

로켓트 연소관용 고강도 알루미늄 합금튜브의 열가공 유동성형공정

장 창 범, 장 현 민, 정 성 희(삼선공업)
손 영 일, 이 경 훈, 은 일 상(국과연)

요 약

2.75인치 MK4/40 및 MK66 추진기관용 연소관의 국산화 개발을 목적으로 가공 열처리와 유동성형 공정을 조합한 열가공 유동성형 공정을 적용하여 치수 제어 시험을 하고 개발품과 수입 연소관을 비교하여 물성 및 구조시험을 실시하여 그 결과를 비교 분석하였다. 개발된 연소관은 수입연소관에 비하여 제작공정이 단축되었고, 열가공 유동성형 공정은 일반 유동성형 공정보다 치수제어에 유리하며, 내경 및 두께 규격을 만족했다. 또한 물성 및 구조시험 결과 수입 연소관에 비하여 우수한 성질을 나타내었다.

1. 서 론

국내에서 생산중인 2.75인치 MK4/40 추진기관용 연소관(2014-T651)은 압출 및 인발공정으로 제작되는 분리칸막이형 연소관(Non-Integral Motor Tube)이었으나, 최근에 구조적 안정성을 개선할 목적으로 유동성형공정(FFP: Flow Forming Process)을 적용하여 일체칸막이형 연소관(Integral Motor Tube)으로 개량 개발하였다[1]. 또한 2.75인치 로켓트의 비행성능을 개선하기 위하여 설계된 개량형 로켓트 MK66 추진기관용 일체칸막이형 연소관(7075-T8)도 FFP공정으로 국산화 개발하였다[2]. 반면에 미국에서 생산중인 일체칸막이형 연소관의 제작방법은 충격압출 및 아이오닝공정(IEIP: Impact Extrusion and Ironing Process)이지만, 이 공정은 생산장비 및 금형의 투자가 과대하여 국내 생산에는 적합하지 않다고 판단되었다. 따라서 국내에서는 FFP공정으로 개발한 것이다.

일반적으로 열처리용 고강도 알루미늄 합금은 재료물성과 응력부식균열(SCC: Stress Corrosion Cracking)저항특성을 개선할 목적으로 가공열처리(TMT: Thermo-Mechanical Treatment)를 적용하고 있으며[3-8], 최근에는 가공열처리공정과 스피닝 공정을 조합한 열가공스피닝(TSF: Themomechanical Spin Forming)을 항공우주산업용 알루미늄합금 구조체 제작에 적용하여 정밀도 및 재료물성향상과 생산공정 단축을 이룩하였다는 보고가 있다[9].

본 연구는 2.75인치 로켓트 MK4/40 및 MK66 추진기관용 연소관을 국산화 개발하는데 있어서 공정 단축과 내경 및 두께의 정밀도 개선을 목적으로 TMT와 FFP를 조합한 열가공유동성형공정(TFFP: Themomechanical Flow Forming Process)을 적용한 시험개발 내용으로서 최적공정설계를 위한 치수제어

시험과 IEIP로 제작된 수입 연소관과 물성 및 구조 시험을 실시하고 그 결과를 비교분석한 것이다.

2. 실험방법

2-1 시료 제작

제작공정 연구에 사용된 재료인 2014 및 7075 합금은 연소관 개발 업체인 삼선공업의 8 Ton 반사로에서 각각 용해 및 주조(Air Slip Casting)하여 ϕ 177mm billet을 제작한 후에 2014는 490℃에서 7시간, 7075는 460℃에서 22시간 균질화 처리하여, 1800 Ton 직접 압출기에서 ϕ 80mm 봉재로 압출하였다. 이 봉재로부터 400 Ton 유압프레스를 이용하여 TFFP 연구를 위한 예비성형체(Preform)를 제작하였다. 이 예비성형체의 치수는 내경이 66.14mm, 두께가 5.0mm, 길이가 410mm(2014) 또는 430mm(7075)이며, 화학조성은 Table 1과 같다.

공정연구에 사용된 열처리 조건은 MIL-H-6088에 준하여 용체화 열처리는 2014의 경우 502℃, 7075의 경우 462℃에서 90분간 유지후 열변형을 방지하기 위하여 20~25% 농도의 글리콜 수용액에 소입(Quenching)하였으며, 최종 시효열처리는 2014의 경우 177℃에서 9시간, 7075의 경우는 121℃에서 24시간 유지하였다.

2-2 치수제어시험

Table 2는 2.75인치 로켓트 모터 MK4/40 및 MK66용 연소관 제작공정들을 비교하여 나타낸 것이다. 2014-T6 연소관은 FFP와 TFFP-I를 비교하였고, 7075-T8 연소관은 TFFP-II를 적용하여 1차 및 2차 유동성형 단면감소율을 변화시켜 비교하였으며, 그 결과를 IEIP가 적용된 수입연소관들과 함께 비교 분석하였다. Table 3은 각 연소관의 유동성형 공정에서 X, Y, Z롤러의 형상, 롤러의 축방향 진행속도

(Feed), 앤드렐 회전속도 및 단면감소율을 나타낸 것이다.

연소관의 규격은 내경이 $66.19\text{mm} \pm 0.11\text{mm}$, 두께가 $1.83\text{mm} + 0.10\text{mm}$, $1.83\text{mm} - 0.07\text{mm}$ 로서 비교적 두께가 얇은 고정밀 튜브이며, 각 공정으로 개발된 연소관들의 후반부 끝단에서부터 각각 5mm, 300~350mm, 640~760mm 떨어진 연소관의 축방향 전, 중, 후반부에서 내경과 두께를 정밀 측정하여 연소관 치수가 규격에 만족하는 최적 유동성형 공정을 선정하였다.

2-3. 물성비교시험

TFFP로 개발된 2014 및 7075 연소관과 IEIP로 제작된 수입 연소관의 미세조직 관찰, 부식특성 시험 및 기계적 성질 시험을 하였으며, 7075 연소관의 경우는 용체화 열처리후의 냉간가공 효과를 파악하기 위한 전류응력측정과 수압시험을 하였다.

각 연소관의 가공조직은 Keller's 시약으로 부식시킨 후 광학현미경으로 인장시편의 파면은 주사전자현미경으로, 석출물의 형태 및 분포는 투과전자현미경으로 관찰하였다.

인장시험은 Cylinder부위에서 L방향으로 폭이 12mm, 표점거리가 25mm인 ASTM E-8의 표준시편을 제작한 후에 변형속도 2mm/min로 UTM(30Ton)에서 하였고, 노치인장시험은 인장시험과 동일한 방법으로 측정하였다.

응력부식균열시험은 Cylinder 부위에서 ASTM 344에 따라 C Ring Type의 시편을 제작하여 항복강도의 75%에 해당하는 응력상태에서 20일간 3.5% NaCl 용액에 10분간 침적시킨 후 50분간 공기중에 노출시키는 반복 시험을 하여 균열의 발생유무를 관찰하였다.

전류 응력시험은 Bakwin 방법, 스트레인 게이지를 이용한 Section법 및 구멍 뚫기법(HDM : Hole Drilling Method)으로 평균전류응력을 이용하여 측정하여 상호 비교하였으며, 수압시험은 연소관의 내압하중에 대한 변형률거동 및 파열압력을 평가하기 위하여 연소관 표면에 스트레인게이지를 부착한 후 2축 압력 상태에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 치수제어시험

Fig.1은 FFP와 TFFP-1으로 제작된 2014-T6 연소관의 축방향 위치에 따른 내경의 변화를 나타낸 것이고, Fig.2는 두께 변화를 같은 방법으로 나타낸 것이다. 여기서 내경 및 두께의 측정값은 연소관 전, 중, 후반부의 각 단면에서 측정된 최대값과 최소값의 평균값이며, 내경과 두께의 규격공차 범위는 Fig.1과 2에서 사각형으로 나타냈다. TFFP-1으로 제작된 연소관 9개의 내경 및 두께는 모두 규격을 만족하였으나, FFP로 제작된 연소관 5개의 내경은 연소관의 모든 축방향 위치에서 규격보다 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 정도 크게 나타났고, 두께는 연소관 전, 후반부에서 편차가 크게 나타났다. 따라서 FFP로서는 고정밀 연소관을 개발하는 것이 부적당하다는 판단을 얻었다. 1-pass에 65%의 큰 단면감소를 갖는 유동성형을 할 때

TFFP-1의 경우가 FFP보다 치수제어가 유리한 이유는 다음과 같이 판단된다.

경도가 $H_b=135$ 로 높은 시효처리 상태의 예비성형체를 사용하는 TFFP-1에서는 균일변형을 하지만, 경도가 $H_b=45$ 로 낮은 풀림처리 상태의 예비성형체를 사용하는 FFP에서는 불균일 변형을 일으켜서 재료용기(Build up)현상이 심하게 나타나기 때문이다. 그러나 FFP의 경우도 단면감소율은 약 40% 이하로 해서, 2-pass로 하면 고정밀 튜브 제작이 가능할 것으로 판단되지만 이것은 공정이 증가되기 때문에 바람직하지 않다.

Fig.3은 7075-T8 연소관을 개발하기 위하여 TFFP-II에서 다양하게 변화시킨 단면감소율이 내경 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 용체화 처리 전후의 1차 및 2차 유동성형의 단면감소율 차이가 큰 공정 I과 공정 III에서 내경이 규격보다 $0.2 \sim 0.7\text{mm}$ 크게 나타났으며, 1차 및 2차 단면감소율이 각각 33.5%와 47.7%로서 그 차이가 비교적 작은 공정 II의 경우가 고정밀 연소관의 제작에 적합하였다. 공정 I에서는 단면감소율이 21%로 작은 2차 유동성형시에 내경성장이 발생하였으며, 공정 III에서는 단면감소율이 21.1%로 작은 1차 유동성형시에 내경성장이 발생되어 2차 유동성형에서 제어되지 않았다. 이와 같이 유동성형공정에서 단면감소율이 30% 이하로 작으면 연소관의 축방향보다 전선방향의 소성유동이 증가되어 내경이 성장하는 경향을 나타내는 것으로 판단된다.[10]

3-2. 물성비교시험

3-2-1. 미세조직 특성 비교

Fig.4는 TFFP와 IEIP로 제작된 2014 및 7075 연소관의 실린더 부위에서 관찰한 3차원 현미경 조직 사진으로서 TFFP의 경우가 IEIP에 비하여 결정입도가 미세한 것을 알 수 있으며, 또한 7075-TFFP의 결정립은 L(축)과 LT(원주)방향으로 상당히 연신되어 있으며 2014-TFFP의 결정이 축방향으로 연신된 상태를 보이고 있다. 그러나 IEIP의 경우는 모두 축방향으로 약간의 방향성을 나타내지만 등축 결정립이 매우 성장되어 있다. 이와같이 7075-TFFP의 조직이 더 미세하고 방향성이 뚜렷하게 나타나는 이유는 열가공 유동성형을 하였기 때문이고, 2014-TFFP의 경우도 T6상태의 예비성형체를 열가공 유동성형을 해서 많은 전위가 석출상 주위에 tangled 되어 있었기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 원주방향으로 연신된 조직을 갖는 TFFP 연소관은 정수압에서 균열 진전방향이 축방향으로 전파될 때 축방향과 수직하게 배열되어 있는 많은 결정립을 전단하며 진행하여야 되므로 균열저항성이 IEIP보다 높 것으로 예측된다.

2차상입자의 분포는 TFFP의 경우 IEIP보다 미세하고 밀도도 낮은 상태를 보인다. 2차상입자는 주로 Fe의 금속간 화합물이며, TFFP 연소관은 IEIP 연소관보다 조성중에 Fe의 양이 적게 포함되어 있을 뿐만 아니라 이러한 2차상입자들이 미세하게 균일 분포되었기 때문에 판단된다.[11] 일반적으로 2차상입자들은 주조과정에서 합금 원소와 Fe, Si 등의 불순

들이 편석되어 생기는 불응성 금속간 화합물로서 균질화 과정에서 대부분 용해되지 않고 잔류되며, 후속 가공에서 가공방향으로 연신되어 균열에 대한 우선적인 전파 경로를 제공하기 때문에 LT 또는 ST 방향의 파괴인성을 크게 저하시키는 것으로 알려져 있다.[12,13] 따라서 시험금의 파괴인성은 2차상 입자들에 의하여 크게 지배된다.

Fig.5는 각 공정의 인장파면조직을 비교하여 나타낸 것으로 모두 딩풀이 존재하는 연성파괴 양상을 나타내지만, IEIP의 경우는 딩풀내부에 다량의 계재물이 존재하며, 등축점에 가까운 파면조직을 보이나, TFFP의 경우는 가공방향으로 연신된 파면조직을 나타내며, 광학현미경조직 관찰 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig.6은 각 공정의 투과현미경 조직사진으로서 2014-TFFP의 석출상이 2014-IEIP에 비하여 미세하게 균일 분포되어 있음을 알 수 있고, 7075-TFFP의 경우도 IEIP에 비하여 석출상의 밀도가 크고 미세하였다.

이와 같은 현상은 TFFP의 특징으로서 소성변형에 의하여 도입된 다량의 전위가 석출상의 우선 석출 site로 작용하여 석출반응이 촉진되었기 때문이라고 판단된다.

3-2-2 부식 특성 비교

Fig.7은 TFFP와 IEIP로 제작된 2014 및 7075 연소관의 응력부식 균열시험 결과를 나타낸 사진이다.

2014-TFFP는 응력부식의 주균열이 거의 없고 pitting 현상이 관찰된 반면에 2014-IEIP는 깊이 진전된 응력부식 균열이 발견되었다. 이와같은 결과는 TFFP의 경우가 IEIP에 비하여 결정입이 미세하고 석출상이 균일분포되었기 때문으로 판단된다.

7075 연소관은 모두 응력부식 균열이 발생되지 않고, Pitting 현상만이 관찰되었으며 TFFP 및 IEIP 연소관에서 각각 10 μ m, 7 μ m 이었다. 이와같이 TFFP의 경우 IEIP보다 응력부식 pH의 진전이 큰 것은 표면에 큰 잔류응력이 존재하기 때문이라고 사료된다. 그러나 두 제품 모두 응력부식 균열이 발견되지 않고 있어 내SCC특성이 우수하다고 판단된다.

3-2-3. 기계적 특성 비교

Table 4는 TFFP와 IEIP로 제작된 2014 및 7075 연소관 실린더의 축방향 기계적시험 결과들 비교하여 나타낸 것으로서 공정별로 큰 차이를 보이지 않고 모두 규격을 상회하는 것을 알 수 있다.

그러나 7075에 TMT를 적용하면 최대 peak에 이르는 시효시간이 단축된다는 보고가 있다. 따라서 TFFP는 시효시간을 기존의 시효시간보다 짧게 유지 시킴으로써 강도를 기존의 강도보다 증가시킬 수 있을 것으로 예측된다. 이것은 결국 용체화 열처리 후 으로서 최대강도에 이르는 시효시간이 단축되기 때문이다. 따라서 TFFP 공정에서는 시효시간의 재설정이 필요하며, 이와같이하여 시효시간을 단축시키면 제작 공정이 개선되고 재반물성이 향상될 것으로 생각된다.

노치 인장강도는 평면변형 파괴인성(K_{Ic})을 간접적으로 알 수 있는 유용한 자료로서 사용될 수 있으며, 특히 NTS/YS(=NYS)값이 클수록 파괴인성이 우수하다.

7075-T8의 NTS/YS 값은 IEIP와 TFFP가 약 1로서 비슷하게 나타났는데 이것으로부터 TFFP의 경우 용체화 열처리후의 유동성형에 의하여 생성된 잔류응력이 파괴인성 저하에 크게 관여하지 않음을 알 수 있었다.

3-2-4. 잔류응력특성 비교

Table 5는 7075 연소관의 축방향과 원주방향의 잔류응력 측정치를 여러가지 측정방법과 제작공정 따라 비교하여 나타낸 것으로서 측정 방법에 따라 측정값의 차이는 있으나 원주방향으로는 인장응력이 작용하고, 축방향으로는 IEIP의 경우 인장응력이 TFFP의 경우 압축응력이 작용하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같이 TFFP의 경우 축방향 압축잔류응력이 존재하는 것은 유동성형 공정에 나타나는 현상으로 사료된다. 여러가지 측정치 중에서 가장 유효한 값으로 추정되는 것은 구멍뚫기법(HDM)의 Through Hole 방법에 의한 측정치이다. 그 이유는 다음과 같다.

구멍뚫기법 HDM에서 Blind Hole 방법으로 측정할 표면부근의 잔류응력은 관의 외부표면에서부터 0.127mm 깊이까지의 등가 균일응력이기 때문에 관두께 전체에 대한 잔류응력의 대표값(또는 유효값)으로 볼 수 없다. 그리고 Baldwin 방법은 원주방향이나 축방향의 잔류응력분포가 균일하다는 가정하에서 유도된 수식이지만 실제 연소관에서 채취된 링형상의 시편을 축방향으로 절단해 보면 변위(δ)가 비선형적으로 변화된다. 따라서 Baldwin 방법으로 측정된 잔류응력 데이터는 신뢰성에 문제가 있을 것으로 사료된다. 또한 Section법은 연소관의 표면에 2축 스트레인 게이지를 부착한 후에 연소관을 축방향으로 절단하여 이완되는 스트레인으로부터 원주방향 잔류응력을 계산하는 고전적인 방법으로 신뢰성이 떨어진다.[15]

따라서 HDM의 Through Hole방법으로 측정된 잔류응력은 TFFP가 IEIP보다 작은 것을 알 수 있으며, 이 잔류응력치가 7075 연소관의 항복압력에 미치는 영향을 Von Mises의 Yield Criteria로서 계산하여 그 결과들 Table 6에 나타냈다.

TFFP 연소관의 경우는 잔류응력이 항복압력에 미치는 영향이 약 4% 수준으로서 IEIP의 약 8%에 비하여 작은것을 알 수 있다.

3-2-5. 수압특성비교

Table 7은 TFFP와 IEIP로 제작된 7075 연소관의 수압파열 시험 결과들 나타낸 것이다. 이들 시험은 수압시험기의 최대 압력인 278 kg/cm²까지 압력을 올리면서 파단 압력을 측정하였으며, TFFP의 경우 2개는 278kg/cm² 에서도 파단되지 않았으나 1개는 258kg/cm²에서 파단되었으며, IEIP의 경우 3개는 278kg/cm²에서 1개가 파단되지 않았고, 3개는 235~

258kg/cm²에서 파단되었다. 따라서 평균압력은 TFFP의 경우가 IEIP보다 약 5% 이상 높게 나타났으나, 모두 피열압력을 측정할 결과가 아니기 때문에 정상적인 평가는 어렵다. 그러나 파단면을 관찰하면 IEIP의 경우는 파단경로가 단순하지만 TFFP의 경우는 파단경로가 축방향과 원주방향으로 연결되는 복잡한 형태로 나타났다. 이것은 TFFP 연소관의 경우 시험에서 관찰된 LT방향으로 연신되어 있는 미세한 결정입과 미세한 2차상 입자들의 분포와 관련이 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

가공열처리 공정과 유동성형 공정을 조합한 열가공 유동성형 공정(TFFP)으로 2.75인치 로켓 연소관용 고강도 알루미늄 합금 튜브의 국산화 개발을 위한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TFFP에 의하여 2.75인치 로켓 추진기관, MK4/40용 2014-T6 연소관과 MK66용 7075-T8 연소관이 개발되었으며, 수입연소관의 제작공정보다 공정단축이 가능하였다.
2. 2014-T6 연소관의 TFFP는 일반적인 유동성형 공정(FFP)보다 내경 및 두께제어에 유리하였으며, 7075-T8 연소관의 TFFP는 용체화 열처리 전, 후의 1차 및 2차 유동성형 단면감소율을 각각 33.5%와 47.7%로 설계합으로써 내경 규격에 만족하게 제어되었다.
3. TFFP로 개발된 2014 및 7075 연소관의 충격압출 및 아이어닝 공정(IEIP)으로 제작된 수입연소관들 보다 결정입이 미세하고 축방향과 원주방향으로 연신되었으며, 2차상 입자와 강화석출상이 미세하게 균일 분포하였다. 또한 응력부식 균열 시험에서 모두 2014 수입연소관의 경우에만 균열이 발생되었고, 다른 연소관에서는 P_H 현상이 관찰되었다.
4. 2014 및 7075 연소관은 각각 기계적 성질이 비슷하였고, 7075 연소관의 전류응력시험에서 원주방향으로

로 인장 전류응력이 축방향으로 압축 전류응력이 존재하였으며, 그 크기는 오히려 TFFP가 IEIP보다 작았다.

5. 국산화 개발된 7075 연소관은 수입피열압력이 7075 수입연소관 보다 약간 높았으며, 전류응력이 항복압력 감소에 미치는 영향도 약간 작게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 은일상 등 : " 2.75" 로켓(MK4/40) 일체 칸막이형 모터케이스 개발기술 지원", 기술보고서, MSRD-519-90359, 1990
2. 은일상 등 : " 2.75" 공대지 로켓(MK66) 기술보고서(II), 기술보고서, MSDC-519-940075, 1993
3. E.D.Russo et al : Metall.Trans., Vol.4, No.4, P 1133, 1973
4. D.S.Thompson et al : Jahrg, Vol.50, No.10, P647, 1974
5. D.S.Thompson et al : Jahrg, Vol.50, No.10, P719, 1974
6. E.D.Russo et al : Mat.Sci. & Eng., Vol.14, P 23, 1974
7. H.J.Rack et al : Metall.Trans., Vol.8A, P 335, 1977
8. J.A.Wert et al : Metall.Trans., Vol.19A, P 617, 1988
9. E.H.Rennhack : Jahrg, Vol.58, No.3, P 166, 1982
10. C.H.Wells : Jour. of Eng. Ind., Vol.90, P 63, 1968
11. 임성택 등 : 제 2 차 유도무기 추진기관 학술대회 논문집, 국방과학연구소, P 213, 1982
12. D.D.Hughes et al : Mat.Sci.Tec., Vol.4, P 106, 1988
13. J.T.Staley : ASTM STP 605, P 71, 1976
14. 조현기 : "7075 Al 합금의 TMT에 따른 응력부식 균열성과 기계적 성질", 연구논문, P 63, 1985
15. 이오연 : "Flow Forming 연소관의 전류응력과 안전율 평가에 관한 연구", 연구논문, P 80 (1993)

Table 1 Chemical Composition of 2014 and 7075 motor tubes

		Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Cr	Al
Al 2014	TFFP	0.84	0.07	4.34	0.62	0.79	0.02	0.01	Bal.
	IEIP	0.99	0.28	4.11	0.39	0.82	0.13	0.01	Bal.
	Spec.	0.5-1.2	0.7 ↓	3.9-5.0	0.2-0.8	0.4-1.2	0.25 ↓	0.10 ↓	Bal.
Al 7075	TFFP	0.12	0.05	1.51	2.53	-	5.47	0.23	Bal.
	IEIP	0.12	0.19	1.41	2.36	0.02	5.60	0.21	Bal.
	Spec.	0.4 ↓	0.5 ↓	1.2-2.0	2.1-2.9	0.3 ↓	5.1-6.1	0.18-0.28	Bal.

Table 2 Manufacturing processes of tubes for 2.75" rocket motor, MK 4/40 and MK66

2014 motor tube (MK4,40)		7075 motor tube (MK66)	IEIP (U.S.A)
FFP	TFFP	TFFP	
Annealed Preform	Aged Preform	Annealed Preform	Annealed rod
Flow Forming	Flow Forming	1st Flow Forming	Impact Extrusion
Solution Heat Treatment	Solution Heat Treatment	Solution Heat Treatment	Process Annealing
Aging	Aging	2nd Flow Forming	1st Ironing
		Aging	Process Annealing
			2nd Ironing
			Solution Heat Treatment
			Aging

Table 4 Mechanical properties of 2014-T6 and 7075-T8 motor tubes.

		UTS	YS	E	N.T.S	NTS/YS
		(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(%)	(kg/mm ²)	(=NYR)
Al 2014	IEIP	51.1	45.6	11.0	-	-
	TFFP	50.1	47.4	11.5	-	-
	Spec.	46.4 ↑	40.78 ↑	7.0 ↑	-	-
Al 7075	IEIP	58.3	53.0	9.6	60.6	1.04
	TFFP	58.4	53.0	9.8	60.1	1.03
	Spec.	54.14 ↑	47.81 ↑	7.0 ↑	-	-

Table 5 Average residual stresses of 7075-T8 motor tubes measured by various methods.

	(unit:kg/mm ²)							
	Baldwin		Section		HDM			
	IEIP	TFFP	IEIP	TFFP	Blind Hole		Through Hole	
	IEIP	TFFP	IEIP	TFFP	IEIP	TFFP	IEIP	TFFP
Hoop Stress	1.8	5.3	0.95	4.72	4.4	7.0	4.2	2.3
Axial Stress	4.6	-2.8	-	-	12.8	-7.9	6.5	-1.4

Table 3 Flow Forming Condition

	Roller Geometry			Feed (mm/min)	Mandrel Speed (rpm)	Area Reduction (%)	
	α (deg)	R (mm)	β (deg)				
Al 2014	X	20	1	10	213	200	65% (SI → 1.83 ↓)
	Y	20	1	10			
	Z	30	3	17			
Al 7075	X	20	4	3	213	200	I 55.7% 21.0% II 33.5% 47.7% III 21.1% 55.7%
	Y	20	3	3			
	Z	30	2	3			

Table 6 The comparison of theoretical yield-pressure of 7075-T8 motor tubes

	Absence of Residual Stress	Presence of Residual Stress	
		IEIP	TFFP
Theoretical Yield Pressure (kg/cm ²)	333	307	320
Percent Reduction of Yield Pressure (%)	0	7.8	3.9

Table 7 Data of burst pressure test of 7075 motor tube

	Burst Pressure				Aver.	비 고
	1	2	3	4		
TFFP	258	278	278	-	271	Biaxial Burst Test
IEIP	255	235	258	278	257	

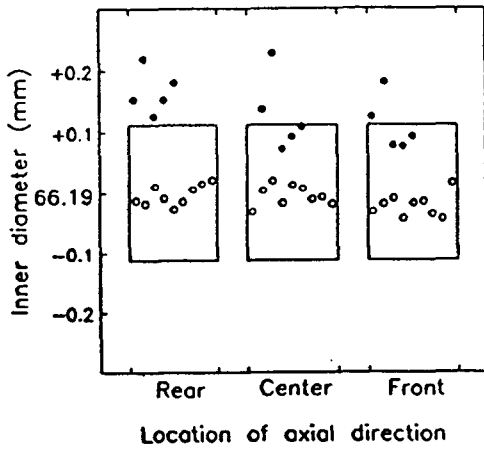


Fig.1 Inner diametral change of 2014-T6 tubes for 2.75 inch rocket motor, MK4/40 (●:FFP, ○:TFFP-1)

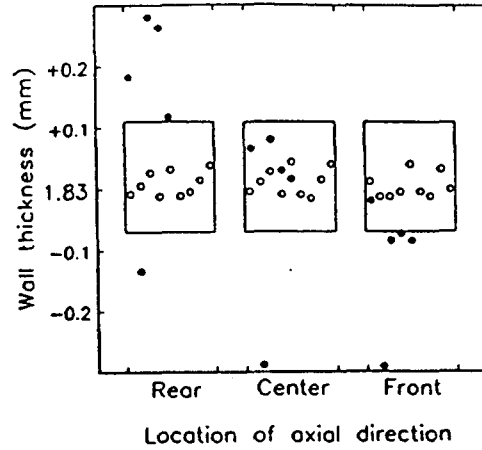


Fig.2 Wall thickness change of 2014-T6 tubes for 2.75 inch rocket motor, MK4/40 (●:FFP, ○:TFFP-1)

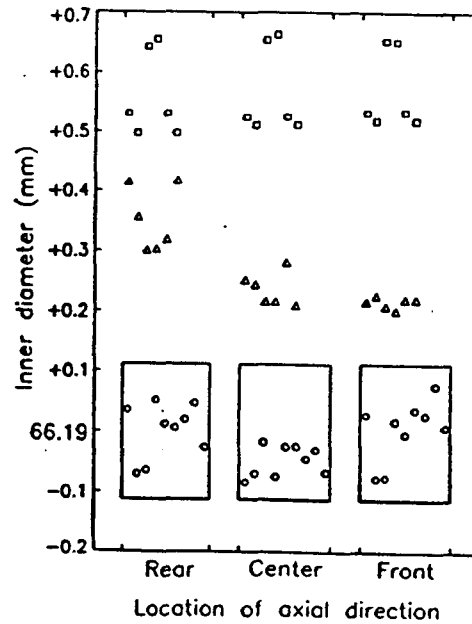


Fig.3 Inner diametral change of 7075-T8 tubes for 2.75 inch rocket motor, MK66 (▲:process I ○:process II □:process III)

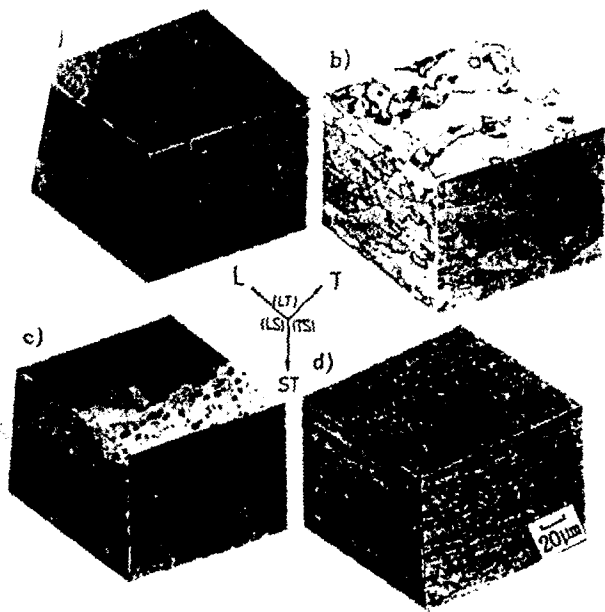


Fig.4 Three directional micrographs of 2014-IEIP(a), 2014-TFFP(b), 7075-IEIP(c) and 7075-TFFP(d)

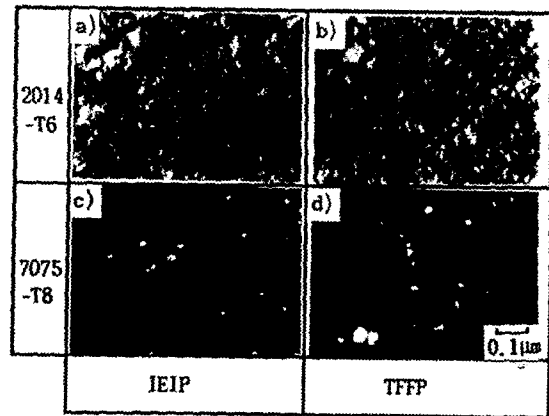


Fig.6 TEM of 2014-T6 and 7075-T8 motor tubes

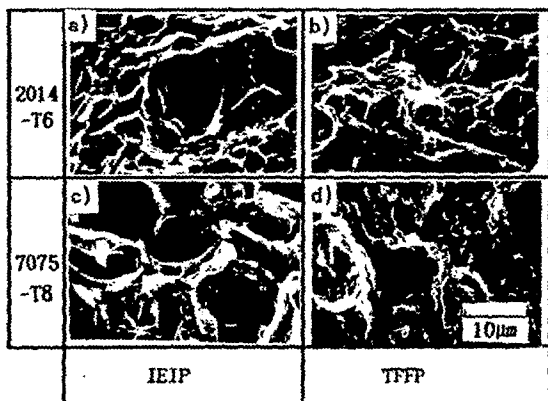


Fig.5 Tensile fractographs of 2014-T6 and 7075-T8 Motor tubes

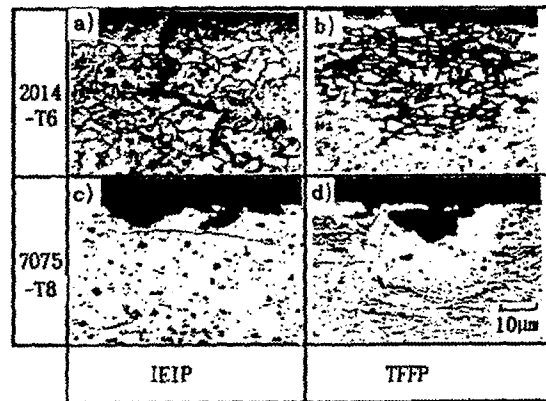


Fig.7 Optical micrographs showing the SCC pits of 2014-T6 and 7075-T8 motor tubes