

技術資料

## 진공다이캐스팅의 열처리기술 개발

한요섭 · 이호인

### Heat Treatment of Vacuum Die Castings

Yo-sub Han and Ho-In Lee

#### 1. 서론

다이캐스팅은 다른 주물에 비하여 치수정밀도가 높고 박육제품의 주조성이 우수하며 생산성도 높아서 알루미늄이나 마그네슘합금 주조에 가장 널리 이용되고 있고 특히 각종 차량부품이나 수송기계부품에 다수 적용되고 있으며 계속 그 이용이 확대되고 있다. 최근 자동차산업의 발달로 그 수요가 크게 증가하고 있으며 환경문제로 자동차의 연비향상에 대한 사회적 요구에 따라 부품 경량화가 추구하고 있고 고강도의 알루미늄부품을 다이캐스트로 제조하는 것이 주요한 이슈가 되고 있다.

알루미늄합금의 다이캐스트의 강도향상을 위하여서는 공기혼입에 의한 기포결함이 없어야 하며 Blister 없이 열처리가 가능해야 하는 과제가 남게 된다. 그 해결책으로서 진공법, 저속충류충진법(용탕단조), PF 법 등이 연구 개발되고 있다. 충류충진(용탕단조)법은 비교적 두꺼운 주물에 사용되는 것이지만 충전시간이 길어져서 충전도중에 용탕응고의 문제가 있다. PF(Pore Free) 법은 박육주물에도 적용이 되지만 금형캐비티중에 공기를 산소로 치환할 필요가 있어 주물의 형상에 따라서 치환효율에 문제가 되고 있다.

한편 진공법은 기포결함의 해결방안으로서 다이캐스팅의 초기부터 연구가 이루어 졌지만 진공시스템의 장치의 복잡성과 효율성에서 한계가 있어 고진공에서의 다이캐스팅개발이 주요 과제가 되어 왔다. 근래에 와서 단순히 진공배기의 기능에서 나아가 고진공이 가능한 여러 공정들이 개발 실용화가 되고 있고 그로 인한 고품질의 다이캐스팅의 주물 제조 및 용접과 열처리가 가능하여 여러 경량구조제품의 적용이 활발하게 진행되

고 있다[1-5].

본 보고는 진공을 적용한 알루미늄의 다이캐스팅 제조에서 열처리가 가능한 제조공정의 개발에 대해서 살펴보고 실제로 열처리조건과 소재에 대한 조직과 특성들을 최근 문헌들을 중심으로 종합하여 보았다. 아울러 고진공의 다이캐스팅에서 열처리 특성을 비롯해서 일반적인 진공다이캐스팅주물에서 열처리시의 조직과 물성을 살펴 보고 실용화 가능성을 검토하여 보았다.

#### 2. 열처리 가능한 진공다이캐스팅 공정

##### 2.1 이론

주물내의 가스 농도가 클수록 열처리시에 Blister를 발생하여 결함을 생성시키고 물성을 악화시키게 된다. 그림 1은 알루미늄의 주조시에 주조법에 따른 가스농도와 열처리 가능성 및 품질에 대한 비교를 보여 주고

가스량 cc/100g	사형		diecast 법
	展伸材	금형주조	
0.1	T6, T7	1	10
열처리성	가 능	처리가능	변형발생
용접성			pin hole 발생
내압성	100-150 Kg/cm <sup>2</sup>		100Kg/cm <sup>2</sup> 이하

Fig. 1. Gas content of various Aluminium Castings and relates to further processing.

있다. 비교적 탈가스처리 및 품질관리가 된 용탕의 가스농도는 약 0.1 cc/100g 수준이며 주조공정에 의하여 공기혼입이나 주형과 접촉시에 각종 가스혼입등이 발생하여 주물내의 가스농도가 증가하게 된다. 가스농도 수준을 보면 다이캐스팅이 가장 높은 10-50 cc/100g 이고 다음이 사형주조로 3-10 cc/100g, 금형주조 및 저압주조 및 진공다이캐스팅은 2-5 cc/100g, 충류충진 및 용탕단조의 경우 1-5 cc/100g 순으로 나타나고 있다. 여기서 안정된 용체화 열처리가 가능한 가스농도 수준은 약 1 cc/100g 으로 보고되고 있다. 최근에 연구에서는 가스농도가 5 cc/100g 이내이면 큰 열처리결함이 없는 것으로 보고가 되고 있고 또한 저압주조나 금형주조에서도 비교적 고 가스농도에서도 열처리가 이루어지고 있다.

다이캐스팅에서 주요 가스 발생원은 사출슬리브와 금형캐비티에 포집된 공기이다. 알루미늄은 산소와는 반응하여 급속하게 산화물을 형성하므로 남은 기포내의 가스는 주로 질소가 된다. 이상기체법칙으로 대기압(STP)에서 질소농도 1cc의 조건은  $4.46 \times 10^{-5}$  moles 이 된다. 대략 다이캐스팅 알루미늄의 밀도가 상온에서 2.7 g/cc 가 되므로 100g 주물의 부피는 약 37cc 가 된다. 따라서 압탕(비스켓)이 없고 leak, 배기가 없다는 가정하에서 빈 사출슬리브의 체적( $V_{ss}$ )은 주탕구가 밀폐된 뒤의 시스템의 공기체적과 같다. 사출중량(W)은 다음의 슬리브충진율(F%)과 슬리브체적( $V_{ss}$ )의 함수로 나타난다.

$$W = V_{ss} * F\% / 2.7 \tag{1}$$

따라서 T6 열처리후 부풀음이 없는 주물을 얻기 위하여 주물내의 가스농도(nT)는 다음식으로 나타난다.

$$nT < W/100 * 4.46 * 10^{-5} = 1.205 * 10^{-3} * V_{ss} * F\% \tag{2}$$

공기중 21% 가 산소이며 알루미늄과 반응하여 소모되므로 시스템내의 공기( $n_a$ )는 다음과 같이 된다.

$$n_a = nT/0.79 = 1.53 * 10^{-3} * V_{ss} * F\% \tag{3}$$

이상 기체법칙을 적용하여 기압(P)를 계산하면 다음과 같다.

$$P = n_a * R * T / V_{ss} = 1.53 * 10^{-3} * F\% * 0.0821 * 273 = 26.1 * F\% \text{ (torr)} \tag{4}$$

Table 1. Vacuum required for succesful T6 heat treatment

% Fill in Shot Sleeve	Vacuum for T6, torr
30	7.8
40	10.4
50	13.1
60	15.7
70	18.3
100	26.1

여기서 가스온도는 상온(273K) 로 가정하였다. 표 1은 슬리브충진율의 함수로서 부풀음없는 주물을 얻기 위한 진공도를 보여 주고 있다.

이러한 진공수준은 현재 사용되고 있는 열처리가능한 주물의 진공도와 비교하여 높은 값으로서 진공다이캐스팅기 제조업체들은 대기압의 1/10 수준(70 torr, 10 kPa) 이면 충분한 품질이 얻어 진다고 한다. 표 1의 진공도를 얻기 위해서는 매우 고진공의 시스템이 요구되는데 현재 사용되는 진공수준은 50-100 torr 수준에서도 우수한 열처리특성의 다이캐스팅이 얻어지고 있다는 보고[3]가 있다.

## 2.2 고품질 진공다이캐스팅 공정 개발

### 2.2.1 금형진공 유지판제어법

진공다이캐스팅에서 진공이 된 금형과 슬리브에 용탕이 주입되거나 혹은 주입 후 진공을 처리하면 슬리브내에 용탕이 압력차로 인하여 일부 금형으로 유입되거나 용탕의 불안정하여지고 금형에 사출이전에 유입되거나 캐비티내의 공기유동의 불안정으로 진공유지가 어려워지는 것이 대부분이다. 따라서 오히려 진공도를 높이기 보다 낮추어서 150-400 torr(20-50 kPa) 정도로 관리하는 것이 보통이다. 그러나 진공도가 높아지면 보다 구조결함억제와 열처리 가능성이 크게 향상되므로 금형의 고진공유지와 사출시에 안정된 용탕이송이 주요한 과제이다.

일본 토요 다이캐스팅기기업체에서는 금형에 탕도에 공기차단판을 설치하여 사출슬리브와 격리시켜 진공시키고 사출충진시에 진공된 금형으로 충전되는 방안을 개발(그림 2)하였다[6]. 이것은 간단한 장치로서 기존의 진공시스템의 효율을 높이고 주물의 품질을 향상시키는 방안으로 사용되고 있다.

### 2.2.2 급탕벨브식 진공다이캐스팅

일본 RST 다이캐스팅업체에서는 10 torr 이내의 고

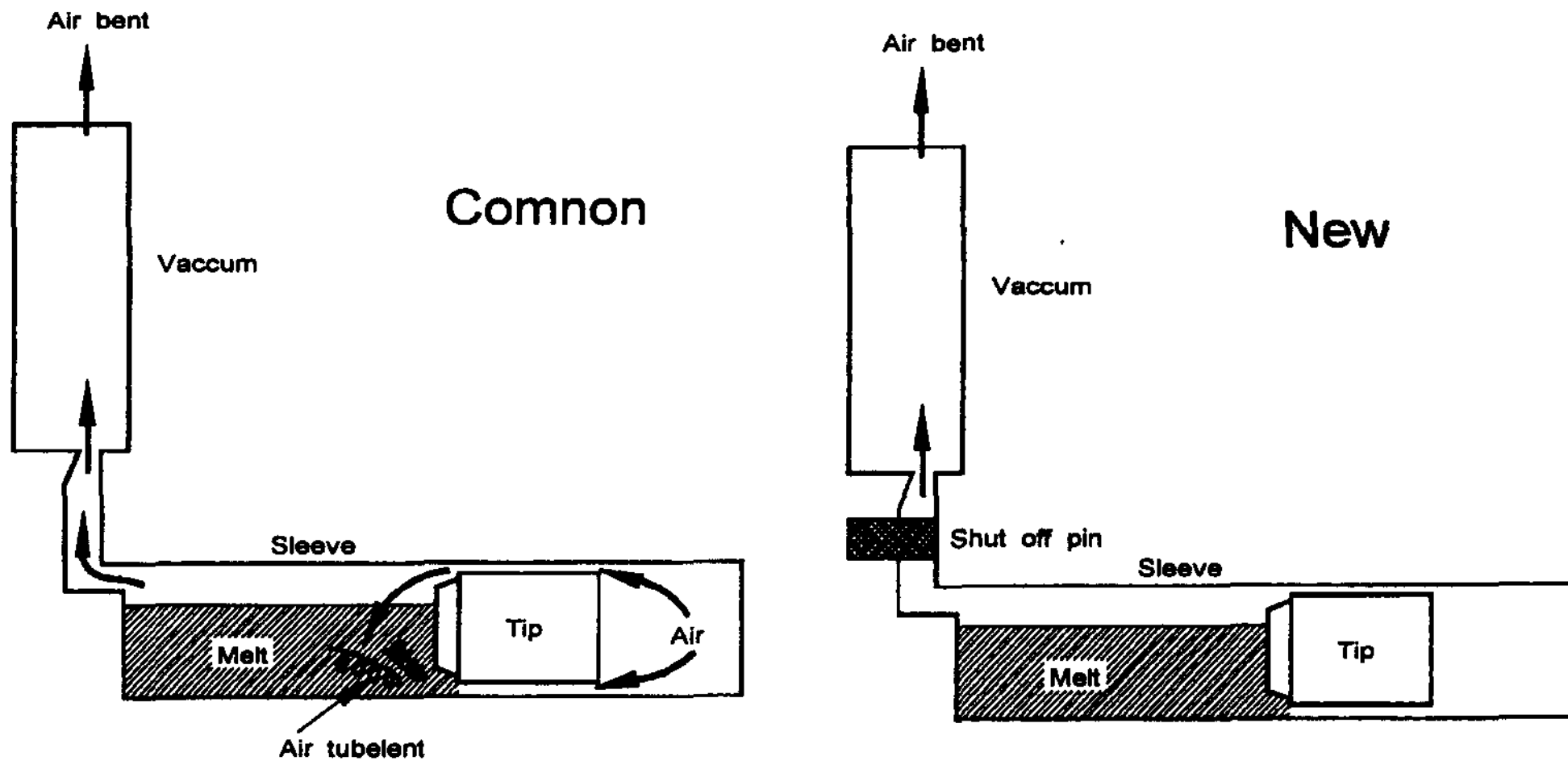


Fig. 2. Die cavity shut off system for high vacuum diecasting.

진공을 얻기 위해서 케비티와 사출슬리브공간의 진공실링이 중요하며 진공 된 사출슬리브에 임의의 시기에 급탕이 이루어 지는 급탕밸브를 도입하였다(그림 3). 금형과 사출슬리브의 각 접촉부위에는 O-ring을 설치하고 사출슬리브에 급탕밸브를 설치하여 용탕유지로에 직접 연결시켜서 진공이 충분히 된 상태에서 용탕을 주입시키고 신속하게 사출충진을 완료시키는 것으로서 공기유입억제와 진공도 감소를 최소화하였다[7].

2.2.3 진공흡입식 진공다이캐스팅 (Vaccural Process)

이 공정(그림 4)은 앞의 급탕밸브와 다소 유사한 원리이다. 사출슬리브는 밀폐된 구조를 가지며 급탕은 사출슬리브에 접속된 흡입관을 통하여 이루어 진다. 금형

에는 진공밸브를 설치하여 케비티, 사출슬리브내의 가스를 배출하고 그 흡입력으로서 용탕이 사출슬리브에 유입되고 일정시간 뒤에 사출을 시작하여 고속변환과 함께 실린더기구에 의하여 진공밸브가 닫힌다. 이러한 방식에서는 배기시간이 길어서 감압효과가 크고 케비티내의 진공도를 약 40 torr(5 kPa) 이내로 유지시킬수 있어서 주물내의 가스농도를 1-5 cc/100g 까지 얻을수 있어 안정된 열처리가 가능하다고 한다.

이 방법에서는 사출팁이 급탕구를 막아서 용탕흡입이 갑자기 정지되므로 그 순간에 용탕이 분출되어져 흡입구를 침식하고 사출팁과 측벽사이에 용탕이 응고되는 문제가 있다.

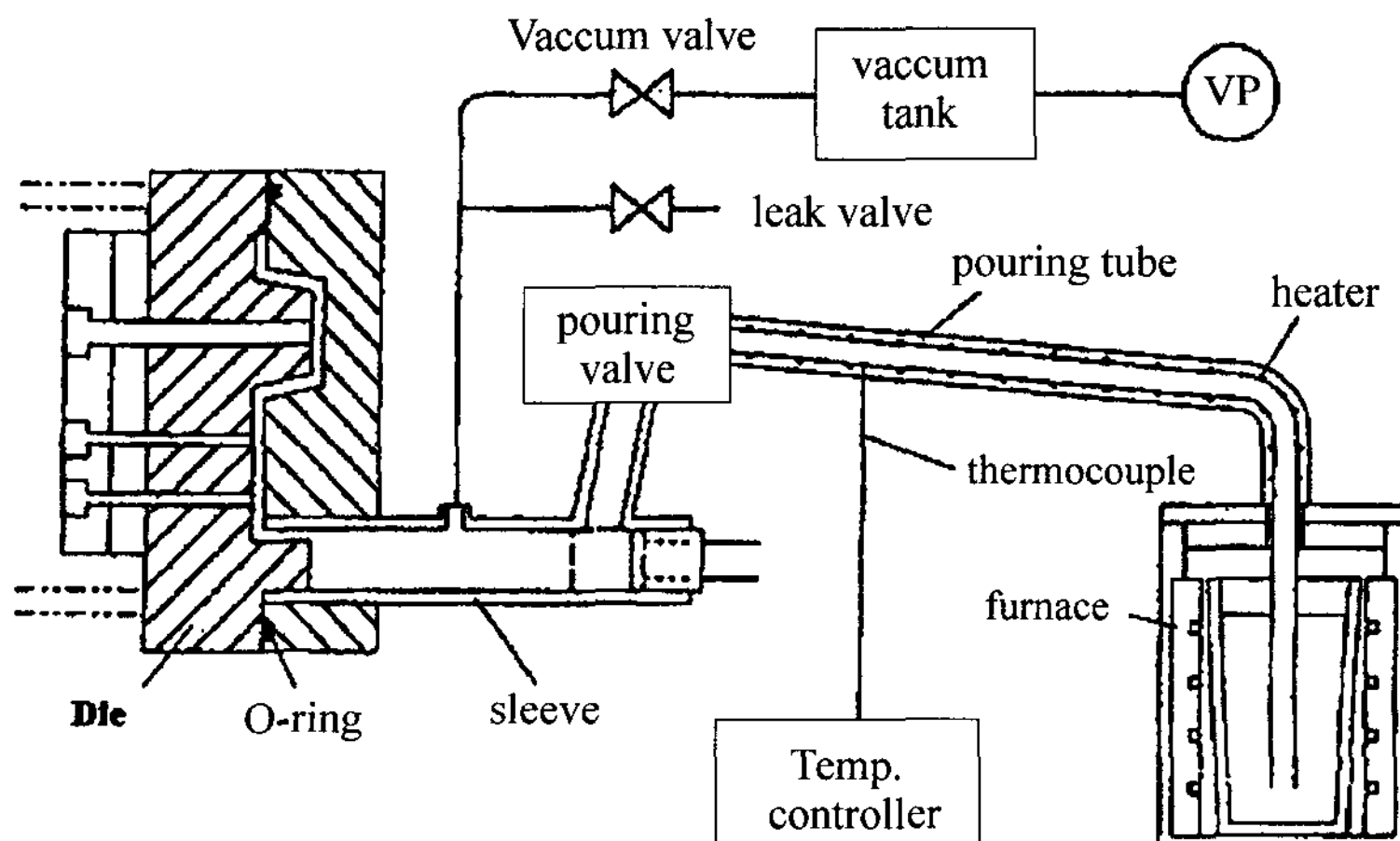
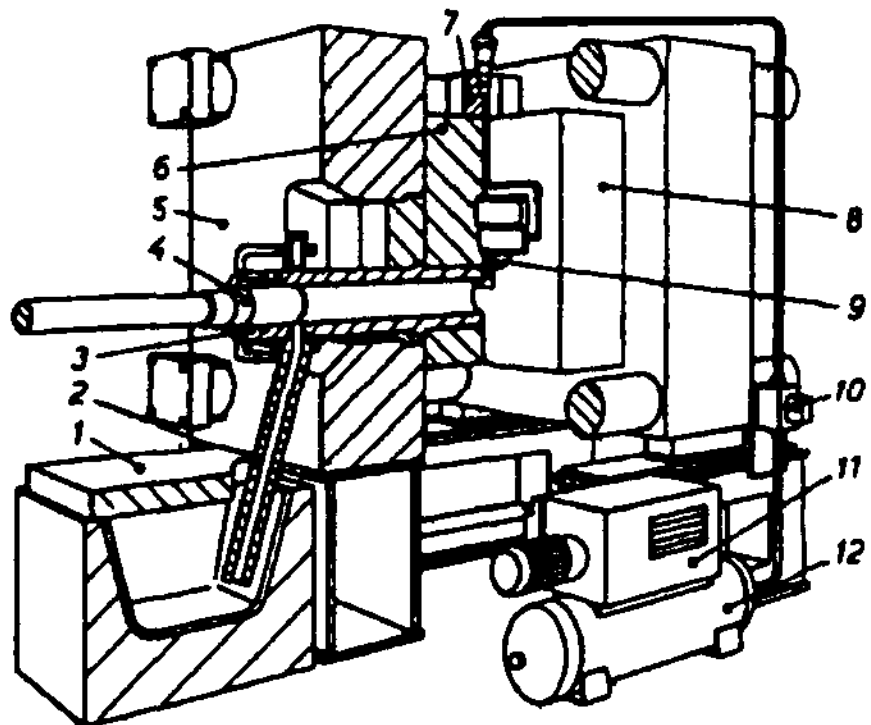


Fig. 3. Pouring valve system for high vacuum diecasting.

### 2.3 진공다이캐스팅의 실용화

표 2는 진공다이캐스팅과 다른 주조법의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 일반 진공다이캐스팅과 이른바 고진공 다이캐스팅인 vaccural 법을 구분하여 살펴 보았다. 고진공 다이캐스팅이 여러 모로 우수한 품질과 생산성 및 경제성의 가능성을 제시하고 있으나 그것의 일반화에는 아직 설비비와 양산성에는 개선이 요구되는 요소가 많다. 그러나 고품질 다이캐스팅의 요구가 심화되고 그 파급효과가 매우 크므로 선진국에서는 용탕단조나 반응고성형법과 함께 고진공 다이캐스팅이 신수요 창출 및 주요 경량금속주물의 양산공정으로 활발히 개발 보급되고 있다. 표 3은 이러한 고품질 진공다이캐스팅인 Vaccural에 의한 자동차부품의 양산품들을 보여주고 있다.



1 - holding furnace  
2 - vacuum pipe  
3 - shot chamber  
4 - shot piston  
5 - fixed platen  
6 - fixed die half  
7 - vacuum valve  
8 - moving die half  
9 - metal run  
10 - solenoid valve  
11 - vacuum pump  
12 - vacuum reservoir

Fig. 4. Vaccural Diecasting Process.

### 3. 일반 진공 다이캐스팅에서 열처리 특성

주물의 T6 열처리시의 부풀음문제가 적게 하기 위해서는 우선적으로 주물내의 가스농도가 적도록 하는 것이 요구된다. 기존 진공다이캐스팅에서도 진공장치의 고속진공처리, 진공탱크의 용량증가, 용탕의 탈가스처리 및 이형제나 사출조건의 제어, 진공실링처리 개선 등의 여러 가지 보완을 통하여 다소 주물의 가스농도를 감소시킬수 있으며 그로 인하여 열처리 온도와 시간의 적절한 조절을 병행하면 열처리 가능성이 있다.

그림 5는 일반 진공다이캐스팅 으로 제조된 자동차 용 오일펌프 하우징으로서 국내 주조업체에서 제조된 주조품을 T6 열처리한 것으로서 그 외관을 보여 주고 있다. 350톤 도시바 다이캐스팅기에서 제조하였으며 진공도는 80%를 유지시키며 소재는 ADC12이다. 그 T6 열처리 조건은 500°C 4시간 용체화후 수냉하고 200°C 4시간 시효처리하였다. 외관에서 1mm 이내의 미세한 기포가 부분적으로 형성되어 있으나 그것은 무시할만 하였다. 그림 6은 그 단면조직으로서 전반적으로 수축공이나 기포가 없었으나 15mm 두께의 후육부에는 미세 기포가 일부 있다. 그러나 부풀음이나 조대 주조결함은 없었다. 그림 7의 미세조직에서도 일반다이캐스팅의 기포결함들은 거의 없으며 일부 20-100µm의 미세기포들이 일부 형성되어 있다.

표 4는 진공다이캐스팅과 일반 다이캐스팅주물의 열처리시편으로 압축시험한 결과를 보여 주고 있다. 일반 다이캐스팅주물은 470°C까지는 거의 부풀음이 적으나 500°C 이상에서는 급격하게 결함이 발생하여서 경도는 열처리로 증가하나 자체결함에 의하여 낮은응력에서도 변형이 되어 강도가 크게 감소하고 있다. 그에 비하여

Table 2. Characteristics of Aluminum Casting Processes

	Vaccural	Vaccum Diecasting	Diecasting	Squeeze Casting
Melt Feeding	Vaccum suction	laddle	laddle	laddle
Vaccum(torr)	80	200	760(1atm)	760 (1atm)
Gas content (cc/100g)	1-5	5-15	10-50	0.2-0.5
Porosity	○	△	×	◎
T6 treatment	○	△	×	○
Welding	○	△	×	○
pressure tightness	○	△	×	◎
productivity	100	100	100	50
Life of Mold*	100	100	100	50

\* Life of diecasting die is 100

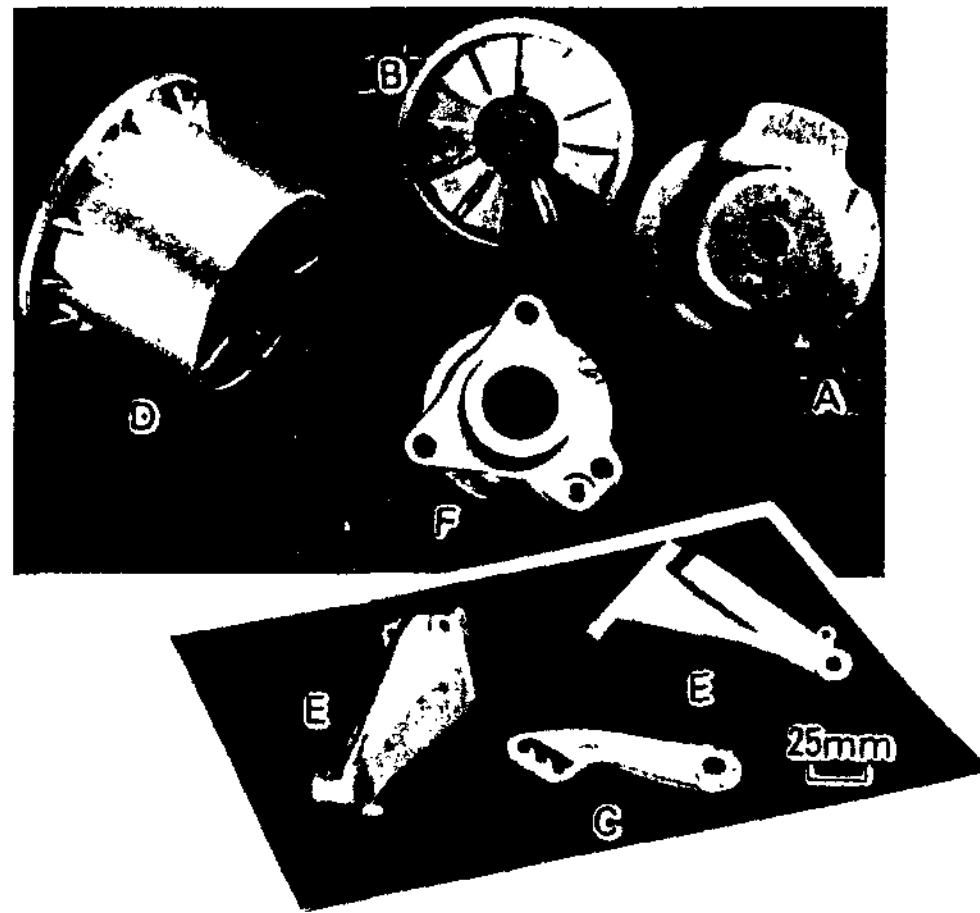


Table 3. Applications of Vaccural process on automobile in Duetch

Note	Name	Car	Fuction	Alloy	Before
A	Spring case	Benz 124	ductility	Al-11Si-Cu	Steel sheet
B	Bearing Cover	Benz all	ductility	Al-7Si-Mg	diecasting
C	Motor cover holder	Benz 124	high temp.property	Al-9Si-Mg	Al gravity casting
D	propeller shaft case	BMW K1	durability	Al-11Si-Cu	Al extrusion
E	Moter plate	Foed Siera	durability	Al-9Si-3Cu	Al sand casting
F	Hydraulic steering cover	Audi	durability	Al-11Si-Cu	Al gravity casting

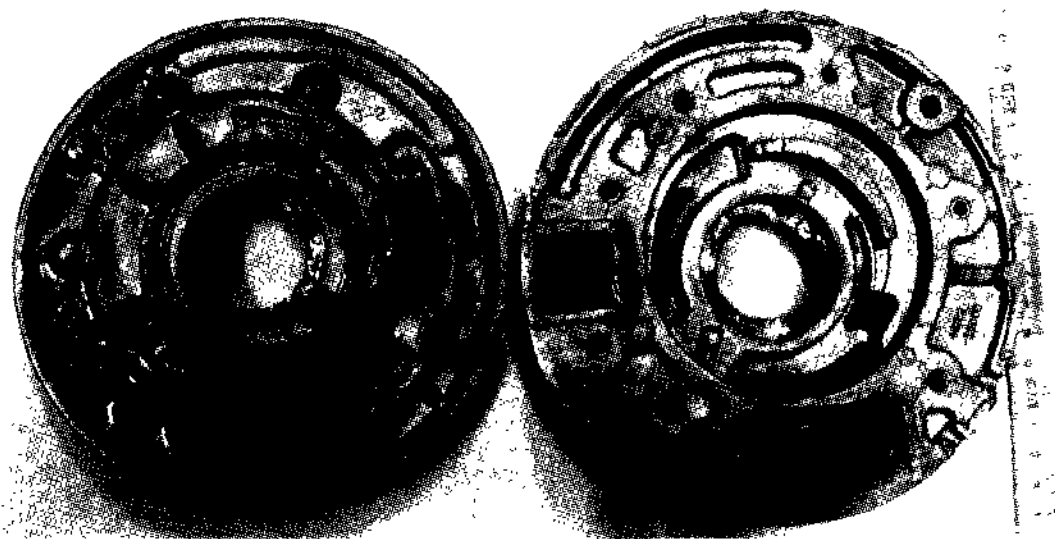


Fig. 5. T6 heat treated ADC12 Al Vaccum diecasting.

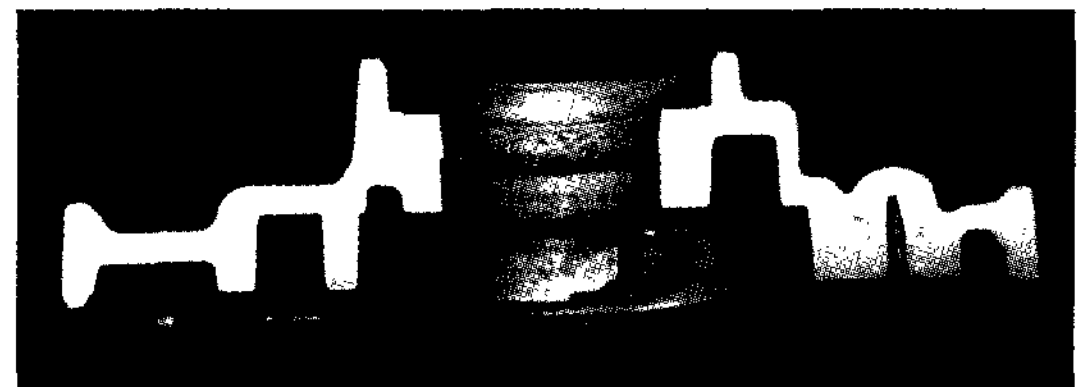


Fig. 6. Section of the T6 heat treated Vaccum Diecasting.

진공다이캐스팅 주물은 결함이 거의 발생하지 않아서 자기 강도를 나타내고 있다. 즉 충분히 T6 열처리의 대응이 가능하다.

#### 4. Vaccural 법에 의한 다이캐스팅주물의 열처리 특성

현재 진공 다이캐스팅법중에서 고진공을 가지면서 고품질의 주물제조에 활발히 적용되고 있는 공정이

Table 4. Mechanical Properties of T6 - ADC12 Al diecastings

Diecasting	T6 condition	Compressive strength (MPa)		Hardness (HRB)	Ref.
		0.1% Yield	Ultimate		
Normal	430°C	137	280	32.3	Blistering
	470°C	183	367	60.0	
	510°C	213	313	60.5	
Vaccum	500°C	285	415	62.4	



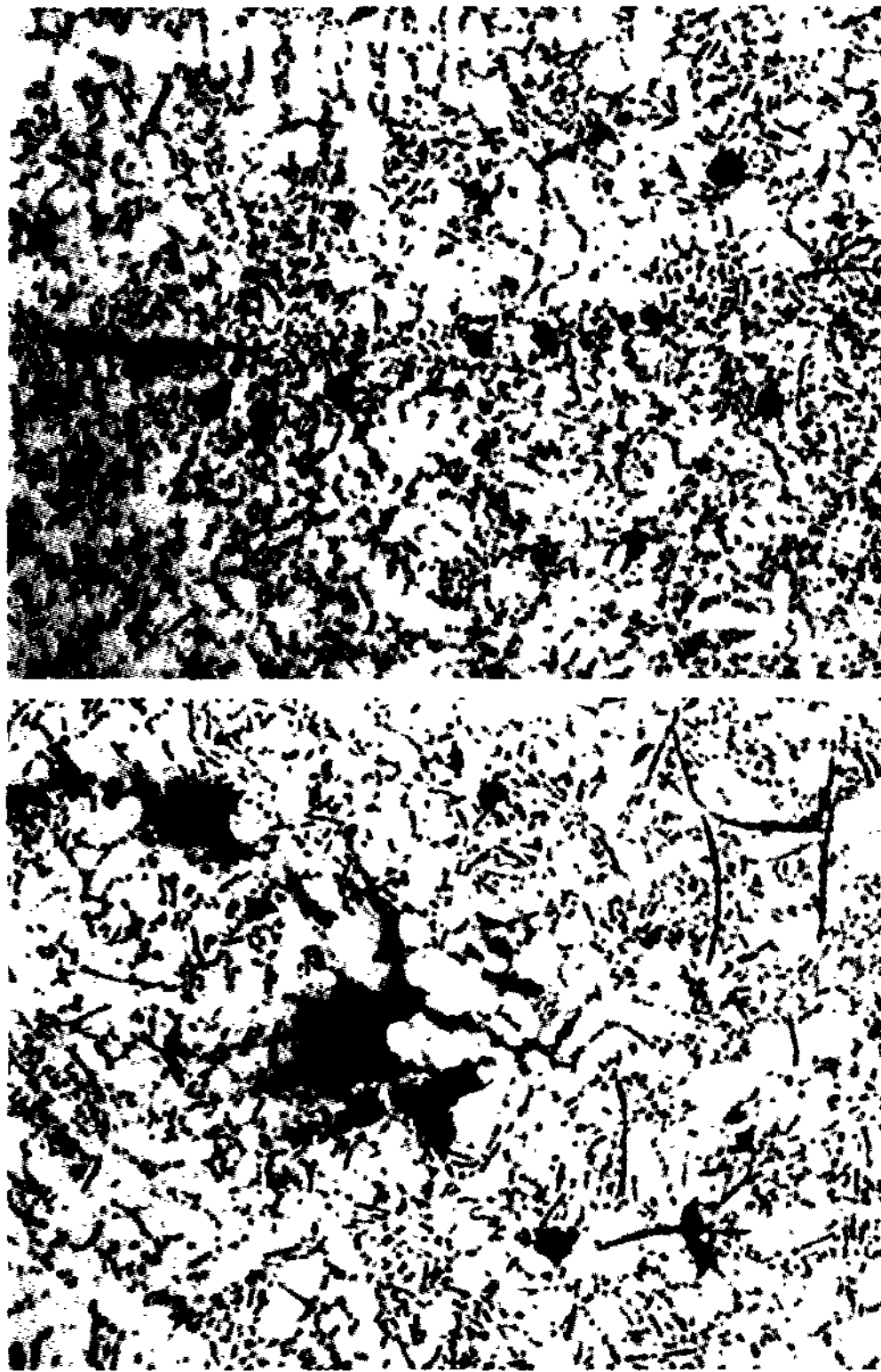


Fig. 7. Microstructure of T6 - ADC12 Al vacuum diecasting (X160).

Vaccural 법이다. 그러나 열처리와 용접이 가능하다는 것 이외에 실제로 진공다이캐스팅시 열처리 공정이나 조건에 따른 물성에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 최근 문헌에 의하면 이 다이캐스팅으로서 종래 일반 다이캐스팅합금계 뿐 아니라 중력주조재인 A356(Al-7Si-Mg)을 비롯해서 다양한 소재에도 적용하여 고품질의 경량주물의 양산에 적용하고 있어서 다이캐스팅의 생산성과 경제성을 가지면서 고성능 다기능성 구조제품의 적용성이 주목받고 있다. 여기서는 A356합금을 가지고 Vaccural 법으로 제조한 2-10 mm 두께의 판상주조시편에서 제조조건과 열처리 조건에 따른 기계적성질들을 살펴 보았다[8].

4.1 물성에 대한 진공도의 영향

그림 8은 주조시에 진공도에 따른 시편의 파괴연신율의 변화를 보여 주고 있다. 진공도가 높을수록(저압) 연성이 증가하고 있으며 열처리시에 보다 연성이 증가하고 특히 진공도가 100 mbar(1/10기압)이하에서는 보

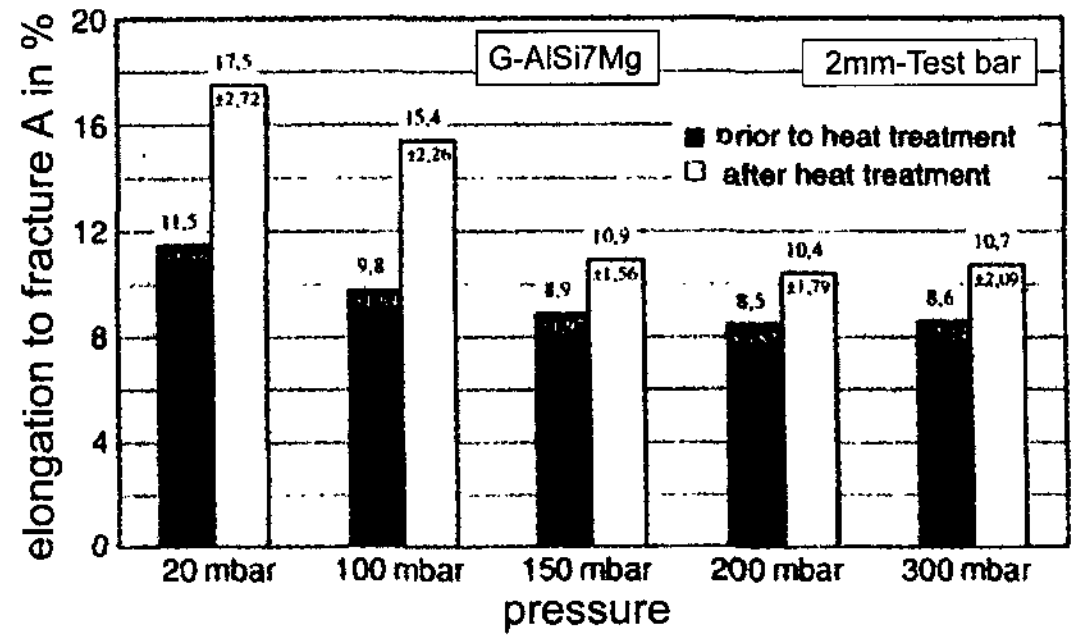


Fig. 8. Effect of vacuum pressure in die cavity and sleeve on the elongation.

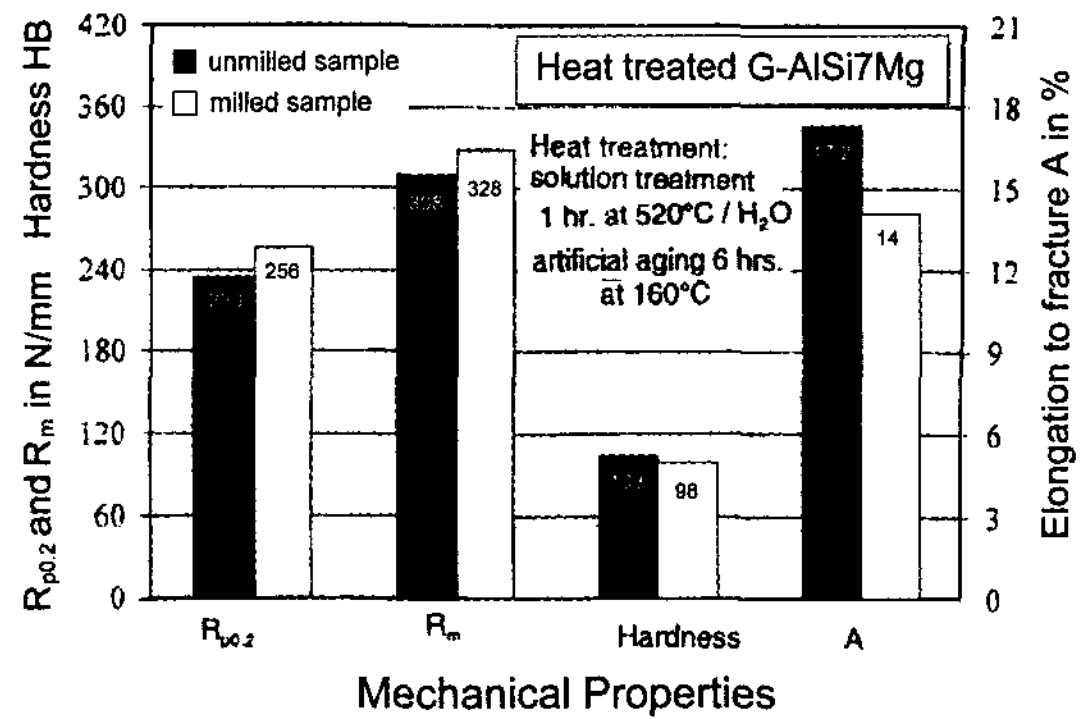


Fig. 9. Effect of the cast skin on the mechanical properties.

다 고품질이 얻어지고 있다.

4.2 물성에 대한 주물표면의 영향

그림 9는 주물의 표면을 가공여부에 따라 기계적성질의 변화를 보여 주고 있다. 표면가공으로 강도는 증가하고 있으나 연성은 감소하고 있다. 역으로 주조품 상태가 연성이 우수함을 알 수 있다.

4.3 용체화처리 조건의 영향

그림 10은 용체화처리 온도를 460-535°C 범위에서 30, 60, 120분으로 유지하고 시효처리시에 인장성질을 조사한 결과들이다. 인장강도 항복강도 및 경도의 강성을 비롯해서 연신율도 용체화 처리온도가 높을수록 증가하고 있으며 500°C 이상에서는 거의 큰 증가가 없이 일정해지는 포화상태에 이르고 있다. 특히 용체화시간의 영향을 보면 강도의 경우 30분이나 120분이나 큰 차이가 없다는 것이다. 반면에 연신율은 500°C 미만에서는 용체화시간이 미치는 변화가 크지 않으나 520°C 이상에서 60분과 120분의 차이가 크다 이것은

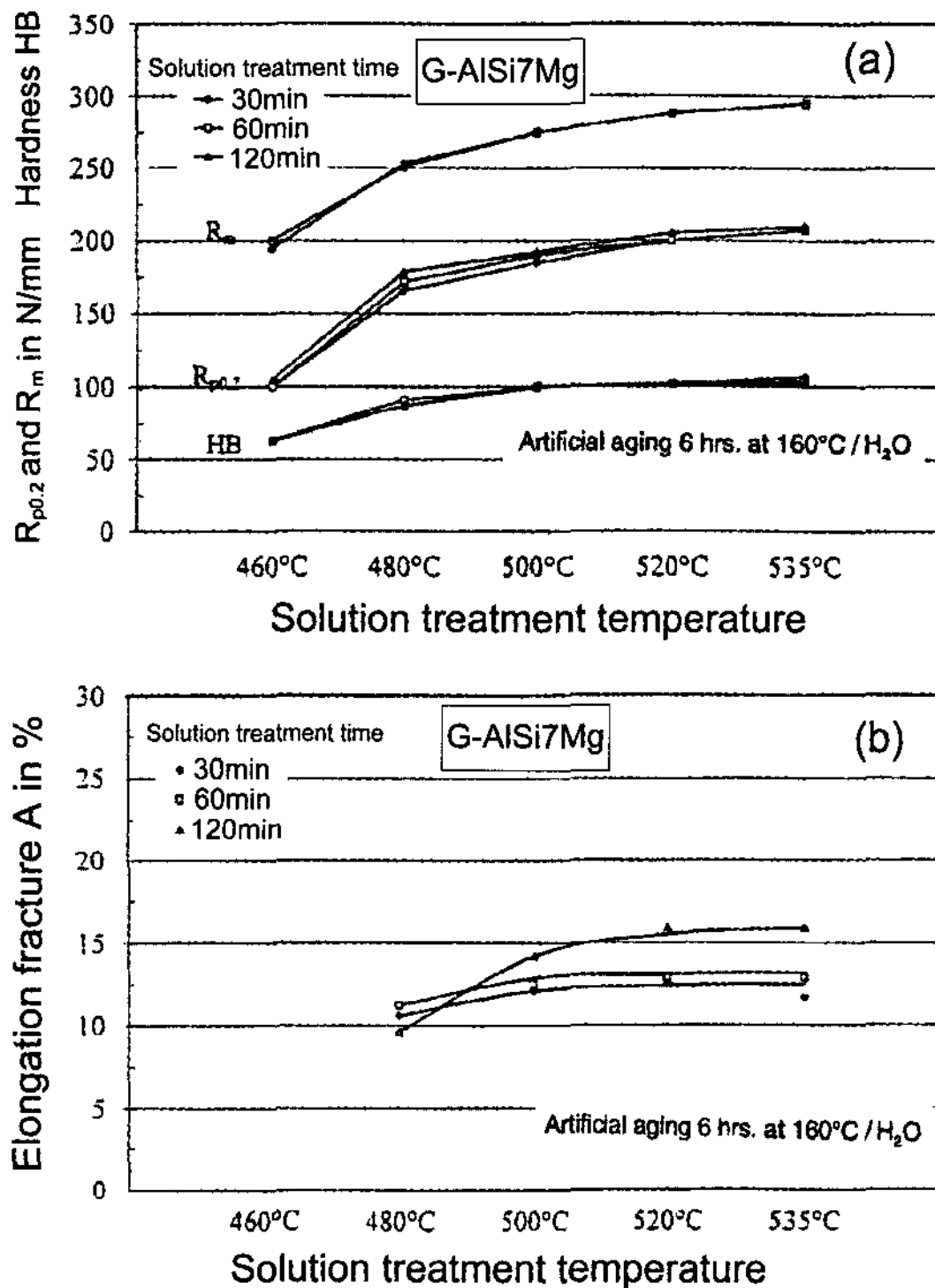


Fig. 10. Effect of solution condition on the mechanical properties.

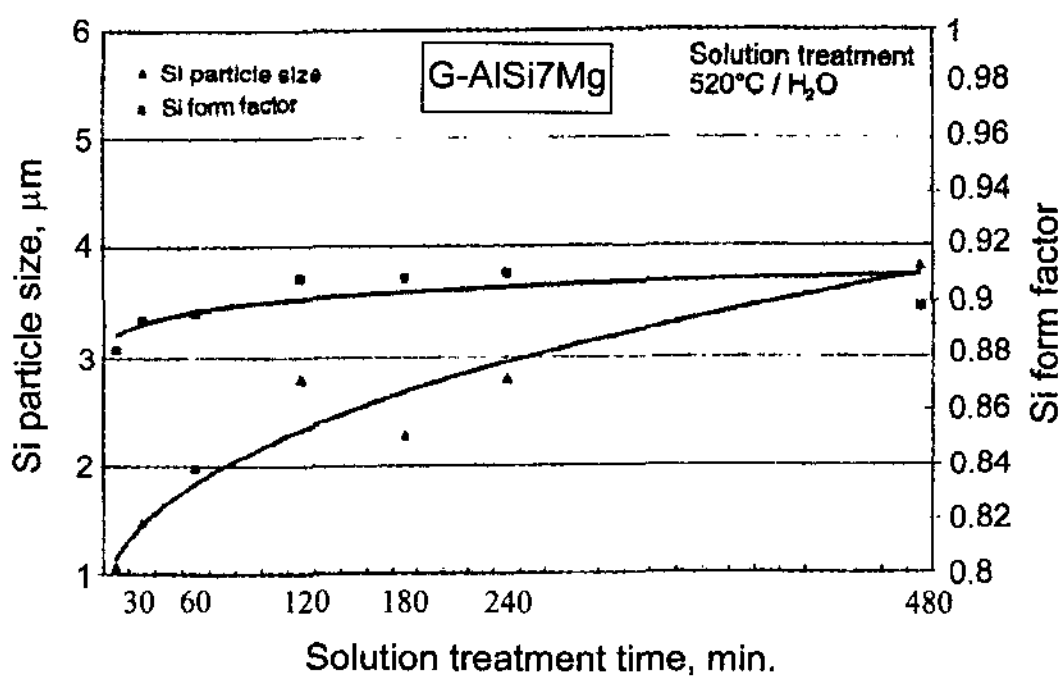


Fig. 11. Effect of solution condition on the eutectic Si shape and the size.

이러한 온도에서 연신율에 영향을 미치는 공정 Si 이 현저하게 구상화 및 입자화가 되어져서 연성에 악영향을 미치는 봉상이나 flake 의 조직들이 감소한 한 것으로 고려된다. 즉 500°C 이하에는 공정 Si 의 조직이 주조조직과 별로 차이가 없이 유지되고 있음을 반증하고 있다. 그림 11은 실제 공정 Si 의 변화를 정량적으로 보여 주는 자료이다. 따라서 이러한 진공다이캐

스팅의 주물에서 박육 복잡형상의 주물의 경우 비교적 낮은 520°C에서 1시간정도의 짧은 열처리조건으로도 충분한 물성의 확보가 가능함을 알수 있고 이러한 짧은 용체화에서는 보다 가스농도의 악영향이 상대적으로 그 영향이 적어서 품질면에서 유리한 점이 있다.

4.4 퀀칭조건의 영향

그림 12는 여러 가지 냉각조건에서 주조시편들의 인장성질을 보여 주고 있다. 비교적 서냉이 되는 공냉에서 강제 공냉, 유냉, 상온 수냉 및 60°C 수냉등의 조건에서 T6 처리시의 특성들로서 비교적 박육인 2-5 mm 두께의 시편의 결과이다. 강도면에서 냉각능이 클 수록 높은 특성이 얻어지고 있다. 인장강도 면에서 상온수냉은 약 290 MPa 수준이나 강제공냉에서는 250 MPa로 자연공냉은 200 MPa 로 크게 감소하고 있다. 연성은 그에 반하는 경향을 보이고 있다. 즉 상온 수냉에서 강제 공냉의 냉각조건에서는 약 15% 수준이나 자연공냉에서는 20% 수준으로 증가하였다. 여기서 박육 복잡 형상의 주물에서는 수냉변형이나 문제발생에

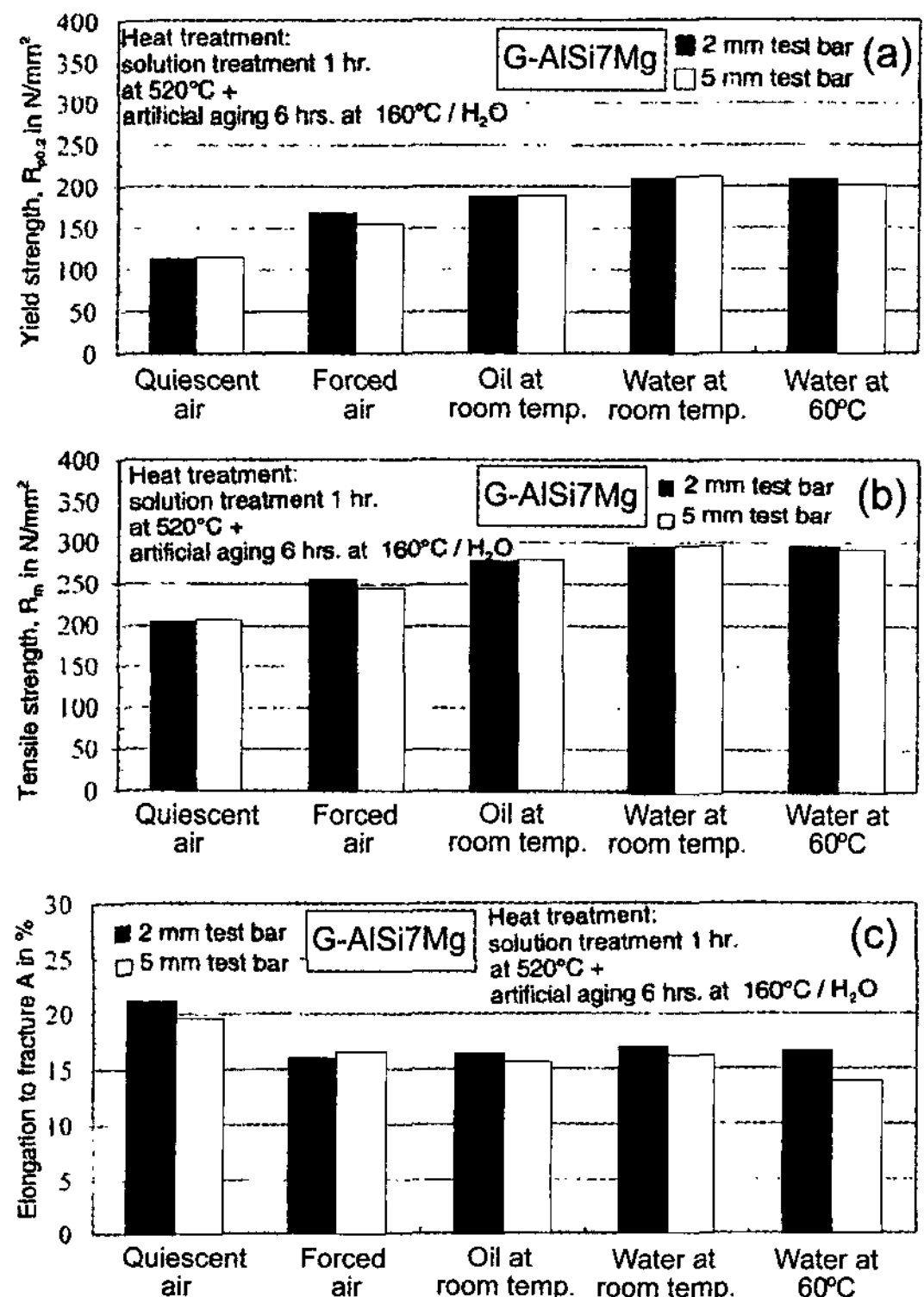


Fig. 12. Effect of the quenching rate on the tensile properties.

대하여 강제 공냉조건에서도 비교적 물성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

4.5 시효처리 조건의 영향

그림 13은 160-230°C 범위에서 15분에서 16 hr 까지의 시효처리에 인장성질과 경도이다.

인장강도는 160°C에서는 약 16시간에서 최대가 되고 있으며 180°C에서는 약 4시간에 이르고 있고 그 이후는 약간 감소하는 과시효가 나타난다. 최대 인장강도 값은 160°C가 325 MPa 수준이고 180°C는 약간 낮은 320 MPa이다. 200°C에서는 20분에 최대가 되고 있고 이전의 온도에 비해서 그 값이 낮다. 230°C에서는 강화가 나타나지 않고 시효가 될 수록 감소하였다. 한편 160, 180°C에서는 시효초기에 강도 감소는 강화상의 느린 석출로 인하여 입계 석출이 진행되어 초기 고용도 고갈이 발생된 것으로 고려된다.

한편 연신율을 보면 160°C에서 특이하게 시효초기 30분 정도까지는 26%에서 28 %로 다소 연성이 증가하고 그 이후 급격히 감소하여서 16시간에서는 16%에 이르고 있다. 180°C에서는 시효가 되면서 계속 연신율이 감소하였고 160°C 보다는 연성이 감소하고 있다. 200°C에서는 더욱 급격히 연신율이 감소하여 거의

12% 대에 머무르고 있으나 230°C에서는 연신율이 1 시간 정도에서 크게 감소하였다가 그 이후에는 다소 증가하고 있다.

5. 결 론

진공다이캐스팅은 이제 고품질의 경량주물제조에 주요한 공정으로 대두되고 있고 국내외적으로 그 적용이 확대되고 있다. 그러나 국내는 주조상태에서 주조결함이 적고 신뢰성이 있는 주물의 생산에 국한되고 있고 열처리는 거의 도입하지 않고 있다. 본 보고에서 강조하고자 하는 것은

- 1) 현재의 진공시스템의 효율적 관리와 용탕관리 주조조건의 합리화를 통해서도 비교적 T6 열처리 가능한 주물이 제조가 가능하다.
- 2) 진공다이캐스팅은 일반 다이캐스팅의 특성을 충분히 발휘하면서 고품질 및 열처리와 용접성이 가능한 수준에 다다르고 있고 경쟁력있는 공정으로서 개발의 가치가 충분하다.
- 3) 기계적인 측면 보다 금속적인 개발특성을 가지고 있고 다양한 주조소재를 수용할 수 있어서 새로운 기능 및 고성능을 요구하는 신 경량구조제품 제조에 효

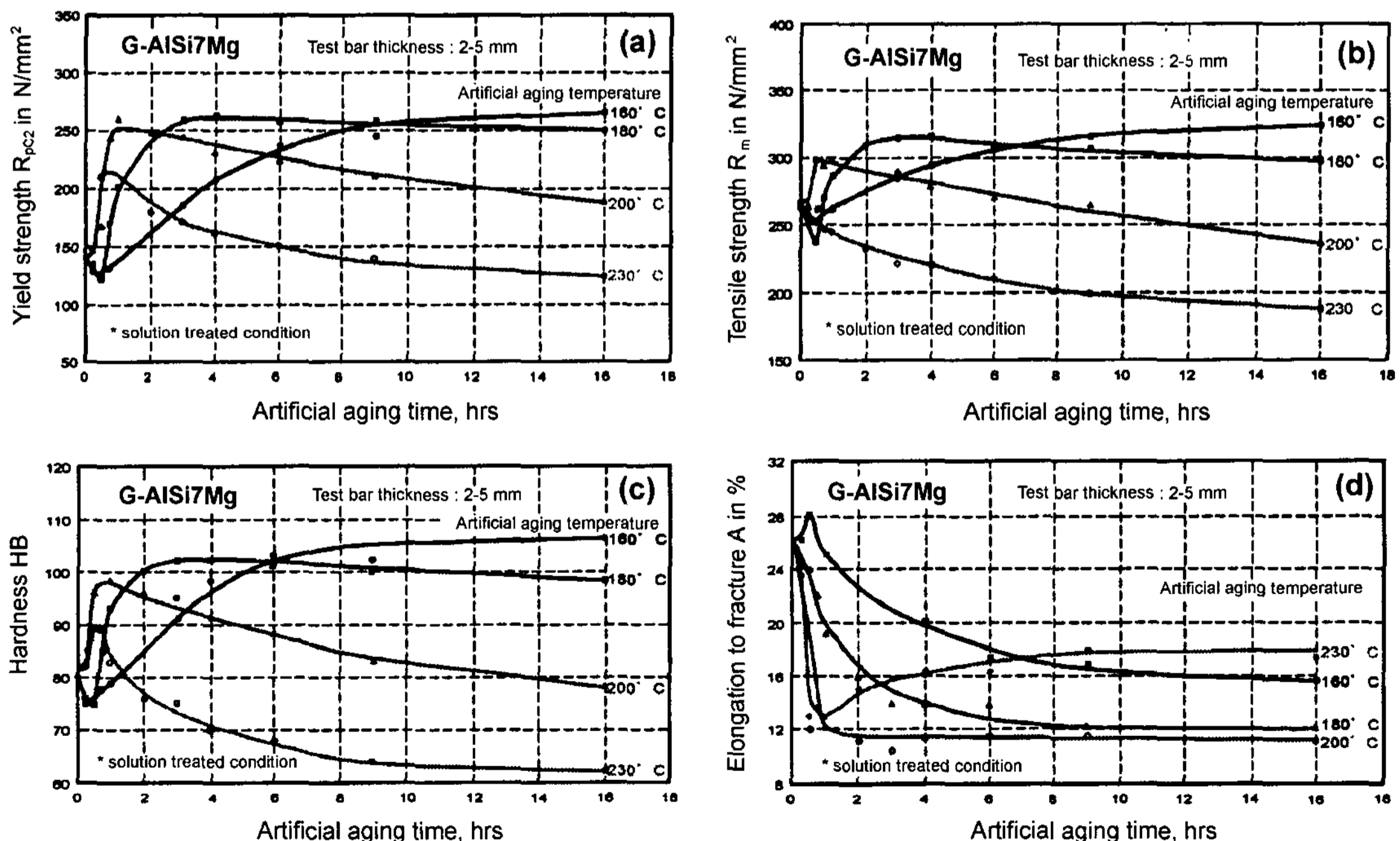


Fig. 13. Aging diagram for tensile strength and elongation.



과적이다.

본 보고가 이러한 면을 인식하고 진공다이캐스팅의 열처리 적용이 활발히 추진되는 계기가 되기를 기대한다.

### 참 고 문 헌

[1] F. G. Stummer : Giesseri : Vol 64, (1977) 236  
 [2] R. J. Kervich : Transactions of SDCE , (1966) 44

[3] Jerald R. Brevick and P. S. Cheng : Transactions of NADCA, 95-045 (1995) 145  
 [4] N. Tsumagari and A. Nitz : Transactions of NADCA, 97-045 (1997)  
 [5] Ch. Seydoux and R. Tracy : Transactions of NADCA, 97-092 (1997)  
 [6] Toyo Diecasting machinery catalog (1997)  
 [7] 青山俊三, 坂本勝美, 梅村晃由 : 鑄物 第66卷 第12號, (1994) 934  
 [8] W. Schneider and F. J. Feikus : Light Metal Age, June (1998) 22