

Fe-Ni 인바(Invar) 합금 박판의 가공성 향상을 위한 방향성 조직 제어

박성용¹· 남궁정²· 김문철²· 김상선³· 이상석³· 박찬경[#]

Relationship Between Texture and Deformability in Fe-Ni Invar Alloy Strips

S. Y. Park, J. Namgung, M. C. Kim, S. S. Kim, S. S. Lee, C. G. Park

(Received October 12, 2006)

Abstract

42Ni-Fe Invar alloy strips were fabricated using conventional ingot casting and melt drag casting followed by rolling. Mechanical properties such as tensile strength, elongation and blanking deformability of the strips were evaluated. The properties were strongly depended on fabrication methods. Tensile strength and elongation of all strips were in the range of 40-60 kg/mm² and 26-35%, respectively, which are enough values for the manufacture of the final products. In some of the strips, however, burrs occurred at deformed surface. The properties of strips were explained in terms of microstructure such as grain size and texture formation during rolling. Additionally, strips by melt drag casting method were compared to those by conventional ingot casting.

Key Words : Invar Alloy, Texture, Deformability, Melt Drag Casting

1. 서 론

Ni-Fe 합금계 중, 36~42% Ni을 포함한 합금을 'Invar alloy'라 하며, 이 합금의 가장 큰 특징은 상온에서 약 162°C부근까지 온도 구간에서 열팽창 계수가 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도로 매우 낮다는 것이다. 이러한 낮은 열팽창 계수의 원인은 이 합금이 부피가 다른 두 가지 'spin state'를 가지고 있으며, 온도가 증가함에 따라 증가하는 부피가 magnetic state의 전환을 통하여 상쇄되기 때문이다[1~2].

Invar 합금은 고유의 저열팽창 특성으로 인해 각종 전자 부품 소재로 사용되며, 전자총 전극 및 shadow mask 등에 적용되고 있다[3]. 저열팽창 특성

외에도 원활한 가공 공정을 위하여 적정 강도 및 연신율이 요구되며, 이러한 기계적 특성은 합금 조성, 첨가 원소, 공정 조건 등에 영향을 받는다. 특히 개재물의 유무는 냉간 압연 및 타발 가공에서 균일한 변형을 저해하고 균열 발생의 시작점이 된다. 또한 박판 제조를 위한 압연 공정에서 발생한 집합 조직은 자기 이방성 뿐만 아니라 기계적 물성의 이방성도 유발한다. 이방성 조직의 발달은 등방의 변형을 통해 얻어지는 최종 성형 과정에서 균열 및 표면 결함을 유발하는 요인으로 알려져 있다[4].

본 연구에서는 몇몇 제조사의 Invar 합금 주물을 열간 및 냉간 압연을 통하여 제조한 박판과 열연 공정을 생략한 용탕인출법을[5] 통해 제조한 박판

1. 포항공과대학교 신소재공학과
2. 포항산업과학기술원 주조공정팀
3. 대명 SMC㈜

교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과,
E-mail:cgpark@postech.ac.kr

을 비교하여 새로운 Invar 합금 박판 제조 공정을 개발하고자 하였다. 또한 제조된 박판의 가공성에 미치는 미세구조의 영향에 대해서도 살펴보았다.

2. 실험 방법

42%Ni-Fe Invar 합금 박판의 제조를 위하여 이 합금을 생산하는 제조사(N, D, S 사)에서 수입한 주물을 ㈜대명 SMC 에서 기존 제품에 적용하는 공정을 이용하여 열간 및 냉간 압연과 소둔을 거쳐 0.3mm 두께의 박판으로 가공하였다.

또한 Fig. 1 과 같이 본 연구진에서 개발한 용탕인출법을 이용하여 제조한 strip(P 시편)을 냉간 압연을 통하여 0.3mm 두께로 가공 후 850~1150°C 구간에서 소둔 열처리를 하였다. 용탕이 롤에 의해 인출될 때, 주물의 터짐을 방지하기 위하여 액상/고상 공존 온도를 넘는 원소인 Si 이 첨가 되었다[5].

제조된 박판 시편을 인장 시험을 통해 강도와 연신율을 측정하였으며, 타발 가공을 통해 Fig. 2 와 같이 최종 제품의 형상을 위한 성형성을 시험 하였다.

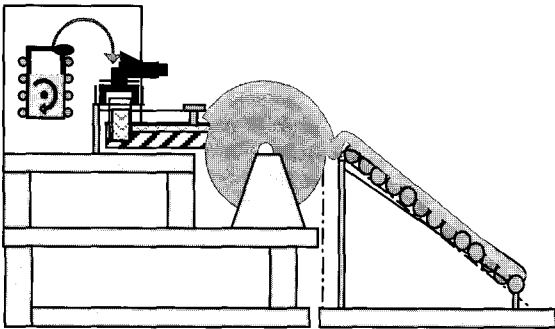


Fig. 1 Schematic diagram of melt drag casting facilities

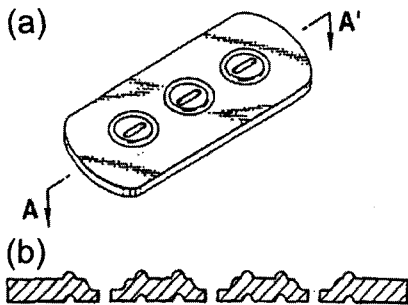


Fig. 2 (a) Shape of pressed sheet for a part in electron gun, (b) Cross sectional shape along A-A in (a)

미세조직의 평가를 위해 광학, 주사전자현미경을 이용하였으며, EBSD를 통해 박판의 방향성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성 평가

박판의 인장 시험 결과를 Fig. 3에 표시하였다. 용탕인출법으로 제조한 시편의 경우, 가장 특성이 우수하였던 1050°C에서 열처리한 시편을 나타내었으며, P-1과 2는 각각 0.5%와 1.0%의 Si 합금원소를 포함한 시편이다.

인장 강도가 높으면 타발 가공이 어려우며, 너무 낮으면 최종 제품의 응용이 힘들어 40~60 kg/mm²의 적정 강도 값이 요구된다. 또한 최종 형상의 성형을 위해서 연신율이 25% 이상이 필요하다. N 시편은 인장강도가 높으나 연신율이 낮았으며, 용탕인출법에 의한 시편 P-1과 P-2은 인장강도는 가장 낮았으나 가장 높은 수준의 연신율을

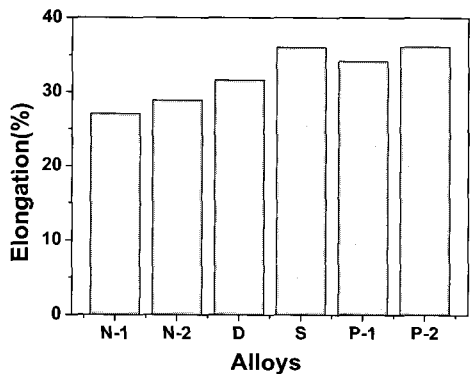
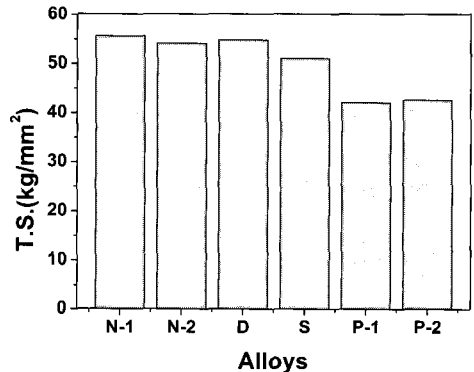


Fig. 3 Tensile strength(upper) and elongation (lower) of fabricated alloy sheets

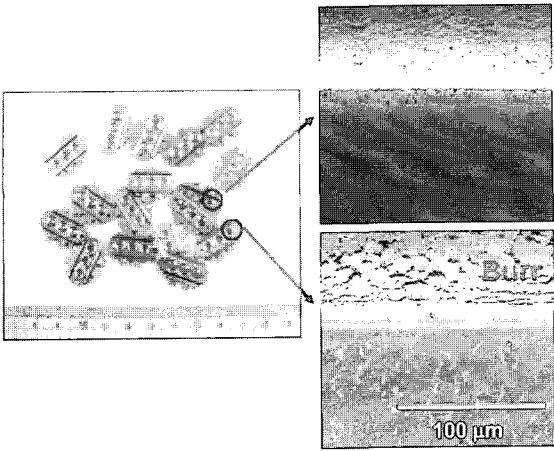


Fig. 4 Final products after press and magnified surface images showing the occurrence of burr

보였다. 본 연구에서 제작한 모든 시편이 요구 강도와 연신율을 만족하였다.

3.2 타발 가공 특성

모든 시편이 타발 가공을 위해 통상적으로 요구되는 인장 강도와 연신율을 만족 하였으나 타발 가공 후 일부 시편에서 표면에 미세한 균열이 발생하고 거칠어짐(burr)이 Fig. 4와 같이 발생하였다.

시편 N-1, N-2은 타발 가공 후 거칠어짐이 매우 빈번하게 일어났으며, 시편 D의 경우 일부 표면에서 거칠어짐의 발생이 관찰되었다. 시편 S와 P-1, P-2에서는 거름 발생이 관찰되지 않았다. 시편 N과 D의 인장강도는 높지만 타 시편에 비하여 연신율의 낮았다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 통상적인 요구 연신율을 만족하는 범위에 해당함에도 불구하고 표면 거칠어짐이 발생하였다. 이러한 원인을 조사하기 위하여 미세조직 분석을 수행하였다.

3.3 미세조직

Fig. 5에 제조된 박판의 미세구조를 나타내었다. 모든 시편에서 소둔 쌍정과 약간의 Mn 개재물이 관찰되었다. 주물로 제조한 시편의 경우 입계 크기가 40 μm 이내의 미세한 조직을 보이고 있으며, 용탕인출법으로 제조한 P-1 시편은 130 μm , P-2 시편은 172 μm 의 비교적 큰 결정립 크기를 보였다. 시편 N-1과 N-2의 경우, 압연 방향(지면의 세로

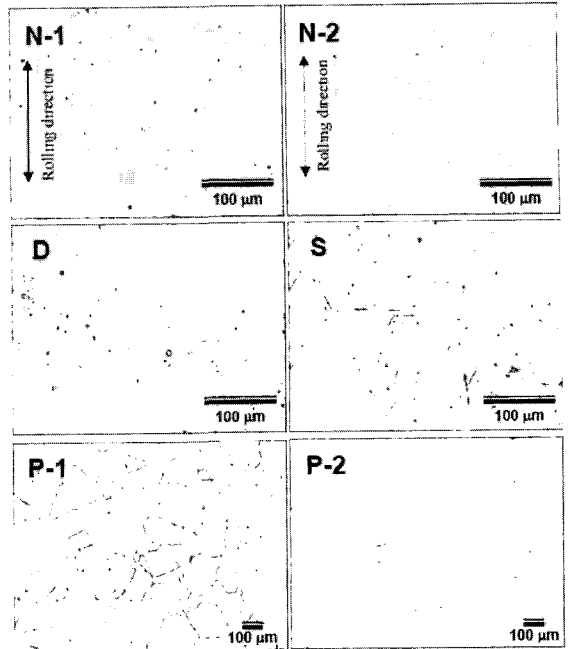


Fig. 5 Optical micrographs of fabricated strips

방향)으로 연신된 입계가 관찰되었으며 소둔 쌍정의 생성이 미약하였다. 즉 압연 조직이 사라지지 않고 남아 있으며 충분한 재결정이 발달되지 못하였다. 반면 다른 시편들에서는 압연에 의해 연신된 결정립은 관찰되지 않으며, 소둔에 의해 압연 조직이 사라지고 재결정이 충분히 일어났음을 알 수 있다.

관찰된 미세조직을 통하여 각 시편의 인장 강도 변화를 설명할 수 있다. 주물로 제조된 시편의 인장 강도가 높고 용탕인출법으로 제조된 시편에서 인장 강도가 낮은 것은 결정립 크기 차이 때문이며, 이는 Hall-Petch 관계식으로 간단히 설명된다.

그러나 연신율의 변화는 조직 사진만으로 원인을 판단하기 힘들다. 재결정이 일어날 정도의 소둔 조건이었으므로, 압연 과정 중에 축적되었던 변형은 모두 제거되었을 것으로 판단된다. 특히, 결정립 크기 차이가 심한 시편 S와 P가 유사한 연신율을 보이는 것은 연신율에 미치는 결정립의 크기 효과가 미진함을 말해준다. 또한 충분한 재결정이 일어났던 시편 D의 연신율이 낮은 것은 설명이 되지 않는다. 따라서, 압연 조직에 대한 보다 정밀한 진단을 위해 EBSD를 통한 집합 조직을 평가하였으며, 대표성을 위해 100개 이상의

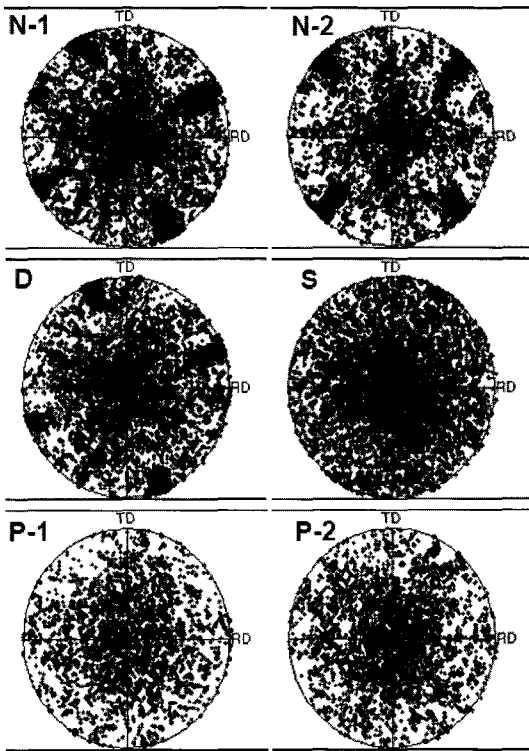


Fig. 6 {100} Pole figures of each strips observed by EBSD

입계가 포함되도록 측정 하였다. 각 시편의 pole figure 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 각각의 점들은 측정된 픽셀에서 {100} 면의 pole을 나타낸다. 광학 사진에서 연신된 입계를 보였던 N-1과 N-2는 (100)면이 측정 방향으로 강하게 배열되어 있음을 알 수 있으며, 이러한 배열은 FCC 구조를 가지는 금속에서 빈번히 발생하는 Rotated cube {100}<100>압연 집합 조직이다. 이것은 Fig. 5의 광학 사진과 잘 일치하는 것으로 소둔 공정 후에도 압연에 의해 배열되었던 Fe-Ni 결정 격자 특정 방향으로 배열되어 있음을 알 수 있다. 시편 N과 D의 점 분포가 약간 다른 각도로 이루어져 있다. 이것은 EBSD 시편 준비와 시편의 장착에서 시편상의 압연 방향과 분석 상의 압연 방향이 정확히 일치하지 못하여 발생한 것이다. FCC의 정사면체의 대칭 구조로 보아 N-2의 방향이 정확한 방향이다.

광학 사진에서 연신된 조직이 관찰되지 않았던 시편 D에서도 약한 Rotated cube 집합조직이 생성되어 있다. 즉 시편 D가 작은 결정립으로 재결정

이 일어났음에도 불구하고 연신율이 저하된 것은 소둔 시에 압연 집합 조직이 완전히 해소되지 않았기 때문이다. 반면 시편 S, P-1과 P-2에서는 {100} pole이 고르게 분포하고 있어서 압연에 의한 집합 조직이 완전히 사라진 것으로 판단할 수 있다. P-1과 P-2에서 점의 개수가 적은 것은 입계의 크기가 커서 EBSD 측정에 100여 개의 입계만 분석이 되었기 때문이다.

박판의 타발 가공 시에 burr가 가장 많이 발생 하였던 시편 N-1과 N-2과 일부 burr의 발생을 보인 시편 D는 압연 조직이 잔존 때문으로 판단할 수 있으며, 압연 조직의 발달 정도와 burr의 발생 빈도는 일치한다. 타발 가공에서는 Fig. 2와 같이 등방의 변형이 요구된다. 전체 연신율이 요구 범위에 포함된다 하더라도 방향성 조직의 발달은 타발 가공에서 변형이 어려운 방향이 존재하여 burr가 발생하는 것이다. Ni의 경우, <111> 방향이 <100> 방향에 비해 Young's modulus 가 2.5배 가량 높으며 [100] 방향으로 자화가 용이함 등 방향성 조직의 특징들이 보고된 바 있다[4]. 즉 이러한 방향성 조직의 생성은 박판의 기계적 물성 및 자기 이방성을 유발하여 가공 특성 및 최종 소재의 열팽창 특성에 영향을 끼칠 것으로 판단된다.

이 결과들로부터 Fe-Ni 결정립의 방위에 따른 물성의 차이를 발견할 수 있다. 강도는 방위 집합 조직 보다 결정립의 크기에 더욱 의존하였다. 그러나 연신율은 결정립 크기 보다 방위 관계에 더욱 민감하게 변하였다. 입방정상의 기저면(basal plane) 위에 있는 <100> 방향이 기타 다른 방향에 비해 연신율이 떨어지는 것이다. 따라서, Fe-Ni 과 같은 FCC 합금 박판은 타발 가공과 같은 등방 변형을 위해서 <100> 방향을 무질서하게 분포하도록 제어되어야 한다.

특정 방향으로 배열되었던 압연 집합 조직은 소둔 공정 동안 재결정이 일어나며 사라진다. 그러나 소둔 온도 및 소둔 시간이 충분하지 않아 구동력이 낮은 경우, 시편 N과 같이 변형 조직이 그대로 남아있거나 효과적인 결정립 배열을 이루지 못한다. Fig. 7은 SEM 사진에 EBSD 결과 {100} <100> rotate cube 방향성 조직 결과를 겹쳐서 표현한 것이다. 빨간색으로 표시한 영역은 오른쪽 pole figure에서 표시된 방향성 조직을 띠고 있는 결정립을 나타낸다. 압연에 의해 배열되었던 결정립이 재결정 과정에서 작은 결정립으로 나누어지

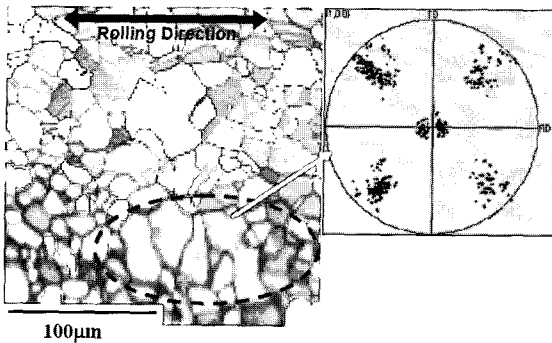


Fig. 7 SEM micrograph overlapped with {100}<100> texture

지만 일부 방향성 조직이 완전히 사라지지 못하고 남아 있다. 이러한 조직은 결정립이 작음에도 불구하고 저경계각(low angle grain boundary)을 이루고 있어 전위의 이동에 효과적인 장애물로 작용하지 못할 뿐 아니라, 특정 방향으로 결정립 배열을 통해 물성의 방향성을 여전히 유도하고 있다.

주물을 이용한 Invar 합금 박판의 제조는 많은 압연을 거치게 되어 압연 조직의 생성이 두드러지며, 이들 시편의 경우에 소둔 온도 상승 또는 소둔 시간 증가를 통하여 압연 조직을 사라지게 해야 할 것이다. 반면 용탕인출법을 사용하여 제조한 박판의 경우, 초기 두께가 얇기 때문에 높은 압연율이 필요하지 않아 집합조직의 생성이 미비하다. 즉 공정의 간소화는 물론 집합조직 생성을 방지할 수 있어 산업적으로 가치가 높은 Invar 합금 박판의 제조 방법으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구는 전자 부품용 42Ni-Fe 합금 박판의 집합 조직 등의 미세구조와 기계적 물성 및 타발 가공 특성에 대해 조사하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 주물을 압연하여 만든 박판의 경우, 높은 압연율로 인하여 {100}<100> Rotated cube 압연조직이 생성되었다.

(2) 압연 조직의 발생은 박판의 전체 연신율을 저하시키고 타발 가공 시 burr의 발생을 유발하였다.

(3) 용탕 인출법으로 제조한 Invar 합금 박판의 경우 제조 공정을 간소화 하며, 낮은 압연율로 인하여 집합 조직의 생성을 억제할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프론티어 연구개발 사업의 재정적 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Schilfaarde, L. A. Abrikosov, B. Jhansson, 1999, Origin of the Invar effect I iron-nickel alloys, Nature, Vol 400, pp. 46~49.
- [2] A. V. Ruban M. I. Katsnelson, W. Olovsson, S. I. Simak, I. A. Abrikosov, 2005, Origin of magnetic frustrations in Fe-Ni Invar alloys, Physical review B, 71, 054402.
- [3] N. Yuki, T. Ono, T. Shibate, S. Tanaka, 2004, Fe-Ni Co alloy thin strip for shadow masks having high strength and low coefficient of thermal expansion, along with excellent magnetic properties, US patent, No. 0241035 A1.
- [4] C. Kittel, 1976, Introduction to solid state physics, John & Wiley & Sons.
- [5] S. Y. Park, K. M. Lim, J. Namkung, M. C. Kim, C. G. Park, 2006, The effects of Si addition on microstructure and magnetic properties of permalloy strips fabricated by melt drag casting. Scripta Materialia, Vol. 54, pp. 621~625.