금형재료용 주철강의 복합열처리 특성

황현태 · 소상우 · 김종도^{†*}

(재)울산테크노파크, *한국해양대학교

Combined Heat Treatment Characteristics of Cast Iron for Mold Materials

Hyun-Tae Hwang, Sang-Woo So and Jong-Do Kim^{†*}

Ulsan Technopark, 342-1 Maegok-dong, Buk-gu, Ulsan 683-420, Korea

*Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(2011년 5월 9일 접수 : 2011년 6월 1일 최종수정 : 2011년 6월 1일 채택)

Abstract Currently, there are two main issues regarding the development of core technologies in the automotive industry: the development of environmentally friendly vehicles and securing a high level of safety in the event of an accident. As part of the efforts to address these issues, research into alternative materials and new car body manufacturing and assembly technologies is necessary, and this has been carried out mainly by the automotive industries. Large press molds for producing car body parts are made of cast iron. With the increase of automobile production and various changes of design, the press forming process of car body parts has become more difficult. In the case of large press molds, high hardness and abrasive resistance are needed. To overcome these problems, we attempted to develop a combined heat treatment process consisting of local laser heat treatment followed by plasma nitriding, and evaluated the characteristics of the proposed heat treatment method. From the results of the experiments, it has been shown that the maximum surface hardness is 864 Hv by the laser heat treatment, 953 Hv by the plasma nitriding, and 1,094 Hv by the combined heat treatment. It is anticipated that the suggested combined heat treatment can be used to evaluate the durability of press mold.

Key words HPDL (high power diode laser), laser surface treatment, cast iron, combined heat treatment, nitriding treatment.

1. 서 론

최근 국내·외 금형 업계의 동향을 살펴보면 가격파괴, 글로벌화, 정보의 고속화 등 큰 변화시기를 겪고 있다. 수요자 요구가 증가하는 것과 함께 가격경쟁이 심화되고 신제품개발경쟁이 치열해지고 있다. 이와 같은 상황에서 지금까지 금형업체는 단순 금형개선 만으로는 품질, 비용, 조속한 납기 등의 수요자의 요구에 대한 대응이 어려우며, 치열한 국내·외적 경쟁에서 생존하기 어려운 현실에 놓여있다. 이에 금형업체에서는 금형의 고도화, 차별화, 초정밀화와 납기의 단축 및 복잡형상의 가공을 통한 고부가가치의 금형 설계 제작을 지향해야 한다는 숙제를 안고 있다. 이러한 관점에서 금형산업은 금형재료의 현상을 재인식하고 최근 요구에 대응하는 금형소재의 개선과 표면처리 기술의 도입이 반드시 필요

하게 되었다. 세계 금형시장의 점유율을 높이고, 금형 생산국으로서의 확고한 자리매김을 위해서는 차별화된 고성능성 금형의 개발이 절실해짐에 따라 금형의 고도화 기술개발에 국가적인 지원책이 반드시 필요한 시점이 되었다. 또한 자동차 차체 제품은 프레스 금형을 이용하여 박판소재를 원하는 형상으로 제작하는 공정으로 최근 차체 경량화라는 세계적 목표를 달성하기 위하여 소재가 고강도강으로 대체되고 있다. 이에 따라 제품 성형 중 금형과 소재의 마찰에 의해 금형이 마모되어 금형의 내구성에 문제를 야기시킨다.

본 연구는 금형에 대한 이러한 문제점을 극복하기 위하여 마모도가 높은 부위에 국부 레이저 열처리 후 이온질화처리를 하는 복합열처리 기술을 개발하자고 한다. 국부 레이저열처리는 고출력다이오드레이저를 이용하여 강성이 필요한 부분만 열처리하면서 열처리 후 변형이 최소로 할 수 있는 열처리 특성을 규명하고,¹⁻⁵⁾ 이온질화처리를 통한 내구특성을 평가함으로써⁶⁻⁸⁾ 복합열처리 공정개발을 하고자 하였다.

[†]Corresponding author
E-Mail : jdkim@hhu.ac.kr (J. -D. Kim)

Table 1. Chemical composition of specimen.

Element (wt%)	Material	C	Si	Mn	P	S	Alloy element
FCD550		3.0~3.8	1.8~2.6	0.1~0.5	~0.04	~0.02	Mg Cu

2. 실험 방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료는 프레스를 이용하여 생산되는 자동차 부품의 사이드아웃트(side outer)를 제작하는 금형으로 자동차의 백밀러부터 트렁크 옆 차폭등까지 연결되는 부품을 제작하는 대형금형이다. 이 금형은 대형이면서 형상이 복잡하기 때문에 국부적으로 마찰 마모가 다른 부위보다 심하게 발생하므로 복합열처리를 적용하여 금형내구수명을 향상시키고자 하였다.

이와 같은 대형금형은 금형강 소재로 주철금형강을 많이 사용하고 있으며, 자동차 사이드아웃트 부품을 제작하는 금형의 경우 FCD550이라는 금형 소재를 사용하고 있고, 소재의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 레이저열처리 및 이온질화를 통한 복합열처리 공정 개발을 위한 시험편은 90 × 40 × 25 mm로 제작하였다.

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 레이저열처리 장비는 고출력 다이오드 레이저 장비로 레이저 최대출력이 4.0 kW이며, 레이저 빔은 직경이 400 μ m의 파이버(fiber)로 전송된다. 레이저 빔의 전송은 파이버를 통해 6축 로봇에 부착된 광학렌즈로 전송되고, 대형부품의 레이저열처리 적용을 위해 레일을 설치하여 넓은 범위로 빔의 전송이 가능하도록 구성하였다. 시편의 온도측정을 위하여 열처리 헤드부분에 적외선 온도센서인 2색 온도계(two color pyrometer)가 부착되어 있으며, 측정지점은 빔조사부의 중앙이며 측정온도의 범위는 350~1,300°C이다. 또한 온도제어는 고온계를 통

해 측정된 온도를 통하여 레이저출력이 자동조절 되도록 구성되어 있다.

이온질화장비는 챔버내 최대 유효플라즈마 처리공간이 7 × 3.5 × 1.5 m까지 처리가능하며, 1회 공정시 최대 제품 장입 허용하중은 40 ton까지 처리가능하도록 설계되어 있다. 또한 챔버내 온도편차는 $\pm 7^{\circ}\text{C}$ 이하로 650°C까지 온도 제어가 가능하며, 공정압력은 0.5~5 mbar으로 최대입력 전력량은 1,000 kW까지 사용가능하도록 구성되어 있다.

본 연구에서는 레이저열처리 조건으로 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도를 통하여 경화특성을 분석하고 최적 조건에서의 열처리 후 이온질화처리를 가스조성비, 처리시간 및 온도를 통하여 복합열처리 경화특성을 분석한 후 사이드아웃트 금형에 대한 복합열처리 기술을 적용하여 내구성평가를 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레이저열처리 공정변수에 따른 경화특성

본 연구에 사용된 주철 소재에 대한 경화특성을 파악하기 위해 주된 공정변수인 열처리 온도 및 레이저 빔의 이송속도를 변화시키면서 레이저 열처리를 실시하였다. 레이저 빔의 이송속도 3 mm/sec로 고정하고 열처리 온도를 950~1,200°C 사이에서 50°C 간격으로 설정하였고, 열처리 온도 1,150°C로 고정하고 레이저 빔의 이송속도 2, 3, 5, 7, 10 mm/sec로 변화시키면서 열처리를 실시하였다. 이때 빔 사이즈는 40 × 7 mm의 광학계를 이용하였다.

열처리 온도의 경우 레이저 빔이 시편 표면에 입사되어 시편의 입열량 증감으로 인해 경화 특성에 영향을 미

Fig. 1. Equipments for combined heat treatments; (a) Equipment of laser heat treatment and (b) Equipment of plasma nitriding.

Fig. 2. Variation of cast iron of hardness on hardened zone prepared by local laser heat treatment; (a) Hardened width by temperature control and (b) Hardness by speed control.

치는데 열처리 온도가 낮을 경우 입열량의 감소로 열처리 성능이 감소하여 경화폭 및 표면경도가 낮아진다. 또한 열처리 온도가 너무 높을 경우 입열량의 과다로 시편의 표면이 용융하게 된다. 표면을 용융시키지 않고 열처리하기 위해서는 입열량, 즉 열처리 온도 제어가 필수적이다. 따라서 Fig. 2(a)에서 보이는 것과 같이 측정된 온도가 증가할수록 경화폭이 선형적으로 상승하는 경향을 나타내었다. 950, 1,000°C의 경우 입열량 부족으로 열처리 경화능이 현저히 낮았으며, 1,200°C의 경우 일부 표면용융이 발생하였다. Fig. 2(b)는 레이저 빔의 이송속도에 따른 표면경도를 나타낸 것으로 열처리속도 7 mm/sec 이상에서는 표면경도가 모재와 같았다.

따라서 레이저 열처리의 주된 공정변수인 열처리 온도 1,050~1,150°C, 레이저 빔의 이송속도 2~5 mm/sec에서 열처리능이 우수한 경향을 보였다.

3.2 레이저열처리 후 경화특성 및 변형특성

레이저열처리 후 표면경화부의 평가는 한국산업규격 ‘강

Fig. 3. Hardness distribution at speed 2 mm/sec on local laser heat treatment; (a) Hardened width and (b) Hardened depth.

의 화염 경화 및 고주파 경화층 깊이 측정방법’(KS D 0027)에서 Quenching 템퍼링한 경화층의 표면에서 경도값 500 Hv를 유효 경화층의 한계 경도로 정의하고 있다. 따라서 본 연구에서 경도값을 토대로 500 Hv 이상의 경도값을 나타내는 부분을 경화부로 정의하였다.

FCD550 소재의 모재경도는 약 240~280 Hv 이다. Fig. 3은 빔 사이즈 40 × 7 mm의 광학계를 이용하여 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec에서의 열처리 온도 변화에 따른 경화분포를 보인다. 분석결과 열처리 온도 변화에 따른 경화폭의 변화에 비해 경화깊이는 크게 차이가 났다.

또한 열처리 온도 1,150°C에서의 경화깊이는 다른 열처리 온도에 비해 경화깊이가 깊게 나타났다. 이것은 열처리 온도가 증가할수록 시편의 깊이방향으로 입열량이 증가하여 오스테나이트로 변태되는 부분도 증가되며, 그 후 레이저열처리의 장점인 자기냉각효과로 인하여 마르텐사이트를 형성하는 부분이 넓어진 것으로 판단된다.

Fig. 4는 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec에서의 열처리 온도에 따른 변형량을 나타내었다. 여기서 최대 변형량은 열처리 온도 1,150°C에서 18.6 μm로 나타났다. 또한 같

Fig. 4. Distortion value of FCD550 according to local laser heat treatment temperature.

은 속도의 레이저 빔의 이송속도에서 열처리 온도에 따라 변형량의 차이가 발생하였다. 이는 열처리 온도가 높을수록 입열량이 증가하여 소재의 변형량이 증가하는 것으로 판단된다.

레이저열처리 경화특성을 통하여 복합열처리시 제 1공정 레이저열처리의 조건은 열처리 온도 1,150°C, 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec로 실시한 후 제 2공정 이온질화처리를 하는 것으로 진행하였다.

3.3 가스조성에 따른 복합열처리 특성

질화처리는 재질 및 사용용도에 따라 처리조건을 달리 하여야 하며, 특히 질화층의 생성을 제어하는 인자중 가스조성비율이 큰 영향을 미친다. 질화조건 중 가스조성을 잘 못 선정하면 갈매기상과 같은 거대한 석출물이 생성되며, 이는 표면박리 및 균열의 원인이 되기도 한다.

본 실험에서는 레이저열처리후 이온질화처리온도 520°C, 이온질화처리 시간 10시간, 방전압력을 250 Pa로 일정하게 하고 이온질화공정변수 중 가스혼합비(N_2/H_2)를 2/8, 5/

5, 8/2로 변화시켰을 때 화합물층 두께와 경화특성을 Fig. 5에 나타낸다. 가스혼합비에서 질소농도가 일정한 수준으로 증가함에 따라 화합물층이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 가스중에 존재하는 질소가 많으므로 표면부에서 철 및 질화물 형성원소들과 질화물 형성이 용이하여 질화물이 집적되기 때문이다. 경도분포 또한 질소 농도가 증가함에 따라 높아지는 것을 알 수 있으며, 이와 같이 표면경도가 증가하는 원인으로서는 질소의 양이 증가할수록 화합물층의 두께가 증가하였다.

3.4 질화온도에 따른 복합열처리 특성

질화온도에 따른 복합열처리 특성은 레이저열처리 후 이온질화처리 시간 10시간, 방전압력을 250 Pa, 가스혼합비(N_2/H_2)를 8/2로 일정하게 하고 이온질화공정변수 중 질화온도를 420°C, 470°C, 520°C로 변화시켜 복합열처리한 화합물층 두께와 경도를 Fig. 6에 나타낸다. 화합물층 두께의 경우 질화처리 온도 420°C에서는 형성하지 않았고, 이는 질화처리 온도가 너무 낮아 시험편 표면에서 질소이온의 활동이 둔화하여 질소이온이 표면에 흡착되지 않은 것으로 보인다. 한편 이온질화처리 온도 470°C와 520°C에서는 화합물층 두께가 각각 5.7 μm , 9.6 μm 로 나타났다. 질화처리 온도 변화에 따른 경화특성은 질화처리 온도 420°C, 470°C, 520°C에서 표면 최고 경도는 각각 600 Hv, 978 Hv, 1,028 Hv로 관찰되었다. 또한 질화층 깊이도 이온질화처리 온도가 증가 할수록 증가하는 것으로 관찰되었으며, 이온질화처리 온도 증가로 측정된 경도 분포 전 영역에서 높은 경도 분포를 나타내었다.

3.5 질화시간에 따른 복합열처리 특성

복합열처리에서 질화시간에 따른 특성을 파악하기 위해 레이저열처리 후 이온질화처리조건으로 질화처리온도 520°C, 방전압력을 250 Pa, 가스혼합비(N_2/H_2)를 8/2로 일정하게 하고 이온질화공정변수 중 질화시간 10 hr, 15 hr,

Fig. 5. Characteristics of combined heat treatment by gas ratio; (a) Thickness of compound layer and (b) Hardening characteristics.

Fig. 6. Characteristics of combined heat treated by temperature on nitrification; (a) Thickness of compound layer and (b) Hardening characteristics.

Fig. 7. Characteristics of combined heat treated by time on nitrification; (a) Thickness of compound layer and (b) Hardening characteristics.

Fig. 8. Progress for combined heat treatment; (a) Photo of laser heat treatment and (b) Photo of tools in nitriding chamber.

20 hr로 복합열처리 특성을 Fig. 7에 나타내었다. 질화시간에 따른 화합물층의 두께는 질화시간이 증가할수록 화합물층의 두께가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 질화처리 시간 10 hr, 15 hr, 20 hr에서의 표면 최고 경도는 각각 958 Hv, 967 Hv, 975 Hv로 나타났다. 이에 질화시간에 따른 표면 최고 경도는 크게 차이가 없음을 관찰하였다. 그러나 질화시간이 길어질수록 경화 깊이 방향으로 경도값이 증가하고 있음을 관찰하였다. 이것은 질화시간의 증가

로 화합물층의 두께와 질화층 깊이가 깊어지고 있는 것으로 판단된다.

3.6 복합열처리 후 경화특성 및 내구 특성

레이저 열처리 적용 금형으로는 자동차 측면 형상의 부품으로 사이트 아웃트 금형에 적용하였다. 적용 금형 요소로는 다이(die), 블랭크 홀드(blank hold), 패드(pad)에 적용하였다. 금형 소재는 FCD550, 레이저 빔 사이즈는 $40 \times$

Fig. 9. Hardness of various heat treatments according to case depth.

Table 2. Comparison of analysis and experimentation.

Material	Surface treatment method	Production amount (EA)	Number of reprocessing
Side outer (Right tools)	Plasma nitriding	250,000	-
Side outer (Left tools)	chromium plating	250,000	4

7 mm, 레이저 열처리 조건으로는 열처리 온도 1,150°C, 레이저 빔의 이송속도 2 mm/sec 로 하였다.

실제 금형에 대한 레이저열처리의 경우 시험편과 달리 3차원 곡면으로 이루어져 있어 3D 로봇 시뮬레이션을 통하여 3D 곡면 금형에 수직으로 6축 다관절 로봇을 Fig. 8과 같이 제어하였다. 레이저열처리 후 이온질화처리 조건은 온도 520°C, 방전압력 250 Pa, 전압 600 V, 가스 혼합비(N_2/H_2)를 8/2하여 질화시간 20 hr으로 하였다. 이온질화처리는 챔버내 진공 및 승온에 약 12 hr, 질화처리 시간 약 20 hr간, 냉각 10 hr으로 전체 이온질화처리 챔버내에서는 42 hr이 소요되었다. 경화특성은 레이저열처리한 시편, 이온질화처리한 시편, 복합열처리한 시편 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 샘플은 레이저열처리(laser hardening, LH), 이온질화처리(plasma-nitriding, PN), 복합표면처리(LH + PN)로 구분하였다. 레이저열처리, 이온질화처리, 복합표면처리의 경화특성을 각각 746 Hv, 903 Hv, 975 Hv로 나타났다. 또한 열처리 후 경화 깊이는 레이저열처리, 이온질화처리, 복합열처리 순으로 크게 나타났다. 복합표면처리 샘플은 레이저 열처리보다 표면경도가 높아 표면내 마모 상태가 우수하며, 경화깊이가 이온질화처리에 비해 깊기 때문에 금형 내마모 향상에 효과적으로 대응할 수 있다. 평가결과는 Table 2에 정리하여 나타낸다. 자동차용 차체부품(사이드 아웃 부품)금형을 평가하기 위해 오른쪽 금형은 복합표면처리를 적용하였고, 왼쪽의 금형은 기존 방법인 크롬도금을 이용하여 표면처리 하였다. 금형

의 내구성평가는 기존의 금형과 복합표면처리 적용 금형을 이용하여 같은 횟수의 부품을 제작하여 금형의 재처리 횟수로 평가하였다. 금형의 재처리는 프레스를 이용하여 자동차 차체부품을 만들면서 부품의 외면에 불량이나올시 금형의 마모 상태로 인한 불량이라고 판단되면 재처리를 하게 된다.

따라서 평가는 제품 25만개를 제작함에 있어 금형의 재처리 횟수를 비교한 것으로 기존의 크롬도금의 경우 4회를 재처리 하였다. 그러나 복합열처리는 재처리를 하지 않고 제품 25만개의 제작에도 금형 마모에 의한 제품 불량이 발생하지 않았으며, 현재에도 금형의 내구성평가가 진행 중에 있다.

4. 결 론

본 연구는 FCD550 소재를 이용하여 프레스 금형의 레이저 열처리와 이온질화처리를 순차적으로 실시하는 복합열처리 공정에 대하여 적용성 평가를 하였다. 레이저 열처리 조건은 1150°C, 2 mm/sec, 이온질화처리 조건은 방전 발생압력, 이온질화처리 온도 및 시간, 가스조성과 펄스 유지시간에 따라서 조건을 설정하고 실제 프레스 금형에 적용 후 복합열처리의 적용 타당성을 검토한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1) 레이저열처리지 지배적인 공정변수인 열처리 온도와 레이저 빔의 이송속도의 변화에 따른 열처리 공정개발시 열처리 온도가 증가할수록, 그리고 레이저 빔의 이송속도가 낮을수록 입열량의 증가로 인해 경화정도가 증가하였다. FCD550 소재는 열처리지 열처리 온도 1200°C에서 부분용융이 발생하였고, 열처리 온도 1050°C 미만에서는 경화특성이 떨어졌다. 레이저 빔의 이송속도의 경우 5 mm/sec 이상에서 표면경화특성이 떨어졌다.

2) 가스조성에 따른 레이저열처리 후 이온질화처리에 의한 복합열처리 특성은 가스혼합비(N_2/H_2)를 2/8, 5/5, 8/2로 변화시켜 화합물층 두께 및 경화특성을 분석한 결과 질소농도의 증가에 따라 화합물층이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 질소가 증가할수록 소재 표면에서 철과 질소의 반응이 용이하여 화합물층이 증가하는 것으로 판단된다. 경화분포 또한 가스혼합비 8/2에서 다른 가스혼합비에 비해 우수한 특성을 보였다.

3) 복합열처리지 이온질화처리 온도 420, 470, 520°C에서의 표면최고 경도는 각각 600, 978, 1028 Hv로 관찰되었고, 질화층 깊이도 이온질화처리 온도가 증가 할수록 높아지는 것을 확인하였다. 복합열처리 후 이온질화처리 온도 520°C에서 경도분포가 다른 온도에서보다 높은 것으로 나타났다.

4) 복합열처리에서 이온질화시간 10, 15, 20 hr 일때 표

면경도는 큰 차이가 없었으나, 이온질화시간이 길어질수록 화합물층이 두꺼워졌다.

5) 실재 금형에 대한 복합열처리 후 내구실험은 프레스를 이용하여 제품을 생산하면서 제품의 불량률 통하여 금형내구 수명을 평가하였다. 레이저 열처리의 경우 마모가 심한 곳에 국부적으로 열처리 후 금형 전체를 이온질화처리 하였다. 금형의 내구수명 평가는 12개월에 걸쳐 진행되었으며, 기존의 표면처리(크롬도금) 대비 약 4배 이상의 내구수명을 갖는 것으로 평가 되었으며, 현재에도 평가가 진행 중에 있다.

참 고 문 헌

1. H. T. Hwang, J. D. Kim, H. S. Song, M. K. Song and Y. K. Kim, Kor. J. Mater. Res., **19**(9) 457 (2009) (in Korean).
2. J. D. Kim, H. T. Hwang, S. W. So, Y. K. Kim and B. H. Kim, J. Kor. Soc. Heat Treatment, **22**(6), 339 (2009).
3. H. Pantsar and V. Kujanpää, Surf. Coating. Tech., **200**, 2627 (2006).
4. I. R. Pashby, S. Barnes and B. G. Bryden, J. Mater. Process. Tech., **139**, 585 (2003).
5. P. Dumitrescu, P. Koshy, J. Stenekes and M. A. Elbestawi, Int. J. Mach. Tool. Manufact., **46**, 2009 (2006).
6. S. C. Kim, S. G. Woo and D. M. Kan. J. Soc. Naval Architects of Korea, **27**(2), 47 (1990) (in Korean).
7. K. S. Cho and C. O. Lee, Wear, **64**, 303 (1980).
8. B. O. Lee. Master Thesis, p. 11-19, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea (1983).