

12Cr 강의 이동 화염경화 공정 특성

김광호^a, 이민구^{b*}, 김경호^c, 김흥회^c, 이창규^b, 김길무^a

^a충남대학교 재료공학과, ^b한국원자력연구소 원자력나노소재응용팀, ^c한국원자력연구소 재료기술개발부

Characteristics of Flame Hardening Process for 12Cr Steels

Gwang-Ho Kim^a, Min-Ku Lee^{b*}, Kyeong-Ho Kim^c, Whung-Whoe Kim^c,
Chang-Kyu Rhee^b, Gil-Mu Kim^a

^aDepartment of Materials Engineering, Chungnam National University, Yuseong,
Daejeon 305-533, South Korea

^bNuclear Nanomaterials Development Lab, Korea Atomic Energy Research Institute,
P.O. Box 105, Yuseong, Daejeon, 305-353, South Korea

^cNuclear Materials Technology Development Team, Korea Atomic Energy Research Institute,
P.O. Box 105, Yuseong, Daejeon, 305-353, South Korea

(Received 1 February 2006 ; accepted 8 March 2006)

Abstract

In this study, the movable flame hardening process of 12Cr steel for a uniform hardness and desirable residual stress have been investigated. For this, the temperature cycles have been controlled accurately as a function of the three processing variables, the flame intensity I_f , the scanning velocity V_s and the initial flame holding time t_h , where the standard surface temperature $T_{s,max}$ was maintained at 960°C. The optimized conditions were $V_s=0.68$ mm/s and $t_h=67$ sec for the $C_3H_8:O_2=5:20$ l/min, $V_s=0.80$ mm/s and $t_h=56$ sec for the $C_3H_8:O_2=6:24$ l/min, $V_s=1.01$ mm/s and $t_h=48$ sec for the $C_3H_8:O_2=7:28$ l/min, and $V_s=1.15$ mm/s and $t_h=39$ sec for the $C_3H_8:O_2=8:32$ l/min. The optimally flame-hardened surface exhibited uniform distributions of the hardness and residual compressive stress over the treated area with moderate levels of 470~490HV_{0.2} in hardness and -300~-450 MPa in residual stress, which were acceptable on the basis of the acceptance criteria of Siemens AG-KWU and GE Power Generation Engineering.

Keywords: Flame hardening, 12Cr steel, Steam turbine blade, Residual stress, Heat treatment

1. 서 론

화염경화공정은 증기 및 가스 터빈 블레이드와 롤(roll), 축류(cam) 등 다양한 기계적 구조 부품들의 성능과 수명 향상을 위해 널리 적용되고 있다. 이는 공정 자체가 단순하고 저비용이며, 대형 또는 대 면적 부품에 적용이 용이하다는 공정상 중요한 잇점을 갖기 때문이다¹⁻³). 이러한 화염경화에 의한 표면처리는 고 에너지의 화염으로 재료 표면을 국부적으로 가열하여 설정온도에 도달시킨 후 이어서 빠른 냉각을 실시하는 것으로 공정이 이루어진다.

강의 경우에는 이러한 급랭에 의해 오스테나이트로부터 마르텐사이트 변태가 일어나면서 표면경화가 발생된다. 그러나 고온의 화염처리는 표면경화와 함께 상변태 및 온도구배에 기인하는 불필요한 잔류응력의 형성을 수반하게 되는데 특히 높은 인장응력이 형성될 경우 응력부식균열, 피로파괴, 취성과 파괴 등 재료 파괴 반응에 대한 민감도가 증가하게 된다^{4,5}). 따라서 화염경화 공정처리 시 내부 잔류응력의 조절은 경도 조절과 함께 공정 최적화에 매우 중요한 인자이다. 이전 연구에서 원자력 증기 터빈 동익의 재료로 사용되고 있는 12Cr 강을 이용하여 화염경화 처리 시의 열 이력에 따른 경도, 경화깊이 및 경화층의 잔류응력 특성 변화에 대해 체계적

*Corresponding author. E-mail : leeminku@kaeri.re.kr

으로 고찰하였다³⁾. 그 결과, 표면경도와 경화 깊이는 표면온도와 오스테나이트화 시간의 증가에 비례하여 선형적으로 증가하고, 경화층의 잔류응력은 표면온도와 냉각속도가 증가하면서 압축응력 상태에서 인장응력 상태로 변화되는 등, 화염처리 시의 열이력에 따라 경화 특성 및 잔류응력 특성이 민감하게 변화됨을 관찰하였다. 그러나 이전 연구는 국소영역(10 mm×10 mm)에서 고정된 화염에 의해 이루어졌기 때문에 대형 부품인 터빈 동익(길이: 1092 mm)을 최적온도로 균일하게 화염처리하기 위해서는 화염이동에 따른 열 이력 제어에 관한 연구가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 정밀한 공정제어를 통해 단순 화염이동 조건과 화염을 일정시간 동안 유지 후 이동한 경우를 비교하여 열 이력 특성을 이해하고자 하였고, 이를 통해 최적의 이동 공정조건을 결정하였다. 이를 위해 화염가스의 유속, 이동속도 및 유지시간을 공정변수로 선정하여 정밀하게 조절하였고, 열 이력의 변화가 경화 특성 및 잔류응력 특성이 미치는 영향을 조사하였다. 화염의 이동공정시 설정된 표면온도는 이전연구에서 GE의 물성기준에 의거하여 최적화된 960°C 이었다.

2. 실험방법

본 연구에 이용된 12Cr steel은 터빈 동익 재료로 11.5~12.5Cr, 0.25~0.65Mn, 0.20Mo, 0.05~0.20Nb, 0.12~0.15C, 0.025P, 0.025S, 0.50Si, 0.75Ni, bal. Fe(wt.%)의 화학조성을 가진다. 터빈 동익과 같이 큰 면적을 갖는 부품을 화염 이동공정에 의해 화염경화할 경우 승온 특성은 제작 시편의 체적과 밀접한 관련을 갖는다. 승온 특성의 시편 체적 의존성을 검토한 결과 각 유속에서 일정 면적 이하에서는 시편 면적(두께 일정)이 증가함에 따라 승온 시간이 증가함을 명확히 보여주지만 시편 면적이 약 8 cm×8 cm=64 cm²(두께: 1.5 cm) 이상이 되면서 승온 시간의 증가는 점차 완만해지거나 일정해진다는 것을 알 수 있었다. 이는 화염 조사 면적과 단위 시간당 열 주입량이 일정하므로 시편면적이 일정 면적 이하에서는 시편 면적이 증가함에 따라 열전달 속도가 감소하다가 시편면적이 일정 면적을 초과하는 경우 열전달 속도가 일정해지는 현상 때문이다. 이와 같이 시편 크기에 따라 달라지는 열전도 및 승온 거동의 이해를 바탕으로 임의의 크기를 갖는 실험 시편이나 실제 부품 크기의 재료 표면에 화염경화 처리 시 설계된 온도와 도달시간에 대한 승온 공정의 설계가 가능해진다.

따라서 본 연구에서는 실제 터빈 동익의 형태와 크기를 모사하고 위의 승온 특성이 적용되도록 하기 위해 시편을 5 cm×15 cm×1.5 cm의 bar 형태로 가공하였다. 화염원으로는 99% O₂와 96.9% 프로판(C₃H₈) + 1.0% 에탄(C₂H₆) + 1.9% 부탄(C₄H₁₀) 등이 혼합된 가스를 이용하였다. 시편과 토치사이의 거리를 일정하게 유지하기 위해 토치는 guide rail에 고정하여 이동시켰고, 시편 표면의 온도를 민감하면서도 정확하게 측정하기 위해 <0.1 mm 깊이까지 k-type 열전대(TC)를 위치시켰으며, 열전대는 clamp를 이용하여 고정시켰다. 이동 시 시편 각 지점의 온도변화를 정확하게 측정하기 위해 8개의 열전대를 10~15 mm의 간격으로 위치시켰다. 시편 표면온도 변화는 열전대를 PC의 DAQ board에 연결하여 실시간으로 측정하였다. 토치의 이동속도는 0.01 mm/s의 정밀도로 미세하게 제어하였다. 이러한 화염경화 실험 장치 및 공정도를 그림 1에 나타내었다.

또한 열 이력에 따른 경화 특성 및 잔류응력 특성을 확인하기 위해 화염경화 영역의 길이(L, 위치: W/2 지점)방향 및 폭(W, 위치: L/2 지점)방향에 대해 Vickers 경도(모델명: HVM200, AKASI) 시험 및 X-선 회절(모델명: STRESSCAN3000,

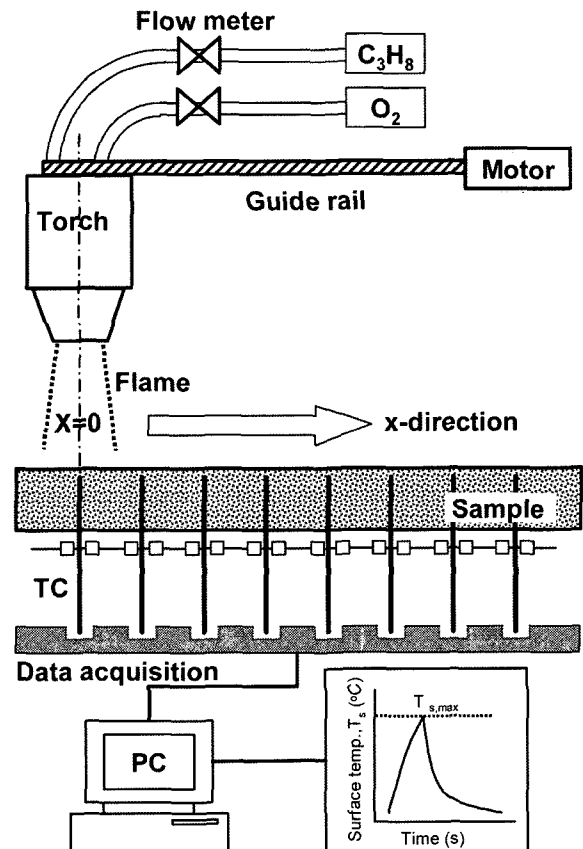


Fig. 1. Schematic diagram of movable flame hardening apparatus.

STRESSTECH)을 이용한 잔류응력 측정을 실시하였다. 측정에 이용된 결정면은 (211)이었고, Cr K α 선을 이용하여 ψ 각의 변화에 따라 각각의 d_{211} 을 측정하여 $\sin^2\psi$ 법으로 잔류응력을 계산하였다⁸⁾. 계산에 이용된 12Cr 강의 Young's modulus(E)와 poisson's ratio(ν)는 각각 217 GPa과 0.26이었다. 기계적 전 처리 및 표면 상태는 X-선 회절에 의한 잔류응력 결과에 매우 민감한 영향을 주므로 모든 시편들은 표면을 전해 연마하여 산화막 및 불순물의 영향을 최소화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 이동에 의한 공정 특성

일반적으로 화염 이동 공정에 있어서는 화염유속, 이동속도(V_s)와 화염유지시간(t_b)을 정밀하게 조절함으로써 균일한 온도제어가 가능하게 된다. 터빈 동익의 화염경화 공정 시 가장 중요하게 고려되어야 할 것은 경화 표면 전반에 걸쳐 균일하고 원하는 경도와 잔류 응력 등의 물성을 얻는 것인데 이는 화염 이동공정시 변수에 따른 열이력 특성의 이해와 공정의 정밀한 제어에 달려있다. 그림 2는 일정한 화염유속($C_3H_8:O_2=8:32$ l/min)과 $V_s(=0.71$ mm/s)에서 화염이 x 방향으로 이동함에 따라 화염 처리 영역의 각 지점들이 겪는 표면온도 T_s 변화를 나타내고 있다. 이동 속도가 일정할 때 최대표면온도 $T_{s,max}$ 는 x 방향으로의 거리가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내는데 이는 초기 지점($x=0$)에 비해 x 방향으로의 거리가 증가함에 따라 열전달에 의한 열의 누적이 심화되기 때문이며 이동시 위치별 온도특성의 전형이라고 할 수 있다. 각 지점의 열이력 곡선은 화염 이동에 의해 점차 가열되어 최

대표면온도 $T_{s,max}$ 에 도달한 후 냉각되는 특성을 나타내는데 재미있게도 화염 이동 초기지점(TC1, $x=0$ mm)의 승온 곡선과는 달리 TC3($x=20$ mm) 이상에서는 $T_{s,max}$ 에 도달하기 전에 승온속도가 변하는 변곡점을 관찰할 수 있다. 이는 본 연구에 이용된 화염(직경 30 mm)에서 산소공급이 더욱 원활한 화염외부의 온도가 내부에 비해 높기 때문인데⁹⁾, 이러한 온도구배로 인해 고온구역과 저온구역의 경계에서 승온속도의 변화가 발생되게 되는 것이다. 따라서 이러한 변곡점의 발생은 화염 이동 공정에서의 전형적인 열 이력 특성이라고 할 수 있다. 또한 $T_{s,max}$ 는 초기지점(TC1, $x=0$ mm)에 비해 마지막지점(TC8, $x=85$ mm)으로 화염이 이동할수록 점차 증가하며 이러한 $T_{s,max}$ 의 증가량은 점차 감소하여 일정한 온도로 포화되는 것을 볼 수 있다. 이는 화염 이동 초기지점과 거리가 멀어질수록 시작지점의 열 영향과 상관없이 순수하게 이동공정 자체의 열 이력만이 작용하기 때문이다. 따라서 마지막지점의 $T_{s,max}$ 를 이용하여 이전 연구에서 최적 물성을 나타내었던 설정온도에 도달할 수 있는 공정조건을 결정할 수 있다.

이러한 공정적 이해를 바탕으로 최적 V_s 를 결정하기 위해 V_s 변화에 따른 시편 각 지점에서의 $T_{s,max}$

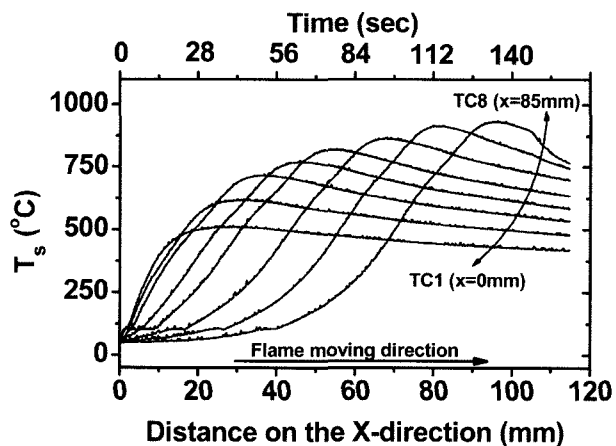
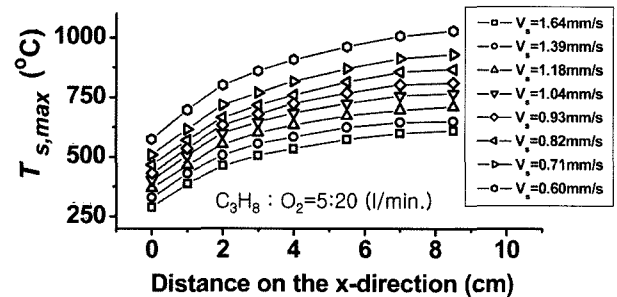
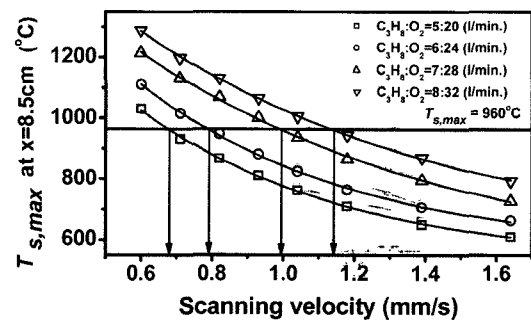


Fig. 2. Temperature profile at surface as a function of distance on the X-direction for $C_3H_8:O_2=8:32$ l/min, $V_s = 0.71$ mm/s.



(a)



(b)

Fig. 3. Variation of (a) maximum surface temperature $T_{s,max}$ as a function of scanning velocity with $C_3H_8:O_2=5:20$ l/min, (b) maximum surface temperature $T_{s,max}$ at $x=8.5$ cm for various flame intensity.

변화를 그림 3(a)에 나타내었다($C_3H_8:O_2=5:20$ l/min). 일정한 V_s 에서의 이동 공정이므로 $T_{s,max}$ 분포는 그림 2의 그것과 유사한 것을 볼 수 있다. 이동 속도와 화염원인 C_3H_8 과 O_2 의 유속이 증가함에 따라서는 열 주입량 증가로 인해 전체적으로 $T_{s,max}$ 은 증가한다. 이와 같이 적게는 $300^\circ C$ 에서 많게는 $600^\circ C$ 의 길이방향으로의 큰 온도구배와 불균일한 위치별 온도 특성은 결국 최종 물성치와 밀접한 관련이 있고 불균일한 물성을 초래할 수 있다¹⁰⁾. 이전 연구에서 보고된 $960^\circ C$ 를 설정온도로 하여 최적 이동 속도를 결정할 수 있었다. 그림 3(b)는 화염유속과 V_s 에 따른 마지막지점의 $T_{s,max}$ 변화를 나타낸 것이다. 이때 얻어진 최적의 화염이동속도는 $C_3H_8:O_2=5:20$ (l/min)일 때 약 0.68 mm/s, $C_3H_8:O_2=6:24$ (l/min)일 때 약 0.80 mm/s, $C_3H_8:O_2=7:28$ (l/min)일 때 약 1.01 mm/s, $C_3H_8:O_2=8:32$ (l/min)일 때 약 1.15 mm/s이었다. 참고로 GE의 화염경화 규정⁷⁾에 의하면 화염경화 길이가 43 cm, 공정시간이 8 min. 인데 이때의 이동속도는 약 $0.9\sim 1.0$ mm/s로서 본 연구에서 얻은 최적 이동속도 조건과 유사함을 알 수 있다.

3.2 화염 유지 및 이동에 의한 공정 특성

공정 특성상 단순 이동 공정만으로는 이동 초기 지점의 낮은 온도에 따른 큰 온도구배를 피할 수 없다. 따라서 단순 이동 공정 시 발생하는 초기지점의 낮은 온도를 보상하기 위해 초기지점에서 일정시간 화염유지를 한 후 화염 이동을 실시하였다. 그림 4(a)는 초기지점($x=0$ mm)에서 65초 동안 유지하였을 때 화염원($C_3H_8:O_2=5:20$ l/min)과의 거리에 따른 $T_{s,max}$ 분포, $V_s=0.68$ mm/s로 단순 이동한 경우의 $T_{s,max}$ 분포와 함께 화염 유지와 이동을 연속으로 실시하였을 때의 실험적인 $T_{s,max}$ 분포와 앞의 두 결과를 이용한 산술적인 계산에 의한 $T_{s,max}$ 분포를 비교하여 나타내었다. 실험적으로 확인한 연속공정의 결과는 계산 결과와 달리 매우 균일한 $T_{s,max}$ 분포를 보임을 알 수 있다. 이러한 이유는 온도 증가에 따라 열용량이 증가하기 때문인데, 65초 동안 화염을 유지한 후 이동하는 경우 초기지점은 이미 $800^\circ C$ 이상의 온도를 갖기 때문에 이후 단순 이동에 의한 열 주입량이 같더라도 상온부터 가열되는 경우에 비해 온도 증가량이 작게 된다. 그림 4(b)는 화염 유지 후 이동하였을 때 각 지점에서의 T_s 의 변화를 나타낸다($C_3H_8:O_2=5:20$ l/min, $V_s=0.68$ mm/s, $t_h=65$ sec). $T_{s,max}$ 가 균일하게 제어되었는데 화염처리 영역 각 지점에서의 열 이력은 매우 다른 것을 알 수 있다. 초기지점(TC1, $x=0$ mm)의 경우

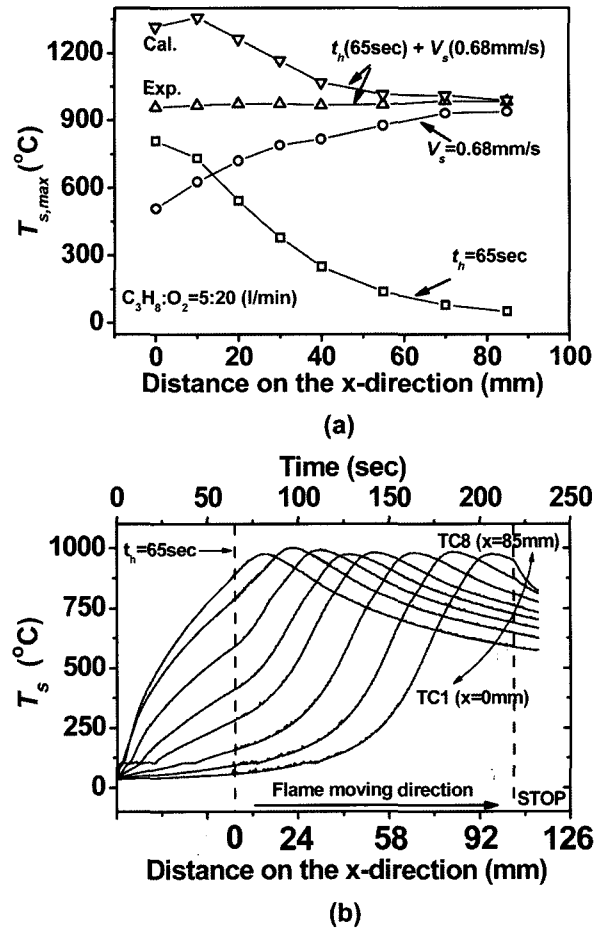


Fig. 4. (a) Comparison of maximum surface temperature $T_{s,max}$ profile to calculation and experiment for 2 step(holding+moving) process with $C_3H_8:O_2=5:20$ l/min, $V_s=0.68$ mm/s, $t_h=65$ sec, (b) temperature profile at surface as a function of distance on the X-direction with $C_3H_8:O_2=8:32$ l/min, $V_s=0.71$ mm/s.

t_h 동안 주입된 열이 승온을 주도하였으며 마지막지점(TC8, $x=85$ mm)으로 갈수록 화염 이동에 의해 전달 및 주입되는 열에 의해 승온 되었음을 알 수 있다. 그림 2에서와 마찬가지로 불균일한 화염의 온도 구배에 기인하는 변곡점을 여기서도 관찰할 수 있다.

그림 5(a)는 화염유속이 $C_3H_8:O_2=5:20$ l/min이고 그림 3에서 결정한 최적 이동속도(0.68 mm/s)에서 표면처리할 때 t_h 의 변화에 따른 x 방향으로의 $T_{s,max}$ 변화를 나타낸 것이다. 화염유지시간이 증가하면서 온도분포가 점차 일정해지다가 너무 큰 경우 오히려 초기지점에서의 온도가 마지막 지점에 비해 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 각 화염 유속에서 초기 화염유지시간(t_h)에 따라 $x=0$ 지점에서의 $T_{s,max}$ 과 ΔT , 즉 $x=8.5$ cm인 지점에서의 $T_{s,max}$ 과 $x=0$ 지점에서의 $T_{s,max}$ 의 차이를 결정하여 그림

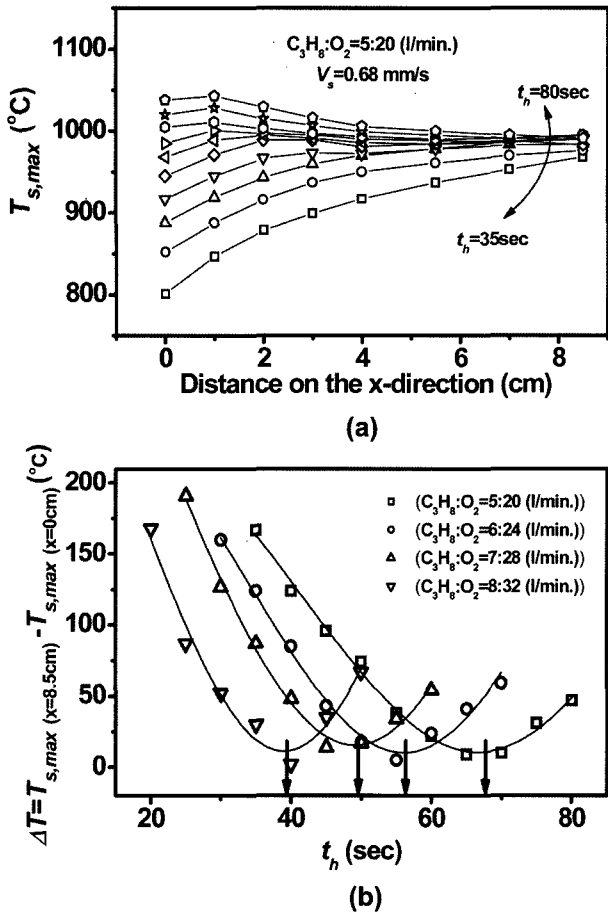


Fig. 5. Variation of (a) maximum surface temperature $T_{s,max}$ as a function of holding time with $C_3H_8:O_2=5:20$ l/min, $V_s=0.68$ mm/s, (b) $\Delta T (=T_{s,max, x=8.5\text{cm}} - T_{s,max, x=0})$ for various flame intensity.

5(b)에 그 결과를 나타내었다. $T_{s,max}$ 이 960°C로서 $\Delta T (=T_{s,max, x=8.5\text{cm}} - T_{s,max, x=0})$ 의 값이 최소가 되는 즉, 균일한 온도 분포를 나타내는 화염유지시간에 대한 최적 조건은 $C_3H_8:O_2=5:20$ 인 경우 67 sec, $C_3H_8:O_2=6:24$ 인 경우 56 sec, $C_3H_8:O_2=7:28$ 인 경우 48 sec, $C_3H_8:O_2=8:32$ 인 경우 39 sec이었다. 이 때 각 화염 유속과 최적 화염이동속도의 조건에서 최소값을 나타내는 ΔT 는 15°C 이내의 값으로서 시편 길이 방향으로 온도 분포가 매우 균일하며 온도 제어가 매우 정밀하였음을 보여준다.

이상의 결과를 이용하여 12Cr steel의 화염경화 이동공정을 위한 화염유속-화염이동속도(V_s)-화염유지시간(t_h)에 대한 공정도를 완성하였다(표 1, 그림 6). 최적의 화염 이동속도(V_s)와 화염유지시간(t_h)은 화염의 유속에 따라 변화하며, 공정시 화염유속의 변화에 따라 이동공정 조건을 선정하는 것이 바람직하다. GE에서 제작된 최종단 동익의 경우 화염경화 영역의 길이 L 이 약 43 cm이고, 총 공정시간이 약 6.5~8.7 min.인 것을 감안할 때 화염이동속도

Table 1. The optimum condition of flame hardening process.

$C_3H_8 : O_2$ (l/min)	V_s (mm/sec)	t_h (sec)
5:20	0.68	67
6:24	0.8	56
7:28	1.01	48
8:32	1.15	39

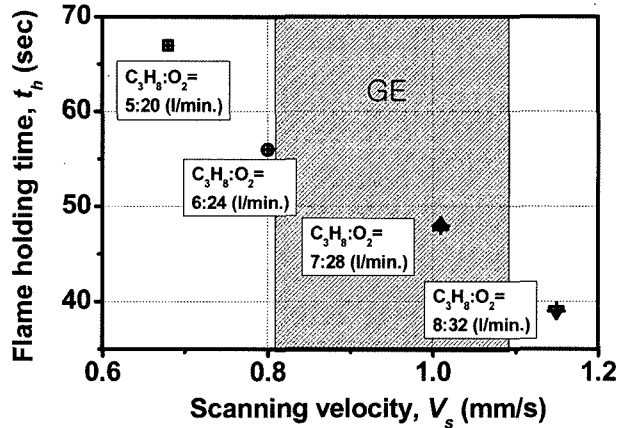


Fig. 6. Flame hardening process diagram to flame intensity-scanning velocity(V_s)-holding time(t_h) for uniform temperature of 12Cr steel.

는 약 0.82~1.10 mm/s이며 이는 본 연구에서 확립한 이동 공정 조건과 매우 유사함을 알 수 있다.

3.3 열 이력에 따른 표면경도와 잔류응력 성질

화염경화 이동 공정 후 시편의 품질을 평가하기 위해 표면경도와 잔류응력 등의 물성 시험을 하였고, 최종적으로 이들 물성치들이 GE의 규정에 부합하는지를 평가하여 바람직한 물성을 갖기 위한 이동공정 특성을 고찰하였다. 물성 측정은 GE의 시험 규정에 근거하여 W/2인 위치에서 x(길이) 방향과 z(너비) 방향으로 경도 및 잔류응력 시험을 행하였다. 그림 7은 온도 분포가 최종 물성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 화염 유속 $C_3H_8:O_2=5:20$ (l/min), $V_s=0.68$ mm/s일 때 t_h 가 35 sec, 67 sec, 130 sec로 변화되었을 때 각각의 표면온도(T_s)의 변화로부터 결정된 $T_{s,max}$ 를 x 방향으로 거리에 따라 나타내었다. $t_h=35$ sec인 경우 열 주입량이 작아서 설정 온도인 960°C에 못 미치고 있으며 x 방향으로 상당히 큰 $T_{s,max}$ 의 온도구배를 보여주고 있고, $t_h=67$ sec인 경우에는 설정온도에 정확히 도달되었으며 x 방향으로 매우 균일한 $T_{s,max}$ 분포를 나타내었다. t_h 가 130 sec로 더욱 증가한 경우 초기 지점에서 많은 열 주입으로 인해 오히려 설정온도보다 높

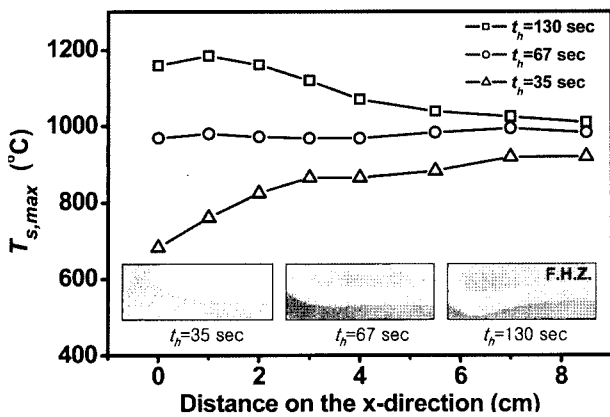


Fig. 7. Variation of maximum surface temperature $T_{s,max}$ at various holding time with $C_3H_8:O_2=5:20 //min$, $V_s=0.68 mm/s$.

은 온도를 나타내었고 역시 x 방향으로의 큰 $T_{s,max}$ 의 온도구배를 나타내었다. 이러한 온도분포의 차이는 화염경화 영역의 미세조직 변화를 통해 확인할 수 있다. $t_h=35 sec$ 인 경우, 변태온도에 못 미친 초기 지점에서는 급랭에 의한 미세조직 변화가 일어나지 않았고 x 방향으로 경화영역이 불균일한 것을 볼 수 있다. $t_h=67 sec$ 인 경우는 매우 균일한 $T_{s,max}$ 분포에서 예상할 수 있듯이 화염경화 이동 공정 후 x 방향으로 균일한 경화영역을 보여주고 있다. $t_h=130 sec$ 에서는 초기 지점의 경화 영역이 크게 확대된 것을 확인할 수 있다.

그림 8(a)는 각 시편의 x 방향으로의 표면경도 특성을 나타내었다. 이전 연구에서 표면경도는 탄소 고용량에 영향을 끼치는 오스테나이트화 시간과 선형적 관계가 있음을 보고하였다³⁾. $t_h=35 sec$ 인 경우 초기 지점에서는 열 주입량이 작아 오스테나이트화 온도 $T_{AUSTENITIZATION}$ 에 도달하지 못하였고 이로 인해 냉각에 의해 경도증가가 발생하지 않았으나, x 방향으로 거리가 증가하면서 점차 경도가 증가하여 GE에서 화염경화 시 요구하는 최소 경도 393 HV 이상이 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 전체적으로 불균일한 경도 특성과 큰 경도 구배를 나타내었다. $t_h=67 sec$ 인 경우에는 $T_{s,max}$ 온도분포가 전체적으로 균일했듯이 경도 역시 x 방향으로 경도구배가 없이 470~490 HV로 매우 일정한 값을 나타내었다. $t_h=130 sec$ 인 경우에는 초기에 약 530~550 HV로 매우 큰 경도값을 보이다가 x 방향으로 거리가 증가하면서 경도가 점차 감소하여 470 HV로 일정해짐을 볼 수 있다. 이러한 초기지점에서 큰 경도가 형성된 것은 $T_{s,max}$ 가 높아지면서 오스테나이트화 시간이 증가하여 탄소의 고용량이 증가했기 때문이며, x 방향으로 경도의 점차적 감소는 $T_{s,max}$ 감소에 의해 오스테나이트화 시간이 짧아져 탄소 고용량이

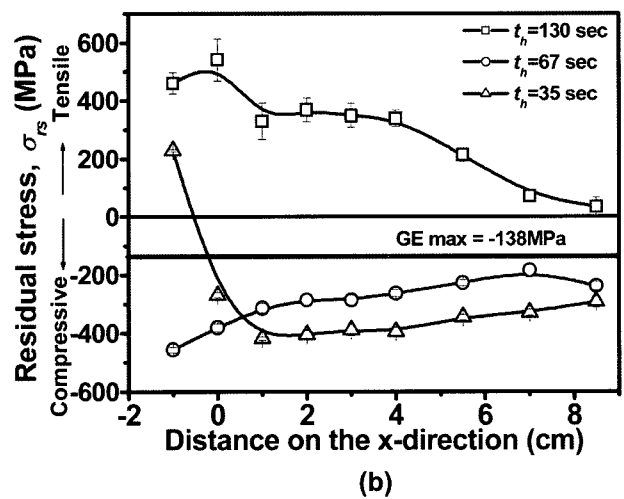
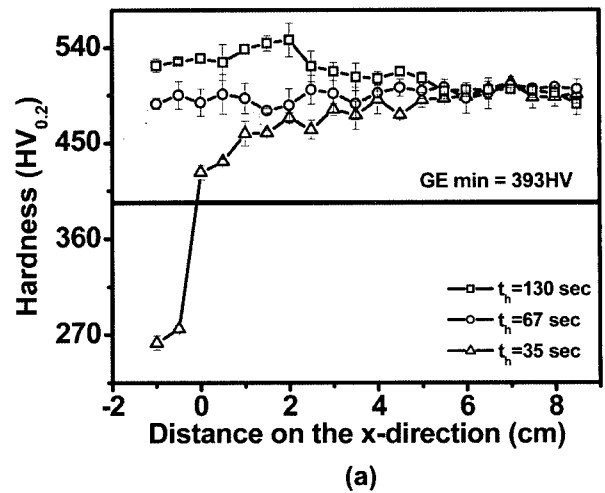


Fig. 8. Variation of (a) micro-Vickers hardness, (b) residual stress on the x-direction as a function of holding time with $C_3H_8:O_2=5:20 //min$, $V_s=0.68 mm/s$.

감소하였기 때문이다. 그림 8(b)는 각 시편의 x 방향으로의 잔류응력 특성을 보여준다. 일반적으로 경화층의 잔류응력은 마르텐사이트 변태에 따른 인장응력^{11,12)}과 열구배에 의한 압축응력^{12,13)}의 경쟁적 기여에 의해 생성된다. $t_h=35 sec$ 인 경우 초기 지점에서 약 200 MPa 이상의 인장응력이 형성된 것을 볼 수 있으며 x 방향으로의 거리가 증가하면서 점차 압축응력 상태로 이동하여 약 -380~-420 MPa의 일정한 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 경화되지 않은 초기 지점의 응력상태는 현용 상태의 인장응력을 나타내고 있으며, x 방향으로 $T_{s,max}$ 가 증가함에 따라 열응력 성분이 증가하여 압축응력 상태로의 급격한 변화를 보여준다. 인장응력에서 압축응력으로 전이되는 구간은 그림 8(a)의 경도의 급격한 증가가 발생하는 구간과 일치하며 이 구간은 그림 6의 온도분포로부터 $T_{AUSTENITIZATION}$ 이상의 마르텐사이트 변태가 발생하기 시작하는 위치임을 알 수 있

다. 초가지점에서는 상당히 큰 응력구배를 갖고 있으며 GE에서 제시한 응력 기준인 -138 MPa을 벗어나 있음을 볼 수 있다. 그러나 $t_h=67$ sec인 경우 x 방향으로 압축응력이 -300~-450 MPa의 범위 내에서 균일하게 형성되었음을 볼 수 있다. 이는 역시 균일한 표면온도와 경도의 제어에 의한 것으로서 전체적으로 GE의 화염경화층 잔류응력 검사기준을 잘 만족하고 있음을 보여준다. $t_h=130$ sec인 경우에는 전체적으로 인장응력이 발생하였음을 볼 수 있는데, 이는 x 방향으로 1250°C에서 1000°C 이상의 높은 $T_{s,max}$ 를 경험함으로써 마르텐사이트 변태에 의한 변태응력의 기여도가 매우 컸음을 의미한다. 전체적인 응력 상태는 GE의 응력 기준으로부터 많이 벗어나 있음을 관찰할 수 있으며 비록 경도 측면에서는 바람직한 물성치를 나타내었지만 응력 제어의 필요성을 시사하고 있다.

그림 9(a)는 각 조건의 $x=65$ mm 지점(L/2)에서 W 방향으로의 경도 특성을 보여주고 있다. t_h 에 관계없이 유사한 경도 분포를 보여주고 있으며, GE의 경도 기준을 잘 만족하고 있다. 약 3 cm의 경화너비(W)를 나타내었다. 그림 9(b)는 각 조건에서 화염경화 이동공정 처리된 시편에 대해 역시 동일 지점에서 측정된 W 방향의 잔류응력 분포를 보여준다. 경화된 영역에서는 압축응력을 나타내었고, 경화 경계에서 매우 급격한 응력 변화와 함께 경화되지 않은 영역에서는 인장응력으로 전이하고 있음을 보여준다. GE의 응력 기준에 비추어 볼 때 경화영

역 내에서는 바람직한 응력상태를 형성하였음을 보여준다.

4. 결 론

원자력 증기 터빈 동익 재료로 사용되고 있는 12Cr 강의 이동 화염경화 공정 최적화와 열 이력 특성에 따른 경도 및 잔류응력 특성에 대해 고찰하였다. 공정 최적화를 위해 이전 연구에서 경도와 잔류응력 특성이 가장 우수하였던 960°C를 최적 표면온도로 설정하여 균일한 이동공정 표면온도를 위한 화염유속-화염이동속도(V_s)-화염유지시간(t_h)에 대한 공정도를 완성한 결과 최적의 공정조건은 $C_3H_8:O_2=5:20$ (l/min) - 0.68 mm/s - 67 sec, $C_3H_8:O_2=6:24$ (l/min) - 0.80 mm/s - 56 sec, $C_3H_8:O_2=7:28$ (l/min) - 1.01 mm/s - 48 sec, $C_3H_8:O_2=8:32$ (l/min) - 1.15 mm/s - 39 sec이었다. 화염경화 이동공정의 열 이력 특성이 최종 물성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 화염유속 $C_3H_8:O_2=5:20$ (l/min), $V_s=0.68$ mm/s일 때 t_h 가 35 sec, 67 sec, 130 sec로 변화됨에 따라 화염경화 층의 경도 및 잔류응력 분포를 측정하였다. $t_h=35$ sec와 130sec인 경우 열 주입량이 작아 설정온도인 960°C에 못 미치거나 너무 큰 열 주입으로 인해 설정온도보다 높아져서 이동방향(x 방향)으로 상당히 큰 $T_{s,max}$ 의 구배를 나타내었다. 이들 경우에서 경도는 GE에서 화염경화 시 요구하는 최소 경도 393 HV 이상이 되었지만 x 방향으로 큰 경도 구배를 보였고, 잔류응력은 GE 응력 기준인 -138 MPa을 벗어난 인장응력이 생성되었으며 분포 또한 매우 불균일하였다. 이에 비해 $t_h=67$ sec인 경우는 설정온도에 정확히 도달하여 매우 균일한 $T_{s,max}$ 분포를 보였고 경도 역시 x 방향으로 경도구배가 없이 470~490 HV로 매우 일정한 값을 나타내었으며 잔류응력은 -300 MPa~-450 MPa의 범위 내에서 균일하게 형성되었음을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 경화층의 바람직한 물성조절을 위해 경도뿐만 아니라 잔류응력 제어의 필요성을 시사하고 있다.

후 기

본 연구는 산자부 원자력 중·장기 연구 개발 사업(MOCIE)의 원전기술 혁신분야의 재정적 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. I. R. Pashby, S. Barnes, B. G. Bryden, J. Mat.

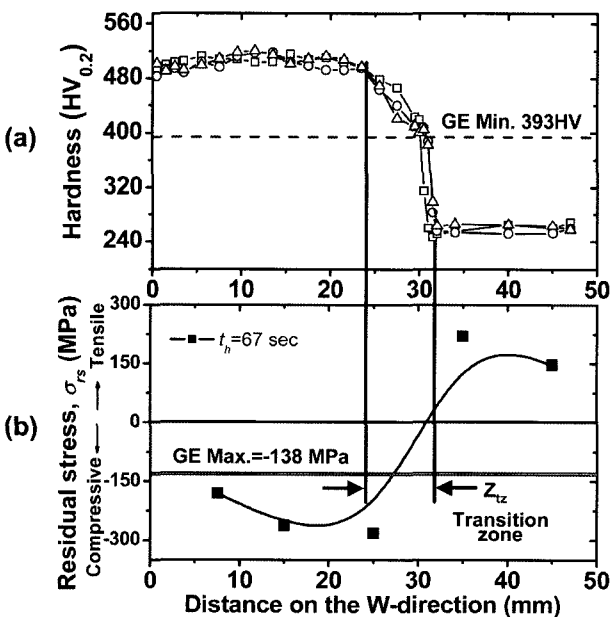


Fig. 9. Variation of (a) micro-Vickers hardness, (b) residual stress on the w-direction as a function of holding time with $C_3H_8:O_2=5:20$ (l/min.), $V_s=0.68$ mm/s. Z_{tz} : transition zone.

- Processing Tech., 139 (2003) 585.
2. S. F. Luk, T. P. Leung, W. S. Miu, I. Pashby, J. Mat. Processing Tech., 91 (1999) 245.
 3. M. K. Lee, G. H. Kim, K. H. Kim, W. W. Kim, Surf. Coat. Tech., 184 (2004) 239.
 4. K. Schleithoff, F. Schmitz, Workshop Proceedings, edited by R. I. Jaffee, Palo Alto, CA, Sep. 21-24, EPRI, Pergamon Press, (1981) 2-70.
 5. M. Heitkemper, C. Bohne, A. Pyzalla, A. Fischer, Int. J. Fatigue, 25 (2003) 101.
 6. E. Stuecker, G. Gartner, H. J. Hamel, Steam and Combustion Turbine Blading conference and Workshop, Orlando, Florida, (1992) 1.
 7. Process specification, Materials and Process Engineering, GE Power Engineering, Schenectady, NY, (1995) 14.
 8. B. D. Cullity, Elements of X-ray diffraction (Addison-Wesley, Reading, MA) 2nd ed., 447 (1978)
 9. J. M. Char, J. H. Yeh, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 56(1) (1996) 133.
 10. M. Melander, Yao Shanchang, T. Ericsson, In Proc. 3rd Int. Congress on Heat Treatment of Materials, Shanghai, PT (1984) NOV, 2.75-7.85.
 11. Bekir Sami Yilbas, Muhammad Sami, Shahzada Zaman Shuja. Optics and Lasers in Engineering, 30 (1998) 25.
 12. S. Sen, B. Aksakal, A. Ozel, Int. J. Mech. Sci. 42 (2000) 2013.
 13. Janez Grum, J. Mat. Processing Tech., 114 (2001) 212.