

論 文

구상흑연주철에서 초음파 전파속도에 미치는 흑연형상의 영향

李啓完*, 梁老錫**, 朴璵洙**

The Effect of Graphite Morphology on the Propagation of Ultrasonic Wave in Ductile Cast Iron

Kye-Wan Lee*, No-Seok Yang**, Un-Su Park**

Abstract

The relationships between nodularity, tensile property and ultrasonic velocity were studied in ductile iron castings having similar matrix structure. Also, the effects of heat treatment and the number of graphite nodules on the ultrasonic velocity were investigated.

The results were as follows

- 1. The ultrasonic velocity increased proportionally with increasing nodularity and tensile strength.
2. The ultrasonic velocity in annealed and normalized state decreased average 1.7% and 3.4% respectively than that in as cast state.
3. The ultrasonic velocity increased with increasing the number of graphite nodules.

Therefore, ductile iron castings can be evaluated in the only case of castings having the same manufacturing history by ultrasonic velocity.

1. 서 론

구상흑연주철은 강에 가까운 우수한 기계적 특성을 지니고 있어 각종 기계 부품의 소재로 많이 이용되고 있다.

그러나 재질의 재현성이 부족하기 때문에 모든 제품에 대하여 검사가 필요하며, 최근 합금원소 첨가 및 열처리 등에 의한 품질고급화가 이루어지고 있어 엄격한 품질관리가 요구되고 있다.

구상흑연주철의 품질검사는 일반적으로 광학현미경을 사용하고 있으나, 이 방법은 많은 측정시간이 소요되고 검사부위가 표면 또는 일부분에 국한되며, 전수 검사가 불가능할 뿐만 아니라 반드시

피검사체를 파괴하여야 하는 어려움이 있다.

따라서 이러한 문제점을 피할 수 있는 검사방법이 요구되므로 초음파속도 등을 이용한 비파괴적 평가에 관한 연구가 이루어지고 있다. 이 것은 구상흑연주철에서 초음파의 전파속도가 흑연구상화율에 따라 변하고 있으므로 초음파의 속도를 측정함으로써 구상흑연주철의 흑연구상화율과 기계적 성질을 추정할 수 있음에 근거를 두고 있다.

구상흑연주철에서 초음파의 전파속도는 흑연구상화율 뿐만 아니라 지지조직 및 열처리상태, 비구상흑연의 형태, 구상흑연의 분포와 입도 등에 영향을 받는 것으로 보고된바 있으나, 아직 만족할만한 결론을 내리지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 구상흑연주철에서 흑연구

*한양대학교 공과대학 금속공학과(Professor, Department of Metallurgical Engineering, Hanyang University)

**한양대학교 대학원 금속공학과(Graduate Student, Department of Metallurgical Engineering, Hanyang University)

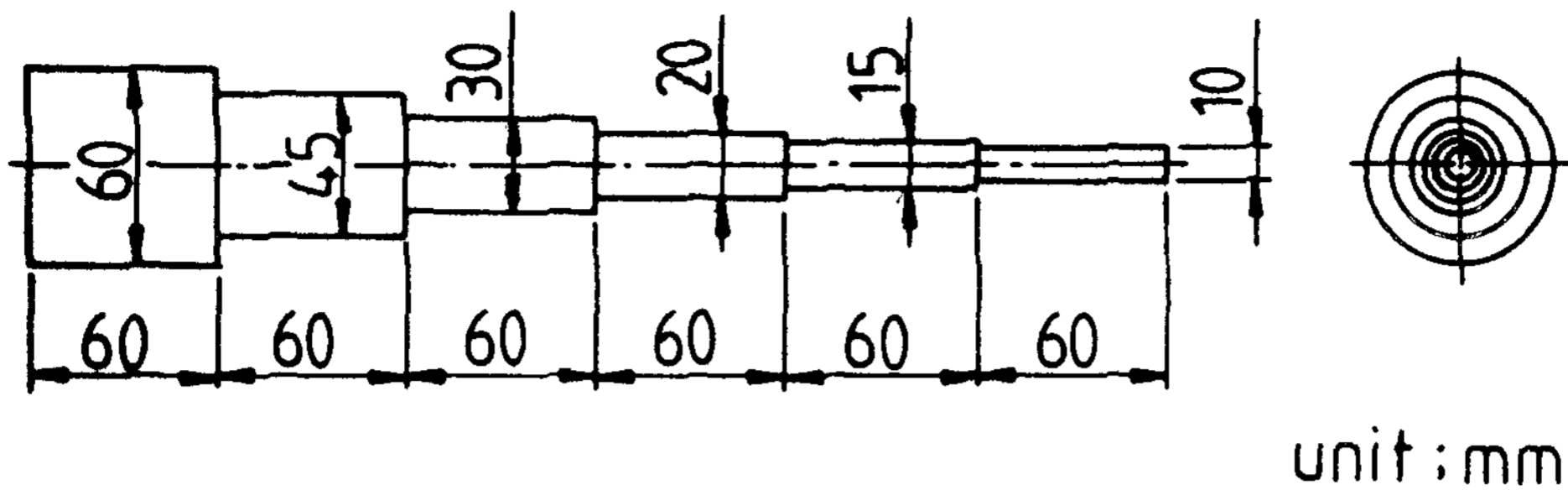


Fig. 1. Shape of mold.

상화율과 초음파 전파속도와의 관계를 검토하고 열처리조직의 변화와 흑연의 입도 및 분포가 초음파 전파속도에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험방법

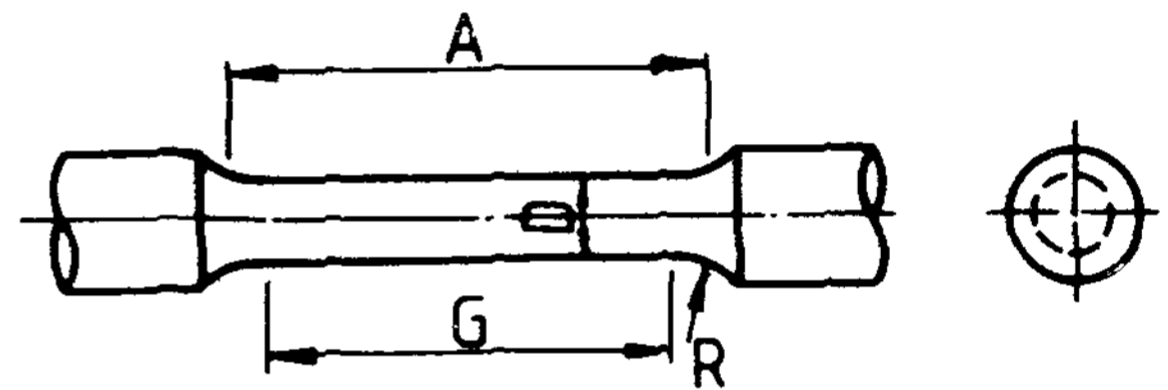
2-1. 시험편의 제조

원료선철, Fe-Si 및 전해철을 목표조성이 되도록 배합한 다음 Kryptol로에서 용해하였으며 1450°C 에서 약 2%의 CaC₂를 첨가하여 탈황처리 후 slag 를 제거하였다. 그리고 시판용 흑연구상화제인 TDCR-8로 구상화처리를 하였으며 Fe-Si 0.5%로 후접종처리하여 42mm×45mm×20mm의 생형에 즉시 주입함으로써 구상화제 처리량에 따라 구상화율이 다른 시험편을 제조하였다.

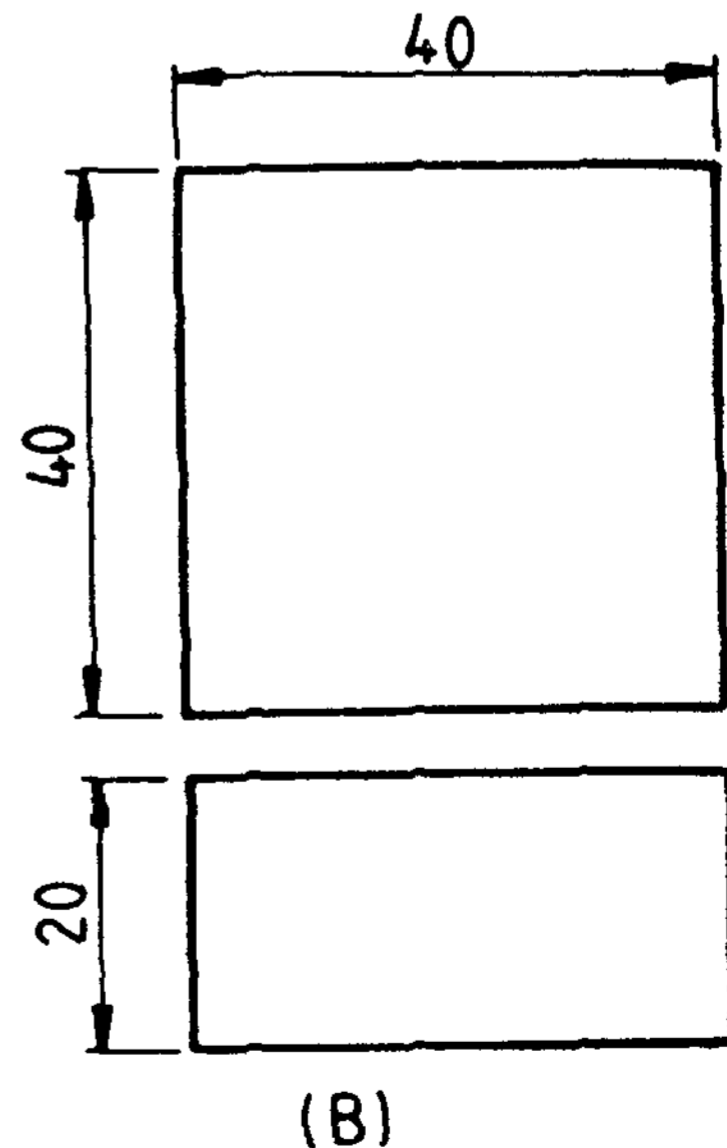
그리고 같은 방법으로 용해한 용금을 Fig. 1과 같이 직경의 변화가 있는 주형에 주입하여 흑연의

입도가 다른 시험편을 만들었다.

Table 1은 본 실험에서 제조한 시험편의 화학조성을 습식분석한 결과이며 시험편을 가공하여 Fig 2(A)와 같은 인장시험편과 Fig 1(B)와 같은



G 30.0±0.1 R 6
D 6.0±0.1 A 36 unit:mm
(A)



(B)

Table 1 Chemical composition of specimen and nodularizing treatment %.

Comp. Spec.No.	C	Si	C.E.	Mg	Nodularizing treatment(%)
1	3.33	2.96	4.32	0.010	0.4
2	3.41	2.87	4.37		0.6
3	3.40	2.91	4.37		0.7
4	3.43	2.91	4.40		0.9
5	3.43	2.70	4.33		1.4
6	3.57	2.92	4.54		1.7
7	3.58	2.76	4.50		1.9
8	3.43	2.93	4.41	0.043	2.0
9	3.40	2.80	4.33		2.2
A	3.40	2.91	4.37	0.032	1.5
B	3.49	2.81	4.43	0.015	0.7

*Mn<0.28%, P<0.12%, S<0.009%

Fig. 2. Dimensions of specimen for (A) tension test, and (B) Ultrasonic test.

초음파시험편을 만들었다. 초음파시험편은 평면연삭하여 양면을 평행하게 하였다.

2-2. 흑연구상화율과 흑연입수의 측정

100배의 배율로 촬영한 광학현미경사진을 가지고 일본주물협회가 정한 가중평균 구상화율측정법¹³⁾에 따라 흑연구상화율을 계산하였으며 흑연입수는 50배의 배율로 촬영한 조직사진에서 시험편의 단위면적(mm²)당의 흑연입수를 세었다.

2-3. 초음파 전파속도의 측정

초음파두께측정기(Krautkramer사제, Model CL-204)로 주파수가 5MHz인 탐촉자를 써서 펄스 반사법으로 초음파의 종파속도를 측정하였으며 한 개의 시험편을 주조상태에서 측정한 다음 열처리하여 다시 측정하였다.

2-4. 인장시험

만능시험기를 사용하였으며 2톤의 하중에서 cross-head speed를 10mm/min으로 하였다.

2-5. 열처리

미세조직의 변화에 따른 초음파의 전파특성을 알아보기 위해 Fig. 3과 같이 어닐링(annealing)과 노르말라이징(normalizing)처리를 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 공시재의 흑연구상화율과 기지조직

Photo. 1은 흑연구상화율이 다른 주조상태의 시

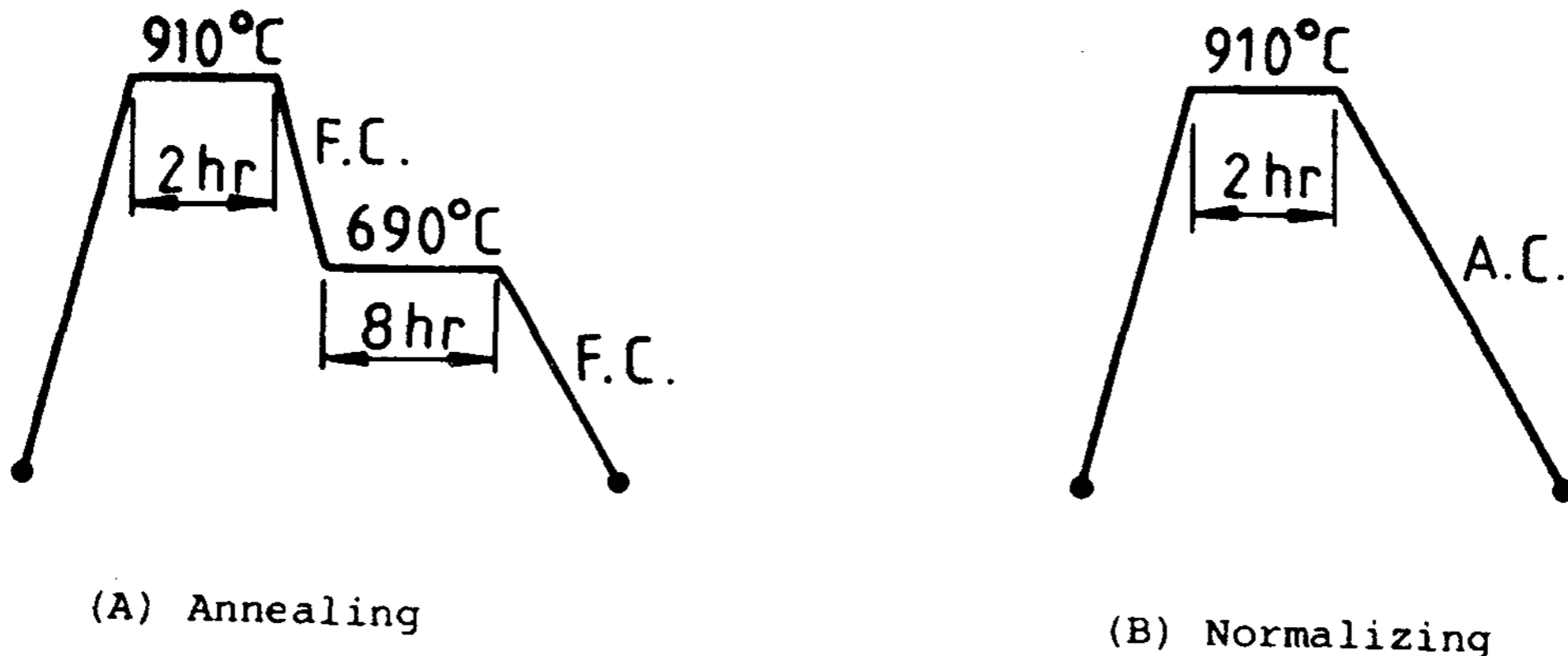


Fig. 3. Heat treatment cycle.

험편을 연마후 부식시키지 않고 흑연형상을 광학현미경으로 관찰한 사진이며, (A)는 31%, (B)는 57%, (C)는 79%, (D)는 90%의 구상화율을 나타내고 있다. Photo. 2는 부식시킨 시험편의 미세조직사진이다.

Photo. 2를 보면 흑연구상화율이 달라도 기지조직에는 큰 변화가 없음을 알 수 있으며 이는 시험편의 두께가 일정했기 때문이다. 흑연구상화처리를 과하게 했을경우 기지조직이 백선화되는 경향이 있다는 보고¹²⁾가 있으나 본 시험편의 사진에서는 백선화된 조직은 보이지 않고 있다.

Fig. 4는 흑연구상화제의 처리량에 따른 흑연구상화율의 변화를 나타낸 도표이다.

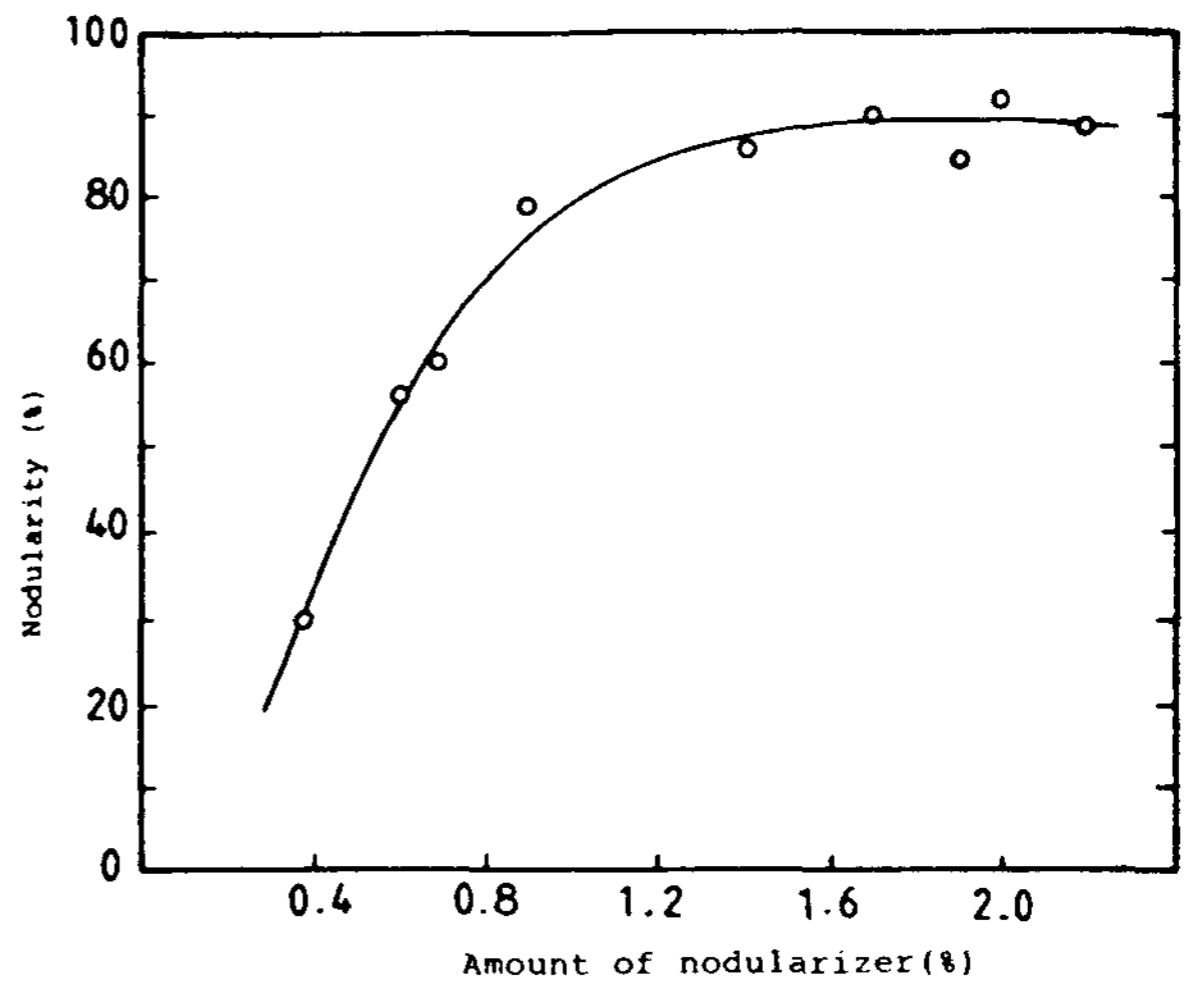


Fig. 4. Relationship between nodularizing treatment and nodularity.

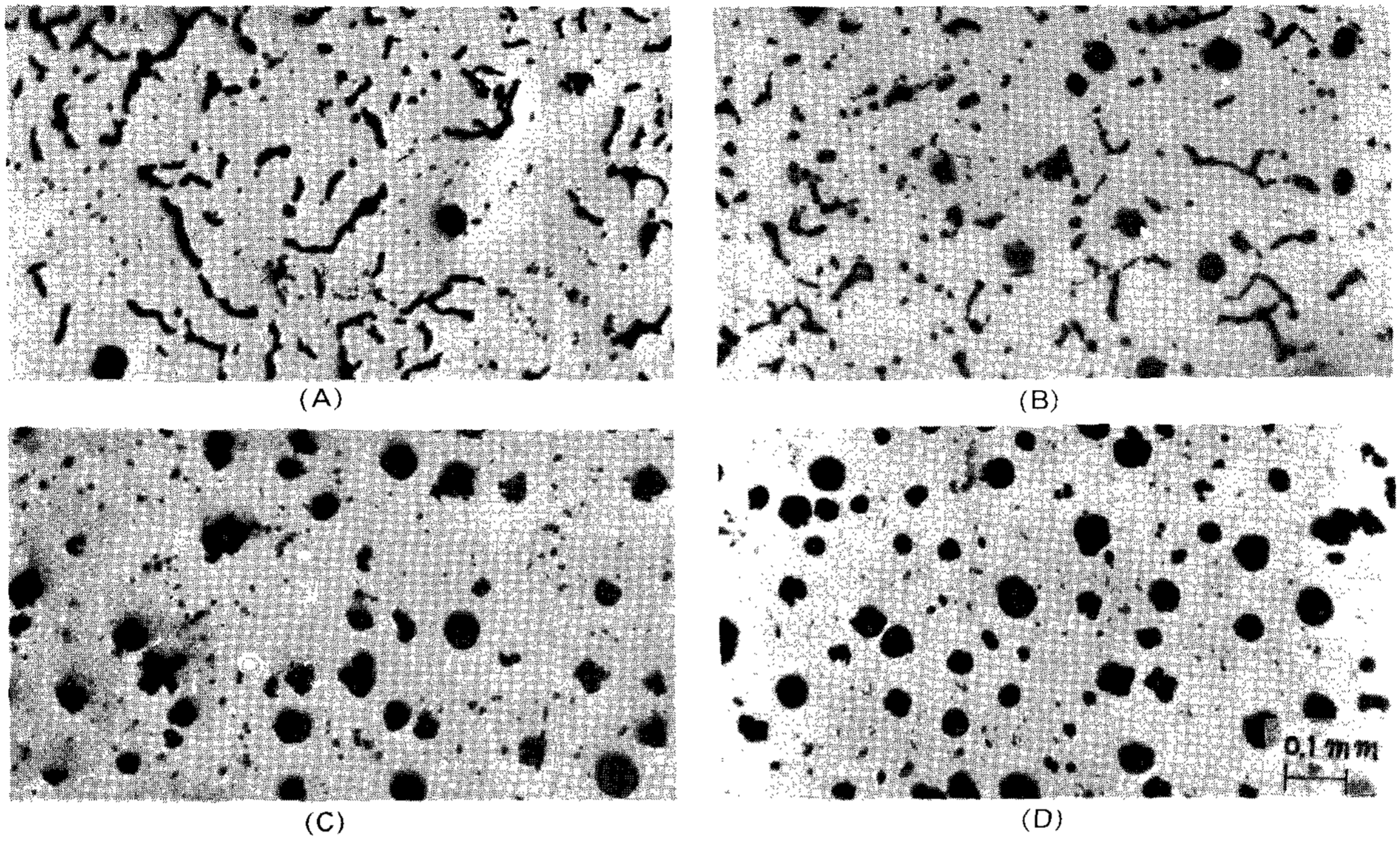


Photo. 1 Microstructure of ductile cast iron with various nodularity (x200) : (A) 31% (B) 57% (C) 79% (D) 90%.

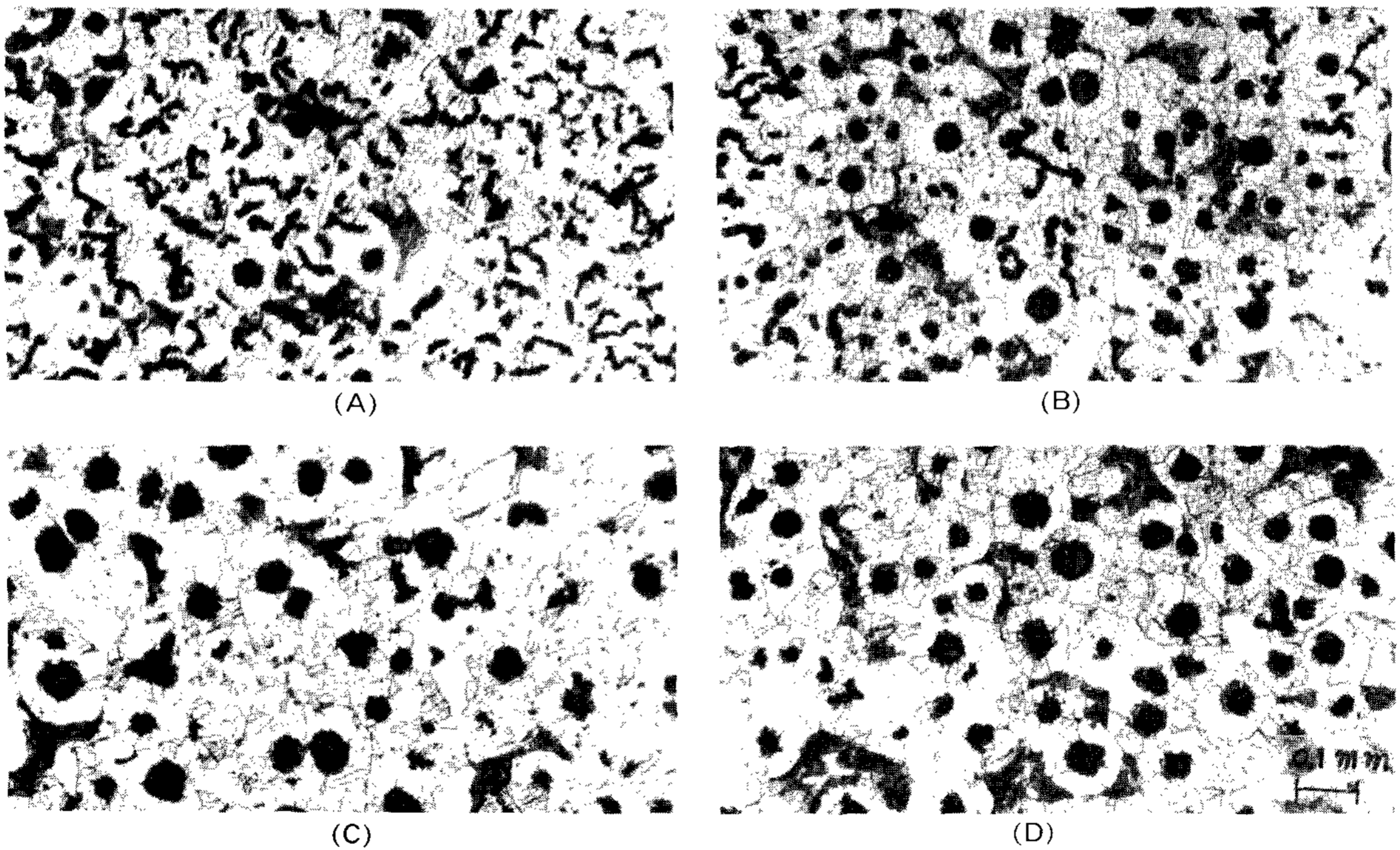


Photo. 2 Microstructure of etched specimen with various nodularity (x200, 2% nital etched) : (A) 31% (B) 57% (C) 79% (D) 90%.

처리량 1.5%까지는 구상화율이 거의 직선적으로 증가하고 있으나 그 이상에서는 큰 변화가 없다.

3-2. 흑연구상화율과 초음파 전파속도 및 인장강도와의 관계

Fig. 5는 주조상태에서 흑연구상화율과 초음파 전파속도와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림으

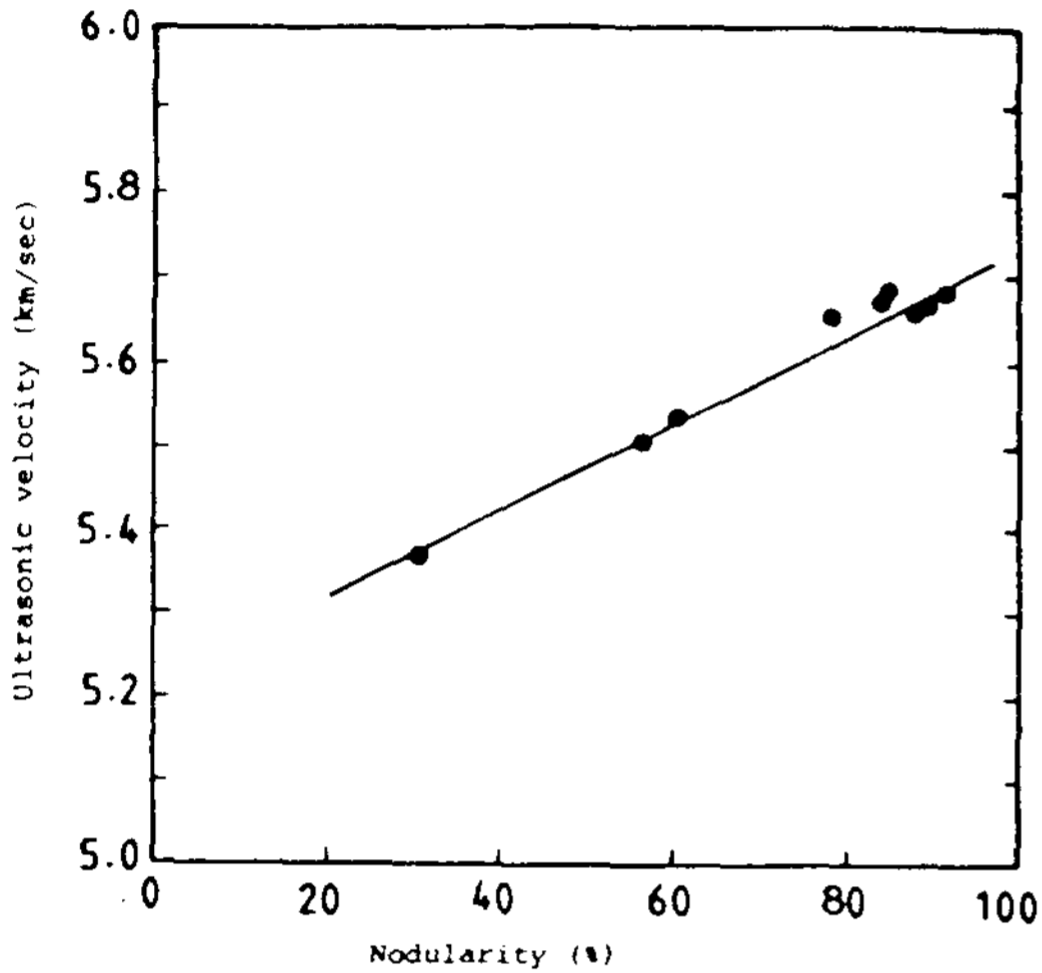


Fig. 5. Relationship between nodularity and ultrasonic velocity in as-cast condition.

로부터 흑연구상화율과 초음파 전파속도 사이에는 높은 상관성이 있으며, 일차함수적인 비례관계가 있음을 알 수 있다. 이것은 초음파가 주철의 내부를 통과할 때 흑연의 형상에 영향을 받기 때문이다. Papadakis⁶⁾는 구상흑연주철에서 흑연은 초음파의 전파매질로 작용한다고 하였고, Qin Ben-De⁷⁾는 Papadakis와 달리 흑연입자는 초음파의 전파매질로 작용하는 것이 아니라 하나의 장애물로 작용한다고 보고하였다. 즉 전자의 경우 초음파속도는 초음파가 전파되는 방향으로 놓여 있는 흑연의 단면길이가 클 수록 늦어지게 되며 흑연구상화율이 증가할 때 단면의 길이가 감소하므로 초음파속도가 증가한다는 이론이며, 후자의 경우 흑연은 초음파 전파의 장애물이므로 흑연입자에 전파된 초음파는 입자주위에서 회절하여 진행하므로 편상흑연에서 구상흑연으로 변함에 따라 진행경로가 단축되어 초음파 전파 속도가 증가한다는 이론이다.

본 실험에서 이들 메카니즘을 확인하기 위한 실험을 하지 않았지만 초음파의 전파이론으로 볼 때

흑연이 초음파의 전파매질로 작용한 것으로 생각되며 앞으로 연구하여야 될 과제라고 생각한다.

Fig. 6은 주조상태에서 흑연구상화율과 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 잘 알려진바와^{2, 9)} 같이 흑연구상화율이 증가할수록 인장강도가 직선적으로 증가하고 있다. 따라서 주조상태에서 구상흑연주철의 초음파 전파속도를 측정함으로써 구상

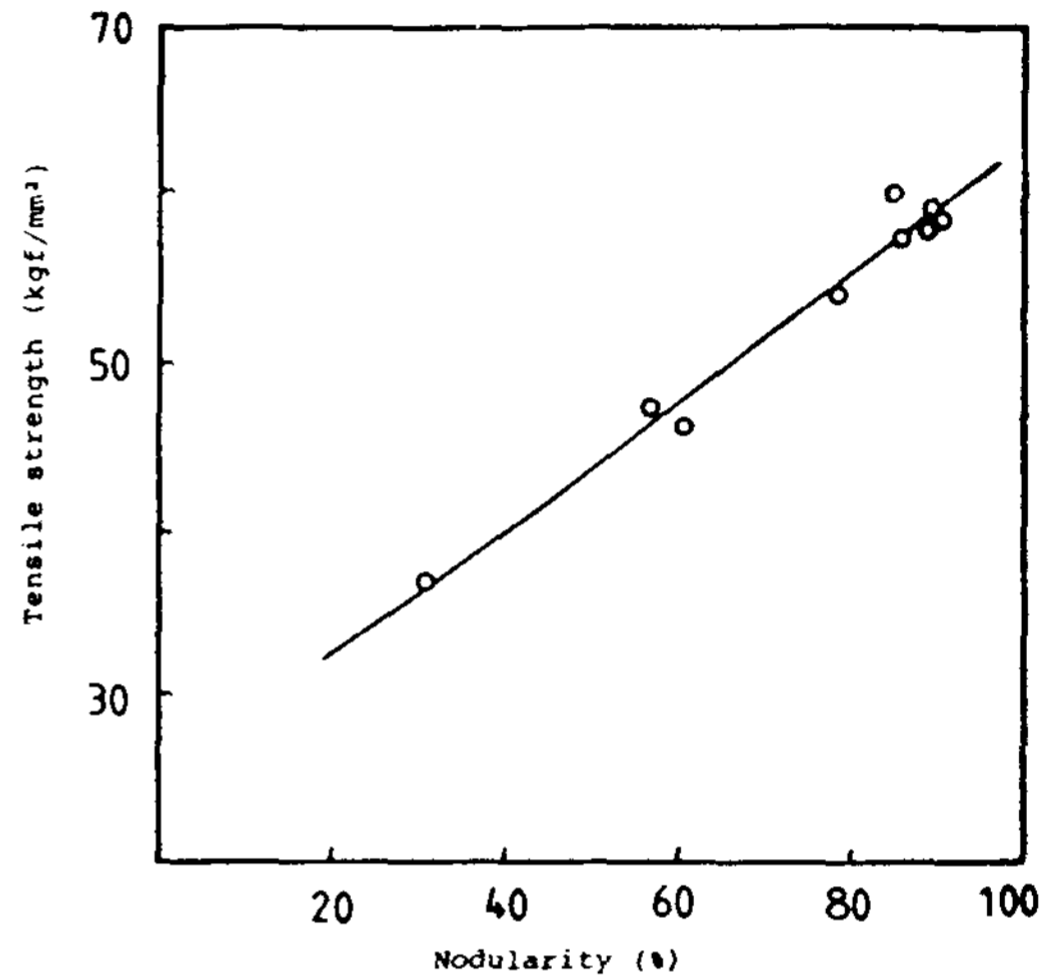


Fig. 6. Relationship between tensile strength and nodularity in as cast condition.

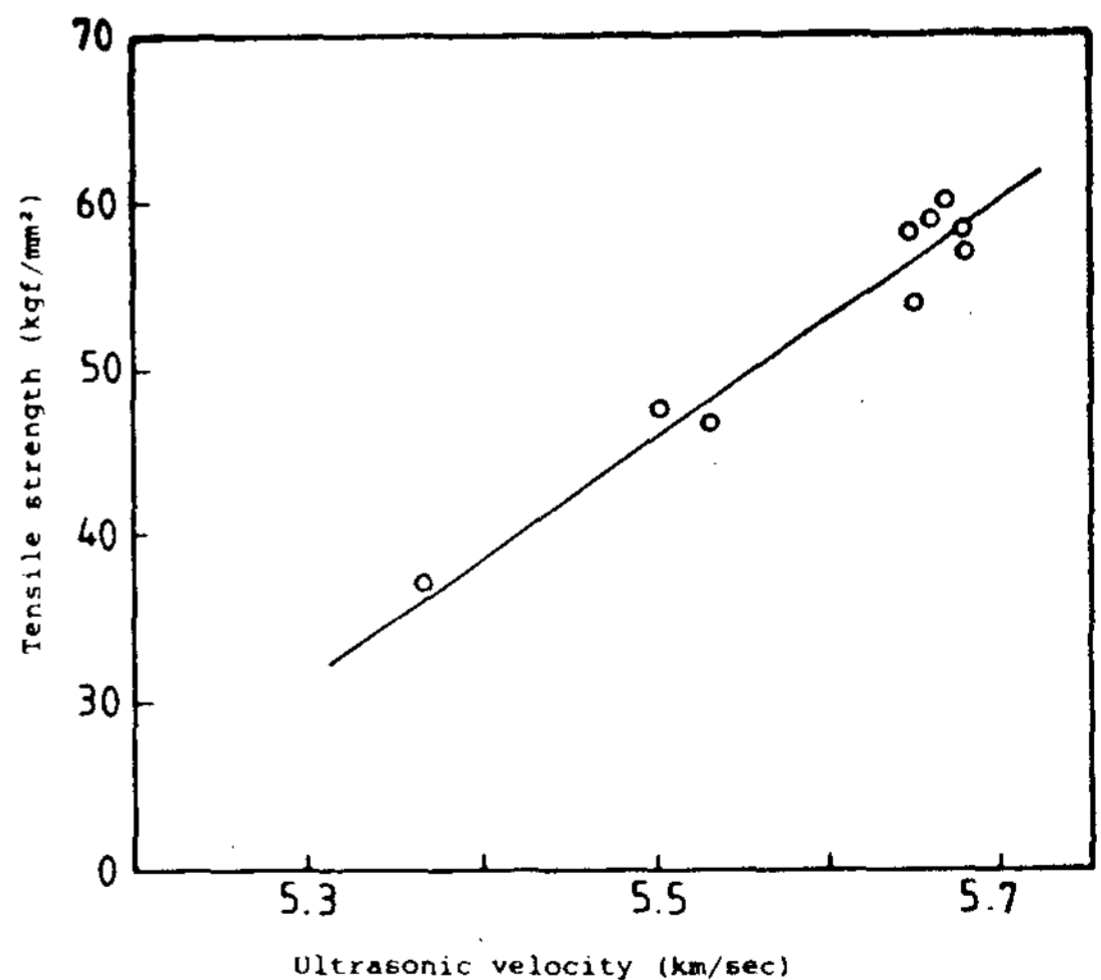


Fig. 7. Relationship between ultrasonic velocity and tensile strength in as cast condition.

화율과 아울러 그것의 기계적 성질을 추정할 수 있음을 보여주고 있다. Fig. 7은 주조상태에서 인

장강도와 초음파 전파속도와의 관계를 도시한 것이며 상관도가 높음을 보여 주고 있다.

3-3. 열처리에 따른 초음파 전파속도의 변화

Photo. 3은 시험편의 열처리조직을 광학현미경으로 촬영한 사진으로서 (A)는 주조상태, (B)는 어닐링처리, (C)는 노르말라이징처리한 것이다. 어닐링처리한 시험편의 기지조직은 ferrite화되어 있으며, 노르말라이징처리한 시험편의 기지조직은 pearlite화되어 있음을 알 수 있다. 그러나 흑연의 형상은 열처리에 의해 거의 변함이 없음을 보여주고 있다.

Fig. 8은 위의 세 가지 조건으로 열처리한 상태에서 흑연구상화율과 초음파 전파속도와의 관계를 나타낸 것이다. 최소자승법에 의해 직선으로 그렸으며 각각의 상관계수를 나타내었다. 이들의 상관계수가 공히 0.985이상이다. 주조상태와 열처리한 상태에서의 상관계수가 비슷한 것은 열처리를 하기 전의 주조상태에서도 각 시험편의 기지조직이 유사하였기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8에서 어닐링한 시험편의 초음파 전파속도는 주조상태의 시험편에 비해 평균 100m/s 정도 (1.7%) 감소하였으며, 노르말라이징한 시험편에서는 구상화율에 관계없이 평균 200m/s 정도(3.4%)의 감소를 보이고 있다.

大出 卓 등⁵⁾은 열처리를 하면 흑연형태에 관계없이 초음파 전파속도는 감소한다고 하였으며, Henderson¹⁰⁾은 연속적인 열처리를 하면 ferrite%에

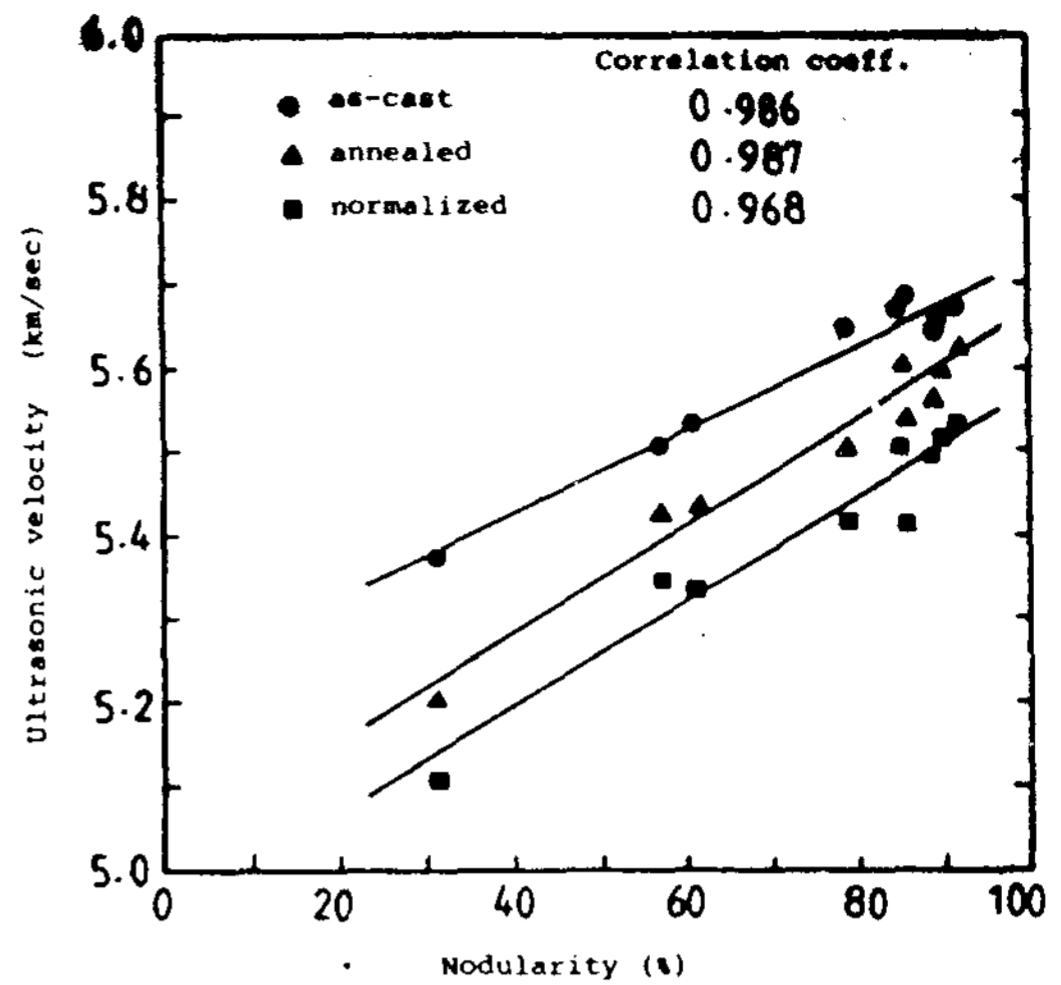


Fig. 8. Relationship between nodularity and ultrasonic velocity in heat treatment condition

관계 없이 초음파 전파속도는 감소하는 경향이 있다고 보고한바 있다. 그리고 阿部利彦 등⁸⁾은 열처리온도와 열처리시간에 따라 초음파속도의 감소율이 다르며 또한 냉각속도가 클 수록 감소율이 증가한다고 하였다.

본실험에서 노르말라이징한 시험편에서 초음파속도가 어닐링한 시험편에서의 초음파 속도보다 낮은 것은 이들 보고내용과 정성적으로 일치함을 보여주고 있다. 이것은 열처리로 인한 흑연의 재석출, 열응력의 발생, 흑연과 철의 박리 및 내부산화 등에 의한 탄성율의 저하로 추측할 수 있으나 아직

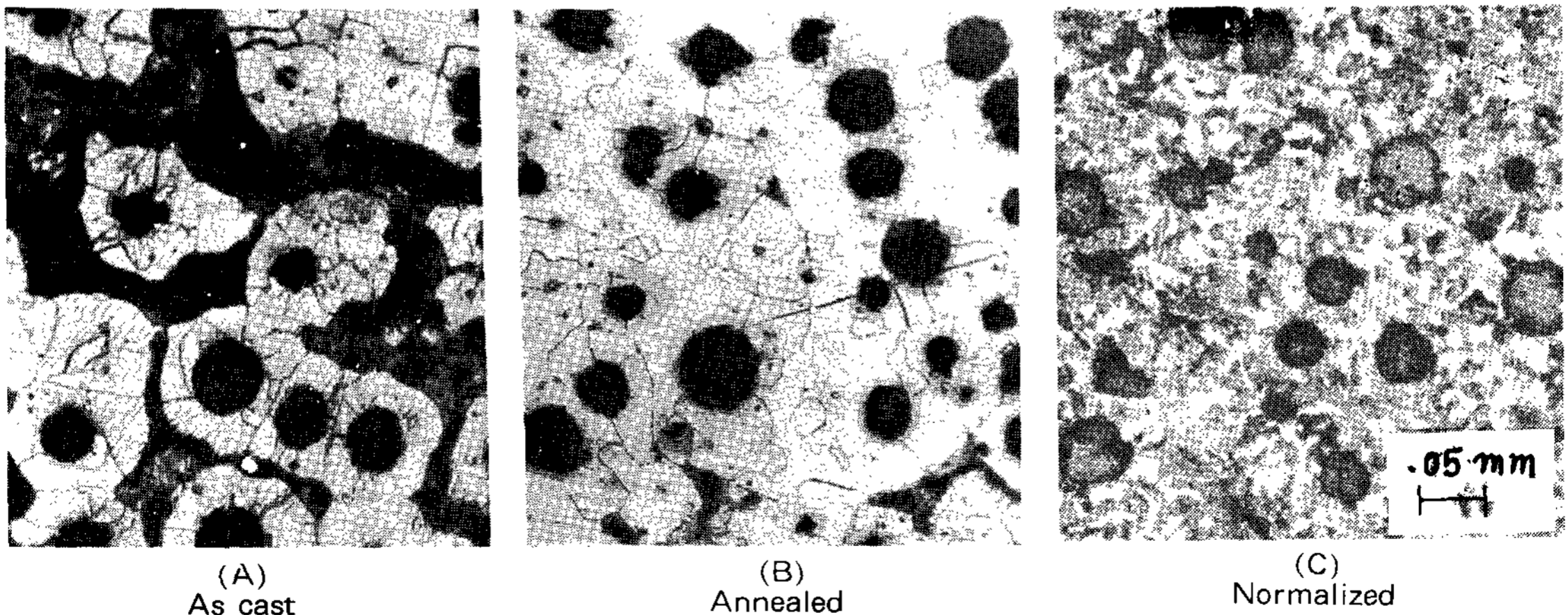


Photo. 3 Microstructures of specimen in heat treatment condition (x400, 2% nital etched).

명확히 밝혀진바 없어 더 많은 연구가 요망된다.

구조상태에서 흑연구상화율과 초음파 전파속도 사이에 높은 상관관계를 가지고 있었으며 또한 열처리후에도 그 상관성에는 변함이 없으나 냉각속

도에 따라 초음파 전파속도가 변하므로 초음파속도 측정법을 이용하여 비파괴적으로 구상흑연주철의 품질평가를 하려면 그 재료의 열처리 이력을 이해하여야 될 것으로 생각한다.

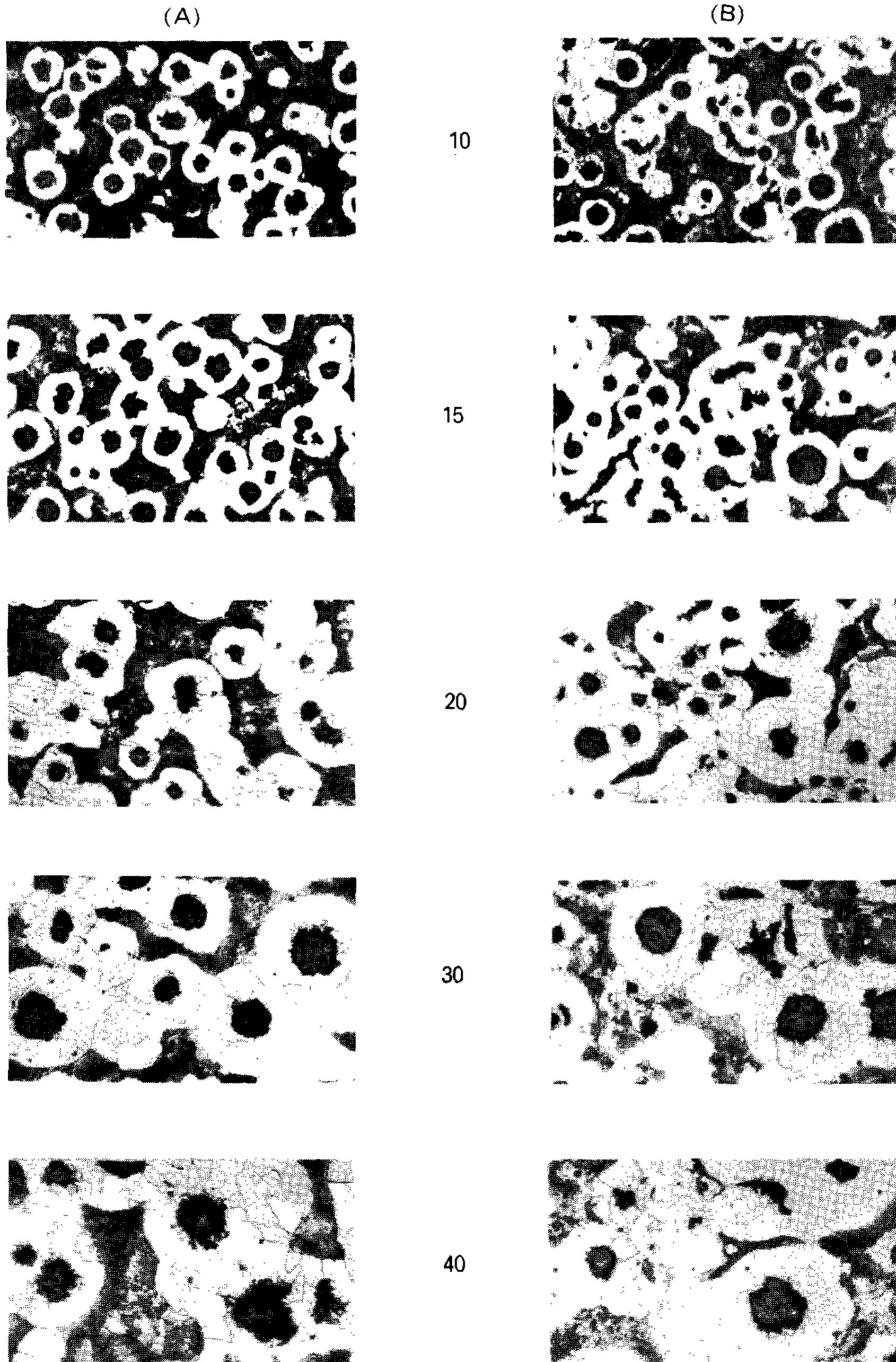


Photo. 4. Microstrues of specimen with 1.5%(A) and 0.7%(B) nodularizing theatment(x400, 2% nital etched).

3-4. 초음파 전파속도에 미치는 구상흑연립의 분포와 입도의 영향

Photo. 4는 시험편의 직경을 변화시켜 냉각속도를 달리한 시험편의 현미경조직사진이다. A는 흑연구상화처리량이 충분하다고 생각되는 1.5%의 구상화제를 첨가한 경우이며 B는 그렇지 못한 0.7%를 첨가한 경우이다. A와 B 모두 주형의 직경이 클수록, 즉 시험편의 두께가 두꺼워 질수록 흑연립의 수는 감소하고, 흑연립의 크기는 증가하였으며, pearlite의 양은 감소하고 있다.

Fig. 9는 시험편의 두께와 흑연구상화율과의 관계를, Fig. 10은 시험편의 두께와 흑연립의 수와의 관계를 나타낸 것이다. 흑연립의 수는 A와 B의 경우 공히 시험편의 두께가 증가할수록 감소하고 있으며 구상화율은 시험편의 두께가 두꺼워짐에 따라 A의 경우는 큰 차이가 없으나 B의 경우는 감소하는 경향이 있다.

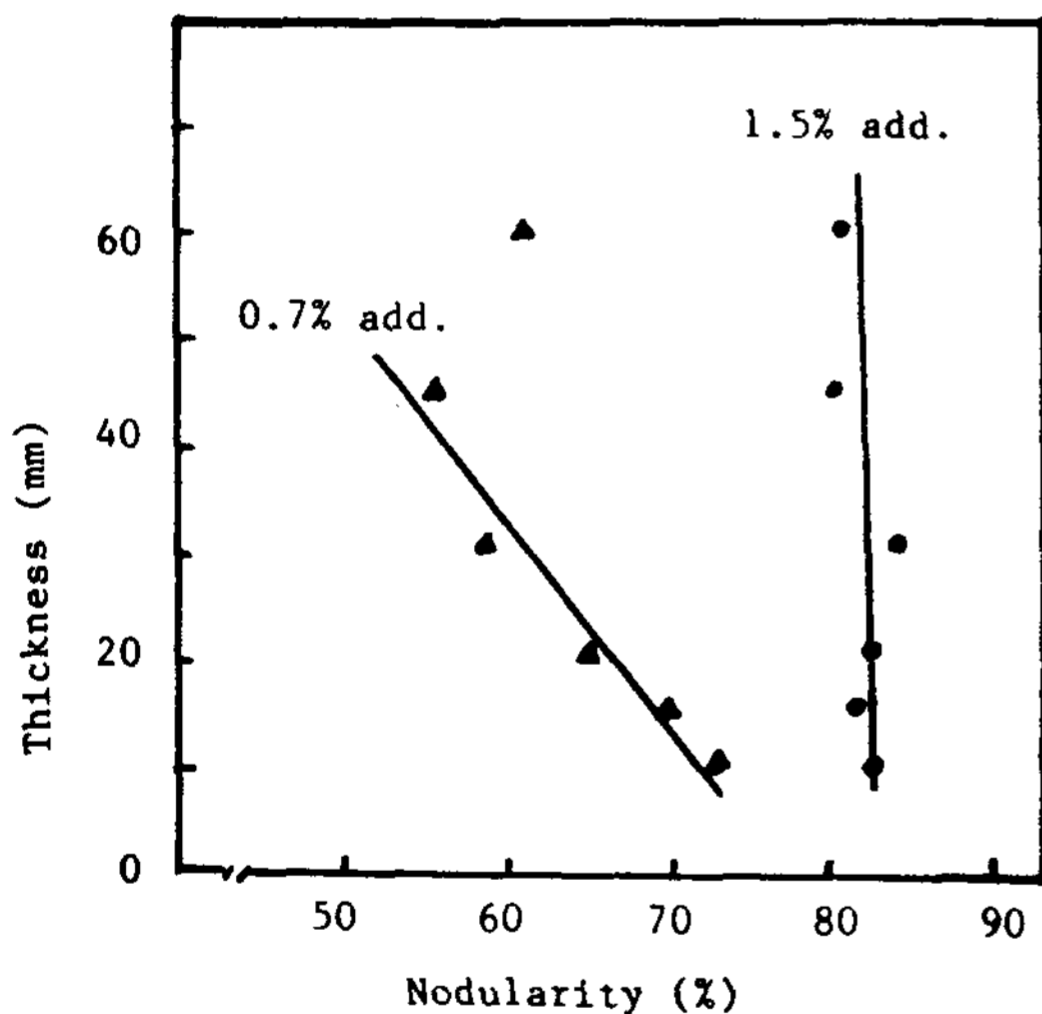


Fig. 9. Relationship between nodularity and thickness.

Fig. 11은 흑연립의 수에 따른 초음파 전파속도의 변화를 나타낸 것이다. 흑연립의 수가 증가할수록 초음파 전파속도는 증가하였으며 大出 卓 등¹²⁾의 연구결과와 일치하였다.

Fig. 12는 1.5%의 구상화제를 첨가한 시험편에 대해 주조상태, 어닐링처리 및 노르말라이징처리한 상태에서 시험편두께와 초음파 전파속도와의 관계를 나타낸 것이다. 두께가 증가함에 따라 초음

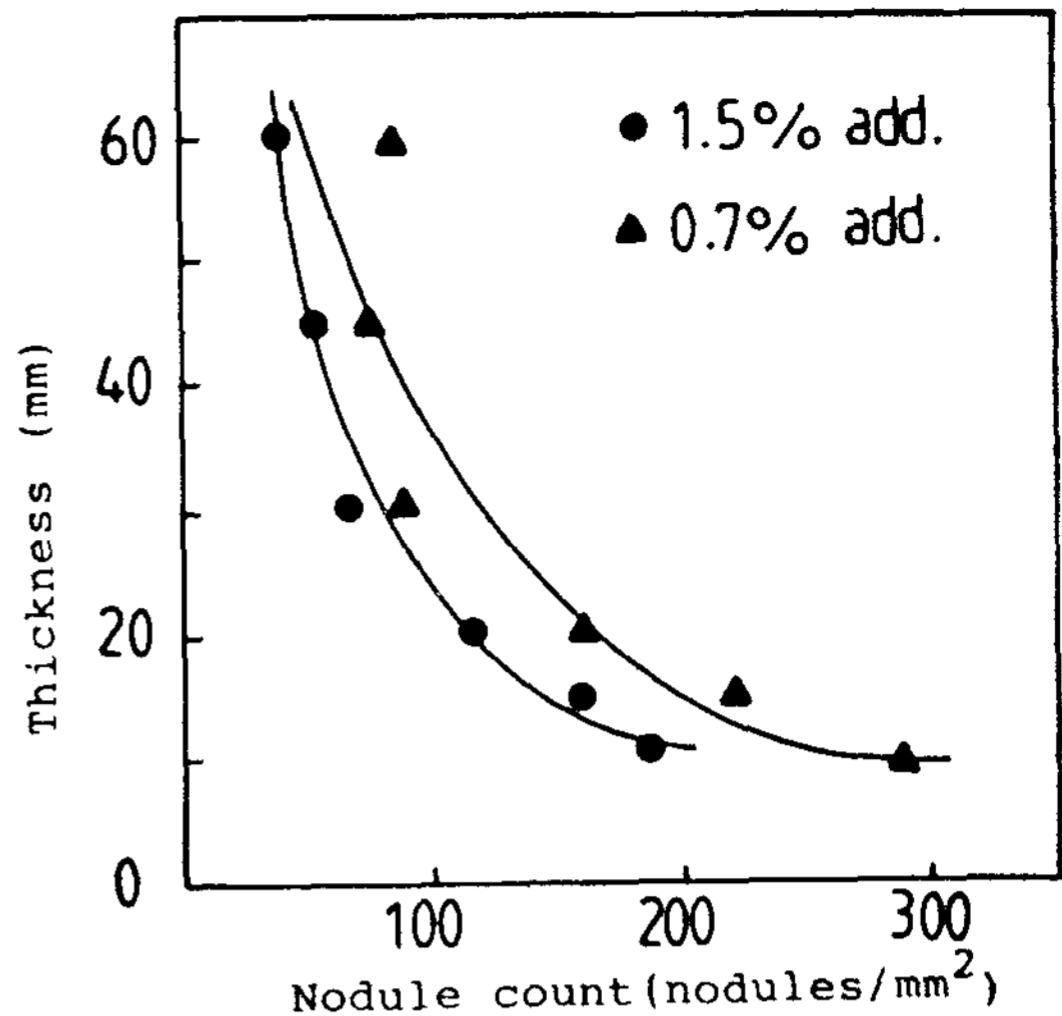


Fig. 10. Relationship between nodule count and thickness.

파 전파 속도는 감소하였으며 주조상태, 어닐링처리, 노르말라이징처리 모두 같은 경향을 나타내고 있으나 그 절대값이 주조상태, 어닐링처리, 노르말라이징처리의 순으로 감소하였다.

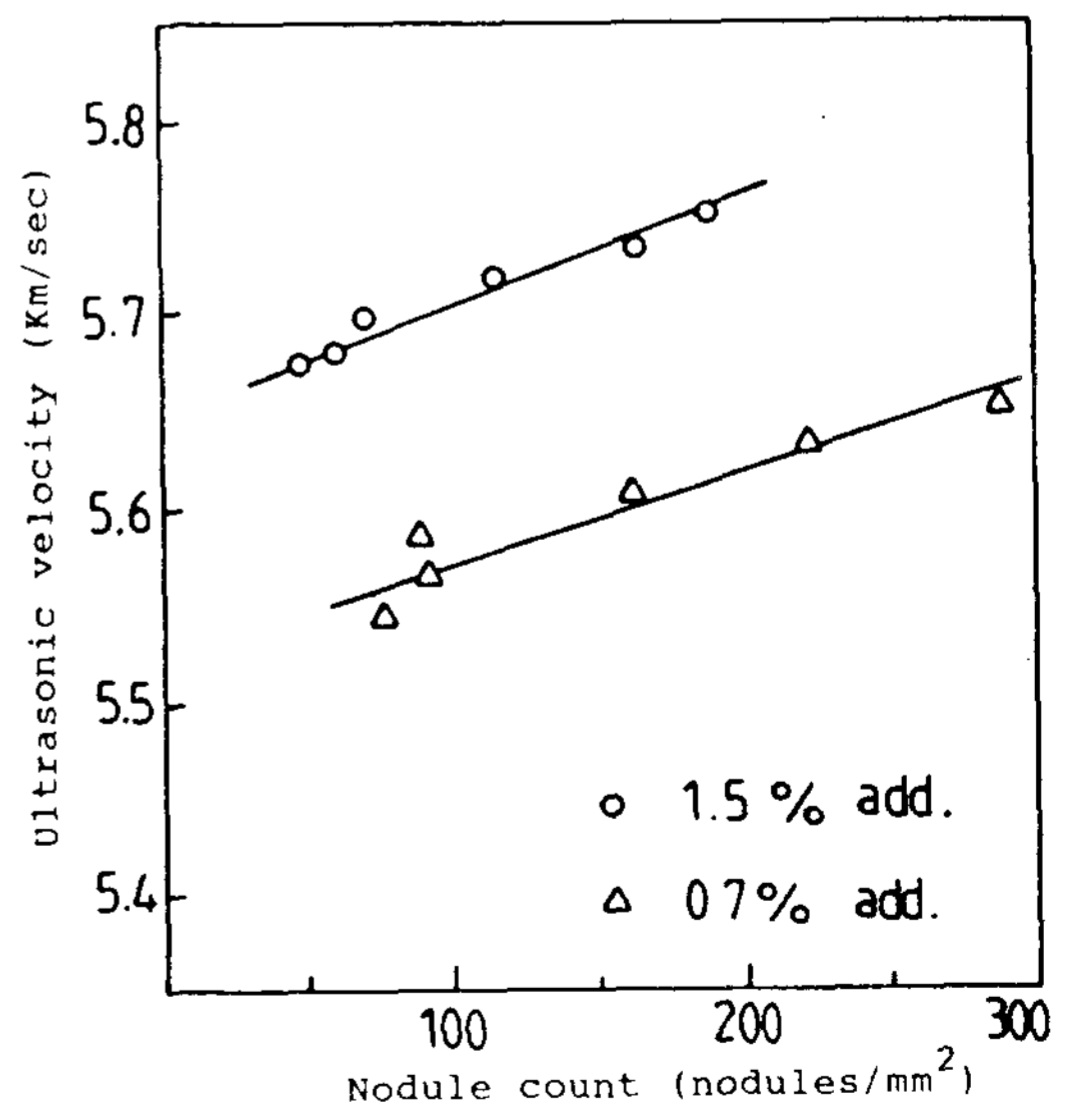


Fig. 11. The effect of nodule count on ultrasonic velocity in as cast state.

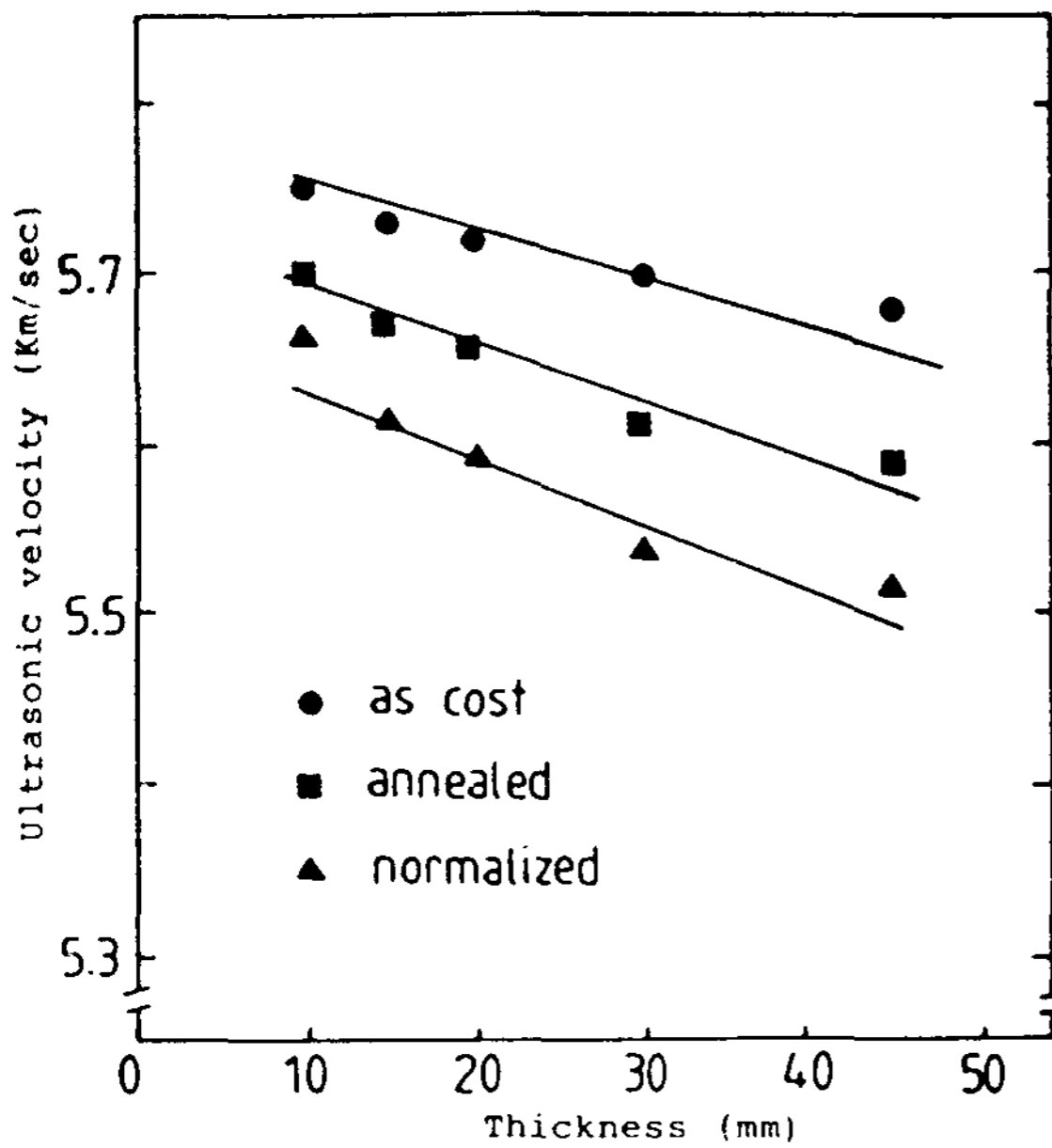


Fig. 12. Relationship between thickness and ultrasonic velocity in heat treatment conditior

4. 결 론

구상흑연주철에서 흑연의 형상이 초음파 전파속도에 미치는 영향에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구상흑연주철에서 흑연구상화율이 증가할 수록 인장강도와 초음파 전파속도는 비례적으로 증가하였으며, 인장강도와 초음파 전파속도 사이에

도 비례적인 관계가 존재하였다.

2. 구상흑연주철내를 통과하는 초음파 전파속도는 열처리에 의해 주조상태보다 어닐링처리한 경우 평균 1.7%, 노르말라이징처리한 경우 평균 3.4% 감소하였다.

3. 동일한 흑연구상화율을 가지고 있는 주철에서 시험편의 두께변화에 따라, 흑연 입자수가 증가할 수록 초음파 전파속도는 증가하였다.

참 고 문 헌

1. P. J. Enerson and W. Simmons : AFS Trans., Vol. 84(1976) 109
2. A. G. Fuller : AFS Trans., Vol. 85(1977) 509
3. A. G. Fuller etc. : AFS Trans., Vol. 88(1980) 21
4. 田中雄一 etc. : 鑄物, Vol. 56(1984) 408
5. 大出 卓 etc. : 鑄物, Vol. 58(1986) 262
6. E. P. Papadakis etc. : AFS Trans., Vol. 91 (1983) 721
7. Qin Ben-De : Proceedings of world conf. NDT -85(1985) 1577
8. 阿部利彦 etc. : 鑄物, Vol. 57(1985) 704
9. A. G. Fuller : AFS Trans., Vol. 88(1980) 751
10. H. E. Henderson : Foundry Trade Journal, Vol. 21(1974) 203
11. 阿部利彦 etc. : 鑄物, Vol. 57(1985) 352
12. 大出 卓 etc. : 鑄物, Vol. 60(1988) 116
13. 日本鑄物協會特殊鑄物部會 : 鑄物, Vol. 40(1968) 296