

## 《論 文》

가공온도에 따라 다이업셋한 Nd-Fe-B-Cu합금의  
응력과 결정에 관한 연구

박정덕 · 양현수 · 곽창섭 · 정원용

인천대학교 공과대학 기계공학과

한국 과학기술 연구원

A Study on the Stress and Crystal in Die-Upsetted Nd-Fe-B-Cu Alloys  
as a Function of Working Temperature

J. D. Park, H. S. Yang and C. S. Kwak, W. Y. Jeung

Department of Mechanical Engineering, Incheon University

KIST

## ABSTRACT

This study is to investigate the stress distributions, crystal orientations and magnetic properties during die-upsetting according to working temperature of Nd-Fe-B-Cu alloys. The stress distributions in the specimens during compressing process were calculated by a finite element method program (SPID). The calculated stresses were effective stress ( $\sigma_{eff}$ ), compression stress ( $\sigma_z$ ), radial direction stress ( $\sigma_r$ ), rotational direction stress ( $\sigma_\theta$ ) and shear stress ( $\tau_{rz}$ ). The stress distributions of  $\sigma_z$  obtained by a computer simulation showed that the stress components causing the magnetic alignment during die-upsetting of the cast magnets were very high at the center-part of a specimen, and decreased toward the periphery-part of a specimen. In view of the above results the magnetic properties should be better at the center-part of a specimen than any other parts. But the measured magnetic properties were better at the mid-part. These results should be due to the fact that the specimens were casted. Normally the magnetic properties are affected by the casting process as well as by the stress levels.  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  are thought to affect the liquid phase flowing and domain patterns, respectively. The influence of  $\tau_{rz}$  was trivial,  $\sigma_{eff}$  distributed similar throughout the specimen. The Nd-rich phase appeared at the peripheral of the specimen where the stress level of  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  was low or the stress level of  $\sigma_z$  was high. The Nd-rich phase was squeezed out during die-upsetting. This phase had an effect on the crystal orientation and grain growth. The stress distributions of alloy were irregular at the parts of the specimen where the die contacted with specimen.

## 1. 서 론

R-Fe-B계 영구자석은 1980년대에 Hadjipanayis<sup>1)</sup>가 Pr-Fe-B-Si계 합금을 제조한 이후, Sagawa<sup>2)</sup>은 분말야금법으로 36MGOe의 최대자기에너지적을 가지는 Nd-Fe-B계 영구자석 제조에 관한 연구를 하여 차세대 영구자석으로서의 가능성을 시사하였다. 1989년 Croat<sup>3)</sup>은 R-Fe-B계 합금을 급속응고법으로 분말제조하여 다이업셋 방법으로 이방화시켜 39MGOe의 최대자기에너지적을 갖는 R-Fe-B계 영구자석을 개발하였다. 또한, 같은 해에 Shimoda<sup>4)</sup>은 이전의 제조공법과는 달리 제조공정을 단축시키며 비용을 줄일 수 있는 열간가공법을 시행하였다. 이들은 일반응고법으로 잉곳트 제조된 Pr-Fe-B-Cu 합금을 열간가공법을 이용하여 결정을 이방화시켜 36.2MGOe의 최대자기에너지적을 갖는 영구자석을 제조하였다. 이와같이 열간

가공법에 의해 제조공정을 단축시키고 비용을 줄이며 자기적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있지만, 열간가공중 시편 내부의 응력 분포가 미치는 영향에 대해서는 연구가 미약하다. 따라서, 본 연구에서는 Nd<sub>16</sub>Fe<sub>77.5</sub>B<sub>5</sub>Cu<sub>1.5</sub> 합금을 가공온도에 따라 다이업셋했을 때에 시편 내부에 발생하는 응력을 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 프로그램의 일종인 SPID(Simple Plastic Increment Deformation)을 이용하여 해석하였으며, 이때 시편 내부에 계산된 응력이 결정의 성장과 방향성 및 자기적 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 시뮬레이션 해석 및 실험방법

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

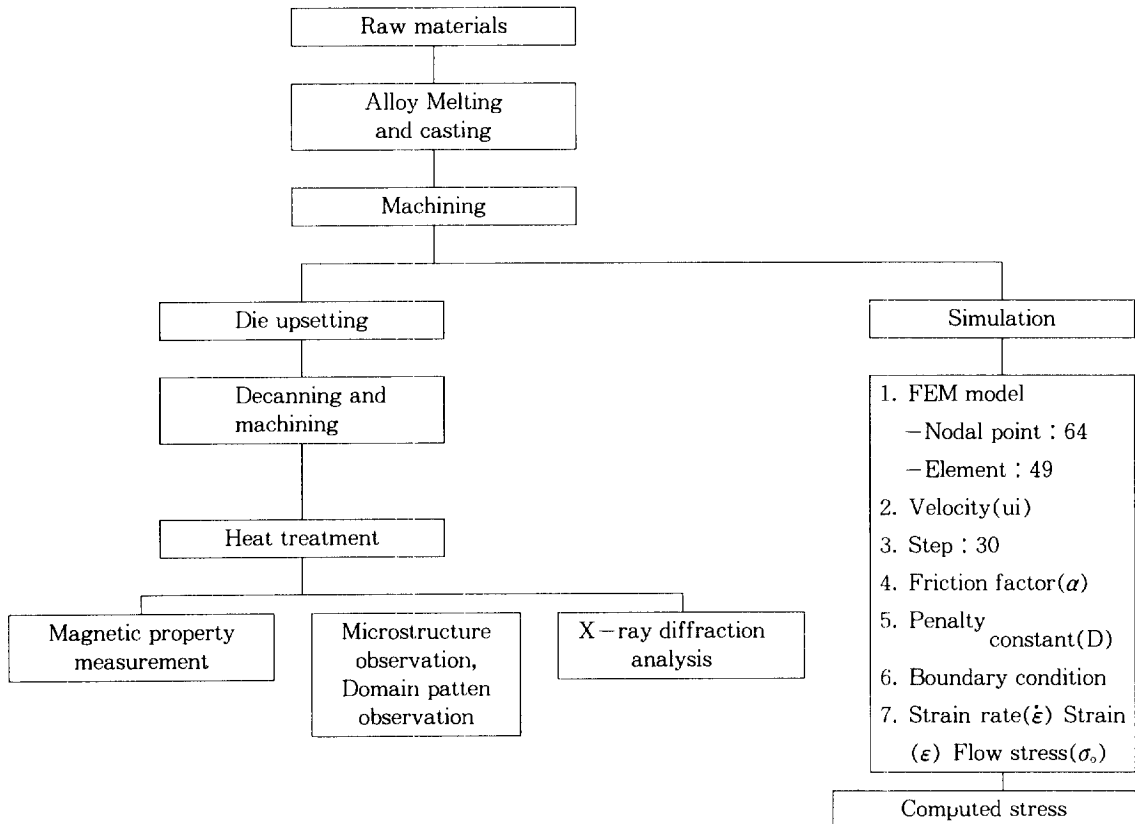


Fig. 1. Schematic representation of experimental procedure and simulation.

### 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 생각할 수 있으므로, 응력을 1/4의 요소 분할로 해석하였다. 그림의 모델은 반지름 방향(R축)과 높이방향(Z축)의 각각에 대하여 8개의 절점과 7개의 요소를 구성시켜, 총 64개의 절점과 49개의 요소를 나누었다. 각 요소는 4개의 절점을 가진 이차원 등 매개변수의 사각요소로 되어 있다. 또한, 시편 가공도의 정밀성과 점진적인 압축률을 부여하기 위하여 step은 30회로 분할 시행하였다. 시편과 다이부분의 마찰, 그리고 적절한 배블립현상을 고려하여 마찰인자<sup>5)</sup> ( $\alpha=0.5$ )와 penalty constant ( $D=10000$ )을 주었다<sup>6)</sup>.

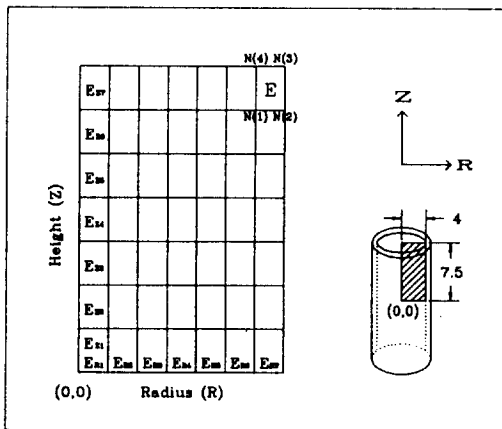


Fig. 2. The finite element model for stress analysis.

본 프로그램에서 사용된 응력식은 다음과 같다.

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

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

$$3. \sigma_{eff} = \sigma = \sigma_0 * \dot{\epsilon}_e$$

( $\sigma_0$  : flow stress,  $\sigma_{eff}$  : effective stress,  
 $\dot{\epsilon}_e$  : effective strain rate,  $\dot{\epsilon}_p$  : 각 요소의 strain rate,  $\dot{\epsilon}_m$  : 평균 strain rate ( $\dot{\epsilon}_m = (\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3)/3$ ),  
 D : penalty constant)

여기서, 지속적인 소성변형을 유지시켜 주는 흐름응력(flow stress)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_0 = f(T, \epsilon, \dot{\epsilon}, S)$$

( $\sigma_0$  : flow stress, T : temperature,  $\epsilon$  : strain,  
 $\dot{\epsilon}$  : strain rate, S : microstructure)

즉, 흐름응력은 온도, 가공도, 변형속도, 미세조직 등에 관계가 있고, 본 실험에서는 T,  $\epsilon$ ,  $\dot{\epsilon}$ 의 조건을 동시에 유지하면서 압축했을 때의 결과인 응력-변형률 곡선(Fig. 7 참조)에서 구할 수 있으며 가공온도(T)가 850℃, 900℃, 1000℃, 1050℃에서 각각 2.9, 2.6, 1.6, 1.5, 1.4(kg/mm<sup>2</sup>)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. 다이업셋 실험중에 부서지는 것을 예방하기 위해 저탄소강 두께로 0.75mm canning하여 시편을 직경 9.5mm, 높이 15mm의 봉상 시편으로 가공하였다. 본 실험에 사용된 열간가공재현시험기(thermecmaster-Z)의 총 하중은 5ton이며, 진공도는 10<sup>-4</sup>torr로 유지한다. 시편 부착은 실린더 형태의 시편을 SiN으로 제작된 상·하 편치에 장착시킨 다음 진공도가 10<sup>-4</sup>torr로 되면 5℃/sec의 상승온도로 원하는 가공온도까지 가열시킨 후, 일정한 상태로 약 5분간 유지시켜 온도 분포를 일정하게 하여 다이업셋을 시행한 후, 1000℃에서 4hr 열처리하여 자기적 특성(Br, iHc, (BH)<sub>max</sub>), X-ray 회절분석, 미세조직 및 자구관찰을 시행하였다. 또한, 시편 각 부분 별로 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-Cu 합금을 가공온도에 따라 다이업셋했을 때의 컴퓨터 시뮬레이션으로 계산된 시편의 형상 변화와 효율응력(effective stress)을 나타낸 것이다. 그림(A)의 우상에 있는 요소는 시뮬레이션 이

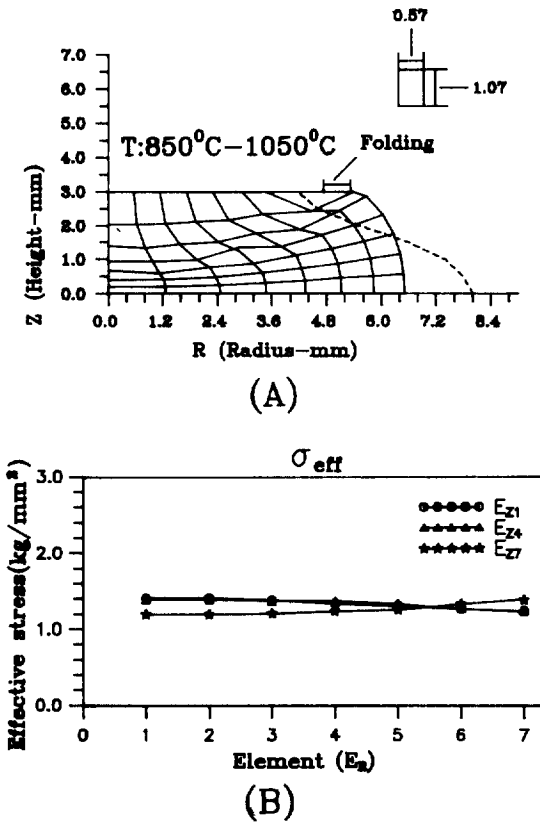


Fig. 3. Grid distortion and distribution of effective stress in Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature.  
 (A) T : 850°C - 1050°C (B) Effective stress  
 ( $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec,  $\epsilon$  : 60%)  
 (T : 1000°C,  $\epsilon$  : 60%,  $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec)

전의 원래 요소의 크기(1.07mm \* 0.57mm)이다. 그림(A)는 가공도( $\epsilon$  : 60%), 변형속도( $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec)로 고정시키고, 가공온도(T : 850°C - 1050°C)를 변화시킨 경우로 가공도가 일정하기 때문에 각 온도 조건에 따른 시편 형상의 변화는 동일하다. 그러나 다이업셋후 실험 시편의 형상과 시뮬레이션한 시편의 결과치와는 차이가 있었다. 그림에서 접선부분은 실제 실험에서 시편이 밀려나간 길이로써 이 길이의 차이는 1.48mm이었다. 실험과 시뮬레이션의 차이는 Nd-Fe-B-Cu 영구자석 내에 기지조직인 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B상, Nd-rich상이 존재하고, 이 Nd-rich상은 다이업셋온도에서 액상으로 존재하나, 시뮬레이션할 때에는 조직이 고상 상태로 존

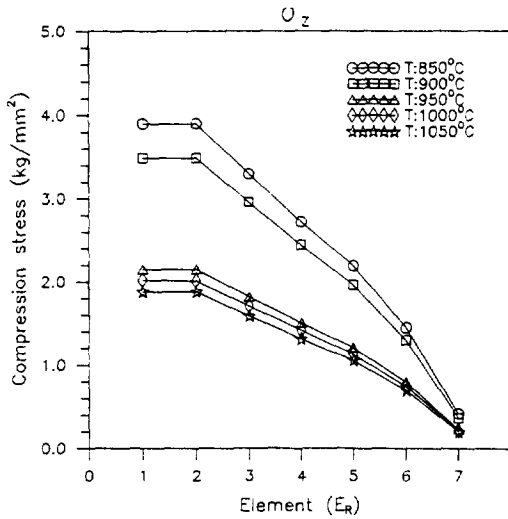
Table 1. Computed stress of  $\sigma_{eff}$  (effective stress) for Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature.

Specimen	Temperature	$\sigma_{eff}$ (kg/mm <sup>2</sup> )			
		$E_{R1}$	$E_{R4}$	$E_{R7}$	
$\epsilon$ : 60% $\dot{\epsilon}$ : 0.001/sec	T : 850°C	$E_{Z1}$	2.720	2.595	2.395
		$E_{Z4}$	2.693	2.652	2.376
		$E_{Z7}$	2.321	2.395	2.678
	T : 900°C	$E_{Z1}$	2.438	2.326	2.147
		$E_{Z4}$	2.415	2.378	2.130
		$E_{Z7}$	2.081	2.148	2.401
	T : 950°C	$E_{Z1}$	1.500	1.432	1.321
		$E_{Z4}$	1.486	1.463	1.311
		$E_{Z7}$	1.280	1.322	1.477
	T : 1000°C	$E_{Z1}$	1.407	1.342	1.238
		$E_{Z4}$	1.393	1.372	1.228
		$E_{Z7}$	1.200	1.238	1.385
	T : 1050°C	$E_{Z1}$	1.313	1.253	1.156
		$E_{Z4}$	1.300	1.280	1.147
		$E_{Z7}$	1.120	1.156	1.293

재할 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 folding현상이 발생한다. 배불림현상이 중심부분에서 많이 나타나는 이유는 Nd-Fe-B-Cu 합금 조직내에 있는 Nd-rich상이 다이업셋시에 액상으로 존재하여 액상이 시편의 중심부분으로 밀려나오기 때문이다.

그림(B)는 그림(A)의 각 조건중에서 대표적으로  $\epsilon$  : 60%,  $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec, T : 1000°C일때의 시편 내부의 효율응력으로서 다른 조건의 온도 변화에서도 효율응력의 절대값만 차이가 나고, Table 1에서 알 수 있듯이 응력 분포는 시편 중심에서 끝부분까지 거의 비슷하다. 즉, 가공온도 변화에 따라서는 시편 형상 변화가 같고, 이때에 각 요소에 작용하는 효율응력이 비슷함을 알 수 있다.

그림 4는 압축시 가공온도 변화에 따른 시편 내부의 압축응력인  $\sigma_z$ 의 응력 분포를 나타내었다. 시편 내부의 Z방향은 압축방향과 일치하고 있고  $\sigma_z$ 가 시편 내부의 결정방향성에 영향을 미칠뿐만 아니라 이로 인하여 시편의 자기적 특성에 영향을 미치게 된다. 그림은 시편 중심( $E_{Z1}$ )에서 반경 방향(R축)의 각 요소에

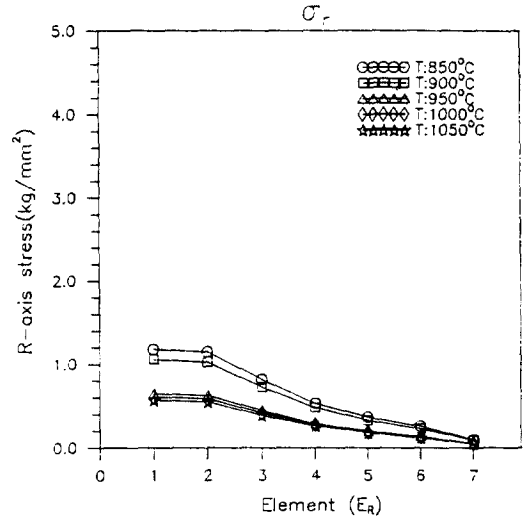


**Fig. 4.** Comparisons of the computed stress of  $\sigma_z$  for Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature : ( $E_{z1}$ ) ( $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec,  $\epsilon$  : 60%)

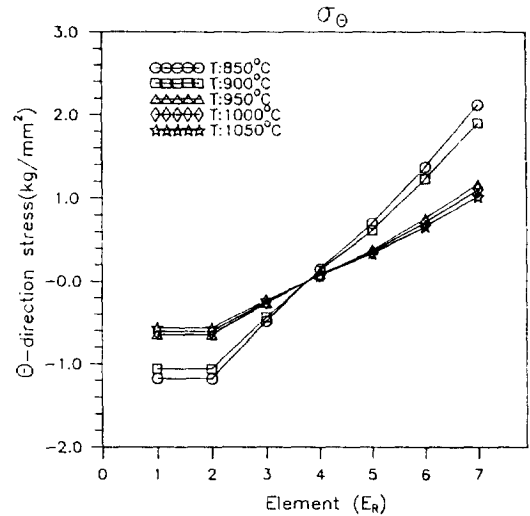
대한  $\sigma_z$ 의 응력 분포로서 압축응력이 작용하고 있는 부호는 -이지만 본 그림에서는 그 절대값만 표시하였다. 응력 분포는 시편 중심( $E_{R1}$ )에서 응력이 가장 높고 시편 끝부분( $E_{R7}$ )으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. 또한, 가공온도가 높을수록 응력이 낮아지고 있다. 이는 열간압축시 응력-변형률 곡선에서도 알 수 있듯이 가공온도가 높을수록 변형이 잘 되기 때문에 오히려 소성변형을 계속 유지하기 위한 흐름응력은 낮아지기 때문이다. 900°C와 950°C에서 응력 차이가 큰 이유는 金<sup>7)</sup>에 의한 시차열분석 관찰 결과에 의하면 950°C 부근에서 Nd-rich상의 액상에 의한 변태로 흡열반응이 나타난다. 이로 보아 900°C와 950°C 사이에서 Nd-rich상은 액상으로 존재하며 이 액상은 입계의 슬라이딩을 용이하게 한다. 이로 인하여 응력 차이가 발생하는 것으로 생각된다.

그림 5는 시편 중심부분( $E_{z1}$ )에서 반경방향(R-axis)으로 작용하는 각 요소에 대한  $\sigma_r$ 의 응력 분포이다. 시편 중심부분에서는 응력이 높고, 시편 끝부분으로 갈수록 응력이 감소하여 다이업셋시 액상의 유동이 시편 중심부분에서부터 시편 끝부분으로 밀려 나오게 된다.

그림 6은 시편 중심부분( $E_{z1}$ )에서 회전방향( $\theta$ -axis)



**Fig. 5.** Comparisons of the computed stress of  $\sigma_r$  for Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature : ( $E_{z1}$ ) ( $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec,  $\epsilon$  : 60%)



**Fig. 6.** Comparisons of the computed stress of  $\sigma_\theta$  for Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature : ( $E_{z1}$ ) ( $\dot{\epsilon}$  : 0.001/sec,  $\epsilon$  : 60%)

으로 작용하는 각 요소에 대한  $\sigma_\theta$ 의 응력 분포이다. 시편 중심부분에서는 응력이 낮고, 시편 끝부분으로 갈수록 응력이 증가하여 시편 내부의 결정립의 회전을 야기시켜, 시편 중심부분과 끝부분의 지구형태가 변화

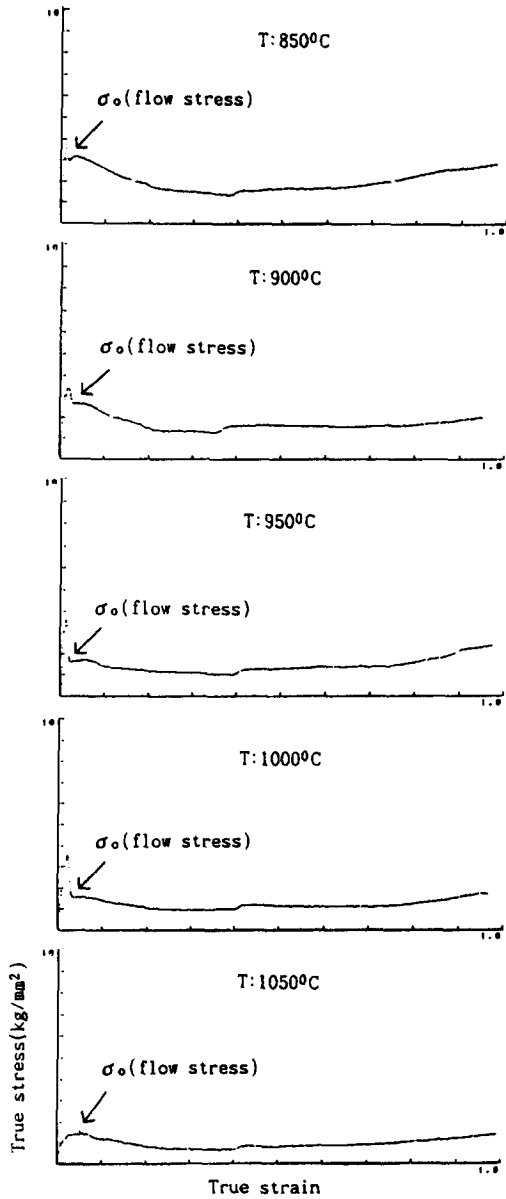
함을 알 수 있다.

Table 2는 전단응력 분포를 나타낸 것으로 가공온도에 따른 전단응력의 분포 양상의 차이는 크지 않으며, 절대값 역시 미소하여 시편에 큰 영향을 주지는 않는다.

**Table 2.** Computed stress of  $\tau_{ii}$ (shear stress) for Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature.

Specimen	Temperature	$\sigma_{ii}$ (kg/mm <sup>2</sup> )			
			$E_{R1}$	$E_{R4}$	$E_{R7}$
$\epsilon : 60\%$ $\dot{\epsilon} : 0.001/\text{sec}$	T : 850°C	$E_{Z1}$	-0.026	-0.015	0.015
		$E_{Z4}$	-0.295	-0.336	0.163
		$E_{Z7}$	-0.322	-0.759	-0.638
	T : 900°C	$E_{Z1}$	-0.023	-0.014	0.013
		$E_{Z4}$	-0.264	-0.301	0.146
		$E_{Z7}$	-0.289	-0.681	-0.572
	T : 950°C	$E_{Z1}$	-0.014	-0.008	0.008
		$E_{Z4}$	-0.163	-0.185	0.090
		$E_{Z7}$	-0.178	-0.419	-0.352
	T : 1000°C	$E_{Z1}$	-0.014	-0.008	0.008
		$E_{Z4}$	-0.152	-0.173	0.084
		$E_{Z7}$	-0.166	-0.393	-0.330
	T : 1050°C	$E_{Z1}$	-0.013	-0.007	0.007
		$E_{Z4}$	-0.142	-0.162	0.079
		$E_{Z7}$	-0.155	-0.367	-0.308

그림 7은 다이업셋시 가공온도 변화에 따라 흐름응력을 알 수 있는 응력-변형률 곡선으로서 850°C - 1000°C까지는 응력에 있어서 최대치를 나타내는 날카로운 피크점이 존재하나, 1050°C온도에서는 이와같은 피크점이 존재하지 않는다. Nd-Fe-B계 합금은 저온에서는 변형응력이 매우 높고 취약하여 상온에서의 소성가공이 불가능하지만 고온에서는 변형응력이 낮아 소성가공이 가능하다. 이 금속간화합물은 변태온도 사이의 고온으로 올라갈수록 강도가 급격히 저하하지는 않는다. 그러나 변태온도 부근에서 급격히 감소하는 특이한 현상을 나타내고 있다. 또한 흐름응력은 950°C에서 급격히 감소하지만, 최대응력치를 나타내는 날카로운 피크점은 1050°C에서 사라진다. 금속간화합물의 경우에 단결정에서는 변형응력에 있어서 온도 의존성이 크나, 다결정의 경우에 변형응력의 온도 의존성은 그다지 크지 않다. 그러나 본 실험의 경우는 다결정의 상태이나 옹고시 수지상조직이 일정방향으로 성장하여 압축시 단결정 같은 상태로 존재한다. 압축



**Fig. 7.** Variation of stress-strain curves in die-upsetted Nd-Fe-B-Cu magnets according to working temperature. (die-upsetted by 60% at  $\dot{\epsilon} : 0.001/\text{sec}$ )

시  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 상은(001)면에서 2개의 슬립면을 가지고 있으며, 그림의 경우 압축응력이 1050°C에서 급격히 감소하였다. 이로 보아 (001)면에서 슬립에 필요한 에너지값이 급격히 감소하였다고 생각된다. 온도 구역

에서 응력의 변화는 다음 두가지로 설명된다. 첫째는 Nd-rich상이 액상 변태로 인하여 야기되는 현상이며, 둘째는 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B상이 변태 구역에 가까이 존재함으로써 나타나는 현상으로 생각된다. 또한 각 곡선에서 true strain이 0.4 이상에서 증가하는 현상을 보이고 있는데 이는 다이업셋중 Nd-rich상이 외부로 빠져나감에 따라 결정의 미끄러짐이 어려워지기 때문이다.

3. 2. 액상분포 및 결정방향과 성장

다이업셋시 가공온도에 따른 액상 분포를 관찰하면, 가공온도가 850℃인 경우는 가공 온도가 낮기 때문에 시편 전체에 액상 분포량(←Nd-rich phase)이 적고 (Photo. 1의 (A)-(1)참조), 1050℃로 가공온도가 높은 경우는 용융된 Nd-rich상의 변형이 일어나므로 특히, 시편 끝부분에서 액상 분포량(←Nd-rich phase)가 많고 결정이 성장함을 알 수 있다(Photo. 1의 (A)-(2)참조). 또한, 시편 내부의 부분 별로 결정방향성을 bitter pattern으로 관찰하면 사진(B)는 가공온도가 850℃인 경우의 자구형태로 액상의 영향이 없기 때문에 결정방향성이 부분별로 비슷하면 자화용이축인 C축으로 잘 정렬되지 않고, 가공온도가 1000℃인 경우의 자구형태는 사진(C)-(2)에서 알 수 있듯이 시편 중간부분(E<sub>R1</sub>)에서 자화용이축인 C축으로 정렬이 잘 된다. 그러나 사진(D)에서처럼 가공온도가 1050℃인 경우는 시편 중심부분(E<sub>R1</sub>)에서 이전과 똑같이 결정방향이 무 방향성이나 시편 중간부분에서는 결정방향은 자화용이축인 C축으로 잘 정렬되고 있다. 그러나 가공온도가 높기 때문에 결정성장이 나타나고 있음을 알 수 있다. 시편 끝부분에서는 액상에 의한 영향으로 결정이 커지며 방향성도 크게 변화하여 압축방향에 대해 수직한 면에서는 maze domain(3)의 A)과 spike domain(3)의 B)이 관찰되고, 평행한면에서는 stripe domain(3)의 C)이 관찰되며, 또한, stripe과 maze의 중간 형태의 자구(3)의 D)도 나타나고 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. 다이업셋시 반경방향으로 작용하는 σ<sub>r</sub>의 응력 분포에 의해 액상이 시편의 주위로 밀려 나가면서 결정은 다이업셋온도에서 액상으로 존재하는 Nd-rich상에 둘러

쌓이게 된다. 이로 인하여 결정은 다이업셋시 야기되는 압축응력의 분포에 따라 방향성이 정해진다. 즉, 압축응력이 높은 부분이 결정입계의 미끄러짐이 용이하여 결정방향성이 좋고, 압축응력이 낮은 부분이 결정방향성이 나쁘다. 그러나 시편 중심에서 압축응력이 가장 높지만 이 부분에서는 방향성이 좋지 않다. 이는 주조조직에 기인한 것이며 시편의 주조조직 중심에서 dendrite가 충돌하는 현상 때문이다.

그러므로 이러한 시편 중심부분을 제외한 시편 중간부분이 압축응력이 높고 결정방향성이 좋으며, 압축응력이 제일 낮은 시편 끝부분에서는 결정방향성이 나쁘다.

3. 3. 자기적 특성

그림 8은 Nd-Fe-B-Cu합금을 가공도와 변형속도를 각각 60%, 0.001/sec로 일정하게 하고, 가공온도를 850℃-1050℃로 변화시키면서 다이업셋했을 때의 자기적 특성 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 가공온도가 상승할수록 잔류자속밀도(B<sub>r</sub>)와 최대자기에너지적(BH)<sub>max</sub>은 향상되었지만, 보자력(iH<sub>C</sub>)은 감소하였다. 잔류자속밀도의 상승은 다이업셋시 압축응력에 의해 결정입계의 미끄러짐이 야기되어 결정방향

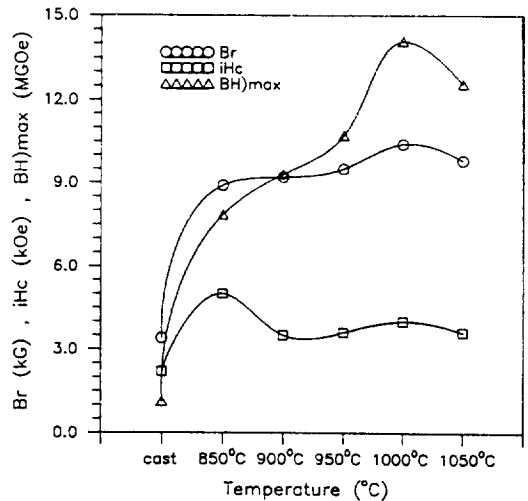
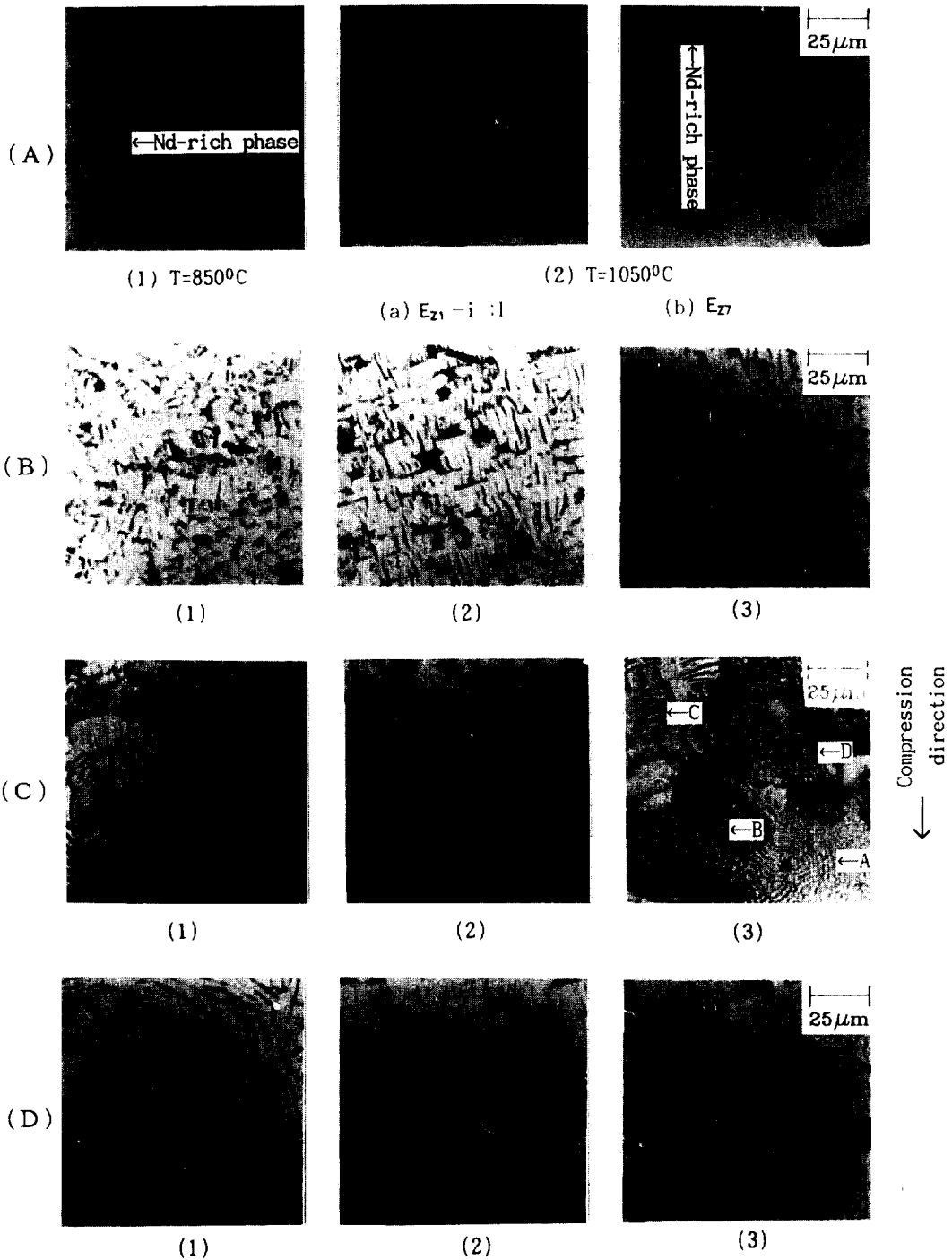


Fig. 8. Change of magnetic properties of die-upsetted Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature. (die-upsetted by 60% at ε̇ : 0.001/sec, and heat treated at 1000℃ for 4hr.)



**Photo. 1** Distribution of Nd-rich phase and crystal orientation in die-upsetted Nd-Fe-B-Cu alloys as a function of working temperature.  
 (die-upsetted by 60% at  $\epsilon=0.001/\text{sec}$ , and heat treated at  $1000^\circ\text{C}$  for 4hr.)  
 (A) Nd-rich phase (B) Crystal orientation( $T=850^\circ\text{C}$ ) (C)  $T=1000^\circ\text{C}$  (D)  $T=1050^\circ\text{C}$   
 (1)  $E_{R1}$  (2)  $E_{R4}$  (3)  $E_{R7}$





자기적 특성을 나타낸 것이다. 잔류자속밀도와 보자력은 가공온도에 상관없이 시편 중심과 끝부분사이의 중간부분에서 가장 높음을 알 수 있다. 잔류자속밀도가 시편중간부분에서 높은 것은 이전의 설명처럼 다이업셋시 압축응력에 의해 결정입계의 미끄러짐이 야기되어 결정방향성이 향상되었기 때문이며, 보자력의 상승은 이전의 사진과 비교하면 결정크기가 중간부분이 약간 크나 액상의 영향과 결정방향성이 향상된 관계로 잔류자속밀도와 동시에 상승하였기 때문이다.

### 3. 4. 시뮬레이션의 응력 분포와 실험의 비교·결과

Nd-Fe-B-Cu합금을 가공온도(T)에 따라 다이업셋했을 때와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응력 분포를 비교하면 다음과 같다.

다이업셋시 가공온도에 상관없이 시편의 형상 변화는 똑같으며 각 요소에 작용하는 효율응력도 비슷하다. 압축응력인  $\sigma_z$ 의 응력 분포는 시편 중심부분( $E_{H1}$ )에서 가장 높고 시편 끝부분( $E_{H2}$ )으로 갈수록 감소하였다. 이에 따라 압축응력에 의해 결정방향성이 향상되어 시편 중심부분의 자기적 특성이 좋아야하나, 시편 중심부분보다는 시편 중간부분( $E_{H3}$ )이 높다. 이는 시편의 주조조직에 기인한 것이며, 시편의 자기적 특성은 응력뿐만 아니라 주조조직의 영향도 받는다.  $\sigma_r$ 의 응력 분포는 시편 중심부분에서 높고, 시편 끝부분으로 갈수록 감소하여 액상의 유동과 관계가 있으며,  $\sigma_t$ 의 응력 분포는 시편 끝부분에서 그 값이 증가하여 시편 내부의 결정립의 회전을 유발시켜 자구형태가 변화고 있음을 알 수 있다. 또한, 전단응력 분포에서는 그 값이 미소하여 시편에 큰 영향을 주지 않고 있다. 한편,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ 의 응력분포가 낮은 부분과  $\sigma_t$ 의 응력분포가 높은 부분인 시편의 끝부분은 자기적 특성은 낮고, 결정방향은 자화용이축인 C축으로 정렬되지 않는다. 이는 시편 끝부분에서  $Nd_2Fe_{14}B$ 상이 액상으로 존재하는 Nd-rich상으로 둘러 쌓여 있다. 따라서, 강자성상인 결정은 회전과 성장이 동시에 이루어지는 것으로 생각되며 시편 끝부분의 잔류자속밀도와 보자력이 감소한다. 또한, 시편 표면부분( $E_{H7}$ )에서의 각각의 응력 분포는 다른부분과는 달리 압축시 마찰 영향으로 불규칙하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

$Nd_{16}Fe_{77.5}B_5Cu_{1.5}$  합금을 가공온도(T)에 따라 다이업셋했을 때와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 응력 분포 결과를 비교하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 시편의 압축응력인  $\sigma_z$ 의 응력 분포는 시편 중심부분에서 가장 높고 시편 끝부분으로 갈수록 감소하였다. 이에 따라 압축응력에 의해 결정방향성이 향상되어 시편 중심부분의 자기적 특성이 좋아야하나, 시편 중심부분보다는 시편 중간부분이 높다. 이는 시편의 주조조직에 기인한 것이며, 시편의 자기적 특성은 응력뿐만 아니라 주조조직의 영향도 받는다.

2)  $\sigma_r$ 의 응력 분포는 액상의 흐름,  $\sigma_t$ 의 응력 분포는 자구형태에 영향을 미친다.  $\tau_{rz}$ 는 미세하여 시편에 영향을 주지 못하고,  $\sigma_{H1}$ 는 시편 전역에 비슷하게 분포한다.

3) 시편 내부의 Nd-rich상은  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ 의 응력 분포가 낮은 곳과  $\sigma_t$ 의 응력 분포가 높은 곳인 시편 끝부분에서 보이며, 이 Nd-rich상은 시편 끝부분으로 밀려나면서  $Nd_2Fe_{14}B$ 상의 결정방위와 결정성장에 영향을 미친다.

4) 다이와 접촉하는 표면부분( $E_{H7}$ )에서는 마찰 영향으로 응력이 불규칙하게 작용한다.

## 참 고 문 헌

1. G. C. Hadjipanayis, R. C. Hazelton and K. R. Lawless : "New Iron-Rare-Earth Based Permanent Magnets Materials", Appl. Phys. Lett., Vol. 43, No. 8, 1983, p.797.
2. M. Sagawa, S. Fujimori, N. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura : "New Material for Permanent Magnets on a Base of Nd and Fe", J. Appl. Phys., Vol. 55, 1984, p. 2083.
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, 1966, p. 163.
6. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan : "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, New York, 1989.
7. 金東燁 博士學位論文 : "熱間壓縮된 R-Fe-B系 永久磁石의 磁氣의 特性에 關한 研究", 延世大學校, 1991.