A 에서의 단차가 증가하는 이유는 하드페이싱 층의 재료인 Stellite 21 과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 감소할수록 열팽창 계수 가 감소하며 열전도도가 증가하기 때문이다. 또한 Boundary B 가 Type 1에서 Type

3 로 이동할수록 단차가 감소하는 것은 Type 1에서 Type 3로 갈수록 기저부의 열물성인 열팽창계수와 열전도도 차이가 감소하기 때문이다. 이 결과를 Boundary A 와 B 의 단차 차이가 가장 적은 Type 2 와 Type 4 가 하드페이싱 층과 기저부층의 열 물성 차이로 인해서 발생하는 결함 등을 해결에 적합한 열 응력 제어층의 재료 혼합비로 예측이 된다.

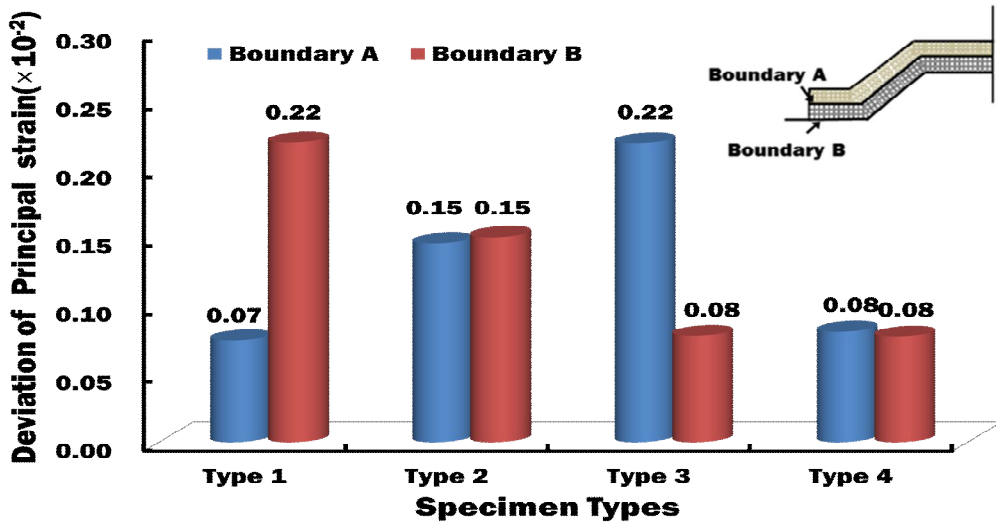


Fig. 7 Influence of the material combination of TSCL on the deviation of the major principal stress in the vicinity of boundary regions

제 3 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 주응력 분포 특성분석

Fig. 8 은 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 주응력 분포 결과이다. 이결과 열응력 제어층 재료인 Stellite 21 혼합비가 증가할수록 최대 응력이 증가한다. 이유는 동일한 열량 과 체적을 가질 때 열응력 분포에 영향을 줄 수 있는 요인은 재료물성 중 열팽창계수 와 탄성계수이며 이런 물성이 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 체적비가 증가할수록 열팽창계수와 탄성계수가 증가해서 열응력이 증가하는 것으로 사료 된다.

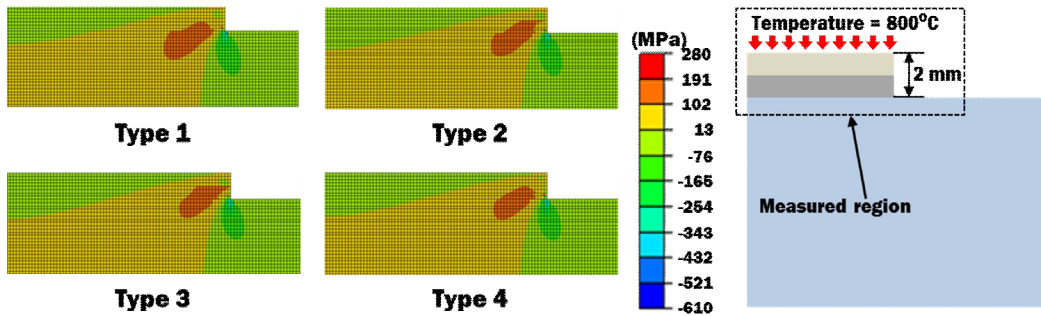


Fig. 8 Influence of the material combination of TSCL on the maximum principal stress distribution

Fig. 9 은 깊이 방향에 대한 열응력제어층의 열응력 결과이다. 이 결과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 체적비가 증가할수록 깊이 방향에서의 열응력 차이를 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이결과 열응력 제어층 재료인 Stellite 21 혼합비가 증가할수록 최대 응력이 증가한다. 또한 각 적층 경계면인 1 mm 와 2 mm 에서 응력 단차가 발생하며, 경계면 1 mm 에서는 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 증감할 때 단차가 감소하고 경계면 2 mm 에서는 열응력 제어층의 재료인 STD 61 체적비가 증가할수록 단차가 감소하는 경향을 보였다. 이런 결과가 나온 이유는 하드페이싱 재료인 Stellite 21 과 기저부 재료인 STD 61 이 열응력 제어층의 혼합비에 따라서 각 경계면에서의 열물성 차이가 줄어들거나 늘어나기 때문에 단차차이가 생기는 것으로 예측이 된다. 또한 Fig. 10 은 깊이 방향에서 측정된 주응력 단차 결과이다. 이결과 통해서 Boundary A에서 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 재료 체적비가 감소할수록 단차가 증가하는 이유는 하드페이싱 층의 재료인 Stellite 21 과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 감소할수록 열전도도가 커지기 때문이다. 또한 Boundary B 가 Type 1에서 Type 3 로 이동할수록 단차가 감소하는 것은 Type 1에서 Type 3로 갈수록 기저부의 열물성인 열전도도 차이가 감소하기 때문이다.

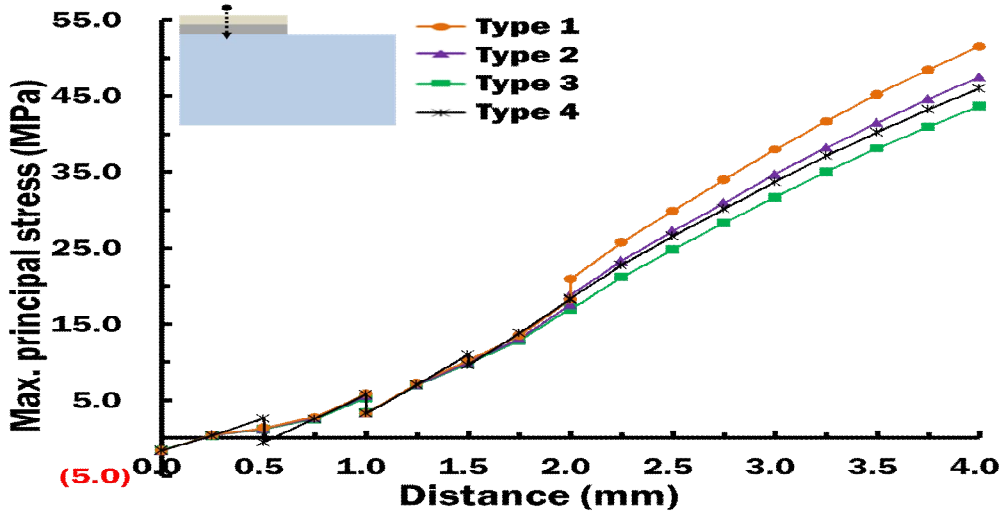


Fig. 9 Influence of the material combination of TSCL on the maximum principal stress distribution in the thickness direction

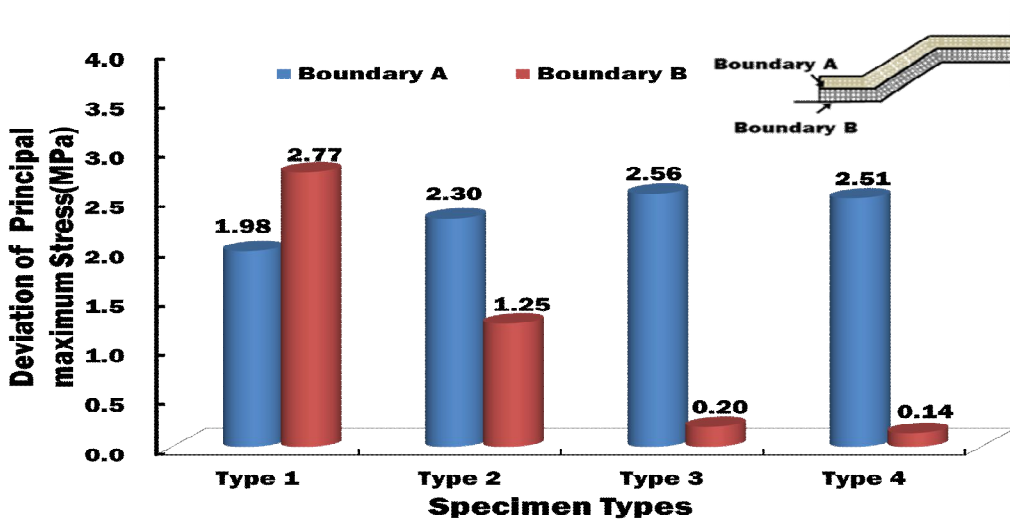


Fig. 10 Influence of the material combination of TSCL on the deviation of the maximum principal stress in boundary regions

제 4 장 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도에 따른 3차원 유한요소 결과 및 고찰

제 1 절 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 따른 온도 분포 결과 및 고찰

열응력 제어층의 재료 혼합비를 선정 후 열응력제층의 돌출 높이 및 형상각도가 열간성형 공정에 미치는 특성을 비교 분석하여 가장 적합한 열응력 제어층을 설계안을 도출하고자 열응력제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 대한 열전달/열응력 해석을 수행하였다. 열응력제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 따른 온도분포를 비교하기위하여 Fig. 11 와 같이 유한 요소 모델의 상단부 표면의 세로 6 mm, 가로 22 mm 안에서 발생한 온도분포를 비교하였다. Fig. 11 은 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 대한 열전달/열응력 해석을 통해 얻어진 온도 분포이다. 돌출 높이에 따라 열응력제어층의 최대 온도를 비교 한 결과 돌출높이가 증가하게 되면 최대 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 형상각도가 증가하게 되면 온도분포 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해서 돌출높이 및 형상각도 상승이 온도분포를 상승시킴을 알 수 있었다.

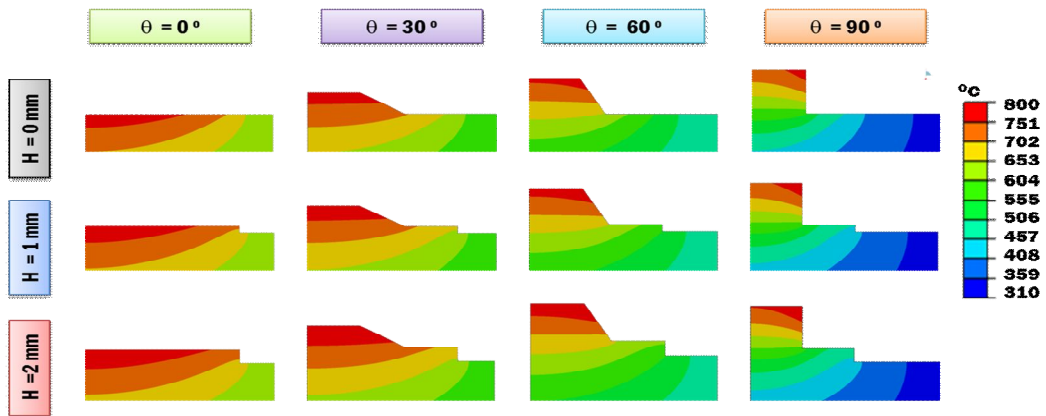


Fig. 11 Influence of the protruded height and the inclined angle on the temperature distribution

제 2 절 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 따른 응력 분포 결과 및 고찰

Fig. 12 는 열응력 제어층의 재료 혼합비가 Type 2 일 때의 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 대한 열전달/열응력을 통해 얻어진 열응력 분포이다. 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도가 증가함에 따라 열응력 분포가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 열응력 제어층의 높이 및 형상각도와 상관없이 최대 응력은 경계부 에지 (Boundary edge) 에서 최대 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이결과 동일한 열량이 부가되는 경우에도 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도의 증가에 따라 금형의 표면 온도가 증가하기 때문에 열응력 분포도 증가하는 것으로 예측이 된다.

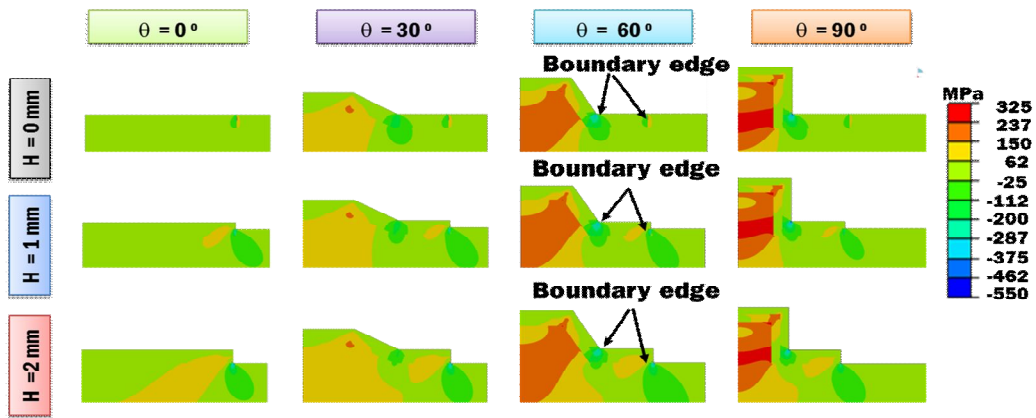
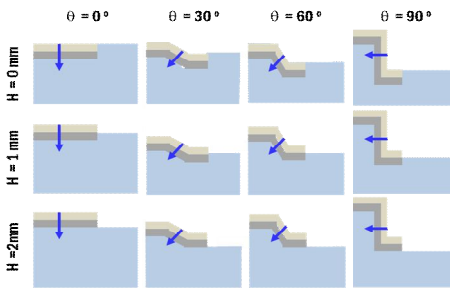


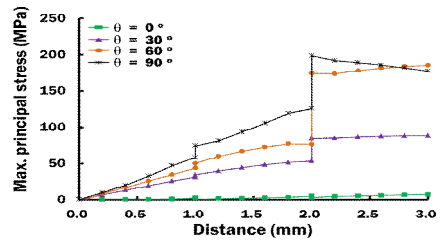
Fig. 12 Influence of the protruded height and the inclined angle on the maximum principal stress distribution

Fig. 13 는 열응력 제어층의 돌출높이 및 형상각도별 깊이 방향에 대한 주응력 측정위치 및 분포 결과이다. 이 결과 열응력 제어층의 형상각도가 0 °- 90 °로 증가할수록 주응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 동일한 열량이 부가되는 경우 돌출높이 및 형상각도가 증가하게 되면 표면의 온도가 높은 것을 확인할 수 있었고 표면 온도가 높아짐에 따라 주응력이 증가하는 것으로 예측할 수 있었다. 또한 재료 물성이 바뀌게 되는 경계층에서 돌출 높이 및 형상각도의

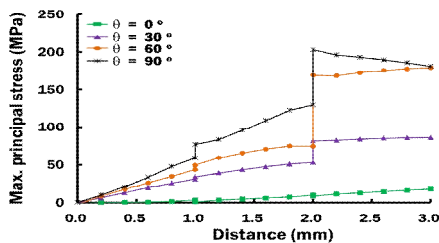
변형에 따른 주응력 단차를 확인할 수 있었다. 하드페이싱층 과 열응력 제어층의 주응력 단차 보다 열응력 제어층과 기저부층 사이에서 발생하는 단차가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 열응력 제어층의 열팽창계수와 하드페이싱층 재료인 Stellite 21 보다 기저부 재료인 STD 61 과 열팽창계수 차이가 크기 때문에 단차 차이가 커진 것으로 예측이 된다.



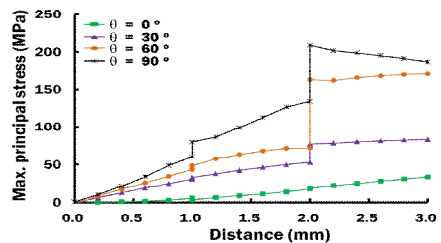
(a) Measured regions and directions



(b) Protruded height = 0 mm



(c) Protruded height = 1 mm

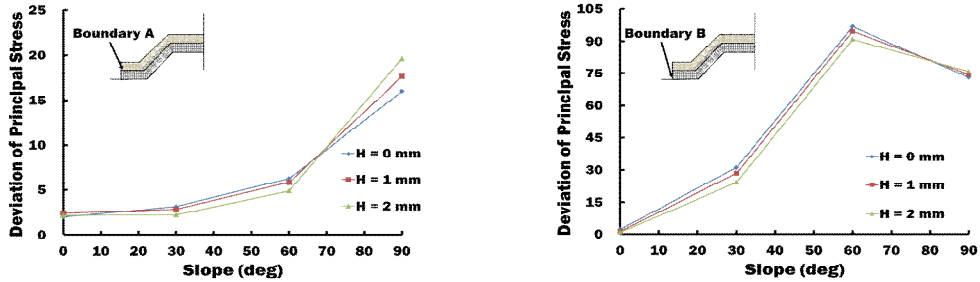


(d) Protruded height = 2 mm

Fig. 13 Influence of the protruded height and the inclined angle on the maximum principal stress distribution in the thickness direction

Fig. 14 은 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 따라 하드페이싱 층과 열응력 제어층의 경계부인 Boundary A 와 열응력 제어층 과 기저부의 경계층인 Boundary B 에서 발생한 주응력 단차 결과이다. 이 결과 열응력 제어층의 형상각도가 0 °- 90 ° 로 증가할수록 Boundary A에서 단차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 형상각도가 증가할 때 Boundary B 에서는 0 °- 60 ° 까지 단차가 증가하지만 60 °- 90 ° 로 증가할 때는 단차가 감소하는 것을 알 수 있었다.

Boundary B 일 때 형상각도 0°에서 열응력 제어층의 돌출 높이가 증가할 때 주응력이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 30°- 60°로 형상각도가 증가할 때는 단차가 증가 하지만 60°- 90°로 형상각도가 증가할 경우 단차가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Boundary A

(b) Boundary B

Fig. 14 Influence of the protruded height and the inclined angle on the deviation of the maximum principal stress in the vicinity of boundary regions

제 3 절 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 따른 주변형률 분포 결과 및 고찰

Fig. 15 는 열응력 제어층의 재료 혼합비가 Type 2 일 때의 주변형률 분포의 결과이다. 이 결과 형상각도가 0°- 90°로 증가할수록 하드페이싱 표면에서의 주변형률이 감소함을 알 수 있었으며, 열응력 제어층의 돌출 높이가 1 mm 에서 2 mm 로 증가할 때 표면의 주변형률 분포가 증가함을 알 수 있었다. Fig. 16 은 깊이 방향에 대한 주변형률 분포 결과로 형상각도가 0°- 90°로 표면에서의 주변형률이 감소함을 알 수 있었다.

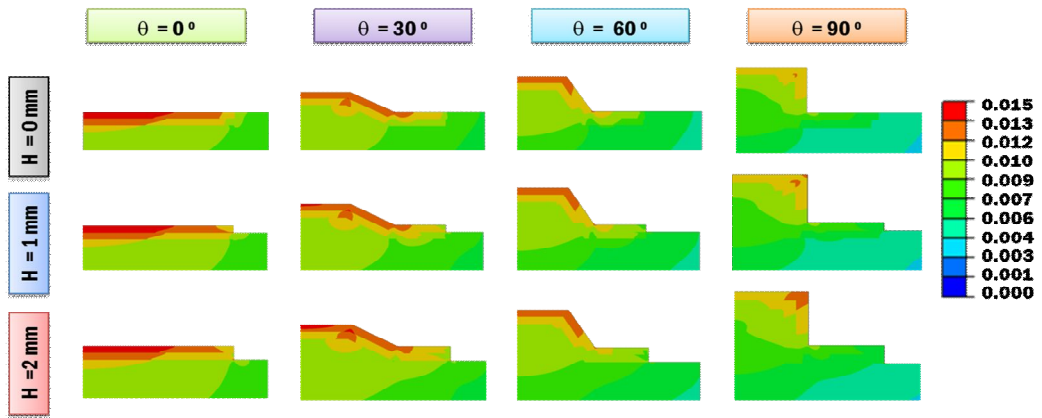
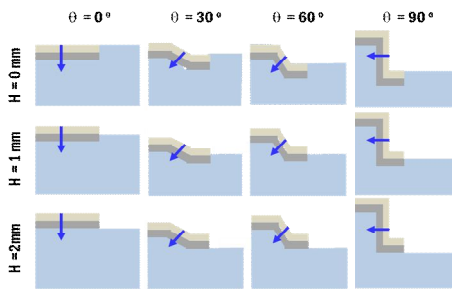
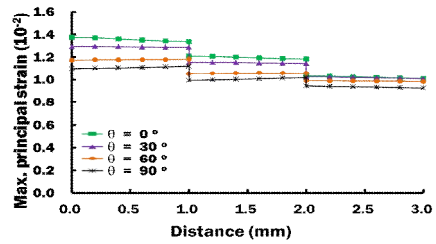


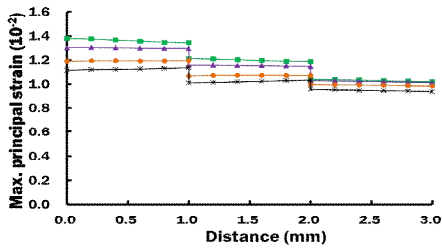
Fig. 15 Influence of the protruded height and the inclined angle on the major principal strain distributions



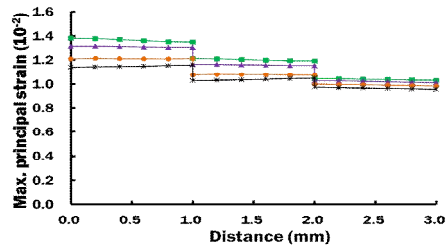
(a) Measured regions and directions



(b) Protruded height = 0 mm



(c) Protruded height = 1 mm

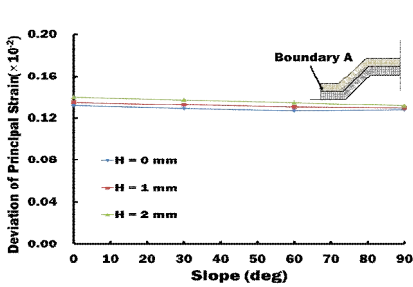


(d) Protruded height = 2 mm

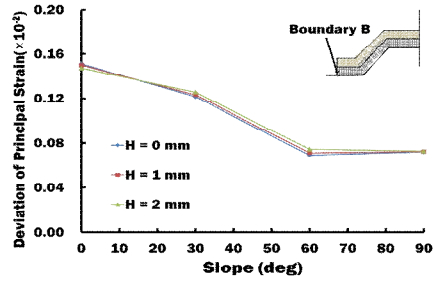
Fig. 16 Influence of the protruded height and the inclined angle on the major principal strain distribution in the thickness direction

열응력 제어층의 형상각도가 0°- 90° 증가 할 때 Boundary A 에서는 Fig.18

와 같이 주변형률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Boundary B 에서는 $0^\circ - 60^\circ$ 까지는 주변형률이 감소하지만 $60^\circ - 90^\circ$ 로 변화할 때에는 주변형률이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 위 결과를 통해서 형상각도가 90° 일 때 주변률 단차가 가장적인 것을 확인하였고 이를 통해서 형상각도가 90° 일 때 변형으로 인한 금형손상이 가장 적은 것으로 예측이된다.



(a) Boundary A



(b) Boundary B

Fig. 17 Influence of the protruded height and the inclined angle on the deviation of the major principal strain in the vicinity of boundary regions

제 5 장 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 경도/잔류응력 및 미세조직 특성 분석

제 1 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마 모 시편 경도 시험

열응력 제어층의 재료혼합비에 따른 제작특성 및 기계적 특성변화를 비교 분석
 하고자 마모시험을 수행하였다. 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모시
 편 전/후의 경도를 측정하기 위하여 경도 측정용 실험 시편으로 30 mm × 30 mm
 × 10 mm 크기의 사각형 형상의 시편을 준비하였다. 경도 시험은 Fig. 18 의 마
 이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여 경도를 측정하였으며 이때 사용된 시험 하
 중은 50 kgf 이며 하중부하 시간은 10 초로 하였다. 경도 측정은 상온에서 각 시
 편당 10 회씩 실시하였으며 경도 시험을 통해 생성되는 압입자국 간의 상호 간섭
 을 피하기 위하여 경도 측정위치는 압입자국에서 2 mm 이상 떨어지도록 하였다.

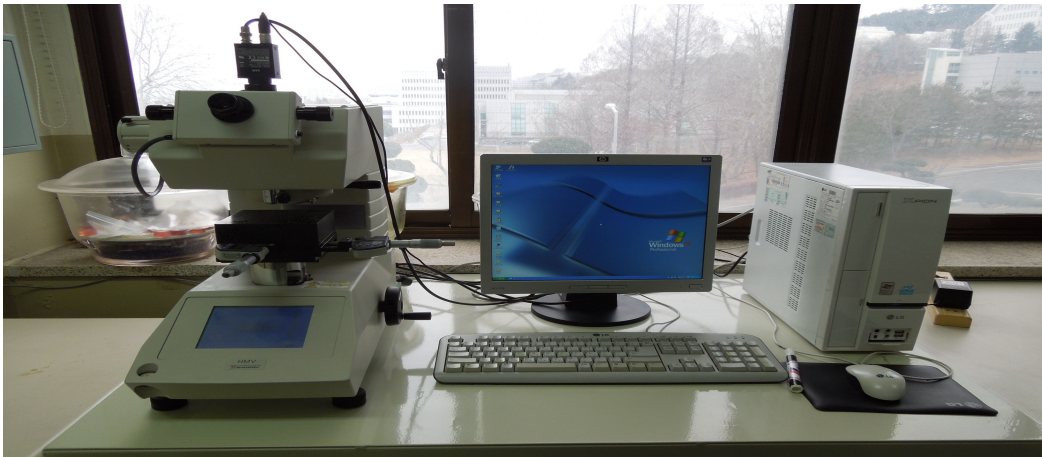
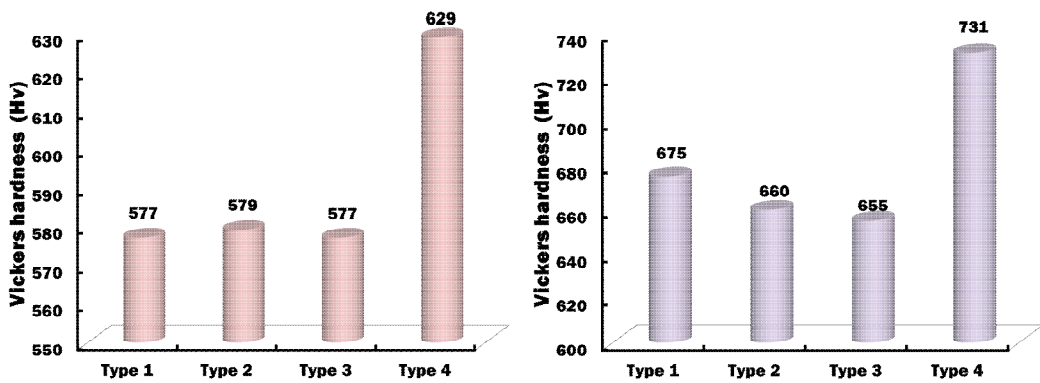


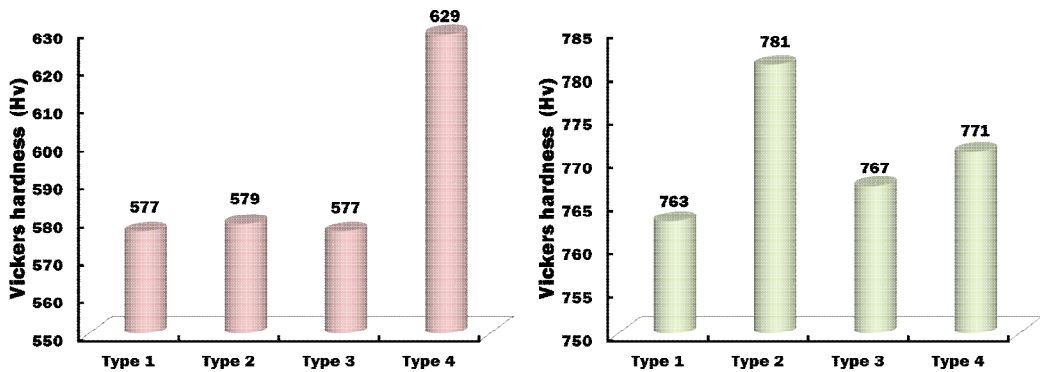
Fig. 18 Micro-vickers hardness tester

Fig. 19 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모 시험 전/후의 시편 표
 면에서의 경도 측정 결과 이다. 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모
 시험 전 경도인 Fig. 19 (a) 을 통해서 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 Type 1

- Type 3 의 경도는 별 차이가 없어 보이지만 Type 4 경우 경도가 높게 나왔다. 이 결과를 통해서 2 Layer 에서 4 Layer 로 다층이 될 경우 경도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 19 (b) 의 고온 마모 시험 후의 경도 결과를 통해서 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 기계적 특성을 비교 할 수 있었다. 이 결과를 통해서 고온 마모 실험 후 Type 1 - Type 3 로 재료 혼합비가 변경될 때 경도값이 감소하는 이유는 열응력 제어층에 사용되는 Stellite 21 이 고온에서의 기계적 특성이 STD 61 우수항우수하기 때문이며 이를 통해서 Type 1 - Type 3 될 때 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21의 체적비가 감소하기 때문이다.



(a) Before high temperature wear test (b) After high temperature wear test
 Fig. 19 Variation of surface hardness of specimen according to wear experiments in the elevated temperature



(a) Before high temperature wear test (b) After high temperature wear test
 Fig. 20 Variation of surface hardness of specimen according to wear experiments in the elevated temperature

Fig. 20 은 마찰에 의한 가공 경화도를 알아보기 위해 마모부의 마모면의 경도를 측정된 결과이다. 이 결과를 통해서 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모 시험후 마모부에서는 고온 마모실험 전 보다 Type 1 는 32.23 %, Type 2 는 34.88 %, Type 3 는 32.92 %, Type 4 는 22.57 % 가 상승한 것을 알 수 있었다.

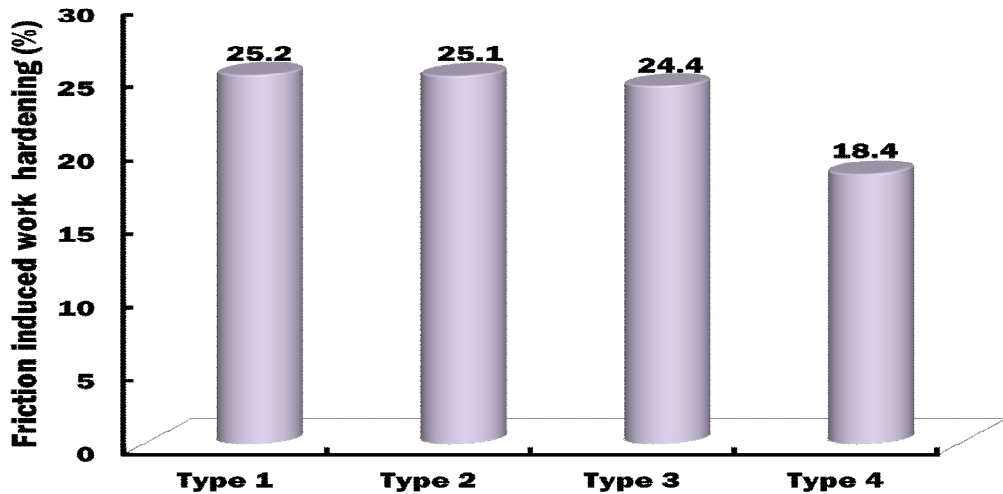


Fig. 21 Friction induced work hardening(FIWH) for different specimens

Fig. 21 은 마모면의 경도 결과를 통해서 다음과 같은 식을 이용하여 구한 마찰 유도 가공 경화 지수이다.

$$FIWH (\%) = \frac{HV_{ws} - HV_{initial}}{HV_{ws}}$$

HV_{ws} 는 마모면의 경도, $HV_{initial}$ 은 마모시험 전 경도이며, 마모면에 대한 경도의 증가를 도출한 수식이다. 이 결과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21의 체적비가 증가 할수록 가공경화가 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Type 4 인 4 Layer 의 경우 가장 낮은 마찰 유도 가공 경화 지수를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해 열응력 제어층을 가지는 고온마모 시편은 고온 마모 실험 전에 비해 실험 후 마모면의 경도가 상승하는 것을 알

수 있었다. 특히 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 재료 체적비가 줄어들수록 마모면의 FIWH가 적은 것을 확인할 수 있었고 고온마모에 의한 경도상승이 가장 높게 나타나 마모 특성이 가장 우수한 재료임을 알 수 있었다.

제 2 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 잔류응력 특성 분석

잔류응력이완은 시편의 경도를 감소시키며 금형의 복합적인 파손에 영향을 준다. 이를 통해서 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 잔류 응력 변화를 확인하고 이를 통해서 잔류응력 특성이 우수한 열응력 제어층 재료를 찾기 위하여 Fig. 22 의 잔류응력 측정 장비를 사용하여 측정하였다. 잔류응력을 측정하기 위하여 30 mm × 30 mm × 10 mm 크기의 잔류응력 측정용 시편을 준비하여 시험을 진행하였다. 잔류응력 측정시 하중은 50 g 이며, 출력은 200 V_{ac} 로 설정하여 잔류응력을 측정하였다. 또한 잔류응력은 각시편당 표면 3회 씩 실시하였으며, 경계층의 중앙부의 경도를 측정하여 비교 하였다.

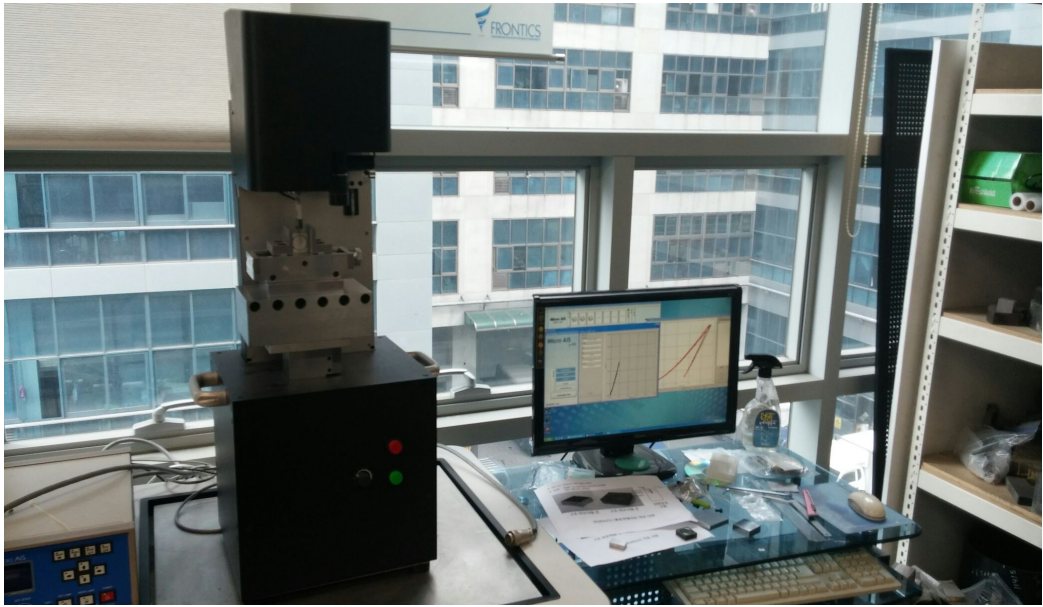


Fig. 22 Residual stress measurement system

Fig. 23 은 열응력 제어층 재료 혼합비에 따른 고온마모 시험 후 열응력 제어층과 기저부 층 경계면에서 발생하는 잔류응력 결과이다. 이결과를 통해 Type 2 일 때 가장 높은 압축 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었고 Type 3 일 때는 압축 응력이 감소하지만 전단응력이 눈에 띄게 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 Type 2 와 Type 4 가장 적은 잔류응력을 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 압축, 인장 잔류응력은 피로강도를 상승시키며, 피로강도가 상승하게 되면 경도는 감소한다. 이 결과를 통해서 가장 적은 잔류응력을 갖는 Type 2 와 Type 4 가 경도특성이 가장 우수하다는 것을 예측할 수 있었다.

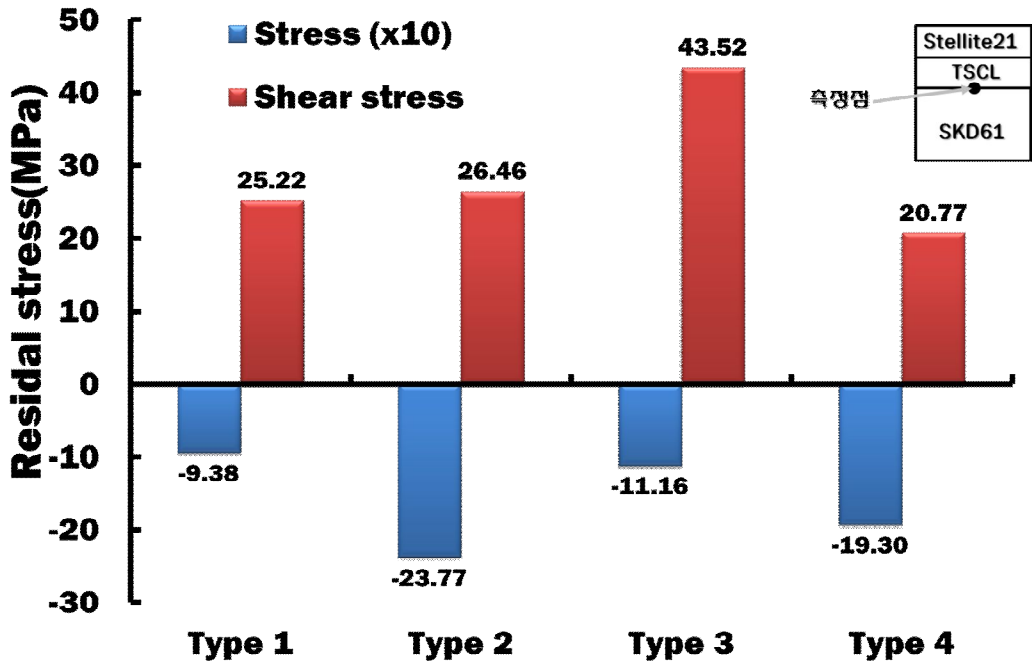


Fig. 23 Influence of the design of in the vicinity of the boundary region

제 3 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 시편 조직 비교

열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 상변화, 탄화물의 크기 및 분포를 관찰하여 제작특성을 비교하였다. 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 상변화 및 경계면 균열 여부를 비교하기 위하여 15 mm × 15 mm × 10 mm 시편을 준비하여 질산, 염화나트륨 용액으로 에칭 하여 시편의 경계에서 발생하는 균열 및 결합 특성을 관찰하였다. 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 시편의 마모면의 특성과 경계층의 결합특성을 비교하기 위하여 Fig. 24 의 일본 Jeol 사의 JSM-7000F 장비인 주사형 전자 현미경 (FE-SEM : Field emission scanning electron microscope) 으로 실험을 진행하였다.



Fig. 24 Field emission scanning electron microscope (FE-SEM)

Fig. 25 (a) 는 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 75 % 일때 마모시험 후 마모면의 조직변화 결과이다. 이 결과 마모면의 일부가 뜯겨 나가 는 마멸이 관찰이 되며, 500 배율로 확인하였을 경우 마모면의 입자가 탈락하는 형상을 보였다. 2,000 배율로 확대했을 때 마모면의 마모시험을 통해 생긴 탄화물들이 고온에서 마모면에 부착되는 흔적이 발생한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 고온마모시험 하드페이징층에서 스틱슬립(Stick-Slip) 현상에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

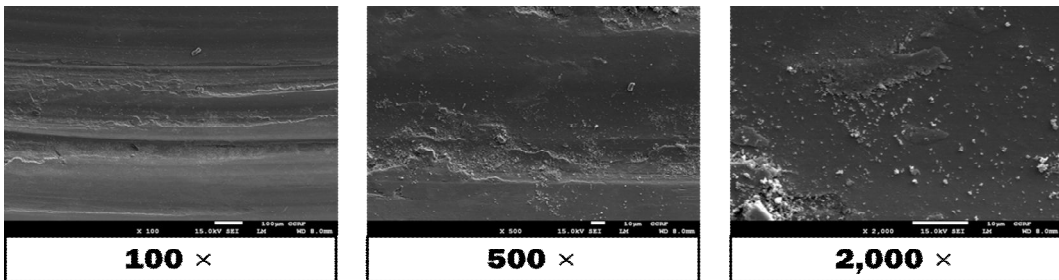
Fig. 25 (b) 는 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 50 % 일때 마모시험 후 마모면의 조직변화 결과이다. 이결과 마모면을 살펴본 결과 깨끗한 마모면을 보였으며, 500 배로 확대했을 때 다른 열응력 제어층의 재료 혼합비에

따른 마모 시험후의 마모면 보다 깨끗한 마모면을 보이는 것으로 알 수 있었다. 2,000 배율로 확대한 결과 마모면에서 미세한 요철의 용융 흔적들이 관찰되었다. 이와 같은 결과를 깨끗한 마모면을 갖는 이유는 다른 열응력 제어층의 재료 혼합비보다는 적은 마모체적을 갖기 때문으로 사료된다.

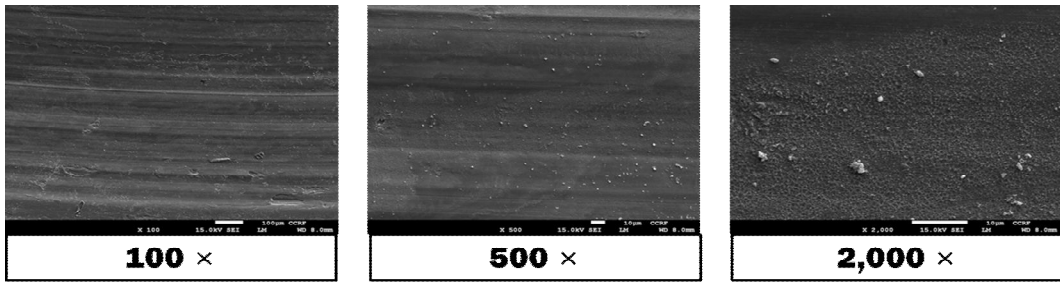
Fig. 25 (c) 는 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 75 % 일때 마모 시험 후 마모면의 조직변화 결과이다. 이 결과 100 배로 확대했을 때 미세한 요철의 용융 흔적이 있지만 깨끗한 마모면을 보인다. 500 배율에서 확대된 사진을 보면, 마모면은 대부분 용융흔적이 발생했음을 알 수 있었다. 2,000 배율로 확대한 결과 고온마모로 생성된 미세한 산화물 입자의 흔적들이 관찰되었다. 이와 같은 결과로 마모면에 미세한 용융이 발생되게 되는데 이러한 미세한 용융이 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 체적비가 높을수록 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 25 (d) 는 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 75 % 일 때 마모 시험 후 마모면의 조직변화 결과로, 100 배율에서 확인한 결과 매우 깨끗한 마모면을 보인다. 500 배율로 확대하여 관찰한 결과 곳곳에서 벗겨져 나간 마멸양상을 제외한 마모면 에는 깨끗한 마모면 양상을 보였다. 2,000 배율로 확대했을 때 마모면 에 벗겨나간 흔적을 제외하고는 열응력 제어층 재료인 Stellite 21 의 체적비율이 75%, 50%, 25% 에 비해서 깨끗한 마모면 을 가지는 것을 관찰할 수 있었다.

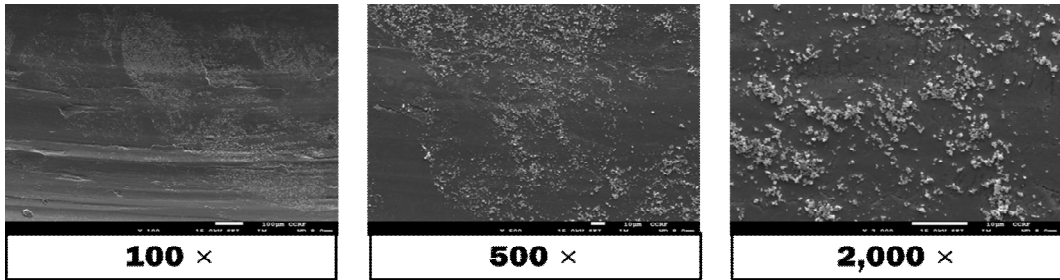
위 결과를 통해서 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 50 % 시편과 4 Layer 로 제작된 시편 등이 우수한 고온 마모 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.



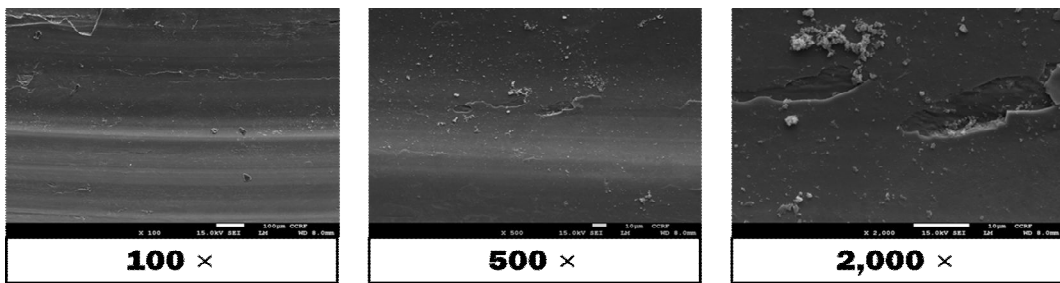
(a) Type 1 specimen



(b) Type 2 specimen



(c) Type 3 specimen

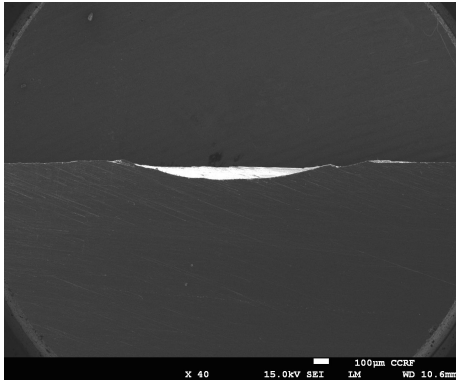


(d) Type 4 specimen

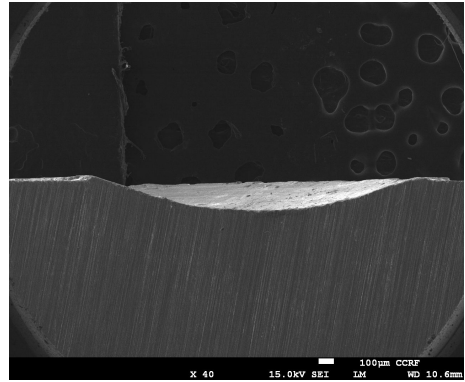
Fig. 25 Morphologies on the worn surface

Fig. 26 은 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모실험후 마모 폭과 마모 깊이에 대한 FE-SEM(Field emission scanning electron microscope) 결과이다. 이를 통해서 얻은 Fig. 27 의 마모 폭 및 마모 깊이에 대한 결과이다. 이결과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가 증가할수록 마모폭도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 동일한 마모 시험 조건 및 시편의 모양인 경우 마모시험에 영향을 주는 요인은 재료특성인 탄성계수, 열전도도, 가공경화 특성 및 경도 등이다. 이런 재료 특성은 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 의 체적비가

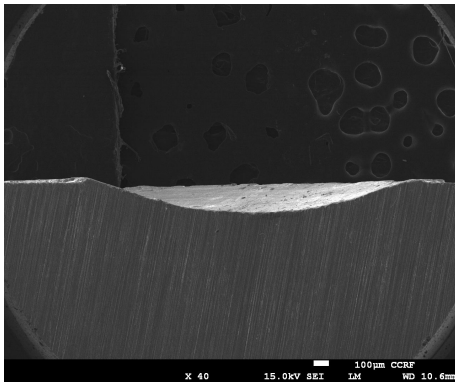
증가하게 되면 재료 특성들이 증가한다. 이 결과를 통해서 재료의 폭이 증가하는 것으로 예측이 되다. 그리고 Type 4 인 4 Layer 층을 보유할 때 2 Layer 층보다 재료 특성들이 우수한 것을 확인할 수 있었다.



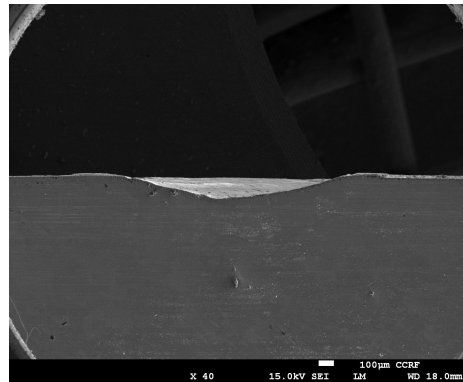
(a) Type 1 specimen



(b) Type 2 specimen



(c) Type 3 specimen



(d) Type 4 specimen

Fig. 26 Morphologies in the vicinity of the worn section

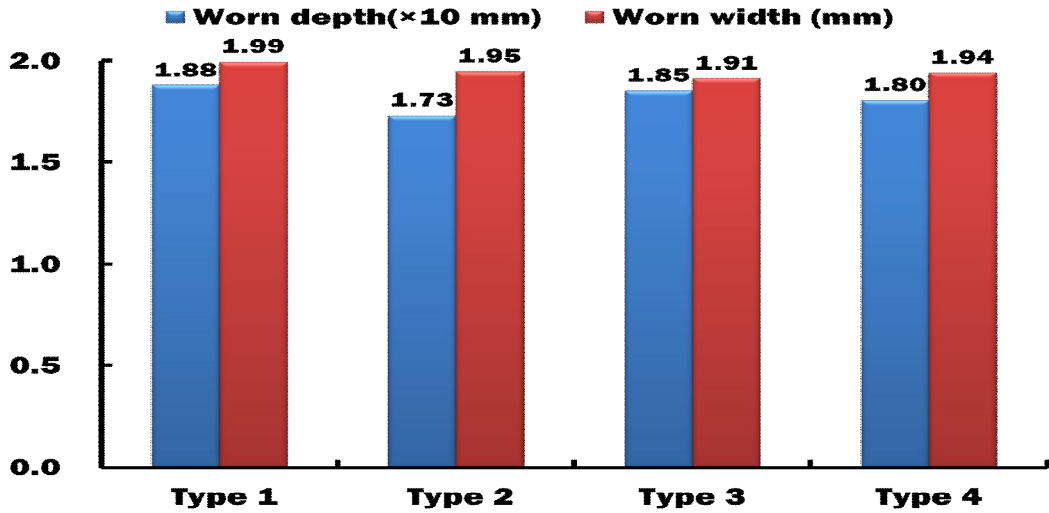
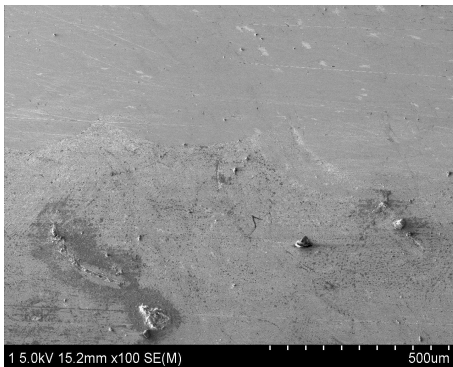
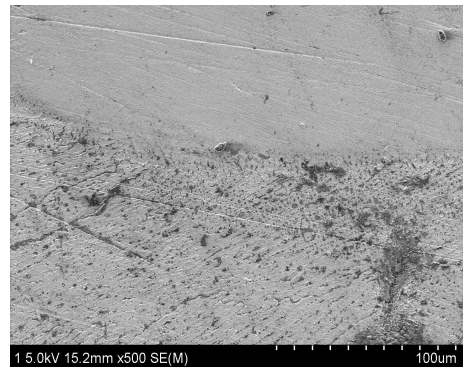


Fig. 27 Worn depth and worn width of specimens for different TSCL designs

Fig. 28 은 마모 시험 후 하드페이싱층 과 열응력 제어층의 전단면의 경계부 FE-SEM (FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscope) 관찰 사진이다. Fig. 28 (a) 는 하드페이싱층 과 열응력 제어층의 전단면의 경계부를 100 배율로 촬영하였으며, 특별한 경계결함은 발견 되지 않았다. Fig. 28 (b) 인 500 배율로 확대한 결과 경계 결함을 없는 것으로 확인되었다.



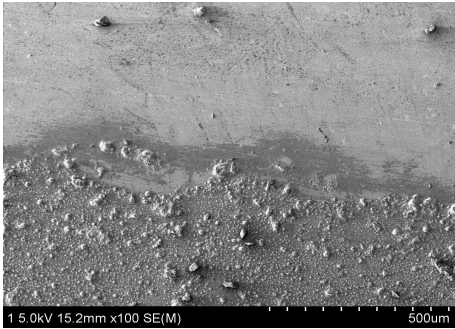
(a) Magnification ratio = 100



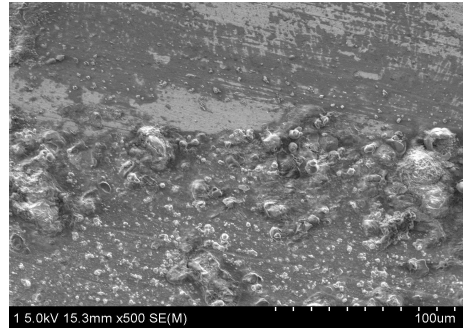
(b) Magnification ratio = 500

Fig. 28 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 1)

Fig. 29 은 마모시험 후 열응력제어층의 재료 혼합비가 Stellite 21 75 % 시편의 전단면에서 STD 61 과 열응력제어층 경계부 촬영 사진이다. Fig. 29 (a) 는 STD 61 과 열응력제어층 경계를 100 배율로 촬영하였으며, 서로 다른 재료의 경계가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 29 (b) 는 500 배율로 까지 결함이 발견되지 않아 접합성에도 문제가 없음을 알 수 있었다.



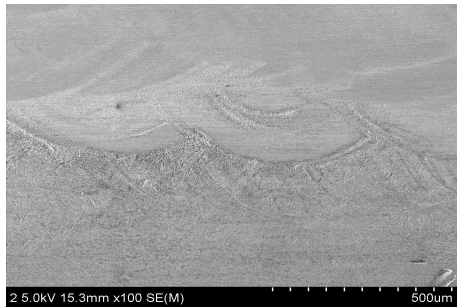
(a) Magnification ratio = 100



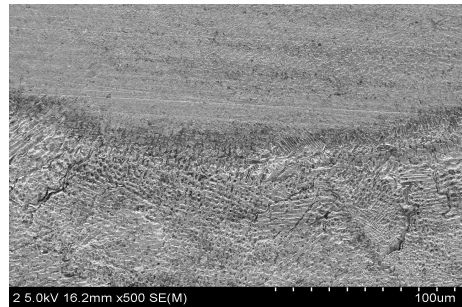
(b) Magnification ratio = 500

Fig. 29 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 1)

Fig. 30 은 마모시험 후 열응력제어층의 재료 구성비가 Stellite 21 50 % 시편의 전단면에서 열응력제어층 과 하드페이싱층의 경계부 촬영 사진이다. Fig. 30 (a) 는 하드페이싱층과 열응력제어층의 경계를 100 배율로 촬영하였으며, 서로 다른 재료의 경계가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 30 (b) 는 500 배율로 까지 결함이 발견되지 않아 접합성에도 문제가 없음을 알 수 있었다.

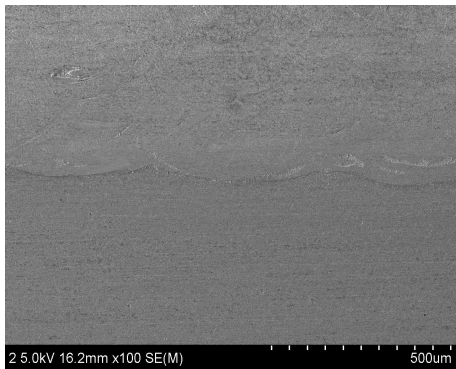


(a) Magnification ratio = 100

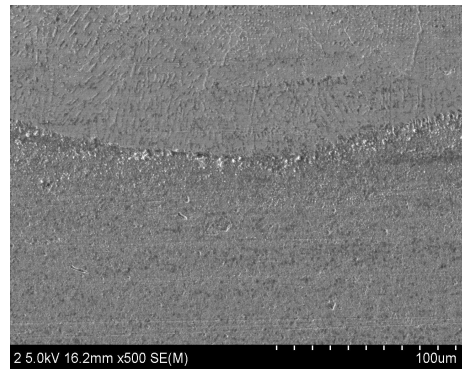


(b) Magnification ratio = 500

Fig. 30 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 2)



(a) Magnification ratio = 100

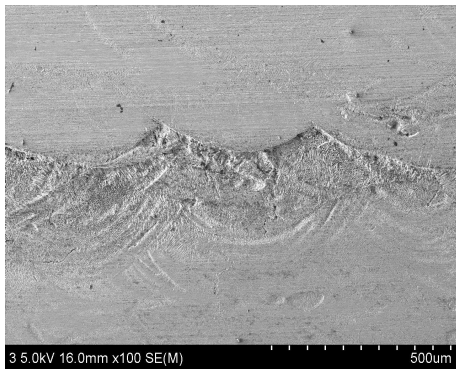


(b) Magnification ratio = 500

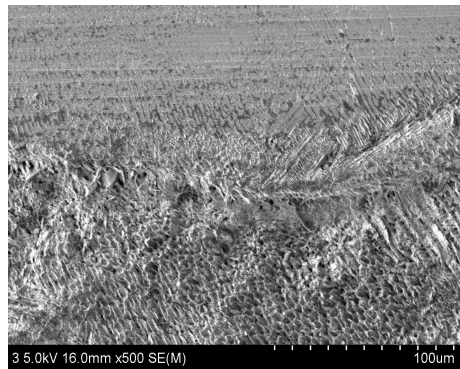
Fig. 31 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 2)

Fig. 31는 마모시험 후 열응력제어층의 재료 혼합비가 Stellite 21 50 % 시편의 전단면에서 STD 61 과 열응력제어층 경계부 촬영 사진이다. Fig. 31 (a) 는 STD 61 과 열응력제어층 경계를 100 배율로 촬영하였으며 경계부에서 적층 형태를 확인할 수 있었다. Fig. 31 (b) 는 500 배율로 까지 확인하였을 때에도 재료의 변형이 뚜렷하게 보였다.

Fig. 32 은 마모시험 후 열응력제어층의 재료 구성비가 Stellite 21 25 % 시편의 전단면에서 열응력제어층 과 하드페이싱층의 경계부 촬영 사진이다. Fig. 32 (a) 는 하드페이싱층과 열응력제어층의 경계를 100 배율로 촬영을 통해서 서로 다른 재료의 결정체의 배열을 관찰할 수 있었다. Fig. 32 (b) 는 500 배율로 결정입계 확인한 결과 재료의 결정입자 사이의 경계를 확인할 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100



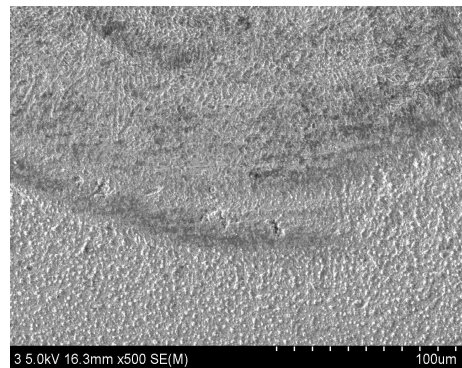
(b) Magnification ratio = 500

Fig. 32 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 3)

Fig. 33 은 마모시험 후 열응력제어층의 재료 구성비가 Stellite 21 25 % 시편의 전단면에서 STD 61 과 열응력제어층 경계부 촬영 사진이다. Fig. 33 (a) 는 STD 61 과 열응력제어층 경계를 100 배율로 촬영하였으며, 이를 통해서 경계부 부분에서 균열이 발생하는 문제가 발생하였다. Fig. 33 (b) 는 500 배율로 까지 확인하였을 때에도 열응력 제어층의 결정입자 형태를 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100

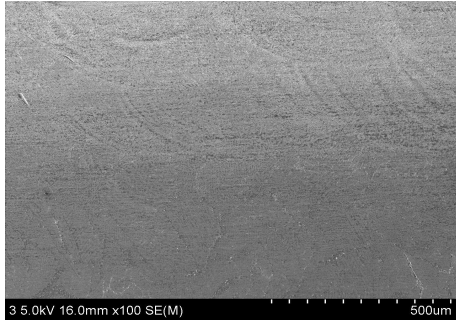


(b) Magnification ratio = 500

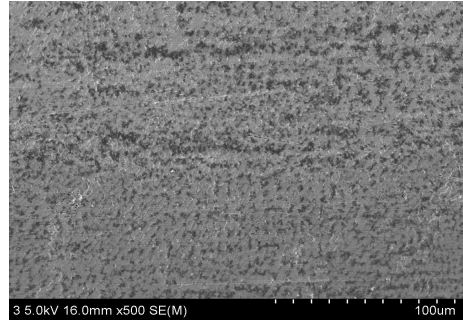
Fig. 33 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 3)

Fig. 34 은 마모시험 후 열응력제어층의 재료 구성비가 4 Layer 시편의 전단면

에서 열응력제어층 과 하드페이싱층의 경계부 촬영 사진이다. Fig. 34 (a) 는 하드페이싱층과 열응력제어층의 경계를 100 배율로 촬영하였으며, 서로 다른 재료의 경계를 통해서 결정체의 구조를 확인할 수 있었다. Fig. 34 (b) 는 500 배율로 까지 확인하였을 때에도 열응력 제어층의 결정입자 형태를 알 수 있었다.



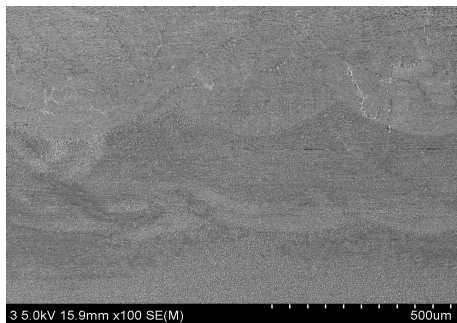
(a) Magnification ratio = 100



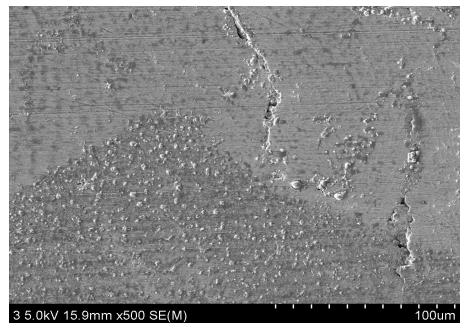
(b) Magnification ratio = 500

Fig. 34 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the hardface layer and TSCL (Type 4)

Fig. 35 은 마모시험 후 열응력제어층의 재료 구성비가 4 Layer 시편의 전단면에서 열응력제어층 과 기저부 경계부 촬영 사진이다. Fig. 35 (a) 는 열응력제어층과 기저부의 경계를 100 배율로 촬영하였으며, 서로 다른 재료의 경계를 통해서 결정체의 구조를 확인할 수 있었다. Fig. 35 (b) 는 500 배율로 까지 확인하였을 때에도 열응력제어층과 기저부층 경계면 부위에서 균열을 확인되었다.



(a) Magnification ratio = 100



(b) Magnification ratio = 500

Fig. 35 Morphologies in the vicinity of the boundary region between TSCL and the substrate (Type 4)

제 4 절 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 EDS (Energy Electron Microscopy) 성분 분석

열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 하드페이싱층 과 열응력 제어층의 경계면 및 열응력 제어층 과 기저부 경계면 의 시편 구조 및 화학 조성비 분포 변화를 비교하기 위하여 EDS (Energy Electron Microscopy) 분석을 수행하였다. 이때 사용된 장비는 Fig. 36 의 LV-SEM (Low Vacuum Scanning Electron Microscope) 장비이며, 측정용 시편크기는 15 mm × 15 mm × 10 mm (높이)이다.

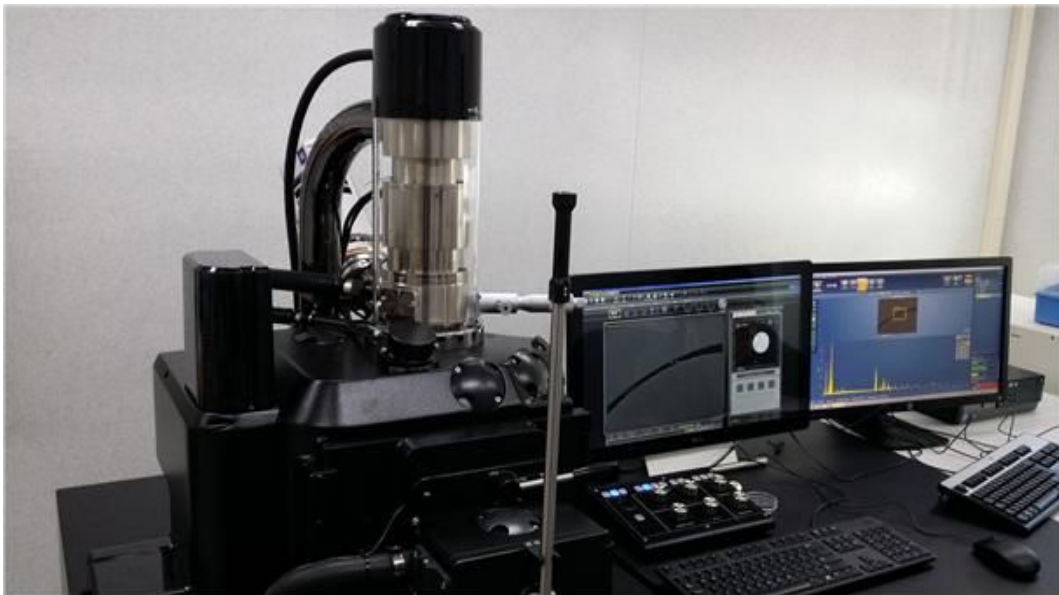
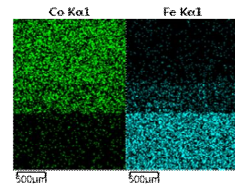
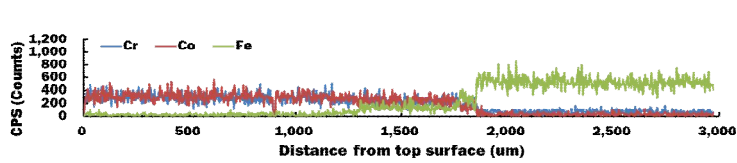


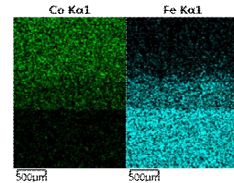
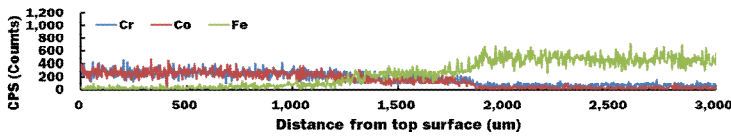
Fig. 36 Low vacuum scanning electron microscope

Fig. 37 는 열응력 제어층의 재료혼합비에 따른 각각의 경계층에서 변화하는 화학 조성비를 나타낸 것이다. 이결과 열응력제층과 기저부 층의 경계면에서 Type 1 이 급격한 화학조성비변화를 보이고 Type 3 에서는 하드페이싱층과 열응력제어층의 경계면에서 급격한 화학 조성비를 보이는 것을 확인하였다. Type 2 의 경우 Type 1 과 3 와는 달리 화학 조성비가 매끄러운 선형적인 경사를 형성하였다. 또한 2 Layer 인 Type 2 보다는 4 Layer인 Type 4 가 우수한 선형적

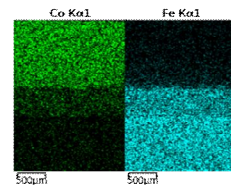
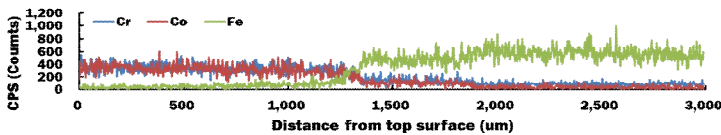
인 경사각을 가지면서 화학 조성비가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 선형적인 화학조성비 변화를 이루는 열응력 제어층 혼합비가 하드페이싱층과 기저부층 사이에서 발생하는 열적 물성 차이로 인해 발생하는 결함 및 손상을 방지에 우수한 것으로 예측 된다. 열응력 제어층의 혼합비에 따른 열물성과 EDS 분석을 통한 화학성 조성비 비교 변화를 바탕으로 하드페이싱층과 기저부층의 열물성 차이를 보완할 수 있는 재료 혼합비는 Type 2 와 Type 4 의 혼합비가 가장 우수한 것을 확인할 수 있었다.



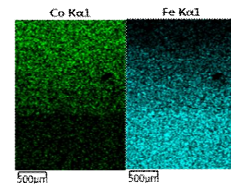
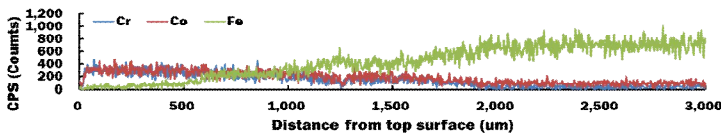
(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3



(d) Type 4

Fig. 37 Results of line and area analyses

제 6 장 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 충격 특성 분석

제 1 절 하드페이싱된 열간금형강 시편 제작 및 충격 실험

1. 하드페이싱된 열간금형강 시편 제작

Cobalt 계로 적층된 하드페이싱층이 열간성형 공정중 낙하 충격을 받을 경우 발생하는 결함파손을 고찰하고자 Fig. 38 와 같은 과정으로 충격 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 크기는 26 mm × 46 mm × 79 mm (높이) 이며, 하드페이싱층 재료는 Cobalt 계인 Stellite 21 과 Stellite 6 로 하였다. 하드페이싱층의 적층 두께는 2 mm - 4 mm 가 되도록 하였다. 제작된 시편이 충격시험에 용이하게 수행될 수 있도록 경면에 연마가공을 통하여 적층면을 1 mm 연마하였고, 시편에 4 면에 대하여 연마가공을 수행하여 최종적인 시편 크기를 25 mm × 45 mm × 78 mm (높이) 가 되도록 하였다.

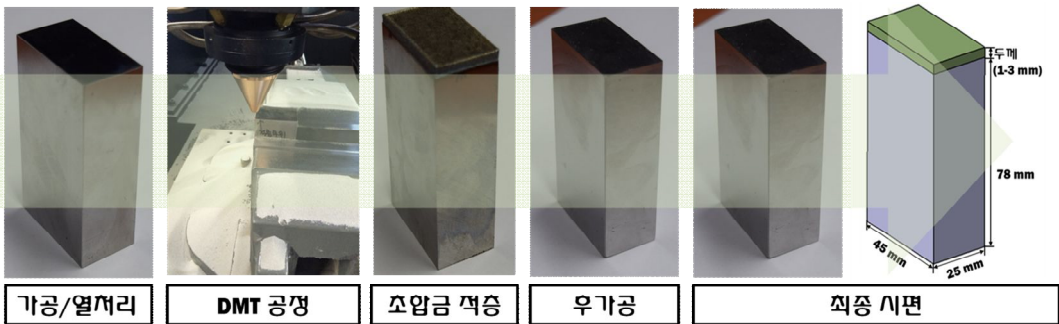


Fig. 38 Manufacturing procedure of the specimen for drop impact test

2. 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 충격 실험

Stellite 21 과 Stellite 6 재료로 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 충격 특성 분석은 복합재료 충격 시험에서 가장 많이 사용되는 낙하 하중 (Drop

weight) 방식을 이용해 충격 시험을 수행하였다. 충격 낙하 하중을 측정하기 위하여 Fig. 39 의 충격실험 기기 충격 헤드 상부에 2 ton 로드 셀 (Load Cell)을 부착하였다. 총 충격 시험은 1,000을 실시하였고 충격 시험 100 회 완료시 마이크로 스코프 현미경을 통해서 시편의 외관 형상을 관찰하였다. 충격실험시 충격 헤드와 시편의 충돌시간이 매우 짧은 시간에 완료되기 때문에 시편에 가해지는 충격 하중에 따른 변화 거동을 관찰하기 위하여 Fig. 39 과 같은 초당 10,000 컷을 촬영할 수 있는 고속카메라를 설치하여 충격 시험을 모습을 촬영하면서 충격 시험을 진행하였다.

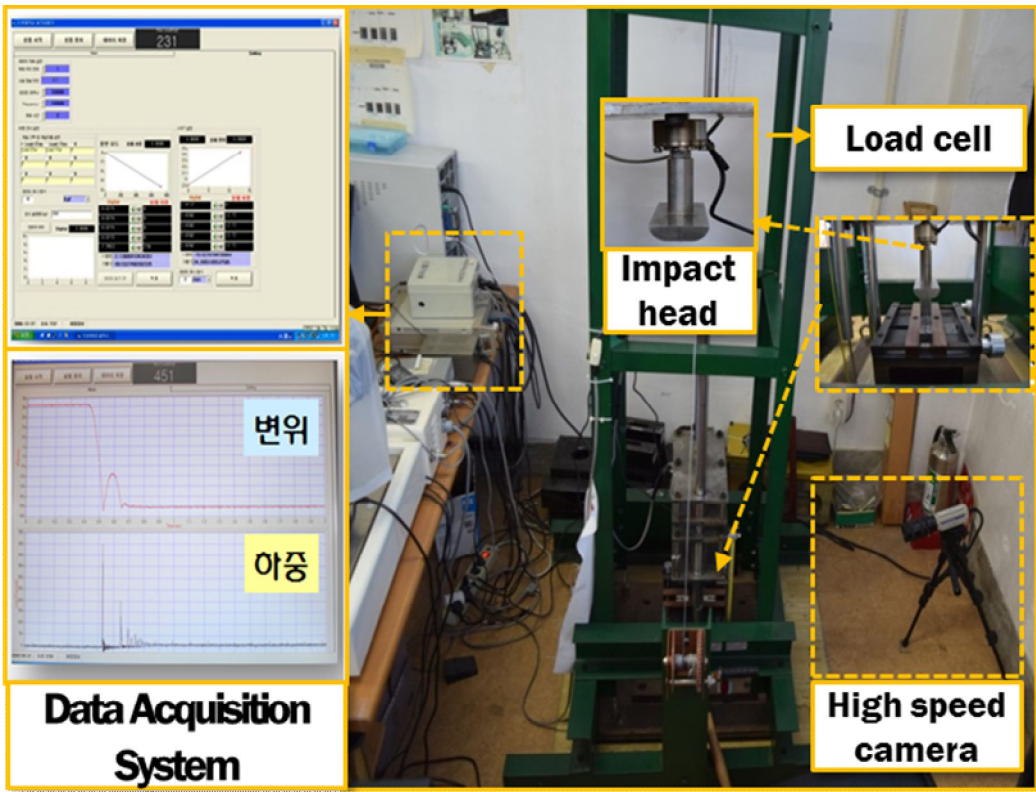


Fig. 39 Set-up of drop impact test

제 2 절 하드페이싱된 열간금형강 시편에 대한 제작 특성 분석

Fig 40 과 같이 후가공전 적층 시편들에 대하여 적층 특성 및 균열 발생에 대하여 고찰하였다. 하드페이싱층 적층 재료인 Stellite 21 인 경우 적층 두께에 상관 없이 시편에서 적층 균열이 발생되지 않았지만 Stellite 6 로 적층된 시편의 경우 후가공전 적층 두께 3 mm 와 4 mm 시편에서 적층 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해서 열처리된 STD 61 시편위에 Stellite 6을 적층할 경우 적층두께가 높아질수록 적층 균열 발생 가능성이 높아지는 것을 확인하였다.

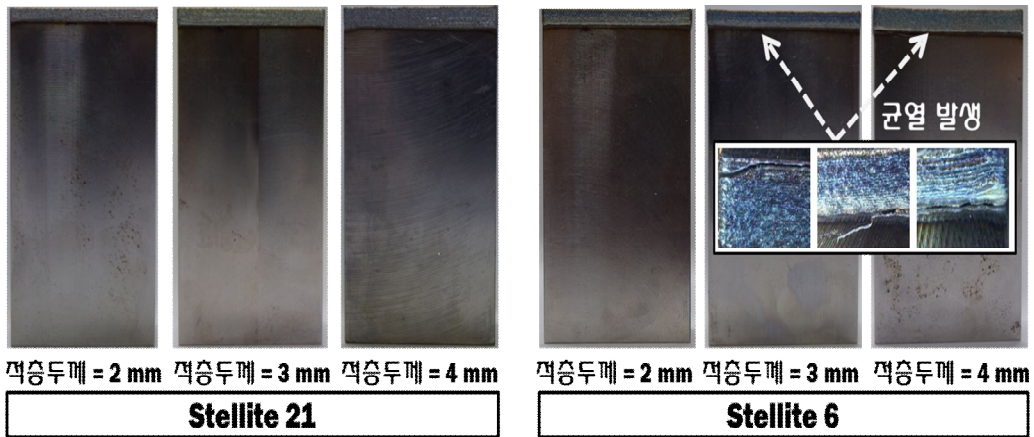


Fig. 40 Formation of cracks in the vicinity of joined regions

제 3 절 반복 충격하중에 따른 하드페이싱층을 가진 열간금형강 시편 하중 및 외관 형상 특성 변화 분석

Fig. 41 은 반복 충격 횟수에 따른 충격 하중 변화 결과 이다. 반복 충격 하중에 따른 하중변화를 비교한 결과 하드페이싱층 재료와 두께에 관계없이 충격 횟수가 증가하여도 충격하중은 거의 유사하게 나타났다. 또한 1,000 회 반복 하중을 부가하여도 실험에 사용된 시편에서는 파손이나 균열이 발견되지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 광학현미경을 이용하여 각 시편별 외관형상 변화 및 경계층에서 결함이 발생하는지 Fig. 42 과 같이 관찰하였다. 이 결과를 통해서 1,000

회 충격하중 부가되는 경우 시편의 외관형상 변화는 없는 것으로 확인되었고 경계층 부위에서는 외관 결함여부를 확인한 결과 하드페이싱층 재료 및 적층 두께 변화에 따른 외관 결함이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 위 결과들로부터 충격 시편으로 제작된 하드페이싱을 갖는 열간 금형강은 반복적인 충격 하중이 부가되는 경우에도 적층 경계면 및 외관 형상 균열/결함이 발생하지 않음 통해서 내충격 특성이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

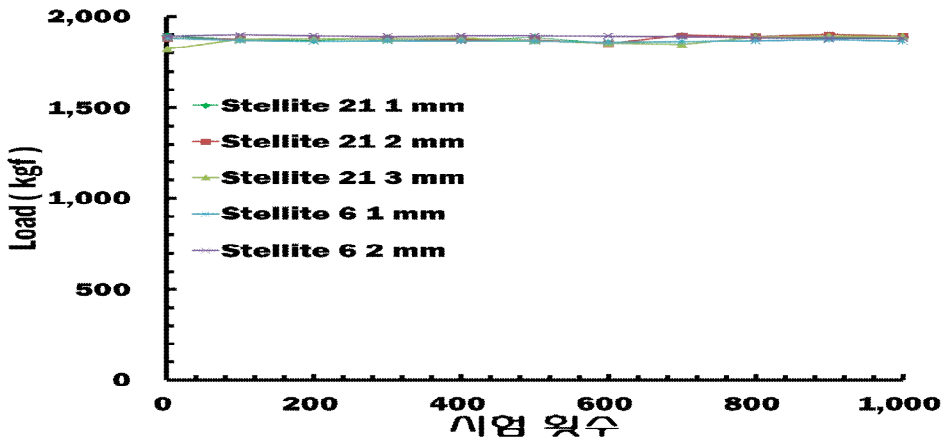


Fig. 41 Variation of impact load according to number of impact

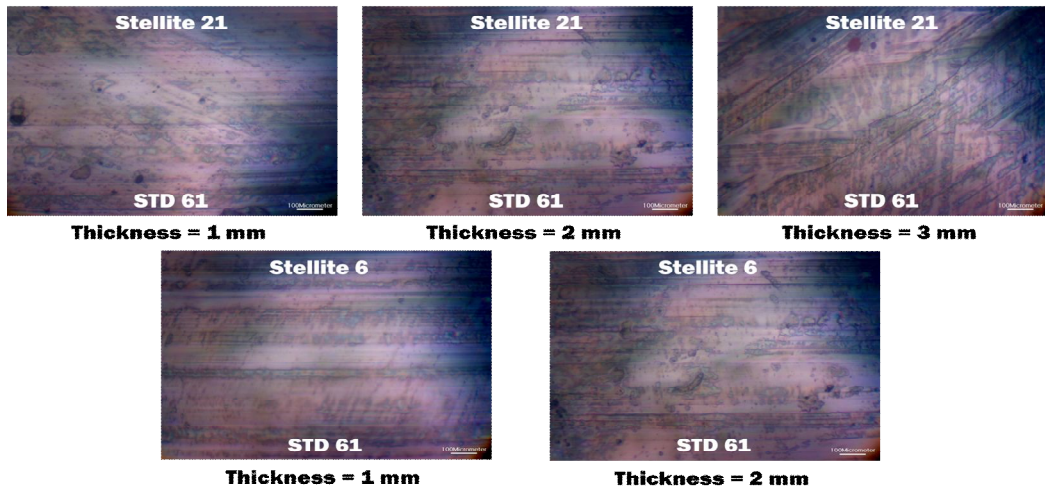


Fig. 42 Morphologies in the vicinity of the boundary region between the deposited layer and the substrate

제 4 절 반복 충격하중에 따른 적층 시편의 내부 균열/결함 특성 분석

Fig. 45 은 1,000 회 반복 충격이 부가되는 경우에 시편 내부에서 발생하는 결함 특성 분석 결과이다. 하드페이싱층 재료로 사용된 Stellite 21 재료의 경우 적층 두께에 따라 비교한 결과 적층 두께 1 mm 와 3 mm에서 균열이 발생되었고 균열들은 하드페이싱층 과 기저부층 경계부 부위에서 나타났다. 하지만 적층 두께 2 mm 에서는 하드페이싱층 과 기저부층 경계부 부위에서 균열 등이 발견되지 않았다. 또한 하드페이싱층 재료가 Stellite 6 인 경우 적층 두께 1 mm 와 2 mm에서 하드페이싱층 과 기저부층의 경계면 부위에서 미세 균열이 발견되었다. 위 결과 등을 통해서 반복 충격하중이 부가될 때 내부 균열/결함이 발생되지 않고 내충격성이 우수한 재료는 Stellite 21 이며 적층 두께는 2 mm 형성 할 때 가장 좋은 것이라는 것을 알 수 있었다.

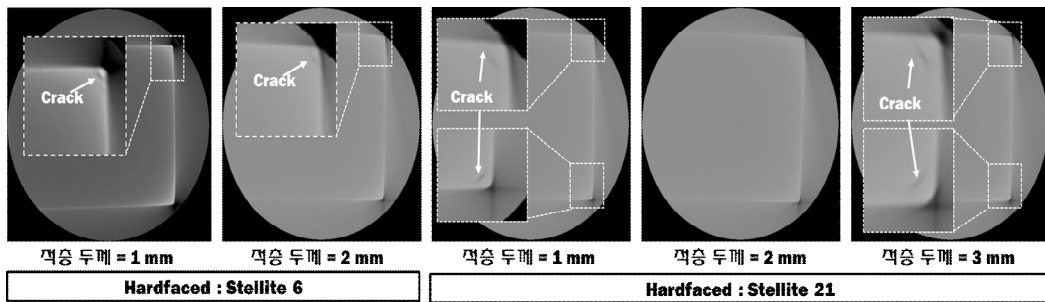


Fig. 43 X-ray CT images of specimens in the vicinity of joined regions

제 7 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 유한요소 해석을 수행하여 열응력제어층의 혼합비 및 형상각도와 돌출높이 변화 따른 온도/열응력/변형률 분포 변화 분석을 수행하였다. 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모 시험후의 경도, 잔류응력, SEM, EDX 분석을 수행하였으며 하드페이싱층 적층 재료 및 두께에 따른 충격 낙하 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

첫째, 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 열전달/열응력 해석을 수행하여 온도 및 열응력/변형률 분포 결과를 비교 분석하여 열응력제어층의 재료 혼합비에 따른 열물성인 열팽창계수 차이로 인하여 열응력/변형률 단차가 발생하는 것을 확인할 수 있었고 이 결과를 통해서 Type 1 과 Type 4 가장 우수한 열응력 제어층의 재료 혼합비로 선정하였다.

둘째, 열응력 제어층의 돌출 높이 및 형상각도에 따른 열전달/열응력 해석을 수행하여 형상각도 및 돌출높이가 열간금형강에 미치는 경향을 분석할 수 있었고 이를 통해서 열응력 제어층의 형상각도가 증가하면 주변형률이 감소하고 단층 차이도 감소경향을 보인을 확인할 수 있었다. 또한 형상각도가 90° 일 때 주변률 단차가 가장 적은 것을 확인하였고 이를 통해서 형상각도가 90°일 때 변형으로 인한 금형손상이 가장 적은 것으로 예측이 된다.

셋째, 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 고온 마모시험에 대하여 경도를 비교한 결과 열응력 제어층의 재료인 Stellite 21 재료 비중이 줄어들수록 마모면의 FIWH가 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 고온마모에 의한 경도상승이 가장 높게 나타나는 Type 4 가 가장 우수한 마모 특성을 보이는 재료임을 알 수 있었다.

넷째, 열응력 제어층의 재료 혼합비에 따른 경계층에서의 SEM 촬영 결과를 바탕으로 Type 1 과 Type 4 의 균열을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해서 4 Layer 의 경우 열응력 제어층의 재료 혼합비로 적합하나 제작특성이 어렵다는 것을 알 수 있었다.

다섯째, 충격 낙하 시험 1,000 회 실시한 결과 하드페이싱 재료 및 적층 두께

에 따른 하중 변화는 없지만 내부 균열 검사 결과 하드페이싱층을 Stellite 21 로 2 mm 적층한 경우를 제외한 모든 시편에서 내부 균열이 발생한 것을 확인하였고 이 결과를 통해서 내충격성이 우수한 재료 Stellite 21 이며 적층두께 2 mm 임을 알 수 있었다.

여섯째, 실험 결과를 종합적으로 판단한 결과 열응력 제어층 혼합비는 Stellite Type 1 과 Type 4 일때가 가장 우수하지만 SEM 분석을 통해서 과 Type 4 경우 결함이 발생하였을 확인함으로써 제작 특성까지 고려할 경우 열응력 제어층 재료 혼합비로는 Type 1 가 가장 우수한 것을 도출할 수 있었다. 하드페이싱 재료 및 적층 두께에 따른 낙하 충격 실험을 통해서는 하드페이싱 재료가 Stellite 21 이고 적층 두께가 2 mm 일 때 가장 우수한 내충격성을 갖는 것을 알 수 있었다.

추후, 열간 성형 공정에서의 충격으로 인한 파손을 방지할 수 있는 손상저감층 설계 할 수 있도록 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

첫째, 낙하 충격 실험을 통해 열응력 제어층을 가진 시편 하중 변화 및 내부 균열 특성 분석에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

둘째, 손상저감층으로 가장 알맞은 재료 선정 및 손상저감층 설계에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

셋째, 손상저감층의 두께 및 위치 선정 과 충격/열피로 특성이 우수한 손상저감층 설계/제작 연구가 이루어져야 할 것이다.

넷째, 손상저감층을 가지는 영역 별 충격 특성분석 및 설계에 따른 열피로 특성 분석에 대한 연구가 이루어져야한다.

REFERENCES

1. Hoel M., Kverndokk S., Depletion of fossil fuels and the impacts of global warming. *Resource and Energy Economics* 18(2), pp. 43-54, 1996.
2. Park C. W., Kwon K. S., Kim W. B., Min B. K., Park S. J., Sung I. H., Yoon Y. S., Lee K. S., Lee J. H., Seok J. W., Energy consumption reduction technology in manufacturing - A selective review of policies, standards, and research., *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10(5), pp.151-173, 2009.
3. Shivpuri R., Semiatin S.L., in: D. Olsen (Ed.), *Friction lubrication and wear technology*, ASM Handbook Vol. 18, ASM, Materials Park, OH, pp. 621 - 48, 1992.
4. Summerville E., Venkatensan K., Subranmanian C., Wear processes in hot forging press tools, *Materials & Design* 16(5), pp. 289-294, 1995.
5. Terceelj M., Perus I., Turk R., Suitability of CAE neural networks and FEM for prediction of wear on die radii in hot forgingin, *Tribology International*, 36, pp.573-583, 2003.
6. Kim D. H., Lee H. C., Kim B. M., Kim, K. H., Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forgingin processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 166, pp.372-380, 2005.
7. 박장익, 윤영철, 김태형, 김달중, 피로해석에 기초한 다이캐스팅 금형의 수명향상을 위한 형상 최적화, *한국공작기계학회 2009 추계학술대회논문집*, pp. 291-296, 2009.
8. Radu I., Li, D. Y., Investigation of the role of oxide scale on Stellite 21 modified with yttrium in resisting wear at elevated temperatures, *Wear*, 259, pp.453-458, 2005.
9. Shivpuri R., Chu Y. L., Venkatesan K., Conrad J. R., Sridharan K., Shamim M., An evaluation of metallic coatings for erosive wear resistance in die casting applications, *Wear*, 192, pp.49-55, 1996.
10. Mitterer C., Holler F., Ustel F., Heim D., Application of hard coating in aluminum die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour, *Surface & Coatings Technology*, 125, pp.233-239, 2000.
11. 이진호, 김동진, 김병민, 김호관, 열연화 현상을 고려한 열간 단조 금형의 마멸 해석, *한국소성가공학회지*, 제 9권, 제 1호, pp. 43-51, 2000.
12. Farhani M., Amadeh A., Kashani H., Saeed-Akbari A., The study of wear resistance of a hot forging die, hardfaced by a cobalt-base superalloy, *Materials Forum*, 30, pp, 212-218, 2006.

13. Ahn D. G., Kim S. H., Lee S. Y., Lee C. H., Wear characteristics of hardfaced surface via rapid tooling process, Proceedings of Spring Annual Meeting of KSME for Design and Manufacturing Sector, pp. 116-117, 2010.
14. Miller, A. E., Maijer D. M., Investigation of erosive-corrosive wear in the low pressure die casting of aluminum A356, Materials Science & Engineering A, 435-436, pp. 100-111, 2006.
15. Navisek B., Panjan P., Gorenjak F., Improvement of hot forging manufacturing with PVD and DUPLEX coatings, Surface & Coatings Technology, 137(2-3), pp. 255-264, 2001.
16. Kashani H., Amadeh A., Vatanara M. R., Improvement of wear resistance of hot working tool steel by hardfacing Part 2 - Case study, Materials Science and Technology 24(3), pp. 356-360, 2008.
17. Kohopää J., Hakonen H., Kivivuori S., Wear resistance of hot forging tools surfaced by welding, Wear, 130, pp. 103-112, 1989.
18. Ming Q., Lim L.C., Chen Z. D., Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys, Surface & Coatings Technology, 106, pp. 174-182, 1998.
19. Mingxi Li, Yizhu H., Guoixong S., Microstructure and wear resistance of laser clad cobalt-based alloy multi-layer coatings, Applied surface science, 230, pp. 201-206, 2004.
20. Kashani H., Amadeh A., Ghasemi H. M., Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies, Wear 262, pp. 800-806, 2007.
21. Arnold J. Volz R., Laser powder technology for cladding and welding, Journal of Thermal Spray Technology, 8(2), pp. 243-248, 1999.
22. K. H. Stern, "Metallurgical and Ceramic Protective Coatings," Chapman & Hall, pp.74-111, 1996.
23. Yellup. J. M, "Laser cladding using the powder blowing technique," Surface and Coatings Technology, 71, pp.121-128, 1995.
24. S. Q. Wang, M. X. Wei, F. Wang, Y. T. Zhao, "Transition of elevated-temperature wear mechanisms and the oxidative delamination wear in hot-working die steels," Tribology International, 43, pp.577-584, 2010.
25. U. De. Oliveira, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson, "Residual stress analysis in Co-based laser clad layers by laboratory X-rays and synchrotron diffraction techniques," Surface and Coatings technology, 201, pp.533-542, 2006.

26. Li. Mingxi, He. Yizhu, Sun. Guoxiong, "Microstructure and wear resistance of laser clad cobalt-based alloy multi-layer coatings," *Applied Surface Science*, 230, pp.201-206, 2004.
27. Henry K, Knut. P, Joana. R. K, Frank. V, "Residual stresses in steel specimens induced by laser cladding and their effect on fatigue strength," *Physick Procedia*, 39, pp.354-361, 2012.
28. Ming. Q, Lim. L. C, Chen. Z. D, "Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys," *Surface and Coatings Technology*, 106, pp.174-182, 1998.
29. Chattopadhyay. A. K, Chollet. L, Hintermann. H. E, "Experimental investigation on induction brazing of diamond with Ni-Cr hardfacing alloy under argon atmosphere," *Journal of Materials science*, 26, pp.5093-5100, 1991.
30. Sapate. S. G, Rama Rao. A. V, "Effect of carbide volume fraction on erosive wear behaviour of hardfacing cast irons," *Wear*, 256, pp.774-786, 2004.
31. Amado. J. M, Tobar. M. J, Alvarez. J. C, Lamas. A, Yáñez. A, "Laser cladding of tungsten carbides (Spherotene®)hardfacing alloys for the mining and mineral industry," *Applied Surface Science*, 255, pp.5553-5556, 2009.
32. Bayhan. Y, "Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare," *Tribology International*, 39, pp.570-574, 2006.
33. Müller, S., Pries, H., Dilger, K., Ocylok, S., Weisheit, A., and Kelbassa, I., 2011, "Applying Functionally Graded Materials by Laser Cladding: a Cost-effective Way to Improve the Lifetime of Die-casting Die," *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 235~239.
34. Jeong, J. S. and Shin, K. H, 2013, "Fabrication of Functionally Graded Materials between P21 Tool Steel and Cu by Using Laser-Aided Layered Manufacturing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp.61~66.
35. Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2007, "Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity," *Trans. AMSE Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, Issue 5, pp. 617~623.

감사의 글

부족한 저를 지도해주시고 긍정적이고 자신감을 가지고 모든 일을 해결해 나갈 수 있도록 도와주시며 대학원생활을 통해 나 자신이 발전할 수 있도록 해주시는 안동규 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한 학위 논문을 작성해서 완성하기까지 충고와 심사하시느라 고생하신 조규재 교수님과 한길영 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

제가 전산설계실험실에서 생활하면서 자주는 못 뵙지만, Home coming day 때마다 조언을 아낌없이 해주신 이상훈과 김민수 선배님들에게 감사의 말씀을 드립니다. 학술대회에서 만날 때 조언을 해주신 김진석 선배님, 저희의 진로에 대한 걱정과 조언을 해주신 변경원 선배님, 문경제 선배님, 김대원 선배님, 자주는 못 뵙지만 항상 만날 때 진로에 관해 조언을 해주신 정광원 선배님, 실험실 관련일과 진로에 대한 조언을 해주신 김현우 선배님, 남경흠 선배님, 박승화 선배님, 송동한 선배님, 언제나 만나면 항상 밝은 미소로 대해주신 김세훈 선배님, 박민우 선배님, 조창규 선배님, 선향선 선배님, 안영수 선배님 연구 관련 궁금사항과 조언 및 주말에 실험실 찾아와서 충격실험, 구조해석등을 지도해준 정우철 선배님 과 박나라 선배님 항상 실험실에 생활을 잘하고 부족함 없이 지낼 수 있도록 도와준 이호진 선배님에게 모두 진심으로 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다.

실험실에 들어와서 잘 적응해 나가고 연구관련 사항들을 알려주면서 무엇이든 잘해나가고 습득할 수 있도록 조언과 격려를 아낌없이 도와준 이호진 선배에게 진심으로 감사하고 실험실에서 잘 적응해 나가는 동인, 용훈, 재국이와 함께 연구를 진행하고 즐거운 시간들을 함께 보낼 수 있어서 행복했고 이 시간들이 소중한음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 대학원생활 하는 동안 항상 응원해주시고 믿음을 보내주신 아버지,

어머니, 형, 형수, 여동생 그리고 힘들 때 항상 나를 위로해준 친구들 진심으로
내가 잘될 수 있도록 기도와 조언을 해준 교회 선배·후배님들 모두에게 진심으
로 감사드립니다.

2016년 6월
국 내 선