

논문

초음파 진동에 의한 A328 알루미늄 합금 용탕의 탈가스

최경환 · 장훈 · 임정규 · 김상섭* · 조규섭†

한국생산기술연구원, *인하대학교

Degassing of Molten A328 Aluminum Alloy by Ultrasonic Vibration

Kyeong-Hwan Choe, Hoon Jang, Jung-Kyu Lim, Sang-Sub Kim*, and Gue-Serb Cho†

Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

*Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract

A328 alloy is an attractive candidate for recycle-friendly aluminum alloy in the recycling of automotive components. In this study, A328 alloy melt was degassed by ultrasonic vibration and the effect of treatment time on the density, fluidity and mechanical properties was investigated. Experimental results reveal that a constant value of density can be reached after less than 180 seconds of ultrasonic treatment time, but the density decreased when the treatment time was 300 seconds. Ti which was dissolved from the horn during ultrasonic treatment reduced the fluidity of melt. After degassing by ultrasonic vibration for 180 seconds, tensile strength increased from 201MPa to 250MPa, and elongation increased from 2.38% to 3.50%, however, further treatment deteriorated the mechanical properties.

Key words: Ultrasonic vibration, Degassing, Cavitation, Die-casting, A328 alloy.

(Received October 6, 2011 ; Accepted October 27, 2011)

1. 서 론

최근 국제적인 환경규제와 이에 대응하기 위한 연비향상을 위해 자동차의 경량화에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 알루미늄, 마그네슘 등의 경량합금을 이용한 자동차 부품의 비율이 점차 증대되고 있다. 알루미늄 자동차 부품의 경우 주조 공정에 의한 생산비율이 79%로 가장 높는데[1], 주조 공정에 의한 부품의 생산은 필연적으로 기공(pore)이 존재하는 문제점이 있으며, 이는 기계적 성질 및 내식성에 유해하게 작용하며 주조 공정에서의 유동도(fluidity)를 감소시킨다. 따라서 고품질의 주조 부품의 제조를 위해서는 기공의 제거가 매우 중요하다[2].

일반적으로 기공의 제거를 위해서는 용해 단계에서의 탈가스 공정이 매우 중요한데 알루미늄 용탕의 기공의 원인으로 작용하는 수소 제거의 방법에는 N₂ 또는 Ar 가스 버블링(bubbling), 진공 혹은 불활성 분위기 용해, 재용해, 탈가스 정제 투여 등이 있다[3]. 그러나 환경의 보호와 자원의 경제적 사용에 대한 문제점 때문에 위의 탈가스 방법 외에 또 다른 방법의 적용이 필요시 되고 있으며 그 중 초음파 진동에 의한 탈가스는 앞에 언급되었던 문제점들을 해결하면서 용탕의 탈가스 효과는 물론 처리 조건에 따라 용탕의 청정화, 결정립의 미세화도 가능하다[2,4,5].

한편, 환경규제의 강화와 함께 자동차 부품의 재활용에 대한

관심이 높아지고 있다. 하지만, 알루미늄 합금의 경우, 국가별로 상이한 규격이 존재하고, 각 자동차 메이커들도 각자의 규격을 관리하는 등 200여 개에 가까운 규격이 존재하기 때문에 알루미늄 자동차 부품을 재활용하는 데에는 큰 어려움이 존재하는 것이 현실이다. Table 1은 자동차 한 대당 알루미늄 주조부품의 무게를 100 kg으로 상정하였을 때 알루미늄 주조합금의 종류와 무게를 나타낸 것이며 Table 2는 알루미늄 주조부품 전체를 같이 용해했을 때의 조성을 알기 위하여 각각의 합금조성에 중량비를 가중치로 하여 환산한 결과이다. 환산결과 Si 7.6wt%, Cu 2.1wt%, Fe 0.9wt%, Mn 0.4wt%, Mg 0.3wt%로 미국 알루미늄협회(AA) 규격의 328 합금과 유사한 조성으로 확인되었다.

Table 1. The kinds and weights of Aluminum casting alloys for automobile components.

Components	Alloy	Weight
Engine block	ALDC10	30 kg
Cylinder head and etc.	AC2B	15 kg
Wheel	AC4CH	20 kg
Transmission case	ALDC10	10 kg
Various housings	ALDC10	10 kg
Safety components	AC4CH	15 kg

†E-mail : gscho@kitech.re.kr

Table 2. Conversion composition of Aluminum castings for automobile components.

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Pb	mass balance
AC2B	5.5-6.5	1.00	3.0-4.0	0.50	0.10	0.00	0.35	1.00	0.00	0.25	0.0	15 kg
Conversion Factor	0.90	0.15	0.52	0.07	0.01							
AC4CH	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.25-0.45	0.05	0.05	0.10	0.05	0.20	0.05	35 kg
Conversion Factor	2.45	0.07	0.07	0.04	0.12							
ADC10	7.5-9.5	1.30	2.0-4.0	0.50	0.30	0.00	0.50	1.00	0.30	0.00	0.00	50 kg
Conversion Factor	4.25	0.65	1.50	0.25	0.15							
Conversion Composition	7.6	0.9	2.1	0.4	0.3							100 kg

본 연구에서는 재활용성이 높은 알루미늄 A328 주조합금 용탕에 초음파 진동을 적용하여 탈가스 효과를 통한 기계적 성질의 향상, 개선탄 및 용탕 내 수소가스의 용해량 감소를 통하여 유동도를 향상시켜 주조 공정에서의 문제점인 가스혼입 (Air trap)이나 주조 제품 내부의 기공의 존재에 의한 결함을 줄여 주조특성을 개선하고자 하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 초음파 진동 발생장치는 최대출력 20kHz, 2kW로 PZT 압전센서인 Converter, 출력전환 Booster, 알루미늄 용탕에 직접 접촉하여 진동 에너지를 전달하는 Horn으로 구성되어 있으며, 고온의 용융 알루미늄과 접촉한 상태로 유지하기 때문에 공냉 및 수냉자켓으로 보호되어 있다. 용탕에 진동을 전달하기 위한 Horn은 지름이 40 mm인 Ti-6Al-4V합금이 사용되었으며 실험에 사용된 초음파 조사 장비의 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

본 실험에는 A328합금을 사용하였으며 실험에 사용된 알루미늄 합금의 조성을 Table 3에 나타내었다. A328합금 1.2 kg을 SiC 도가니에 담아 저항전기로를 이용하여 750°C에서 용해한 다음 유지로(holding furnace)로 옮겨 용탕 온도를 720°C로 유지하면서 초음파 진동을 조사하였다. 초음파의 출력은 장비의 60%출력인 1200W로 하고 Horn을 탕면으로부터 1 cm 깊이로 침적시킨 후 용탕 내 초음파 진동 조사 시간을 0초, 30초, 60초, 180초, 300초로 각각 변화시키며 실험을 진행하였다. 초음파 진동을 조사하는 동안 용탕 내 온도의 변화는 ±10°C로 유지하였다. 초음파 진동 조사가 완료된 용탕을 660°C까지 냉각시킨 후 200°C로 예열되어 있는 Fig. 2의 Y-block 금형에 주입하여 응고시켰으며, 또한 각각의 용탕에 대해 감압응고시험 (Reduced Pressure Test, RPT)을 실시하였다. 초음파 진동을 조사한 각 조건의 용탕을 강(steel)제 컵에 주입하여 50torr의 압력에서 9분간 응고시켰으며, 응고가 완료된 시편의 중앙 단면을 절단하여 마이크로 폴리싱하여 시편 내부에 존재하는 팽창된 기공의 양을 보다 명확하게 관찰하였다. 또한 감압응고시편

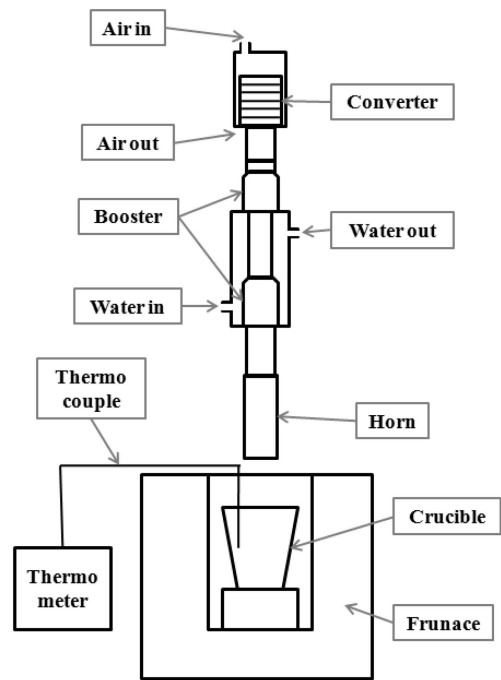


Fig. 1. The schematic diagram of experimental equipment.

의 길보기밀도를 측정하여 초음파 진동 조사에 의한 탈가스 효과의 정도를 비교하였다.

초음파 진동 조사 조건에 따른 유동성의 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 3의 스파이럴 금형을 이용하여 유동도 테스트를 실시하였고, A328 합금 용탕의 이동거리 비교하여 유동성의 차이를 관찰하였으며, 응고 선단을 수직으로 절단하여 초음파 진동 조사 조건에 따른 변화를 광학현미경으로 관찰하였다.

응고 완료된 Y-block으로부터 ASTM E8M-04의 규격으로 시편을 가공하여 인장시험을 각각 4회 실시하여 평균값을 구하였고, 인장 시험 후 인장 시험편의 파단면을 FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy, Quanta 200 FEG)을 이용하여 기공 및 비금속개재물의 존재 유무 및 분포를 확인하였다.

Table 3. Chemical compositions of aluminum casting alloy used in this study.

Alloy	Standard	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn
A328	ASM	8.17	0.69	1.63	0.23	0.52	0.032	0.05	1.137	0.027

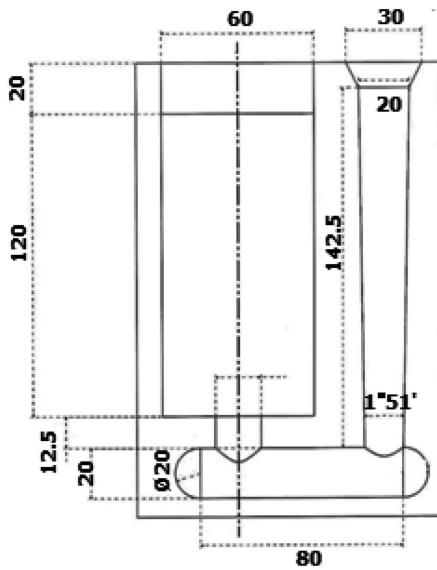


Fig. 2. The dimension of Y-shaped mold.

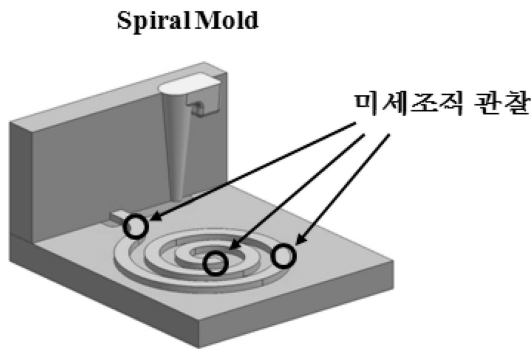


Fig. 3. The schematic diagram of spiral mold for the fluidity test.

3. 결과 및 고찰

3.1 탈가스

용탕 내에 초음파 진동을 인가하면, 강한 세기의 진동에 의해 발생하는 압력이 용탕 내에 존재하는 기공들을 파쇄하여 크기가 많은 수의 작은 기공을 만든다. 이러한 기공들은 용탕으로부터 수소를 분해시키고 흡착시킨 후 응집되어 용탕의 표면으로 떠올라 용탕 내 수소가스의 양을 감소시킨다[6]. Fig. 4는 초음파 진동 조사 시간에 따른 탈가스 효과를 관찰하기 위한 감압응고시편의 단면을 보인 것이다. -50torr의 감압상태에서 응고를 진행시켜 시편내부의 기공은 팽창된 상태이며 감압에 의하여 약간의 탈가스가 진행되었다. 초음파 진동을 조사하지 않은 (a)의 경우에는 시편의 전체적인 부분에서 많은 양의 기공이 관찰된다. 초음파 진동을 30초간 조사한 시편 (b)의 경우에는 초음파 진동을 조사하지 않은 경우의 시편에 비하여 시편 내부에 존재하는 기공의 양이 크게 감소하는 모습을 보이지 않으나 초음파 진동 조사 시간이 증가할수록 전체적인 기공의 양이 감소하며, 그 크기 또한 점점 미세하게 변화하였다. 또한 감압응고시편의 상부가 초음파 진동 조사 시간이 증가할수록 볼록한 형태에서 오목한 형태로 변화하였는데, 일반적으로 RPT

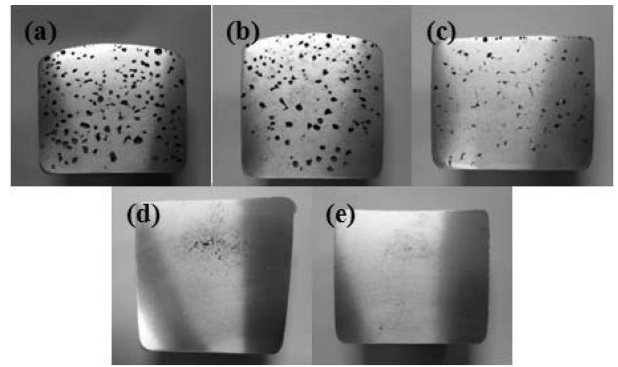


Fig. 4. Cross section images of RPT specimens as a function of ultrasonic processing time; (a) no processing, (b) 30, (c) 60, (d) 180 and (e) 300 seconds.

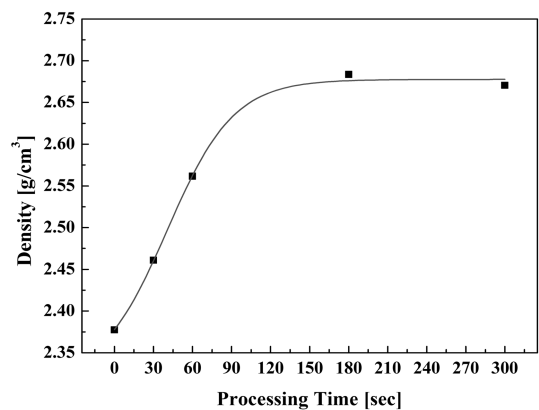


Fig. 5. Density of RPT specimens varying with processing time of ultrasonic vibration.

시편의 상부가 버섯모양인 경우는 수소용해량이 많은 것을 나타내며 탈가스가 된 용탕의 시편은 오목한 형태를 보인다[7]. 이는 응고되면서 석출된 수소 기포의 팽창으로 인한 것으로 탈가스가 이루어짐에 따라 이러한 팽창은 보이지 않고 최종응고부위에 형성되는 수축공으로 인해 오목한 형태를 가지게 되는 것이다.

Fig. 5는 RPT 시편의 밀도를 측정된 결과이다. 초음파 진동을 조사하지 않은 시편의 밀도는 2.378 g/cm³로 이론밀도(2.7 g/cm³)의 약 88% 정도의 값을 보였다. 초음파 진동을 조사하면 그 조사시간의 경과에 따라 밀도가 증가하여 초음파 진동을 180초간 조사하였을 때의 밀도는 2.684 g/cm³로 이론밀도에 거의 근접하였다. 그러나 초음파 진동 조사시간을 이보다 증가시키면 오히려 밀도가 감소하는데, 이는 용탕에 초음파 진동을 조사할 때 발생하는 cavitation bubble에 의한 것으로 판단된다. 초음파 진동에 의한 탈가스의 메커니즘은 초음파 진동에 의해 용탕 내에 수많은 작은 크기의 cavity가 형성되면, 그 중 일부는 alternating pressure와 수소 확산의 영향으로 빠르게 성장한다. 크게 성장한 bubble은 중력과 초음파 진동의 영향으로 표면으로 떠올라 용탕으로부터 제거된다[8-10]. 초음파 진동에 의한 탈가스는 일정한 시간이 지나면, 더 이상 수소의 양이 줄어들지 않는 정상상태에 이르게 된다. 정상상태 이후에도 계

속해서 초음파 진동을 조사하면, cavitation bubble의 과도한 생성으로 인하여 미세한(1~10 μm) 크기의 bubble이 시편의 내부에 잔류하게 됨으로써 밀도가 감소하는 것으로 사료된다.

3.2 유동도

초음파 진동 조사에 의한 용탕 유동성의 변화를 조사한 결과

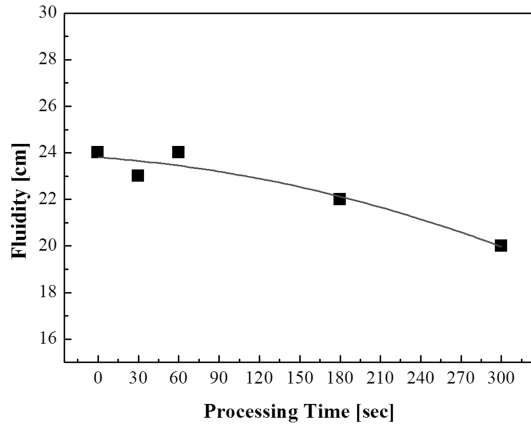


Fig. 6. Fluidity of aluminum melts as a function of ultrasonic processing time.

를 Fig. 6에 보였다. 초음파 진동 조사 시간이 길어짐에 따라 유동성이 소폭 감소하였으며 장시간 측으로 갈수록 그 감소폭 또한 증가하였다. 용탕의 유동도에 영향을 미치는 인자로는 화학조성, 과열도, 응고잠열, 표면장력, 점성, 응고 모드와 같은 금속학적 변수와 냉각속도, 주형 물질과 그 표면상태 등의 주형/주조 변수가 있다. Flemings 등과 Kim 등은 Al-4.5%Cu와 Al-Si 합금의 유동도에 미치는 소량의 용존가스의 영향은 미미하다고 보고하였다[11-13]. 반면, 용탕 내의 산화물 개재물은 특히 낮은 주입온도에서 유동도를 감소시킨다는 보고가 있다 [14]. Fig. 7은 초음파 진동을 300초간 조사한 경우의 인장시편의 파단면을 FE-SEM을 이용하여 관찰한 사진이다. 파단면 전반에 걸쳐 작은 크기의 검은 부분이 관찰되는데, EDX 분석 결과 Ti이 다량으로 고용되어 있는 것으로 나타났다. 이것은 초음파 진동 조사 장비의 horn으로부터 Ti 성분이 용입되어 용탕 중의 Al과 반응하여 형성된 것으로 판단된다. 조사 시간이 길어짐에 따라 Ti의 용입량이 증가하였고, 이것이 개재물로 작용하여 유동도를 감소시킨 것으로 사료된다.

3.3 기계적 특성

금형주조된 Y-block의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 8에 나타냈다. 초음파 진동을 조사하지 않은 (a)의

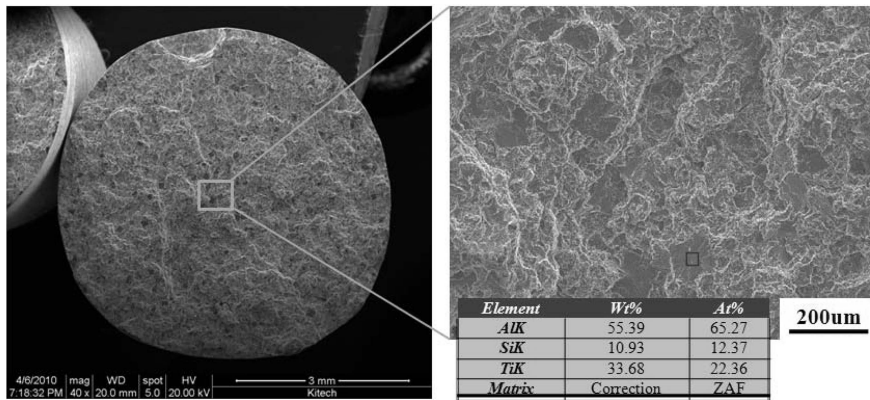


Fig. 7. Microstructures of fracture surface in aluminum castings after 300 seconds ultrasonic processing time.

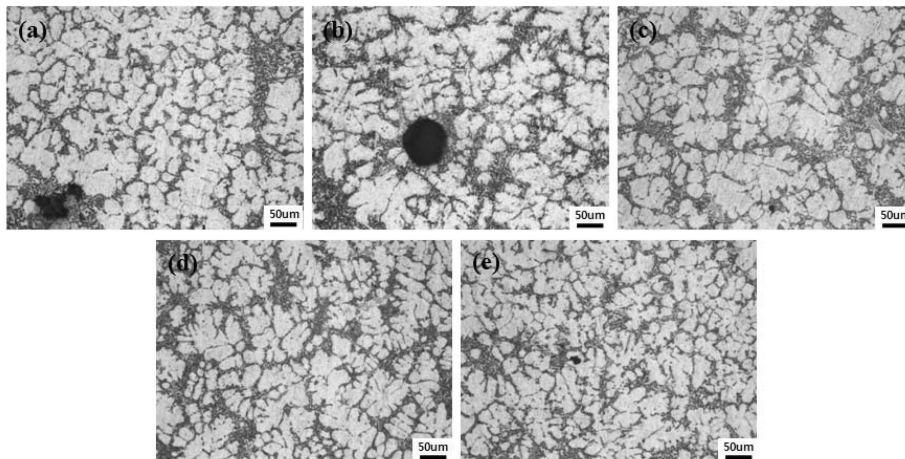


Fig. 8. Microstructures of aluminum castings varied with ultrasonic processing time; (a) no processing, (b) 30, (c) 60, (d) 180 and (e) 300 seconds.

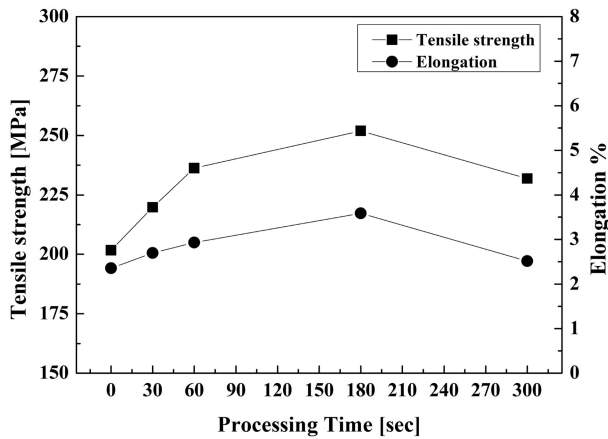


Fig. 9. Mechanical properties of aluminum castings varying with processing time of ultrasonic vibration.

경우와 초음파 진동을 30초간 조사한 (b)의 경우에는 시편 내부에서 크고 작은 기공들이 다수 관찰되었다. 조사 시간이 60초인 경우에는 상대적으로 큰 기공들은 관찰되지 않으나 미세한 기공들이 존재하였다. 조사 시간을 더 증가시키면, 기공은 더 이상 관찰되지 않았다. 초정 α상의 크기는 조사 시간이 60초 이하인 경우에는 거의 유사하였는데, 그 이상인 경우에는 점점 미세해져서 300초일 때 가장 작은 크기를 나타내었다. 본 실험은 초음파 진동을 응고과정에서 조사한 것이 아니기 때문에 초음파 진동의 초정상 파괴에 의한 결정립 미세화를 기대할 수 없었다. 조사 시간이 길수록 초정상이 미세해지는 것은 응고과정에서 앞서 말한 horn으로부터 혼입된 Ti이 핵으로 작용하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 초음파 진동 조사 시간에 따른 인장강도-연신율의 변화를 나타낸 것이다. 초음파 진동을 조사하지 않은 경우에는 인장강도가 약 201MPa, 연신율이 2.38%로 나타났다. 초음파 진동을 30초간 조사한 경우에는 인장강도가 약 220MPa, 연신율이 2.63%로 증가하였으며, 초음파 진동의 조사 시간을 증가시킬수록 인장강도와 연신율은 증가하여 조사 시간이 180초일 때 약 250MPa의 인장강도와 3.5%의 연신율을 보였다. 하지만, 초음파 진동 조사 시간을 300초로 증가시키면, 오히려 인장강도와 연신율이 모두 감소하였다. 조사시간이 300초인 경우에 가장 미세한 결정립을 가졌음에도 불구하고 낮은 인장강도를 가지는 것은 밀도 측정 결과와 마찬가지로 과도한 초음파 진동 조사로 인해 용탕 내에 잔류한 미세한 cavitation bubble 때문으로 판단된다.

4. 결 론

1) 초음파 진동을 이용한 탈가스 처리법은 매우 효율적인 공정으로 A328 용탕 1.2 kg에 3분간 초음파 진동을 조사했을 때

이론밀도의 99.4%를 가질 정도로 탈가스가 이루어졌다. 하지만, 5분 이상 초음파 진동을 조사할 경우 초음파에 의해 생성된 micro bubble이 용탕 내 잔존하여 오히려 밀도가 감소하였다.

2) 초음파 진동 조사 시간이 증가할수록 유동도가 감소하였는데, 이는 horn으로부터 용입된 Ti에 의한 것으로 판단된다.

3) 초음파 진동 조사 시간이 증가할수록 기계적 성질이 향상되었다. 이는 탈가스에 의한 porosity의 감소에 기인한 것으로 사료된다.

4) 초음파 진동을 300초간 조사하였을 때 가장 작은 크기의 초정상을 얻을 수 있었으나, 기계적 성질은 오히려 열화하였다. 이는 micro bubble에 의해 생성된 porosity로 인한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Ducker Worldwide, Aluminum Association Auto and Light Truck Group 2009 Update on Aluminum Content in North American Light Vehicles, (2009) <http://aluminumtransportation.org/downloads/Ducker International Final Report 2009-II.pdf>
- [2] H. Xu, X. Jian, T. T. Meek and Han Q: Mater. Lett. "Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration", 58 (2004) 3669-3673
- [3] H. Xu, T. T. Meek and Q. Han: Mater. Lett. "Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy", 61 (2007) 1246-1250
- [4] H. Xu, Q. Han and T. T. Meek: Mater. Sci. Eng. A "Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys", 473 (2008) 96-104
- [5] A. Das and H. R. Kotadia: Materials Chemistry and Physics "Effect of high-intensity ultrasonic irradiation on the modification of solidification microstructure in a Si-rich hypoeutectic Al-Si alloy", 125 (2011) 853-859
- [6] G. I. Eskin: Ultrasonics Sonochemistry "Cavitation Mechanism of Ultrasonic Melt Degassing", 2(2) (1995) 137-141
- [7] ASM International, *Metals Handbook*, vol. 15 (1988)
- [8] O. V. Abramov: *Ultrasound in Liquid and Solid Metals*, CRC Press, London, 1994, pp 91
- [9] G. I. Eskin: *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*, Gordon and Breach, Amsterdam, 1998, pp 87
- [10] I. G. Brodova, P. S. Popel and G. I. Eskin: *Liquid Metal Processing*, Taylor and Francis, New York, 2002, pp 201
- [11] K. R. Ravi, R. M. Pillai, K. R. Amaranathan, B. C. Pai and M. Chakraborty: *J Alloys Compd* "Fluidity of aluminum alloys and composites: a review", 456 (2008) 201-210
- [12] M. C. Flemings, E. Niiyama and H. F. Taylor: *AFS Trans.* 69 (1961) 625-635
- [13] J. M. Kim and C. R. Loper Jr.: *AFS Trans.* 103 (1985) 521-529
- [14] Y. D. Kwon and Z. H. Lee: *Mater. Sci. Eng. A* "The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4.5Cu-0.6Mn and A356 alloys", 360 (2003) 372-376