

技術解説

켄칭시 발생하는 잔류응력 Formation of Residual Stress during Quenching

황 능 문

한국표준연구소 재료연구실

1. 열응력에 의한 잔류응력

고온에서 유지되고 있던 재료가 냉각이 되면 재료의 내부와 외부의 냉각속도의 차이가 생기게 되고 이러한 차이는 결국 일정한 온도로 유지되고 있던 재료에 내부와 외부 사이에 온도차이를 야기한다. 이러한 온도차이로 비등적이 달라지고 이때 발생하는 응력을 열응력이라 한다.

Fig.1에서 알 수 있듯이 재료의 표면부가 처음에는 내부보다 빨리 냉각되고 더 많이 수축되므로 표면에는 인장응력이 발생하고 내부에는 압축응력이 발생한다. 이때 표면에 발생한 인장응력이 재료의 항복강도보다 크면(Fig.1에 곡선 a) 소성변형이 일어나 인장응력이 감소된다(사선 부분). Fig.1에서 온도차이가 가장 큰 W를 지나면 내부가 표면보다 더 빨리 수축하여 표면 탄성인장응력이 감소

하여(곡선 c) 결국 응력의 부호가 바뀌게 된다. 따라서 Fig.1의 오른쪽 하단과 같이 표면은 압축응력을 받게 되고 내부는 인장응력이 남게 된다. 표면은 압축응력이 되고 내부는 인장응력이 되는 이러한 열적, 기계적인 프로세스에 의하여 발생하는 잔류응력은 상변태를 수반하지 않는 재료에 전형적으로 나타난다.

재료에 따라 잔류응력이 다른 예로, Borchers 등은 Armco 철(0.018%C)을 845°C에 가열 후 165°C의 염욕에 급냉하고 또한 오스테나이트강(0.18%C, 20%Cr, 12%Ni)을 마찬가지로 급냉을 하여 잔류응력을 조사하였다. 전자는 표면부에 12 kg/mm²의 압축응력이 나타났지만 후자는 47 kg/mm²이 나타나 재료의 고온항복강도의 차에 의한 영향이 뚜렷한 것을 알 수 있다.

급냉온도의 영향으로서는, 급냉온도가 높을수록 Fig.1의 W 까지 탄성변형의 차이와 온도차이가 크게 되고 잔류응력의 크기에 영향을 준다. Buhler는 직경 50 mm와 직경 250 mm의 Armco 철(0.025%C)을 각종의 온도로부터 냉각하여 잔류응력을 조사하였다. 단면내 최대의 잔류응력은 중심부의 인장잔류응력이다. 축방향의 잔류응력에 대해서는 직경의 차이에 따라 나타나지 않지만, 원주방향의 잔류응력은 직경에 따라 변한다. 급냉온도가 높을수록 열응력에 의한 잔류응력이 크다.

2. 상변태를 수반하는 재료의 냉각

상변태를 수반하는 재료의 냉각에 있어서 열응력 이외에 상변태에 관여하는 두 상 사이의 비등적이 달라 생기는 부피차이에 의해서도 발생한다. Fig.2에 상변태에 관여하

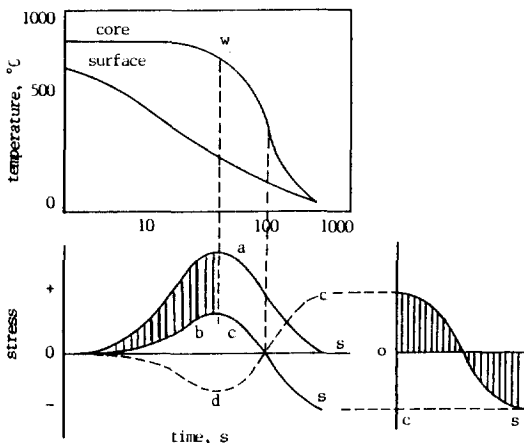


Fig.1. 열응력의 발생.

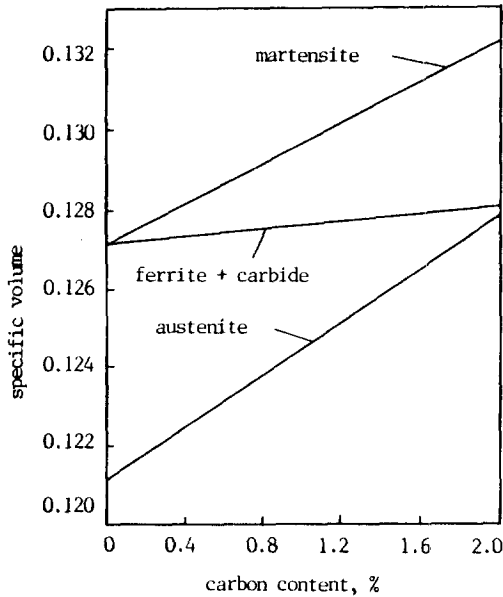


Fig. 2. 탄소강의 각 상의 비용적에 미치는 탄소함량의 영향.

는 각 상의 탄소농도에 따른 비용적을 나타냈다. 이러한 부피차이로 인하여 두 가지의 응력 즉, 열응력과 상변태 응력은 재료의 온도분포, 상변태양상, 열팽창계수 및 고온 항복강도에 따라 변화한다. 이러한 변수의 상호작용으로 최종적인 잔류응력이나 변형이 나타난다. Fig. 3의 위 부분은 실린더형 강 of 표면과 내부에 대한 3개의 다른 냉각곡선을 나타내는 연속냉각 변태 다이어그램이다. Fig. 3의 아랫부분은 각각에 해당하는 표면(실선)과 내부(점선)에 대하여 컴퓨터로 계산된 열응력(가는 선)과 전체응력(두꺼운 선)을 나타낸 것이다.

Fig. 3의 (a), (b)와 (c)는 강의 냉각과 상변화사이에 3가지 유형의 전형적인 작용을 나타낸다. Fig. 3(a)는 강의 표면에서의 상변태가 열응력이 인장에서 압축으로 부호를 바꾸기 전에 표면과 내부의 상변태가 일어난 경우이다. 부피팽창을 수반하는 표면에서의 상변태로 인하여 전체응력이 열응력보다 먼저 부호가 바뀌게 된다. 그 후 내부의 응력이 고온 항복강도를 초과하게 되어 내부에 소성변형이 일어난다. 뒤따르는 내부의 마르텐사이트 상변태로 전체응력의 부호가 다시 바뀌게 된다. 따라서 냉각 후에는 표면에는 인장응력, 내부에는 압축응력이 존재하게 된다.

Fig. 3(b)는 열응력의 부호가 바뀐 후 상변태가 시작하는 경우이다. 이 경우는 표면부의 상변태에 의한 부피증가가

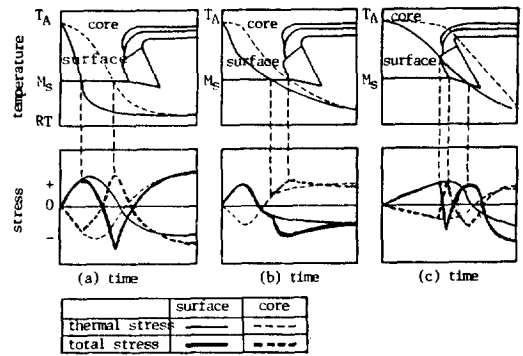


Fig. 3. 표면과 내부의 냉각곡선의 CCT 도표와 해당되는 열응력과 전체응력의 계산 값.

이 부분의 압축응력을 더욱 증가시키고 힘의 밸런스 때문에 내부에는 인장응력을 증대시킨다. 이 경우는 또 상변태로 인한 소성변형은 없다고 가정했기 때문에 잔류응력 분포는 상변태가 없는 재료와 비슷하게 된다.

Fig. 3(c)는 내부의 상변태가 표면부의 상변태보다 늦게 시작하여 일찍 끝나는 경우이다. 여기에서는 표면부와 내부의 응력이 3번 부호가 바뀌게 되고, 최종적인 잔류응력의 분포는 상변태가 없는 재료의 경우와 비슷하게 된다. 이와 비슷한 내용의 연구로 Buhler 과 Scheil은 Fe-Ni 강에서 잔류응력발생에 관하여 극단적인 경우로서 (1) 열응력의 부호가 바뀐 후에 시작하여 실온에서 도달하여도 변태가 완료되지 않는 경우와 (2) 열응력의 부호가 바뀌기 전에 상변태가 시작하여 실온에서 냉각되기 전에 상변태가 완료되는 경우의 응력발생과정을 설명하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 (1)과 (2)의 경우의 냉각시의 표면부, 중간부 및 중심부의 비용적의 변화와 내부응력을 나타낸 것이다. (1)의 경우인 Fig. 4는 냉각시 우선 시간 Z_1 에서 표면부에서 변태가 시작된다. 이때 이미 열응력의 부호는 역전된 상태이다. 여기서 표면부에 부피증가가 더해져, 표면부의 압축응력은 증가하고 중심부의 인장응력도 증가한다. 그러나 시간 Z_2 , Z_3 에 달하면 중심부에 갑자기 부피팽창을 수반하는 상변태가 진행하여 표면부 및 내부의 응력은 최대에 도달한 후 떨어져, 중심부의 상변태 완료 후 응력분포는 역전되어 표면부는 인장응력을 나타내는 분포가 된다. 과정으로서의 이와 같지만 최종적인 응력분포는 열응력과 변태응력의 비율에 따라 달라지는데 즉, 열응력이 우세하면 표면부는 압축응력이 되고 변태응력이 우세하면 표면부는 인장응력이 된다. 또 열응력의 부호가 바뀌기 전에 변태가 시작하는 Fig. 5의 경우는 일반

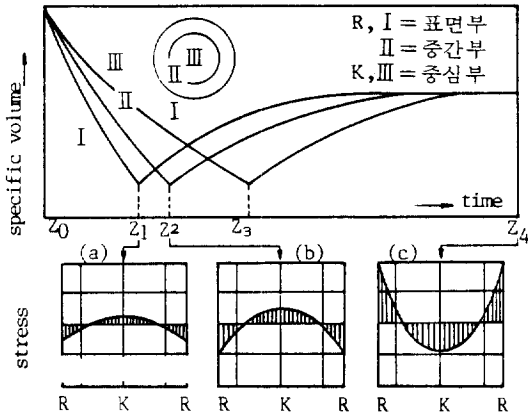


Fig. 4. 열응력의 부호가 바뀐 후 상변태가 시작할 경우의 부피 변화와 응력.

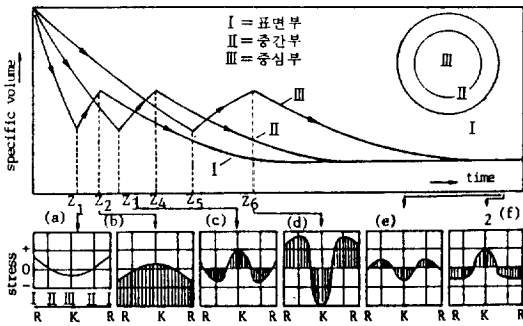


Fig. 5. 열응력의 부호가 바뀌기 전에 상변태가 시작했을 경우의 부피변화와 응력.

적으로 변태개시온도가 높은 경우이다. 이때 시간 Z_1 에서는 응력분포는 표면에 인장, 내부에 압축응력이 나타난다. 여기서 표면부가 변태를 행하면, 표면부의 부피증가로 인하여 즉시 Fig.5(b)와 같이 응력분포가 역전되고, 표면부는 압축응력이 된다. 변태가 더욱 내부로 진전하여 시간 Z_2 에서 Z_5 에 이르는 사이는 변태의 종료 부분과 미종료 부분의 경계인 변태가 진행되는 부분의 주변에는 커다란 압축응력이 나타나 분포 (c)와 같은 상태가 된다. 뒤이어 중심부의 변태는 시간 Z_5 에서 시작하지만, 표면부 인장의 내부응력분포가 나타난다. 이 (2)의 경우는 전자 (1)의 경우와 비교하여 변태개시온도에 따라 그 변태종료 온도도 상온보다 훨씬 높기 때문에 상온까지의 냉각에 의하여 (e)에 나타난 잔류응력분포를 보인다. 또한 변태종료 온도가 더욱 높을 때에는 (f)와 같이 역전하여 표면부는 압축, 중심부는 인장잔류응력이 분포하게 된다.

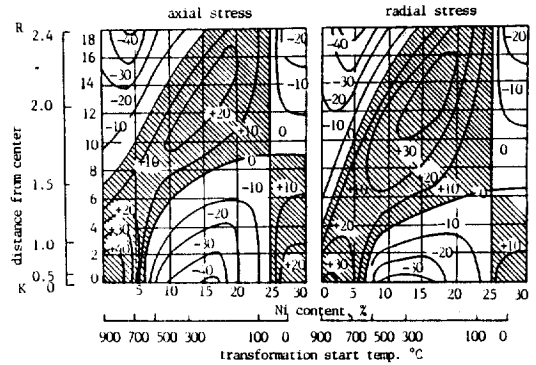


Fig. 6. 축방향과 원주방향의 잔류응력에 미치는 Ni 함량과 상변태개시온도의 영향.

일반적인 각종의 잔류응력분포를 얻기 위하여 Buhler와 Scheil은 Fe-Ni 강에서 Ni%를 다양하게 변화시킨 재료를 급냉하여 잔류응력을 측정하였다. Fig.6에 이들의 잔류응력을 나타내었다. Ni 양의 대소는 변태개시온도의 고저에 대응한다. 따라서 이 결과로부터 변태개시온도가 잔류 응력분포에 미치는 영향을 알 수 있다. 또한 Ni 17%의 강은 변태종료온도가 상온에 달하는 경우이다. 여기서 전술한 상태 (1)는 Ni 17%이상에 해당하고, 상태 (2)는 Ni 17%이하의 경우에 해당한다.

이 결과는 보통의 탄소를 함유하는 일반 강에 바로 적용할 수 없다. 오스테나이트의 고온강도는 탄소량에 따라 영향을 받으므로 Ni을 함유한 경우와 다르다. 그러나 정상적으로는 비슷한 결과를 얻는다고 보고되고 있다.

상기한 설명은 일정한 직경을 갖는 또 특정의 조성을 갖는 강에 관한 것으로, 이들로부터 일반적인 직경이 다른, 또 여러 종류의 강에 대하여 급냉에 의한 잔류응력을 예측하는 데는 불충분하다. 탄소를 포함하는 공업용의 여러 종류의 강에 대해서는 그 과냉 오스테나이트의 거동에 관해서는 항온변태곡선과 급냉시 연속변태곡선과 관련시켜 잔류응력의 발생을 논할 수 있다. 다음은 질량효과가 있는 경우도 포함시켜 일반의 강의 급냉에 의한 잔류응력의 발생에 관하여 설명한다.

Fig.7은 연속변태곡선 상에 서로 표면부와 중심부의 냉각곡선을 그리고 여기에 관련하여 냉각시의 표면부의 응력과 냉각 후의 잔류응력을 나타낸 한 예이다. 이때 중심부까지는 급냉경화하지 않은 경우이다. W는 Fig.1과 마찬가지로, 표면부와 중심부의 온도차가 최대로, 최대의 열응력을 발생하는 시기를 나타낸다. 이때 정확히 시간

W에 있어서 중심부는 먼저 페라이트 변태영역으로 들어간다. 따라서, 내부응력은 Fig.7에서 점선으로 나타낸 탄성화 상태에서의 응력을 고려하면 표면부는 중심부의 변태에 의한 체적증가로 인하여 인장응력이 급증한다. 그러나 이 응력은 이미 이 온도에서 항복강도를 초과하여 실제의 응력은 실선과 같이 된다. 중심부는 열응력의 부호가 바뀌기 전에 변태를 하지만 표면부는 늦어져 Fig.7과 같이 내부응력의 반전기에 마르텐사이트 변태를 행한다. 표면부에서는 이후 그 변태에 의한 부피팽창 때문에 압축응력이 급증하고 커다란 압축응력을 얻게 된다. 이 분포는 열응력형의 분포이다. 중심부까지 충분히 급냉경화를 행하는 경우의 예를 Fig.8에 나타냈다. 재료는 22CrMo 22로 C%는 낮고 마르텐사이트 발생온도는 약간 높지만 중심부는 페라이트를 생성시키지 않고 표면부, 중심부와 함께 마르텐사이트 변태를 행한다. 냉각시 표면부의 변태는 온도차이가 최대가 되는 시간 W의 직후에 발생한다. 이 변태에 의하여 표면부의 응력은 급격히 압축응력으로 변한다. 이 내부응력의 역전은 빠르게 행해진다. 이때도 표면부의 응력은 이 온도에서의 소성압축강도를 초과하지 않고 또, 중심부의 소성변형에 뒤이어 상변태가 표면부로부터 중심부까지 진전하면, 여기서의 부피팽창 때문에 표면부에 압축응력은 급격히 감소하고, 내부응력은 역전하

고 표면부는 인장응력이 된다. 그 결과 잔류응력은 변태 응력형 분포를 보인다. 이 사실로부터 변태응력형 분포를 얻는데에는 시료가 전단면 급냉경화가 가능하고 그 단면적이 작고, 시료가 전단면적 급냉경화가 크고, 또 재료의

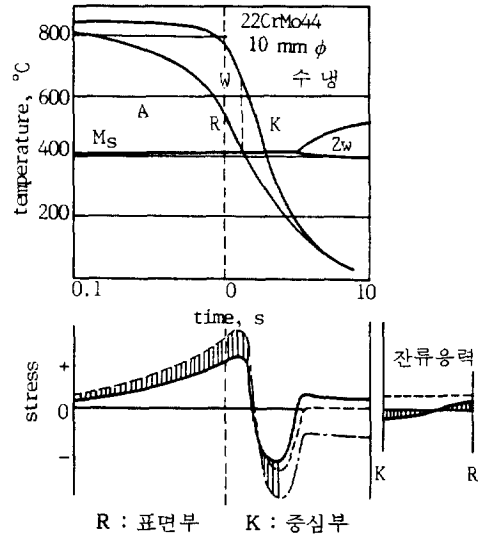


Fig. 8. 중심부가 완전히 마르텐사이트화되었을 경우의 잔류응력.

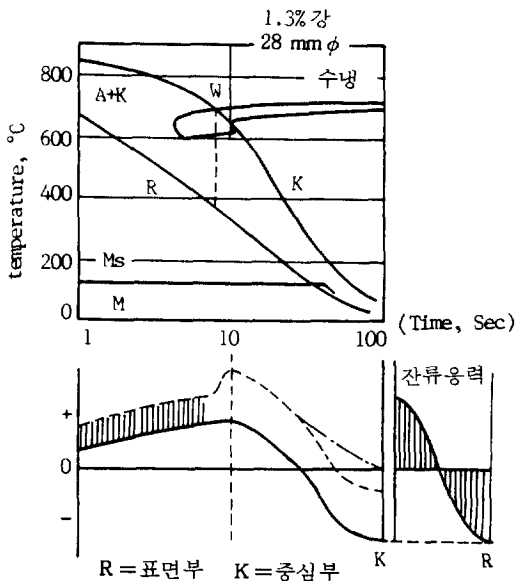


Fig. 7. 중심부가 완전히 마르텐사이트화되지 않을 경우의 잔류응력의 양상.

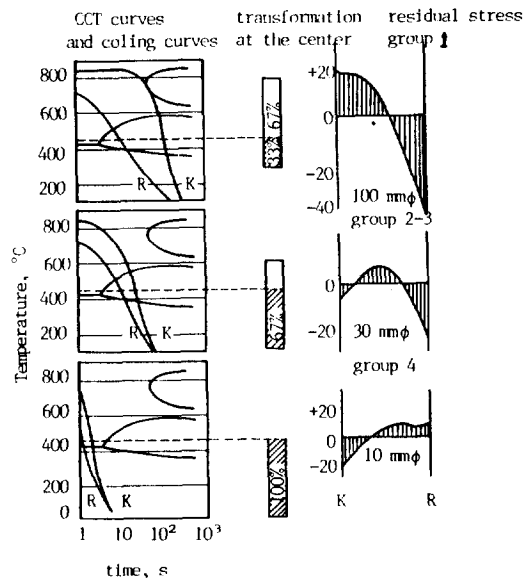


Fig. 9. 22CrMo 44강의 직경변화에 따른 CCT 곡선, 냉각곡선과 잔류응력 사선부분의 %는 마르텐사이트의 양을 나타냄.

고온강도가 크면 용이하다.

이상은 극단적인 경우의 예이지만 실제의 경우에는 조성도 다르고 그 연속변태곡선도 다양하고, 또 직경도 다르므로 잔류응력의 발생에 있어서 다른 판단조건을 고려하지 않으면 안된다. 일반적으로 중심부의 변태가 표면부의 변태후에 나타나는 것을 이용하여 변태응력형 분포를 알 수 있다. 여기에는 각 종의 재료의 연속변태곡선과 실제의 변태거동으로부터 추정하여 중심부가 450°C까지의 냉각으로 그 사이에 페라이트 변태등의 중간단계의 조직변화를 거치지 않고 450°C 이하에서 전부 마르텐사이트 변태를 하면 완전한 변태응력형 분포가 얻어진다고 하는 것이 판단조건이 된다. 실제에 나타나는 많은 종류의 강에 있어서는, 급냉 후 중심부는 마르텐사이트 조직에 앞으로

설명한 중간단계의 변태에 의한 조직이 같이 존재하는 경우가 많다. 이때, 잔류응력분포도 열응력형과 변태응력형의 중간적인 분포를 나타내고, 이들에 대해서도 450°C 근방에서 나타나는 조직량의 상대치를 목표로 취하면 이것을 잔류응력분포에 관련시킬 수 있다.

이와같은 관점에서 22CrMo44 재료(C, 0.19~0.26% Cr, 0.90~1.20%Mo, 0.40~0.50%)의 직경 10, 30, 100 mm의 시료를 물에 급냉하여, 각각 연속변태곡선 및 냉각곡선, 발생하는 내부응력과 잔류응력, 더욱이 각 경우에 450°C이하에서 생성된 마르텐사이트의 양을 조사한 결과가 Fig.9에 나타나 있다. 사선부분은 조직내의 마르텐사이트 양을 나타낸다. 잔류응력은 축 방향의 잔류응력이다.