

Nd-Fe-B-Cu합금의 변형속도에 따른 열간압축시 응력분포와 자기적 특성에 관한 연구

박 정 덕*, 정 원 용**, 한 수 현*, 곽 창 섭*

A Study on the Stress Distributions and Magnetic Properties during Hot-Pressing according to Strain Rate of Nd-Fe-B-Cu Alloys

J. D. Park*, W. Y. Jeung**, S. H. Han*, C. S. Kwak*

ABSTRACT

The specimens were melted in high frequency induction furnace. The samples for measurements were prepared by machining cylinder of 9.5mm diameter and 15mm height. These samples were then hot-pressed according to strain rate ($\dot{\epsilon}$). These samples were decanned and cut out, and subsequently heat treated at 1000°C for 4hours. These were investigated for the change of microstructure, domain pattern, X-ray diffraction and magnetic properties. The stress distributions in the specimens during compressing process were calculated by a finite element method program (SPID). The calculated stresses were effective stress (σ_{eff}), compressive direction stress (σ_z), and shear stress (τ_{rz}). These stresses were compared with the experimental data.

Key Words : Stress Distribution (응력분포), Magnetic Properties (자기적 특성), Hot-Pressing (열간압축), Strain Rate (변형속도), Nd-Fe-B-Cu Alloys (Nd-Fe-B-Cu합금)

1. 서 론

R-Fe-B계 영구자석은 1980년대에 Hadjipanayis¹⁾가 Pr-Fe-B-Si계 합금을 제조한 이후, Sagawa²⁾은 분말 야금법으로 36MGOe의 최대자기에너지적을 갖는 Nd-Fe-B계 영구자석 제조에 관한 연구를 하여 차 세대 영구자석으로서의 가능성을 시사하였다. 1989년 Croat³⁾은 R-Fe-B계 합금을 급속응고법으로 분말제조하여 다이업셋 방법으로 이방화시켜 39MGOe의 최대자기에너지적을 갖는 R-Fe-B계 영구자석을 개발하였다. 또한, 같은 해에 Shimoda⁴⁾은 이전의 제조공법과는 달리 제조공정을 단축시키며 비용을 줄일 수 있는 열간가공법을

시행하였다. 이들은 일반응고법으로 잉곳트 제조된 Pr-Fe-B-Cu합금을 열간가공법을 이용하여 결정을 이방화시켜 36.2MGOe의 최대자기에너지적을 갖는 영구자석을 제조하였다. 이와같이 열간가공법에 의해 제조공정을 단축시키고 비용을 줄이며 자기적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있지만, 열간가공중 시편 내부의 응력 분포가 미치는 영향에 대해서는 연구가 전무하다. 따라서, 본 연구에서는 소형고주파 진공유도로로 용해한 Nd₁₆Fe_{77.5}B₅Cu_{1.5}합금을 변형속도에 따라 열간압축했을 때 시편 내부에 발생하는 응력을 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 프로그램의 일종인 SPID(Simple Plastic Increment Deformation)을 이용하여

* 인천대학교 기계공학과(정회원)

** 한국과학기술연구원 금속재료 연구단

해석하였으며, 이때 시편 내부에 계산된 응력이 결정 성장과 방향성 및 자기적 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 시뮬레이션 해석 및 실험방법

그림 1은 본 연구에서 사용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

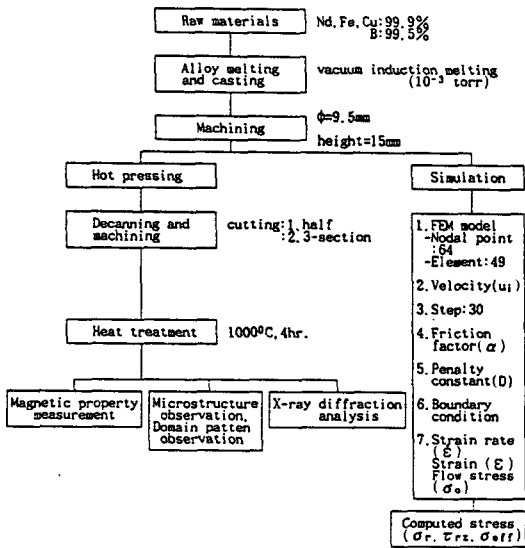


Fig.1 Schematic representation of experimental procedure and simulation

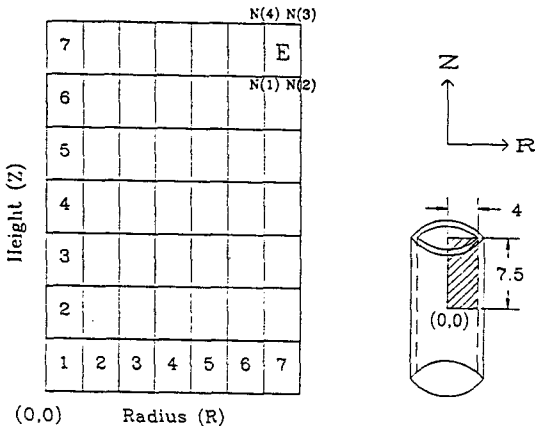


Fig.2 The finite element model for stress analysis

2-1. 시뮬레이션 해석방법

그림 2는 시편 내부의 응력 해석을 위해, 직경 8mm, 높이 15mm의 형상을 1/4요소 분할 모델로 도시하였다. 실린더 형태의 시편은 축 대칭이며, 기하학적 대칭축을 단면으로 생각 할 수 있으므로, 응력을 1/4의 요소 분할로 해석하였다. 그림의 모델은 반지름 방향(R축)의 8개의 절점(nodal point)과 7개의 요소(element), 높이방향(Z축)의 8개의 절점과 7개의 요소로 구성되며, 총 64개의 절점과 49개의 요소로 이루어졌다. 각 요소는 4개의 절점을 가진 이차원 등매개변수의 사각요소로 되어 있다. 또한, 시편 가공도의 정밀성과 점진적인 압축률을 부여하기 위하여 step은 30회로 분할 시행하였다. 시편과 다이부분의 마찰, 그리고 적절한 배럴링(barrelling) 현상을 고려하여 마찰인자⁵⁾ (friction factor : $\alpha = 0.5$)와 페널티상수(penalty constant, $D = 10000$)을 주었다⁶⁾.

본 프로그램에서 사용된 응력식은 다음과 같다.

$$1. \sigma(r, z, \theta) = \frac{2}{3} * \sigma \frac{\dot{\epsilon}_p - \dot{\epsilon}_m}{\dot{\epsilon}_o} + 3D * \dot{\epsilon}_m$$

$$2. \tau_{rz} = \sigma \frac{\dot{\epsilon}_p}{3\dot{\epsilon}_o}$$

$$(\sigma = \sigma_{eff} = \sigma_o * \epsilon_e)$$

(σ_o : 흐름응력, σ_{eff} : 유효응력, $\dot{\epsilon}_e$: 유효변형속도, $\dot{\epsilon}_p$: 각 요소의 변형속도, $\dot{\epsilon}_m$: 평균 변형속도($\dot{\epsilon}_m = (\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_\theta) / 3$), D : 페널티상수)

여기서, 지속적인 소성변형을 유지시켜 주는 흐름응력(flow stress)은 변형속도에 따라 열간압축시 각 조건에 따른 응력-변형률 곡선(stress-strain curves; Fig.6 참조)에서 구할 수 있으며 변형속도($\dot{\epsilon}$)가 0.0005/sec, 0.001/sec, 0.005/sec, 0.01/sec, 0.5/sec에서 각각 1.3, 1.5, 2.2, 2.7, 3.6 (kg/mm²)이었다.

2-2. 실험방법

본 실험은 소형고주파 진공유도로를 이용하여 Nd (purity : 99.9%), Fe (99.9%), B (99.5%), Cu (99.9%)를 300-350g으로 정량하여 용해하였다. 열간압축 실험중에 부서지는 것을 예방하기 위해 저탄소강 두께로 0.75mm canning하여 시편을 직경 9.5mm, 높이 15mm의 봉상 시편으로 가공하였다. 이렇게 완성된 시편을 변형속도에 따라 열간압축을 시행한 후, 1000°C에서 4hr. 열처리하여 자기적 특성(Br, iHc, (BH)_{max}), X-ray회절분석, 미세조직 및 자구관찰(domain

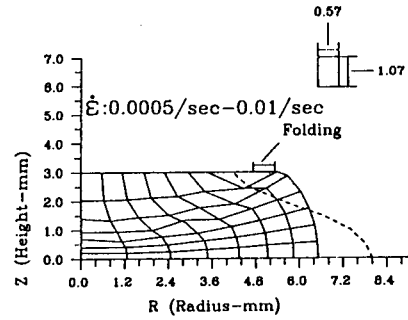
pattern)을 시행하였다. 또한, 시편 각 부분별로 자기적 특성을 측정하기 위해 시편을 반으로 절단한 후, 다시 그 반쪽을 3등분으로 채취하여 VSM으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

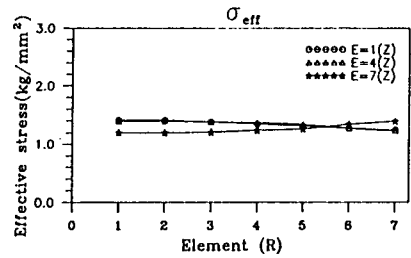
3.1. 응력분포

그림 3은 Nd-Fe-B-Cu합금을 열간압축 했을 때의 컴퓨터 시뮬레이션으로 계산된 시편의 형상 변화와 유효응력(effective stress)을 나타낸 것이다. 그림(A)의 우상에 있는 요소는 시뮬레이션 이전의 원래 요소의 크기(1.07mm*0.57mm)이다. 그림(A)는 가공도(ϵ)를 60%, 가공온도(T)를 1000°C, 변형속도를 0.0005/sec-0.01/sec로 변화시킨 경우로 가공도가 60%로 일정하기 때문에 각각의 시편 형상의 변화는 똑같게 되지만, 시편 내부의 요소의 변화는 일정하지 않음을 알 수 있다. 그러나 열간압축 후 실험한 시편의 형상과 시뮬레이션한 결과치와는 차이가 있었다. 그림에서 점선부분은 실제 실험에서 시편이 밀려 나간 길이로서 이 길이의 차이는 1.48mm이었다. 실험과 시뮬레이션의 차이는 첫째, 시편과 다이가 접촉하는 부분에서의 마찰계수가 시뮬레이션시 상용된 수치와 실험치에서 나타난 결과와 차이가 있기 때문이다. 둘째, R-Fe-B계 영구자석 내에 기지조직인 $R_2Fe_{14}B$ 상, R-rich상이 존재하고, 이 R-rich상은 열간압축온도에서 액상으로 존재하나, 시뮬레이션할 때에는 조직이 고상 상태로 존재할 때로 가정하여 시편의 형상 변화를 계산하였다. 이로 인하여 시뮬레이션한 결과와 실험치와의 차이가 나타난다고 생각된다. 또한, 시편과 다이가 접촉하는 끝부분($R=4.75-5.39mm$)에서 배불림현상에 의하여 내부쪽의 요소들이 다이와 겹치는 겹침(folding) 현상이 발생한다. 배불림 현상이 중심부에서 많이 나타나는 이유는 R-Fe-B계 조직 내에 있는 R-rich상이 열간압축시에 액상으로 존재하여 액상이 시편의 중심부분으로 밀려나오기 때문이다.

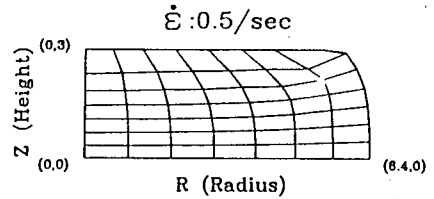
그림(B) 경우에 있어서는 그림(A)의 각 조건중에서 대표적으로 $\epsilon: 60\%$, $T: 1000^\circ C$, $\dot{\epsilon}: 0.001/sec$ 일 때의 시편 내부의 유효응력으로서 다른 조건의 변형속도 변화에서도 유효응력의 절대값만 차이가 나고, Table.1에서 알 수 있듯이 응력 분포는 시편 중심에서 끝부분까지 거의 비슷하다. 즉, 변형속도 변화에 따라서는 시편 형상 변화가 같지만, 각 요소의 변화는 일정하지 않고,



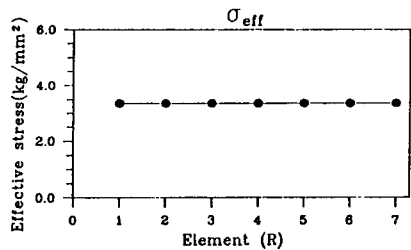
(A) $\dot{\epsilon}: 0.0005/sec-0.01/sec$
($T: 1000^\circ C$, $\epsilon: 60\%$)



(B) Effective stress
($T: 1000^\circ C$, $\epsilon: 60\%$, $\dot{\epsilon}: 0.0001/sec$)



(C) $\dot{\epsilon}: 0.5/sec$



(D) Effective stress ($\dot{\epsilon}: 0.5/sec$)

Fig.3 Grid distortion and distribution of effective stress in Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of strain rate

Table 1. Computed stress of σ_{eff} (effective stress) for Nd-Fe-B-Cu alloys

specimens		σ_{eff} (Kg/mm ²) at E=1 (Z-axis)		
		E : 1 (R-axis)	E : 4 (R-axis)	E : 7 (R-axis)
$\epsilon : 60\%$ $T : 1000^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon} : 0.0005/\text{sec}$	1.22	1.16	1.07
	$\dot{\epsilon} : 0.001/\text{sec}$	1.41	1.34	1.24
	$\dot{\epsilon} : 0.005/\text{sec}$	2.06	1.97	1.82
	$\dot{\epsilon} : 0.01/\text{sec}$	2.53	2.42	2.23
	$\dot{\epsilon} : 0.5/\text{sec}$	3.36	3.36	3.36

이때에 각 요소에 작용하는 유효응력은 비슷함을 알 수 있다. 그러나 변형속도가 빠른 $\dot{\epsilon} : 0.5/\text{sec}$ 인 경우는 그림(C)처럼 시편 형상의 각 요소 변화가 일정하게 되며, 그림(D)와 같이 변형속도가 빠른 관계로 시편 전역에 유효응력이 동일하게 작용한다.

그림 4는 변형속도에 따른 압축시 시편 내부의 σ_z 의 응력 분포를 나타내었다. 시편 내부의 Z방향은 압축방향과 일치하고 있으므로 여러 응력 중에서 σ_z 가 시편 내부의 결정의 방향성에 영향을 미칠뿐만 아니라 이로 인하여 시편의 자기적 특성에 영향을 미치게 된다. 그림은 시편 중심(Z축;E=1)에서 반경 방향(R축)의 각 요소에 대한 σ_z 의 응력 분포로서, 압축응력이 작용하고 있고, 부호는 -이지만 본 그림에서는 그 절대값만 표시

하였다. 응력 분포는 시편 중심(R축;E=1)에서 응력이 가장 높고 시편 끝부분(R축;E=7)으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 그러나 변형속도가 0.5/sec로 빨라지면 시편의 중심부에서의 응력 값은 감소하고 시편의 끝부분의 응력 값은 증가하여 시편의 응력 분포의 차이가 감소한다.

그림 5는 변형속도($\dot{\epsilon} : 0.001/\text{sec}$), 가공온도($T : 1000^\circ\text{C}$), 가공도($\epsilon : 60\%$)인 경우에 전단응력(τ_{rz})분포를 자세하게 나타내었다. 또한, 변형속도가 다른 경우에서

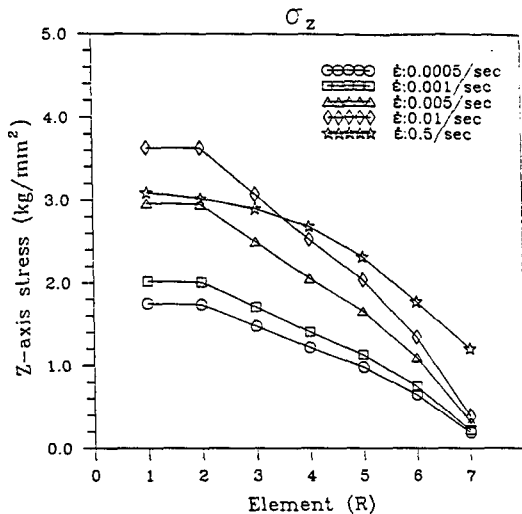


Fig.4 Comparisons of the computed stress of σ_z for Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of strain rate : (Z-axis;E=1) ($T : 1000^\circ\text{C}$, $\epsilon : 60\%$)

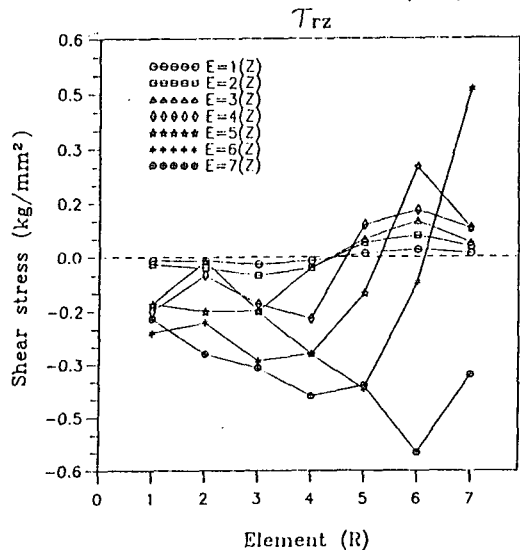
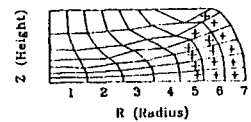


Fig.5 Comparisons of the computed stress of τ_{rz} for Nd-Fe-B-Cu alloys ($T : 1000^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon} : 0.001/\text{sec}$, $\epsilon : 60\%$)

Table 2. Computed stress of τ_{rz} (shear stress) for Nd-Fe-B-Cu alloys

specimens		τ_{rz} (Kg/mm ²) at E=1 (Z-axis)		
		E : 1 (R-axis)	E : 4 (R-axis)	E : 7 (R-axis)
ϵ : 60% T : 1000°C	$\dot{\epsilon}$: 0.0005/sec	-0.012	-0.007	0.007
	$\dot{\epsilon}$: 0.001/sec	-0.014	-0.008	0.008
	$\dot{\epsilon}$: 0.005/sec	-0.002	-0.001	0.001
	$\dot{\epsilon}$: 0.01/sec	-0.024	-0.014	0.014
	$\dot{\epsilon}$: 0.5/sec	-0.006	-0.026	0.021

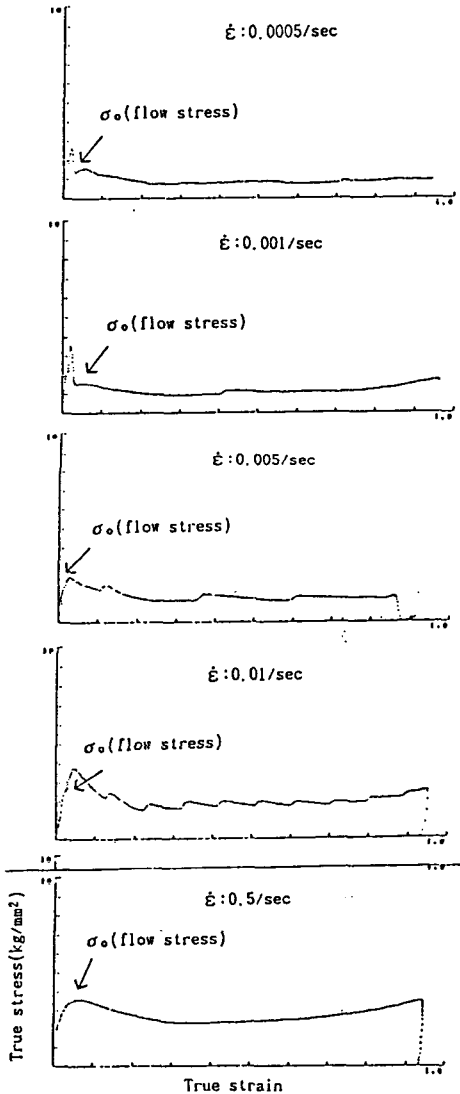


Fig. 6 Variation of stress-strain curves in hot-pressed Nd-Fe-B-Cu magnets according to strain rate (hot-compressed at T : 1000°C, ϵ : 60%)

도 각 절대값만 차이가 날뿐, Table. 2에서 알 수 있듯이 변형속도에 따른 전단응력의 분포 양상의 차이는 크지 않다. 또한, 시편 내부에 미치는 영향은 σ_z 보다는 작음을 알 수 있다. 그림에서 +영역과 -영역의 반대 방향으로 전단응력이 분포하고 있다. 다이와 접촉하는 표면부분은 마찰 영향으로 불규칙하게 응력을 받고 있기 때문에 이 부분을 제외하고는 다른 부분에서는 시편 중심부근과 끝부분에서 전단응력이 반대 방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 열간압축시 변형속도에 따라 흐름응력을 알 수 있는 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 변형속도가 느린 경우($\dot{\epsilon}$: 0.0005/sec)에 전응력의 최대치는 2.7kg/mm²로 가장 낮았다. 이는 주조조직의 파괴와 급냉조직에서 Nd₂Fe₁₄B상과 변형온도에서 액상으로 존재하는 Nd-rich상이 분리가 서서히 이루어지고 슬립과 슬라이딩이 일어남과 동시에 동적 재결정이 생기기 때문으로 생각된다. 변형속도가 0.001/sec로 증가하면 최대치는 3.6kg/mm²로 증가하며 흐름응력도 같이 증가한다. 변형속도 0.005/sec로 다시 증가되면 동적 재결정 중 불연속 재결정으로 형상이 나타난다. 이와같은 불연속 재결정은 변형속도 0.01/sec에서 더욱 심해 졌다가 변형속도가 0.5/sec로 증가하면 불연속 결정 형상은 없어진다. 변형속도가 빨라지면 전응력의 최대치와 흐름응력은 비슷하게 된다.

3-2. 액상분포 및 결정방향과 성장

변형속도에 따른 열간압축 과정중 액상분포(←Nd-rich phase)를 관찰하면 Photo. 1의 (A)-(1)에서 알 수 있듯이 변형속도가 빠른 $\dot{\epsilon}$ =0.5/sec인 경우는 결정이 작고 액상분포는 변형속도가 느린 $\dot{\epsilon}$ =0.0005/sec의 시편 끝부분을 제외하고는 분포 양이 많다. 변형속도가 느린 경우는 액상이 시편 끝부분으로 밀려나서 결정이

커지며 결정 주위에 다량의 액상이 존재한다((A)-(2)-(b) 참조). 또한, 변형속도에 따라 열간압축 한 시편 내부의 결정의 방향성과 크기를 bitter pattern으로 조사하면 사진(B)는 변형속도가 빠른 0.5/sec인 경우의 자구형태로 Nd₂Fe₁₄B의 결정은 10 μ m 내외이며 결정 방향은 변형속도가 느린 경우에 비하여 크게 개선되지 않았다. 그러나 사진(C)는 변형속도가 0.0005/sec인 경우의 자구형태는 결정이 50 μ m까지 성장하였으며 방향성은 시편의 중간부분(R축;E=4)에서 크게 개선되었다.

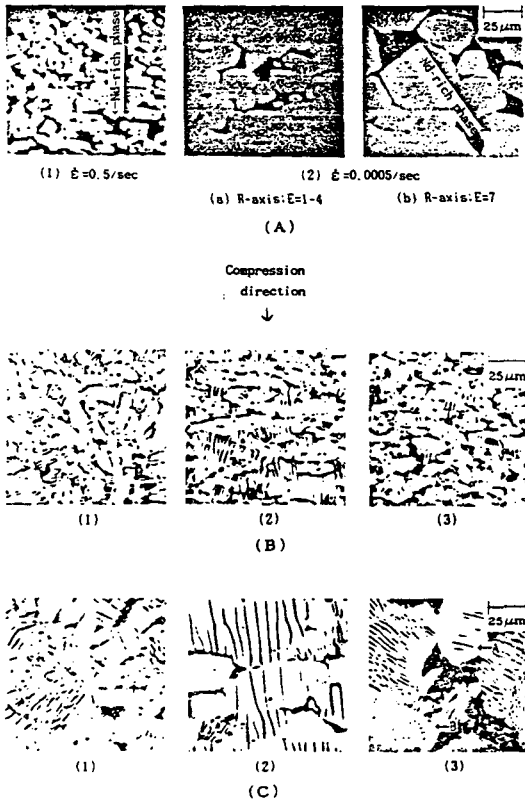


Photo.1 Distribution of Nd-rich phase and crystal orientation in hot-pressed Nd-Fe-B alloys as a function of strain rate (hot-pressed at 1000 $^{\circ}$ C, ϵ =60%, and heat treated at 1000 $^{\circ}$ C, 4hr)
 (A) Nd-rich phase
 (B) Crystal orientation ($\dot{\epsilon}$ =0.5/sec)
 (C) ($\dot{\epsilon}$ =0.0005/sec)
 (1) R-axis;E=1 (2) R-axis;E=4 (3) R-axis;E=7

그러나 시편의 중심부분(R축;E=1)에서 결정의 방향성은 무너져 있다. 이는 주조시 생긴 수지상조직이 생성될 때 이 조직이 충돌이 일어났기 때문에 열간압축으로도 결정의 방향성을 개선할 수는 없다. 시편의 끝부분은 결정이 중심부분보다 성장하여도 결정의 방향은 시편의 중간부분보다 더욱 나빠져 있고, 지구의 형태는 시편의 압축방향에 평행한 면인 줄무늬자구(stripe domain, \leftarrow A)와 줄무늬자구와 압축방향에 수직인 면인 미로자구(maze domain)의 중간 형태(\leftarrow B)로 나타나 있음으로 결정은 45 $^{\circ}$ 정도 돌아가 있다. 이로 보아 시편의 끝부분에서는 서로 각기 다른 방향의 결정이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 결정의 성장과 방향의 변화는 다음과 같이 설명될 수 있다. 열간압축시 액상이 시편의 주위로 밀려 나가면서 결정은 열간압축온도에서 액상으로 존재하는 Nd-rich상에 둘러 쌓이게 된다. 이로 인하여 결정은 열간압축시 야기되는 압축응력(σ_z)의 분포에 따라 결정 경계면의 슬라이딩(grain boundary sliding)을 야기시켜 결정 방향성이 정해진다. 즉, 압축응력이 높은 부분이 결정의 방향성이 좋고, 압축응력이 낮은 부분이 결정의 방향성이 나쁘다. 그러나 시편 중심에서 압축응력이 가장 높지만 이 부분에서는 방향성이 좋지 않다. 이는 주조조직에 기인한 것이며 시편의 주조조직 중심에서 수지상조직(dendrite)이 충돌하는 현상 때문이다. 그러므로 이러한 시편 중심부분을 제외한 시편 중간부분이 압축응력이 높고 결정의 방향성이 좋으며, 압축응력이 제일 낮은 시편 끝부분에서는 결정의 방향성이 나쁘다.

3-3. 자기적 특성

그림 7은 가공온도와 가공온도를 각각 60%, 1000 $^{\circ}$ C로 고정시키고, 주조 시편과 변형속도를 0.0005/sec에서 0.5/sec로 변화시키면서 열간압축 하였을 때의 시편의 자기적 특성을 나타낸 것이다. 변형속도가 0.001/sec인 경우에 최대자기에너지적((BH) max)과 잔류자속밀도(Br)가 가장 높았다. 그러나 변형속도가 0.0005/sec로 느린 경우는 최대자기에너지적과 잔류자속밀도 그리고 보자력(iHc)이 급격히 감소하였다. 이는 결정의 성장으로 인한 결과이다. 변형속도가 느린 경우는 결정의 방향성이 향상되며 Nd-rich상이 시편의 외각으로 밀려나 측정 시편의 Nd₂Fe₁₄B상의 밀도는 증가하였지만, 결정의 성장이 자기적 특성의 감소에 더욱더 크게 작용한 것으로 생각된다. 변형속도가 빠른 0.5/sec인 경우에

결정의 크기는 $10\mu\text{m}$ 인 경우로 보자력이 증가하지 못한 것은 결정의 방향성이 나쁘기 때문으로 생각된다.

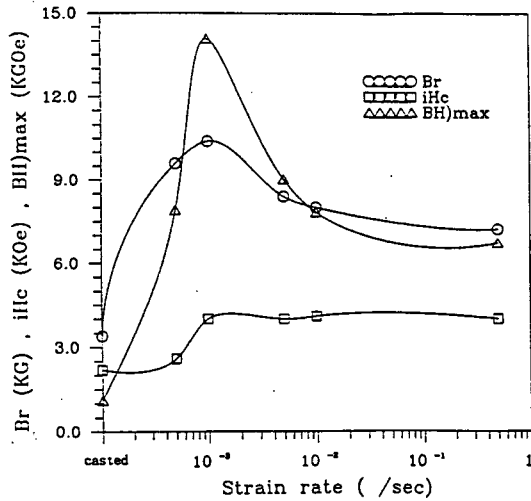


Fig. 7 Change of magnetic properties of hot-pressed Nd-Fe-B-Cu alloys as a function strain rate (hot-compressed at $T: 1000^\circ\text{C}$, $\epsilon: 60\%$, and heat treated at 1000°C , 4hr)

그림 8은 Nd-Fe-B-Cu합금을 열간압축시 변형속도에 따른 X-ray 회절 분석 곡선을 나타낸 것이다. 변형속도가 적절한 $\dot{\epsilon}: 0.001/\text{sec}$ 일때의 그림(B)가 결정의 성장과 결정의 방향성이 가장 향상되어 (105), (006)면의 강자성상인 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 상의 피크가 그림(A)의 $\dot{\epsilon}=0.5/\text{sec}$ 인 경우와 그림(C)의 $\dot{\epsilon}=0.0005/\text{sec}$ 인 경우 보다 높음을 알 수 있다.

그림 9는 열간압축시 변형속도에 따른 시편 내부의 자기적 특성을 비교하였다. 변형속도에 상관없이 시편의 중간부분에서 자기적 특성이 가장 좋음을 알 수 있다. 이는 이전의 사진에서 알 수 듯이 시편 중간부분에서 결정의 방향성이 가장 좋은 이유이다.

4. 결 론

$\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{77.5}\text{B}_5\text{Cu}_{1.5}$ 합금을 변형속도($\dot{\epsilon}$)에 따라 열간압축(hot-pressing)했을 때와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응력 분포 결과를 비교하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

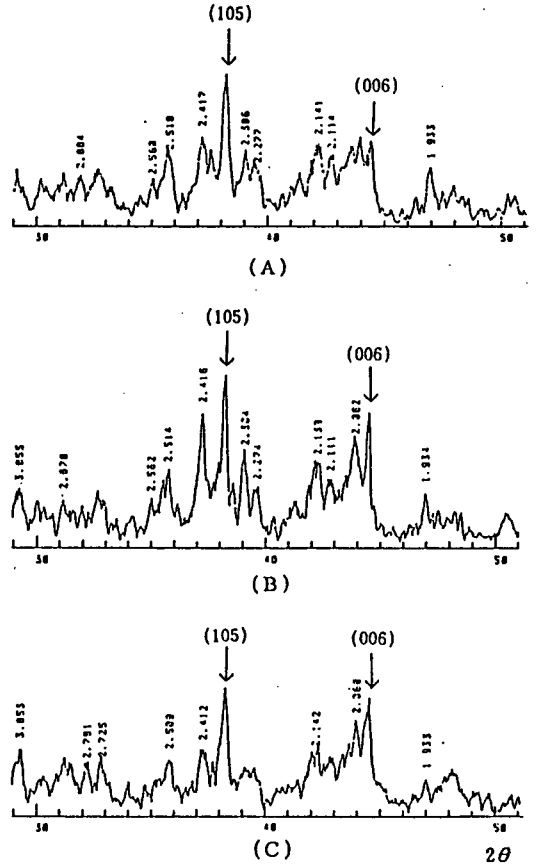


Fig. 8 Variation of X-ray diffraction patterns for hot-pressed Nd-Fe-B-Cu magnets according to strain rate (hot-pressed at 1000°C , $\epsilon=60\%$, and heat treated at 1000°C , 4hr)
(A) $\dot{\epsilon}=0.5/\text{sec}$ (B) $\dot{\epsilon}=0.001/\text{sec}$
(C) $\dot{\epsilon}=0.0005/\text{sec}$

- 열간압축시 변형속도에 상관없이 시편의 형상 변화는 똑 같으며, 각 요소의 변화는 일정하지 않으나, 각 요소에 작용하는 유효응력은 비슷하다. 그러나 변형속도가 빠른 $0.5/\text{sec}$ 인 경우에는 시편 전체의 각 요소에 유효응력이 동일하게 작용하고, 각 요소의 변화도 일정함을 알 수 있다.
- 각각의 변형속도에 따라 시편 내부의 응력 분포가 절대값만 차이가 날뿐, 분포 양상의 변화는 없으나 시편의 자기적 특성에는 차이가 나타난다. 이는 시편 내부에 존재하는 각 상의 특성에 기인한 것으로 여겨진다.

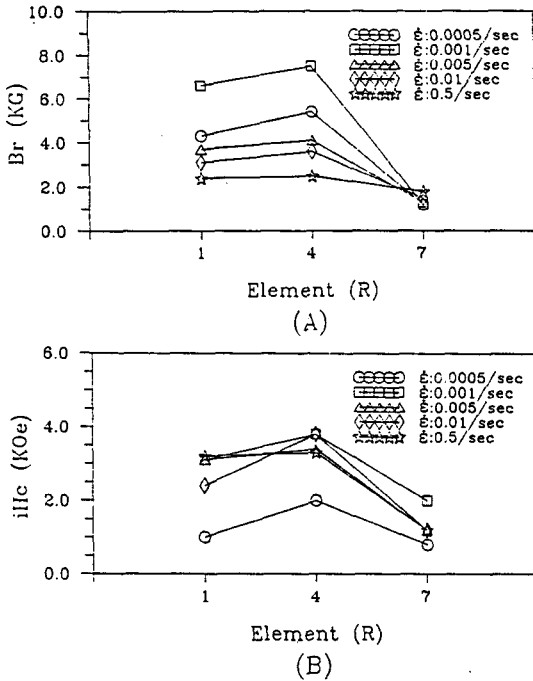


Fig. 9 Change of magnetic properties of the inner part in hot-pressed Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of strain rate (hot-pressed at 1000°C, $\epsilon=60\%$, and heat treated at 1000°C, 4hr)
 (A) Remanence (Br)
 (B) Coercive force (iHc)

3. σ_z 의 응력 분포는 시편 중심부분(R축;E=1)에서 가장 높고 시편 끝부분(R축;E=7)으로 갈수록 감소하였다. 이에 따라 시편 중심부분의 자기적 특성이 좋아야하나, 시편 중심부분 보다는 시편 중간부분(R축;E=4)이 높다. 이는 시편의 구조조직에 기인한

것이며, 시편의 자기적 특성은 응력뿐만 아니라 구조조직의 영향도 받는다.

4. 응력 분포가 일정한 곳에서는 결정의 방향성과 자구의 형태가 비슷하다.

참고문헌

1. G.G.Hadjipanayis, R.C.Hazelton and K.R.Lawless: "New Iron-Rare-Earth Based Permanent Magnets Magnets Materials", Appl. Phys. Lett., Vol. 43, No.8, P.797, 1983
2. M.Sagawa, S.Fujimori, N.Togawa, H.Yamanoto and Y.Matsuura: "New Material for Permanent Magnets on a Base of Nd and Fe", J.Appl.Phys., Vol. 55, P.2083, 1984
3. J.J.Croat, V.Panchanathand and K.H.See: "Rapidly solidified Nd-Fe-B states of anisotropic magnets by hot deformation", Pro. 10th Int. Workshop on Rare-Earth Magnets, Kyoto, Japan, 1989, P.429
4. T.Shimoda, K.Akioka, O.Kobayashi and T.Yamagami: "Hot-Worked Anisotropic Pr-Fe-B Magnets", Pro. 10th. Int. Workshop on Rare-Earth Magnets, Kyoto, Japan, 1989, P.389
5. J.B.Hawkyard and W.Johnson: "An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder During Axial Compression", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, P.163, 1966
6. S.Kobayashi, S.I.Oh and T.Altan: "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, New York, 1989