

〈기술자료〉

## 유도 표면 경화의 야금학적 고찰\*

장 우 양

조선대학교 공과대학 금속·재료공학부

### The Metallurgy of Induction Surface Hardening

W. Y. Jang

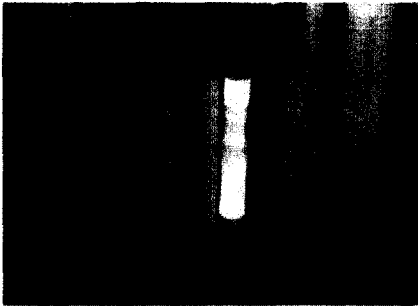
Division of Metall. and Mater. Engr. Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

급속 가열, 짧은 오스테나이트화 시간 및 자기 쿨링 등과 같은 특징을 갖는 유도 경화(그림 1)에서 나타나는 미세조직은 기존의 전기로 경화법에서 나타나는 미세조직과는 다르다. 그러나 열처리에 개재된 물리야금학적 원리는 동일하다. 이 글에서는 특히 유도경화와 기존의 전기로 경화법을 비교하여 오스테나이트화 이후 냉각공정에 관해서 설명하고자 한다.

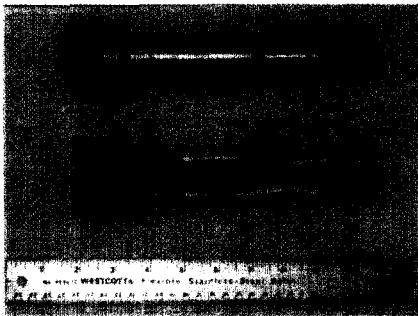
#### 오스테나이트화 열처리

경화의 전 단계는 부품을 오스테나이트화하는 것이다. 전통적 열처리에 있어서, 오스테나이트화는 강을 오스테나이트( $\gamma$ )상 영역(그림 2)의 원하는 오스테나이트화 온도까지 가열하여 화학적으로 균일한 단상 오스테나이트를 얻기 위해 충분한 시간을 유지하는 공정을 포함한다. 오스테나이트는 핵 생성 및 성장과정에 의해 생성되며 그 생성속도는 초기의 미세조직(예를 들면 펄라이트 또는 베이나이트)에 의존한다.

오스테나이트의 생성과정은 항온변태에 의해 조사할 수 있다. 그러나 연속 가열이 실제 열처리 조업을 잘 묘사할 수 있기 때문에 연속가열에 의해 오스테나이트의 생성과정을 조사하는 것이 더 유리하다. 강을 연속 가열할 때 오스테나이트 생성에 대한 시간-온도-변태(TTT)곡선을 그림 3에 나타낸다. 그림 3은 900°C의 대기로에 장입한 부품의 대표적인 가열곡선을 포함하고 있다(C; 기존 가열방식). 이러한 기존 가열방식에서는 균일한 오스테나이트는 약 1시간 후에 얻어진다. 또한 그림 3에는 유도가열과 같이 고입열(high-heat-input)법을 이용하여 급속 가열한 부품의 가열곡선(R)도 포함하고 있다. 유도가열에서는 균일한 오스테나이트를 얻기 위해서는 더 높은 온도가 요구된다. 만약 최대 오스테나이트화 온도를 더 낮게 한다면 이 때 얻어지는 미세조직은 화학조성이 불균일하거나 미용해 탄화물을 포함할 수도 있다. 이러한 미세조직은 경화능을 감소시키고 미세조직이 균일한 오스테나이트보다 마르텐사이트를 생성하기 위해서는 더 빠른 냉각이 필요하다.



(a)



(b)

그림 1. 샤프트 표면경화의 (a) 실 예 및 (b) 샤프트 단면.

\*이 글은 미국금속학회에서 발간된 Heat Treating Progress(Dec. 2000, pp.19-23)에 게재된 내용을 번역한 것임.

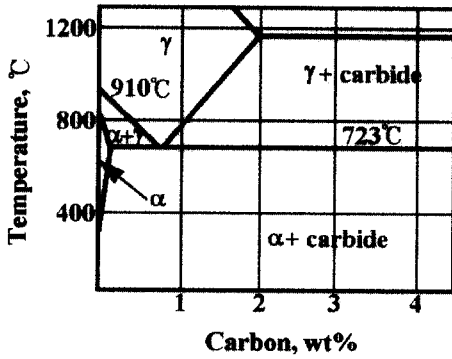


그림 2. Fe-C 상태도의 일부.

경화방법의 비교

전통적인 경화법과 고입열(high heat-input) 표면경화법을 그림 4에 비교하였다.

전통적인 방법(a)에서, 부품은 전기로 내에서 오스테나이트화 온도까지 가열하여 오스테나이트 생성을 확실하기 위해 충분히 오랜 시간동안 유지한 후(예를 들면, 1시간) 원하는 경도분포를 얻기 위해 물 또는 기름과 같은 냉매에 쿨칭시킨다. 이러한 열처리 후에는 흔히 공석온도 아래로 가열하여 템퍼링을 하며 마르텐사이트는 인성을 개선하는 템퍼드 마르텐사이트라 불리우는 페라이트와 미세한 탄화물들의 혼합물로 바뀌게 된다.

반대로, 유도표면경화는 그림 4(b)와 같이 오스테나이트 구역까지 급속 가열 및 급속 냉각하는 공정을 포함한다. 높은 열 흐름은 부품의 내부가 아닌 표면만을 오스테나이트화 하는데 충분한 시간동안 부품 표면에 적

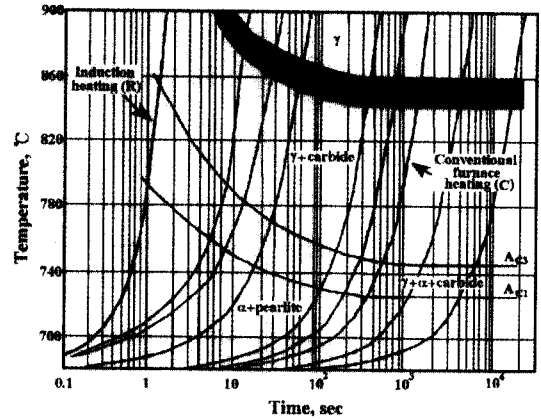


그림 3. 오스테나이트의 생성을 나타내는 대표적 TTT곡선; 기존의 전기로 가열곡선(C) 및 급속 유도가열 곡선(R).

용된다. 부품 표면이 원하는 시간에 적절한 오스테나이트화 온도에 이르렀을 때 열원은 제거되고 이 때 가열된 부품 표면은 온도가 더 낮은 내부로의 열전도와 표면으로부터의 물 분사 등에 의한 강제 냉각에 의해 냉각된다. 만약 가열된 표면층이 부품의 나머지 부분에 비해 작으면 표면의 냉각속도는 가열되지 않은 내부로의 열전도에 의해 매우 빠르게 된다.

미세조직의 영향

유도가열시의 가열 및 냉각 과정을 그림 6에 도식적으로 나타낸다. 유도가열에서는 냉각 시간뿐만 아니라 가열 시간도 짧아진다. 부품 표면은 오스테나이트 구역

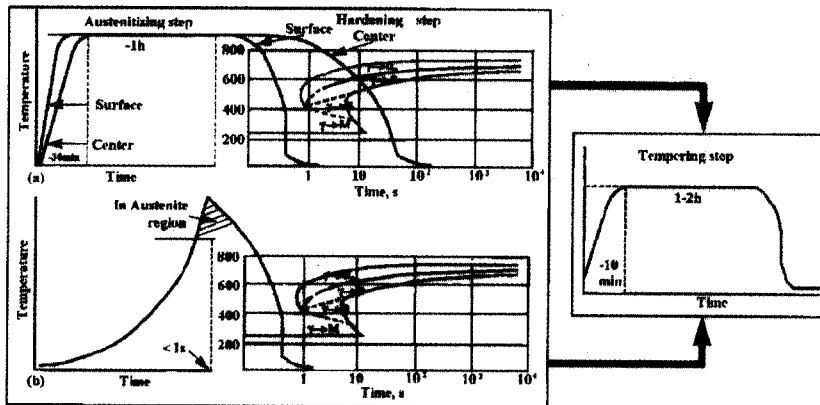


그림 4. 강의 기존의 전기로 경화법 및 급속 가열법의 비교;  $\gamma$ (오스테나이트),  $\alpha$ (초석 페라이트), P(펄라이트), B(베이나이트), M(마르텐사이트). 템퍼링은 양 방법에서 동일.

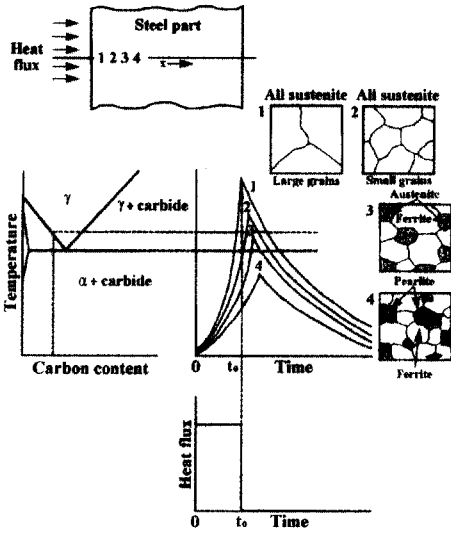


그림 5. 0.4% C 강도의 유도 표면 경화법에서 깊이에 따른 온도 시간 곡선. 개략적인 미세조직은 오스테나이트 생성을 나타낸다. 오스테나이트 생성 후 표면에서의 오스테나이트 결정립은 성장한다.  $\gamma$ (오스테나이트),  $\alpha$ (페라이트).

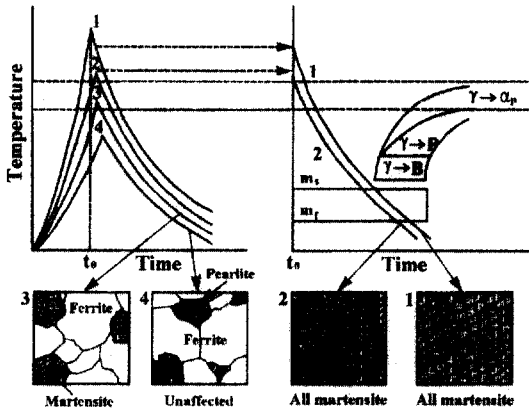


그림 6. 표면 가열된 0.4% C 강에서 냉각에 따른 오스테나이트의 변태. 번호 1~4는 강 부품의 깊이를 나타냄(그림 5참조). 마르텐사이트는 대개 표면에서 생성된다.

에서 더 높은 온도로 오랜 시간 유지되기 때문에 부품 표면에서 오스테나이트가 생성된 후에 오스테나이트 결정립들은 성장한다. 또한 오스테나이트 영역까지 가열된 표면 내부는 오스테나이트 결정립이 더 작아질 수 있다(그림 5에서 곡선 2). 따라서, 표면 내부에서는 오스테나이트와 초기 미세조직(예를 들면, 오스테나이트 및 초석페라이트)이 얻어진다. 그림 6에 개략적으로 나타낸 바와 같이 표면에서의 냉각은 보통 몇 초 이내로 매우

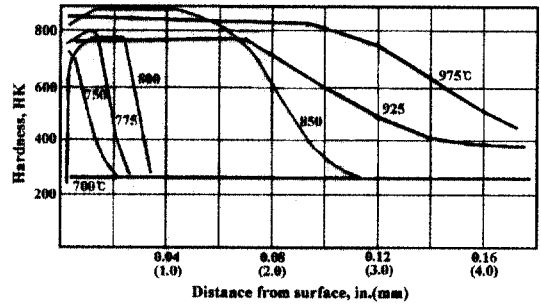


그림 7. 각각의 최대 표면온도에서 유도 가열된 0.8% 강도의 경도 분포. 강의 초기 미세조직은 모두 펄라이트.

빠르기 때문에 일반적으로 마르텐사이트가 생성된다. 그러나 표면 내부로 접근함에 따라 고온에서 부분적으로 오스테나이트가 존재하는 구역이 존재하며 냉각 중 마르텐사이트와 미변태된 조직의 혼합상을 생성한다.

### 경도값

깊이에 따른 경도변화는 열처리 부품의 미세조직에 영향을 받으며 열처리 효과를 확인하기 위한 유용한 방법이 될 수 있다. 그림 7은 초기 미세조직이 모두 펄라이트인 0.8% C 강을 유도가열한 후의 경도분포를 보여준다. 그림 7에 나타난 곡선들은 강의 표면에서의 최대 온도를 나타낸다.

700°C의 가열에서는 이 온도가 공석온도(723°C) 이하이기 때문에 경도변화는 없다. 즉 결과적으로 오스테나이트는 형성되지 않는다. 0.8% C 강을 800°C로 가열하면 표면에 모두 오스테나이트가 생성되며 오스테나이트는 냉각 중에 거의 모두 780HK(~63HRC) 정도의 경도를 갖는 마르텐사이트로 변태한다. 이보다 더 높은 최대 표면온도에서의 경도는 약 850HK(65HRC)로 약간 증가한다. 또한 더 높은 표면온도로 가열하면 더 깊은 곳까지 오스테나이트, 즉 냉각에 의한 마르텐사이트를 생성한다.

### 유용한 조미니 시험 자료

오스테나이트 변태에 미치는 급속 가열의 영향을 조사하는 전통적인 방법은 조미니 바의 표면을 가열하는 것이다. 조미니 바의 유도코일 안에 놓고 지정된 시간동안 가열한 후, 물을 분무하여 끝단을 퀘칭한다. 다음에 조미니 바를 길이방향으로 잘게 연마하여 경도를 측정

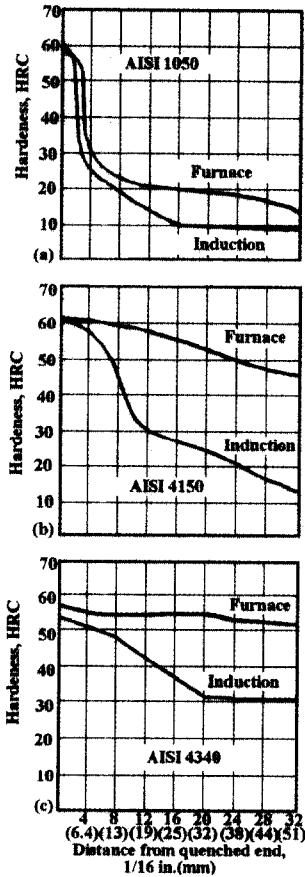


그림 8. 기존의 전기로 경화 및 급속 유도경화에 따른 (a) AISI 1050, (b) 4150 및 (c) 4340강의 조미니 시험결과.

한후 경도값들을 급냉된 선단으로부터 거리에 따라 풀롯한다. 조미니 바의 연마 깊이는 매우 얇기 때문에 측정된 경도는 본질적으로 유도가열된 표면의 경도를 나타낸다. 기존의 전기로 가열 및 유도가열에 대한 세 가지 강-AISI 1050, 4150 및 4340-들의 기존 전기로 경화 및 유도경화법에 대한 조미니 시험 결과를 그림 8에 나타냈다.

그림 8(a)는 표면온도가 870°C에 도달하도록 20초 동안 유도 가열한 후 선단 퀴칭한 AISI 1050 탄소강의 조미니 곡선을 나타낸다. 이에 대응되는 전통적 경화법은 대기로를 이용하여 800°C에서 1시간 가열 후 퀴칭하는 것으로서 그림 8(a)에서 조미니 곡선의 모양은 퀴칭된 선단 근처에서만 100% 마르텐사이트 구조가 나타나는 저경화능 강들의 곡선과 유사하다.

그림 8(b) 및 (c)의 두 가지 저합금 강들에 대한 조

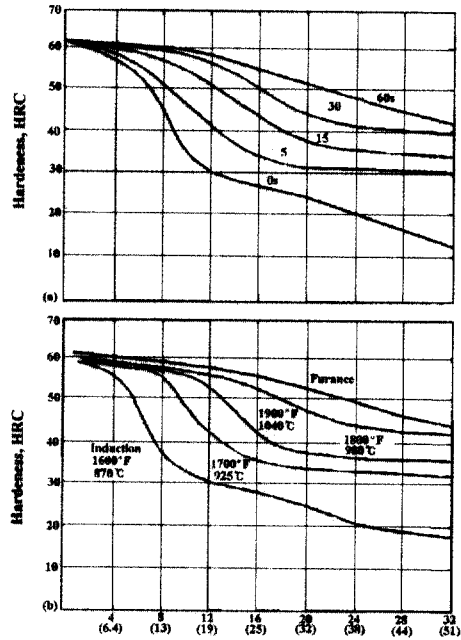


그림 9. 유도 경화된 AISI 4150강의 조미니 곡선에 미치는 (a) 870°C 오스테나이트화 온도에서의 시간(a) 및 최대 표면온도의 영향. (b) 기존의 전기로 가열에 의한 4150강의 곡선

미니 곡선들은 합금 원소의 첨가가 어떻게 경화능을 개선하는 지 또는 가열방법에 따라 조미니 곡선들이 어떻게 변하는 지를 보여준다. 유도가열한 강들의 조미니 곡선은 기존 전기로 가열한 강들의 조미니 곡선에 비해 현저하게 낮으며 이것은 급속 가열이 전반적으로 경화능을 감소시킨다는 사실을 나타낸다. 이와 같이 유도 가열한 강들의 낮은 경화능은 급속 가열된 강들의 미세 조직에서 나타나는 미용해 탄화물들과 미세한 오스테나이트 결정립과 관계가 있다. 그러나 퀴칭 선단에서의 경도는 기존의 전기로 가열법에 의한 것과 같음에 유의하여야 한다. 비록 이 구역이 오스테나이트화 온도에서 오스테나이트와 미용해 탄화물로 이루어져 있더라도 퀴칭 선단에서의 매우 빠른 냉각으로 인해 여전히 미세한 미용해 탄화물을 포함한 고경도의 마르텐사이트를 생성한다.

기타의 예

AISI 4150강의 조미니 곡선에 있어서 유도가열 시간 및 최고 표면온도의 영향들을 그림 9에 나타냈다. 이러한 두 인자들 중 하나가 증가하면 균일한 오스테나이트

와 더 큰 결정립을 갖는 오스테나이트가 생성하며 이에 따라 경화능은 증가되고 조미니 곡선은 상승한다. 그러나 본질적으로 퀴칭 선단에서의 경도는 비록 강들의 경화능이 더 낮아지더라도 같게 되는 것에 주목할 필요가 있다. 바의 선단에서, 급냉에 의해 약간의 미용해 탄화물을 갖는 마르텐사이트가 생성되며 이에 따라 높은 경도를 갖게 된다.

이러한 사실은 왜 급속 가열 및 급속 냉각에 의해 높은 표면경도가 얻어지는가를 설명한다. 유도경화에서는 급속 가열에 의해 표면 구역에 오스테나이트가 생성되더라도 부품 내부는 거의 상온에 머무르게 된다. 따라서, 열원이 제거되면 뜨거운 표면은 차가운 중심부로의 열전도에 의해 순식간에 냉각된다. 이것은 무한에 가까운 가혹한 냉각조건에 대등하며 조미니 선단 퀴칭 시험시 사용된 고속의 물 분사와 유사하다. 표면에서의 경화능은 낮으나 냉각 속도는 아주 경한 미세조직을 생성하기에 충분히 높다.

## 요 약

급속 표면가열과 기존의 전기로 열처리에서 얻어지는 경화의 가장 중요한 차이점은 전자가 불균질한 오스테나이트를 생성할 수도 있다는 것이다. 즉, 오스테나이트에 미용해 탄화물이 존재할 수도 있고 탄소와 합금원소의 농도 구배가 존재할 수도 있다. 합금강에서, 이러한

탄화물은 합금성분이 비교적 높기 때문에 철 탄화물에 비해서는 좀 더 천천히 기지에 용해된다. 또한 망간, 크롬, 니켈 및 몰리브덴과 같은 치환형 합금원소는 천천히 확산한다. 따라서, 균일한 오스테나이트를 생성하기 위해서는 더 많은 시간과 더 높은 온도가 요구된다. 그러나 표면 구역의 낮은 경화능에도 불구하고 냉각속도가 마르텐사이트의 체적분율이 큰 미세조직을 확보할 만큼 충분히 크기 때문에 경도는 높게 된다.

## 참고문헌

1. Metals Handbook, 8th Ed., Vol. 8, Metallography, Structures and Phase Diagrams: American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1973.
2. Steel and Its Heat Treatment, 2nd Ed., by K.-E. Thelning: Butterworths, London, U.K., 1975.
3. Principles of the Surface Treatment of Steels, by C.R. Brooks: Technomic Publishing Co., Lancaster, Pa., 1992.
4. "Induction Hardening and Austenitizing Characteristics of Several Medium Carbon Steels," by D.L. Martin and W.G. Van Note: Transactions American Society for Metals, Vol. 36, 1946, p. 210.
5. "The Effect of Alloying Elements on the Transformation Characteristics of Induction-Heated Steels," by Joseph F. Libsch, Wen-Pin Chuang, and William J. Murphy: Transactions American Society for Metals, Vol. 42, 1950, p. 121.