《기술자료》 열처리공학회지, 제 23 권 제 2 호 (2010) pp. 104~111

吉田勝彦
일본특수강(주)

* 이 글은 日本 "熱處理" 제 47권 2호, p. 85~91에 게재된 내용을 번역 정리한 것임.

열처리 실패와 그 대책(1)

지 태 구
홍익대학교 금속공학과

서 언

강 또는 특수강을 열처리 할 때, 특히 퀜칭, 템퍼링 시에 현장에서 발생하는 실패를 살펴보고 그 원인과 대책을 구명해보자.

퀜칭, 템퍼링 작업시에 발생하는 실패를 분류해보면

1. 경도 불량(목표경도 보다 낮거나 높은 경우)
2. 균열 발생(가열, 열응력 균열)
3. 비틀림 (치수 변화) 으로 구분 할 수 있다.

여기서는 이들 3대 불량의 원인을 알아보고 각각의 대책을 서술하여 현장기술자에 도움이 되고자 한다.

1. 경도 불량

목표경도 (기계적 성질)로 하려고 퀜칭을 하였으나 경도가 너무 낮거나, 또한 템퍼링 후 너무 높거나 낮아지는 경우가 있다.

공구강의 퀜칭에서 목표경도보다 너무높거나 낮으면 내마모성 강성 등이 부족하여 공구로서의 성능이 충분하지 못하여 불량이 나게 된다.

구조용강의 퀜칭, 템퍼링 후 경도가 목표경도로부터 벗어나 너무 높거나 낮아도 요구되는 기계적 성질을 만족하지 못한다. 전자는 연성의 부족, 후자는 인장강도가 부족하게 되어 모두 재 열처리를 해야 한다.

이와같이 경도 불량을 일으키지 않게 하는 것이 열처리에서가장중요하며, 특히 공구강의 경우는 경도 불량 때문에 재 가열을 하게 되면 내부응력이 증가하여, 가열 시 균열이 발생하기 쉽고 또 반복가열에 의한 산화, 탈탄 등의 치명적인 결함과 직결되기 때문에 각별히 주의하지 않으면 안 된다. 템퍼링시의 경도불량을 미리 템퍼링 성능곡선과 과거 실적으로 추측을 정확히 하여 방지해야 하므로 항상 자료를 수집, 정리 해 두어야 한다. 다음에 이들 불량 원인을 열거 하고 각각의 대책을 알아보자.

1.1 설비 불량

열처리의 기초는 우선 온도의 정확성이다. 열처리 기술을 습득하여도 온도가 부정확한 열처리 설비를 사용하게 되면 퀜칭, 템퍼링 모두 만족한 결과를 얻지 못한다.

그림 1에 대표적인 열처리로의 가열방식을 나타내었다.

그림 2에 가열방식의 차이에 의한 로내 온도 분포의 크기를 나타내었다.

그림 2에서 하방 가열식로의 온도 분포가 가장 양호하며 측면가열로가 다음으로 직접가열로가 가장 나쁘게 나타났다.

예를 들면 SK3 탄소강을 표준 퀜칭 온도 760~820°C의 평균 인 790°C에서 퀜칭 한 경우, 그림 2에서와 같이 코크스로 가열하는 화상에서 가열하면 공구가 장소에 따라 최저 750°C에서 최고 850°C까지 온도가 되어 750°C 부분은 퀜칭시에 불완전

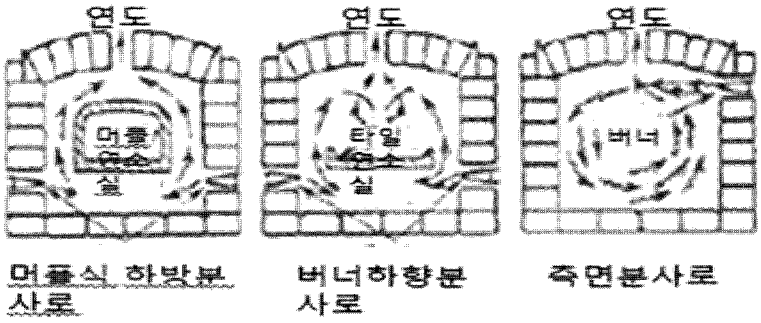

그림 1. 대표적인 열처리로의 가열방식.

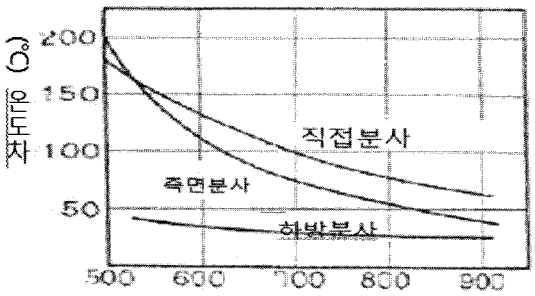

그림 2. 가열방식에 따른 로내온도 분포(℃).

퀜칭 조직으로 되어 경도는 규격 HRC 63보다 낮고, 830℃ 부분은 결정립이 조대화 하여 인성이 크게 저하 하여 사용중에 결손사고의 원인이 된다. 측면 가열식로 에서는 최저 760℃, 최고 820℃로 겨우 표준가열온도 범위에 들어가고, 하방가열식의 경우는 최저 775℃, 최고 805℃로 여유있게 표준가열온도 범위에 들어가 양호하다.

따라서 온도분포가 양호한 가열방식의 로를 선정하는 것이 필수 조건이다. 로내의 온도 분포를 좋게 하기 위해 로내에 내열강재로 된 순환 팬을 부착한 전기로도 출현하였다. 또 염욕로도 소형은 용융염 대류작용에 의해 온도 분포가 좋으나 대형은 아래 부분과 윗부분의 온도차가 의외로 크므로 주의해야한다.

더욱이 그림 2에서와 같이 템퍼링 온도 범위(약 600℃ 이하)로 되면 온도차가 심해지므로, 공구강의 저온템퍼링(약 200℃)용으로는 교반 장치를 부착한 템퍼링로를 사용하면 온도정밀도를 약 25℃로 유지할 수 있다. 또 온도 측정용 계기, 열전대 등의 보수점검을 게을리 하면 안 된다. 수년전 모 일류 공구 메이커가 고속도강 완성공구 열처리시 퀜칭 온도 측정 등 열전대의 오류로 다량의 불량이 발생한 예가 있다. 열전대는 필히 접속계기와 함께 최소 1개월에 1회는 표준 열전대와 계기 또는 전위차계로 정밀도를 점검해야한다.

점검을 마친 열전대는 그림 3(a)와 같이 로의 들여다보는 구멍으로 볼 때 열처리 재와 열전대 보호관이 일부 겹치게 보이도록 삽입하고 항상 열처리 재와 열전대 보호관의 색을 비교해 보아야한다. 그림 3(b)와 같이 이들 색이 확실히 다르면 온도계에 표시되는 온도와 열처리 재의 온도와는 다르며, (c)와 같이 양자의 색을 전혀 식별할 수 없으면 온도가 같은 것을 나타낸다.

이것을 게을리 하면 다음과 같은 실패를 초래하는 경우가 있다.

즉, 열전대 내 삽입부의 밀폐도가 나쁘거나, 충분히 깊이 삽입이 안되면 열전대는 틈새의 바람으로

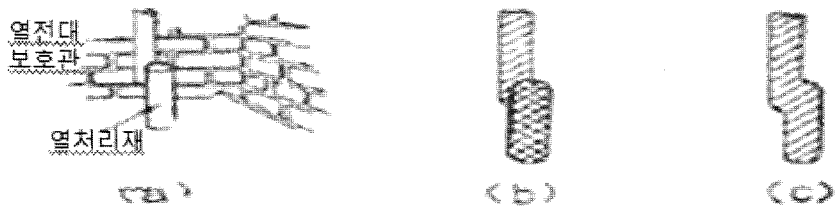

그림 3. 열처리재와 열전대와의 관계.

인해 냉각되기 쉽다. 따라서 열전대 색을 관찰할 수 없고 온도계의 지시온도는 로 중앙에 있는 열처리재 온도 보다 높아 열처리재는 과열조직으로 되어 전부 불량이 발생하게 된다.

1.2 소입성과 질량효과

JIS의 열처리 온도 표준 항목에 퀜칭 난을 보면, 그 냉각법에 구조용 합금강, 특수용도강에도 수냉, 유냉, 공냉이 있다.

즉, JIS 규정에 의하면 구조용 합금강에서는 직경 25 mm × 길이 약 200 mm의 시편을, 공구강에서는 약 15 mm 각봉 또는 환봉, 길이 약 200 mm의 시편을, JIS 에 나타낸 열처리를 하여 규정의 기계적 성질 또는 퀜칭, 템퍼링 경도를 만족해야한다.

이들 규정에서와 같이, 같은 크기의 시편에 대하여 같은 정도의 경도 또는 기계적 성질을 얻기 위해서 어느 강종은 수냉 해야만 규정을 만족할 수 있고, 어느 강종은 공냉으로도 여유있게 만족한다. 이 경우 전자를 소입성이 작은 것, 후자를 소입성이 크다고 한다.

모든 강은 그 굵기에 따라 차례로 퀜칭을 해서 이어서 경도, 기계적 성질과 함께 규격을 만족하지 않거나, 다시 단면경도를 측정해보면 표면에서 내부로 들어 갈수록 경도가 감소하여 U자형의 곡선으로 된다. 이것을 일반적으로 U곡선이라한다. SKS-2 U 곡선의 예를 그림 4에 나타내었다.

이와 같이 같은 치수에서도 강종에 따라 소입성이 다르나, 같은 강종에서도 질량이 커지면 내 · 외부의 경도차가 커지게 되는 현상을 질량효과라 한다. 따라서 어떤 크기의 공구를 열처리 하는 경우 선정된 강종의 소입성 질량효과를 고려하지 않고 퀜칭하면 경도가 만족하지 않은 결과를 가져올 수 있다.

이것의 대책으로서 열처리하는 재료의 퀜칭능과 질량효과를 나타냈다. 조미니 곡선, S곡선, U곡선 등을 미리 조사해 두어야한다.

그림 5에 대표적인 냉간공구강의 S곡선을 조합하여 나타내었다.

SK4 < SKS2 < SKD1 < SKD11 < PDAH-1 순으로 퀜칭능이 커지고, 질량효과가 작다.

SKD11, PDAH-1의 실용 공구의 퀜칭은 공냉으로도 충분함을 알 수 있다. 그래서 공구 등을 설계할 때는 그 크기보다는 적절한 강종을 선정하지 않으면 안 된다.

1.3 산화, 탈탄

구조용 합금강은, 완성부품을 열처리 하는 경우에는 당연히 표면층에 산화, 탈탄층을 생성하므로, 일반적으로 조질처리 후 경도가 절삭가공 가능 범위내에 있는 경우가 많아 열처리 전에 산화. 탈탄층의 깊이를 예측하여 절삭 할 수 있도록 살을 두껍게

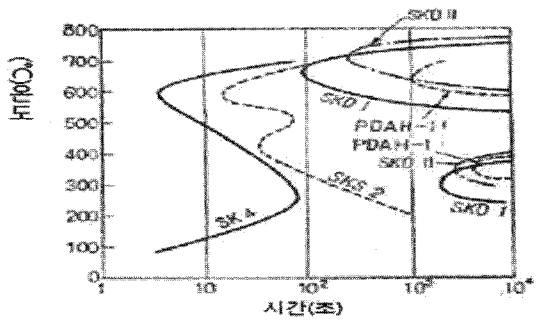

그림 5. 대표적인 냉간공구강의 S곡선.

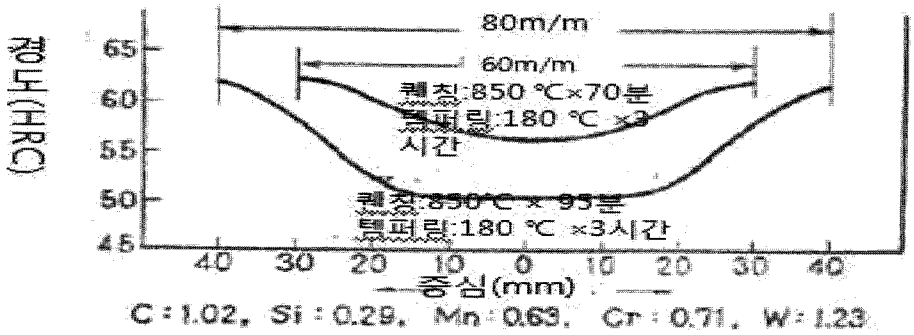

그림 4. SKS-2 퀜칭, 템퍼링 U곡선.

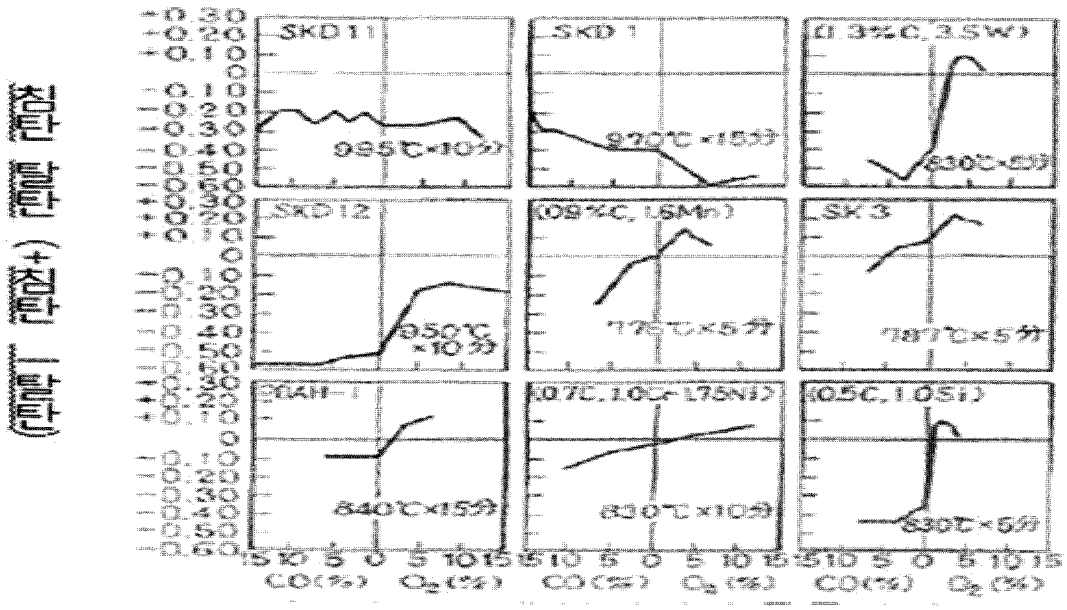

그림 6. 가스로내 분위기와 공구강의 표면 탈탄과의 관계 (표면에서 0.06 mm 깊이에서 평균 탄소량).

하는 경우가 많다.

그러나 공구강 부품의 경우는 조질 처리 후 경도가 높아 국부적인 연마로 수정하는 외에는 가공이 전혀 불가능하기 때문에 마무리 상태로 열처리 하는 경우가 많다.

그래서 완성 공구 부품을 열처리 할 때 산화, 탈탄이 생기면 치명적인 결함이 된다. 완성공구 표면이 산화 되면 치수가 마이너스로 되어 표면에 미소 균열이 계속 증가하여 조기 피로 균열의 원인이 되고 또 탈탄을 일으키면 표면경도 불량으로 조기마모, 조기피로파단, 특히 고속도강에서는 퀜칭 시에 표면균열의 원인이 된다.

이들, 산화. 탈탄현상의 주원인은 당연히 가열로 분위기중 O_2, CO_2, CO의 양에 영향을 받으며 이들 가스양과 탈탄과의 관계를 조사하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다.

그림에 9종류의 공구강을 그림 중의 각 열처리 조건에서 가스로 내에서 가열한 경우 O_2%와 CO% 양이 침탄(+)과 탈탄(-)에 미치는 영향을 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 저합금 공구강 그래프에서는 CO%가 많은 환원성 분위기에서는 탈탄을 보이고 O_2%가 0~5%에서는 오히려 침탄 현상을 보인다. 이것에 반하여 고합금강 그래프의 SKD1, SKD11, SKD12에서는 모든 경우에 탈탄 되는 것을 보이고 있다. 그림 6에는 나타내지 않았으나 열간 다이스강 SKD5는 6~12% CO, SKD6은 1~3% O_2 범위가 좋다.

이들 결과로부터 저합금강 그래프에서는 로내 분위기를 그림에 나타낸 범위로 조절하면 탈탄을 나타내지 않는 것으로 보이며 따라서 이들 공구강을 대량으로 공업적 규모로 실험한 경우 부탄가스 분사로의 경우는 간단히 이들의 가스 범위내로 조절이 가능하고, 이 때 연소되어 소멸되는 것은 평균이 0.15 mm, 오차 0.05 mm, 또 표면 침탄층은 0.05 mm~0.1 mm로 공구의 인성 저하에는 전혀 영향을 미치지 않은 정도여서 따라서 탈탄도 전혀 일어나지 않은 결과를 얻는다. 이에 반하여, 종래의 중유 분사로로를 제어하지 않고 사용한 경우 거의 0.5 mm~1 mm 정도의 탈탄을 일으키고 공구의 불량이 발생한다. 이들 결과를 사진 1과 2에 나타내었다.

사진 1은 로 분위기를 제어하지 않은 경우. 사진 2는 O_2 0.5%, CO 0~0.5%, CO_2 12~13.5%로 제어한 경우의 단면 현미경 조직을 나타낸 것이다. 시료는 SK7, 직경 28 mm로 각각 780°C에서 5시간 가열한 경우이다.

이들 결과로부터 특히 주의 해야 할 것은 탈탄은

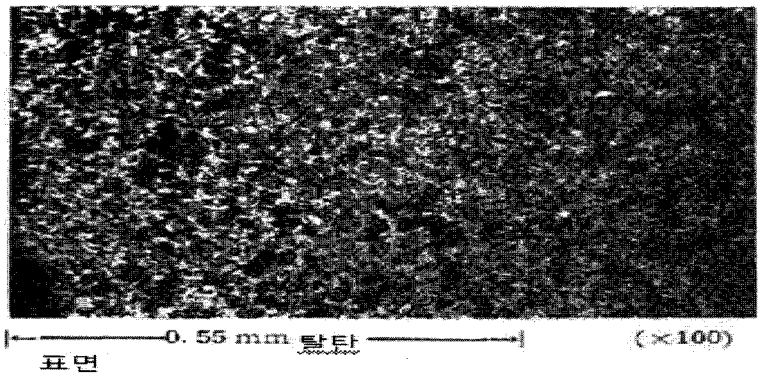

사진 1. SK7 780°C × 5 h 르냉 무제어 분위기 가열.

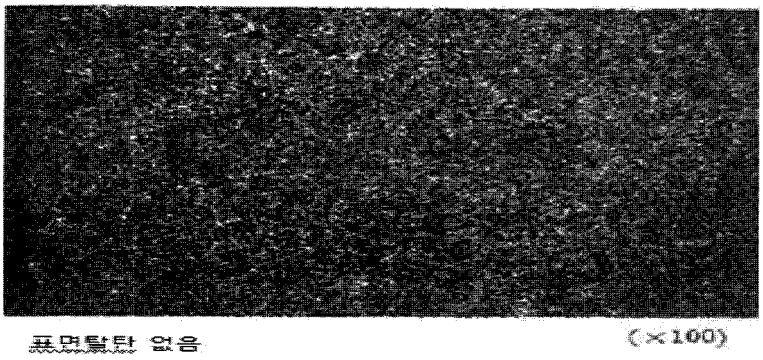

사진 2. SK7 70°C × 5 h.

환원 분위기중에 수증기가 적은 양이라도 혼입 하게 되면 진행되고, 이에 반해 산화분위기 중에 수증기는 탈탄 촉진 작용이 없다는 점이다. 그러므로 일반적으로는 로 중의 수증기는 분의기 조절로를 사용하지 않으면 제어 할 수 없으므로 산화 분위기 쪽이 안전하다.

또 그림 6에서 약 산화 분위기의 침탄현상은 강중의 탄소 확산속도보다 탄소를 함유하지 않은 부분의 산화속도가 높아 확산되지 않은 탄소는 로내 분위기 중에 CO 가스로 방산되고 역으로 강 내부로의 농도가 높아지기 때문에 발생하는 것이라 생각된다.

따라서 침탄이라기보다는 탄소의 농축이 바른 표현이다.

다만, 앞에 언급한 바와 같이 탈탄 방지를 위해 O_2 0~5%의 약 산화 분위기에서도 로내의 가스 흐름이 충분하지 않으면 공구가 로 바닥에 밀착된 부분이나, 2개의 공구가 접촉한 부분, 작은 구멍, 구멍 내부 등은 환원성으로 되기 때문에 주의해야한다. 또 고합금강의 경우에는 앞에 서술한 바와 같이, 이와 같은 약산화 분위기 중에서는 탈탄 하는 것으로 보아 적극적으로 box에 넣어 가열하거나 분위기 조절로 중에서 가열해야한다.

표 1에 SKD1을 상자에 넣어 가열한 경우의 표면 탄소농도 변화를 나타낸 것이다.

따라서 고탄소, 고크롬 계 공구강의 box 가열용 탈탄 방지제로는 주철절삭분이 좋고, 목탄은 과잉 침탄 우려가 있다.

이 경우에도 당연히 boxing작업 전에 약 500°C로 가열하여 충분히 건조시켜야 한다.

그림 7은 탄소공구강에 사용한 경우 산화 탈탄 방지제의 각 온도에 대한 분위기를 나타내었다. 또 표 2에 SKD6에 사용한 산화 탈탄방지제의 종류에 의한 표면 탈탄농도를 나타냈다.

표 1. SKD1의 퀜칭 가열에 대한 탈탄 방지제의 종류에 의한 표면 농도(시편크기 25 mm ϕ, 길이 150 mm, 퀜칭온도 970°C 퀜칭 전 탄소농도 2.10%)

탈탄방지제	유지시간	표면탄소량
새로운 목탄	970°C × 3 h 40 min	2.53
사용한 목탄	970°C × 3 h 40 min	2.37
주철 절삭편	970°C × 2 h 30 min	2.22

표 2. SKD6에 사용한 산화 탈탄 방지제에 의한 표면 탈탄농도 (1018°C × 2 h 퀜칭 전 0.35% C)

탈탄방지제	표면에서 0.4 mm	표면에서 0.75 mm	표면에서 1.2 mm	표면에서 1.5 mm
목탄	0.56%	0.56%	0.50%	0.43%
주철절삭분	0.71%	0.64%	0.53%	0.46%
피치 코크스	0.35%	0.35%	0.35%	0.35%

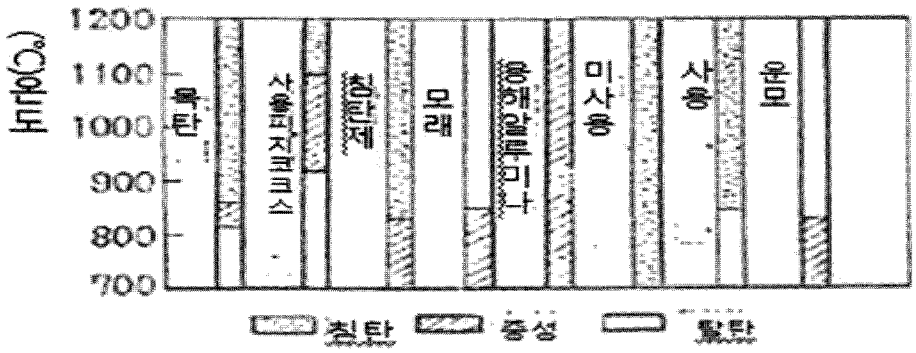

그림 7. 탄소공구강에 사용한 산화 탈탄 방지제의 각 온도에서의 분위기.

표 3. 분위기 조절로에 대한 로점 온도 범위 (가스성분) CO_2 0.1% CO 19.8%, H_2 40.5%, CH_4 0.5%, N_2 39.1%)

강종	퀜칭온도(°C)	최적로점(°C)	목표로점범위
SK3	810°C	10°C	7~13°C
SKD1	960°C		-7~21°C
SKD11	1010°C	7°C	4~10°C
SKD12	980°C		-7~21°C
SKD5	1080°C	-14°C	-18~-12°C
SKD6	1010°C	7°C	4~13°C
SKD9	1220°C	-16°C	-15~-18°C

표 1 표 2 그림 7에서 알 수 있듯이 강종에 따라 최적 탈탄 방지제가 다르고 box의 용적에 따라 충진 되는 양이 변하므로 단위 공구 표면적당 방지제 충진 양이 다르므로 반드시 예비 실험결과를 확실히 해둘 필요가 있다.

또 어떠한 경우에도 수증기는 가장 금지 되어야 하므로 방지제의 건조에 유의하고 box 틈새에 점토 등도 수분을 함유하지 않아야한다.

다음에 적극적인 분위기 제어법으로서 분위기 조절로의 강종에 따른 조절법을 알아보자.

대표적인 흡열반응형 가스(CO_2 0.1%, CO 19.8%, H_2 40.5%, CH_4 0.5%, N_2 39.1%)을 사용하여 각종 공구강을 열처리 할 경우 최적 노점 온도 범위를 표 3에 나타내었다.

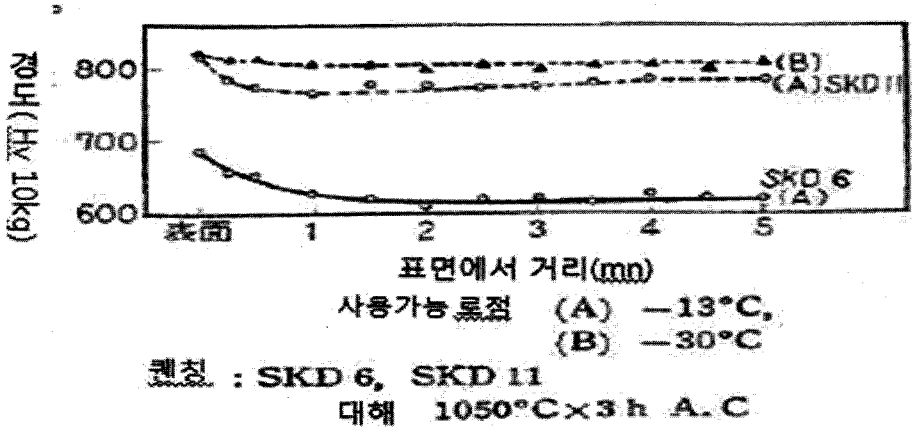

그림 8. SKD6, SKD11을 분위기 가열로에서 가열한 후 퀜칭 한 경우의 단면 경도 분포.

분위기로 조업에서 주의해야 할 것은, 위의 성분의 분위기 가스는 700°C 이하로 냉각하면 폭발성이 있어 위험할 뿐만 아니라 로점 조절, 가스유량에 변동이 있으면 탈탄, 침탄이 발생하므로 작업관리, 계기 점검을 엄격히 해야 한다.

그림 8에서 SKD6, SKD11을 앞의 가스 중에서 1050°C에서 3시간 가열 한 후 공냉시킨 경우 단면 경도 분포를 나타내었다. 그림에서 (A)는 로점을 -13°C에 (B)는 -30°C로 각각 조절한 것이다. 단 최적 로점 온도는 표3에 나타낸 바와 같이 모두 7°C이다.

그림 8에서 명확히 알 수 있듯이 로점이 매우 낮기 때문에, SKD6, SKD11 모두 심부경도보다 표면 경도가 높아, 침탄 된 것을 나타내며 특히 SKD6의 경우는 다이캐스트 금형 재료로 사용되는 경우에 조기에 열피로 균열이 발생하기 쉽다.

또 분위기 가스의 로점이 높으면 탈탄되어, 경도가 낮아져 내마모성의 불량원인이 되지만, C 1% 정도의 공구강의 표면이 0.6%~0.7% 정도 까지 탈탄되어도 퀜칭 경도는 완전히 같고 판별할 수 없어 사용 후 에야 마모가 조기에 일어나게 됨을 알게 되므로 주의해야한다.

염욕로에 사용하는 염욕제는 *Nacl*, $Bacl_2$, *kcl* 등으로 모두 조해성이 있어 습기를 흡수하기 쉬워 탈탄성을 갖게 되므로 사용하지 않은 염욕제는 밀폐해 둬야하며 작업 종료 후 염욕제는 반드시 빨리 꺼내 응고시킨 후 통속에 밀폐하여 보관하고 절대로 도가니 중에 그대로 방치하지 않도록 하고 도가니는 뚜껑을 덮어 내부가 드러나지 않도록 해야 한다.

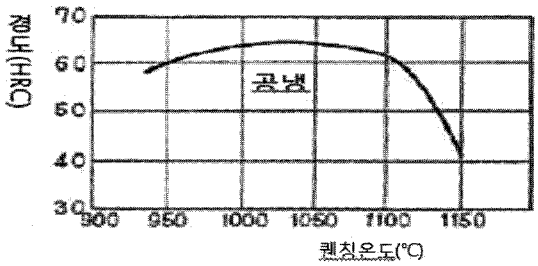

그림 9. SKD11의 퀜칭 온도와 경도와의 관계.

또 작업 개시 전에는 필히 파아노선, 고탄소 강 박판등을, 공구강과 완전히 같은 온도, 같은 시간으로 염욕제 중에서 가열 후 수냉하고 beding 시험을 해보아 꺽이면 탈탄이 없고, 꾸부정하게 굽은 것은 탈탄으로 판정되어 그 불량을 판정한다.

1.4 퀜칭온도 불량

퀜칭 작업시 구조용 합금강이든 특수용도강 이든, 지정온도보다 낮은 온도에서 퀜칭을 하면 차츰 퀜칭 경도가 낮아지고, 특히 가열 변태점 이하로 가열하면 그 온도에서 급냉 해도 단조 또는 압연상태의 경도보다 연하게 되는 것은 없어도 경화가 되지 않으므로 절대로 피해야한다. 그러므로 가열로의 덮개 부근의 밀폐도, 염욕로의 바닥의 온도 분포에 주의 해야 한다. 또 지정 퀜칭온도보다 높은 온도에서 퀜칭하면 퀜칭경도가 높아지는 경우가 있다. 공

구강 특히 고합금 공구강에서는 더욱이 잔류 오스테나이트 양이 증가하여 경도는 낮아지고 좋은 점은 전혀 없다.

그림 9에 SKD11의 퀜칭온도와 경도와의 관계를 나타내었다.

여기서 알 수 있듯이 JIS에 규정 된 지정 퀜칭온도 1000~1050°C 보다 높으면 경도는 낮아지고 있다. 일반적으로 원하는 경도보다 낮은 경우에 다음번 퀜칭에서 무턱대고 퀜칭온도를 높여 다시 하는 습관이 있으나 엄격히 경계해야한다.

(계속)