

강재의 유도가열 템퍼링

정 인상
경북대학교 공과대학

Induction Tempering of Steel*

K. Weiss, V. Rudnev, R. Cook and M. Black
Inductoheat Inc. Madison Heights, Mich. USA

1. 글머리

템퍼링은 퀴칭상태의 경도를 크게 떨어뜨리지 않고 경화된 강재 부품의 인성과 연성을 증대시키고, 내부응력을 줄이기 위해 실시한다. 경우에 따라서는 형상의 안정성과 균질성을 개선시키는 목적도 있다. 고온 강재의 퀴칭은 아주 단단하고 취성이 강한 마르텐사이트 상으로 변태를 일으킨다. 이러한 상태의 마르텐사이트는 너무 취성이 강하므로 공업적으로는 사용될 수 없다. 이 상태는 내부 잔류 응력이 대단히 큰 것으로 특징지을 수 있다. 퀴칭 후에 템퍼링을 하기 위해 재가열하면 이러한 응력이 줄거나 제거되면서 "tempered martensite"라는 조직으로 바뀐다. 템퍼링 온도는 항상 변태온도(변태온도구간 중 낮은 쪽, A_1)보다 낮다.

유도 경화 부품의 전형적인 템퍼링 방법은, 공장 내 다른 장소에 설치된 box형 노에서(gas나 전기로)가열하는 것이다. 이 방법은 설비가 공간을 크게 차지하고, 노동력이 필요하며, 부품을 옮기는데 시간까지 더 필요한 단점이 있다. 또한 작업시간이 적어도 2~3시간 이상 걸린다. 단시간 유도가열 템퍼링법은 이러한 단점을 극복하기 위해 개발되었다. 그림 1은 이 방법에 이용 가능한 부품들이다.

2. 유도가열 템퍼링의 기초

유도가열 템퍼링에서 시간과 온도는 가장 중요한 두 개의 결정적인 인자이다. 그러나 통상적인 노가열 템퍼링에서 사용되는 온도보다 고온이어야 비슷한 효과를 얻을 수 있다. 종래의 장시간-저온 노가열 템퍼링과 단시간-고온 유도가열 템퍼링간의 시간/온도 상관 관계를 결정하는데는 여러 방법이 있다. 예를 들어 Hollomon-Jaffe식과 Grange-Baughman의 템퍼링 상호관계식이 있다.

유도가열 템퍼링 온도는 보통 120-600°C 범위이다. 탄소강인 경우 100°C 이하로 가열한다면, 미세 조직에는 아무런 변화가 일어나지 않으므로 템퍼

그림 1. 유도 가열경화된 이런 부품은 유도 가열 템퍼링이 가능하다.

* 이 자료는 "Advanced Materials & Processes", 156(2)(1999) H19에 실린 자료이다.

링은 효과가 나타나지 않는다. 탄소강의 저온-템퍼링은 일반적으로 120-300°C이며, 이 온도에서 일차적으로 내부응력이 완화된다. 동시에 경도는 HRC로 1-2 포인트 정도 떨어진다.

만일 탄소강을 600°C 이상에서 템퍼링 했다면, 조직은 확실하게 바뀌게 되며 경도도 심하게 낮아질 수 있다. 경도가 HRC로 15 이상 낮아져서 경도 값이 HRC 36-44로 감소한다. 그러나 합금강의 경우에는 600°C 이상의 템퍼링에도 경도가 이처럼 크게 떨어지지 않는다.

3. 잔류응력의 생성

템퍼링은 필요한 경도와 낮은 내부응력으로 절기고, 연성을 가진 조직을 동시에 갖도록 해야 한다. 내부응력의 제거는 템퍼링의 중요한 목적이기 때문에 유도가열경화에서 내부응력이 어떻게 생성되는가를 아는 것은 아주 중요하다.^{1)~4)} 침탄이나 질화 같은 다른 열처리 공정에서 생기는 현상과는

잔류응력 생성기구가 다르다.

일반적으로 유도가열에서 생성되는 응력에는 두 가지, 즉 열응력과 변태응력이 있다. 열응력은 온도의 차이와 온도구배 때문에 생긴다. 상의 변태응력은 오스테나이트, 베이나이트 및 마르텐사이트의 생성과 같은 조직의 변화 때문에 생긴다. 최종적인 응력은 두 성분의 합이다. 이 두 성분이 전체응력에 기여하는 역할은 열처리 공정에 따라 달라진다.

4. 가열과 냉각

그림 2와 그림 3에는 막대모양 탄소강재의 유도 가열 표면경화에서 동적인 응력생성의 대강을 그려 놓았다.^{1)~4)} 가열단계의 처음에는 유도코일 아래에 있는 막대의 단면은 팽창할 것이다. 그러나 이 초기 단계에서는 온도가 상대적으로 낮기 때문에 (500°C 이하) 소재가 탄성범위조건에 있는 까닭에 쉽게 팽창할 수가 없다. 그 결과 그 부분의 내부에는 압축 응력이 발생한다.

그림 3에서 알 수 있는 대로 소재 표면의 온도의 상승은 표면에 압축응력의 증대를 수반한다. 그러나 온도가 올라가서 520-750°C에서는, 철강재가 소성단계의 체적팽창을 하는 까닭에 압축응력이

그림 2. 유도가열 후 분사 급냉한 탄소강 봉재에 생성된 복잡한 잔류 응력의 모양. (템퍼링 목적에는 표면 아래에 있는 최대 인장 잔류응력을 완화시켜 사용 중 균열 발생을 억제하는데 있다. 표면의 압축 잔류 응력은 존재하는 것이 유리하다. 응력의 크기는 확대해서 그렸음)

그림 3. 그림 2의 봉재 표면에 가열과 냉각 중에 생성되는 응력.(마르텐사이트 변태는 궁극적으로 압축 잔류 응력을 형성한다)

감소하기 시작한다. 때문에 가열의 최종단계에서는, 온도가 850°C를 넘어서면, 강재의 표면이 자유롭게 팽창하며, 피가열물의 직경이 본래보다 커진다. 따라서 표면에서의 응력은 현저하게 줄어든다.

그러나 퀘칭을 위해 냉각재가 이 가열된 부분에 뿌려지면, 표면층은 갑자기 온도가 내려가기 때문에 탄성이 줄어들게 되어 그림 3에서 알 수 있는 대로 인장응력이 발생한다. 인장응력은 피가열물의 표면이 Ms 온도가 될 때 최대가 된다. 이때부터 강재내부에서는 마르텐사이트가 형성되기 때문에 표면의 인장응력은 감소하기 시작하고 표면에는 다시 압축응력 상태로 된다. 그러므로 유도가열 경화된 부품에는 그림 2 아래 부분에 나타난 것처럼, 압축응력과 인장응력이 동시에 존재하는 복잡한 상태로 된다. 즉 축응력만을 고려한다면 막대의 중심부와 표면에는 압축응력이, 그 사이에는 인장응력이 존재하게 된다.

5. 템퍼링의 필요성

부품의 표면에 생성된 압축잔류응력은 보통 공업적으로 유리한 것으로 생각하고 있다. 즉 압축응력은 표면에 있는 미소 결함 (scratch 등)으로부터 생길 수 있는 균열발생을 예방하고, 피로균열발생을 지연시키며, 운행 중 부품이 받을 굽힘 응력과 뒤틀림 응력에 잘 대응하는 역할을 한다.

그러나 표면경화층 바로 아래에는 최대인장응력이 존재한다는 사실에 주목해야한다. 바로 이곳에서(sub-surface) 표면균열이 가장 잘 발생하는 까닭에 이 부분이 존재하면 부품의 수명이 짧아질 가능성이 크다.

결론적으로 유도가열 경화된 부품의 전체적인 상태의 잔류응력은 부품의 취성을 조장하고 노치 민감도를 증가시켜 부품의 신뢰성을 떨어뜨린다. 템퍼링은 이들 잔류응력의 표면 안쪽에 있는 인장응력을 감소시키면서 동시에 표면에는 이러한 압축잔류응력을 어느 정도 남기는 것이 템퍼링의 주목적이다.

기본적으로 유도가열에 의한 템퍼링에는 두 가지 방법이 있다. 즉 하나는 부품에 남아 있는 열을 활용하는 자기 템퍼링(self-tempering)이고, 다른 하나는 부품을 특수 코일로서 재 가열하는 유도가열 템퍼링(induction tempering)이다.

6. 자기 템퍼링

그림 4에는 막대모양 탄소강의 경우, 유도가열경화 후 자기 템퍼링의 원리를 나타낸 것이다. 유도가열의 초기 단계에서 표면층의 온도는 급격히 상승하고, 대략 5초 후에 표면이 필요한 최종 온도(경화온도)에 도달한다. 이 과정은 재료에 약간 따라 달라질 것이다. 그러나 부품 중심부의 온도는 여러 가지 이유, 즉 표면효과, 높은 전력밀도, 짧은 가열시간과 같은 원인 때문에 그다지 올라가지 않는다. 즉 표면의 온도가 중심부까지 전달되는데 필요한 충분한 조건이 만족되지 못한다.

퀘칭을 위해 냉각재를 분사하면 급냉의 초기단계에서 표면층의 고온은 감소하기 시작하고, 분사 냉각 2초 후에는 표면 온도가 급속히 감소한다. 이러한 상태에서 부품의 최대온도는 표면에서 약간 안쪽인 내부에 존재한다. 그러나 부품의 중심부는 열 전달이 계속되기 때문에 온도가 약간씩 증가한다.

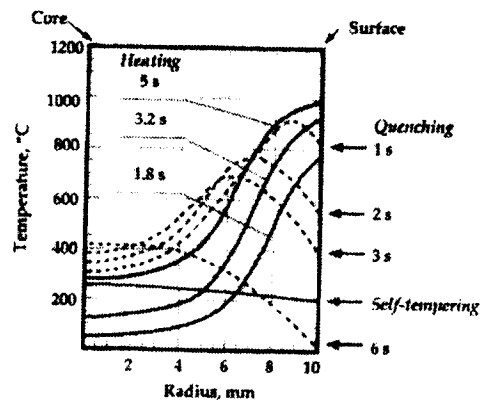


그림 4. 직경 20mm(8inch) 탄소강 봉재를 10kHz에서 가열한 후, 분사 냉각시킨 경우, 어떻게 자기 템퍼링이 가능한가를 보여 주는 예.

급랭하여 6초가 경과하면 표면의 온도는 냉각제의 온도와 거의 비슷하게 되나, 내부는 아직도 상당한 열을 가지고 있게 되며, 중심부의 온도는 400℃ 이상이다. 이 순간에 냉각제의 공급을 차단하게 되면, 이 부품은 내부의 열 때문에, 단면 전체가 골고루 가열되는 현상이 나타나, 어느 정도 시간이 흐르면, 표면의 온도는 급랭을 정지시킬 때보다 올라간다.(그림 4의 self-tempering선의 표면온도 참조)

이와 같은 방법으로 냉각조건을 적당하게 선택함으로써, 부품에 남아 있는 잔류 열을 이용하여 템퍼링을 할 수 있다. 이 방법에서의 온도는 보통 260-290℃을 넘지 않으며, 대개 210-240℃ 범위에서 이용된다.

이 방법을 성공적으로 수행하기 위해서는 유의해야 할 점이 있다. 부품에 공급되는 에너지와 가열시간을 잔류열량이 일정하도록 항상 점검해야 하며, 냉각제의 흐름과 냉각시간, 냉각온도도 동시에 기록하면서 부품이 재가열된 후 표면온도가 일정하게 되도록 유지하여야 한다.

7. 참고사항

자기 템퍼링은 부품이 큰 질량을 가지며, 단발(일발)유도경화인 경우에는 비교적 쉽게 이용될 수 있다. 이동 유도경화나 형상이 복잡하면 이 방법의 적용이 어렵다. 중심부의 온도가 부품의 길이에 따라 달라지기 때문이다. 경화된 부품의 각 단면 내부 열의 분포와 축적된 열의 크기가 같아야만 된다. 그렇지 못하면 자기 재 가열 후 온도 분포가 달라져서 템퍼링은 실패하게 된다.

8. 템퍼링용 특수 코일

자기 템퍼링을 적용할 수 없는 부품에는 유도가열 템퍼링을 적용한다. 템퍼링에 사용하는 코일은 대개 경화시에 사용한 코일을 사용하지 않는다. 그 이유는 다음과 같다.

1) 유도가열경화에서는 복잡한 형상의 피가열물에 필요한 경도를 얻기 위해 어떤 부분에 집중적인 에너지가 공급되도록 전자장 재 분포시킬 필요가 있다. 이에 비해 템퍼링용 코일은 대개 경화영역보다도 큰 영역, 경우에 따라서는 부품전체를 가열시킨다.

2) 경화에서는 템퍼링보다 훨씬 큰 전력밀도가 사용된다. 템퍼링에서는 표면에서 경화침투깊이가 지나 완만한 온도구배가 되도록 아주 낮은 속도로 표면을 가열하여야 한다. 그러나 전력밀도가 너무 높으면, 표면온도가 너무 높아, 표면경도가 과도하게 떨어지게 된다.

3) 경화코일과는 달리 템퍼링코일에는 자속잡증자를 거의 사용할 필요가 없다.

4) 템퍼링온도는 대개 Curie 온도 이하이기 때문에 낮은 주파수가 이용되어야 한다. 즉 단일 주파수를 이용하면 템퍼링에서의 침투 깊이는 경화때보다도 아주 작아진다. 그림 5에서 알 수 있는 대로 강재의 투자율(透磁率)은 경화 때보다 템퍼링 때가 10배 이상 크다.

5) 이 투자율의 차이는 강재의 조성 및 결정립도 및 온도 뿐만 아니라, 주파수와 자기장 강도의 복잡한 함수이기 때문이다. 그림 6에서 템퍼링에 이용된 주파수와 자기장 강도는 둘 다 경화에 이용되는 경우보다 큰 투자율을 형성시키는 것을 알 수 있다. 그러므로 유도가열 템퍼링에서 부품에 전

그림 5. 유도가열 템퍼링과 표면경화에서 온도에 따른 강재의 투자율 변화.

그림 6. 유도가열 템퍼링에 사용되는 주파수와 자장 강도에서는 강제의 투자율이 경화때 보다 훨씬 크다.

류밀도를 깊게 침투시키기 위해서는 낮은 주파수를 이용하여야 한다.

9. 템퍼링작업에 유의점

템퍼링은 모든 내부응력을 완전히 제거한다고 생각하는 것은 잘못된 것이다. 그러나 내부응력을 현저하게 감소시키는 것은 맞다. 그렇게 함으로써, 위험한 최대인장 잔류응력이 작용하는 지점을 표면에서 안쪽으로 옮기고, 그 크기를 감소시킨다. 경화된 강재에서는 이 최대인장 잔류응력이 표면 바로 안쪽에 위치하고 있다.

시간 - 템퍼링은 강재를 좀 더 연성을 가지게 하여 균열발생의 가능성을 줄인다. 그러나 퀴칭과 템퍼링 공정간에 걸리는 시간을 가능한 짧게 해야 한다. 이 시간이 길어지게 되면 잔류응력이 부품을 "뒤틀리게"하거나 "균열을 발생"시키게 되고, 나중에 템퍼링을 해도 효과가 떨어지게 된다. 유도가열 템퍼링도 일종의 확산과정이기 때문에 경화나 퀴칭에 걸리는 시간보다 장시간이 필요하다. 즉 유도가열 경화에 수초가 걸린다면, 유도가열 템퍼링에서는 수 십초에서 수분이 소요된다.

형상 - 복잡한 형상의 부품을 유도가열 템퍼링

하려면, 주파수, 전력밀도, 코일 형상을 에너지가 부품의 원하는 곳에 충분히 입력되도록 적절하게 선택하여야 한다. 예로서, 기어를 템퍼링 하는 경우, 에너지가 톱니 잇발이 과열되지 않으면서 뿌리 부분에 충분히 공급되도록 해야 된다. 기어의 뿌리 부분은 잔류응력과 외부의 응력이 집중되는 곳이기 때문에 가장 민감한 부분이다. 따라서 기어에서 생기는 균열은 대부분 이곳에서 나타난다. 그러므로 기어의 템퍼링은 이 부분의 응력제거(완화)가 일차적인 목표가 된다. 하지만 다음 세 요인이 그것을 어렵게 한다.

가) 기어의 이빨 부분과는 달리, 뿌리 부분에는 적절한 코일을 배치하기 어렵다. 따라서 에너지 공급이 쉽지 않다.

나) 템퍼링이 Curie 온도 이하에서 이루어지기 때문에, 기어가 자성(磁性)을 가지고 있고, 표피효과가 크다. 따라서 뿌리 부분보다 이빨 부분에 열 공급이 우선한다.

다) 뿌리 아랫부분의 몸체에서 열을 너무 많이 빼앗아 간다.

10. 유도가열 템퍼링

그림 7과 그림 8에 나타난 것처럼, 유도가열 템퍼링 부품에는 두 종류가 있다. 부품의 내면을 경

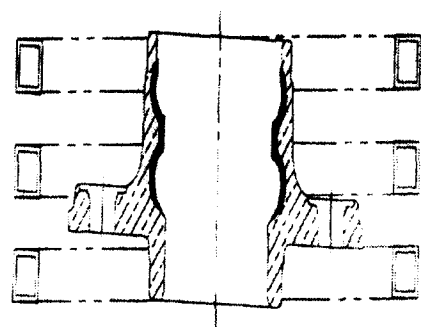


그림 7. 내면(검은 부분)이 경화된 부품의 유도가열 템퍼링. 코일은 부품을 둘러싸며, 온도는 외부에서 경화된 내부로 서서히 증가된다.

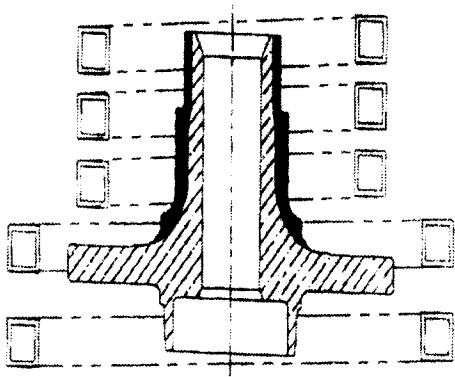


그림 8. 외면이 경화된 부품의 경우. 단면의 두께가 다르므로 프랜지와 같은 경화되지 않은 부분에도 가열되도록 코일이 설계되어야 한다.

화시킨 것이 그 하나로서, 이 종류가 유도가열 템퍼링에 가장 효과적으로 적용되고 있다. 템퍼링 코일은 부품전체를 감고, 온도를 외부표면에서 경화된 내부로 서서히 올리면 된다. 경화된 부분을 가열시키지 않은 온도 조정이 가능하게 된다. 이와 비슷한 디자인의 코일을 외면을 경화시킨 속이 빈 원통(中空)부품에도 적용할 수 있다. 그러나 이 경우 코일은 피가열물의 빈 내부 공간에 두어야 한다.

열방출 효과 - 그림 8과 같은 허브(hub)에는 미리 결정된 에너지가, 필요한 단면에 공급될 수 있도록 특수한 코일을 사용하여야 한다. 즉 단면적이 다르니까 모든 단면에 동일한 템퍼링 온도가 되도록 고안하여야 한다. 각 부분에서 질량효과가 다르므로, 가열시의 코일과는 달라야만 한다. 즉 단면적의 차이에 따라 열방출 효과가 달라지게 되므로, 코일은 프랜지처럼 경화되지 않은 부분에도 열을 전달되게 하여야 한다. 이러한 부분은 열의 완충지역으로 작용하게 되고, 템퍼링 온도 보다 약간 높게 가열하면 된다. 이 열은 또한 경화층 바로 안쪽에 있는 천이 영역에도 공급되어 최대 인장 잔류응력을 완화시킨다.

그리고 일반적으로 이러한 코일은 피가열물과 단단히 고정시키지 않으므로, 열이 전달되기 어려

운 곳이 많아지게 된다. 동시에, 모서리나 홈과 같은 기타 예리한 부분에도 가열효과가 크지 않다. 표면을 과열시키지 않으면서 얻을 수 있는 전체가열은 "가열 - 균열"사이클을 채용함으로써 해결될 수 있다. 이러한 형태의 코일은 복잡한 모양과 질량분포를 가진 여러 부품에 적용된다. 또 다른 예로서 벨(bell)의 내부와 샤프트의 외부를 동시에 경화시킨 정속(constant velocity) 조인트가 있다.

공정설계 - 대략적으로 템퍼링 시간은 경화시간(가열과 급랭까지)의 적어도 2배 정도이다. 이것은 유도가열장치에 경화시(가열 + 급랭)에는 한 station이 필요하며, 템퍼링 시에는 두 station이 필요하다는 것을 의미한다. 템퍼링 시 두 station 사이에서 균열화가 진행된다. 템퍼링에도 냉각단계가 있다. 이 단계가 템퍼링 장치 내에 둘 수도 있고, 그냥 컨베어로 송출되면서 진행될 수도 있다.

11. 유도가열 템퍼링의 채용

유도가열 템퍼링의 적용에는 신중한 검토가 필요하다. 어떤 사람은 시간이 너무 짧아서 이 방법이 적당하지 못하다고 주장하기도 한다. 이들은 종래의 노 사용법이 시간도 길며 전체를 가열하는 까닭에 신뢰성이 있는 것으로 생각하고 있다. 그러나 결과는 실제 어느 제품이 수명이 길게 성능을 발휘하느냐에 달려 있으며, 결과는 이 방법에 의한 부품도 규격을 만족한다는 데 있다.

피로시험과 인장시험으로 두 방법이 비교될 수 있지만, 중요한 것은 표면 템퍼링 온도만으로는 템퍼링의 적절성을 판단하기에는 적당하지 않다는 것이다. 템퍼링이 적절하게만 수행되었다면, 경도는 약간 떨어져야 하고(가장 적절한 템퍼링은 경화시킨 후 보다 경도가 Hrc로 1-2 포인트 정도 낮아지는 조건), 대신 내부응력의 현저한 완화를 통해 인성과 연성이 개선되고, 기계가공성 등도 개선되어야만 한다.

참고문헌

1. V. I. Rudnev, R. L. Look, D. L. Loveless and M. R. Black : "Steel Heat Treatment Handbook", G. E. Totten and M. A. H. Huer(Eds.), Marcal Dekker Inc., Monticello, N.Y., 1997, p.765
2. K. Weiss : Industrial Heating, 62(12)(1995) 37
3. M. Lozniski : "Industrial Apphicaion of Induction Heation", Pergamon Press, London, 1969, p.672
4. G. Golovin and M. Zamiatin : "High Frequency Heat Treatment", St. Peterburg, 1990, 239
5. V. I. Rudnev, T. G. Boussie, D. L. Loveless and R. L. Look : Heat Treating - Procd, 16th Conference, ASM International, Ohio, 1996, p.107