

## Indentation 기법을 이용한 원자로 압력용기용 저합금강의 미소영역 물성 및 미세조직 특성 분석

김성훈 · 최 열 · 이봉상\* · 홍준화\* · 권동일

서울대학교 재료공학부  
\*한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

## Analysis of Micro-Mechanical Properties and Microstructure of Low-alloy Steel Using Indentation Technique

Sung-Hoon Kim, Yeol Choi, Bong Sang Lee\*, Jun Hwa Hong\* and Dongil Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
\*Nuclear Materials Technology Development Team, Korea Atomic Energy Research Institute,  
Daejeon 305-353, Korea

**Abstract :** Low alloy steels for nuclear reactor are degraded progressively through microstructural changes due to high operation temperature and irradiation. Strength properties are the most important factors for the selection of materials and the determination of degradation degree. Interfacial properties affected by strengthening particles with the range of nm size and strength distribution in microstructures could not be tested by the conventional mechanical testing methods. Microindentation and nanoindentation technique have been studied as a alternative of conventional methods. Specially, nanoindentation technique with a  $\mu\text{N}$  load range and a nm residual indent size range has been highlighted as a tool which is very useful to determine those properties. Since each phase composing microstructure of steels has a characteristic hardness value, it is possible to characterize phase on the basis of that character. In this study, by using of microindentation and nanoindentation technique can be evaluated microstructural mechanical properties of low alloy steels manufactured under 7 different kinds of processes. Through the study, we verified potentialities whether or not indentation technique can be used as a method to determine degree of degradation.

(Received November 28, 2002)

**Key words :** Low-alloy steel, Microindentation, Nanoindentation, Characteristic hardness, Phase characterization, Degree of degradation

### 1. 서 론

원자로 압력용기재료로 사용되는 대표적인 저합금강인 SA508-Gr.3 강재는 기본적으로 bainitic ferrite의 미세구조를 가지며, 압연에 의한 제조로 인해 단조품에서 전형적으로 나타나는 밴딩 구조와 그 주변부의 기본구조로 이루어져 있다. 이들 구조 및 조직적 특성은 제조 방법에 따라 조금씩 다른 형상을 갖게 된다. 또한 원자로 압력용기용 저합금강은 사용 중의 높은 열과 압력, 방사선 조사에 의해 미세조직이 변화함으로써 지속적인 열화 거동을 보임과 동시에 강도 특성이 다양하게 변화되는 특성을 보인다. 이러한 원자로용 저합금강의 서로 다른 제조 공정에 의한 미세조직차로 인한 강도 차이를 설명함과 동시에, 사용 중 열화도 진단 및 수명 예측을 위해서는 강이 가지는 미세조직 강도 특성 평가가 우선적으로 이루어져야 한다.

재료의 강도를 미세조직적 접근을 통해 해석하고자 하는 연구의 일환으로써 재료의 상 별 물성 평가에 관한 연구가 다양하게 진행되었다. 일반적으로 단결정이나 단일상을 갖는 재료에서는 각각의 상에 대해 재료 전체가 가지는 것과 동일한 기계적 특성을 나타내지만 다상 재료의 경우 각 상들이 갖는 기계적 특성이 다르게 나타난다. 재료 전체의 overall 한 물성은 인장시

험을 통해서 알 수 있지만, 각 상이 가지는 고유한 물성 분포인 미세조직 강도 특성의 경우 일반적인 평가시험법으로는 알 수 없다.

이들 강재들이 갖는 복잡한 조직의 강도 특성을 평가하기 위해 도입될 수 있는 것이 연속 압입 시험 기법이다. 연속 압입 시험 기법은 압입자에 의해 재료에 가해지는 하중과 그에 따른 변위를 연속적으로 나타내는 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 경도를 비롯한 다양한 기계적 특성을 평가할 수 있는 시험법이다<sup>4,6)</sup>. 특히 nanoindentation 기법은  $\mu\text{N}$  단위의 극저하중을 이용하여 미세소자 및 미소재료의 기계적 특성을 평가하는데 적합한 연속압입시험기법이다. 이러한 특성으로 인해 nanoindentation 기법은 미세 상에 대한 압입시험이 용이하고, 압입하중-변위곡선으로부터 간단하게 경도 값을 얻을 수 있는 장점 등으로 인해 원자로용 저합금강의 미세조직적 강도 특성 평가에 매우 적합하다. 특히 각 상에 따라 잔류압흔과 압입 깊이가 서로 다르며, 이에 따라 경도 값이 서로 다르게 나타난다는<sup>1,3)</sup> 특성이 적극 활용될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 microindentation 기법을 통해 7종의 저합금강에 대한 기본구조 및 밴딩구조의 특성을 평가함과 동시에 nanoindentation 기법을 통해 각 구조를 이루고 있는 내부의

세부 상들에 대한 기계적 특성을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

### Indentation 기법을 이용한 상 판별

페라이트상은 뚜렷한 소성변형거동 시 흔히 나타나는 다량의 pile-up을 동반한 concave 형의 압흔을 가지는 반면 오스테나이트상은 하중제거시 탄소성 변형거동의 특징을 나타내는 convex 형의 압흔을 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 이들 상에 대해 동일한 하중에서 행해진 연속압입시험으로부터 얻어지는 압입하중-변위곡선의 개형이 서로 다르게 나타난다<sup>1)</sup>.

한편 철강 재료에 대해 압입 위치의 이동을 통한 연속적인 경도 값을 측정하는 경우 서로 다른 상이나 석출물들에 의해 다양한 경도 값이 얻어지며, 이들 경도 값은 동일 상에 대해 일정한 범위에서 분포함으로써 상을 판별해 낼 수 있는 기반이 될 수 있음을 알 수 있다<sup>3)</sup>.

### Indentation 기법을 이용한 경도 평가

Indentation 기법에서는 실험에 대한 기본 데이터로서 압입하중-변위곡선이 얻어지게 된다. 이 곡선을 이용하여 상 판별을 위한 각 상이 가지는 경도를 이용하여 분석이 가능하다. 기하학적인 유사성을 지닌 압입자를 이용하여 측정된 압입하중-변위곡선의 해석을 통해 일반적으로 평가되는 경도값은 최대압입하중  $L_{max}$ 에서의 평균접촉압력  $p_m$ 으로 정의되며, 다음의 관계식을 통해 구해진다.

$$H = p_m = \frac{L_{max}}{A} \quad (1)$$

여기서, 실제 압입자와 시편이 접촉하고 있는 면적을 결정하는 것이 매우 중요하며, 이를 구하는 대표적인 방법으로는 접촉면적  $A$ 를 접촉 깊이  $h_c$ 에 관한 함수로 표현하는 것이다. 그러한 표현들 가운데  $A$ 를  $h_c$ 에 관한 멱급수로 나타낸 Oliver & Pharr 식<sup>4)</sup>이 가장 많이 사용된다.

$$A = 24.5h_c^2 + C_1h_c^3 + C_2h_c^{1/2} + C_3h_c^{1/4} + \dots + C_8h_c^{1/128} \quad (2)$$

### 복합물성의 평가

재료의 특성에 대해 부피비가 클수록 재료의 물성에 대해 미치는 영향은 크다는 이론에 근거하여 부피 분율과 경도 값을 이용하여 재료 전체의 물성을 평가할 수 있다. 따라서 경도 값

과 부피분율에 관한 데이터들로부터 식 (3)과 같은 경도  $H$ 와 부피분율  $V_f$ 의 곱의 합으로 나타나는 혼합률(rule-of-mixture)을 이용하여 복합 경도를 평가할 수 있다.

$$H = H_{(phase A)} \cdot V_{f(phase A)} + H_{(phase B)} \cdot V_{f(phase B)} + H_{(phase C)} \cdot V_{f(phase C)} \quad (3)$$

## 3. 실험 방법

### 실험재료 및 시편연마

본 연구에서는 원자로 압력 용기용 SA508-Gr.3 저합금강을 실험재료로 사용하였다. 이들은 VCD-1, VCD-2, VCD-3 등 VCD(Vacuum Carbon Deoxidation) 공법에 의해 제조된 3가지 시편과 VCD+Al(VCD 공법에 Al을 미량 첨가) 공법에 의해 제조된 시편, Si-killing+Al(Si 탈산 및 Al 첨가) 공법에 의해 제조된 시편 등 서로 다른 공정법으로 제조한 재료들 및 일본산 SA508-Gr.3 단조강(JFL)과 일본산 SA533-B1 압연재(JRQ)를 사용하였다. 이들 각각에 대한 조성은 표 1과 같다.

각 시편들은 nanoindentation을 수행하기 용이하도록 10 mm × 10 mm × 1 mm의 정사각형 판상 형태로 가공되었다. 압입 시험에 앞서 시편 표면 준비는 기계적 연마와 전해 연마, 두 가지의 연마 방식을 통해 진행되었다. 또한 예칭은 기계적 연마된 시편은 2% nital etching 방법을 통해, 전해연마된 시편은 연마 시 사용된 것과 동일한 50% 물, 50% perchloric acid를 혼합한 용액을 이용하여 전해 전압, 전류 조건의 변화를 통해 이루어졌다.

### 압입시험

각각의 조직들이 가지는 강도특성 평가를 위해서 미소경도 시험기인 AKASHI 사의 MVK-H2를 이용하였다. 또한 조직 내부의 세부상들에 대한 정밀한 특성 분석을 위해서 원자현미경(AFM)이 부착된 Hysitron 사의 Triboscope II를 이용하여 nanoindentation을 실시하였다. MicroVickers 경도 시험법의 경우는 Vickers 압입자를 이용하여 25 gf, 50 gf에 대해서 경도 평가를 수행하였으며, 실험 수행 전 표준시편을 통한 수차례의 사전 실험으로부터 눈으로 관찰하여 얻어지는 결과에 의한 오차를 최소화할 수 있도록 하였다.

Nanoindentation 기법의 경우, 최대하중 1000 μN, 하중부가속도 100 μN/sec로 행하였으며, 압입자는 저하중 연성 재료의 물성평가를 위해 널리 사용되는 삼각뿔 형태를 가지는 Berkovich

Table 1. Chemical compositions of the tested materials

Specimen	Chemical composition (wt.%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
VCD-1	0.18	0.08	1.43	0.008	0.003	0.78	0.04	0.52	0.005	0.06	0.006
VCD-2	0.19	0.07	1.38	0.007	0.003	0.78	0.16	0.54	0.006	0.06	0.007
VCD-3	0.19	0.04	1.42	0.007	0.002	0.86	0.14	0.51	0.006	0.035	0.003
VCD+Al	0.18	0.10	1.46	0.006	0.003	0.86	0.15	0.51	0.0018	0.03	0.004
Si-killing+Al	0.21	0.24	1.36	0.007	0.002	0.92	0.21	0.49	0.022	0.03	0.005
JFL	0.17	0.25	1.44	0.004	0.002	0.75	0.20	0.51	0.016	0.01	0.004
JRQ	0.18	0.24	1.42	0.017	0.004	0.84	0.12	0.51	0.014	0.14	0.002

압입자를 사용하였다. 또한 상의 관찰을 통해 압입 위치를 선정하고 압입된 양상을 관찰하기 위해서 nanoindenter와 일체를 이루고 있는 AFM을 이용하였다. 압입 위치의 선정 후에는 그 지점에 대한 nanoindentation을 행하고, 이로부터 압입하중-변위곡선으로 나타나는 기본 데이터들을 얻게 된다. 또한 압흔 및 상 분포 양상에 대한 2차원 및 3차원 영상을 AFM으로부터 얻게 된다.

#### 복합물성의 평가

각 조직 및 그 내부의 세부상들에 대한 indentation으로부터 얻어진 경도 값들은 조직 및 상의 특징에 따라 일정 범위에 대

해 분포하게 된다. 이 때 각 범위에 속하는 경도 값의 수와 각 상의 기하학적 형태를 고려하여 부피 분율을 계산하게 된다. 재료의 특성에 대해 부피비가 클수록 재료의 물성에 대해 미치는 영향은 크다는 이론에 근거하여 부피 분율과 경도 값을 이용하여 재료 전체의 물성을 평가할 수 있다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 미세조직의 분석

본 연구에서 사용된 SA508-Gr.3 강과 일본산 SA533-B1 강

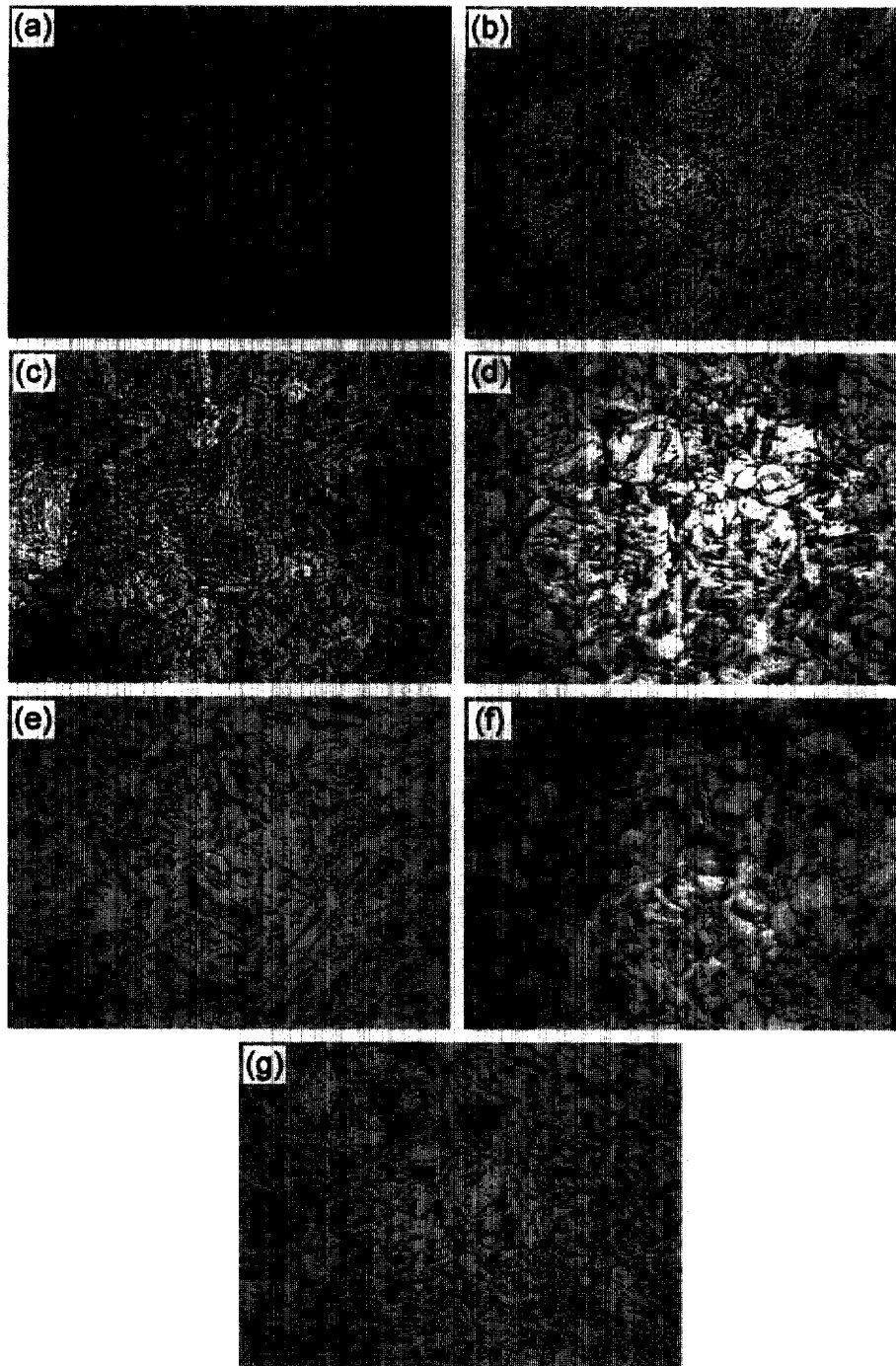


Fig. 1. Optical micrographs of the 7 specimens (a) VCD-1, (b) VCD-2, (c) VCD-3, (d) VCD+Al, (e) Si-killing, (f) JFL and (g) JRQ.

의 시편 블록에서 기본적으로 관찰되는 조직은 베이나이트이다. Nanoindentation 기법을 통한 상별 물성 평가로부터 각 재료들이 가지는 미세조직적 특성의 차이를 분석하고자 함에 앞서, 이를 용이하게 진행하기 위해 각 베이나이트 조직들에 대한 분류를 선행하였다. 먼저 조대한 페라이트 래스 사이에 두꺼운 세멘타이트의 층이 존재하는 조직을 B1이라 하였으며, 이 조직은 정도의 차이는 있었지만 거의 전 시편에서 고루 나타나고 있었다. 한편 페라이트 래스 사이에 막대 형태의 세멘타이트가 분포한, 전형적인 상부베이나이트 형태를 가지는 조직을 B2라 하였다. 또한 페라이트 래스 내부에 세멘타이트가 일정한 방위를 가지고 존재하는 조직을 B3라고 하였다<sup>7)</sup>.

VCD 계열의 시편들은 그림 1과 같이 페라이트 래스 사이에 막대 형태의 세멘타이트가 널리 분포한 전형적인 상부베이나이트 형태, 즉 B2의 조직을 나타내고 있다. VCD-1, VCD-2는 B2가 거의 주를 이루고 있는 반면, VCD-3의 경우는 B2가 주를 이루고 있음과 함께 B1이 상당량 분포하고 있다.

한편 VCD+Al 시편은 조대한 페라이트 래스 사이에 두꺼운 세멘타이트 층이 존재하고 있는 B1 조직으로 판별되었다. Si-killing+Al 시편의 경우 B1 조직과 유사하지만 뚜렷하게 B1으로써 구분되는 것이 아니라 B2와 B1 중간 단계의 상 분포를 보이고 있었다. JFL 시편은 앞서의 VCD+Al 시편과 거의 유사하지만 페라이트가 뚜렷한 래스 형태를 가지지 않고 오히려 래스 형태가 아닌 구형 또는 타원형의 페라이트와 세멘타이트가 혼재하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. JRQ 시편은 B1 조직이 주를 이루고 있으나, VCD+Al에서와 같이 균일하게 B1이 분포하고 있지는 않으며 세멘타이트 역시 일정한 규칙성을 가지고 분포하고 있지 않았다.

이들 시편들에서 특이한 것은 미세조직 관찰결과를 살펴보면 공통적으로 기본구조와 함께 밴딩(banding)구조를 가지고 있다는 것이다. 이러한 밴딩구조는 Mn의 집중에 의해 주변에 비하여 상대적으로 저온 변태조직을 가지는 것으로 알려져 있으며<sup>8)</sup>, 그림 2에서와 같이 주변부인 기본구조에 비해 상대적으로 검게 나타나고 있어 세멘타이트의 분포양이 상대적으로 많음을 알 수 있다. 이들 각 재료들에서 나타나고 있는 밴딩구조들의 미세구조는 B2, B3 조직이 주를 이루고 있으며, 페라이트 래스 사이에

Table 2. Grain sizes for the 7 specimens

Specimen	VCD			VCD+Al	Si killing	JFL	JRQ
	1	2	3				
Grain Size (μm)	59.72	62.03	68.52	30.88	26.63	18.03	16.09

침상의 세멘타이트들이 집중적으로 분포하여 매우 세밀한 모습의 미세구조를 형성하고 있음을 알 수 있다. 이러한 밴딩구조는 방향성을 가지고 시편 전체에 걸쳐 비교적 규칙적으로 배열되어 있으며, 시편의 에칭시 얼룩무늬로 나타난다.

한편 서로 다른 공정에 의해 제조된 각 재료들은 결정립 크기 및 결정립의 분포에 있어서도 다양한 특징을 가지고 있었다. 재료의 강도 특성을 결정짓는 중요한 요인중의 하나인 결정립 크기에 있어서 VCD 계열의 재료들이 비교적 큰 결정립을 가짐을 알 수 있었으며 결정립 크기 감소를 위해 Al을 추가한 VCD+Al은 상대적으로 VCD 계열의 재료들에 비해 결정립 크기가 작음을 알 수 있다. 따라서 이번 실험에서 사용된 시편들에서는 VCD>VCD+Al>Si-killing+Al>JFL, JRQ 공정에 의한 재료순으로 결정립 크기가 감소함을 알 수 있었다. 이들의 결정립 크기에 대한 자세한 수치는 표 2에서 정리하였다.

상 별 강도 특성 평가

Nanoindentation 기법을 통한 7종 강재의 구조 별 강도 특성 평가

7종의 원자로 압력용기용 강재의 강도를 평가하고자 할 경우, 이들 강재들의 미세구조는 기본 구조와 밴딩 구조로 구성되어 있으므로 이들에 대한 동시적인 고려가 필요하다. 기본 구조 및 밴딩 구조에서 평균을 이루는 결정립을 선정하여 그림 3에서와 같이 microVickers indentation을 행한 결과를 표 3에 나타내었다. VCD 계열의 세가지 재료들은 거의 유사한 경도 값을 보임을 알 수 있다. 하지만 VCD-3의 결과가 VCD-1, VCD-2에 비해서 다소 낮게 나오고 있는데, 이는 표 2에서 보는 바와 같이 VCD-3가 가지는 결정립 크기가 다른 두 재료들에 비해 크게 나타나고 있는 사실과 무관하지 않은 것으로 판단된다. 특히,

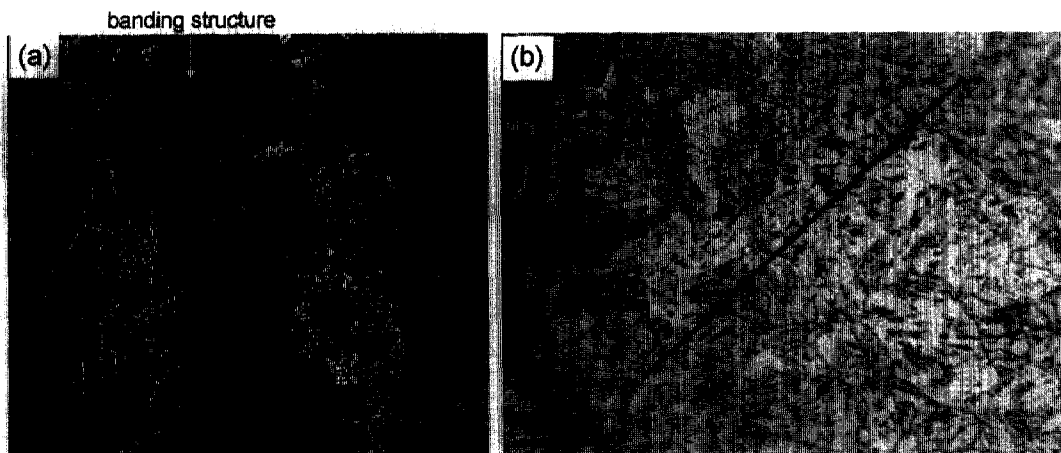


Fig. 2. Optical micrographs of banding structure.

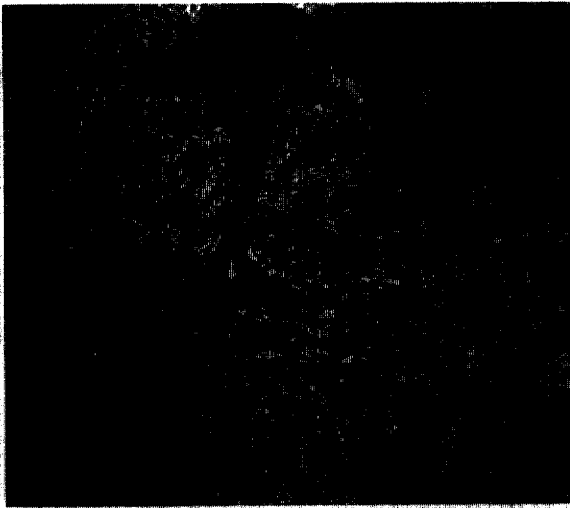


Fig. 3. MicroVickers indentation for the average grain.

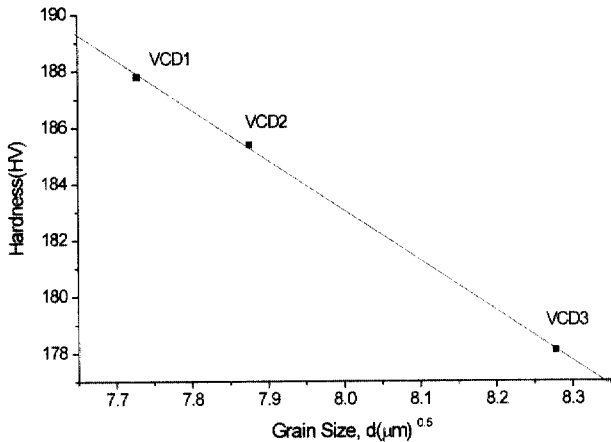


Fig. 4. Hardness vs. grain size of 3 specimens manufactured by VCD methods.

그림 4와 같이 결정립 크기의 증가에 따라 경도 값이 선형적으로 감소하고 있음으로부터 이들 구조간의 경도 차이는 결정립 크기의 차이가 지배적인 요인임을 알 수 있다.

한편 VCD+Al 시편에 대한 microVickers indentation 결과는 VCD-1에서의 결과와 거의 유사하게 나타나고 있는데, 결정립 크기가 VCD-1에 비해서 약 50%에 지나지 않는 VCD+Al에서의 경도 분석 결과가 VCD-1에서의 결과와 유사하다는 것은 재료를 구성하는 베이나이트 종류인 B1, B2 조직간의 강도 차이를 의미하는 것이다. 즉 VCD-2를 구성하고 있는 주된 베이나이트는 B2이며, VCD+Al을 구성하고 있는 주된 베이나

이트는 B1임을 볼 때 B1 상이 1.5배 이상의 높은 경도 특성을 가지는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 경향은 결정립 크기가 거의 유사한 VCD+Al과 Si-killing에서의 경도 평가에서도 유사한 결과를 나타낸다. B1, B2 조직이 혼재하고 있는 양상을 보인 Si-killing에서의 경도 결과가 B1 조직이 주를 이루고 있는 VCD+Al 조직에서의 결과보다 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

한편 JFL, JRQ에 대한 결과에서는 두 재료가 조직적 특성과 강도 특성이 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

**AFM을 부착한 nanoindenter를 통한 기본구조의 세부 상 특성 평가**

공정에 따라 각각의 재료들은 다양한 베이나이트 상의 분포 양상을 보이고 있으며 이들이 어떻게 영향을 미치는 지에 대해서 살펴보기 위해서 베이나이트 상을 구성하고 있는 페라이트와 세멘타이트가 갖는 각각의 강도 특성을 nanoindentation 기법을 통해 살펴보았다.

이 중 대표값으로써 VCD-2에 대한 세부 특성 평가를 수행하였는데, AFM을 통해서 연마 후 에칭을 통해 준비된 시편을 관찰하면 그림 5에서와 같이 고른 표면 상태를 보이는 페라이트 래스와 돌출되어 하얀 이미지로 나타나는 세멘타이트로 구분될 수 있다. 이들에 대해서 그림 6에서와 같이 nanoindentation을 행하여 그림 7과 같은 압입하중-변위곡선을 얻고 이를 분석함으로써 페라이트와 세멘타이트에 대한 경도 값을 얻을 수 있었다. 그림 8에서 나타나는 것처럼 페라이트는 시편전체에 걸쳐 고르

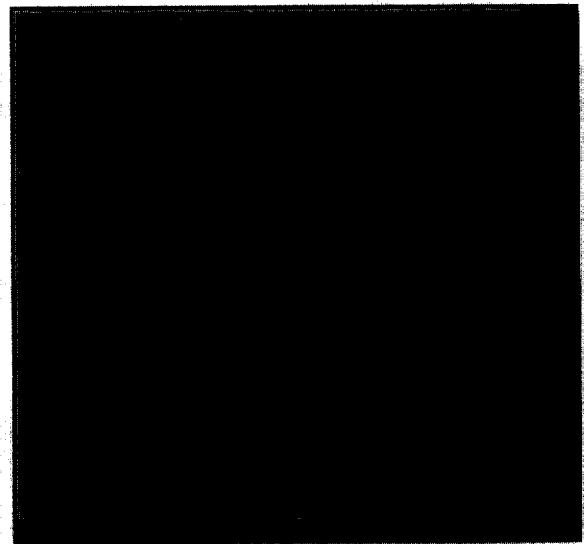


Fig. 5. AFM image of nanoindentation for VCD-2 specimen.

Table 3. Hardness values for the 7 specimen

Specimen	VCD			VCD+Al	Si killing	JFL	JRQ	
	1	2	3					
Hardness(HV, 10N)	184.9	179.8	176.2	186.7	194.4	201.3	202.1	
Hardness(HV, 0.25, 0.5 N)	Basic sturcture	187.8	185.4	178.1	187.3	196.5	203.6	198.6
	Banding structure	218.7	217.6	211.4	218.6	230.1	225.4	227.0

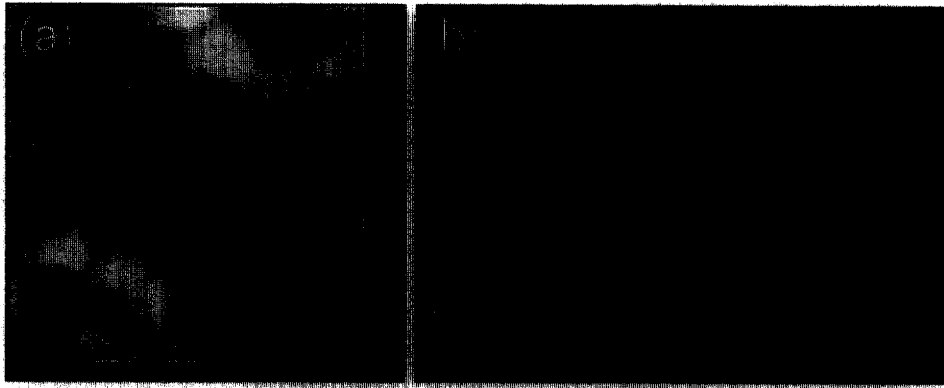


Fig. 6. AFM images of the nanoindentation for ferrite: (a) top view and (b) 3D view.

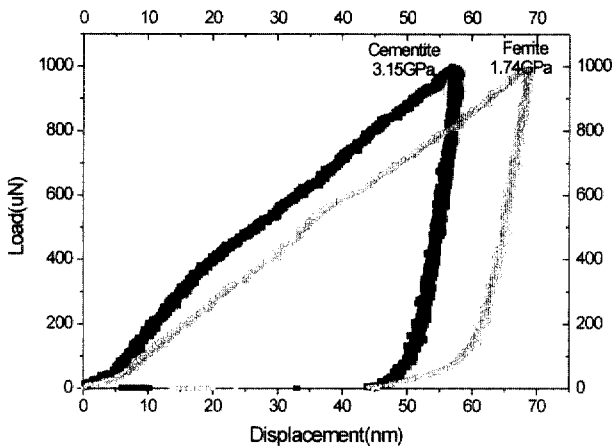


Fig. 7. Indentation load-depth curves for ferrite and cementite.

게 분포하고 있으며 마치 기지상처럼 보이는 부분이다. 페라이트는 평평한 형태로 널리 분포하고 있어 압입을 통한 평균적인 경도 값의 평가가 용이했으며, 이들 상이 가지는 경도 값은 1.5~2.05 GPa 사이에 집중 분포하고 있다. 한편 세멘타이트의 경우 그림에서 보는 것과 같이 낮은 배율에서는 하나의 덩어리 형태로 나타나지만 높은 배율을 통해 살펴보면 하나의 봉우리 형태의 것들이 모여 있는 집합체와 같이 구성되어 있다. 이 때문에

압입자가 상에 다가가 압입을 할 경우 압입자가 상으로부터 미끄러지는 현상이 빈번히 발생하여, 압입을 통한 경도 평가에 많은 어려움이 있었다. 이로 인해 측정된 결과에 대한 편차가 큰 편이다. 따라서, 압입자의 미끄러짐으로 인해 발생하는 초기 변위의 급격한 증가가 없는 결과를 분석하면 세멘타이트의 경우 2.5~3.5 GPa 범위내에서 경도 값들이 분포하였다. 이들 경도 값들의 분포에 대한 대표값으로써 페라이트의 경우 1.74 GPa, 세멘타이트의 경우 3.15 GPa로 각각 나타났으며, 경도를 나타내는 방법의 차이를 고려하여 Vickers 경도 값으로 환산하면 대략 HV 165, HV 300의 값으로 각각 나타났다.

이러한 결과의 범위에 대해서 다른 공정에 의해서 제조된 시편들에 대한 nanoindentation 결과 역시 이들 범위내에서 분포하고 있었다.

**복합 물성의 평가와 통합 강도의 비교 분석  
단일 결정립의 복합 물성 평가**

광학현미경에서 관찰된 조직 이미지들로부터, 페라이트 조직에 의해 흰색 띠와 같이 나타나는 부분은 구조내에서 래스이며, 래스의 크기는 래스 두께로 표현된다. 또한 이들 래스들의 간격은 래스 간격으로 표현되며, 이들이 가지는 크기는 표 3에 나타내었다. 따라서 앞서 nanoindentation 법을 통해 평가된 VCD-2에서의 페라이트와 세멘타이트의 경도 값과 표 3에 나타난 래스

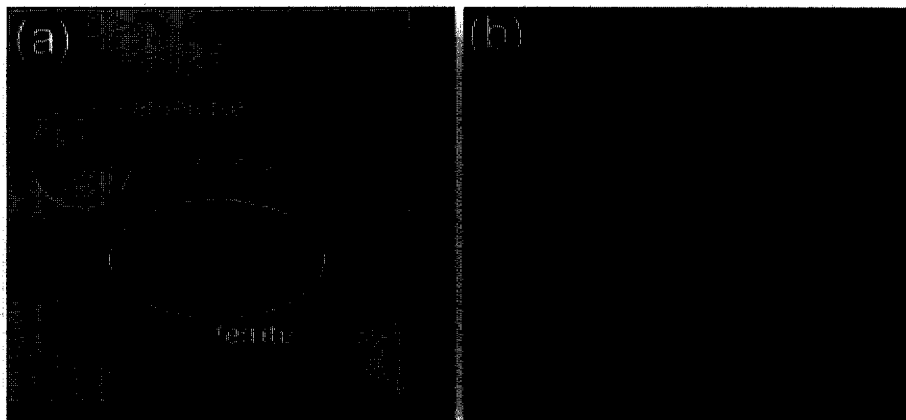


Fig. 8. AFM images of ferrite phase and cementite phase: (a) 2-D image and (b) 3-D image.

두께와 래스 간격의 결과를 결합함으로써 간략히 복합 물성을 평가하였다. 결정립계 및 미세석출물의 효과는 앞서 평가된 경도 평균 값에 포함된 것으로 판단하고, 래스 경계에는 세멘타이트가, 래스 내부에서는 페라이트가 존재하는 것으로 간략화 하여 기본 구조가 갖는 복합 경도를 평가하면 평균접촉압력으로 정의된 나노경도로서 2.107 GPa의 값이 얻어진다. 이는 HV 경도 값으로는 HV 200에 근사하는 값이다. 표 3에서와 같이 기본 구조내의 표본 베이나이트 상에 대해 0.25 N 하중으로 행한 microVickers 경도 값보다는 약 8% 정도의 차이를 두고 근사한 값을 보임을 알 수 있다. 다만, 이러한 경도 값에서의 차이는 하중의 감소에 따른 경도 값의 증가, 즉 indentation size effect(ISE)로써 설명될 수 있다. ISE에 대한 연구는 전세계적으로 다양하게 이루어지고 있으며, 이에 대한 추가적 연구가 수행된다면 위 값들은 보다 근사한 값을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

**소재의 복합 경도 평가 및 인장 결과와의 비교 검토**

각 재료들의 기본 구조 및 밴딩 구조에서 베이나이트상이 가지는 개별 경도 값들은 0.25, 0.5 N의 하중범위에서 행해진 microVickers 경도 시험으로부터 얻어졌으며, 역시 표 3에 나타나 있다. 표 4에 나타나 있는 밴딩 구조의 두께와 간격을 밴딩 구조가 평면상에서 갖는 부피로 고려하여 간략한 rule-of-mixture를 통해 구조의 복합 경도 값을 간략히 구할 수 있으며, 그 값은 표 5와 같이 주어진다. 직접적인 측정에서 얻어진 값과 유도되어 얻어진 값이 약간의 차이를 보이고 있긴 하지만 10% 전후의 오차 범위에서 잘 일치하고 있으며 그 경향성 역시 잘 나타나고 있다.

한편 재료의 유동응력 값과 압입경도 값은 식 (4)와 같이 일정한 비를 가진다고 일반적으로 알려져 있다.

$$\frac{H}{\sigma} = \text{constant} \tag{4}$$

특히 초기 Tabor의 경도와 항복강도간의 상관관계 연구에서는 상수 값이 3에 근사하는 것으로 연구되었으며<sup>9)</sup>, 이 후 다양한

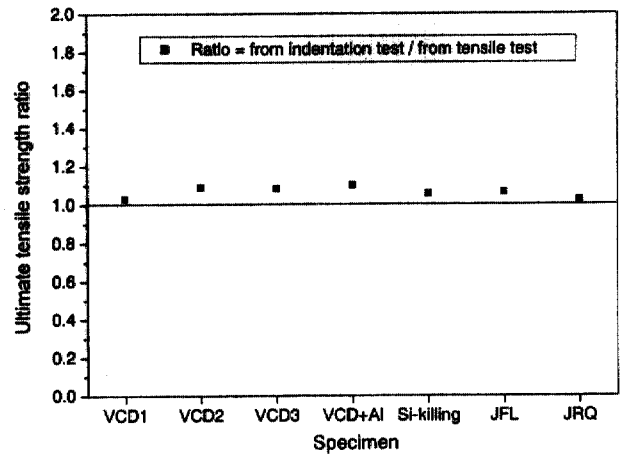


Fig. 9. Comparison ultimate tensile strengths between from indentation and from tensile test.

연구들이 진행되어 ASTM A 370-97a와 같은 규격이 제정되기에 이르렀다<sup>10)</sup>. 인장시험으로부터 얻어진 7종 강재의 인장강도와 ASTM을 기준으로 Vickers 경도 값으로부터 환산된 인장강도가 표 5에 나타나 있다. 두 강도 값을 비교해 보면 그림 9에서와 같이 경향성이 일치하며, 두 값이 같은 경우를 의미하는 실선에 거의 근접하고 있으며, 값들이 오차 범위 10% 이내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 압입 시험으로부터 추정된 강도 값이 효과적으로 활용될 수 있음을 단적으로 보여 주는 결과라 할 수 있다.

**5. 결 론**

본 연구에서는 원자로 압력용기용 저합금강에 대한 nano-indentation을 통해 강 들이 가지는 강도 특성을 평가해 보았다. 각 강을 구성하고 있는 다양한 상에 대해 nanoindentation 기법으로부터 얻어지는 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 경도 값을 얻을 수 있었으며, 이러한 경도 값들은 특정한 영역을 형성하면

Table 4. Banding structures and lath boundaries for the 7 specimen

Specimen		VCD			VCD+Al	Si killing	JFL	JRQ
		1	2	3				
Banding Structure	Thickness(μm)	170	170	150	170	190	200	170
	Spacing(mm)	1.00	1.00	1.10	0.70	0.65	1.50	0.70
Lath	Thickness(μm)	1.45	1.76	1.69	-	1.73	1.22	0.51
	Spacing(μm)	3.88	4.96	6.45	-	4.34	6.08	2.03

Table 5. Hardness obtained by direct test and indirect derivation

Specimen		VCD			VCD+Al	Si killing	JFL	JRQ
		1	2	3				
Hardness (HV)	MicroVickers(2 kgf)	184.9	179.8	176.2	185.7	194.4	201.3	199.1
	Derivation(50 gf)	192.28	190.10	182.10	192.82	203.30	206.17	204.14
Tensile Strength(MPa) (from tensile test)		597	556	545	560	602	613	630
Tensile Strength(MPa) (derived from indentation based on ASTM)		615	605	590	616	635	652	646

서 분포하고 있음을 확인하였다. 또한 경도 값들의 규칙성 있는 분포로부터 분류된 상 특성에 대하여, 압입된 강의 상의 형상을 나타내는 AFM 이미지와 실험 시 기록된 실험 위치 조건의 검토를 바탕으로 경도 값의 경향과 비교를 통해 미세상 판별이 가능함을 확인하였다. 즉, 원자로 압력용기용 저합금강에 대해서는 각 상별 경도 평가와 부피 분율에 대한 혼합률을 이용하여 유도된 경도 값과 microindentation으로부터 얻어지는 값을 비교함으로써 역시 그 타당성을 살펴보았다. 이와 더불어 ASTM 규격을 기준으로 압입시험으로부터 유도된 강도 특성과 인장시험으로부터 직접 얻어진 강도 특성 값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 미세조직의 분석과 압입시험을 통해 강의 강도 특성을 충분히 예측할 수 있으며, 사용 중 열화된 조직에 대해 indentation 기법을 이용하여 강도를 평가함으로써 열화도의 평가가 가능함을 확인하였다. 나아가 간단한 압입시험이 소재의 물성 평가 및 구조물의 안전진단을 위해 적극 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일부 지원으로

수행되었습니다.

## REFERENCES

1. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **7**, 1564 (1992).
2. J. S. Field and S. W. Swain, *J. Mater. Res.*, **10**, 101 (1995).
3. S. Suresh and A. E. Giannakopoulos, *Acta Mater.*, **46**, 2955 (1998).
4. N. X. Randall and G. Zacharie, *Thin Solid Films*, **308-309**, 297 (1997).
5. M. S. Bischel, M. R. Vanlandingham and R. F. Eduljee, *J. Mater. Sci.*, **35**, 221 (2000).
6. M. Göken, M. Kempf, M. Bordenet and H. Vehoff, *Surface and Interface Analysis*, **27**, 302 (1999).
7. J. H. Hong *et al.*, Development of Structural Steels for Nuclear Application, KAERI/RR-1724/96, 1996.
8. R. A. Grange, *Metall. Trans. A*, **2**, 417 (1971).
9. D. Tabor, *The Hardness of Metals*, (Carendon Press, Oxford, 1951).
10. A370-02e1, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM, Philadelphia, PA.