《기술자료》

진공열처리와 문제점

자료정리 경북대학교 교수 정인상

이 자료는 熱處理(13券 2 (1973) 95－100)에 실린 山中久彦(大阪府立工業技術研究所)의 기술해설을 번역 정리한 것으로, 자료는 묵은 것이지만 열처리 현장에 참고가 될 것으로 판단되어 채택한 것이니 많은 도움이 되기를 기대한다.

1. 글머리

강재를 열처리할 때 산화, 탈탄, 침탄, 질화 등 표면의 변질를 방지하기 위해 지금까지 주로 분위기 가스나 용융염 퀜칭이 이용되어 왔다. 그러나 고온이 되면 금속과 가스, 또는 염과의 반응을 방지하기 위해 분위기를 중성으로 유지하는 일이 매우 어려워진다. 분위기 가스로서 Ar, He, N_2 등 불활성 가스를 사용하면 목적을 달성할 수는 있지만 비용이 많이 들어 실용적으로 불가능하다. 진공은 고온이라하더라도 금속에 대해 불활성이므로 열처리 분위기로서 이상적이다. 그러나 지금까지는 진공 용해, 진공 탈가스, 진공 증착, 진공 소결 등 가열 후 냉각속도에 그다지 문제가 되지 않는 분야에만 사용되었고, 실험실적으로나 소규모의 것에만 이용되었다.

최근 여러 진공기기와 내열재료의 발달에 의해 과거에 비해 진공기술이 현저하게 발전되었다. 더구나 노내 냉각방법을 개량한 진공로(眞空爐)도 개발되었을 뿐만 아니라 열처리 후 소재의 표면상태가 더욱 엄격하게 관리되어야 하거나 Ti, Zr과 같은 활성 금속의 열처리도 필요하게 되는 등, 금속재료의 열처리용 노로서 진공로가 각광을 받고 있다.

한편 진공 밀폐시킨(sealing) 모터를 이용하여 고속 펌프로 불활성 가스를 순환시킴으로서 강제 대류 냉각이 가능한 진공열처리로가 개발되고 오일퀜칭까지 가능한 것이 개발됨으로서 진공열처리 법이 급속하게 발달하게 되었다. 현재는 가스 냉각, 오일 냉각 이외 수냉법까지 채택된 열처리로가 개발되어 있다.

2. 진공열처리에 수반되는 여러 작용

금속이나 합금을 진공열처리 할 때 일어나는 특별한 사항을 정리하면 다음과 같다.

1) 금속의 산화 방지(광휘열처리)
2) 금속의 표면에 형성된 스케일(산화물 딱지) 제거(descaling)
3) 금속의 표면에 부착된 오물, 윤활유 등 제거(탈지)
4) 금속에 흡수되어 있는 가스 제거(탈가스)
5) 금속중으로의 가스 및 원소 침입 작용 방지(침탄, 탈탄, 질화, 황화 방지)

2.1 광휘열처리

금이나 백금 종류를 제외한 대부분의 금속은 공기(산소), 수증기, 이산화탄소와 같은 산화성 가스 중에서 가열하면 산화물을 만든다. 이것은 금속이 산소와 친화력이 있기 때문이며, 그 반응을 화학식으로 표시하면 다음과 같다.

$$M + 1/2\ O_2 \Leftrightarrow MO$$

$$M + H_2O \Leftrightarrow MO + H_2$$

$$M + CO_2 \Leftrightarrow MO + CO$$

산화되기 쉬운 금속은 가열온도에 상관없이 위 식에서 오른 쪽으로 반응이 진행되지만, 금속의 종류에 따라서는 온도나 가스의 조성에 따라 왼쪽으로 반응이 진행되는 경우도 있다.

광휘열처리는 가열 중에 일어날 수 있는 산화반응(오른 쪽으로의 반응)을 방지하여 매끄럽게 빛나는 표면을 얻는 열처리 방법이다. 따라서 이 방법은 종래에는 분위기 가스나 Ar, He, N_2와 같은 불활성 가스 중에서 실시하였다. 그러나 산화하기 쉬운 Cr, Ti, Ta, Mo, W 등의 금속 성분이 있으면 가스 중에 포함된 미량의 산화성 가스와 반응하여 표면 광택이 사라져 버린다. 스테인리스 강도 많은 량의 Cr을 함유하고 있으므로 산화되기 쉬워 표면이 매끄럽게 빛나도록 광내기가 매우 어렵다. 하지만 진공열처리에서는 미량의 산화성가스도 존재하지 않기 때문에 이 문제는 쉽게 해결될 수 있다.

2.2 스케일 제거

금속의 산화물은 고온이 되면 다음 식과 같이 분해될 수 있다.

$$2MO \Leftrightarrow 2M + 2O$$

$$2O \Leftrightarrow O_2$$

이 식에서 오른 쪽으로 일어나는 반응을 해리(解離) 반응이라고 부르며, 해리반응에서 생긴 가스로 인해 나타나는 압력을 해리압이라고 부른다. 두 번째 반응인 $2O \Rightarrow O_2$ 반응이 일어날 때의 해리압 Po_2가 분위기 중의 산소압력보다 크면 오른 쪽으로 반응이 진행되지만, 반대로 산소압력이 해리압보다도 클 때는 왼쪽으로 반응(산화반응)이 진행된다. 따라서 이론적으로 볼 때, 높은 진공도에서는 늘 오른 쪽으로 반응이 진행되고, 결과적으로 산화물 중의 산소가 제거되기 때문에 매끄러운 표면을 얻을 수가 있다.

그림 1에는 여러 산화물의 평형(平衡) 해리압을 정리하여 놓았다. 일반적으로 공업적으로 이용되는 고진공도는 1×10^{-6} Torr 정도이고, 이 이상의 고진공을 얻기는 매우 어렵다. 그러므로 그림 1과 비교하여 보면 실제로 금속을 진공열처리로 속에서 가열한다고 하여도 거의 대부분 금속은 산화되는 상태에 있다. 그러나 실제로는 산화물의 해리압보다도 훨씬 높은 압력에서 진공열처리를 하는데도 불구하고 무산화 광택이 얻어지고 있다. 이 점은 해리 반응을 단순히 평형 해리압만으로 검토할 수 없는 점이지만 열처리 측면에서 보면 아주 좋은 결과임에 틀림없다.

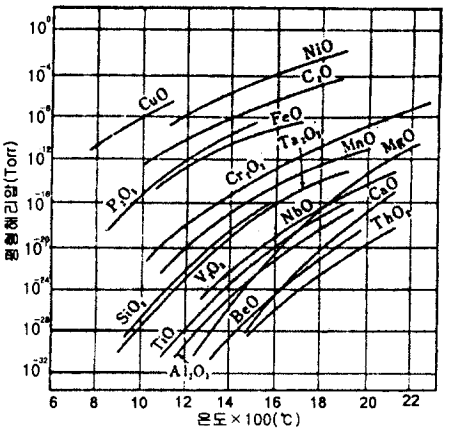

그림 1. 금속산화물의 평형해리압

2.3 탈지

강선(wire) 등의 인발(선뽑기)공정에서는 대부분 윤활제를 사용한다. 윤활제가 부착된 것을 그대로 마지막 선뽑기 작업을 하면 표면 광택을 얻을 수가 없다. 이 때문에 최종 공정 전에 반드시 산세(酸洗)처리를 한다. 그러나 진공 어닐링처리를 하면 산세처리를 하지 않고도 광택 있는 표면을 얻을 수가 있다. 사용되는 윤활제가 보통 지방(脂肪)족에 속하는 C, H_2, O_2 등의 화합물이므로, 이것을 가열하면 분해되어 수증기나 이산화탄소로 되는 까닭에 진공열처리가 유효한 것이다.

2.4 탈가스

진공 용해한 금속이라 할지라도 공기 중에서 열처리하면 여러 종류의 가스가 금속 중으로 흡수되어 고용된다. 특히 Ti, Zr 등은 다량의 H_2를 흡수하며, 가스를 흡수하고 있는 금속은 기계적 성질이 크게 나빠진다. 미량의 가스도 금속의 기계적 성질에 큰 영향을 주게 되므로, 미량의 가스 원소를 제거하기 위해서는 진공열처리가 필요하게 된 것이다.

진공열처리에 의한 탈가스 작용은 Henry의 법칙으로 설명할 수 있다. 즉 고체에 흡수되어 용해되는 가스는 그 주위 분위기 중의 같은 종류의 가스압력에

비례한다.

$$C = kP$$

여기서 C는 고체에 흡수되어 있는 가스 량, k는 고체의 온도에 따른 정수이고, P는 같은 종류 가스의 외부 압력이다. 진공이 되면 P가 0에 접근하게 되므로 C가 낮아져서 탈가스 작용이 충분히 일어나게 되는 것이다.

2.5 가스 원소 침입방지

철강재를 광휘열처리할 때 사용되는 분위기 가스는 가열온도에서 철강 중의 C와 가스 중의 C 포텐셜이 동일한 조건에서 가열되어야만 한다. 만일 이 평형이 깨어지면, 철강은 침탄이 되거나 아니면 반대로 탈탄이 되거나 한다. 또한 동시에 가스 중에 미량이라도 S가 있으면 이것의 반응도 일어난다. Ti, Mo 등은 고온에서 H_2는 물론이고 N_2도 흡수하여 취성을 나타내게 된다. 그렇지만 진공열처리에서는 이러한 현상이 완벽하게 방지된다.

이상은 다른 열처리법에서는 얻을 수 없는 진공열처리의 장점들을 열거한 것이다. 그러나 진공열처리에서도 문제점이 없는 것은 아니다. 그 중의 하나로서 증기압이 높은 합금원소는 진공열처리 도중에 증발하여, 성분이 줄어든다. 예를 들어 높은 증기압을 가진 Zn이나 Mg을 함유한 합금을 진공열처리하면 이 성분의 이탈이 일어나므로 표면 광택을 얻을 수가 없다. 또한 진공로의 발열체가 금속인 경우에는 발열체의 성분이 증발하여, 발열체의 수명이 짧아지는 것은 물론이고 증발된 금속이 여러 장소에 증착되어 예상치 못한 문제의 원인을 제공하게 된다. 이처럼 금속의 증기압은 아주 중요한 문제를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그림 2에는 여러 금속의 증기압을 실어 놓았다. 또 다른 이 방법의 단점으로는 대류에 의한 열전달이 거의 없고, 복사에 의한 열전달만 있는 점이며, 진공열처리 장비가 다른 방법들의 장비보다 비싼 것도 단점으로 들 수 있다.

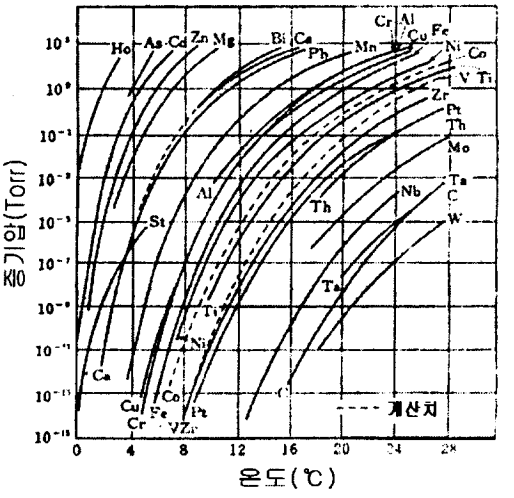

그림 2. 순금속의 증기압

3. 진공열처리의 문제점

3.1 광휘성

진공열처리한 재료의 광휘성은 일반적으로 양호하다. 특히 진공 가스퀜칭재의 광휘성은 진공 유냉 퀜칭재보다도 우수하다. 그 원인은 기름 때문이며, 기름 중의 탄소, 수분, 산소 등과 표면이 반응하거나 이들이 부착하여 표면의 광택을 죽이는 것으로 판단된다. 그러나 기름의 특성을 좋게 하면 이 점도 해결될 수 있다.

또한 진공 중에 재료를 고온으로 가열하여 오스테나이트화 하는 도중에 합금원소가 승화되거나 증발하는 바람직하지 못한 현상도 우려된다. 특히 Cr, Mn 등이 함유된 공구강의 경우에 탈원소 현상이 일어나 광휘성이 나빠지는 문제가 발생한다. 이 현상이 심해지면 표면결함으로까지 발전될 수도 있다. 이에 대한 대책으로는 ①오스테나이트화 도중에는 압력을 크게 낮추지 말거나, 아니면 ②노내 압력을 저온에서 고진공으로 배기한 뒤 고순도의 질소가스로 치환시킨 다음, 어느 정도 이상으로 압력을 높인 후에 가열하는 방법이 있다. 냉간 다이스 강에는 로터리 펌프를 이용하여 $10^{-1} - 10^{-2}$ Torr 정도에서도 좋은 결과를 얻을 수 있다.[1]

3.2 경화능

진공열처리한 여러 재료의 크기와 급냉 경도와의 관계를 표 1에 나타냈다[2]. 이 표를 보면 다이스강의 경우, 가스 퀜칭에서 작은 것은 문제가 없으나 직경 100mm 이상의 것은 경도가 H_RC 60 이하로서 불완전 퀜칭이 된다. 그러나 기름 퀜칭에서는 직경 164mm인 것도 H_RC 60 이상 되어 대형 금형 종류의 열처리에는 오일 퀜칭이 바람직함을 알 수 있다.

가스 퀜칭의 경우 질량효과를 조사한 결과가 그림 3이다[1]. 표면경도를 보면 SKD11에서는 직경 40mm를 경계로 경도치가 떨어지고 있다. SKD1에서는 재료의 직경이 커질수록 경도치가 서서히 떨어지고 있지만 그래도 경화된 상태에 있다. 단면 경도 분포를 보면 SKD1에서는 1/4D 및 중심부에서 30mm를 경계로 경도가 낮아지고, SKD11에서는 이 재료의 S곡선으로 추측하건대 직경 50mm의 중심부까지는 완전 경화될 것으로 생각되었지만 1/4D 및 중심부에서 40mm를 경계로 낮은 경도치를 나타내고 있다. 이것은 재료 부위별로 가열시의 승온속도 차이가 탄화물이 오스테나이트에 재고용되는 량에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

진공열처리에서는 발열체로부터의 복사열로 가열되기 때문에 분위기로나 염욕로에 비해 가열속도가 느리다. 진공열처리로에서도 발열체의 위치 설계를 통해 빠른 승온속도를 얻을 수 있게 하였으나 염욕로에 비하면 1/6 정도로 느린 편이다.

표 1 진공열처리한 각종 재료의 · 칭 경도

재료 \ 크기	50mm 이하		50−100mm		100mm 이상	
	가스퀜칭	기름퀜칭	가스퀜칭	기름퀜칭	가스퀜칭	기름퀜칭
SKH 9, SKH 55	64	−	62	−	60	−
SKD 11	62	63	61−62	63	59−60	60−61
SKT 4	−	62	−	60	−	58
SKS 3	−	64	−	60	−	55
SUJ 2	−	66	−	64	−	58
SK 3	−	64	−	62	−	50−54
SCM 4, SNCM 8	−	55	−	50	−	45
S55C	−	60	−	55	−	50

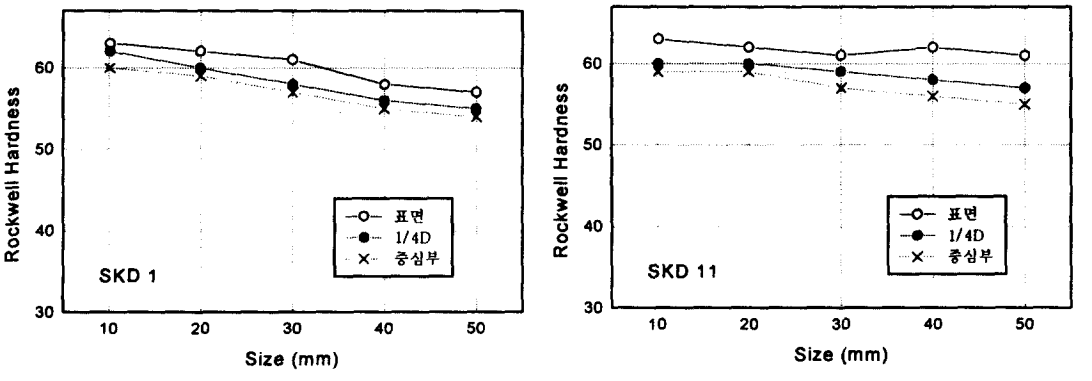

그림 3. 진공열처리한 SKD과 SKD11 의 직경과 퀜칭경도와의 관계

그림 4는 직경 20 및 50mm 소재를 이용하여 온도 제어용 계기온도와 실제 소재 온도를 비교한 것으로 지시온도 400℃를 넘으면 늦어지기 시작하여 600℃를 넘으면 중심부의 온도는 승온속도가 빨라지고 있다. 어떻든 지시온도와 실제 온도와는 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 중간에 800℃에서 60분간 예열을 하고 승온시키면 두 온도는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 가열물의 크기에 따라 적당한 온도에서 예열 유지가 필요하다. 복사가열이기 때문에 발열체와 마주보는 부분은 가열속도가 빠르고 그렇지 못한 부분은 속도가 느린 점도 유의할 필요가 있다.

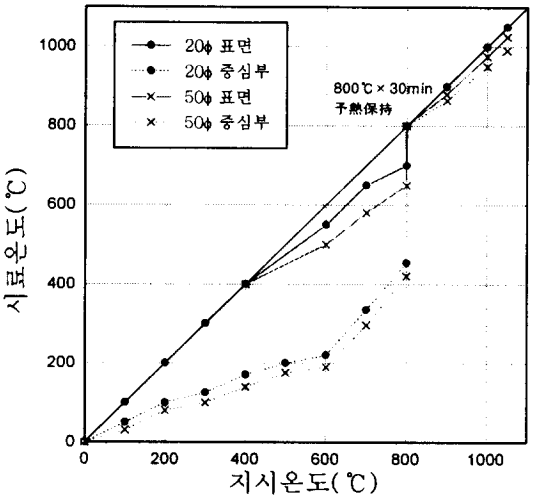

그림 4. 진공열처리로의 지시온도와 소재온도와의 관계

3.3 열처리 변형

진공열처리한 재료는 열처리 변형이 거의 없다. 그러나 그 원인은 아직 명확하게 밝혀져 있지 않다. SKH9 냉간 단조용 펀치를 N_2 가스 냉각에 의해 진공열처리를 한 후 변형을 조사한 결과, 염욕 열처리에서는 열처리 후 마무리 가공을 위하여 15/100 − 30/100mm 정도 붙여서 가공하여야 했으나, 그 반 정도인 8/100mm를 붙여 열처리하여도 만곡에 의한 변형은 최고 5/1000−30/1000mm 정도로 아주 낮았다고 보고되어 있다.

또한 냉간 다이스용 중공형(中空型) 강을 N_2 가스 냉각에 의해 진공열처리를 한 후 열처리 변형을 조사한 결과, 변형은 거의 (−)로 발생하고 그 크기는 최고 1/1000 − 13/1000로 아주 작았으며, 종래 염욕로에 의한 것보다 1/5 −1/10 정도라고 한다. 따라서 마무리 여유를 극도로 작게 할 수 있으므로, 마무리 공정 절약, 시간 절약 등 원가절감에 크게 기여할 수 있다.

SKD11의 진공열처리와 염욕열처리 한 것의 변형을 비교하여 보면, 그림 5와 같다.[2] 단조방향 Y에 나란하게 시료를 채취하고, 진공열처리 퀜칭하면 단조방향 C가 늘어나고, 그 직각방향인 A_1, A_2, B_1, B_2 등은 수축한다. 반면에 염욕 퀜칭한 것은 A_1은 변형이 없고, A_2, B_2가 수축하여 끝이 오므라진 모양이 된다. 단조방향 X로 시료를 만들어 진공열처리

재료 절단	측정 위치	진공열처리 1030℃ N_2냉각	염욕열처리 1000℃, 250℃
단조방향 (X)	A1	+0.04	+0.02
	A2	+0.04	−0.08
	B1	+0.05	−0.01
	B2	+0.03	−0.12
	C	+0.01	−0.01
경도(H_RC)		63.0	61.0
단조방향 (Y)	A1	−0.03	0
	A2	−0.06	−0.07
	B1	−0.02	−0.03
	B2	−0.04	−0.08
	C	+0.05	+0.04
경도(HRC)		63.0	64.5

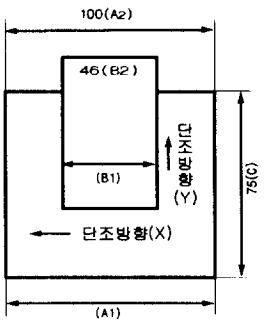

그림 5. SKD11의 열처리변형

퀜칭한 것은 A_1, A_2, B_1, B_2 모두가 늘어난다. 그러나 염욕 퀜칭한 것에는 단조방향 A_1는 팽창하였지만 A_2, B_2는 수축하여 역시 끝이 오므라진 모양으로 변형된다. 이상의 결과에서 퀜칭 변형은 단조방향으로 크고, 그것과 직각방향으로는 작다는 변형형태를 보이는 반면, 염욕 퀜칭재는 일정한 법칙에 따르지 않고 복잡한 변형을 일으키고 있다는 것을 알 수 있다.

rotary 다이스 용 SKD11의 진공열처리와 염욕열처리 한 것의 변형을 비교하여 보면, 그림 6과 같다. 950℃에서는 퀜칭이 불완전하게 되어 크기 변화가 0.04%로 거의 나타나지 않는다. 1050℃에서는 가열시간에 의한 영향은 거의 보이지 않고 0.08%로 아직도 아주 작다. 1100℃에서는 이제 변형의 크기가 0.19%로 커진다. 반면 염욕가열한 것은 진공열처리 한 것보다 한층 변형의 크기가 커서 0.25%로 되며, 3배 이상 증가한다. 그 원인은 진공열처리와 염욕에서 가열 승온속도의 차이로 판단된다.

진공 중에서는 열의 전달이 복사에만 의존하므로 승온속도가 아주 느리다. 때문에 표면과 중심부의 온도차가 작고, 따라서 비교적 균일 팽창과 수축이 일어난다고 생각된다. 이에 비해 염욕가열에서는 표면과 중심부에 온도차가 생기기 쉽고, 이 때문에 팽창의 정도가 달라지며, 특히 변태점을 통과할 때는 내부와 외부에 큰 변형량의 차이가 생길 것이고, 이것이 탄성한계를 넘으면 큰 변형을 남기는 것으로 추측된다.

퀜칭조건	경도(H_RC)	템퍼링 조건	경도(H_RC)	템퍼링조건	경도(H_RC)
950℃×30min	53.5	160℃×2hr	53	160℃×2hr	53
1050℃×15min	62.5	180℃×2hr	61	470℃ ×2hr	57
1050℃×30min	63	〃	61	〃	57
1050℃×60min	62.5	〃	61	〃	57
1050℃×90min	62.5	〃	61	〃	57
1100℃×30min	61	〃	59.5	〃	56

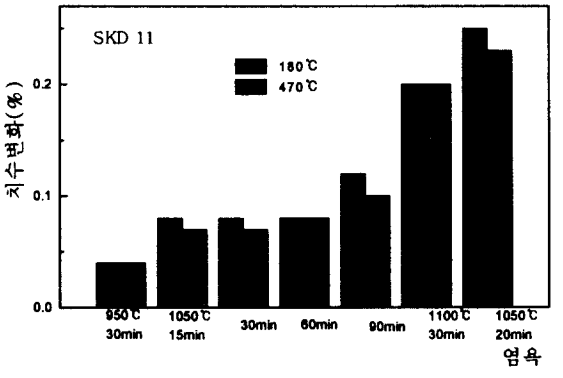

그림 6. 진공열처리한 냉간다이스강의 변형크기

3.4 실용화 수명

진공열처리한 소재의 실제 수명은 어느 정도인가를 확인하는 것은 실용상 아주 중요하다. 열처리 과정에서 가스가 흡수되었거나 표면에 탈탄층이 있는 경우, 기계적 성질이 크게 떨어지나, 진공열처리한 소재는 가열 중에 탈가스 효과에 의해 제품의 성질은 높아지고 내마모 특성도 향상된다고 인식되고 있다. 그림 7은 냉간 다이스용 SKD11을 수명 평가 시험하기 위해, 스테인리스 강 나사의 냉간 전조 다이스에 적용시킨 결과이다. SKD11은 마무리 래핑도 필요 없이 진공열처리한 채로 사용할 수 있어서 더욱 능률적이다. 염욕처리한 다이스에서는 평균 성형수가 2−2.5만 번인데 비해 진공열처리한 다이스에서는 대략 8−9.5만 번이나 되어 약 3−4배 수명이 연장됨을 확인할 수 있다.

그러나 진공열처리가 어떠한 경우라도 무조건 좋다라고 하기 보다는 사용하는 강종이나 사용하는 목적에 따라 진공열처리 조건을 최적화 하여야만 이와 같은 효과를 얻을 수가 있을 것이다.

3.5 진공열처리용 퀜칭 기름

진공 열처리의 기름 퀜칭의 경우, 가열에서 퀜칭 때까지 동일한 낮은 압력에서 이루어지는 것은 아니다. 그림 8에 나타낸 대로 100Torr 이하의 압력에서는 전혀 경화되지 않는다. 대기압 아래에서 한 것과 같은 경화 경도를 얻기 위해서는 10^{-2} Torr 압력에서 가열하여 퀜칭 직전에 불활성 가스를 불어넣어 약 200 Torr 정도의 압력으로 만든 후 퀜칭하여야만 된다. 그러나 이때는 대기압보다 낮아진 용기 내에 있는 기름의 냉각능력이 달라진다.

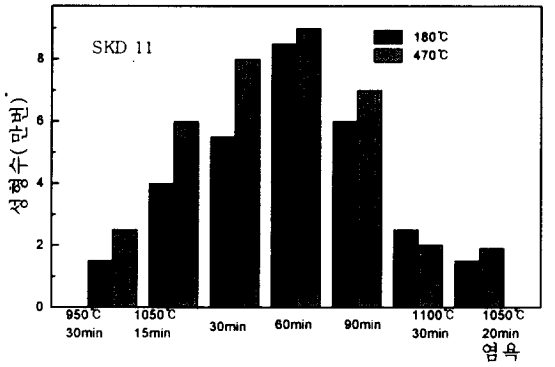

그림 7. 진공열처리한 냉간다이스강의 수명비교

그림 9에 나타낸 것처럼 진공 속에서 냉각유의 냉각능력을 비교하여 보면, 낮은 압력에서는 증기막(蒸氣膜) 시간이 길어지고, 특성온도가 낮아지고 있다. 동시에 저온까지 비등단계가 나타나서 저온에서의 냉각속도는 대기압에 비교해서 훨씬 큰 경향을 나타낸다. 이런 이유에서 진공열처리용 냉각유가 갖추어야할 성질은 ① 증기압이 낮을 것, ② 광휘성이 좋을 것, 그리고 ③ 경화성능이 좋을 것을 들 수 있다. 또한 퀜칭유의 기본이 되는 것은 기질유(base oil)이고, 그 선택이 중요한 포인트가 된다. 냉각능을 향상시키기 위해서는 첨가제로서 감압중에서도 광휘성과 냉각능을 떨어뜨리지 않는 것을 선택할 필요가 있다.

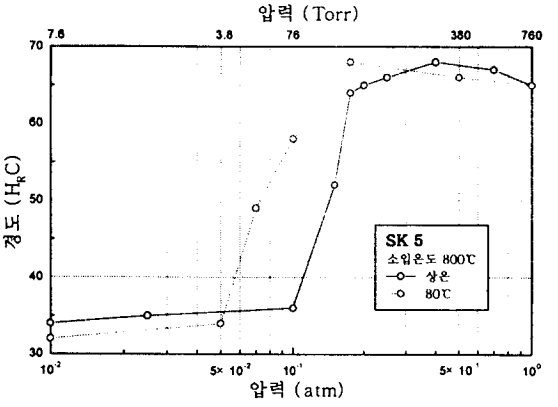

그림 8. 퀜칭직전의 압력에 의한 퀜칭경도의 변화

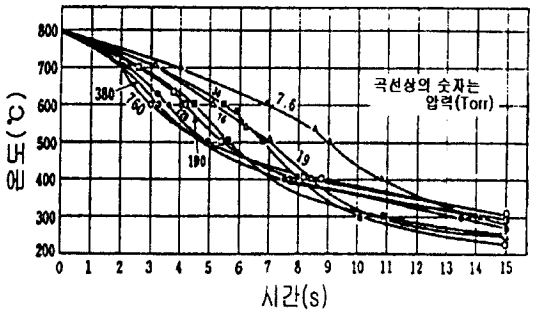

그림 9. 압력에 의한 냉각곡선의 변화

4. 글 마무리

이상 진공열처리의 특징과 진공열처리할 때의 경화능, 광휘성, 열처리 변형 등에 관해 알아보고 수명이 얼마만큼 연장되는가를 알아보았다.

모든 분야에서 점차 고부가가치를 추구하고 있는 현시점에서 품질을 고급화하고, 신뢰성을 높임으로서 열처리 분야의 낙후성을 탈피하여 전문성을 높일 수 있다. 기계공업의 기반은 기초 설계 뿐만 아니라 궁극적으로 각 종 부품의 특성을 열처리를 통하여 제고하여야만 튼튼해 질 것이다. 기타 열처리 분야의 환경 문제와 관련해서도 종래의 염욕 등에 의한 처리보다는 진공열처리를 활용함으로서 환경오염도 줄이고,

작업자들의 작업의지도 높일 수가 있을 것이며, 수요가의 요구도 만족시켜 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1) 山中, 中村, 石神 : 大阪府立工業奬勵館報告, 58 (1972)12

2) 杉山, 山本 : 熱處理, 10(1970)316

3) 山中, 中村 : 大阪府立工業奬勵館報告, 55 (1971)1

4) 朝倉 : 工具鋼技術研究會テキスト, (1970)1

5) 山中 : 特殊鋼, 5(1972)11

6) 山中, 中村, 石神 : 大阪府立工業奬勵館報告, 56 (1972)50

7) 山中, 中村 : 大阪府立工業奬勵館報告, 54 (1971)32