

다이캐스팅용 금형강의 내구성 평가



이 종 훈

(KIMM 표면연구부)

'78 고려대학교 금속공학(학사)
 '78 - '83 한국과학기술연구소(KIST)연구원
 '79 - '80 Darmstadt 공대(독일) 객원연구원
 '87 한국과학기술원 재료공학(석사)
 '98 한국과학기술원 재료공학(박사)
 '83 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

윤 국 태

(KIMM 표면연구부)



'99 창원대학교 금속재료공학(학사)
 '01 창원대학교 재료공학(석사)
 '01 - 현재 한국기계연구원 위촉연구원



임 영 목

(KIMM 표면연구부)

'91 한양대학교 재료공학(학사)
 '94 포항공과대학교 재료공학(석사)
 '00 포항공과대학교 재료공학(박사)
 '00 - '01 포항공과대학교 금속재료 기술혁신센터(TICM) 위촉연구원
 '01 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

고온의 용융금속을 플런저에 의하여 고압·고속 사출하여 원하는 형상을 가진 완성품에 가까운 제품을 만들기 위해 3차원 형상으로 가공된 상하 일체 공간을 갖는 것을 다이캐스팅 금형이라 한다. 여기서 제품 표면의 품질과 치수정도 등은 금형 형상이 그대로 전사되기 때문에 금형의 품질이 매우 중요하다.

최근, 다이캐스팅 주조는 새로운 다이캐스팅 주조기의 개발에 의한 기계의 고강성화, 가압 주조법이나 무공성 주조법 등의 주조기술 개발 등 주조기술의 진보와 고 Si계의 고인성 다이캐스팅 주조합금의 개발에 의한 용탕의 고온화, 금형 표면의 고속, 고압력화, cycle time의 단축화 등 조업 조건의 변화와 함께 주조제품의 고품질화에 따른 기술적 요구의 엄격함과 양면성이 공존하고 있는 실정이다. 또한 생산성의 향상을 목적으로 금형의 사용조건도 보다 가혹한 환경으로 변화함으로써 이에 대응하여 다이캐스팅 제품의 고품질화 달성을 위한 금형의 품질 안정화가 중요한 과제로 대두되고 있다. 따라서 금형재료자체의 고강도, 고인성, 고경화능의 구비가 요구되고 있으며, 이러한 여러 특징을 모두 구비한 고성능재료의 개발 및 실용화, 금형강종의 적절한 선택, 최적 열처리, 또한 내히트체크성, 내용손성을 고려한 표면 개질의 적용, 그리고 이들의 조합으로 다이캐스팅 주조 기술의 진보에 따른 금형 수명저하 방지를 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다^[1-3].

이에, 본 고에서는 다이캐스팅 금형강의 수명 및 신뢰성 향상을 위한 각종 처리에 따른 기계적 특성과 열피로 시험 등의 각종 내구성 평가 방법을 소개하고 검토하는 한편, 금형의 수명 향상과 안정 조업의 유지를 목표로 수행된 연구 내용을 기술하였다. 이를 통해 각 사용환경에 요구되는 기본 특성을 신뢰성 있는 평가를 통하여 기준을 제시하고 검토하여, 나아가 열간금형강의 신뢰성 확보와 품질안정화에 도움이 되고자 하였다.

2. 다이캐스팅 금형 관련 기술 동향

지금까지 행해지고 있는 금형관련 기술의 연구를 정리해보면 다음과 같다.

- (1) 금형의 열피로 특성과 히트체크 및 crack의 발생에 따른 수명저하의 영향

- (2) 금형강의 손상기구, 즉 열피로특성과 용손 및 마모특성에 관한 연구
- (3) 금형강의 열피로 특성 평가 시험, 방법의 제안
- (4) 방전가공 금형강의 열피로특성 평가와 표면개질에 의한 열피로 특성 향상에 대한 연구

여기에서 현재 고기능화된 특수용도용 금형소재 및 각종 개발강에 대한 (1), (2) 분야의 연구는 미비한 상태이고, 열피로 특성평가에 대한 체계적 연구 및 데이터 처리법이 미숙하여 금형강의 수명 평가에 객관적 기준이 없는 실정이다.

또한 다이캐스팅 금형관련 기술로 고인성, 고강도의 SKD61 개량형 강종의 개발이 지속적으로 연구되고 있으며, 금형 성능을 높이는 열처리법과 유냉이나 염욕에 비해 Ecological Thermo Processing System으로 환경친화적인 초고압고진공전기능열처리와 가감압가스 복합표면개질로 등이

표 1. 일반적인 표면개질법의 분류

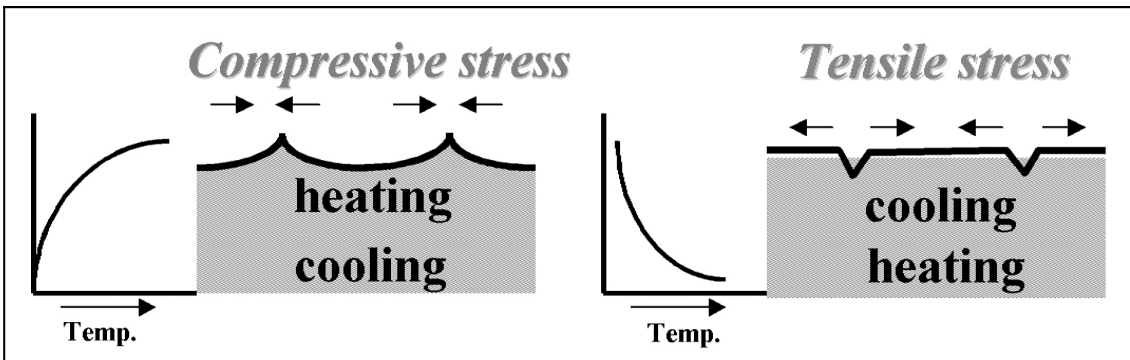
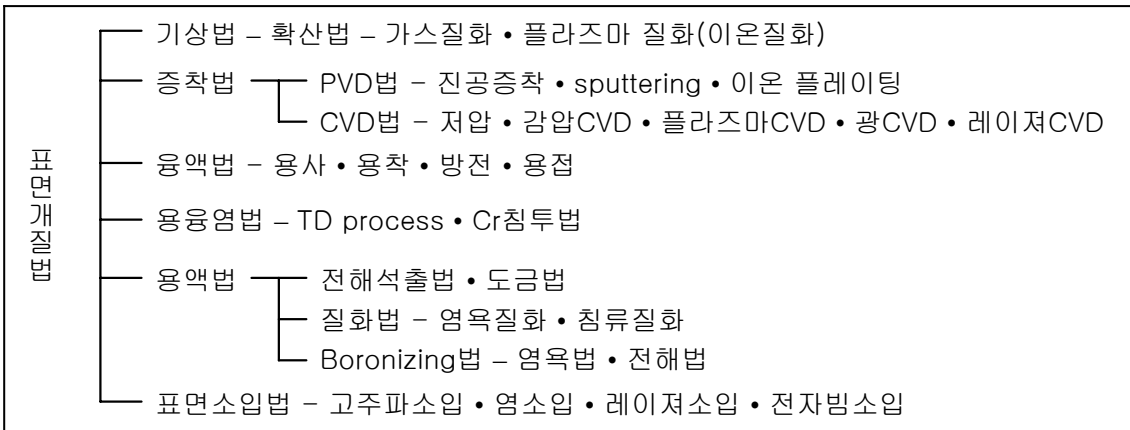


그림 1. 금형의 열피로모델

개발되었으며, 표 1^[3]에 나타난 것처럼 소재의 일반적인 표면개질법을 금형강에 적용하여 히트체크를 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

3. 다이캐스팅 금형강의 파괴기구

3.1 Thermal fatigue

열간 금형강의 주된 손상기구는 제품 생산 중에 일어나는 가열-냉각 반복공정에 의한 히트체크로 손상사례의 약 70~80%를 차지하고 있다.

다이캐스팅 금형은 조업 중 캐비티 표면에서 용융금속과의 접촉에 의해 급격히 가열되었다가 이형시의 이형과 냉각을 겸한 고속 압입 유지 및 이형제의 분무도포 등으로 급속히 냉각되는 가열-냉각의 반복 열응력을 받게 된다. 그림 1에 나타난 바와 같이 다이캐스팅 금형 표면은 주조작업 중 피가공재에 의해 고온으로 되어 국부적 팽창이 일어나지만 금형 표면으로부터 내부에 걸쳐 온도구배가 발생하고 상대적으로 온도가 낮은 부분에 의해 구속되기 때문에 압축응력이 발생, 항복점을 넘으면 압축소성 변형이 표층부에 발생한다. 그리고, 이 소성변형이 발생하는 곳에서 피가공재 배출 후 이형재 도포에 의한 급속한 냉각에 의해 인장응력이 작용하게 된다. 따라서, 히트체크는 냉각시의 인장응력에 의해 발생하는 것으로 생각할 수 있으므로 이러한 열피로 균열 억제에 위해서는 가열시의 압축응력에 의한 소성변형 발생량을 작게 해주는 것이 효과적이며, 이를 위해 금형의 승온온도에 따른 고온강도를 높이는 것이 효과적임을 알 수 있다. 한편, 같은 고온강도를 구비한 금형재의

경우 연성값이 높은 재료가 균열진전을 방해함으로써 일정한 반복인장변형에 대해 열피로 균열 발생이 보다 고사이클로 될 것을 예측할 수 있다.

금형에 발생하는 열응력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = E \times \Delta T / (1 - \mu) \quad \text{식 (1)}$$

(σ : 발생응력, μ : Poisson's ratio, E : 탄성계수, α : 열팽창 계수, ΔT : 온도구배)

즉, 히트체크는 상기한 열응력이 작업시 금형표면에 가열-냉각의 온도 사이클의 반복으로 발생하게 된다. 이 식에서 알 수 있는 바와 같이, 금형재료는 열팽창계수, 탄성계수가 작고, 열전도율이 높아 온도구배가 작을 수록 히트체크 억제에 효과적임을 알 수 있다. 하지만 열적, 물리적 특성의 변화는 실제로 구현하기 어렵다. 따라서 반복 열응력에 견디는 강도나 연성 또는 피로특성 등의 기계적 특성 향상 방안이 함께 연구되어지고 있다.

히트체크는 보통 처음 1차 냉각시에 발생하는 것이 아니고 반복 열사이클 과정에서 저 사이클 피로로써 발생하게 되는데 금형표면의 얇은 영역에 미세한 crack이 network형태로 발생된다. 그림 2와 같이 crack은 반복 열응력 과정과 산화물의 wedge effect 그리고 용융금속과의 화학적 반응으로 진전되며, 한계 균열길이에 도달하면 불안정 파괴가 발생한다. 따라서 그림 3과 같이 히트체크에 의한 금형의 요철형상이 다이캐스팅 제품에 그대로 전사되거나, 심하면 금형의 파괴를 초래하게 되어 제품 불량에 따른 보수나 금형의 보수가 필요하게 됨으로써 생산성 저하 및 cost의 증가를 가져온다.

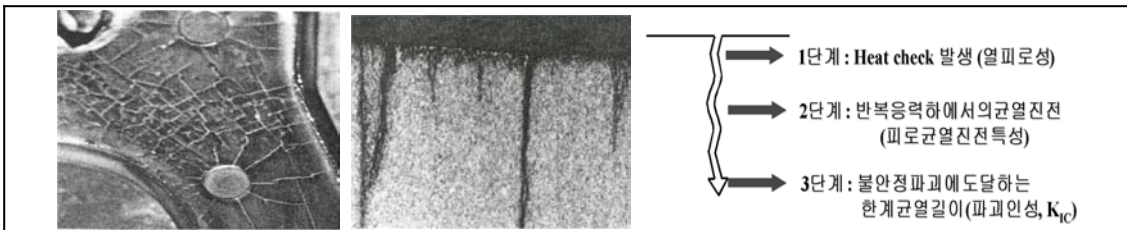


그림 2. 히트체크의 OM관찰사진과 균열발생 및 진전에 대한 모식도

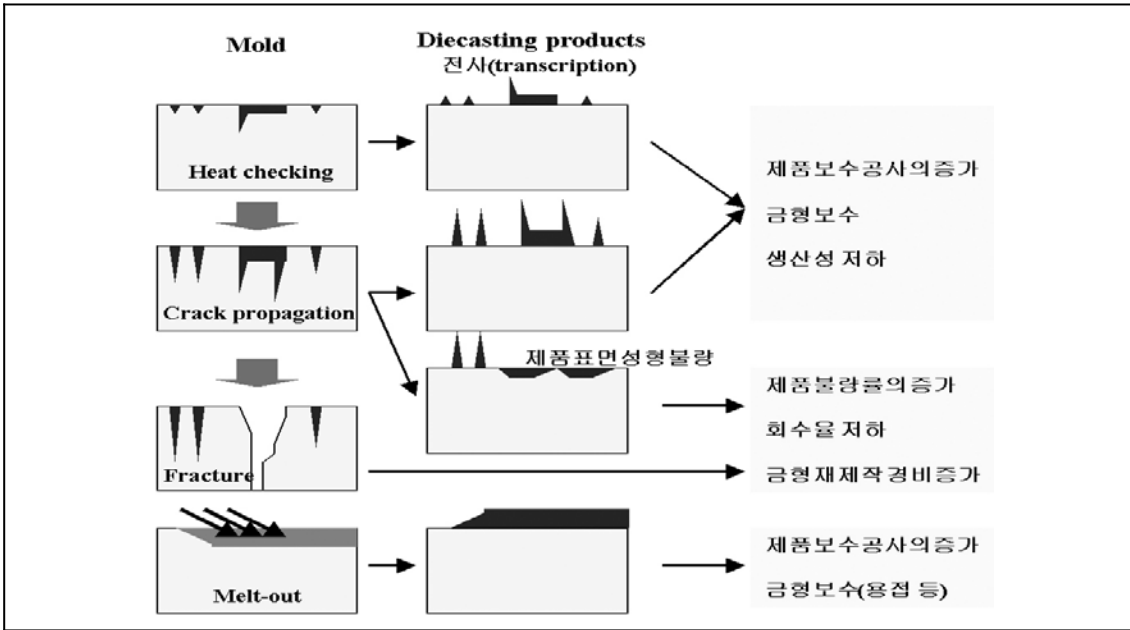


그림 3. 다이캐스팅 금형에 발생하는 결함의 개략도와 제품상태

3.2 용손

용손이란, 용탕성분과 금형성분의 야금학적인 표면반응에서 용융금속이 금형의 캐비티내에 고속, 고압사출될 때 발생하는 기계적, 물리적 침식으로, 마식(erosion)에 의하여 금형이 마찰되어 제품에 불록부의 결함을 발생시키게 되는 금형 표면의 전체적, 부분적 탈락현상을 말한다. 알루미늄 다이캐스팅을 예로 들면, 초기단계에서는 용탕과 기지와 표면확산에 의하여, Fe, Al 및 Si의 고용체가 형성된 후 과포화의 고용체가 Al-Fe-Si계 금속간화합물로 변화되고, 그 후 이 금속간 화합물의 기지와 열팽창율의 차이에 의해 기지와 계면에 균열이나 캐비티가 발생하게된다. 이러한 균열이나 캐비티는 계면의 밀착성을 저하시켜 표면탈락을 유발시키며 이와 같은 과정의 반복에 의하여 용손이 진행된다.

금형강 및 표면처리 금형강의 용손형태의 분류를 그림 4에 나타내었다. (a)의 표면처리되지 않은 금형강의 경우 전면 용손형을 나타내고 시험 후 시험편 형상은 전체적으로 작게 된다. 표면처

리 금형강의 경우는 (b)와 같이 처리피막과 용융 알루미늄과의 반응성이 낮은, 내용손성이 양호한 피막이 조성(예 : TiC 등)됨으로써 피막에 발생하는 피트상 결함으로부터 금형강의 기지 중에 용손이 진행되는 부분용손 형태를 보인다. (c)는 내열 충격성이 낮고 반응성이 높은 피막의 경우로 피막의 면탈락으로 부분용손에서 전면용손으로 진행되는 복합용손형을 나타낸다.

그림 5는 SKD61 금형강의 용손 상태를 관찰한 것으로 전면용손 형태이다. 그림에서 표면으로부터 용융 알루미늄, 반응층, 즉 금속간화합물 형성 영역, 기지의 순으로 나타나고, 금속간화합물층에 반응시의 가스형성에 의한 pore와 crack 발생 등 많은 결함이 집중되어 있다.

상기의 용손기구에 대한 고찰에서는 용융금속과의 반응이 금형강의 수명에 미치는 영향만을 고려했지만, 실제로는 히트체크 및 crack의 발생과 그 부분에서의 용융금속의 침투도 결함진전을 촉진하는 요인이 되어, 열피로와 용손현상의 복합적 상호작용에 의해 금형의 수명저하가 일어날 가능성이 높다.

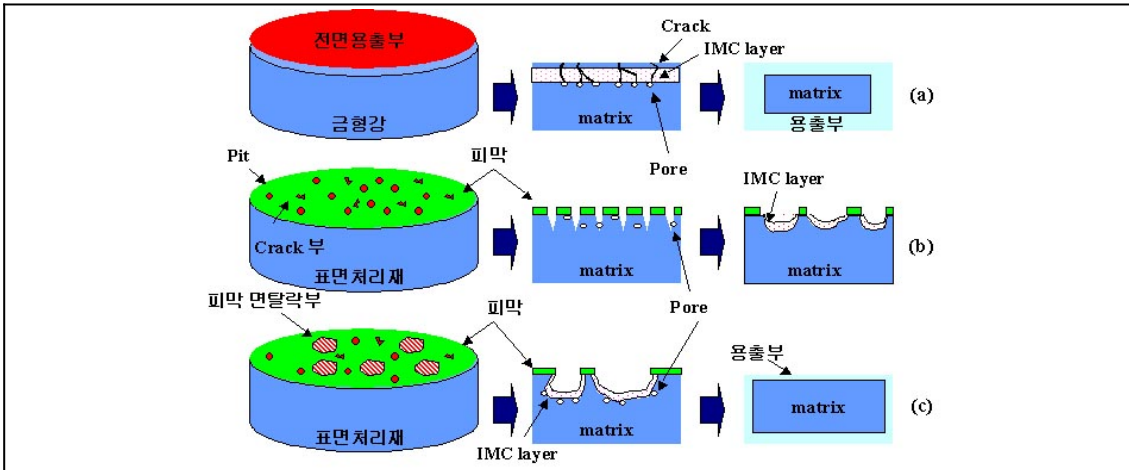


그림 4. 금형강 및 표면처리 금형강의 용손형태의 개략도

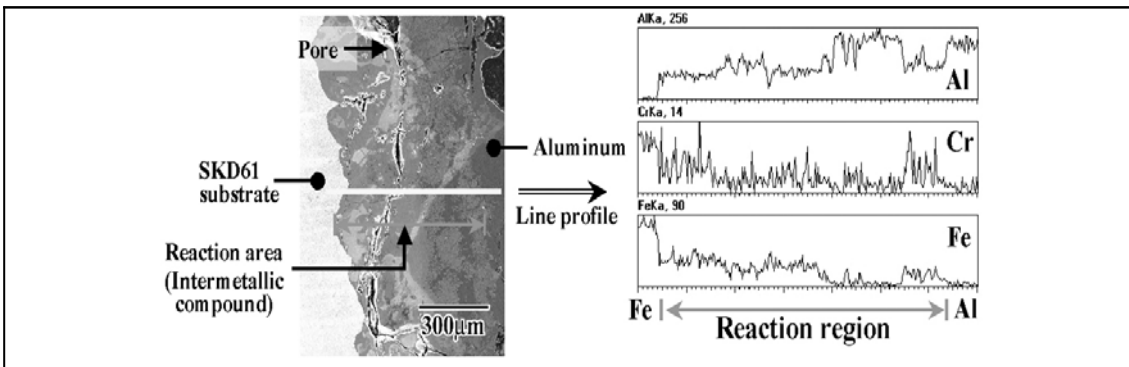


그림 5. SKD61 금형강의 용손

3.3 고온마모

금형의 주 파손원인 중 하나인 용손이 발생하는 기구는 앞서 기술한 바와 같이 용탕과 금형간의 야금학적인 반응이외에도 고속 사출된 용융금속에 의한 마식도 하나의 원인이므로 고온에서의 내마모성은 금형의 수명에 대한 간접적인 지표가 될 수 있다.

고온마모는 용융금속과 금형강의 반응으로 생성된 금속간화합물층에서 cavity의 형성과 소멸에 의해 cavitation erosion이 발생하여 금형표면이 제거되거나, 용융금속의 고속의 움직임에 의해 기계적 마모를 나타내는 현상으로, 구조작업 중에서는 용손과 고온마모가 복합적으로 일어나며, 히트 체크와도 병합되어 금형의 수명에 영향을 미친다.

技術現況分析

4. 금형강의 신뢰성 평가방법

다이캐스팅 금형의 신뢰성을 높이기 위해서는 금형강이 요구하는 특성을 검토하고, 그 특성 평가를 위한 시험을 이해하는 것이 필요하다. 따라서 본 절에서는 금형 수명향상 방안 연구에 기반이 되는 금형강의 기본 물성 및 내구성 등 신뢰성 평가 관련 시험방법 및 그 의의를 기술하였다.

4.1 화학성분

화학성분은 열처리시의 상변태, 불순물 및 계층물 등에 관련되어 소재의 기본적 물성을 좌우하게 되며 용손시의 야금학적인 반응에도 영향을 미치게 된다. 따라서 금형 소재의 화학성분을 Optical

표 2. 열간금형강 SKD61의 화학조성

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
Nominal composition	0.32-0.45	0.80-1.20	0.50 max	0.030 max	0.030 max	4.50-5.50	1.00-1.75	0.80-1.20	remainder
Measured composition	0.36	0.86	0.30	0.017	0.002	4.82	1.06	0.85	remainder

Emission Spectrometer를 이용하여 정량 분석을 실시하여 KS 규정(표 2 참고)을 기준으로 평가를 실시한다.

4.2 경도시험

히트체크 및 균열의 발생지에는 기지경도의 증가가 효과적이나 이는 반대로 큰 균열의 발생, 즉 균열의 진전에는 악영향을 미치게 된다. 일반적으로 고온 열피로에 미치는 영향은 HRC 47~50 근방이 가장 좋은 피로강도를 나타낸다고 알려져 있다. 또한 열간압연시 탄화물이 발생하면 경도가 증가하며 이들 탄화물은 가공결함이나 예리한 코너부근에서 큰 균열의 발생기점이 될 수 있다. 그 때문에 현재는 일반적으로 금형은 HRC 45부근의 경도로 처리하고 인성을 향상시켜 파괴를 방지하고 있으며 이와 같이 다이캐스팅 금형의 경도관리는 특히 주의가 필요한 중요한 항목이다. JIS에서는 열간금형강의 경도를 HRC 53이하로 규정하고 있으나 균열발생을 낮추기 위해서는 하한값도 규정할 필요가 있다. 이에 국산제품의 평가결과 HRC 42.5~44의 범위인 것으로 나타나 HRC 43~53의 경도값을 만족해야 할 것으로 판단된다.

경도시험은 KS D 0806 로크웰 경도 시험절차에 의하여 6곳에서 실시, 평균값을 구한다.

4.3 탈탄층 깊이 시험

열처리에 따라 발생하게되는 탈탄층은 소재의 표면물성을 변화시켜 열피로균열에 대한 민감도 및 제반 기본물성에 영향을 미치게된다. 따라서 모든 다이캐스팅 금형강은 열처리 종료 후 탈탄층

이 잔존하지 않도록 제거된 상태에서 제공되어야 하며 탈탄층 시험을 통해 잔존여부를 점검한다. 예비시험결과 대부분의 시편에서 탈탄층의 깊이가 1.5 mm 이하로 나타났으므로 열처리 후 약 표면을 2 mm 정도 기계가공해야 할 것으로 판단된다.

탈탄층 깊이 시험은 시험절차 KS D 0216 에 의거하여 시험편의 절단면을 현미경과 경도시험에 의해 실시한다.

4.4 제품의 표면거칠기 시험

제품 표면의 거칠기 상태는 열피로에 의한 균열발생의 민감도를 좌우하게 되므로 일정 조도 이하의 기준이 필요하다. 연마(Polishing)의 단계는 아닌, 6.3 μm R_{max} 이하의 정밀기계가공에 의한 표면거칠기의 정도는 만족해야 할 것으로 생각된다.

표면 조도계를 사용하여 시편의 양단면과 둘레면적 부위의 중심선 표면 거칠기(Ra)를 구한다.

4.5 결정입도 시험

결정입도는 금형소재의 기본적인 강도나 인성이 외에도 균열발생시 균열의 진전속도 등에 영향을 미치게 된다. 입도는 ASTM E112의 No. 8 이상 미세해야 한다.

결정입도 측정을 위한 시험절차는 KS D 0205에 의거하여 실시한다. 부식액은 9 g 계면활성제, 9 g 피크린산, 100 ml 증류수 비율로 만든 뒤 70~80 °C 가열상태에서 부식시키고 최종적으로 5% 암모니아수로 세척한다.

4.6 충격 시험

충격치는 소재의 인성과 관련된 기본물성으로 금형의 경우 열피로 균열의 진전 등에 영향을 미치며 입계탄화물의 존재여부 등 미세조직에 대한 간접적인 지표로 사용될 수 있다. 시험결과 16~23 J/cm²의 충격값에서 열피로 특성이 가장 양호하게 나타났다.

4.7 고온압축 시험

금형의 사용환경이 고온임을 고려할 때 금형소재의 고온항복강도 및 고온경도와 같은 고온에서의 기본 물성평가가 필수적이다. 금형의 기지경도와 고온강도가 클수록 소성변형량을 작게하여 히트체크의 발생을 억제한다. 그러나 금형의 형태를 고려하면 표준인장시험의 채취 등에 어려움이 있을 수 있고, 고온경도 시험의 수행에도 어려움이 있을 수 있으므로 고온에서의 기본적인 물리적 물성을 압축시험에 의해 평가할 수 있다. 국내 제품으로 세가지 변형속도에서 예비실험을 실시한 결과, 변형속도에 따라 압축강도가 변화하였으며 최고 강도가 나타나는 변형률도 변화하였다. 따라서 고온 압축강도가 보다 명확하게 나타나는 조건인 600℃ 무산화분위기에서 변형율 1 mm/sec, 변형률 5 %을 판단기준으로 하였으며, 시험은 3번을 실시, 평균값을 취하였다. 시험결과 압축강도값이 950 MPa 이상은 만족해야 할 것으로 판단되었다.

4.8 고온마모 시험

상대재로 세라믹 볼을 이용하여 금형소재를 마모시킨 후 레이저 표면조도계를 이용하여 마모부피량을 계산하는 방식을 채택하였다. 이는 무게감소량을 측정값으로 할 경우, 고온에서 발생할 수 있는 산화에 의해 그 정확도가 떨어질 수 있기 때문이다. 국내 2개사 제품의 고온 내마모성을 평가한 결과, 약 0.47 및 0.49 mm³의 부피감소를 보였

다. 기준 부피감소값으로 0.6 mm³로 규정할 수 있는데, 이는 측정치가 상당히 작은 수치이기 때문에 발생할 수 있는 오차를 고려한 것이다. 고온마모시험 조건은 표 3에 나타내었다.

표 3. 고온마모시험 조건

Temperature	500℃
LOAD	1 kgf
마모거리	3Km
선속도	25m/min (300rpm, 마모트랙의 지름은 약 2.65cm)

평가방법은 마모 Track을 90° 간격으로 4곳에서 Laser 표면 조도계로 마모 Track 방향과 수직으로 마모 profile를 그린 뒤 식 (2)와 같이 부피로 마모량을 구한다.

$$\text{마모량(mm}^3\text{)} = \frac{S1 + S2 + S3 + S4}{4} \times L \quad \text{식 (2)}$$

(S1,S2,S3,S4 : 마모 Track 4곳에서의 각각 마모 단면적(mm²), L : 총마모 Track 길이(mm))

4.9 용손 시험

용손의 초기단계에서의 야금학적인 반응 정도를 평가하기 위하여 용탕내에 금형소재를 침지시킨 후 무게감소량을 측정하는 방법을 이용하였으며, 이 때 용탕의 성분은 다이캐스팅용으로 널리 사용되는 알루미늄 합금인 KS ALDC 8로 결정하였다. 이에 대한 일본에서의 실험결과를 참고하면 JIS규격의 SKD61종의 경우 43시간동안의 침지에 의해 1140 mg/cm²의 무게감소가 발생한다고 보고되고 있다.

용손시험의 조건은 용융 알루미늄 온도 680 ℃ 이고, 시험편의 용탕내 침지시간은 43시간으로 하였다. 용손 시험의 평가방법은 시험 후 시험편에 붙은 알루미늄은 가성소다수용액에 넣고 용착된 알루미늄을 제거한 다음, 용손시험편의 중량을 측정하여 식 (3)에 대입하여 금형강의 단위표면적당 중량 감소량(Δ W)을 구한다. 여기에서 실험적 오

차를 줄이기 위하여 시험편은 3개로 하여 평균값을 취하였다. 용융 알루미늄의 부착여부는 단면을 절단하여 광학현미경으로 확인한다.

$$\Delta W = (W_0 - W) / A \quad \text{식(3)}$$

ΔW : 중량감소량, mg/cm^2

W_0 : 침지전의 중량, mg

W : 침지후의 중량, mg

A : 침지전의 표면적, cm^2

4.10 열피로 시험

파괴기구에서 고찰한 바와 같이 열피로는 금형의 주 파손원인이며, 이에 대한 시험은 금형소재의 신뢰성평가에 있어 중요하다. 먼저 실제 현장의 다이캐스팅 금형이 가지는 열피로 환경과 가까운 시험환경을 모사하고 신뢰성 있는 열피로 시험을 수행하기 위해 국내외의 여러 히트체크 시험실 시기관의 시험방법을 비교·검토하여, 고주파유도가 열과 water spray에 의한 냉각 방식의 열피로 System을 구축하였다(그림 6). 연구에는 본 시험 방법 이외에도 접촉가열방식, 가스가열방식에 의해 금형강의 내히트체크성 및 crack 발생형태의 관찰, 표면개질 금형강의 열피로 거동 등의 연구에 이용되고 있으며, 버너가열 방식에서는 금형강 표면에 형성되는 산화물의 형태가 산화염 및 환원염에 의하여 다르기 때문에 열피로 거동에 고려할

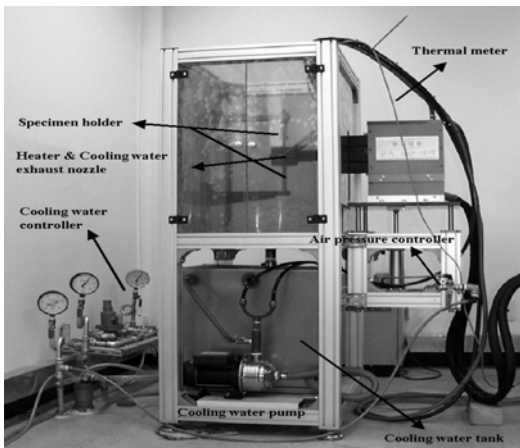


그림 6. 열피로 시험장치

사항이 있는 것으로 보고되고 있다^[11].

열피로 시험편은 최종 $43 \Phi \times 60 \text{ mm}$ 의 환봉으로 열처리, 가공하였다. 시험온도는 열전대를 표면에 welding시켜 가열속도 및 냉각시간, 열피로 cycle 수를 조절하였으며, 최고가열온도는 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 가열시간은 14초, 최저온도는 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하, 8초의 냉각시간으로 하여 1 cycle을 책정하였다(그림 7). 열피로 시험 후 히트체크 및 crack의 발생에 대한 감수성 및 crack의 진전속도의 지표로 다음 식에 의해 crack 발생빈도를 평가하였다^[4].

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{M} \quad \text{식 (4)}$$

(L : 실제 총 crack 길이, L_i : 각 crack의 길이, M : 광학현미경의 배율)

Crack관찰면은 먼저 disc 형태로 3부분을 절단하고, 중심의 disc를 다시 4부분으로 절단하여 표면 crack의 길이를 측정하였다(그림 8). 여기서, 식 (5)에 의해 평균 총 crack길이를 구하고,

$$L_m = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{4} \quad \text{식 (5)}$$

$$\frac{1}{L_m} = \frac{L_m}{d} \quad (d : \text{crack 측정표면의 길이}) \quad \text{식 (6)}$$

식 (6)으로 단위길이 당 평균 총 crack길이를 구하여

$$L_f = \frac{\Delta L_m}{\Delta \ln N_f} \quad (N_f : \text{cycle 수}) \quad \text{식 (7)}$$

로 나타낼 수 있다.

상기의 균열민감도 지수 L_f 와, 평균 crack길이와 균열진전의 속도에 직접적인 지표가 될 수 있는 최대 균열 길이를 이용하여 열피로 특성을 평가하였다. 하지만 금형강의 수명평가에 객관적 지표로 사용될 수 있는 분석법의 체계성에 의한 기준설정에는 지속적인 연구가 필요한 실정이다.

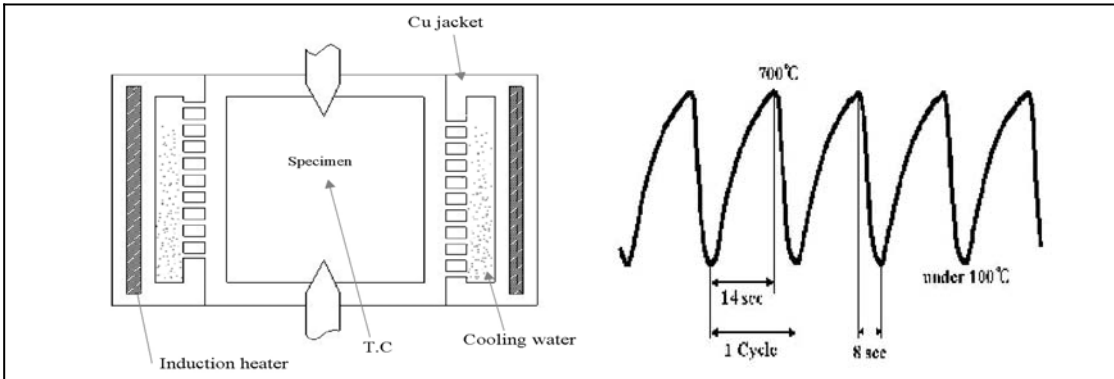


그림 7. 열피로 시험장치의 개념도와 열피로 사이클

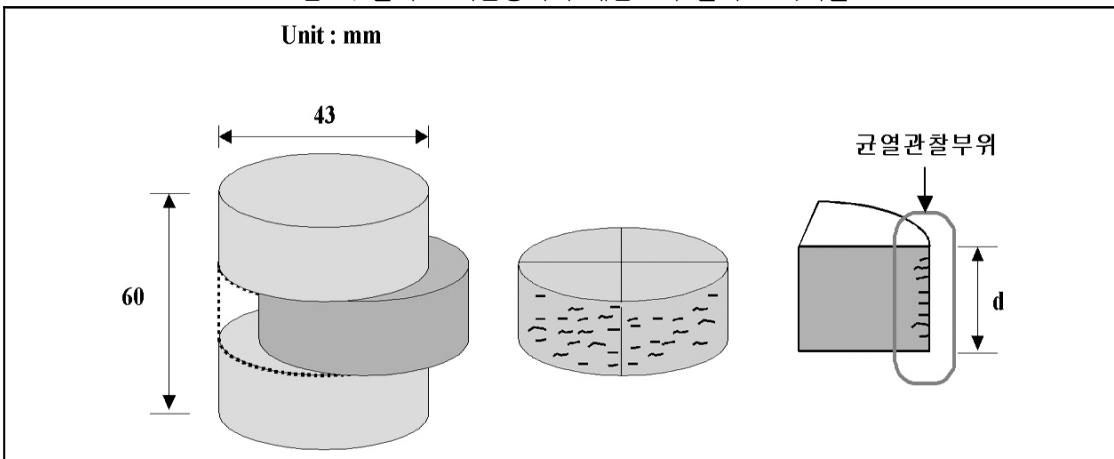


그림 8. 열피로 시편에서의 Crack 길이 측정을 위한 시편 채취 방향

5. 금형강의 내구성 평가와 수명향상 방안

본 절에서는 다이캐스팅용 금형의 수명향상을 위해 현장에서 널리 사용되고 있는 열처리 및 표면개질처리에 대한 소개와 더불어 본 연구진에서 열처리 및 표면처리를 달리한 시편을 제작하여 앞 절에 기술한 평가방법으로 실제 내구성 시험을 수행한 결과를 고찰하였다.

5.1 다이캐스팅 금형의 현행 열처리

JIS에서는 SKD61의 열처리 방법으로 오스테나이트 온도 1000~1050 °C로 하여 공냉하고, 550~580 °C 공냉 1회의 템퍼링을 규정하고 있으며, 현장에서는 1020 °C 오스테나이트 온도에서 공냉 후

600 °C에서 공냉하는 2회 템퍼링에 의해 HRC 45의 경도값을 가지도록 열처리하고 있다^[10].

5.2 금형의 수명향상과 안정화를 위한 열처리

다이캐스팅 열간금형강의 주요 화학성분과 열처리 조건을 표 4^[5]에 나타냈다.

5.2.1 퀴칭

금형의 퀴칭처리의 경우, 승온시 예열과 소정온도에 이르기까지의 균열, 냉각의 3과정에 주의를 해야 한다. 특히 대형 금형에서 승온과정 중 로내, 금형 표면, 금형내부의 승온속도 차이와 냉각과정에서 금형내외의 냉각속도차를 고려하여 균일한 조직을 가지도록 열처리 하는 것이 중요하다. 대표적인 퀴칭

표 4. 주요 열간금형강의 화학성분과 열처리 조건

기호	화학성분(%)							Quenching(°C)	Tempering(°C)
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V		
SKD6	0.37	1.0	<0.5	5.0	1.3	-	0.4	1000 ~ 1050 공	550 ~ 650
SKD61	0.37	1.0	<0.5	5.0	1.3	-	1.0	1000 ~ 1050 공	550 ~ 650
SKD62	0.37	1.0	<0.5	5.0	1.3	1.3	0.4	1000 ~ 1050 공	550 ~ 650
SKD4	0.3	<0.4	<0.6	2.5	-	5.5	0.4	1050 ~ 1070 공, 유	550 ~ 650
SKD7	0.3	<0.4	<0.5	3.0	3.0	-	0.4	1000 ~ 1050 공, 유	550 ~ 650

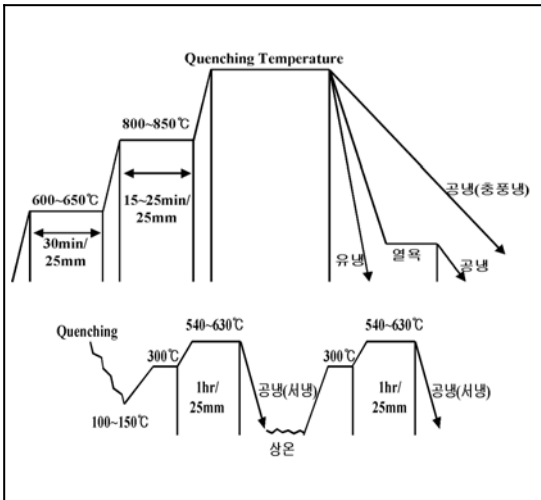


그림 9. 열간금형강의 퀴칭, 템퍼링 열처리도

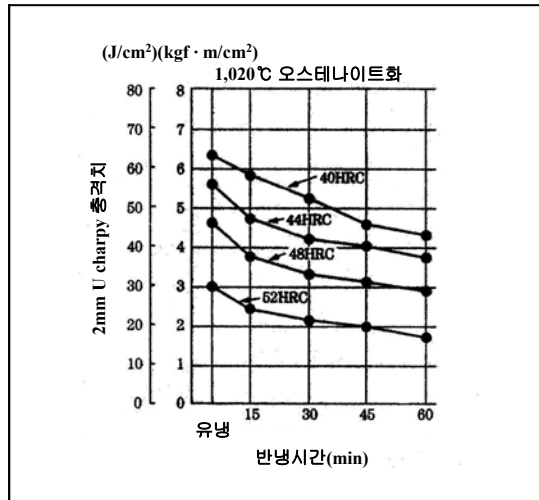


그림 10. SKD61의 인성에 미치는 퀴칭냉각속도의 영향

곡선을 그림 9에 나타내었다. 퀴칭냉각에서 SKD61, SKD6, SKD62 등의 5 % Cr계는 경화능이 좋으므로 공냉하는 것이 일반적이다. 따라서 다이캐스팅 금형의 퀴칭은 충풍냉각(가압가스냉각)이 일반적으로 사용되지만, 이 경우 냉각과정에서 금형의 변형조정은 가능하지만 인성값이 낮게되며, 이러한 경향은 대형화할수록 커진다. 그림 10^[6]에서 보면 퀴칭냉각속도가 인성에 미치는 영향이 크므로 최근에는 히트체크에 의한 균열발생이 쉬운 다이캐스팅형과 단조형에서 유냉과 열욕냉각을 행하는 경우가 많아졌다. 이러한 유냉의 경우 열균열에 주의가 요구되며, M_s점 직상의 300 ~ 350 °C에서 냉각유로부터 꺼내어 공냉 후 약 100 ~ 150 °C가 되면 곧 템퍼링을 행하는 것이 좋다고 알려져 있다.

본 연구진의 시험에서 퀴칭온도에 따른 퀴칭

경도와 고온강도는 그림 11, 12와 같이 퀴칭온도가 높을수록 증가하였다. 하지만 그림 11에서 볼 수 있듯 일정 온도 이상에서 결정립이 조대화되어 인성이 저하되므로 over-heat는 피해야 한다. 시험 결과 1050 °C를 초과하면 오스테나이트 결정입도는 ASTM No. 10 이하로 조대화되기 시작하여 인성의 악화를 가져왔다. 그리고, 그림 11에서의 잔류오스테나이트 분율측정 결과, 퀴칭온도에 따른 차이가 거의 없었다. 즉, SKD61의 1100 °C까지의 오스테나이트 온도에서 정도 저하 현상이 보이지 않는데 이것은 잔류오스테나이트 량의 증가에 따른 영향이 없기 때문으로 생각된다^[7].

그림 13^[5]은 SKD6의 퀴칭경도의 유지시간에 의한 영향을 나타낸 것으로, 유지시간이 50분을 초과하

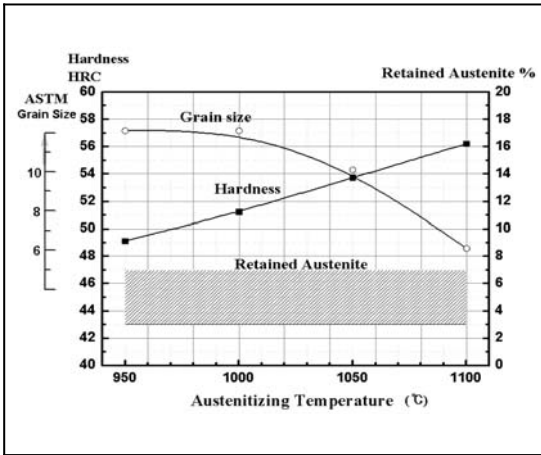


그림 11. 오스테나이징 온도에 따른 경도, 입도 및 잔류오스테나이트 부피분을 변화

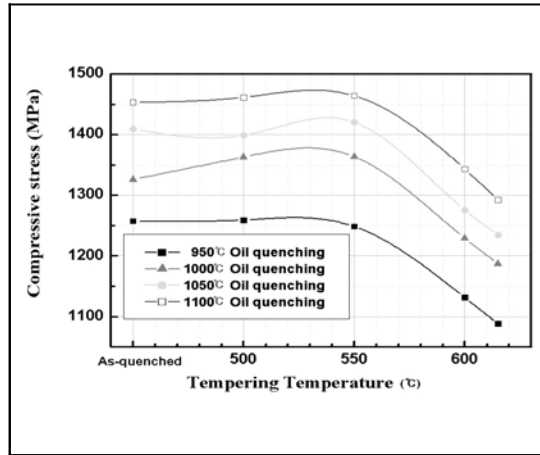


그림 12. 템퍼링 온도에 따른 고온압축강도

면 경도는 급속히 저하한다. 이것은 탄화물이 다량으로 고용됨으로써 잔류 오스테나이트량이 증가하기 때문이다. SKD6에서는 15~50분의 유지시간에 의해 높은 퀴칭경도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 여기서 탄화물의 고용속도는 강종에 따라 차이가 있으므로 가열유지시간 또한 강종에 따라 차이가 있다. SKD61 금형강에서 적정퀴칭온도에서의 유지시간을 시험결과로부터 추정하여 보고된 가열유지시간은 퀴칭온도 1030 °C에서 15~30 분이였다.

한편, 히트체크 원인 중 큰 비율을 차지하는 요소로서 퀴칭 냉각속도를 들 수 있다. 그림 14^[9]는 다이캐스팅용 금형강 SKD61의 CCT곡선으로써, 펄라이트 노우즈는 장시간 측에 있으나 베이나이트 노우즈는 단시간측에 있다. 이에 의해 금형크기는 물론 냉각조건에 따라 베이나이트 조직의 생성을 피할 수 없는 경우가 있다. 따라서 최근 급냉기술에서는 초기 냉각속도의 관리도 중요하지만 베이나이트변태역의 급냉 필요성이 다양하게 보고되고 있다. 실제 132000 sec(700 °C:~1 min., 400 °C:~28 min., 300 °C:~52 min., 100 °C:~220 min.)의 서냉시험 결과 HV 442 정도값을 나타내며, 그림 15와 같이 입계탄화물과 베이나이트(~30%)조직이 생성되었다. 각 냉각방법에 따른 기계적 특성을 그림 16^[12]에 나타냈으며, 냉각속도가 늦어짐에 따라 입계탄화물과 베이나이트 조직

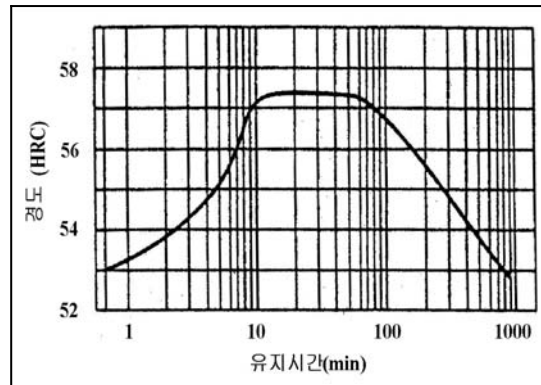


그림 13. SKD6의 퀴칭경도와 가열유지시간의 관계(퀴칭온도 1030 °C, 공냉)

형성에 따른 인성의 감소를 볼 수 있다. 현재에는 퀴칭 냉각속도에서 실용 금형에의 새로운 급냉기술에 의한 냉각제어법에 의해 퀴칭균열을 방지하고 퀴칭조직을 갖게 함으로써 인성치도 만족시키는 결과가 얻어져 내히트체크성 향상도 가능해졌다. 이러한 급냉기술로써 진공가압가스냉각, 오일냉각, 솔트냉각 등이 실용화되고 있다.

5.2.2 템퍼링

열간 금형강은 열간에서의 강도를 유지하기 위해 W, Mo, V 등을 함유하고 있어 템퍼링 온도 550 °C 부근에서 2차 경화현상을 나타낸다(그림 17). 금형 수명을 향상시키기 위해서는 금속학적 면에

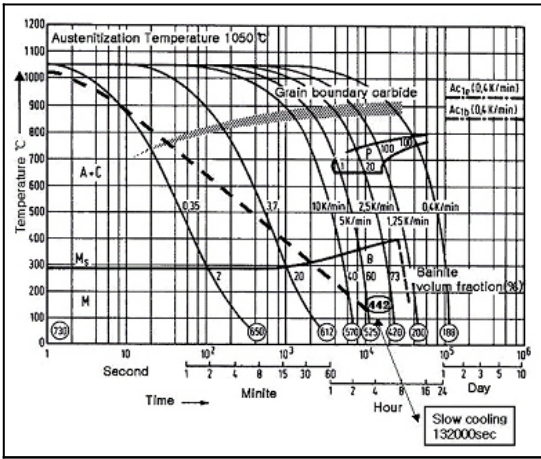


그림 14. 열간금형강 SKD61의 CCT곡선

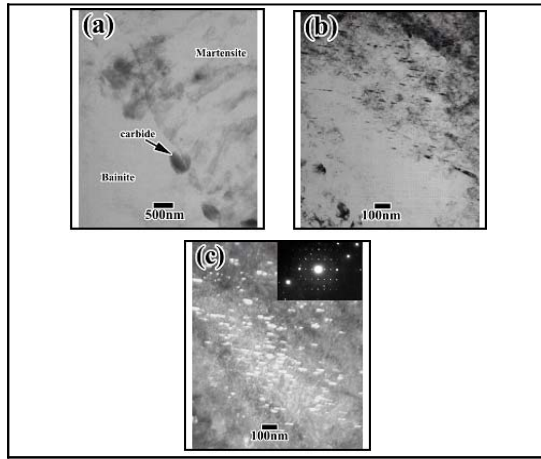


그림 15. 서냉시험에 의한 입계탄화물과 베이나이트의 TEM관찰 사진

(a) 입계탄화물 (b) 베이나이트 조직의 bright field image (c) dark field image와 회절패턴

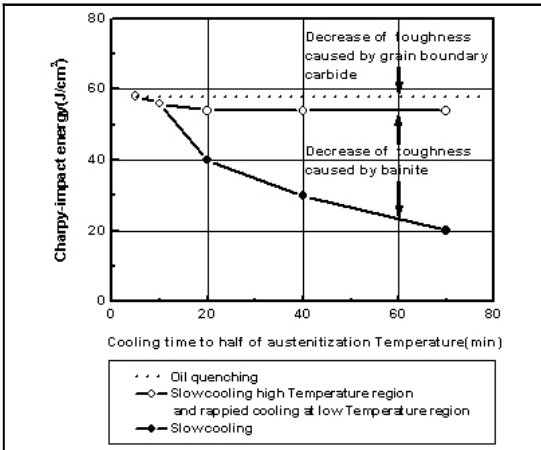


그림 16. 기계적 특성에 미치는 입계탄화물과 베이나이트 조직의 악영향

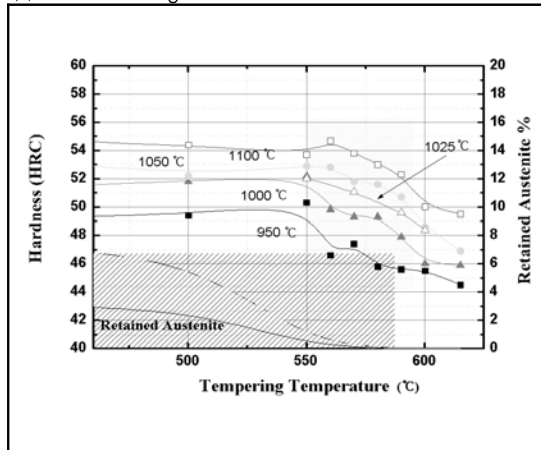


그림 17. 템퍼링 온도에 따른 경도의 변화와 잔류오스테나이트 분율변화

서 상반관계에 있는 강도와 인성을 균형적으로 만족시킬 필요가 있다. 보통 템퍼링은 잔류 오스테나이트(퀵칭시 3~7%, 그림 17)가 분해되고 또한 인성이 증가하는 2차 경화온도 이상에서 실시한다(그림 18 참고). 그림 17의 시험결과에서처럼 근소한 템퍼링 온도차에서 경도가 크게 변화하므로 실제 작업에서는 온도의 균일성과 온도 유지시간의 컨트롤이 중요하다.

열간금형강의 일반적인 템퍼링곡선을 그림 9에 나타내었다. 대형 및 복잡한 형상의 금형의 템퍼

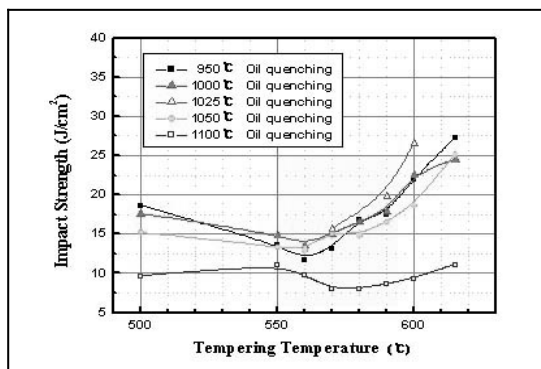


그림 18. 템퍼링온도에 따른 충격값의 변화

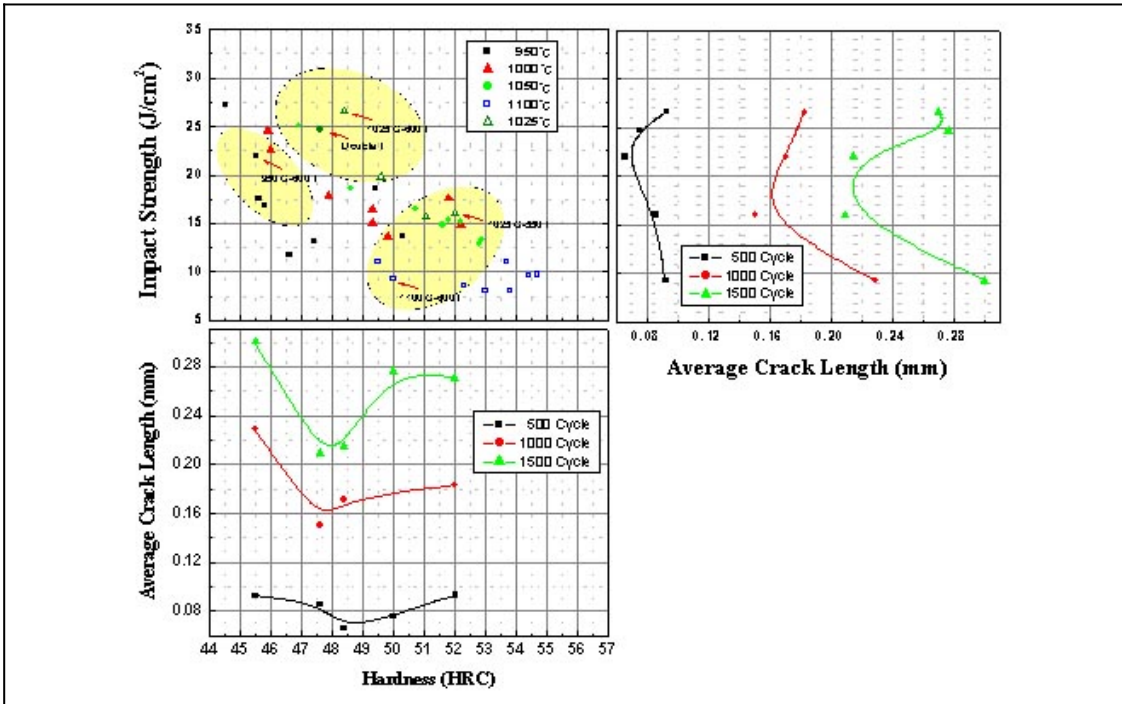


그림 19. 평균 crack 길이에 미치는 경도와 충격값 영향

링에서는 300℃ 전후의 저온에서 서서히 열을 가해 변형과 급열균열을 방지한다. 또한 조직과 기계적 성질의 안정화를 위해서 2회 템퍼링을 일반적으로 실시하고 있는데 첫 번째 템퍼링은 목표의 경도를 얻기위함(잔류 오스테나이트 분해 및 응력해소)이고, 두 번째는 1차 템퍼링보다 30℃ 정도 낮은 온도에서 행하여 경도의 저하를 방지한다.

5.3 각 열처리 조건에 따른 열피로 특성 평가

그림 19는 각 열처리조건에 따른 경도와 충격값을 나타낸 그림으로, 열피로 시험 후 최대 crack 길이와 평균 crack 길이를 측정하여 최적의 열처리 조건을 검토한 결과, 세 개의 군으로 나타낼 수 있었다. 즉, 1025℃ 퀴칭-2회 템퍼링과 1025℃ 퀴칭-600℃ 템퍼링한 시험편의 열피로 시험결과 가장 우수한 수명향상 효과를 나타냈으며, 950℃ 퀴칭-600℃ 템퍼링 시험편은 인성은 높으나 강도

技術現況分析

가 낮고, 1025℃ 퀴칭-550℃ 템퍼링 및 1100℃ 퀴칭-600℃ 템퍼링한 시험편의 경우 강도는 높으나 인성의 저하로 비교적 히트체크 발생이 큰 것으로 나타났다.

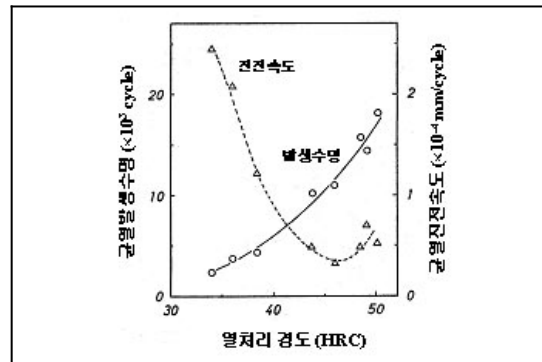


그림 20. 열처리 경도와 히트체크 특성의 관계

균열발생 수명은 경도가 높을수록 향상되는데 이것은 경도가 높은 쪽이 고온강도가 높기 때문이다. 그림 12는 고온압축 시험결과를 나타내었다. 일반적으로 항복강도가 증가하면 소성변형이 지연 또는 방지됨으로써 균열선단의 소성역 거동이 변화됨에 따라 균열 진전 속도 등에 영향을 미친다. 한편,

표 5. 초경질 박막피복의 방법

방법	도금	확산처리				증착처리				
	경질Cr	질화	boronizing	TRD (고온)	TRD (저온)	CVD (저온)	CVD (고온)	PVD	PCVD	
표면층	Cr	Fe ₂ -3N Fe ₂ N	FeB, Fe ₃ B	VC, NbC Cr ₇ C ₃ , VNbC	CrN, VN	W ₂ C	TiC, TiN, TiCN	TiN, TiCN	TiN	
시행방법	수용액 중에서 전해	용융 salt에 침적 유동층에 침적 가스 중 가열			-	고온법과 동일	고온법과 동일	할로겐화 가스를 함유한 수소 분위기에서 증착	감압용기중에 금속을 용해하고, 증기를 이온화, 피처리물에 증착	할로겐화 가스함유수소 , 질소를 이온화하여 증착
시행시의 모재 온도(℃)	50~80	500~600	600~1,000	800~1,200	500~650	500~600	900~1,100	200~600	500~600	
소요시간	1~5	①100~200 ②③ 1~8	1~4	0.3~8	2~6	1~3	4~8	2~4	2~4	
층깊이(μm)	20~50	10~20 (회합물층)	50~500	5~15	2~8	5~20	5~15	1~5	1~5	
변형발생의 위험성	소	중	대	대	소	소	대	소	소	
국부피복	가능	가능	가능	가능	가능	곤란	곤란	가능	가능	
모재경화열처리	처리 전	처리 전	처리 후 재가열, 혹은 처리와 동시에	처리와 동시에	처리 전	처리 전	처리 후 재가열하여	처리 전	처리 전	
후가공	필요성	때에 따라 필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요	일반적으로 불필요
	방법	연삭	-	-	-	-	-	-	-	-
두께 균일성	불량	양호	양호	양호	양호	양호	양호	불량	양호	
모재	각종 금속 비금속	철강	철강, Ni합금, Co합금, 초경 합금 등	좌동	철강	철강, Ni합금, Co합금, 초경 합금 등	좌동	좌동	좌동	

히트체크 및 균열의 발생저지에는 기지경도와 고온 강도가 클수록 효과적이지만 균열진전속도는 HRC 47을 넘게 되면 쉽게 진행되는 양상을 보인다^[11] (그림 20). 이것은 경도가 너무 높으면 오히려 인성이 저하됨으로써 균열진행이 용이해지기 때문이다. 실제로 950 ℃에서 퀴칭한 시험편은 경도값이 낮고, 1100 ℃에서 퀴칭한 시험편의 경우는 grain size의 조대화에 따른 인성의 저하로 균열진행이 용이하여 열피로 특성이 비교적 낮게 나타났다.

평균 crack 길이와 경도 및 충격값을 비교, 검토한 결과를 마찬가지로 그림 19에 나타내었다.

각 열피로 사이클에서 경도와 충격값의 평균 crack 길이와의 관계에서 열피로 특성이 가장 양호한, 다시말해 평균 crack 길이가 가장 작은 영역을 검토한 결과, 금형 수명향상을 위한 최적 열처리 조건으로는 경도값 HRC 47~49, 충격값 16~23 J/cm²으로 유추할 수 있었다^[7].

5.4 금형의 표면개질처리

현재 사용되고 있는 금형에의 각 물성으로는 실제 다이캐스팅 금형에 부하되는 장시간에 걸친 가

표 6. PVD·CVD 피막처리 금형강의 열피로시험 후의 crack발생 사이클 수, 단위면적당의 crack 총길이, crack 발생빈도 결과 및 각 피막의 특성치

PVD·CVD 처리피막	crack발생 사이클 수 N_f	단위면적당 crack 총길이 C_f , mm/cm ²	crack 발생빈도 $dc/d\ln N_f$	열팽창계수 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	종탄성계수 $\times 10^4 \text{kgf/mm}^2$	비커스경도 HV
TiN(PVD)	1000	5000	1.0	9.30	2.56	1900-2400
CrN(PVD)	10	64000	5.7	2.30	-	1000-2000
TiN(PVD)	2000	2000	0.9	9.30	2.56	1900-2400
TiN(CVD)	10	26000	3.0	7.40	4.48	3300-4000
TiCN(CVD)	200	14500	1.2	8.10	3.52	2600-3200
TiC-TiN (CVD)	50	15000	0.9	-	-	-
TiC-TiCN-TiN(a.CVD)	3000	1000	0.7	-	-	-
TiC-TiCN-TiN(b.CVD)	500	17500	2.3	-	-	-
W ₂ C(CVD)	500	20000	2.7	가) 3.84*	나) 5.36*	2300-2400
TD(VC)	10	6000	6.0	7.25	2.60	2800
금형강종래재	100	24000	3.9	10.3	2.10	450(HRC45)
금형강개량재	500	22000	2.8	11.6	2.10	450(HRC45)

* : W₂C의 값이 불분명하기 때문에 WC값을 나타낸다.

열-냉각 열사이클에 의한 히트체크 및 crack, 그리고 용손 등의 결함 발생 수명 연장에 한계성을 가진다. 이의 극복을 위해 다이캐스팅 금형 표면에 표 5와 같은 개질처리를 함으로써 수명향상을 시도하고 있다^[3]. 하지만 이러한 표면처리제의 평가방법은 표면자체의 물성평가에 그쳐, 실제 피막의 열피로 거동이나 용손거동 등에 대한 연구는 부족한 실정이다.

표 6에 PVD, CVD 피막처리에 의한 금형강의 열피로 시험(10000 사이클) 후 crack 발생 사이클 수의 단위면적 당 crack 총길이 및 crack 발생빈도(C_f :여기에서는 단위면적 당 crack 발생빈도를 구함)에 대해, 각 사이클마다 시험면에 발생한 crack의 총길이와 시험 사이클 수와의 관계로부터 구한 결과를 나타내었다^[2]. 결과를 보면, PVD처리한 TiN피막처리는 높은 내히트체크성을 나타내며 CrN 및 CVD처리에 의한 TiN은 열피로 시험과정에서의 피막 건전성이 악화됨을 알 수 있다. 또한 crack 발생빈도 C_f 도 PVD처리 TiN피막에서 낮아져 금형 수명향상을 예상할 수 있다. 그리고 기타 칩

유질화 및 가스질화(KANUC처리)처리에 의한 수명 비교의 보고에서도 내히트체크 및 crack의 진전 저지 효과와 수명향상 수법으로 유효함을 나타내고 있다.

한편 방전가공의 영향은 최근 금형 가공수단이 변화됨에 따라 요구되는 연구분야로, 다이캐스팅 금형의 가공에서 생산성향상 및 공정단축, model change 시기 단축에 따른 금형 제작의 합리화를 위한 중요한 수단으로 일반화된 공정이다. 방전가공에 의해 표면에 형성된 변질층은 층내의 crack이나 용융, 재응고층을 기점으로 열피로에 의하여 금형 파괴유발의 원인이 된다. 따라서 방전 변질층의 제거는 필수적이나 가공이 어려워 방전표면 자체로 사용하는 경우도 있어 다이캐스팅 수명향상에 중요한 과제가 되었다. 변질층을 연마하여 제거하여도 변질층 부근의 인장응력 영향층이 변질층두께보다 깊어 이러한 응력잔존 영역에 의해 금형수명은 저하된다. 따라서 뜨임처리에 의한 방전가공 개선 등 열처리와 peening 및 표면의 질화처리에 의한 표면개질이 필요하다.

표 7. Blasting 처리 조건

Designation	R0	R1	R2	R3	WC
Process	As-machined	Micro-blasting	Micro-blasting	Sand blasting	Wire Cut(EDM)
Particulars (Sequence, Particle size, Pressure)	-	1. Ceramic particle, 45 μ m, 3bar 2. Ceramic particle, 30 μ m, 3bar	1. Ceramic particle, 45 μ m, 4bar 2. Ceramic particle, 37 μ m, 4.5bar 3. Ceramic particle, 30 μ m, 4bar	1. Sand 210-310 μ m, 7bar	-

표 8. 잔류응력과 균열진전속도에 미치는 각 표면처리의 영향

Designation	R0	R1	R2	R3	WC
Residual stress(kg/mm ²)	-	-88.57 \pm 3.86	-85.56 \pm 1.14	-88.98 \pm 7.78	-
L_f	0.5753	0.2316	0.2411	0.2733	0.7151
Averaged total crack length, \bar{L}_m at 1000 cycle(mm)	0.5668	0.6560	0.8104	0.7005	1.0797

본 연구진에서는 방전층이 열피로 특성에 미치는 영향과 표면개질 방법 중 micro-blasting 및 sand blasting 처리에 따른 열피로 거동을 관찰하였다. 각 처리의 조건을 표 7에 나타내었으며, 표 8은 각 표면처리 후 잔류응력 및 열피로 시험결과 L_f (단위길이 당 crack 발생빈도) 및 평균 crack 길이를 비교한 결과이다^[8].

기계적 연마에 의한 가공상태의 시험편보다 방전가공한 시험편은 변질층에 의한 영향으로 평균 crack 길이가 거의 두배나 증가하였으며, 균열민감도 또한 증가하였으므로 방전가공 상태에서 사용할 경우 금형수명이 크게 감소함을 예상할 수 있다.

Micro-blasting 및 sand blasting의 경우는 표면 잔류응력과 열피로 거동의 직접적 관계를 알아보기 위하여 잔류응력을 측정된 결과 85~89 kgf/cm² 정도로 나타났다. 열피로 거동을 관찰한 결과 blasting처리에 의한 표면결함에 의해 초기의 crack 발생은 크게 나타났으나, L_f 는 blasting처리를 하지 않은 연마 가공상태의 시험편 보다 약 2배 감소하였다. 이는 열피로 crack 진전을 방해하는 잔류응력의 효과로 내열피로 특성을 증가시켜 금형 수명 증가를 가져왔기 때문으로 판단된다.

6. 결 론

다이캐스팅용 금형강의 신뢰성 평가방법과 이를 통한 재료의 특성평가 및 열피로 특성평가의 실풠을 들어 금형강의 수명향상방안을 소개하였다.

현 금형업계는 수주경쟁 속에 납기와 생산성 향상을 통한 원가절감 요구가 심화되고 품질의 고정도화가 요구됨으로써 금형의 사용조건은 더욱 가혹화 될 것이 분명하다. 이러한 현실에서 열피로, 용손 거동 평가에서 PVD, CVD 그리고 이온질화 등의 표면처리의 적용 평가, 방전가공기술에 의한 변질층 열피로 거동 및 이의 악영향 제거방법 등 기술발전에 따른 평가기술의 방법도 변화가 요구되고 있다. 하지만 현재의 열피로 특성 등 각종 금형강의 시험수단 및 내구성 평가방법은 체계적이지 못하고, 객관적 평가기준이 없어 집중적 연구에 의한 금형의 수명예측 관리가 절실한 실정이다. 따라서 본 연구진에서 소개한 내용을 바탕으로 금형강의 내구성 평가를 통한 수명향상에 관한 체계적 제 요인 분석에 접근할 수 있었다.

본 고의 고찰 결과 금형의 열처리 기술에 의한 수명 향상, 표면 질화처리에 의한 효과 및 blasting 처리에 의한 잔류응력의 유용성 등을 확인하였으며, 따라서 이후의 금형의 수명향상을 위

한 기술은 열처리 기술개발 및 표면개질에 집중될 것으로 예상할 수 있다.

향후 금형 수명향상 기술 전망을 정리해보면, 1)진공템퍼링 및 가압식 냉각 진공로의 이용 증대, 2)blasting 및 blasting-질화의 복합처리에 의한 열피로 수명향상, 3)방진 변질층 제거에 관한 연구, 4)정밀금형에의 이온질화, 이외에 최근 주목되고 있는 5)cryogenic처리에 의한 내마모성 향상 등을 들 수 있겠다.

참 고 문 헌

- [1] 須田光則, 山口敏郎, 紀田兼昭, ヒートチェックを克服する熱處理, 熱處理, 36卷, 3号, 1996, pp.165-170
- [2] 日原政彦, (譯)한국생산기술연구원 주조공정연구팀, 다이캐스팅 금형의 수명향상과 대책, 1997
- [3] 日原政彦, 久保田普堪, 今釜敬一, 紀田兼昭, ヒートチェックを克服する表面改質法, 熱處理, 36卷, 3号, 1996, pp.171-181
- [4] 日原政彦, 藤原和徳, 向山芳世, 緒方 勳, ダイカスト金型鋼に關する研究—金型鋼と試料の殘留応力測定—精密工學會誌. 55卷, 10号, 1989, pp.137.
- [5] 西村富隆, 金型熱處理のための基礎データ, 熱處理, 37卷, 2号, 1997, pp.82-87
- [6] (社)日本熱處理技術協會, 熱處理技術便覽, 2000, pp.449-473
- [7] 윤국태, 이종훈, 임영목, 유위도, 열간금형강 SKD61의 열피로 특성에 미치는 열처리의 영향, 2002년도 한국열처리공학회 춘계학술대회 논문집, pp.9-11
- [8] 임영목, 이종훈, 유위도, 이장원, 열간금형강의 열피로특성에 미치는 표면상태의 영향, 2002년도 대한금속재료학회 춘계학술대회 논문집, pp.79
- [9] DIN-Taschenbuch 218, Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, Druck, 1986:228
- [10] 大和久重雄, 熱間金型のヒートチェックと熱處理, 熱處理, 36卷, 3号, 1996, pp.119-123
- [11] 金型のヒートチェック研究部會 共同研究成果發表講演會자료집, 日本熱處理技術協會, 1995
- [12] Suda M, Yamaguchi T, Kida K., Heat treatment to prevent heat checking of hot die steel, Journal of the Japan society for heat treatment, 36, 1999, pp.165-170