



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2014년 2월
석사학위논문

열간금형 수명향상을 위한
열간금형 표면 하드페이싱 기술
개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

박 나 라

2014년 2월

석사학위논문

열간금형수명향상을위한열간금형표면하드페이싱기술개발

박
나
라

열간금형 수명향상을 위한 열간금형
표면 하드페이싱 기술 개발에 관한
연구

A study on the development of hard-facing
technology of hot forming tool surfaces for
the improvement of service life of the hot
forming tools

2014 년 02 월 25 일

조선대학교 대학원

기계공학과

박 나 라

열간금형 수명향상을 위한 열간금형
표면 하드페이싱 기술 개발에 관한
연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2013 년 10 월

조선대학교 대학원

기계공학과

박 나 라

박나라의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 조규재



위원 조선대학교 교수 한길영



위원 조선대학교 교수 안동규



2013 년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
NOMENCLATURES	viii
ABSTRACT	ix
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
제 2 절 연구 목적 및 방법	4
제 2 장 직접식 금속 쾌속 툴링 공정(Direct Metal Rapid Tooling Process) 및 열간금형강의 하드페이싱 층 설계	5
제 1 절 직접식 금속 쾌속 툴링 공정	5
제 2 절 적층재료 선정	6
1. Co 계 초합금 적층재료	6
2. Fe 계 초합금 적층재료	7
제 3 장 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 열간금형강의 3차원 열전달/열응력 해석	8
제 1 절 3차원 Steady-state 열전달 해석	8
제 2 절 3차원 Transient 열전달 해석 및 열응력 해석	9

제 4 장 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 열간금형 강의 응력/변형을 분포분석	10
제 1 절 Co 계 초합금 Stellite 6 의 두께에 따른 응력/변형을 분포 특성분석	10
1. Stellite 6 하드페이싱 층의 두께에 따른 온도 분포 특성 분 석	10
2. Stellite 6 하드페이싱 층의 두께에 따른 응력 분포 특성 분 석	12
3. Stellite 6 하드페이싱 층의 두께에 따른 변형을 분포 특성 분석	14
제 2 절 Co 계 초합금 Stellite 21 의 두께에 따른 응력/변형 을 분포 특성 분석	16
1. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 온도 분포 특성 분 석	16
2. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 응력 분포 특성 분 석	18
3. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 변형을 분포 특성 분석	20
제 3 절 Fe 계 초합금 19-9 DL 의 두께에 따른 응력/변형을 분포 특성 분석	22
1. 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께에 따른 온도 분포 특성 분 석	22
2. 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께에 따른 응력 분포 특성 분 석	24
3. 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께에 따른 변형을 분포 특성 분 석	26

제 4 절 온도/유효응력/주변형상을 고려한 재료 및 두께 선정	28
제 5 장 하드페이싱 시편제작 및 고온경도, 고온마모 실험 방법	29
제 1 절 하드페이싱 된 열간금형강 시편 제작	29
제 2 절 하드페이싱 재료에 따른 고온경도시험	30
제 3 절 고온마모시험 방법	32
제 6 장 하드페이싱 된 열간금형강의 고온마모 실험	33
제 1 절 하드페이싱 재료에 따른 고온마모시험 결과	33
1. 하드페이싱 재료에 따른 마찰계수 비교/분석	33
2. 하드페이싱 재료에 따른 마모량 비교/분석	34
3. 하드페이싱 재료에 따른 마모시험 후 시편조직 비교	36
4. 하드페이싱 재료에 따른 경도특성 비교/분석	48
제 2 절 Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 고온마모 시험 결과	51
1. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마찰계수 비교/분석	51
2. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모량 비교/분석	52
3. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모시험 후 시편조직 비교	54

4. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 경도특성 비교/ 분석	63
제 7 장 결론 및 향후과제	65
References	66
감사의 글	

LIST OF TABLES

Table 1	Chemical compositions of Stellite 6 and Stellite 21	6
Table 2	Thermal properties of Stellite 6 and Stellite 21	6
Table 3	Chemical composition of NOREM 02 and 19-9 DL	7
Table 4	Thermal properties of 19-9 DL	7
Table 5	Temperature of surface and boundary region of the Stellite 6 hardfaced specimen	11
Table 6	Effective stresses on the surface and the difference of effective stress in the joined region (Stellite 6 hardfaced specimen)	13
Table 7	Principal strain on the surface and difference of principal strain in the joined region (Stellite 6 hardfaced specimen)	15
Table 8	Temperature of surface and boundary region of the Stellite 21 hardfaced specimen	17
Table 9	Effective stresses on the surface and the difference of effective stress in the joined region (Stellite 21 hardfaced specimen)	19
Table 10	Principal strain on the surface and difference of principal strain in the joined region (Stellite 21 hardfaced specimen)	20
Table 11	Temperature of surface and boundary region of the 19-9 DL hardfaced specimen	23
Table 12	Effective stresses on the surface and the difference of effective stress in the joined region (19-9 DL hardfaced specimen)	24
Table 13	Principal strain on the surface and difference of principal strain in the joined region (19-9 DL hardfaced specimen)	26
Table 14	Process condition of hardfacing	30
Table 15	Comparison of the hardfaced specimens with the STD 61 specimen from viewpoints of the weight loss and the worn volume	35
Table 16	Comparison of the hardfaced specimens with the STD 61 specimen from viewpoints of the Worn width and the worn depth	45
Table 17	Friction induced working hardening for different hardfacing specimen	50
Table 18	Weight losses and worn volumes for different hardfacing thicknesses	51

Table 19	The worn width and the worn depth of each hardfacing thickness	56
Table 20	Friction induced working hardening for different hardfacing thickness	58

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Typical hardfacing process	2
Fig. 2 Process of Laser-aided Direct Metal Rapid Tooling	5
Fig. 3 Boundary condition of steady-state analysis	8
Fig. 4 Boundary condition of transient heat transfer and thermal stress analysis	9
Fig. 5 Temperature distributions in the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	10
Fig. 6 Temperature distribution in the thick direction of the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	11
Fig. 7 Effective stress distributions in the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	12
Fig. 8 Effective stress distributions in the thickness direction of the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thickness	12
Fig. 9 Principal strain distributions in the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	14
Fig. 10 Principal strain distributions in the thickness direction of the stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thickness	14
Fig. 11 Temperature distributions in the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	16
Fig. 12 Temperature distribution in the thick direction of the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	17
Fig. 13 Effective stress distributions in the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	18
Fig. 14 Effective stress distributions in the thickness direction of the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thickness	19
Fig. 15 Principal strain distributions in the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	20
Fig. 16 Principal strain distributions in the thickness direction of the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thickness	21
Fig. 17 Temperature distributions in the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	22

Fig. 18 Temperature distribution in the thick direction of the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	23
Fig. 19 Effective stress distributions in the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	24
Fig. 20 Effective stress distributions in the thickness direction of the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thickness	25
Fig. 21 Principal strain distributions in the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses	26
Fig. 22 Principal strain distributions in the thickness direction of the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thickness	27
Fig. 23 Manufacturing procedure of the specimen	29
Fig. 24 Procedure of specimen fabrication for hardness experiments in the elevated temperature	30
Fig. 25 High temperature vickers hardness tester (NIKON QM-2)	30
Fig. 26 Influence of the ambient temperature and hardfacing materials on the hardness of the specimen	31
Fig. 27 Experimental set-up of wear experiments in the elevated temperature	32
Fig. 28 Coefficient of frictions for different hardfacing materials	33
Fig. 29 Worn shapes for different hardfacing materials	34
Fig. 30 Scanning electronic microscope (SEM)	36
Fig. 31 Morphologies in the vicinity of the worn surface of STD 61 specimen (Furnace temperature = 800 °C)	38
Fig. 32 Morphologies in the vicinity of the worn surface of stellite 6 specimen (Furnace temperature = 800 °C)	40
Fig. 33 Morphologies in the vicinity of the worn surface of stellite 21 specimen (Furnace temperature = 800 °C)	42
Fig. 34 Morphologies in the vicinity of the worn surface of norem 02 specimen (Furnace temperature = 800 °C)	44
Fig. 35 Morphologies in the vicinity of the worn section (Furnace temperature = 800 °C)	45
Fig. 36 Morphologies in the vicinity of the deposited region Stellite 6	46
Fig. 37 Morphologies in the vicinity of the deposited region Stellite 21	47
Fig. 38 Morphologies in the vicinity of the deposited region NOREM 02	47

Fig. 39 Morphologies in the vicinity of the crack initiation region	48
Fig. 40 Experimental set-up of micro-vickers hardness measurement	48
Fig. 41 Variation of surface hardness of specimen according to wear experiments in the elevated temperature	49
Fig. 42 Variation of hardness of the worn region according to wear experiments in the elevated temperature	50
Fig. 43 Specimen design for the wear experiments in the elevated temperature to investigate hardfacing thickness effects	51
Fig. 44 Coefficient of frictions for different hardfacing thicknesses	52
Fig. 45 Worn shapes for different hardfacing thicknesses	52
Fig. 46 Morphologies in the vicinity of the worn region (Hardfacing material = Stellite 21, Thickness = 1 mm)	55
Fig. 47 Morphologies in the vicinity of the worn region (Hardfacing material = Stellite 21, Thickness = 2 mm)	57
Fig. 48 Morphologies in the vicinity of the worn region (Hardfacing material = Stellite 21, Thickness = 3 mm)	59
Fig. 49 Morphologies in the vicinity of the worn section for different hardfacing thicknesses	60
Fig. 50 Morphologies in the vicinity of the deposited region (hardfacing thickness = 1 mm)	61
Fig. 51 Morphologies in the vicinity of the deposited region (hardfacing thickness = 2 mm)	62
Fig. 52 Morphologies in the vicinity of the deposited region (hardfacing thickness = 3 mm)	62
Fig. 53 Variation of the surface hardness of specimen according to wear experiment in the elevated temperature (consideration of hardfacing thickness effects)	63
Fig. 54 Variation of hardness of the worn region according to the wear experiment in the elevated temperature (consideration of hardfacing thickness effects)	64

NOMENCLATURES

ρ : 하드페이싱 재료의 밀도

κ : 하드페이싱 재료의 열 전도도

α : 하드페이싱 재료의 열 팽창계수

$\Delta\sigma$: 하드페이싱영역과 기저영역의 경계에서 발생하는 유효응력 차

σ_{hard} : 경계부의 하드페이싱 영역에서 발생하는 유효응력

σ_{su} : 경계부의 기저영역에서 발생하는 유효응력

$\Delta\epsilon$: 하드페이싱영역과 기저영역의 경계에서 발생하는 주 변형율 차

ϵ_{hard} : 경계부의 하드페이싱 영역에서 발생하는 주 변형율

ϵ_{su} : 경계부의 기저영역에서 발생하는 주 변형율

μ : 마찰계수

F : 마찰계수를 측정하는 로드셀에서 발생하는 Volt

R : arm 길이

W : 압하하중

r : 웨지의 반지름

W_v : 마모체적

W_w : 마모량

$HV_{initial}$: 재료의 경도

HV_{ws} : 마모면의 경도

ABSTRACT

A study on the development of hard-facing technology of hot forming tool surfaces for the improvement of service life of the hot forming tools

Park Na Ra

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

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Thermal softening phenomenon of the hot forming tool steel leads to the premature wear of the hot forming tools. Hence, several researchers have paid attention to the development of wear resistance coating technologies to enhance the service life of the hot forming tool. The aim of this thesis is to develop the hardfacing technology of the hot forming tool surfaces for the improvement of the operation life of the hot forming tool.

In order to obtain proper thickness of the hardfacing specimen for the wear experiment, transient heat transfer and thermal stress analyses have been performed using the ABAQUS V6.11 Temp-displacement module. Using the results of the FE analyses, the temperature, effective stress and principal strain distributions in the specimen have been investigated. From the results of the investigation, it has been shown that an appropriate thickness of the hardfacing layer is 2 mm.

Hardness and wear experiments in the elevated temperature have been performed to investigate wear characteristics of the hardfaced specimen. The specimen of the experiments have been fabricated via the deposition of the Stellite 6, Stellite 21 and NOREM 02 superalloys on the STD 61 hot working tool steel using laser-aided direct metal rapid tooling (DMT) process. The results of the hardness experiments in the elevated temperature

have been revealed that the hardness of the hardfaced specimen is conspicuously greater than that of STD61 specimen when the ambient temperature is larger than 700 oC. The results of the wear experiment in the elevated temperature have been shown that the weight loss, the worn volume, the worn width, and the worn depth of the hardfaced specimen is remarkably smaller than those of the STD 61 specimen. In addition, it has been revealed the friction, lubrication and friction induced work harding characteristics are highly improved when the Stellite 21 is deposited on the STD 61. From these results, it have been noted that the Stellite 21 is a proper hardfacing material of the STD 61 hot working tool steel.

Wear experiments in the elevated temperature have been carried out to investigate the influence of thickness of the hardfaced layer on the wear characteristics of the Stellite 21 hardfaced specimen. The results of the experiments have been shown that the weight loss, the worn volume, the worn width, the worn depth and the friction coefficient of the hardfaced layer is minimized when the thickness of the hardfaced layer is 2 mm.

Based on the above result, proper material and thickness of the hardfaced layer for the STD 61 hot working tool have been obtained to develop the hardfacing technology of the hot forming tool surfaces for the improvement of the operation life of the hot forming tool.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 관련연구

최근 전 세계적으로 관심이 집중되고 있는 자원고갈과 지구온난화에 대처하기 위하여 기계/생산/재료공학분야에서는 녹색생산기술, 제품 수명 향상 기술, 자원 재활용 기술 등에 대한 기술개발이 폭넓게 진행되고 있다.^{1,2)} 특히 제품 수명 향상 기술과 자원 재활용 기술은 제품제작에 사용되는 소재사용량과 제품제작을 위한 생산공정의 에너지 사용량을 감소시킬수 있어 최근 다양한 연구개발이 추진되고 있다.^{3,4)} 금속제품을 대량으로 생산하기 위한 열간성형공정에서는 생산 공정의 녹색화와 생산성 향상 및 자원활용을 위하여 금형 수명 향상 기술에 대한 지속적인 연구를 폭넓게 수행하고 있다.⁵⁻¹⁰⁾ 제품 성형공정의 금형 표면온도가 600 °C 이상에서 금형 열연화 현상에 의한 금형변형, 마모, 침식, 열시책등이 많이 발생하게 되어 금형의 수명은 급격히 감소하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 하드페이싱을 이용한 다중재료 금형의 설계 및 제작에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹¹⁻¹⁴⁾ 이와 같은 하드페이싱 공정은 금속의 표면에 사용자가 원하고자 하는 기계적 특성을 가지고 있는 금속분말을 적층시키는 공정으로 금속을 적층하는 방법에 따라 Fig. 1 과 같이 LSA(Laser Surfaced Alloying), LCVD(Laser Chemical Vapor Diposition), PSP(Plasma Sparying Process) 및 Laser cladding 등의 공정이 있다.¹⁵⁾ 이와 같은 하드페이싱 공정 중 레이저 클레딩(Laser cladding) 공정의 경우 레이저를 이용하여 기저부를 가열시킨 후 그 위에 하드페이싱 재료를 분사하여 재료의 표면에 새로운 금속층을 생성하는 공정으로, 내마모성, 내부식성 등 새로운 기계적 특성 및 화학적 특성을 부여하는 공정이다. 레이저 클레딩 공정의 장점은 기저부와 적층재료의 혼합비가 다른 공정에 비해 상대적으로 낮아 적층부의 기계적 성질이 우수하며, 적층두께를 미세하게 제어할 수 있는 공정이다. 또한, 층두께 제어가 가능하며 레이저를 이용하기 때문에 고 용융점 재료의 사용이 가능하다.^{16,17)}

이러한 하드페이싱공정을 이용하여 금형의 표면의 내마모성을 높이며, 하드페이싱에 의해 생기는 금속간에 생기는 잔류응력과 하드페이싱 재료와 금형재료에 의해 발생하는 특성 등 하드페이싱의 재료 및 적용범위에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행하고 있다.^{18,19)}

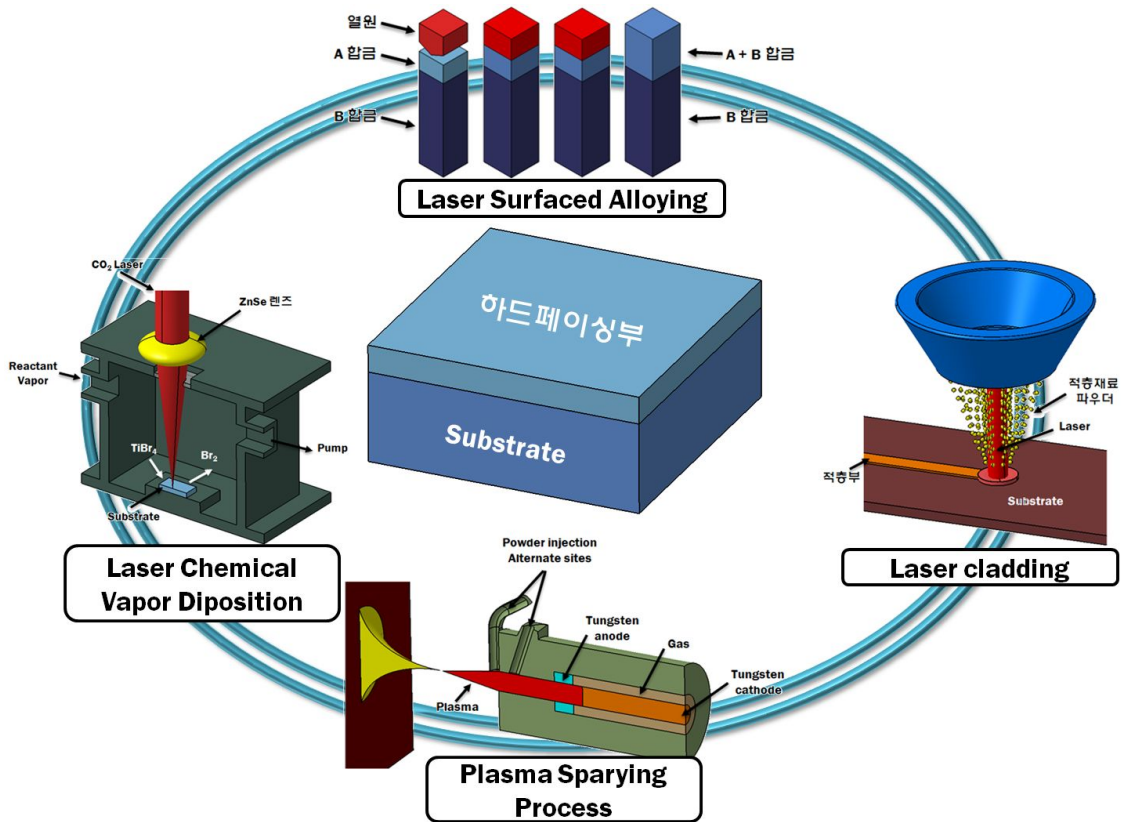


Fig. 1 Typical hardfacing processes

최근 열간금형에서 문제시 되고 있는 금형의 마모특성, 금형의 수명 등을 개선하기 위해 금형의 표면에 하드페이싱을 이용하여 금형의 마모특성, 금형의 수명향상 등에 관한 연구가 진행되고 있다.²⁰⁻²⁴⁾ 하드페이싱에 관련된 연구로는 하드페이싱에서 사용되는 재료의 종류에 따른 마모특성 및 재료간 결합특성, 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모특성 및 결합특성에 관한 연구가 이루어 지고 있다.²⁵⁻³⁰⁾ 또한, 하드페이싱 공정에서 이루어지는 열에 의해 발생하는 잔류응력에 의한 열 시책이 발생되는데 열시책 현상을 최소화 하기 위하여 레이저 출력, 공정조건 등을 변경하여 잔류응력을 감소시키는 연구가 진행중이다. 금형에 하드페이싱 되었을 때 적층재료의 종류, 적층재료의 두께에 따른 온도분포, 응력분포 및 변형율분포를 도출하여 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 금형의 영향성에 대한 연구 또한 국내외적으로 진행되고 있다. 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

Oliveira 등은 레이저 클레딩을 이용하여 304 스테인레스 스틸에 Stellite 6 를 적층하

여 레이어에 따른 잔류응력을 분석하였다. 또한 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면특성과 미세조직을 분석하였다.³¹⁾ Mingxi 등은 레이저 클래딩을 이용하여 Co 계 합금을 하드페이싱 한 후 SEM(scanning electron microscope)를 이용하여 표면의 미세조직을 분석하였으며, XRD(X-ray diffractometer)을 이용하여 두께에 따른 성분을 분석하였다. 또한 레이어 두께에 따른 경도를 분석하였다.³²⁾ Jiang 등은 H13 공구강에 Ni/Cr 합금을 레이저 클래딩을 이용하여 하드페이싱 하는 방법을 유한요소해석을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 해석을 통해 도출된 레이저 파워와 냉각속도등을 이용하여 시편을 제작하였다.³³⁾ Fouilland 등은 MIG (Metal insert gas) 용접공정을 이용하여 55NiCrMoV7 기저부 상면에 Stellite 21을 하드페이싱 하여 마모시험을 수행하였다. 마모시험 전 시편의 경도와 마모시험 후 시편의 경도를 비교하여 FIWH (Friction-induced Work hardening)을 도출하였다.³⁴⁾ Ocylock 등은 표면층에 연성 부여 및 열응력/침식 최소화를 위하여 여러 가지 재료를 기능적 경사 구조로 적층하는 방법에 대한 기초연구를 수행하였다.³⁵⁾ Morrow 등은 직접식 금속 쾌속 툴링 공정 중 하나인 DMD (Direct metal deposition) 공정을 이용하여 온간/열간단조 금형의 표면에 초합금 하드페이싱 층을 생성하는 연구를 수행하였다.³⁶⁾

하드페이싱 기술 기반 금형 마모/수명 향상 기술의 개발을 위하여 에너지원, 적층재료, 적층 두께에 따른 하드페이싱 된 금형면의 내 마모성, 층간결합, 수명향상 등에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.³⁷⁻⁴³⁾

제 2 절 연구목적 및 방법

최근 전 세계적으로 자원고갈과 지구온난화에 대처하기 위해 기계/생산/재료공학 분야는 제품의 수명 향상 기술, 자원재활용 기술개발에 대해 많은 연구를 하고 있다. 특히, 열간금형에서 발생하는 금형의 마모에 의해 수명이 급격히 감소하게 되는데 금형의 마모를 감소시켜 수명을 향상시키는 연구가 요구되어진다. 이러한 금형의 수명향상을 위한 방법 중 금형의 표면에 하드페이싱 하여 수명향상에 대한 연구를 진행하고자 한다. 3 차원 유한요소 프로그램을 이용하여 하드페이싱 표면에 열량이 부가될 때 하드페이싱의 재료에 따른 온도분포, 응력분포 및 변형을 분포에 대한 분석을 수행하였다. 이때 부가되는 열량은 선행연구에서 STD 61 의 온도가 열간성형시 도달하는 온도 및 사이클을⁴⁴⁾ 정상상태 열전달을 통하여 비정상 상태 열전달 해석에 적합한 열량을 도출할 수 있었다. 하드페이싱 재료로 사용된 재료는 Co 계 초합금 Stellite 6, Stellite 21 과 Fe 계 초합금 NOREM 02 와 구성비가 유사한 19-9DL을 3차원 유한요소 프로그램을 이용하여 온도분포, 응력분포 및 변형을 분포를 도출하였다.

해석 프로그램은 ABAQUS 6.11을 사용하여 열전달, 열응력 해석을 수행하였으며, 열전달 해석을 위한 열량은 정상상태 열전달 해석을 수행하여 도출하였다. 정상상태 열전달해석을 통해 도출된 온도분포를 비정상 상태 열전달 해석을 수행하여 시간에 따른 온도분포, 응력분포, 변형을 분포를 도출하였다.

하드페이싱된 열간금형강의 마모특성을 분석하기 위해 STD 61 상면에 Co 계 초합금 Stellite 6, Stellite 21 과 Fe 계 초합금 NOREM 02 를 DMT 공정으로 하드페이싱된 고온마모시편을 제작하였다. 하드페이싱된 고온마모시편을 이용하여 상온에서 재료에 따른 경도와 실험 후 경도를 도출하여 비교/분석 하였다. 제작된 시편은 고온마모 시험을 수행하였으며, 고온마모 시험에 사용된 온도, 하중 조건은 선행연구를 통해 도출된 열간금형의 조건을 바탕으로 도출하였다. 마모시험을 통해 도출된 마찰계수와 마모량을 비교/분석하여 가장 적합한 재료를 선정할수 있었다. 선정된 재료의 하드페이싱 층 두께에 따른 영향을 분석하기 위해 두께별 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 1 ~ 3 mm 의 두께를 가졌으며, 같은 조건으로 마모시험을 수행하였다. 마모시험 후 SEM을 이용하여 층간 결함과 마모면을 비교/분석하였다.

제 2 장 직접식 금속 쾌속 툴링 공정(Direct Metal Rapid Tooling Process) 및 열간금형강의 하드페이싱 층 설계

제 1 절 직접식 금속 쾌속 툴링 공정

직접식 금속 쾌속 툴링 공정이란 제품에서 필요로 하는 기계적 성질을 가지고 있는 금속재료를 이용하여 3 차원 형상의 CAD 데이터로부터 직접 물리적인 형상을 구현하는 공정으로 매우 빠른 시간 내에 제작할 수 있다. 직접식 금속 쾌속 툴링 (Direct Metal Rapid Tooling) 공정은 (주) 인스텍에서 개발되었다.⁴⁵⁾ 직접식 금속 쾌속 툴링 공정의 기본 원리는 Fig. 2 과 같이 2 차원 단면에 해당하는 금속 층은 고출력 레이저와 금속분말로 인해 제작이 된다. 이러한 원리는 레이저 클래딩공정과 비슷하며, 레이저를 이용해 국부적인 금속 표면에 조사하면 순간적으로 금속표면에 용융 풀 (melt pool) 이 생성되고 용융풀 안으로 정밀하게 제어되는 금속분말이 공급되어 클래딩 층을 형성한다. 이러한 클래딩 층은 3D CAD 모델로부터 산출된 공구경로에 따라 이동시켜 2차원 단면에 해당하는 클래딩층을 제작한다. 직접식 금속 쾌속 툴링 공정은 클래딩에 영향을 미치는 모든 공정변수를 실시간으로 제어하여 정밀한 두께의 금속층을 생성하는데, 이러한 공정을 Layer-by-Layer 형태로 반복함으로써 3D 모델과 동일한 금속제품이 제작된다. 이때 한 층의 두께는 0.25 mm 로 제작할 수 있다.

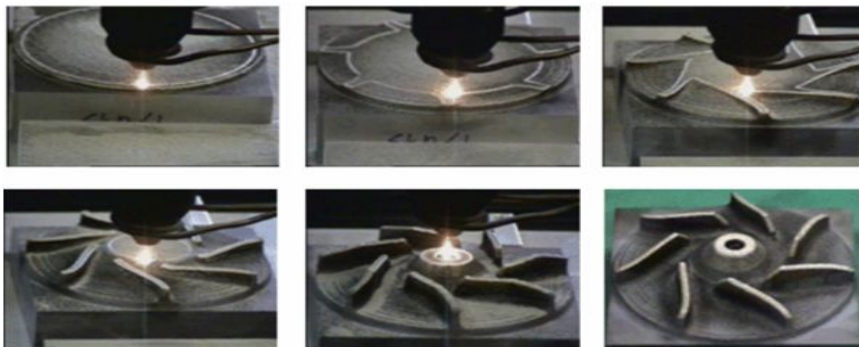


Fig. 2 Process of Laser-aided Direct Metal Rapid Tooling

제 2 절 적층재료 선정

1. Co 계 초합금 적층재료

하드페이징용 Co 계 초합금은 Stellite 6 와 Stellite 21을 사용하였다. 열간금형의 고온 내 마모성을 향상시키기 위하여 열간합금공구강 STD 61 에 비해 고온경도가 높은 재료로 선정하였다. 이와 같이 Stellite 6 와 Stellite 21을 선정한 이유는 Fouiland 와 Olivera 등의 연구결과를 통해 고온에서도 내 마모성이 우수함을 알 수 있어 열간금형의 하드페이징 재료로 적합함을 알 수 있었다. Co 계 초합금 하드페이징재료의 구성비는 Table 1 과 같으며, 물성은 Table 2 와 같다.

이와 같이 Co 계 초합금 하드페이징용 재료인 Stellite 6 와 Stellite 21을 비교하였을 경우 열전도도의 경우 온도가 증가할수록 Stellite 21 이 높은 열 전도율을 가졌으며, 열 팽창계수의 경우 Stellite 21 이 약간 낮은 정도였다. 이 결과로부터 Stellite 21 이 Stellite 6 에 비하여 온도분포가 낮게 나타날 것으로 예상했다.

Table 1 Chemical compositions of Stellite 6 and Stellite 21

Stellite 6	Co	Cr	W	C	Others
	Base	27 ~ 32	4 ~ 6	0.9 ~ 1.4	Ni, Fe, Si
Stellite 21	Co	Cr	Mo	C	Ni
	Base	26 ~ 29	4.5 ~ 6.0	0.2 ~ 0.35	2 ~ 3

Table 2 Thermal properties of Stellite6 and Stellite 21

	T (°C)	ρ (kg/m ³)	T (°C)	κ (W/m·K)	T (°C)	α (10 ⁻⁶ /K)
Stellite 6	20	8,200	200	14.5	100	13.9
			300	16	400	14.7
			500	19	700	15.8
Stellite 21	20	8,330	200	17	315	14.1
			300	18.8	427	14.3
			400	20.6	816	15.6

2. Fe 계 초합금 적층재료

하드페이징용 Fe 계 초합금은 NOREM 02를 사용하였다. NOREM 02 의 물성데이터를 구할 수 없어 유한요소 해석을 위해 Table 3 와 같이 NOREM 02 유사종인 Fe 계 초합금 19-9 DL 을 사용하였다. 또한 열간금형의 고온 내마모성을 향상시키기 위한 고온경도가 높은 재료로 선정되었다. 하드페이징 재료의 물성은 Table 4 와 같다.

Table 3 Chemical composition of NOREM 02 and 19-9 DL

NOREM 02	Fe	Ni	Cr	C	Mo
	57.6 ~ 59.0	3.7 ~ 5.0	23 ~ 26	1.19 ~ 1.2	1.8 ~ 2.2
19-9 DL	Fe	Ni	Cr	C	Mo
	65	8 ~ 11	18 ~ 21	0.28 ~ 0.35	1.0 ~ 1.75

Table 4 Thermal properties of 19-9 DL

	T (°C)	ρ (kg/m ³)	T (°C)	κ (W/m·K)	T (°C)	α (10 ⁻⁶ /K)
19-9 DL	20	7,900	20	13.5	93	15.3
			215	18.5	205	16.3
			350	21.3	815	18.0

이와 같이 Fe 계 초합금 하드페이징용 재료인 19-9 DL 과 Co 계 초합금 Stellite 6 와 Stellite 21 을 비교하였을 경우 열전도도의 경우 온도가 증가할수록 19-9 DL 의 열전도도는 급격히 감소함을 알 수 있었다. 하지만 열 팽창계수의 경우 온도가 증가할수록 급격한 열팽창을 보여 안정성이 낮을 것으로 판단하였다.

제 3 장 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 열간금형강의 3차원 열전달/열응력 해석

제 1 절 3차원 Steady-state 열전달 해석

비정상상태 열전달 해석을 위한 열간금형에 부가되는 열량을 도출하기 위해 정상상태 열전달 해석을 수행하여 열량을 도출하였다. 이때 금형의 크기는 Fig. 1 과 같이 100 mm × 100 mm × 50 mm 의 기저부의 상면에 30 mm × 30 mm × 1 mm 의 돌출부를 가지는 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 이때, 재료는 STD 61 열간금형강을 사용하였다. 해석은 열 유량을 변경하며 해석을 수행하였으며, 표면의 온도가 800 °C 에 도달할 때의 열량을 도출하여 비정상 상태 열전달 해석에 적용하였다.

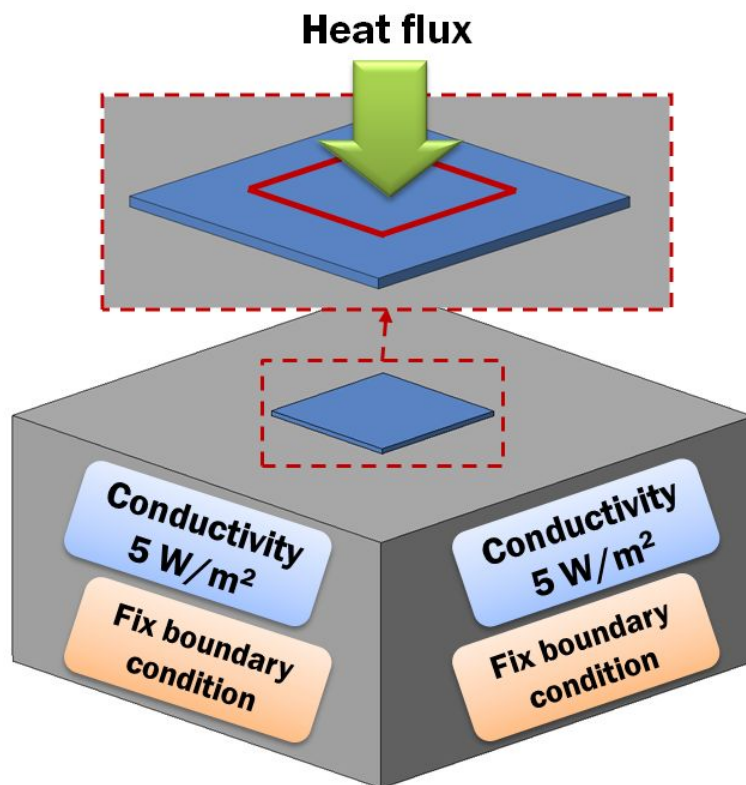


Fig. 3 Boundary condition of steady-state analysis

제 2 절 3차원 Transient 열전달 해석 및 열응력 해석

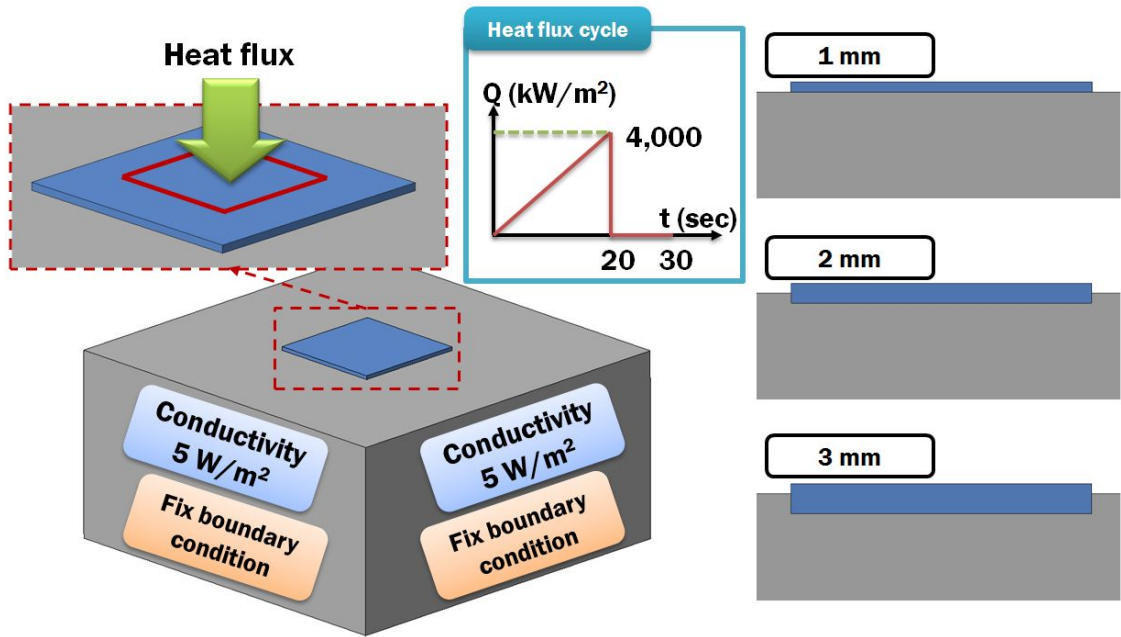


Fig. 4 Boundary condition of transient heat transfer and thermal stress analyses

본 연구의 열간금형 수명향상을 위한 열간금형의 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 온도, 열응력 분포를 비교/분석하기 위하여 Fig. 4 와 같은 조건에서의 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 프로그램은 ABAQUS V6.11 을 사용했으며 Temp-displacement 모듈을 사용하여 열전달 해석과 열응력 해석을 동시에 수행하였다. 이때 사용된 열량의 조건은 정상상태 열전달 해석을 통해 도출된 열량인 $4,000 \text{ kW/m}^2$ 을 사용하였으며, 열간금형의 1 cycle 동안의 경계조건은 20 초 까지 $4,000 \text{ kW/m}^2$ 가열시킨 후 10 초간 냉각이 되는 총 30 초 동안 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 기저부 STD 61 의 크기는 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 의 너비와 폭을 가지며 높이는 50 mm 를 가지는 재료로 사용하였다. 하드페이싱부는 기저부의 상면 중앙에 위치하며, $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 의 너비와 폭을 가지며 하드페이싱층의 두께는 돌출부 1 mm 를 가지고 있다. 두께의 증가는 기저부 내부로 삽입이 되는 삽입부로 설계를 하여 두께는 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 를 표현하였다.

제 4 장 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 열간금형강의 온도/응력/변형을 분포분석

제 1 절 Co 계 초합금 Stellite 6 의 두께에 따른 온도/응력/변형을 분포 특성

본 연구에서 Stellite 6 가 STD 61 상면에 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 온도/열응력/열변형을 분포특성을 분석하기 위해 비정상 열전달 해석을 수행하여 두께에 따른 온도, 열응력, 열변형을 분포를 비교/분석하였다.

1. Stellite 6 하드페이싱 층의 두께에 따른 온도 분포 특성 분석

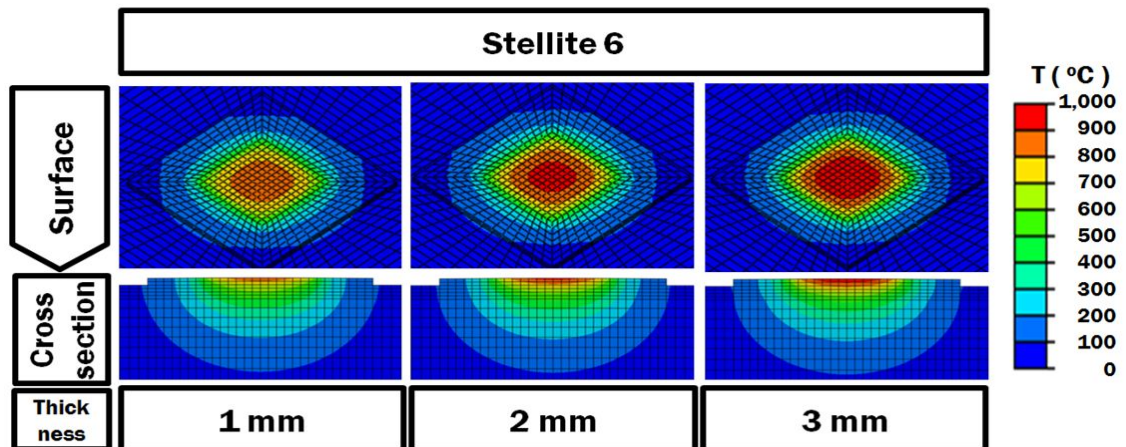


Fig. 5 Temperature distributions in the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 5 는 Stellite 6 로 하드페이싱 된 열간금형강의 온도분포 결과이다. 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 온도는 증가함을 알 수 있었으며 두께가 1 mm 에서 2 mm 로 증가할 때 약 7.1 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가할 때 5.2 % 가 증가하였다.

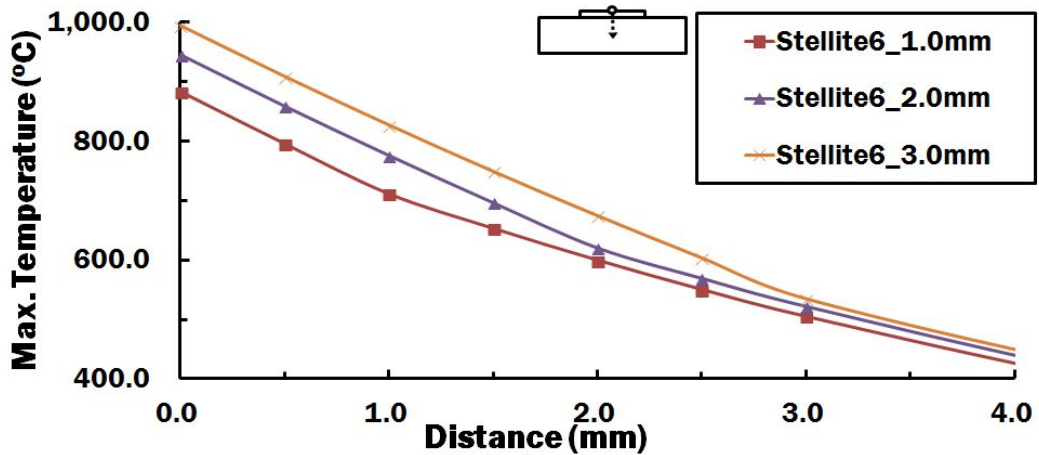


Fig. 6 Temperature distribution in the thick direction of the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Table 5 Temperature of surface and boundary regions of the Stellite 6 hardfaced specimen

Thickness (mm)	1	2	3
Surface temperature (°C)	883.1	945.4	994.2
Boundary temperature (°C)	711.0	620.5	535.1

또한 하드페이싱층과 기저부 의 경계에서의 온도는 두께가 증가할수록 경계부는 하드페이싱 층의 표면과 거리가 멀어지기 때문에 경계부에서의 온도분포는 3 mm 에서 531.1 °C 로 가장 낮게 도출되었다.

Fig. 6 은 Stellite 6 하드페이싱 층의 두께별 깊이방향에 대한 온도분포 결과이다. 그 결과 Stellite 6 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 온도는 상승함을 알 수 있었지만, 약 3 mm 의 깊이에서는 온도차는 10 °C 내외로 큰 차이는 보이지 않음을 알 수 있었다. Table 5 는 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면의 온도와 경계부의 온도 결과이다. 그 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가함에 따라 표면온도는 증가하지만 경계부의 온도는 직접적인 열량이 부가되는 하드페이싱 층의 표면과 거리가 발생하기 때문

에 3 mm 의 하드페이싱 층 두께와 기저부의 경계에서 가장 낮은 온도분포를 보임을 알 수 있었다.

이와 같은 결과를 바탕으로 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 온도는 증가하지만, 하드페이싱층과 기저부의 경계에서 발생하는 온도는 감소함을 알 수 있었다.

2. Stellite 6 하드페이싱 층의 두께에 따른 응력 분포 특성분석

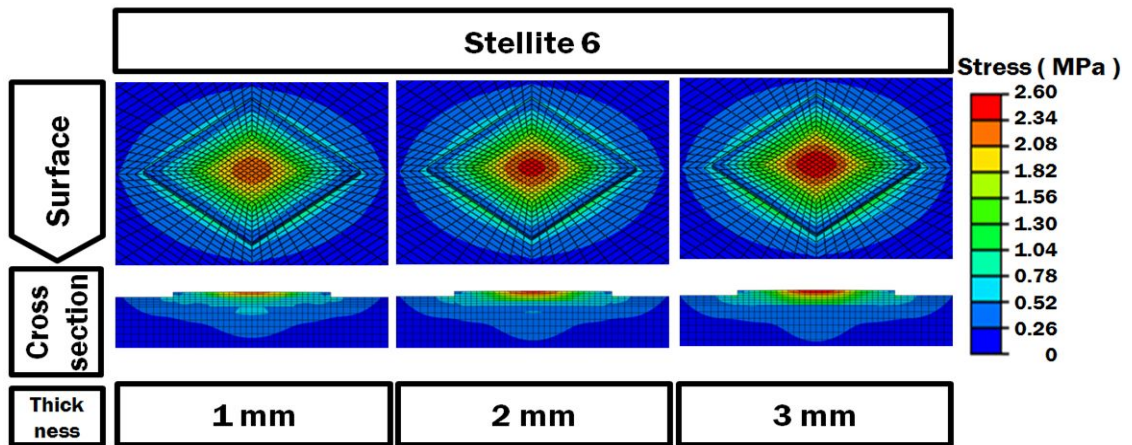


Fig. 7 Effective stress distributions in the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

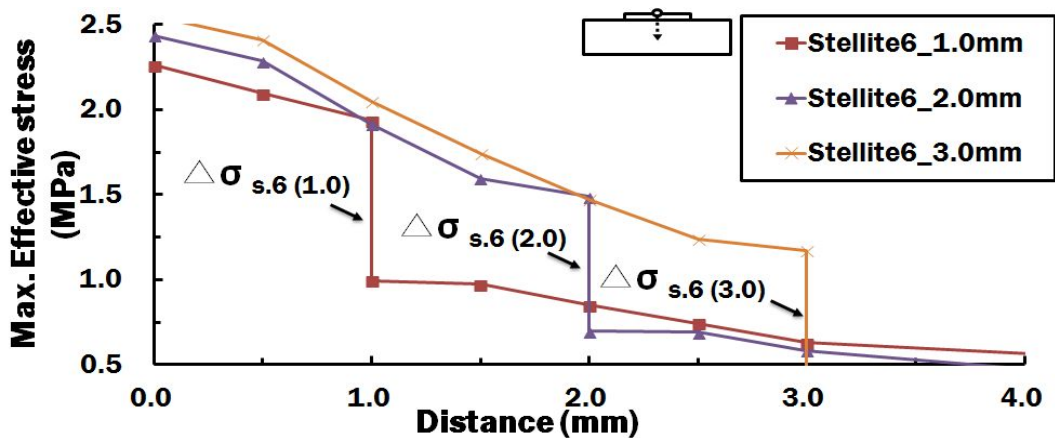


Fig. 8 Effective stress distributions in the thickness direction of the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thickness

Fig.7 은 Stellite 6 가 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 유효응력 분포 결과이다. 이 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 유효응력은 증가함을 알 수 있었다. 하드페이싱 층의 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 약 7.3 %, 2 mm 에서 3 mm 로 증가할 때 약 4.4 % 의 표면의 유효응력이 증가함을 알 수 있었다. 하지만 경계에서 발생하는 응력은 감소함을 알 수 있었다. 또한 약 3 mm 의 하드페이싱 층에서 유효응력 분포가 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 8 은 Stellite 6 하드페이싱 층의 두께별 깊이방향에 대한 유효응력분포 결과이다. 그 결과 Stellite 6 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 유효응력은 상승함을 알 수 있었지만, 약 3 mm 의 깊이에서의 응력차는 약 0.2 Mpa 이내로 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있었다. 또한 하드페이싱 층의 경계에서 재료의 변화에 따른 유효응력 단차가 발생함을 알 수 있었다. Table 6 는 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면의 유효응력과 경계부에서 발생하는 단차 결과이다. Stellite 6 의 유효응력 단차는 식 (1) 과 같다. 유효응력의 단차는 하드페이싱 층의 영역에서 발생하는 유효응력 σ_{hard} 와 기저부의 영역에서 발생하는 유효응력 σ_{su} 의 유효응력 차 이다.

$$\Delta\sigma = \sigma_{hard} - \sigma_{su} \quad (1)$$

Table 6 Effective stresses on the surface and the difference of effective stress in the joined region (Stellite 6 hardfaced specimen)

Thickness (mm)	1	2	3
Effective stress in the surface (MPa)	2.26	2.44	2.55
$\Delta\sigma_{s,6}$ (MPa)	0.94	0.79	0.75

그 결과 두께가 1 mm 에서는 0.95 Mpa 이 도출되었지만 1 mm 의 하드페이싱 층 두께가 증가함에 따라 약 5.1 % ~ 15.9 % 의 유효응력 단차가 감소함을 알 수 있었다. 이와 같이 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 응력단차는 성형 공정 중 반

복되는 열 사이클에 의해 응력단차가 높을수록 경계부의 피로파괴 현상이 발생되게 하는 요인이 된다. Stellite 6 가 하드페이싱 될 때는 약 3 mm 의 하드페이싱 층을 가지는 금형이 경계부의 결합 발생이 가장 적음을 예측할 수 있었다.

3. Stellite 6 하드페이싱 층의 두께에 따른 변형을 분포 특성분석

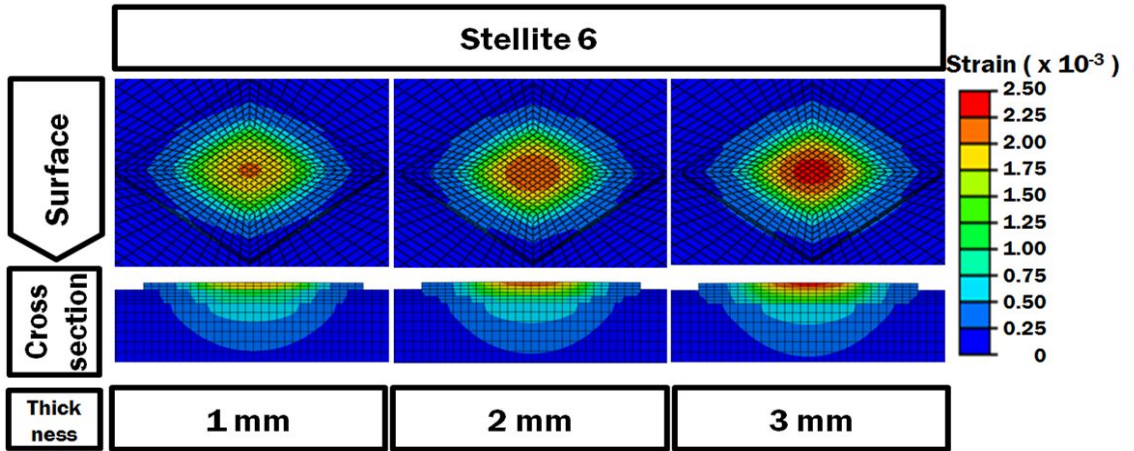


Fig. 9 Principal strain distributions in the Stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

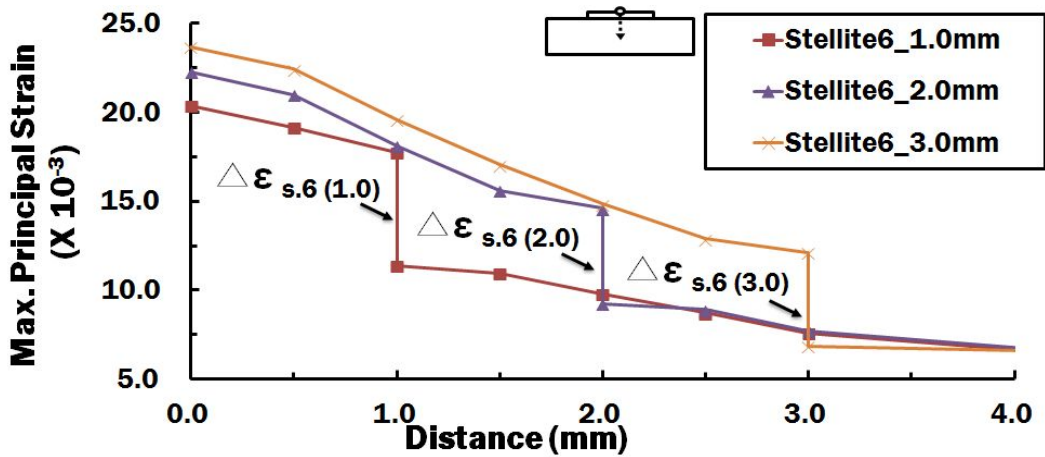


Fig. 10 Principal strain distributions in the thickness direction of the stellite 6 hardfaced specimen for different hardfacing thickness

Fig.9 은 Stellite 6 가 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 주 변형율 분포 결과이다. 이 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 주 변형율은 증가함을 알 수 있었으며, 하드페이싱 층의 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 표면의 유효응력은 약 8.5 %, 2 mm 에서 3 mm 로 두께가 증가할 때 약 .5 % 증가함을 알 수 있었다. Fig. 10 은 깊이방향에 대한 온도분포 결과로 Stellite 6 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 주 변형율은 증가함을 알 수 있었다. 또한 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 변형율 단차가 발생함을 알 수 있었다. Table 7 은 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면과 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 단차 결과 이다. Stellite 6 의 주 변형율 단차는 식 (2) 와 같으며, 경계부 하드페이싱 영역에서 발생하는 주 변형율 ϵ_{hard} 와 경계부의 기저부 영역에서 발생하는 주 변형율 ϵ_{sub} 의 주 변형율 차 이다.

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{hard} - \epsilon_{su} \quad (2)$$

그 결과 두께가 1 mm 에서는 6.33×10^{-3} 의 가장 높은 주 변형율 차를 보였으며, 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 경계에서 발생하는 주 변형율의 단차는 약 1.7 % ~ 15.5 % 가량 감소함을 알 수 있었으며, 2 mm 의 두께를 가지는 하드페이싱층과 3 mm 의 두께를 가지는 하드페이싱 층은 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 여기에서 경계부의 주 변형율 단차는 열간성형 시 반복되는 열 사이클에 의해 단차는 증가하게 되며, 하드페이싱 된 경계에서 두 재료의 변형율에 의해 피로파괴가 발생하게 된다. 따라서 경계에서 발생하는 주 변형율 차는 감소할수록 우수함을 알 수 있었다.

Table 7 Principal strain on the surface and difference of principal strain in the joined region (Stellite 6 hardfaced specimen)

Thickness (mm)	1	2	3
Principal strain on the surface ($\times 10^{-3}$)	20.39	22.28	23.70
$\Delta\epsilon_{s,6}$ ($\times 10^{-3}$)	6.33	5.35	5.26

이와 같이 온도분포, 유효응력분포 및 주 변형을 분포를 도출하여 비교/분석한 결과 열간금형에 하드페이싱 되는 재료가 Stellite 6 일 경우 표면의 온도분포를 고려하였을 경우 하드페이싱 층의 두께가 감소할수록 우수하였지만, 하드페이싱 층의 안정성을 고려하여 경계부의 유효응력 단차와 주변형을 단차를 고려하였을 경우 두께가 약 2 ~ 3 mm 의 하드페이싱 층을 가질 때 안정성이 우수한 두께임을 알 수 있었다.

제 2 절 Co 계 초합금 Stellite 21 의 두께에 따른 응력/변형 율 분포 특성 분석

본 연구에서 Stellite 21 이 STD 61 상면에 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 온도/열응력/열변형을 분포특성을 분석하기 위해 비정상 열전달 해석을 수행하여 하드페이싱 층 두께에 따른 온도, 열응력, 열변형을 분포를 비교/분석하였다.

1. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 온도 분포 특성 분석

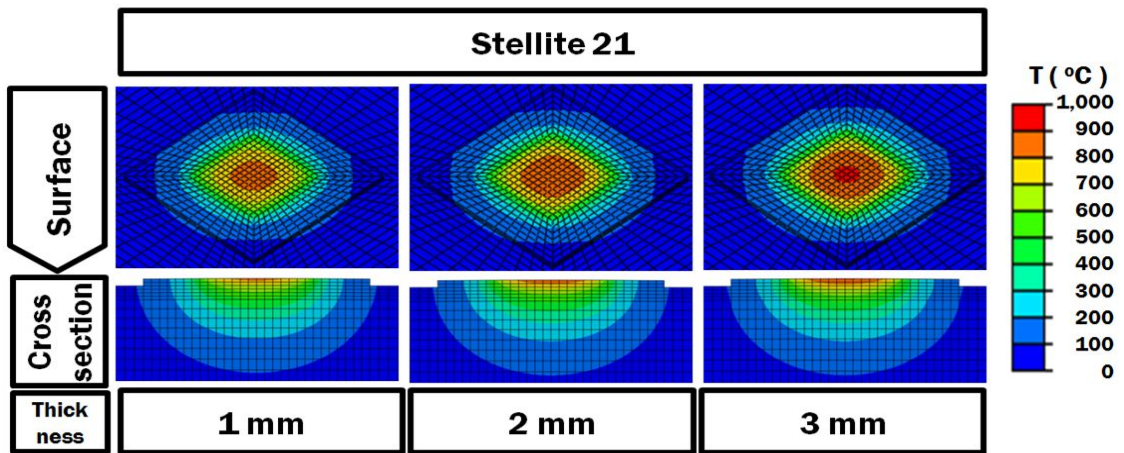


Fig. 11 Temperature distributions in the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 11 은 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 두께에 따른 표면과 깊이방향의 온도분포 결과이다. 그 결과 하드페이싱층의 두께가 증가할수록 표면의 두께가 증가함을

알 수 있었으며 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 약 4.1 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가할 때 약 3.2 % 온도가 상승함을 알 수 있었다. 또한 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 온도는 3 mm에서 약 524.8 °C 로 가장 낮은 온도분포를 보였다. 이와 같은 결과는 Stellite 21 의 열전도도가 STD 61 에 비해 낮은 열전도도를 보이기 때문에 발생하게 된다.

Fig. 12 은 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 두께별 깊이방향에 대한 온도분포 결과이다. 그 결과 Stellite 21 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 온도는 상승함을 알 수 있었으며, 약 3 mm 의 두께에서 온도차는 두께가 증가할수록 약 10 °C

Table 8 Temperature of surface and boundary regions of the Stellite 21 hardfaced specimen

Thickness (mm)	1	2	3
Surface temperature (°C)	848.59	884.45	914.25
Boundary temperature (°C)	703.14	609.82	824.86

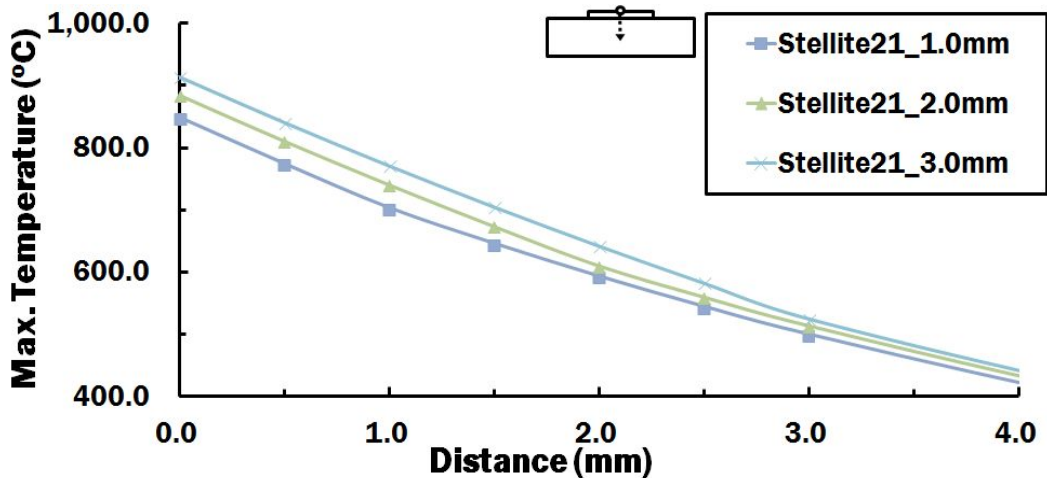


Fig. 12 Temperature distribution in the thick direction of the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

내외로 비슷한 온도차를 보임을 알 수 있었다. Table 8 은 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면의 온도와 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서의 온도 결과이다. 그 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가함에 따라 표면의 온도는 증가하지만 경계부의 온도는 열량이 부가되는 위치와 거리가 발생하기 때문에 3 mm 의 하드페이싱 층에 가장 낮은 온도분포가 도출되었다.

2. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 응력 분포 특성 분석

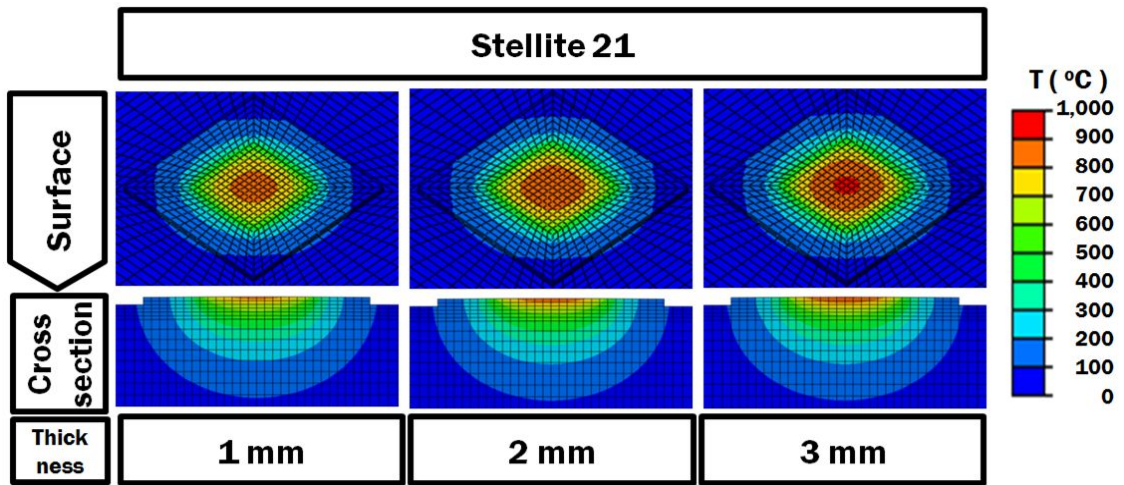


Fig. 13 Effective stress distributions in the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 13 은 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 유효응력 분포 결과이다. 이 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 유효응력은 증가함을 알 수 있었다. 하드페이싱 층의 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가했을 때 표면의 유효응력은 약 5.5 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가했을 때 표면의 유효응력은 약 4.4 % 증가함을 알 수 있었다. 하지만 경계부에서의 응력분포는 이종재료에 의한 응력단차가 발생하였다. 이와 같이 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 응력단차는 성형 공정 중 반복되는 열 사이클에 의해 응력단차가 높을수록 경계부의 피로파괴 확률이 증가하게 되는 요인이 된다. 이때 발생한 유효응력 차는 식 (1)을 이용해 도출하였다.

Table 9 Effective stresses on the surface and the difference of effective stress in the joined region (Stellite 21 hardfaced specimen)

Thickness (mm)	1	2	3
Effective stress on the surface (MPa)	1.79	1.89	1.98
$\Delta\sigma_{s,21}$ (MPa)	0.57	0.53	0.54

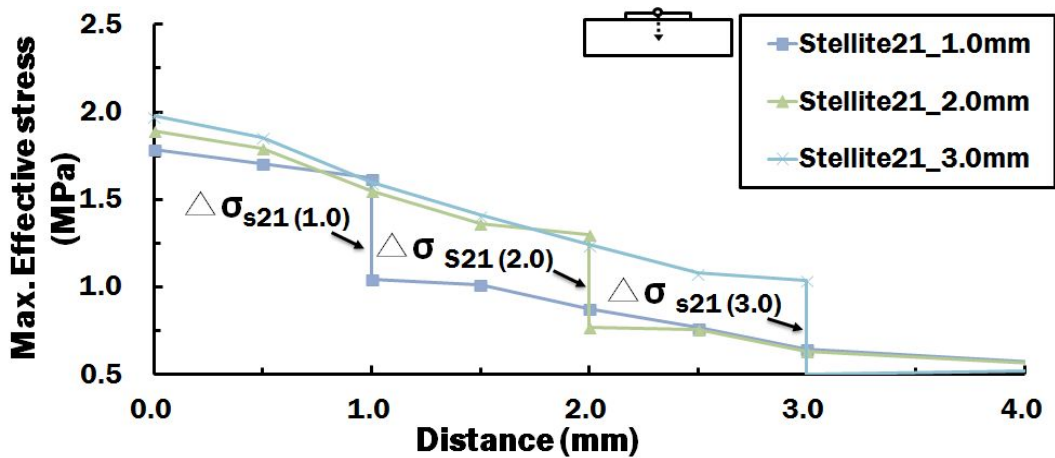


Fig. 14 Effective stress distributions in the thickness direction of the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thickness

Fig. 14 은 Stellite 21 하드페이싱 층의 두께별 깊이방향에 대한 유효응력분포 결과이다. 그 결과 Stellite 21 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 유효응력은 상승함을 알 수 있었지만, Table 9 와 같이 경계부에서의 응력차는 1 mm 일때는 0.57 Mpa 이었으며 2 mm 일때는 0.53 Mpa, 3 mm 일 때 0.54 Mpa 로 2 mm 의 하드페이싱 층을 가질 때 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 유효응력차는 감소함을 알 수 있었다. 이 결과 두께가 감소할수록 표면의 응력은 감소하지만 경계부의 응력을 고려할 경우 약 2 mm 의 하드페이싱 층을 가질 경우 피로파괴 가능성이 가장 적음을 예측할 수 있었다.

3. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 변형을 분포 특성 분석

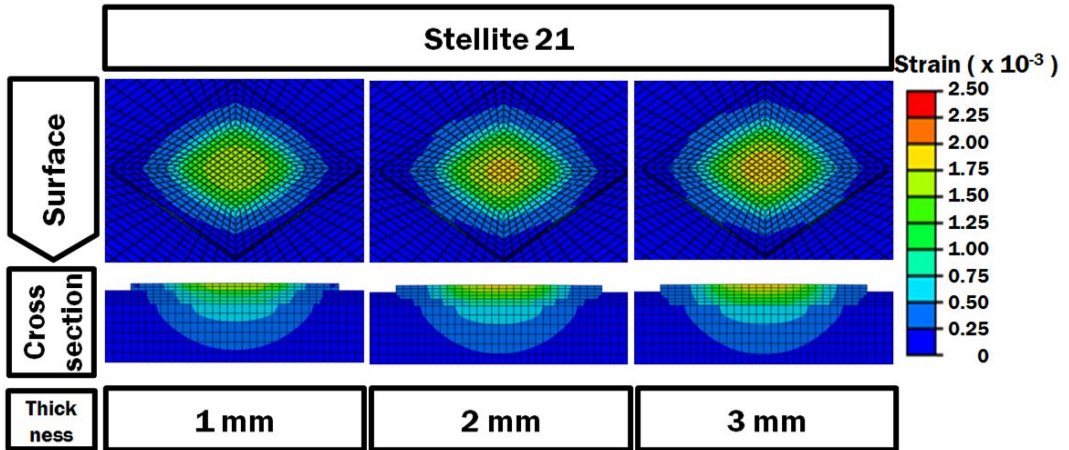


Fig. 15 Principal strain distributions in the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 15 는 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 주 변형을 분포 결과이다. 이 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 주 변형율은 증가함을 알 수 있었으며, 하드페이싱 층의 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가하였을 때 약 8.5 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가하였을 때 약 5.9 % 의 표면 주 변형율이 증가함을 알 수 있었다. Fig. 16 은 깊이방향에 대한 주 변형율 분포 결과로 Stellite 21 하드페이싱

Table 10 Principal strain on the surface and difference of principal strain in the joined region (Stellite 21 hardfaced specimen)

Thickness (mm)	1	2	3
Principal strain on the surface ($\times 10^{-3}$)	17.44	18.57	19.58
$\Delta \epsilon_{s,21}$ ($\times 10^{-3}$)	4.34	3.93	4.08

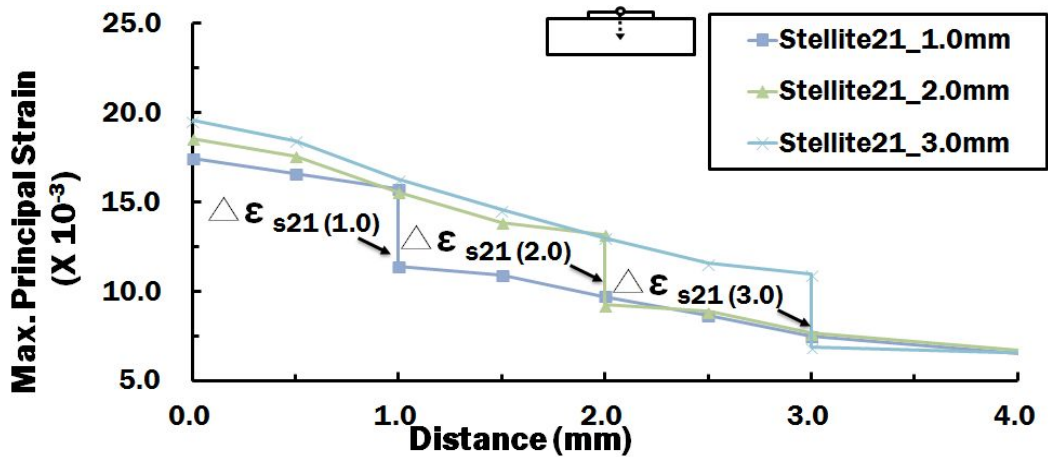


Fig. 16 Principal strain distributions in the thickness direction of the Stellite 21 hardfaced specimen for different hardfacing thickness

층의 두께가 증가할수록 표면의 주 변형율은 증가함을 알 수 있었다. 또한 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 변형율 단차가 발생함을 알 수 있었다. 여기에서 경계부의 주 변형율 단차는 열간성형 시 반복되는 열 사이클에 의해 단차는 증가하게 되며, 하드페이싱 된 경계에서 두 재료의 변형율에 의해 피로파괴 가능성이 증가하게 된다. 따라서 경계에서 발생하는 주 변형율 차는 감소할수록 우수함을 알 수 있었다. Table 10 은 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면과 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 단차 결과 이다. 이 결과 Stellite 21 의 주 변형율 단차는 식 (2) 와 같으며, 하드페이싱 층과 기저부에서 발생하는 변형율 단차는 하드페이싱 층의 두께가 1 mm 일 때 4.34×10^{-3} 이었으며 2 mm 의 하드페이싱 층을 가질때는 3.93×10^{-3} 으로 가장 적은 변형율 분포를 보였으며, 3 mm 의 하드페이싱 층일때는 4.08×10^{-3} 로 변형율은 다시 증가함을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로 온도, 유효응력 및 주변형율분포를 도출하여 비교/분석한 결과 열간금형에 하드페이싱 되는 재료가 Stellite 21 일 경우 표면의 온도분포를 고려하였을 때는 두께가 감소할수록 우수하였지만, 경계부의 유효응력 단차와 주변형율 단차를 모두 고려하였을 경우 두께가 약 2 mm 의 하드페이싱 층을 가지고 있을 때 가장 우수한 두께임을 알 수 있었다.

제 3 절 Fe 계 초합금 19-9 DL 의 두께에 따른 온도/응력/변형을 분포 특성 분석

본 연구에서 19-9 DL 이 STD 61 상면에 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 온도/열응력/변형을 분포특성을 분석하기 위해 비정상 열전달 해석을 수행하여 두께에 따른 비교/분석을 수행하였다.

1. 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께에 따른 온도 분포 특성 분석

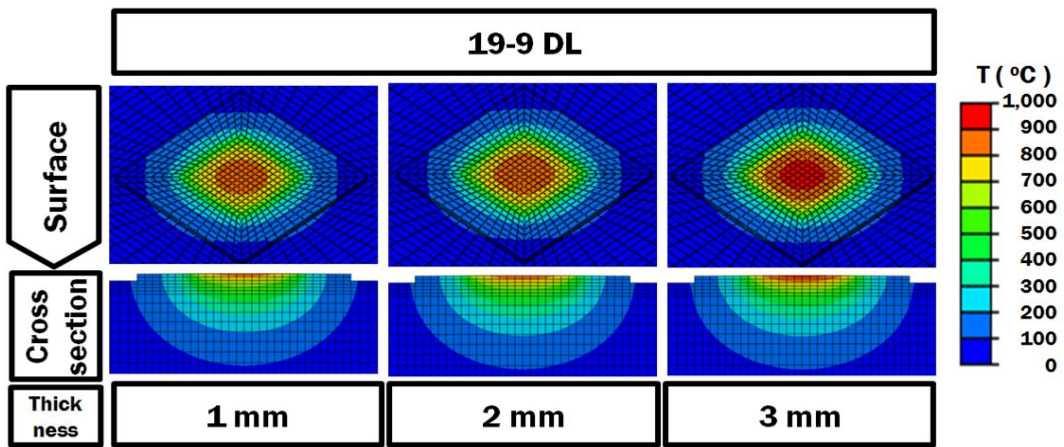


Fig. 17 Temperature distributions in the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 17 은 19-9 DL 이 하드페이싱 되었을 때 층 두께에 따른 온도분포 도출 결과이다. 그 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 온도는 증가함을 알 수 있었으며, 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 약 8.3 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가할 때 약 7.9 % 의 표면 온도가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서의 온도는 열량이 부가되는 부위에서 가장 거리가 있는 3 mm에서 약 524.9 °C 로 가장 낮은 온도분포를 보였다.

Fig. 18 은 19-9 DL 로 하드페이싱 되었을 때 두께별 깊이방향에 대한 온도분포 결과이다. 그 결과 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 온도는 상승함을 알 수 있었으며, 약 3 mm 부근에서 10 °C 내외의 온도차를 보이며 큰 차이를 보이지

Table 11 Temperature of surface and boundary regions of the 19-9 DL hardfaced specimen

Thickness (mm)	1	2	3
Surface temperature (°C)	867.2	915.0	950.3
Boundary temperature (°C)	706.0	611.7	524.9

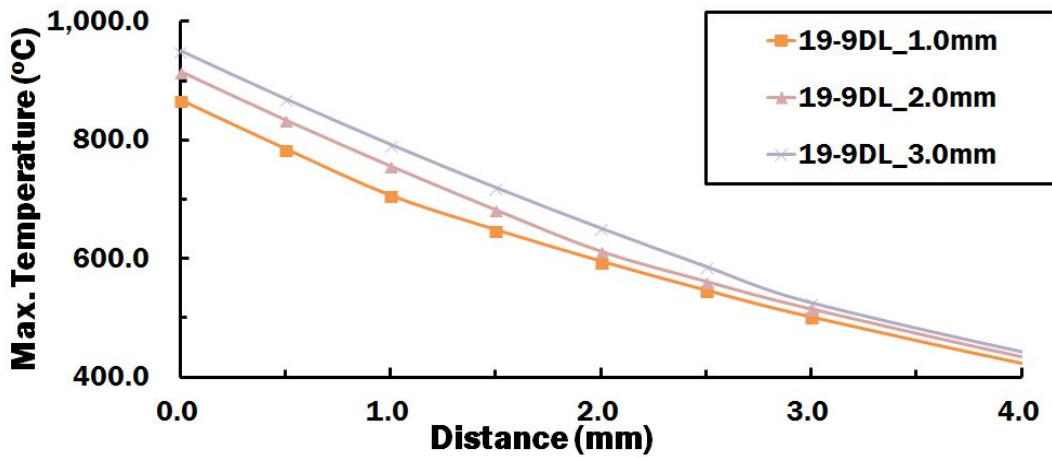


Fig. 18 Temperature distribution in the thick direction of the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

않았다. Table 11 는 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면의 온도와 경계부의 온도 결과이다.

그 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가함에 따라 표면온도는 증가하지만 경계부의 온도는 직접적인 열량이 부가되는 하드페이싱 층의 표면과 거리가 발생하기 때문에 약 3 mm 의 하드페이싱 층 두께의 경계에서 가장 낮은 온도분포를 보임을 알 수 있었다.

2. 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께에 따른 응력 분포 특성 분석

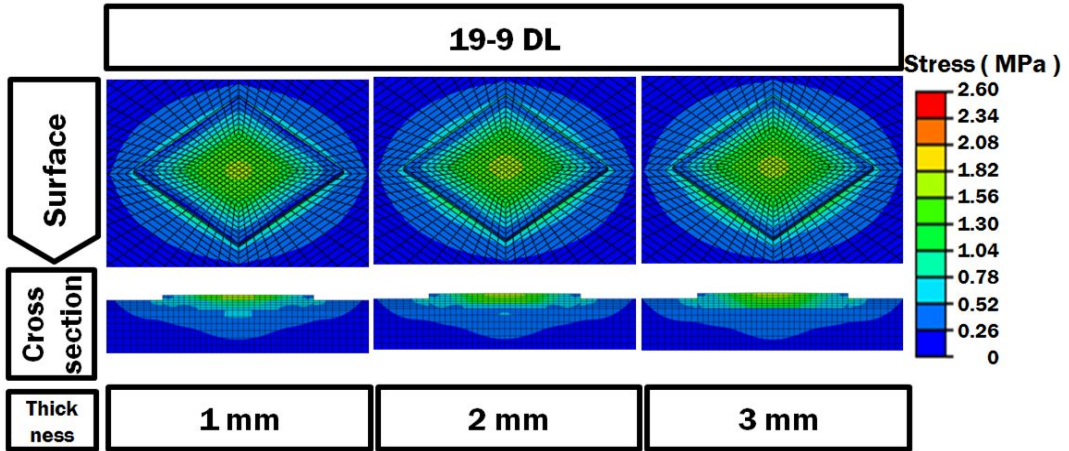


Fig. 19 Effective stress distributions in the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 19 는 19-9 DL 로 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 유효응력 분포 결과이다. 이 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 유효응력은 증가함을 알 수 있었다. 하드페이싱 층의 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 약 5.2 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가할 때 약 3.7 % 의 표면 유효응력이 증가함을 알 수 있었다. 하지만 경계부에서의 응력분포는 이종재료의 의한 응력단차가 발생하였다. 이와 같이 하드페이싱 층과 기저부의 경계에서 발생하는 응력단차는 성형 공정 중 반복되는 열

Table 12 Effective stresses on the surface and the difference of effective stress in the joined region (19-9 DL hardfaced specimen)

Thickness (mm)	1	2	3
Effective stress on the surface (MPa)	1.59	1.63	1.62
$\Delta\sigma_{s,21}$ (MPa)	0.54	0.63	0.73

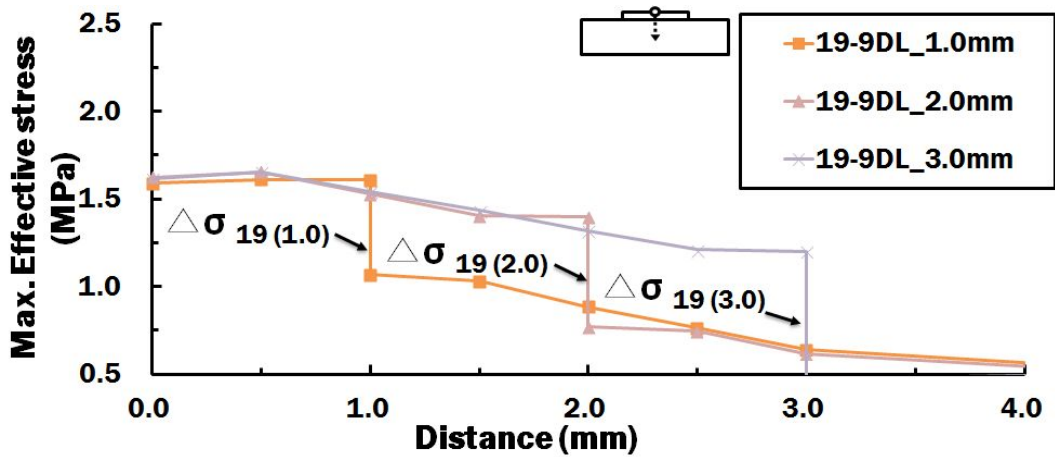


Fig. 20 Effective stress distributions in the thickness direction of the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thickness

사이클에 의해 응력단차가 높을수록 경계부의 피로파괴 가능성이 높아지게 되는 요인이 된다. 이때 발생한 유효응력차는 식 (1) 을 이용하여 도출하였다.

Fig. 20 은 19-9 DL 로 하드페이징 된 금형의 하드페이징 층의 두께별 깊이방향에 대한 유효응력분포 결과이다. 그 결과 19-9 DL 하드페이징 층의 두께가 증가할수록 표면의 유효응력은 상승함을 알 수 있었지만, Table 12 와 같이 경계부에서의 응력차는 1 mm 에서는 0.54 Mpa 이었으며 1 mm에서 2 mm 로 하드페이징 층이 증가하면 약 14.3 %, 2 mm에서 3 mm 로 하드페이징 층이 증가하면 약 13.7 % 의 유효응력 단차가 증가함을 알 수 이와 같은 결과로 두께가 감소할수록 표면의 응력은 감소하며, 경계부의 응력차를 고려하였을 경우 19-9 DL 은 두께가 감소할수록 결함이 적음을 예측할 수 있었다.

3. 19-9 DL 하드페이싱 층의 두께에 따른 변형을 분포 특성 분석

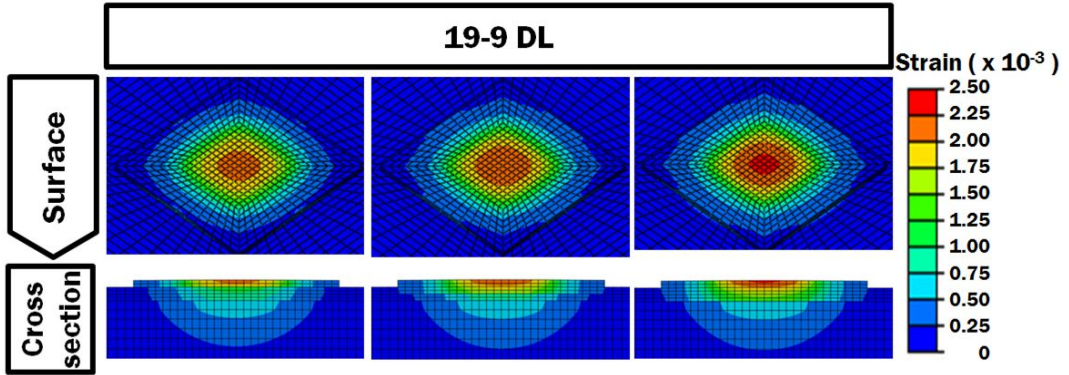


Fig. 21 Principal strain distributions in the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thicknesses

Fig. 21 은 19-9 DL 이 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 주 변형율 분포 결과이다. 이 결과 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 주 변형율은 증가함을 알 수 있었으며, 하드페이싱 층의 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 약 5.5 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가할 때 약 3.1 % 의 표면 주 변형율은 증가함을 알 수 있었다. Fig. 22 는 깊이방향에 대한 온도분포 결과로 19-9 DL 하드페이싱층의 두께가 증가할수록 표면의 주 변형율은 증가함을 알 수 있었다. 또한, 하드페이싱 층과 기저부의

Table 13 Principal strain on the surface and difference of principal strain in the joined region (19-9 DL hardfaced specimen)

Thickness (mm)	1	2	3
Principal strain on the surface ($\times 10^{-3}$)	21.24	22.48	23.21
$\Delta \varepsilon_{s,21}$ ($\times 10^{-3}$)	7.76	7.24	7.18

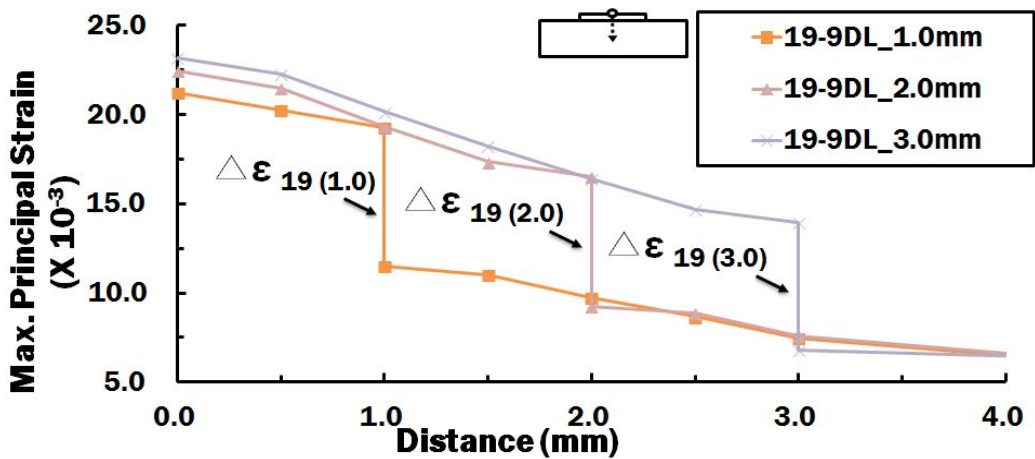


Fig. 22 Principal strain distributions in the thickness direction of the 19-9 DL hardfaced specimen for different hardfacing thickness

경계에서 변형을 단차가 발생함을 알 수 있었다. Table 13 은 하드페이싱 층의 두께에 따른 표면과 하드페이싱층과 기저부의 경계에서 발생하는 단차 결과이다. 이 결과 19-9 DL 의 주 변형을 단차는 식 (2) 와 같으며, 는 Stellite 6 가 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층과 기저부의 주 변형을 분포 결과이다. 이 결과는 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 표면의 주변형율은 증가 함을 알 수 있었으며, 두께가 1 mm에서 2 mm 로 증가할 때 약 8.3 %, 2 mm에서 3 mm 로 증가할 때 약 6.7 % 의 주변형율 단차는 감소함을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로 온도, 유효응력 및 주 변형을 분포를 도출하여 비교/분석한 결과 열간금형에 하드페이싱 되는 재료가 19-9 DL 일 경우 표면의 온도분포와 유효응력 분포를 고려하였을 때는 두께가 감소할수록 우수하였지만, 경계부의 주변형율분포를 고려하였을 경우 두께가 증가할수록 경계부의 주 변형율 차는 감소하여 약 2 mm 의 하드페이싱 층을 가지고 있을 때 가장 우수한 두께임을 알 수 있었다.

제 4 절 온도/유효응력/주변형율을 고려한 재료 및 두께 선정

열간성형 온도조건에서 하드페이싱층의 재료 및 두께에 대한 영향을 분석하기 위해 Stellite 6, Stellite 21 및 19-9 DL 이 하드페이싱 된 금형강에 열간성형 온도 조건을 부여하여 유한요소 해석을 수행하였다.

이 결과 Stellite 6 의 경우 하드페이싱 층의 두께가 증가할수록 경계부의 유효응력과 주변형율의 차가 적었으나, Stellite 21 의 경우 약 2 mm에서 유효응력과 주변형율 차가 가장 적게 나왔다. 19-9 DL 의 경우 경계부의 유효응력 단차와 주변형율 단차가 다른 두 재료에 비해 상대적으로 높게 나타나 반복되는 열 성형 사이클에 의해 경계부의 피로파괴 가능성이 증가하기 때문에 하드페이싱 재료로 부적합함을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로 열간금형강 STD 61 상면에 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 표면의 온도분포, 경계부의 유효응력 단차 및 경계부의 주변형율 단차가 가장 낮은 분포를 보여 경계부의 피로파괴 가능성이 재료 중 가장 낮았으며, 두께는 2 mm 일 때 가장 우수한 두께임을 알 수 있었다.

제 5 장 하드페이싱 시편제작 및 고온경도, 고온마모 시험방법

제 1 절 하드페이싱 된 열간금형강 시편제작

본 연구에서는 열간금형강의 상면에 직접식 금속 쾌속 툴링 (DMT) 공정을 이용하여 Stellite 6, Stellite 21 및 NOREM 02 시편을 제작하였다. 제작순서는 Fig. 23 과 같으며, STD 61 상면에 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 시험을 위한 경면을 도출하기 위한 연마가공을 통해 정밀하게 적층면을 2 mm 로 연마하였으며, 시편의 4 면에 대하여 연마가공을 수행하였다. 시편의 크기는 32 mm × 32 mm × 8 mm 의 STD 61 상면에 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용해 2.5 mm 적층을 수행하였다. 적층된 시편은 표면이 거칠기 때문에 연마가공을 통해 최종 시편의 크기를 30 mm × 30 mm × 10 mm 로 제작하였다. 이때 하드페이싱 공정의 조건은 Table 14 와 같다. 시편의 마모 상대재료는 고온에서도 우수한 기계적 성질을 유지하는 세라믹 소재인 Sialon 으로 제작된 핀을 사용하였다.

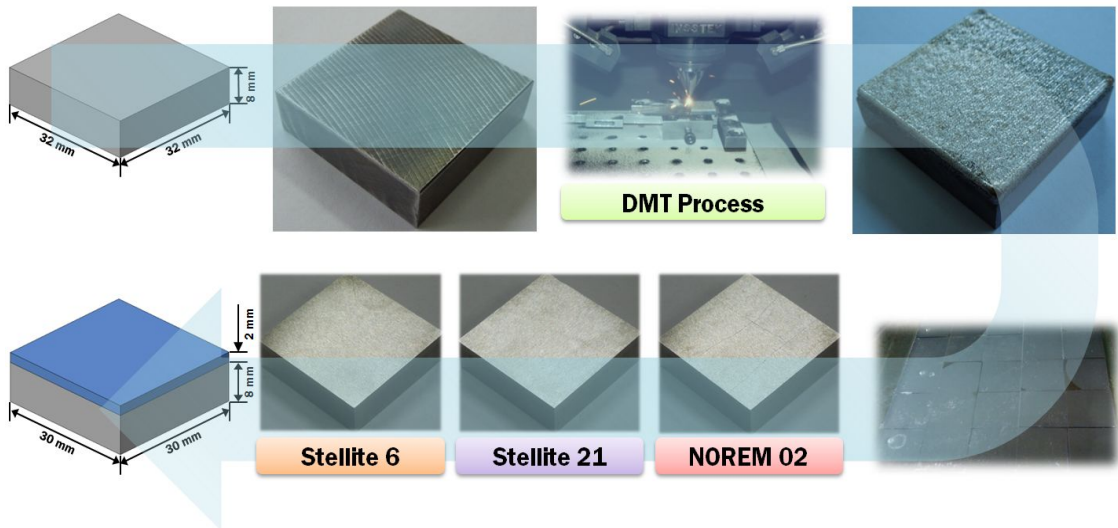


Fig. 23 Manufacturing procedure of the specimen

Table 14 Process condition of hardfacing

Powder feeding speed (g/min)	Shielding gas	Powder/gas ratio	Power of laser (W)	Travel speed of laser (m/min)	Method of path	Overlap
4	Argon	7.5/2.5	370	0.85	Zig-Zag	0.5

제 2 절 하드페이싱 재료에 따른 고온경도시험

하드페이싱 재료에 따른 고온경도시험을 수행하기 위해 Fig. 24 와 같은 공정으로 고온마모시험용 시편을 제작하였다. 이때 사용된 절단기는 Accuton-5 를 사용하였으며, 이송속도는 0.05 mm/min 으로 서서히 절단하였다.



Fig. 24 Procedure of specimen fabrication for hardness experiments in the elevated temperature



Fig. 25 High temperature vickers hardness tester (NIKON QM-2)

시험장비는 Fig. 25 와 같은 포항산업과학연구원에 있는 고온마모시험기 (NIKON QM-2) 를 사용하였으며, 시험 규격은 KS B 0800 : 2001 고온 비커스 경도 시험 방법에 의거하여 시험을 수행하였다. 이때 경도가 일정이상 떨어지게 되면 경도측정을 중지하였다.

Fig. 26 은 고온경도시험 결과이다. 이 결과 STD 61 의 경우 약 400 °C 의 온도에서 경도가 급격히 감소하기 시작해 약 700 °C 의 온도에서 시험을 수행할 수 없을 정도로 경도가 급격히 감소하였다. 이와 같은 결과는 STD 61 의 풀림현상에 의해 경도가 급격히 감소하여 열간성형 조건의 경우 경도가 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 하지만

Stellite 6, Stellite 21 및 NOREM 02 의 경우 경도를 약 900 °C 까지 측정할 수 있었으며, 500 °C 이상에서도 경도를 유지함을 알 수 있었다. 또한, STD 61 과 비교 시 고온에서 경도가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 상온에서는 Stellite 6 가 다른 재료 비해 경도가 급격히 높았지만 약 800 °C 에서는 Stellite 21 이 가장 높은 경도가 유지됨을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로부터 고온에서도 경도가 높은 재료인 Stellite 6, Stellite 21 및 NOREM 02를 하드페이싱 하여 금형을 제작할 경우 고온에서도 경도가 유지되어 금형의 수명이 향상될 것으로 사료된다.

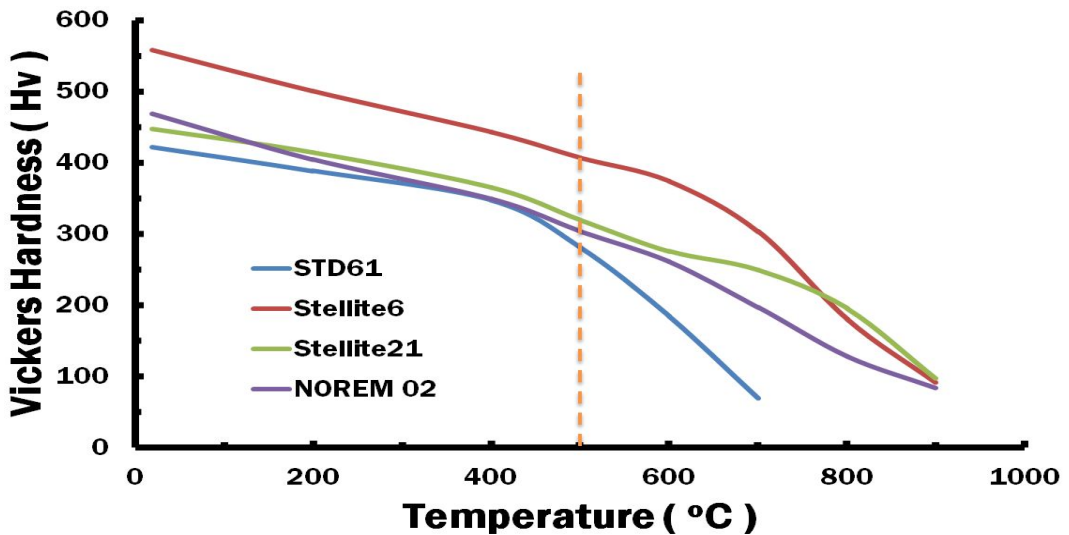


Fig. 26 Influence of the ambient temperature and hardfacing materials on the hardness of the specimen

제 3 절 고온마모시험 방법

본 연구에서 고온마모특성을 분석하기 위하여 Fig. 27 과 같이 포항산업과학연구원의 EFM-III-F 장비를 사용하여 고온마모시험을 수행하였다. 시험은 ASTM G99-05 를 규격으로 시험을 수행하였다. 고온마모시험은 전기로를 통해 800 °C 의 온도로 설정한 후, 핀과 시편의 온도를 균일하게 하기 위하여 30 분간 가열을 하였다. 이때 온도는 ± 10 °C 이내의 변화를 보였다. 가열된 시편은 열간단조금형의 하중조건인 15 kg_f 를 부여하였으며, 회전속도는 200 rpm 의 속도로 30분간 총 6000 회 회전으로 시험을 수행하였다. 시험결과는 데이터 로거를 통해 하중과 마찰계수의 변화를 분석할 수 있었다.

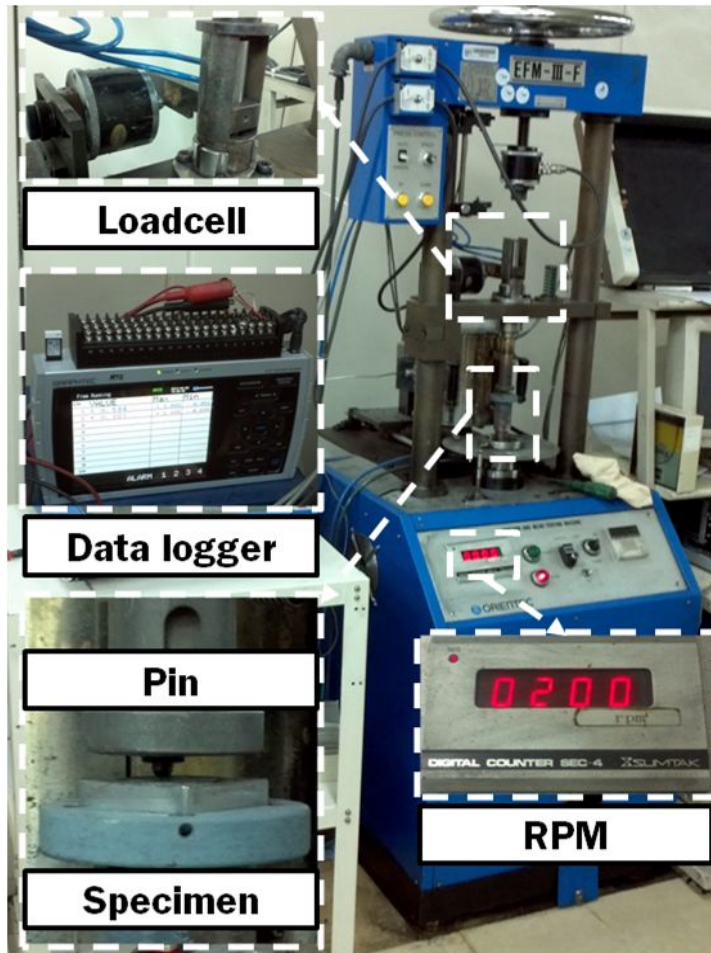


Fig. 27 Experimental set-up of wear experiments in the elevated temperature

제 6 장 하드페이싱 된 열간금형강의 고온마모 시험

제 1 절 하드페이싱 재료에 따른 고온마모시험 결과

1. 하드페이싱 재료에 따른 마찰계수 비교/분석

하드페이싱 재료에 따른 고온마모시험을 수행하여 고온마모 시험 중 마찰계수를 측정할 수 있었다. 마찰계수는 식 4 와 같은 방법으로 도출하였으며, 실험 후 하드페이싱 재료에 따른 마찰계수는 Fig. 28 과 같다.

$$\mu = \frac{F \cdot R}{W \cdot r} \quad (4)$$

여기서 F 는 마찰계수를 측정하는 로드셀에서 발생하는 Kg 이며, R 은 arm 길이로 114 mm 이다. W 는 압하하중 (Kg), r 은 궤적의 반지름 (mm) 이다.

이 결과 Stellite 6 의 경우 재료의 고온마모저항능력이 우수 하여 발생하는 Pin-attac-

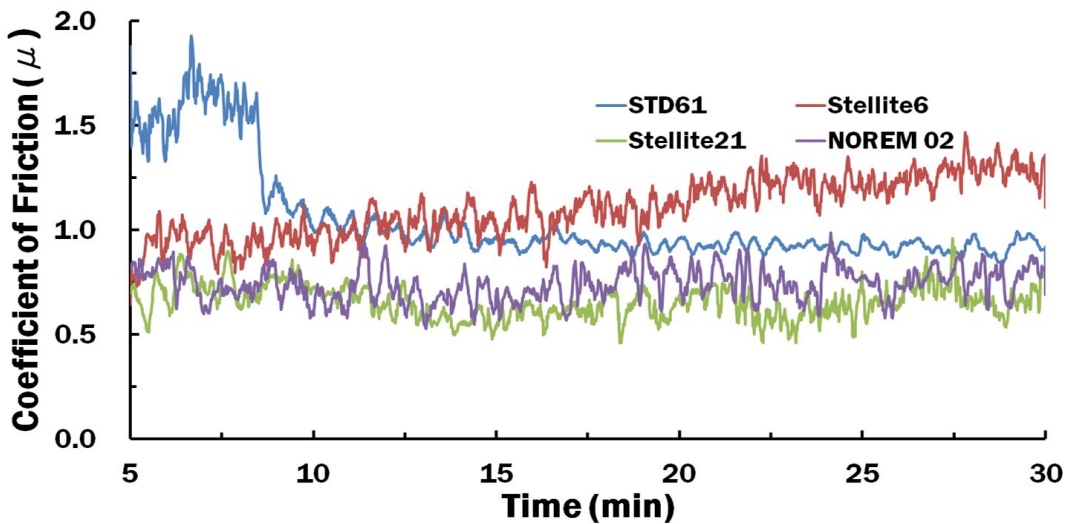


Fig. 28 Coefficient of frictions for different hardfacing materials

-hment 현상에 의해 마찰계수는 점점 증가하여 약 1.2 정도의 마찰계수를 보였지만, Stellite 21 의 최종 마찰계수는 약 0.5 ~ 0.75 사이, NOREM 02 의 최종 마찰계수는 경우 0.5 ~ 0.9 사이를 보여 Stellite 6 에 비해 Stellite 21 과 NOREM 02 의 마찰계수는 더 낮아 재료의 고온윤활이 우수함을 알 수 있었다. 또한 STD 61 의 경우 10 분 전의 마찰계수 값이 최대 1.5 ~ 20 정도의 분포를 보이는데 이때 마모량이 증가하고, 마찰부의 금속이 용융되어 윤활작용을 하였을 것으로 사료된다.

2. 하드페이싱 재료에 따른 마모량 비교/분석

고온마모 시험 후 마모량을 분석하기 위하여 하드페이싱 된 시편의 재료별 무게를 전자정밀저울(CAS-CUX 620H)을 이용하여 측정된 후, 시험이 끝난 후 마모 된 시편의 무게를 측정하여 마모량을 비교/분석하였다. 시험 후 시편은 Fig. 29 과 같이 육안으로 마모부를 확인할 수 있었다. 그 결과 STD 61 은 하드페이싱 된 시편에 비해 마모량이 많음을 확인할 수 있었다. 정량적인 마모량을 측정하기 위하여 전자정밀저울을 이용하여 측정을 하였으며, 마모량을 Table 15 와 같이 도출할 수 있었다.

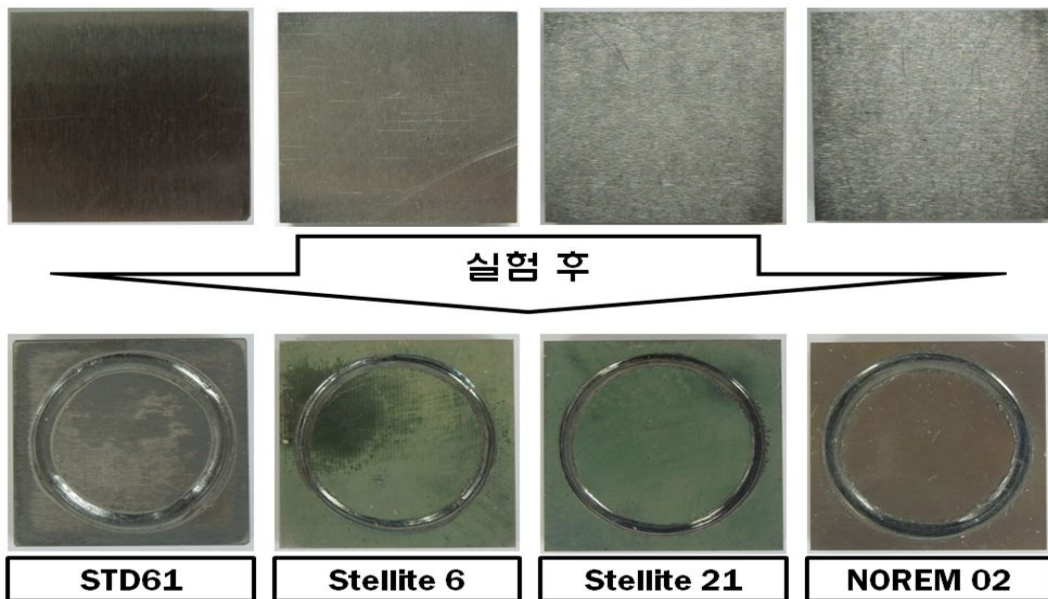


Fig. 29 Worn shapes for different hardfacing materials

Table 15 Comparison of the hardfaced specimens with the STD 61 specimen from viewpoints of the weight loss and the worn volume

Specimen	STD 61 specimen	Stellite 6 hardfaced specimen	Stellite 21 hardfaced specimen	NOREM 02 hardfaced specimen
Weight loss (g)	0.156	0.058	0.05	0.058
Worn volume (mm ³)	2.013	0.687	0.600	0.810

이와 같은 결과로 STD 61 의 경우 마모량이 가장 많음을 알 수 있었으며, Stellite 6 와 NOREM 02 의 경우 마모량이 같음을 알 수 있었다. 하지만 밀도차에 의해 마모체적은 틀렸는데, 마모체적의 경우 식 (5) 와 같은 방법으로 도출하였다.

$$W_v = \frac{W_w}{\rho} \quad (5)$$

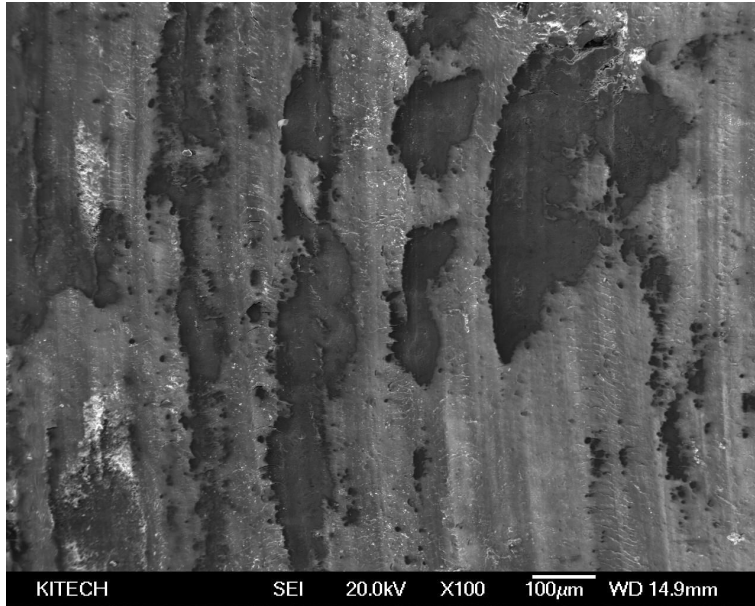
도출된 마모체적은 NOREM 02 의 경우 Stellite 6 에 비해 많은 마모체적을 보여 Stellite 6 가 NOREM 02 에 비해 마모체적이 적음을 알 수 있었다. Stellite 21 의 경우 하드페이싱 된 열간금형강 조건에서 가장 낮은 마모량, 마모체적을 보여 800 °C 의 온도에서 고온마모 시험을 수행했을 경우 가장 우수한 하드페이싱 재료임을 알 수 있었다.

3. 하드페이싱 재료에 따른 마모시험 후 시편조직 비교

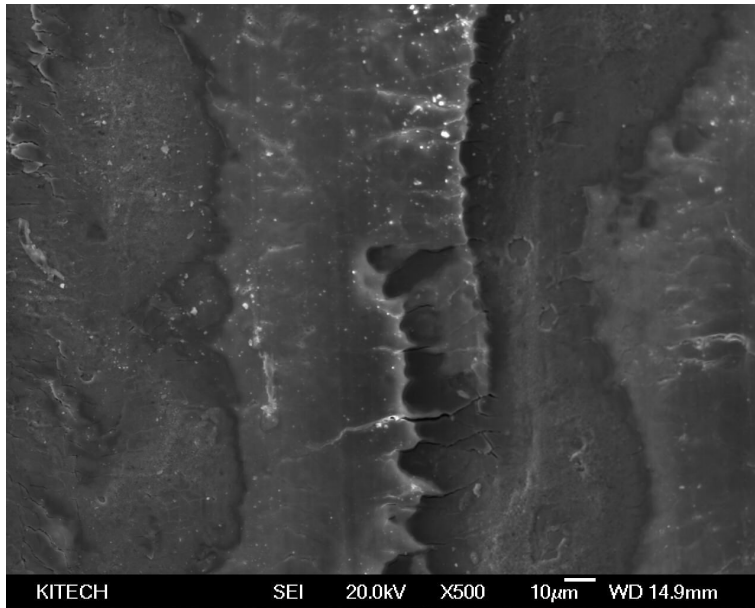
하드페이싱 재료별 시편의 마모시험 후 시편조직을 촬영하기 위해 Fig. 30 과 같은 일본의 Jeol 사 JSM-7000F 장비를 이용하여 시편의 마모면 조직변화와, 경계에서 발생하는 결합특성 및 경계결함 특성을 분석/고찰 할 수 있었다.



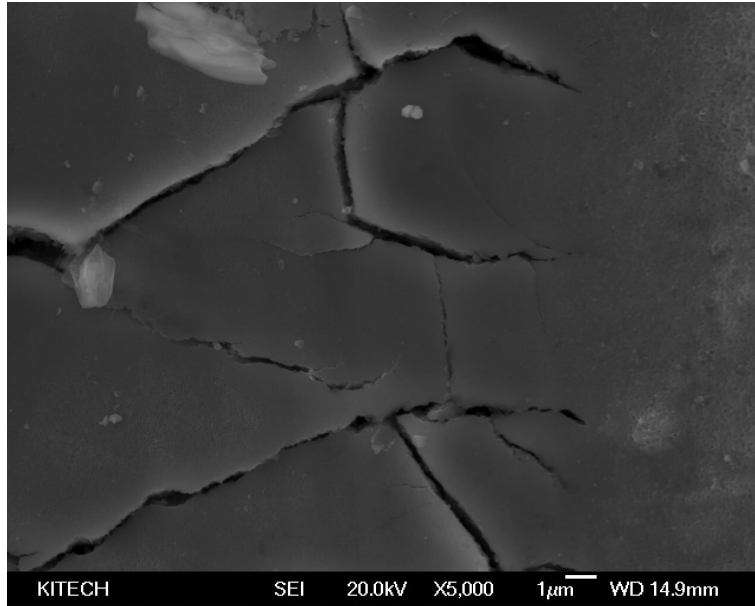
Fig. 30 Scanning electronic microscope (SEM)



(a) Magnification ratio = 100



(b) Magnification ratio = 500



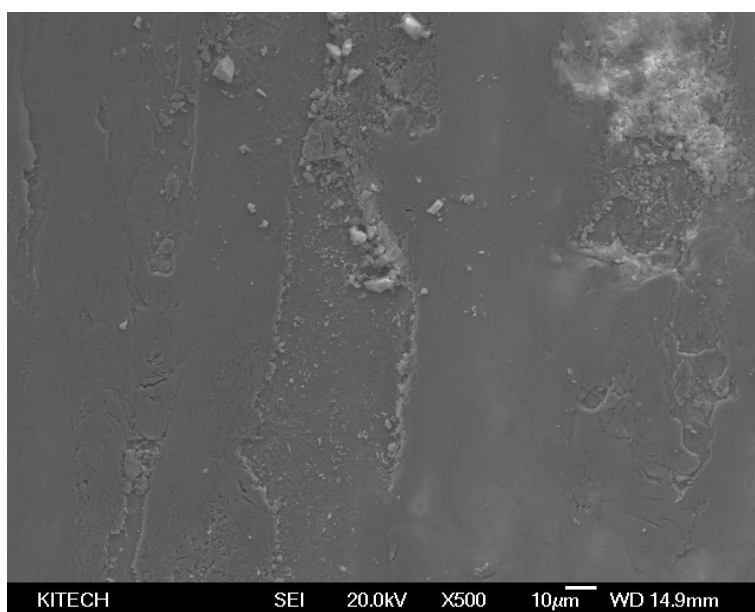
(c) Magnification ratio = 5,000

Fig. 31 Morphologies in the vicinity of the worn surface of STD 61 specimen
(Furnace temperature = 800 °C)

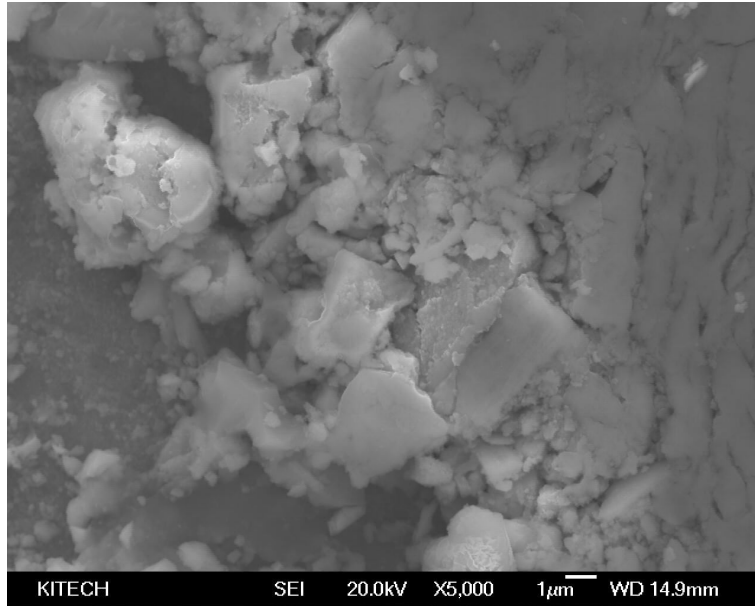
Fig. 31 은 STD 61 의 마모시험 후 마모면의 조직변화 결과이다. 이 결과 Fig. 31 (a) 인 100 배율에서 확인한 결과 STD 61 의 경우 마모면이 상당히 거칠게 나타나며, Fig. 31 (b) 인 500 배율로 확인하였을 경우 마모면의 균열 사이로 Sialon 편에서 입자가 탈락하여 STD 61 마모면에 접합됨을 알 수 있었다. Fig. 31 (c) 인 5,000 배율로 확대했을 때 마모면에 균열이 발생함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 고온마모시험 시 Sialon 편과 STD 61 간에 스틱슬립(Stick-Slip) 현상에 의해 발생하는 Pin-attachment 현상으로 인해 발생함을 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100



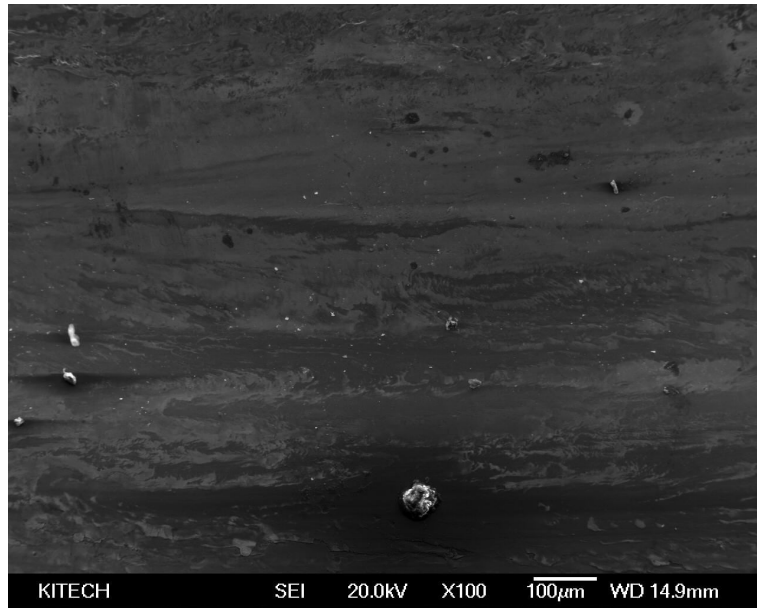
(b) Magnification ratio = 500



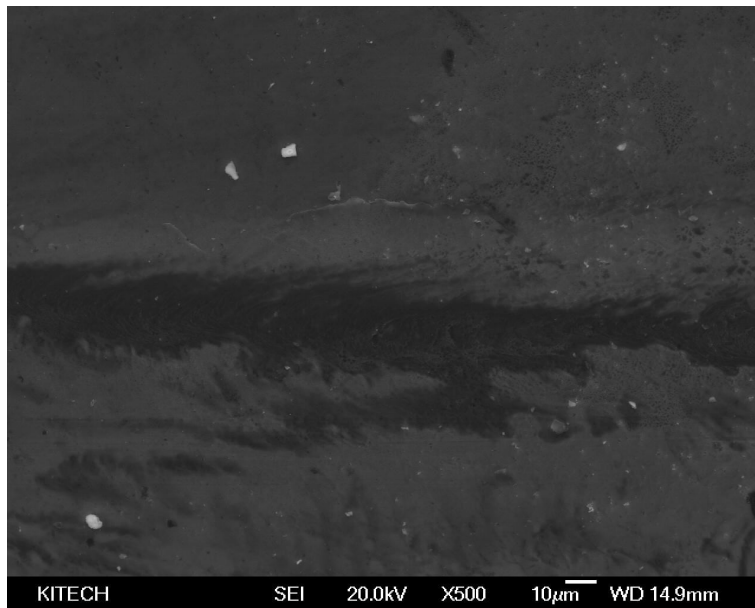
(c) Magnification ratio = 5,000

Fig. 32 Morphologies in the vicinity of the worn surface of stellite 6 specimen
(Furnace temperature = 800 °C)

Fig. 32 는 Stellite 6 로 하드페이싱 된 시편의 마모시험 후 마모면의 조직변화 결과이다. 이 결과 Fig. 32 (a) 인 100 배율로 확인하였을 경우 Stellite 6 의 마모면은 STD 61 에 비해 깨끗한 마모면을 보였으며, Fig. 32 (b) 인 500 배율로 확대했을 때 Sialon 핀에서 분리된 입자가 Stellite 6 마모면에 부착되었음을 알 수 있었다. Fig. 32 (c) 인 5000 배율로 확대한 결과 마모면에서 Sialon 입자가 많이 발견되었다. 이와 같은 결과를 통해 Stellite 6 로 하드페이싱 된 시편의 경우 마모면의 Stellite 6 와 Sialon 핀 사이에 발생하는 Pin-attachment 현상으로 인해 마찰계수가 다른 재료들에 비해 높게 나타남을 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100



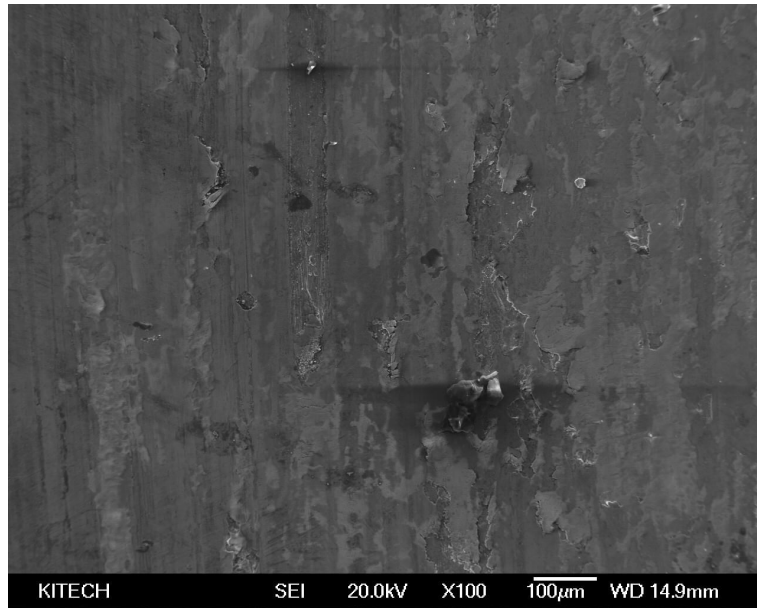
(b) Magnification ratio = 500



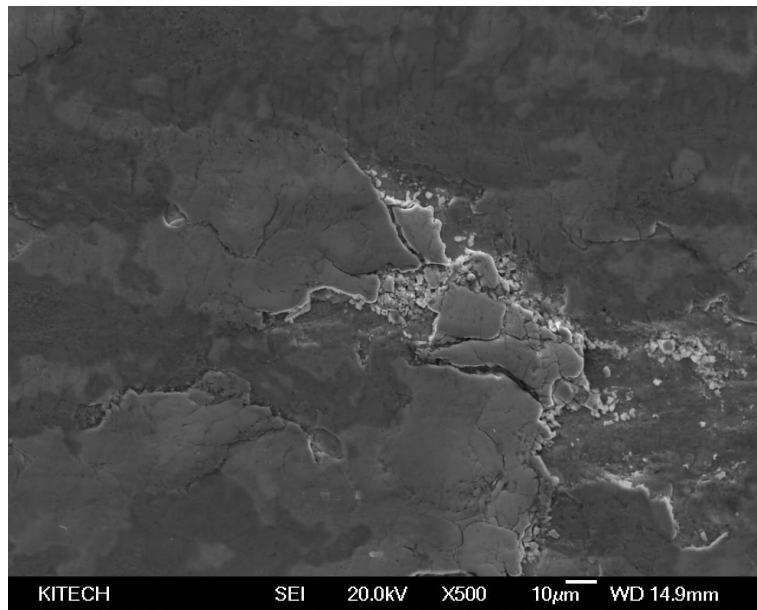
(c) Magnification ratio = 5,000

Fig. 33 Morphologies in the vicinity of the worn surface of stellite 21 specimen
(Furnace temperature = 800 °C)

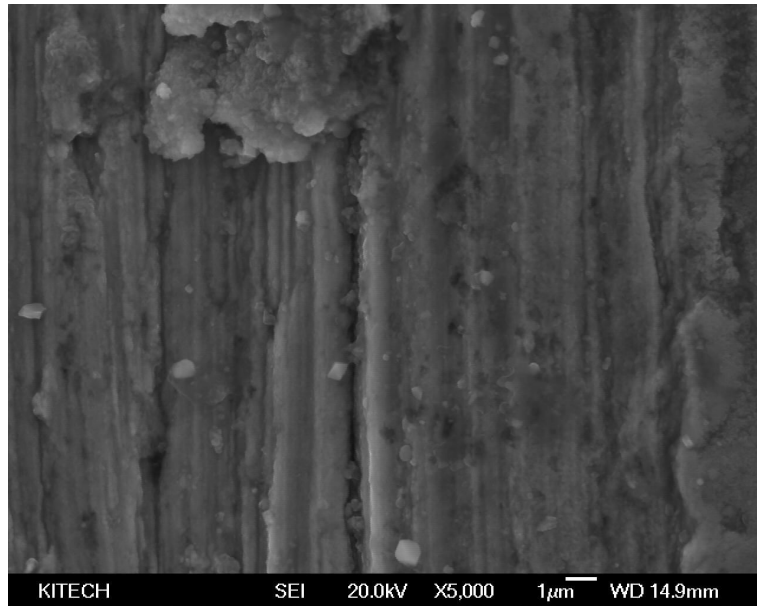
Fig. 33 은 Stellite 21 로 하드페이싱 된 시편의 마모시험 후 마모면의 조직변화 결과이다. 이 결과 Fig. 33 (a) 인 100 배율에서 확인한 결과 다른재료로 하드페이싱 된 시편 보다 상당히 깨끗한 마모면을 보였으며, Fig. 33 (b) 인 500 배율에서 확대된 사진을 보면, 마모면은 대부분 용융마모가 발생했음을 알 수 있었다. Fig. 33 (c) 인 5000 배율로 확대한 결과 마모면의 용융으로 인해 용융된 Stellite 21 이 마모방향을 따라 물결모양의 용융흔적이 발생함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 Stellite 21 로 하드페이싱 된 시편은 고온마모시험 시 마모면에 미세한 용융이 발생되게 되는데 이러한 미세한 용융에 의해 윤활현상이 발생되어 마찰계수가 다른 재료들에 비해 상대적으로 낮음을 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100



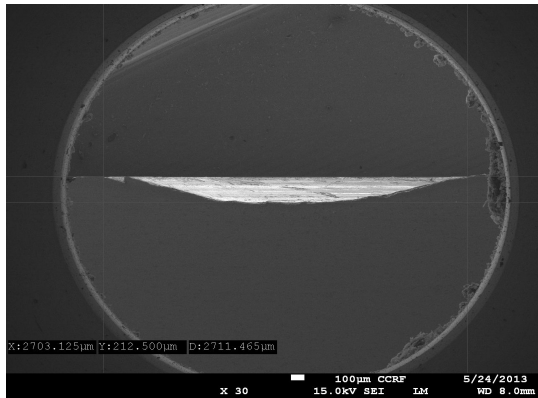
(b) Magnification ratio = 500



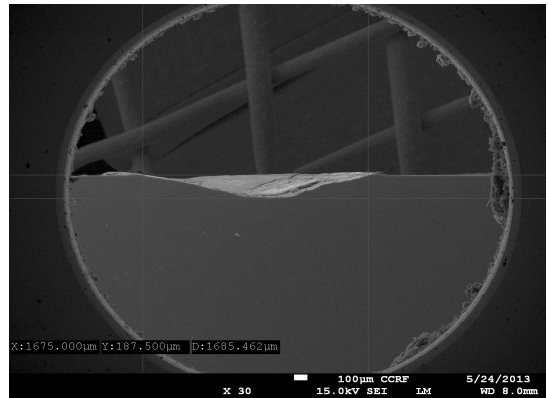
(c) Magnification ratio = 5,000

Fig. 34 Morphologies in the vicinity of the worn surface of norem 02 specimen
(Furnace temperature = 800 °C)

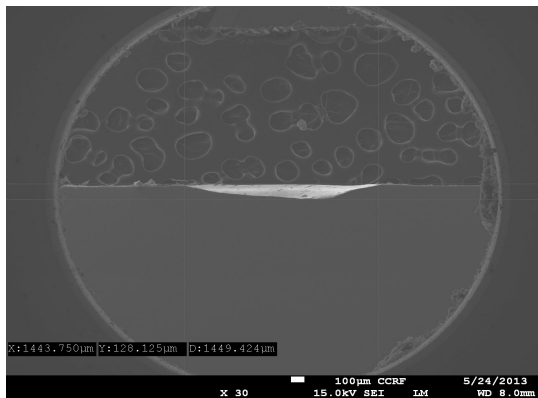
Fig. 34 는 NOREM 02 로 하드페이싱 된 시편의 마모시험 후 마모면의 조직변화 결과로, Fig. 34 (a) 인 100 배율에서 확인한 결과 마모면은 Stellite 6 나 Stellite 21 에 비해 상당히 거친 마모면을 보임을 알 수 있었다. 또한 NOREM 02 의 경우 Fig. 34 (b) 인 500 배에서 마모면을 확인 하였을 때 마모면의 입자가 탈락하는 형상을 보임을 알 수 있었다. Fig. 34 (c) 인 5000 배에서는 마모면을 따라 마모형상을 보임으로 연삭마모에 의하여 마모면이 발생하였을 것으로 판단하였다. 이와 같은 결과를 통해 NOREM 02 로 하드페이싱되었을 경우 NOREM 02 의 입자가 탈락되며, 하드페이싱 부의 균열로 인하여 부적합한 재료로 판단을 하였다.



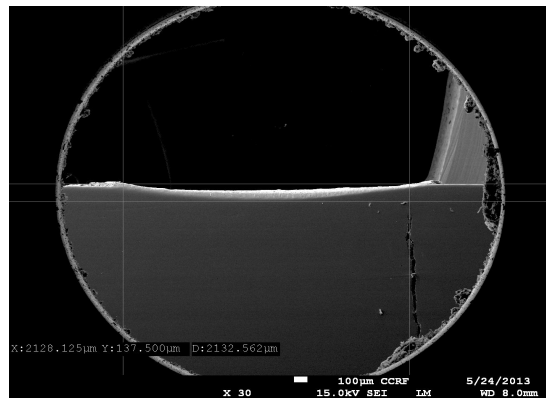
(a) STD 61 specimen



(b) Stellite 6 specimen



(c) Stellite 21 specimen



(d) NOREM 02 specimen

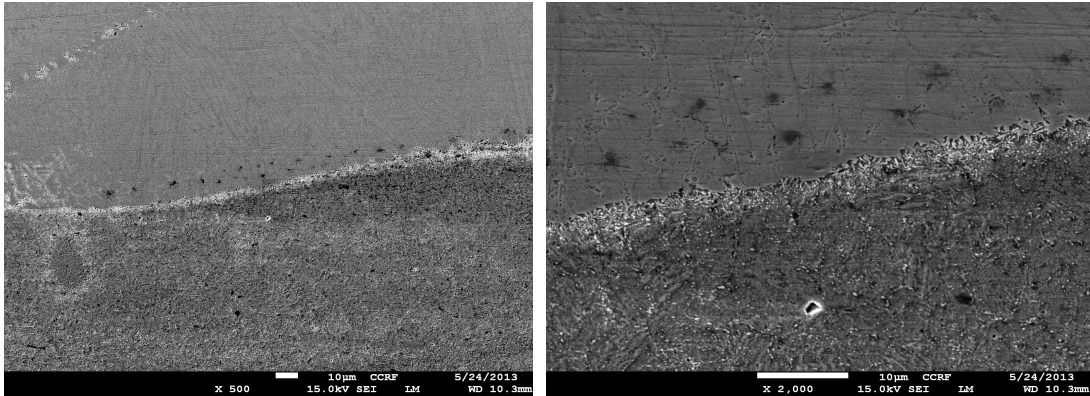
Fig. 35 Morphologies in the vicinity of the worn section (Furnace temperature = 800 °C)

Table 16 Comparison of the hardfaced specimens with the STD 61 specimen from viewpoints of the worn width and the worn depth

specimen	STD 61 specimen	Stellite 6 hardfaced specimen	Stellite 21 hardfaced specimen	NOREM 02 hardfaced specimen
Worn width (mm)	2.7	1.67	1.44	2.13
Worn depth (mm)	0.21	0.187	0.12	0.13

Fig. 35 은 마모시험 후 시편의 전단면 마모 깊이에 대한 사진이다. 이와 같은 결과

는 Table 16 과 같이 정리하였다. STD 61 의 경우 마모면의 폭은 2.7 mm 이며, 마모깊이는 0.21 mm 로 다른 재료들에 비해 상당히 많은 마모량을 가짐을 확인할 수 있었다. Stellite 6 의 경우 STD 61 보단 우수한 마모특성을 보였지만, Stellite 21 이나 NOREM 02 에 비해 마모깊이가 깊게 나타남을 알 수 있었다. Stellite 21 은 하드페이싱 된 재료 중 마모폭과 마모깊이가 가장 적은값을 나타내어 가장 우수한 마모특성을 보였다. NOREM 02 의 경우 마모깊이는 적지만, 넓은 마모폭을 가짐을 알 수 있었다.

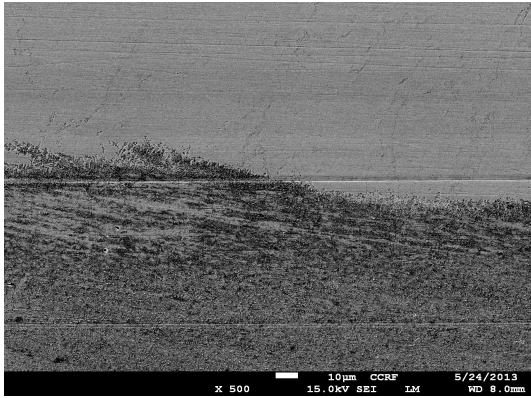


(a) Magnification ratio = 500

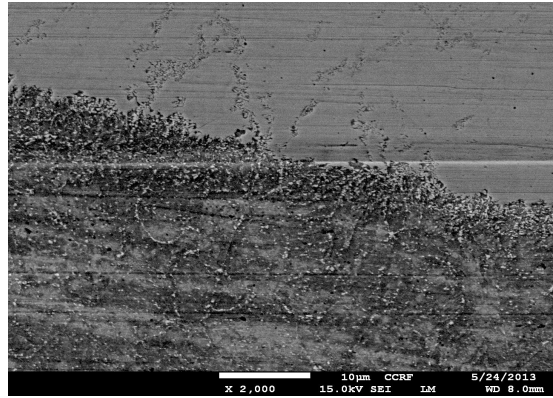
(b) Magnification ratio = 2,000

Fig. 36 Morphologies in the vicinity of the deposited region Stellite 6

Fig. 36 은 마모시험 후 Stellite 6 시편의 전단면에서 STD 61 과 하드페이싱부의 경계부 촬영 사진이다. Fig. 36 (a) 는 Stellite 6 로 하드페이싱 된 시편의 경계를 500 배율로 촬영하였으며, 특별한 경계결함은 발견되지 않았다. Fig. 36 (b) 인 2,000 배율까지 확인하였을 때에도 특별한 경계결함은 발견되지 않아 접합성능이 우수함을 알 수 있었다.



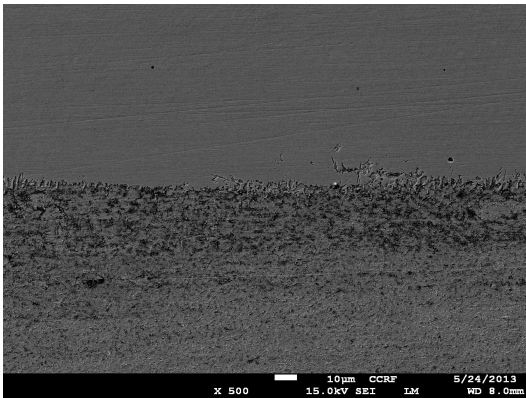
(a) Magnification ratio = 500



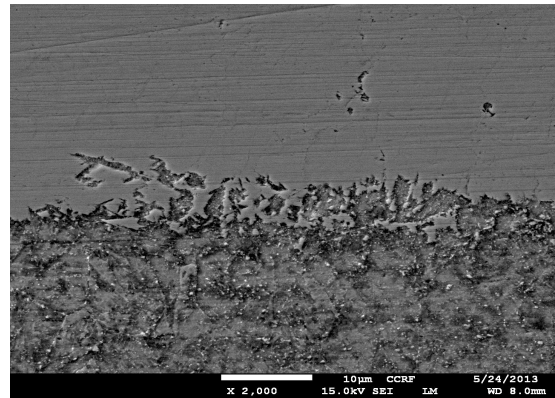
(b) Magnification ratio = 2,000

Fig. 37 Morphologies in the vicinity of the deposited region Stellite 21

Fig. 37 은 Stellite 21 로 하드페이징 된 시편의 경계이며, 최대 2000 배율까지 확인을 하였지만 하드페이징 부와 Stellite 21 의 경계에서 발생하는 결함은 발견되지 않았다.

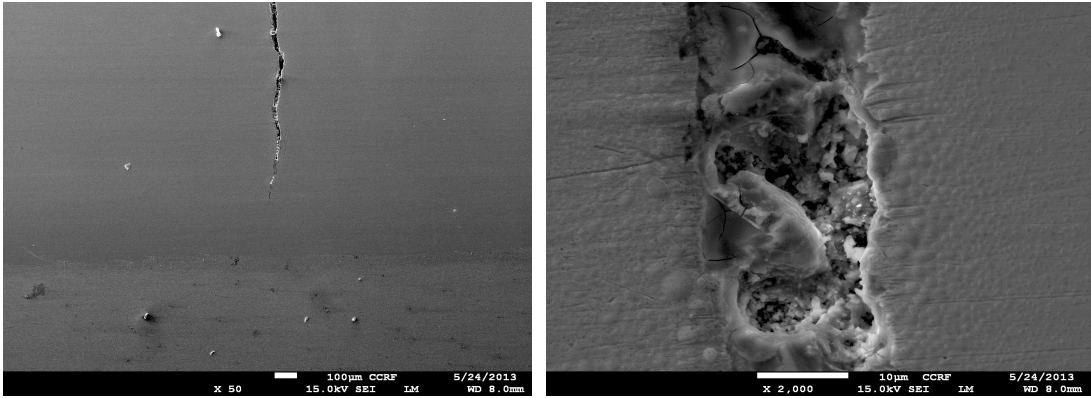


(a) Magnification ratio = 500



(b) Magnification ratio = 2,000

Fig. 38 Morphologies in the vicinity of the deposited region NOREM 02



(a) Result of Crack in 50 X in SEM (b) Result of Crack in 2,000 X in SEM

Fig. 39 Morphologies in the vicinity of the crack initiation region

Fig. 38 은 NOREM 02 로 하드페이싱 된 시편의 경계이다. 이 결과 Fig. 38 (a),(b)를 확인한 결과 접합면에 대해서는 크게 문제가 되지 않았다.

하지만 Fig. 39 (a),(b) 와 같이 STD 61 과 NOREM 02 의 경계부에서 균열이 발생되는 문제가 발생하였다. 이와 같은 결과로 하드페이싱 재료로 NOREM 02 는 하드페이싱 재료로 부적합한 재료임을 알 수 있었다.

4. 하드페이싱 재료에 따른 경도 비교/분석

본 연구에서 경도를 측정하기 위해 Fig. 40 과 같은 마이크로 비커스 경도 측정기 (HMV) 를 사용하여 실험 전, 후 에 대한 시편 경도를 비교하였다.

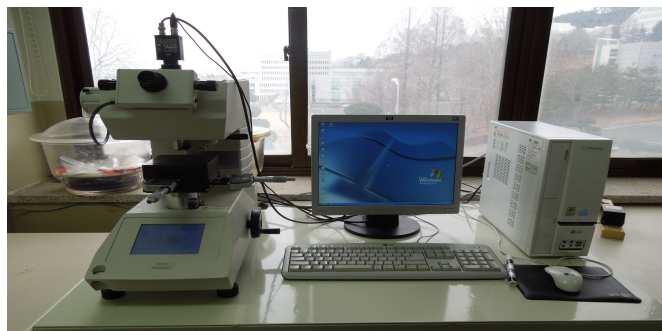


Fig. 40 Experimental set-up of micro-vickers hardness measurement

그 결과는 Fig. 41 과 같다. 이 결과 초기의 경도는 Fig. 41 (a) 와 같이 Stellite 6 가 가장 높았으며, Stellite 21 이 가장 낮은 경도분포를 보임을 알 수 있었다. 실험 후 경도는 Fig. 41 (b) 와 같이 STD 61 의 경우 풀림현상에 의해 경도는 483 HV 에서 300.2 HV 로 급격하게 떨어짐을 알 수 있었다. 하지만 Stellite 6, Stellite 21 및 NOREM 02 의 경우 경도변화는 없어 고온에서도 기계적 성질이 우수한 재료임을 알 수 있었다.

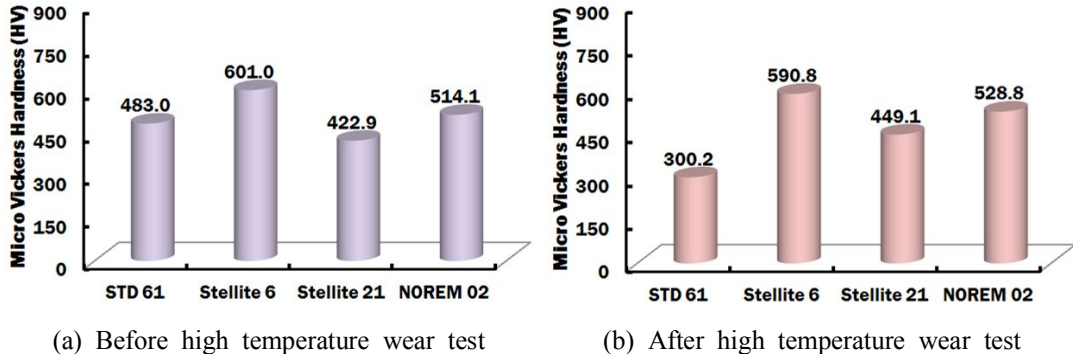
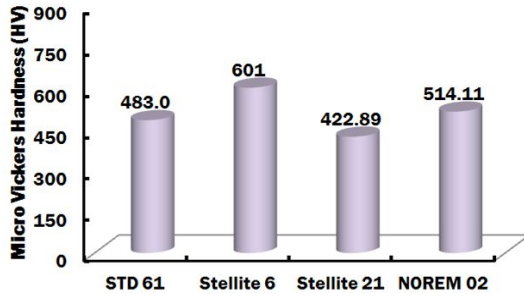


Fig. 41 Variation of surface hardness of specimen according to wear experiments in the elevated temperature

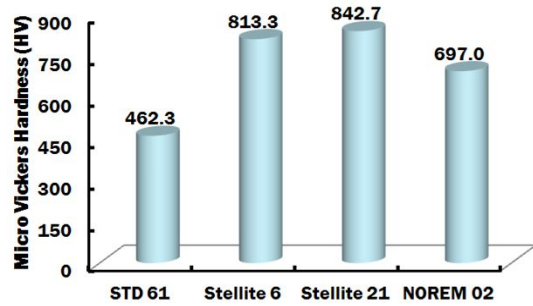
마찰에 의한 가공 경화도를 알아 보기 위해 마모면의 경도를 측정하였다. 이 결과는 Fig. 42 과 같다. 마찰에 의한 가공경화(FIWH)는 식 (6) 와 같이 도출할 수 있었다.

$$FIWH(\%) = \frac{HV_{ws} - HV_{initial}}{HV_{ws}} \quad (6)$$

HV_{ws} 는 마모면의 경도 이며, $HV_{initial}$ 은 마모시험 전 시편의 경도로 도출하며, 마모면에 대한 경도의 증가를 도출할 수 있는 수식이다. FIWH(Friction-induced Work Hardening) 은 Table 17 과 같다. 이 결과 STD 61 의 경우 마모면의 경도는 약 4.5 % 감소함을 보였으며, Stellite 6 는 26.1 %, Stellite 21 은 49.8 %, NOREM 02 는 26.2 % 가 상승하였다.



(a) Before high temperature wear test



(b) After high temperature wear test

Fig. 42 Variation of hardness of the worn region according to wear experiments in the elevated temperature

Table 17 Friction induced working hardenings for different hardfacing specimens

Specimen	STD 61 specimen	Stellite 6 hardfacing specimen	Stellite 21 hardfacing specimen	NOREM 02 hardfacing specimen
FIWH (%)	-4.5	26.1	49.8	26.2

이와 같은 결과로부터 STD 61 의 경우 실험 전에 비해 실험 후 마모면의 경도는 감소함을 알 수 있었지만 Stellite 6 와 Stellite 21 은 마모면의 경도가 증가함을 알 수 있었다. 특히, Stellite 21 의 경우 초기에 가장 낮은 경도를 보였지만, 고온마모에 의한 경도상승이 가장 높게 나타나 마모 특성이 가장 우수한 재료임을 알 수 있었다.

제 2 절 Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 고온마모 시험 결과

재료에 따른 고온 마모 시험 후 Stellite 21 의 고온마모특성이 가장 우수하여, Stellite 21 로 하드페이싱 될 때 하드페이싱 층의 두께에 따른 고온마모 특성을 분석하기 위하여 Fig. 35 와 같이 하드페이싱 두께를 각각 1 mm, 3 mm 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. Stellite 21 이 2 mm 하드페이싱 된 시편은 Fig. 23 과 같이 제작이 되었기 때문에 1 mm, 3 mm 시편을 제작하였다.

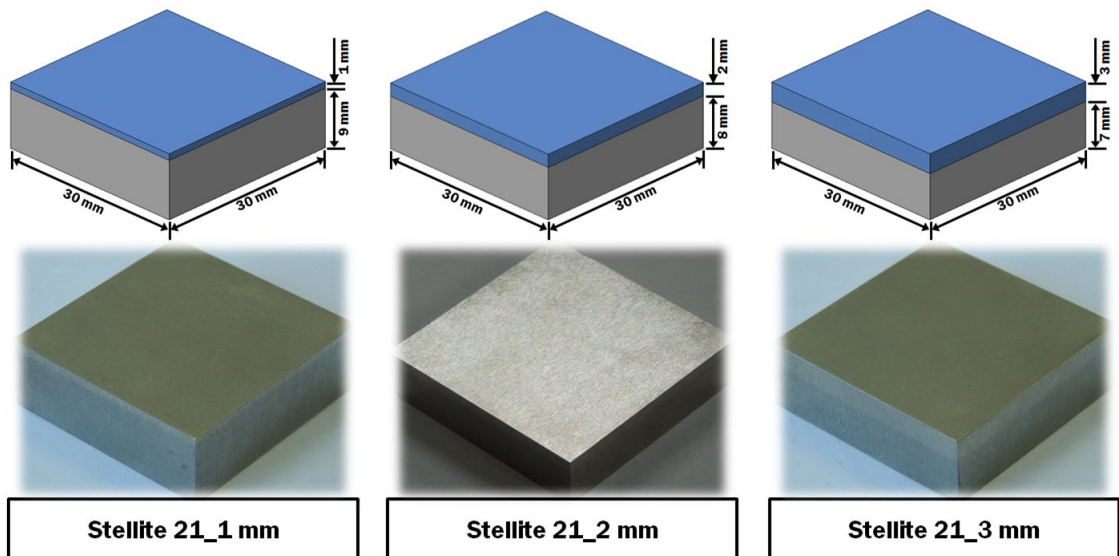


Fig. 43 Specimen design for the wear experiments in the elevated temperature to investigate hardfacing thickness effects

1. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마찰계수 비교/분석

실험 후 하드페이싱 두께에 따른 마찰계수는 Fig. 44 와 같다. 마찰계수는 식 4 와 같은 방법으로 도출하였다.

이 결과는 Stellite 21 로 하드페이싱 된 시편으로 시험을 하였으며, 각 두께에 따른 마찰계수를 비교할 수 있었다. 1 mm 와 2 mm 로 하드페이싱 된 시편의 마찰계수는 0.5 ~ 0.75 사이를 유지함을 알 수 있었다. 하지만 Stellite 21 이 3 mm 하드페이싱 된

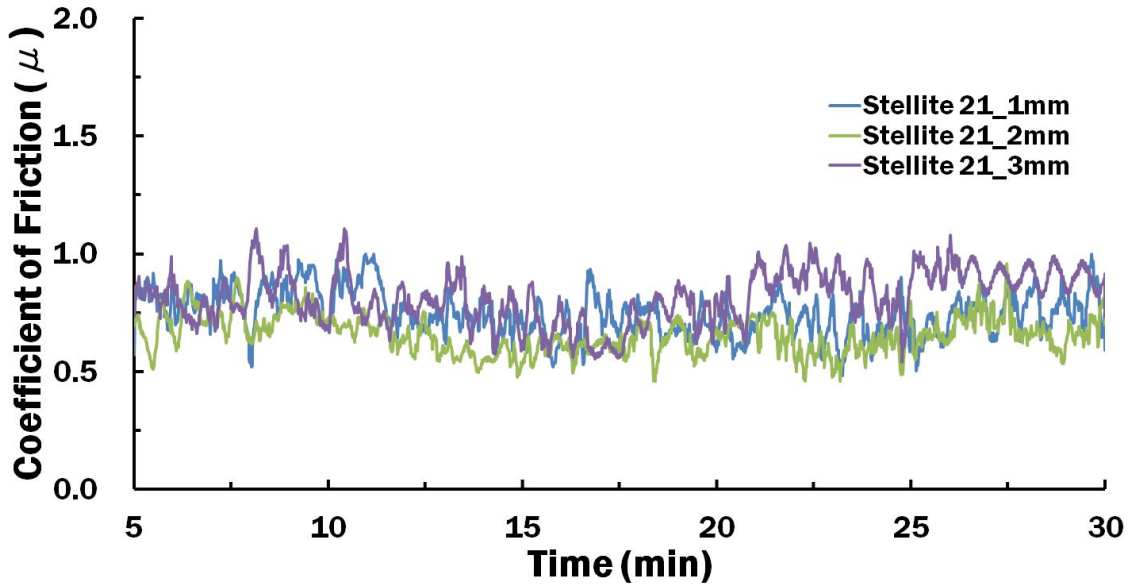


Fig. 44 Coefficient of frictions for different hardfacing thicknesses

시편의 경우 약 20 분 이후부터 다른 두께들과 다르게 약 1.0 의 마찰계수를 보이며 높은 마찰계수를 보였다. 이와 같은 결과로부터 약 2 mm 의 하드페이싱 층을 가질 때 최종 마찰계수는 가장 낮은값을 보임을 알 수 있었다.

2. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모량 비교/분석

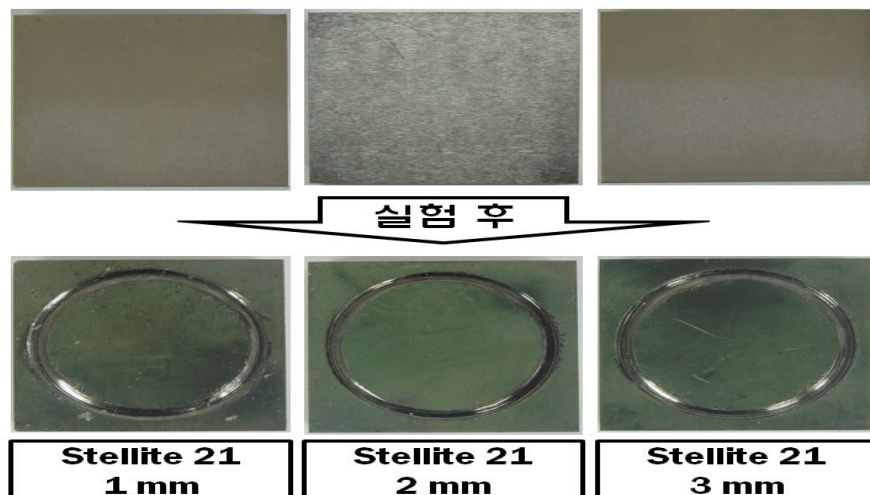


Fig. 45 Worn shapes for different hardfacing thicknesses

Table 18 Weight losses and worn volumes for different hardfacing thicknesses

Thickness (mm)	1 mm	2 mm	3 mm
Weight loss (g)	0.077	0.05	0.072
Worn volume (mm ³)	0.924	0.600	0.864

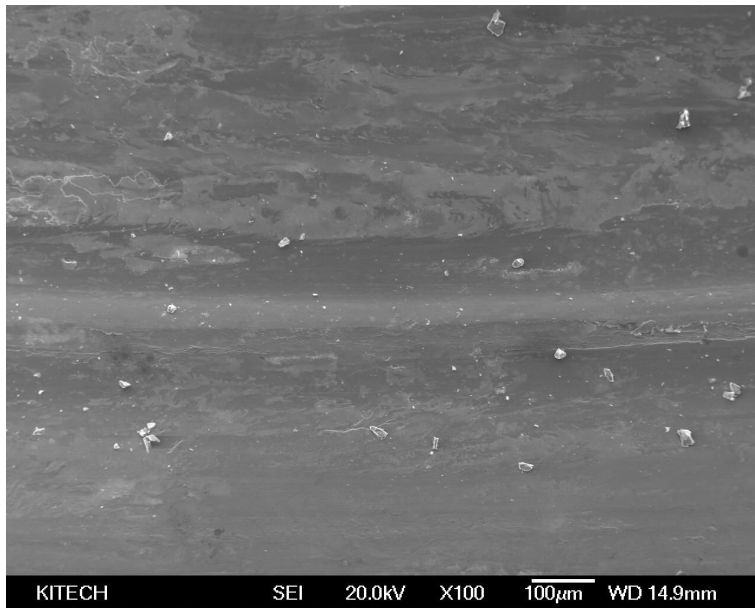
고온마모 시험 후 마모량을 분석하기 위하여 하드페이싱 된 시편의 재료별 무게를 전자 정밀저울을 이용하여 측정하였다. 시험 후 시편은 Fig. 35 과 같이 마모부를 육안으로 확인할 수 있었다. 그 결과 1 mm 로 하드페이싱 되었을 때 마모량이 다른 두께에 비해 비교적 많이 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 마모량, 마모체적 등을 Table 18 과 같이 도출하였다.

이와 같은 결과로 1 mm 의 하드페이싱층을 가지는 시편의 경우 마모량이 0.077 g 으로 가장 많음을 알 수 있었으며, 3 mm 의 하드페이싱을 가질 경우 마모량은 0.072 g 이 었으며, 2 mm 로 하드페이싱 되었을 때 0.05 g 으로 가장 마모량이 적음을 알 수 있었다. 밀도에 의한 마모량을 확인하기 위해 마모체적을 식 (5) 와 같은 수식을 이용하여 도출하였다.

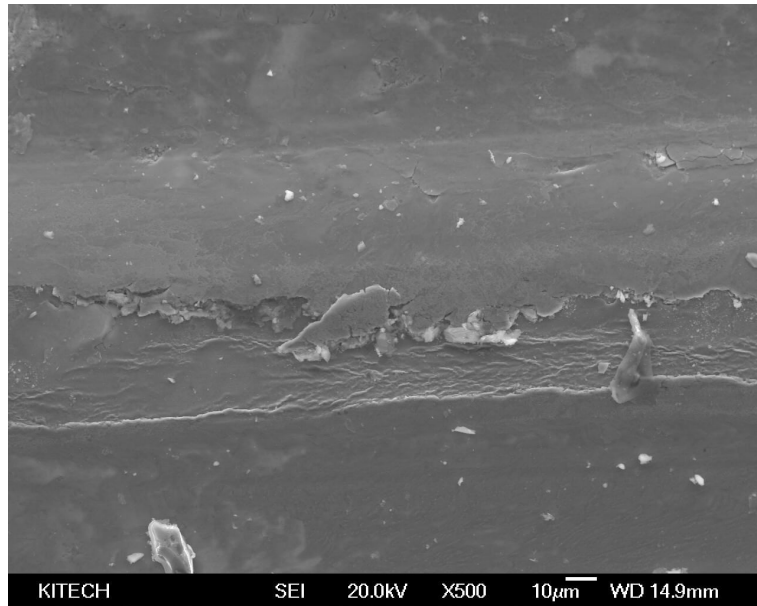
이 결과 1 mm 의 하드페이싱 층을 가지는 시편의 마모체적이 0.924 mm³ 으로 가장 많은 마모체적을 보였으며 3 mm 는 0.864 mm³, 2 mm 는 0.600 mm³ 으로 가장 낮은 마모체적을 보였다. 이와 같은 결과는 1 mm 의 경우 DMT 공정에서 기저부인 STD 61 의 혼합으로 인하여 많은 마모량을 보임으로 사료되었으며, 3 mm 의 경우 유한요소 해석을 이용한 결과로부터 가장 높은 온도로 인하여 마모량이 많음으로 사료되었다. 이러한 결과를 분석하였을 때 2 mm 로 하드페이싱 되었을 경우 가장 우수한 고온 마모 특성을 가짐을 알 수 있었다.

3. Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모시험 후 시편조직 비교

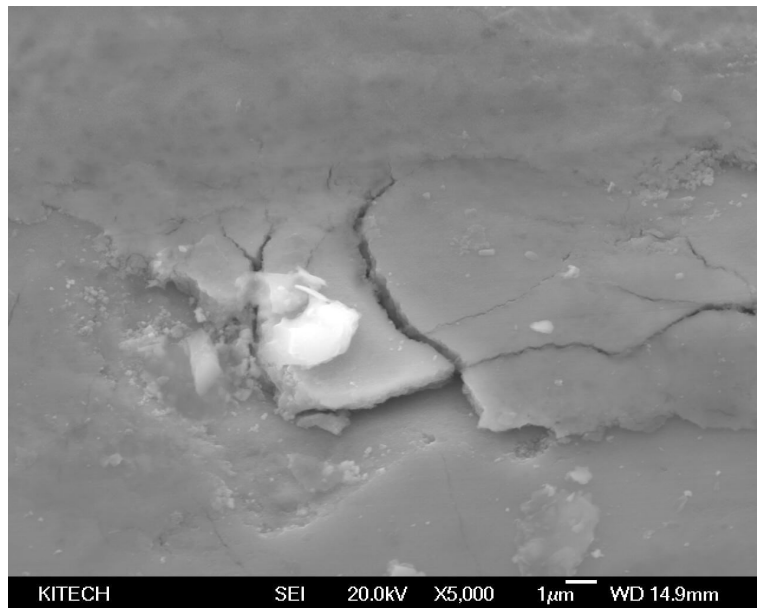
Fig. 46 은 Stellite 21 이 1 mm 하드페이싱 된 시편의 마모면 조직변화 결과이다. 이 결과 1 mm 로 하드페이싱 된 시편은 Fig. 46 (a) 와 같이 100 배율로 확인했을 때는 특별한 결함은 발견되지 않았지만, Fig. 46 (b) 인 500 배율로 확인되었을 경우 Stellite 21 의 마모면에 용융과 함께 입자가 탈락하는 현상이 나타남을 알 수 있었다. 또한, Fig. 46 (c) 와 같이 5,000 배율로 확인하였을 때 마모면에 균열이 발생함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 STD 61 상면에 1 mm 의 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 마모면은 비교적 깨끗한 마모면을 보였지만, 500 배율 이상에서 마모면을 확인하였을 경우 마모면에 용융현상과 함께 입자가 탈락하는 현상도 함께 보임을 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100

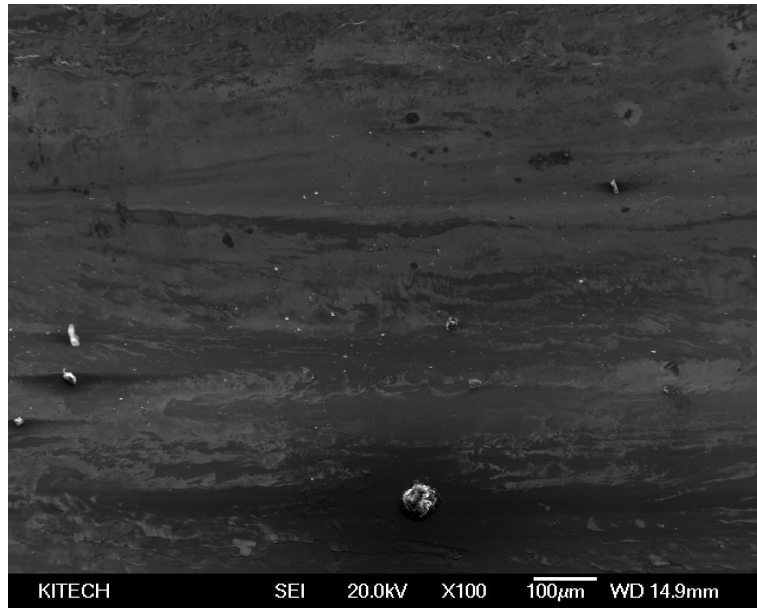


(b) Magnification ratio = 500

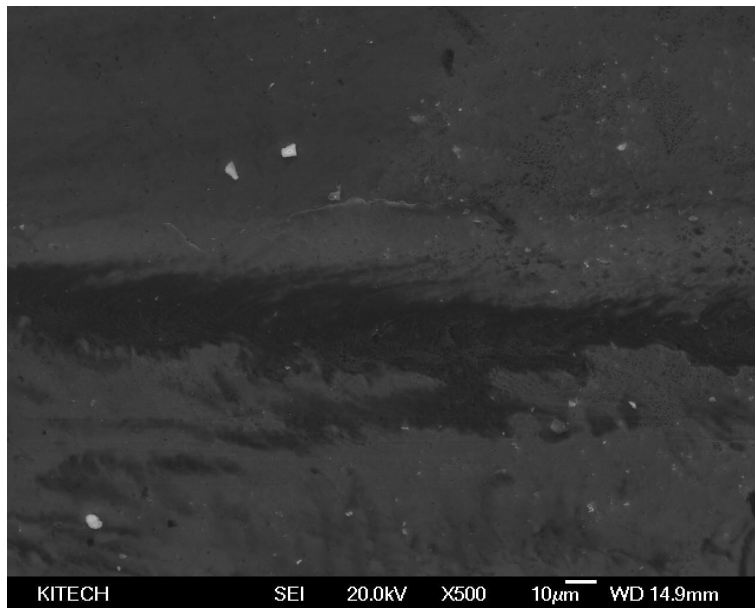


(c) Magnification ratio = 5,000

Fig. 46 Morphologies in the vicinity of the worn region
(Hardfacing material = Stellite 21, Thickness = 1 mm)



(a) Magnification ratio = 100



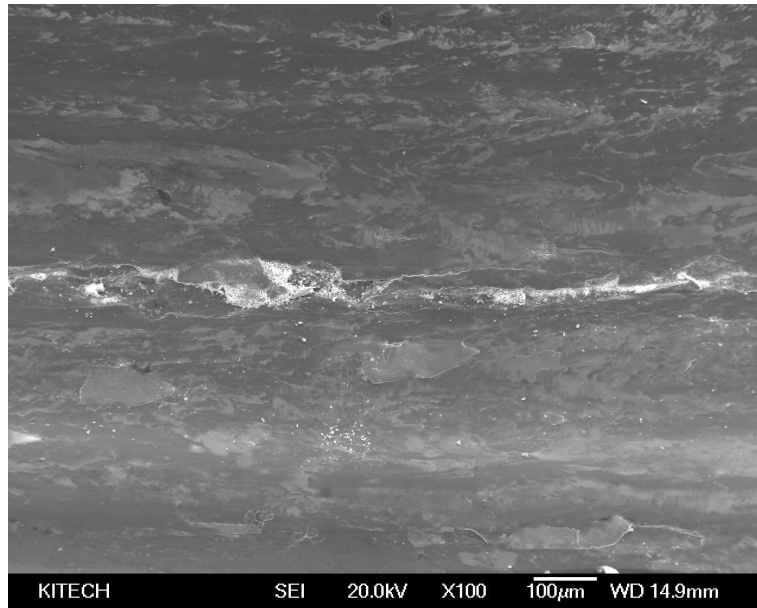
(b) Magnification ratio = 500



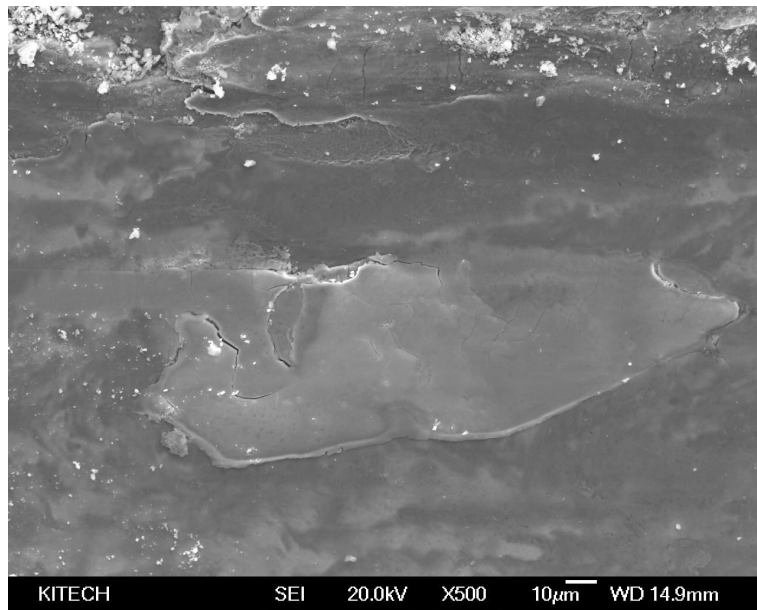
(c) Magnification ratio = 5,000

Fig. 47 Morphologies in the vicinity of the worn region
(Hardfacing material = Stellite 21, Thickness = 2 mm)

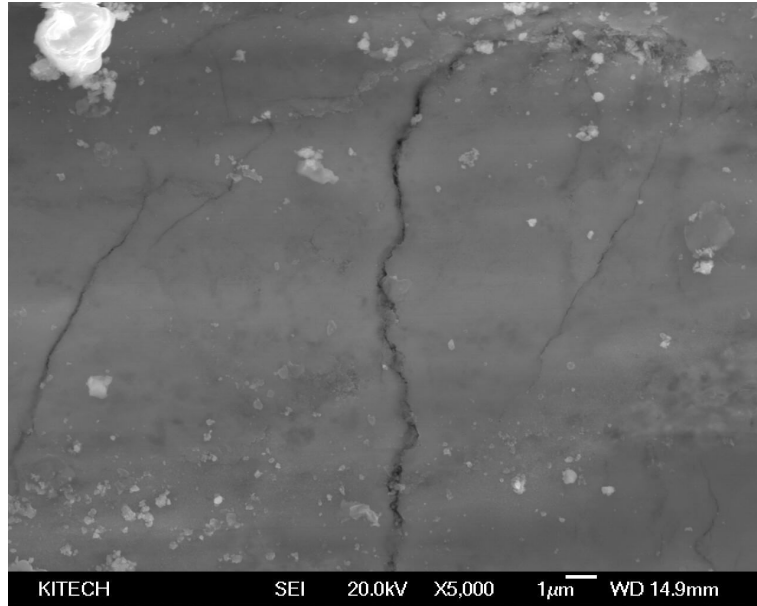
Fig. 47 는 Stellite 21 이 2 mm 하드페이싱 된 시편의 마모면 조직변화 결과이다. 이 결과 2 mm 로 하드페이싱 된 시편은 Fig. 47 (a) 와 같이 100 배율로 확인했을 때는 1 mm, 3 mm 로 하드페이싱 되었을 때보다 깨끗한 마모면이 관찰되었다. 또한, Fig. 47 (b) 인 500 배율로 확인되었을 경우 Stellite 21 의 마모 방향으로 미끌린 마모면이 관찰 되었으며 비교적 깨끗한 마모면이 확인되었다. Fig. 47 (c) 와 같이 5,000 배율에서 확인하였을 때는 마모방향으로 미끌림 현상만 발견되었을 뿐 1 mm, 3 mm 로 하드페이싱 되었을때에 비해 매우 깨끗한 마모면이 관찰됨을 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 100



(b) Magnification ratio = 500

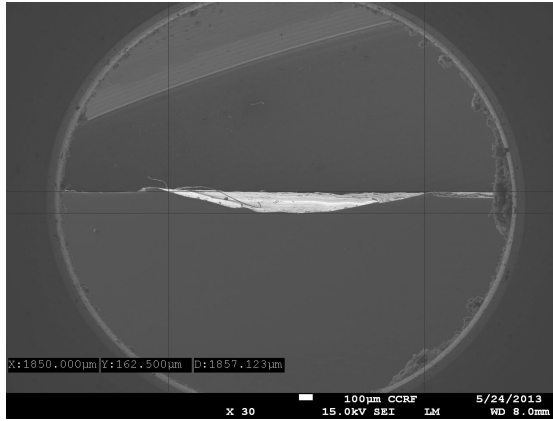


(c) Magnification ratio = 5,000

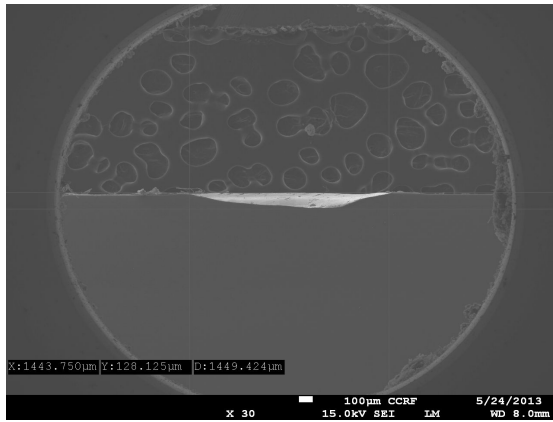
Fig. 48 Morphologies in the vicinity of the worn region
(Hardfacing material = Stellite 21, Thickness = 3 mm)

Fig. 48 은 Stellite 21 이 3 mm 하드페이싱 된 시편의 마모면 조직변화 결과이다. 이 결과 3 mm 로 하드페이싱 된 시편은 Fig. 48 (a) 와 같이 100 배율로 확인했을 때는 1 mm, 2 mm 로 하드페이싱 되었을 때보다 거친 마모면을 보였다. 또한, Fig. 48 (b) 인 500 배율로 확인되었을 경우 Stellite 21 의 마모면에 Sialon 으로 제작된 핀의 입자가 부착되었음을 알 수 있었다. Fig. 48 (c) 와 같이 5,000 배율에서 확인하였을 때는 마모면에 미세한 균열이 발생하여 입자가 탈락함을 알 수 있었다.

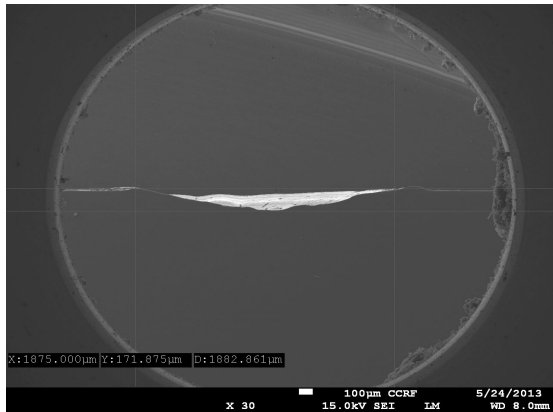
이와 같은 결과를 통해 Stellite 21 로 하드페이싱 되었을 때 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모면의 마모특성에 대해 알 수 있었다. 1 mm 로 하드페이싱 되었을 경우 특별한 결함은 일어나지 않지만 Stellite 21 의 입자가 탈락함을 알 수 있었다. 3 mm 로 하드페이싱 되었을 경우 약간의 균열이 발생하며, 핀의 입자가 부착되었으며, Stellite 21 입자가 마모면에서 탈락하는 현상을 보였다.



(a) Hard facing thickness = 1 mm



(b) Hard facing thickness = 2 mm



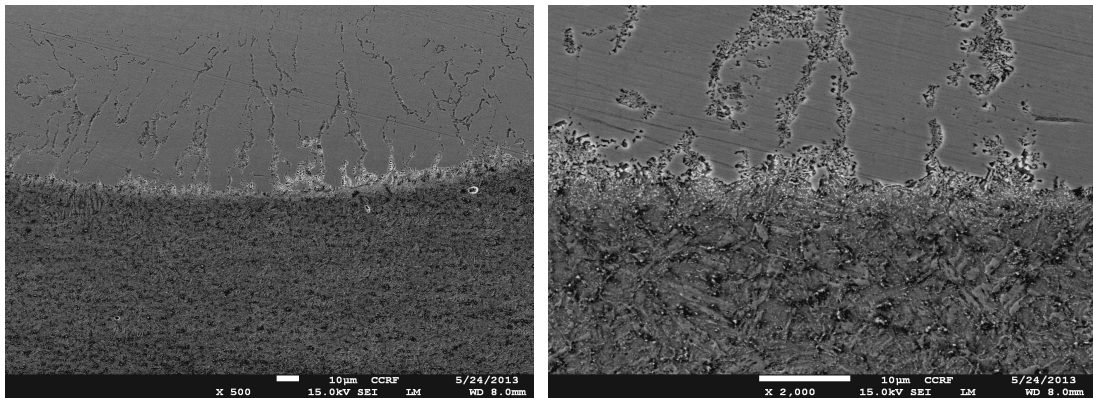
(c) Hard facing thickness = 3 mm

Fig. 49 Morphologies in the vicinity of the worm section for different hardfacing thicknesses

Table 19 The worn width and the worn depth of each hardfacing thickness

	Stellite 21 (1 mm)	Stellite 21 (2 mm)	Stellite 21 (3 mm)
Width (mm)	1.85	1.44	1.87
Depth (mm)	0.16	0.12	0.17

Fig. 49 는 Stellite 21 하드페이싱 층의 두께에 따른 마모시험 후 시편의 전단면 마모 깊이에 대한 사진이다. 이와 같은 결과는 Table 19 와 같다. Stellite 21 이 1 mm 하드페이싱 되었을 경우 마모면의 폭은 1.85 mm 이며, 마모깊이는 0.16 mm 였다. 2 mm 로 하드페이싱 되었을 경우 가장 낮은 마모폭과 마모깊이를 보였으며, 3 mm 로 하드페이싱 되었을 때 마모폭과 마모깊이는 가장 높게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 Stellite 21 은 약 2 mm 일 때 가장 우수한 마모특성이 나타남을 알 수 있었다.

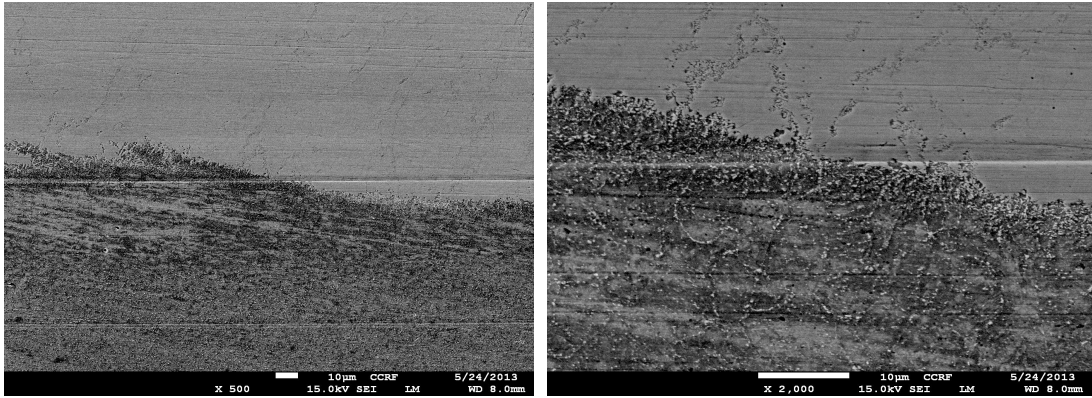


(a) Magnification ratio = 500

(b) Magnification ratio = 2,000

Fig. 50 Morphologies in the vicinity of the deposited region
(hardfacing thickness = 1 mm)

Fig. 50 은 Stellite 21 이 1 mm 하드페이싱 되었을 때 마모시험 후 시편의 전단면에서 STD 61 과 Stellite 21 로 하드페이싱 된 부분의 경계 사진이다. 이 결과 Fig. 50 (a) 와 같이 500 배율에서 확인하였을 경우 경계부의 상면에서 STD 61 과 Stellite 21 의 혼합이 많이 되었음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 50 (b) 와 같이 2,000 배율로 확대하여 분석한 결과 경계에서의 결합은 발견되지 않았다.

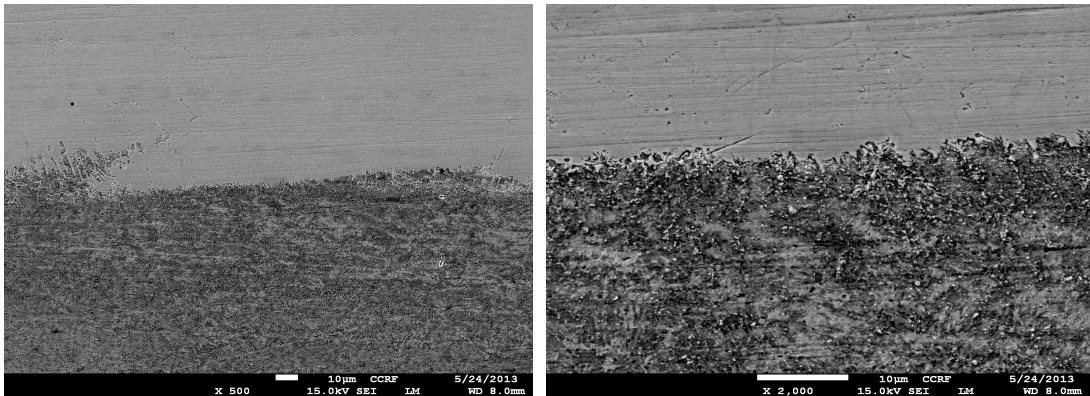


(a) Magnification ratio = 500

(b) Magnification ratio = 2,000

Fig. 51 Morphologies in the vicinity of the deposited region
(hardfacing thickness = 2 mm)

Fig. 51 는 Stellite 21 이 2 mm 로 하드페이싱 되었을 때 마모시험 후 시편의 전단면에서 STD 61 과 Stellite 21 로 하드페이싱 된 부분의 경계 사진이다. 이 결과 Fig. 51 (a) 와 같이 500 배율로 확인하였을 때 경계부에서 STD 61 과 Stellite 21 의 혼합은 1 mm 보다 많은 혼합율을 보임을 알 수 있었다. 또한, Fig. 51 (b) 와 같이 2,000 배율에서 확인하였을 때에 특별한 경계결함은 발견되지 않음을 알 수 있었다.



(a) Magnification ratio = 500

(b) Magnification ratio = 2,000

Fig. 52 Morphologies in the vicinity of the deposited region
(hardfacing thickness = 3 mm)

Fig. 52 는 Stellite 21 이 3 mm 로 하드페이싱 되었을 때 마모시험 후 시편의 전단면에서 STD 61 과 Stellite 21 로 하드페이싱 된 부분의 경계 사진이다. 이 결과 Fig. 52 (a) 와 같이 500 배율로 확인하였을 때 경계부에서 STD 61 과 Stellite 21 의 혼합은 1 mm 와 2 mm 로 하드페이싱 되었을 때 보다 혼합율이 적음을 알 수있었다. 또한, Fig. 52 (b) 와 같이 2,000 배율에서 확인하였을 때에 특별한 경계결함은 발견되지 않음을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로 1 mm 로 하드페이싱 되었을 경우 Stellite 21 과 STD 61 의 경계에서 두 재료간 혼합율이 상당히 높음을 알 수 있었지만, 3 mm 로 하드페이싱 되었을 때는 경계에서 발생하는 혼합은 가장 최소가 됨을 알 수 있었다. 2 mm 로 하드페이싱 되었을 경우 1 mm 로 하드페이싱 되었을 때 보다 혼합은 적게 발생하였으며, 3 mm 로 하드페이싱 되었을 때 보다 혼합은 많이 발생함을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 2 mm 의 두께에서 발생하는 혼합에 의해 경계부의 열 제어층이 얇게 형성됨을 알 수 있었다.

4. 하드페이싱 재료에 따른 경도 비교/분석

본 연구에서 하드페이싱 두께에 따른 시편의 경도를 측정하기 위해 Fig. 40 과 같은 마이크로 비커스 경도 측정기를 사용하여 실험 전, 후 에 대한 시편 경도를 비교하였다. 그 결과는 Fig. 53 과 같다.

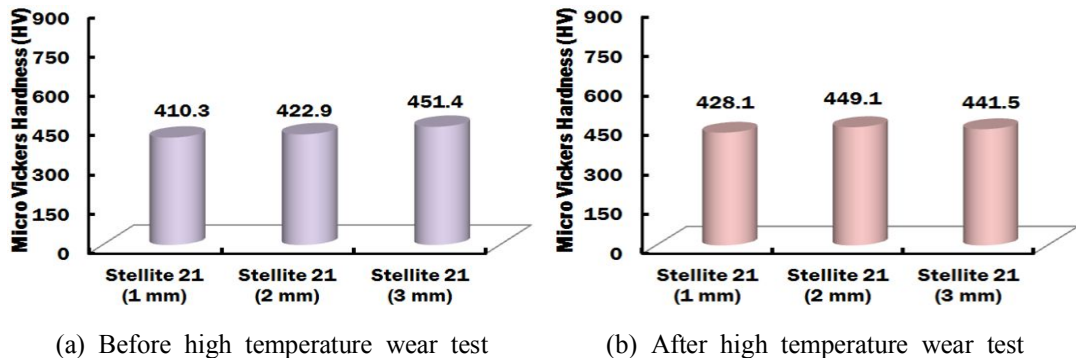


Fig. 53 Variation of the surface hardness of specimen according to wear experiment in the elevated temperature (consideration of hardfacing thickness effects)

이 결과 초기의 경도는 Fig. 53 (a) 와 같이 Stellite 21 이 3 mm 하드페이싱 되었을 때 가장 높았으며, Stellite 21 이 1 mm 로 하드페이싱 되었을 때 가장 낮은 경도분포를 보임을 알 수 있었다. 실험 후 경도는 Fig. 53 (b) 와 같이 1 mm, 2 mm 로 하드페이싱 된 시편의 경우 소폭 상승하였지만 3 mm 로 하드페이싱 된 시편의 경우 소폭 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 Stellite 21 로 하드페이싱 될 경우 두께와 상관없이 경도의 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

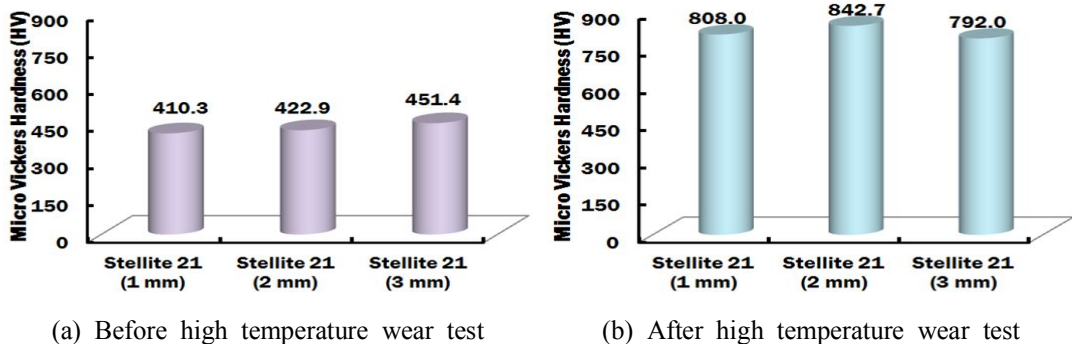


Fig. 54 Variation of hardness of the worn region according to the wear experiment in the elevated temperature (consideration of hardfacing thickness effects)

Table 20 Friction induced work hardenings for different hardfacing thickness

Thickness (mm)	1 mm	2 mm	3 mm
FIWH (%)	49.2	49.8	43.0

마찰에 의한 가공 경화도를 알아보기 위해 마모면의 경도를 측정하였다. 이 결과는 Fig. 54 와 같다. 이 결과 Stellite 21 의 경우 800 °C 의 온도로 가열되었을 때 보다 고온마모 조건에서 경도가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 마모면의 마찰에 의한 가공경화(FIWH)는 식 (6) 과 같이 도출할 수 있었으며 이 결과는 Table 20 과 같다. 1 mm 로 하드페이싱 된 시편의 경우 FIWH 는 약 49.2 % 증가하였으며, 2 mm 로 하드페이싱 된 시편은 49.8 %, 3 mm 로 하드페이싱 되었을 때 43.0 % 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 같은 재료라도 하드페이싱 두께에 따라 마모면의 경도가 변화함을 알 수 있었으며, 약 2 mm 의 하드페이싱 층을 가지고 있을 때 가장 마모특성이 우수한 두께임을 알 수 있었다.

제 7 장 결론 및 향후과제

본 연구는 열간금형강 STD 61 상면에 Stellite 6, Stellite 21 및 NOREM 02 가 하드페이싱 되었을 때 열간성형온도 조건에 대하여 열전달/열응력 해석을 수행하였다. 또한, 하드페이싱 된 시편을 고온마모시험을 수행하여 재료 및 두께에 대한 고온마모특성을 비교/분석 하였다. 그 결과를 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 열간금형강 STD 61 상면에 하드페이싱 재료가 적층되었을 때 열간성형조건에서 가장 적합한 하드페이싱 재료와 두께를 선정할 수 있었다. 유한요소 해석 결과를 이용하여 하드페이싱층과 기저부 사이에서 발생하는 유효응력 단차, 하드페이싱 층과 기저부에서 발생하는 주 변형을 단차를 고려하여 안정성이 가장 높은 재료와 두께를 선정하였다.

둘째, 재료에 따른 고온마모시험을 수행하여 고온마모특성이 가장 우수한 하드페이싱 재료를 선정하였다. 제작된 시편을 고온마모 시험을 수행하여 마찰계수, 마모량을 도출할 수 있었으며, 시험 후 시편의 마모면을 주사전자현미경을 이용하여 마모면의 마모특성 분석, 경계부의 결합특성을 분석한 결과 실험에 사용된 하드페이싱 재료 중 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때 가장 우수한 마모특성을 보임을 알 수 있었다.

셋째, 실험에 사용된 하드페이싱 재료 중 고온마모 특성이 가장 우수한 재료 인 Stellite 21 의 두께에 따른 고온마모 특성을 분석하여 가장 우수한 두께를 선정하였다. 하드페이싱 층의 두께에 따른 마찰계수와 마모특성, 마모량 등을 도출할 수 있었으며, 고온마모 시험 후 시편의 마모면을 주사전자현미경을 이용하여 마모면의 마모특성, 경계부의 결합특성을 분석한 결과 2 mm 의 두께를 가지는 하드페이싱 층이 가장 우수한 두께임을 알 수 있었다.

넷째, 고온마모시험을 수행한 후 마모면에 대한 경도를 측정하여 마찰에 의한 가공경화를 도출하였다. 그 결과 다른 재료에 비해 Stellite 21 이 하드페이싱 되었을 때의 마모면의 경도특성이 가장 우수함을 알 수 있었다.

추후 연구에서는 하드페이싱 층과 기저부 경계에서 잔류응력으로 인해 발생하는 균열을 감소시키고 수명을 향상시키기 위해 하드페이싱 층과 기저부 사이에 열 응력 제어층을 설계함으로써 금형의 수명을 향상시키는 방안을 도출할 것이다. 또한, 열 응력 제어층으로 인해 발생할 수 있는 경계부의 잔류응력과 마모특성에 대한 연구가 진행되어 실제 열간성형금형에 적용되어 이용될 수 있도록 연구가 이루어져야 할 것이다.

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. C. W. Park, K. S. Kwon, W. B. Kim, B. K. Min, S. J. Park, I. H. Sung, Y. S. Yoon, K. S. Lee, J. H. Lee, J. W. Seok, "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. Shepeleva. L, Medres. B, Kaplan. W. D, Bamberger. M, Weisheit. A, "Laser cladding of turbine blades," Surface & Coatings Technology, 125, pp.45-48, 2000.
4. Sextom. L, Lavin. S, Byrne. G, Kennedy. A, "Laser cladding of aerospace materials," Journal of Materials processing Technology, 122, pp.63-68, 2002.
5. Summerville. E, Venkatesan. K, Subranmanian. C, "Wear processes in hot forging press tools" Materials & Design, 16(5), pp.289-294, 1995.
6. Tercej. M, Perus. I, Turk. R, "Suitability of CAE neural networks and FEM for prediction of wear on die radii in hot forging" Tribology International, 36, pp.573-583, 2003.
7. D. G. Ahn, "Applications 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, 2011.
8. D. H. Kim, H. C. Lee, B. M. Kim, K. H. Kim, "Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes" Journal of Materials Processing Technology, 166, pp.372-380, 2005.
9. 박장익, 윤영철, 김태형, 김달중, "피로해석에 기초한 다이캐스팅 금형의 수명향상을 위한 형상 최적화" 한국공작기계학회 2009 추계학술대회논문집, pp.291-296, 2009.
10. Radu. I, Li, D. Y, "Investigation of the role of oxide scale on Stellite 21 modified with yttrium in resisting wear at elevated temperature," Wear, 259, pp.453-458, 2005.
11. 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.
12. Mitterer. C, Holler. F, Üstel. F, Heim. D, "Application of hard coating in aluminum die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour," *Surface & Coatings Technology*, 123, pp.233-239, 2000.
13. 김현우, "직접식 캐속 틀링 기반 다중 재료 적층 방식을 이용한 사출 성형 금형의 냉각 특성 향상에 관한 연구", 석사학위 논문, 2009.
14. D. G. Ahn, S. H. Park, H. S. Kim, "Manufacture of an injection mould with rapid and uniform cooling characteristics for the fan parts using a DMT Process", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 6, pp.915-924, 2010.
15. K. H. Stern, "Metallurgical and Ceramic Protective Coatings," Chapman & Hall, pp.74-111, 1996.
16. Hoadley. A. F. A, Rappaz. M, "A thermal model of laser cladding by powder injection," *Metallurgical transactions B*, Volume 23 B, pp.631-642, 1992.
17. Pei. Y. T, De Hosson. J. Th. M, "Functionally graded materials produced by laser cladding," *Acta mater*, 48, pp.2617-2624, 2000.
18. Yellup. J. M, "Laser cladding using the powder blowing technique," *Surface and Coatings Technology*, 71, pp.121-128, 1995.
19. 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.
21. Xing S, YU. S, Deng. Y, Dai. M, YU. L, "Effect of cerium on abrasive wear behaviour of hardfacing alloy," *Journal of rare Earths*, Vol. 30, No. 1, pp.69-73, 2012.
22. Reisgen. U, Dilthey. U, Balashov. B, Kondapalli. S, Geffers. C, "Investigation of wear resistance and microstructure of a newly developed chromium and vanadium containing iron-based hardfacing alloy," *Werkstofftech*, 39, No. 6, pp.379-384, 2008.
23. Kashani. H, Amadeg. 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.

24. Venkatesan. K, Subramanian. C, Summerville. E, "Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures," *Wear*, 203~204, pp.129-138, 1997.
25. Mansori. EL. M, Nouari. M, "Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, pp.1715-1727, 2007.
26. 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.
27. Svensson L. E, Grefott. B, Ulander. B, Bhadeshia. H. K. D. H, "Fe-Cr-C hardfacing alloys for high-temperature applications," *Journal of Materials science*, 21, pp.1015-1019, 1986.
28. Bhaduri. A. K, Indira. R, Albert. S. K, Rao. B. P. S, Jain. S. C, Asokkumar. S, "Selection of hardfacing material for components of the Indian Prototype Fast Breeder Reactor," *Journal of Nuclear Materials*, 334, pp.109-114, 2004.
29. K. Y. Lee, S. H. Lee, Y. D. Kim, H. S. Hong, Y. M. Oh, S. J. Kim, "The effects of additive elements on the sliding wear behavior of Fe-base hardfacing alloys," *Wear*, 255, pp.481-488, 2003.
30. J. K, Kim, S. J. Kim, "The temperature dependence of the wear resistance of iron-base NOREM 02 hardfacing alloy," *Wear*, 237, pp.217-222, 2000.
31. 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.
32. 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.
33. Wenping. Jiang, Rajeev. Nair, Pal. Molian, "Functionally graded mold inserts by laser-based flexible fabrication : Processing modeling, structural analysis, and performance evaluation," *Journal of Materials Processing Technology*, 166, pp.286-293, 2005.
34. L. Fouiland, M. El. Mansori, A. Massaq, "Friction-induced work hardening of cobalt-base hardfacing deposits for hot forging tools," *Journal of Materials processing technology*, 209, pp.3366-3373, 2009.

35. Ocylok. S, Weisheit. A, Kelbassaq. I, "Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection," *Physics Procedia*, 5, pp.359-367, 2010.
36. Morrow. M. R, Qi. H, Kin. I, Mazumder. J, Skerlos. S. J, "Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing," *Journal of Cleaner Production*, 15(10), pp.932-943, 2003.
37. 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.
38. Ming. Q, Lim. L. C, Chen. Z. D, "Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys," *Surface and Coatings Technology*, 106, pp.174-182, 1998.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. Bayhan. Y, "Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare," *Tribology International*, 39, pp.570-574, 2006.
43. 강남현, 채현병, 김준기, 최종하, 김정한, "재생 WC 분산형 Fe계 하드페이싱 용접재료의 마모저항성에 미치는 Mn 과 C 첨가의 영향," *한국재료학회지*, Vol. 13, No. 12, pp.839-845, 2003.
44. 안동규., "레이저 클래딩 기술을 이용한 금형 표면 마모 특성 향상 기술 개발," *레이저응용 신기술 개발 연구센터 지역혁신센터사업 결과보고서*, 2010.
45. InssTek Inc, [Http://www.insstek.com](http://www.insstek.com)

감사의 글

지금의 학위 논문을 완성하기까지 여러 가지 도움을 주신 많은 여러분들께 진심어린 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

처음 CATIA 연수생으로 인연을 맺은 후 실험실에 들어와 2년이란 시간을 보냈습니다. 길게만 느껴졌던 2년을 보내고 벌써 졸업논문을 마치고 감사의 글을 쓰고 있는 걸 보니 이제는 짧게만 느껴집니다. 그동안 실험실에서 힘든 순간도 많았지만 많은 것을 배우고 느낄 수 있는 정말 의미있는 시간이었습니다.

대학원 생활동안 부족한 저에게 아낌없이 학업에 대한 관심과 공학가 가져야 할 마음가짐, 또한 사회에 나갔을 때 필요한 매너와 겸손에 대하여 가르쳐주신 안동규 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 논문이 완성되기까지 적극적인 지도와 아낌없이 격려해주신 조규재 교수님과 한길영 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

사회생활을 하시며 바쁘셔서 자주 뵙지는 못하지만, Home coming day 때나 찾아 뵈는 때마다 경험을 바탕으로 항상 좋은 말씀과 충고, 조언을 해주셨던 전산설계실험실의 대선배이신 상훈 선배님과 민수 선배님, 가끔 실험실에 들려주시고 학회에서 만나서 술한잔과 조언을 해주시는 진석 선배님과 경원 선배님, 항상 저희의 진로에 대해 조언과 걱정 해주신 경제 선배님, 자주 못 뵙지만 만나면 항상 편하게 대해주시는 대원 선배님, 일본에서 박사과정을 마치시고 일본에서 연구하고 계신 광운 선배님, 항상 저희 실험실원들 걱정해주시고 맛있는 간식을 사주시는 현우 선배님, 실험실관련 일과 진로에 대해 조언 해주시는 경흠 선배님과 승화 선배님, 그리고 최근 딸바보가 되시는 동한 선배님, 연구관련 궁금사항과 조언을 많이 해주시는 세훈이형, 언제나 만나면 항상 밝으신 민우형, 비록 반년동안 같이 실험실 생활을 했지만 친밀감이 높은 창규형과 향선이형, 항상 이런저런 조언을 많이해주는 영수형과 우철이 모두에게 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다.

비록 저보다 한학기 늦지만, 실험실 생활을 같이하며 기쁨과 고생을 많이 나누었던 호진이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 남은 기간동안 매우 열심히 하며 실험실

활력담당 호진이, 실험실에 들어온지 얼마 되지 않았지만 매우 열심히 하고 있는 진우, 실험실에 잘 적응해 가고 있는 대선이, 그리고 학부생으로 열심히 하고 있는 슬기와 동인이와 함께했던 시간들이 소중했음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 지금이 오기까지 항상 저의 뒤에서 묵묵히 큰 버팀목이 되어주고 믿음으로 후원해주신 사랑하는 아버지, 어머니, 누나 그리고 힘들 때 위로해준 친구들 모두에게 진심으로 감사합니다.

2013년 11월
박 나 라