

技術資料

# 용탕단조법에 의한 경량금속주물의 개발시 고려사항과 사례분석

한 요 섭

## Considerations and Case Studies of Light Alloy Casting Development by Squeeze Casting

Y. S. Han

### 1. 서 론

국내외적으로 강조되고 있는 차량 경량화, 고품질화 및 경제적 양산화 요구추세는 비철분야에서 기존의 중력주조 및 압력주조법들의 개선 및 신 주조공정의 개발도입을 적극적으로 추진하게 하는 계기가 되고 있다. 그중에서 새로운 고압용 고주조법으로서 용탕단조법은 고품질, 신 경량제품 개발 실용화에 효과적인 공정으로 인식되어졌다[1,2]. 그러나 기초 현상 이해장치로서는 상용품을 효과적으로 개발 실용화하는데 한계가 있으며 일본 유럽에서는 이미 전용기기 및 각종 기술장벽으로서 우리의 신기술 확보에 어려움을 주어서 독자적인 연구개발이 요구되어 졌다. 실제로 국내에서 용탕단조법의 실용화는 일본 주조기의 도입으로부터 이루어졌으며 그를 기반으로 국내 산학연 협동연구 개발의 노력으로 이제 국내에서도 용탕단조법의 기반기술들이 점차 확보되고 있는 상황이다[3,4]. 그러나 용탕단조법의 연구 개발의 노력들은 일본 유럽처럼 체계화가 미흡한 상태이고 더욱이 기술교류 및 협조가 여러 가지로 부족하여 대부분 독자적으로 추진되어서 이중삼중으로 같은 연구개발이 진행됨에 따라 노력에 비해 효과가 적게 얻어지고 있다.

본 보고는 용탕단조법에 대한 개요를 먼저 점검하여 보고 용탕단조법으로 경량금속주물 특히 알루미늄주조품을 개발시에 주요 고려사항들을 제시하고 아울러 최근의 용탕단조법에 대한 연구 결과들과 실용화현황을 검토하면서 그동안 수행하여 온 각종 용탕단조법의 개발사례들을 분석함

으로서 효과적인 실용화 요소들을 살펴보고 본 기술의 적용방향을 나름대로 정리하여 보았다.

### 2. 용탕단조법의 개괄

#### 2.1 용탕단조법의 원리와 주요 현상들

용탕단조법은 주형내의 용탕에 기계적인 압력을 가하여 용탕상태에서 완전응고에 이르기까지 고압하에서 성형응고를 하는 주조법이다. 그림 1은 용탕단조시에 주물과 주형에서 이루어지는 물리적 현상들을 개략적으로 도시한 것이다. 이들을 크게 3가지로 구분하면,

- 1) 성형 및 소성변형-수축공이나 기포가 고압압축에 의해 억제 제거되고, 주형에 충전 밀착을 시키고 응고층의 소성변형을 가져오며 미응고 용탕이 수지상계면에서 전후로 유동방출되어 유동이 촉진된다.
- 2) 열전달촉진-가압으로 주물수축에 따른 air gab을 효과적으로 억제시키고, 주형과 주물의 밀착으로 계면열전달이 증가되어 급냉이 촉진되고, chill조직이 얻어진다.
- 3) 고압현상-고압을 받아서 물성값들-비열, 밀도, 점성도, 전기열전도도, 확산계수 등이 변하고 상태도도 고압으로 변하여서 고용도, 상변태 온도와 조성 변화와 준안정상의 생성이 이루어진다.

이 현상들이 용탕단조주물의 조직과 성질들을 기존의 주조품과 비교하여 다음의 특성들을 가지게 하고 있다.

한국과학기술연구원

\*1996년도 추계기술 강연대회에서 강연한 내용임.

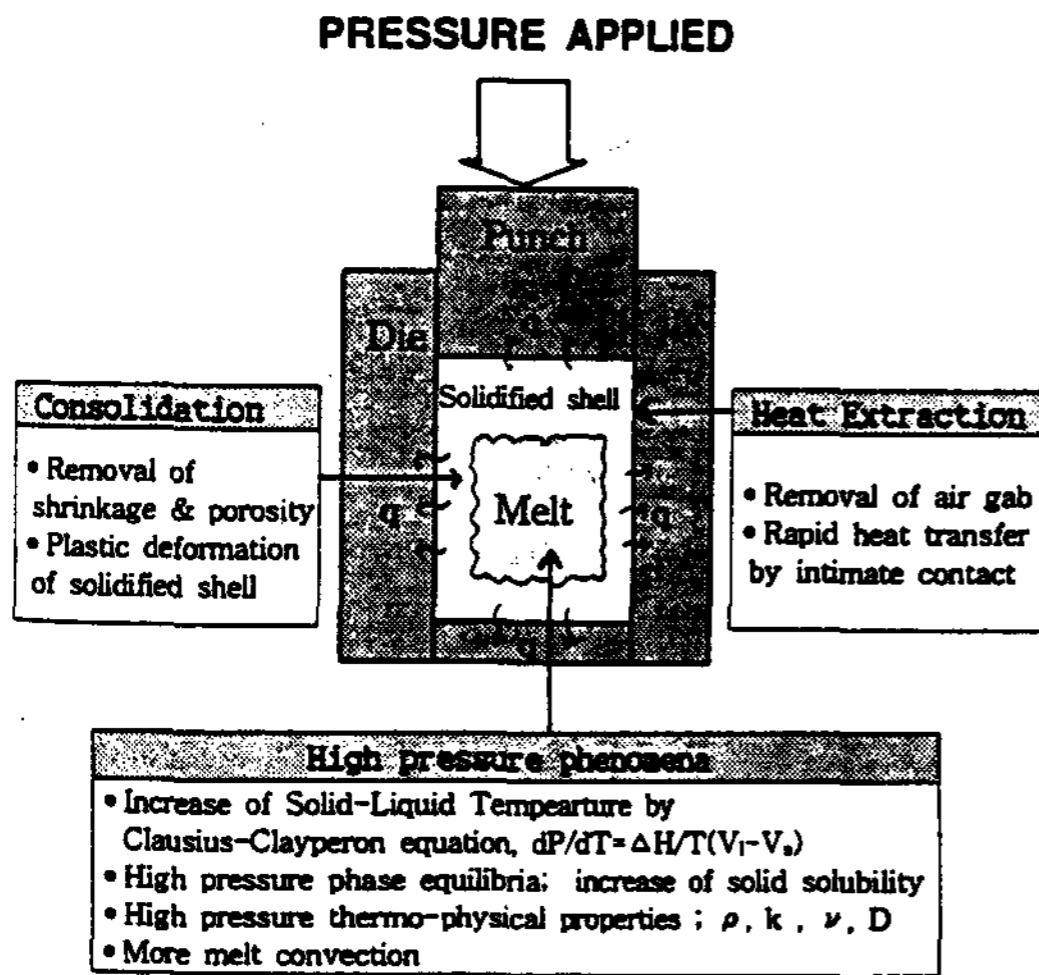


그림 1. 용탕단조시 나타나는 주요 현상들

## 2.2 용탕단조공정과 주물의 특성

### 2.2.1 제조공정 특성

용탕단조의 주요원리가 주형내 용탕에 기계적 고압을 효과적으로 지속시키는 것인데 그림 1의 직접가압방식의 용탕단조에서는 용탕을 주형에 정량주입하는 것과 적정온도와 품질-온도, 가스 억제, 조성등의 용탕을 관리하는 것이 어렵다. 이를 개선하기 위해서 장치를 이용하여 주탕 및 가압을 수행하는 것으로서 간접가압식 용탕단조가 개발되어 실용화에 크게 이용되고 있다.

이러한 기계적장치를 이용하는 주조법에서 주조외관과 내부품질을 좌우하는 2가지 요소로서 i) 용탕의 금형캐비티로 주입속도, ii) 용탕에 가해지는 압력을 들수 있다.

용탕의 주입속도의 영향을 보면, 그 속도가 빠른 일반 다이캐스트법에서는 용탕의 유입경로나 캐비티내의 공기가 용탕중에 혼입되어 제품내부에 결함을 야기시키고 그 결함 부위도 일정하지 않고 열처리도 어려워서 주조품질의 신뢰성이 떨어진다. 이러한 결함을 방지하기 위해서 다이캐스트에서 Pore Free 다이캐스트, 진공 다이캐스트(GF), plunger 속도를 제어하는 방법등이 제안되어 일부 실용화가 되고 있지만 결함을 획기적으로 감소시키거나 고신뢰성을 얻지 못하고 있다. 유입속도가 낮은 중력주조나 저압주조는 용탕의 亂流가 적어 공기혼입이 감소하여 열처리가 가능하지만 탕류결함이 많이 발생하는 단점이 있다. 따라서 다이캐스트에서 주입속도를 낮추어

저속 層流(lamellar flow)의 안정되고 제어를 가능한 흐름을 가지도록 하는 層流다이캐스트, Accurad법, 스퀴즈캐스팅법, 中壓주조법 등이 새로 개발되고 있다.

한편 주조압력에 대해서, 주조압력이 높은 다이캐스트법은 금형내 용탕이 고속 고압으로 사출 충전되므로 금형표면과 밀착도가 높아져서 외관이 양호하고, 응고속도가 빨라 높은 생산성을 확보하는 장점이 있다. 반면 주조압력이 낮은 중력이나 저압주조의 경우 용탕과 금형간의 밀착도가 낮고 그 사이에 도형재가 있어서 외관 형상이 떨어지고, 응고속도도 느려서 생산성이 낮은 단점이 있다. 또한 응고속도가 느리므로 응고수축에 대한 용탕보충이 충분하지 못하여 미세 기포나 수축공이 생기기도 하고 미세조직이 조대화가 되어서 고품질의 주조품제조 요구에는 미흡한 점이 있다.

표 1은 일반 다이캐스트법을 비롯해서 최근에 개발 실용화되고 있는 각종 고압응고주조법들의 주조및 제조특성들을 비교하여 본 것으로서 전통적인 중력금형주조나 저압주조의 경우도 참고로 나타내었다. 다음은 용탕단조시의 제조특성을 살펴본 것이다.[5-7]

#### 1) 급속응고및 고생산성

가압에 의한 주형과 주물간의 밀착되고 air gab 현상이 없어져서 빠른 냉각속도가 얻어진다. 실험적으로 다양한 크기의 Al-8%Si합금의 봉상 주물에서 중력금형주조와 용탕단조시에 나타나는 응고시간을 반경험식 Chvorinov rule( $t=K(V/S)^2$ )으로 조사한 바에 의하면 비례상수 K가 중력주조재에서는  $421ks/m^2$ 이었으나 용탕단조재에서는  $212ks/m^2$ 로서 동일소재 크기에서 용탕단조재가 중력주조에 비해서 응고시간이 1/2로 단축되었다. 또한 형/주물간 계면열전달계수는 가압력이 39.2MPa일때 중력주조에 비해서 4배 정도, 100MPa 정도에서는 약 10배까지 증가하는 현상이 측정되었다[8]. 이러한 급속응고로 인하여 생산성이 다이캐스트 수준에 이른다. 실제로 Al wheel의 제조싸이클을 보면 중력주조는 240-300초, 저압주조는 240-360초인데 비해 용탕단조는 120-150초로 1/2 수준이다.

2) 기계적 고압으로 충전 성형을 함으로 중력주조,다이캐스트에서는 주조균열 등의 결함이 발

표 1. 알루미늄합금의 고압주조법의 비교[5]

주 조 법	주입방식	탕구유입속도 m/s	탕구두께 mm	가압력 (가압방식) kgf/cm <sup>2</sup>	주입온도 ℃	특 징
1. 일반다이캐스트	고속충진	30~60	0.5~2.5	500~1000 (플런저1단)	600~650	최고생산성
2. GF다이캐스트 (Gas Free);진공	↑	↑	500~700 (형내감압)	↑	기포없음	
3. 스퀴즈병용 다이캐스트	↑	↑	↑	1250 . 2500 (플런저,케비티)	≒660	고생산성, 기포감소
4. PF다이캐스트 (Pore Free)	↑	↑	↑	↑ (활성가스치환)	600~650	기포없음
5. 총류다이캐스트	저속총류충진	0.5~0.7	5~15	1500 (플런저1단)	≒700	고생산성, 기포감소
6.아큐라드법 (Accurad)	↑	0.3~2.5	↑	500~1000 (플런저2단)	700~720	수축공역제
7. Hi-CAST법 (Hi-pressure)	↑	0.15~0.4	제품부 최대두께이상	500~2000 (플런저2단)	700~800	두꺼운제품 적당
8. 스퀴즈캐스트법 (Squeeze cast)	저속총류충진	≒0.2(케비티 내 상승)	-	1000~2000 (직접압입)	700~750 (추정)	균일고강도
9. NDC법 (New Die Cast)	저속총류충진	1~2	제품부 최대두께이상	200 (플런저)	700 (추정)	대형. 붕괴중자
10. [참고] 중력 금형주조법	↑	<2	임의	중력	700~800	성형자유 붕괴중자
11. [참고] 저압 주조법	↑	0.6~0.7	25~40	0.2~0.5	690~740	대형. 붕괴중자

비고 : 번호 5-9는 고압응고법에 해당됨

생하는 전신가공용 소재나 주조성이 나쁜소재도 주물로 제조가 가능하다.

3) 저속충진과 고압에서 가스고용도증가 등에 의해서 주물내 수소가스농도감소와 기포결함 억제로 전전주물이 제조된다. 아울러 그결과 용탕단조품은 열처리,용접가공, 내압기밀품으로 요건을 만족시키고 있다.

4) 저속,안정된 용탕충진 및 정수압 가압으로 모래중자 및 염중자를 사용할수 있어서 복잡 다양한 주물에 대응할수 있고, near net shape제조, under cut 주물등 으로서 실제로 crossdeck engine block, 중공 piston가 있다.

5) 치수정밀도가 우수하여 후가공절감효과가 크다.

6) 주철 등의 이종재질과 주조접합 또는 세라믹 등의 섬유를 가지고 FRM제조에 효과적이다.

7) 간접가압식 용탕단조방식과 자동화장치의 개발로 뛰어난 재현성, 설계다양성 등의 효과로

단순후육주물에서 박육, 대형 주단조품의 제조가 가능하다.

8) 조직이 미세하여서 기계가공성이 우수하여 경면가공이 되고, 절삭공구의 수명도 증가하는 효과가 있다.

9) 표면조직이 치밀하고, 미세기포가 적어서 표면처리 및 피막상태가 우수하다.

2.2.2 주물 특성

1) 급속응고에 의한 응고조직의 미세화 및 치밀화

그림 2는 A356합금의 일반다이캐스트, 용탕단조, 중력금형주조, 사형주조재의 미세조직을 보여 주고 있다. 앞에서 냉각과 응고속도가 다른 주조법보다 빠르다는 것을 알수 있는데 그 결과가 조직미세화로 나타나고 있으며, 별다른 미세화재를 사용할 필요가 없이 공정 Si이 미세화되고 있다. 이러한 급냉효과로 그림 3에서 나타나

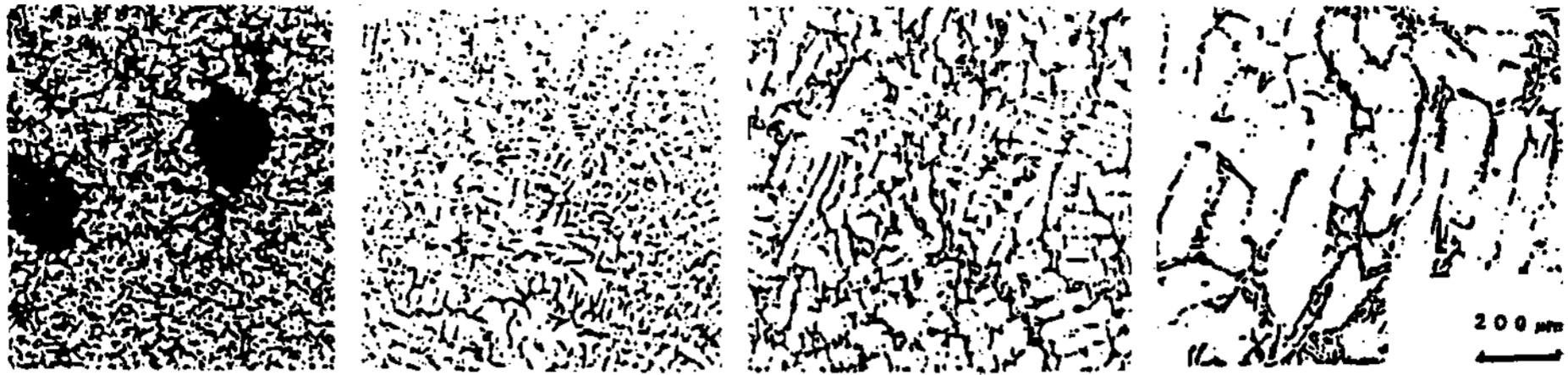


그림 2. A356합금의 주조공정별 미세조직들

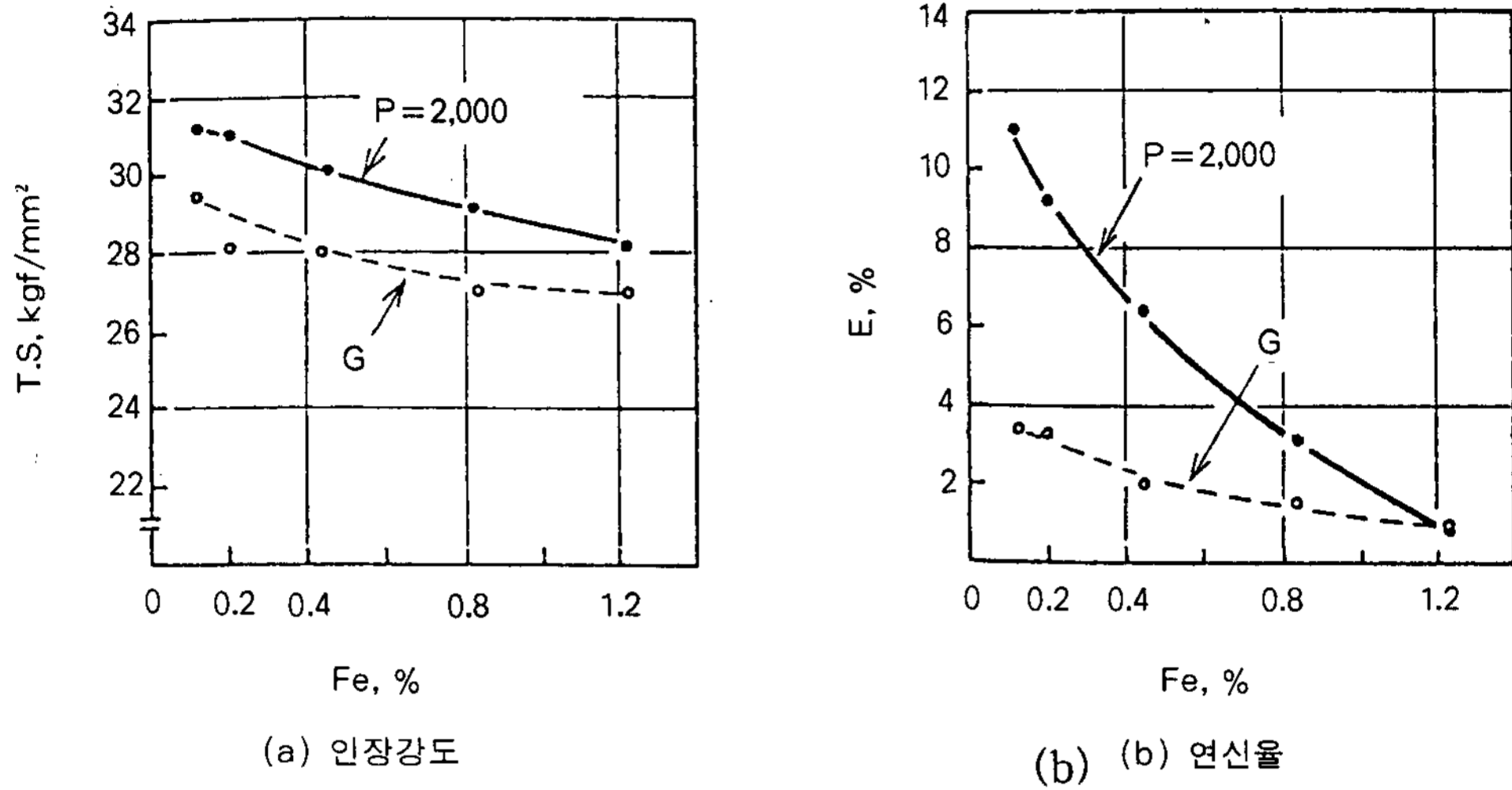


그림 3. A356합금의 Fe함량에 따른 중력주조와 용탕단조재의 기계적성질 : G-중력주조, P=2000-2000kgf/cm<sup>2</sup> 용탕단조

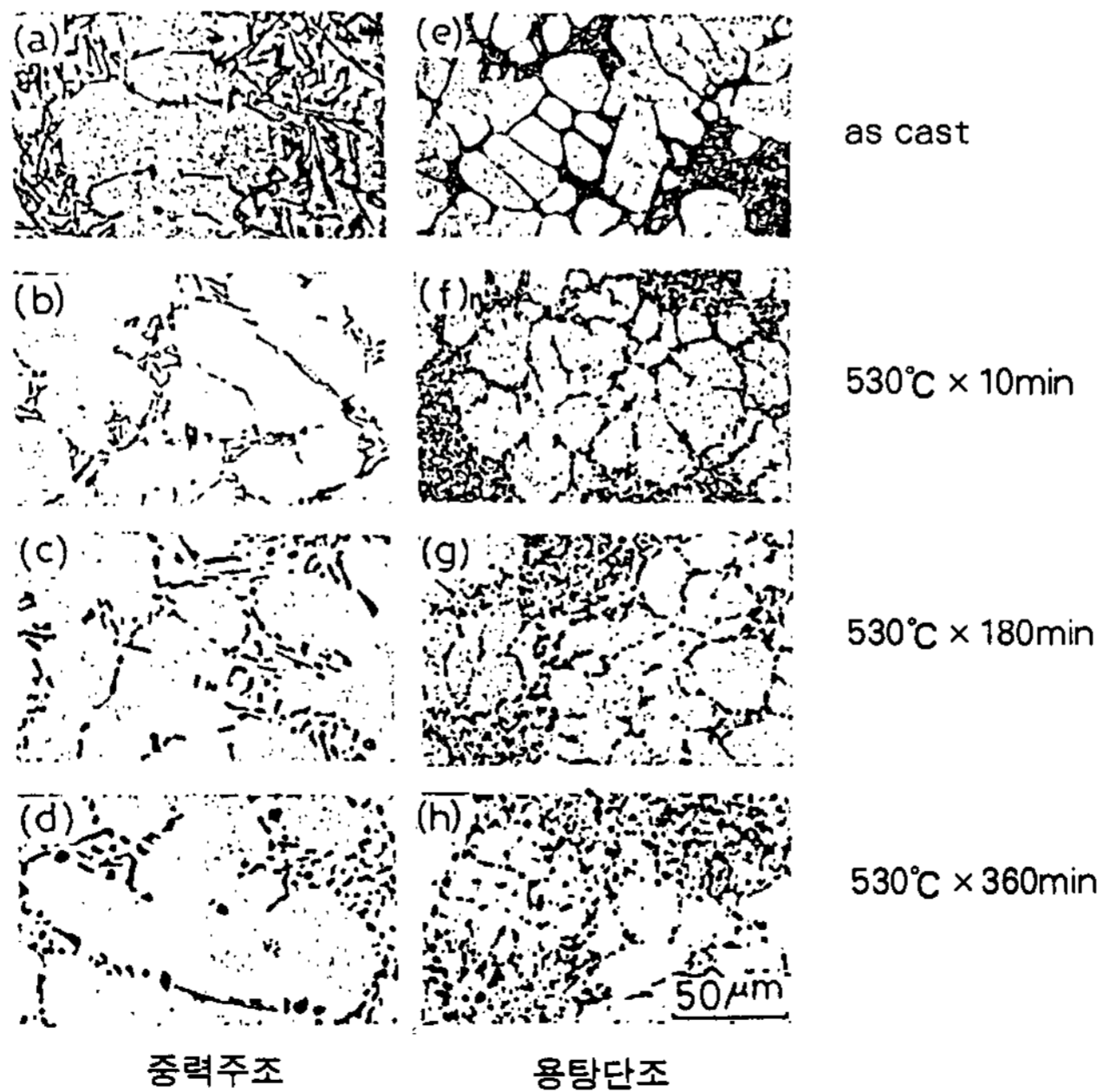


그림 4. A356합금의 공정 Si의 형상에 대한 용체화시간의 영향

듯이 Fe 등의 불순물이 비교적 많아도 기계적강도와 신율이 유지되는 특성이 있다[9]. 또한 미세한 조직으로 인해서 다른 주조재에서 용체화 및 시효가 빨리 진행되는 효과를 보이고 있다. 그림 4는 A356합금의 중력주조재와 용탕단조재의 주조 및 용체화처리시간에 따른 미세조직변화이다[10]. 중력주조재는 공정Si이 길고 침상으로 서 조대하지만 용탕단조재는 알루미늄수지상도 미세하지만 공정 Si은 보다 미세하다. 따라서 중력주조재는 공정Si의 구상화는 거의 6시간이상 이 요구되지만 용탕단조재는 3시간만으로도 충분히 구상화 분산이 이루어졌다.

2) 기계적성질 향상과 등방성특성

응고조직의 미세화, 주조결함 억제, 전전성 향상은 강도와 연성을 모두 증가시키는 효과를 준다. 표 2는 AC4C합금의 사형주조, 셀주조, 금형주조, 용탕단조 등의 주조공정에 따른 미세조직과 기계적성질을 실험적으로 비교한 것이다[11]. 여기서 용탕단조가 가장 냉각속도도 빠르고 조직의 치밀도, 미세화가 크고 동시에 강도,연신율,

충격값이 전반적으로 크게 우수함을 알 수 있다.

표 3은 각종 공업용 주조합금들에서 용탕단조시의 기계적성질의 특성을 금형주조와 비교하여 나타내었다[12]. 전반적으로 강도와 연신율들이 중력주조에 비해 용탕단조재가 향상되고 있으며 특히 Al-Si공정계합금들(AC8A, ADC12)등은 증가효과가 적으나, 고액구간이 넓고, 주조성이 떨어지는 합금들에서는 중력주조재에 비해서 조직미세화에 따른 연성향상이 2배이상에 이르고 있다.

표 4는 전신재합금에서 형단조재와 용탕단조시의 기계적성질의 특성을 금형주조와 비교하여 나타내었다[13]. 전반적으로 용탕단조재의 강도와 신율이 형단조재에 근사한 안정된 값을 보여 주고 있어 신뢰성이 우수함을 알 수 있으며 특히 단조재와 비교할 것은 본 기계적성질은 주로 길이방향에서 얻어진 것으로서 수직방향에서는 인장강도와 연성이 크게 떨어지는 문제가 있는데 이값은 용탕단조재 보다 크게 낮은 것으로서 이방성이 형단조재에서는 제품의 성능과 품질에 큰

표 2. AC4C합금의 주조법별 응고조직과 기계적성질비교

주조법	평균냉각속도 K/s	공정Si크기 μm	인장강도 kgf/mm <sup>2</sup>	연신율 %	충격값 kgf/cm <sup>2</sup>	밀도 g/cm <sup>3</sup>
용탕단조	2.0	2.7	32.5	15.5	1.47	2.701
금형주조	1.3	5.0	32.1	8.4	0.52	2.675
셀 주 조	0.13	13.6	23.3	3.3	0.18	2.665
사형주조	0.052	23.4	21.0	0.6	0.18	2.649

표 3. 각종 주조용 알루미늄합금의 금형주조와 용탕단조시의 기계적성질의 비교 (as cast)

합 금	용 탕 단 조				중 력 단 조			
	인장강도 kgf/mm <sup>2</sup>	항복강도 kgf/mm <sup>2</sup>	연신율 %	충격값 kgf/cm <sup>2</sup>	인장강도 kgf/mm <sup>2</sup>	항복강도 kgf/mm <sup>2</sup>	연신율 %	충격값 kgf/cm <sup>2</sup>
AC1A	25.4	18.1	11.7	1.82	18.6	14.6	2.5	0.40
AC2A	23.4	15.1	7.6	0.66	18.0	11.2	2.6	0.30
AC3A	20.9	16.4	15.7	1.78	17.7	13.6	15.3	1.56
AC4B	23.7	14.9	4.7	0.40	9.2	12.4	3.5	0.27
AC4C	20.9	14.1	11.4	1.17	18.2	11.6	6.8	0.48
AC5A	26.1	17.7	2.6	0.27	20.5	14.9	1.6	0.19
AC7A	26.5	18.1	27.4	4.90	24.8	15.2	16.1	2.57
AC8A	24.2	16.6	1.4	0.19	19.7	13.6	1.4	0.15
ADC1	19.7	10.8	2.1	0.22	15.4	8.5	1.9	0.21
ADC5	24.5	11.4	17.5	1.79	17.3	9.7	4.7	1.26
ADC10	24.0	11.9	3.7	0.46	19.4	10.8	2.5	0.28
ADC12	25.2	15.5	1.7	0.22	20.8	13.7	1.5	0.18

표 4. 각종 전신재용 알루미늄합금의 용탕단조와 단조시의 기계적성질의 비교

합 금	재 질	용 탕 단 조			형 단 조		
		인장강도 kgf/mm <sup>2</sup>	항복강도 kgf/mm <sup>2</sup>	연신율 %	인장강도 kgf/mm <sup>2</sup>	항복강도 kgf/mm <sup>2</sup>	연신율 %
2014	T4	39.7	25.1	10	42.1	25.5	20
	T6	42.3	36.9	4	43.4	38.1	6
2017	T4	39.7	26.8	12	42.7	27.5	22
2218	T6	34.1	29.0	2	40.7	30.3	13
	T7	28.4	22.4	3	33.1	25.5	11
2024	T4	43.3	30.0	9	42.7	27.6	12
5083	H112	27.7	13.3	24	30.3	19.3	16
	0	30.9	13.6	22	29.0	14.5	22
6061	T6	33.7	29.7	9	26.2	24.1	7
6066	T6	40.5	39.0	5	34.5	31.0	8
6082	T6	28.5	26.0	7	29.5	25.5	8
7075	T6	56.5	52.5	6	57.2	50.3	11
	T7	52.1	44.3	10	44.1	38.0	7
7N01	T6	37.5	30.5	21	37.0	30.0	15

영향을 미치는데 용탕단조재는 등방성으로서 이러한 점에서 보다 신뢰성이 우수하다.

표 5는 주조용 마그네슘합금 AZ91의 사형주조, 금형주조, 다이캐스트, 용탕단조시의 기계적 성질들을 나타낸 것이다[14]. 이 합금은 중력주조나 다이캐스트에 모두 사용되는 대표적 마그네슘 주물합금으로서 기포와 결정립크기에 기계적 성질이 좌우되어서 주조와 열처리 모두에서 용탕 단조, 다이캐스트, 금형주조, 사형주조 순으로 강도와 연성이 우수하게 나타났으며 특히 연성에서 현저하게 향상이 되고 있다.

표 6은 마그네슘 전신재합금 ZCM711의 용탕 단조재와 형단조재의 기계적성질을 비교하여 조사한 것이다[14]. 강도면에서 용탕단조재는 길이 방향의 값에는 미치지 못하고 폭방향값과 근사하나 연성에서는 오히려 2배 이상의 향상이 되어서 인성이 우수함을 알수 있다.

이상의 인장성질을 비롯해서 피로강도, creep, 내마모성, 내식성 등에서도 기존 주조재보다 우수하다는 보고가 되고 있다[13,14].

### 2.3 주조장치의 개발현황

그림 5는 각종 용탕단조장치 및 방식의 발전 과정을 개략적으로 나타낸 것이다. 초기의 직접 가압식에서 용탕의 주입과 가압을 동시에 기계적으로 제어하면서 하부나 측면에서 용탕사출 충전

을 수행하는 간접가압방식이 보다 양산화 방식으로 다수 개발되어 왔다. 국내에서도 용탕단조효과를 가지면서 범용성과 경제성을 가지는 전용주조기 개발이 추진되고 있다. 이에 대해서는 다른 문헌들에 자세히 언급되어 있다[4].

### 2.4 용탕단조법의 실용화 현황

앞에서 언급한 용탕단조 특성을 고려하여 활발

표 5. 주조용 마그네슘합금 AZ91의 주조공정별 기계적성질 비교

공 정	상 태	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
사형주조	F	154	83	2
	T6	230	127	2
금형주조	F	176	96	2
	T6	240	130	3
다이캐스트	F	190	96	3
용탕단조	F	200	115	6
	T6	260	150	5

표 6. 전신재용 마그네슘합금AZ711합금의 단조재와 용탕단조재의 기계적성질 비교

공 정	상 태	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
용탕단조-T6		272	135	16
형단조-T6	길이방향	372	360	6.7
	폭방향	260	146	6.4

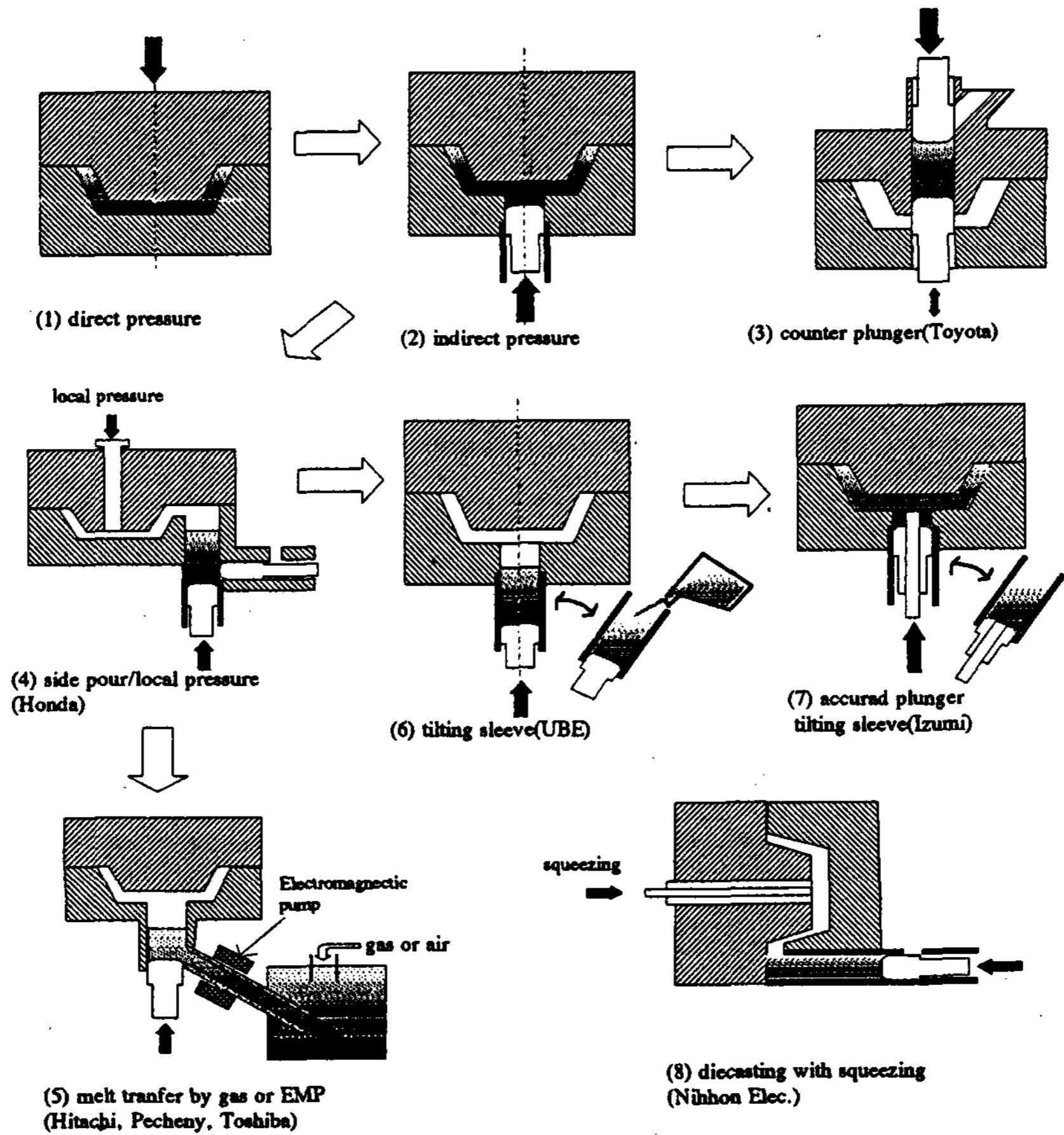


그림 5. 용탕단조장치의 실용화 개발진행 현황

한 실용화가 일본, 구미에서 추진되고 있으며 특히 일본에서는 뛰어난 기계, 전자제어기술을 응용하여 각종 전용주조기의 개발로 실용화가 가장 앞서고 있다. 그러나 일반 주조품에 비해서 장치비가 높고 금형비 등에서 제조단가가 높아서 각종 조직과 물성의 우수성으로 고품질, 신뢰성이 요구되고, 높은 기계적특성을 요구하는 주단조품으로서 현재 응용분야는 방산품, 항공, 차량부품 등에 적용되고, 특히 철제 부품의 경량화대체로서 효과적인 제조방안으로 각광받고 있다[15, 16]. 표 7은 이러한 점을 이용하여 실제로 1980년대부터 현재까지 자동차분야에서 대표적인 용탕단조 실용화제품들로서 종래의 공정에서 용탕단조 개발시의 효과를 비교하여 나타내었다. 이들은 주로 간접가압식 용탕단조제품들로서 고품질, 양산성, 기능성을 가지는 것을 알수 있다.

### 3. 용탕단조주물의 개발시의 고려사항들

#### 3.1 적절한 용탕단조공정 선정

주물제품의 제조개발에서 우선적으로 제조공정의 선택이 중요하다. 요구하는 품질, 수량, 단가, 납기 등에 기초하여 용탕단조법으로 제조가 가능하고 경제성을 포함하여 적절한 용탕단조방식과 주조기의 선정이 요구된다. 용탕단조장치의 개발이 활발히 이루어지고 있으나 경쟁적으로 다른 주단조법-다이캐스트, 형단조, 중력 및 저압주조등에서도 고품질, 고생산성의 공정개발이 이루어지고 있어서 엄밀한 비교분석이 요구된다. 실제로 용탕단조방식으로 주로 이용되는 것은 직접가압방식과 UBE전용주조기(VSC, HVSC)와 다이캐스트에서 스퀴즈가압기능도입방식 등 3가지가 되며, 국내에서는 UBE기기가 주종이나 국내 기술개발과 경쟁력확보면에서는 소량 다품종, 경

제성과 효율성이 큰 직접가압장치와 스퀴즈다이 케스트의 개발 실용화에 보다 관심을 가져야 할 부분이다.

3.2 효과적인 주물 및 주조방안 설계

적절한 주조공정 장치를 선택후에는 주물의 설계 및 주조방안의 확립이 뒤따른다. 특히 주물설계가 중요한데 국내에서는 다른 제조기술에 비해서 낙후되어 있어서 중요한 제품의 설계를 국내 독자적으로 실행하는 것이 드물고 주로 해외의 설계를 의뢰하거나 또는 일부 수정을 하고 있다. 이 경우 단순히 제품의 기능과 구조만 고려하여서 국내 제조공정의 개선과 조건 최적화로서는

경쟁력있는 주단조품의 제조에는 한계가 있다.

1) 기본적으로 주물설계의 기본원리는 동일하게 적용된다.

-주조응력의 최소화(균열방지), 기계적강도와 내구성을 위한 강도설계 지향성응고 방안(박육부를 통한 후육부 유입불가, 가능한 단면은 압탕부로 평형되게, 고립 hot spot 회피), 유동을 고려한 설계, 원가절감 방향

2) 용탕단조시에 고려사항들

-압탕부가 최종응고가 되도록 탕구, bisquit, runner방안 선정

-용탕이 금형 충전시 회전되어 주물내부로 초탕이 들지 않게 하고, overflow부로 효과적 제

표 7. 자동차분야에서의 대표적인 용탕단조 실용화 제품들

품 명	재 질	요 구 성 능	이 전 공 법	주조장치
Wheel	AC4C	경향화고강도, 열처리 다양한설계	저압주조 중력주조 단조	VSC 1500T, VSC 1800T
Knuckle	AC4C	경량화, 열처리	주철	VSC 630T
Brake caliper	AC4C	고강도, 경량화, 내압	주철, 중력주조	HVSC 350T
Piston(FRM)	AC8A	경량화, 고강도	단조, 중력주조, 주철	VSC 800T
Crank arm	AC1B	고강도, 열처리, anodizing	주단조, 단조 중력주조	HVSC 350T
Pump cover	ADC12	내압	다이케스트+합침	HVSC 350T
Bearing cover	ADC12	불량을 감소	다이케스트	HVSC 350T
Puel pipe	AC4C	기밀, 공정생략	중력주조+파이프용접	HVSC 350T
Brake cylinder	AC2B	내압	중력주조, 단조, 주단조	HVSC 350T
ABS	AC4C	열처리, 내압	압출, 중력주조, 충류다이케스트	"
Frame lug	AC4C	열처리	철제품	"
Shift fork	A390	내마모, 공정생략	단조, 다이케스트 합침	HVSC 350T
Power steering	ADC12	기밀, 고강도	중력주조, 다이케스트 합침	VSC 315T
Toe control hub	AC1B	경량 고강도 열처리	주철	VSC 630T
Cross member	AC4C	경량, 고성능, 배치 유연성	용접철판제	VSC 1800T
Aircon rotor	ADC12	내마모	단조, 다이케스트 합침	HVSC 350T
Aircon scroll	B390	내압, 기밀	중력주조, 다이케스트 이차가압	HVSC 350T
Engine block (FRM)	ADC12	고강도, 열처리, 주조 복합화, 사중자, 정밀	저압주조, 다이케스트, 중력주조	VSC 2000T HVSC 2300T
Con rod (FRM)	AC4C	고강도, 복합재, 경량	주강	VSC 315T
Handle support	AC4C	고강도, 인성, 열처리	중력주조 단조 주강	HVSC 350T



거가 되게 한다.

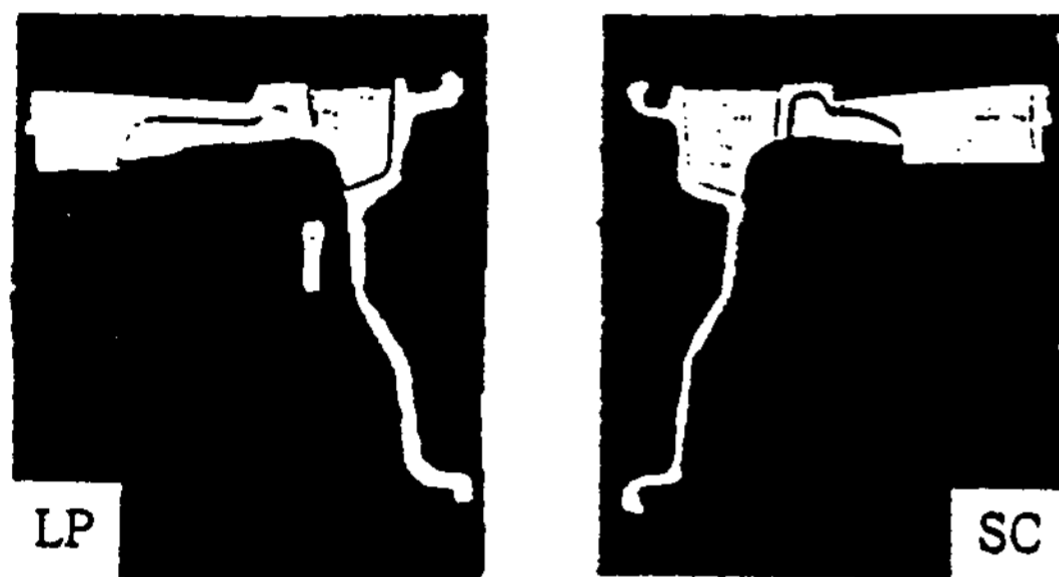
- 응고층의 주물내 유입방지용 응고층포집부를 탕도에 설정한다.

- 급격한 주물두께변화나, 복잡형상은 억제한다.

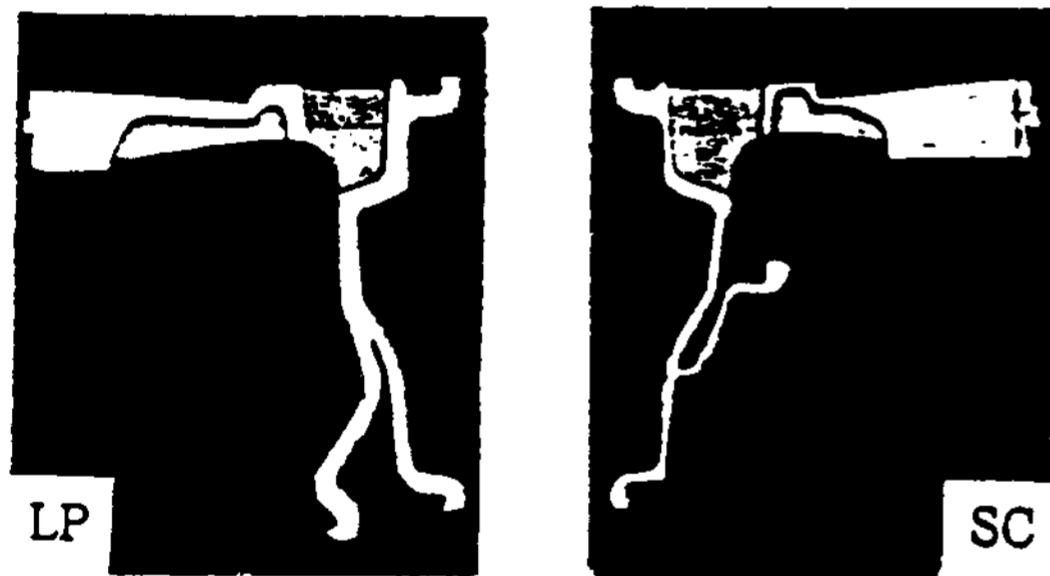
- 용탕단조 공정과 주물의 특성에 맞게 구조와 기능을 분석설계한다.

- 2차가압, 중자도입, 특수표면처리 등의 요건에 대응한 설계를 한다.

그림 6은 자동차용 휠을 기존의 저압주조품에 대해서 용탕단조제조시에 강도와 전전성을 고려



1. Thinner Wail(20% Weight Reduction)



2. Higher Ductility(More Safe)

그림 6. 저압주조(LP)와 용탕단조(CC) 제조 자동차용 휠의 비교

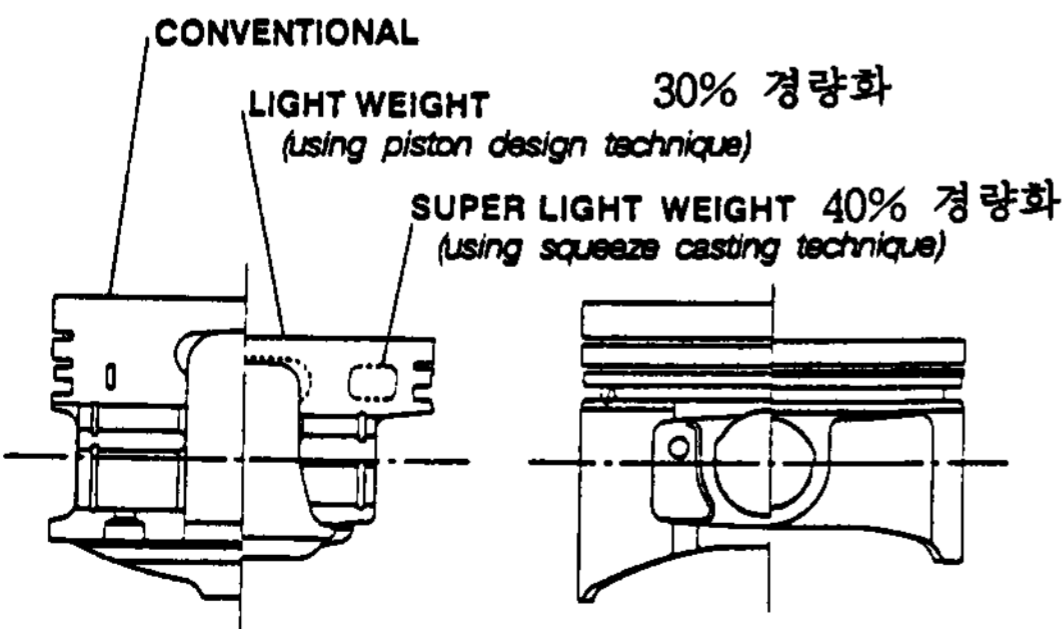


그림 7. 용탕단조기술을 이용한 초경량 자동차엔진 피스톤 개발

하여 재설계한 경우 20%의 경량화와 연성으로 복잡형상화를 기할수 있어 용탕단조효과를 극대화한 것을 보여주고 있다. 그림 7는 엔진피스톤에서 용탕단조기술을 도입함으로 조직의 미세화로 인한 피로강도 내구성 향상, 제거가능한 염증자를 이용한 중공형성, 분할코어를 이용한 두께 감소등으로 최대 40%의 경량화를 기할수 있게 된 예로서 각각 용탕단조 특성을 최대한 이용한 좋은 실례이다[17].

### 3.3 적절한 합금 소재 사용

제조하고자 하는 주물의 기능과 특성에 맞게 소재선정이 주물설계에서 중요하다. 용탕단조에는 비주조용 소재도 사용이 가능하나 주조성이 낮아서 결함발생이 용이하여 보다 엄밀한 공정관리 및 주조방안의 검토가 요구된다. 아울러 용탕단조에서 기존의 공업용합금과 달리 보다 고강도와 고품질을 가지는 용탕단조용 합금의 연구 개발이 시도되고 있다. 표 8은 개발 및 보고되고 있는 용탕단조합금들의 종류와 기계적성질들을 나타낸 것이다. 이들은 기존 주조재의 강도와 인성 한계를 능가하거나 조직적으로 보다 우수한 소재들로서 가능성을 보이고 있다.

### 3.4 효과적인 용탕단조품 제조 신기술들[18]

#### 1) 국부가압용 Feed back control

국부가압은 일차가압으로 충분히 건전주물을 얻기 어려운 경우 수축공이 생기는 hot spot부를 보상하는데 효과적으로 이용된다. 국부가압방식에는 기존의 timer방식보다 servo제어 feed back control이 정해진 가압profile을 재현하는데 효과적이다. 국부가압은 수축공의 제어뿐 아니라 200MPa이상의 고압에 의해서 주물전체 품질 향상을 가져오고 유효 투영면적이 감소하고 flash가 감소한다.

#### 2) 사출제어 시스템

용탕단조는 0.01-0.2m/s의 저속충진으로 금형내 용탕유동이 안정되고, 가스혼입이 적게 된다. 그러나 고속충진은 조기응고를 가져와 주탕결함을 발생시킨다. 따라서 주물에 따라 사출속도의 제어가 중요하고 공기혼입의 위험이 적은 한 고속사출이 요구된다. 각종 사출속도제어 방식이 보고되는데 UBE는 전자제어로 6단계제어를 임

의로 설정하는 DDV 시스템을 사용하고 있고 그림 8은 다이캐스트와 용탕단조시의 사출곡선의 특성을 잘 나타내고 있다. 즉 저속 다단 변속의 가압충진이 용탕단조에서 전전주물제조에 필요함을 알수 있다. 한편 Buhler는 수평사출장치에서 그림 9에 나타난 사출시스템을 이용하여 용탕단조기능을 갖는 주조기를 개발하고 있다[19].

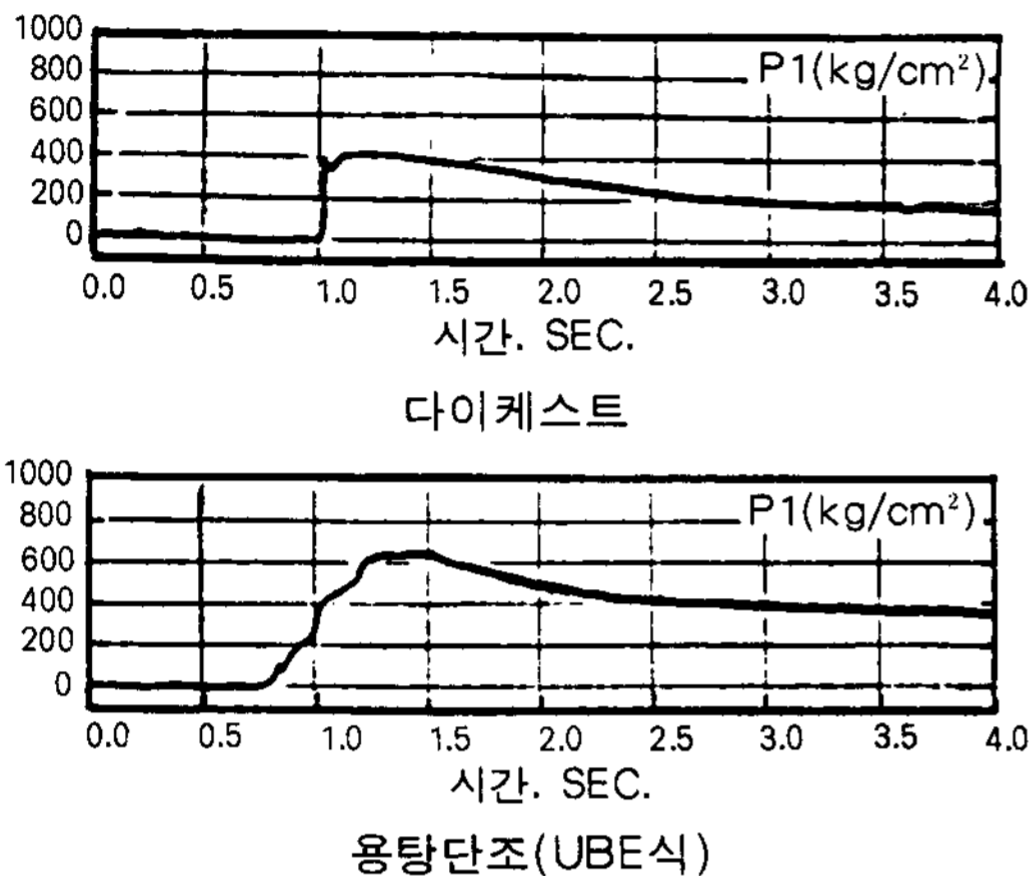


그림 8. 사출플런저의 cavity내 압력전달거동

이 경우도 용탕충진시에 공기혼입을 억제하고 효과적인 충전과 응고가압력을 유지하게 하는 데 본질이 있다. 이들 방식들은 사출 profile을 효과적으로 재현하도록 전자, PC제어를 하여 milli-second반응을 하게 한다.

3) 고온 사출슬리브

사출슬리브표면에서 응고층이 두꺼워지면 사출스토로그 끝에 저항요소가 되고, 분리된 응고층조각이 주물에 유입되어 연성을 크게 악화시키므로 고온슬리브는 이러한 응고층을 줄이는데 600K로 관리를 한다.

4) 분말성 윤활재 및 이형제

용탕단조용 이형 윤활제로 흑연계가 먼저 이용되었고 근래에 백색 이형제가 사용되고 있으나 미세분말을 이형재로 개발되어 주목을 받고 있다. 이 이형제는 정전기방식으로 금형과 슬리브에 분무되며 다공성으로 기존 흑연계 이형제에 비해 열전달이 1/3 수준으로 단열상태를 가져 용탕의 응고가 지연되고 유동성을 개선하고, 용탕가압시에 금형과 밀착되어 열전달이 개선되어 급냉응고가 진행되어 용탕단조효과는 유지되는

표 8. 개발되거나 연구중인 용탕단조용 알루미늄합금종류

개발처	합금	시스템	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)	비고
GKN	SF1	Al-4Zn-2Mg	385	335	10	[15]
Hi-Tech	HTM1	Mg-12Al-Cu,Si,Ca	239	201	1.0	GB2196986 피로creep
UBE		Al-7Si-3Cu-Mg,Sr				DE3632609A 열처리단축
Mitsubishi		Al-7Si-3Cu-Mg,Ti				特開昭58-58 244편석감소
KIST	AS1	Al-12Si-Cu-Mg	426	377	1.8	
	AC1	Al-Cu-Mg,Si	460	453	2.0	
	AM3	Al-Mg-Si-Cu	389	315	7.8	
	AM5	Al-Cu,Mg,Si,Ag	506	402	4.7	

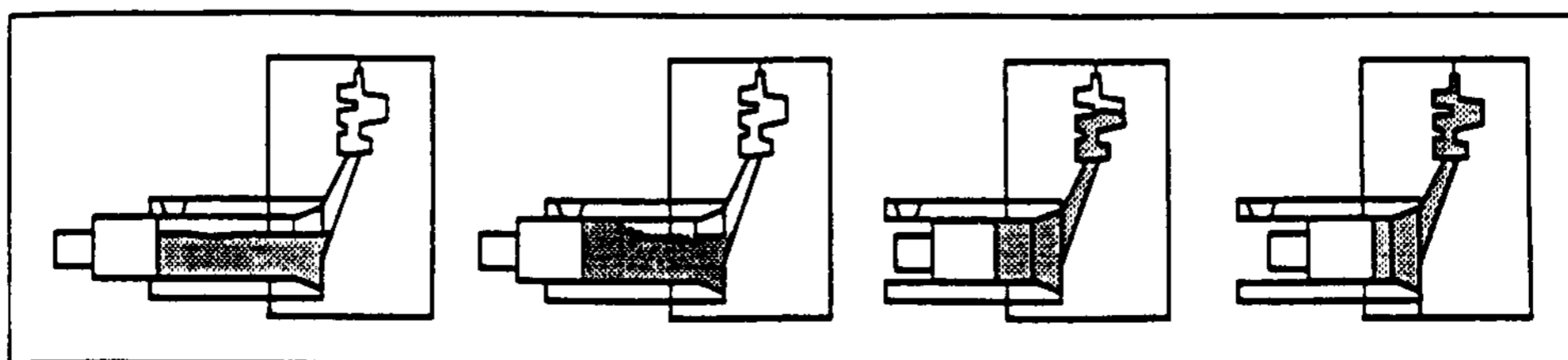


그림 9. Bulher식 용탕단조시 사출슬리브내 용탕속도 거동

특징이 있다.

5) 밀면tap ladling시스템

최근 세라믹기술의 진전으로 열충격성이 뛰어난 제품이 개발되어서 이것을 이용한 주탕ladle을 제조하고 그림 10과 같이 용탕을 사출슬리브에 안정 주입함으로써 산화를 크게 억제 및 보호하는 효과가 얻어진다.

6) 보호분위기 주탕 시스템

사출슬리브에 용탕을 이송시 기존 용탕단조시에는 대기에 노출이 되지만 저압주조같이 공압이나 진공흡입, 전자주탕방식에서는 용탕의 온도유지, 산화억제, 품질관리가 효과적이므로 이를 도입한 용탕단조기가 개발되고 있다.

4. 경량금속주물의 용탕단조 개발 사례분석

4.1 브레이크 마스터 실린더

이 주물은 AC4C(A357)합금으로 중력주조되고 있는 것으로서 용탕단조법으로 고강도, 고품질, 가공성 향상, 양품을 개선 등의 효과를 보인 경우이다.

그림 11은 용탕단조한 브레이크 마스터실린더 시제품의 주조상태를 보여주고 있다. 이 주물의 용탕단조시제에는 1차로 그림 5의 초기 간접가압식의 주조기에서 1cavity로 추진하였고 여기서 제조된 주조품의 조직과 기계적성질을 분석한 결과 표 9로 나타났다. 용탕단조재의 조직 미세화와 양호한 기계적성질이 확인되었으며, 부가적으로 절삭가공성이 우수하여 가공속도 향상 공구수명증가, 표면조도 향상의 효과가 있고 불량율이 낮아서 생산성의 향상이 전체적인 제조면에서 유리하게 기여하였다. 또한 열처리조건면에서 제품규격에 비해서 빠른 열처리효과를 보여서 용체화 시간단축의 가능성이 확인되었다. 양산화방식으로는 UBE식 tilting 하부사출sleeve를 도입한 HVSC350T에서 2cavity금형으로 실시하였는데

표 9. Al 브레이크 마스터 실린더주물의 특성비교

주 조 공 정	인장강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	항복강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	HB	DAS (μm)
용 탕 단 조	36.1	32	6.2	115	30
중력주조	국 산	32.6	-	106	45
	외 산	35.8	-	98	50
규 격	25 ↑	18 ↑	2.5 ↑	100 ↑	

여기서 주물내부 후육부의 주조결함을 제거하는 금형 주조방안의 분석이 주요 관건이 되었다.

4.2 자동차용 FRM 엔진피스톤

용탕단조로 디젤용 FRM 엔진피스톤의 개발을 수행하였었다. 그림 12는 UBE HVSC350T로 시제한 FRM 피스톤의 수직단면조직이다. 이 디젤 피스톤은 직경이 100mm로서 매우 두께가 있는 주조품이다. 이 경우 FRM용 preform은 OD 102,

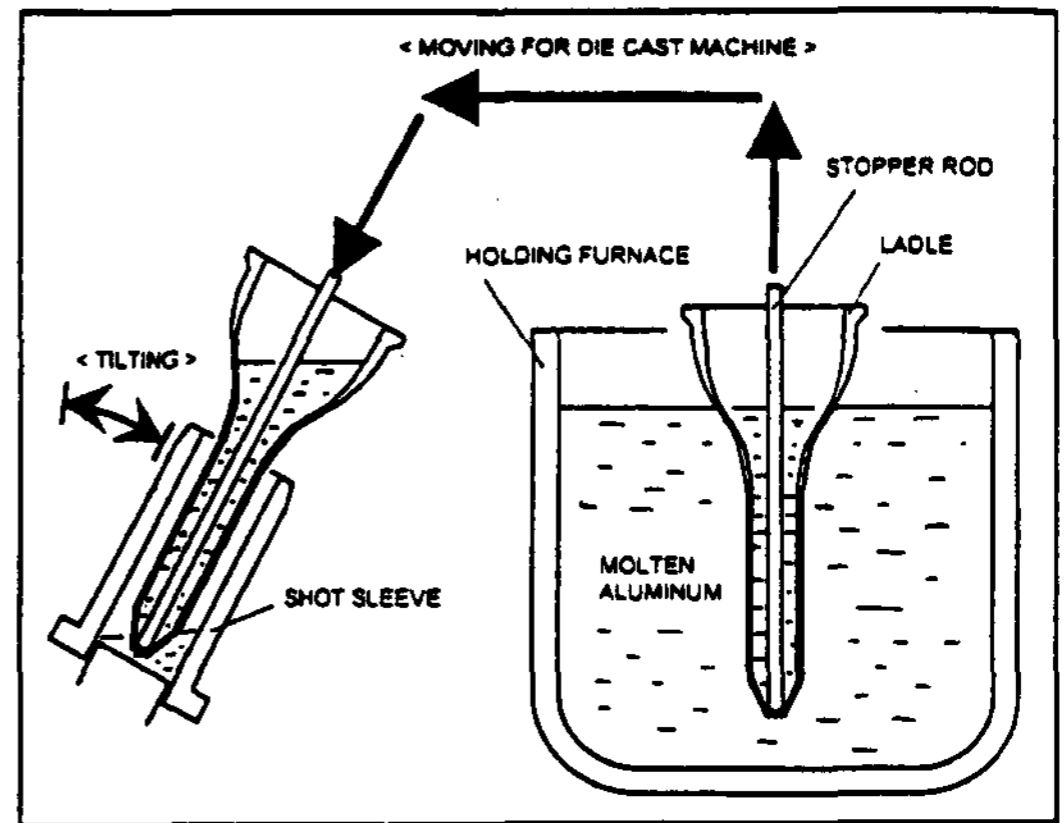


그림 10. TF(Turbulent Free) ladle 시스템의 개략도

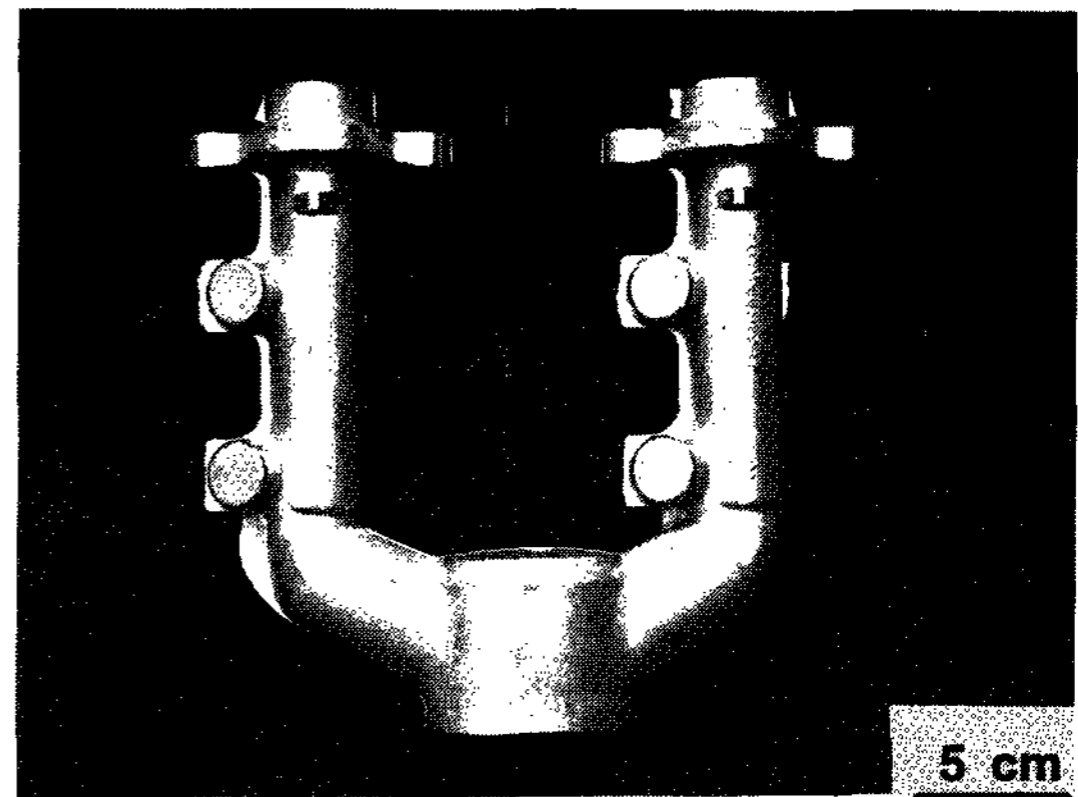


그림 11. 용탕단조 시제한 Al brake master cylinder

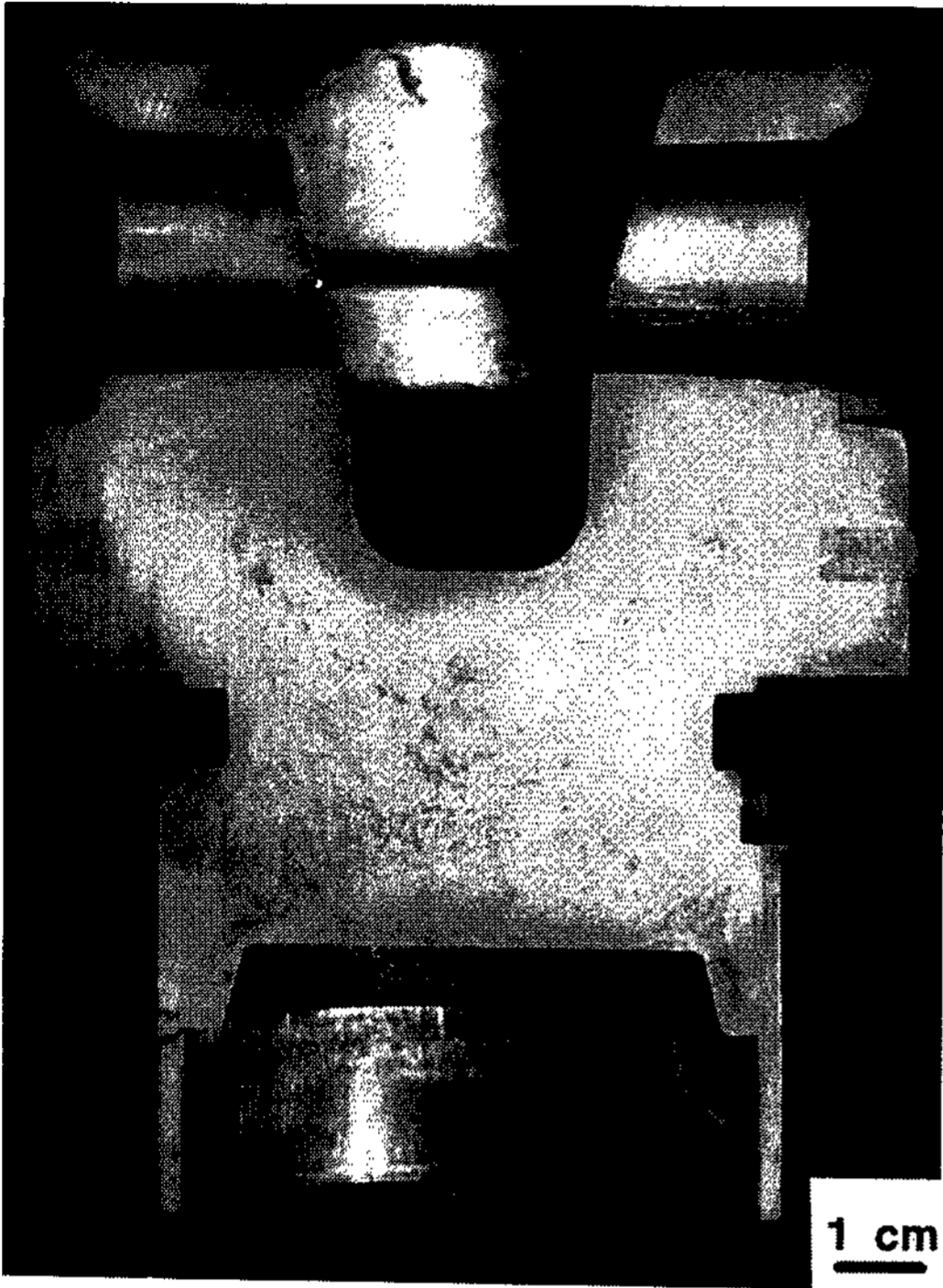


그림 12. 용탕단조 시제한 FRM 디젤엔진 피스톤의 단면조직

ID 79 H6mm로서 Saffil(7%), Kaowool(5%) 2종류로서 사용하였고 강제strut를 삽입하고 있다. 본 디젤용 FRM피스톤의 개발에서 중요한 관건은 안정된 탕구, 탕도 방안의 확립과 건전한 FRM조직이 얻어지는 최적 주조조건의 결정이었다.

1) 탕구방안-지향성응고와 용탕가압효과를 효과적으로 가지게 탕구 크기와 모양, 탕도의 길이 및 bisquit부 크기와 길이 등을 시행오차와 응고 거동을 분석하여 확립하였다.

2) 건전한 FRM충진-상온과 500℃ 예열한 preform들로 용탕단조 시제한 경우 용탕량이 충분하고 충전거리가 짧아서 상온에서도 안정된 충진이 되었고, preform의 변형은 kaowool에서는 거의 없었으나 saffil은 압축변형이 용탕충진방향으로 발생하였다.

#### 4.3 에어컨용 V5콤프레서 실린더

이 제품은 B390 과공정 합금으로 다이캐스트 제조되는 것을 용탕단조로 개발한 것으로서 그림 13은 용탕단조 주물의 모습이다. 이경우도 적정

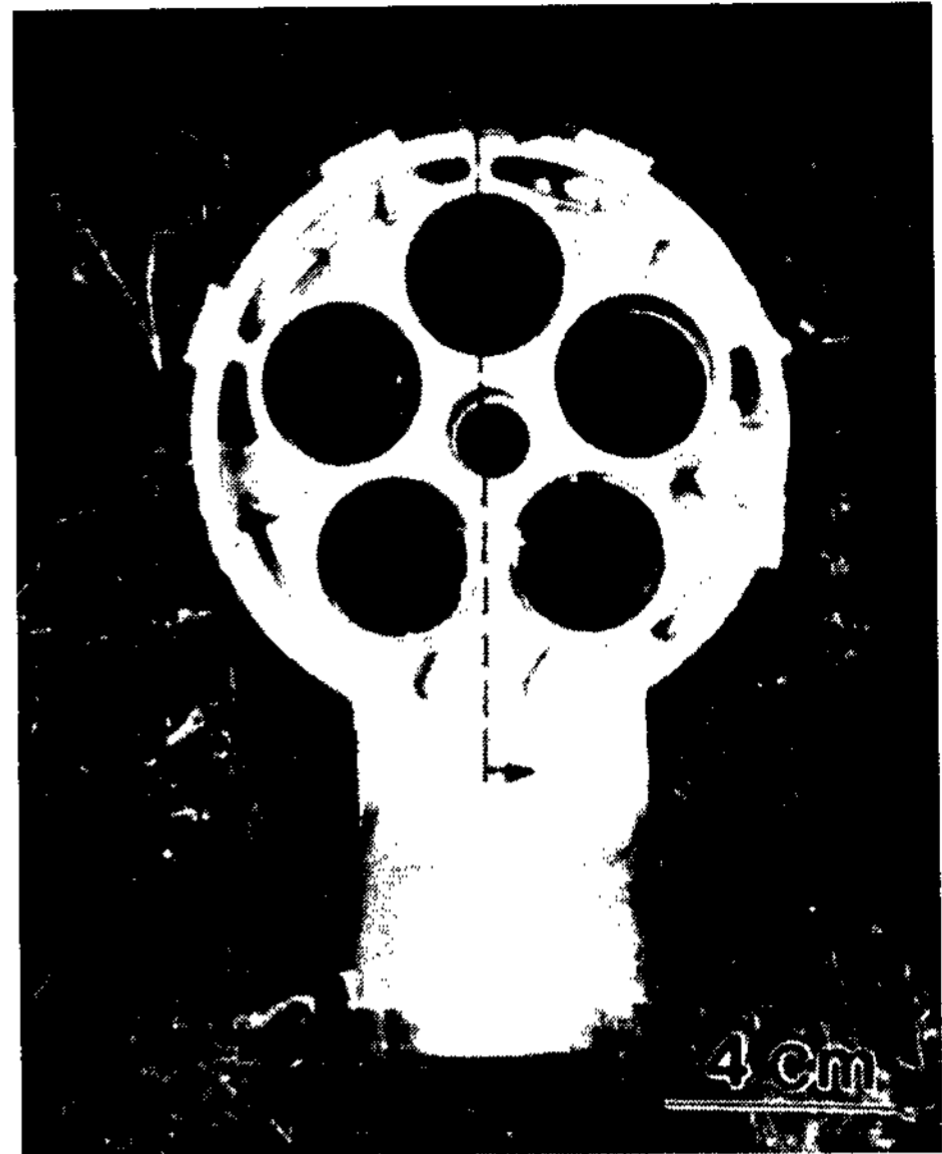


그림 13. UBE용탕단조기로 시제한 에어컨용 V5콤프레서 실린더

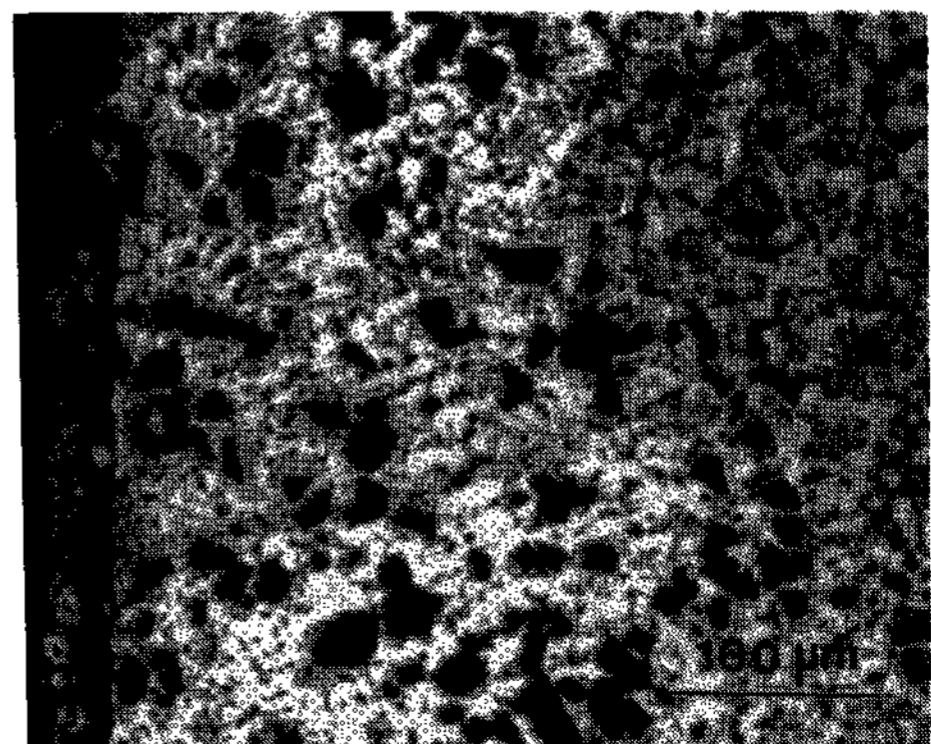
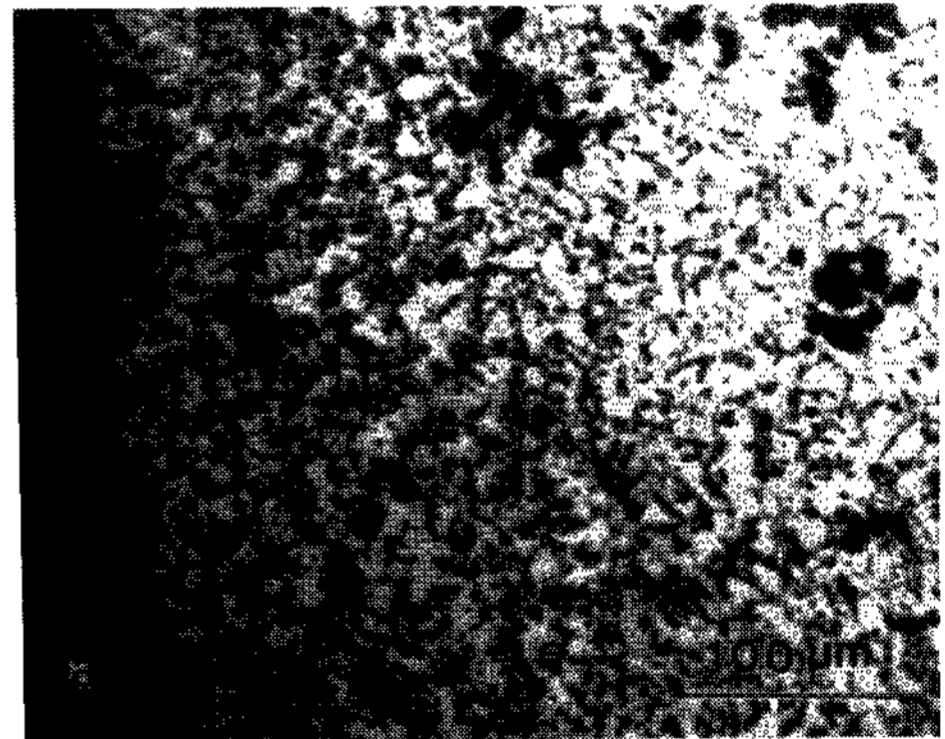


그림 14. 제조공정에 따른 B390합금제 에어컨 실린더의 표면응고조직 (a) 다이캐스트 (b) 용탕단조

한 탕구방안의 확립이 건전 시제품제조에 중요한 요소이었으며 특히 후속부에서 주조결함을 다이캐스트는 2차가압 및 함침처리로서 보완하고 있으나 용탕단조는 탕구방안의 최적화로서 양품제조가 가능하였다. 시제품의 응고조직은 용탕단조가 보다 초정 Si의 미세 균일분산이 되었고 그 결과 다이아몬드 경면가공성이 현저히 개선되고 표면조도나 공구수명에 효과가 있었다. 또한 그림 14에 나타나 있듯이 다이캐스트 주물은 표면에 초정 Si depletion이 발생하나 용탕단조에서는 표면에서도 초정이 균일 분포하여 near net shape 제조의 가능성을 보였다[20].

### 5. 결 론

신 고압주조법으로서 용탕단조법에 대한 국내외적인 관심과 개발의 열기가 높아지는 현실에서 문헌적으로 매우 탁월한 주조법으로서 보고되고 있는 내용을 전반적으로 살펴보았고 실제 다양한 공업화를 추진한 사례를 몇가지 검토하여 보았다. 여기서 본 주조법이 분명히 고품질 기능성 주물의 제조에 효과적인 제조법임을 알수 있으나 국내 토착화를 위해서는 먼저 기초 원리의 숙지와 독자적이면서 적절한 장치개발 및 사용, 적정 소재 선정, 용탕단조에 적합한 주물설계, 연구개발결과의 상호 교류와 협력이 중요하다.

### 참 고 문 헌

[ 1 ] 松井光次 : Materia Japan, 第33卷 第9號 (1994) 1119  
 [ 2 ] J. R. Franklin and A. A. Das : The British Foundryman, Vol 77,(7) (1984) 19  
 [ 3 ] 李浩仁 : 大韓金屬學會會報, 제9권 제2호 (1996) 89  
 [ 4 ] 韓堯燮, 金基培, 金容俊 : 大韓金屬學會會

報, 제9권 제2호(1996) 126  
 [ 5 ] 貫名正彦 狹原俊南 : 素形材, '89. 5.(1989) 8  
 [ 6 ] 檀浦貞行, 板村正行, 松井勝彦 : 素形材, '91. 3.(1991) 8  
 [ 7 ] 鈴木鎮夫 : 日本金屬學會會報, 第10卷 (1971) 464  
 [ 8 ] 김진수, 안재영, 한요섭, 이호인, 홍준표 : 韓國鑄造工學會誌, 第14卷 第3號 (1994) 248  
 [ 9 ] 松原弘美 : Alutopia, (1994.4) 11  
 [10] 安達充, 和久芳春, 岩井英樹, 西正, 吉田淳 : 輕金屬, 第38卷 第7號 (1989) 487  
 [11] 藤井則久, 藤井滿, 森本庄吾, 岡田千里 : 鑄物, 第56卷 第7號 (1984) 387  
 [12] 石丸博, 金子純一, 菅又信 : 輕金屬, 第31卷 第11號 (1981) 712  
 [13] 鈴木鎮夫, 後藤 夫, 片岡義典, 大福根康夫 : 住友輕金屬技報, 第27卷 第2號 (1986) 32  
 [14] G. A. Chadwick and T. M. Yue : Metals and Materials, Jan (1989) 6  
 [15] J. R. Morton : Metallurgia, Aug (1994) 277  
 [16] M. P. Martin : Die casting Engineer, Sep. (1996) 28  
 [17] M. Sasaki, M. Sasaki, Y. Nishimura and E. Okamura : SAE Transaction, 910434 (1991) 614  
 [18] T. Sakamoto : The 3rd Int. Conf. on SSP of alloys and composites, (1994.6) 137  
 [19] K. P. Young and K. Brissing : Die Casting Engineer, May(1996) 12  
 [20] 한요섭, 이호인, 김성수, 김정식 : 한국주조 공학회지 제13권 제3호 (1993.6) 259