

뜨임처리 연화저항과 인성이 우수한 브레이크 디스크

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이원식
(wslee0912@reseat.re.kr)

1. 서언

- 이 발명은 오토바이, 자동차, 자전거 등의 디스크 브레이크에 사용되는 디스크에 관련되는 것으로, 브레이크 패드와의 마찰부가 담금질 처리로 적정 경도를 가지며, 뜨임연화 저항이 우수하고, 인성이 우수한 브레이크 디스크에 관한 것이다.
- 여기서 「뜨임연화 저항이 우수하다」는 것은 뜨임연화 저항이 높은 것을 의미하는 것으로 자동차가 제동 시 마찰열에 의하여 고온에 유지될 때 연화가 적고 초기의 적정 정도 근처의 경도를 유지하는 특성을 말한다.

2. 발명의 필요성

- 브레이크 디스크(이하 BD로 칭함)의 기능은 BD와 브레이크 패드와의 마찰로 차륜의 회전을 억제하여 차량을 제동하는 것이다.
- BD는 적당한 경도를 가져야 한다. 경도가 낮으면 브레이크 기능이 약해지고 마찰로 빨리 마모된다. 너무 단단하면 브레이크 소리(brake squeal)가 난다. 브레이크의 적정 경도는 HRC 32~38다.
- 브레이크 재료는 SUS 420J2로 탄소량이 높은 마텐자이트계 스테인리스강을 담금질과 뜨임처리를 하여 사용하였으나 뜨임처리 비용이 커 최근에는 일특개 S57-198249나 일특개 S60-106951와 같이 담금질처리 그대로 사용하고 있다.

- 최근 자동차 등에 연비 향상이 요구되고 있고 연비 향상에는 차체중량 경량화가 지향되고 있다. 제동장치에도 경량화를 위해 BD의 소형화, 두께의 감소 등이 추진되고 있다.
- BD 소형화, 박육화는 열용량 저하를 초래하여 제동 시 마찰열로 BD의 온도를 높게 한다. 종래의 재료에서는 뜨임처리가 되어 연화내구성이 낮아질 염려가 있어 뜨임저항이 높고 뜨임연화 저항에 우수한 BD가 요망되고 있다.

3. 종래기술의 문제점

- 특개(特開)2002-146489호 공보는 Ti, Nb, V, Zr을 적정량 함유한 저탄소계 마텐자이트계 스테인리스강판, 특허 제3315974호 공보는 Nb이나 Nb에 Ti, V, B를 복합적으로 첨가하는 스테인리스강, 특개 2002-121656호 공보는 강중에 C, N, Ni, Cu, Mn, Cr, Si, Mo, V, Ti 및 Al 함유량에 Nb, V를 적정량 함유시키는 강이 제안되고 있다.
- 이상의 특허는 가격이 비싼 합금원소를 비교적 다량 첨가할 필요가 있어 BD 제조원가가 높아지며, 600℃에서 장시간(1시간 정도) 유지하면 경도가 급격히 낮아지는 문제가 있다.

4. 발명의 내용

- BD용 재료를 특정 조성의 저탄소 마텐자이트계 스테인리스강으로 BD의 구(舊) 오스테나이트 입경을 8 μ m 이상으로 하여 적정 담금질 경도를 가지며, 또한 뜨임연화 저항을 향상시키는 것이다.
- 질량%로 0.055%C-0.1%Si-12%Cr-1.5%Mn-0.01%N-잔부 Fe인 마텐자이트계 스테인리스강에 대하여 뜨임 가열온도에서 1분간 유지 후 공랭한다.
- 담금질 온도가 1,000℃ 때 입도는 6 μ m, 1,050℃ 때 8 μ m, 1,100℃ 때 12 μ m 이었다. 이들을 600℃에서 1시간 유지 후 경도를 측정하였으며 평균 입경 8 μ m 이상이면 경도는 HRC 27 이상이었다.

- 뜨임과정에서 Cr 등의 합금원소는 확산으로 입계에 도달한 것은 석출이 쉽고 입계에 조대한 석출물을 형성한다.
- 미세한 구γ립을 가진 금속조직에서는 입내의 Cr 등의 합금원소로부터 구γ입계까지의 거리가 짧고 뜨임처리하면 합금원소가 쉽게 구γ입에 도달하여 조대한 석출물을 형성한다.
- 입내에는 미세한 석출물의 형성은 적어지고 조대한 석출물은 석출강화에 기여가 적어 뜨임연화 저항에도 기여하지 못한다.
- 이 발명의 내용은 다음과 같다.

- 질량%로 C 0.1% 이하, Si 1.0% 이하, Mn 2.0% 이하, Cr 10.5~15.0%, N 0.1%로 다음 두식을 만족하고, 구γ립의 평균입경이 $8\mu\text{m}$ 이상 $15\mu\text{m}$ 미만인 마텐사이트 조직을 가지고 뜨임연화 저항과 인성이 우수한 BD이다.

$$5\text{Cr}+10\text{Si}+15\text{Mo}+30\text{Nb}-9\text{Ni}-5\text{Mn}-3\text{Cu}-225\text{N}-270\text{C} < 45 \dots\dots\dots (a)$$

$$0.03 \leq \{ \text{C} + \text{N} - (13/92)\text{Nb} \} \leq 0.09 \dots\dots\dots (b)$$

- 위의 성분 외에 질량%로 Cu 0.01~1.0% 함유하고 600℃에서 1시간 유지하는 뜨임처리 후 경도가 HRC 27 이상이다.

- 또한 Cu를 1.0~3.0% 함유하거나 Nb을 0.02~0.6% 함유하고 석출 Nb과 전량 Nb비(석출 Nb/전 Nb)가 식 (c)를 만족한다.

$$0.5 < (\text{석출 Nb} / \text{전 Nb}) \leq 0.7 \dots\dots\dots (c)$$

- 질량%로 Mo 0.01~2.0%, Ni 0.10~2.0% 중, 한 가지나 두 가지를 함유하고 Co 0.01~1.0%를 함유하거나 Ti 0.02~0.3%, V 0.02~0.3%, Zr 0.02~0.3%, Ta 0.02~0.3% 중 선택하여 1가지나 2종 이상을 함유한다.

- 질량%로 B 0.0005~0.005%, Ca 0.005~0.005% 중 적당량 함유한 BD로 경도 HRC 32~38의 적정 경도를 가져 뜨임연화 저항이 높고 우수하며 인성이 좋은 BD를 쉽고 값싸게 제조할 수 있는 방법이다.

5. 발명을 실시하기 위한 가장 좋은 조건

○ BD 제조 순서는 보통 다음과 같다.

- 소재 마텐자이트계 스테인리스강판으로 원반을 만들고 패드가 닫는 마찰부에 고주파유도가열 등으로 담금질 온도로 가열 후 냉각하며 소정의 경도로 조정한다.
- 이 발명에서 사용하는 마텐자이트계 스테인리스강판은 열연이나 냉연강판 어느 것이든 이 재료의 성분을 제한하는 이유는 다음과 같다.
 - C : 0.1% 이하 : 0.1% 이상이면 조대한 Cr탄화물이 형성되고 내식성저하와 함께 인성이 낮아진다.
 - N : 0.1% 이하 : 담금질 후 경도가 높아지며 500~700℃ 범위에서 미세하다. Cr탄화물 형성 석출경화작용으로 연화저항을 향상시킨다.
 - Cr : 10.5~15.0% : 10.5% 이상 함유하는 것이 필요하다. 15.0%가 넘으면 가공성과 인성을 저하시킨다.
 - Si : 1.0% 이하 : 탈산제로 1.0% 이상이면 담금질성 저하로 경도를 저하시킨다.
 - Mn : 2.0% 이하 : δ페라이트 생성 억제, 2.0% 이상이면 내식성을 저하시킨다.
 - P : 0.04 이하 : 열간 가공성을 저하시키는 원소로 가급적 적은 것이 좋으나 원가상의 문제가 될 수 있다.
 - S : 0.010 이하 : 열간 가공성을 저하시키는 원소로 가급적 적은 것이 좋으나 원가상의 문제가 될 수 있다.
 - Al : 0.2% 이하 : 탈산제로 강중에 과잉으로 잔류하면 내식성, 인성을 저하시킨다.
 - Cu : 0.01~1.0% 미만 : 내식성 개선 효과가 있고 0.01% 이상 1.0% 미만이 좋다.
 - 이상의 기본성분으로서 패드와 마찰되는 부위를 담금질 처리 후 구γ립의 평균 입경이 8 μ m이상 15 μ m 미만인 마텐자이트 조직이 되고 600℃에서 1시간 유지하는 뜨임처리 후 경도가 HRC 27 이상이 되는 뜨임연화 저항이 있는 BD가 된다.
 - Cu : 1.0~3.0% : Nb 0.02~0.6%를 첨가하여 앞의 식(a), (b)를 만족시켜 뜨임처리 후 경도가 HRC 30이 된다. 1.0% 이상 함유하면 뜨

임연화저항이 향상되나 3.0%를 넘으면 인성이 열화한다.

- Nb : 0.02~0.6% : 담금질 후 600℃에 유지할 때 탄질화물을 형성 석출경화하고 고온에서의 경도 저하를 억제한다. 이와 같은 효과를 얻기 위해서는 0.02% 이상 함유하는 것이 요망되고 0.6% 이상 함유하면 인성이 저하한다. 적당한 양은 0.08~0.3%이다.
 - Mo : 0.01~2.0%, Ni 0.1~2.0% 중 1가지나 2가지 선택 : Mo, Ni은 모두 내식성 향상 원소로 필요에 따라 선택적으로 함유시킨다.
 - Co : 0.01~1.0% : 내식성 향상, 필요에 따라 0.01% 함유를 요망, 1.0% 이상 함유하면 인성을 저하시킨다.
 - Ti : 0.02~0.3%, V 0.02~0.3%, Zr 0.02~0.3%, Ta 0.02~0.3% 중 선택 하여 1종 또는 2종 이상 : 모두가 탄화물 형성석출경화로 뜨임연화 저항을 향상시킨다.
 - B : 0.0005~0.0050%, Ca 0.0005~0.0050% 중 선택하여 1종이나 2종 : 강의 담금질성 향상, 필요에 따라 선택, 0.005% 이상 함유하면 내식성을 저하시킨다.
- 식 (a)는 우수한 담금질 안전성을 확보하기 위한 조건이며 이는 담금질 가열시 오스테나이트상이 75%이상 생성되고 공랭 이상의 빠른 냉각에서 마텐자이트상으로 변태가 안정화되어 소정의 경도를 확보하는 오스테나이트 영역이 넓고 가열 범위가 넓음을 의미한다.
- 식 (b)는 담금질 경도를 소정의 적정범위 내에 경도가 되기 위한 조건이다. 이 식의 중간 항이 0.03 미만이면 DB의 적절범위 하한치(HR32) 미만이 되고 0.09 이상이 되면 상한치(HR38)를 초과하여 높아진다.
- 위와 같은 조성을 가진 소재 재료를 제조하는 방법은 특별히 제한되어 있지 않고 용강을 전로, 전기로 등에서 용해하고 용강을 VOD, AOD 등 2차 정련하여 연속주조법으로 주조한다.
- 강 소재를 1,100~1,250℃로 가열하여 열간 압연한다. 두께 3~8mm로 압연하여 풀림열처리 후 슛 블라스트와 산세를 한다. 압연제품의 풀림작업은 750~900℃로 10시간 정도 하며 BD용 소재로서 적당한 경도는 HRB 75~88이다.

- 소재를 편칭 등의 가공으로 원반상을 만들고 담금질 처리는 γ 영역인 $1,000^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서 담금질하며 냉각속도는 1°C/s 이상의 속도로 처리한다. 여기서 γ 영역이란 오스테나이트(γ)상이 75체적%를 말한다. 온도가 $1,000^{\circ}\text{C}$ 이하에서는 경도 저하가 현저하므로 $1,050^{\circ}\text{C}$ 초과 또는 $1,100^{\circ}\text{C}$ 초과가 더욱 좋다.
- 담금질 온도가 $1,200^{\circ}\text{C}$ 를 넘으면 δ -페라이트 생성이 많고 오스테나이트는 75%가 되지 않으며 고온이 될 수록 γ 입 평균입경이 $15\mu\text{m}$ 이상이 되므로 $1,200^{\circ}\text{C}$ 이하로 하는 것이 좋다. $1,150^{\circ}\text{C}$ 를 추천한다.
- 가열 후 1°C/s 이상의 냉각속도로 Ms점 이하 200°C 이하까지 냉각한다. 좋은 냉각속도는 $5\sim 500^{\circ}\text{C/s}$ 이며 안정된 냉각속도는 100°C/s 이다. 이와 같이 하여 제조된 BD는 구 γ 립의 평균직경은 $8\sim 15\mu\text{m}$ 이며 뜨임 연화저항이 우수하고 인성도 우수한 특징을 가진다.
- 구 γ 립의 평균입경 : $8\mu\text{m}$ 이상 $15\mu\text{m}$ 이하 : 구 γ 립의 평균입경미만에서는 구 γ 입내에 미세한 석출물의 석출이 적고 뜨임연화저항의 증가가 적다. 또한 $15\mu\text{m}$ 이상이 되면 취성파괴(brittle fracture)의 파면단위가 커져 인상이 저하한다.

6. 발명의 실시 예

- 금속조직관찰 : 담금질 처리 후 금속조직관찰용 시험편을 채취하여 압연방향과 평행한 판 두께 방향단면을 연마하여 알칼리 용액으로 부식시켜 구 γ 입계를 출현시키고 광학현미경(400배)으로 5시야 이상을 관찰하여 γ 입의 평균입경을 측정하였다.
- 석출 Nb양 측정 : 담금질 처리 후 전해추출용시험편(sample for electrolytic extraction)을 채취하여 전해액(electrolyte)(10v/v% acetylacetone-1w/v% tetramethylammonium chloride)과 메타놀(metanol)로 잔사를 추출하였다. 추출된 잔사를 고주파유도결합 플라즈마 발광분석기로 Nb양을 측정하여 석출 Nb로 한다.

- 담금질 안정성 시험 : 담금질 후 시험편을 산세처리하고 JIS Z 2245에 따라 로크웰 경도기 HRC로 5곳을 측정하여 평균치를 담금질 경도로 하였다.
- 뜨임연화 저항 시험 : 담금질 후 뜨임처리하고, 시험편을 산세 처리하여 JIS Z 2245에 따라 로크웰 경도기 HRC로 5곳을 측정하여 평균치를 뜨임연화 저항으로 평가하였다.
- 뜨임처리 후의 인성 평가시험 : 담금질이나 뜨임처리 한 시험편을 산세하고 JIS Z 2202에 따라 V노치를 5개 만들어 샤르피 충격시험을 시험 온도 25℃에서 5개 실시하였으며 그 값이 50J/cm² 이상이면 인성이 실용상 문제가 없는 것으로 평가하였다.

출처 : JFE STEEL CORPORATION, "BRAKE DISCS EXCELLENT IN RESISTANCE TO TEMPER SOFTENING AND TOUGHNESS", WO2008044299, pp.1~27



◁ 전문가 제언 ▷

- 현대사회는 자동차의 급격한 증가와 더불어 교통사고의 증가가 큰 사회적 문제로 되고 있다. 특히 자동차의 고속화 추세에 따른 제동 시스템, 즉 브레이크 계통에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다.
- 자동차 브레이크 시스템은 주행하는 자동차의 브레이크 디스크와 패드의 운동에너지를 기계적인 마찰에너지로 전환시킴으로써 차량을 안전하게 정지시키는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 미끄럼마찰로 열탄성 마멸, 열 크랙, 페이드(fade) 및 이상 떨림(judder) 등으로 제동성이 급속히 감소한다.
- 이를 해결하기 위해 최근 내마멸성과 열전도율을 높이기 위한 재료의 개발과 이상 떨림의 발생원인 해결책을 위한 연구와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석 등이 활발히 진행되고 있다.
- 여기서는 마텐자이트계 스테인리스 금속 재료를 담금질 처리 후 적정 경도를 가지며 뜨임연화 저항성이 우수하면서도 인성이 우수한 브레이크 디스크 재료를 발명하여 공개하고 있다. 구체적인 재질은 질량%로 C 0.1% 이하, Si 1.0% 이하, Mn 2.0% 이하, Cr 10.5~15.0%, N 0.1% 이하를 함유하고, $5\text{Cr}+10\text{Si}+15\text{Mo}+30\text{Nb}-9\text{Ni}-5\text{Mn}-3\text{Cu}-225\text{N}-270\text{C} < 45$ 이고 $0.03 \leq \{C+N-(13/92)\text{Nb}\} \leq 0.09$ 를 만족하는 성분의 스테인리스 강판이다.
- 지금까지의 브레이크 디스크에 대한 연구는 열탄성 마멸거동, 접촉마찰 진동, 브레이크의 마찰 특성 등 디스크와 패드의 열적 변화와 마찰을 분석하여 작동조건에 따른 변화를 분석하여 기계적 설계를 개선하고자 하는 것이 대부분이었다. 그러나 이 발명은 재질을 개선하여 브레이크의 안정성을 높이고자 하였다는 점에서 특이하다고 하겠다.
- 자동차가 제동될 때 디스크의 온도가 600℃ 이상으로 올라간다는 점과 철 합금의 뜨임처리 온도가 600℃ 전후임을 감안하면 이 합금은 대단히 유용한 재질이며 실용화 전망이 크다고 하겠다.