

내열강의 내부품질에 따른 절삭가공 특성에 관한 연구

김동현*, 채왕석**

A Study on the Machining Characteristics by the Internal Quality of Heat Resisting Steel

Dong-Hyun Kim*, Wang-Seok Chae**

Abstract

This paper is experimental study of machining characteristics about martensitic heat resisting steel STR11. Machining characteristics are different according to internal quality (chemical compositions, microscopic structure and nonmetallic inclusion), mechanical properties (tensile strength value, impact value and hardness) and dynamic cutting force.

Following are the results ;

1. In analyzing internal quality, test materials have typical martensite structure and a minute needle-shaped structure.
2. Tensile strength and reduction of area and hardness are larger. But, values of elongation and impact values are smaller.

Fracture surface of tensile specimen is ductile.

3. Cutting force is decreasing with cutting speed increasing.
4. Cutting force is increasing with feed speed increasing..

Key Words : Heat resisting steel(내열강), Internal quality(내부 품질), Cutting force(절삭력)

1. 서 론

여러 환경 중에서 특히 고온에서 사용되어지는 재료의 충칭을 일반적으로 내열재료(耐熱材料)⁽¹⁾라 하고 금속재료를 포함한 내화벽돌이나 파인 세라믹 등이 여기에 포함된다.

내열재료는 보통 산업현장에서 각종 가열로나 자동차와

선박 등의 내연기관, 성(省)에너지, 폐열회수를 위한 열교환기, 도시 및 각 공장에서 발생되는 쓰레기 처리를 위한 소각로나 열분해로 등의 사용용도에 따라 고온에서 산화 또는 부식이 되지 않고 높은 하중이 작용하더라도 변질이 되지 않는 조건을 요구하는 경우가 있다.

내열재료 중에 높은 사용온도에서 산화와 부식이 되지 않고 높은 하중에서도 변질이 되지 않는 특수한 강을 내

* 원광대학교 기계공학부
** 원광대학교 대학원

열강(耐熱鋼)이라고 한다.⁽²⁾

내열강은 고온에서 사용하도록 제조된 특수한 강으로서 고온 산화성 분위기에 대한 내식성과 사용온도에서 적당한 강도를 갖는 것이 필수조건이지만 보일러, 터빈과 공업로 등의 사용목적에 따라 요구되는 성질이 다양하다.

내열강에 요구되는 조건은 내식성이 양호하고 고온에서 기계적 성질이 양호하며 가공성이 용이하고 가격이 저렴하여야 한다.

따라서 절삭가공에서 절삭성 검토 및 향상을 위해서 절삭가공 전에 절삭재료에 대한 금속학적 특성 및 기계적 특성을 정확히 검토하면 향상된 절삭가공이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 마르텐사이트계 내열강을 소재로 하여 금속학적 특성 및 기계적 특성을 고찰하고 실제 선삭가공 시험을 통하여 발생하는 동적특성을 검증하여 산업현장에 필요한 절삭조건의 설정을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 관계 이론

내열강은 각종 내열재료 중에서 가격이 비교적 저렴하고 구입이 용이하며 산업현장에서 널리 사용하고 있는 금속재료로 STR계(Steel)와 STS계(Stainless) 등 2가지 계로 대별하며 각각 오스테나이트계, 페라이트계, 마르텐사이트계와 석출 경화계(스테인레스계)로 세분되며, 특히 STS계는 스테인레스강의 규격을 그대로 사용하고 있다.⁽¹⁾

내열강은 제조과정에서 사용자의 요구에 의하여 풀림(annealing), 담금질(quenching), 뜨임(tempering) 중의 하나를 실시하거나 일부 열처리를 생략하여야 한다.⁽³⁾

마르텐사이트에는 급냉에 의해 발생한 마르텐사이트(正方晶)와 100~200℃ 뜨임에 의해 정방정(正方晶)에서 입방정(立方晶)으로 가까워진 템퍼링 마르텐사이트가 있다.⁽⁴⁾ 템퍼링 마르텐사이트는 급냉한 상태의 마르텐사이트보다 산(酸)에 부식되기 쉽다.

마르텐사이트계 내열강의 조직은 강재(鋼材)를 오스테나이트 영역(A₁점 이상)에서 급냉하여 얻어지는 삼(麻) 잎 모양의 침상조직(針狀組織)으로 경도가 높다는 것이 특색이다. 또 마르텐사이트는 퍼얼라이트 변태와 다르게 탄소의 확산이 충분히 이루어지기 전에 격자의 변태로 이루어진 조직으로 각각의 침상 마르텐사이트 결정(結晶) 생성에 소요되는 시간이 극히 짧은 것이 특징이다.

오스테나이트가 마르텐사이트로 변하는 Ar^{''} 변태는 과공석강(過共析鋼)에서 온도가 약 300℃ 이상일 때 나타나지만 탄소량이 낮은 경우는 한층 더 빠른 냉각속도가 필요하다.

스테인레스계 내열강은 합금조성에 따라 크롬계와 크롬-니켈계로 구분하며 급속조직에 따라 마르텐사이트계와 페라이트계 및 오스테나이트계로 구분할 수 있으며 이것은 다시 경화정도에 따라 여러 가지로 세분된다.

마르텐사이트계는 경화 가능성이 자경성 또는 담금질 경화성으로 내식성보다 경도 및 강도를 중요시하여 비소입 경화성을 가지는 페라이트계와는 반대로 탄소(C)량을 증가시켜 크롬(Cr)탄화물이 많이 형성하도록 하는 것이 특징이다.

이러한 합금원소의 함유량을 일정량 이상 함유하는 것을 마르텐사이트라 불리우는 이유는 오스테나이트 영역으로부터 담금질 후에 강의 조직을 변화시켰기 때문이며, 이 계의 합금은 페라이트계나 오스테나이트계에 비하여 내식성이 떨어지는 편이다.

마르텐사이트계 스테인레스강의 강도와 인성을 증가시키기 위한 열처리에는 탄소강과 저합금강의 경우와 같이 합금을 오스테나이트화하고 마르텐사이트 조직이 되도록 급냉시킨 다음, 응력을 제거하고 인성을 증가시키기 위하여 뜨임을 실시한다. 12~17% Cr 합금은 경화능이 우수하며 수냉할 필요가 없고 좀더 느린 속도로 냉각하면 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있다.

내열강에 첨가되는 주요 합금원소의 영향⁽⁵⁾은 다음과 같다.

탄소(C)는 모든 종류의 내열강에서 고온강도를 높이는 석출경화 원소로서 여러 원소와 탄화물을 생성시킴으로써 강도를 증가시키고 가공성, 피삭성과 내마모성 등에 영향을 준다. 그러나 탄소의 함량이 증가하면 강도는 상승하지만 충격치는 저하한다.

크롬(Cr)은 내열강의 기본 합금성분으로 Cr₂O₃를 주체로 한 보호피막을 형성하며 탄화물과 질화물을 형성하여 크립(Creep) 파단강도를 향상시킨다. 12% 이상 함유시 내식성과 내산화성을 향상시키고 열간강도를 증가시킨다.

규소(Si)는 산화피막을 생성하고 내산화성을 증대시키며 탈산제로서 뜨임 연화저항을 증대시킨다.

망간(Mn)은 탈산과 탈황제로 작용하며 오스테나이트의 안정화와 적열취성을 방지하며 질소 흡수력을 증대시킨다.

니켈(Ni)은 오스테나이트의 안정화와 탄화물의 조대화를 방지시키며 내식성 및 열간강도를 증대시킨다.

몰리브덴(Mo)은 석출기지를 강화하고 탄화물을 형성하여 고온강도와 크립 파단강도를 높이고 인성을 개선한다.

알루미늄(Al)은 강력한 탈산제로 강재(鋼材)의 열간 가공성이나 결정입도를 개선하지만 고용점 결정질(Al_2O_3)을 생성하면 열간이나 냉간압연에서의 표면성을 열화시킨다.

동(Cu)은 철(Fe)보다 산화하기 어렵기 때문에 용해과정에서 제거하기 매우 어려우며 비산화성 산에 대해 내식성을 증가시킨다.

마르텐사이트의 기계적 성질인 항복강도, 인장강도, 연신율과 단면 수축율 등은⁽⁶⁾ 열처리에 의해 조정할 수 있다. 뜨임 열처리 온도가 450℃ 정도에서 인장강도가 급강하하기 전에 약간의 증가현상이 발생하는데 이것은 (Fe,Cr)₂₃O₆ 의 석출에 의한 2차 경화에 의한 것이고, 충격치는 뜨임 열처리 온도가 260℃ 부근에서 최고치를 나타내며 450~550℃에서 최소값을 나타낸다. 경도는 완전경화(硬化)하였을 경우 탄소량에만 의존하고 탄소의 함유량이 0.6%까지는 경도가 급격히 높아지며 그 이상에서는 경도의 변화가 거의 없다.⁽⁷⁾

절삭성⁽⁸⁾은 가공재료를 절삭할 때 절삭하기 쉬운 정도를 의미하며 절삭성은 절삭기능 뿐 아니라 생산능률이나 원가관리까지도 포함되고 내열강은 절삭가공에서 가공이 곤란한 재료 즉, 난삭재(難削材)의 범위에 속한다.

난삭재는 넓은 의미에서 가공물의 재질 자체가 난삭성을 불러일으키는 특성을 가지는 재료, 피삭성이 명확하지 않는 재료, 알루미늄 합금과 주철 등의 공삭(共削)과 같은 이형재료, 형상적으로나 구조적으로 절삭가공이 난해한 재료와 보유설비인 가공기계의 가공 한계성을 가지는 재료를 의미한다.

절삭가공에서 발생하는 문제점은 매우 다양하다. 이러한 문제점의 대표적인 예로 절삭저항, 공구마모, 절인의 소성변형, 공구수명의 불안정, 열에 의한 균열, 절인에 용착(溶着), 채터진동의 발생, 다듬질 정밀도 및 치수정밀도 불량, 절인의 치핑이나 버(burr)의 발생과 칩처리성의 불량 등이 있다.

절삭저항에 영향을 미치는 인자는 절삭속도, 절삭깊이와 이송, 공구각, 절삭면적 등이 있다. 절삭속도는 최근에 절삭공구 재료의 발달과 함께 고속절삭이 가능하여짐에 따라 절삭저항에 큰 영향을 준다는 것을 알게 되었다.

선삭에서 절삭 단면적은 공작물 1회전에 대한 이송과 절삭깊이의 곱으로서 이송에 따라 칩의 두께가 변화하고 절삭깊이에 따라 칩의 폭이 변화한다. 또 이송에 대한 절삭력의 변화는 이송이 커짐에 따라 절삭력이 감소하고 절삭깊이와 절삭력의 관계는 거의 선형적으로 증가한다.⁽⁹⁾

3. 실험

3.1 실험재 및 실험장치

3.1.1 실험재료의 제조

실험재료는 자동차 내연기관의 흡입밸브로 사용되는 마르텐사이트계 내열강(STR11)을 소재로 하였다.

실험재료의 제조공정은 제강공정에서는 원자재를 전기로에서 용해하고 용해로 정련에서 탄소의 산화촉진을 활성화시키기 위하여 용강과 접하는 대기중의 CO분압을 충분히 저하시키기 위한 감압방법으로 진공 탈가스(VOD) 공정과 조괴공정을 거치고 압연공정에서는 주문 사양에 따라 분괴압연 및 중형압연공정과 표면산화 스케일등의 이물질 제거하고 내부결함검출 및 표면결함을 제거하는 빌렛공정을 거쳐 풀림, 담금질과 뜨임 등의 열처리공정으로 제조된다.

실험재료의 제조공정은 Fig. 1과 같다.

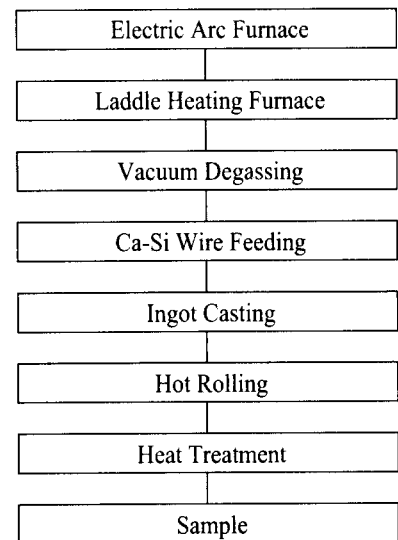


Fig. 1 Manufacturing process of sample

3.1.2 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험장치 및 기기에 대한 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 The specifications of experimental apparatus

Spectrometer	- model : ARL(Swiss)-3460 - 34 channels
Image analyzer	- model : LECO(U.S.A)-300 - × 50 ~ 200
Component analyzer of inclusion	- model : JOEL(U.S.A) EPMA JXA 8600MX
Tensile tester	- model : SHIMADZU UH-100AUH-100A - maximum range : 100 ton, 6 range
Rockwell Hardness tester	- model : MATSUZAWA MXT-a27 - B.C scale
Impact tester	- model : SHIMADZU CH-type - maximum range : 30mkg, - model : WHA CHEON (Korea) HL380
Free cutting tester	-Spindle speed : 45 ~ 1800rpm -Range of feeds : 0.06 ~ 0.84 Tool dynamometer - model : KISTLER TYPE-9257B -Range of force : Fx,Fy : -5 ~ 5KN, Fz : -5 ~ 10KN -Sensitivity : Fx,Fy : 7.5PC/N, Fz : -3.5PC/N

3.2 금속학적 시험

실험재료의 내부품질의 규명을 위한 금속학적 시험에서 화학성분은 ARL-3460 분광분석기를 이용하여 성분을 분석하였으며, 이때 시험편은 직경이 14mm 이상인 원형봉을 사용하였다.

현미경조직은 시험편을 압연한 강재의 단면방향으로 절단하여 채취하였고 1,200까지 연마한 후에 연마액(알루미나)를 사용하여 폴리싱을 하고 3%질산용액으로 적절히 부식시킨 후 광학 현미경을 이용하여 400배율로 관찰하였다.

3.3 기계적 성질 실험

실험재료의 담금질과 뜨임상태에서 기계적 성질을 규명하기 위하여 인장시험은 KS 4호 시험편으로 가공 준비하였고 100ton 용량의 인장시험기를 사용하여 3회 시험의 평균치를 인장시험 결과로 하였다. 또 인장시험의 파단면의 단면특성을 조사하기 위하여 EPMA를 이용하여 파단면을 관찰하였다. 경도시험은 록크웰 경도시험기의 B스케일을 사용하여 소재단면의 표면에서 중심까지 5점을 시험한 평균치를 경도 결과로 하였다. 충격 시험은 KS 4호 시험편을 가공 준비하여 샤르프 충격 시험기를 사용하여 3회 충격시험의 평균치를 충격결과로 사용하였다.

3.4 절삭성 실험

산업현장에서 절삭가공 조건의 설정에 기초 자료로서 제안하고 선삭가공에서 절삭속도 및 이송의 영향을 고찰하기 위하여 절삭속도와 절삭저항과의 관계 및 이송과 절삭저항과의 관계를 평가기준으로 하였으며, 절삭성실험은 선반에 공기동력계(Tool dynamometer, KISTLER 9257B)를 사용하였고, 틀출되는 PCLNR2020-K12와 인서트는 TiCN이 코팅된 초경공구인 CNMG120408의 KT300을 각각 사용하였다.

실험재료는 먼저 스케일을 제거하고 선삭가공에서 편심을 없애기 위하여 표면을 1mm 깊이로 예비 절삭한 후 절삭속도를 510, 710과 1,010rpm으로 하고, 이송속도를 0.228, 0.264와 0.314 mm/rev으로 하였으며 절삭 깊이를 1과 2mm로 절삭가공을 하였다.

절삭저항은 각각의 절삭조건에서 측정시간을 총 10초로 하고 매 1초마다 10개의 절삭저항 값의 평균치로 하여 주분력, 배분력과 이송분력의 3분력을 각각 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 금속학적 시험결과

본 연구에서 사용한 실험재료의 화학성분 분석 결과는 Table 2와 같으며 압연한 소재의 단면에 대한 현미경조직의 관찰결과는 사진 1과 같다.

조직사진에서 보면 조직이 마르텐사이트(Martensite)이며 일부에 미세한 침상(針狀) 또는 삼잎(麻葉)모양이 보여진다. 이 조직은 강재의 오스테나이트 지역(A₁점 이상)에서 급냉하여 얻어지는 삼잎모양의 침상조직으로 대단히 높은 경도를 특색으로 한다. 마르텐사이트는 100℃ 정도의 뜨임에 의하여 템퍼링 마르텐사이트가 되지만 거의 조직의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

Table 2 Chemical composition of determined Samples

Item	Component(%)
C	0.481
Si	1.658
Mn	0.480
P	0.0087
S	0.0162
Cu	0.032
Ni	0.047
Cr	8.587
Mo	0.012
Al	0.0079

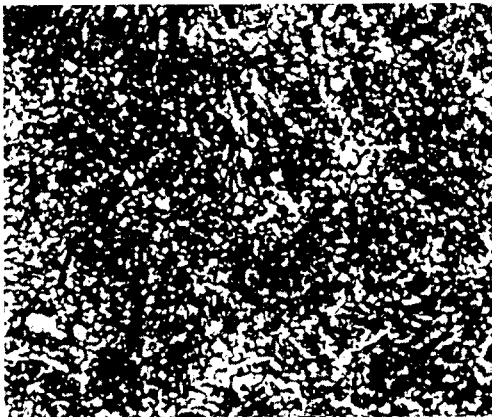


Photo. 1 Optical micro-structure of tested samples(× 400)

4.2 기계적 성질 실험결과

본 연구에서 사용한 실험재료에 대한 인장시험 및 경도 시험 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

인장강도 및 단면수축율과 경도가 비교적 높았으며 연신율과 충격치는 비교적 낮은 것으로 나타났다.

이와 같은 현상은 탄소(C)의 함량이 많아 크롬(Cr) 탄화물이 많이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 기계적 성질은 향후 절삭가공시 기초자료로 활용될 것이다.

또한, 인장시험 후 파단면에 대한 파단조직을 관찰한 결과 사진 2와 같으며 파단면이 연성파괴 형태를 나타내었으며 파단조직의 딴플(Dimple)의 형태 및 크기로 보아 실험재료의 인장강도의 결과가 높게 발생하였다.

Table 3 Results of tensile test and hardness test of sample

Item	Sample
Tensile strength(kgf/mm ²)	90.6
Elongation (%)	18.1
Reduction of Area(%)	36.2
Impact(kgf/cm ²)	2.63
Hardness (HRB)	103.5

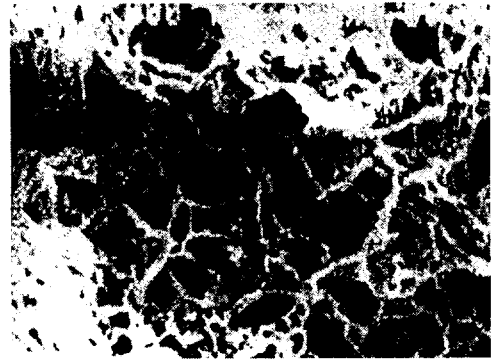


Photo. 2 SEM micrographs specimen surface in tensile test

4.3 절삭성 실험

절삭성 실험은 절삭속도와 절삭저항과의 관계 및 이송과 절삭저항과의 관계를 고찰하였다.

Fig. 2는 실험재료에 대하여 절삭깊이가 각각 1mm 및 2mm일 때 절삭속도에 따른 이송의 변화에 대한 절삭저항의 변화를 보여주고 있다

절삭깊이가 2mm일 경우의 절삭저항이 절삭깊이가 1mm일 경우의 절삭저항보다 전체적으로 약 60% 정도 높았으며, 절삭깊이의 변화와 관계없이 절삭속도가 증가함에 따라 절삭저항이 감소하였다.

또한, 이송의 변화에 따른 절삭저항은 이송속도가 0.314, 0.264와 0.228mm/rev로 감소할수록 선형적으로 감소하였다.

이와 같이 절삭깊이와 이송의 변화에 관계없이 절삭속도가 높을수록 절삭저항이 감소하는 것은 절삭가공에서 절삭온도의 상승에 의하여 실험재료의 강도가 떨어지는 것으로 판단되며, 이것은 마르텐사이트의 기계적 성질 가운데 뜨임온도의 변화에 따라 인장강도의 변화가 급격히 변화하는 것과 일치한다.

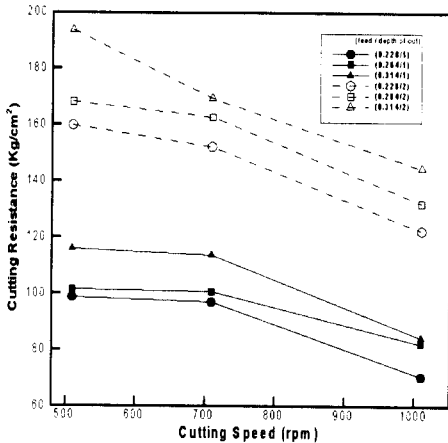


Fig. 2 Cutting speed versus cutting resistance

절삭가공에서 전단영역의 절삭재료 강도는 소성(塑性) 등으로 인하여 원래의 재질과 현저히 차이가 있다. 이러한 원인은 다음과 같다. 첫째, 전단파괴에 대한 전단변형이 보통 재료실험에 의한 변형보다도 크기 때문에 가공경화가 발생한다. 둘째, 칩의 전단면은 전단력과 동시에 압축력을 받기 때문에 순수 전단응력의 파괴와 재료조각내의 마찰력이 크게 영향을 발생한다. 셋째, 절삭가공중에 전단변형의 속도가 크기 때문이다.

5. 결 론

마르텐사이트계 내열강 중 STR11에 대한 금속학적 특성과 기계적 성질 및 선삭가공에서 절삭특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대부분 조직이 마르텐사이트 조직으로 나타났으며 일부분의 조직에 미세한 침상조직이 발생하였다.
- (2) 담금질과 뜨임 상태에서 인장강도, 단면 수축율과 경도는 비교적 높고, 연신율과 충격치는 비교적 낮았으며, 인장시험 후 파단면의 파단조직은 연성과 파괴 형태를 발생하였다.
- (3) 동일한 절삭조건에서 절삭깊이가 작을수록 절삭성이 우수하게 발생하였다. 또한, 절삭깊이가 일정하고 이송속도가 증가할 때 절삭속도가 증가하면 절삭저항은 감소하였다.
- (4) 동일한 절삭깊이에서 이송이 증가함에 따라 절삭저항이 선형적으로 증가하였다. 절삭깊이가 큰 경우

에 절삭속도가 증가함에 따라 절삭성이 우수하게 나타났으나, 절삭깊이가 작은 경우에 절삭속도는 일정범위에서만 우수한 절삭성을 나타냈다.

본 연구의 결과는 경제적인 기계가공 조건의 설정에 기초자료가 될 것이다.

후 기

본 연구는 1998년도 원광대학교 일반과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 狩野勝吉, "難削材の 切削加工技術", (株) 技術情報, pp.184~186, 1987
- (2) 鐵鋼材料, "金屬工學講座, 材料編 8", 朝倉書店, 1987
- (3) 山崎道夫, "超耐熱合金의 開發現況" 機械의 研究, 第39卷, 第9號, 1987
- (4) 朴禧善, "新編金屬組織學", pp.396~397, 1989
- (5) AMERICAN MACHINIST & Automated Manufacturing Special Report 790, pp.115~121, 1986
- (6) JIS HAND BOOK 1, "Steel for special purpose", Japane Standards Association, pp.678~719, 1996
- (7) 起亞 特殊鋼, "스테인레스강 일반" pp.43~55, 1996
- (8) 김동현, 채왕석, 김우순, "트럭용 커넥팅 로드 소재의 내부품질에 따른 기계적 특성 연구", 한국공작기계학회, 제7권 제1호, pp.75~81, 1998
- (9) 徐南燮, "金屬切削理論", 東明社, pp.52~88, 1988