

담금질 균열의 원인과 대책

김 현 주

부경대학교 금속공학 전공

Cause and Countermeasure against Quenching Cracks

Heon-Joo Kim

Dept. of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

1. 서 론

열처리에 의해 발생하는 문제점으로는 열처리 균열, 변형, 열처리 얼룩과 조직불량 등이 있다. 재료품질의 향상, 열처리 설비의 개선, 분위기 및 온도제어 기술의 진보 등의 개선과 함께 열처리 부품의 품질은 향상되고 있지만, 열처리에 의해 발생하는 문제들은 지속적인 열처리 기술자들의 노력을 필요로 한다. 또한 이들 문제점들을 해결하기 위해서는 적절한 제품설계, 좋은 품질의 재료와 우수한 열처리기술이 필요하다.

열처리공정에서 여러 문제점들이 발생될 수 있지만, 가장 치명적인 것은 균열발생이다. 균열발생을 원인별로 구분해보면 열처리 조건이 직접적인 원인이 되어 열처리 과정에서 일어나는 균열과, 열처리 이전의 제품제조 및 가공공정 등이 원인이 되어 발생한 미세 균열이 열처리 공정에서 표면에 나타나는 경우도 발생한다. 균열 발생에 대한 적절한 대책수립을 위해서는 열처리 이전의 각 공정에 대한 기본적 이해와 여기서 발생할 수 있는 균열발생 원인과, 열처리 균열의 발생원인을 이해하고 파면 해석을 위한 지식이 종합적으로 요구된다.

본 해설은 우선 열처리 과정에서 일어나는 담금질 균열의 원인과 대책수립에 필요한 사항들을 소개하고, 균열발생에 대한 원인 파악을 위한 파면 해석의 기본적 사항을 간단히 명기한다.

2. 열처리 제품의 균열

열처리 제품에 나타나는 균열은 여러 종류가 있으며, 각각의 원인과 대책이 다르기 때문에 종류를 확인하는 것이 중요하다. 따라서, 균열의 발생위치, 균열형상, 파면의 색상, 파면의 형태와 작업조건 및 상황, 균열발생

시기, 균열 발생율, 내부조직과 재료분석 등을 상세하게 조사하여 재발방지를 위한 충분한 조사와 신중한 판단이 필요하다.

2.1. 발생위치

균열 발생위치는 대체적으로 응력집중부, 냉각속도가 급격하게 변화하는 부분에서 발생한다. 즉, 날카로운 모서리 부분, 두께 차이가 큰 부분, 계단 부분, 구멍, 파팅라인 부분 등에서 대부분 발생한다. 또한, 제품 표면 부분의 과도한 마킹 부분도 응력집중을 일으켜 균열이 발생한다.

2.2. 균열의 형상

길이방향 균열, 횡방향 균열, 일자형 균열, 십자형 균열, 눈썹형 균열, 동심형 균열, 방사선형 균열 등 여러 형상으로 구분되며, 날카로운 형상을 특징으로 한다.

2.3. 파면의 색

물 담금질에 의한 균열 파면은 붉은 녹이 붙어 있으며, 기름 담금질에 의한 균열 파면은 기름이 소착된 경우가 많다.

2.4. 파면의 형태

열처리 균열은 급진적으로 발생되므로 파면은 거친 형태를 나타내며, 피로 파면은 매끈한 결모양 형태를 나타낸다.

3. 담금질 균열의 원인

가열과 냉각사이클 중 제품에서 일어나는 변화를 올바르게 이해할 필요가 있다. 그림 1에 공석탄소강을 변태

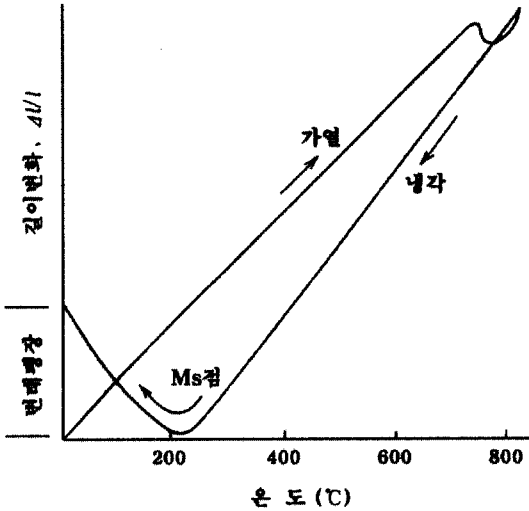


그림 1. 공석탄소강의 가열·담금질시 수반되는 길이변화.

온도 이상으로 가열한 후, 급랭한 경우의 길이변화와 온도의 관계를 나타내고 있다. 냉각 최종단계에서 마르텐사이트 변태에 의한 팽창이 나타나며, 탄소함량이 높을수록 팽창량은 크다. 이 팽창으로 인해 담금질 균열과 담금질 변형이 일어난다. 즉, 이 변태에 의한 팽창과, 가열과 냉각에 의한 팽창과 수축이 제품의 외부와 내부에 동시에 발생되기 때문에 제품내부에 발생하는 응력변화는 상당히 복잡하다.

그림 2에 담금질에 의한 체적변화와 내부응력의 분포를 나타내었다. 근본적인 문제는 냉각시 제품의 외부와

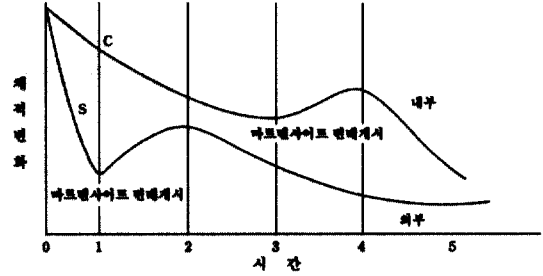


그림 2. 담금질에 따른 체적변화.

내부에서 발생하는 수축과, 마르텐사이트 변태에 의한 팽창이 일어나는 시점이 일치하지 않음으로 인해 제품 내부에 압축응력, 외부에 인장응력이 존재하는 경우이다.

그림 3은 냉각시의 조건에 따라 제품 내·외부에서 발생하는 열응력과 변태응력에 의한 응력분포를 나타내고 있다. (a)그림은 냉각속도가 상대적으로 완만한 공기 담금질의 경우 제품 내·외부의 응력분포로, 외부는 변태에 의한 팽창이 되고 이 응력으로 인해 내부는 스트레치(stretch)되어 연신되면서 외부는 인장응력 상태가 된다. 시간적으로 지연된 변태에 의해 내부는 팽창되나 외부의 구속에 의한 반작용으로 압축 응력상태로 담금질 균열의 가능성이 있다. (b)그림은 물 담금질로 Ms 점 이하를 급랭시킨 경우의 응력분포로 제품외부가 냉각이 되면서 수축이 일어날 때 제품내부는 온도가 높은 상태이므로 변형이 용이하여 외부의 수축응력에 의해 내부가 수축되는 업셋(upset)현상이 발생한다. 냉각이

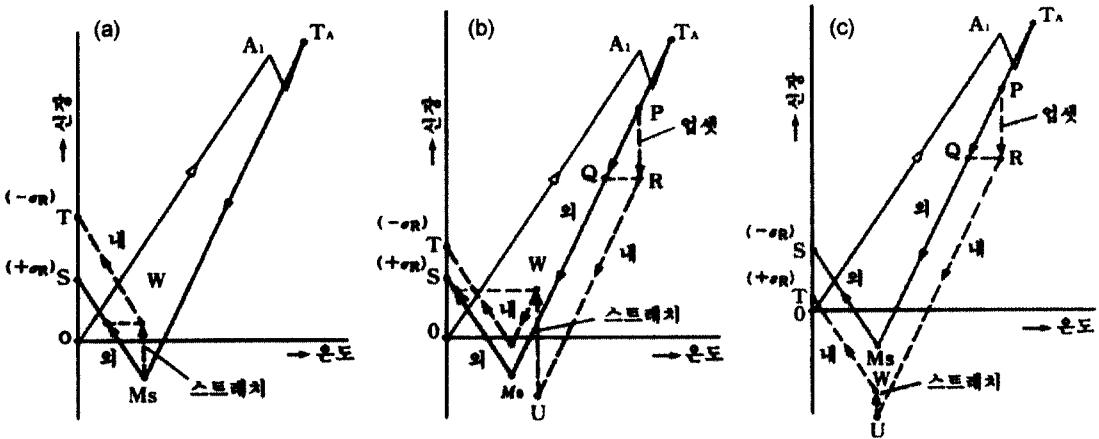


그림 3. 냉각조건에 따라 제품 내·외부에서 발생하는 열응력과 변태응력에 의한 응력분포. (a) 공기분사에 의해 Ms점 이하를 급냉할 경우 변태응력에 의한 외부: 인장응력, 내부: 압축응력 상태, 균열발생 가능성, (b) 담금질에서 Ms점 이하를 급랭할 경우 열응력과 변태응력에 의한 외부: 인장응력, 내부: 압축응력 상태, 균열발생 가능성, (c) 담금질에서 Ms점 이하를 서냉할 경우 열응력과 변태응력에 의한 외부: 압축응력, 내부: 인장응력 상태, 균열발생 없음.

진행되어 마르텐사이트 변태가 일어나는 구간에서 외부는 팽창되면서 스트레치(stretch)가 일어나 인장응력이 분포하는 반면, 내부는 상대적으로 늦게 마르텐사이트 변태에 의한 팽창이 일어나 외부의 구속으로 인해 압축응력이 존재한다. 이 경우 역시 담금질 균열의 가능성이 크다. (c)그림은 물 담금질을 행하나 Ms점 이하를 서냉시킨 경우의 응력분포로, 변태응력에 의한 스트레치(stretch)가 거의 일어나지 않아 제품의 외부는 압축응력 상태이며 내부는 인장응력 상태가 되어 담금질 균열이 발생하지 않는다.

따라서 담금질 균열은 담금질시 제품 내·외부의 수축과 팽창이 심하게 어긋나면서, 제품 외부에 인장응력이 과대하게 존재하는 열처리조건이 원인이 되어 담금질 균열이 발생된다. 이 경우 제품표면에 흠집이 있거나 가공면이 조악하게 거친 경우에 응력집중을 배가하여 균열발생의 위험도를 높이며, 재료에 편석이 존재하거나 비금속 개재물이 많이 존재하는 경우에도 균열발생의 위험성은 커진다.

4. 담금질 균열 대책

4.1. 재질선정

재질을 선정함에 있어 제품의 크기, 형상, 질량효과 등을 고려하여 완전 담금질이 가능한 재질을 선정하는 것이 중요하다. 담금질 균열, 변형, 얼룩의 발생경향은 물 담금질 → 기름 담금질 → 공기(가스) 담금질의 순서로 위험도가 감소하지만, 연료비 부담은 높아지므로 품질과 비용을 고려하여 판단할 필요가 있다.

그림 4는 물 담금질의 경우, 강의 탄소량 및 D₂값이

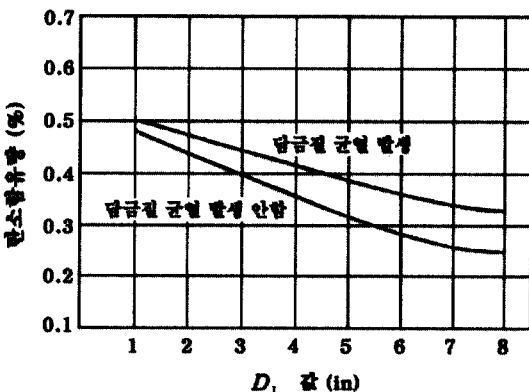


그림 4. 탄소함유량, D₂값과 담금질균열의 상관관계.

상인계직경)과 담금질 균열의 관계를 나타낸 것으로 담금질성이 좋은 강과 탄소함량이 높은 강일수록 균열발생은 용이하다. 이것은 마르텐사이트의 소성변형능(담금질에 의해 인장응력이 발생한 경우, 마르텐사이트가 소성변형을 하여 응력을 저감하여 균열을 회피할 수 있는 능력)이 탄소함량이 높을수록 저감되기 때문이다. 그림 5에서 0.45%C 강이 되면 소성변형능을 나타내는 연신율값이 제로에 근접됨을 나타내고 있다.

물 담금질의 경우는 물론, 기름 담금질의 경우도 재질측면의 대책으로는 가능한 탄소함량을 낮추는 것이 좋다. 그러나, 단순히 탄소함량을 낮추는 것만으로는 담금질성이 저하되어 충분한 담금질효과를 얻을 수 없는 경우가 많다. 그러나, 합금강을 사용하면 원가가 상승하므로 이런 경우에는 보른 함유강을 검토해볼 만 하다. 고장력 볼트와 건설기계용 부품에 많이 사용되는 보른강은 0.0005~0.0030%의 미량 보른을 함유하여 합금강과 비슷한 높은 담금질성을 나타낸다. 그림 6에 10B35의 보른강과 SCM435강의 조미니곡선을 비교하였다. 이 보른강의 조미니곡선은 담금질 면으로부터 조금만 떨어져도 경도가 급락하는 특징을 나타낸다. 이것은 이 강종에서 충분한 담금질을 필요로 할 때 강한 냉각을 수반해야 한다는 것과 아울러 강한 냉각조건에서도 담금질 균열을 일으키기 어렵다는 사실을 의미한다.

4.2. 냉매 선정과 관리

냉각과정은 담금질 균열의 발생과 밀접한 관련성이 있다. 안정된 냉각과정은 냉매의 종류, 온도, 교반방법, 분사방법, 교반/분사의 강도, 냉각시간, 부품의 입수자세 등

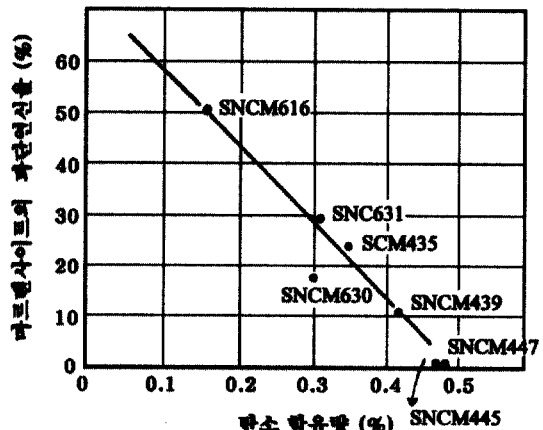
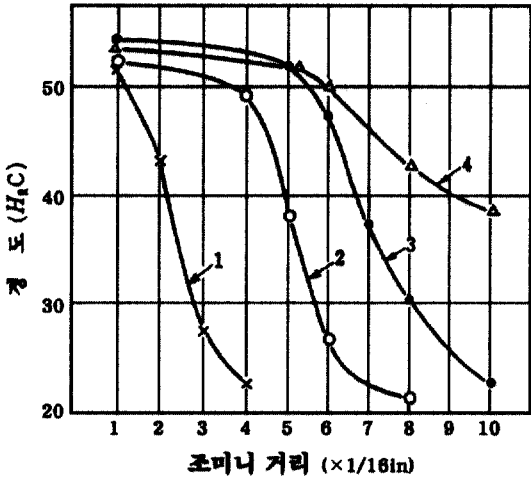


그림 5. 마르텐사이트의 파단연신율에 대한 탄소함유량의 영향.



	재질	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	B
1	S35G	0.34	0.82	0.27	0.04	0.04	-	-
2	10B35A	0.34	0.79	0.23	0.02	0.10	0.02	0.0022
3	10B35B	0.36	1.02	0.25	0.02	0.12	0.01	0.0025
4	SCM435	0.35	0.72	0.26	0.05	1.00	0.18	-

그림 6. 탄소강, 보론함유 탄소강, 저합금강의 담금질곡선.

과 관련성이 있다. 제품종류마다 최적의 방법을 선택하고 일정 범위 내에서 작업조건을 관리할 필요가 있다. 냉매로는 기체(공기, 불활성 가스), 물, 기름, 수용성 냉각제, 염욕 등의 종류가 있으며, 재질과 열처리목적에 따라 선택된다. 냉각능과 잔류열을 일정하게 유지하기 위해서는 냉매의 온도관리가 중요하다. 그림 7은 물 냉매의 냉각곡선에 미치는 온도의 영향을 나타낸다. 일반적으로 냉각과정이 안정되고, 온도관리가 쉬운 30~40°C 부근으로 온도폭을 좁게 관리하는 것이 바람직하다.

수용성 냉매는 물보다 냉각능이 약간 떨어지기 때문에 담금질 균열 예방대책으로 선택할 수 있는 한 방안이다. 그림 8에 나타난 것처럼 물에 비해 증기막 접촉단계가 길고, 냉각속도가 늦다. 또한 물보다 온도영향을 많이 받으므로 온도관리 폭을 좁게 설정할 필요가 있다. 강한 교반과 분사냉각으로 증기막 접촉단계를 짧게 하며, Ms점 통과를 완만하게 하는 것이 가능하기 때문에 탄소강에서도 충분히 경화가 가능하고 담금질 균열 방지 효과도 얻을 수 있다.

기름 냉매는 종류와 열처리목적에 따라 온도범위가 다르다. 저온 담금질(60~80°C), 중온담금질(100~130°C), 고온 담금질(150~180°C)로 구분된다. 물과 달리 온도 관리 폭은 넓고, 냉각능은 안정하지만, 물 혼입 혹은 기름이 열화하면 불안정하게되어 담금질 균열과 얼룩의

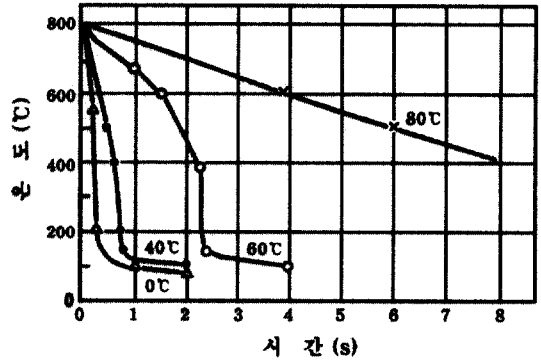


그림 7. 직경 10 mm 은 불시편의 냉각곡선에 미치는 수온의 영향.

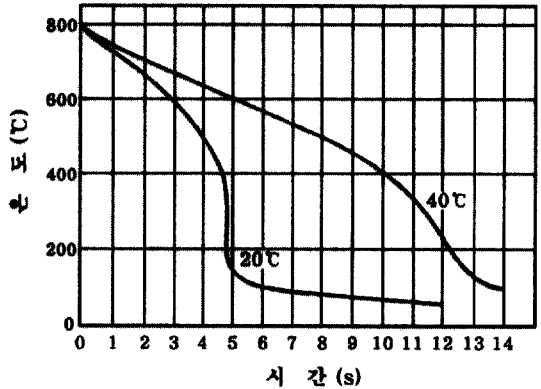


그림 8. 800°C, 직경 10 mm 은 불시편을 2% 수용성기름 냉매에 담금질한 경우의 냉각곡선.

원인이 될 수 있으므로 주의를 요한다.

4.3. 균일한 냉각

균일한 냉각은 담금질에 의한 응력 불균일이 적어 담금질 균열의 위험을 낮춘다. 두께차이가 심한 제품을 균일하게 냉각시키는 방법은 그림 9에 나타난 오스템퍼링과 마르템퍼링 방법이 있으며, 담금질성이 좋은 재료에도 유용한 방법이다. 이러한 방법이 적용되지 못하는 경우에는 부품형상에 따라 냉각정도를 달리하는 방안이 필요하다. 두꺼운 부분에는 빠른 냉각을, 얇은 부위에는 느린 냉각이 되도록 공중 또는 액체의 노출분사 방식과 같은 방법도 있으며, 컴퓨터 제어에 의한 공중분무 냉각도 가능하다. 간단한 방법으로는 날카로운 모서리부, 두께가 얇은 부분과 구멍이 있는 부분에는 냉각을 늦추기 위해 석면 등으로 마스킹을 하는 방법도 적용할 수 있다. 그러나, 담금질 균열을 염려하여 냉각속도를 너무

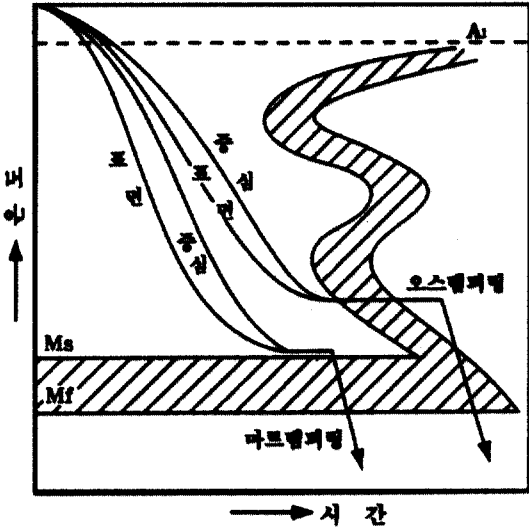


그림 9. 마르템퍼링 · 오스테퍼링.

늦추어도 증기막 접촉단계의 시간차이로 냉각 불균일이 발생되어 오히려 담금질 균열의 염려가 있을 수 있다.

4.4. 잔류 열관리

담금질 균열과 변형이 적은 담금질작업을 행하기 위해서는 Ms점 온도까지는 급랭하고, Ms점 이하는 가능한 서냉해야 한다. 간단한 방법으로써 그림 10에 나타난 시간 담금질이 유효한 방법이다. 냉각시간을 관리하는 것으로, 담금질 제품을 실온까지 냉각시키지 않고 150~230°C 범위의 필요한 잔류열을 보존시켜 냉매보다 온도를 높여 Ms점 통과 후의 냉각을 완만하게 유지함으로 마르텐사이트 변태에 의한 팽창을 완화시켜 담금

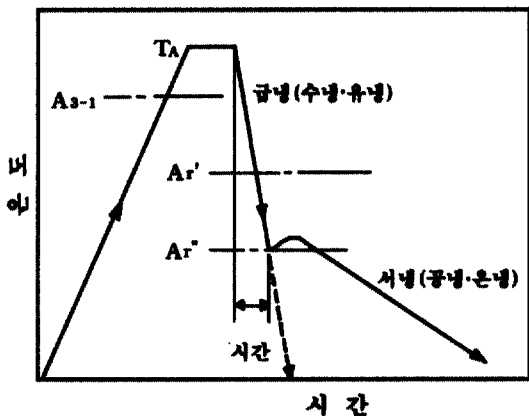


그림 10. 시간 담금질.

질 균열 방지에 효과가 있다.

그림 11은 물 담금질의 경우, 규정의 잔류열을 얻기 위한 시료직경과 담금질 시간의 관계를 나타낸 예를 나타내었다.

4.5. 표면경화

제품의 중심부까지 담금질 효과를 유지하려면, 표면에 큰 인장응력이 발생하여 담금질 균열의 원인이 되지만 표면층만 경화시키고 중심부의 재질은 담금질 효과를 받지 않은 표면경화법은 표면에 큰 압축응력이 잔류하기 때문에 담금질 균열의 위험은 적다. 보론 함유강은 물 또는 수용성 냉매에 담금질시켜도 표면경화 조직이 된다.

4.6. 분위기관리

진공로에서 열처리하는 가탄 및 탈탄 문제가 적지만, 일반 분위기로의 경우는 정확한 탄소 포텐셜의 제어가 곤란한 경우가 많다. 일반적으로 분위기 가스로는 RX가스(부탄 또는 프로판 변성에 의한 흡열반응형 가스) 및 DX가스(발열반응형 가스)가 사용된다. 표 1에 가스 조성을 나타내었다. RX가스는 H₂와 CO를 다량 함유한 환원성이며, DX가스는 반대로 H₂와 CO가 적은 산화성이다. 가탄현상은 담금질 균열을 촉진시키므로 피해야한다. 과도한 탈탄은 피로강도를 저하시키며, 고탄소강에

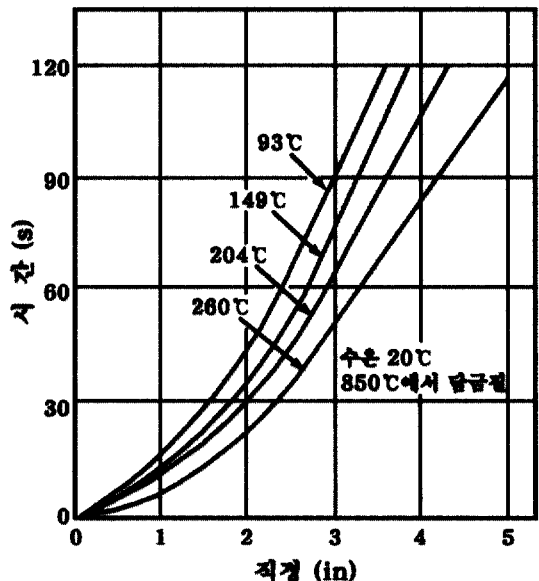


그림 11. 잔류열을 위한 재료의 직경과 담금질 시간의 관계.

표 1. 분위기가스 조성

가스명칭 연료		비중 (15°C, 1 기압)	가스조성 (체적 %)					
			CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ C	%
RX	프로판	0.667	0.0	24.0	33.4	0.4	0.0	잔량 (42.2)
	부탄	0.678	0.0	24.5	32.1	0.4	0.0	잔량 (43.2)
DX (저품위)	프로판	1.209	12.5	1.5	0.8	0.0	0.8	잔량 (84.4)
	부타	1.030	12.8	1.5	0.8	0.0	0.8	잔량 (84.1)
DX (고품위)	프로판	0.929	7.0	10.2	8.2	0.5	0.8	잔량 (73.3)
	부탄	0.936	7.3	10.2	7.6	0.5	0.8	잔량 (73.6)

서 담금질 균열을 일으킬 가능성도 있다. 제품의 기능을 저하시키지 않는 범위내의 가벼운 탈탄(페라이트가 없이 탈탄깊이가 0.2 mm 이하)을 유도하는 것은 담금질 균열 방지의 요령이다. 제품의 탄소량에도 영향이 있지만, 통상 RX가스 분위기에서 가탄경향이, DX가스 분위기에서는 탈탄경향이 있다. 가벼운 탈탄 분위기로 제어하기 위해서는 (a) RX가스에 일정 비율의 공기(5~10%)를 혼입하여 약 탈탄 분위기로 유도한다.

(b) RX가스에 일정 비율의 DX가스(10~30%)를 혼입시켜 약탈탄성 분위기로 유도한다.

이 방법을 사용하면 가열분위기 중의 수소 포텐셜을 저하시키기 때문에 담금질 균열 방지 이외에 지연파괴 방지에도 효과가 있다.

표면 탈탄을 위한 분위기관리는 담금질 균열 방지에 효과가 있지만, 제품에 따라 표면 탈탄이 부적합한 경우도 있다는 것을 유념할 필요가 있다.

4.7. 담금질 후 뜨임처리

담금질 직후 균열이 발생하지 않더라도, 담금질 후 잔류 오스테나이트가 불안정하여 마르텐사이트로 변태되면서 지연파괴를 일으킬 위험도 있다. 따라서, 담금질 후에는 빠른 시간내에 뜨임처리를 행하여 잔류 오스테나이트를 안정화시키고 응력을 완화시키는 것이 바람직하다.

4.8. 형상변경

봉이나 판상의 단순한 형상 부품은 균열발생을 일으키기 어렵지만, 날카로운 모서리 부분, 구멍, 두께차이가 많이 있는 제품은 위험하다. 참고로, 요철부(凹凸部)의凸부분의 냉각속도는 평면부의 7배이며, 凹부분은 평면부의 1/3정도이다. 표면에 깊은 마킹자국 등은 담금질시 균열을 일으키거나, 사용 중 응력집중을 일으켜 피로균

열 기점이 될 수 있다.

5. 파면보존 및 해석

균열은 어떤 원인에 의해 최초 시작된 부분에서의 균열발생(Crack Initiation)과 점진적으로 성장하는 균열전파(Crack Propagation) 과정으로 나누어지며, 적절한 처방이 행해지지 않을 경우에는 일부분의 균열에 국한되지 않고 전체로 전파되면서 제품이 2개 부분 이상으로 분리되는 파괴(Fracture)과정으로 진전된다.

파면은 이와 같이 균열이 발생해서 멈추기까지 전체 과정을 포함하고 있어, 균열발생 원인을 확인할 수 있는 주요 자료로 활용된다. 따라서, 훼손되지 않은 상태에서 정확한 분석이 이루어질 수 있도록 파면을 보존하는 것이 현장에서 취해야할 우선적인 조치사항이다.

담금질로 인해 발생하는 균열파면은 대부분 취성파면의 특징인 물결모양의 리버패턴(river pattern)으로 구성되어 있으며, 물결모양을 거슬러 올라가서 취합되는 기점이 균열 발생부가 된다. 제품 사용 중 균열이 발견되거나 파괴로 이어질 때 담금질에 의한 균열발생이 원인일지라도 균열전파 영역에 해당하는 파면의 일부분에 피로균열 전파에 의한 파면특징인 방사성형 균열자국, 가는 줄무늬 모양이 띠를 이룬 스트리이션(striation)이 존재할 수 있다.

균열발생 원인은 제품형상이 파괴응력을 유발하는 원인으로 작용하는 경우에는 제품설계 단계와 열처리공정에서 응력집중을 완화할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 아울러 균열발생부에 조대한 비금속 개재물이 분포하는 경우처럼 재료적인 측면도 원인의 일부분으로 작용한다. 균열이나 파괴가 발생되었을 때는 우선적으로 파면을 청결하게 보존하고 작업 당시의 상황과 작업일지 등의 자료가 제공되면, 정확한 균열발생 원인과 균

열발생 시점 등을 판정하는데 도움이 된다. 파면형태의 해석으로부터 균열 발생부를 확인하는 것은 균열과 파 괴원인을 규명하기 위한 최초의 작업이면서 가장 중요한 작업이다. 파면조사를 통해 균열 발생부를 확인하면 미소영역 성분분석, 현미경조직 검사, 경도 등의 검사결과와 전 단계의 제조공정과 열처리공정 조건들을 검토하여 원인을 판정하게되는데 전문적인 지식이 필요한 부분으로 전문가의 도움이 필요한 부분이다.

이 자료의 일부는 일본 鑄鍛造と熱處理 1997년 1호 25페이지와 1997년 2호 13페이지에 게재된鈴木建司, 工藤 續 자료의 “실패하지 않는 열처리, 소입균열” 내

용을 번역 정리한 것임.

참고문헌

1. 大和久 : 熱處理108つのポイント, 大河出版 1987
2. 宮長 : 材料の破損とその対策, 日刊工業新聞社 1990
3. 守屋 : 炭素鋼および含ボロン炭素鋼の水焼入れ, 熱處理 16 卷5? 1976
4. 大和久 : 熱處理技術マニュアル, 日本規格協會 1988
5. ザハロフ(大和久譯) : 熱處理技術, アグネ 1963
6. 鈴木他 : 材料?熱處理-常識のウソ, 工業材料 Vol.39 No.10 1991
7. 大和久 : 熱處理のトラブルと対策150問, 日刊工業新聞社 1982