

3 차원 유한요소해석을 이용한 Stellite21 초합금으로 하드페이싱된 STD 61 열간금형강의 열응력제어층 재료조합 및 두께 예측[§]

박나라*, 안동규*†, 오진우*

* 조선대학교 기계공학과

Estimation of the Thickness and the Material Combination of the Thermal Stress Control Layer (TSCL) for the Stellite21 Hardfaced STD61 Hot Working Tool Steel Using Three-Dimensional Finite Element Analysis

Na-Ra Park*, Dong-Gyu Ahn*† and Jin-Woo Oh*

* Dept. of Mechanical Engineering, Chosun Univ.

(Received April 1, 2014 ; Revised May 7, 2014 ; Accepted May 7, 2014)

Key Words: Thermal Stress Control Layer(열응력제어층), Material Combination(재료조합), Thickness(두께), Thermal Stress-Strain Distributions(열응력/변형률 분포), Hardfacing(하드페이싱)

초록: 하드페이싱층과 기저부의 결합부에서 발생하는 잔류 응력/변형률을 감소시키기 위하여 열응력제어층에 대한 연구가 시작되고 있다. 이 연구에서는 3 차원 유한요소해석을 이용하여 Stellite21 초합금으로 하드페이싱된 STD61 열간금형강의 중간층으로 형성된 열응력제어층의 재료조합과 두께를 예측하고자 한다. 열응력제어층은 Stellite21 과 STD61 의 조합으로 생성하였다. 열응력제어층의 두께범위는 0.5-1.5 mm 로 선정하였다. 유한요소해석 결과를 이용하여 열응력제어층을 구성하는 Stellite21 과 STD61 의 혼합을 및 열응력제어층 두께에 따른 시편 내부 온도/열응력/열변형률분포를 정량적으로 분석하였다. 이 결과로부터 적합한 열응력제어층의 재료혼합비는 Stellite21 50 % 와 STD61 50 % 이며, 적절한 열응력제어층의 두께는 1.0 mm 임을 알 수 있었다.

Abstract: The research on a thermal stress control layer (TSCL) begins to undertake to reduce residual stress and strain in the vicinity of the joined region between the hardfacing layer and the base part. The goal of this paper is to estimate the material combination and the thickness of TSCL for the Stellite21 hardfaced STD61 hot working tool steel via three-dimensional finite element analysis (FEA). TSCL is created by the combination of Stellite21 and STD61. The thickness of TSCL ranges from 0.5 mm to 1.5 mm. The influence of the material combination and the thickness of TSCL on temperature, thermal stress and thermal strain distributions of the hardfaced part have been investigated. The results of the investigation have been revealed that a proper material combination of TSCL is Stellite21 of 50 % and STD61 of 50 %, and its appropriate thickness is 1.0 mm.

- 기호설명 -

w_H : 하드페이싱층 두께
 w_T : 열응력제어층 두께
 Φ : Stellite21 의 체적비율

Q_a : 부가되는 열유량
 $Q_{a,max}$: 부가되는 최대 열유량
 ρ : 밀도
 C_p : 비열
 k : 열전도도
 α : 열팽창계수
 ξ_{TSCL} : 혼합법칙이 적용된 열응력제어층의 물성
 ξ_1 : STD61 열간금형강의 물성
 ξ_2 : Stellite21 의 물성

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, smart@chosun.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

- C_{pTSCL} : 열응력제어층의 비열
- C_{p1} : STD61 열간금형강의 비열
- C_{p2} : Stellite21의 비열
- k_{TSCL} : 열응력제어층의 열전도도
- k_1 : STD61 열간금형강의 열전도도
- k_2 : Stellite21의 열전도도

1. 서론

열간 성형 공정중 고온의 성형 재료에서 금형으로의 열전달에 의하여 금형면 열연화 현상이 발생한다.⁽¹⁾ 이 열연화 현상은 금형의 급격한 국부 마모를 발생시켜 금형의 수명을 현저히 감소시킨다.⁽¹⁾ 열간 성형 금형의 열연화 현상에 의한 금형 마모현상을 극복하기 위하여 하드페이싱 공정개발에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있다.⁽¹⁾ 하드페이싱은 Fig. 1 과 같이 금형의 고마모 발생 가능 영역에 마모/마찰특성이 우수한 초합금을 적층하여 금형의 마모수명을 현저히 향상시키는 공정이다.⁽¹⁾ 최근 전세계적인 관심을 불러 일으키고 있는 3 차원 레이저 기반 직접식 금속 쾌속툴링공정은 금형면에 국부적으로 3 차원 형상을 가진 하드페이싱층을 생성할 수 있어, 금형 제작 비용의 증가를 거의 발생시키지 않고도 열간 성형 금형의 수명을 현저히 증가시킬 수 있다.⁽¹⁾ POM 사에서는 DMD(direct metal deposition) 공정을 이용하여 케벡팅 로드와 업셋팅용 열간성형 금형에 하드페이싱 공정을 적용하여 금형 수명이 현저히 향상되는 것을 보고하였다.^(2,3) 인스텍사에서는 DMT (laser-aided direct metal rapid tooling) 공정으로 열간단조금형을 하드페이싱한 바 있다.^(1,2)

열간성형 금형의 하드페이싱에서는 열간성형금형강으로 기저부를 형성하고, 고온에서 기계적 특성이 우수한 초합금 재료를 적층하여 하드페이싱층을 생성한다. 이 경우 기저부와 하드페이싱층의 열팽창계수 차이에 의하여 하드페이싱부와 경계부

에서의 열 피로 현상(thermal fatigue) 을 발생시킬 수 있다.^(1,3-5) 하드페이싱된 열간성형 금형에서 발생하는 열 피로 현상을 해결하기 위하여 열응력제어층(thermal stress control layer: TSCL) 생성에 대한 연구가 시작되고 있다.^(1,3-5) Smurov 등은 기저부 재료와 하드페이싱부 재료를 혼합하여 열응력제어층을 생성하는 개념을 제안하였다.⁽³⁾ 이들은 경사 기능재료 개념을 이용하여 기저부에서 하드페이싱부 방향으로 열응력제어층을 적층하여 생성할 때, 하드페이싱부에 가까워질수록 하드페이싱부 재료의

체적비율이 선형적으로 증가하도록 열응력제어층을 생성하였다.⁽³⁾ Kelbassa 등은 다이캐이팅 금형의 마모와 열피로 저항성 향상을 위하여 선형적 천이층 개념을 가지는 열응력제어층 설계 방법에 대하여 제안하였다.^(5,6) 그들은 기저부 재료로 H11 로 선정하였으며, Dievar, Stellite31 및 AISI 10 을 하드페이싱 재료로 사용하였다. 기저부와 하드페이싱부 재료의 혼합으로 열응력제어층을 생성할 경우, 적합한 열응력제어층의 재료 혼합비와 두께 예측에 대한 연구가 필수적이다.

이 연구에서는 3 차원 유한요소해석(finite element analysis: FEA) 을 이용하여 Stellite21 초합금으로 하드페이싱된 STD61 열간금형강의 중간층으로 형성된 열응력제어층의 Stellite21 과 STD61의 비율 및 열응력제어층 두께에 따른 해석 모델 내부 온도/열응력/열변형률분포를 정량적으로 분석하였다. 이 분석 결과로부터 Stellite21 초합금으로 하드페이싱된 STD61 열간금형강에 적합한 열응력제어층의 재료 혼합비와 두께를 도출하였다.

2. 열응력제어층 설계 및 유한요소해석

2.1 열응력제어층 설계

Fig. 2 은 이 연구에 적용된 열응력제어층 생성 개념이다. 하드페이싱부와 기저부의 재료는 각각 Stellite21 과 STD61 열간금형강으로 선정하였다. 열응력제어층은 Fig. 2 및 Table 1 과 같이 하드페이싱부와 기저부사이에 STD61 열간금형강과 Stellite21 초합금 재료들을 체적비율로 혼합하여 생성하도록 하였다. 선행 연구결과를 이용하여

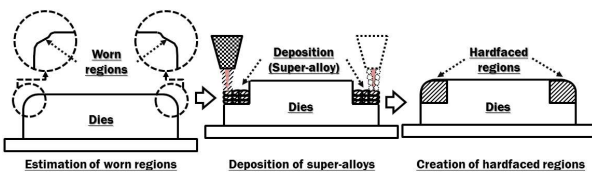


Fig. 1 Concept of hardfacing technology

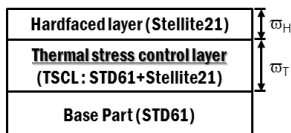


Fig. 2 Design concept of thermal stress control layer

Table 1 Design alternatives of TSCL

Design	Type1	Type2	Type3	Type4	Type5	Type6	Type7
ϖ_H (mm)	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5
ϖ_T (mm)	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5
1- Φ	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75	0.50	0.75

열응력제어층과 하드페이싱부의 두께의 합은 2 mm 가 되도록 설계하였다.⁽⁶⁾ 이 연구에서 적용된 열응력제어층의 STD61 체적비율과 두께범위는 각각 25~ 75 % 와 0.5 mm~ 1.5 mm 이다. 열응력제어층의 재료 혼합비 및 두께에 따라 Table 1 과 같은 7 가지의 열응력제어층 설계안을 도출하였다.

2.2 유한요소해석

열응력제어층 설계에 따른 하드페이싱부/경계부/기저부의 열응력/열변형률 변화를 분석하기 위하여 3 차원 비정상 열전달 해석(transient heat transfer analysis)과 이 해석결과에서 산출된 온도분포를 이용하여 열응력 해석(thermal stress analysis)을 수행하였다. 3 차원 비정상 열전달의 해석 모델은 Fig. 3 과 같다. Park 등의 선행연구와 같이 해석 모델의 하드페이싱부중 돌출부는 Fig. 2 와 같이 기저부 최상면으로부터 1 mm 돌출되게 하였다.⁽⁶⁾ 하드페이싱부와 열응력제어층를 포함하는 적층부 전체 크기는 30 mm(길이) × 30 mm(폭) × 2 mm(두께) 이다. 열 이력(thermal history)은 Fig. 3(a)와 같은 선행연구에서 적용된 열유량 이력 모델을 사용하였다.⁽⁶⁾ Fig. 3(a)의 최대 열유량(Q_{a,max})은 4,000 kW/m² 이다.⁽⁶⁾ 열전달 해석시 기저부의 바닥면과 측면들에는 Fig. 3(a)과 같이 자연 대류(natural convection) 조건을 적용하였다. 자연대류계수는 5.0 W/m² 이다. 기저부의 최상면에는 단열조건을 적용하였다. 비정상 열전달 해석 결과 최대 온도분포가 나타나는 해석시간 20 초에서의 온도 분포를 사용하여 열응력 해석을 수행하였다. 열응력 해석에서 기저부의 바닥면과 측면에서 고정 경계조건을 부여하였다. ABAQUS V6.11 Coupled

temp-displacement 모듈을 이용하여 비정상 열전달 해석과 열응력해석을 수행하였다. 하드페이싱부, 열응력제어층 및 기저부는 육면체 입체요소로 묘사하였다. 비정상 열전달해석과 열응력해석에 사용된 유한요소격자와 절점수는 Table 2 와 같다.

비정상 열전달해석과 열응력해석에 사용된 하드페이싱부와 기저부에 적용된 재료인 Stellite21 초합금과 STD61 열간금형강의 밀도, 비열, 열전도도 및 열팽창계수는 Table 3 과 같다. 열전달/열응력 해석용 재료 물성데이터중 열응력제어층에 대한 밀도, 열팽창계수, 탄성계수 및 포아송비는 식 (1) 과 같은 혼합법칙(Mixing law)를 이용하여 산출하였다.⁽⁷⁾ 식 (2)의 혼합법칙을 활용한 유효 비열 산출식로부터 열응력제어층의 비열을 계산하였다.⁽⁷⁾ 열응력제어층의 유효 열전도도는 맥스웰(Maxwell) 모델을 이용하여 식 (3)과 산출하였다.⁽⁸⁾

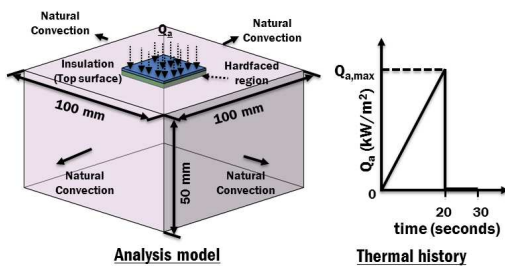
$$\xi_{TSCL} = \xi_1(1 - \Phi) + \xi_2\Phi \quad (1)$$

$$C_{PTSL} = \frac{\rho_1 C_{P1}(1 - \Phi) + \rho_2 C_{P2}\Phi}{\rho_1(1 - \Phi) + \rho_2\Phi} \quad (2)$$

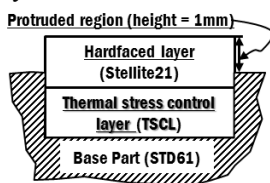
$$\frac{k_{TSCL}}{k_1} = \frac{k_2 + 2k_1 + 2\Phi(k_2 - k_1)}{k_2 + 2k_1 - \Phi(k_2 - k_1)} \quad (3)$$

Table 2 Number of elements and nodes for the FE model

Design	Hardfaced region		Thermal stress control layer		Base part	
	Element (EA)	Nodes (EA)	Element (EA)	Nodes (EA)	Element (EA)	Nodes (EA)
Type1 and 2	3,528	4,319	1,176	1,851	47,180	49,866
Type3-Type5	2,352	3,085	2,352	3,085		
Type6 and 7	1,176	1,851	3,528	4,319		



(a) Analysis model and thermal history



(b) Section view in the vicinity of the hardfaced region

Fig. 3 Model of finite element analysis

Table 3 Thermal properties and thermal expansion coefficients of STD61 and Stellite21⁽⁶⁾

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)	k (W/m°C)	α (10 ⁻⁶ /K)
STD61	7,760	460	25.0	10.4
Stellite21	8,330	423	17.0	14.3

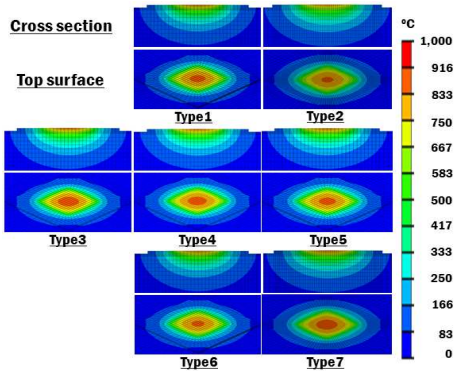


Fig. 4 Temperature distributions in the specimens for different material combinations and thicknesses of TSCL (time = 20 seconds)

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포 특성

비정상 열전달 해석 결과 해석시간 20 초에서 해석 모델 내부에 최대 온도 분포가 산출되었다. Fig. 4 는 비정상 열전달해석 결과 도출된 해석시간 20 초에서의 7 가지 열응력제어층 설계에 대한 해석 모델의 온도분포이다. 동일 열응력제어층 두께에서 열응력제어층의 STD61 금형강 재료의 혼합비가 증가할수록 모델 내부 온도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 동일 열응력제어층 재료 혼합비에서 열응력제어층의 두께가 감소할수록 시편모델 내부온도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 현상들은 열응력제어층의 STD61 금형강의 재료혼합비와 열응력제어층의 두께가 증가할수록 열응력제어층의 열전도도가 증가하여 기저부로 전달되는 열량이 증가함과 동시에 모델의 측면의 대류에 의하여 소산되는 열량이 증가하기 때문으로 사료된다. 열전달 해석에 도출된 열응력제어층 설계안에 대한 온도분포를 열응력 해석에 적용하였다.

3.2 열응력 분포 특성

Fig. 5, 6 및 7 은 열응력 해석 결과 취득된 열응력제어층 설계에 따른 유효응력분포, 두께 방향의 유효응력 분포 및 각 경계부에서의 유효응력 단차 변화이다. 해석 모델 내부의 전체적인 유효응력분포와 최대 유효응력은 Fig. 5 및 6 과 같이 열응력제어층의 재료 혼합비와 두께에 관계없이 거의 유사하게 예측되었다. 그러나 Fig. 6 및 7 과 같이 하드페이징 부와 열응력제어층의 결합부인 경계부 A(boundary A) 및 열응력제어층과 기저부의 결합부인 경계부 B(boundary B)에서는 유효응력의 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

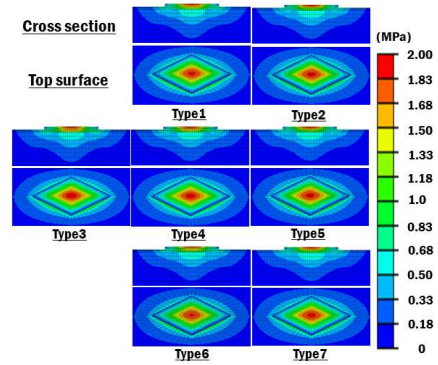


Fig. 5 Effective stress distributions in the specimens for different material combinations and thicknesses of TSCL

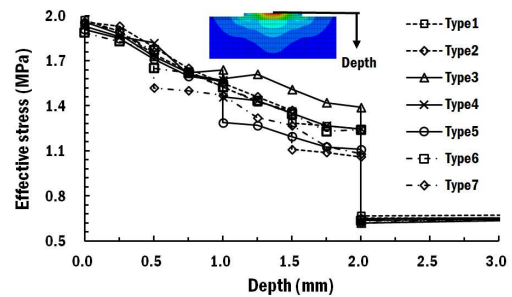


Fig. 6 Effects of the material combination and the thickness of TSCL on the effective stress distribution in the thickness direction

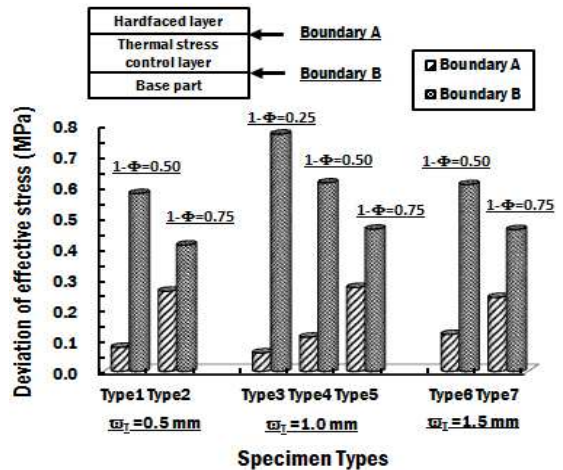


Fig. 7 Influence of the material combination and the thickness of TSCL on the maximum effective stress of the specimen

Fig. 6 과 7 에서 열응력제어층의 STD61 열간금형강 재료 혼합비가 증가할수록 경계부 A 에서의 유효 응력 단차가 증가하지만, 경계부 B 에서의 유효 응력 단차가 감소하는 것을 알 수 있었다.

그러나 열응력제어층의 두께가 증가하여도 경계부 A 와 B 에서의 유효응력단차는 거의 유사하게

나타나는 것을 알 수 있었다. Fig. 6 과 7 에서 열응력제어층의 STD61 열간금형강 재료의 혼합비가 25 % 인 Type 3 의 열응력제어층 설계안에서는 경계부 B 에서 가장 큰 유효응력 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

3.3 주변형률 분포 특성

열응력제어층의 재료 혼합비 및 두께에 따른 해석 모델 내부의 주변형률 분포를 분석하였다. Fig. 8 과 9 는 열응력제어층의 재료혼합비와 두께의 변화에 따른 해석 모델 내부 주변형률 분포와 두께 방향의 주변형률 분포 변화이다. 열응력제어층의 재료혼합비와 두께의 변화에 관계없이 전체적인 주변형률 분포는 거의 유사하게 예측 되었다. 그러나 최대 주변형률은 열응력제어층의 STD61 금형강 재료 혼합비와 두께가 증가할수록 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 9 의 두께 방향주변형률 분포를 분석한 결과, 경계부 A 와 B 에서 주변형률 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 현상의 주요 원인은 하드페이싱부, 열응력제어층 및 기저부의 열팽창계수의 차이인 것으로 사료되었다.

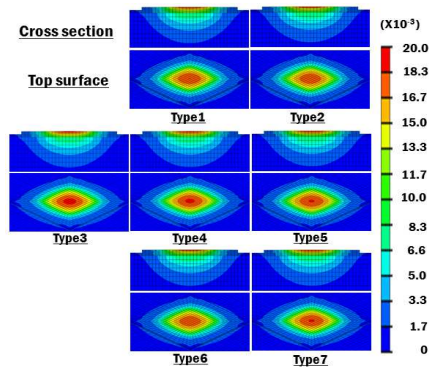


Fig. 8 Principal strain distributions in the specimens for different material combinations and thicknesses of TSCL

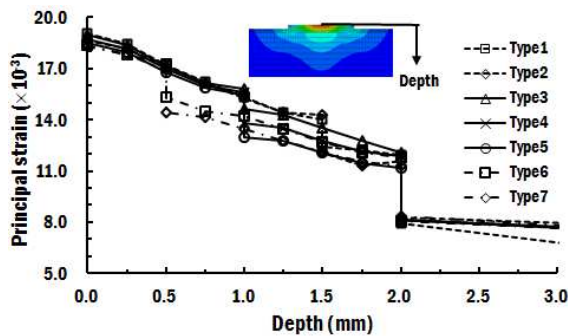


Fig. 9 Effects of the material combination and the thickness of TSCL on the principal strain distribution in the thickness direction

Fig. 9 로부터 Fig. 10 과 같은 열응력제어층의 재료 혼합비 및 두께에 따른 경계부 A 와 B 에서 발생하는 주변형률 단차 변화를 도출하였다. Fig. 9 와 10 에서 열응력제어층의 STD61 열간금형강 재료 혼합비와 두께가 증가할수록 경계부 A 의 주변형률 단차는 증가하지만, 경계부 B 의 주변형률 단차는 감소하는 것을 알 수 있었다. Park 등의 연구결과에서는 열응력제어층을 사용하지 않고 두께 2 mm 의 하드페이싱부를 적용할 때, 하드페이싱부와 기저부의 경계부에서 Fig. 10 의 점선과 같이 3.93×10^{-3} 정도의 주변형률 단차가 발생하는 것으로 보고하였다.⁽⁶⁾ Fig. 10 과 같이 열응력제어층 설계조건별 적층부와 기저부의 결합부인 경계부 B 의 주변형률 단차를 열응력제어층이 적용되지 않은 경우의 경계부 주변형률 단차와 비교하였다. 그 결과 열응력제어층 두께가 0.5 mm 이고 STD61 금형강 재료 혼합비가 50 % 인 Type 1 설계와 열응력제어층 두께가 1.0 mm 이고 STD61 금형강 재료의 혼합비가 25 %인 Type 3 설계가 적용될 경우, 경계부 B 에서 발생하는 주변형률 단차가 열응력제어층을 적용되지 않은 모델의 경계부 주변형률 단차보다 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 하드페이싱부와 열응력제어층이 열간성형 금형에 실제 적용할 경우 금형 표면부에 발생하는 열 피로 현상을 감소 시키기 위해서는 하드 페이싱부와 열응력제어층의 열팽창계수 차이에 의한 주변형률 단차가 최소화되어야 한다. 이 관점에서 Fig. 9 와 10 의 경계부 A 의 주변형률 단차를 고려한 결과 Type 2, Type 4 및 Type 5~7 의 열응력제어층 설계 중에서 열응력제어층 두께가 1.0 mm 이고 STD61

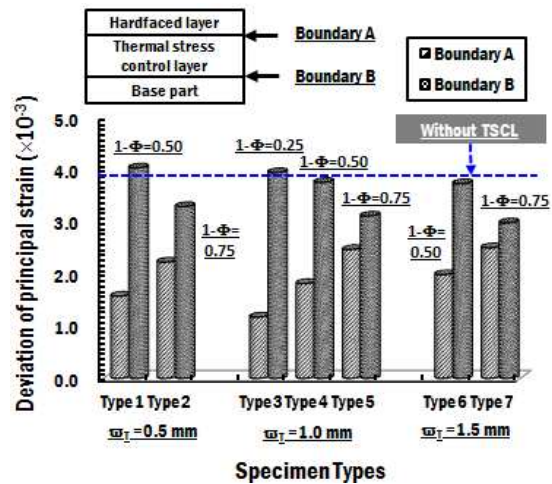


Fig. 10 Influence of the material combination and the thickness of TSCL on the maximum principal strain of the specimen

금형강 재료 혼합비가 50 % 인 Type 4 설계를 적용할 경우 경계부 A 의 주변형률 단차가 가장 작게 발생하는 것을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 STD61 열간금형강에 Stellite21 초합금을 하드페이싱할 경우, STD61 금형강 재료 50 %와 Stellite21 초합금 재료 50 % 의 혼합비를 가지는 두께 1.0 mm 의 열응력제어층이 가장 적합할 것으로 사료되었다.

4. 결 론

이 연구에서는 3 차원 유한요소해석을 이용하여 Stellite21 초합금으로 하드페이싱된 STD61 열간금형강의 열응력제어층의 재료혼합비와 두께를 예측하였다. 열응력제어층의 STD61 금형강과 Stellite21 초합금 재료 혼합비 및 두께에 따라 7 가지의 열응력제어층 설계안을 도출하였다. 비정상 열전달 해석을 수행하여 열응력 해석을 위한 7 가지 모델에 대한 온도분포를 도출하였다. 이 온도분포를 이용하여 열응력 해석을 수행하였다.

하드페이싱부와 열응력제어층의 결합부(경계부 A) 및 열응력제어층과 기저부의 결합부(경계부 B)에서 유효응력과 주변형률의 단차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 열응력제어층의 STD61 열간금형강 재료 혼합비가 증가할수록 경계부 A 의 유효응력/주변형률 단차는 증가하지만, 경계부 B 의 유효응력/주변형률 단차는 감소하는 것을 알 수 있었다. 열응력제어층의 두께가 증가하여도 경계부 A 와 B 의 유효응력 단차는 거의 유사하였다. 그러나 열응력제어층의 두께가 증가할수록 경계부 A 의 주변형률 단차는 증가하고, 경계부 B 의 주변형률 단차는 감소하는 것을 알 수 있었다. 열응력제어층이 적용된 경우와 열응력제어층 적용되지 않은 경우에 대한 경계부 B 의 주변형률 단차 비교 및 열응력제어층 설계안들에 대한 경계부 A 의 주변형률 단차를 비교를 통하여, STD61 금형강 재료 50 % 와 Stellite21 초합금 재료 50 % 의 혼합비를 가지며 두께 1.0 mm 인 Type 4 의 설계안이 가장 적합한 열응력제어층 설계로 예측되었다.

추후 이 연구에서 취득된 열응력제어층이 적용된 시편들에 대한 고온마모실험과 잔류응력분석을 수행하여, 최적의 열응력제어층 재료혼합비와 두께를 도출할 예정이다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었음.(NRF-2012R1A1A4A01013986)

참고문헌 (References)

- (1) 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.
- (2) 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.
- (4) Smurov, I., 2008, "Laser Cladding and Laser Assisted Direct Manufacturing," *Surface and Coating Technology*, Vol. 202, No. 18, pp. 4496~4502.
- (5) Ocylok, S., Weisheit, A. and Kelbassa, I., 2010, "Functionally Graded Multi-layers by Laser Cladding for Increased Wear and Corrosion Protection," *Physics Procedia*, Vol. 5, Part A, pp. 359~367.
- (6) Müller, S., Pries, H., Dilger, K., Ocylok, S., Weisheit, A., and Kelbassa, I., 2011, "Applying Functionally Graded Materials by Laser Cladding: a Cost-effective Way to Improve the Lifetime of Die-casting Die," *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 235~239.
- (7) Jeong, J. S. and Shin, K. H., 2013, "Fabrication of Functionally Graded Materials between P21 Tool Steel and Cu by Using Laser-Aided Layered Manufacturing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp. 61~66.
- (8) Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2007, "Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity," *Trans. AMSE Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, Issue 5, pp. 617~623.
- (9) Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, Issue 21, pp. 4,316~4,318.