동시경화용 복합재료의 특성에 따른 금형의 선택방법

홍 중 표*. 이 종 옥*. 이 원 곤*. 홍 정 수*. 지 우 석*. 조 한 준*

Selection Methodology of Tool for Co-cured Composite Materials

J. P. Hong, J. O. Lee, W.G. Lee, J.S. Hong, W.S. Ji, H.J. Jo

Key Words : BAJ(Bonding Assembly Jig:본딩지그), Composite(복합재료), Thermal expansion(열팽창)

ABSTRACT

Co-cured composite materials has its own characteristics, so its thermal expansion is different each other . The selection of tool material for co-cured composite part in high temperature more over 350°F and 50 Psi pressure have to consider part thermal expansion, size, shape, and economic aspect in production line. So it is important choose tooling material in manufacturing composite parts. We called the tool for airplane composite parts as BAJ (Bonding Assembly Jig). Composite parts are cured on the BAJ in autoclave. BAJ have to stable at high temperature over 350°F and 50 Psi pressure, Considering composite parts' dimensional tolerance compare to heat up in autoclave. This paper come from the results of the experiment at the composite parts production line and review other aircraft company's method for tooling . This is for the engineer engaged in composite parts manufacturing.

1. 서 론

항공우주산업은 최근 들어 항공기의 경량화에 따른 소재개발의 발전으로 인하여 높은 비강도 높은 비탄성 특성의 복합재료의 사용이 대폭 증가하고 있는 추세다. 이는 우주항공산업뿐만 아니라 일반기계구조물 및 자동차산업, 스포츠, 레저산업에도 파급적으로 증가하고 있는 추세라 하겠다. 또한 재료의 재단성이 뛰어나 평판 형태뿐만 아니라 3 차원형상도 금형의 형상에 따라 다양한 형태의 모양으로 만들 수 있겠다. 이러한 기계적 성질 및 형태의 다양화를 할 수 있는 복합재료는 불포화 폴리에스테르 수지와 에폭시 수지, 페놀릭등과 같은 열경화성 수지에 유리섬유 또는 탄소 섬유등으로 강화시킨 섬유강화 복합재료로서 이 재료들은 고유의 물적 열적특성을 가지고 있어서 온도에 따라 열팽창 계수가 다르다 하겠다. 또한 Part 의 형상 및 크기에 따라 사용되어지는 금형의 재료는 Part 의 치수 보정성 및 Part 생산 댓수에 따라 경제성을 고려 하여 선택해야 겠다. 항공기용 복합재료 부품을 생산하기 위해서는 Autoclave 라는 압력용기에서 250 °F(121°C) 및 350 °F(177°C) 이상의 온도와 50 Psi 이상의 압력으로 Part 를 구워내야 한다. 그러므로 이와 같은 온도, 압력이상에서 복합재료와 열적 특성에 맞춰 함께 작용하여 열구배에 따른 치수안정성을 도모할 수 있는 금형재료의 선택은 중요하다 하겠다. 항공기용 Composite Part 제작용 금형을 특히 BAJ(Bonding Assembly Jig)라 칭하며 사용되는 금형은 Steel BAJ, Aluminum BAJ, Ni BAJ, Composite BAJ, Invar BAJ 등이 있다. BAJ 용 재료들은 Part 의 열팽창계수 및 형상, 크기, 생산 댓수등 여러 고려요소에 따라 선택되어 지며 재료의 가격 및 국내에서 만들 수 없는 금형의 경우 해외구매에 따른 Lead Time 의 증가로 인한 생산 일정의 지연등을 고려한 금형설계등 고려할 요소들이 다양하다 하겠다. 이에 초기 BAJ 설계 시 이런 요소들을 고려하여 BAJ 의 재료를 쉽게 접근할 수 있도록 TABLE 화 및 실례를 나열함으로써 Engineer 들이 쉽게 금형설계 시 재료를 선택할 수 있도록 해보았다. 소재과학의 발달로 인해 복합소재도 다양하게 개발되

* 대한항공

고 있는 추세에 따라 이를 성형하는 Tool 재질 또한 다양화되어 질 것이다. 본 논문에서 사용되어진 재료들은 보잉사의 Spec'에 따른 자재를 고려하고 있으며 본 논문은 현재 GE 사에서 사용되어지고 있는 6 σ (Six Sigma)기법을 가미하여 표현하였다.

2. 본 론

2.1 목 적

서론에서 언급한 것과 같이 BAJ 는 Composite parts 를 제작하는데 사용되는 Tool 로서 어떤 자재의 Tool 을 선택하느냐에 따라 Part 에 미치는 영향이나 경제성, 효율성 측면에서 많은 차이가 난다.현재까지 BAJ 를 설계하는데 있어서 Part 의 특성 및 형상 무게에 따른 BAJ 의 자재 선정에 대한 표준이 부재하였고, 설계 기준이 없어 대부분의 설계 개념을 Designer 의 능력에 의존하였으며, 표준이 없어 기능성을 주장할 근거 자료가 부족하였다.

이런 상황에서 설계 시 나올 수 있는 문제점으로는 무분별한 자재 선정으로 인한 Part 불량, Tool Maintenance 비용 증가 등 여러가지 문제점이 발생할 수 있다 하겠다. 이에 표준화를 통해 일정한 기준 내지는 통일성이 결여된 BAJ 설계에서 나올 수 있는 문제점들을 해결하고자 한다.

2.2 B A J 설계 공정도

Fig.1 에서 보는것과 같이 Tool 을 design 하는데 있어서 여러가지 재고사항이 많다 하겠다.

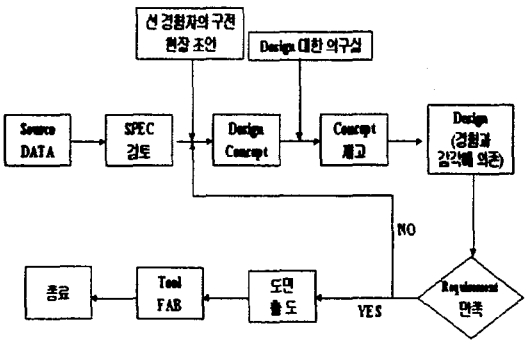


Fig.1 Design Process

2.3 특성 요인도 (4M-METHOD)

특성요인도는 Fig.2 와 같이 fish-bone 을 이용하여 여러 사람들이 모여 4M 을 기준으로 brain-storming 기법을 이용 원인을 파악하는 단계라 하겠다.

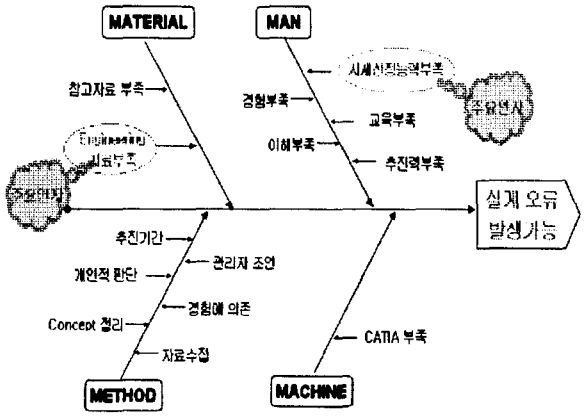
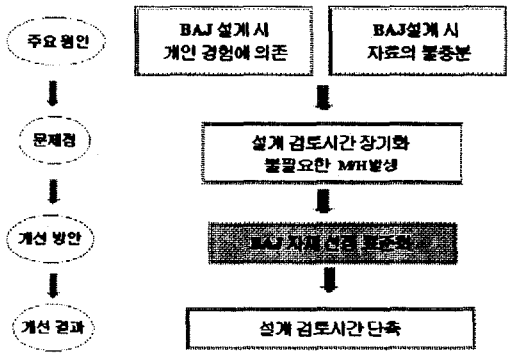


Fig.2 4M – Method

2.4 B A J 비표준화의 주요원인 및 개선방안

상기 2.3 에서 설계 오류발생에 대한 원인 및 개선방안을 정리해 보면 아래와 같다.



2. 5 표준화를 위한 자료수집

2.5.1 BAJ 용 Tool Material

BAJ 용으로 주로 사용될 수 있는 재료는 Aluminum,Steel,EFNi,Fiberglass/Epoxy,Graphite/Epoxy,Invar36 등으로 나눌수 있겠고 각각의 장단점을 살펴보면 다음과 같다.

Aluminum 은 low cost, easy to machine, light weight, weldable, good heat-up-rate 등의 장점을 가지고 있으나 CTE(Coefficient of Thermal Expansion)가 큰 단점이 있다. 이런 특성 때문에 주로 복잡하지 않은 형상을 가진 BAJ 의 자재로 사용된다.

Steel 은 slow heat-up-rate 와 무거운 무게가 별 상관이 없다면 복잡한 형상에도 사용될 수 있다.

EFNi(Electroformed Nickel)은 상대적으로 가벼우면서 매우 복잡한 형상을 가질 수 있다.

Fiberglass/Epoxy 는 비교적 제작도 쉽고 복잡한

형상도 만들 수 있으나 수명이 짧은 것이 단점이라하겠다.

Graphite/Epoxy 는 CTE 가 낮고 온도가 올라가면 강도가 높아지며 심한 열변화에도 안정성이 매우 높다. 또한 화학적으로도 안정하여 이물질에 의해 오염되지 않으며 기계 가공성 또한 매우 좋다.

Invar36 은 열에 의한 팽창이 매우 적어 CTE 가 매우 중요한 요소로 취급되는 곳에 사용된다.

Expendable LM 는 Duct 등을 만들 때 사용되며 Plaster, Eutectic Salts 등으로 만들어진다. Expendable LM 은 Production Part 의 Cure 후에 깨거나 녹여서 제거 시킨다.

2.5.2 Tooling Material Thermal Expansion

각각의 material 별 열팽창 계수를 보면 table.1 과 같다 하겠다.

Tooling Material	Expansion Coefficient ($x\ 10^{-6}$) (in./in.deg F)
Aluminum	12.5
Fiberglass Prepreg Wet layup	7.9 8.0 – 10.0
Electroform Nickel	7.4
Steel	6.7
Graphite Prepreg	2.0
Invar 36	1.5

Table.1 Thermal Expansion chart

기본적인 열팽창 계수를 고려한 길이 변화를 간단히 살펴보면

$$L' = \delta \times L \times \Delta T \qquad (1)$$

L':길이 변화량,δ:열팽창계수,L:처음길이, ΔT:온도차이(350°F-70°F)

식(1)과 같이 표현이 되겠고 치공구 자재 선택시 각각의 치공구 자재와 Part 자재와의 열팽창을 고려하여 선택하여야 겠다.

2.5.3 적용 P A R T 자재 Spec'

아래의 BAC 계열은 Part 에 적용되는 Boeing Process Specification 이라 하겠다.

1) BAC 5317-1
Graphite(Carbon) and Aramid Fiber Reinforced Composite Parts, 350 degree F (177°C) Cure.

2) BAC 5317-2
Manufacture of Low Temperature Autoclave Cured Epoxy Structural Parts, 250 degree F (121°C) Cure.

3) BAC 5317-3
Manufacturing of High Temperature Resistant Epoxy Structural Parts, 350 degree F (177°C) Cure.

4) BAC 5317-4
Advanced Composite Honeycomb Sandwich Structural Parts, 350 degree F (177°C) Cure.

5) BAC 5317-5
Manufacture of Advanced Composite Structural Parts, 250 degree F (121°C) Cure.

6) BAC 5331
Manufacture of Nonstructural air ducts, laminates, and sandwich constructions using fabric reinforced thermosetting resins. 350 degree F(177°C) Cure.

2.6 B A J 자재선정 방법

BAJ 자재를 선정하기위한 방법을 Brain-Storming 방법을 통하여 체계화 해보았다.

첫째, BAJ 에 적용될 Part 의 process pecification 결정한다.

두번째는 Tool 의 형상을 결정할 coordination 방법 결정한다. MDD 나 MDS 가 있으면 NC machining 으로, Physical Model(MM, AM or PM)이 있으면 model 또는 splash 에서 직접 떠내는 방법으로, Dimensional Drawing 이 있으면 일반기계가공이나 roll forming 혹은 break forming 으로 가공할 수 있다. 일반기계가공이나 forming 은 단순한 형상에 한정된다.

세번째로 할일은 적용될 Part 공차를 고려하는 것인데 공차가 Critical 한 Profile Tolerance 가 0.010 inch 이하이고, 주로 군사업의 Part 에 적용된다 하겠다. Non-Critical 한경우는 Profile Tolerance 가 0.030 inch 정도로 주로 민항기 사업의 Part 에 적용된다.

네번째로 고려할 것은 Tool 전체 크기의 범주를 결정하는 것으로 Small 은 36 inch 이하, Medium 은 36 inch 이상 72 inch 이하 Large 는 72 inch 이상으로 간주한다. 다섯번째로 Tool 형상의 일반적 굴곡정도 결정하는 것으로 Simple 인경우는 1 inch 이상의 곡률반경을 가진 한가지 패턴으로 이루어진 곡면 또는 Included Angle 이 90° 이하인 곡면을 가지고 있고, Compound 인경우는 1 inch 이상의 곡률반경을 가진 여러 개의 패턴이 모여 이루어진 곡면 또는 Included Angle 이 90° 이상인 곡면이고, Mild 한 경우는 Compound 한 형상 중 높이 대 너비의 비가 1:1 이하인 경우 그리고 Severe 한 경우는 Compound 한 형상 중 높이 대 너비의 비가 1:1 이상인 경우로 보면 되겠다.

여섯번째로 BAJ 로 제작할 Part 의 개수 결정하는 것으로 Single Permanent Tool 인경우 1 개의 BAJ 를 제작하고 Permanent Rate Tool 인경우는 1 개 이상의 BAJ 제작 Short Run Tool 인경우 50 part cycle Temporary Tool 인경우 1 or 2 part cycle 를 생산하는데 사용한다 하겠다.

일곱 번째로는 Rate Tool 이 필요한지 아닌지를 결정하고 마지막으로 Fabrication Flow Time, Cost, Capacity, Shop Load, NC Machine Availability, Specific Part Requirements 등의 특성을 고려한다.

fig.3 은 선택순서를 step 별로 보여준다.

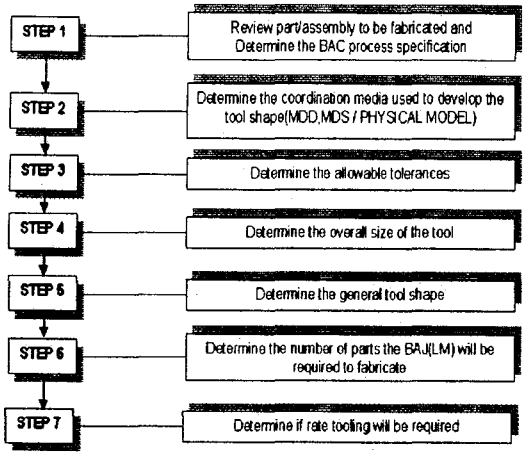


Fig.3 BAJ Material Selection Step

다음으로 각각의 Part 특성 및 공차,크기,형상에 따라 적용되는 Tool material 을 Flow Chart 화 하여 보았다. Fig.4,fig.5,fig.6 은 그 flow 를 보여준다. Flow chart 를 적용하여 Table Matrix 화한것이 Table.2,Table.3,Table.4 이다. 지면 관계상 다른 Spec'에 적용된 것은 생략한다.Fig.7~Fig.12 까지는 현장에서 사용되고 있는 Tool 및 타회사에서 사용되어지고 있는 Tool 들을 Review 한 자료이다. 다른 자료는 생략하는 바이다.

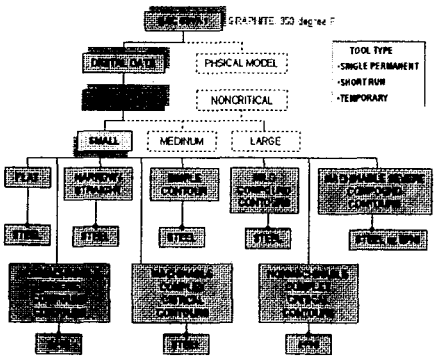


Fig.4 Tool Material Selection Flow 1

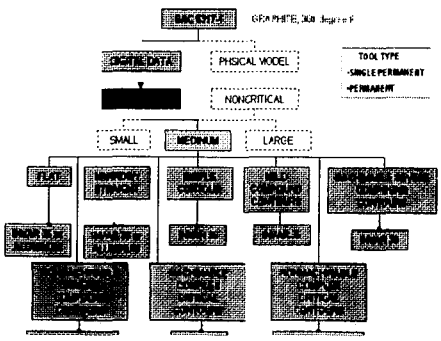


Fig.5 Tool Material Selection Flow

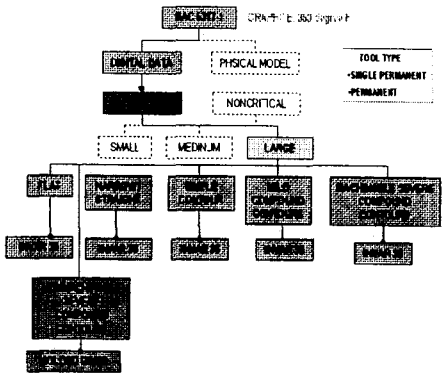


Fig.6 Tool Material Selection Flow 3

• BAC5317-1, 5317-4 INITIAL SELECTION CHART

TOOL COORDINATION	PART TOLERANCE	TOOL SIZE	REFER TO FINAL SELECTION CHART
MASTER DIMENSIONAL DATA/MASTER DIMENSIONAL SURFACE	CRITICAL	SMALL	TABLE 2
		MEDIUM	TABLE 3
		LARGE	TABLE 4
	NON CRITICAL	SMALL	TABLE 5
		MEDIUM	TABLE 6
		LARGE	TABLE 7
PHYSICAL MODEL	CRITICAL	SMALL	TABLE 8
		MEDIUM	TABLE 9
		LARGE	TABLE 10
	NON CRITICAL	SMALL	TABLE 11
		MEDIUM	TABLE 12
		LARGE	TABLE 13

Table.2 Tool Material Selection Matrix Table1

• BAC5317-1, 5317-4 SMALL, CRITICAL, SELECTION CHART(TABLE 2)

GENERAL TOOL SHAPE	SELECTION TOOL TYPE FOR • SINGLE PERMANENT • SHORT RUN • TEMPORARY	SELECTED TOOL TYPE FOR: • PERMANENT RATE
FLAT	STEEL	STEEL
NARROW/STRAIGHT	STEEL	STEEL
SIMPLE CONTOURS	STEEL	STEEL
MILD COMPOUND CONTOURS	STEEL	EFNI
MACHINABLE SEVERE COMPOUND CONTOURS	EFNI or STEEL	EFNI
NON MACHINABLE SEVERE COMPOUND CONTOURS	EFNI	EFNI
MACHINABLE COMPLEX/CRITICAL DETAILS	STEEL	EFNI
NON MACHINABLE COMPLEX/CRITICAL DETAILS	STEEL	EFNI

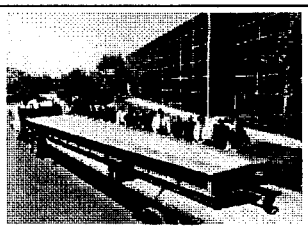
Table.3 Tool Material Selection Matrix Table2

- BAC5317-1, 5317-4 MEDIUM, CRITICAL SELECTION CHART (TABLE 3)

GENERAL TOOL SHAPE	SELECTED TOOL TYPE FOR: • SINGLE PERMANENT • PERMANENT	SELECTED TOOL TYPE FOR: • SHORT RUN • TEMPORARY
FLAT	INVAR 36 And/or Aluminum	INVAR 36 And/or Aluminum
NARROW/STRAIGHT	INVAR 36 And/or Aluminum	INVAR 36 And/or Aluminum
SIMPLE CONTOURS	INVAR 36	INVAR 36
MILD COMPOUND CONTOURS	INVAR 36	MOLDED GR/EP
MACHINABLE SEVERE COMPOUND CONTOURS	INVAR 36	MOLDED GR/EP
NON MACHINABLE SEVERE COMPOUND CONTOURS	MOLDED GR/EP	MOLDED GR/EP
MACHINABLE COMPLEX/CRITICAL DETAILS	INVAR 36	MOLDED GR/EP
NON MACHINABLE COMPLEX/CRITICAL DETAILS	MOLDED GR/EP	MOLDED GR/EP

Table.4 Tool Material Selection Matrix Table3

- EXAMPLE OF APPLICATED BAJ MATERIAL TYPE



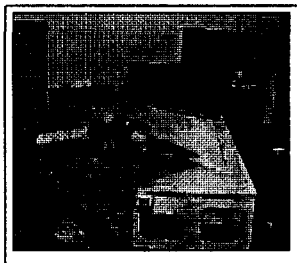
MATRIX REVIEW

1. Specification : Graphite
2. C/O Media : Digital Data
3. Tolerance : Critical
4. Size : Large
5. Shape : Simple contour
6. Rate : Single Permanent
7. **Material type : INVAR 36**

Boeing program C-17 Rear Stabilizer
Application : Bonding Fixture
Material : INVAR - 36 (CAST & WROUGHT)
Size : 40' X 100'- 60" Wide X 34" High

Fig.7 Tool Material Selection Review1

- EXAMPLE OF APPLICATED BAJ MATERIAL TYPE



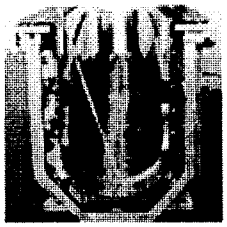
MATRIX REVIEW

1. Specification : Epoxy structure
2. C/O Media : Digital Data
3. Tolerance : Critical
4. Size : Large
5. Shape : Simple contour
6. Rate : Single Permanent
7. **Material type : Aluminum**

Lockheed - F-22 Raptor
Application - Bonding Tool
Material : Aluminum
SIZE : 21" X 96" X 44"

Fig.8 Tool Material Selection Review2

- EXAMPLE OF APPLICATED BAJ MATERIAL TYPE



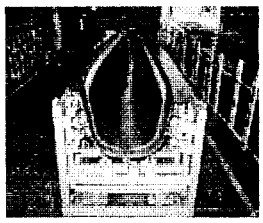
MATRIX REVIEW

1. Specification : Epoxy structure
2. C/O Media : Digital Data
3. Tolerance : Critical
4. Size : Medium
5. Shape : Severe compound Contour
6. Rate : Single Permanent
7. **Material type : EFNI**

Airbus program - A340 fairing
Application - Bonding Tool
Material : Electroformed nickel
SIZE : 30" X 24" X 70"

Fig.9 Tool Material Selection Review3

- EXAMPLE OF APPLICATED BAJ MATERIAL TYPE



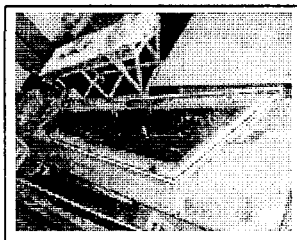
MATRIX REVIEW

1. Specification : Epoxy structure
2. C/O Media : Digital Data
3. Tolerance : NonCritical
4. Size : Large
5. Shape : Severe compound Contour
6. Rate : Single Permanent
7. **Material type : EFNI**

Boeing program – B777 Aft Fairing (KAL)
Application : Bonding Fixture
Material : Electroformed nickel)
Size : 28" X 30" X 146"

Fig.10 Tool Material Selection Review4

- EXAMPLE OF APPLICATED BAJ MATERIAL TYPE



MATRIX REVIEW

1. Specification : Graphite
2. C/O Media : Digital Data
3. Tolerance : Critical
4. Size : medium
5. Shape : Simple contour
6. Rate : Single Permanent
7. **Material type : INVAR 36, Steel**

Military program – F16 Fighter (KAL)
Application : Bonding Fixture
Material : Steel
Size : 2' X 30" X 80"

Fig.11 Tool Material Selection Review5

• EXAMPLE OF APPLICATED BAJ MATERIAL TYPE

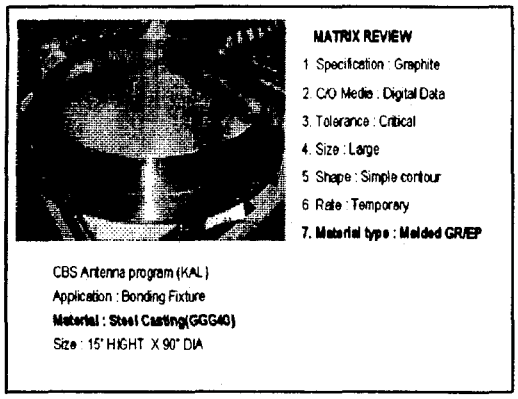


Fig.12 Tool Material Selection Review6

3. 결 론

상기와 같이 여러 종류의 재료로 사용된 금형의 형상 및 금형자재 선택방법을 쉽게 하기 위한 Table 을 보았다. 복합재료로 만들어지는 제품을 위한 금형의 재료선택에 있어서 변수는 앞에서 언급한 바와 같이 상당히 많다 하겠다. 산업현장에서의 경쟁력이란 Cost 와 직결되어 있으므로 어떤 재질의 금형을 사용하느냐에 따라 Cost 절감을 가져 올수 있겠다. 하지만 싼 자재를 사용해서 복합소재 제품의 요구사항을 맞추기 위해서는 여러가지 기술적 요건이 필요하다 하겠다. 여기서는 Engineer 들이 쉽게 재료선택을 할 수 있도록 산재해 있는 여러 자료들을 취합 및 정리 했고, 지면이 적은 관계로 해서 다 보여주지는 못했다. 상기 자료를 만듦으로 해서 여러 가지 결과를 돌출할 수 있었다.

첫째 BAJ(Bonding Assembly Jig)의 자재선택을 쉽게 할 수 있다 하겠다. 이것은 설계초기 단계에서 불필요한 Lead Time 을 많이 감소 시킬 수 있는 계기가 되었다.

둘째 기존의 대한항공내에서 사용되고 있는 치공구 설계 교범의 부족한 부분을 많이 보완할 수 있었다. 설계 Engineer 들에게 보다 많은 자료를 제공하므로 해서 보다 나은 설계의 Out-Put 을 가져올 수 있었다.

셋째 경쟁력 있는 자재를 선택하는데 별 문제가 없다 하겠다. 상기 자료를 통해서 금형자재를 선택함으로 해서 가격대비 Spec'에 별 무리 없이 선택할 수 있겠다.

후 기

본 자료는 공장에서 사용되고 사용되어져 온 치공구 자료들과 선진항공사에서 사용되고 있는 방법들을 당 공장실정에 맞게 총괄하여 정리한 자료로 보면 되겠다. 본 자료에 열해석 및 기타해석이 가미 되었으면 더 좋은 자료가 되었을 것이다. 기회가 되면 여러 해석기구를 통해 해석해볼 기회를 앞으로 잡아볼 계획이다. 그 동안 본 자료를 취합하고 정리하는데 수고 하신 Bonding 분과 위원들에게 지면을 통해 감사 드린다.

참고문헌

(1) D31181, Boeing Advanced Composites Tool Design Document
(2) D31171, Boeing Electroformed Nickel(ENFi) Tooling Document
(3) D33028, Boeing INVAR 36 AND INVAR 42 Tooling, Fusion Welding and Machining and Finishing Procedures
(4) D33181, Boeing Tooling Procedure tandards(TPS's)
(5) BAC5317 Process Spec, Fiber Reinforced Coposite Parts
(6) BAC5317-2 Process Spec, Manufacture of Low Temperature Autoclave Cured Epoxy Structure Parts
(7) BAC5317-3 Process Spec, Manufacture of High Temperature Resistant Epoxy Structure Parts
(8) BAC5317-4 Process Spec, Advanced Composite Honeycomb Sandwich Structural Parts, 350 degree F Cure.
(9) BAC5317-5 Process Spec, Manufacture of Advanced Composite Structure Parts, 250 degree F Cure.
(10) BAC5331 Process Spec, Manufacturing of Airducts,Laminates,and Sandwich Constructure Using Fabric Reinforced Thermosetting Resins