

초음파 속도 측정에 의한 주철의 미세구조 및 품질평가 가능성 검토

Feasibility Study on Ultrasonic Velocity for Evaluation of Microstructure and Quality of Cast Iron

최찬양*, 현창용*, 변재원*[†]

C. Y. Choi*, C. Y. Hyun* and Jai-Won Byeon*[†]

초 록 초음파 속도를 이용하여 다양한 종류의 주철에 대해 미세구조와 품질 특성을 평가하였다. 상용으로 사용되는 3종의 회주철 및 3종의 구상흑연주철을 준비하였으며, 열처리 미세구조의 영향을 평가하기 위해 구상흑연주철을 어닐링 열처리를 다르게 하여 시편을 준비하였다. 초음파 전파 속도 측정, 미세구조(펄라이트 분율, 흑연의 길이 및 구상화율) 정량화, 경도 측정을 행하여 이들 파라미터 사이의 경험적 상관관계를 확인하였다. 구상흑연주철의 초음파 전파 속도가 회주철에서의 속도보다 크게 나타났다. 구상흑연주철에서 펄라이트 미세조직의 분율이 감소할수록 경도 및 초음파 속도는 감소하였다. 초음파 속도를 주철 소재의 품질관리를 위한 비파괴평가 파라미터로서 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

주요용어: 초음파 속도, 미세구조, 주철, 품질관리, 열처리

Abstract It was attempted to evaluate the microstructure and quality of various types of cast iron by ultrasonic velocity measurement. Three types of commercial gray cast iron and ductile cast iron were used for this investigation, respectively. One type of the ductile cast iron was heat-treated as a function of annealing time to produce different microstructure. Ultrasonic velocity measurement, microstructural analysis (pearlite area fraction, graphite length and nodularity), and hardness measurement were performed to find empirical correlations among these parameters. Ultrasonic velocity of ductile cast iron was markedly faster than that of gray cast iron. Ultrasonic velocity decreased with the decrease of fraction of pearlite structure. As a quality monitoring parameter of cast iron, potential of ultrasonic velocity was suggested.

Keywords: Ultrasonic Velocity, Microstructure, Cast Iron, Quality Monitoring, Heat Treatment

1. 서 론

주철은 우수한 주조성, 내마모성 및 적절한 강도 특성으로 인해 다양한 기계구조용 부품소재로 사용되고 있다. 주철은 페라이트나 펄라이트 기지에 다양한 형상 및 크기의 흑연이 분포하는 미세조직을 갖으며, 흑연의 형상에 따라 회주철, 구

상흑연주철 등으로 분류된다[1,2]. 주철의 강도 등 기계적 특성은 흑연의 형태 및 분포, 기지조직의 미세구조 등에 의해 지배되기 때문에 우수한 품질의 주철 부품을 생산하기 위해서는 미세구조가 일정하게 제어되도록 생산 공정의 품질관리가 이루어져야 된다.

일반적으로 열처리된 철강 소재에 대한 품질관

리는 열처리 후 절단, 연마, 마운팅, 화학 에칭 등의 여러 단계를 거친 후 광학현미경 또는 전자현미경으로 미세구조를 관찰하는 방법을 적용하고 있다. 그러나 이러한 파괴적인 미세구조 측정 방법은 긴 시간과 많은 인력이 필요한 평가 방법이며, 또한 선택된 표본시편에 대해서만 검사가 이루어지기 때문에 공정 단계별 검사 및 실시간 검사가 어려운 단점이 있다.

주철 소재의 생산공정 중에 공정관리가 완전하게 이루어지지 않을 경우에 열처리 온도, 시간, 냉각 속도 등의 문제가 생길 수 있으며 이로 인해 미세구조가 균일하게 제어되지 않아 기계적 강도 등의 물성 재현성이 낮아질 수 있다. 주철 부품의 신뢰성 확보를 위해서는 전수검사가 필요하나 전수검사의 필요성과 다양한 산업수요에 비해 주철 제품의 품질관리는 충분히 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 철강재의 미세조직을 기존의 현미경 관찰과 같은 파괴적인 실험을 거치지 않고 비파괴평가 파라미터를 측정함으로써 간접적으로 평가하고자하는 연구의 필요성이 커지고 있다. 주철, 탄소강, 내열합금강 등 철강 소재에서 열처리나 고온노출에 의한 미세구조 변화를 평가하기 위해 초음파[3-5], 자기 파라미터[6], 전기비저항[7]을 측정하는 연구가 보고되고 있다. 특히, 초음파 전파 속도는 재료의 탄성계수, 밀도, 잔류응력, 미세구조 등에 의해 변하기 때문에[8,9], 다양한 재료의 미세구조 및 물성 평가에 적용될 수 있으며, 이전 연구로 주철의 흑연 구상화율 및 흑연 형상이 초음파 속도에 미치는 영향에 대해 보고된 바 있다[9-11].

본 연구에서는 주철의 종류(회주철, 구상흑연

주철), 흑연 형상, 열처리 미세구조(펄라이트 미세구조의 분율)가 초음파 속도 및 경도에 미치는 영향을 분석하여, 이들 사이의 상관관계를 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

초음파를 사용하여 주철 미세구조의 비파괴평가 가능성을 확인하기 위해 다양한 상용 주철 소재를 사용하여 연구를 진행하였다. 한국표준협회의 주철분류규격을 기준으로 종류, 등급(회주철: GC150, GC250 등급, 구상흑연주철: GCD450, GCD500 등급) 및 제조사가 다른 소재를 공급받아 사용하였다. 이중 회주철과 구상흑연주철을 각각 C그룹(gray cast iron, 회주철, C1, C2, C3 시편)과 D그룹(ductile cast iron, 구상흑연주철, D1, D2, D3 시편)으로 명명하였다. 각 시편의 화학 조성은 소재에 따라 미소한 차이는 있으나, 모두 표준 규격의 범위를 만족하고 있다. 공급된 소재의 시편명 및 화학성분을 Table 1에 요약하여 나타내었다.

또한 구상흑연주철 기지조직(펄라이트 면적분율)의 차이가 초음파 속도에 미치는 영향을 확인하기 위해, D3 시편을 선택하여 펄라이트 조직의 면적분율을 다양하게 얻을 수 있도록 여러 조건으로 어닐링 열처리 하였다. 열처리는 660°C에서 시간을 1 min ~ 3 hr로 다르게 하여 어닐링 열처리를 하였으며 시편은 각각 D3, D3-1, D3-2, D3-3로 명명하였다(Table 1).

미세조직은 경면 연마된 시편을 2% 나이탈(Nital) 용액으로 화학 부식 후 광학현미경을 사용하여 관찰하였다. 미세조직 관찰을 통하여 주

Table 1 Chemical compositions of the cast iron (wt%)

Type	Designation (KS spec)	Chemical compositions							Manufacturer
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	
Gray cast iron	C1(GC150)	3.31	1.98	0.76	0.12	0.05	-	-	A
	C2(GC250)	3.20	2.60	0.70	0.20	0.20	-	-	B
	C3(GC250)	3.53	2.69	0.53	0.16	0.07	-	0.17	C
Ductile iron	D1(GCD450)	3.72	2.68	0.27	0.03	0.01	0.03	-	A
	D2(GCD500)	3.50	2.60	0.50	0.10	0.10	0.06	-	B
	D3(GCD500)	3.52	2.84	2.38	0.03	0.01	0.04	0.01	C

* C and D stand for gray cast iron and ductile iron, respectively

철의 주요 미세조직 인자인 흑연분율, 흑연의 길이, 구상화율 및 펄라이트의 분율을 정량화 하였다. 미세조직 정량화는 이미지 분석기를 이용하여 KS D 4302 미세조직 정량화 방법에 따라 수행하였다.

초음파 속도 및 감쇠계수는 접촉식 측정 시스템을 통해 얻어진 시간영역 펄스 신호로부터 펄스에코오버랩법을 이용하여 측정하였다. 초음파의 송수신을 위해서는 Panametrics사의 펄서/리시버(모델 5072PR, 펄스반복주파수: 100 Hz)를 사용하였으며, 아날로그/디지털 전환 및 데이터 수집을 위해 디지털 스토리지 오실로스코프(모델 TDS 2022B)를 사용하였다. 오실로스코프의 샘플링 주파수는 2 GHz이었으며, 126회의 신호를 시간 평균을 낸 신호를 최종적으로 얻었다. 주철 주조제는 금속재료 중 감쇠가 비교적 큰 소재임을 고려하여 수십 MHz의 고주파수가 아닌 중심 주파수가 5 MHz인 중파 탐촉자(Panametrics사, 직경 0.25인치)를 사용하였다.

초음파 측정용 시편 제작을 위해 직경 30 mm 인 환봉의 주철을 두께 30 mm로 디스크 형상으로 가공하였으며, 초음파 속도 계산 시에 두께 차이로 인한 오차를 줄이기 위해 두께편차를 $\pm 2 \mu\text{m}$ 이내가 되게 기계적 경면연마를 하였다. 초음파 측정치는 5회 측정의 평균 및 표준편차를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 주철 종류 및 미세구조에 따른 초음파 속도 변화(C,D그룹의 비교)

Fig. 1(a)~(f)는 3종류의 회주철과 3종류의 구상화 흑연 주철 시편의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 회주철(a,b,c)은 기지(페라이트와 펄라이트 혼합 조직)에 길이가 긴 편상 흑연(검은색 부분)이 분포하는 미세조직을 갖고있다. 흑연의 총면적분율은 시편 간에 유사하게 측정되었으나(14.7%~17.2%), 흑연 길이는 회주철의 등급 및 제조사에 따라 $33.8 \mu\text{m} \sim 66.4 \mu\text{m}$ 로 다르게 나타났다(Table 2).

구상흑연주철(d,e,f)은 기지에 구형의 흑연이 분포하고 있는 조직을 가지며 흑연 면적분율 및 구상화율은 3가지 시편에서 유사하게 나타났다.

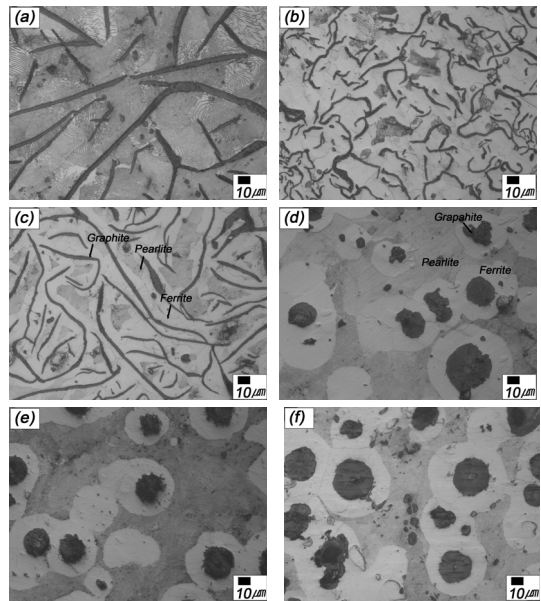


Fig. 1 Optical microstructure of the gray cast iron and ductile cast iron: (a) C1, (b) C2, (c) C3, (d) D1, (e) D2, and (f) D3

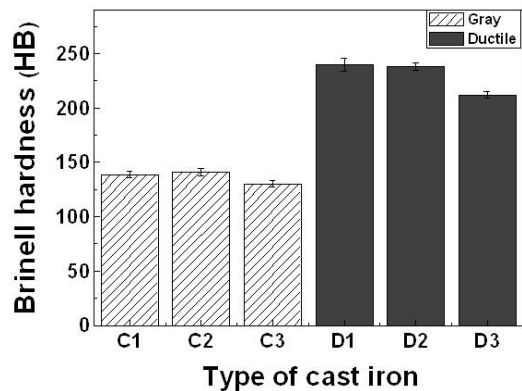


Fig. 2 Comparison of hardness among the types of cast iron

Fig. 1의 미세구조 사진을 비교하면 주철의 종류(회주철, 구상흑연주철)에 따라 흑연의 형상(편상, 구상)이 확연하게 다를 수 있다. 관찰된 미세조직을 이미지 분석기를 사용하여 정량적으로 측정된 결과와 브리넬 경도값 및 초음파 파라미터 측정값을 종합하여 Table 2에 나타내었으며 괄호 안의 값은 표준편차를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 C와 D그룹 시편의 브리넬 경도 측정 결과를 보여준다. 회주철 그룹(C1, C2, C3시편)과 구상흑연주철 그룹(D1, D2, D3시편)을 비교하면

구상흑연 주철이 고강도를 나타내었으며, 이는 흑연의 형상 차이에 기인한 것으로 일반적으로 알려진 사실과 일치한다[12].

Fig. 3(a), (b)는 주철의 타입에 따른 초음파 전파 속도와 감쇠계수의 변화를 나타낸 그래프이다. 감쇠계수의 경우 주철 시편의 종류에 따른 특별한 경향성을 확인할 수 없었다. 초음파 전파 속도는 구상흑연주철의 경우 5557~5637 m/s, 회주철의 경우 4089~4661 m/s의 범위를 나타냈었다. 동일한 종류의 주철 그룹 내에서는 일정한 범위의 속도를 나타내었으나, 주철의 종류에 따라 비교해보면 구상흑연주철에서의 초음파 전파 속도가 회주철에 비해 상대적으로 빠른 것을 알 수 있다. 이는 미세조직 인자 중 흑연의 형상이 구상일 경우가 길이가 긴 편상일 경우보다 초음파 속도가 빠름을 의미한다.

Fig. 4는 C, D 그룹 시편의 브리넬 경도(Fig. 2), 초음파 속도(Fig. 3b) 및 흑연형상(Fig. 1)의

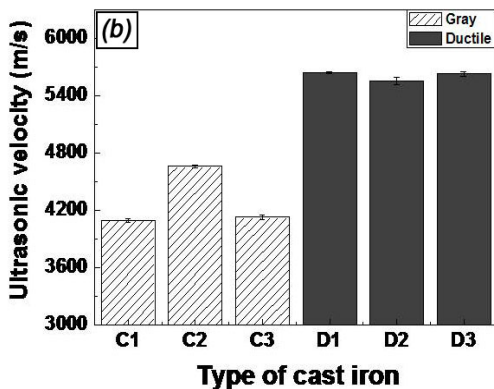
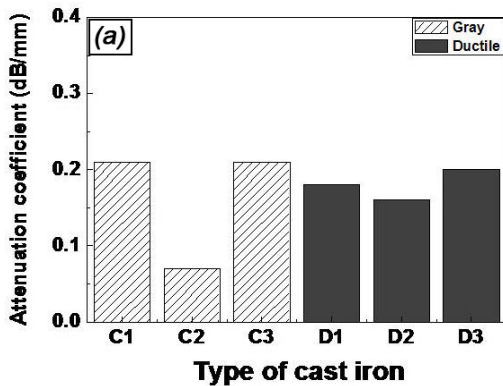


Fig. 3 Comparison of ultrasonic parameters among the types of cast iron: (a) attenuation coefficient, and (b) velocity

상관관계를 종합하여 보여주고 있다. 이로부터 초음파 속도와 측정을 통해 주철 시편의 미세조직(흑연 형상), 주철의 종류, 주철의 경도값을 비교적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다. 더 많은 종류의 시편을 대상으로 Fig. 4와 같은 상관관계 데이터베이스를 구축하면 초음파 속도와 파라미터를 이용하여 주철의 물성 검사 및 품질관리에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

회주철에서 흑연의 길이와 초음파 속도와 상관관계 여부를 확인하기 위해, 이들의 관계를 Fig. 5에 그래프로 나타내었다(Table 2의 C1, C2, C3의 비교). 측정된 시편의 범위 내에서는 흑연의 길이와 초음파 속도가 반비례적 상관관계가 있어 보인다. 그러나 시편 간에 흑연 면적분율이 동일하게 제어되지 않았기 때문에, 미세조직과 초음파 속도 사이의 일대일 상관관계에 대한 추

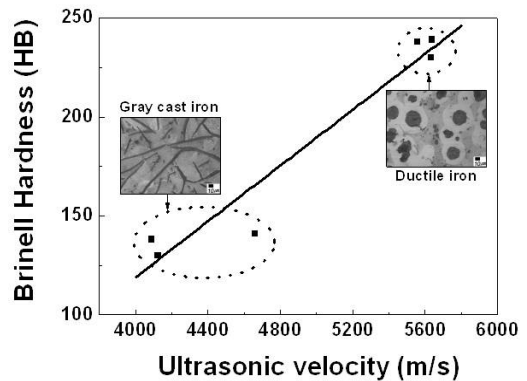


Fig. 4 Relationship among ultrasonic velocity, hardness, and microstructure of the gray cast iron

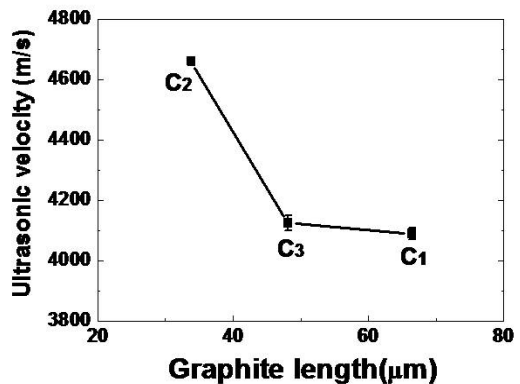


Fig. 5 Correlation between ultrasonic velocity and graphite length of the gray cast iron

가적 연구가 이루어져야 될 것으로 생각된다.

구상흑연주철에서 흑연면적분율(11.9~19.7%), 구상화율(71.9~78.3%)의 미소한 미세조직 차이가 있었으나, 이는 초음파 속도에 큰 영향을 주지 않았다(Table 2의 D1, D2, D3의 비교). Lee 등은 이전 연구에서 주철의 구상화율과 초음파 속도 사이의 비례관계를 보고한 바 있으나[9] 이는 구상화율이 20~100%의 범위에서 큰 차이를 보이는 경우로, 본 연구에서 사용된 시편은 구상화율차가 매우 적어(71.9~78.3% 범위) 상관관계가 관찰되지 않았다.

3.2. 구상흑연주철의 열처리에 따른 초음파 속도 변화

Fig. 6은 구상흑연주철 중 D3 시편을 어닐링 열처리 시간을 다르게 하여 준비한 시편을 광학 현미경으로 관찰한 미세조직 사진이다. D3는 열처리 되지 않은 시편으로 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)가 혼재된 기지조직에 흑연(구형의 검은색 부분)이 분포하는 미세조직을 보여준다. 어닐링 열처리 시간이 길어짐에 따라 흑연의 구상화율은 거의 변화가 없었으나 기지조직은 점차 펄라이트가 페라이트로 상변태되어 펄라이트의 분율이 줄어들었으며, 펄라이트 분율 변화를 정량적으로 측정하여 Table 2에 요약하였다. 주철 부품 생산공정에서 어닐링 열처리 시간이 과도하게 길면 경도가 높은 펄라이트 조직이 줄어들게

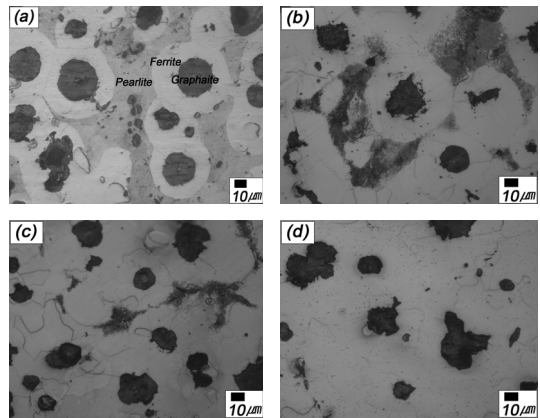


Fig. 6 Optical microstructure of the heat treated gray cast iron for various time: (a) D3 (as-cast), (b) D3-1(5min), (c) D3-2(30min), and (d) D3-3(3hr)

되어 주철 부품의 경도가 요구 사양 이하로 저하될 수 있으므로, 규격에서 요구되는 수준의 펄라이트 분율을 일정하게 유지할 수 있도록 열처리 공정 품질관리가 이루어져야 한다.

Fig. 7은 어닐링 열처리에 따른 펄라이트 면적 분율 변화와 경도 및 초음파 전파 속도의 상관관계를 나타내었다. 페라이트 조직에 비해 고경도인 펄라이트 조직의 면적 분율이 감소함에 따라 경도와 초음파 속도 모두 비례적으로 감소하였다. 탄소강의 열처리에 따른 초음파 속도 변화 연구에 의하면, 펄라이트 조직에서의 초음파 속도가 페라이트의 경우보다 높게 보고되었다[10]. 본 연구에서도 펄라이트가 페라이트로 미세구조

Table 2 Summarized results of the microstructural, ultrasonic and hardness measurement for various cast irons

Type		Microstructure			NDE Parameter		Mechanical Property	
		Graphite area fraction (%)	Graphite Length (µm)	Nodularity (%)	Pearlite area fraction (%)	Ultrasonic velocity (m/s)	Attenuation coefficient (dB/mm)	Brinell Hardness (HB)
Gray cast iron	C1(GC150)	14.7	66.4	-	-	4089(±19)	0.21	138(±3)
	C2(GC250)	17.3	33.8	-	-	4661(±14)	0.07	141(±3)
	C3(GC250)	17.2	48.1	-	-	4124(±24)	0.21	130(±3)
Ductile iron	D1(GCD450)	11.9	-	74.2	-	5637(±9)	0.18	239(±6)
	D2(GCD500)	13.3	-	78.3	-	5557(±34)	0.16	238(±4)
	D3(GCD500)	19.7	-	71.9	36.7	5633(±16)	0.20	230(±3)
Ductile iron (Heat-treated)	D3-1(GCD50)	-	-	-	17.3	5607(±1)	-	190(±3)
	D3-2(GCD50)	-	-	-	3.5	5602(±3)	-	179(±1)
	D3-3(GCD50)	-	-	-	0.1	5593(±1)	-	170(±0)

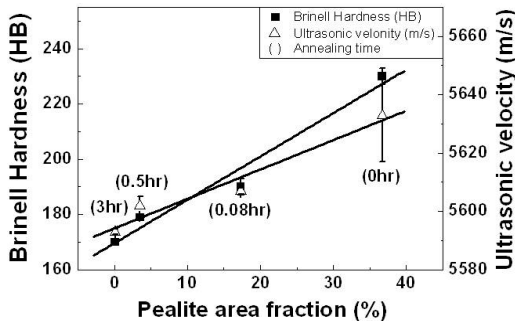


Fig. 7 Changes of ultrasonic velocity and hardness as a function of pearlite area fraction in the ductile cast iron

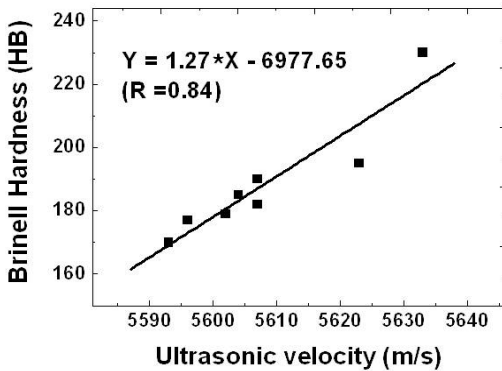


Fig. 8 Correlation between ultrasonic velocity and hardness of the annealing heat-treated gray cast iron

로 변하면서 미소한 탄성계수의 감소가 일어나 초음파 속도가 감소된 것으로 보인다.

Fig. 7에서 관찰된 펄라이트 분율-브리넬 경도-초음파 속도의 상관관계를 더 많은 어닐링 열처리 시편에 대해 확인 검증하기 위해, 8개의 어닐링 열처리 시편에 대해 경도 및 초음파속도를 측정하여 경험적 상관관계 데이터를 구축하였다 (Fig. 8). 이러한 상관관계는 선형회귀분석에 의해 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = 1.27 * X - 6977.65 \quad (R = 0.84) \quad (1)$$

여기서 Y, X, R은 각각 브리넬경도(HB), 초음파속도(m/s), 상관계수(correlation coefficient)이다.

위의 선형적 경험 상관관계식은 초음파 속도 측정을 통해 주철 열처리 공정의 품질관리에 응용할 수 있는 가능성을 보여주는 것으로, 향후 실제 품질관리에 적용을 위해서는 더 다양한 시편을 대상으로 미세조직 변화와 초음파 속도의

일대일 상관관계 분석 및 데이터베이스의 구축이 필요할 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

초음파 속도를 이용하여 주철의 종류와 열처리 미세구조 특성을 비파괴적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주철의 종류에 따라 초음파 전파 속도는 일정한 범위를 가졌으며(회주철: 4089~4661 m/s, 구상흑연주철: 5557~5637 m/s), 흑연의 형상이 구상인 미세조직을 갖는 구상흑연주철에서의 초음파 전파속도가 편상 흑연이 분포한 회주철보다 빠르게 나타났다.
- 2) 구상흑연주철을 어닐링 열처리 시 고경도인 펄라이트 미세구조가 페라이트 구조로 상변태되어 펄라이트의 양이 줄어들었고, 이에 따라 경도 및 초음파 전파 속도가 감소하였다. 이로부터 어닐링 열처리된 주철 소재에서 초음파 속도와 경도와의 선형의 경험적 상관관계식을 도출하였다.
- 3) 초음파 속도 측정을 통해 주철의 종류(회주철, 구상흑연주철), 회주철의 흑연 길이, 구상흑연주철의 펄라이트 기지조직 분율을 평가할 수 있었다. 정량화된 미세조직 파라미터, 초음파 속도, 기계적 경도와의 경험적 상관관계 데이터를 구축함으로써 주철 부품소재 열처리 공정의 품질관리를 위한 비파괴평가 파라미터로의 응용 가능성을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2008년도 교육인적자원부 학술연구 조성사업비로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00147).

참고문헌

[1] W. Wang, T. Jing, Y. Gao, G. Qiao and X. Zhao, "Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 593-597 (2007)

- [2] B. J. Ye, "Effects of control factors on the morphology of compacted/vermicular graphite (II), *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol 9, pp. 215-220 (1989)
- [3] P. Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar and Baldev Raj, "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel," *NDT & E International*, Vol. 28, pp. 179-185 (1995)
- [4] S. T. Hong, S. I. Kwun and W. Y. Choo, "Non-destructive evaluation of microstructures in low carbon steel by measurement of ultrasonic attenuation," *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 37, No. 7, pp. 754-759 (1999)
- [5] W. Orłowicz, M. Tupaj, M. Mroz and E. Guzik, "Evaluation of ductile iron casting material quality using ultrasonic testing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 1493-1500 (2010)
- [6] 변재원, 권숙인, "보자력 및 잔류자화를 이용한 2.25Cr-1Mo 강의 경년열화도 평가-미세조직적 접근", *비파괴검사학회지*, Vol. 22, No. 1, pp. 65-73 (2002)
- [7] 변재원, 권숙인, "전기비저항을 이용한 2.25Cr-1Mo 강 열화재의 미세조직 및 연성-취성 전이온도 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 22, No. 3, pp. 284-291 (2002)
- [8] C. H. Gür, "Investigation of microstructure-ultrasonic velocity relationship in SiC - reinforced aluminium metal matrix composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. A361, pp. 29-35 (2003)
- [9] S. C. Lee and J. M. Suen, "Ultrasonic NDE of matrix structures and nodularity in cast irons," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20A pp. 2399-2407 (1989)
- [10] W. Orłowicz and W. Opiekun, "Ultrasonic detection of microstructure changes in cast iron," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 22, pp. 9-16 (1995)
- [11] D. N. Collins and W. Alcheikh, "Ultrasonic non-destructive evaluation of the matrix structure and the graphite shape in cast iron," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, pp. 85-90, (1995)
- [12] S. W. Kim, K. K. Kim, J. S. Park, D. K. Kim and Y. G. Toon, "The effects of heat-treatment on the mechanical properties of high chromium cast irons," *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol 25, No. 1, pp. 23-29 (2005)