

|||||||  
論 文  
|||||||

## 화상분석에 의한 구상흑연주철의 구상화율 판정

주대헌 · 박주승\* · 김명호†

### Evaluation of Nodularity in Ductile Cast Iron by Image Analysis

Dae-Heon Joo, Joo-Seung Park\* and Myung-Ho Kim†

#### Abstract

In determining properties of ductile cast iron, it is well known that nodularity plays a significant role. Therefore, the national and/or international standards for ductile cast iron such as KS, ISO, ASTM and JIS have specified some methods for evaluating it. However, most of standards have not recommended the methods using image analyzer which is known as an objective analyzing tool for evaluating microstructure. In this study, a reliable method for evaluating nodularity by image analyzing method was proposed, and the result was compared with that from the common counting method proposed in KS D 4302-1999. It was found that there was a reasonable relationship in nodularities measured by these two methods. (Received May 8, 2001)

**Keywords :** Ductile Cast Iron, Nodularity, Image Analysis, Korean Industrial Standard

#### 1. 서 론

구상흑연주철의 가장 중요한 미세조직적 특징은 외부 응력에 의한 크랙 전파를 억제하는 효과를 지닌 구상의 흑연이 존재한다는 것이다. 이로 인해 구상흑연주철은 다른 주철류에 비해 우수한 기계적 특성을 나타내는 물론 주강이나 단조강에 비견할 만한 강도와 인성을 나타내는 것으로 알려져 있다.[1,2] 구상흑연주철은 우수한 기계적 특성과 뛰어난 주조성과 경제성 등으로 인해 수송기계, 공작기계 및 산업기계 등 광범위한 산업분야에서 중요한 기초소재로 사용되고 있다.

구상흑연주철의 기계적특성에 영향을 주는 미세조직적 인자로는 구상화율, 흑연입수, 기지조직의 펄라이트/페라이트 비 및 탄화물의 존재 유무 등이 있다. 이들 중 구상화율은 구상흑연주철의 기계적 특성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.[1] 이로 인해 세계 각국의 산업규격은 물론 ISO 규격에서도 구상화율을 구상

흑연주철의 평가기준으로 명시하여 관리하고 있다.[3-7]

구상흑연주철에 대한 한국산업규격인 KS D 4302는 1999년 개정되기 전까지만 해도 일본의 NIK 규격(일본 주물협회 규격)과 유사하게 모양계수(shape factor)를 고려하여 구상화율을 판정하였으나, 현재는 ISO 규격과 동일한 방법으로 구상화율을 판정하고 있다. 개정 전후의 KS D 4302에서 제시하는 구상화율 판정법의 큰 차이로는 그 판정방법의 차이는 물론 구상화율에 대한 합격기준 역시 70%와 80% 이상으로 상이함을 보이는 것이다. 또한 개정전 규격인 KS D 4302-1994에서는 구상화율 판정에 형상계수를 도입함으로써 영상분석이 용이하였으나, 개정된 KS D 4302-1999에서는 영상분석법에 의한 구상화율 판정에 대한 기준이 확실히 정립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 측정자의 주관에 개입될 소지가 적은 화상분석법을 이용하여 구상흑연주철의 품질 기준 중 가장 중요한 요소인 구상화율에 대한 판정법

인하대학교 재료공학부(School of Materials Science and Engineering, Inha University)

\*기술표준원 금속과(Agency for Technology and Standard)

†E-mail : mhkim@inha.ac.kr

을 비교 평가함으로써, 영상분석법에 의한 객관적인 구상화율 측정기준을 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 다양한 흑연 형상을 갖는 주철 시편들을 입수하여 KS D 4302-1999에서 제시한 방법에 따른 사진비교법과 본 연구에서 제안한 영상분석법으로 흑연의 구상화율을 측정하였다. 사진비교법을 이용하여 구상화율을 측정한 경우에는 KS D 4302-1999에 제시된 6종의 표준사진과 분석 시료의 현미경사진에 존재하는 개개 흑연을 비교하여 표준사진에 대한 형태번호를 부여한 후 형태번호에 따라 구분한 전체 흑연 입수 대비 형태번호 V와 VI을 갖는 흑연입수의 비로 흑연구상화율을 측정하였다. 한편, 영상분석법을 이용하여 구상화율을 측정한 경우에는 영상분석 전용 프로그램인 Image-Pro Plus 3.0을 이용하여 표준사진에 대한 흑연형태별 면적분율 분포를 조사하여, 상대빈도 분포를 얻은 후 이를 토대로 형태번호 IV와 형태번호 V의 면적분율 분포범위 및 존재 확율을 고려하여 실제 시료의 흑연 구상화율을 측정하였다. 영상분석법을 이용한 구상화율 측정방법에 대해서는 실험결과에서 자세하게 다루었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 표준사진에 대한 구상화율 측정 및 형상계수 설정

그림 1은 KS D 4302-1999에 제시된 표준사진과 이를 영상분석한 결과이다. 형태 2를 제외하고는 모든 표준사진의 분석결과에서 흑연면적분율이 정규분포 형태를 갖는 것을 알 수 있었다. 그림 2는 그림 1에서 얻은 흑연면적분율 분포도를 상대빈도수에 대한 흑연면적분율의 확률 분포함수로 표현하여 하나의 그래프에 옮겨 놓은 것이다. 그림에서 보면 형태번호 IV, V와 형태번호 II, III의 흑연면적분율 분포범위가 유사한 것을 알 수 있다. KS D 4302-1999에서는 형태 V와 VI이 전체 흑연에서 차지하는 비율로 흑연의 구상화율을 규정하고 있으므로, 영상분석으로 형태번호 IV와 V를 구분하기 어렵다는 것은 영상분석을 통해 KS D 4302-1999에 의한 구상화율 분석이 불가능할 수 있음을 의미하는 것이다. 실제로도 KS D 4302-1999에서

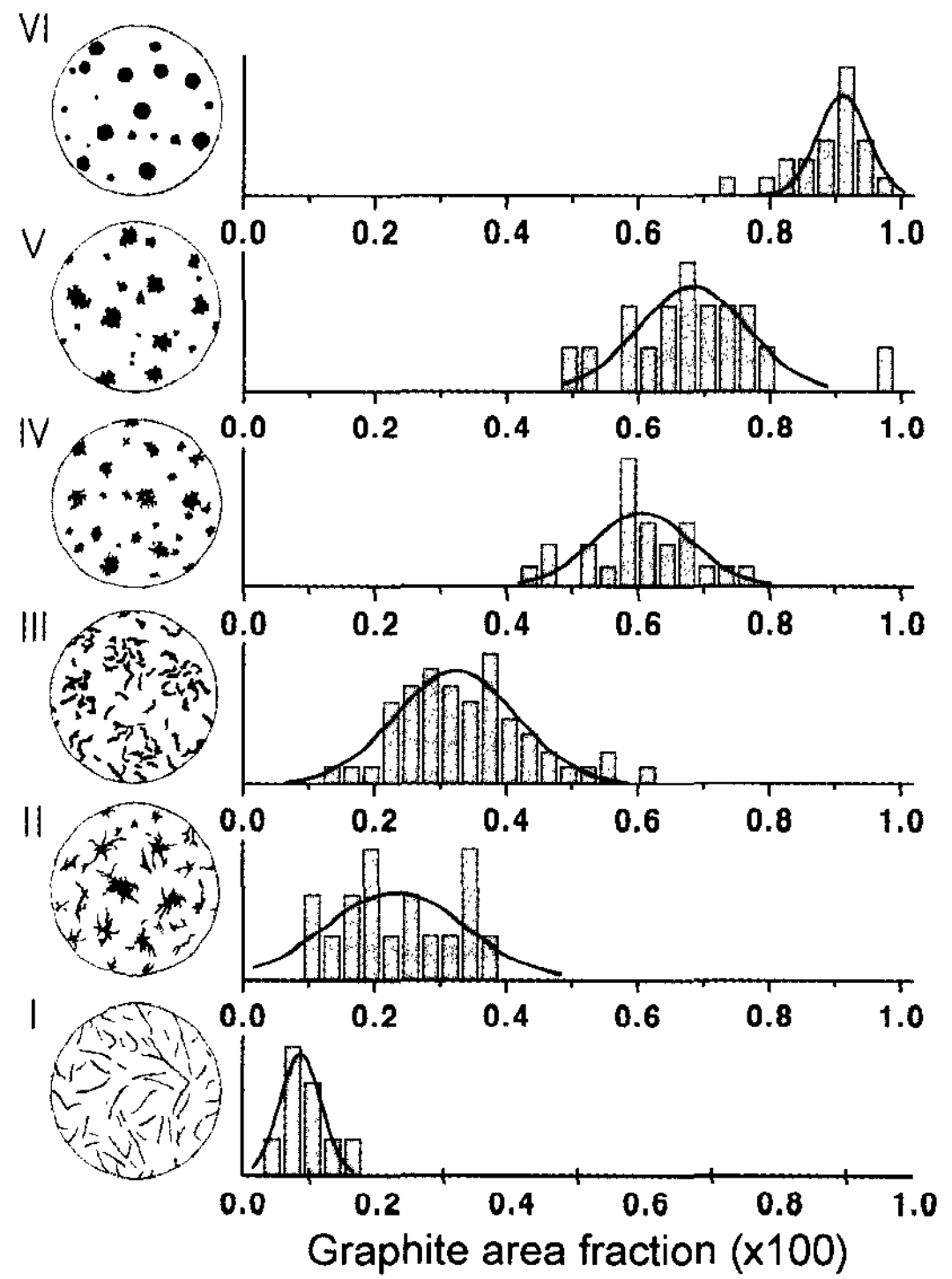


Fig. 1. Reference diagrams and distributions of area fraction for graphite form designated by KS D 4032-1999.

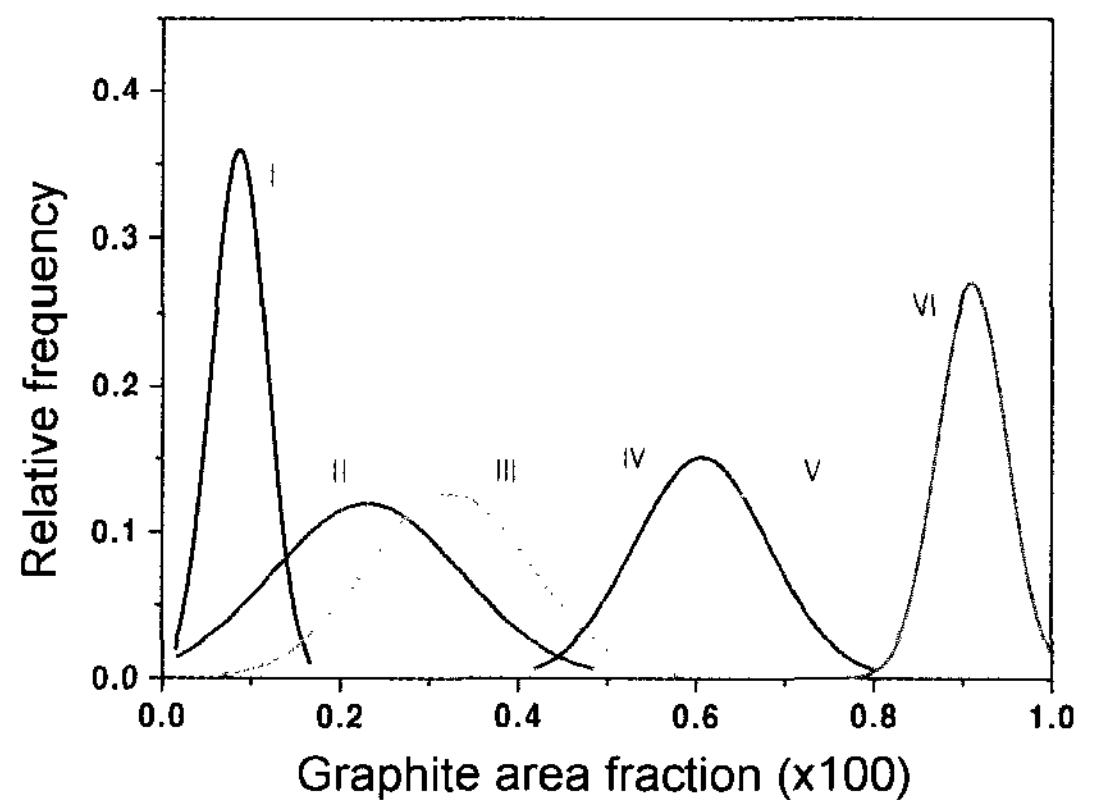


Fig. 2. Gaussian distributions of graphite area fraction designated by KS D 4032-1999.

규정한 형태번호 IV와 V를 개개의 흑연에 대해 세밀하게 관찰하여 보면, 그 두 형태에서 표현하는 개개의 흑연을 명확히 구분하기 어려움을 알 수 있다. 따라서 영상분석법을 이용하여 흑연의 구상화율을 측정할 경우 형태번호 III의 흑연을 완전히 배제하고 형태번호

형태번호 IV의 흑연 편입을 억제할 수 있는 기준을 마련하는 것이 필요하다고 판단되었다.

영상분석법을 이용하여 구상화율을 측정할 경우에는 개정전 규격인 KS D 4302-1994에서 제시되었던 방법과 같이 형상계수를 도입하는 것이 친숙한 접근방법이라고 볼 수 있다. 이러한 접근방법 중 가장 간단한 방법으로서 KS D 4302-1999에서 제시한 사진비교법을 응용하여, 형태번호 V와 VI의 면적분율을 갖는 흑연을 형상계수 1로 규정하고 기타 흑연을 형상계수 0으로 규정하여 흑연 구상화율을 계산할 수 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 이러한 방법을 이용할 경우 형태번호 IV와 V의 면적분율 범위가 겹치는 부분이 많아 측정결과의 신뢰성을 확보하기 어렵다고 판단되었다.

이에 따라 본 연구에서는 이상의 문제점을 극복하기 위한 방안으로 2가지 형태의 영상분석 방법을 제시하여, 사진비교법에 의한 측정결과와 비교함으로써 이 방법들에 대한 신뢰성을 평가하기로 하였다. 본 연구에서 영상분석을 위해 첫 번째 도입한 방법에서는 형태번호 III과 IV의 교점과 형태번호 IV와 V의 교점 사이에 존재하는 면적분율을 갖는 흑연을 형태번호 IV로 규정하고 이 부분에 대해 임의의 형상계수를 부여하여 식 (1)에 따라 흑연 구상화율을 구하였다.

$$Nodularity(\%) = \frac{S_G \times n_{IV} + 1 \times (n_V + n_{VI})}{n_I + n_{II} + n_{III} + n_{IV} + n_V + n_{VI}} \quad (1)$$

여기서  $n_i(i=IV\sim VI)$ 는 각각의 형태번호를 갖는 흑연입수이며,  $S_G$ 는 임의로 부여한 형상계수 값이다. 식 (1)에 따라 구상화율을 계산하는데 이용한 형상계수 값과 흑연면적분율 범위는 표 1에 나타내었다.

또 다른 방법에서는 형태번호 IV의 흑연이 출현할 확률을 고려하여 형상계수를 설정하였다. 형태번호 IV를 갖는 흑연은 일반적인 구상흑연 주철품에서 거의

Table 1. Graphite shape factors assigned for calculating nodularity by Equation 2

Graphite form	IV	V, VI
Range of graphite area fraction(%)	47~65	>65
$S_G$	0.1	0.1
	0.3	0.3
	0.5	0.5
	0.7	0.7
	0.9	0.9

존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 표준사진을 영상분석한 결과로는 형태번호 IV와 V를 구분할 수 없으므로, 본 연구에서는 두 흑연형태 간의 면적분율이 겹치는 부분에 대해서 확실적인 존재가능성을 고려하기로 하였다.

우선 형태번호 IV의 존재를 완전히 배제한 상태에서 형태번호 V인 흑연의 면적분율 범위는 형태번호 III과 V의 교점과 형태번호 V와 VI의 교점간의 면적분율이라고 볼 수 있다. 이와 같이 고려하면 형태번호 V의 면적분율범위는 51%~82%이다.(그림 2 참조) 그림 3은 그림 2의 흑연면적분율 분포도 중 형태번호 IV와 V에 대해 면적분율 51~82%를 확대하여 그린 그래프이다. 형태번호 IV와 V의 교점인 65%의 면적분율 값을 기준으로 이보다 작은 범위인 51~65%까지는 형태번호 IV가 차지하는 면적이 크며, 이보다 큰 범위인 65~82%까지는 형태번호 V의 면적이 크다는 차이를 보인다. 그러므로 본 연구에서는 65%의 면적분율을 기준으로 두 부분으로 구분하여 형태번호 V의 흑연 존재확률을 고려한 형상계수를 계산하였다. 형상계수는 앞서 구분한 두 면적범위의 전체 면적 중 형상번호 V의 면적분율이 차지하는 면적과 이 때 형태번호 V의 흑연이 존재할 확률을 함께 고려하여 계산하였으며, 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$S_G = \frac{A_V \times \frac{P_V}{P_{IV}}}{A_{IV} + \left( A_V \times \frac{P_V}{P_{IV}} \right)} \quad (2)$$

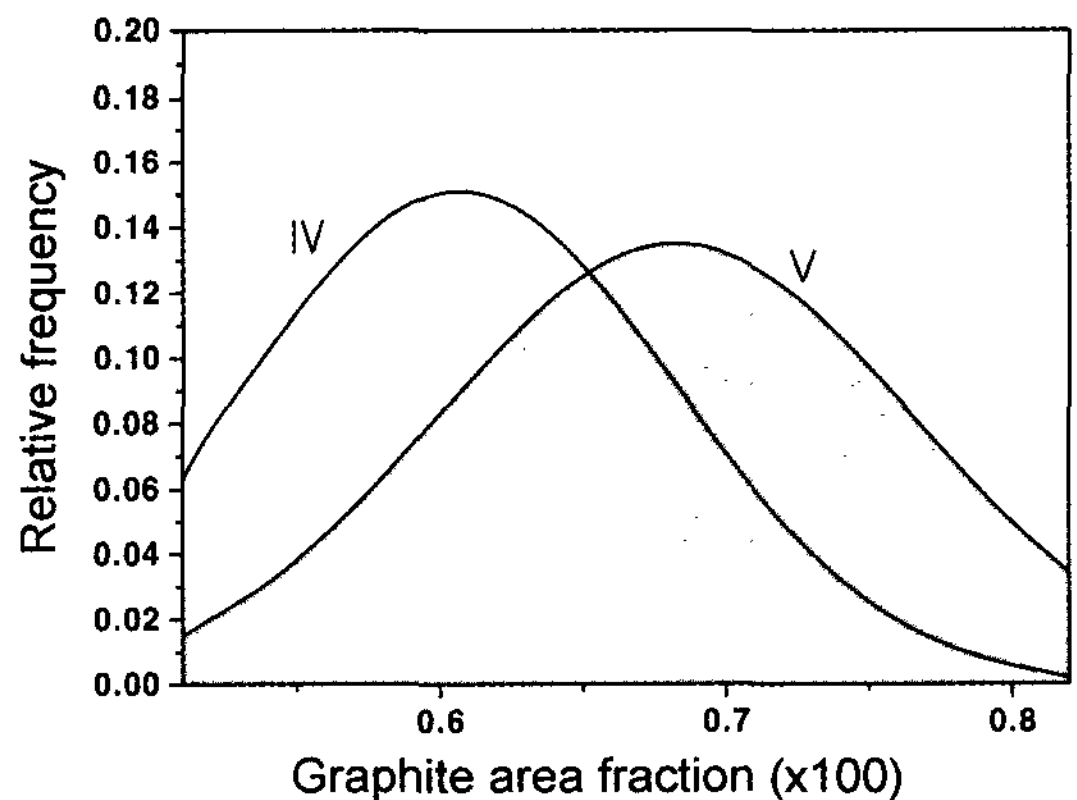


Fig. 3. Gaussian distributions of graphite area fraction of standard pictures IV and V.

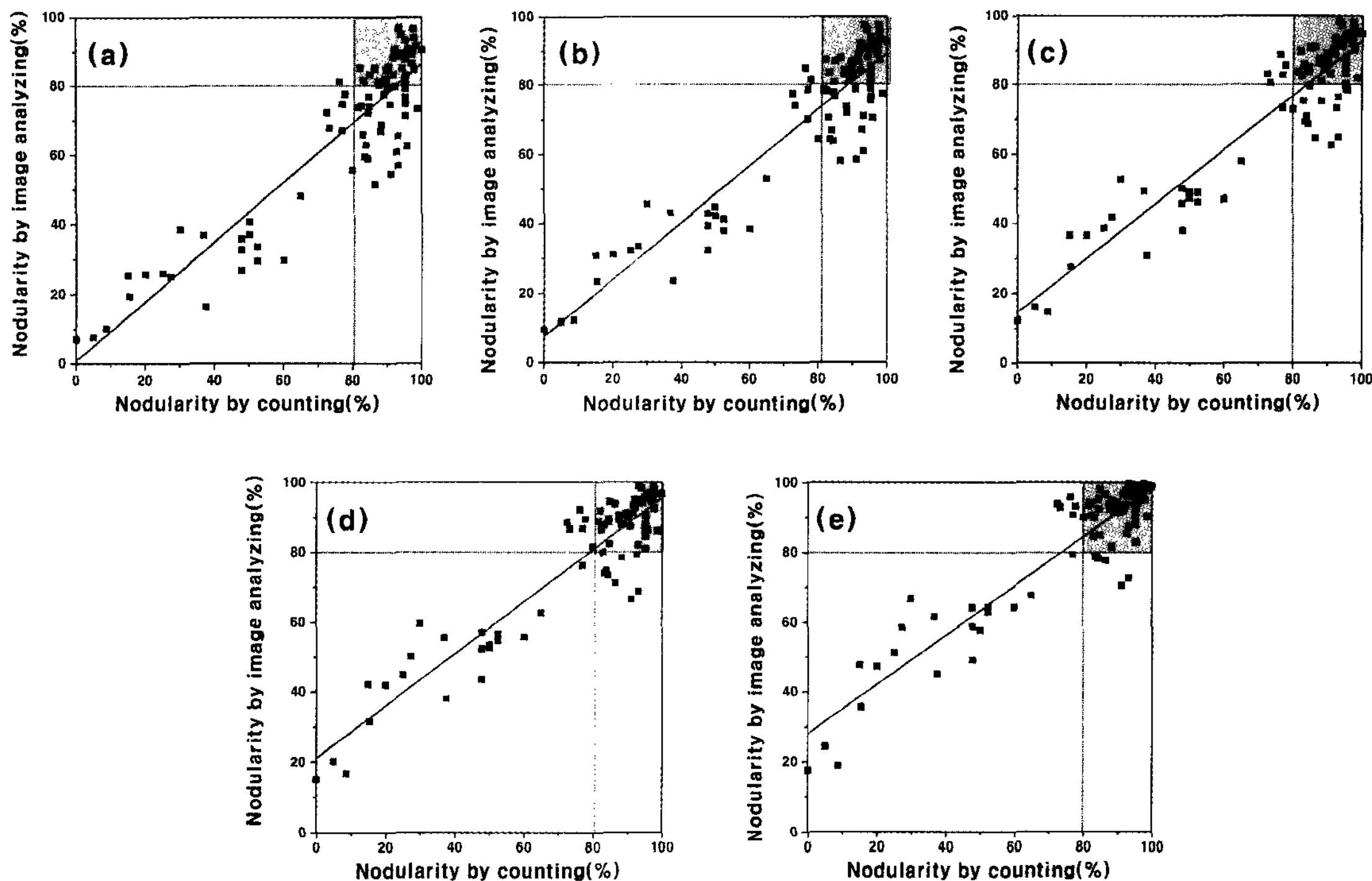


Fig. 4. Comparison of nodularities measured by image analyzing and common counting methods; (a)  $S_G = 0.1$ , (b)  $S_G = 0.3$ , (c)  $S_G = 0.5$ , (d)  $S_G = 0.7$  and (e)  $S_G = 0.9$ .

여기서  $A_j(j = IV, V)$ 는 그림 3의 흑연면적분율 분포도에서 형태번호 IV와 V 각각의 정규분포곡선이 차지하는 면적이고,  $P_V/P_{IV}$ 는 형태번호 IV와 V의 흑연이 나올 수 있는 확률을 고려한 항이다.  $P_V/P_{IV} = n$ 이라는 의미는 동일한 면적분율의 흑연일 지라도 이 흑연이 형태번호 IV일 확률보다 형태번호 V일 확률이  $n$ 배 높음을 의미하는 것이다. 이상과 같은 방법으로 형상계수를 설정한 후 식 (3)을 이용하여 흑연 구상화율을 계산하였다.

$$Nodularity(\%) = \frac{n_V \times (S_{G1} + S_{G2}) + n_{VI}}{n_I + n_{II} + n_{III} + n_{IV} + n_V + n_{VI}} \times 100 \quad (3)$$

여기서  $S_{G1}$ 은 흑연면적분율이 51~65% 범위에서의 형상계수 값이고  $S_{G2}$ 는 흑연면적분율이 65~82% 범위에서의 형상계수 값이다. 식 (3)에 따라 구상화율을 계산하는데 이용한 형상계수 값과 흑연면적분율 범위는 표 1에 나타내었다.

### 3.2. 구상화율 측정결과 비교

그림 4는 표 1에 정리한 형상계수 값을 도입하여 식 (1)에 따라 흑연 구상화율을 계산한 결과와 사진비교법으로 구상화율을 측정된 결과를 상호 비교한 것이다. 그래프에 회색으로 표시한 부분은 두 방법에 의해 측정된 구상화율이 공통으로 80% 이상인 구간을 나타낸다. 구상화율 80% 이상은 KS D 4302-1999 규격의 구상화율 합격기준으로, 이 영역은 영상분석법과 사진비교법에 의해 측정된 구상화율이 상호 연관성을 갖는지에 대한 기준이 된다고 볼 수 있다. 또한 그래프에 표시한 직선은 두 방법간의 선형연관성을 최소자승법으로 도시하여 표현한 결과이다. 임의로 도입한 형상계수 값이 0.1에서 0.9로 변화하여도 80%이상의 구상화율을 갖는 점들의 분포가 특별한 연관성을 갖는다고 보기 어려울 정도로 산포되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

그림 5는 표 2에 정리한 형상계수 값을 도입하여 식 (3)에 따라 흑연 구상화율을 측정된 결과와 사진비교법으로 구상화율을 측정된 결과를 상호 비교한 것이다. 형태번호 IV와 V의 흑연이 존재할 확률을  $P_V/P_{IV}$

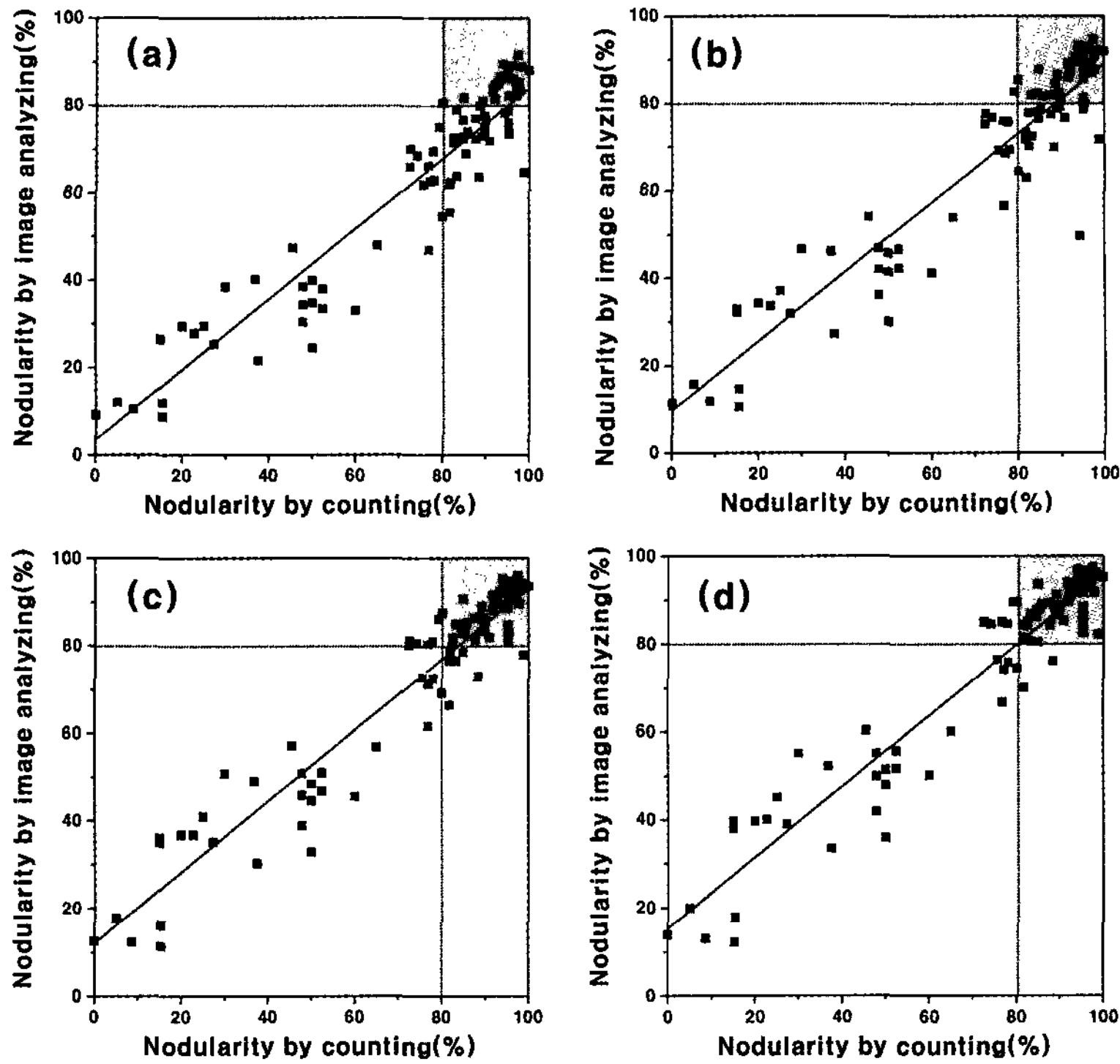


Fig. 5. Comparison of nodularities measured by image analyzing and common counting methods; (a)  $P_V/P_{IV} = 1$ , (b)  $P_V/P_{IV} = 2$ , (c)  $P_V/P_{IV} = 3$  and (d)  $P_V/P_{IV} = 5$ .

를 1에서 5까지 변화시킴에 따라 그래프에 도시된 점들의 분포는 큰 차이를 보이지 않았으나,  $P_V/P_{IV}$  값이 증가할수록 즉, 형태번호 V의 존재확률이 높을수록 사진비교법으로 구상화율을 분석한 결과와 영상분석법으로 구상화율을 분석한 결과가 일치하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

표 3은 본 연구에서 적용한 다양한 형상계수에 따라 측정된 구상화율과 사진비교법으로 측정된 구상화율 간의 선형관계 최소자승법으로 계산한 결과를 요약하여 놓은 것이다. 표 3의 a와 b는 [구상화율-사진비교법(%)] =  $a \times$  구상화율-영상분석법(%) + b의 계수들이며, R값은 중다상관계수로서 종속변수와 독립변수군의 상관관계를 나타내는 척도이다. 또한 SD는 표준편차이다. 여기서 R값이 1에 가깝고 SD가 작을수록 선형상관관계가 좋다는 의미이다. 표 3에서  $F_{IV}$ 로 표시한 부분은 형태번호 IV인 흑연의 면적분율에 0.1~0.9까지 임의로 형상계수를 부여한 경우이고  $P_V/P_{IV}$ 로 표시한 부분은 형태번호 IV와 V를 갖는 흑연의 존재확률을 고려하여 형상계수를 도입한 경우이다. 두 경우 모두 큰

Table 3. Linear relationship between nodularities by image analysis and common counting methods

Shape factor( $S_G$ )	a	b	R	SD
$F_{IV}$	0.1	0.860	0.78	9.90
	0.3	0.820	7.57	8.80
	0.5	0.780	14.36	7.95
	0.7	0.740	21.15	7.42
	0.9	0.710	27.94	7.28
$P_V/P_{IV}$	1	0.805	3.48	7.86
	2	0.804	9.30	7.15
	3	0.810	12.09	6.93
	5	0.810	15.33	6.92

형상계수값을 도입함에 따라 R값이 높아지고 SD값이 낮아지는 경향을 보였으나, 흑연의 존재확률을 고려하여 형상계수를 도입한 경우에서 보다 R값이 크고 SD값이 낮은 것으로 보아 이 방법을 영상분석을 위한 좀 더 타당한 접근방법으로 고려할 수 있다.

표 4는 두 가지 방법으로 구상화율을 측정된 경우와 사진비교법으로 구상화율을 측정된 경우간의 불일치 정

Table 4. Incorrect rate of modularity between image analyzing and common counting methods

Shape factor( $S_G$ )	Under estimated(%)	Over estimated(%)	Incorrect Rate(%)	
$F_{IV}$	0.1	33.3	1.1	34.3
	0.3	23.7	2.2	25.9
	0.5	15.1	5.4	20.5
	0.7	9.7	5.4	15.1
	0.9	6.5	5.4	11.9
$P_V/P_{IV}$	1	35.6	0.0	35.6
	2	21.1	1.1	21.2
	3	8.9	6.7	15.6
	5	3.3	6.7	10.0

도를 정리한 결과이다. 표 4에서 저평가(Under estimated)로 표현한 부분은 사진비교법으로 측정된 구상화율이 80%이상이나 영상분석법으로 측정된 구상화율 80% 미만인 경우를 전체 측정결과에 대한 비율로 나타낸 것이고, 과평가(Over estimated)는 그 반대의 경우를 표현한 것이다. 전체적으로 볼 때 큰 형상계수 값을 도입한 경우에 측정결과의 부정확도가 줄어드는 경향을 보였으며,  $P_V/P_{IV} = 5$ 인 경우에서 부정확도가 10%로 가장 낮은 값을 보임을 알 수 있다.

이상의 결과들을 볼 때 영상분석법으로 구상화율을 측정할 경우  $P_V/P_{IV} = 5$ 인 경우 사진비교법과 가장 유사한 구상화율을 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

영상분석을 이용하여 구상흑연주철의 흑연 구상화율을 측정/분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 영상분석을 이용하여 구상화율을 측정할 경우 표준시료를 분석하여 흑연형태 V와 VI을 최대한 포함시킬 수 있는 방법을 선정해야하며, 본 연구의 결과로 볼 때 형태번호 IV와 V인 흑연의 존재확률을  $P_V/P_{IV} = 5$ 로 고려하여 형상계를 도입하는 것이 타당하였다.

2. 사진비교법과 영상분석법간에는 [구상화율-사진비교법(%)] =  $0.81 \times$ 구상화율-영상분석법(%)] + 15.33의 관계를 보였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Keith D. Milles, Ductile iron data for design engineers, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., (1990)
- [2] C. Labrecque and M. Gagn, Canadian Metallurgical Quarterly, 37(1998)343-378
- [3] KS D 4302-1994, Spheroidal graphite iron casting, (1994)
- [4] KS D 4302-1999, Spheroidal graphite iron casting, (1999)
- [5] ISO 1083, Spheroidal graphite cast iron - Classification, (1987)
- [6] JIS G 5502-1995, Spheroidal graphite iron casting, (1995)
- [7] ASTM A395, Standard Specification for Ferritic Ductile Iron Pressure- Retaining Castings for Use at Elevated Temperatures, (1980)