

현장기술

대형주물의 기계적 특성 예측

Franco Chiesa^{*1)}, David Levasseur*, Seong-Ho Ha** and Shae K. Kim**

*Centre de métallurgie du Québec, Trois-Rivières (Québec), Canada

**Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Republic of Korea

Predicting Mechanical Properties Inside A Large Casting

Franco Chiesa*, David Levasseur*, Seong-Ho Ha** and Shae K. Kim**

*Centre de métallurgie du Québec, Trois-Rivières (Québec), Canada

**Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Republic of Korea

*감수: 유승목²⁾

Paber Aluminium is a medium size sand and permanent mold foundry; it was faced with the challenge of producing five 500kg castings, identical to the one shown on the left of Fig. 1. It is a well-known fact that the mechanical properties varies within a casting and are not represented by the tensile properties of the separately cast ASTM B26 standard tensile specimens; in the present case, these separately cast test bars had a yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS) and elongation(El) of 184MPa, 254MPa and 5.1% respectively. These properties were achieved with an alloy A356 of composition given in Table 1, following this T6 heat treatment: solutionizing for 12h at 540°C, water quenching and aging for 4 h at 155°C.

Paber Aluminium은 중건의 사형 및 금형 주조업체이며, 그림 1의 좌측에 나타난 그림과 같이, 5개의 500kg 주물을 생산하는 과제에 직면했다. 기계적 특성은 하나의 주물 내에서도 부위별로 다양하기 때문에 개별적으로 주조된 ASTM B26 시편의 인장 특성으로 대표될 수 없다. 현재의 경우, 이러한 개별적으로 주조된 테스트 바의 항복강도, 인장강도 그리고 연신율은 각각 184MPa, 254MPa 그리고 5.1%를 나타내고 있다. 이러한 결과는 A356 합금의 T6 열처리 (540°C에서 12시간

동안 용체화, 수냉 후 155°C에서 4시간 동안 시효) 를 통해서 얻어졌으며, 합금성분은 표 1에 나타내었다.

An indication about the tensile properties inside the casting was required and while avoiding excising samples in the casting. A method was devised to assess the required properties on the basis of the measurement of 3 sets of tensile properties: a) those of the separately cast ASTM B26 specimens given above; b) those measured in a “cold” section of the casting, in the present case Location 1 in the runner, indicated on the right of Fig. 1; c) those in a ‘hot’ section of the casting, i.e at the bottom of the bigger riser, just above the casting surface (Location 7). Each result was an average after testing two samples.

주물 내부의 인장 특성의 평가가 요구됨과 동시에 주물로부터의 시편 채취는 피해야 한다. 3가지 세트의 인장 특성 측정을 기반으로 요구된 특성을 평가하기 위한 방법이 고안되었다. 3가지 세트란 a) 위에서 언급된 개별적으로 주조된 ASTM B26 규격의 시편들, b) 주물의 Cold section, 다시 말해 그림 1의 우측 그림에서 위치 1로 표시된 탕도 부위 그리고 c) 주물의 Hot section, 즉 주물 표면 바로 위의 큰 압탕부 바

Table 1. Composition of the primary alloy poured

표 1. 초탕에 의해 주조된 합금 성분

A356	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	B
	7.32	0.11	0.04	0.02	0.34	0.04	0.10	0.000	0.0015

¹⁾E-mail: franco.chiesa@cegeptr.qc.ca²⁾한국생산기술연구원 수석연구원 (E-mail: yoosm@kitech.re.kr)

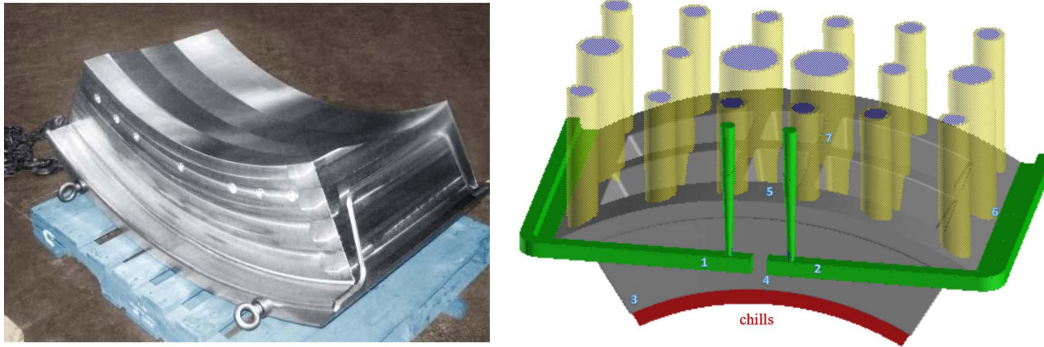


Fig. 1. The finished casting (left) and the rigged casting with the locations 1 to 7 indicated.
 그림 1. 완성된 주조품 (왼쪽) 및 전체 주물 세트 이미지 (우측).

Table 2. Properties at different locations in the casting
 표 2. 주물내 위치별 인장특성

Location	Modulus cm	t_s min	YS MPa	UTS MPa	El %	Q MPa
Test bar	ASRM B26	1.0	184	254	5.1	360
1, 2	1.3	17.5	163	205	3.1	279
3	3.6	124	114	158	2.4	215
4	4.9	156	102	148	2.6	210
5	3.2	87	119	164	2.5	224
6	2.2	96	136	174	2.1	221
7	4.1	198	103	139	2.5	199

탁 (위치 7) 에 대한 시편들을 의미한다. 각각의 세트에 대한 결과는 2개의 시험편에 대한 평균값으로 정하였다.

These 3 sets of tensile properties are shown in bold black print, in the last columns of the table in Fig. 2, along with the corresponding Quality Index Q. Q represents the metallurgical quality of the alloy by lumping the ultimate tensile strength and the elongation according to the relationship: $Q \text{ (MPa)} = \text{UTS} + 150 \text{ Log El}$. The great interest of Q is that it is independent of the aging treatment which follows the solutionizing and quenching of the AlSiMg alloys [1].

위의 3가지 세트에 대한 인장 특성은 품질 지수 Q와 함께 표 2에 굵은 글씨체로 표시된 수치들로 나타내었다. Q는 식 $Q(\text{MPa}) = \text{UTS} + 150 \text{ Log El}$ 에 따라 인장강도와 연신율을 포함한 합금의 품질을 대표한다. 흥미로운 점은 Q는 AlSiMg 합금의 용체화 및 급랭 후 이어지는 시효 처리와 무관하다는 것이다 [1].

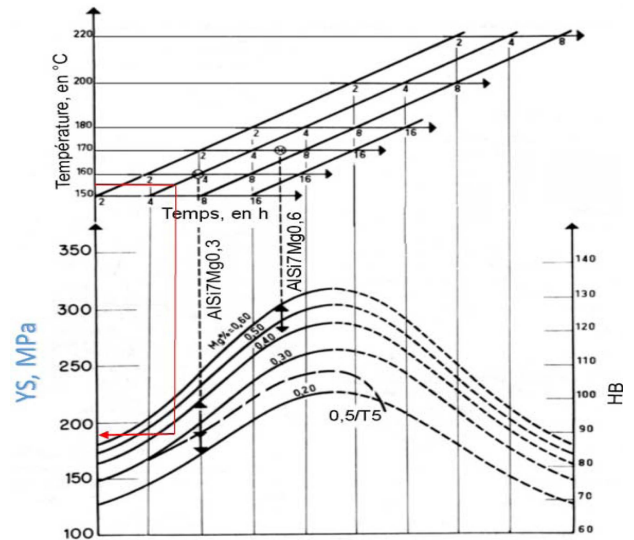


Fig. 2. YS as a function of aging and Mg content [2].
 그림 2. Mg 함량과 시효 조건에 따른 항복강도 변화.

Q mainly depends on the fineness of the dendritic structure and the level of microporosity [3], which both depend on the local solidification time of the alloy, t_s , which is the time elapsed between the beginning and the end of solidification. This can be easily obtained throughout the casting by thermal modeling of the filling and solidification process. If the dependence of Q on t_s is assumed to take the form $Q = Q_0 t_s^n$, Q_0 and n can be worked out by a best fit through the 3 known values of Q for the separately cast ASTM B26 test bar (solidification time of one minute) and at locations 1 and 7. Consequently, the relationship $Q = 367 t_s^{-0.111}$ is obtained and the last column in Table 2 may be completed (in green).

Q는 주로 수지상 조직의 미세함과 미세기공의 정도에 따라 달라지며 [3], 둘 다 합금의 국부적 응고 시간 t_s (응고 시작과 끝 사이의 경과된 시간) 에 의존한다. 이것은 충전과 응고 과정의 열적 모델링을 통해 주물 전체에 걸쳐서 쉽게 얻을 수 있다. t_s 에 대한 Q의 의존성이 $Q = Q_0 t_s^n$ 형식을 취하는 것으로 가정하면, Q_0 및 n 은 별도로 주조된 ASTM B26 테스트 바 (1분의 응고 시간) 와 위치 1과 7 에 대해 얻어진 총 3개의 Q 값을 통해 최적으로 계산할 수 있다. 그 결과, $Q = 367 t_s^{-0.111}$ 이 얻어지고 표 2의 위치 3-6에 대한 YS와 Q 값들이 얻어졌다 (녹색).

Contrary to UTS and El, YS has been shown to depend on the metallurgical quality, but only on the magnesium content and the temperature and the aging time, i.e. 0.34% Mg, 155°C and 4h in the present case. The graph on the right of Fig. 2 shows that for these conditions, one should get a value for YS close to 190 MPa, which is precisely what we get for the separately cast test bar, 13mm in diameter. However, for bigger parts in the casting, the quenching is only partial since, because of the slower cooling, a fraction of the supersaturated magnesium precipitates and is no longer available for precipitation hardening during the aging process; this amounts to reduce the effective magnesium content of the alloy below 0.34%; hence, the values of YS at locations 1 to 7 are lower than the graph suggests for %Mg = 0.34. The effectiveness of

the quenching maybe assumed to vary with the cooling modulus at the different locations. For a simple shape, this modulus is the ratio of the volume to the cooling surface area. The modulus is plotted in Fig. 3 for the casting after the risers have been removed. In the same figure, the graph at the top plots the thermal history on quenching at Locations 1 and 7.

인장강도와 연신율과는 달리, 항복강도는 야금학적인 품질에 의존성을 보이고 마그네슘 함량, 온도 그리고 시효 시간에만 의존하는 것으로 나타났다. 본 연구의 경우에는 0.34% Mg, 155°C 그리고 4h에 해당된다. 그림 2의 그래프는 이러한 조건에 대해 190MPa에 가까운 항복강도 값을 얻어야 한다는 것을 보여주며, 이는 주조된 13 mm 직경의 테스트 바에 대한 수치들과 일치한다. 그러나 주조에서 더 큰 부품의 경우 냉각 속도가 느리기 때문에 과포화 마그네슘의 일부가 석출되고, 시효처리 중에 더 이상 석출경화에 사용할 수 없기 때문에 수냉은 불완전할 뿐이다. 이는 합금의 유효한 마그네슘 함량을 0.34% 미만으로 감소시키게 된다. 따라서 위치 1에서 7까지의 항복강도 값은 Mg = 0.34%에 대해 그래프가 나타내는 것보다 낮다. 수냉의 유효성은 각기 다른 위치들에서 냉각 계수에 따라 변한다고 가정할 수 있다. 단순한 모양의 경우 냉각 계수는 냉각 표면에 대한 부피의 비율이다. 압탕부가 제거된 후 주물에 대한 계수를 그림 3에 나타내었다. 그림3에서 상단의 그래프는 위치 1과 7에서 수냉에 의한 열적 변화를 보여 준다.

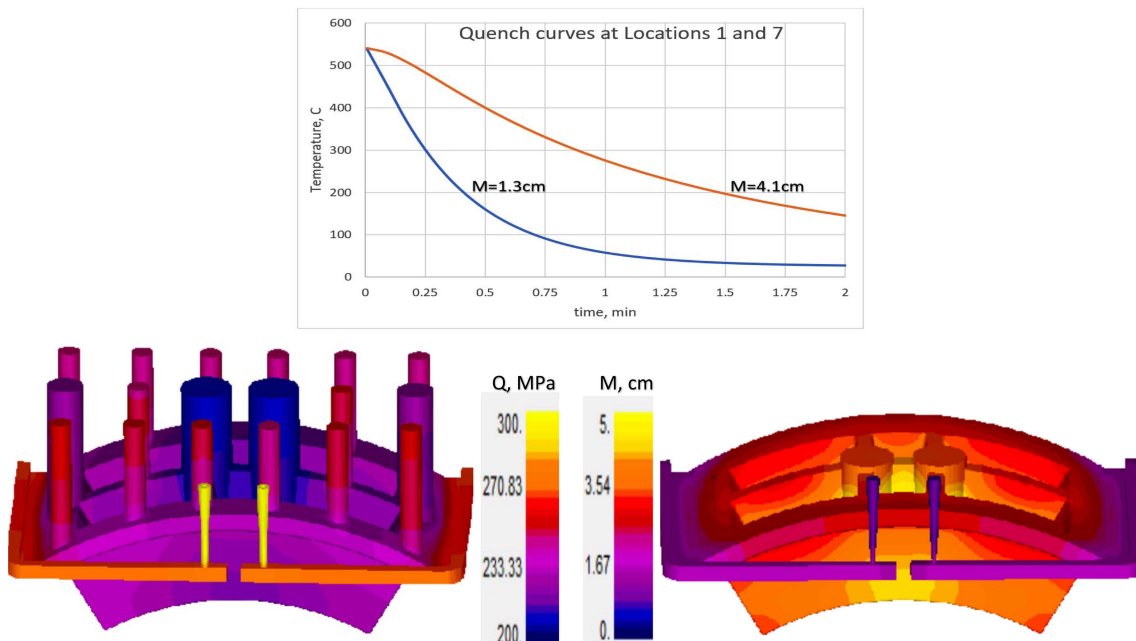


Fig. 3. Distribution of the Quality index Q and of the cooling modulus M in the de-risered casting.
 그림 3. 주조품내 품질지수 Q(하단 좌측)와 냉각계수 M (하단 우측)의 분포.

If YS is assumed to depend on M through the relationship $YS = YS_0 \cdot M^m$, M being the cooling modulus in cm, YS_0 and m can be determined because YS and M are known for 2 points in the casting: at Location 1 in the runner and at Location 7, at the bottom of the bigger risers, 20mm of which have been left to machine test bars after the T6 heat treatment; accordingly, the relationship $YS = 179 M^{-0.35}$ is derived. YS cannot be more than the YS of the 13mm diameter, separately cast test bar (184 MPa) for which the quench was complete.

It has been shown that YS , UTS and EI are not independent [1]; they are related by a relationship of the type, $UTS = YS + a \text{Log}_{10} EI + b$, a and b being equal to 60 and 13 MPa respectively. Since $Q = UTS + 150 \text{Log}_{10} EI$ is known, the solution of 2 equations with 2 unknowns (UTS and EI) can be solved, and the columns in blue in Fig. 3 can be completed.

The problem of determining the tensile properties inside the casting from the properties of: 1) the standard test bar, 2) a "cold part of the casting (gating) and 3) a "hot part" of the casting (bottom of riser) is solved.

$YS = YS_0 \cdot M^m$ 의 관계를 통해 YS 가 M 에 의존한다고 가

정하면, M , 냉각계수 M (cm), YS_0 그리고 m 은 주물의 위치 1과 7의 YS 와 M 이 이미 얻어졌기 때문에 결정할 수 있다. 따라서 관계 $YS = 179 M^{-0.35}$ 가 도출될 수 있다. YS 는 충분히 급랭되어진 13mm 직경의 별도시편(184MPa)의 YS 를 초과할 수 없다.

YS , UTS 그리고 EI 은 독립적이지 않은 것으로 나타났다 [1]. 이들은 $UTS = YS + a \text{Log}_{10} EI + b$ 의 식과 관련되며, a 및 b 는 각각 60 및 13MPa이다. $Q = UTS + 150 \text{Log}_{10} EI$ 이므로 2개의 미지수 (UTS 및 EI)가 있는 2개의 방정식의 해를 풀 수 있으며, 그림 2의 위치 3-6에 대한 UTS 와 EI 수치들을 완성할 수 있다. 이상으로 1) 표준시편, 2) 주물의 Cold section (탕도) 그리고 3) "주물의 Hot section (압탕부의 바닥)의 특성값으로부터 주물 내부의 인장특성을 예측할 수 있다.

References

- [1] Drouzy, M, Jacob, S and Richard, M, AFS International Cast Metals Journal, 5(2) (1980) 43.
- [2] Jacob, S, AFS Transactions, "AFS transactions 2000 Volume 108", AFS, IL (2000) 811-814.
- [3] Chiesa, F, Duchesne, B and Morin G, Proceedings of the International Symposium on Aluminium: From Raw Materials to Applications, CIMM Publications, (2006) 115-130.