

論文

외부에 접착한 복합재료 단열재의 열적특성

황철규* · 김종환**

Thermal Characteristics of External Bonded Composite Insulators

Cheol-Gyu Hwang* and Jong-Hwan Kim**

ABSTRACT

In this paper thermal tests of carbon-phenolic and silica-phenolic composite insulators which adhered to aluminum plates and heat transfer analysis on the interface between the insulator and the plate were studied. Surface temperatures of specimens were obtained from a radiational heating test by using lamps. A numerical method to compute thermal effect of bonded faces was presented, where the thermal effect was calculated by using experimental surface temperatures and analytic temperatures and heat fluxes. The proposed method will be useful to decide the optimal insulator thickness of external insulated structures.

초 록

본 연구는 알루미늄판에 접착한 카본-페놀, 실리카-페놀 복합재료 단열재의 열적시험 및 단열재와 알루미늄판 계면의 열전달 해석에 관한 것이다. 램프를 이용한 복사가열 방식으로 시험을 수행하여 시험편의 표면온도를 측정하였다. 접착부위의 열적영향을 실험으로 측정한 표면온도와 해석에서 구한 온도 및 열류를 이용하여 계산하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법은 외부 열차단 방식의 구조물에서 적절한 단열재의 두께를 결정하는데 유용하게 이용될 수 있다.

1. 서 론

비행체의 구조설계에서 중요하게 고려되어야 하는 사항 중 하나는 비행체 구조물의 중량을 감소시키면서 구조재의 안전성과 신뢰성을 극대화시킬 수 있는 재료의 선정이다[1]. 특히 비행중 공기와의 마찰로 인하여 표면온도가 고온으로 상승하는 부위는 구조재의 열변형, 물성열화 등으로 인한 재료의 강도저하로 비행체 자체 또는 내부 탑재장비가 심각한 손상을 입게되므로, 설계시 재료의 열적특

성을 충분히 고려하여야 하며, 구조재를 열로부터 보호할 수 있는 열차단이 필수적이다.

구조물의 외부에서 열차단을 시키는 방법 중에는 구조재의 외피에 열전도도(Thermal Conductivity)가 낮은 복합재료를 단열재로 부착하는 방법이 구조물을 경량화할 수 있고, 단열재의 적절한 선정으로 비교적 높은 온도까지 전달 수 있어 실용적이지만, 접착방법에 따라 사용중에 단열재가 떨어져 나가는 위험성이 있다. 이러한 위험성을 미연에 방지하기 위해서는 단열재의 열적 물성과 아울러

* 정회원, 국방과학연구소

** 국방과학연구소

단열재와 구조재 접착부위의 열전달 특성을 미리 예측하여 접착부위의 안전성을 보장할 수 있는 열전달 해석이 선행되어야 한다. 복합재료의 열전달 해석시 가장 중요한 변수 중의 하나가 열전도도인데, 이와 관련된 다양한 해석적인 연구[2~3] 및 실험적인 연구[4~7]가 진행되어 왔으며, 상용화된 재료의 경우는 제조업체에서 제공하는 측정결과를 이용할 수 있다. 그러나, 기존의 연구들이 대부분 복합재료 자체만의 열전도도를 구하는데 치중하고 있으며, 특히 단열재와 구조재 접착부위의 열전달 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 일반적으로 접착부위의 열전달특성을 실험적으로 구하기 위해서는 접착부에 온도와 열류를 계측하기 위해 센서를 부착해야 하므로, 시편에 손상을 입히게 됨은 물론 센서의 설치가 용이하지 않다. 본 실험연구는 접착부위의 열전달 특성을 시편 내부에 센서를 부착하는 대신 열전달해석을 실험과 연계하여 구하는 방법과 실제 구조물에 적용하기 위한 열전달해석 모델에 대한 연구로, Carbon-Phenolic, Silica-Phenolic 복합재료를 단열재로 하는 평판시편에 대해서 내열 시험을 수행한 표면온도를 측정하고, 그 결과를 해석과 연계하여 단열재와 구조재 접착부위의 열전달 특성을 구하였다.

2. 실험

2-1. 실험시편

본 연구에 사용한 시편은 Fig.1에 보인 바와 같이 두께 1.5mm, 폭 200mm 정방형의 알루미늄

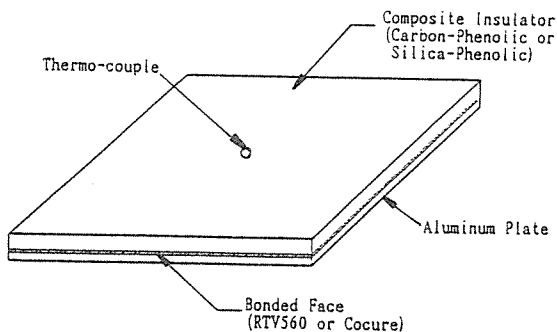


Fig. 1. Shape of Composite Plate Specimen

Table 1. The Thermal Properties of Composite Insulators

Property Material	Thermal Conductivity (W/m°C)			Specific Heat (J/kg°C)		Density (kg/m³)
	Temp. (°C)	K _w *	K _a *	Temp (°C)	Specific Heat	
Carbon-Phenolic (FM 5055) ¹⁾	0	1.08	0.80	0	880	1398.4
	200	1.50	0.93	100	1165	
	275	1.55	1.00	200	1450	
	400	1.55	1.00	300	1475	
	600	1.55	1.00	400	1500	
Silica-Phenolic (MX 2600) ²⁾	21	0.667	0.586	21	1088.6	1741.2
	171	0.679	0.587	171	1151.4	
	283	0.682	1.906	283	1233.4	
	371	0.685	1.934	371	1297.9	
	560	0.685	1.933	560	1663.7	

* K_w : with laminar direction

** K_a : across laminar direction

1) Journal of Composite Materials, Vol.26, No.2, 1992, pp.206~255.

2) NACA CR-72492

(AL2024) 판에 복합재료 프리프레그를 5mm 적층하여 접착하여 Hydroclave에서 성형한 것으로, 시편의 종류는 Carbon-Phenolic 프리프레그를 접착재 RTV560으로 접착한 C/P(RTV)시편, 접착재를 사용하지 않고 동시에 성형(cocuring)한 C/P(cocure)시편, Silica-Phenolic 프리프레그를 접착재 RTV 560으로 접착한 S/P(RTV)시편, 접착재를 사용하지 않고 동시에 성형한 S/P(cocure) 시편의 4종류이다. 복합재의 경화온도 및 경화시간은 80°C에서 1시간, 120°C에서 2시간 155°C에서 3시간의 순으로 유지하고, 승온속도는 분당 1~2°C, 냉각속도는 분당 2~3°C이며, 성형압력은 70kgf/cm²이다. 단열재의 열적물성은 Table 1에 보인 바와 같다.

2-2. 실험방법

실험장치는 Fig.2에 보인 바와 같이 측정센서, 가열장치, 데이터획득장치로 구성된다.

1) 측정센서

고온시험의 수행시 온도측정에 사용되는 센서로

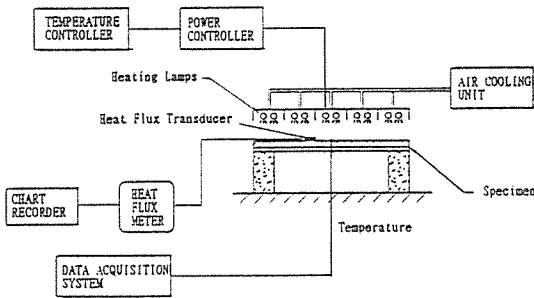


Fig. 2. Block Diagram of Set-up for Heating Test

는 열전대(Thermo-couple), RTD, 비접촉식 온도 계등 종류가 다양하나, 본 실험에서는 일반적으로 온도측정에 많이 사용되는 K Type의 열전대를 사용하였다. 시편의 온도구배를 측정하기 위해서 Fig. 1의 시편 상/하면 중앙에 각각 열전대를 부착하였고, 시편에 가해진 열류는 열류게이지(Heat Flux Transducer)를 단열재 표면에 설치하여 측정하였다. 사용한 열전대 및 열류게이지의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of Sensors

Thermo-couple	Type	Max. Temperature	Reaction Time	Wire Thickness	Manufacturer
	K Type	760°C	300msec	0.010"	Omega
Heat Flux Transducer	Model	Normal Output	Range	Manufacturer	
	GT-120-80-632	10mV at Full Scale	0-120 Btu/ft ² sec	Medtherm	

2) 가열장치

접착부위 열전달 특성의 추정이 용이하기 위해서는 시편의 두께방향 온도구배가 커야하므로, 본 실험에서는 짧은 시간에 높은 열류를 가할 수 있는 적외선 램프를 이용한 복사가열(Radiation Heating) 방식을 택하였다. 가열장치는 가열램프, Power Controller, 온도제어기, 냉각장치로 구성되며 장비의 사양은 Table 3과 같다.

가열은 온도제어기에서 입력전력이 설정되면 입력된 전력은 0-5V 전압으로 Power Controller에 공급되며, 최종적으로 Power Controller에서 램프의 전압을 조절하게 된다.

Table 3. Specifications of Testing System

Unit	Specifications
Quartz Lamp	- Power: 600 watts - Light Length: 24.8cm - Voltage: 480 volts - Total Length : 30.3 cm
Power Controller	- Input: 480 volts(45-65Hz) - Control: Input Signal Control - Cooling: Air Cooling
Temperature Controller	- Input: 18ch Analog - Output: 12ch Analog, 4ch Digital
Cooling Unit	- 8auto loops, 256 segments - Motor Current: AC 440V, 60Hz - Motor Power: 10HP

램프는 10개를 병렬 연결하여 델타 부하로 Power Controller에 연결하였다.

3) 데이터 획득

실험시 열류는 열류게이지, 온도는 열전대를 이용하여 측정하였으며, 측정데이터는 A/D 변환기를 거쳐서 500 Hz로 획득하였다. 본 실험의 수행에 앞서 실험시 부가할 열류의 설정을 위하여 시편이 연소되기 시작할 때의 열류를 예비시험을 통하여 측정하였다.

3. 해 석

3-1. 유한요소해석 모델링

복합재 시편에 대한 열전달해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/standard[8]를 이용하여 수행하였다. 시편의 두께에 비하여 폭이 넓고 구속되어 있지 않아 일차원 열전달 문제이나 단열재의 열전도도가 온도에 따라 일정하거나 선형적이지 않고, 열류도 초기에는 일정하지 않으므로 엄밀해(Exact Solution)를 구하기 어렵고 수치해석이 필요하다. 본 연구에서 수치해석 프로그램을 별도로 하지 않고 상용 프로그램을 이용한 것은 실험과 해석을 연계하여 구한 접착부의 열적특성을 실제 구조물의 해석에 적용하기 용이하기 때문이다. 해석모델은 Fig. 3에 보인 바와 같다. 모델링은 단

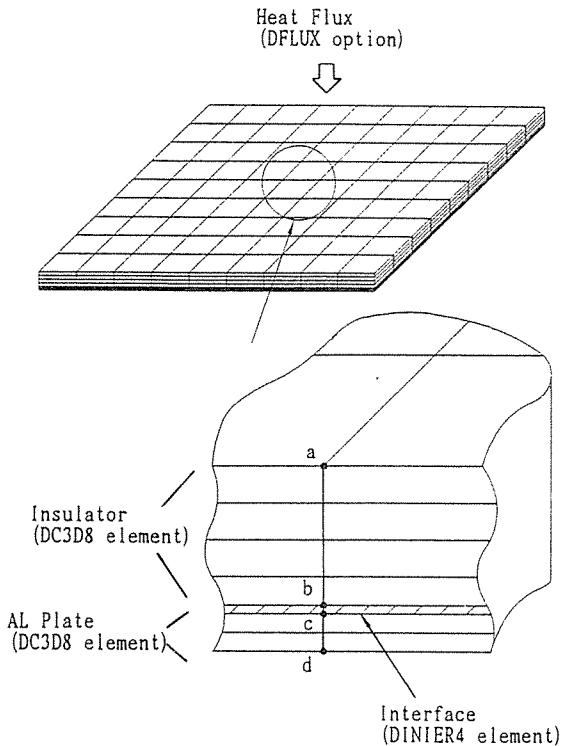


Fig. 3. Finite Element Model of the Test Specimen

열재와 알루미늄 판은 '3차원 8절점 열전달요소 (DC3D8 element)'로 접착부위는 '3차원 계면(Interface) 열전달요소(DINTER4 element)'로 구성하였으며, 열입력은 단열재의 표면에 단위면적당 '분포열류(DFLUX option)'를 시험조건과 유사하게 시간에 대한 table로 입력하였다. 해석모델의 초기 온도는 20℃이며, 외부는 단열조건이다.

3-2. 해석방법

1) 열입력량 계산

실험시 시편에 가한 열류를 열류계이지로 측정 하였으나, 실제로 시편이 흡수한 열량은 표면의 상태에 따른 흡수율(Absorbity) 및 외부로의 재복사(Reradiation)등으로 인하여 계측치 보다 낮다. 따라서 시편이 흡수한 열량을 계산하기 위하여 측정한 단열재의 표면온도를 해석모델에 온도 경계 조건으로 적용하여, 시편의 온도상승에 필요한 열

량을 계산한 다음 그 값을 해석시 열입력으로 적용하였다.

2) 접착부위 열전달특성

본 논문에서는 접착부위의 열전달특성을 대류열 전달에서의 Film Coefficient와 유사한 'Gap Conductance'[9]로 수치화 하였다. Gap Conductance를 다음과 같이 표현한다.

$$h = k / \delta = q / (T_A - T_B) \quad \dots\dots\dots (1)$$

h : gap conductance(W/m²℃)

k : thermal conductivity(W/m℃)

δ : effective gap thickness(m)

q : 계면의 상대절점 A에서 B를 통과하는 단위 면적당의 열류(W/m²)

T_A, T_B : 계면의 상대절점 A와 B의 온도(℃)

식(1)에서의 δ 는 계면의 특성으로 접착재의 물성 및 두께, 접합방법등의 접착부위 열전달 특성에 영향을 미치는 인자들을 포함하는 값이다. ABAQUS 프로그램에는 h 를 T_A 와 T_B 의 평균온도에 대한 테이블로 입력한다. 모델에서의 계면요소의 두께는 0.1mm로 각 시편에 대해 동일한데 이는 요소의 Gap Conductance가 절점의 거리와는 무관하기 때문이며, 만약 열응력해석에 모델이 이용된다면 실제 접착부의 두께가 모델에 적용되어야 한다. 본 연구에서는 Gap Conductance를 다음과 같은 과정을 거쳐 계산하였다(Fig.3 참조).

과정 1) 계면을 고려하지 않고 해석한다. $T_b = T_c$ 인 조건에서 해석하고, 표면온도 T_a 를 시험 결과와 비교하여 단열재의 열적물성이 적절함을 확인한다.

과정 2) 과정 1의 해석결과와 실험 결과로 부터 Gap Conductance를 구한다. 실험결과로 부터의 Gap Conductance는 식(1)에 측정치를 대입하여 다음과 같이 계산된다.

$$h = q_{b(exp.)} / (T_{b(exp.)} - T_{c(exp.)}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, 첨자 (exp.)는 측정치를 의미한다.

식(2)에 의하면 h 를 계산하기 위하여 시편내부의

온도와 열류를 측정해야 하지만, 실제로 계측하기가 용이하지 않다. 본 연구에서는 시편내부의 온도와 열류를 측정하지 않고, 과정 1.의 해석결과를 다음과 같이 적용하였다. 단열재의 열적물성이 적절하면 $q_b(\text{exp.}) \approx q_b$, $T_b(\text{exp.}) \approx T_b$ 이며, T_c 는 계면의 열적특성이 고려되지 않았으므로 $T_c(\text{exp.})$ 와 차이가 있다. 하지만 알루미늄판의 열전도도가 단열재에 비하여 100배 이상으로 매우 높고, 두께도 단열재에 비하여 상대적을 얇아 두께방향의 온도구배가 무시할 수 있을 정도로 작으므로 $T_c(\text{exp.}) \approx T_d(\text{exp.})$ 로 둘 수 있다. 따라서, 식(2)는 해석과 실험결과로부터 다음과 같이 대체된다.

$$h \approx q_b / (T_b - T_d(\text{exp.})) \quad \dots\dots\dots (3)$$

과정 3) 식(3)의 Gap Conductance를 해석모델에 적용하여 재해석 한다.

4. 결과검토

4-1. 실험결과

실험결과는 Fig.4와 Fig.5에 보인 바와 같으며, 그림에서의 결과는 0.02초 간격으로 획득한 데이터를 1초 간격으로 평균화 한것이다. 실험시 단열재 표면에 가한 열류는 100kw/m^2 를 일정하게 유지하였으며, 지속시간은 60초 정도이나 시편이 연소되는 시점에서 실험을 중단하였으므로 시편마다 차이가 있다. Fig.4는 RTV560으로 접착한 시편의 시험 결과로 C/P(RTV) 시편은 75초 부근에서 연소하기

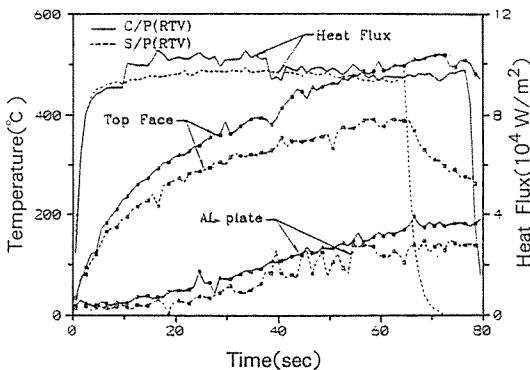


Fig.4. Test Results of RTV560 Bonding Specimen

시작하였으며, 최대온도는 단열재 표면 530°C , 알루미늄판 200°C 였다. S/P(RTV) 시편은 65초 부근에서 연소하기 시작하였으며, 최대온도는 단열재 표면 390°C , 알루미늄판 140°C 였다. Fig.5는 Cocuring한 시편에 대한 시험 결과로 C/P(cocure) 시편은 32초 부근에서 연소하기 시작하였으며, 최대온도는 단열재 표면 430°C , 알루미늄판 198°C 였다. S/P(cocure) 시편은 50초 부근에서 연소하기 시작하였으며, 최대온도는 단열재 표면 380°C , 알루미늄판 120°C 였다.

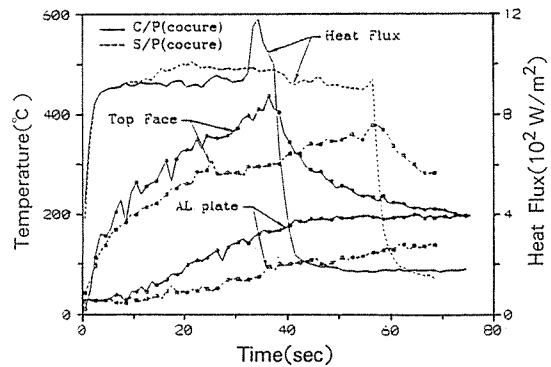


Fig.5. Test Results of Cocuring Specimen

4-2. 해석결과 및 검토

측정한 시편의 표면온도를 열전달해석의 경계 조건으로 적용하여 구한 시편의 열흡수율은 C/P(RTV)시편 75%, S/P(RTV)시편 65% C/P(Cocure) 시편 85%, S/P(Cocure) 시편 65%로 Silica-Phenolic이 Carbon-Phenolic 보다 단열재 표면에서의 열차단 효과가 좋음을 알 수 있고, 동일한 Carbon-Phenolic 시편에서 열흡수율이 차이가 나는 것은 단열재의 표면상태가 시편에 따라 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.6은 실험결과의 구조재 표면온도와 계면의 열전달 특성을 고려하지 않고 해석한 접착면에서의 온도 및 열류를 식(3)에 적용하여 접착면에서의 온도에 대한 Gap Conductance를 계산한 것이다. C/P 시편의 경우 C/P(RTV) 시편이 C/P(cocure) 시편 보다 접착면에서의 열전도도가 낮아 접착부위의 열차단 특성이 좋음을 알 수 있는데, 이는

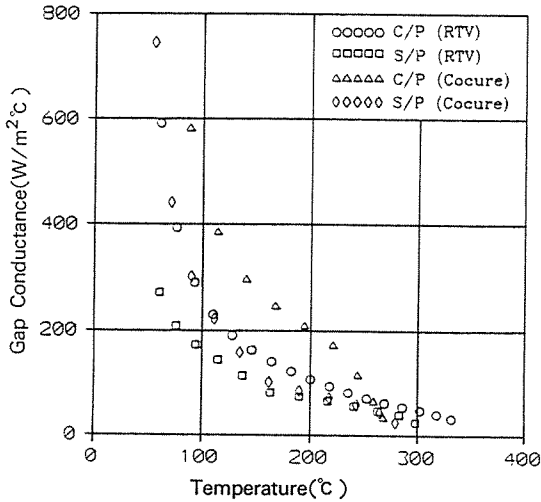
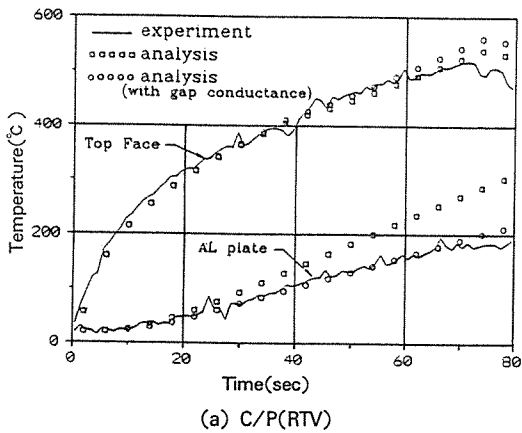


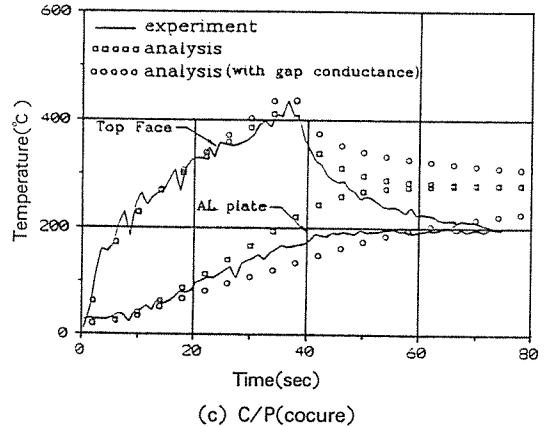
Fig. 6. Gap Conductance vs Bonded Face Temperature

RTV560 자체의 열전도도가 $0.3\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 로 페놀수지의 열전도도 $4.2\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 것이 주요인으로 판단된다. S/P 시편의 경우 S/P(RTV) 시편은 C/P(RTV) 시편과 유사한 값으 보이나, S/P(cocure) 시편은 C/P(cocure) 시편과 차이가 큰데 그 이유는 이후의 온도결과에 설명하였다.

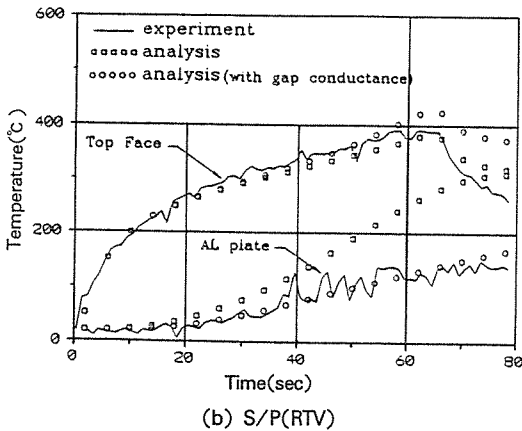
Fig. 7은 Gap Conductance를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대한 단열재 표면과 알루미늄 판의 온도결과를 실험치와 비교한 것으로, Gap Conductance를 적용한 해석 결과가 실험치와 유사함을 알 수 있다. 시편의 연소후에는 복합재의 층간박리(Delamination) 및 연소 연기로 인한 램프의 복사열 차단등으로 인하여 실험치가 해석치 보다 낮다. Fig. 7(d)는 S/P(cocure) 시편에 대한 결과를 보인 것으로 Gap Conductance를 적용하여도



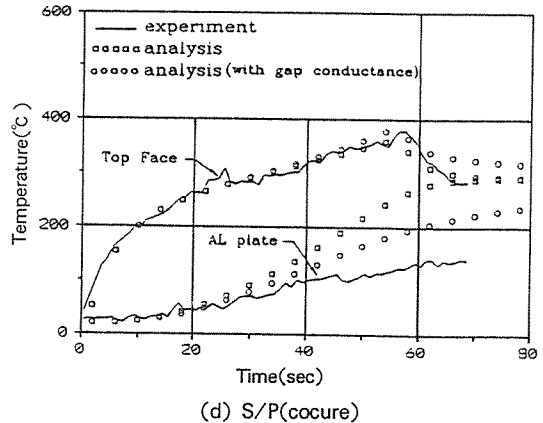
(a) C/P(RTV)



(c) C/P(cocure)



(b) S/P(RTV)



(d) S/P(cocure)

Fig. 7. Comparison of Temperature Results

알루미늄판의 온도가 실험치와 차이가 있는데, 이는 식(3)을 적용하기 위한 조건인 $q_{b(exp.)} \approx q_b$, $T_{b(exp.)} \approx T_b$ 가 만족되지 않았기 때문이다. 즉 Fig. 7 (d)에서 알루미늄 판에서의 해석온도가 실험치와 차이가 커지기 시작하는 30~40초 부근에서 열응력으로 인하여 단열재 내부에서 층간박리가 발생하여, 40초 이후에는 Table 1의 열적물성을 적용할 수 없기 때문이다. 따라서, Cocuring의 경우 접착면의 열적특성은 앞서 설명한 접착제의 열전도도 차이 등을 고려하면, Fig. 6에서 C/P(cocure) 시편의 결과가 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

(1) Carbon-Phenolic과 Silica-Phenolic 복합재료를 단열재로 사용한 평판시편에 대해서 내열시험을 수행하고, 센서 부착의 난점 및 시편의 손상등으로 인하여 실험만으로 측정이 어려운 접착부위의 Gap Conductance를 실험과 열전달해석을 연계하여 표면 온도의 측정만으로 계산하는 방법을 제시하였다. 또한, 제시한 방법으로 열응력에 인한 복합재료 단열재의 층간박리 등의 파손 시점을 추정할 수 있었다.

(2) 단열재와 구조재 접착부위의 열전달특성을 Gap Conductance로 수치화 하였으며, Gap Conductance를 해석모델에 적용하여 열전달해석한 결과가 실험시 측정된 구조재의 온도변화와 일치함을 확인하였다.

(3) 외부 열차단 방식의 구조물 설계시 단열재 접착부위의 열전달특성을 고려하지 않으면 구조재의 온도가 실제온도 보다 높게 계산되어 단열재를 필요 이상으로 사용할 우려가 있으므로, 항공기와 같은 경량화가 중요한 구조물에 있어서는 접착부위의 열전달 특성을 고려하여 설계해야 한다.

참 고 문 헌

1. Smith, W.F., *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill, 1988.
2. Blundell, D.J. and Willmouth, F.M., "Crystalline Morphology of the Matrix of PEEK-Carbon Fiber Aromatic Polymer Composites," *SAMPE Quaterly*, Vol.17, 1986, pp.50-57.
3. Veyret, D., Cioulachtijan, S., Tadrist, L. and Pantaloni, J., "Effective Thermal Conductivity of a Composite Material: A Numerical Approach," *J. of Heat Transfer*, Vol.115, 1993, pp. 866-871.
4. Nan, L.S. and Boyee, W.F., "Thermal Conductivities and Diffusivities of Graphite-Epoxy Composites," *AFWAL-TR-83-3002*, 1983.
5. Taylor, R.E., Shoemaker, R.L., Stark, J.A. and Koshigoe, L.G., "Thermophysical Property Testing using Transient Techniques", *AFOSR-TR-84-0869*, 1984.
6. Kuniya, K., Arakawa, H., Kanai, T. and Chiba, A., "Thermal Conductivity and Specific Heat of Copper-Carbon Fiber Composite," *NASA-TT-20172*, 1988.
7. Kilik, R., Davies, R. and Darwish, S.M. H., "Thermal Conductivity of Adhesive Filled with Metal Powders," *Int. J. of Adhesion & Adhesives*, Vol.9, No.4, 1989, pp.219-223.
8. *ABAQUS/standard User's Manual(ver.5.4)*, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1994.
9. Song, S., Yovanovich, M.M., Goodman, F.O., "Thermal Gap Conductance of Conforming Surfaces in Contact," *J. of Heat Transfer*, Vol.115, 1993, pp.533-540.