

고주파 열처리와 특수강

김 현 주

부경대학교 금속공학과

1. 서 론

고주파 열처리는 일반적인 로 가열에 비해 작업시간이 단시간이고, 공정 자동화가 용이한 청정 열처리 방법으로 주목받고 있다. 고주파 열처리는 열처리기술의 개발, 제어시스템의 발전 등에 힘입어 요구되는 품질을 보장하는 작업정도(精度)가 크게 향상되어 왔다. 최근에는 초단시간 출력제어 장치와 켈칭기술의 조합으로 마이크로-펄스 유도 소입 시스템 및 고주파 소입용 강, 비파괴에 의한 경회층 깊이 측정장치, 광파이버식 온도측정기 및 학습기능을 갖춘 전체 제어시스템의 채택으로 고정도화가 가능한 시스템이 개발되고 있다.

한편 재료측면에서 보면, 가열시간이 짧을수록 열처리 정도에 대한 재료인자의 영향은 극히 중요하므로 이에 대한 검토가 당연하며, 새로운 재료 개발에 있어서 이 영향을 고려하는 것이 중요하다. 본 기술

해설에서는 특히 구조용강의 고주파 소입성과 고주파 소입재료의 특성에 중점을 두어 설명한다.

2. 고주파 소입성과 금속학적 인자

조미니 시험으로 대표되는 소재의 소입성과 고주파 소입성은 다른 의미를 포함하고 있다. 고주파 소입은 단시간에 가열되기 때문에 이전 조직 등의 영향을 크게 받는 것이 큰 차이점이다.

2.1. T. T. A선

단시간 가열시의 오스테나이트화 거동을 파악하는 것은 소입성 뿐 아니라 기타 품질관리 측면에서도 중요하다. 그림 1에 오스테나이트화에 관한 제반 인자의 관계를 나타낸다[1]. 각 인자의 영향을 독립적으로 해석하여 오스테나이트화 거동을 파악하는 것은 매우 복잡하기 때문에 TTA선을 작성한다. 일례를

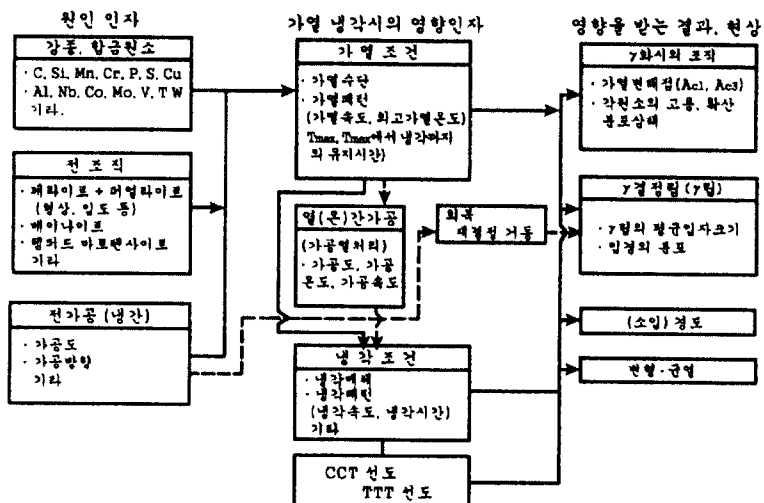


그림 1. 단시간 가열에 의한 강의 γ화에 관한 제반인자

*이 기술자료는 일본 特殊鋼 46권 9호(1997년 9월)에 게재된 내용을 번역한 것임.

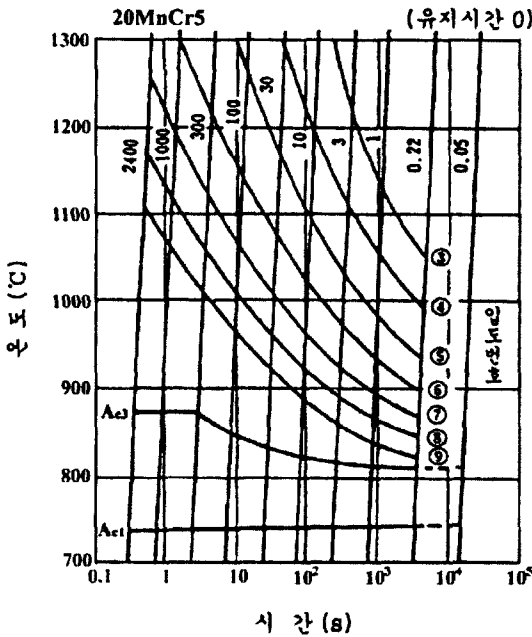


그림 2. 가열속도를 변화시킨 경우의 변태점, γ 입도에 관한 T.T.A 곡선.

그림 2에 나타내었다. 가열온도, 시간, 속도를 변화시켜 변태점과 오스테나이트 입도변화를 나타낸 것이다. 그림에 의하면, 가열시간이 짧을수록 A_{c3} 변태점이 상승하므로, 균일 오스테나이트화를 위해서 고주파 열처리에서는 일반 열처리보다 고온으로 가열할 필요가 있다. 또한, 고온에서 가열시간이 길어질수록 결정립이 현저히 조대화됨을 알 수 있다.

2.2. 합금원소의 영향

고주파 소입시킨 베어링 부품의 반복 피로강도 및 굽힘 피로강도는 주로 경화층의 깊이에 의존한다. 안정된 경화층 깊이를 얻기 위한 소재측면의 대응책으로는 소입성의 협폭관리가 거론되고 있다[2]. 그러나, 고주파 소입 이전의 조직(열처리) 영향도 크기 때문에 정도가 좋은 경화층 깊이를 얻기 위해서는 소입성과 이전 조직의 영향을 이해하는 것이 중요하다. 먼저, 각 합금원소의 영향에 대하여 기술한다.

그림 3은 기본 성분을 S45C로 선정하고 고주파 소입 후의 유효 경화층 깊이에 미치는 합금원소량의 영향을 나타낸 것으로, 고주파 열처리 이전의 열처리도 동시에 변화시킨 실험결과이다[3]. 고주파 소입성을 안정하게 높이는 원소는 C, Mo, Mn, Si,

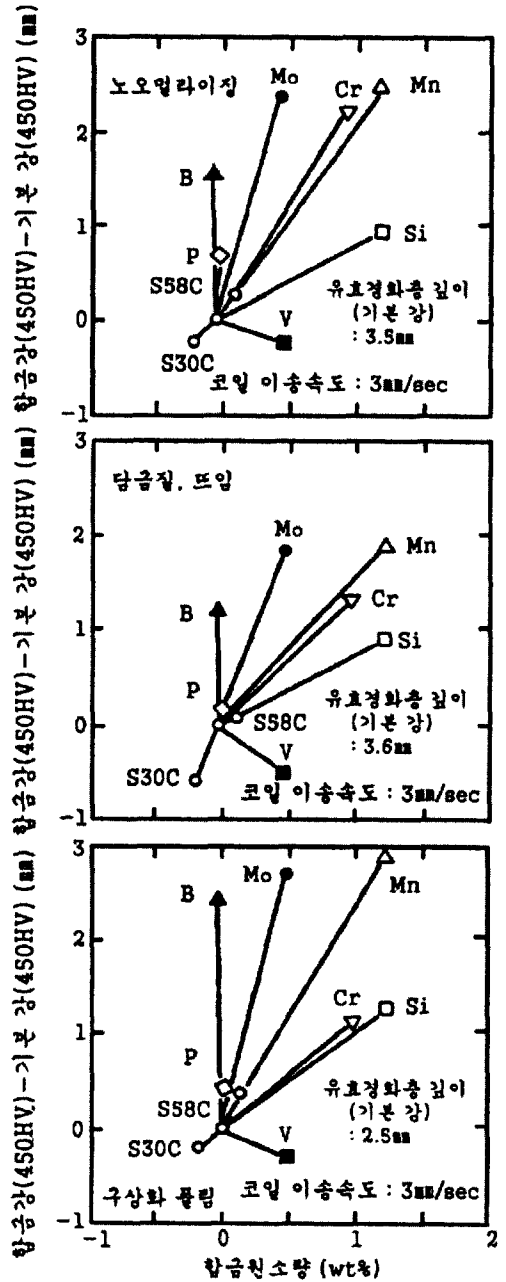


그림 3. 고주파 소입성에 미치는 합금원소의 영향.

B, P이며, V는 저하시킨다. Cr은 소입성을 높이지만, 이전 열처리 영향을 강하게 받는다. 한편, 경화층의 경도 관점으로 합금원소의 영향을 조사한 보고(기본 성분은 SUP12 상당)에서도 거의 동일한 결과가 얻어졌다[4]. 어느 관점으로부터 평가하여도 안정한 탄

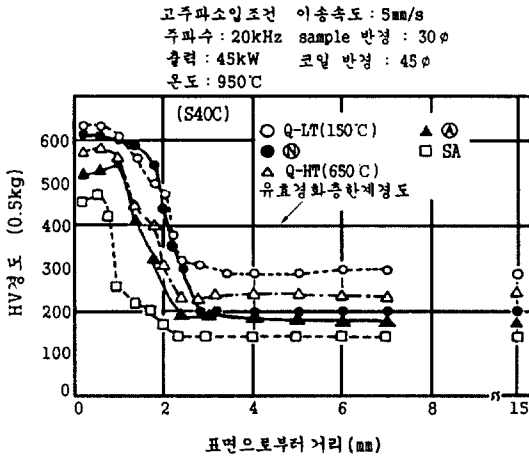


그림 4. 고주파 소입 후 경도분포 (S40C).

화물을 형성하는 원소는 고주파 소입성을 저하시키거나 안정된 효과를 나타내지 않는다.

2.3. 이전 조직의 영향

고주파 담금질은 급속가열, 단시간 유지의 특성 때문에 일반 로 가열의 경우에 비해 이전 조직(이전 열처리) 영향을 많이 받는다.

그림 4는 이전 열처리로, 소입 후 저온 뜨임(Q-LT: 저온뜨임 마르텐사이트 조직), 소입 후 고온 뜨임(Q-HT: 고온뜨임 마르텐사이트 조직), 불림(N: 미세 페라이트 + 퍼얼라이트 조직), 풀림(A: 조대 페라이트 + 퍼얼라이트 조직) 및 구상화 풀림(SA: 구상화 조직)처리 S40C의 고주파담금질 후의 경도분포 측정결과이다[4(14)]. 경화층 깊이, 경화층 경도, 특히 이전 열처리의 영향을 현저히 받아 Q-LT, N, Q-HT, A, SA의 순서로 경화층의 경도는 저하하고, 경화층 깊이는 알려져 고주파 소입성은 저하한다. 같은 결과가 SCR440과 SCM440에도 나타나지만, 합금강의 경우에는 그 차이가 현저하다.

경강선(硬鋼線)에 의한 냉간가공 영향을 조사한 결과에 의하면, 냉간 가공재료의 오스테나이트 개시 및 종료시간은 항상 단축되므로, 냉간가공은 고주파 소입성을 향상시키는 것으로 추정된다. 고주파 소입성에 관한 이들 현상은 소입성에 미치는 합금원소 영향 이외에 급속가열에 의한 오스테나이트의 탄화물 고용속도(이전 열처리 및 합금원소에 의한 탄화물의 안정성 즉, 탄화물 조성, 형상, 크기, 분포 등), 변태

점(주로 A₃ 변태점)의 상승, 페라이트로의 탄소확산에 의해 설명이 되고 있다. 따라서, 일반 고주파 소입보다 가열시간이 짧은 급속가열 고주파 소입 및 충격 소입(초고주파 소입) 등의 경우, 이들 현상이 보다 현저하기 때문에 소입조건 설정에 특히 주의를 요한다.

3. 고주파 소입 재료의 특성

고주파 소입은 재료표면 부근에서 높은 경도와 큰 압축 잔류응력 발생, 미세한 결정립이 얻어지는 특징이 있다. 건설기계, 공작기계, 자동차 부품 및 산업기계 등의 고주파 소입 적용 목적은 대부분의 경우 피로강도와 내마모성 향상이다.

3.1. 피로 강도

고주파 소입 재료의 피로특성에 관해서 많은 보고가 있다[5,6]. 고주파 소입조건을 적절하게 선정하면 피로강도는 무처리 재료에 비해 적어도 50% 이상 향상된다. 피로특성에 영향을 미치는 주요 인자는 형상인자를 제외하면, 표면경도, 경화층 깊이(경화층의 깊이 비)와 잔류응력이며, 그 외에 경화층의 조직상태 등이다.

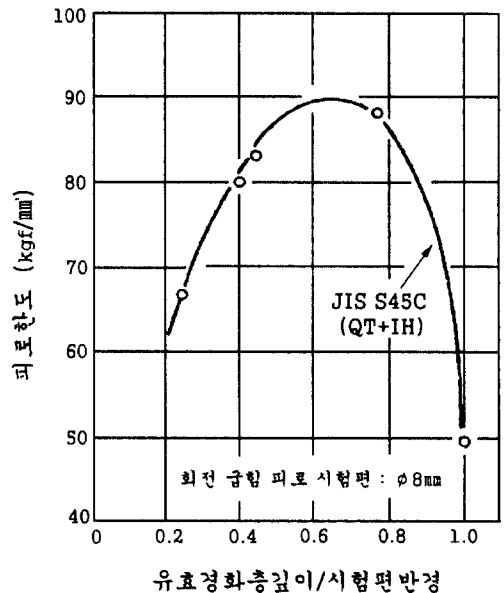


그림 5. S45C의 피로강도에 미치는 경화층 깊이의 영향.

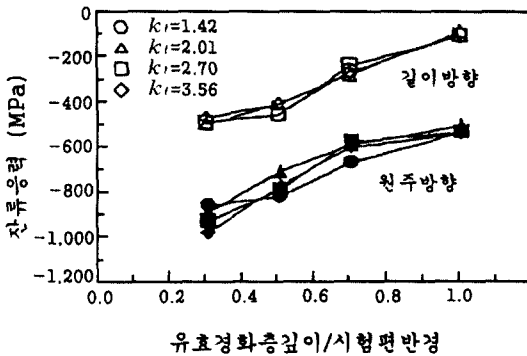


그림 6. 유효경화층 깊이와 잔류응력의 관계

그림 5는 S45C 조질재료의 평활 시험편에서 고주파 소입에 의한 경화층의 깊이 비(경화층의 깊이/시험편 단면 반경)와 회전굽힘 피로강도와와의 관계이다 [6]. 평활 재료의 경우, 피로강도가 최대가 되는 경화층 깊이는 0.6 전후이며, 기타 노치 재료의 경우는 0.3 정도라는 보고가 있다[7]. 한편, 고주파 소입 재료의 압축 잔류응력은 경화층 깊이가 깊어질수록 깊어진다.

그림 6에 0.4% C-B 첨가 강, 불림열처리 재료를 사용하여, 응력집중 계수를 변화시킨 시험편의 경화층 깊이를 비와 압축 잔류응력의 관계를 나타내었다. 응력집중 계수(노치형상)와 상관없이 경화층의 깊이가 깊어질수록 압축 잔류응력의 값은 크다. 실제 부품의 소입 깊이는 부하 응력의 상태, 응력집중 계수 등도 고려하여 설정할 필요가 있다. 또한, 페라이트 등의 잔류에 의해 경화층의 조직이 불균질할 때에는 피로강도가 저하하는 경우도 있으므로 주의를 필요로 한다[8].

3.2. 내마모성, 운전수명

3.2.1. 내마모성

내마모성에 대하여 탄화물 유무, 표면상태(표면처리의 유무도 포함)도 영향이 있지만 주요 인자는 접촉면의 경도로 생각된다. 고주파 소입에 의해 경도가 상승하고 내마모성은 현저히 개선된다. 탄소강의 탄소량과 고주파 소입 정도의 조사결과에 의하면, 일반 소입의 경우와 같이 탄소량이 약 0.5% 이상에서 경도는 포화값에 도달한다[9]. 이 때문에 후술하는 소입 균열의 문제도 있어 고주파 소입은 일반적으로 탄소량이 0.4~0.55% 강이 사용되고 있다. 침탄 소입과 비교해 보면, 고주파 소입 재료의 내마모성은

약간 떨어지며 접촉면 경도에서도 내마모성이 현저히 저하한다는 보고가 있다[9].

3.2.2. 운전수명

일반 소입·뜨임 재료의 운전수명에 관해서 많은 보고가 있으며, 표면경도, 마르텐사이트의 탄소량, 잔류 오스테나이트 량, 미용해 탄화물, 비금속 개재물 등이 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[10]. 그러나, 고주파 소입시킨 베어링강의 운전수명에 관한 보고는 많지 않다. 전처리로 구상화 불림처리를 시행한 JIS-SUJ13 재료의 시험결과에 의하면, 107회에서 얻어진 최대 응력은 5,200 MPa와, 일반 담금질·뜨임 재료와 같은 결과가 얻어지고 있다[11]. 다만, 급속 가열의 경우 완전히 오스테나이트화하고 소입 후 양호한 품질을 얻기 위해서는 일반 소입에 비해 가열 온도를 30~60°C 높이고, 60초 정도 유지시간이 필요하다. 이와 같이 재료가 고탄소·크롬 함유이며 전처리로 탄화물 안정화인 구상화 불림처리한 경우, 가열시 완전한 오스테나이트화를 이루기 위해서는 고온·장시간 가열을 필요로 하기 때문에 탈탄에 의한 표면경도 저하를 조심해야 한다.

기어의 피칭수명에 대한 합금원소의 영향(기본 성분: S55C) 조사결과에 의하면, C의 증가, V, Mo, Cr의 첨가, Si, Mn 증가는 수명을 향상시킨다. 이유는 회전을 동반한 높은 압력의 피로에서 접촉면의 온도가 상승하므로 뜨임 저항성이 수명의 주요 지배인자로 추정되기 때문이다. 또 초석 페라이트 량을 변화시킨 롤 피칭시험결과에서는 단시간 가열의 경우, 초석 페라이트 량이 많을수록 수명이 짧아진다는 보고가 있다[8].

3.3. 기계적 성질

고주파 가열은 주로 재료의 표면근방을 가열하여 표면 소입에 사용되고 있지만, 재료 치수, 가열시간 및 가열 후 유지시간의 조절에 의해 재료 전체 가열수단으로도 이용되고 있다. 대표적인 예로 PC 강재와 스프링 강선의 적용이다. PC 강재의 경우, 고주파 가열의 뜨임처리로 미세 결정립(약 No. 10)을 도모하여 고강도, 고풍복비, 적절한 연전성 및 지연 파괴에 대한 양호한 저항성을 얻는다. 또, 스프링용 강선에서는 미세 결정립에 의해 얻는 전술의 특성이 외에 단시간 가열로 탈탄이 적어 피로특성이 안정된

다는 보고가 있다[12]. 고탄소 강선의 Pb 파텐팅처리에 고주파가열 적용 및 AISI 10B 30강의 고주파가열이 적용되어 고강도, 고연성, 피로강도 향상 및 지연파괴 저항성 개선효과가 보고된다[13,14]. 또, S45C와 0.43%C 강 of 고주파 소입과 일반 소입 재료의 충격값과 연신율 조사결과에 의하면, 일반 소입 재료에서는 300°C 부근에서 뜨임현상이 일어나 저온 취성이 일어나지만, 고주파 소입 재료에서는 이 현상이 일어나지 않는다[9].

3.4. 열처리 변형

일반적으로, 열처리 변형에 대한 재료의 원인으로 가열과정에서 열팽창, A_1 변태점에서 수축, 자중 및 열응력에 의한 크립 변형과 냉각과정에서 냉각에 동반한 열수축과 마르텐사이트 변태에 의한 팽창이 있다. 또한, 뜨임 과정에서는 각 단계에 따라 다르지만 팽창 또는 수축이 발생한다. M_s 점이 상온부근 이하인 고탄소강 및 고합금강을 소입한 경우, 오스테나이트가 다량으로 남아 시간 경과에 따라 변형을 발생시킨다. 고주파 소입의 경우도 기본적으로 동일하다. 일반적으로 전체를 소입시킨 침탄재료와 비교하여 변형은 적은 것으로 알려져 있다[15]. 변형은 응력이 재료의 탄성한계를 넘어선 경우에 생기기 때문에 탄소강보다 탄성한이 높은 합금강, 또 열처리조직으로 비교하면 구상화 세멘타이트보다 페라이트량이 적은 페라이트·퍼알라이트, 또한 뜨임처리한 마르텐사이트가 변형이 적은 것으로 알려져 있다[15].

이전 가공도도 변형에 영향을 미쳐, 고주파 소입에 의한 굽음변형은 교정재료가 가장 크고 압연재료, 조질재료의 순서로 굽음변형이 적어진다. 이것은 내부 잔류응력이 가열에 의해 해방되기 때문이다. 경화층 깊이도 변형의 주요인자로 된다.

3.5. 소입 균열

S, P을 많이 함유한 재료는 소입 균열이 발생하기 쉬우며, 특히 P은 0.03% 이상이 되면 위험하나, S는 다른 합금 원소량이 적은 경우 P만큼 위험하지는 않다. 탄소량이 0.5% 이상의 강은 균열이 발생하기 쉬우며, Ni, Cr, Mo 등을 함유한 합금강은 탄소량 0.4% 이상에서 균열이 발생하기 쉽다[9]. 따라서, 베어링강의 경우 소입 균열에 주의해야 한다. 또

한, 고주파 소입시 과열되면 결정립이 조대화되고 균열발생의 위험성이 증가한다.

4. 공구강, 스테인리스강의 고주파 소입

공구강의 고주파 소입에 관한 자료는 압연 롤 이외는 거의 보고되지 않고 있다[16]. 판금 프레스 금형의 표면소입 방법은 화염 소입이 주로 사용되고 있다. 이것은 고주파 소입에 비해 화염 소입이 여러 형상의 제품에 적용하기 용이하며, 현장작업 등이 용이하기 때문에 추정된다. 그러나, 금형 펀치 나이프, 톱날 등 소형이며 복잡한 가공형상의 제품에는 고주파 가열을 적용하는 것으로 보고되고 있다[17, 18].

스테인리스강의 고주파 소입에 관한 문헌은 거의 없지만, 고주파 소입의 적용 예로 리니어 베어링과 무한궤도 구동용 스프로(마르텐사이트계 스테인리스강)이 보고되고 있다[19]. 마르텐사이트계 스테인리스강의 고주파 소입은 구조용강에 비해 합금원소가 다량이기 때문에 소입 균열, Cr탄화물의 고용 부족, M_s 점 저하에 의한 잔류 오스테나이트 생성 등에 유의할 필요가 있다.

5. 결 론

고주파 소입용 구조용 강은 과거에는 주로 불순물 관리, 개재물 저감 및 조직조정에 의한 고주파 소입성의 안정화 대책을 다룬 것이 대부분이지만, 최근에는 부품제조 공정의 합리화 및 침탄 작업으로부터 변환을 모색하기 위해 냉간 단조성과 고주파 소입성을 겸비한 새로운 강종이 개발되어 드라이버 샤프트 등에 적용되고 있다.

고주파 열처리는 친환경적인 열처리 방법으로 지속적인 발전이 예상되고 있다. 단시간 작업과 고정밀화 작업 요구에 대응하기 위해 전처리 작업을 생략할 수 있는 적절한 재료의 선정이 중요한 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 川奇, 高岡, 山崎, 尾崎 : 熱處理, 20 (1980) 6,

- 281.
2. 田中, 磯川 : 熱處理, 24 (1984) 5, 259.
3. 瓜田, 並木 : 電氣製鋼, 61 (1990) 1, 14.
4. 洲崎, 岩尾, 山田, CAMP-ISIJ, 9 (1996) 1,410.
5. 中村 : 高周波焼入と疲勞強度, 日刊工業新聞社.
6. 上原, 田中, 大田 : 鐵と鋼, 70 (1984) 11, 1,598
7. 古川, 小沼, 鈴木, 若林 : 材料, 37 (1988), 178.
8. 井上, 中村, 三阪, 川奇 : CAMP-ISIJ, 9 (1996) 1,411.
9. 高橋, 深町, 渡辺, 久保田 : 高周波の工業への応用, 東京電氣大學出版.
10. 對馬 : 日本金屬學會會報, 23 (1984) 1, 50.
11. 波多野, 本間, 安部, 米谷 : 日本金屬學會誌, 44 (1980) 7, 764.
12. 藤田, 水馬, 高橋 : 熱處理, 4 (1964) 6, 401.
13. 高橋, 加藤, 荒川, 幸岡 : 鐵と鋼, 2 (1976) 10, 1,379.
14. 加藤, 荒川, 高橋, 藤井 : 鐵と鋼, 60 (1973), S470.
15. 川奇, 高村 : 工業加熱, 33 (1996) 1, 14.
16. 福島, 加藤 : 熱處理, 28 (1988) 2, 80.
17. 寫田, 泉 : 熱處理, 28 (1988) 1, 11.
18. 岡田 : 特殊鋼, 39 (1990) 5, 36.
19. 竹山 : 鑄鍛造と熱處理, 39 (1986) 12, 17.