

* 이 글은 日本 “熱處理” 제 46권 2호에 게재된 내용을 번역 정리한 것임.

고주파에 의한 철강재료의 결정립미세화 (1) -스프링강의 기계적 성질에 미치는 영향

지 태 구

홍익대학교 금속공학과

Grain Refining of Steel by Induction Heat-treating The First Report : Influence on Mechanical Properties of Spring Steel

1. 서 론

고주파퀸칭이란 철강기계부품의 표면경화법으로 알려져있고, 금속을 짧은시간 가열하여 오스테나이트(γ)화 하는것을 기본으로 하고 있다.

저자의 경험으로는 고주파퀸칭 재의 평균 결정립경(d)는 소재의 조성이나 경화능 깊이에 의한 것으로 5~20 μm 정도인 것이 많고, 일반 열처리 재에 비해 보다 미세하기 때문에, 고주파퀸칭은 결정립 미세화에 유효한 것으로 인식되어있다. 그 때문에 NEDO/JRCM의 철계 수퍼 메탈프로젝트나 물질재료 연구기구의 초철강(STX-21) 프로젝트를 중심으로 행해진 “철강재료의 결정립 미세화 방법개발과, 이것이 실현될 경우 어떠한 새로운 특성이 나타나는가?”에 대한 연구 동향에 흥미가 있었으나, 서브미크론 영역이 대상으로 하고 있어, 고주파퀸칭이 직접 관련된다는 인식은 거의 없었다. 그러는 중에 2002년 11월 일본열처리 기술 협회강연대회에서의 토론회 테마 “초 미세결정립제어 열처리”에서의 강연으로 “고주파퀸칭에 의해 $d = 5\sim 15 \mu\text{m}$ 정도의 미세결정립을 실용화하는 예를 소개하다”라는 말이 있어 저자의 연구를 보고하는 기회를 갖게 되었다[1]. 여기서 관련된 몇가지 연구 정보를 수집정리해보면, 고주파 열처리가 서브미크론까지 도달하지 않으나 “초” 미세결정립에 의외로 근접하는 열처리 기술로 새롭게 인식 할 수 있었다.

본문에서는 고주파 열처리와 미세결정립($d = 1 \mu\text{m}$ 이하의 “초”까지는 제외)을 키워드로 저자등의 스프링강선의 고주파퀸칭(1HQ) 고주파템퍼링(1HT)에 관한 연구를 소개하고, 다음 회에서는 기타의 폐사에서의 연구사례를 소개하고 이어서 다른 사람들의 관련 연구 예를 소개한다.

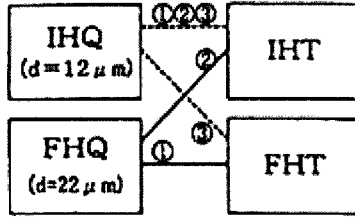
2. 스프링강에서 고주파퀸칭(1HQ)에 의한 미세결정립의 강인화 효과

2.1 연구개요

고주파유도가열은 금속표면가열 후 균열화에 의해 선 직경5~20 μm 정도의 강 선재 전체가열 IHQHT에 쓰이고 있어, 저자들은 1970년대 후반부터 스프링용 Si-Cr강 (SUP12/SAE9254)을 이용하여 금속가열을 일으켜 초 단위 단시간 가열 IHQ1HT 재의 조직과 기계적 성질을 계통적으로 조사하였다[2-9]. 그 결과 그림 1과 같이 $d = \text{약 } 20 \mu\text{m}$ 의 로 가열 퀸칭(FHQ) 로 가열 템퍼링(FHT)재보다 우수한 강인성 (고강도, 고인성)을 나타낸 것을 볼 수 있었다. 또 이와 같은 강인화 효과가 얻어지는 이유는

1. IHQ에 기인하는 “미세결정립”[5, 6]
2. IHT에 기인하는 탄화물의 입계내에서의 미세분산과 입계에서의 석출량감소[7, 8]”라는 조직적 특징이 존재하고, 각각 단독으로 효과를 발휘하는 것이 명확하였다.

① 고주파퀀칭(IHQ) 템퍼링재가 로가열퀀칭(FHQ)템퍼링(FHT)재보다 강인성을 나타낸다.



연성, 인성, 내피로 파괴성
파괴인성, 피로강도 등 비교
(같은경도에서)

그 조직론적 이론은?

| ② 비교: IHQ에 의한 고강인화 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|
| IHQ재의 특징 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 미세결정립 • 탈탄이 전혀 발생하지 않음 |

| ③ 비교: IHT에 의한 고강인화 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IHT재의 특징 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 탄화물석출형태가 • 입내 미세분산 • 일계적 석출출양 |

그림 1. 스프링강의 고주파 퀀칭(IHQ) 템퍼링(IHT)에 관한 연구개요.

그래서 이들 결과를 함께, 자동차현가용 냉간성형 코일스프링에 이용되는 인장강도 $\sigma = 200 \text{ Mpa}$ 급 초강도 스프링강선 ITW(Induction Heating, Quenching and Tempered wire: 직경 6~14 mm, JIS G3560 스프링용 오일템퍼-선재에 해당)을 세계에서 최초로 개발하여 실용화하였다[2-4, 9]. 이하에서는 ITW 개발의 일련의 연구에서 미세결정 효과에 관한 실험결과를 소개한다.

2.2 실험방법

표 1과 같은 화학성분의 Sup12강 선재(직경 12 mm)를 연속 IHQ-IHT라인을 이용하여 그림 2와 같은 열사이클로 γ 화온도를 변화시켜 IHQ하고 (결정립 조대화 포함), 또는 Grange방법[10]을 참고하여 IHQ하고 (미세화)해서 여러 가지 온도에서 IHT하여 각종 기계적 성질을 계통적으로 조사 하였다.

2.3 실험 결과 및 고찰

2.3.1 금속조직과 결정립

그림 3은 IH γ 화온도와 가열온도 및 반복횟수와

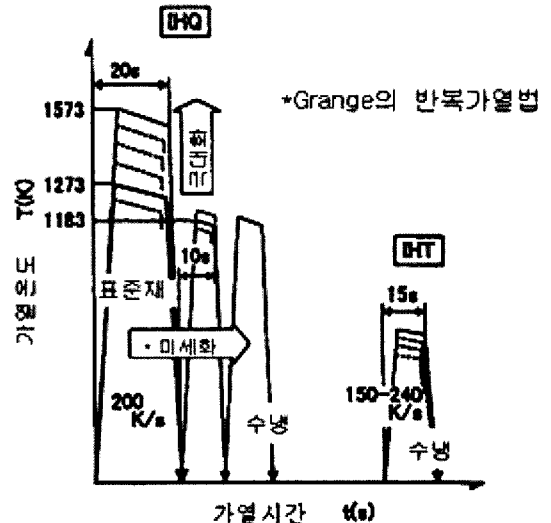


그림 2. 결정입 조정을 위한 열사이클.

결정입도와의 관계를 나타낸 것으로 열처리 시뮬레이션 시험장치를 이용해 3회 반복 퀀칭 한 경우는 $d = 4 \mu\text{m}$ 가 2회 반복 퀀칭 한 경우는 최소 $d = 6 \mu\text{m}$ 가 얻어졌다. 한편 약 1300°C 까지의 고온가열로 $d = 90 \mu\text{m}$ 가 얻어졌다.

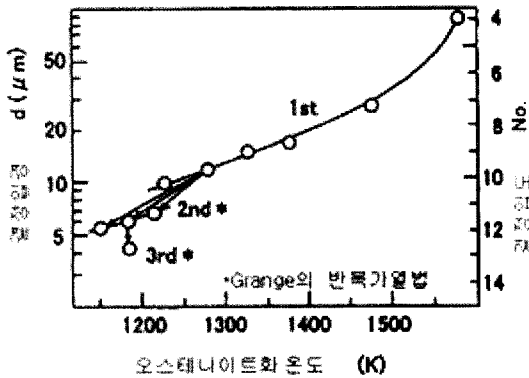


그림 3. IH 오스테나이트화 온도와 결정입경의 관계.

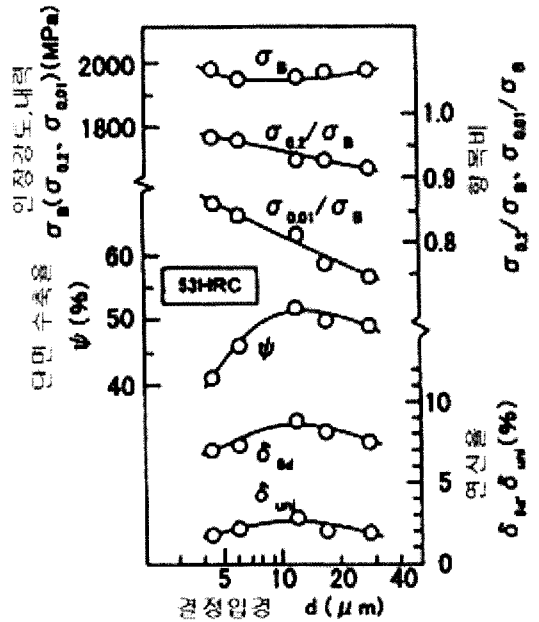
Grange의 반복가열 범위의 경우는 2회째 가열이 γ 화도중의 Ac1 변태점까지의 가열이 전회의 쿨링재에 대해서는 템퍼링 한 것도 석출탄화물이 미세하게 남는다. 이들 석출 탄화물이 Ac1변태점 이상에서는 미세 분산된 γ 핵생성 사이트로 되어 따라서 2회째 이후의 γ 화 온도를 낮추게 되어 γ 입자 성장을 억제하는 효과도 가해져서 $d =$ 수 μm 의 미세결정립이 얻어진다고 생각된다.

그림 4는 $d = 6, 12, 28, 90 \mu\text{m}$ 재의 금속조직과 결정립의 광학현미경조직을 나타낸 것으로 $d = 12 \mu\text{m}$ 이하로 되면 결정립미세화와 함께 입내의 마르텐사이트 래스도 미세해지고 또 짧아졌다.

2.3.2 각종 기계적 성질

(1) 인장시험결과

그림 5는 $\sigma = 1960 \text{ Mpa}(53\text{H}_{\text{RC}})$ 급 시험선재의 인



(53HRC, $d=4$ 및 $6 \mu\text{m}$: Grange반복가열법)

그림 5. 결정입경과 인장성질의 관계.

장시험결과를 나타낸 것으로 인장강도는 같으나 내력비(항복강도 당 $\sigma_{0.2}/\sigma_{13}$, 탄성한 내상당의 $\sigma_{0.01}/\sigma_B$)값은 결정립경이 작아짐에 따라 거의 직선적으로 증가한다.

(1) 식에서나타낸 Hall-petch형의 관계와 같은 모양의 경향을 나타낸 것을 알 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y \cdot d^{-1/2}$$

여기서 σ_y : 항복강도 d 는 결정입경 σ_0 와 K_y 는 결정

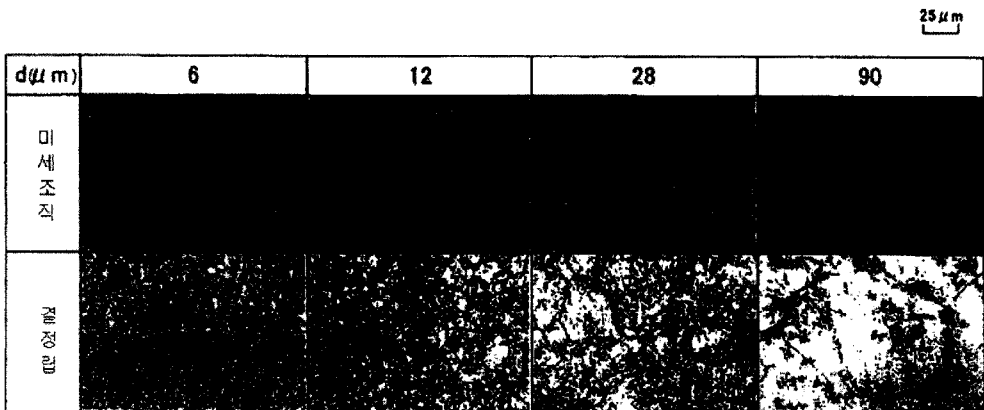


그림 4. 각 결정입경재의 미세조직과 결정립.

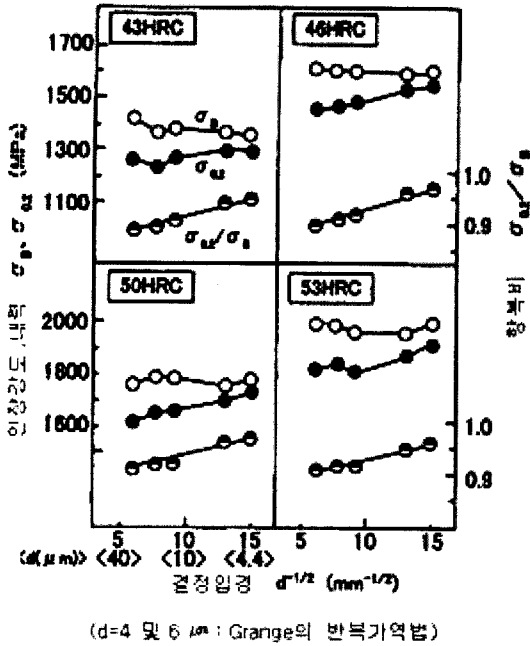
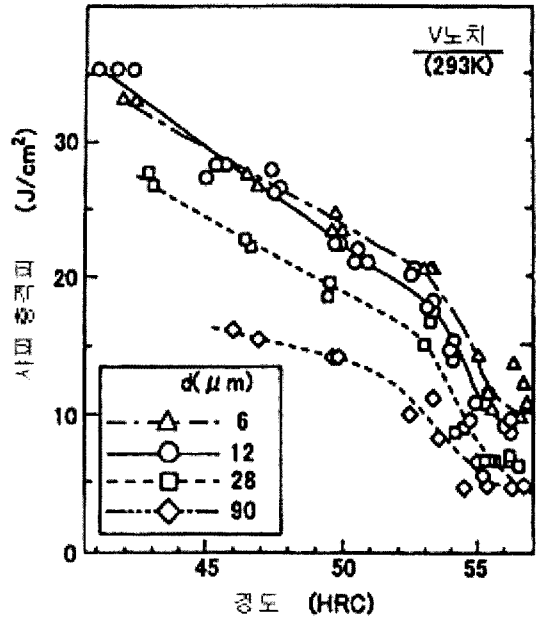


그림 6. 결정입경과 0.2% 항복비의 관계.

입경에 영향을 미치지 않는 정수.

그림 6은 IHT온도를 변화하여 경도를 43, 46, 50, 53 H_{RC} 급으로 조정된 ITW에서의 결정입경과 0.2% 내력비와 관계를(그림의 횡축은 $d^{-1/2}(\text{mm}^{-1/2})$ 을, < >내에 $d(\mu\text{m})$ 을 나타냄) 나타낸 것으로 모든 경도와 $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ 는 Hall patch형 직선 관계를 나타냈다.

연성(단면수축 ψ , 파단연신 δ_{8d} , 균일연신 δ_{um})는 ITW의 표준입경인 $d = 12 \mu\text{m}$ 에서 최대값을 나타내었다. 일반적으로 연성은 결정립미세화에 의해 향상되고 있으나 본 실험에서는 직경이 $d = 12 \mu\text{m}$ 보다 큰 것과 작은 것도 감소하였다. 입경이 큰 쪽에서는 $d = 12 \mu\text{m}$ 에 향해서는 미세화 함에 따라서 연성이 향상되는 것을 볼 수 있다. 이것은 단위체적당 결정립 수나 결정입계의 표면적이 증가하여 소성변형 중에 결정입계에서 전위 축적이 방해되는 장소(기회)가 많아져 응력집중이 보다 분산되어 미세균열 발생과 전파가 억제되는 것이라는 일반적인 연성 향상기구가 작용했기 때문이라고 생각된다. 한편 입경이 작은 쪽에서는 Grange도 미세화에 따라서 연성이 저하하는 것을 지적하고 있어 반복 가열법에 의한 미세화는 공통현상이라 생각 된다. 이것은 또, 그림 5, 6에서와 같이 $d = 4, 6 \mu\text{m}$ 재에서는 0.2% 내력비가 1에



($d = 6 \mu\text{m}$: Grange반복가열법)

그림 7. 경도 및 결정입경과 충격치의 관계.

가깝고 이것으로부터 추측되는 변형중의 전위 이동도의 급격한 저하가 연성 향상효과 보다 크게 나타나는 것이라 생각된다. 다음으로 2회차 이후 γ 화(도중까지는 전 IHQ의 템퍼링에 해당) 가열 시에 석출하는 미세탄화물은 핵생성 사이트로서 초기 γ 화입을 미세화 하는데 활용되고 있으나 γ 화 온도가 높으면 단시간 가열에서도 결정립은 곧바로 조대화 한다. 이 때문에 γ 입 성장을 억제하기 위해서는 저온가열이 필요하고 그 경우 탄화물이 충분히 고용되지 않을 가능성이 있어 미세 균열 핵이 증가해서 연성이 저하하는 것이라 생각된다.

(2)충격시험결과

그림 7은 경도 및 결정립과 상온에서의 인성(V노치, 사피충격값)과의 관계를 나타낸 것으로 결정입이 미세할수록 충격치가 높고 그 값이 급격히 저하하기(취화) 시작하는 경도 영역이 보다 고경도 측으로 되어 결정립 미세화가 인성향상에 유효한 것임을 알 수 있다. 그림 8은 IHT 온도와 경도 및 충격치와의 관계를 나타낸 것인데 결정입경이 미세하게 될수록 500°F 취성인 저온 취성영역에서의 충격치저하가 작아져 취화가 경감되는 것을 알 수 있다. 그림 9는

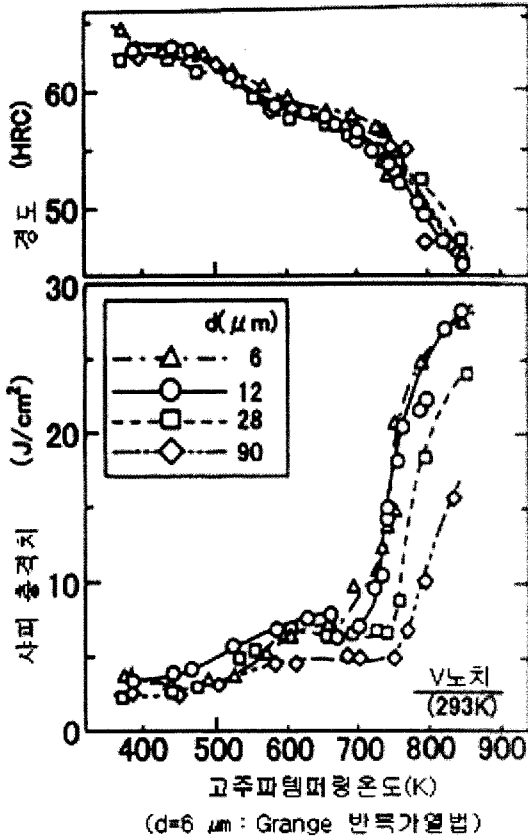


그림 8. IHT 온도 및 결정립과 경도 및 충격치 관계(저온 템퍼링 취화거동).

그림 7에서의 충격시험편 파면의 SEM조적을 나타낸 것으로, 50H_{RC}(1770 Mpa)급 53H_{RC}(1960 Mpa)급과 함께 d = 6, 12 μm에서는 담플파면/연성파괴를 나타내었으며 d = 28 μm 이상에서는 입계파면/취성파괴가 증가하였고, 경도가 높은 53H_{RC}급이 취화경향

이 뚜렷하였으며, 그림 7에서 와같이 미세결정립이 고강도영역에서의 인성향상에 유효한 경향을 뒷받침 하고 있다.

이와 같이 인성/충격치는 연성과는 달리 항상 결정립 미세화에 의한 향상 효과가 보였으나 d = 90 μm까지의 미세화에 의한 향상은 결정립 미세화에 의한 입계표면적이 증가하여 불순물이 분산되어 입계강도 저하가 작기 때문이라고 생각된다. 또 d = 12 μm부터 소입에 의한 d = 6 μm까지 미세화에 따른 약간의 향상은 충격시험에서 변형속도가 인장시험보다도 크기 때문에 급격한 가공경화가 일어나 연성의 정점에서 앞에 서술한 바와 같이 미세입재에서의 탄화물이 많은 경우나 전위의 이동도가 작은 등의 나쁜 영향을 상회하기 때문이라 생각된다.

그림 10은 d = 6 μm재(50H_{RC}급)의 인장파면과 충격파면을 비교한 것으로 충격파면의 담플면적이 큰 것은 변형속도가 큰 충격시험에서는 비교적 큰 미시균열이 파괴기점이 되어 연성 미세균열체가 많아 적지 않은 영향이 나타나서 미세입재에서도 인성이 향상된 것이라 생각된다. 또 저온 템퍼취성 영역에서의 취화거동이 경감된 것은 템퍼링 시 탄화물이 석출거동에도 결정입경이나 입계상황이 영향을 미치는 가능성이 있으나 상세한 해석은 하지 않았다.

(3) 지연 파괴시험결과

지연파괴시험은 고강도PC(pre-stressed C) 강봉에서 FIP: (pc)강봉에서 FIP: (pc공범의 국제학회) 방식인 50°C의 20%NH₄SCN(PH4 정도)을 부식액으로 한 수소취성 환경에서 지연 파괴시험방법을 참고

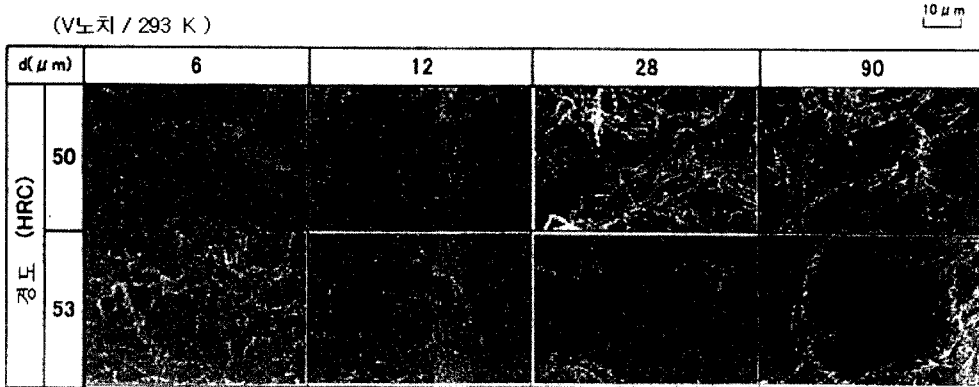
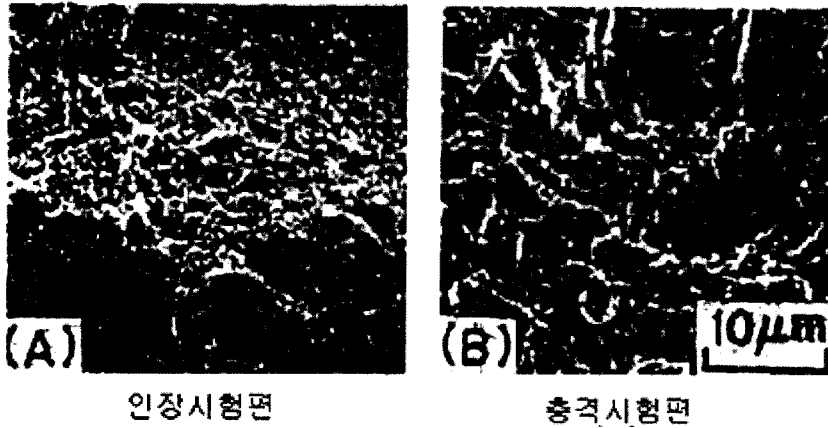


그림 9. 각결정입경재의 충격파면.



(d=6 μm : Grange 반복 가열법, 50HRC)

그림 10. 동일결정립(d = 6 μm) 동일경도(50 HRC)제의 (A) 인장파면 (B) 충격파면(SEM).

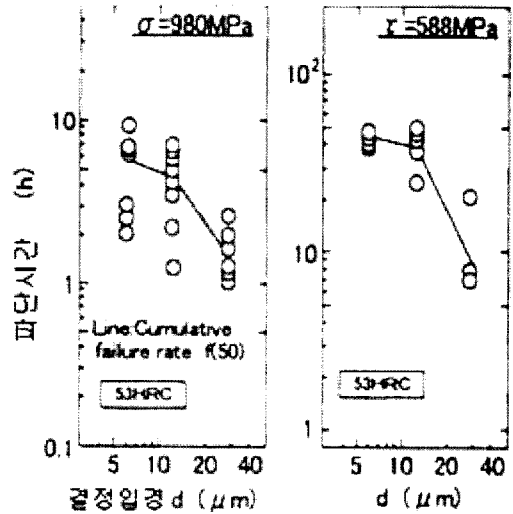
하여 실시하고 pc강봉에서 실시한 (A)인장하중과 코일 스프링으로 성형한 스프링강선 ITW에의 부하를 상정한(B)비틀림 하중을 가하여 단시간을 구하였다. 부하응력은 보통 pc강봉 시험에서는 $0.7 \cdot \sigma_B$ 또는 $0.8 \cdot \sigma_B$ 값을 이용하고 있으나 본 실험에서는 시험편이 고경도인 것을 고려해서 980 Mpa로 하였다. 또 비틀림 시험은 일반적인 비틀림 응력/인장력 관계에서 인장하중의 0.6배인 588 Mpa로 하였다.

그림 11은 53H_{RC} 급에서 (A)인장 지연 파괴시험과 (B)비틀림 지연 파괴시험 결과를 나타낸 것으로 모두 결정립이 미세하게 되면 피단시간이 길어졌다.

이와 같은 지연 파괴특성이 결정립 미세화에 의해 향상하는 것은 결정입계에서의 불순물(석출물/탄화물 포함)의 총량을 일정하게 한 경우 미세결정립편이 입계단위 면적당(또는 체적당) 물순물 양이 적어져 입계강도 저하가 감소하게 되고, 수소 트랩 사이트로서 역할이 약하게 되기 때문이라 생각된다. 또 전술한 바와 같이 저온 템퍼링 취성구역에서의 취화작용이 경감되는 것으로 추정되는 템퍼링 시 탄화물 석출 형태가(특히 입계에서의 석출상태, 양) 영향도 함께 고려된다.

(4) 피로 시험결과

그림 12 d = 6,12,28 μm 의 53HRC급 재료에 대하여 회전 굽힘시험을 하여 S-N 선도를 작성하여



(A) 인장하중부하 (B) 비틀림하중부하
53HRC, 323K 20%NH₄SCN침적
(d=6 μm: Grange반복가열법)

그림 11. 결정입경과 내지연 파괴 특성관계.

결정립경과 10^7 회에서의 피로한도 σ_{WB} 와를 관계를 나타낸 것으로 연성과 마찬가지로 d = 12 μm 재가 가장 높은 피로 강도를 나타낸다. 이것은 피로균열발생은 거의 경도에 의존하고 균열의 진전은 연성을 나타내는 미시적인 소성변형 등에 의존하는 것으로 연성이 가장 높은 d = 12 μm 재의 피로강도에도 반영된 것이라 생각된다.

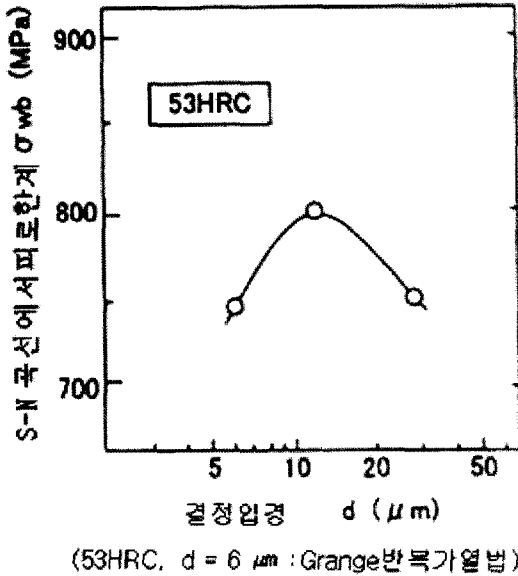


그림 12. 결정입경과 피로강도(10^7 회피로한)의 관계.

재가 한층 우수한 강인성을 갖는 것이 명확하였다. 또 IHQ재 에서는 페라이트 탈탄이 거의 일어나지 않았고 피로강도 향상에도 유리하였고 이것도 급속 단시간가열 γ 화에 의한 특징이다.

또 결정입경이 같은 IHQHT재($d = 28 \mu\text{m}$)와 FHQFHT재($d = 22 \mu\text{m}$)에 있어서의 경도와 충격치와의 관계를 연구한 결과 그림 13같이 IHQHT재의 결정입경이 약간 큼에도 불구하고 우수한 인성이 얻어졌으며 같은 경향이 인성, 파괴인성 지연파괴특성에서도 얻어졌다. 그래서 연구를 진행한 저자는 IHT 단독 강인화 효과가 있음을 발견하였다

IHT재의 탄화물이 FHT재의 비해서 결정입내에서 보다 미세하게 분산하고, 입계에서 석출량도 작은 것을 “의자뺨기계임 설”로서 모식적으로 나타내고 있는 문헌을 참조 하였다[7-9, 15, 16].

4. 결 언

고주파가열 γ 화 퀴칭(IHQ)의 경우 적극적인 미세화라고말하기 어려운 것으로, 급속 단시간 가열에 의해 입자성장을 억제 할수 있어, 극히 일상적으로 $d = 5-20 \mu\text{m}$ 정도의 결정립이 얻어진다. 본 보에서는 IHQHT한 스프링강선ITW예로서, 결정립 미세화가 내 지연파괴성 피로강도등의 향상을 가져오고 고강인화가 가능한 것으로 나타났다.

다음 호에는 이외의 결정립 미세화에 관한 폐사의 연구 data와 다른 연구자의 연구 예를 소개한다.

참고문헌

1. 川崎一博, 山崎隆雄: 日本熱處理技術協會第55回講演大會概要集, (2003) 5.
2. 瀬戸芳樹, 曹我榮市, 内野勝芳, 川崎一博: ばね論文集, 27 (1982) 28.
3. K. Kawasaki, Y. seto, T. Yamazaki and T. Hijiata: SAE Technical paper series, 830656 (1983).
4. 川崎一博, 瀬戸芳樹, 山崎隆雄: 鐵と鋼, 71 (1985) 100.
5. 川崎一博, 千葉貴世, 高岡憲久, 山崎隆雄: 鐵と鋼, 73 (1987) 136.
6. 川崎一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 鐵と鋼, 73 (1987) 144.
7. 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鐵と鋼, 74 (1988) 128.

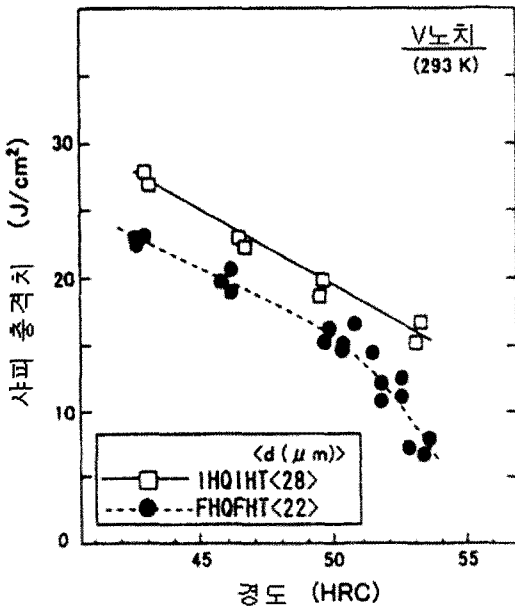


그림 13. 동일경도의 결정입경의 IHQHT재와 FHQFHT 재의 충격치.

3. 동일결정입경의 1HQ1HT재와 FH재와 FHQHT재의 인성

이상의 결과 결정립 미세화가 1HQ1HT재(ITW)

8. 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鐵と鋼, **74** (1988) 136.
9. 川崎一博: 京都大學學位論文 (1987).
10. R. A. Grange : Trans. ASM, **59** (1966) 26.
11. 田村今男 : 鐵鋼材料強度學, 日刊工業新聞社 (1969).
12. 中佐啓次郎, 陳 効列, 武井英雄 : 日本金屬學會誌, **48** (1984) 1060.
13. 福井彰一 : 鐵と鋼, **55** (1969) 151.
14. 川崎一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄 : 日本熱處理技術協會 第24回講演大會預稿集, (1987) 13.
15. 川崎一博, 高岡德義, 平尾 正, 山崎隆雄 : 析出制御メタラジ-研究會 最終報告書, (2003) 64.
16. 高岡德義, 稻葉智一, 平尾 正, 川崎一博, 山崎隆雄 : 日本熱處理技術協會第56回 講演大會概要集, (2003) 5.