

홉킨슨 압력봉법을 이용한 Fe-6.5wt.%Si 합금의 고변형률속도 거동

윤영기[†] · 윤희석^{*} · 馬越 祐吉^{**} · 安田 弘行^{***}

(2000년 10월 19일 접수, 2001년 5월 8일 심사완료)

High-Strain-Rate Deformation of Fe-6.5wt.%Si Alloys using a Split Hopkinson Pressure Bar Technique

Young-Ki Yoon, Hi-Seak Yoon, Yukichi Umakoshi and Hiroyuki Y. Yasuda

Key Words : Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB: 홉킨슨 압력봉), Fe-6.5wt%Si(6.5% 규소 중량농도의 규소강), Floating Zone Method(광학식 부유 대역 용융법), Polycrystal (다결정), Single Crystal(단결정), Fractography(파단면 사진)

Abstract

Many researchers have published numerous papers about the high-strain-rate obtained from Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests. And 6.5wt%Si steel is widely known as an excellent magnetic material because its magnetostriction is nearly zero. Single crystals are prepared by the Floating Zone (FZ) method, which melts the alloy by the use of a high temperature electron beam in a pure argon gas condition. In this paper, the fracture behavior of the poly crystals and single crystals (DO₃ phase) of Fe-6.5wt%Si alloy by SHPB test is observed. The comparison of high-strain-rate results with static results was done. Obtained main results are as follows: (1) Fe-6.5wt%Si alloy has higher strength at high-strain-rate tensile. SHPB results of polycrystal are twice as high as static results. (2) From the fractography, the cleavage steps are remarkably reduced in the SHPB test compared with the static test.

1. 서론

재료 산업의 발달과 함께 개발된 재료의 다양한 분야에의 적용으로 인하여 재료의 정적 역학 성질 뿐만 아니라 고속 충격을 이용한 인장 모드에서의 역학적 성질에 대해서도 중요한 과제로 떠오르고 있다. 이러한 고속 인장 모드를 부여하기 위한 다양한 방법 중 보편적으로 활용되어지는 것이 홉킨슨 압력봉(Split Hopkinson Pressure Bar : SHPB)을 들 수 있다.^(1,2)

각종 기계 및 전기 분야에서 가장 보편적으로 사용되어지고 있는 Fe-Si 합금류는 고 효율 및 철

심 손실이 많은 전기 재료 분야 특히, 고속 모터, 저소음 변압기 및 고주파 유도자(inductor) 등에 널리 응용되는 재료이다.⁽³⁻⁵⁾ 특히, Fe-6.5wt%Si(이후 6.5% 규소강 이라 함)은 매우 낮은 자기변형(magnetostriction)과 높은 전기적 내후성(resistivity), 높은 투자율(permeability) 및 낮은 자기이력(hysteresis) 등의 특성때문에 자기장치(magnetic device)에서 매우 유용하게 적용되고 있다. 현재까지의 6.5% 규소강에 대한 연구는 전기적인 특성, 특히 모터나 변압기의 수명과 성능을 향상시키는 데 목적을 두고 연구되어 왔으며, 최근에는 규소강판의 손실 저하, 전기적 성능향상 및 소음 저하 등에 관한 연구가 많다.⁽⁶⁾

더불어, 규소의 증가에 따른 취성의 메커니즘을 분석하기 위한 단결정 및 다결정의 6.5% 규소강에 대한 정적 인장이 수행되었으며, 이러한 실험을 통하여 6.5% 규소강의 파괴 형태로 부터 규소강 합금에 대한 어닐링 조건과 취성과의 관계를

[†] 책임저자, 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과
E-mail : ykyoon@chonnam.ac.kr
TEL: (062)530-0433 FAX : (062)530-1689

^{*} 회원, 전남대학교 기계공학과

^{**} Professor, Osaka University, Japan

^{***} Research associate, Osaka University, Japan

밝히기 위한 파단면의 조직 관찰은 물론 어닐링 조건에 따른 재료의 연성이 비교/분석되었다.⁽⁷⁾

지금까지 홉킨슨 압력봉을 이용한 고속 인장 변형 거동에 관한 연구가 수행되어 왔지만, 대부분의 재료가 알루미늄 합금 재료 특히 Al 7075-T6, Al 6061-T6 등에 대한 실험이 이루어졌다.^(8,9) 또한, 이러한 실험을 위한 시편은 대부분 탄성봉 사이에 시편을 나사로 체결하고, 압축과가 입력봉의 자유단에서 인장과로 반사되는 것을 이용하였다. 하지만, 본 논문에서는 정적 인장 실험과 동일한 인장 조건을 부여하기 위하여 고속 인장 실험에서도 도그본 형태로 시편을 제작하여 인장과를 이용한 실험을 수행하였다.

더불어, 본 연구에서는 6.5% 규소강에 대해 홉킨슨 압력봉을 이용한 동적 인장 파괴실험을 통하여, 고속 인장모드에서의 충격과 형태로부터 얻어진 동적 파괴 실험결과를 정적 인장파괴 실험 결과와 비교하였다. 더불어, 정적 인장시의 6.5% 규소강 단결정 및 다결정의 파단 면과 비교/분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 준비 및 제작

99.99wt% 철과 99.999wt% 규소를 사용하여 진공상태에서 아크 용해기(ACM-01S, 다이아진공주), 일본)로 Fe-6.5wt%Si 주 잉고트(master ingots)을 용해 하였다. 제작된 잉고트로부터 방전가공기(spark machine)를 이용해 지름 10mm, 길이 100mm의 크기로 제작된 봉(rod)형 시료들을 단일방향으로 정렬시킨 후 광학식 부유 대역 용융법(光學式 浮游帶域 熔融法), 일명 FZ(Floating zone)법⁽¹⁰⁻¹³⁾을 이용해 6.5% 규소강 합금의 단결정을 제작하였다. 결정 성장은 고순도 아르곤 가스 분위기 하에서 성장속도 5mm/h에서 광학적 열원을 가지고있는 단결정 성장 장비(NEC SC-35HD, NEC, 일본)를 이용하여 수행하였다. 제작된 결정의 방향은 X-ray 배면반사 라우에법과 주사형 전자현미경(일본 전자주) JSM-840A, JEOL, 일본)을 통해 SEM-EBSP법을 이용하여 해석하였다. 또한 EDS를 이용하여 제작된 잉고트의 성분비를 확인하였다.

주 잉고트를 균질화 처리 하기 위해 노(爐) 내에서 1000℃로 48 시간 동안 어닐링 처리하고 서서히 냉각시킨 후, 주 잉고트를 석영관에 밀봉시켜 넣은 후 1000℃의 도가니에서 1 시간동안 2차 어닐링 처리한 다음 오일에 급냉 시켰다. 이렇게 완성된 단결정체(Single Crystal) 잉고트와 다결정체

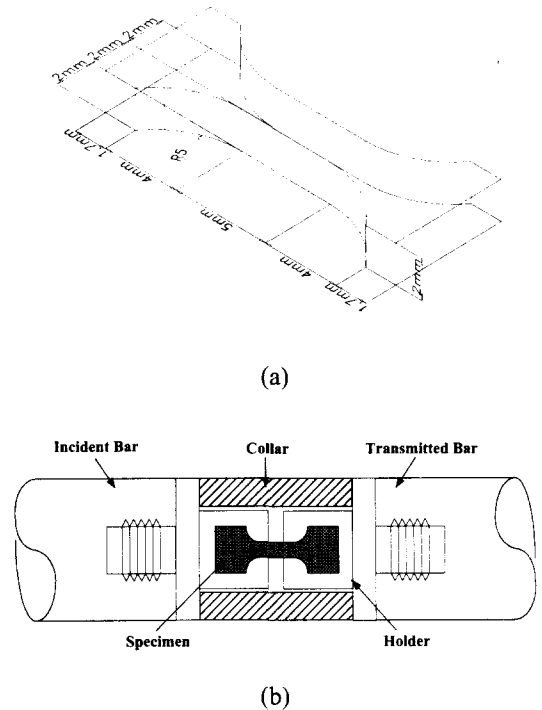


Fig. 1 Geometry of (a) Fe-6.5wt%Si tensile specimen and (b) Tensile split Hopkinson bar with an inserted specimen

(Polycrystal) 잉고트를 방전 가공기를 이용하여 절단함으로써 총 길이 15mm, 폭 6mm, 두께 2mm의 도그본(dogbone)형태의 시편을 제작하였다. Fig. 1은 고속 인장 실험에 이용된 시편의 형상 및 규격과 홀더(holder)를 이용해 시편을 입사봉과 투과봉 사이에 장착된 형상을 나타내고 있다.

제작된 판상의 단결정 시편을 석영관에 밀봉하여 넣은 후 500℃로 재차 1 시간동안 어닐링 한 후 오일로 냉각시켜 DO₃ 상의 시편을 만들었다. 이때 어닐링 중 석영관내에서 인장 시편의 표면 손상을 방지하기 위해 용점이 3000℃인 탄탈(Tantalum) 박막으로 시편을 감싸 보호하였으며, 석영관 내에는 산소를 충분히 제거하기 위해 탈산 재료써 티타늄 조각을 넣어서 어닐링 하였다.

어닐링 작업 후 제작된 시편들을 먼저 연마지 400 ~ 1500 번을 이용하여 기계연마 한 후 8℃의 전해용액(CH₃COOH : HClO₄ = 9:1)에서 15V/6A로 5 분 동안 전해 연마함으로써 표면의 손상을 모두 제거하여 시편 표면의 굽힌 자국으로 인하여 고속 인장 실험 결과에 영향을 미치는 것을 방지하였다.

본 논문에서는 전해연마가 종료된 다결정 및 DO₃ 구조를 갖는 단결정 시편에 대하여 고속 인장 실험을 수행하였다. Table 1 은 사용한 시편의 열처리 조건 및 결정 구조를 보여주고 있다.

2.2 시편 상 (phase) 및 미세단면 관찰

Fig. 2는 DO₃ 상의 격자 구조와 제작된 시편의 격자구조를 확인하기 위한 XRD 패턴을 나타내고 있으며, 이로부터 시편의 상(phase)을 확인할 수 있었다.

시험시편의 파단면은 주사전자현미경 (주일본전자 JSM-840A)을 이용하여 다양한 어닐링 조건에 따른 재료의 구조 및 파괴 형태에 대하여 관찰하였다. 특히, 6.5% 규소강의 역확특성에 미치는 결정내의 규칙상의 영향을 기존 금속 파단면 형태와 비교하여 재료의 성질을 설명하였다.^(14,15)

Table 1 Characteristics of Specimen according to annealing and crystal structure

	Type of crystal	Annealing	structure
Specimen 1	Polycrystal	-	-
Specimen 2	Single crystal	500°C/1hr	(DO ₃ /α ₁)

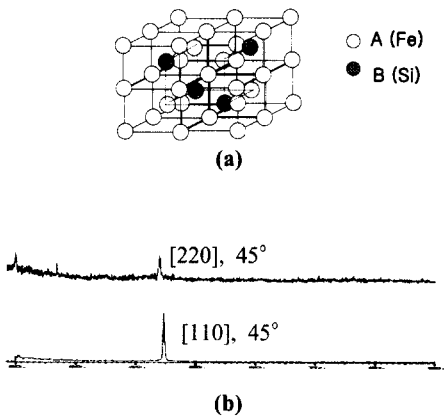


Fig. 2 (a) Unit cell, (b) XRD patterns of DO₃ phase and polycrystal phase

2.3 단순 인장 및 고속 인장실험

단순 인장의 경우 TOYO BALDWIN(株) UTM-1형 TENSILON 을 이용하였으며, 고속 인장 실험을 위한 실험 장비는 탄성 압축봉으로써 역할을 충분히 수행할 수 있고 온도의 영향을 거의 받지 않는 Inconel 718 (Ni-52.8%, Cr-18.6%, Fe-18.5%)으로 구성된 SHPB 장비를 이용하였다. 실험 절차는 입사봉 쪽에 시편을 먼저 장착한 다음 인장 모드를 만들기 위해 시편 바깥 부분에 증공봉 형태의 칼라 (Fig. 1(b))를 끼웠으며 투과봉을 약간 당겨 시험편이 홀더와 완전히 면 접촉되도록 하였다. Fig. 3의 충격시험기(SHPB)의 개략도에서 보는 바와 같이 주요 부분의 구성은 타격봉(striker bar), 입사봉 (incident bar, input bar), 투과봉(transmitted bar, output bar)로 크게 나누어 볼 수 있으며, 각각의 치수는 25cm, 150cm, 75cm 이다.

타격봉은 질소를 사용하는 가스총에 의해서 발사되어 입사봉을 때리게된다. 이때의 속도는 광속도 센서(KEYENCE 사 제품)을 이용하여 측정되어진다. 광센서 속도 측정장치에 의해 계측된 가스총의 용기(chamber) 압력에 따른 충격봉의 속도 측정결과는 Table 2 에 나타내었다. 본 실험에서는 실험의 신뢰성과 장비의 성능 및 시편크기를 고려하여 가스총의 압력 0.3 MPa(7m/sec)와 0.4 Mpa (9m/sec)로 수행하였다. 또한, 타격봉의 타격 후 각각의 봉에 전달되는 신호를 잡기 위해 트리거용, 입사봉용 그리고 투과봉용의 2 축용 스트레인지저를 사용하였으며, full bridge 형식으로 저항 120Ω 으로 입력 전압은 10Volt 를 주었다. 입사봉의 중간

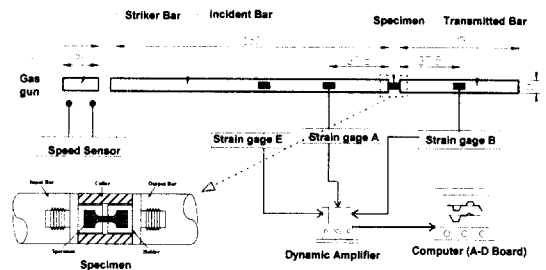


Fig. 3 Schematic diagram of SHPB (Dimension cm)

Table 2 Velocity of striker bar for chamber pressure

Chamber pressure (MPa)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Velocity (m/sec)	4.76	6.67	7.69	9.1	10.0	11.11	12.5	14.29	16.67

지점에 위치한 스트레인게이지 E 는 external trigger 용으로서 타격봉의 타격으로 최초 발생되는 탄성 압축파를 검출해내는 시점을 미리 지정하여 원하는 신호를 놓치지 않게 하기 위해 사용되었다. 스트레인게이지 A 는 타격봉에서 생성된 탄성 압축파와 칼라를 통과해 투과봉의 자유단에서 반사되어 시편에 직접 고속 인장변형을 주고 통과한 일부의 탄성 인장파를 검출한다. 또한, 투과봉의 중간지점에 설치되어 있는 스트레인게이지 B 는 칼라를 통과한 탄성 압축파와 투과봉의 자유단에서 반사되어온 탄성 인장파, 시편이 파괴될 때 시편의 파괴부에서 반사되어온 탄성 압축파를 각각 검출해낸다.

이렇게 검출된 각각의 응력파에 대한 신호는 dynamic amplifier 에서 약 100~200 배 정도로 증폭되며, 이 증폭 신호는 구성된 시스템 중 컴퓨터에 내장되어 있는 AD board 를 통해 저장되고 모니터에 나타나게 된다.

3. SHPB 에 의한 응력-변형률 측정

3.1 탄성과 전파 형상

Fig. 4 는 본 실험을 위한 인장 SHPB 실험 장치의 개략도와 탄성파 전파 형상을 도식적으로 나타내었다. 충격봉이 입사봉에 충격을 가하면 충격봉 길이에 해당하는 응력파 즉, 100 μ s 의 지속 시간을 갖는 압축 응력파가 발생하고, 이 응력파는 입사봉의 길이 방향으로 전파되며, 입사봉과 시편의 경계에서 임피던스의 차로 인해 일부는 다시 입사봉 쪽으로 반사된다. 여기서 임피던스는 봉의 밀도 (ρ)와 응력파의 속도 (C_0)의 곱, ρC_0 로 정의된다. 그리고 반사파를 제외한 나머지 응력파는 투과봉으로 전파되어간다. 여기서 x-t 선도의 기틀

기는 응력파의 전파속도 C_0 를 나타내며, ϵ_t 는 시편에 영향을 미치기 전 초기 압축 변형률파이고, ϵ_R 은 시편에서 반사되어 나온 반사 변형률파, ϵ_T 는 시편에 변형을 가한 후 투과 변형률파를 나타내고 있다.

3.2 시편에서의 응력-변형률 결정

실험을 통하여 입사봉과 투과봉에 부착된 스트레인게이지로부터 얻어지는 신호와 봉 내의 탄성파 전파 이론으로부터 시간에 따른 하중과 변형률을 결정할 수 있다. 스트레인 게이지에서 변형률과 측정 결과에 따른 응력-변형률 관계식은 식 (1)-(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 시편내의 응력과 변형률은 각 봉에 부착된 스트레인게이지로부터 출력되는 값과 아래식을 이용해 구할 수 있다.

$$\sigma_s = E\epsilon_T \left(\frac{A_b}{A_s} \right) \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \frac{-2C_0}{L_0} \int \epsilon_R dt \quad (2)$$

여기서,

E 는 봉의 탄성계수이며, A_b 와 A_s 는 각각 봉과 시편의 단면적이다. 또한, C_0 는 봉에서의 종 탄성파 속도를 나타내며, L_0 는 각 시편의 게이지 길이를 나타낸다.

위의 식들에 의해 충격하중에 대한 시편의 응력 및 변형률 응답은 SHPB 시험에서 각 탄성봉의 응력파만을 측정함으로써 쉽게 산출할 수 있다. 또한, 실험으로부터 구해진 응력파의 형태에서 시편이 위치한 구간을 시간에 대해 변형률을 미분함으로써 시편에서의 변형률 속도를 구하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 인장실험 결과

4.1.1 정적 인장시 응력-변형률 결과

Fig. 5 는 6.5% 규소강 다결정 및 단결정 시편에 대한 단순 인장 실험 결과를 보여주고 있다. 내부 잔류 응력을 충분히 제거한 다결정 6.5% 규소강 시편의 경우 인장 파단 응력은 252MPa 를 나타냈으며, 연신율은 0.05%로 극히 낮음을 알 수 있었다. 따라서, 다결정의 경우 취성 특성을 나타냄을 알 수 있다.

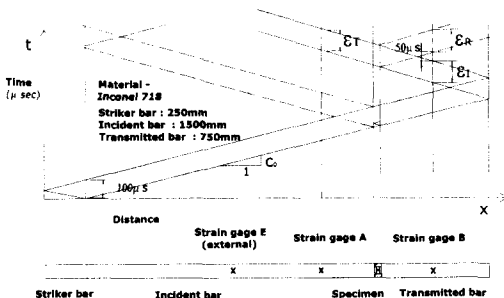


Fig. 4 Lagrangian diagram of elastic stress waves for the SHPB test

그러나, 내부 잔류 응력이 충분히 제거된 6.5% 규소강 합금을 1000°C 로 열처리 후 급냉시킨 후 재차 500°C 로 어닐링한 DO₃ 형태의 구조를 갖는 6.5% 규소강 단결정 시편의 경우 인장 파단 응력은 595MPa 를 나타냈으며, 연신율은 0.49%로 다결정 시편에 비해 강도와 연신율이 높음을 알 수 있었다.

4.1.2 고속 인장시 응력-변형률 결과

Fig. 6 는 6.5% 규소강 다결정 및 단결정 시편에 대한 고속인장실험 결과를 나타내고 있다. 다결정의 경우 최대 파단 응력이 약 560MPa 이며, 단결정의 경우 최대 파단 응력이 약 850MPa 임을 통하여 단결정이 고속 인장 시에도 높은 강도를 보

임을 알 수 있었다. 본 결과로부터 다결정과 단결정의 경우 최대 파단 응력이 단순 인장에 비해 높고, 기울기가 큼을 알 수 있었다. 특히, 단결정의 경우 다결정에 비해 고속 인장시 가장 기울기가 컸다.

또한, 동일 구조를 갖는 재료의 경우 인장 속도를 다르게 하였을 때 인장 속도를 높일수록 기울기가 작음을 알 수 있었다.

4.1.3 고속 인장과 정적 인장 실험결과 비교

Fig. 7 은 각각 동일 구조를 갖는 6.5% 규소 강 시편을 SHPB 를 이용하여 고속으로 인장 하였을 때의 응력-변형률 결과와 단순 인장시의 응력-변형률 결과를 보여주고 있다.

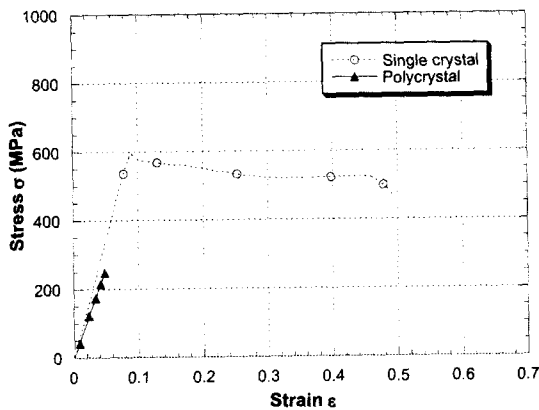


Fig. 5 The result of static tensile test in Fe-6.5wt%Si polycrystal, and $\alpha_1(D0_3)$ single crystal

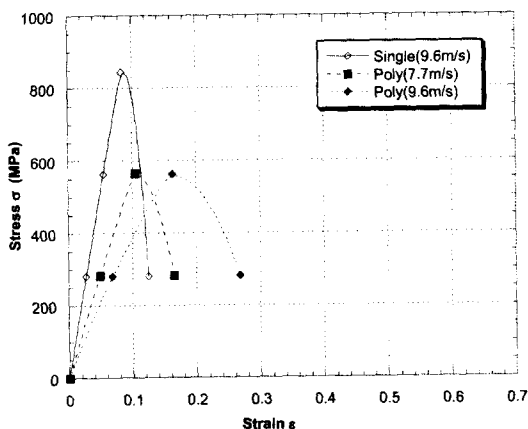
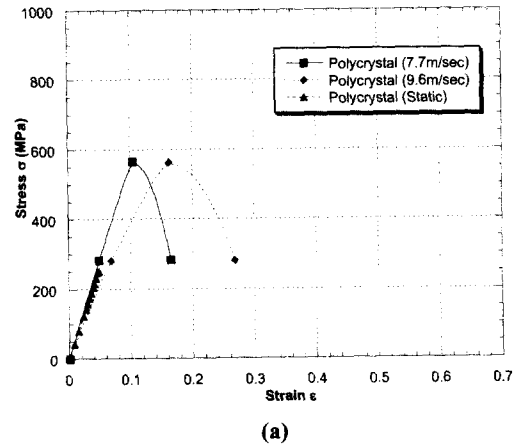
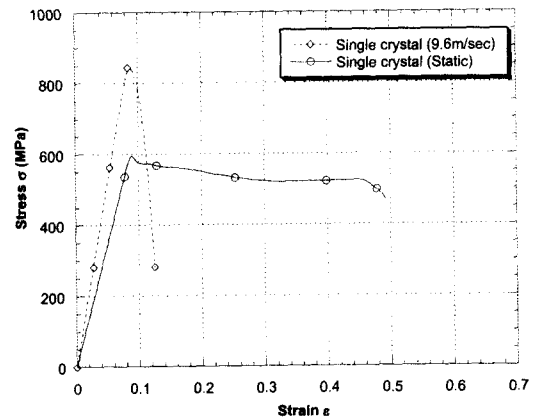


Fig. 6 The result of high strain rate tensile test in Fe-6.5wt%Si polycrystal, and $\alpha_1(D0_3)$ single crystal



(a)



(b)

Fig. 7 The comparative results of static and high strain rate tensile tests in Fe-6.5wt%Si (a) polycrystal, and (b) $\alpha_1(D0_3)$ single crystal

고속 인장의 경우 정적 인장에 비해 높은 강도를 갖음을 알 수 있었다. 특히, Fig. 7 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 다결정 재료의 경우 고속 인장의 경우가 단순 인장의 경우에 비해 강도가 2 배 이상임을 확인 할 수 있었다. 또한, Fig. 7 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 단결정 강도의 경우 다결정과 비교하여 변화의 폭이 작으나 연성의 차이는 매우 큼을 알 수 있었다.

4.2 현미경 관찰 결과

4.2.1 정적 인장 실험 결과

Fig. 8 는 6.5% 규소강 다결정 시편에 대한 인장 실험 후 파단 면에 대한 주사전자현미경 사진이다. 저배율(100 배)의 Fig. 8 (a)에서는 강 무늬(river pattern: 굵은 화살표 **B**), 벽개 계단(cleavage step: **A**), 경사 경계(tilt boundary: **C**) 그리고 비틀림 경계(twist boundary: **D**) 현상을 볼 수 있었다. 이들 현상들은 전형적인 취성 재료의 벽개 파괴된 표면에서 나타나는 양상으로 다결정 재료의 취성 정도를 알 수 있다. 또한, 고배율(1000 배)의 Fig. 8 (b)에서는 벽개 파괴에서 쉽게 발견할 수 있는 쌍정-기지 계면을 따라 일어난 벽개 균열의 국부적 편향으로

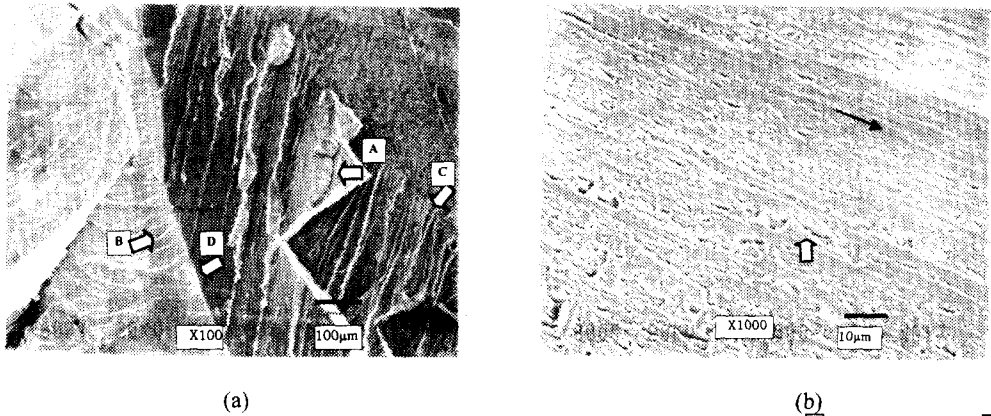


Fig. 8 Fracture from a tensile test in Fe-6.5wt%Si polycrystal. (a) Broad arrows show **A** Cleavage steps, **B** River patterns, **C** Tilt boundaries, and **D** Twist boundary. (b) A broad arrow points to tongues formed on a cleavage fracture and a slender arrow indicates fracture direction

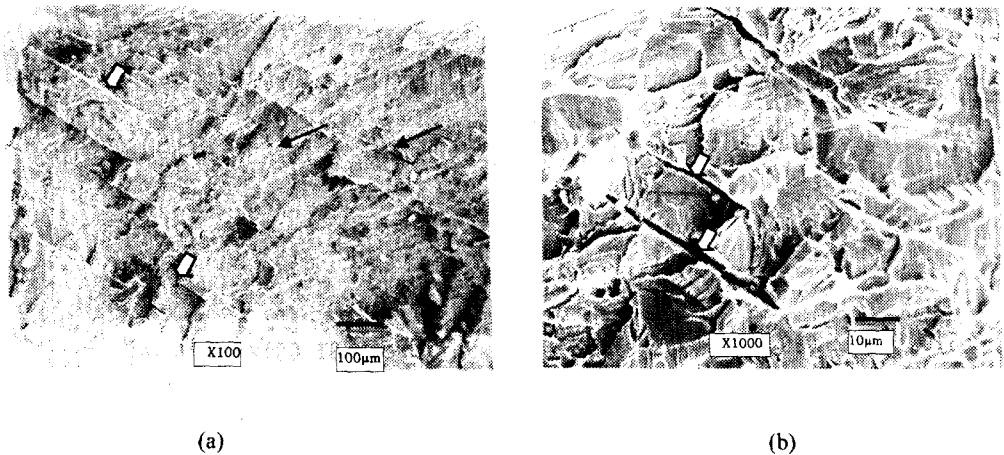


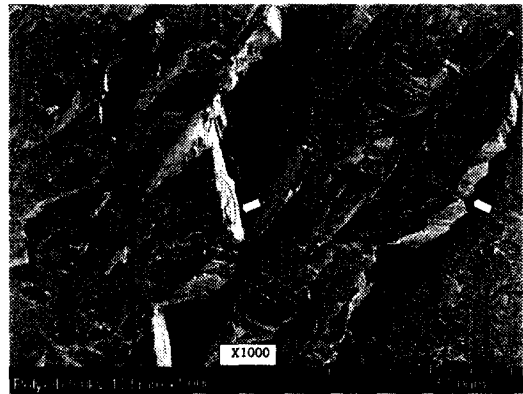
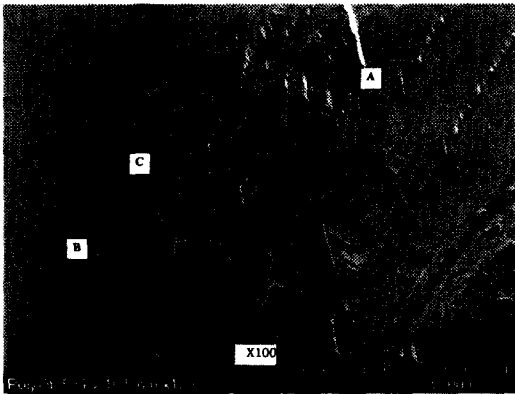
Fig. 9 Fracture from a tensile test in $\alpha_1(D0_3)$ phase Fe-6.5wt%Si single crystal. (a) Broad arrows show transverse straight cracks parallel to fracture surfaces and slender arrows indicate fracture direction. (b) Broad arrows show transverse straight cracks to parallel at each other

생긴 미세한 크기의 높이 상승(소위 “혀(tongue)”라고 하는: 굵은 화살표)을 보여주고 있다. 흑색가는 화살표는 파괴의 진행 방향을 나타내고 있다.

Fig. 9은 $\alpha_1(\text{DO}_3)$ 상의 6.5% 규소강 단결정 시편에 대한 인장 실험 후 파단 면에 대한 주사전자현미경 사진이다. Fig. 9(a)에서 가로 직선 균열(굵은 화살표)이 고속 인장의 경우인 Fig. 12(a)에 비해 많음을 알 수 있다.

4.2.2 고속 인장 실험 결과

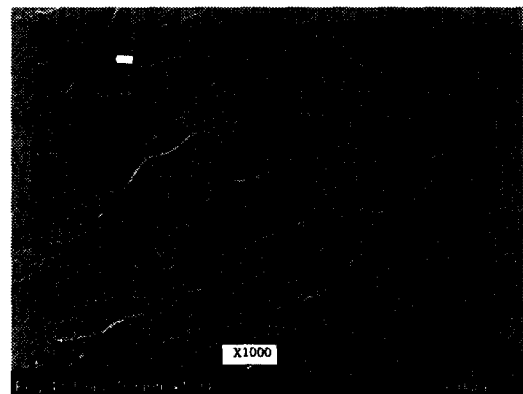
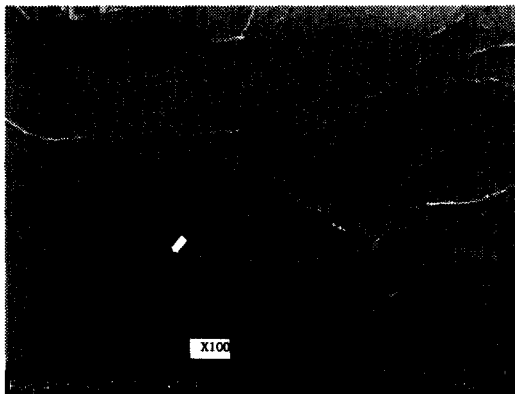
Fig. 10은 Fe-6.5wt% Si 다결정 재료의 인장 시편을 7.7 m/sec의 충격봉 속도로 인장하였을 때의 파단면을 보여주고 있다. 고속 인장으로 인한 시편의 파단면은 단순 인장의 경우에 비해 벽개 파괴가 부분적으로 발생 (Fig 10의 (a))하며 그 깊이는 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 혀 모양의 돌기의 경우는 단순 인장의 경우에 비해 크게 나타남을 알 수 있었다.



(a)

(b)

Fig. 10 Fracture from a high strain tensile test (7.7 m/sec) in Fe-6.5wt%Si ploy crystal. (a) Broad arrows show **A** Cleavage steps, **B** River patterns, **C** Tilt boundaries, and slender arrows indicate fracture direction. (b) White broad arrows show Cleavage steps and black broad arrows points to tongues formed on a cleavage fracture



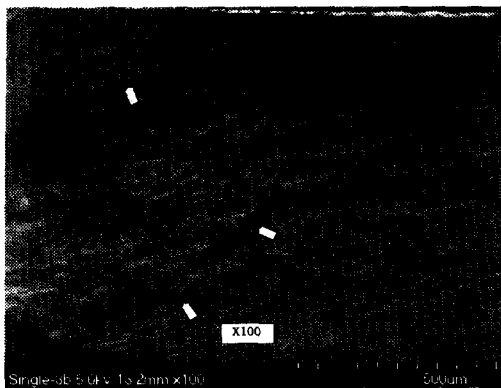
(a)

(b)

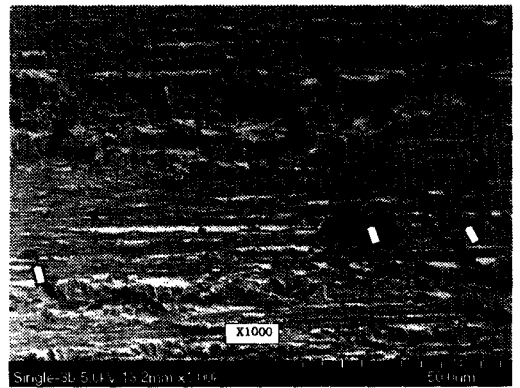
Fig. 11 Fracture from a high strain tensile test (9.6 m/sec) in Fe-6.5wt%Si ploy crystal. (a) A broad arrow shows River patterns and a slender arrow indicates fracture direction. (b) White broad arrow points River patterns and a slender arrow shows Cleavage steps

Fig. 11는 다결정 재료를 9.6 m/sec의 충격봉 속도로 인장하였을 때의 파단면을 보여주고 있다. 단순 인장의 경우인 Fig. 8과 비교하여 보면 벽개 파괴 현상이 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 또한, 충격봉 속도가 조금 낮은 7.7m/sec로 인장하였을 경우인 Fig. 10과 비교해 보면 벽개 파괴 현상은 물론 혀 모양의 돌기 또한 관찰 되어지지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12 과 Fig. 13 는 단결정 시편에 대한 고속 인장시 시편의 파단면을 보여주고 있다. Fig. 12의 경우 단결정 재료의 인장 시편을 7.7 m/sec의 충격봉 속도로 인장 하였을 때의 파단면에 대한 주사전자 현미경 관찰 결과를 보여주고 있다. 단순 인장의 경우 (Fig. 9의 흰색 굵은 화살표)에 비해 가로 직선 균열 (Fig. 12(a) 검은색 굵 화살표)이 적고 깊이 또한 얕음을 알 수 있다.

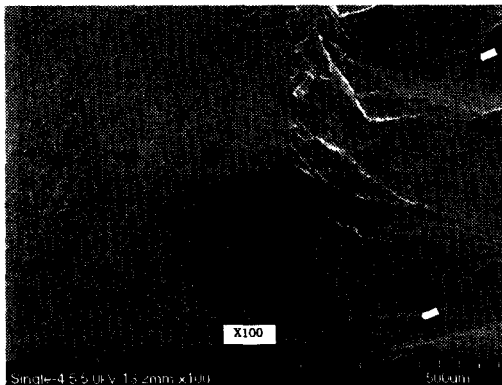


(a)

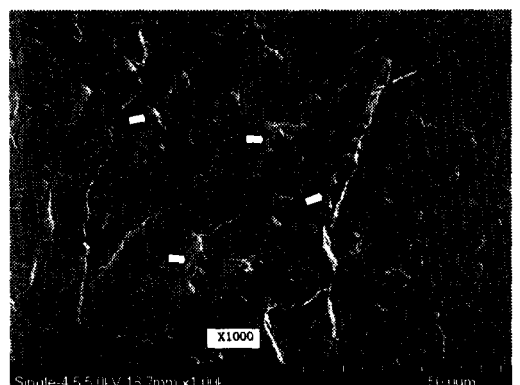


(b)

Fig. 12 Fracture from a high strain tensile test (7.7 m/sec) in Fe-6.5wt%Si single crystal. (a) White broad arrows show Cleavage steps, Black broad arrows point to transverse straight, and slender arrows indicate fracture direction. (b) Black broad arrows show Cleavage steps, White broad arrows point to tongues formed on a cleavage fracture and slender arrows are fracture directions



(a)



(b)

Fig. 13 Fracture from a high strain tensile test (9.6 m/sec) in Fe-6.5wt%Si single crystal. (a) White broad arrows show River patterns, A Black broad arrow shows tilt boundary, and slender arrows indicate fracture direction. (b) White broad arrows point to tongues formed on a cleavage fracture

Fig. 13 은 단결정 재료를 9.6m/sec 의 충격봉 속도로 인장하였을 때의 파단면을 보여주고 있다. 다결정의 경우와 같이 인장속도를 높임으로써 파단면에 벽개 파괴 양상이 크게 줄어 들었음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 13(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 일정한 방향으로 허 모양의 돌기의 많이 일어나 있음을 알 수 있다.

5. 결론

단결정과 다결정 Fe-6.5wt.%Si 규소 합금강에 대한 단순 인장과 고속인장에 대한 응력-변형률과 파단면 관찰 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기계적인 특성의 경우, 고속 인장의 경우 단순 인장에 비해 높은 강도를 갖음을 알 수 있었다. 특히, 다결정 재료의 경우 고속 인장의 경우가 단순 인장의 경우에 비해 2 배 이상 높음을 알 수 있었다.

(2) 파단 양상의 경우, 단순 인장시 다결정의 파단면은 단결정에 비해 벽개 파괴 양상이 큼을 알 수 있었다. 고속 인장의 경우 단순 인장의 경우에 비해 벽개 파괴가 현저히 줄어들음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 Brain Korea21 프로그램의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한, 잉고트를 제작에 지원을 아끼지 않은 일본 Osaka University 의 Prof. Y.Umakoshi 와 Dr. H.Y.Yasuda 께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Kolsky, H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading," *Proceedings of the Physical Society*, B, Vol. 62, pp. 676~701.
 (2) Hopkinson, B., 1914, "A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets," *Phil. Trans. A*, Vol. 213, p. 437.

(3) Arai, K.I., Tsuya, N., and Ohmori, K., 1981, "Annealing of Silicon-Iron Ribbons Containing Around 6.5wt% Silicon," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. MAG-17, No. 6, pp. 3154~3156.
 (4) Tanaka, Y., Takada, Y., Abe, M., and Masuda, S., 1987, "Magnetic Properties of 6.5% Si-Fe Sheet and Its Applications," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 83, pp. 375~376.
 (5) Ninomiya, H., Tanaka, Y., Hiura, A., and Takada, Y., 1991, "Magnetostriction and Applications of 6.5%Si Steel Sheet," *J.Appl.Phys.* Vol. 69, No. 8, pp. 5358~5360.
 (6) Kenji Narita and Masato Enokizono, 1979, "Effect of Ordering on Magnetic properties of 6.5-Percent Silicon-Iron Alloy," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. MAG-15, No. 1, pp. 911~915.
 (7) 윤영기, 윤희석, 홍성길, 2000, "Fe-6.5wt%Si 합금의 역학 특성에 미치는 어닐링 효과," 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권 제 12 호, pp. 2909~2916.
 (8) 양현모, 민옥기, 2000, "SHPB 인장 시험에서 알루미늄 합금의 진응력-진변형률 관계," 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권 제 8 호, pp. 1917~1922.
 (9) 이역섭, 김관희, 황시원, 2000, "SHPB 기법을 이용한 Al6061-T6 의 고속 인장 변형 거동 규명," 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권 제 12 호, pp. 3033~3039.
 (10) Cai, B. C., Dasgupta, A., and Chou, Y. T., 1982, "A New Technique for The Growth of Bicrystals of Refractory Metals," *J. Crystals Growth*, Vol. 86, pp. 145~151.
 (11) Glebovsky, V. G., Moskvina, S. I., and Semenov, V. N., 1982, "Growing Techniques and Structure of Niobium Bicrystals," *J. Crystal Growth*, Vol. 59, pp. 450~454.
 (12) Semenov, V. N., Staumal, B. B., Glebovsky, V. G., and Gust, W., 1995, "Preparation of Fe-Si Single crystals and Bicrystals for Diffusion Experiments by the Electron Beam Floating Zone Technique," *J. Crystals Growth*, Vol. 151, pp. 180~186.
 (13) Kadeckova, S., and sestak, B., 1963, "Stabilization of Floating Liquid Zone in Preparation of Fe-Si Alloy Single Crystals," *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol. 14, pp. 927~928.
 (14) Pittinato, G. F., Kerlins, V., Phillips, A., and Russo, M. A., 1975, "SEM/TEM Fractography Handbook," pp. 25~57, Metals and Ceramics Information Center, USA.
 (15) 小寺澤 良一, 1982, "金屬 破斷面 寫眞集," pp. 503~505, テクノアイ, 東京.