

차량 부품용 Al 합금 분말의 제조 및 분말 압출

본고는 일본 스미토모 전기의 K. Akechi 박사가 최근 자신을 주저자로 발표했던 일련의 논문중 일부를 Akechi 박사의 허가하에 당학회에서 편집·정리한 것이다

(삼성자동차, 석명진 박사)

급냉응고 Al 합금 분말을 원료로 하여 분말압출 및 분말단조 등의 방법에 의해 최종형태로 성형하는, 저열팽창율, 고강도, 내마모성의 새로운 알루미늄 합금이 일본 스미토모 전기에 의해 개발되어 이미 1980년대에 양산 실용화되고 있다. 스미토모 전기는 이 합금분말을 SUMI Al-TOUGH라는 상표로 시판하고 있는데, 본 내용은 이 알루미늄 합금 분말의 제조 그리고 분말압출 방법에 의한 자동차 부품의 개발에 관하여 기술한 것이다.

1. 분말압출 알루미늄 회전자(ROTOR)의 개발

1.1. 서론

자동차 중량감소에 대한 필요성은 계속 증대되고 있다. 중량감소의 한 방편으로써 차량용 에어컨의 콤프레셔 제조업자들은 주요 부품에 사용되고 있는 철계 재료를 알루미늄 합금으로 대체해 왔다. 특히 알루미늄 합금은 회전날개(vane)(그림 1)에 널리 사용되어 왔다. 그러나 강 및 주철로 제조되어 왔던 회전자(rotor)(혹은 실린더, 측면판) 등에 사용되기 위한 알루미늄 합금의 개발은 "알루미늄 콤프레셔"의 개발에 대한 걸림돌이 되어 왔는데 이는 알루미늄 합금 회전자가 다음의 요구 조건을 충족시켜야 했기 때문이다.

- 1) 강에 상응하는 강도
- 2) 회전날개 및 측면판과의 마멸을 극복하기 위한

충분한 내마모성

3) 효율적인 작동에 요구되는 높은 정밀도를 유지하기 위한 저열팽창 계수

그러나, 이러한 요구조건을 만족시킬 만한 알루미늄 합금을 주조나 압출과 같은 통상적인 ingot 야금학적인 기술로는 얻을 수 없다. 일본 스미토모 전기에서 개발된 새로운 합금인 SUMI Al TOUGH 217은 다량의 실리콘과 철을 함유한 급냉응고 알루미늄 합금 분말이다. 이 분말들은 고온 압출에 의해 상조건을 충족시키며 알루미늄 합금 분말 회전자 의 양산에 사용된다. 다음은 이 새로운 합금의 특성과 회전자의 생산 방법에 대한 것이다.

1.2. 생산방법

회전자의 생산에 사용되는 재료는 급냉응고된 분사 알루미늄 합금 분말이다. 분사 분말 제조시 냉각속도는 최소한 10^{-8} Ks^{-1} 이며 조성은 표 1에 나타나 있다. 종래의 ingot 야금학적인 합금의 경우 철의 첨가는 합금의 인성을 감퇴시켜 단지 불순물로 여겨졌으나 분말야금학적인 합금에 있어서는 내열성을 향상시킨다. 그림 2는 생산 공정의 개략도를 나타낸다.

분말은 냉간 등압압축(CIP)에 의해 빌렛 형태로 성형되는데 냉간 등압성형 빌렛의 기공도는 체적비로 약 30%이다. 주어진 온도, 시간, 분위기 하에서 가열된 후 이 빌렛 성형체는 압출된다. 압출공정은 두 가지 기능을 가지고 있다: 소성 변형에 의해 알루미늄 합금 분말의 표면 산화층의 파쇄를 일으키는 동시에, 분말을 상호 결합시켜 통상적인 가공 알루미늄 합금에서 처럼 진밀도를 갖는 최종 형태로 성형시킨다.

K. Akechi, T. Fujiwara, T. Hayashi and Y. Takeda, Sumitomo Electric Technical Review, Jan. 1991 (No. 31), 145; K. Akechi, T. Hayashi, K. Azotsu, T. Fujiwara and K. Ito, 住友電氣, No. 145(1994年 9月), 109.

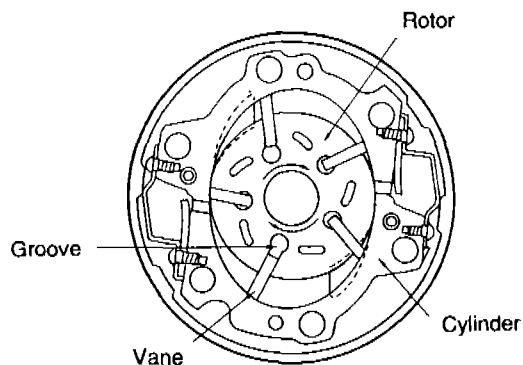


Fig. 1. Schematic diagram of vane type rotary compressor.



Fig. 4. Finished rotor.

Table 1. Compositions of SUMI Al-TOUGH 217

Elements	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Al
mass%	17.0	5.0	3.5	1.0	0.5	balance

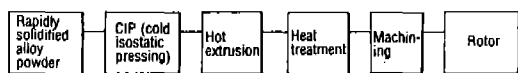


Fig. 2. Main production process.

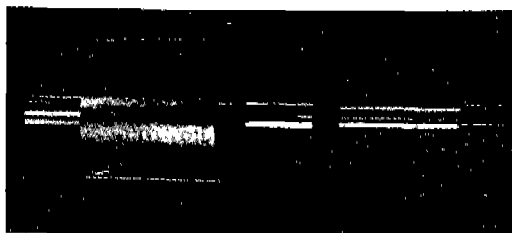


Fig. 5. Rotor with steel shaft.

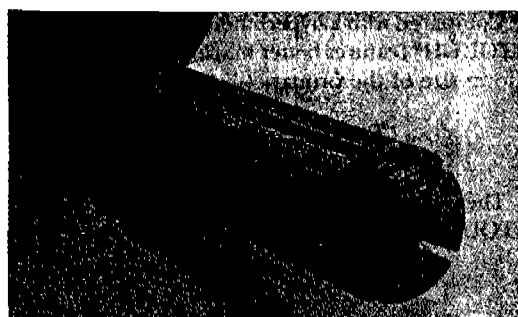


Fig. 3. Rotor shape extrude.

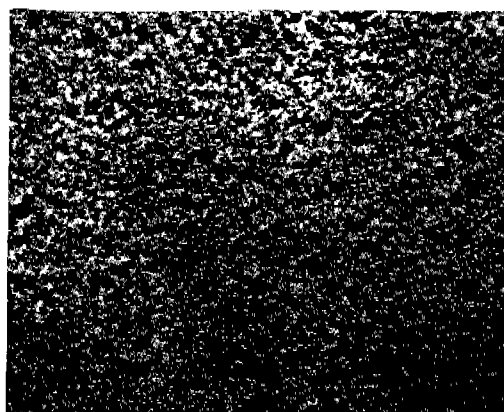


Fig. 6. Microstructures of SUMI Al-TOUGH 217.

종래의 ingot 야금학적인 알루미늄 합금에 비해 실리콘과 철을 함유하는 알루미늄 합금 분말은 고온 가공중 변형성이 매우 불량한데, 이는 경입자인 실리콘 혹은 Al_3Fe 같은 금속간 화합물의 함량이 높는데 기인한다. 이 재료는 따라서 압출 가공이 어렵게 되고 균열형성의 가능성이 높아진다. 따라서 종래의 ingot 야금학적인 처리와는 사뭇 다른 금형설계 및 압출조건이 요구되고 있다. 분말압출용으로 다이설

계를 수정하고 압출조건을 제어함으로써 양호한 치수 허용 한계를 갖는 vane groove를 최종 형상에 가깝게(near net shape) 압출하는데 성공하였으며(그림 3) 알루미늄 회전자의 양산을 이룩하였다. 압

Table 2. Properties of SUMI Al-TOUGH 217

	SUMI	Compared material*	
	Al-TOUGH 217 (T6)	Al-Si extruded alloy (4032TG)	Duralumina (2017T4)
Density (g/cm ³)	2.83	2.69	2.79
Coefficient of thermal expansion (×10 ⁻⁶ /°C) (KT-200°C)	17.2	20.2	23.8
Young's modulus (kgf/mm ²)	9,800	8,000	7,400
Tensile strength (L. direction) (kgf/mm ²) (KT)	46	38.5	44
(after 200°C×100H)	32	—	26**
Rotating bending (L. direction) fatigue strength (kgf/mm ²) (RT, 10 ⁷ cycles)	20.0	16.8	15.2
Rockwell hardness (B scale)	85~95	75***	67***

*Reference from "Aluminum Handbook" edited by Japan Light Metal Association, **Estimated value from 31 kgf/mm² after 10H and 21 kgf/mm² after 1000H. ***Estimated value from Brind hardness.

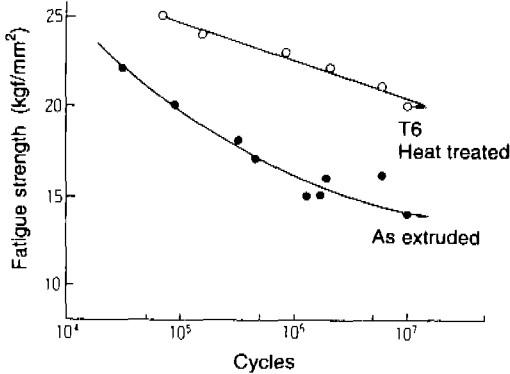


Fig. 7. Results on Ono's rotating bending fatigue test (Room temperature, 8 mm diameter of test piece without notch).

출재는 절단 및 열처리(T6) 공정, 절삭 과정을 거친 후 그림 4와 같은 최종제품으로 생산되었다. vane groove의 표면은 압출된 상태 그대로 남겨졌다. 콤투레서 제조자에 의해 회전자에 축이 삽입되고(그림 5) 마무리 연삭 공정을 거친후 회전자는 콤투레서에

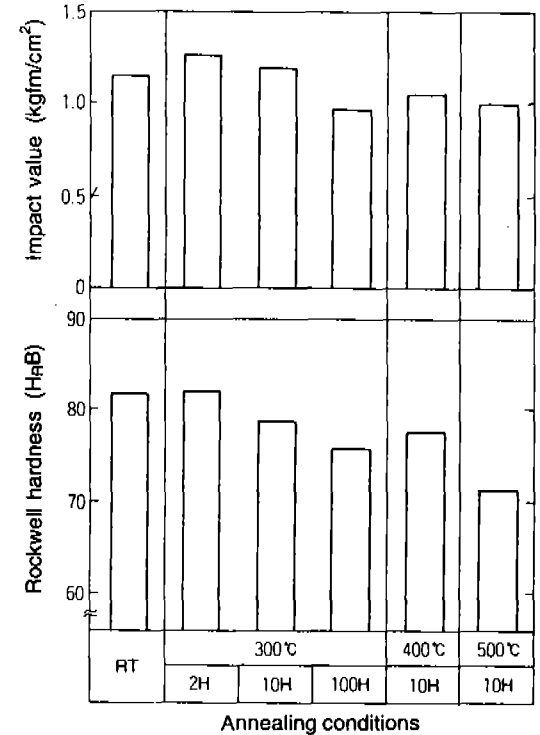
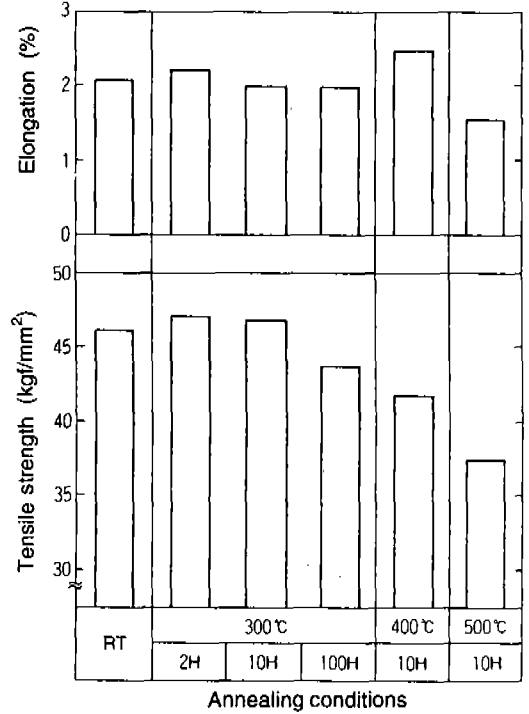
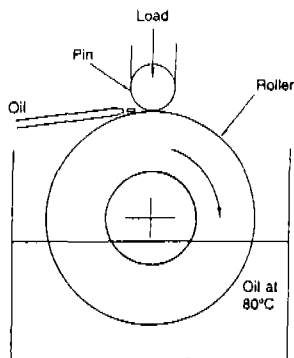


Fig. 8. Properties after annealing (As extruded longitudinal direction).



Condition No.	Load (kgf)	Rotation frequency (rpm)	Testing time (hours)	Length of wear (mm)
A	30	415	20	7.2×10^7
B	10	5,000	20	5.2×10^8

Fig. 9. Roller and pin type wear test.

고정된다.

과공정 Al-Si 주물용 합금에 비하여 SUMI AL-TOUGH는 균일한 크기의 초정 실리콘으로 인해 양호한 절삭성을 나타낸다(그림 6).

1.3. 재료의 특성

회전자용 SUMI AL-TOUGH 217의 물리적, 기계적 특성이 표 2에 열거되어 있다. Ingot 야금학적 재료에 비해 SUMI AL-TOUGH는 낮은 열팽창 계수, 높은 Young률, 고강도를 지닌다. 회전 굽힘 피로 시험(rotary bending fatigue test) 결과가 그림 7에 도시되어 있다. 열처리된 시편의 피로 강도는 20 kgf/mm²이었다. 그림 8은 여러 조건하에서 어닐링 처리 후의 압출재의 상온 특성을 나타낸다. 500°C에서 10시간 동안의 어닐링 처리는 기계적 특성에 실제적인 영향을 끼치지 못하였다. 회전자와 측면판, 실린더, 회전날개 등의 여러 가지 조합을 시뮬레이션하는 그림 9의 roller-pin 마모시험의 결과가 그림 10에 나타나 있는데 알루미늄 합금의 내마모성은 종래의 재료와 차이가 없음을 알 수 있다.

1.4. 결 론

SUMI AL-TOUGH 217 알루미늄 합금분말을 사용함으로써 회전자의 중량은 종래의 철계합금 회전자(0.7 kg)에 비해 0.3~0.4 kg 감소되어, 전 알루미늄

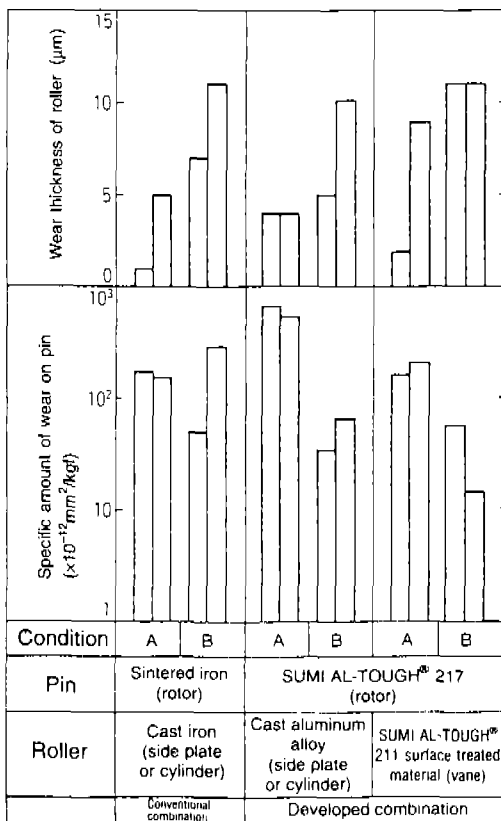


Fig. 10. Results on wear test between various combinations (SUMI AL TOUGH 211: Al-20%Si-5%Fe-3.5%Cu-1%Mg).

컴프레서를 제조하는데 SUMI AL-TOUGH 217 재료가 사용될 경우 약 2 kg의 중량절감 효과를 이루게 된다. 알루미늄 합금 분말재인 SUMI AL-TOUGH는 금속기지 복합재 뿐만 아니라 자동차 및 관련 분야에 매우 유망한 소재로 기대된다. 이들 분야에서 중량절감은 철계합금을 알루미늄 합금으로 대체함으로써 이루어지지만 요구되는 성질은 결코 종래의 ingot 야금학적 알루미늄 합금에 의해서는 얻어질 수 없다.

2. 분말압출에 의한 Al복합재 실린더 라이너의 제조

2.1. 이륜차엔진의 실린더 라이너에 요구되는 특성

이륜차 엔진 실린더 라이너에 요구되는 특성은 다음과 같다.

이륜차의 4사이클엔진에서는, 경량화를 위해 실린더 라이너만을 내마모성·내소착성이 양호한 주철재료 하고, 실린더 블럭 자체는 알루미늄 다이캐스팅으로 제조하는 방법이 일찍부터 채용되어 왔다. 이보다 더욱 진전되어, 실린더 라이너도 포함하여 전체가 Al화된 엔진의 제조가 이루어지고 있는데, 이는 다음과 같은 이유 때문이다.

1) 엔진 성능향상: 열전도성이 양호한 알루미늄 라이너에 의해 실린더 주위의 열분포가 일정하게 되며, 유지된 열에 의해 엔진의 출력 저하가 방지 되고, 더욱이 고압축비를 가능케 함.

2) 경량화: 종래의 주철 라이너에 비해 약 20%의 경량화를 이룸

전 알루미늄화의 수단으로서, 고Si의 알루미늄 주조합금(A390)에 의한 것과 도금 등의 표면처리를 실시한 것 등이 있다. 그러나 전자의 경우 내마모성을 높이기 위해 에칭에 의해 초정 Si입자를 표면에 드러나게 해야 하며 오일 유지성을 높이기 위해, 또한 내소착성 향상을 위해 피스톤축에 철 도금이 필요하다. 후자의 경우 도금면(SiC 입자분산, Ni 복합도금 및 Cr도금)의 결합 방지를 위해 다이캐스팅법이 사용될 수 없고 생산성이 좋지 않은 중력 금형주조법 등 외에는 대안이 없다는 제약이 있다.

전술한 과제를 해결하기 위해, 알루미늄 합금제 실린더 라이너에는 다음과 같은 5가지의 특성이 요구되고 있다.

- 1) 내마모성: 에칭 등의 특별 처리가 불필요
- 2) 내소착성: 피스톤 표면의 도금이 불필요
- 3) 내열성: 주입시 알루미늄 용탕으로부터 열을 받아도 기지의 경도가 저하하지 않음
- 4) 기계가공성: 주철 라이너와 동등한 가공 속도
- 5) 강도와 인성: 주조시의 압력에 전달수 있는 강도와 인성

2.2. 재 료

2.2.1. 기 지

기지 금속으로는 $10^2 \sim 10^3$ K/s 이상의 냉각속도로 급냉응고시킨, 전술한 Al-Si-Fe계 합금분(분사분)을 이용하였다(표 1).

기지 금속의 성분에는 내마모성을 나타내는 Si가 17wt% 함유되어 있다. 초정 Si의 크기는 냉각속도에 의존하는데, 수 μm 정도로 미세하고 균일하다. 이에

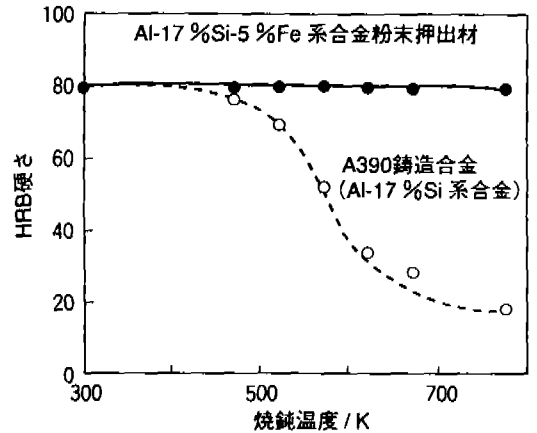


Fig. 11. Influence of annealing temperature on hardness (annealed for 1 h).

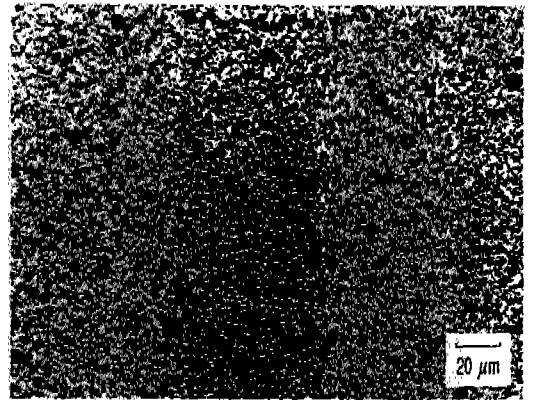


Fig. 12. Microstructure of cylinder liner (spherical particles; Al_2O_3 , grey particles; Si) (Up-down direction; extrusion direction).

반하여, 유사한 Si함량의 A390 주조합금에서는 냉각속도가 1 K/s로 늦기 때문에 초정 Si가 수십 μm 로 조대하고 불균일하며, 편석이 일어나기 때문에 Si입자의 파쇄에 따른 내마모성의 악화가 일어난다. 내열성을 높이기 위한 목적으로 Fe가 5wt% 첨가되고 있고, 실린더 블럭으로 주조할 경우에 라이너 온도가 625~675 K로서 경도 저하가 방지된다. 첨가된 Fe는 Al, Si와 결합하여 열적으로 안정한, 경한 금속간 화합물 등으로 되는데, 이 금속간 화합물과 Si입자에 의해 기지의 경도가 유지될 수 있다. 열처리에 의해 경화가 이루어진 것은 아니므로 고온에서 사용되어도 경도저하는 일어나지 않는다. 그림 11은 각 온도에서 1시간 소둔시킨 후의 경도를 나타내고 있는데, 분말압출재는 770 K까지 경도가 저하되지 않는

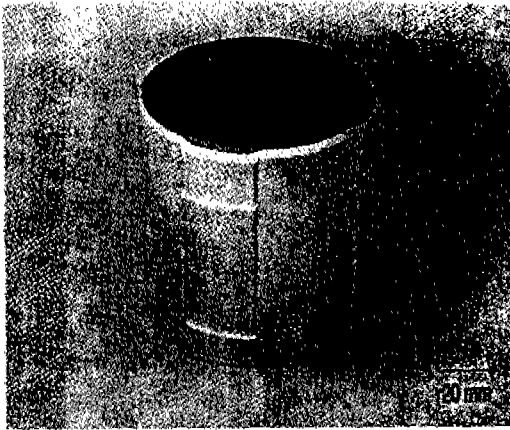
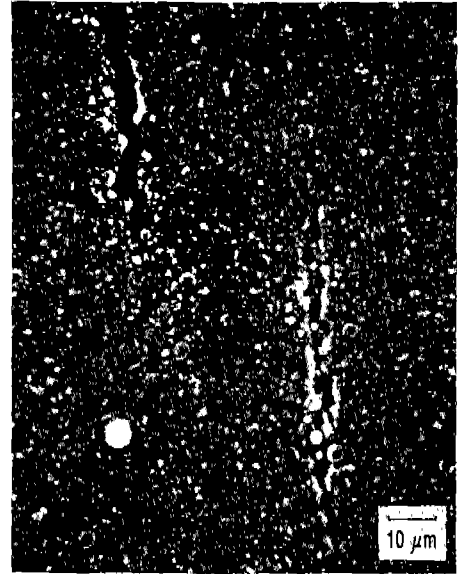


Fig. 13. Al composite cylinder liner (inner black surface; particle dispersed composites, outer surface; 6061 alloy).



산소의 X선 image

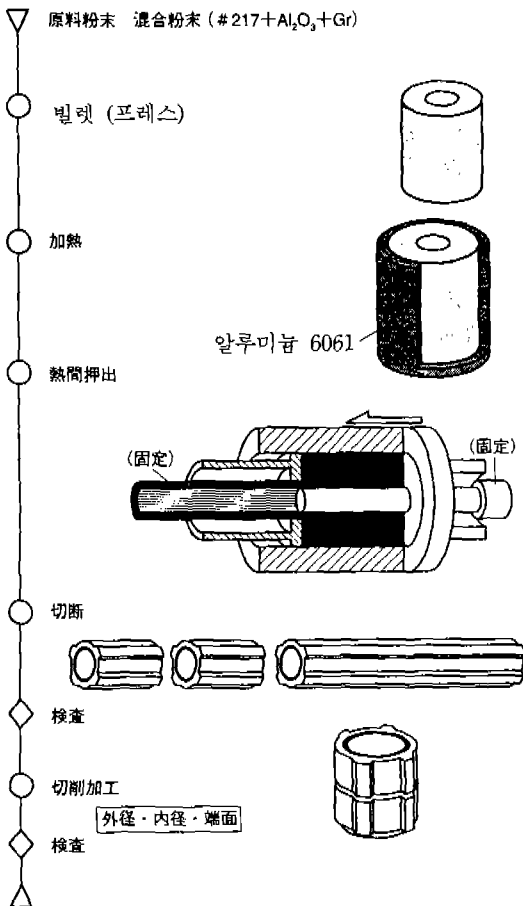


Fig. 14. Schematic diagram for fabrication process of cylinder liner.

다.

2.2.2. 분산 입자

첨가된 알루미늄 입자와 흑연분의 크기·형상·혼합비율을 표 3에 표시하였다.

알루미늄 입자의 첨가는, 경계윤활조건하에서 내마모성을 향상시키기 위한 것이다.

경질입자인 알루미늄 입자 첨가에 따라 피스톤재(알루미늄합금)에 대한 내소착성이 상승하기는 하지

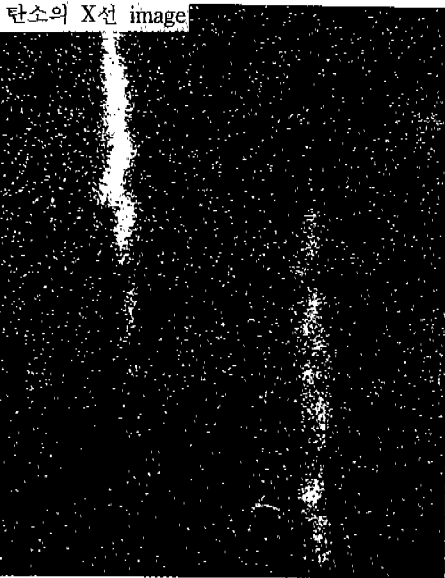


Fig. 15. SEM micrograph and x-ray image of the polished surface of Al composites (Up-down direction: extrusion direction).

Table 3. Powder characteristics and compositions of powders used for cylinder liner

	Powder	Size	Shape	Composition
Dispersed particle	alumina,	3 μm	spherical	3.0~5.0 wt%
	graphite	2~3 μm	flake	0.5~3.0 wt%
Matrix	RSP Al alloy powder	≤300 μm (≤44 μm ~50%)	tear droplet	bal.

만, 그것에 더해서 자기유회의 흑연분이 첨가된 것은 더욱 내소착성을 향상시키기 위함이다. 특히 알루미늄간의 금속접촉이 생기는 초기단계(고하중시)에 흑연첨가의 효과가 크고, 종래의 A390합금 라이너와 철 도금피스톤의 조합의 경우와 동일한 수준의 내소착성을 지닌다. 한편, 흑연량이 증가하면 압출성이 악화되고, 압출재표면에 균열 등이 생기기 쉬우므로 내소착성 향상의 효과와 함께 압출시의 생산성 및 품질도 고려하여 흑연양은 0.5~3.0 wt%로 한다.

2.2.3. 조 직

알루미늄과 흑연을 입자 분산시킨 알루미늄합금 분말 압출재의 금속조직을 그림 12에 나타냈다. Al-Si-Fe계 합금부분의 조직은 금냉응고합금 분말을 원료로 이용하고 있기 때문에 Si 결정과 금속간화

합물이 미세하고 균일하게 분포하고 있다.

2.2.4. 전신 알루미늄 합금과의 이층구조

피스톤이 들어가는 실린더 라이너의 내측은, 알루미늄 입자와 흑연을 포함한 입자 분산형 알루미늄 복합재료이다. 엔진 블럭을 주조할 때에 알루미늄 합금 용탕과 접촉하는 실린더 라이너의 외측은 전신 알루미늄 합금 6061이다(그림 13). 이같이 2층으로 제조된 것은 다음과 같은 이유에서이다.

1) 주조할 때 용탕의 열에 의한, 내측의 분말합금부 표면의 용융의 방지

2) 압출성의 개선: 압출시 다이와의 윤활성을 높여 생산성을 증대시키고, 또한 흑연의 함유로 인한 균열과 갈라짐 등 압출결합의 방지

2.3. 제조방법

실린더 라이너의 제조방법을 그림 14에 도시하였다. 주요 공정은 분말혼합 및 CIP에 의한 분말의 예비성형 그리고 열간압출이다.

2.3.1. 혼 합

3종의 원료분, 즉 알루미늄 합금분·알루미늄분·흑연분을 소정의 비율로 배분하여 혼합분을 제조한다. 주조법 등에 비해 입자분산화가 용이한 것이 분말야금기술의 특징으로 간주될 수 있지만 표 3과 같이 입도가 상당히 다른 다량의 분말을 균일하게 분산시키는 양산혼합기술은 중요한 개발 과제의 한 가지이다.

최적조건으로 혼합된 복합재는, 그림 15과 같이 알루미늄 입자가 균일하게 분산되어 있다. 그러나 공정관리 때문에 원료의 혼합분의 단계에서 알루미늄 입자 등의 분산 상태를 평가하는 것이 필요하다.

2.3.2. CIP

혼합분을 원통형으로 CIP(냉간 등압성형)함으로써 비이론 밀도 약 70%의 예비성형체를 만든다. 일반적으로, 알루미늄 입자와 흑연분이 배합될수록 CIP 성형성은 저하하므로 반송 등의 취급에 견딜 수 있는 성형체 강도도 중요하지만 원통형상으로 치수정밀도가 좋게 하기 위해서는 mold의 재질과 설계, 충전방법, CIP조건 등이 중요하다.

2.3.3. 압 출

압출비 8 이상으로 열간압출한다. 이 압출 과정에서, 분말간의 결합 및 분말과 전신합금간의 결합이 일어난다.

일반적으로 급냉응고 Al 합금분말의 경우, Si와 Fe 등의 전이금속의 양이 많을 수록 압출시의 변형저항이 크고 압출결함이 증대된다. 균열 등의 압출결함을 방지하기 위해서는 저압출속도 즉 저생산성으로 해야 하며, 이같은 양상은 흑연을 첨가한 경우에 더욱 현저하게 된다. 이에 비해, 빌렛 외측에 압출성이 양호한 전신재가 사용되면, 압출결함 없이 생산성 높게 압출하는 것이 가능하게 된다.

이 알루미늄 분말합금복합재 실린더 라이너는,

주철제 실린더 라이너와 동등한 내마모성·내소착성을 가지면서 동시에 엔진 경량화에 기여할 것이며 금후, 4륜차에도 확대 적용될 것이 기대된다.

후 기

본 내용의 정리에 도움을 준 삼성자동차 연구개발팀 최영민 연구원께 감사드립니다.