

공구 · 금형강에 대한 질화계표면처리에 대하여

이 준 연
광덕열처리

Nitriding of Tool Steels for Die and Mold

Lee Jun Yeon
Kwang Duk Heat Treatment Co.

1. 처음에

자동차 업계의 글로벌한 재편, 제조거점의 해외현 지화의 배경속에서 일본 기업과 저임금을 바탕으로한 해외세력과의 국제경쟁 환경아래,

열간단조의 니어벳트세이프화
다이캐스트의 하이사이클화

등 사활을 건 차별화 전술에 의해, 금형계의 부담은 점점 더 가혹해지고 있다. 질화계의 표면경화처리리는 열간단조 금형의 표면 소성유동성의 개선에 의한 마 모수명의 향상이나, 다이캐스트 금형의 용손(용융 알루미늄에 의한 침식)을 억제하는 목적으로 오래 전부터 적용되어져 왔으나, 이들에 별도의 기능을 더한 금형전용 질화열처리가 개발되고 있다.

이러한 배경으로서는, 금형전문의 표면처리업자가 금형전용의 질화처리서비스를 제공하게 되었다는 것 을 들 수 있다. 질화는, 구조용부재의 내마모성이나 피로강도를 향상시키는 표면처리로서 발달해 왔다. 금형도 구조부재를 처리하는 질화전문메이커에서 터 프트라이드를 해왔으나, 알루미늄 압출이나 열간단조 메이커의 작업장 내 설치된 가스질화로나 플라즈마 질화로에서 처리되는 경우가 많았다. 그러나, 금형전 문열처리업자가 금형의 질화처리 서비스를 시작한 것 과, 금형전문 표면처리업자가 탄생한 것으로, 금형손 상에 대응한 전용질화처리가 개발되었다. 즉, 앞서 말한, 내용손성이나 내소성유동성에 덧붙여, 다이캐 스트금형 표면에 열피로(히트체크)나 열간단조금형의

습동유향성을 개선한새로운 질화처리가 개발되어 보 급되고 있다.

2. 온열간단조

2.1 온열간단조형금형의 손모현상

온열간단조에서 틀(형)의 수명구성의 70%는 마모 라고 알려져 있다. 폐기금형의 손모부를 금상학(金相 學)적으로 해석하는 것으로부터 열적, 응력적인 부하 를 예상하여, 형수명의 방향설정을 가능하게 할 수 있다. 온열간 단조금형의 형성면은, 고온의 피가공재 (이하 work)로부터 열전달, work와의 마찰열과, 윤 활 이(離)형제의 분무에 의한 승온과 냉각의 반복으 로 열싸이클에 의해 히트체크가 발생하게 된다. 더욱 이 가열에 의해 금형표층부가 연화하면서 유동마모를 촉진시킨다. 동시에 금형은 단조에 의한 충격응력을 받는다. 이상의 열적, 역학적 부하를 받아 진행된 표 면손상의 사례를 그림 1에 표시한다. 표층부의 0.2 mm 전후의 흑색층이 질화층이다. 모재에 비해 강도는 높으나, 연성이 부족한 질화층에 우선 히트체 크가 발생하고 있다. 단조면압에 의해 work의 사출 (肉流) 방향으로 표층부가 소성유동하고 있다. 표층부 의 연화가 진행되면, 가장 강도가 낮은 질화층 바로 아래인 모재의 소성유동이 진전되어, 히트체크가 work의 사출방향과 평행이되어 인접한 히트체크와 합류하여 질화층이 박리되고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 현상들로부터, 이들 표면손상현상에 대하 여 형재료에 요구되는 특성으로서, 히트체크의 발생,

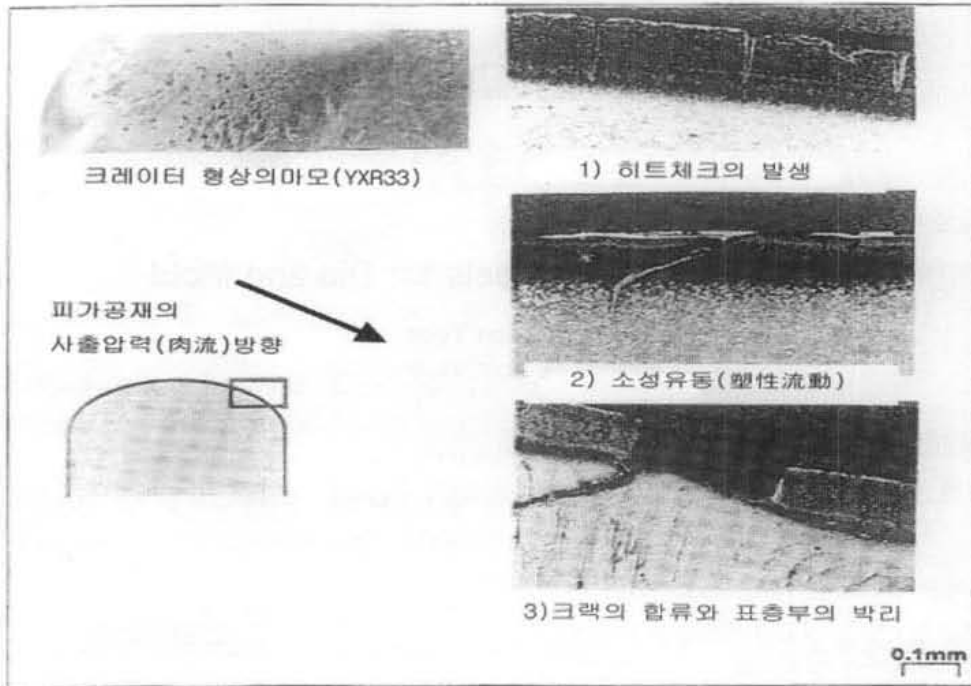


그림 1. 온간단조 편치에 있어서의 표면손상 사례.

초기의 진전 및 소성유동을 억제하기 위한 고온 강도가 높고, 또 형면으로의 고온 승온에 동반하는 연질화(軟質化)가 발생하기 어려울 것 등이 중요하다는 것을 알 수 있다. 또 질화처리에 의한 표층부의 강도가 증가하는 것으로, 소성유동이 억제되어 마모수명이 향상되는 것도 알 수 있다.

상기의 히트체크나 마모에 관한 형재의 재료특성을 만족시키는 한편으로, 금형형상이나 단조조건에 의해 결정되는 금형에 작용하는 응력이 일으키는, 크랙의 발생, 진전에 충분히 견딜 수 있는 인성을 갖는 금형재료가 선택되어야 한다. 질화처리에 대해 언급하기 전에, 온열간 단조금형에 사용되는 형재의 종류를 각각의 고온강도와 관련하여 언급해두고 싶다.

온열간 단조금형재의 고온강도는, 금형표면의 소성유동에 동반하는 '마모를 억제한다'고 하는 점에서 가장 중요한 특성이다. 그림 2에 온열간 단조금형재의 고온강도를 나타낸다. SKD61과 SKD7을 비교하면, 이들의 고온강도는 500°C 전·후까지는, 초기의 조질경도 즉, 상온강도에서 좌우되고 있는 것, 500°C를 넘어서 700°C까지는 금형재의 종류, 즉 조성에 의해 결정되고 있는 것을 알 수 있다. 석출경화계의 형재는 열간단조금형으로서 사용 중에 있어서

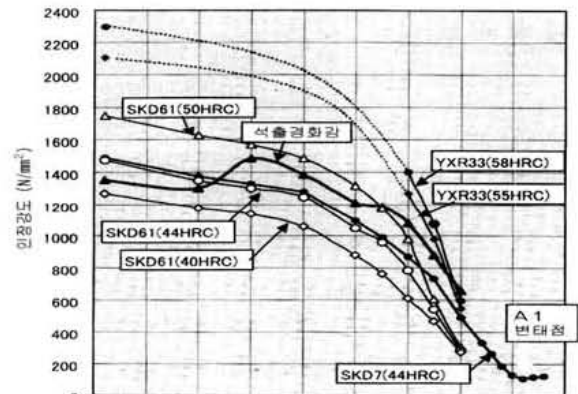


그림 2. 온열간단조형재의 고온강도.

표층부의 승온으로 석출경화반응이 발생하므로 고온강도가 높다. 그러나 단조온도 및 윤회제의 변화로부터 초기경도를 높여 질화처리를 실시한, SKD61계의 형재로 대체되고 있는 중이다. 컨로드(커넥팅로드)금형에 있어서 이러한 구체적인 시도가 보고되고 있다. 열간단조(단조온도 = 약 1,200°C)에서 형성되어 있던 컨로드 금형에는 고온강도가 높은 석출경화강이 사용되고 있었지만, 경량화를 목적으로 컨로드의 피로강도를 향상시키기 위해, 표면의 탈탄층 감소가 가능한 아열간단조(약 1,000°C)가 채용되자, 금형수명이 저하하였다. 이 때문에 SKD61계열의 조질경도를

HRC50으로 하고, 질화처리를 하여, 금형수명저하에 대한 대책으로 삼았다. 그림 2에 의하면, 석출경화강은 300°C 이상에서부터 석출경화가 시작되어, 고온강도가 높아진다. 그러나 SKD61(HRC50)과 비교하여, 고온강도가 높은 것은, 600°C를 넘어서면서 부터이다. 이와 같이 단조온도와 형재의 고온강도 특성의 주의 깊은 관찰을 통하여 보다 좋은 형재의 선택이 가능하게 된다. 55-58HRC의 경도로 사용되어지는 매트릭스 하이스계(그림에서는 YXR33)의 형재는 상온에서 700°C까지 높은 강도를 갖추고 있다. 그리하여, 내압강도와 함께 700°C 전후에서의 내소성유동성이 필요한 온간단조를 시작으로하여, 열간단조금형으로 확대되고 있다. 다만, 높은 경도로 인하여 절결切欠き(kirikaki)인성이 낮기 때문에 샤프코너를 갖는 금형으로의 적용에는 주의를 요한다. 온간단조에 있어서의 매트릭스 하이스의 적용사례를 소개한다. 온간단조는 넷트 셰이프단조로서, 많은 메리트를 가지는 반면, 금형에 작용하는 응력조건, 열적부하가 가혹하여, 열간공구강으로는 내압강도가 부족하고 하이스로는 열충격에 대한 인성이 부족하여, 적용에 곤란을 겪었다. 온간단조의 표면손상은 그림 1에서와 같이, 히트체크의 발생과 질화층 바로 아래의 모재연화에 동반하는 소성유동이 진전하여, 히트체크가 합류하여 박리현상이 발생한 것을 손상부 관찰에 의해 밝혀졌다. 한편 표층부의 승온온도는 700°C 전후인 것을 확인하였다. 그림 3에 표시한 것처럼 상온으로부터 700°C 전후까지의 고온강도가 높고, HRC58 전후의 경도로 종래 매트릭스하이스에 비하여 현격하게 충격치가 높은 형재 YXR33을 제안하였다. 이 사례에 있어서의 금형수명은 종래의 매트릭스하이스강(HRC60)으로 5,000개, 질화처리에 의해 8,000개까지 금형수명이 늘어나게 되었으나, 개발재(YXR33)에 의해 12,000개 이상의 목표수명을 얻을 수 있었다.

그림 2는 SKD7의 800°C를 넘는 온도까지의 강도를 표기한 것이다. 고온강도는 형재의 변태점 부근에서 가장 낮아지고, 열간작용 work의 변형저항(내력치)와 같은 정도로 까지 내려가 버린다. 온열간단조 금형재의 특징인 고온강도가 효과적으로 살아나기 위해서는, 700°C 전후까지이다. 따라서 금형표층부의 소성유동을 억제하기 위해서는, 내소성유동성인

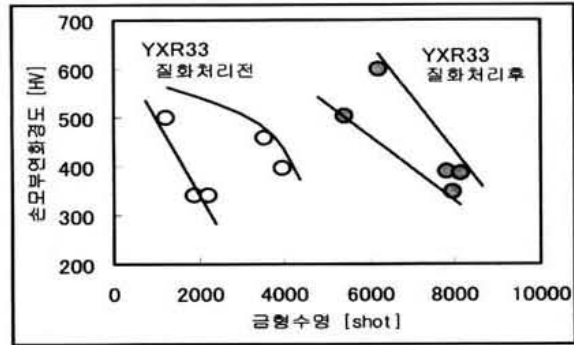


그림 3. 금형손무부의 경도저하와 성형회수의 관계.

고온강도에 더하여, 습동마찰열을 억제하는 것이 중요하다. 이러한 점에서 윤활제에 관한 다수의 연구가 진행되고 있으나, 질화처리도 유효한 방법 중의 하나이다.

2.2 온열간단조 금형의 질화처리

형재의 재료특성은 온도를 파라미터로하여 평가되기 때문에 실제 금형 손상부의 상승온도를 이하는 것이 중요하다. 금형의 표면온도는, work와 금형의 온도로 결정되는 정적인 접촉열전달과 work와 금형표면의 마찰에 의해 소실된 에너지가 초래하는 온도상승이 가산된 것이다. 이 마찰발열은, 정성적(定性的)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta = (1/2b) X (m \cdot \sigma / \sqrt{2}) X (\lambda g / \sqrt{A})$$

$\Delta\theta$: 상승온도, b: 열류다발, m: Tresca마찰계수

σ : work의 변형저항, work의 활량(滑量), A : 활시간(滑時間)

금형표면의 온도상승은 work의 온도만이 아니라, 활량과 활속도. 즉, 단조방안에 의해서, 예측할 수 없는 고온까지 올라갈 가능성이 있다. 사실, 단순한 원주 압축시험에 비교하여, 축압축이나 표면확대율이 큰 스파이크시험에서는, 접촉열 컨덕턴스(열전달계수의 역수에 상당)가 증가하는 것이 지적되고 있다.

그림 3은 어느 온간단조금형 손무부의 경도를 금형수명에 대하여 정리한 것이다. 성형수와 함께 연화가 진행되는 것을 알 수 있다. 또, 질화처리 적용에 의해, 금형표층부 모재의 연화가 2~3배 정도 진전이 어려워지는 것을 알 수 있다.

이와 같이 질화처리는, 표층부 경화에 의한 내소

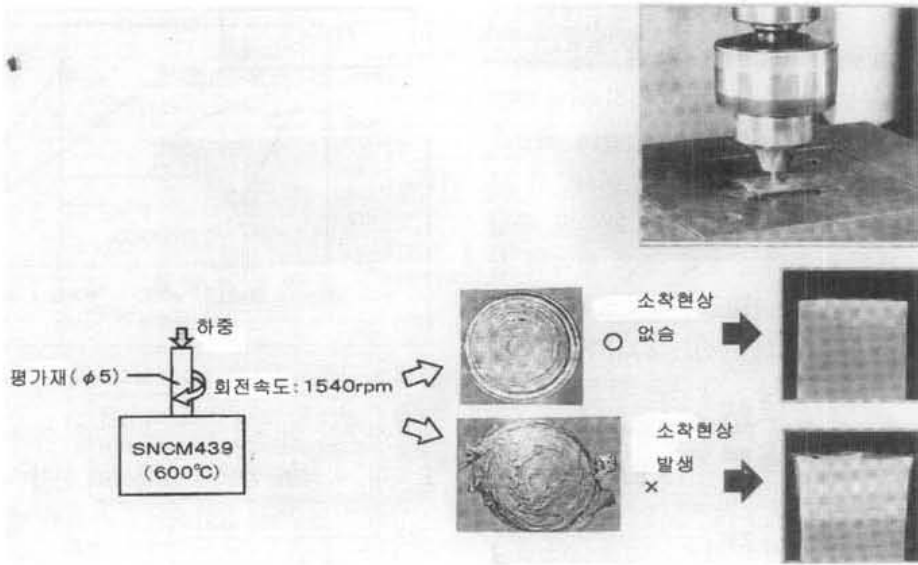


그림 4. 습동발열의 평가시험방법.

성유동성의 향상효과 뿐만 아니라, work와 금형표면 간의 열전달에 대한 단열효과와 마찰발열을 억제하는 효과에 의해 금형의 마모수명을 향상시킨다. 그리하여, 습동발열을 억제시키는 질화층의 개발에 착수하였다. 마찰특성이 좋은 질화층으로는 침류질화가 알려져 있다. 습동발열의 평가방법으로 그림 4에 표시한 실험을 실시하였다.

bowl반에 실험 편을 붙인 후, 가열한 블록에 하중을 걸어, 고속회전으로 습동마찰시키는 단순한 방법이다. 발열온도가 높으면 시험편은 좌굴(座屈)하여 블록과 늘어붙어(燒附, 燒着)버린다.

S를 발생시키는 가스류량과 질화온도를 변화시켜 표면의 Fe, S의 양을 바꾸어 가며 실험한 시험편의 습동발열시험 결과를 그림 5에 표시한다. 여기에서, 이 가스침류질화법을 Hint-S라고 한다. FeS의 양은 Xtjs 회절강도로 측정하였다. 그림 5에 표시한 것처럼 FeS의 양이 증가함에 따라 소착이 발생하는 면압이 증가하였다. 그에 따라 Hint-S라고 부르는 가스 침류질화법에서는, FeS의 X선 회절강도가 500 cps를 넘어가도록 조건을 설정하기로 하였다. 그림 6에 Hint-S의 화합물층의 구조를 표시한다. X선 마이크로 어널라이저로 동정(同定)되어 있듯이, FeS층은 Fe₃N의 더욱 바깥쪽인 최표면에 형성되어 있다.

Hint-S의 습동발열 시험결과를 다른 질화법과 비교

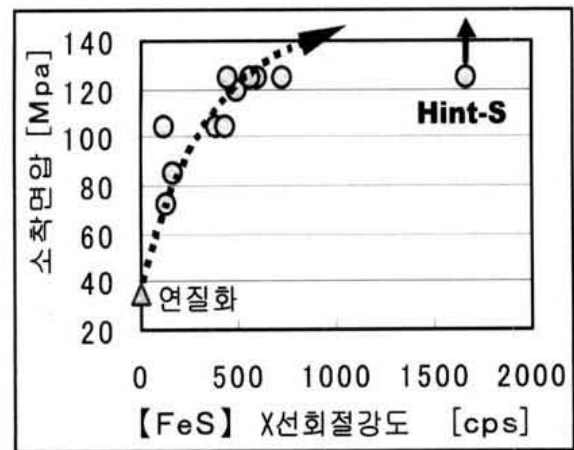


그림 5. 습동발열 시험결과.

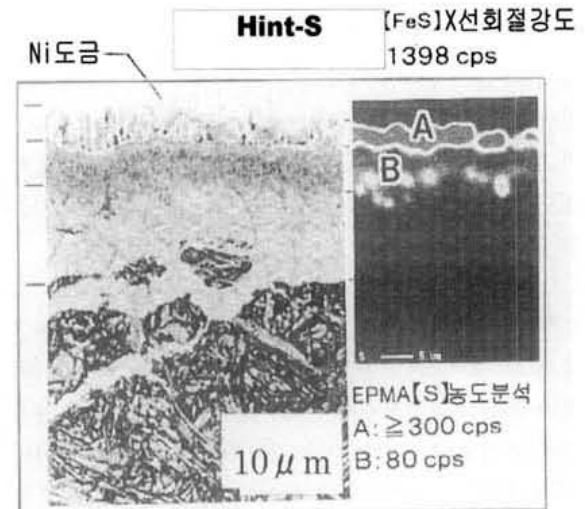


그림 6. 가스침류질화 Hint-S 화합물층의 구조.

하여 그림 7에 표시한다. FeS를 다량으로 생성시키는 것으로, 습동발열을 억제하는 효과가 다른 질화법과 비교하여 크다는 것을 알 수 있다. 실제 열간단조금형에 적용된 사례를 그림 8에 표시한다. 종래의 가스연질화법과 비교하여, 금형손상형태가 국부적으로 움푹움푹 꺼지는 형상으로부터, 균일한 마모형태로의 변화로 인해 금형수명이 약 3배 늘어나게 되었다.

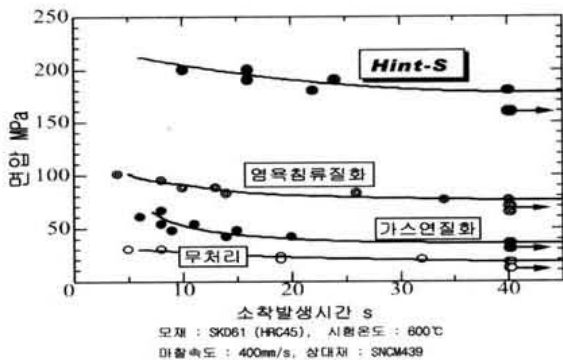


그림 7. Hint-S의 내소착성(열간)

3. 다이캐스트금형

3.1 다이캐스트금형의 손모현상

다이캐스트 금형의 폐기원인은 70%가 히트체크라고 한다. 다이캐스트 금형 표면에 발생하는 히트체크는, 금형표면에 반복적으로 작용하는 열응력에 의한 열피로 현상이다. 그림 9에 나타난 것과 같이 성형중에 반복되어지는 금형 내부의 온도분포에 의해, 반복 작용하는 히트체크를 발생시킨다.

히트체크를 발생시키는 반복응력은, 금형표면부의 소성변형이 클수록 커지게 된다. 따라서, 금형재의 강도가 높을수록, 소성변형이 작아지므로 히트체크의 발생은 어렵다. 반면에 금형표면의 냉각시에 반복 작용하는 인장응력에 대해서는, 금형재의 연성치가 높을수록 히트체크의 발생이 어렵다. 그림 10에 히트체크의 시험결과를 나타낸다.

SKD61의 경우, HRC47까지는 경도가 증가할수록, 즉 강도가 높을수록, 히트체크 발생까지의 사이클횟수가 증가하지만, 그 이상의 경도에서는 오히려, 히

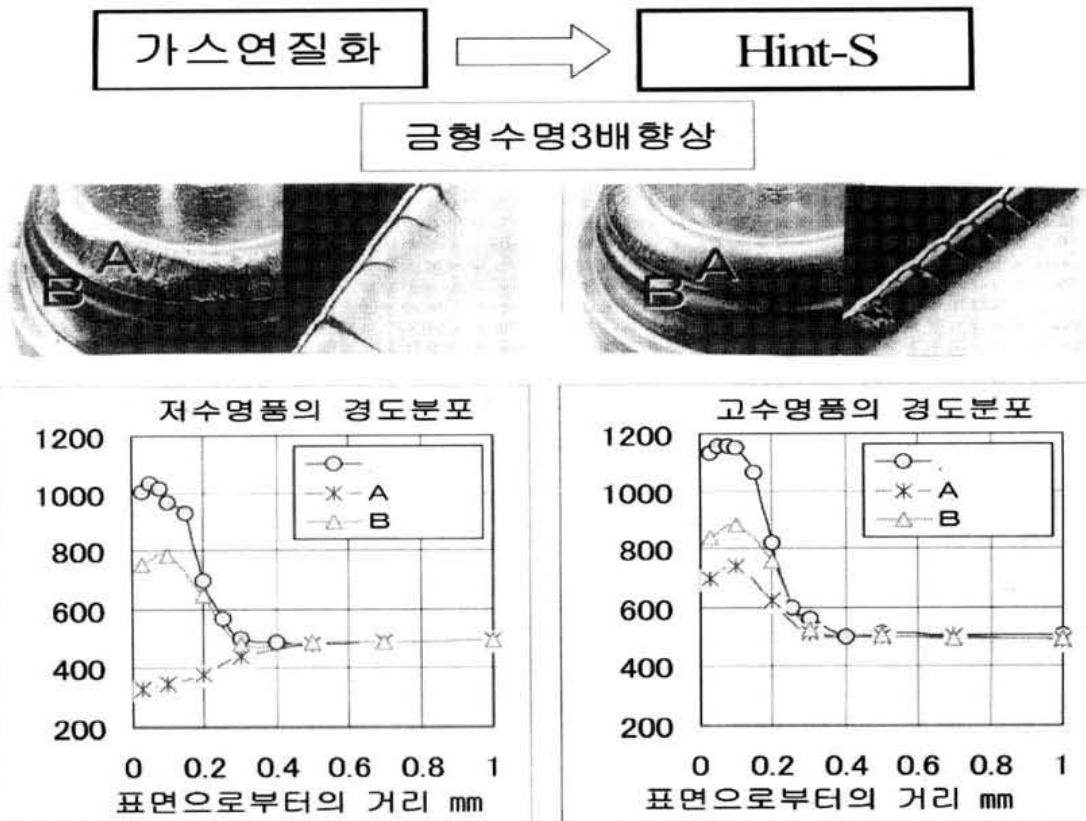


그림 8. 열간단조금형에 있어서의 가스침류질화법 Hint-S의 효과.

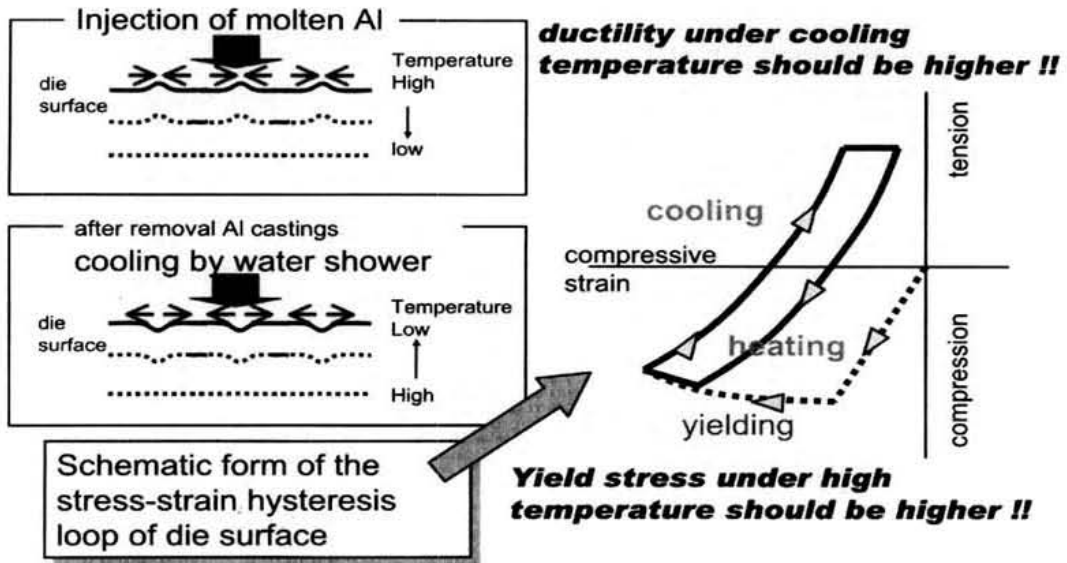


그림 9. 다이캐스트 성형과정에 있어서의 금형표면의 온도분포와 작용하는 열응력 및 금형표층에 있어서의 열응력과 열변형의 모식도.

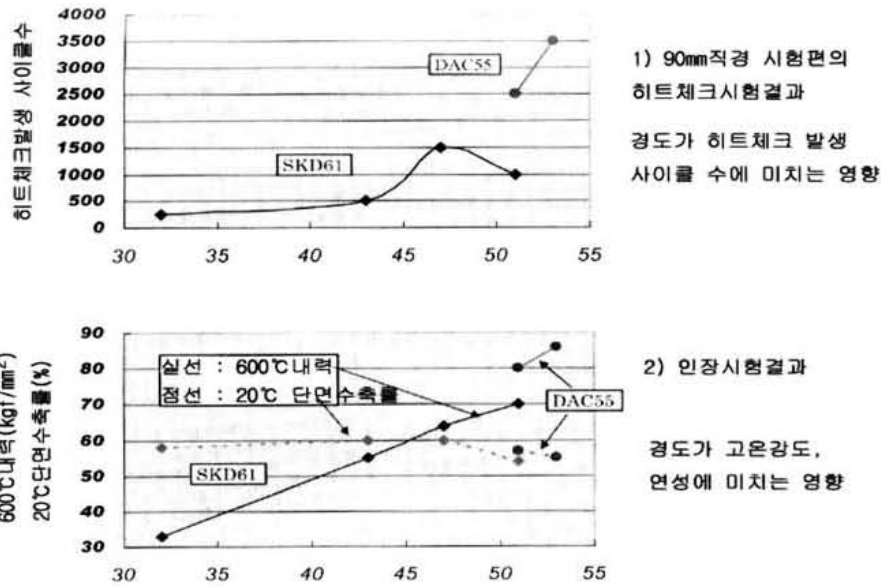


그림 10. 다이캐스트형체의 경도와 내히트체크성.

트체크의 발생이 빨라졌다. 이것은 HRC47 이상의 경도로 SKD61의 연성치가 저하하는 것과 관계있다. 질화처리는, 금형표면부의 강도를 현저하게 높이는 한편, 연성치를 현저하게 저하시킨다. 그리하여, 다이캐스트 금형용의 히트체크대책으로, 강도와 연성의 밸런스를 맞춘 질화처리에 착수하였다.

3.2 다이캐스트 금형의 질화처리

SKD61을 HRC45로 조질처리한 후 그림 11과 같

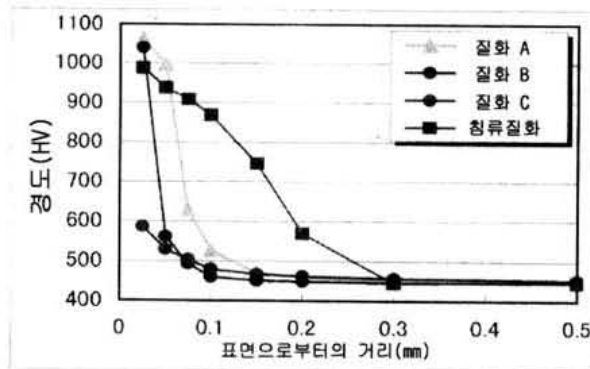
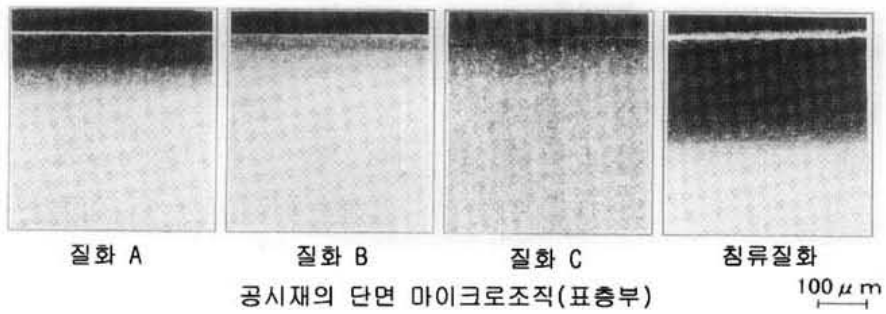
이 4종류의 질화처리를 실시한 시료를 준비하여, 히트체크 시험을 하였다.

질화 A는 일반적인 질화성상인 표면경도 1,000 HV, 확산층 깊이 0.13 mm의 질화층.

질화 B는 표면경도는 1,000 HV이지만 확산층을 0.08 mm로 얇게 하였다.

질화 C는 표면경도를 600 HV까지 억제하고 확산층깊이도 0.1 mm로 비교적 얇게 하였다.

*침류질화는 확산층이 0.3 mm로 두꺼운 편이다.



공시재의 단면 경도분포 (표층부)

<표 1> 공시재의 질화조건

질화 A	560°C x 3h	질화 C	510°C x 3h
질화 B	530°C x 3h	침류질화	560°C x 10h

그림 11. 히트체크시험에 제공된 시료의 질화성상명세; 모재 SKD61, 경도 HRC45.

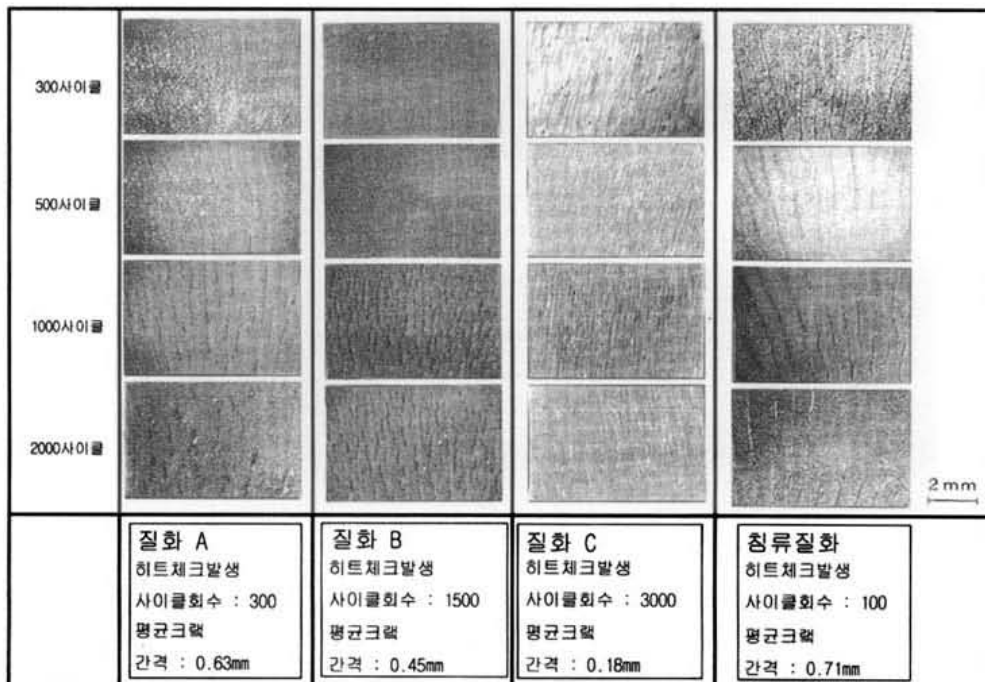


그림 12. 히트체크시험결과; 표면으로부터의 관찰결과.

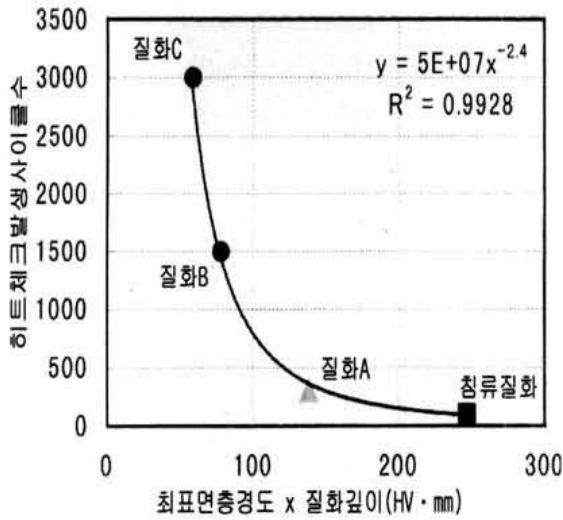


그림 13. 질화형태와 히트체크발생 사이클수의 관계.

질화 A, B, C에 대한 상온 인장시험

시험편 : JIS14A호
(평행부직경:7mm, 표경거리:35mm)

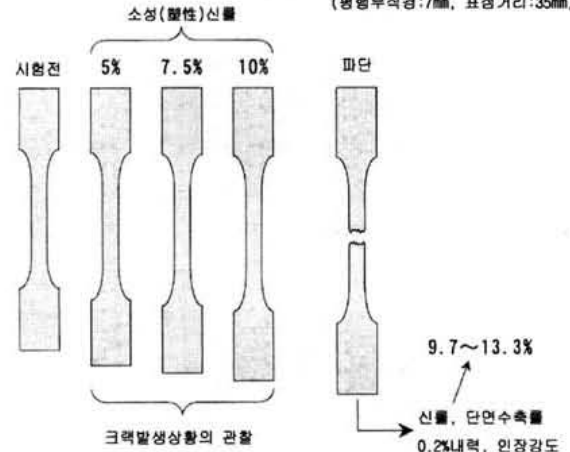


그림 14. 질화시료 인장시험의 실험방법.

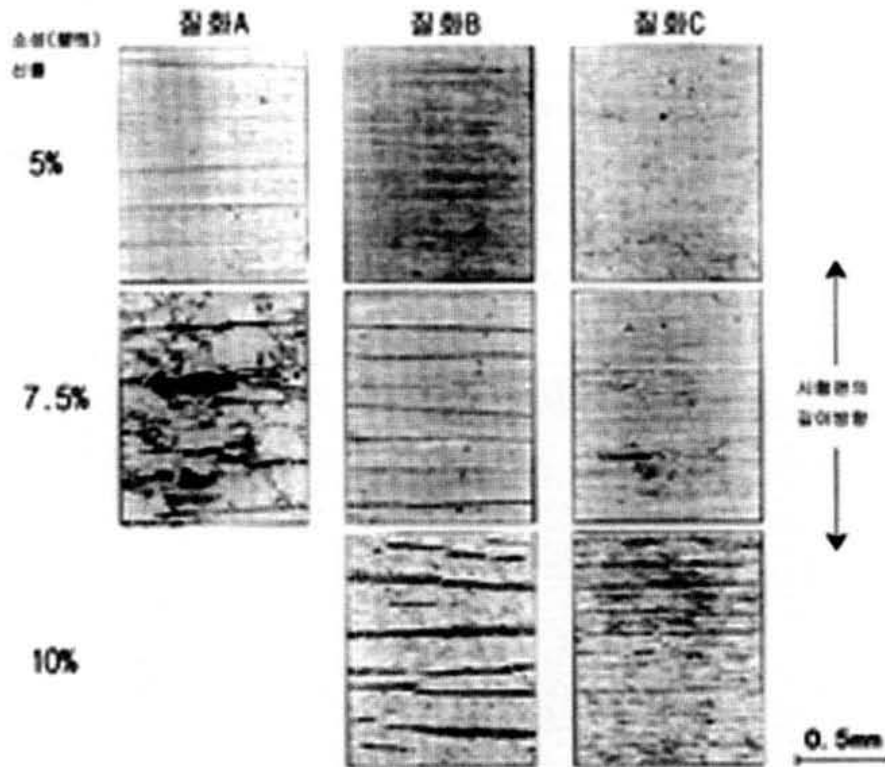


그림 15. 질화형태와 인장시험 과정에서의 표면크랙 발생상황.

그림 12는 히트체크의 시험결과를 나타낸다. 확산층이 깊은 질화 A나 침류질화는 각각 300, 100사이클에서 히트체크가 발생하였다. 확산층이 얇은 질화 B는 1,500사이클이고, 더욱이 질화C는 3,000사이클까지 히트체크가 발생하지 않았다. 질화

C의 특징은 히트체크의 크랙간격이 0.18 mm로 다른 시료와 비교하여 특히 촘촘하다. 질화층의 성장과 히트체크시험의 결과를 정리하여 그림 13에 나타내었다. 질화C의 표면경도와 깊이의 두 요소가 함께 히트체크 성을 개선하고 있는 것을 알 수 있다.

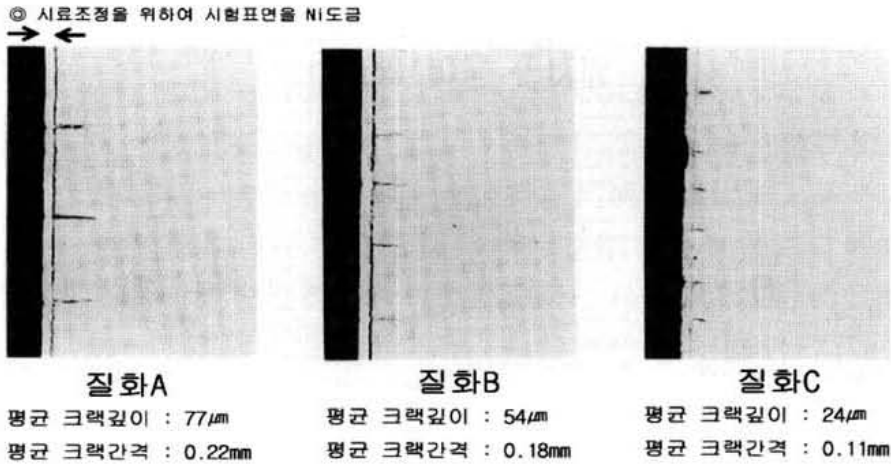


그림 16. 질화형태와 인장시험 과정에서의 단면크랙형태 소성(塑性).

이러한 현상들을 보다 명확하게 이해하기 위하여, 실온에서 인장시험을 거쳐, 질화 A, B, C의 연성을 평가하였다. 실험방법을 그림 14에 표시한다. 앞서 말한 바와 같이 히트체크는 금형의 냉각시에 발생하기 때문에, 크랙거동(舉動) 실온부근에서 평가하는 것이 타당하다고 생각된다. 질화처리한 인장시험편에서는, 시험편이 파단하기 이전에 미세한 크랙이 다수 표면에 발생하고 있다. 그 결과에 관하여 시험편 표면으로부터의 관찰결과를 그림 15에, 단면관찰결과를 그림 16에 표시한다. 히트체크시험의 크랙간격과 같이, 질화C의 크랙간격이 다른 것들과 비교하여 눈에 두드러지게 좁은 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과로부터, 질화C는 표면경도를 적절하게 억제하여, 확산층의 깊이를 얇게 함으로써, 알은 크랙이 다수 발생하여 응력분산효과로 크랙의 진

전이 더디게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 것이, 히트체크를 개선하고 있다고 생각된다.

이상과 같은 사고방식과 함께, 다이캐스트용으로 튜닝된 질화처리가 금형전문 질화처리업자나, 금형전문 열처리업자로부터 제공되고 있다. 또, 다이캐스트 금형의 경우, 사용 중에 히트체크를 보수하기 위하여, 용접이 반복되어 행해지고 있으나, 일반적인 질화처리의 경우, 용접시에 질소가스가 발생하기 때문에, 용접작업이 곤란해진다. 질화C와 같이 질화시의 질소 침입량을 억제한 처리에서는, 가스발생이 거의 없어, 용접작업도 용이하게 처리할 수 있다.

長澤政幸(Nagasawa MasaYuki)

히타치금속(주) 야금연구소

*일본열처리 기술협회 2005년 No.5 Vol.45 게재문