

873 ~ 1,273 K에서 열화된 강화흑연강(Compacted Graphite Iron, CGI)의 초음파특성

Ultrasonic Characteristics of Degraded Compacted Graphite Iron from 873 to 1,273 K

이수철* · 남기우***

Soo-Chul Lee* and Ki-Woo Nam***

(접수일 : 2013년 02월 05일, 수정일 : 2013년 02월 28일, 채택확정 : 2013년 04월 16일)

Abstract: Compacted graphite iron 340 was carried out the heat treatment from 873 to 1,273 K. Compacted graphite iron 340 was evaluated relationship between the sound velocity, the attenuation coefficient and the tensile strength. The obtained results are as following. The signal strength of C scan images were weak according to increasing of heat treatment temperature and time. The amplitude of A scan and B scan was also low. This can be cause that the graphite was grown into the type of vermicular, and the many of grain boundary with ultrasound scattering were increase. The sound velocity was depend upon the heat treatment temperature and time, the attenuation coefficient had nothing to do with the temperature and time. The higher the heat treatment temperature, the tensile strength and the sound velocity were decreased. However, the tensile strength was proportional to the sound velocity. The higher tensile strength, the faster the sound velocity.

Key Words : Diesel engine, Compacted graphite iron, Heat treatment, Sound velocity, Attenuation coefficient, Vermicular

1. 서 론

고출력, 저배출가스 및 연료 경제성에 대한 수요 때문에¹⁾, 엔진 설계자들은 더욱 강한 엔진 블록 재료를 개발하기 위하여 노력하고 있다. 특히, 이것은 실린더 보어 압력을 증가에 의하여 총출 성능 목표의 해결이 목적인 디젤 섹터에서는 필수적이다. 오늘날 직접 분사 디젤에서 보어 압력은

약 135 bar이고, 차세대 DI 디젤은 160 bar 전후이다. 대용량 트럭의 피크 연소 압력은 이미 200 bar를 초과하고 있다. 회색 주철과 상용 알루미늄 합금의 강도, 강성 및 피로 특성은 이러한 사용 기준을 만족하기에 불충분하다. 그러므로 여러 자동차 OEM^{2,3)}은 가솔린과 디젤엔진 실린더 블록 및 헤드 어플리케이션을 위하여 고온용 CGI(Compacted Graphite Iron)를 개발하였다.

*** 남기우(교신저자) : 부경대학교 재료공학과
E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358
*이수철 : 부경대학교 대학원 학연협동기계공학

*** Ki-Woo Nam(corresponding author) : Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.
E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358
*Soo-Chul Lee : UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University

CGI는 흑연 침전물이 짧고, 뭉툭하고 모서리가 둥글기 때문에, 회색과 연성 주철 사이의 중간정도 우수한 기계적 및 물리적 특성을 가지고 있다. 내연기관과 브레이크 시스템과 같은 자동차 부품은 상대적으로 높은 열전도성 때문에 사용한다.^{4,5)} 주철은 기계적 강도, 마모 특성 및 열전도율의 우수한 특성 때문에, 엔진 블록, 실린더 헤드, 브레이크 드럼 및 디스크 등에 사용되고 있다. 엔진의 실린더 내의 연소 가스 온도는 엔진의 압축비 또는 운전 조건(부하)에 따라서 다르다. 보통 상사점 후 283~288°부근에서 2,273 K 이상으로 가장 높고, 그 후 팽창하면서 973~1,173 K 부근에서 배기한다. 이러한 고온은 엔진 각부로 전달되어, 부품의 온도가 지나치게 상승하여 실린더 헤드의 변형을 일으킬 수 있다.

많은 연구자들은 재료시험의 평가 수단으로서 X선법, acousto-ultrasonic법, 초음파법, 음향방출법 등과 같은 비파괴검사법으로 재료의 결합검출 및 평가기술을 개발하는데 주력해왔다. 이러한 재료들은 금속재료 및 복합재료의 파괴기구를 해석하는데 유용한 도구로 많은 연구가 실시되었다.^{6,9)} 그러나 CGI의 초음파 탐상에 관한 비파괴평가 연구는 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있으나,¹⁰⁻¹³⁾ 아직까지 해결해야 하는 문제점이 많은 실정이다. CGI를 안전하게 사용하기 위해서는 비파괴적인 방법에 의하여 초음파특성을 평가하여 안전성을 확보하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 디젤엔진의 실린더 헤드 및 배기 매니폴드에 사용되는 것을 고려하여, 873~1,273 K에서 1~96시간 열처리를 실시한 CGI340의 음속, 감쇠계수 및 인장강도와와의 상관관계를 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

사용한 재료는 신명테크에서 제조한 CGI340을 사용하였다. 재료의 기계적 특성과 화학적 성분은 Table 1, 2에 나타낸다. 시험편의 열처리 온도 및 시간은 873, 973, 1,073, 1,173 및 1273 K에서 각각

1, 5, 10, 24, 48 및 96시간이다. 열처리 된 시험편은 10 x 10 x 6 mm로 잘라서, 초음파의 산란을 막기 위하여 양면을 경면 연마하였다. 초음파 탐상을 위한 시험편의 배치를 Fig. 1에 나타낸다.

실험에 사용한 초음파 탐상 장치(Ultrasonic testing system)는 일본 Krautkramer사의 스캐너 SDS6500, 탐상기 HIS3-HF, 탐촉자 10 MHz (φ 6.35)와 25 MHz (φ 5)이다. 이들 장비는 무라이 처리(minimum unite rating analysis image)를 사용하고 있다.¹⁴⁾ SDS 장비에 의한 수직탐상은 전몰수침(물거리 12 mm)으로 단일 탐촉자 반사법으로, 수직 비집속법(defocus method)으로 탐상하였다. 비집속법 개략도와 탐상 모습을 Fig. 2에 나타내었다. 비집속법은 집적 빔의 초점이 관찰표면보다 먼 안쪽에서 맺도록 하고, 표면파를 만들어 탐상하는 방법이다. 스캔(scan) 간격은 X-Y 0.02 x 0.02 mm이다. 탐상주파수가 높아질수록 그 진폭의 크기는 작아지게 되고 침투 탐상 깊이는 감소한다. 일반적으로 에너지 전달율은 주파수비가 2배로 커질 경우, 감쇠를 무시한다 하더라도 약 40% 이상 더 감소하게 되고 이와 마찬가지로 탐상 가능한 깊이도 감소한다.

두께 측정은 1 μm까지 정확하게 측정하여 음속 계산에 사용하였다. 음속 측정은 두께에 대하여 전파 시간으로 나누어 구하였다. 감쇠계수는 Fig. 3과 같은 B1, B2 신호 높이를 (두께 x 2)로 나누어 구하였다.

Table 1 Mechanical properties of CGI340

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
411.5	313.8	2.7

Table 2 Chemical compositions of CGI340 (wt.%)

C	Si	Mn	Mg	Cr	Al	Cu	S	P
3.63	2.49	0.42	0.007	0.02	0.008	0.42	0.014	0.01

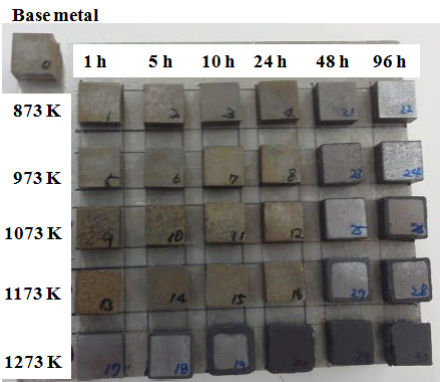


Fig. 1 Arrangement of specimens to measure of velocity and attenuation

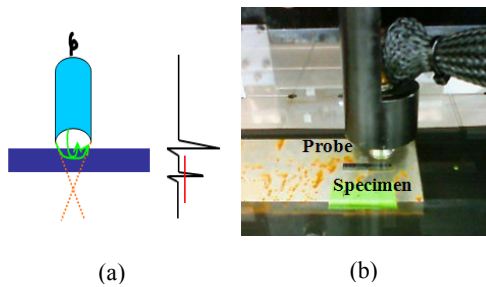


Fig. 2 (a) Schematic diagram of defocus method and (b) Image of detector

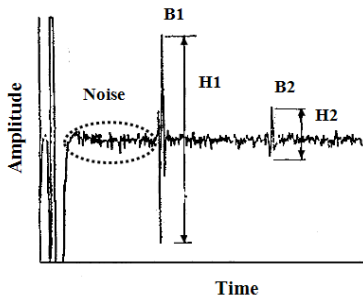
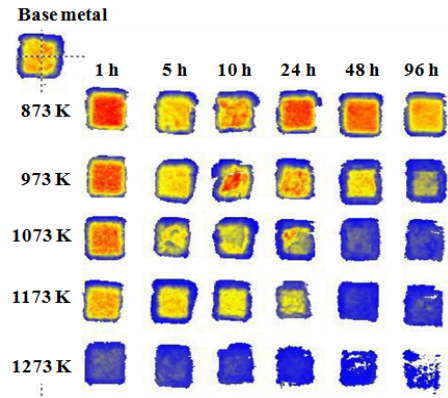


Fig. 3 Ultrasonic echo (A scan mode)

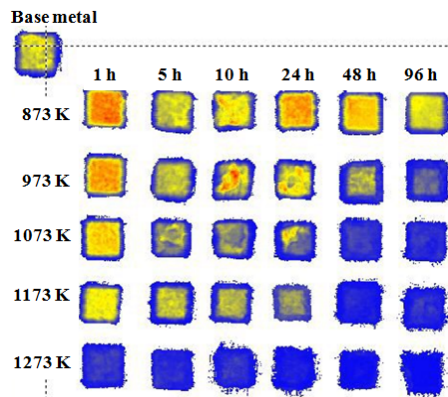
3. 결과 및 고찰

열처리된 시험편을 온도 및 시간에 따라 배열하여 C 스캔한 영상을 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에서 (a)는 10 MHz 탐촉자의 결과이고, (b)는 25 MHz 탐

촉자의 결과이다. 2종류의 탐촉자에서 얻어진 영상은 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 빨간색은 신호 강도가 높으며, 푸른색은 신호 강도가 낮은 것이다. 즉, 빨간색은 표면에서 보낸 신호가 뒷면에서 반사되어 많이 되돌아온 것을 의미한다. 이것은 재료내부에 기공, 불순물, 입계 결함 등이 적어, 초음파의 산란이 작은 것을 의미한다. 5종류 온도에서 시간이 증가함에 따라서 신호 강도가 약하게 나타났다. 이것은 뒤에서 나타내듯이 흑연이 별레 모양으로 성장하여 초음파가 산란할 수 있는 입계가 많아진 것이 원인이라 판단된다. 또한 열처리 온도 및 시간에 따라서 신호 강도가 균일하지 못한 것은 흑연의 분산이 균일하지 않은 것이 원인이다.



(a) Probe 10 MHz



(b) Probe 25 MHz

Fig. 4 C scan image of heat treated specimens at each temperature using 10 and 25 MHz probe, respectively

873 K에서 열처리된 시험편의 C 스캔 영상 및 A 스캔의 진폭을 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에서 (a)는 10 MHz 탐촉자의 결과이고, (b)는 25 MHz 탐촉자의 결과이다. A 스캔에서 빨간선은 신호의 진폭에서 양의 진폭 값이며, 파란선은 음의 진폭 값이다. 2종류의 탐촉자에서 얻어진 C 스캔 영상에 대하여 A 스캔 진폭은 비슷한 결과를 나타내고 있다. 즉, 신호 강도가 강한 열처리 시간에 대한 시험편은 A 스캔 진폭이 높게 나타나고 있다. 반면 신호 강도가 낮아 푸른색을 많이 나타내는 시험편의 진폭은 낮게 나타났다. 25 MHz 탐촉자의 A 스캔 진폭은 양과 음의 값에 차이가 있으나, C 스캔 영상 대비 경향은 10 MHz A 스캔 진폭과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

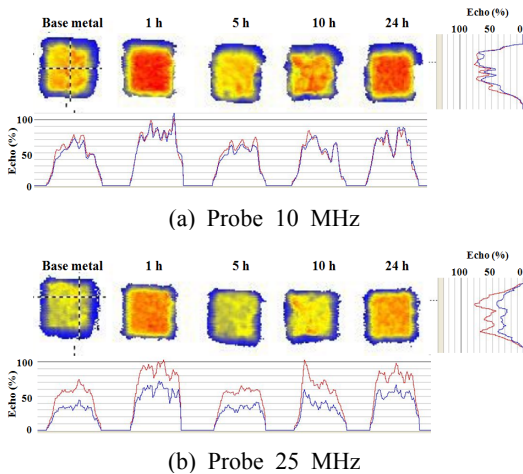
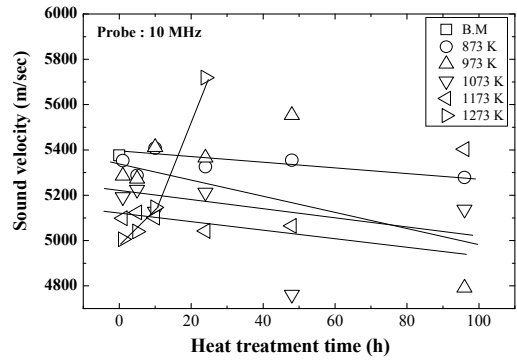


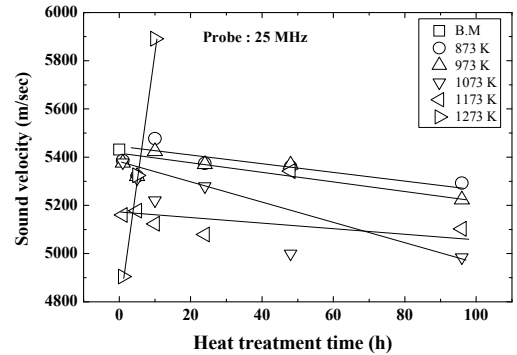
Fig. 5 A scan amplitude and C scan image of heat treated specimens at 873 K using 10 and 25 MHz probe, respectively

열처리 시간과 음속과의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. Fig. 6에서 (a)는 10 MHz 탐촉자의 결과이고, (b)는 25 MHz 탐촉자의 결과이다. (a), (b)에서 각 열처리 시간에서 온도가 증가할수록 음속이 느려지고, 각 온도에서 열처리 시간이 길어짐에 따라서 음속이 느려지는 것을 알 수 있다. 이것은 열처리 온도 및 시간이 길어짐에 따라서 흑연이 벌레모양으로 성장하고, 입계가 많아짐에 따라서 산란

되는 초음파가 많기 때문이라 판단된다. 그러나 1,273 K에서는 반대의 경향이 나타나고 있으나, 이것은 Fig. 10에 나타내었듯이 열처리 시간이 길어질수록 표면은 산화하여 인장강도는 작아지지만, 조직이 미세하여 음속이 빠르게 나타났다고 판단된다.



(a) Probe 10 MHz

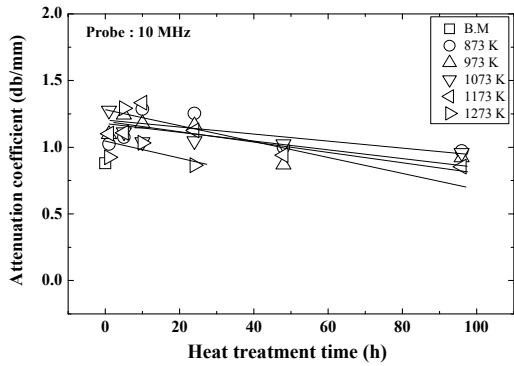


(b) Probe 25 MHz

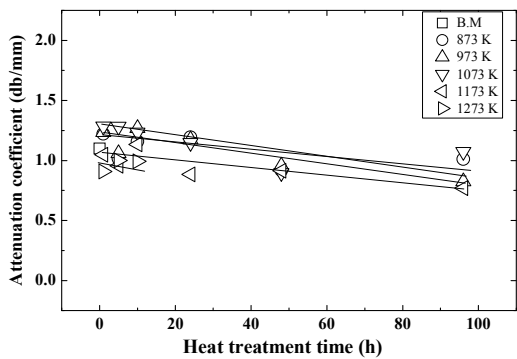
Fig. 6 Relationship between sound velocity and heat treatment time

열처리 시간과 감쇠계수와의 관계를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에서 (a)는 10 MHz 탐촉자의 결과이고, (b)는 25 MHz 탐촉자의 결과이다. (a), (b)에서 감쇠계수는 온도 및 시간에 따른 일정한 경향은 나타나지 않았으나, 전체적으로 온도가 높을수록, 열처리 시간이 길어질수록 작아지는 경향을 나타내고 있다.

인장강도와 음속과의 관계를 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 8에서 (a)는 10 MHz 탐촉자의 결과이고, (b)는 25 MHz 탐촉자의 결과이다. (a), (b)에서 인장강도가 높을수록 음속이 빠른 것을 알 수 있다. 또한 열처리 온도가 높을수록 음속이 저하하고 있다. 이것은 열처리 온도에 따라서 흑연이 벌레 모양으로 성장하고, 입계가 많아짐에 따라서 산란되는 초음파가 많기 때문이라 판단된다. 그러나 1,273 K의 음속은 인장강도가 증가할수록 작아지는 것으로 나타났다. 이것은 시간이 증가할수록 외곽부가 산화하여, 인장강도가 작아지나, 조직이 미세하여, 음속이 증가한 것이라 판단된다.



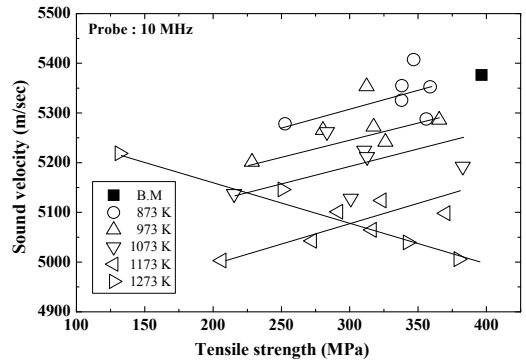
(a) Probe 10 MHz



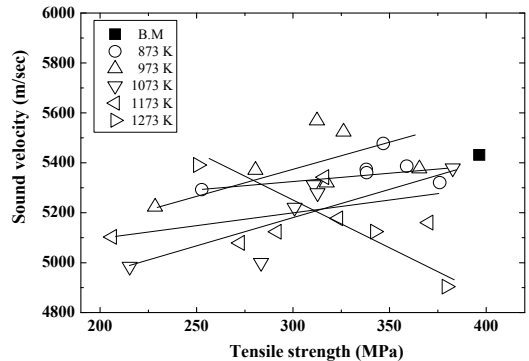
(b) Probe 25 MHz

Fig. 7 Relationship between attenuation coefficient and heat treatment time

Fig. 9는 CGI340 모재의 조직을 나타낸다. CGI340은 구상흑연①과 편심흑연②가 동시에 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 이로 인하여 473 K 이하 온도에서 치수안정성이 높은 소재로 알려져 있다. CGI340은 열처리 온도 및 시간에 따라 구상흑연 및 편심흑연의 변화는 일정하지 않지만, 유지 시간이 길어짐에 따라 기지 조직의 결정립의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 결정립의 성장으로 인하여 인장 강도 및 경도가 감소하였을 것으로 판단되며, 구상흑연 및 편심흑연의 변화 및 Vermicular particles(Worm-shaped) 조직에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.



(a) Probe 10 MHz



(b) Probe 25 MHz

Fig. 8 Relationship between sound velocity and tensile strength

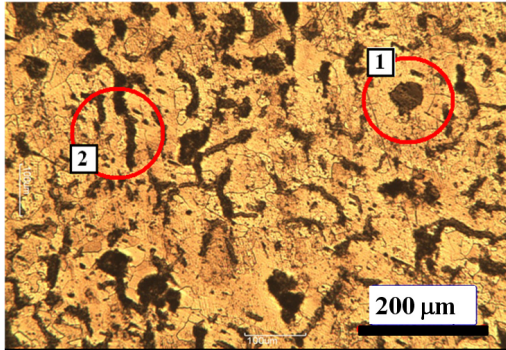


Fig. 9 Microstructure of CGI 340

Fig. 10은 1,273 K에서 48 h 열처리한 시험편이다. (a)는 과도한 열처리에 의하여 열화되어 중심부와 외곽부가 확실하게 구분되었다. 중심부 (b)는 조대한 기지 조직인 페라이트에 구상흑연이 있으나, 외곽부 (c)는 미세한 조직으로 되었다.

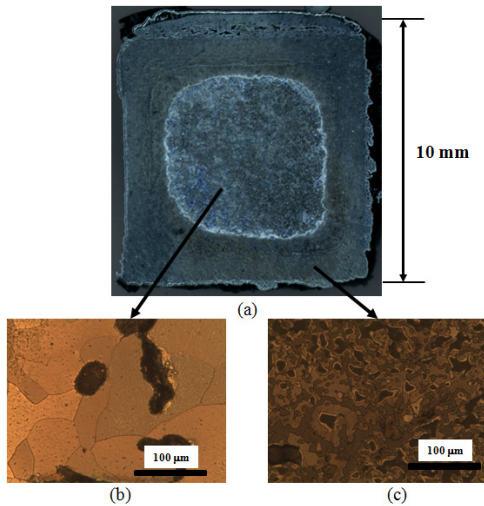


Fig. 10 Micrographs from heat treatment temperature of 1,273 K during 48 hours

4. 결 론

본 연구에서는 강화흑연강(CGI340)이 디젤엔진의 실린더 헤드 및 배기 매니폴드에 사용되는 것을 고려하여, 873~1,273 K에서 열처리를 실시하였다. 열처리를 실시한 CGI340을 사용하여, 음속,

감쇠계수 및 인장강도와의 상관관계를 평가하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. C 스캔의 영상은 열처리 온도가 증가하고 시간이 길어질수록 신호 강도가 약하게 나타났으며, A 스캔 및 B 스캔 진폭도 낮게 나타났다. 이것은 흑연이 벌레 모양으로 성장하여 초음파가 산란할 수 있는 입계가 많아진 것이 원인이다.

2. 열처리 시간과 음속과의 관계는 열처리 온도가 높고, 시간이 길어질수록 음속이 느려지는 것을 알 수 있었다. 그러나 감쇠계수는 상관관계가 거의 없었다.

3. 열처리 온도가 높을수록 인장강도가 저하하고, 음속이 저하하였다. 그러나 인장강도와 음속은 비례하여 인장강도가 높을수록 음속이 빠른 것을 알 수 있었다.

References

1. S. H. Jung, 2009, "Combustion characteristics of pre-mixed charge compression ignition engines with natural gas applied to 4-cylinders diesel engine" *Journal of the Korea Society For Power System Engineering*, 13, pp. 5-10.
2. D-Moment, 1999, "Auto Motor und Sport", Issue 10, pp. 92-94.
3. F. Indra and M. Thol, 1995, "Compacted graphite iron (CGI) - A new material for internal combustion engines", *Fifth Aachen Colloquium on Vehicles and Automobile Technology*, pp. 331-350.
4. Y. H. Shy, C. H. Hsu, S. C. Lee and C. Y. Hou, 2000, "Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron", *Materials Science and Engineering A*, 278, pp. 54-60.
5. G. F. Geier, W. Bauer, B. J. McKay and P. Schumacher, 2005, "Microstructure transition from lamellar to compacted graphite using different modification agents", *Materials Science and Engineering A*, 413 - 414, pp. 339-345.

6. K. W. Nam, S. S. Park, S. H. Ahn, J. Y. Do and I. D. Park, 2003, "Fatigue behavior of STS316L weldments and degradation characteristic evaluation by ultrasonic test", Journal of the KSNT, Vol. 23, No. 2, pp. 156-164.
7. W. C. Kim, J. G. Kim, D. S. Gu, H. J. Kim and B. K. Choi, 2010, "AE signal characteristics analysis caused by crack growth" Journal of the Korea Society For Power System Engineering, 14, pp. 41-46.
8. S. Y. Lee, J. H. Jeong, S. H. Ahn and K. W. Nam, 2003, "AE Characteristic under Tensile of Polyethylene for Low Pressure Pipe", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 82-85.
9. S. H. Ahn, J. W. Kim, J. Y. Do and K. W. Nam, 2006, "Evaluation of the Corroded Pipe by Time-Frequency Analysis", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 89-92.
10. W. Orłowicz and Z. Opiekun, 1995, "Ultrasonic detection of microstructure changes in cast iron", Theoretical and Appl. Fracture Mech, Vol. 22, pp. 9-16.
11. D. N. Collins and W. Alcheikh, 1995, "Ultrasonic non-destructive evaluation of the matrix structure and the graphite shape in cast iron", J. of Materials Processing Technology, Vol. 55, pp. 85-90.
12. Y. Lerner and P. Brestel, 1996, "Ultrasonic testing predicts casting properties", Advanced Materials and Processes, Vol. 11, pp. 39-41.
13. S. E. Kruger and J. Charlier, 1998, "Ultrasonic back scattering formulation applied to cast iron characterization", Proceedings of 7th European Conf. on NDT- Copenhagen, Vol. 2, pp. 1102-1109.
14. J. Murai, "Minimum Unite Rating Analysis Image", Japan Patent No. 2896385