

인바재료의 기계적 성질에 미치는 풀림 열처리의 영향

원시태*

The Effects of the Annealing Heat Treatments on the Mechanical Properties of the Invar Materials

Si Tae Won*

ABSTRACT

This study examined the effects of the annealing heat treatments on the mechanical properties of the Invar(Fe-36%Ni Alloy) materials. Invar materials were annealed at various temperatures range 900~1200°C in vacuum(10^{-4} Torr) and hydrogen atmospheres. And annealing conditions were changed by cooling rate and holding time at 1100°C. The grain size of rolled Invar materials was very fine but those of annealed Invar materials at 900~1200°C in vacuum and hydrogen atmosphere increased with increasing annealing temperature. The micro-vickers hardness values of annealed Invar materials were decreased about 15% that of the rolled Invar materials, regardless of the various of annealing temperatures, atmosphere(vacuum, hydrogen) and annealing conditions. The tensile strength and yield strength of annealed Invar materials at 900~1200°C in vacuum and hydrogen atmosphere were decreased 10.0~14.4% and 34.6~39.1% those of the rolled Invar materials, respectively. The strength ratio(tensile strength/ yield strength) of annealed Invar materials was improved to 1.7~1.8 from the value of 1.2~1.3 of rolled Invar materials. The degree of spring back of annealed Invar materials was about 50% of the rolled Invar materials, regardless of the various of annealing temperatures, atmosphere(vacuum, hydrogen) and annealing conditions.

Key Words : Invar Material(인바 재료), Strength Ratio(강도비), Annealing Heat Treatment(풀림 열처리), Spring Back(스프링 백)

1. 서론

Fe-Ni계 합금의 중요한 성질 중 하나는 온도상승과 더불어 원자진동은 열팽창을, 자기스핀 배열

은 강자성 배열에서 상자성 배열로 변환에 따라 열수축현상을 일으키며 이들 사이의 균형에 의해 낮은 열팽창계수를 갖는 것으로 알려져 있으며^(1, 2) 특히 Fe-Ni계 합금중 선열팽창계수가 철강재료의

* 서울산업대학교 금형설계학과

약 1/10 인 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 Fe-36%Ni 합금이 인바재료이다.⁽³⁾ 그러나 인바소재는 첨가성분^(4, 5), 열처리방법^(6, 7) 및 가공방법^(8, 9)등에 따라 성질이 상당히 변화하는 특성을 갖고 있다.

첨가성분중 C와 Cr은 탄성한계를 향상시키는 효과를 갖고 있으나 열팽창계수를 증가시키고, Co는 열팽창효과를 감소시키나 고용경화 현상이 나타나며, Ti이나 Al은 열팽창계수를 증가시키고 Ni₃(Ti, Al)형태의 석출물을 형성하여 석출경화 효과를 갖는다.^(10, 11)

한편 열처리특성은 인바재료가 오스테나이트조직을 갖기 때문에 열처리에 의해 경화되지 않고 540°C 이상으로 가열시키면 연화되며, 1040°C 이상에서는 결정립이 성장한다.⁽¹²⁾ 또한 인바소재의 선열팽창계수에 미치는 열처리효과는 풀림열처리시 공냉이나 수냉을 하면 열팽창이 감소하는 효과가 크나 내부변형과 탄소에 의한 선열팽창계수의 값이 불안정하게 되기 때문에 낮은 열팽창계수와 높은 치수안정성을 얻기 위하여는 안정화 풀림열처리를 행하고 있다.⁽¹³⁾ 한편 인바소재의 열처리방법과 시효온도(20~205°C 범위) 및 시간에 따른 치수변화의 관계는 830°C에서 담금질한 경우 시효온도에 무관하게 시효시간 5시간까지는 모두 응력제거에 의한 수축현상이 나타나고, 830°C에서 풀림처리한 경우에는 20°C의 시효온도에서 시효시간에 무관하게 치수변화가 나타나지 않기 때문에 인바소재의 시효온도 및 시간에 따른 치수변화는 풀림처리재가 담금질처리재보다 우수한 것으로 알려져 있다.^(14, 15)

이상과 같이 인바소재에 대한 기존의 연구결과는 제조방법, 첨가성분, 열처리 및 가공방법에 의한 선열팽창계수등 치수변화와 관련한 연구가 대부분이었다. 또한 인바소재의 용도는 낮은 선열팽창계수를 갖는 특징으로 인하여 주로 측정용 장비의 소재로 사용되어 왔으나, 적절한 고강도와 고인성의 특성을 갖고 있어서 현재는 작동 온도하에서 장시간 사용하는 측정장비의 스크린이나 TV브라운관 내부의 Shadow Mask^(16, 17)등과 같이 전기, 전자재료 및 정밀기기 부품의 용도로 널리 이용이 확대되고 있는 실정이다. 그러나 인바소재는 기존에 사용되어 왔던 순철에 비해 항복강도는 2배이상 강하고, 연신율은 50%정도이며 특히 강한 스프링백과 파단 특성을 갖기 때문에 제품 성형시에는 많은 문제점으로 나타나고 있기 때문에 성형성 향상을 위한 풀림열처리 방법과 특성파악은 매우 중요하다고 생

각된다.

따라서 본 연구에서는 인바소재의 성형성 향상을 위한 체계적인 연구를 위해 먼저 진공 및 수소 분위기 하에서 풀림열처리온도 및 열처리 사이클등의 영향이 기계적 성질에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 검토하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편제작

본 실험에 사용한 인바소재의 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical compositions of Invar(wt.%)

Composition Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
INVAR	0.003	0.04	0.31	0.001	0.001	36.1	bal.

인바소재의 기계적 성질을 얻기 위한 인장시험편의 형상과 규격은 Fig. 1과 같고, 시험편의 동일 규격화를 위해 Fig. 2와 같이 금형을 제작하여 프레스에서 블랭킹 가공하였다.

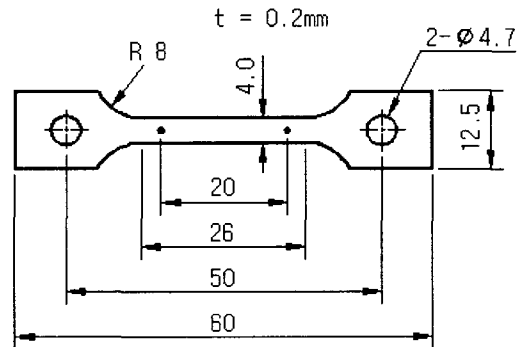


Fig. 1 Geometry of tensile test specimen

인장시험은 Instron 인장시험기[Model 8516]를 이용하여 상온에서 시험속도는 5mm/min.로 하였고, 시험속도가 기계적성질에 미치는 영향을 검토하기 위하여 10mm/min., 20mm/min.을 추가하였다. 또한 풀림처리재의 방향성을 검토하기 위하여 압연방향(0°), 압연에 45°방향(45°) 및 압연 직각방향(90°)의 3종류를 선정하였다.

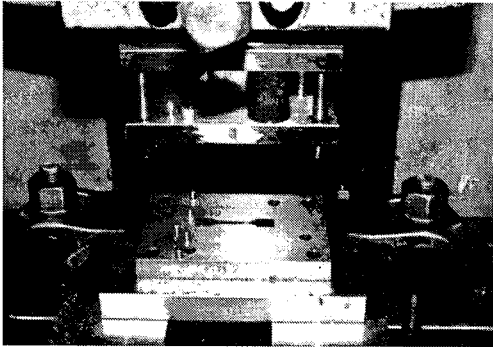


Fig. 2 Blanking die for tensile test specimen

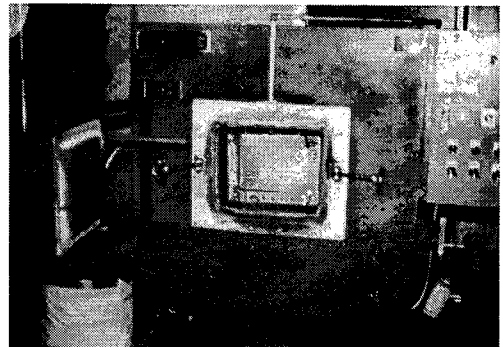


Fig. 3 Furnace for annealing heat treatment

폴림처리재의 경도값의 측정은 미소비커어스 경도시험기를 사용하였고, 인바소재의 스프링백현상을 검토하기 위한 굽힘시험편은 길이 70mm, 폭 20mm의 직사각형 소재로 절단한 후 180° 굽힘시험을 하였다.

2.2 열처리방법 및 조직관찰방법

인바소재의 수소 분위기 풀림처리는 Fig.3과 같은 분위기 열처리로를 이용하여 순도 99.99%를 갖는 수소가스를 가스주입구를 통하여 10분간 로안에 공급하여 로안의 잔여공기를 충분히 제거(flushing)한 후, 수소가스의 폭발위험성을 방지하기 위하여 가스배기구에서 배출되는 수소가스는 연소시키면서 열처리하였다. 이때 가열, 유지 및 냉각과정시 수소가스는 2ℓ/min의 속도로 로안에 계속 주입하여 수소분위기를 유지하였다. 한편 진공열처리는 제작된 시험편을 석영관을 이용하여 10⁻⁴Torr의 진공분위기를 만든 후 봉입하여 열처리로에서 풀림처리하였다. Fig.4는 진공분위기 상태를 만든 석영관의 모양을 나타낸 것이다.

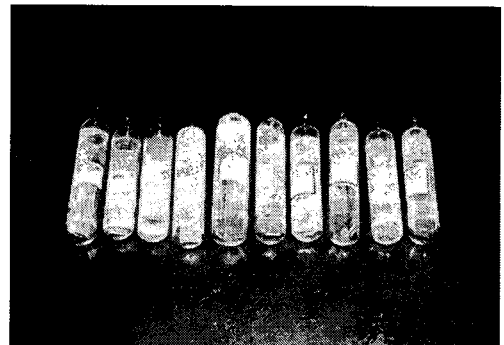


Fig. 4 Quartz glass tubes for vacuum annealing heat treatment

폴림처리 온도는 900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃의 4종류의 온도에서 18분 유지후 로냉시켰으며, 풀림열처리 사이클의 영향을 검토하기 위하여 Fig.5와 같이 풀림온도 1100℃를 기준으로 가열 및 냉각방법, 유지시간을 변화시킨 (a)~(e)의 5종류를 선정하였다.

한편 풀림처리 후의 조직관찰은 금속현미경에서 100배의 배율로 관찰하였고 사용한 부식액은 염산(3)+질산(1)의 혼합액을 이용하였다.

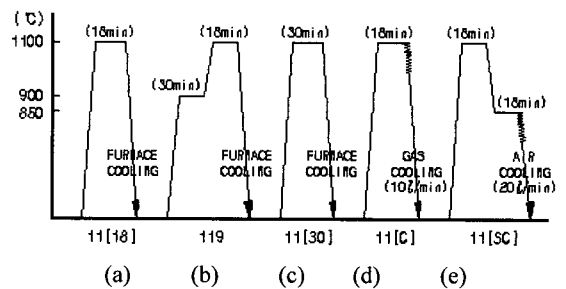


Fig. 5 Annealing heat treatment conditions

3. 실험결과 및 고찰

3.1 풀림열처리조건과 조직과의 관계

Fe-Ni합금의 2원 상태에서 36% Ni을 갖는 인바재료의 용융온도는 약 1450℃이고, 재결정온도는 약 500℃에서 나타나며, 재결정온도 이상에서는 오스테나이트 (γ -Fe, Ni)상을, 재결정온도 이하에서

는 페라이트 (α -Fe)상과 오스테나이트(γ -Fe, Ni)상의 혼합조직을 갖고 있으며 30% 이상의 Ni을 함유하는 경우, 상온에서 10% α 상과 90% γ 상을 갖는다.⁽¹⁸⁾ 그러나 Tanji⁽¹⁹⁾는 실제의 경우 Fe-Ni 합금의 준 평형 상태도에서 30%이상의 Ni을 함유하면 상온에서 γ 상만 존재한다고 하였다.

한편 Fig.6은 미폴림처리 인바소재의 현미경 조직사진으로 결정립이 상당히 미세화되어 있음을 볼 수 있다. Fig.7은 진공분위기 상태의 풀림온도 900~1200°C에서 관찰된 조직사진으로 풀림온도가 높을수록 결정립의 크기는 점차 증가하고 있음을 볼 수 있으며 이것은 Inaba등⁽¹²⁾이 인바소재는 540°C 이상의 온도에서 연화가 시작되며 1040°C 온도에서 결정립이 성장하여 1000°C의 풀림온도에서 결정립의 크기가 20~100 μ m, 1100°C의 온도에서 30~150 μ m로, 1200°C의 온도에서 결정립이 더욱 성장한다고 한 결과와 비슷하게 본 실험의 경우에도 풀림온도가 높은 1100°C 및 1200°C 풀림재의 결정립은 매우 조대화 되어 있음을 볼 수 있다.

한편 Fig.8은 수소분위기에서 풀림처리한 경우의 조직사진으로 진공분위기에서의 풀림재의 경우와 비슷한 양상을 갖고 있다. 이 결과는 Inaba등⁽⁷⁾이 인바소재를 진공 및 수소분위기에서 풀림처리할 경우 소재에 함유된 Mn, Cr, Ca등의 원소에 의한 표면 석출물의 차이는 나타나지만 동일한 풀림 온도에서의 내부 결정립의 크기는 진공이나 수소분위기에서의 풀림재 공히 같다고 한 결과와 일치함을 알 수 있다.

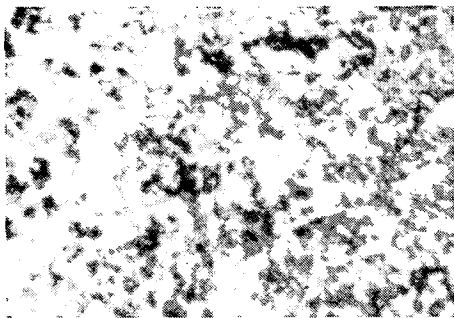
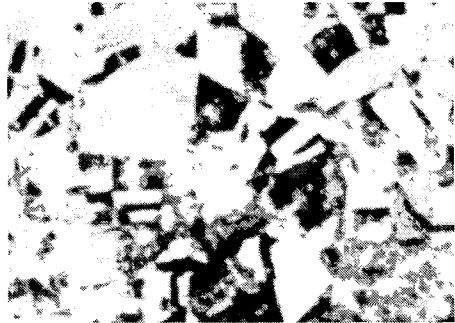


Fig. 6 Microstructure of rolled Invar



(a) 900°C



(b) 1000°C

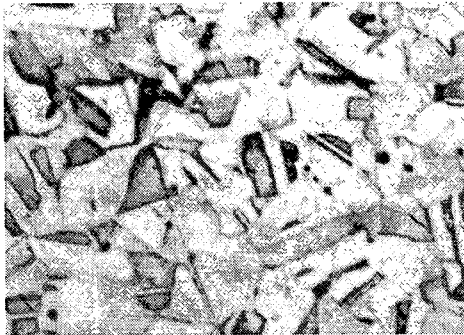


(c) 1100°C

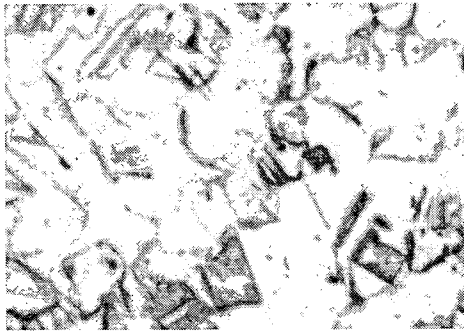


(d) 1200°C

Fig. 7 Microstructures of vacuum annealed Invar



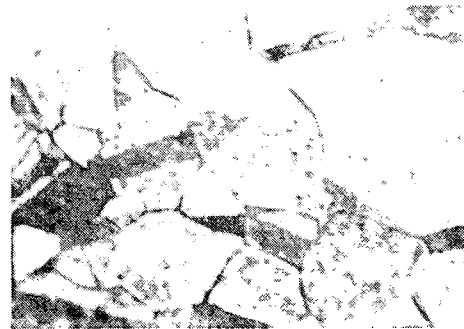
(a) 900°C



(b) 1000°C



(c) 1100°C



(d) 1200°C

Fig. 8 Microstructures of H₂ gas annealed Invar

3.2 풀림열처리조건과 경도값의 관계

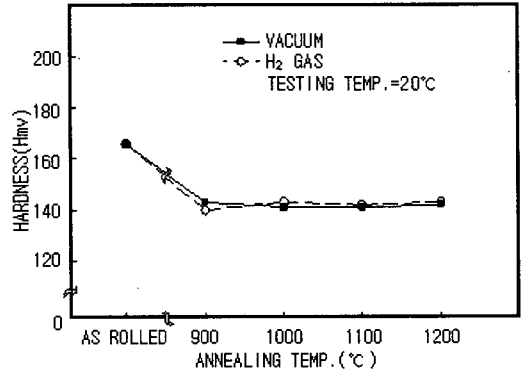


Fig. 9 The relations between micro-vickers hardness and annealing temperatures

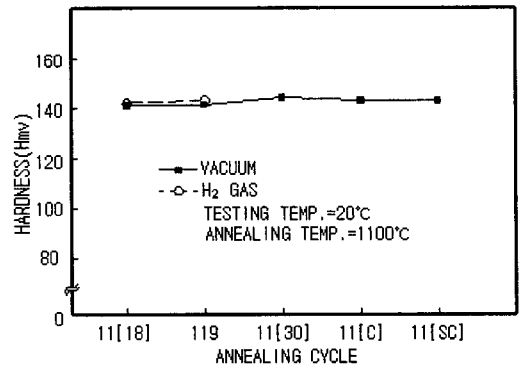


Fig. 10 The relations between micro hardness for the various annealing heat treatments

Fig. 9는 진공 및 수소분위기에서 풀림온도 차이에 의한 인바소재의 경도값의 관계를 나타낸 것이다. 이때 미풀림 인바소재의 경도값은 Hmv=165 정도이나 풀림온도 900 ~ 1200°C 범위의 진공 및 수소분위기에서 풀림처리한 인바소재의 경도값은 Hmv=140~143의 값을 나타내고 있다. 이 결과는 경도값에 미치는 진공 및 수소분위기의 영향은 거의 나타나지 않고 또한 900°C 풀림온도에서의 경도값은 미풀림재의 경도값(Hmv=165)에 비해 약간 저하했으나, 900°C 이상의 온도에서는 풀림온도의 증가에도 불구하고 경도값의 저하현상이 나타나고 있지 않으며 일정한 값(Hmv=140~143)의 범위에서 나타나고 있다. 이 현상은 3.1절에서 검토한 바와같

이 열처리후의 조직이 풀림온도의 증가에 따라 결정립이 조대화된 점을 고려하면 결정립의 크기가 클수록 강도나 경도값은 저하한다는 Hall-Patch 등의 결과⁽²⁰⁾와는 일치하지 않고 있다.

Fig.10은 1100℃의 풀림온도에서 열처리 사이클을 변화시킨 경우의 경도값을 나타낸 것으로 진공 및 수소분위기 풀림재의 경도값은 Hmv=141~143의 범위에서 나타나고 있어 풀림열처리 사이클의 영향도 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다.

3.3 풀림열처리재의 인장실험결과

Fig.11과 Fig.12는 각각 진공 및 수소분위기에서 풀림처리시킨 인바소재의 기계적성질을 나타낸 것으로 900℃ 풀림온도에서의 인장 및 항복강도는 진공 및 수소분위기 풀림재 모두 미풀림재의 이들 값에 비해 인장강도는 약 0.9배, 항복강도는 약 0.65배의 값을 나타내고 있으며 항복강도가 인장강도에 비하여 크게 저하하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 풀림온도가 900℃에서 1200℃로 증가한 경우에는 인장강도 및 항복강도의 저하정도가 그리 크지 않으며 1200℃ 풀림재의 경우 900℃ 풀림재에 비하여 인장강도는 약 0.95배, 항복강도는 약 0.93배로 이들 값에 미치는 풀림온도 크기의 영향은 경도값의 경우와 같이 크지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 Nakamura 등⁽²¹⁾이 Fe-30%Ni 합금재를 800~1100℃의 온도에서 풀림처리한 경우 풀림온도가 높을수록 α 상의 체적분율은 20%에서 8%로 감소하고 γ 상의 체적분율은 64%에서 81%로 증가하고 있으며, 풀림온도가 높을수록 인장 및 항복강도는 서서히 감소하는 경향을 갖는다고 한 결과와도 일치하고 있다.

한편 성형 개시조건인 항복강도와 네킹등 국부적인 변형이 발생하는 성형불안정 개시점인 인장강도의 관점에서 고려한 강도비[인장강도/항복강도]는⁽²²⁾ 강도비가 클수록 인장 성형성이 우수한 것으로 알려져 있고 본 실험결과에서도 강도비는 미풀림처리 인바재의 경우 1.2~1.3인데 비하여 900~1200℃에서 풀림처리한 인바재는 1.7~1.8로 증가시킬 수 있기 때문에 어느정도 성형성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

한편 풀림온도와 연신율의 관계를 살펴보면 미풀림 인바재의 연신율은 약 19%의 값을 갖는데 반해 진공 및 수소분위기의 900℃온도에서 풀림처리

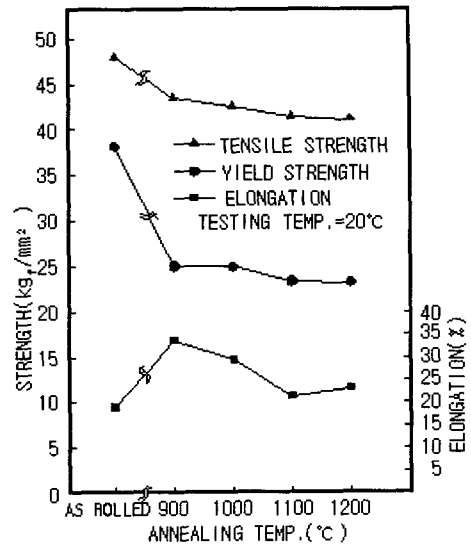


Fig. 11 The relations between mechanical properties and annealing temperatures (vacuum)

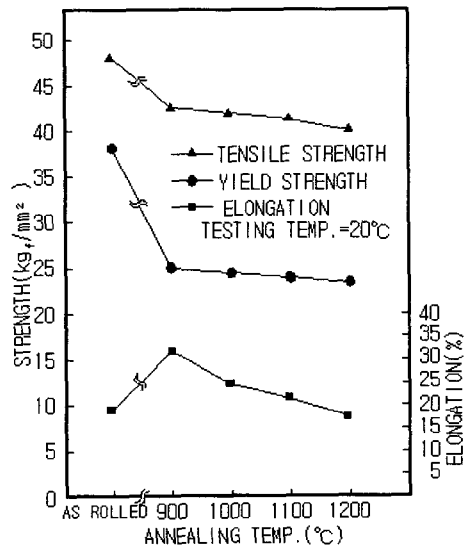


Fig. 12 The relations between mechanical properties and annealing temperatures (H₂ gas)

한 인바재의 연신율은 약 32~33.5%로 크게 증가하고 있다. 그러나 풀림온도가 점점 증가하면 연신율은 오히려 저하하는 경향을 보이면서 1200℃온도

에서 풀림처리한 인바재의 연신율은 미풀림재의 연신율과 비슷한 값을 갖는다. 이 결과는 Inaba등^(12, 23)이 Fe-36%Ni 합금을 진공상태에서 풀림처리한 경우 1000℃의 온도에서는 Mn과 Cr성분이 균일하게 분산되어 석출물이 관찰되지 않지만, 1100℃의 온도에서는 Mn의 일부분이 황화물이나 산화물로 결정경계에서 석출되며, 1200℃의 온도에서는 Ca성분이 지름이 수 μm인 원형의 산화물, 황화물 또는 복합화합물의 석출물로 결정경계 및 결정입내에서도 존재한다고 하였다. 또한 수소 풀림처리한 경우 1000~1100℃의 온도에서는 주로 Mn성분이 결정경계에 산화물로, 1200℃의 온도에서는 주로 Si성분이 산화물로 석출한다고 하였다. 따라서 본 실험에서 사용한 인바소재의 경우 Si, Mn, P, S 등의 원소가 극소량이지만 함유되어 있고 진공 및 수소분위기에서 풀림처리시 풀림온도가 높을수록 결정경계에 다양한 석출물이 존재할 수 있기 때문에 이들 석출물등이 연신율을 저하시키는 것으로 생각된다.

Fig.13은 풀림온도 1100℃를 기준으로 열처리 사이클을 변화시킨 인바소재의 인장 및 항복강도와 의 관계를 나타낸 것으로서 이들 값에 미치는 풀림 열처리 사이클의 영향은 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 한편 Fig.14는 1100℃ 풀림온도의 진공 및 수소분위기에서 풀림처리한 인바소재의 압연방향(0°), 45° 방향 및 압연 직각방향(90°)에 대한 인장 및 항복강도를 검토한 것이다. 이 결과 인장강도는 0° 방향에서는 41.3~41.4kgf/mm², 45° 방향에서는 38.8kgf/mm², 90° 방향에서는 38.9kgf/mm²로 나타나고 있으며, 항복강도는 0° 방향에서 23.3~23.9kgf/mm², 45° 방향에서 21.9~22.5kgf/mm², 90° 방향에서 22.5~22.8kgf/mm²의 크기를 갖고 있다. 따라서 결정립이 조대화한 1100℃의 풀림온도에서도 0° 방향의 인장 및 항복강도는 45° 및 90° 방향의 이들 값보다 각각 약 1.07배 정도 크게 나타나고 있으나 강도상의 이방성은 거의 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig.15는 풀림온도 1100℃에서 풀림처리한 인바소재의 시험속도의 영향을 검토한 것으로서 시험속도가 5mm/min.에서 20mm/min.으로 증가할수록 진공 및 수소분위기 풀림재의 인장강도는 거의 변화가 나타나지 않으나 항복강도는 진공풀림재의 경우 약 1.25배, 수소풀림재는 약 1.34배 상승하고 있음을 볼 수 있다. 이 결과는 시험속도가 기계적성질에 미치는 영향이 인장강도보다는 항복강도에 더

큰 영향을 미치고 있으며, 시험속도가 클수록 강도비를 저하시키기 때문에 성형작업시 작업속도를 서서히 하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

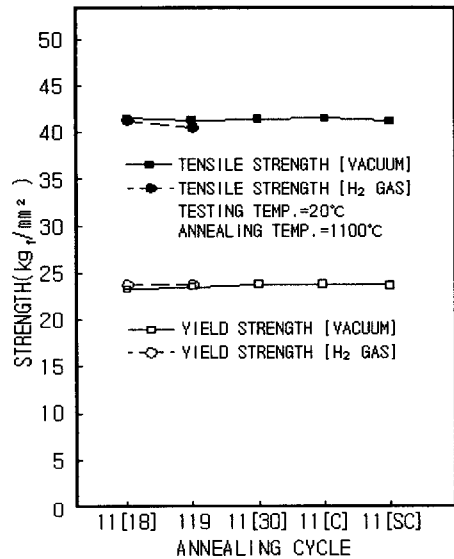


Fig. 13 The relations between strengths for the various annealing heat treatments

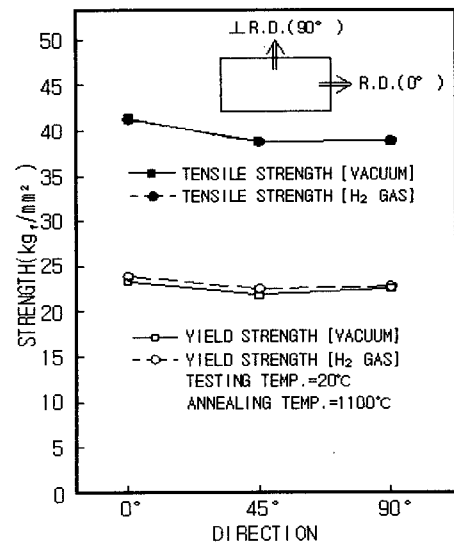


Fig. 14 The relations between strengths and rolling directions of annealed Invar

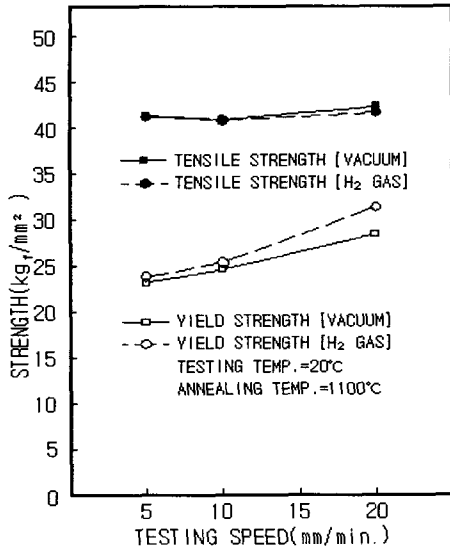


Fig. 15 The relations between strengths and testing speeds

3.4 풀림처리재의 굽힘실험 결과

Fig.16은 굽힘실험 결과 얻어진 스프링백 각도의 변화를 나타낸 것으로서 미풀림재의 스프링백 각도는 약 48° 이고 900~1200°C의 진공 및 수소분위기 풀림재의 스프링백 각도는 미풀림 인바소재의 약 1/2인 24° ~28° 의 값을 나타내고 있다. 이 결과는 스프링백 각도가 적으면 적을수록 제품성형 후 탄성복원되는 양이 적어지는 것을 의미하기 때문에 제품의 성형 정밀도에 매우 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

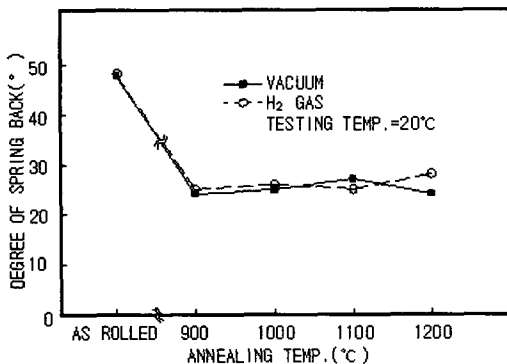


Fig. 16 The relations between degree of spring back and annealing temperatures

한편 Fig.17은 1100°C의 풀림온도에서 열처리사이클을 변화시킨 경우 스프링백 각도에 미치는 영향을 검토한 것이고, Fig.18은 1100°C의 온도에서 풀림처리시킨 인바소재의 방향성이 스프링백 각도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 결과 스프링백 각도에 미치는 풀림열처리 사이클의 영향과 압연 방향성의 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

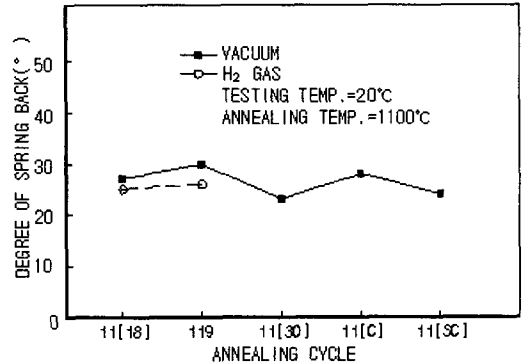


Fig. 17 The relations between degree of spring back for the various annealing heat treatments

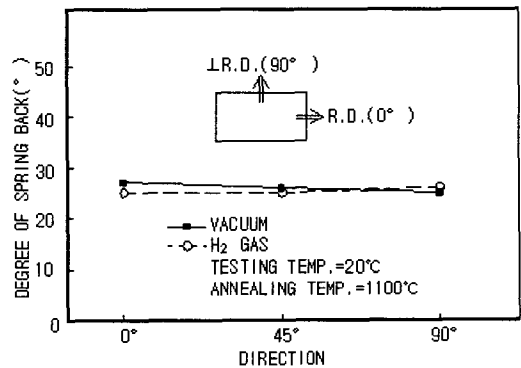


Fig. 18 The relations between degree of spring back and rolling directions of annealed Invar

4. 결론

본 연구에서는 인바소재의 열처리특성과 기계적성질을 검토하기 위하여 풀림열처리 분위기, 온도, 사이클등의 열처리조건을 다양하게 변화시킨

후 열처리 조직검사, 경도실험, 인장실험 및 굽힘실험을 행하였다.

이 결과 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 미폴림처리 인바재의 결정립은 매우 미세하나, 진공 및 수소분위기에서 폴림처리한 인바재의 결정립은 풀림온도가 증가할수록 점차 성장하고 있으며 특히 1100°C 및 1200°C의 풀림온도에서 매우 조대화 되었다. 그러나 폴림처리된 인바재의 경도값(Hmv)은 온도, 열처리 분위기 및 열처리 사이클의 영향에 무관하게 미폴림처리재의 경도값에 비해 약간 저하하였다.
- (2) 900°C 이상의 온도에서 폴림처리된 인바소재는 열처리 분위기, 열처리 사이클 및 풀림온도의 영향에 무관하게 미폴림처리재의 인장강도보다 약 10.0~14.4% 감소하지만, 항복강도는 약 34.6~39.1% 범위로 크게 저하하며, 강도비를 증가시킬 수 있어서 인장 성형성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.
- (3) 연신율은 진공 및 수소분위기 상태의 900°C 온도에서 폴림처리된 인바재의 경우 약 32~33.5%로, 미폴림처리재의 연신율 19%에 비하여 크게 증가하지만 풀림온도가 높을 수록 점차 연신율은 저하하는 경향이 나타난다.
- (4) 1100°C의 온도에서 폴림처리한 인바소재의 압연방향성의 영향은 열처리 분위기상태에 무관하게 거의 나타나지 않으나, 시험속도의 영향은 시험속도가 클수록 인장강도에는 큰 영향을 미치지 않으나, 항복강도는 증가시킨다.
- (5) 굽힘시험결과 풀림열처리 분위기, 열처리온도, 열처리사이클에 무관하게 스프링백 각도는 미폴림처리재의 약 50%로 나타나고 있고 제품성형시 제품정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 서울산업대학교 교내학술 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. M. Matsui, S. Chikazumi, "Analysis of Anomalous Thermal Expansion Coefficient of Fe-Ni Invar Alloys," J. of Physical Society of Japan, Vol. 45,

- No. 2, pp. 458~464, 1978.
2. W. F. Schlosser et al, "The Temperature and Magnetic Field Dependence of the forced Magnetostriction and Thermal expansion of INVAR," J. of Phys. Chem. Solids, Vol. 32, pp. 927~938, 1971.
3. W. F. Schlosser, "A Model for the Invar Alloys and the Fe-Ni System," J. of Phys. Chem. Solids, Vol. 32, pp. 939~949, 1971.
4. H. Morrow, D. L. Sponseller et al, "The Effects of Molybdenum and Aluminum on the Thermal Expansion Coefficients of Ni-Base Alloys," Metallurgical Transactions, Vol. 6, pp. 477~485, 1975.
5. M. L. Theodore, D. A. Colling et al, "The Determination of small amounts of Sulfur in Fe-Ni Alloys," Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 245, pp. 1823~1824, 1969.
6. M. Nakamura, K. Tsuya, "Effect of heat treatment on structure and mechanical properties of sintered Fe-Ni alloys," Podwer Metallurgy, Vol. 26, No. 3, pp. 149~154, 1983.
7. M. Inaba et al, "Effect of the Annealing conditions on the Oxidation behavior of Fe-36 Ni Alloys," Applied Surface Science 27, pp. 164~179, 1986.
8. H. Kagawa, S. Chikazumi, "Origin of Effect in Fe-Ni Invar Alloy," J. of Physics Society Japan, Vol. 43, No. 3, pp. 1097-1098, 1977.
9. J. R. C. Guimaraes, J. c. Shyne, "On the Effects of Plastic Deformation on Thermal Stabilization of Austenite in Fe-Ni-C Alloy," Metallurgical Transactions Vol. 2, pp. 2063~2065, 1971.
10. M. E. Fine and W. C. Ellis, "Youngs Modulus and its Temperature Dependence in 36 to 52 pct Nickel-Iron Alloys," J. of Metals, Transactions AIME, Vol. 188, pp. 1120~1125, 1950.
11. G. Hausch, H. Warlimont, "Single crystalline elastic constants of ferromagnetic F.C.C. Fe-Ni Invar Alloys," ACTA Metallurgical, Vol. 21, pp. 401~414, 1973.
12. M. Inaba et al, "Surface segregation of impurities on vacuum annealed 36% Ni-Fe alloy," J. of Materials Science Letters 4, pp. 818~821, 1985.
13. "36% Nickel-Iron Alloy for low Temp. Service,"

- The International Nickel Company INC., Tech. note
14. B. S. Lement, B. L. Averbach et al, "The Dimensional behavior of Invar," Trans. of ASM, Vol. 43, pp. 1072~1951, 1951.
 15. M. Nakamura, K. Tsuya, "Mechanical Properties of duplex Fe-Ni-C alloys prepared by powder metallurgy techniques," Powder Metallurgy, No. 2, pp. 65~70, 1980.
 16. M. Inaba, K. Teshima et al, "Development of an Invar Shadow Mask for Color Cathode Ray Tubes," IEEE Transaction on electron devices, Vol. 35, No. 10, pp. 1721~1728, 1988.
 17. N. J. Park et al, "Effects of Texture on the Etching Property of Fe-36%Ni Invar Sheets," Metals and Materials, Vol. 6, No. 1, pp. 51~56, 2000.
 18. "Metallography, Structures and Phase diagrams," Metals handbook, Vol. 8, ASM, pp. 304, 1973.
 19. Yasunori Tanji, "Thermal Expansion Coefficient and Spontaneous Volume Magnetostriction of Fe-Ni Alloys," J. of the Physical society of Japan, Vol. 31, No. 5, pp. 1366~1373, 1971.
 20. 이동녕, "재료강도학," 문운당, pp. 208, 1994.
 21. M. Nakamura and K. Txuya, "Effect of phase distribution on mechaninal properties of Fe-Ni heterogeneous alloys, Powder Metallurgy," No. 4, pp. 179~185, 1979.
 22. 최태준, "황동판의 성형성에 미치는 압연제조공정의 영향," 서울산업대 대학원 석사논문, pp. 11, 1996.
 23. M. Inaba et al, "Surface segregation of impurities, manganese and silicon on hydrogen-annealed 36% Ni-Fe alloys," J. of Materials science Letters 5, pp. 16~18, 1986.