

## Austempered Ductile Cast Irons 의 비파괴적 평가

이 승석 · 이 세경

(한국표준연구소 비파괴시험연구실)

### Nondestructive Evaluation of the Austempered Ductile Cast Irons

S. S. Lee and S. K. Lee

**Abstract** Austempered ductile cast iron (ADI) which has been recently developed shows good mechanical properties. These properties are related to the microstructure which is greatly affected by processing variables such as austempering time and temperature. In this study, the relationships between mechanical properties from impact test, and hardness test and the results from ultrasonic velocity measurement and electrical resistivity measurement are studied on the ADI samples which are heattreated at different austempering temperature and time. From the results, we conclude the followings. The ultrasonic velocity measurement could be used for the study of austempering reaction mechanism. The electrical resistivity measurement could be used as quality assurance technique for the ADI.

#### 1. 서 론

최근에 개발된 austempered 구상흑연주철은 좋은 기계적 성질을 가지고 있다. Austempered 구상흑연주철의 기계적 성질과 austempering 처리를 하지 않은 구상흑연주철의 기계적 성질을 비교하여 보면 그림 1)에서 볼 수 있듯이 같은 정도의 연신에 있어서 austempered 구상흑연주철의 인장강도가 austempering 처리를 하지 않은 구상흑연주철의 인장강도의 두배 이상이다. Austempered 구상흑연주철은 구상흑연주철을

austempering 열처리시켜서 만든다. 이상적으로는 austempering 열처리 시킬 때 austenite가 존재하는 온도 영역으로부터 bainite가 형성되는 온도 영역으로 급히 냉각시켜 pearlite의 형성을 막아주는 것이다. 하지만 현재까지도 austempered 구상흑연주철의 좋은 기계적 성질에도 불구하고 광범위한 사용은 제약을 받고 있다. 주된 이유로서는 연고자하는 기계적 성질을 가진 austempered 구상흑연주철은 일관성있게 제조할 수 있는 austempering 처리인자들을 제어하기가 쉽지 않기 때문이다." 위의 austempering 처리 인자들은 austemiti-

zing 시키는 온도, austempering 시키는 온도 및 유지 시간 등이다.

구상흑연주철의 austempering 반응은 보통 두단계로 나눌 수 있다. 첫번째 단계는 강화반응단계로써 austenite가 분해하여 bainite 형태의 ferrite와 탄소가 과도화된 austenite로 나뉘어간다. 위의 ferrite와 austenite로 이루어진 복합상조직으로 인해서 austempered 구상흑연주철은 좋은 기계적 성질을 보여준다. 하지만 어떤 austempering 온도 영역에서 필요이상으로 오랫동안 austempering 처리를 하면 austempered 구상흑연주철의 연성이 급격히 떨어진다.<sup>2)</sup> 그 원인은 탄소가 과포화된 austenite가 분해하여 ferrite와 carbide가 생기기 때문이며 이 단계를 austempering의 두번째 단계라고 한다.<sup>3)</sup> 이때 생성된 carbide가 연성의 저하를 가져온다. 따라서 austempered 구상흑연주철이 요구되는 기계적 성질을 가지기 위해서는 적절한 austempering 온도와 시간으로써 열처리 해를 필요가 있다 하지만 주조나 열처리 공정은 성분원소의 종류 및 양, 주조형태, 조업방안에 따라서 미묘하게 변하는 공정이기 때문에 일관성있게 좋은 품질의 austempered 구상흑연주철을 제조하기가 쉽지 않다. 위의 해결책으로써, 제조된 austempered 구상흑연주철의 품질을 비파괴적으로 관리할 수 있다면 제조된 모든 주물을

검사함으로써 일관성있는 품질관리를 할 수 있다. Austempered 구상흑연주철의 품질 관리를 이룩할 수 있는 가능한 방법들을 확인하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

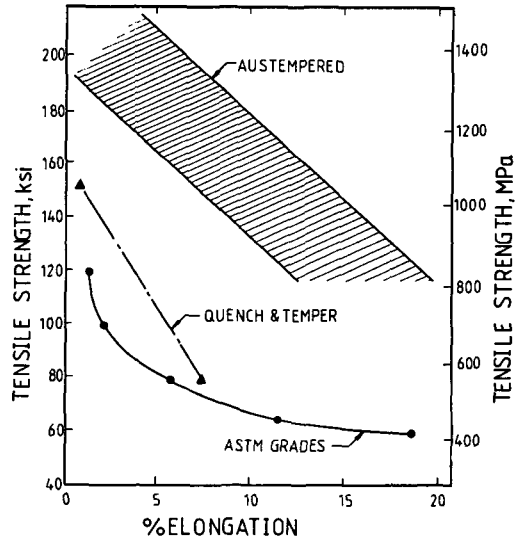


Fig. 1. Comparison of mechanical properties for austempered ductile irons with standard ductile iron grade.

Table 1. Sample preparation

	Composition(%)	# 1					# 2				
		C	Si	Mn	P	S	C	Si	Mn	P	S
Original ductile cast iron before heat-treatment		3.75	2.60	0.25	0.04	0.017	3.85	2.65	0.32	0.03	0.015
Austempering condition	Ferrite content(%)	70					60				
	Austenitizing treatment	900°C, 1.5hr					900°C, 1.5hr				
	Austempering temperature	250°C, 350°C					200°C, 300°C, 400°C				
	Austempering time	10, 20, 30, 60, 120mins					10, 20, 30, 60, 120mins				

2. 시편준비

시편은 다음과 같은 방법으로 준비되어 졌다. 상용의 구상흑연주철 Y-block이 austempering 처리를 위하여 사용되어 졌다. 표 1에서 볼 수 있듯이 두가지 종류의 Y-block이었는데 두종류 모두 JIS 규격 FCD 45였고 같은 회사에서 제조되었다. 다만 다른 batch에서 제조되었기 때문에 조성과 ferrite 분율이 표 1에서 볼 수 있듯이 다소 달랐다. 화학분석은 분광 분석기로 행하였으며 ferrite 분율은 현미경사진으로 결정하였다. 표 1의 1번 구상흑연주철은 austempering 열처리 온도 250℃와 350℃를 위하여 사용되어 졌고 2번 구상흑연주철은 austempering 열처리 온도 200℃, 300℃와 400℃를 위하여 사용되어 졌다. Austempering 열처리 유지시간은 두종류의 구상흑연주철 모두 각 austempering 온도에서 10분, 20분, 30분, 60분, 120분으로 변화를 주면서 염욕에서 austempering 처리를 하여 주었다. Austenitizing처리는 두종류의 시편 모두 900℃에서 1시간 30분 동안 유지시켰다.

Y-block들을 우선 충격시험편과 비파괴시험편으로 가공한 후 austempering 열처리 시켰다. 충격시험편은 8 × 10 × 55mm<sup>3</sup>의 크기를 가진 노치가 없는 subsize charpy 충격시험편으로 가공했고 비파괴시험편은 20 × 40 × 60mm<sup>3</sup>의 크기를 가진 직육면체 형태로 가공했다. 비파괴시험편은 초음파 시험과 전기저항시험을 한 후 경도시험편으로 사용했다. Austempering 열처리는 각 austempering 온도 및 시간에서 세개의 충격 시험편과 하나의 비파괴시험편을 하나의 batch로써 열처리 시켰다.

3. 기계적성질과 현미경사진

우리가 austempered 구상흑연주철을 사용하는 근본적인 이유는 좋은 기계적 성질 때문이다. 본 연구에 있어서는 기계적 성질 평가로서 충격시험과 경도시험을 행하였다. 충격값은 austempering 온도 및 시간을 달리하여 열처리 된 시편을 각 조건당 3개씩 충격 시험을 하여 평균값을 구했다.

Table 2. Impact test results (unit : kgf. m/cm<sup>2</sup>)

Austempering time(min) / Austempering temperature(°C)	10	20	30	60	120
200	0.3	0.4	0.4	1.2	1.6
250	0.4	2.1	4.4	5.9	6.5
300	4.9	4.9	6.0	5.5	5.3
350	6.9	11.1	10.3	11.6	12.9
400	9.6	10.5	10.9	9.2	7.9

\* As cast state : #1 ductile cast iron 9.5 kgf.m/cm<sup>2</sup>  
 #2 ductile cast iron 10.0 kgf.m/cm<sup>2</sup>

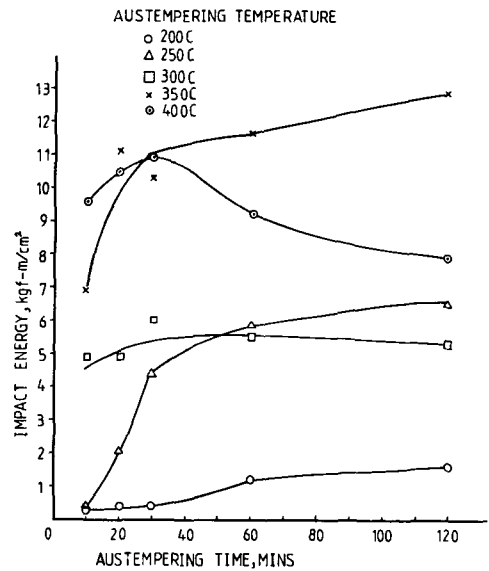


Fig. 2. Influence of austempering time on the impact energy of ductile cast iron austenitized at 900℃ and austempered at 200℃, 250℃, 300℃, 350℃, and 400℃.

표 2에서 볼 수 있듯이 주방상태에서 1번 구상흑연주철의 충격흡수에너지 값이 9.5kgf. m/cm<sup>2</sup>이며 이 값은 2번 구상흑연주철의 충격흡수에너지 값인 10.0 kgf. m/cm<sup>2</sup>과 거의 같은 값을 가진다. 그림 2에서 austempering 반응이 진행되어 감에 따라서 나타나는 충격에너지 값의 변화를 볼 수 있다. Austempering 온도

400℃를 제외하고 다른 온도에서는 시간이 경과함에 따라서 충격에너지 값의 변화가 없거나 증가한다. Austempering 온도 400℃에서 30분 이후에 충격에너지 값이 떨어지는 이유는 뒤에서 다시 언급하겠지만 austempering 반응의 두번째 단계 반응인 carbide 석출과 관련이 있다. 경도시험은 Brinell 경도시험을 하였다.

Brinell 경도시험은 강구의 크기 뿐만 아니라 시험 하중도 다른 경도시험에 비하여 크기 때문에 주물제품의 경도측정에 많이 이용된다. 그림 3은 austempering 온도 및 시간에 따른 Brinell 경도치 변화를 보여 준다. 주방상태의 경도치는 1번 구상흑연주철은 166이었으며 2번 구상흑연주철은 163이었다. 두 시편 사이의 차이는 충격실험 때와 같이 거의 차이가 없었다.

보여주지 않는다.

광학현미경은 austempered 구상흑연주철의 현미경 조직의 변화를 관찰하기에는 배율 관계상 충분하지 못하다. 본 연구에 있어서는 폴리싱되고 에칭된 시편에서 대략 2000배 배율로써 SEM으로 현미경조직을 관찰하여 그림 4에 보였다.

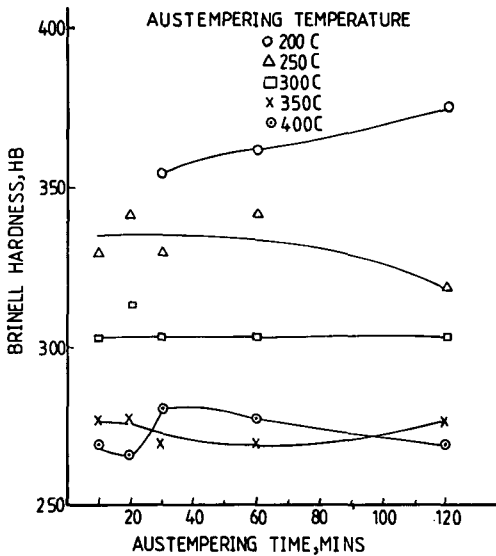
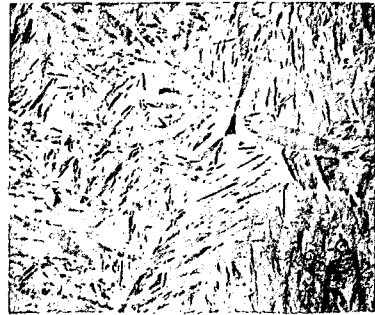
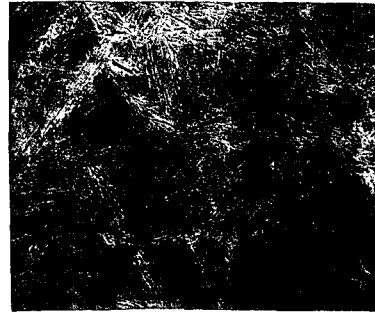


Fig. 3. Influence of austempering time on the Brinell hardness of ductile cast iron austenitized at 900 °C and austempered at 200°C, 250°C, 300°C, 350 °C, and 400°C.

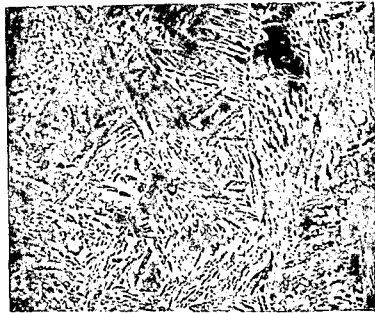
그림 3에서 볼 수 있듯이 austempering 온도 350℃까지는 온도가 올라갈수록 경도값은 떨어지지만 austempering 유지시간에 따라서는 경도값 변화를 거의



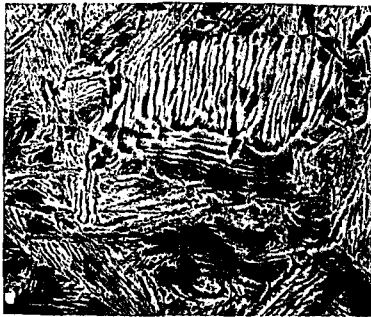
a) 200 °C



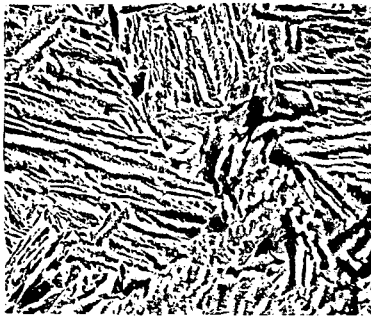
b) 250 °C



c) 300 °C



d) 350°C



e) 400°C

Fig. 4. Microstructures of specimens austempered at various temperatures; austempering times are same as 120minutes at all the samples ; revealed by the SEM (magnification 2000 X).

사진에서 침상형태로 검게 나타나는 부분이 bainite 형태의 ferrite이고 회색 나타나는 부분이 탄소가 과포화된 잔류 austenite이다. 200°C로 austempering 처리를 한 시편의 현미경조직은 martensite 조직을 보이고 있다. 이 martensite 조직이 낮은 충격에너지값과 높은 경도값을 갖는 원인이다. Austempering 열처리 시키는 온도가 올라갈수록 현미경조직 사진상 검게 나타나는 bainite 형태의 ferrite가 크고 분명하게 나타난다. 400°C로 austempering 열처리 시켰을 때 시간이 경과함에 따라서 충격에너지 값의 감소를 가져오는 carbide 석출은 2000배의 배율로서는 확인할 수 없었다.

#### 4. 비파괴적 평가

비파괴적으로 재료특성을 평가한다는 것은 어떤 측정이 가능한 물리적 변수를 측정함으로써 역으로 재료특성을 파악하는 문제이다. Austempered 구성흑연 주철이 물리적 측정 변수에 영향을 주는 것은 크게 보아서 구상화된 흑연, 기지조직(bainite형태의 ferrite, 탄소가 과포화된 austenite, martensite, carbide 등의 분율)이라고 볼 수 있다. 다행히도 austempering 열처리에 의하여 구상화된 흑연의 형태나 양이 변하지는 않는다. 따라서 물리적 변수에 영향을 주는 위의 두인자 중에서 구상화된 흑연의 영향은 배제시킬 수 있다. 본 연구에 있어서는 초음파 속도 측정과 비저항 측정을 통하여 비파괴적으로 austempered 구성흑연주철의 재질을 평가하고자 한다.

##### 4-1 초음파 속도측정

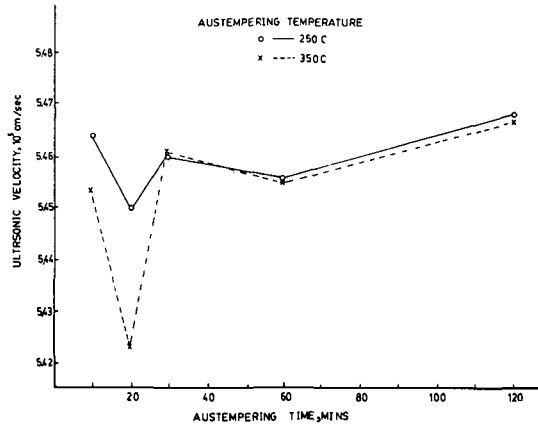
초음파 속도는 간략화된 pulse - echo - overlap<sup>4)</sup> 방법으로 측정하였다. 본 실험에 있어서는 초음파발생 및 수신장치(Panametrics 5052 UA)와 두 echo의 시간 간격을 읽을 수 있는  $\Delta$ time oscilloscope(Hewlett Packard 1743 A) 그리고 탐촉자로 pulse - echo - overlap 장치를 구성했다. 속도를 측정하기 위하여 가능한 한 두면이 평행하고 평편하게 만든 시편들의 두께를 마이크로미터로 측정한다. 시편 내부로 전파된 초음파는 시편저면에서 반사되어 그 초음파에너지의 일부는 탐촉자로 되돌아 오고 일부는 반사되어 다시 시편 속을 전파해 나가는 과정을 되풀이 한다. 그리하여 지수함수 식으로 초음파 에너지가 감쇠해 가는 여러개의 echo가 oscilloscope상에 나타나게 되며, 초음파 속도를 측정하기 위해서는 최소한도로 두개의 echo가 필요하다. 이 두 echo사이의 시간을  $\Delta$ time oscilloscope로 측정한다. 이미 측정된 시편두께를 두배해서 oscilloscope 상으로 측정된 시간으로 나누어서 초음파 속도를 구할 수 있다. 본 실험에서도 5 MHz 탐촉자를 사용했다.

시편준비에서 언급한 austempering 온도 및 시간을 달리한 비파괴시험 시편으로 초음파 속도를 측정하였다. Ferrite 함량이 70% 정도인 구상흑연주철 1번과 ferrite 함량이 60% 정도인 구상흑연주철 2번을 나누

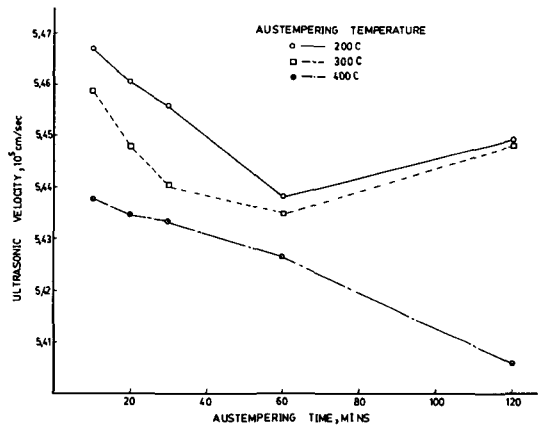
어서 살펴 보았다. 1번 구상흑연주철은 250°C와 350°C에서 austempering 되었으며 2번 구상흑연주철은 200°C, 300°C, 400°C에서 austempering 되었다. Austempered 1번 구상흑연주철의 austempering 시간에 따른 초음파 속도 측정결과를 그림 5(a)는 보여주고 있다. 그림 5(a)에서 보면 시간이 경과함에 따라서 나타나는 초음파 속도가 austempering 온도 250°C일 때와 350°C일 때 같은 경향을 보인다. Austempered 2번 구상흑연주철의 austempering 시간에 따른 초음파 속도 측정결과를 보인 그림 5(b)와 그림 5(a)를 비교하여 보면 흥미롭다. 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 200°C, 300°C, 400°C로 austempering 시킨 시편들도 시간에 따라서 초음파 속도가 변해가는 양상이 같다. 단지 austempering 온도 400°C에서 120분 동안 유지시킨 시편이 다른 경향을 보인다. 즉 austempering 온도 200°C와 300°C에서 120분 동안 austempering 시킨 시편에 비해서 속도가 증가하는데 반하여 400°C에서 120분 동안 austempering 시킨 시편은 60분 동안 austempering 시킨 시편에 비해서 속도가 떨어진다. 이것은 그림 2에서 보인 충격에너지 값이 이 조건에서 떨어지는 것과 관련이 있어 보인다. 그림 5(a)와 5(b)에서 austempering 시간에 따른 초음파 속도가 변하는 양상이 틀린 것은 austempering 처리하기 전의 현미경조직이 다소 틀리기 때문이라고 생각된다. Austempered 구상흑연주철의 중요한 기계적 성질중의 하나인 충격흡수에너지와 초음파 속도와 의 관계를 검토하기 위하여 그림 2와 그림 5(a), 그림 5(b)를 비교하여 보자. Austempering하기 전의 구상흑연주철의 영향력으로 인해서 그림 2와 그림 5(a)를 비교하고, 또 그림 2와 그림 5(b)를 비교하여 보면, 각 austempering 시간에서 austempering 온도가 증가하면 초음파 속도가 감소하고 충격에너지 값은 증가한다.

위의 결과를 볼 때 초음파속도는 austempering하기 전의 구상흑연주철의 조직에 영향을 받기 때문에 초음파속도를 austempered 구상흑연주철의 품질관리도구로 사용하기는 어렵게 보인다. 하지만 그림 5(a)와 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 두가지 종류의 구상흑연주철이 명백히 구분되는 시간에 따른 초음파속도변화의 경향을 보인다는 것은 초음파속도 측정을 통하여 구상흑연주철의 austempering 반응을 연구할 수 있는

가능성을 제시해 준다.



(a) austempered at 250°C and 350°C



(b) austempered at 200°C, 300°C, and 400°C

Fig. 5. Influence of austempering time on the ultrasonic velocity.

#### 4-2 전기저항 측정

비저항은 어떤 재료의 기하학적 형상과 무관하게 결정되는 재료 상수로 등방성재료에서 전기전도도의 역수와 같다. 금속재료의 비저항과 그 재료의 미세구조와의 관계를 이해하기 위하여 재료내의 전자의 이동과 산란효과를 양자역학적으로 전기전도도를 취급

하여 그 역수를 나타내면 다음과 같다.<sup>5)</sup>

$$\rho = \frac{mV_F}{me^2\bar{v}}$$

여기서  $\rho$  는 비저항,  $m$ 은 전자의 질량,  $V_F$ 는 Fermi 에너지를 가지고 있는 전자의 속도,  $e$ 는 전자의 전하,  $\bar{v}$ 는 전자의 평균 자유 경로이다. 이들 중에서 재료의 미세구조와 가장 관련이 있는 변수는 전자의 평균 자유경로인  $\bar{v}$ 이다.  $\bar{v}$ 는 같은 온도에서 격자내의 불순물, vacancy나 self-interstitial과 같은 점결함, 선결함, grain boundary, phase boundary 등에 의하여 영향을 받는다. 따라서 austempering 처리를 할 경우 기조직이 바뀔때 따라 이들이 전자의 평균 자유경로에 영향을 줌으로써 austempering 처리 온도 및 시간이 달라지는 조건에 따라서 비저항이 다르게 나타날 것이다. 비저항 측정장치<sup>6)</sup>는 four point probe, 정전류 공급장치, 전위차 측정장치의 세부분으로 나눌 수 있다. Four point probe의 4개의 pin들 사이의 간격은 3mm로 하였으며 재료표면과 pin 사이의 접촉을 향상시키기 위하여 금으로 도금한 spring loaded pin을 사용하였다. 정전류 공급장치는 5.5 A의 전류까지 선형적으로 정전류의 세기를 변화시킬 수 있는 자체 제작된 장치였고, 전위차 측정에 사용된 장비는 Solatron 7071 computing voltmeter이다. 그리고 상온에서도 열기전력이 존재하므로 이의 영향을 제거하기 위하여 한 지점에 대해서 극성을 바꾸어서 측정하였다. 정전류에 의해서 재료의 온도변화가 생겨 전위차가 변하기 때문에 매 측정시마다 5초 경과 후에 측정된 8개 값의 평균치를 구했다. 이때 측정된 값은 재료가 semi-infinite 하다는 가정하에서 측정된 값이기 때문에 보정상수가 필요하며 본 연구에 있어서는 Uhler<sup>7)</sup>의 보고서에 계산된 보정상수를 이용했다. 실험준비에서 언급한 austempering 온도 및 시간을 달리한 비파괴시험편을 사용하여 초음파속도 측정실험을 한 후 전기저항을 측정하여 그 결과를 그림 6에 보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 austempered 구상흑연주철의 austempering 시간에 따른 전기저항치의 변화 형태가 austempering 하기 전의 구상흑연주철의 조직영향을 받지 않는다. 이 사실은 austempering 구상흑연주철을 전기저항법으로 평가하여 품질관리를 할

수 있는 가능성을 제시해 준다. 200°C에서 austempering을 한 시험편들을 예외로 하고, 다른 온도에서 austempering을 한 시험편들에 있어서, 대체적으로 austempering 온도가 증가할수록 전기저항도 증가한다는 것을 알 수 있다. 200°C로 austempering 시켰을 때 다른 경향이 나타나는 것은 그때의 시험조직이 다른 온도에서 austempering 시켰을 때의 조직과는 달리 martensite 조직이기 때문일 것으로 사료되며 앞의 현미경 사진에서 확인되었다. 그림 6의 전기저항 측정결과와 그림 2의 충격흡수에너지 측정결과와 비교하여 보면 전기저항치가 증가하면 충격흡수에너지 값도 증가한다는 것을 알 수 있다.

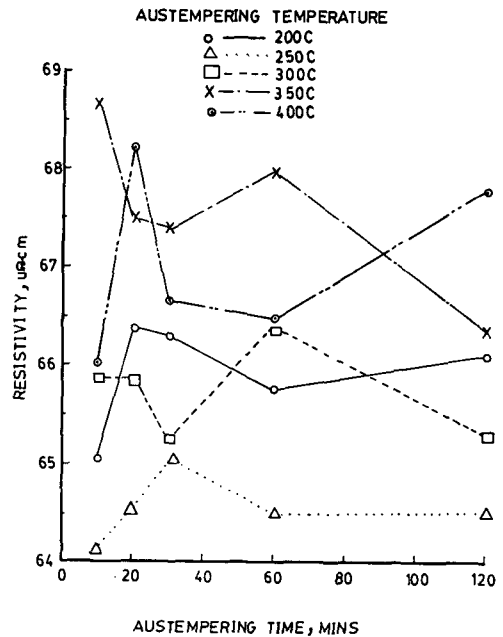


Fig. 6. Influence of austempering time on the resistivity of ductile cast iron austenitized at 900°C and austempered at 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, and 400°C.

한편 충격흡수에너지 결과를 이용하여 구상흑연주철을 어떻게 austempering 열처리 시켜야 우리가 원하는 성질을 가지는 austempered 구상흑연주철을 얻을

수 있다. 그림 7은 우리가 원하는 충격흡수에너지가 9kgf.m/cm<sup>2</sup>이라고 가정하였을 때 빗금친 영역에서 열처리를 해주어야만 우리가 원하는 성질을 가지는 austempered 구상흑연주철을 제조할 수 있다는 것을 보여준다 하지만 충격흡수에너지 값을 얻기 위해서는 재료를 파손시켜야 하기 때문에 비파괴적으로 austempered 구상흑연주철이 우리가 원하는 성질을 가지고 있는지를 판단할 기준이 필요하다. 앞에서 언급한 바와 같이 전기저항치와 충격흡수에너지가 상관관계가 있다는 점으로부터 전기저항치를 이용하여 austempered 구상흑연주철의 성질이 우리가 원하는 성질을 가지고 있는지를 판단할 수 있다. 전기저항치 66.5μΩ-cm를 기준으로 하여 그 이상의 저항치를 가지는 영역을 빗금친 부분으로 나타낸 것이 그림 8이다. 그림 7과 8을 비교하여 본다면, 빗금친 영역이 거의 비슷하다는 사실로부터 전기저항치를 이용하여 austempered 구상흑연주철의 기계적 성질을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

위의 결과로부터 다음과 같이 결론지을 수 있다. 초음파속도 측정을 통한 austempered 구상흑연주철의 기계적 성질 평가는 초음파속도가 austempering 열처리하기 전의 조직 영향력으로 인해서 어렵다.

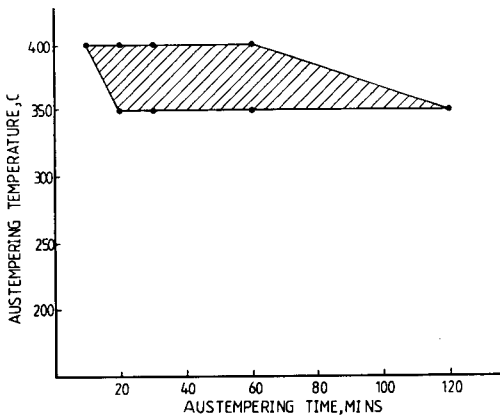


Fig. 7. A process window for obtaining higher toughness than 9 kgf.m/cm<sup>2</sup>.

전기저항측정은 austempering 열처리하기 전의 조직 영향력을 받지 않을 뿐더러 충격흡수에너지와 전기저항치와의 좋은 상관관계로 인해서 austempered 구상흑연주철의 품질관리에 사용될 수 있는 가능성이 있다.

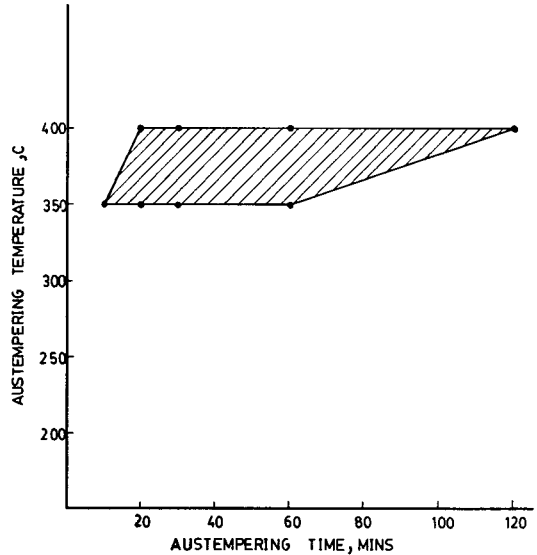


Fig. 8. A process window for obtaining higher resistivity than 66.5 μΩ-cm.

References

1. J. F. Janowak, R. B. Gundlach., AFS Transactions 83-54 (1983) pp. 377~388.
2. R. C. Voight., AFS Transactions 83-89 (1983) pp. 253~262.
3. R. B. Gundlach, J. F. Janowak., Metal Progress, July (1985) pp. 19~26.
4. S. S. Lee, S. Lee, KSRI-88-64-IR (1988)
5. J. S. Dugdale., Electrical Properties of Metals and Alloys, Edward Arnold (1977)
6. R. L. Coben, K. W. West., Material Evaluation, Vol. 41 (1983) pp. 1073~1077.
7. A. Uhler, Jr., Bell System Tech. J. (1955) pp. 105~128.