

特輯

페놀 컴포지트 실용화의 길 - 영국의 경우 (CASE STUDY 3)

How Phenolic Composites were chosen - In Case of England (3)

Kanemasa Nomaguchi*, Ken L. Forsdyke**, Denver E. Brown***

ABSTRACT

“Phenolic composites”, one of safety composites, was also chosen to build boats in England. One of the authors, Mr. Forsdyke and his researcher, Dr. Orpin describe how phenolic composites were chosen as construction material for marine application. The reader can get very good understandings from design point of view through this paper.

요 지

선박화재의 최근의 예는 1990년 4월 「스칸다나비아스타호」 158명 사망사고와, 1991년 4월의 「모베아프린스호」(이탈리아 선박)140명 사망 사고이다.

IMO (International Maritime Organization, 국제 해사협회)에서는 이 대책을 위해 법개정을 했지만, 이것은 한마디로 말하면 「불에 타기 쉬운 재료」에서 「불에 잘 타지 않는 재료」, 예를 들면 「페놀 컴포지트」(이하 PC라고 생략한다.)으로의 개선이었다. 본 보고서는 이 PC를 「선박주정」용 재료로써 설계 심사하도록 규정으로 정리했던 논문을 조사해서 보고한다.

1. 서 언

FRP시장 확대의 하나의 방향은 「화재에 대해서, 보다 안전한 FRP인, 페놀 컴포지트」의 실용화라고 하는 과제이다. 당 협회에서도 이에 대해서 위원회 활동을 중점적으로 하고 있고, 꽤 이전부터 이 협회지에서도 여러가지 형태로 논제를 채용하고 있다. 그리고 이 조사보고도 과거 2회, 영국의 경우로써 철도차량으로의 실용화 과정에 대해서 기재한 바 있다. 이번 호에서는 역시 페놀 컴포지트 선진국인 영국의 선박, 주정으로의 실용화에 대해서 정리하고 있다.

영국은 「철도의 나라」임과 동시에 「해운」의 국가이기도 하다. 일본과 동일한 「섬나라」이고, 사방이 바다로 둘러싸여져 있기 때문에 역사적으로 「조선업」이 성행했다. 오히려 일본이 일로전쟁의 일본해 해전에서 사용했던 주력전함 “삼립” 이하 5척은 거의 영국에서 건조되었던

것이다. 그리고 일본은 당초, 영국 조선기술의 영향을 받았던 것으로 보여진다.



Fig. 1

최근, 선박화재 혹은 북해 유전의 해상 구조물 (oil rig)의 대화재, 인명사고를 비추어 볼 때, 대책재료로써 PC가 영국에서 검토되어 채용되고 있다. 필자의 한사람, 포스다이크(Fig.1)씨는 페놀수지의 제조업체인, P.케미칼사에서 프로젝트의 리더로 있다. 그들은 앞 보고서처럼 「철도차량」용 PC재료를 개발 하는 것과 동시에 「선박주정」용 PC 재료도

개발하고 있지만 그 담당의 한사람, 오르핀 박사가 당시의 상황을 「설계심사」의 관점에서 정리하고 있다.

이번에 그 내용을 인용하여 「영국의 선박화재 대책」

* 플라스틱 사이클링 학회, The Japan Society of Plastics Recycling

** 원 B.P. 케미칼 社, Formally, B.P. Chemical Co.

*** Formally, GEC Alstom-Metro-Cammell Limited

과 PC와의 관계를 독자와 함께 개관한다.

본 내용의 일부는 1999년 10월 27일 행해진 제 27회 주정 기술 강연회(주정협회 주관)에서 보고한 바 있지만, 이번 본 협회지에 게재하기 위해, 필자는 오르핀 박사의 논문을 고쳐서, 자료를 추가 보완했다. 필자의 한사람, 포스다이크氏는 영국에서 많은 협력을 하고 있다. 제2장 이하에서 제 6장까지는 포스다이크 氏와 그의 공동 연구자의 논문을 번역해서 제시하고, 회원과 선박주정 관계자의 편의를 도모하는 노력을 했다. 이것은 일본, 더 나아가서 세계의 선박(船舶)계의 안전에 이어지는 것이 필자가 바라는 바 이다.

PC를 사용한 대형 여객선의 선실(Fig. 2)과 그 배의 외관(Fig. 3), 또 PC를 이용한 오일-리그(Fig. 4), 그 오일-리그의 바닥(그리드)(Fig. 5)를 제시한다. 출처는 모두 B.P.케미컬 사의 팜플렛에서 인용 하였다.

2. PC의 특성

2.1 배경

페놀수지는 가장 오래된 합성수지이다. 20세기 초기에 발명되어, 처음으로 상품화되어 사용되고 있다. 이 전통적, 전형적인 열경화성 수지는 통상 140~180℃에서 가열·가압해서 성형하고 있다. 이 수지는 내열성이 있기에 많은 분야에서 용도를 확대하고 있다. 성형재료, 공업용·화학용의 적층판, 배선판, 그라인더의 회전과 돌, 주조용 형의 바인더, 마찰재료의 바인더 등이다.

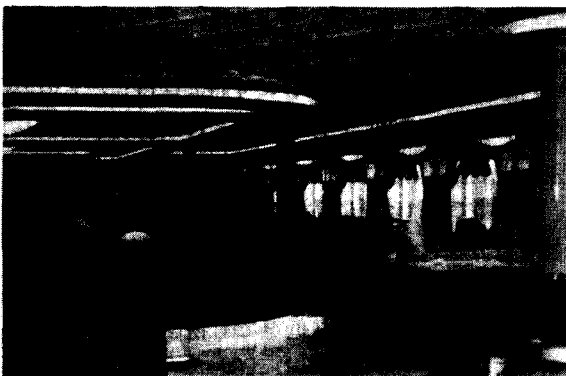


Fig. 2 PC를 사용한 대형여객선의 선실.

1970년대의 말 무렵, 페놀수지의 일종인 「레졸」산(酸)계의 촉매를 더해서 비교적 저온저압에서 경화시키는 방법이 사용되기 시작하였다. 그리고 오늘에 이르기까지 여러가지 기술개발이 행해지고, 다음의 여러 가지 성형법에 대응하는 원자재가 상품으로써 판매되고 있다.



Fig. 3 PC를 사용한 대형 여객선(Fig. 2 의 외관).



Fig. 4 PC를 사용한 오일리그.

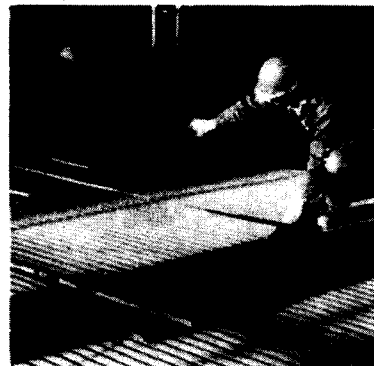


Fig. 5 오일 리그의 바닥(그릿).

즉, (1) 핸드레이 성형법 (2) RTM 성형법 (3) 가열·가압 성형법 (4) FW 성형법 (5) 연속 성형법 (6) 진공주입 성형법 (7) 인발 성형법, (8) 스프레이 업 성형법 (9) 진공 백 성형법 등이 그것이다.

이에 더해 프리프레그 성형법 용의 수지와 촉매도 개발되어, 새로운 소위 「제2세대의 페놀수지」가 차례차례 나오고, PC 실용화의 개막이 본격 시작되었다.

경화된 PC는 적갈색이 되고, 안료를 착색해도 색상은 여전히 불안정하다. 결국, 미관이 중요한 경우 페인트 도장을 하지만, 연소에는 본질적으로 문제가 없는 것을 이용한다. 또 요변(搖變)성의 페놀수지 서펄스 베스트를 이용한 도장성이 좋은 기초를 만드는 것도 가능하다. 현재는 PC에 착색 도장을 잘 한다면 목적하는 미관을 얻을 수 있고 내구성도 좋다. 그 외, 여러 가지의 기술이 개발되어 있지만 자세한 내용은 생략한다.

2.2 물리적 특성

이것에 관해서는 이미 많은 문헌이 있다. Table 1에 기본적 특성의 데이터 예를 나타냈다. Table 1의 데이터를 포함해, 여러 가지 데이터를 모아 “PC 설계 가이드”도 발행하고 있다. 일반적으로 말해서 PC의 기계적 강도는 불포화 폴리에스테르 수지의 FRP와 거의 같은 정도를 보이고 있다. 그래서 중량에 관해서도 양자는 같은 정도이며, 단지 PC는 내연소성이 있는 것으로 되어있다.

최근, 데트·노르스케·베리타즈의 연구소에서 얻은 자료에는 피로성에 대해서 선박용 이소프탈 산(酸)계 불포화 폴리에스테르 수지 FRP와 비교해서 거의 동일 레벨이라는 결과를 얻고 있다. 또, 다른 연구소에서 얻은 데이터에서 불포화 폴리에스테르 수지, 에폭시 수지, 비닐에스테르 수지, 메타클리레이트 수지와의 동등 이상의 내충격 강도를 PC가 보여주고 있다. 복합재료의 특성은 사용하고 있는 강화재에 따라 큰 영향을 받기 때문에 그 점을 충분히 고려하지 않으면 안 된다.

결론으로 PC는 다른 여러 가지의 수지를 이용한 복합재료와 동일 수준이며, 단 화재 안전성이 우수하다는 것이다. PC와 금속과의 비교는 제3장에서 서술한다.

2.3 고온도·저온도에서의 PC 재료 특성

PC는 일반적으로 FRP와 비교해서 상온에서는 대체로 동등 하지만, 다른 FRP가 75~125℃에서는 강도 저하가 되는데 대하여 200℃정도까지 충분히 좋은 수치를 나타낸다. 열변형 온도는 250℃(측정법은 BS2782 Pt 121A)이지만, 유리 함량 30중량%인 것은 250℃에서 4시간 유지하여 인장 강도 유지율이 70% 수준이다. 자동차 엔진의 Heat Shield(열방패)-차열판에 사용한 예가 있다. 단시간 사용한다면 고온도 가능하고, 미국 포드 사에서는 유리함량 50중량%의 PC가 300℃에서 인장길이 유지율이 70%라고 보고하고 있다. 이것의 결과를 Table 2에 제시했다. -40℃같은 저온에서도 물리적 특성은 좋은 수치를 나타내고 있다.

2.4 열적 특성

PC의 유리 함량(중량)이 증가하면 열팽창률은 내려가며, 열전도율이 올라가는 경향이 있다. PC의 열팽창률이 강철이나 알루미늄의 수치를 포함하고 있기에 PC를 금속에 접합해도 걱정은 없다. 페놀수지의 화학구조를 고려할 때 DMTA로 PC의 유리 전이점(Tg)을 측정하는 것은 불가능하다.

Table 1 PC의 물리적 특성

PHENOL GRP-Physical Properties (35-45% Glass as CSM=Chopped Strand Mat)	
Density (밀도)	1.4-1.6×10 ³ kg/m ³ (min.)
Thermal Conductivity (열전도율)	0.20-0.24 W/mK
Coefficient of Linear Thermal Expansion (열 팽창율)	10-15×10 ⁻⁶ /℃
Calorific Value (연소 열량)	13×10 ³ KJ/Kg
Heat Distortion Temperature (열변형온도)	250℃
Surface Resistivity (전기저항)	10 ⁹ Ohms (10 ⁵ Ohms @ 1% carbon black)
Shrinkage in Cure (경화수축률)	0.2-0.3% (in plane) 1.5-2.0% (perp. to plane)
Water Vapour Permeability (증기투과율)	11g/mn/m ² /24hrs
Flexural Strength (굴곡강도)	150-230 MN/m ²
Flexural Modulus (굴곡탄성률)	5000-7500 MN/m ²
Tensile Strength (인장강도)	90-150 MN/m ²
Tensile Modulus (인장탄성률)	5000-6000 MN/m ²
Elongation @ Break (파단시 신장률)	1.8-2.5%
Izod Impact Strength (아이조드 충격강도)	550-750 J/m

(출처) 영국 BODY 사

Table 2 고온도·저온도 PC의 재료 특성 (강도 유지율(%)) (유리함량 50중량% RTM 성형품, 자료는 미국 포드사 제시) [% Retention of physical properties of phenolic/glass composites at high/low temperature] (50% Glass RTM Laminate -Ford Motor Co. USA)

Property (특 성)	Tensile Strength (인장길이)	Tensile Modulus (인장탄성률)	Compressive Strength (압축강도)	Compressive Modulus (압축탄성률)
Exposure to 300℃ (300℃ 유지)	73	89	56	90
Exposure to -40℃ (-40℃ 유지)	114	101	117	105

2.5 내 환경성 (내후성)

축진시험과 현장 폭로시험에서 많은 자료가 발표되고 있다. 이 요점을 Table 3에 나타내었다. 결론으로서, 실험의 범위에서 PC는 특별한 문제점은 없다. 내 약품성 적인 견해에서 보아도 우려할 점은 없다고 보여진다. 또 내 세균성과 방오(防汚)성도 좋다. PC에 고기능성 저 발연성의 도료를 도장한다면 내구성과 색상 보존률, 내약품성 등도 문제가 없다. Table 4에 파워더 코팅한 알루미늄과 멜라민으로 도장한 PC를 비교해서 나타냈다.

Table 3 내환경성(내노후성) 데이터 예 (PC 성형품의 기계적 강도 유지율)
(% Retention of physical properties in environmental testing of phenolic/glass composite)

물 성	굴곡 강도	굴곡 탄성률	인장 강도	인장 탄성률	파단시 신장률	압축 강도	압축 탄성률
1000 hrs Salt Spray (BS 3900) (염수 분무)	86	98	-	-	-	-	-
1000 hrs Humidity (BS 3900) (습윤)	84	100	-	-	-	-	-
1000 hrs Weathering (BS 3900) (내후성)	95	109	-	-	-	-	-
15 Cycles Freeze/Thaw (동결 융해)	92	92	101	104	86	-	-
250 hrs Salt Bath @ 80°C (염수조)	-	-	90	94	-	94	97
300hrs Water Soak (수분 흡수)	-	-	84	97	-	97	100

2.6 내수성

선박에 이용하는 복합재료로서 선박이 물에 직접 접촉하는 관계상, 내수성은 중요한 특성이다. 이 분야에서 과거 30년간, 불포화 폴리에스테르 수지와 에폭시 수지의 복합재료가 소형 카누와 요트, 최근에는 탐광선과 고속 페리의 선체에 사용되어 왔다. 물은 FRP에 대하여, 침투압 현상과 물이 유리섬유에 침투하는 위킹(wicking)이라는 현상이 우려될 수 있으나 실제로는 그러하지 않다.

PC용의 페놀수지는 원래 수분을 함유하고 있으며 경화 후조차 0~4 중량% 평형 상태로 함유되어 있다. 즉 PC는 물을 흡수하거나 방출하거나 하지만 물리적 특성에는 그다지 큰 영향을 주지 않는다. Fig. 6에는 수분 함량과 굴곡강도, 층 사이의 전단강도와의 관계를 나타낸다. 유리함량은 35중량%(CSM=Chopped Strand Mat.)의 PC이며 70°C 수중에 4개월 침적(浸漬)했다.

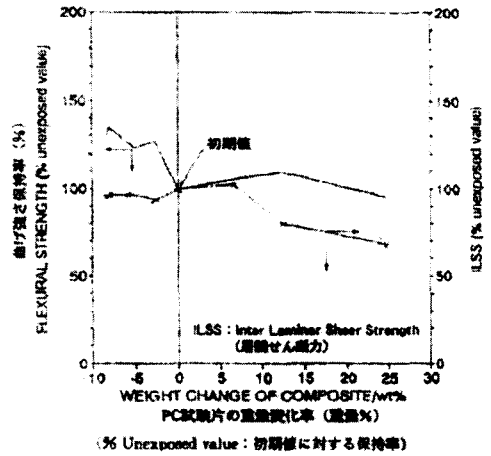


Fig. 6 PC 중의 수분함량과 기계적 강도 유지율과의 관계.

불포화 폴리에스테르 수지, 에폭시 수지, 비닐 에스테르 수지도 동일한 테스트를 했지만, 자료로서는 조금 가혹해서 신뢰성이 있다고는 말할 수 없지만, 거의 동일 수준이라고 판단되고 있다. 마찬가지로 동결 융해 시험도 수행했지만 별 문제는 없다.

2.7 화재, 연기, 독성의 문제

PC의 본래의 이점은 화염에 대한 특성이 우수한 것이다. 예를 들어 유리함량이 35중량%의 PC는 산소지수가 55% 이상이고, 이와 같은 특성은 수산화 알루미늄을 많이 사용해도 좀처럼 이를 수 없다. PC를 강제적으로 연소시키는 엄격한 조건 하에서의 현상에 관해서도 많이 연구되고 있는데 PC의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 화염 전파성이 없다
- (2) 극히 낮은 발연성
- (3) 극히 낮은 독성가스의 발생.
- (4) 연소 발열량이 적다.
- (5) 연소 시, 가연성 가스를 발생하지 않는다.

이러한 특징은 유기물의 구조용 재료로서는 PC가 유일한 내화재료로서 각 국의 규격에 맞다고 판단할 수 있다. 어떤 다른 성분을 첨가하지 않아도 자체만의 특징이 있기에 설계 상 매우 유리하다.

Table 5에서 방화기준과 PC의 자료를 대조해서 제시했으며 이 PC의 자료는 최저 시(즉, 수지함량이 최고 많은 경우)의 자료이다. 수지함량을 낮게 하면 당연히 더 좋은 결과가 나온다. 따라서 PC는 여러 나라의 엄격한 방화기준에 합격 가능하다고 생각한다.

Table 4 각종 도장방식과 내구성 내후성 테스트 결과 비교
(Comparison of durability & weathering performance of various finishing options)

물 성	PC Colour Modified Polyester Gel Coat (phenolic substrate)	30% Gloss Powder Coat (Syntha Pulvin) (aluminium substrate)	30% Gloss PU/acrylic paint (AP211+AE 265/9 ex Trimite) (phenolic substrate)	Melamine-faced Board (LUL approved)
Scratch Test (경도시험) BS 3400 Part E2	Pass 3000g	Fail 2500g Pass 2000g	Pass 3000g	Pass 3000g
Adhesion (접착력) BS AU 148 Part 3	0/0 Excellent	0/0 Excellent	0/0 Excellent	0/0 Excellent
CHIP TEST (칩 테스트) BS AU 148 Part 15	Very slight chipping	Slight/moderate chipping	Slight chipping	Very slight chipping
ABRASION (TABER)(마보) BA AU 148 Part 4 (1000g, 1000cycles CS 17 wheels)	48 mg loss	80 mg paint loss	80 mg paint loss	40 mg loss
GRAFFITI RESISTANCE (낙서 시험) (LUL Test)	No effect after 10 cycles	Staining after 7 cycles	No effect after 8 cycles	No effect after 8 cycles
Impact Test (충격강도) BS 3900 Part E3	Slight cracking	No effect	-	-
Humidity (습윤시험) BS 3900 Part F2	No effect	No effect	No effect	No effect
HOT SALT SPRAY (가온 염수 분무) ASTM B 117	No effect	No effect	No effect	No effect
WATER SOAK(수분흡수) BS 3900 Part F7	No effect	No effect	No effect	No effect
QUV WEATHEROMETRY (내후성 시험) (QUV-B on 80% gloss white gel coat)	ΔE of 3.88 after 1000 hrs. exposure	-	$\Delta E < 0.5$ and $< 10\%$ loss of gloss after 1000hrs. exposure	No effect
FREEZE/THAW CYCLING (동결 융해 시험)	No effect	No effect	No effect	No effect

All the above tested using J 2027 L+5% by weight Phencat 10 to make a 3mm thick laminate (glass content 35%).

Unless otherwise indicated performance relates to an un-painted panel.

Note : Increasing glass content or laminate thickness will improve fire properties further. (출처:영국 BODY 사)

앞에서 기술한 바와 같이 PC 이외의 여러 가지의 복합 재료로 화염 전파성 혹은 연소의 문제가 해결 가능하지만, 그것 때문에 중량 증가(난연제의 첨가에 의해 기계적 강도 개선을 위한 두께의 증가)나 독성가스의 발생도 우려되고 있다. 따라서 겨우 합격하더라도, 또 새로운 기준이 강화되면 합격될 수 없을지도 모른다.

이것은 다음의 글에서 좋은 예가 되고 있다.

영국의 BS 6853(1987)의 경우, 난연 폴리에스테르(화염 전파의 기준 BS476 Pt7 등급1에 합격)의 발생 연기량이 도장한 PC의 100배의 수준이라고 발표된 사례가 있다. 이 BS 6853은 영국내의 지하철에 적용되고 있지만 거기에서 최근 지상주행의 열차에도 적용되어 있다. 실제로 「시인성 (눈으로 보고 확인하는 정도)」의 관점에서 난연 폴리

에스테르는 200mm의 두께라면 PC는 불과 20mm라는 차이가 나타나고 있다.

PC 이외의 복합재료에서 나오는 연기와 유독가스는 화재의 경우 극히 치명적이다. 잘 알려진 예로써, (1)런던 지하철의 Kings cross역 사건, (2)맨체스터 공항사건 (3) 스칸디나비아 스타 페리 사건이 있다.

(3)은 본 보고와 관계가 깊다. 하지만 여기 (1)-(3)의 예 이외의 예도 포함해서 수송 기관과 공공장소의 위험성을 제시한 예는 많으며 종합하면 다음과 같은 결론으로 정리할 수 있다.

“유기물은 화재 시 대량의 연기를 발생하고, 따라서 도파하는 것은 무리이며, 혼란 상태가 가중되고, 연기 중의

Table 5 각종 방화기준과 PC 특성과의 비교(Fire performance of a phenolic composite)

Test (각종 방화기준)	Fire Properties Measured								
	Ignitability	Ignitability Direct Flame	Rate of Heat Release	Effective Heat of Combustion	Total Heat Released	Flame Spread	Smoke Dynamic	Smoke Cumulative	Toxic Gasses
Oxygen Index BS2782 (method 141) ASTM D 2863 NES 714	> 55%	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperature Index	> 420℃	-	-	-	-	-	-	-	-
Small Flame (Bunsen)	-	UL 94VO	-	-	-	-	-	-	-
BS 476 Pt6	-	-	I <6 L <12 (Class 0)	-	-	-	-	-	-
BS 476 Pt7	-	-	-	-	-	Class 1	-	-	-
Cone Calorimeter	-	-	128kW/m ² Qe 50kW/m ²	22.3MJ/Kg	-	-	SEA 182m ² /Kg Qe 50kW/m ²	-	-
IMO surface Flammability A 16/Res. 653	Pass, Bulkhead, Wall & Ceiling Linings	-	Pass, Bulkhead, Wall & Ceiling Linings	-	Pass, Bulkhead, Wall & Ceiling Linings	Pass, Bulkhead, Wall & Ceiling Linings	-	-	-
NT Fire 004	-	-	<Curve 1	-	-	-	-	Light Absorption <2% Full Deflection	-
OSU Calorimeter	-	-	26kW/m ² Painted	39kW. min/m ²	-	-	-	-	-
BS 6853 Smoke 3m Cube Test	-	-	-	-	-	-	-	Ao On <1.0 Ao Off <1.5 Category 1	-
BS 6853 Toxicity R Value	-	-	-	-	-	-	-	-	Index <1.0
NBS Smoke Box ASTM E 662	-	-	-	-	-	-	-	DM NF 55 F 91	-
ATS 1000.001	-	-	-	-	-	-	-	Ds 1.5 mins 5 4 mins 25	Pass
NES 711	-	-	-	-	-	-	-	Smoke Index 4	-
NES 713	-	-	-	-	-	-	-	-	Index <5
NF F 16-101	-	-	-	-	-	MI	-	-	F1
Brandschacht	-	-	-	-	-	B1	-	-	-
ASTM E 84	-	-	-	-	-	FS Index 5-10	-	-	-
ASTM E 162	-	-	-	-	-	FS Index 2	-	-	-

유독가스가 빠르게 확산되어 치사상태가 된다. 앞에서 기술한 재해사건 예에서도 사람들은 자신이 어디가 어딘지 몰라 대부분은 출구 가까운 곳에서 사망하고 있다"는 기록이 있다.

PC의 경우 탄다고 하더라도 주로 이산화탄소(탄소가스)와 수분이 주체이고, 거기에 약간의 일산화탄소와 촉매 잔사의 산화물이다.

단열성의 고분자 재료의 방화성능에 관해서도 검토되고 있는데 발포체와 skin층의 샌드위치 재료가 제작사용되고 있다. 근해의 해양 유전의 구조물의 규제에 「H120 화재/폭발방호 패널(폭발 후 염화수소 화합물의 연소)」라는 것이 있으며, 2시간 내화(耐火)로 되어 있다.

유사한 용도로 PC샌드위치 패널이 사용되어 공공 수송의 숙박시설의 단열과 보호. 혹은 알루미늄의 구조부품의 보호 용도로 사용되고 있다.

고분자의 복합재료는 선박 등에 넓은 범위의 용도에서 많은 우수한 이점을 제공하고 있다. 하지만 화재와 내열성에서 문제가 있다.

PC는 이러한 불리한 점 없이 유리한 점만을 이용하는 것이 가능한 재료이다.

페놀수지의 개발 당초, 일부에서 이 수지는 약간 약한 것은 아닌가 하는 말이 있었다. 최근에도 선박 관계에서 그러한 견해의 논문이 발표되고 있지만 수지를 적절하게 사용한다면 그러한 염려는 없다.

3. PC와 금속 재료와의 특성 비교

복합재료는 본질적으로 이방성(anisotropic)이며, 재료의 어떤 특정영역과 축 방향으로 특정한 특성이 있으며 그러한 점을 고려하여 설계·제작되고 있다. 따라서 금속재료와 같은 소성변형을 복합재료로 하지 않는다. 그리고 선정한 강화재의 특성과 방향성에 따르지만 재질 파괴까지의 응력-변형 곡선은 거의 직선적으로 되어 일정한 기계적 강도와 탄성률을 나타낸다.

본 장에서는 「선박·주정」 용도를 고려하여, 금속과 비교하면서 페놀수지를 이용한 복합재료(PC)의 특성을 항목별로 살펴본다.

3.1 밀도/중량

PC의 밀도는 1.4~1.9g/cm³ 이고, 알루미늄의 50~70%, 탄소강의 18~25%이다. 만약 PC에 유리섬유 대신 탄소섬유를 이용한다면 더욱 가볍게 된다.

3.2 열전도율

PC의 열전도율은 0.20-0.24W/mK 정도이다. 알루미늄의 750배, 철강의 200배 열을 전하기 힘들며 단열성이 있다. 화재의 경우, 이것은 금속에 있어서는 큰 불리한 점이며 「방화격벽」과 「내장(안감)」에 이용하는 것은 설계 상 어렵다.

알루미늄 합금은 또 저용점(600-700℃)이라는 문제점이 있으며 그 용점에서 타기 시작하는 것은 포크랜드 전쟁 시에 체험했다. 그리고 알루미늄은 300℃에서 강도가 급격히 저하하는 것도 알려져 있다. 이 2가지 점에서 화재 시 알루미늄 부재보다 PC가 유리하다는 말은 설득력이 있다.

3.3 부식/내약품성

강철도 알루미늄도 일반 환경에서 차단하여 적절한 도장으로 방식처리하지 않으면 부식한다. 해양의 염수라는 환경조건은 일종의 엄격한 화학약품 부식이라고 말할 수 있다. PC는 이 점에는 문제가 없으며 이것에 관해서는 앞에서 검토한 바와 같다. Table 4에 나타낸 것과 같이 염수 침지를 해도 특히 부식의 문제는 전혀 없다.

3.4 중량에 맞는 기계적 강도

기계적 강도에서 PC는 강철과 알루미늄의 항복점보다 우수하지만 금속의 장점은 굽힘, 인장의 저항에 있어 탄성률이 좋은 것이다. 같은 특성을 PC에서 얻기 위해서는 두께를 증가 할 필요가 있다. 이것은 PC가 경량이라는 관점에서는 불리한 것이지만 피할 수 없다. 하지만 복합재료 설계에서 유연함 점이 있으며, 예를 들어 「경량 샌드위치 구조」로서 강성을 증가하고 경량화 하는 것이 가능하다. 탄소 섬유를 단독 혹은 유리섬유와 혼합해서 사용한다면 탄성률을 높이는 것도 가능하다.

Table 6에서 철강과 알루미늄과 동일 굽곡강도와 인장강도를 나타낸 PC의 중량, 그리고 같은 하중의 것을 운반하는 PC의 중량을 나타냈다. 설계 상 필요한 자료가 DATA BASE화 되어 있으므로 그것을 참고하면 된다. 중요한 것은 금속의 경우와 PC와는 전혀 다른 특성이 있기에, 예를 들어 동일한 용도가 있어도, 설계 당초부터 전혀 새로운 방법, 순서대로 판단해서 이해득실과 한계를 이해한 후 설계할 필요가 있다.

3.5 설계상의 자유도 (설계의 유연성)

고분자 복합재료는 금속재료보다 설계상 크게 유연한 점(설계의 자유도)이 있다. 앞에서 서술한 여러 이점을 달리한다 해도, 복합재료 특성항목을 조정해서 요구 특성에 대응 가능한 것이다. 예를 들어 부품 설계에서 동일한 특성을 요구하는 경우는 그와 같이 동일하게 설계하고, 또

부품의 일부분에서 특히 내하중 특성과 강성이 요구 될 때에는 그에 대응하여 설계 가능하다. 강화섬유의 특성, 섬유길이, 방향에서 강도를 조절하거나, 다른 재료를 복합 재료에 포장하는 방법, 혹은 또 발포체, 코아 매트, 금속류와 마이크로 스피어 등의 특성을 첨가하는 것도 가능하며 이것이 설계상의 유연한 점이다.

Table 6 금속과 PC와의 비교 (steel을 1로 기준 함)
(동일한 기계적 강도 즉, 인장강도 또는 굴곡강도 그리고 동일한 중량의 하중을 받는 재료의 중량)
(Comparison : weight/performance between metals & GRP composite)

Material	Comparable Weight To Give		
	Same Resistance To Elongation	Same Resistance To Bending	Same Load Carrying Capacity
Steel	1.0	1.0	1.0
Aluminium Alloy	0.8	0.4	0.7
PC Unidirectional Rod (70%wt glass, pultrusion)	1.2	0.4	0.2
PC Fabric Laminate (60%wt glass, RTM)	2.5	0.5	0.5
PC Chopped Mat Laminate (35% glass, e.g.hand-lay)	5.7	0.6	0.9

이러한 예로서 철도차량의 의자를 RTM으로 제작한 경우가 있다. 강화재와 페놀수지 폼 코아(강성 있고 경량)를 콘티니우스 필라멘트 유리섬유 (CFM)로 짜서 프리 폼 한 것을 주체로 한다. 하지만 이 의자에는 고하중과 내피로 특성이 요구되며, 거기에는 가장 응력이 걸리는 부분에는 한 방향으로 묶어 유리 섬유를 배치해서 성형했다. 제품의 의자를 마루에 고정하고, 100kg의 하중을 의자의 등에 20만 번 반복해 부하시켜도 충분히 문제없이 합격했다.

금속의 경우, 용접이라든지 접합을 하지 않으면 성형이 곤란하고, 특히 복잡한 형상으로 성형 가공하는 방법은 고가의 금형과 스탬핑 기(機)가 필요하다. 이 방법은 가격은 별도로 하여도 금속판의 끝 부분을 얇게 해야한다. 3차원 소성가공에 따라 길게 늘어난 상태가 되어, 결국 그 부분이 약하게 되는 것은 피할 수 없다. 복합재료를 이용한 성형가공은 이러한 점에서 유연한 점(자유도)이 있다.

3.6 금속을 PC로 했을 때의 경제적 이점

앞의 3.5에서 서술한 것과 같은 부품의 생산은 원샷 프로세스(일발 공정)로 가능하다. 이것이 금속이라면 금형(金型)은 고가이며 용접·접합도 비싸게 치인다. 따라서 금속성형의 여러 가지의 금형들은, 복합재료 성형의 경우 하나의 형에 통합되는 것이 가능하다. 또한 상대적인 형틀의 가격이 저렴하여 설계 변경도 용이하고 단기간 생산

도 비교적 용이하다.

탄소강에 비교하여 복합재료가 중량과 원가의 점에서 유리하다고 하나, PC의 경우 금속의 대체가 아닌 복합재료 자체의 설계상의 이점을 충분히 살려서 성능과 원가 이익을 도모해야 한다.

3.7 피로 특성과 내충격 강도의 특성

3.4에 금속과 PC의 재료 특성의 차이를 서술하였지만, PC와 금속부재를 조합한 부분에는 피로수명을 저하시키는 것은 아닐까 하는 의문이 생긴다. 예를 들어 배의 선체와 상부 구조와의 사이의 접합면에서, 재료의 고 탄성률에서 오는 응력 발생이 우려될 수 있다.(Fig. 7)

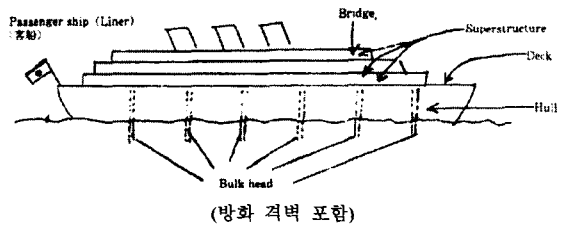


Fig. 7 선박 주경의 주요 부분 명칭(포스다이크 씨의 해설).

하지만 실제로는 반대로, 복합재료(상부구조)/금속(선체) 사이에는 응력이 거의 무시 가능한 정도로 작다는 것이 비교 검토 연구 결과 판명되고 있다. 이 결과는 좋게 평가되어 세계적으로 이 관계의 연구소에서 재평가되어 이용되고 있다.

일반적으로 FRP 복합재료는 금속보다도 좋은 피로 특성을 나타내고 있다. 그것은 앞에 서술한 것과 같이 복합재료의 응력-변형 곡선이 직선적인 움직임을 나타내는 것에서 온 것이다. 이것은 복합재료 중의 강화재인 섬유에 하중이 분담되어 있는 것, 그것 때문에 결과적으로 우수한 내충격 강도도 얻을 수 있다. 그리고 이 이유는 매트릭스 수지와 강화재와의 내면 사이 부분이 crack-stopper(균열방지)로 사용되고 있다고 생각된다. 이 특성은 복합재료의 많은 용도에 활용되며, 예를 들어 방탄 판넬 등이 그 한가지이다.

페놀 수지 매트릭스는 미세구조의 독립성의 작은 공간(3~6 마이크로)을 포함하고 있다. 그 안에 물이 있고, 일종의 고정적 유액으로 함께 되어 있다. 이 공간은 육안으로 보이지 않으나, 균열방지 역할을 하거나, PC의 내충격 강도의 성능에 기여하는 것으로 보인다. 이런 견해는 종래의 가열 경화형 페놀수지와 대비. 검토 연구에 기인한다. 페놀수지의 피로특성과 내충격 강도의 특성은 다른 매트릭스 수지와 비교해서 적어도 동등 이상이라고 말할 수 있다.

3.8 AE 특성의 개량

AE(acoustic emission)의 특징에 관해서는 비교적 저밀도이기에 PC재료는 금속과 같은 음파 흡수 능력의 효과는 없다. 3mm 두께 적층판에 대하여 100-320Hz로 22dB의 흡음성을 나타낸다. 불연속 기포의 코아재는 복잡한 형상의 PC 구조부재에 비교적 용이하게 사용되고 있으며 또 진동과 소리를 부드럽게 하는 효과가 있다.

3.9 레이더/소나 투명성

FRP 복합재료는 금속 성분이 없어 본질적으로 레이더파, 소나파, 라디오파를 잘 투과시키고, 투명성이 좋다. 선박관계, 해양관계에서 그 특징은 매우 유리하며, 중요한 특성이 있다. PC는 배의 함교(艦橋)와 무선실에 이용, 그리고 화계에 관해서 완벽한 재료라는 장점이 특징이다.

3.10 저렴한 관리·유지

고분자의 복합재료는 탁월한 내구성이 있으며, 내환경성(내후성)과 피로 열화 특성이 우수하여 저렴한 관리·유지비가 특징이며 금속보다도 유리하다

4. PC재료의 여러 용도에서 실적

1983년 이후, 앞에서 서술한 것과 같이 PC재료는 선박·주정관계를 포함한 여러 가지 용도로 실적이 알려지고 있다. 그 대표적인 예를 Table 7에서 나타낸다.

철도차량과 항공기의 적용된 설계·제작의 기준 등은 또 배(船)관계, 특히 크루즈나 페리 등에도 동일하게 적용되는 경우가 많다.

4.1 선박 관련 용도 개발의 현상

PC를 배에 이용한 것도 영국이 최초이다. 1980년대의 초기, 영국 해군의 잠수함의 부품으로써 여러 곳에서 사용되었다. 이것은 「NES 705 방화성능 기준 A항」에 적합한 재료로써 채용되었기 때문이었다. 또 관광용 잠수정의 내장재, 락커, 배터리 박스에도 채용되어, 현재도 이 잠수정은 카리브 해와 핀란드 주변에서 사용되고 있다. 그 후, 도장한 PC가 「놀즈 케베리타스」보다 「표면 화재 전파성」이 낮은 안전한 재료로서 인정되어, 철강선과 해양 구축물에 사용하는 것이 가능하게 되고, 1991년 노르웨이에서 건조된 고속 페리 내장재(창 주변의 내장, 락커 등)에 채용되었다. 현재도 이탈리아에서 여객선의 사이에 칸막이 벽에 알루미늄 허니콤 코아가 들어있는 PC가 채용되어, 경량성, 차음성, 단열성에 우수한 PC(페놀 폼 충전/허니콤 코아)의 수요가 증대할 것으로 예측된다.

이러한 영향으로 미국에서 건조된 미시시피 강의 증기선과 구마·스칸디나비아 여러 나라의 대형 크루저 요트, 고속 페리의 주요 승객이 많이 모이는 홀과 레스토랑, 카지노와 선실, bath-unit 등의 내장재에 PC가 사용되고 있다. 한편 안전성 뿐만 아니라, 형상이 복잡한 부분과 장식적 형상의 부분을 경제적으로 제작 가능한 것도 높게 평가되고 있다.

Table 7 PC의 실용화 실적의 대표적인 예 (선박·주정 이외)

분 야	PC 실용화 실적의 대표적인 예
자 동 차	열방패 (폴스로이즈社, 재규어社, 포드社)
광 산	통풍관 (영국, 남아프리카 연방, 캐나다)
건 축	그레이트링* (빌딩, 지하철역)
열 차	영국에서는 기준 BS6853보다는 무조건 PC를 이용하는 것으로 한다. 영국프랑스 해협열차의 내장 그레이트링* 자동차 수송 전용 열차(서틀라인)의 기관차 노즈콘 (수치 8mm 두께에 5m×3m×1.5m, 중량 약 240kg/台) 지하철 이외에 지상주행 열차도 PC를 적용하는 경향임. (전 구미, 영국, 오스트리아, 남아프리카 연방) (전 복합재료 차체의 열차도 검토 중)
항 공 기	좌석, 내장 그레이트링*

*1-5mm 정도의 두께로써 방화를 목적으로 한 판

4.2 선박용 재료로서 PC의 필요성과 법규 상의 문제

요지에 서술한 것처럼, 1990년 4월 「스칸디나비아 스타호(승객158명 사망) 화재사고」 및 1991년 4월 이탈리아의 선박 「모베이·프린스(승객 140명 사망)의 화재사고」에 비추어, IMO의 해양안전 위원회는 이 비극적 사고를 교훈으로 삼아 「SOLAS (Safety of Life at Sea, 해상 인명 안전규칙)1974」를 1994년 일부 개정하고 2000년까지는 전면적으로 고치는 것을 이행하고 있다. 일반적으로 볼 때 「SOLAS 1974」 방화 기준을 적용하고 있지 않는 기존의 선박(특히 1980년 5월 25일 이전에 건조된 선박)에 관해서도 최근의 규칙을 적용해야 한다는 의견이 높아지고 있다. 이 의견은 선박의 사용 연한이 평균 16년 정도라는 의견도 관계가 있지만 대부분의 선박은 16년보다도 짧고, 개선비용도 비싸기 때문에 IMO의 노후 선박 조항에 관해서도 개정하고 있지 않다.

신조선에 신 규칙을 적용하는 것을 진행하는 한편, 기존선의 개선 요청도 재연하고 있으나, 1992년 5월에 IMO의 「노후선박 조항」은 노르웨이의 제안으로 제외되었다. 그러나싼 가격으로 개선할 수단으로써 PC가 주목되었고, PC를 이용하는 것이 바람직하다는 의견이 점증하고 있다.

신조선에 IMO의 A-653 대책 등, 방화법규를 합치시키기 위해서는 재료의 선택 여지가 좁아지게 된다. 실제로

는 「가연성의 내장 재료」도 인정되고 있기에 철/내장과 PC와의 비교가 앞장(제3장)과 같이 검토되어, PC의 샌드위치 패널이 경량으로 동시에 범규에 합치하는 것으로 인정되는 것으로 되었다. 이러한 결과로 가볍고 빠르게, 안전기준에 위반 없이, 효율이 좋은 선박·주정의 설계로의 길이 개척되었다.

IMO 결의안의 안전규칙에는 고속선은 불연 또는 난연 재료로 본래의 내화성능이 A-653결의 (내화성, 단열성능은 「SOLAS-A 60시험」에서 유독가스 발생이 거의 제로에 가까운 것)에 합격하는 재료로 제작하지 않으면 안 된다고 정해져 있다. 시험 중의 강도 유지율도 중요하다. 또 알루미늄의 경우는 「시험 중 코아가 200℃를 넘지 않는 것」이라는 조항도 있다.

이 결의는 PC도 알루미늄도 같이 적용되어, 이것의 2종의 재료로 양자의 우수한 면을 살려서 발전하는 것이라고 생각된다. 주 구조부의 선체와 골격은 알루미늄 재료, 그리고 방화 재료는 PC로 병행하는 것이다. 이 의견은 철도차량의 경우와 비슷하다. PC의 용도는 이로 부터 확대하는 것이다, 예를 들어, 다음과 같은 용도를 고려할 수 있다.

- (1) 방화 격벽
- (2) Frame이나 피팅 (인발 성형품)
- (3) 장식 내벽 내장재료
- (4) 공조 통풍관/파이프 (FW 성형품, 인발 성형품)
- (5) 경량이고 내구성이 우수한 좌석
- (6) 경량의 갑판, 바닥

이러한 부재는 철도차량, 항공기, 광업 관계시설, 근해의 석유채굴 설비 등 실적이 있는 입증된 기술로 제작되었다. 이것은 FRP 복합재료의 우수한 특성을 도입 활용하는 것이다.

5. 오르핀 박사 논문의 결론

여객선 화재의 결론은 적절한 난연성과 단열성의 재료를 선정하지 않으면 「중대한 인명의 손실」이라는 비참한 결과를 초래한다. 기존의 FRP재료는 「불에 대하여 반응(불에 타기 쉬운)」이라는 성질을 제외한다면 금속과 비교해서 많은 이점이 인정되고 있다. 그러나 PC는 「불에 대하여 잘 안타는」 재료로 입증되었다

오늘날, 영국에서 PC의 원재료는 구입 가능하며, 성형 제조회사도 국제적으로 활발하게 활동하고 있기에 PC의 응용은 충분히 가능하다. 즉 PC는 화재에 대하여 우수한 FRP로서 염려 없이 이용 가능하다.

PC는 안전성이라는 점에서 선박·주정 등에서의 「수요」에 일치하는 것이며, 그 자신 혹은 다른 재료와 조화

해서 응용 목적을 이루는 것이 가능하다. PC의 용도확대는 다른 수송 분야에도 좋은 영향을 끼칠 것이라고 생각한다.

6. 결론

이하에 본 보고의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 철도차량에 관해서, 영국에서는 「선박·주정」분야에서도 적극적으로 PC의 실용화가 도모되고 있다. 그 단서는 역시 큰 선박 화재사고에 의해 다수의 인명상실의 반성과 여론에서 비롯된 법규 개정이었다.
- (2) 법 개정에 따라서 지금까지 이용해온 기존의 복합재료(폴리에스터 복합재료)가 사용할 수 없게 되고, 현재는 PC가 가장 안전한 복합재료로서 실용화되고 있는 것이다. 이러한 경향은 점차로 정착 확대되어 영국 이외의 구라파와 미국, 그리고 아시아에도 영향을 미칠 것이다.
- (3) 일본에서도, 영국 및 세계의 동향을 판단하고, 선박의 화재 안전성을 위한 나라로서, 업계로서 적극적으로 빠른 대응을 해야 할 필요가 있다. 그러기 위해서는 이 분야에 일하고 있는 우리 모두가 식견을 갖고 새로운 길을 개척해야만 한다. (제3편 끝)