

3 차원 열전달/열응력 해석을 통한 STD61 열간 금형강의 하드페이싱 재료 및 두께 예측

박 나 라* · 안 동 규*†

* 조선대학교 기계공학과

Estimation of Hardfacing Material and Thickness of STD61 Hot-Working Tool Steels Through Three-Dimensional Heat Transfer and Thermal Stress Analyses

Na-Ra Park* and Dong-Gyu Ahn*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Chosun Univ.

(Received February 4, 2014 ; Revised February 18, 2014 ; Accepted February 19, 2014)

Key Words: Hardfacing Material(하드페이싱 재료), Hardfacing Thickness(하드페이싱 두께), Hot-working Tool Steel(열간금형강), Temperature Distribution(온도분포), Stress-Strain Distribution (응력-변형률분포)

초록: 이 연구에서는 STD61 열간금형강 상부에 생성되는 하드페이싱층에 적합한 하드페이싱 재료와 두께를 3 차원 비정상 열전달 및 열응력 해석을 통하여 예측하고자 한다. Stellite6, Stellite21 과 19-9DL 초합금을 하드페이싱 재료로 적용하였다. 하드페이싱 재료와 두께가 하드페이싱된 시편 내부 온도, 열응력 및 변형률 분포 변화에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 이 결과로부터 큰 열전도도를 가지는 재료로 얇은 하드페이싱 층을 생성하는 것이 열전달 특성 측면에서는 효과적인 것을 알 수 있었다. 또한, Stellite21 초합금으로 2 mm 두께의 하드페이싱부를 STD61 열간 금형강 상부에 생성할 경우, 하드페이싱부와 기저부의 경계부에서 유효응력 및 주변형률 편차가 최소화됨을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 STD61 열간금형강에 적합한 하드페이싱 재료와 두께를 예측할 수 있었다.

Abstract: The goal of this paper is to estimate proper hardfacing material and thickness of STD61 hot-working tool steel through three-dimensional heat transfer and thermal stress analyses. Stellite6, Stellite21 and 19-9DL superalloys are chosen as alternative hardfacing materials. The influence of hardfacing materials and thicknesses on temperature, thermal stress and thermal strain distributions of the hardfaced part are investigated using the results of the analyses. From the results of the investigation, it has been noted that a hardfacing material with a high conductivity and a thinner hardfaced layer are desired to create an effective hardfacing layer in terms of heat transfer characteristics. In addition, it has been revealed that the deviation of effective stress and principal strain in the vicinity of the joined region are minimized when the Stellite21 harfaced layer with the thickness of 2 mm is created on the STD61. Based on the above results, a proper hardfacing material and thickness for STD61 tool steel have been estimated.

- 기호설명 -

Γ : 하드페이싱부의 두께
 Γ_p : 돌출부의 두께
 Γ_p : 삽입부의 두께
 h : 자연대류계수
 Q : 열유량

Q_{max} : 최대 열유량
 t_a : 열유량 부가시간
 t_c : 비정상 열전달해석 시간
 t : 시간
 T : 온도
 $T_{max,i}$: 각 계산시간에서의 최대 온도
 $T_{max,20}$: 계산시간 20 초에서의 최대 온도
 ρ : 밀도
 k : 열전도도
 C_p : 비열

† Corresponding Author, smart@chosun.ac.kr

E	: 탄성 계수
α	: 열팽창 계수
σ_e	: 계산시간 20 초에서의 유효응력
$\Delta\sigma_e$: 계산시간 20 초에서의 기저부와 하드페이싱부의 유효응력차
ϵ_m	: 계산시간 20 초에서의 주변형률
$\Delta\epsilon_m$: 계산시간 20 초에서의 기저부와 하드페이싱부의 주변형률차

1. 서 론

열간 성형(Hot-working) 금형에서는 성형과정 중 성형재료에서 금형으로 전달되는 열에 의하여 국부적인 금형의 열연화(Thermal Softening) 현상이 발생한다.⁽¹⁾ 이 현상은 금형 표면의 경도 감소에 의한 금형 국부 마모를 발생시킨다.⁽²⁾ 열간 성형 금형의 국부 마모는 열간 성형 금형의 수명을 단축시키는 주요 원인이 된다.⁽³⁾ 열간 성형 금형의 열연화 현상에 의한 금형면 마모 현상을 극복하기 위한 한가지 대안으로써 하드페이싱(Hardfacing) 공정이 제시되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

하드페이싱은 고밀도 열원을 이용하여 기저부 재료의 표면에 용점이 높으며 고온 물성이 우수한 초합금 재료를 일정두께 이상 적층하여, 기저부 재료의 윤활/마모/마찰 특성을 향상시키는 공정이다.^(2,5) 최근 하드페이싱 기술의 기반 기술인 레이저 클래딩(Laser cladding), 레이저 합금(Laser alloying) 및 레이저 화학 증착(Laser chemical vapor deposition) 공정 등 레이저 활용 재료 표면 특성 향상 기술들이 발전됨에 따라 하드페이싱 기술의 적용 범위가 확대되고 있다.^(6,7) 특히, 3 차원 금속제품을 자유롭게 제작할 수 있는 레이저 기반 직접식 금속 패속툴링공정(Laser assisted direct metal rapid tooling process)이 개발된 후, 금형의 수명향상을 위하여 다양한 하드페이싱 적용 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다.^(8,9)

특정 금속위에 초합금을 하드페이싱 하기 위해서는 기저 금속에 따른 적절한 초합금 종류와 초합금 적층 두께의 결정이 매우 중요하다. 일반적으로 기저 금속에 따른 하드페이싱용 초합금 재료 및 적층 두께 선정은 마모시험을 통하여 수행된다.^(10,11) Ming 등은 니켈 계열 초합금인 Colmonoy 6, Colmonoy88 및 Al-1236 을 기저재료 AISI1020 위에 하드페이싱한 시편을 제작하여, Block-on-ring 마모시험을 수행하여 적합한 하드페이싱 초합금을 선정하였다.⁽¹²⁾ Persson 등은 316L 스테인리스강 위에 NOREM02 와 Stellite21

초합금을 하드페이싱한 시편들을 이용하여 마찰/마모 시험을 수행하여 적절한 하드페이싱 재료를 선정하였다.⁽¹³⁾ Mingxi 등은 레이저 클래딩 공정으로 HMSP2537 금속위에 니켈계열 초합금을 두께별로 적층한 시편을 제작하여, 마모시험을 수행함으로써 적절한 적층 두께를 도출하였다.⁽¹⁴⁾

이러한 실험적 연구와 달리 해석적 기법을 이용하여 하드페이싱 두께를 결정하기 위한 연구도 진행되었다. Wu 등은 SF50A 탄소강 위에 Stellite6 초합금을 PTAW(Plasma Transferred Arc Welding) 공정으로 하드페이싱 하였을 때, 시편의 잔류응력 분포를 유한요소법으로 계산하였다.⁽¹⁵⁾ 유한요소해석 결과를 이용하여 기저부 재료두께와 공정변수가 하드페이싱된 시편의 잔류응력 분포에 미치는 영향을 고찰하였다.⁽¹⁵⁾ Bhanu Kiran 등은 연강(Mild steel) 위에 Cobalarc-9 재료를 SMAW(Shielded Metal Arc Welding) 공정으로 하드페이싱 하였을 때, 기저부와 하드페이싱층 두께들이 시편의 잔류응력 분포에 미치는 영향에 대하여 적절한 기저부와 하드페이싱 두께들을 도출하였다.⁽¹⁶⁾

본 연구에서는 3 차원 열전달/열응력 해석을 통하여 Stellite6, Stellite21 과 19-9 DL 초합금들을 열간 금형강인 STD61 에 하드페이싱하여 시편을 제작된 후, 열간 성형 공정중 시편에 열이 부가되었을 때 하드페이싱 재료와 두께에 따른 시편 내부 온도 및 열응력/열변형률 분포들의 변화를 분석/고찰하였다. 이 고찰 결과를 이용하여 STD61 열간 금형강에 적합한 하드페이싱 재료와 두께를 예측하였다.

2. 3 차원 열전달 및 열응력 해석

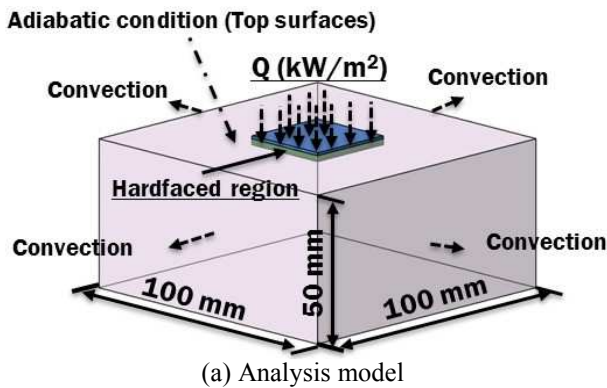
3 차원 열전달 및 열응력 해석을 위한 기본 모델은 Fig. 1 과 같다. STD 61 구성된 기저부의 크기는 100 mm (길이) × 100 mm (폭) × 50 mm (높이) 로 설정하였다. 하드페이싱부는 기저부 최상면으로부터 1 mm 돌출 되도록 하였다. 돌출부의 크기는 30 mm (길이) × 30 mm (폭) × 1 mm (두께)이다. 하드페이싱부 두께가 증가될 경우 Fig. 1(b)와 같이 기저부 최상면으로부터 돌출부 두께를 제외한 하드페이싱 두께 만큼 기저부 방향으로 하드페이싱 영역이 침투하도록 해석 모델을 설정하였다. 이 연구에 적용된 침투부 깊이 (Γ_1)와 하드페이싱부 전체 두께 (Γ)의 범위는 Table 1 과 같다.

ABAQUS V6.11 Coupled temp-displacement 모듈을 이용하여 3 차원 열전달 및 열응력 해석을 수행하였다. 하드페이싱된 모델의 열전달 특성 분석을 위한 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 열유량

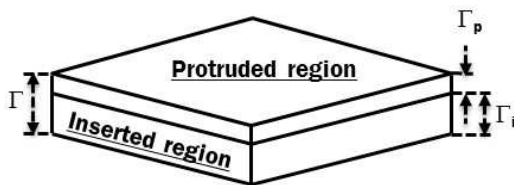
모델(Heat flux model)에서 열이력(Thermal history)은 Fig. 1(c)와 같이 사전 연구에서 적용된 열이력 모델을 사용하였다.⁽¹⁷⁾ 열유량 모델의 최대 열유량(Maximum heat flux : Q_{max}), 열유량 적용시간 (t_a) 및 열전달 해석 시간 (t_c)는 Table 1 과 같다. 비정상 열전달 해석 모델의 상면부와 측면부들은 Fig. 1(a)와 같이 각각 단열 조건과 자유 대류 조건으로 가정하였다. 자연 대류계수 (h)는 Table 1 과 같다.

Table 1 Thickness of the hardface region and conditions of transient heat transfer analysis

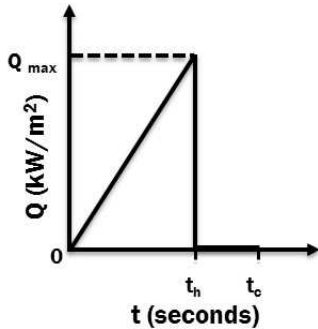
Γ (mm)	Γ_i (mm)	Γ_p (mm)	Q_{max} (kW/m ²)	t_a (sec)	t_c (sec)	h (W/m ²)
1	0	1	4,000	20	30	5
2	1					
3	2					



(a) Analysis model



(b) Hardfaced region



(c) Thermal history

Fig. 1 Model of transient heat transfer and thermal stress analyses

비정상 열전달 해석 결과 도출된 각 시간별 온도 분포를 이용하여, 각 시간별 열응력 해석을 수행하였다. 열응력 해석에서는 기저부의 측면들과 바닥부가 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 각 시간별 열응력 해석결과 얻어진 유효 열응력 및 주변형률 분포중 최대값들을 나타내는 시간에 대한 유효 열응력 및 주변형률 분포를 도출하였다. 이 데이터를 이용하여 하드페이싱 재료와 하드페이싱 두께에 따른 유효 열응력 분포, 최대 주변형률 분포 특성을 고찰하였다. 또한 하드페이싱부와 기저부의 유효 응력 편차 및 최대 주변형률 편차를 분석하였다. 비정상 열전달 해석 및 열응력 해석에서 기저부와 하드페이싱부는 육면체 요소 (Hexahedral solid element) 들로 표현하였다. 하드페이싱부와 수직으로 하드페이싱부와 연결된 기저부는 중심부로 갈수록 조밀해지는 형태의 유한요소격자(Biased mesh)를 생성하였다. 이때 격자생성률 (Bias ratio)는 2 로 적용하였다. 그 외의 영역은 균일한 간격을 가지는 유한요소격자를 생성하였다. 육면체 요소의 최대 체적과 최소 체적은 각각 0.5 mm³ 과 45.9 mm³ 이다. 각 하드페이싱부 두께별 하드페이싱부와 기저부의 유한요소 격자수와 절점수는 Table 2 와 같다.

Table 2 Number of elements and nodes for FE model

Γ (mm)	Hardfaced region		Base region	
	Element (EA)	Node (EA)	Element (EA)	Node (EA)
1	1,176	1,851	49,532	51,493
2	2,352	3,085	48,356	50,259
3	3,528	4,319	47,180	49,025

Table 3 Thermal properties of STD61 and hardfacing materials^(18-23,25-27)

Material	ρ (kg/m ³)	T (°C)	C_p (J/kg°C)	T (°C)	k (W/m°C)
STD61	7,760	20	460	20	25.0
		499	548	350	28.4
		593	590	605	28.7
Stellite6	8,200	20	423	20	14.5
				300	16.0
				600	20.5
Stellite21	8,330	20	423	20	17.0
				300	18.8
				600	24.2
19-9 DL	7,900	20	420	20	13.5
				215	18.5
				350	21.3

Table 4 Elastic modulus and thermal expansion coefficients of STD 61 and hardfacing materials^(18,20,24,26)

Material	T (°C)	E (GPa)	T (°C)	α ($10^{-6}/K$)
STD61	20	215	100	10.4
	499	176	425	12.2
	593	165	650	13.1
Stellite6	20	237	100	13.9
			400	14.1
			700	15.8
Stellite21	20	248	427	14.3
			649	15.1
			816	15.6
19-9 DL	20	203	93	15.3
			205	16.3
			650	18.0

하드페이징부에 적용된 재료는 크롬계 초합금 재료인 Stellite6 와 Stellite21 및 철계 초합금 재료인 19-9 DL 을 선택하였다. 기저부 재료 STD 61 과 하드페이징부 재료인 Stellite6, Stellite21 및 19-9 DL 의 밀도 (ρ), 열전도도 (k) 및 비열 (C_p)는 Table 3 과 같다. 기저부 재료와 하드페이징 재료들의 탄성계수 (E) 및 열팽창계수 (α)는 Table 4 와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포 특성

3 차원 비정상 열전달 해석을 수행하여 Fig. 2 및 3 과 같은 각 시간대의 해석모델 내부 온도분포를 산출하였다.

해석 결과로부터 각 시간대에서 최대 온도가 발생하는 위치는 Fig. 2 와 같이 하드페이징 재료에 관계없이 해석 모델의 최상면 정 중앙부임을 알 수 있었다. 시간에 따른 온도 분포 분석 결과 Fig. 2 및 3 과 같이 열유량이 최대로 부가되는 20 초에서 해석 모델 내부에 최대 온도 분포가 나타남을 알 수 있었다. 이 결과들을 이용한 열전달 특성 분석과 열응력 해석을 위한 온도 데이터로는 최대 온도 분포가 나타나는 해석시간 20 초 때의 해석 모델의 내부 온도 분포를 선정하였다.

Fig. 4 와 5 는 최대 열유량이 부가되는 20 초에서의 하드페이징 재료와 하드페이징 재료의 두께에 따른 해석 모델 내부 온도 분포이다.

Fig. 4 와 5 에서 하드페이징 재료중 열전도도가 가장 큰 값을 가지는 Stellite21 를 STD61 열간 금형강 상면에 하드페이징 하였을 때, 해석모델에

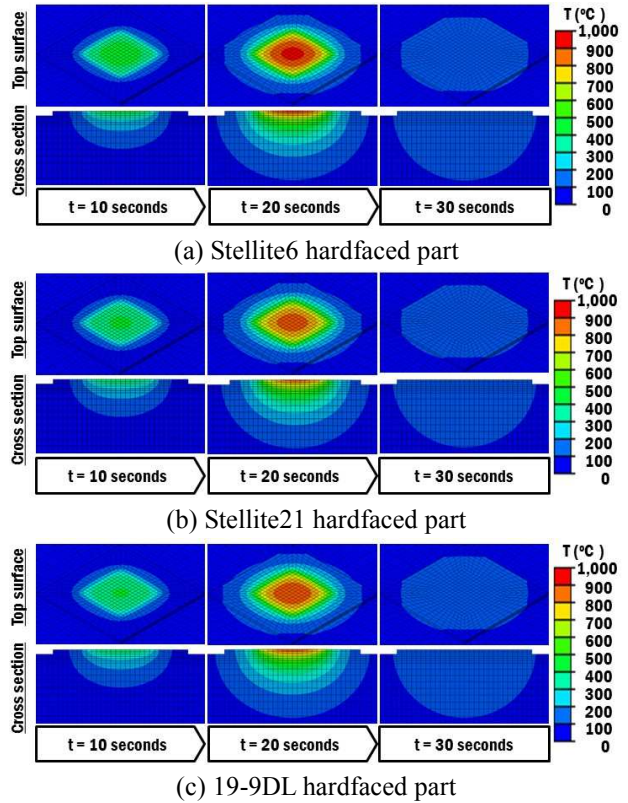


Fig. 2 Temperature distributions of the specimen for different times ($\Gamma = 2$ mm)

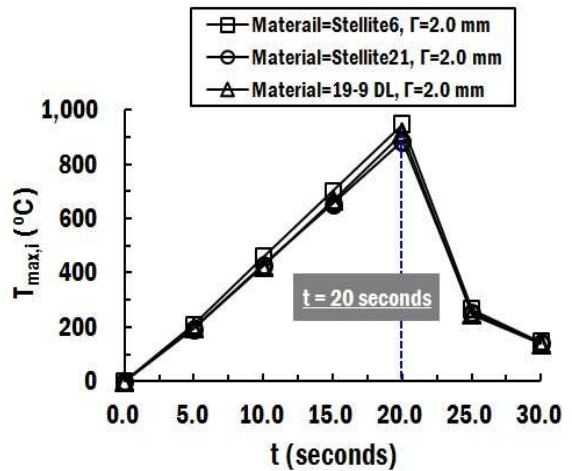


Fig. 3 Variation of the maximum temperature of the specimen according to time

가장 낮은 온도 분포가 나타남을 알 수 있었다. 또한, 하드페이징부 두께가 증가할수록 해석 모델 내부 온도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 전체 해석 모델 체적에서 STD61 열간 금형강 재료 보다 열전도도가 작은 값을 가지는 하드페이징 재료의 체적이 증가하여, 기저부로 전달되는 열량이 감소함과 동시에 대류에 의하여 소실되

는 열량이 감소하기 때문으로 사료된다. 이 결과들로부터 온도 측면에서 하드페이싱 재료를 선택할 경우 큰 열전도도 값을 가지는 재료를 선정하여야 하며, 하드페이싱부의 두께는 얇게 생성하여야 함을 알 수 있었다.

Fig. 5 의 각 하드페이싱부 두께에 따른 해석모델의 깊이 방향으로의 온도 변화를 분석한 결과, 하드페이싱부와 기저부의 경계에서도 온도는 연속성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 하드페이싱부와 기저부의 경계에서 깊이 방향의 온도변화 기울기가 변화하며, 기저부보다 하드페이싱부에서 깊이 방향의 온도변화 기울기가 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이 결과로부터 하드페이싱부와 기저부의 경계에서 열응력과 열변형률의 단차가 발생할 것으로 예측되었다.

3.2 유효 응력 분포 특성

비정상 열전달 해석 결과 최대 온도분포가 나타나는 해석시간 20 초에서 대한 해석모델의 내부 온도분포를 이용하여 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 6 과 7 은 열응력 해석 결과 도출된 하드페이싱 재

료와 두께에 따른 해석모델 내부 유효 열응력 분포이다.

Fig. 6 과 7 에서 하드페이싱 재료가 Stellite 6 일 경우에 해석 모델에 가장 큰 유효열응력이 발생함을 알 수 있었다. Stellite6 과 Stellite21 초합금을 하드페이싱 재료로 선택할 경우, 19-9 DL 초합금 재료를 하드페이싱 재료로 선택한 경우 보다 하드페이싱부에 발생하는 최대 유효 열응력이 각각

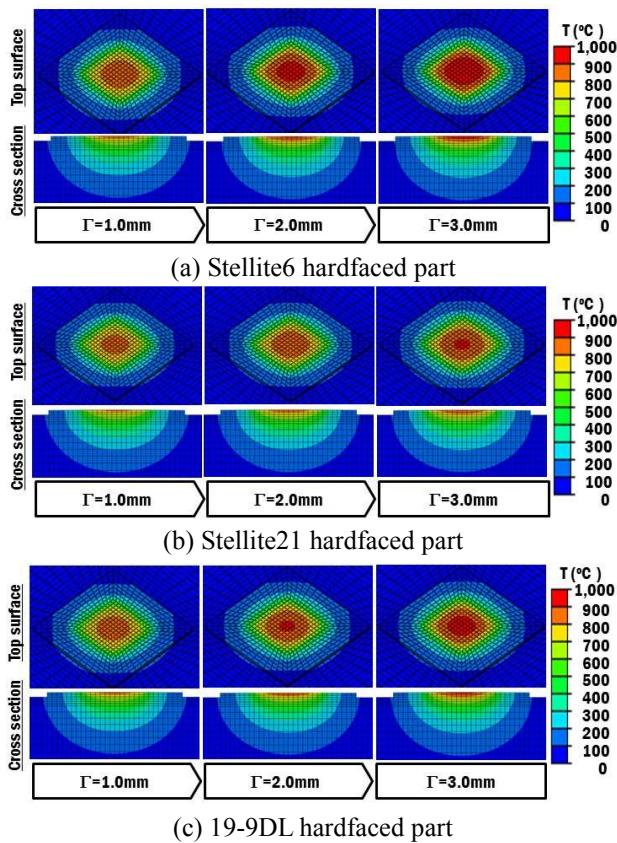


Fig. 4 Temperature distribution in the specimen for different materials and thicknesses of the hardfaced region (t = 20 seconds)

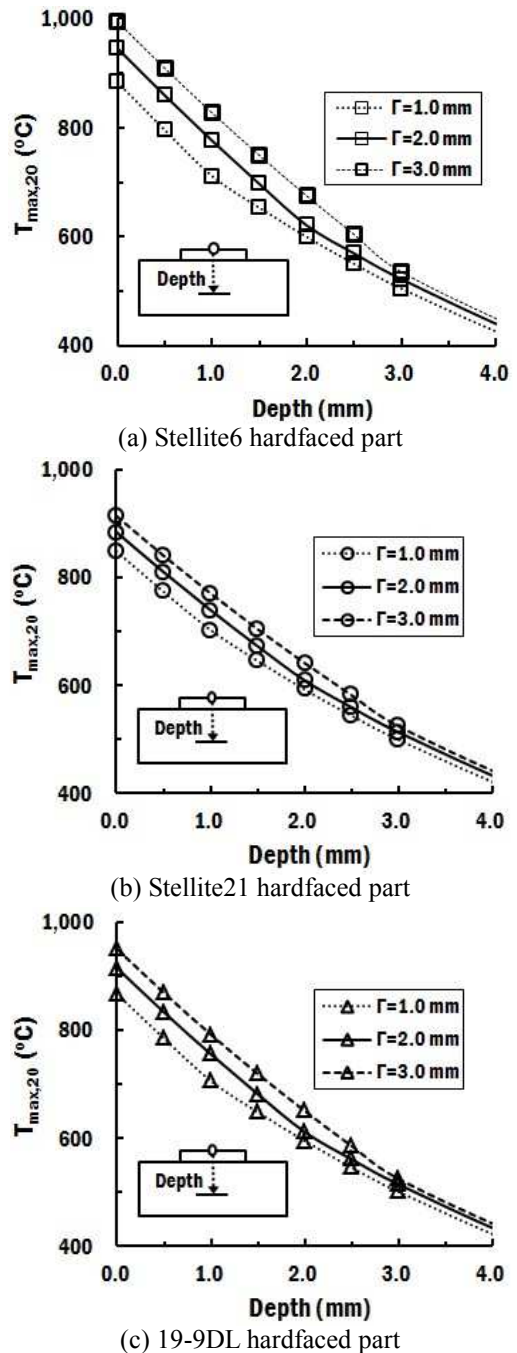


Fig. 5 Influence of the thickness of the hardfaced region on the temperature distribution in the thickness direction (t = 20 seconds)

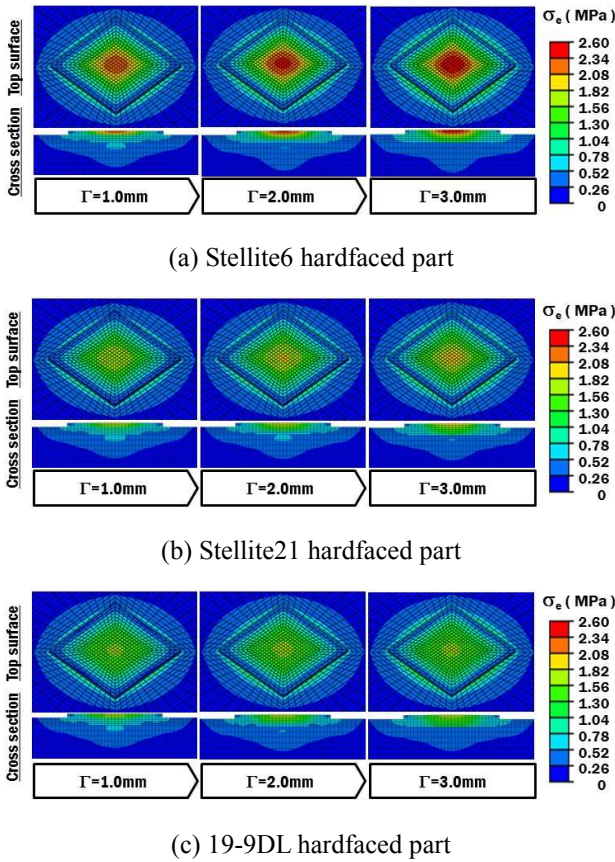


Fig. 6 Effective stress distribution in the specimen for different materials and thicknesses of the hardfaced region ($t = 20$ seconds)

42.3-57.8 %와 12.2-22.3 % 정도 증가하는 것을 알 수 있었다. Stellite6 와 Stellite21 초합금을 하드페이싱 재료로 선정한 경우, 하드페이싱부의 두께가 증가할수록 해석 모델 내부 유효 열응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 하드페이싱부의 두께가 증가할수록 Stellite6 와 Stellite21 재료로 하드페이싱된 해석 모델들과 19-9 DL 로 하드페이싱된 해석 모델의 최대 유효 응력의 차가 증가하였다. 그러나, 19-9 DL 을 하드페이싱 재료로 적용한 경우에는 하드페이싱부의 두께가 증가하여도 해석 모델 내부 유효 응력은 거의 증가하지 않았다.

Fig. 7 과 같은 해석모델의 깊이 방향 유효 응력 변화를 고찰한 결과 하드페이싱부와 기저부의 경계에서 유효 응력의 현저한 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 하드페이싱 재료 및 두께에 따른 경계부의 유효 응력차 변화를 분석하기 위하여 Fig. 8 의 그래프를 도출하였다. Fig. 8 과 같이 유효 응력차 변화를 분석한 결과 Stellite6 를 하드페이싱 재료로 적용한 경우, Stellite21 및 19-9 DL 을 하드페이싱 재료로 적용한 경우보다 하드페이싱부

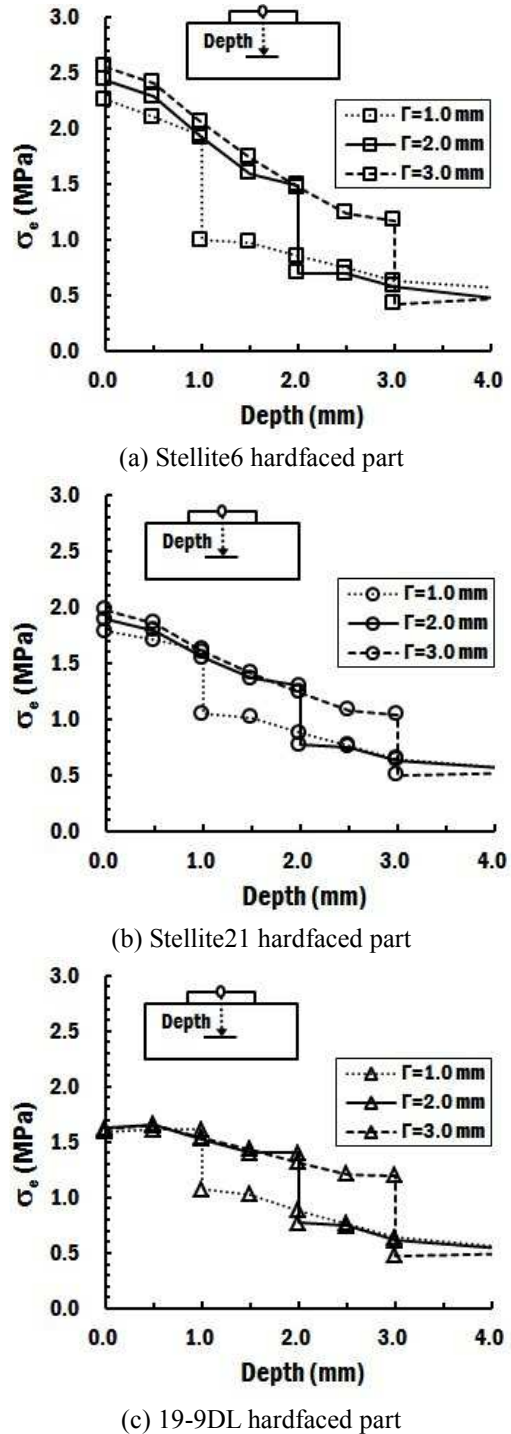


Fig. 7 Influence of thickness of the hardfaced region on the effective stress distribution in the thickness direction ($t=20$ seconds)

와 기저부의 경계부에서 큰 유효 응력차가 발생하는 것을 알 수 있었다. Stellite6 와 Stellite21 을 하드페이싱 재료로 적용한 경우에는 하드페이싱부 두께가 1 mm 에서 2 mm 로 증가할 때 경계부 유효 응력차가 감소하지만 하드페이싱부 두께가 2

mm 이상되면 경계부에 거의 유사한 크기의 유효 응력차가 발생하였다. 19-9 DL 을 하드페이싱부 재료로 적용한 경우에는 하드페이싱부 두께가 1 mm 일 때에는 3 가지 하드페이싱 재료중 가장 적은 경계부 유효 응력차를 나타내었다. 그러나 하드페이싱부 두께가 증가할수록 경계부의 유효 응력차가 거의 선형적으로 증가하여 하드페이싱부 두께가 3 mm 일 때 두께 3 mm 의 Stellite6 재료를 하드페이싱부에 적용한 경우와 거의 같은 크기의 경계부 유효 응력차를 나타내었다. Fig. 7 과 8 을 고찰한 결과 Stellite21 초합금을 하드페이싱 재료로 적용한 경우, 하드페이싱부 두께가 2 mm 일 때 가장 작은 크기의 경계부 유효 응력차가 발생함을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 19-9 DL 초합금 재료로 1 mm 두께의 하드페이싱부를 생성 하였을 때, 가장 적은 잔류 열응력이 발생할 것으로 사료된다. 그러나 Stellite21 초합금 재료로 2 mm 두께의 하드페이싱부를 생성 하였을 때, 하드페이싱부와 기저부의 경계에서의 유효 응력 편차가 가장 적게 발생할 것으로 판단되었다. 열간성형 금형의 고온에서의 반복적 온도 및 하중 조건 변화에 따른 경계부의 분리가 하드페이싱 된 금형의 수명에 중요한 영향을 미치는 것을 고려하면, STD61 금형강 상부에 2 mm 두께로 Stellite21 초합금 재료를 적층하여 하드페이싱부를 생성하는 것이 경계부의 피로 현상에 의한 분리를 최소화 할 수 있을 것으로 사료되었다.

3.3 주변형률 분포 특성

Fig. 9 와 10 은 열응력 해석 결과 도출된 하드페

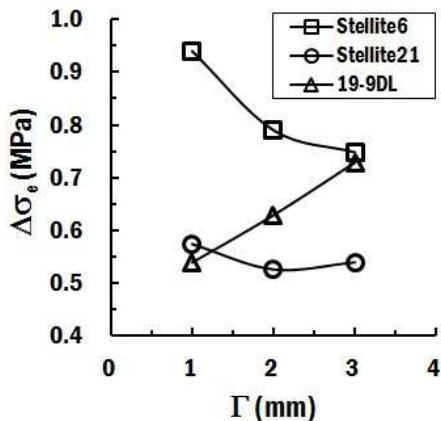
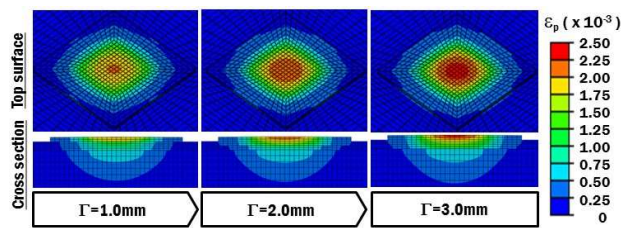


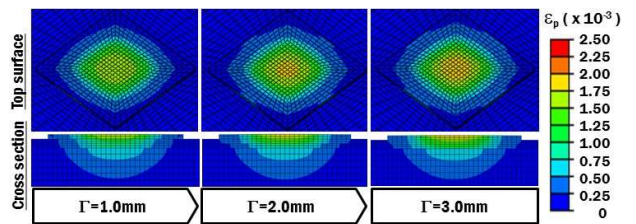
Fig. 8 Influence of the material and thickness of the hardfaced region on the deviation of the effective stress in the joined region (t=20 seconds)

이싱 재료와 두께에 따른 해석 모델 내부의 주변 형률 변화이다.

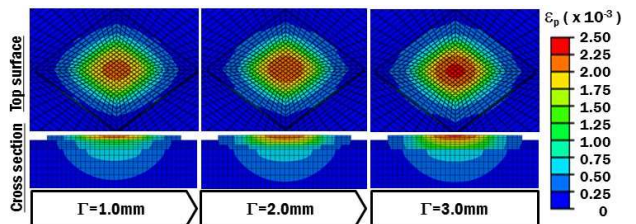
Fig. 9 와 10 에서 19-9DL 을 하드페이싱 재료로 적용한 경우 하드페이싱부 두께에 관계없이 3 가지 하드페이싱부 재료 중 가장 큰 값의 주변형률 분포를 나타내었다. Stellite6 와 19-9DL 초합금을 하드페이싱 재료로 적용한 경우, Stellite21 를 하드페이싱 재료로 적용한 경우보다 최대 주변형률이 각각 16.9-21.1 % 및 18.5-21.8 % 정도 크게 예측되었다. 경계부의 최대 주변형률은 또한 Stellite6 와 19-9DL 초합금을 하드페이싱부 재료가 적용된 경우, Stellite21 를 하드페이싱부 재료로 적용한 경우보다 주변형률이 각각 10.3-12.5 % 및 22.3-27.2 % 정도 크게 발생하였다. Stellite6 와 Stellite21 재료로 하드페이싱된 경우를 비교한 결과 하드페이싱부 두께가 증가할수록 Stellite6 와 Stellite21 로 하드페이싱된 해석모델에서 발생하는 최대 주변형률 차이가 증가하였다. 또한, 19-9DL 과 Stellite21 재료로 하드페이싱된 경우를 비교한 결과 하드페이싱부 두께가 증가할수록 19-9DL 과 Stellite21 로 하드페



(a) Stellite6 hardfaced part



(b) Stellite21 hardfaced part

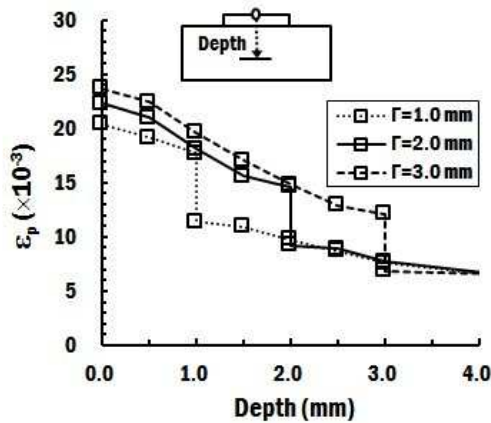


(c) 19-9DL hardfaced part

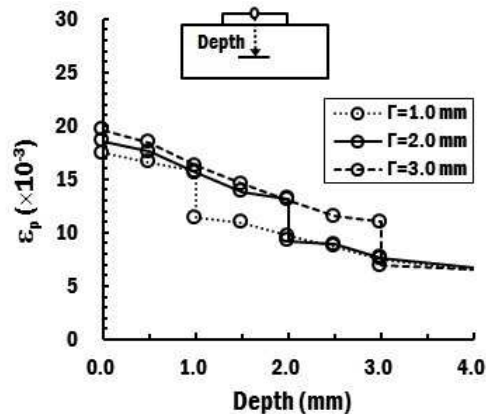
Fig. 9 Principal strain distribution in the specimen for different materials and thicknesses of the hardfaced region (t = 20 seconds)

이성된 해석모델에서 발생하는 최대 주변형률 차이가 감소하는 것을 알 수 있었다.

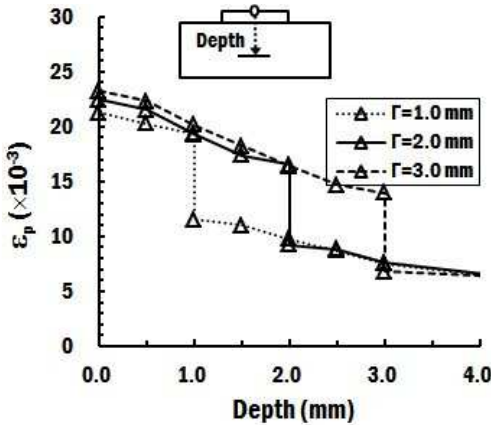
Fig. 10 을 이용하여 해석모델의 깊이 방향 주변형률 변화를 분석한 결과 기저부와 하드페이싱부의 경계에서 두드러진 주변형률 차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 하드페이싱 재료별 하드페이싱 두께에 따른 경계부의 주변형률 차이를 정량적으



(a) Stellite6 hardfaced part



(b) Stellite21 hardfaced part



(c) 19-9DL hardfaced part

Fig. 10 Influence of thickness of the hardfaced region on the principal strain distribution in the thickness direction ($t=20$ seconds)

로 분석하기 위하여 Fig. 11 과 같은 그래프를 산출하였다. Fig. 11 에서 Stellite6 와 19-9DL 초합금들을 하드페이싱 하였을때, Stellite21 을 하드페이싱 한 경우보다 경계부 주변형률 차가 각각 28.9-45.9 %와 75.8-84.3 % 정도 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 19-9DL 을 하드페이싱 재료로 적용하였을 경우 하드페이싱부와 기저부의 경계에서 가장 큰 주변형률 차이가 발생함을 알 수 있었다. Stellite6 와 19-9DL 재료를 하드페이싱 재료로 적용한 해석모델들에서는 하드페이싱 두께가 증가할수록 경계부의 주변형률 차이가 감소하는 경향을 보였다. 그러나, Stellite21 초합금을 하드페이싱 재료로 적용한 해석모델에서는 하드페이싱 두께가 2 mm 일때 경계부에서의 주변형률 차이가 가장 적게 발생함을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 최대 잔류 주변형률과 경계부 주변형률 차이 측면에서 STD61 금형강에 두께 2 mm 로 Stellite21 재료를 하드페이싱을 수행하는 것이 가장 바람직할 것으로 사료된다.

3.4 하드페이싱 재료 및 두께 선정

3.1 절에서 도출된 하드페이싱 재료에 따른 해석 모델별 열전달 측면 분석 결과에 따라 3 가지 하드페이싱 재료의 열전도도를 비교한 결과 Table 2 와 같이 Stellite21 초합금이 가장 큰 열전도도를 나타내었다. 그러므로, 이 연구에 적용된 하드페이싱 재료중 Stellite21 초합금을 하드페이싱 재료로 적용한 경우 3 가지 하드페이싱 재료중 열전달 측면에서 가장 효과적일 것으로 사료된다. 하드페이싱부와 기저부의 경계에서 반복되는 고온 및 하중 조건 변화에 의한 경계부 분리를 최소화하기 위

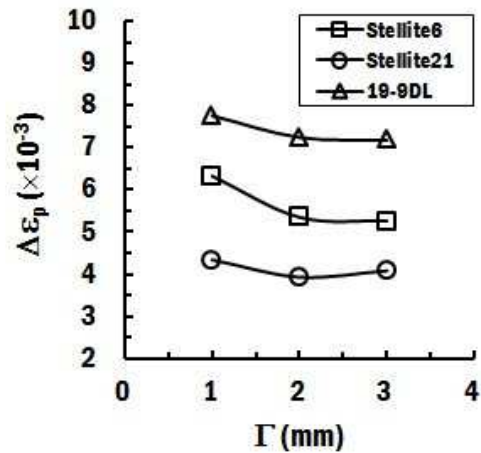


Fig. 11 Influence of the material and thickness of the hardfaced region on the deviation of the principal strain in the joined region ($t=20$ seconds)

하여서는 경계부에서의 유효응력 차이 및 주변형을 차이가 가장 적게 발생시키는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 3.2 절과 3.3 절의 결과들을 고찰한 결과 Stellite21 초합금 재료로 두께 2 mm 의 하드페이싱부를 생성하는 것이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

위 결과들로부터 가장 적절한 하드페이싱 재료와 두께를 각각 Stellite21 과 2 mm 로 선정하였다.

4. 결론

이 연구에서는 3 차원 열전달/열응력 해석을 통한 STD61 열간금형강의 하드페이싱 재료 및 두께를 예측에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 비정상 열전달 해석 결과를 이용하여 하드페이싱 재료와 두께에 따른 열전달 특성과 온도 분포 변화를 고찰할 수 있었다. 고찰 결과로부터 열전달과 온도 분포 측면에서 열전도도가 큰 하드페이싱 재료를 선정하여야 하며, 하드페이싱 두께는 얇게 생성하여야 함을 알 수 있었다.

둘째, 3 차원 열응력해석을 통한 하드페이싱 재료와 두께에 따른 내부 유효응력 분포 변화를 분석 하였다. 유효응력 분포 변화 분석 결과 최대 유효응력 측면에서는 19-9DL 재료를 1 mm 로 하드페이싱 하는 것이 가장 적은 최대 유효응력을 발생시켰다. 그러나 Stellite21 초합금 재료로 두께 2 mm 의 하드페이싱층 생성할 때, 경계부의 유효응력 차가 가장 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 열응력해석 결과를 이용하여 하드페이싱 재료와 두께에 따른 내부 주변형률 변화를 고찰 하였다. 그 결과 Stellite21 초합금 재료로 두께 2 mm 의 하드페이싱층 생성한 경우에서 최대 주변형률과 경계부 주변형률 차가 가장 적게 발생함을 알 수 있었다.

넷째, 위 결과들로부터 STD61 열간금형강에 하드페이싱공정을 적용할 때, 적합한 하드페이싱 재료와 두께의 조합이 Stellite21 초합금과 2 mm 임을 알 수 있었다.

향후, 이 연구결과를 기반으로 하드페이싱된 시편의 고온마모실험을 수행하여, 하드페이싱 재료와 두께 선정에 관한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받

아 수행되었음. (NRF-2012R1A1A4A01013986)

참고문헌

(References)

- (1) Lee, R. S. and Jou, J. L., 2003, "Application of Numerical Simulation for Wear Analysis of Warm Forging Die," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 140, Issue 1-3, pp. 43~48.
- (2) Ahn, D. G., 2013, "Hardfacing Technologies for Improvement of Wear Characteristics of Hot Working Tools: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 7, pp. 1271~1283.
- (3) Lange, K., Cser, L., Geiger, M. and Kals, J. A. S., 1992, "Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming," *CIRP Annals*, Vol. 41, Issue 2, pp. 667~675.
- (4) Farhani, M., Amadeh, A., Kashani, H. and Saeed-Akbari, A., 2006, "The Study of Wear Resistance of a Hot Forging Die, Hardfaced by a Cobalt-base Superalloy," *Materials Science Forum*, Vol. 30, pp. 212~218.
- (5) Kohopää, J., Hakonen, H. and Kivivuori, S., 1989, "Wear Resistance of Hot Forging Tools Surfaced by Welding," *Wear*, Vol. 130, Issue 1, pp. 103~112.
- (6) Stern, K. H., 1996, "Metallurgical and Ceramic Protective Coatings," *Chapman & Hall*, pp. 74~111.
- (7) Frenk, A. and Kurz, W., 1994, "Microstructural Effects on the Sliding Wear Resistance of a Cobalt-Based Alloy," *Wear*, Vol. 174, Issues 1-2, pp. 81~91.
- (8) Majumdar, J. D., 2010, "Laser Assisted Composite Surfacing of Materials for Improved Wear Resistance," *Physics Procedia*, Vol. 5, Part A, pp. 425~430.
- (9) Ahn, D. G., 2011, "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, pp. 925~938.
- (10) Ocken, H., 1995, "The Galling Wear Resistance of New Iron-Base Hardfacing Alloy: a Comparison with Established Cobalt-and Nickel-base Alloys," *Surface Coating Technology*, Vol. 76-77, Part 2, pp. 456~461.
- (11) D'Oliveira, A. S. C. M., Vilar, R. and Feder, C. G., 2002, "High Temperature Behaviour of Plasma Transferred Arc and Laser Co-based Alloy Coatings," *Applied Surface Science*, Vol. 201, Issues 1-4, pp. 154~160.
- (12) Ming, Q., Lim, L. C. and Chen, Z. D., 1998, "Laser Cladding of Nickel-based Hardfacing Alloys," *Surface Coating Technology*, Vol. 106, Issues 2-3, pp. 174~182.

- (13) Persson, D. H. E., Jacobson, S. and Hogmark, S., 2003, "Effect of Temperature on Friction and Galling of Laser Processed NOREM 02 and Stellite 21," *Wear*, Vol. 255, Issues 1-6, pp. 498~503.
- (14) Mingxi, L., Yizhu, H. and Guoxiong, S., 2004, "Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad Cobalt-based Alloy Multi-layer Coatings," *Applied Surface Science*, Vol. 230, Issues 1-4, pp. 201~206.
- (15) Wu, A. P., Ren, J. L., Peng, Z. S., Murakawa, H., and Ueda, Y., 2000, "Numerical Simulation for the Residual Stresses of Stellite Hard-facing on Carbon Steel," *Journal of Material Processing Technology*, Vol.101, Issue 1, pp. 70~75.
- (16) Bhanu Kiran, V. T., Krishna, M., Praveen, M. and Pattar, N., 2011, "Numerical Simulation of Multilayer Hardfacing on Low Carbon Steel," *International Journal of Engineering Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 53~63.
- (17) Ahn, D. G. and Park, N. R., 2012, "A Study on the Influence of Hard-facing Material and Its Thickness on Temperature and Thermal Stress Distributions in Hotworking Tools Using 3-D Finite Element Analysis," *Proceedings of 2012 Autumn Meeting of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 2357~2358.
- (18) Latrobe Specialty Metals Inc., "LSS H13 Tool Steel," <http://www.latrobesteel.com>
- (19) MatWeb, "Bohler-Uddeholm SUPERIOR H13 Hot Work Tool Steel," <http://www.matweb.com>
- (20) MatWeb, "Deloro Stellite Stellite[®]6," <http://www.matweb.com>
- (21) China Steel Suppliers Inc., "Stellite 6," <http://www.steelgr.com>
- (22) Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y. and Klemens, P. G., 1970, "Thermal Conductivity/Metallic Elements and Alloys," *Thermophysical Properties Research Center*, New York-Washington, pp. 947~949.
- (23) Deloro Stellite, "STELLITE 21 ALLOY," [http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Completed%20Data%20Sheets/Stellite%2021%20DS01-22208%20\(S%20R0808\).pdf](http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Completed%20Data%20Sheets/Stellite%2021%20DS01-22208%20(S%20R0808).pdf)
- (24) MatWeb, "Deloro Stellite Stellite[®]21," <http://www.matweb.com>
- (25) China Steel Suppliers Inc., "Stellite 21," <http://www.steelgr.com>
- (26) MatWeb, "AISI Type 651(19-9) Stainless Steel," <http://www.matweb.com>
- (27) ASM International Handbook Committee, 1990, "ASM Handbook-Tenth Edition, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys," *ASM International*, Vol.1, pp. 950~980.