

〈논 문〉

## 저변형률시험법에 의한 섬유강화 복합재료의 응력부식균열에 관한 연구

임재규\* · 최태수\*\*

(1995년 12월 18일 접수)

### A Study on Stress Corrosion Cracking of Fiber Reinforced Composite by Slow Strain Rate Test

J. K. Lim and T. S. Choi

**Key Words:** Slow Strain Rate Test(저변형률시험), Glass Fiber Reinforced Plastics(GFRP : 유리섬유강화 플라스틱), Stress Corrosion Cracking(응력부식균열), Synthetic Sea Water(인공해수), SCC Fracture Surface(SCC 파면)

#### Abstract

This paper was investigation of the stress corrosion cracking(SCC) mechanism and the properties of corrosion fracture surface of glass fiber reinforced plastics(GFRP) produced by hand lay up(HLU) method in synthetic sea water. Test material is GFRP, that was used vinylester type epoxy acrylate resin and an unsaturated polyester as the matrix and the chopped strand mat(CSM) type E-glass fiber as the reinforcement. The slow strain rate test(SSRT) was performed on dry, wet and saturated wet specimens in sea water. Here the pH concentration of synthetic sea water was 8.2 and the strain rate is  $1 \times 10^{-6}(\text{sec}^{-1})$  and test temperature ranges varied from  $-60^{\circ}\text{C}$  to  $80^{\circ}\text{C}$ . It could be confirmed the fact that wet specimens tested at a particular test temperature ranges were appeared the evidences of SCC such as co-planar, mirror and hackle zone. Moreover, SCC of GFRP in sea water was characterised by flat fracture surfaces with only small amounts of fiber pull-out, in partial.

#### 1. 서 론

재료 성질에 대한 요구는 그 사용조건이 가혹해 지고, 복잡화되는 동시에 매우 다종다양하다. 예를 들면 강도, 강성, 내식성, 내마모성, 경량성, 내구성, 내열성(단열, 열전도성), 차음성(sound-proof), 미관 등에 부합되는 특성을 가진 것을 바라고 있다. 이 같은 요구를 가능한 많이 만족시키

기 위해 복합재료가 이용되고 있으며, 대표적인 것으로 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastics : 이하 GFRP)이 널리 이용되고 있다.

1960년대까지 GFRP를 이용한 선박 및 기타 해양 구조물은 수톤 정도의 소형이 대부분이었으나, 1970년대에 이르러 점차 대형화되고 있는 실정이며, 또한 미래의 응용분야인 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion : OTEC)계획에서 해저의 해수를 바다 표면까지 온도변화를 주지 않고 운반하는 냉수 파이프 재료로의 응용이 검토되고 있으며,<sup>(1)</sup> 그에 따른 손상 사고가 증가하고

\*회원, 전북대학교 기계공학부

\*\*전북대학교 대학원

있어서 GFRP를 이용한 구조물의 안전 대책이 시급한 실정이다.

또한 선박, 항만시설, 부유 구조물 등의 해양 공학 분야에서 공업용 재료로 널리 사용되는 GFRP는 그들이 대신하게 될 일반적인 공업용 재료가 받게 되는 환경에서 견딜 수 있어야 한다. 그 사용환경은 흔히 해수와 응력이 조합된 매우 가혹한 환경이다. 이렇게 많은 분야에서 GFRP 구조 요소들은 짧은 시간 동안에 가해지는 동적하중으로 인한 파손 이외에도 정적강도보다 훨씬 작은 응력을 장시간 동안 받게 될 때 파괴를 일으킬 수 있다. 이러한 파괴현상은 적절한 환경에 노출될 때 흔히 가속되는데, 곧 응력부식균열(stress corrosion cracking: 이하 SCC)에 의한 파괴이다.

GFRP는 대부분의 환경에서 그 요소들이 사용하중을 받지 않을 때 상당히 불활성이다. 그러나, 최근 지지 하중이 존재하는 물환경에서조차 SCC이 발생할 수 있다는 점이 알려졌다.<sup>12)</sup> 그러므로 해양 구조물에서 GFRP의 파괴는 해수 중 SCC에 의해 일어날 것으로 예상되지만, GFRP의 해수 중 SCC에 관한 연구는 매우 드물다.

그 동안 GFRP재를 대상으로 한 SCC에 관한 연구는 주로 강한 산성용액에 대해 진행되어 왔는데 이는 강산환경에서 SCC의 발생이 용이하며 그로 인한 파괴가 많이 보고되고 있기 때문이다.<sup>13,14)</sup> 그러나, 불환경에서조차 SCC 발생 가능성이 보고되고 있어서 선박이나 기타 해양 구조물의 부재로 사용되는 GFRP재의 사용수명을 보장하고 여러가지 요인으로 인한 대형사고를 방지하기 위해서는 해수 환경에서 GFRP재의 인장특성과 SCC의 발생에 관한 조사 및 SCC를 가속시킬 수 있는 환경인자에 대한 검사가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 SCC를 평가하는 가장 일반적인 방법인 저변형률시험법(Slow Strain Rate Test: SSRT)을 이용하여 해수 중에서의 흡습률과 환경온도가 SCC 발생에 어떻게 영향을 주는가를 파면관찰을 통하여 조사하고 해수환경에 의한 GFRP재의 인장특성의 변화와 그에 미치는 온도의 영향에 대해 검토하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 GFRP 및 시험편

본 연구에 사용한 GFRP의 제작방법은 Fig. 1과

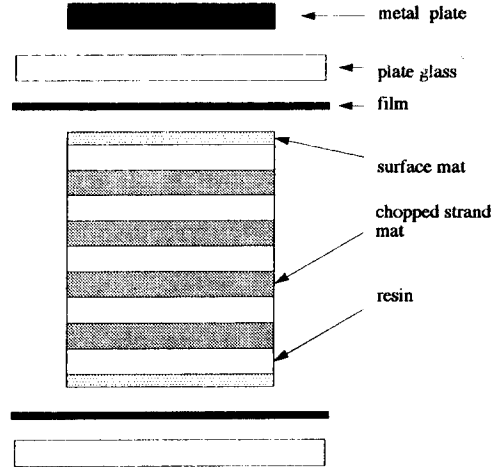


Fig. 1 Laminate construction

같이 실험실에서의 제작이 가능한 수적법(Hand Lay Up method: HLU)으로 하였다. 먼저 silicon oil을 toluene에 희석시킨 이형제를  $500 \times 500 \times 5$  mm의 유리판에 고르게 바른 다음  $500 \times 500 \times 0.1$  mm 크기의 이형필름을 올려놓고 이형제를 적층한다. 수지와  $300 \times 300$  mm의 크기로 절단한 CSM 4장을 교대로 적층하며 이때 표면섬유포를 한 장씩 상하면에 위치시킨다. 균일한 두께의 GFRP판재를 얻기 위해 유리판의 네 모서리에 두께 3.2 mm의 금속 spacer를 올려놓고 이형제를 바른 이형필름, 유리판, 금속판(30 kgf)의 순서로 덮는다. 여기에서 금속판은 상온경화시 발생하는 열에 의한 휨 방지와 일정 압력을 가하기 위해 사용했으며 나사산을 낸 금속물리를 사용하여 적층시의 기포를 최대한 제거하였다.

한편 수지의 경화시약은 3액형으로 MEKPO (Methyl Ethyl Ketone Peroxide), Co-octoate (8%), 및 EMA(Ei-methyl Aniline) (5% in Xylene)를 사용하였으며, 경화시약의 배합량 및 온도변화에 따른 겔화시간(gel time)을 조사하여 적층판을 만드는데 필요한 가사시간을 결정하였다. 이상과 같이 적층한 GFRP판재를 24시간 동안 상온 경화시킨 후  $120^\circ\text{C}$ 에서 2시간 동안 후경화시켜 두께 3.2 mm의 GFRP판재를 얻었으며 이때의 유리섬유 함유율은 약 30~35 wt. %였다.

본 실험에 제공된 인장시험편은 Fig. 2와 같이 제작된 GFRP판재로부터 두께가 3.2 mm로 균일한 부분을 JIS K 7054 규격에 따라 CNC 자동밀링

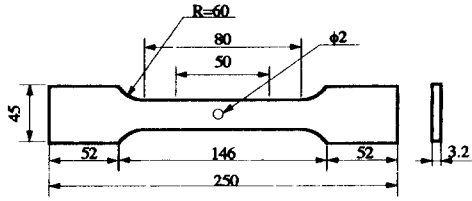


Fig. 2 Dimension of specimen for SSRT. (JIS K 7054)

으로 기계 가공하였다.

제작된 GFRP 시편을 미시조직관찰을 하기 위해 Microtoming 기법을 이용하여 시험편을 폭, 두께, 너비방향으로 초박판 시험편을 절단하였다. 절단된 시험편을 10~15 μm의 박편으로 가공한 후 편광현미경(NIKCON Microphoto-sa)을 이용한 투과법으로 GFRP의 미시조직을 관찰하였다.

한편 인공해수중 저변형률 인장시험에 제공된 포화침지 시험편을 준비하기 위해 ASTM D 570의 규격(25.4×76.2×3.2 mm)에 따라 흡수률 측정시험편을 제작하고 인공해수중에서 일정 시간마다의 흡수률을 측정하였다.

즉, 50±3°C에서 2시간 동안 건조시킨 흡수률 측정용 시험편의 무게를 0.0001 g까지 측정이 가능한 분석용 저울을 이용하여 0.001 g까지 측정할 후 실온(20±3°C)하의 인공해수에 침지시켜 일정 시간마다의 무게변화를 측정하여 흡수률곡선을 얻었다.

흡수률은 ASTM D-570에 의해 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100$$

여기서,  $M_t$ 는 t시간 침지 후의 흡수율이며  $W_t$ 와  $W_0$ 는 각각 t시간 침지 후의 시험편의 무게와 건조상태에서의 시험편의 무게이다.

## 2.2 저변형률 인장시험

저변형률 시험을 위해 사용할 시험기는 프래임, 로드셀, 감속장치 등으로 구성되어 있는 SSRT (Slow Strain Rate Test)용 인장·압축시험기이며, 구동원은 AC 소형모터이고, 용량은 2톤이다. 또한, GFRP의 기계적인 특성을 측정하기 위해 Automatic Multipoint Strain Meter를 연결하였으며, 분위기 조성을 위해 시험기의 중앙에 수조를 설치한 Fig. 3과 같은 실험장치를 이용하였다. 이

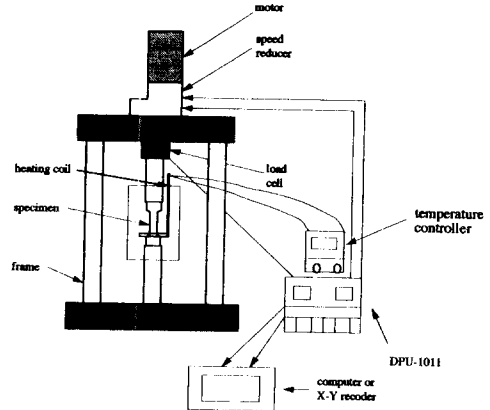


Fig. 3 Schematic diagram of SSRT apparatus

때 분위기 온도는 dry ice, 얼음 및 소형 온도조절기 등을 사용하여 소정의 온도조건을 유지시켰다. 실험에 제공되는 시험편은 건조재, 침지재, 포화침지재의 3종류로 하며, 분위기 온도는 -60°C ~ +80°C 범위내에서 6구간(-60°C, -30°C, 15°C, 30°C, 60°C, 80°C)으로 나누어 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 일반적으로 SCC의 발생이 용이한  $1 \times 10^{-6}(\text{sec}^{-1})$ 의 저변형률속도로 실시하였다.

한편, 인공해수에서 실험하기 위해 시험기의 중앙에 수조를 설치하였으며, 수조는 내기 개방상태로 두었고, 실험조건에 맞는 해수온도를 유지하기 위해 상온이상의 온도는 수조에 직접 코일 Heater를 넣고, 0°C이하의 온도에서는 시험편 주위에 알부미늄호일 등을 이용하여 이중막을 형성하고 수조와 사이에 dry ice를 넣어 실험을 하였으며, 실험 온도는 소형 온도조절기를 사용하여 실험온도를 ±3°C로 조절하였었다. 시험중에 pH값의 변동을 최소화하기 위해 6시간마다 pH값을 측정하고 변화량은 KCl과 NaOH를 첨가하여 pH 8.2인 표준해수로 조절하여 실험에 사용하였다.

## 2.3 파면관찰

흡수상태에서 분위기의 온도에 따른 인공해수중 SCC의 발생여부와 파면특성을 조사하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM) (HITACHI사, X-60)을 사용하여 미시적인 파면관찰을 수행하였다. 관찰에 앞서 모든 시험편은 순도 99.9%의 ethyl alcohol로 초음파세척을 행한 후 두께 200Å 정도로 파면을 금(Au)으로 코팅(coating)하였다. SCC의 발생여부는 기계적 성질의

변화와 co-planar fracture, mirror, mist, hackle zone 등의 출현여부로 평가하였으며, matrix에서는 river line, polygonal marking 등의 존재 여부도 첨가되었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미시조직과 흡수율 변화

Microtoming 기법에 의해 단면을 절단하고 10~15  $\mu\text{m}$ 의 박편으로 가공한 후 편광현미경 (NIKCON Microphoto sa)을 이용하여 부위별로 GFRP의 미시조직을 관찰한 결과 Fig. 4에서 보여지는 것과 같이, fiber와 resin의 구별이 뚜렷한 적층채임을 알 수 있었고, 직층간의 유리섬유는 방향성이 없는 이방성재료임을 확인할 수 있었다.

위와 같은 미시조직을 가지는 시험편의 흡수율의 변화를 측정하기 위해 ASTM D 1141[4]에서 추천하고 있는 인공해수를 사용하였으며, ASTM D 570의 plastic 흡수율 측정시험법을 행한 결과, 제작한 GFRP시험편은 Fig. 5와 같이 흡수율이 흡수시간에 따라 증가하다가 120일 후에는 0.45%로 일정한 포화침지재가 되었다. 시험편은 측정결과에 따라 실험에 사용할 시험편을 건조재(0%), 침지재(0.25%), 포화침지재(0.45%)로 분류하여 실험을 하였는데, 최대 인장하중은 건조재, 침지재, 포화침지재 순으로 나타났고, 변위도 최대 인장하중과 같이 건조재, 침지재, 포화침지재 순으로 나타났는

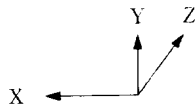
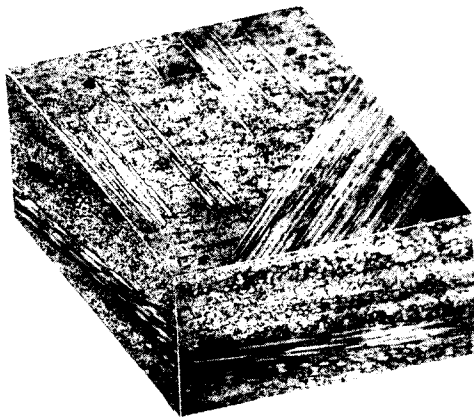


Fig. 4 Fiber orientation of parent

데, 이는 시험편의 흡수율이 증가함에 따라 시험편은 침지에 따른 수지의 경화로 말미암아 debonding과 delamination이 많이 발생하였으며, pull-out된 섬유표면에 붙어있는 수지가 적게 나타나는데, 이는 수지와 섬유간의 결합력이 저하되는 것으로 보여진다.

#### 3.2 GFRP의 해수중 인장특성

해수중에서 건조재와 침지재, 포화침지재의 시험편에 대해 저변형률 인장시험을 실시한 결과 Figs. 6, 7, 8과 같이 각 시험편에 대한 하중-변위곡선을 얻었다.

건조재는 각 조건에서 대체적으로  $P_{max}$ 가 가장 크게 나타나며, 파단직전에 약간의 연성적인 거동을 보인다.  $-60^{\circ}\text{C}$ 에서  $P_{max}$ 는 940 kgf로 최대값이고, 온도가 증가함에 따라 수지의 기계적 성질 저하로 인해  $P_{max}$ 는 점차 저하되는 경향을 보이며,

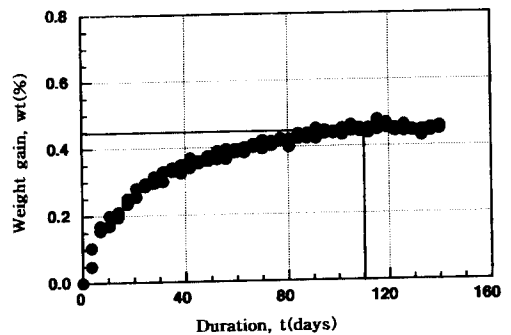


Fig. 5 Diffusion behavior of synthetic sea water into GFRP at room temperature. ( $20 \pm 30^{\circ}\text{C}$ )

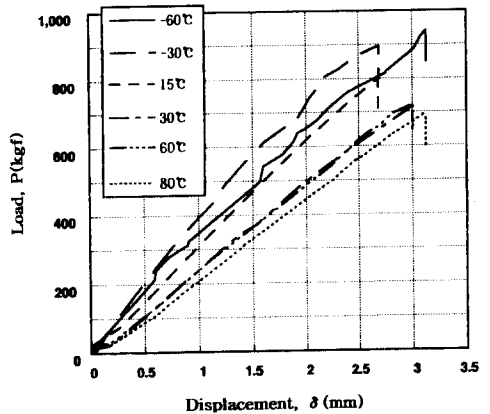


Fig. 6 Load displacement curves of dry specimens tested in synthetic sea water

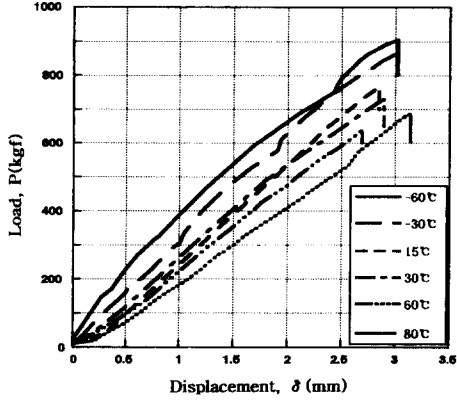


Fig. 7 Load-displacement curves of wet specimens tested in synthetic sea water

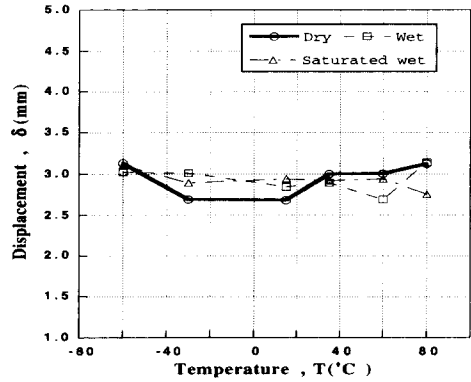


Fig. 9 Relation between displacement and temperature

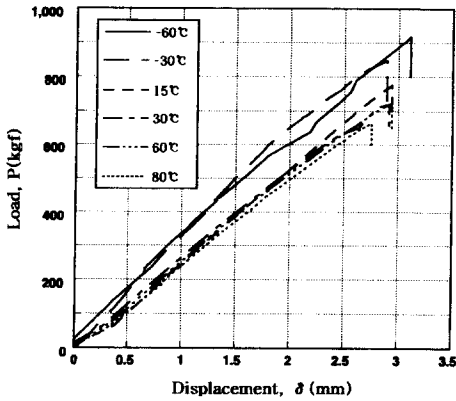


Fig. 8 Load-displacement curves of saturated wet specimens tested in synthetic sea water

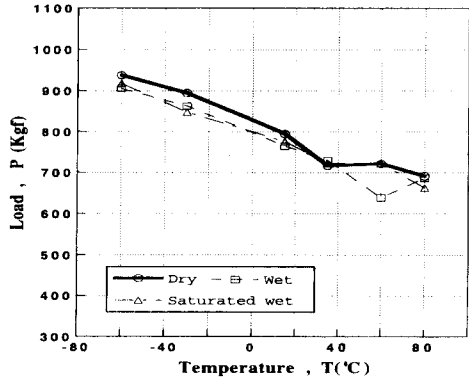


Fig. 10 Relation between maximum load and temperature

80°C에서  $P_{max}$ 는 692 kgf로 최소값을 갖는다.  $P_{max}$  이후의 후 변형과정은 겪지 않으며 최대 하중점에서 바로 파괴되는 것을 알 수 있다.

침지재(최대값 : 906 kgf(-60°C), 최소값 : 639 kgf(60°C))와 포화침지재(최대값 : 918 kgf(-60°C), 최소값 : 663 kgf(80°C))는  $P_{max}$ 까지의 변형과정은 거의 완전한 직선상태의 선형거동을 보이고 있으며,  $P_{max}$  점에서 시험편은 완전히 파괴되었다. 이러한 하중-변위선도의 양상으로 볼 때 해수로 인한 경화정도가 건조재의 경우보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있고, 각 시험의 최대하중값의 차는 대략 250 kgf이며, 건조재와 포화침지재는 거의 비슷하고 침지재가 다소 작은 폭을 나타내고 있다. 또한 상온 이상에서는 건조재에서 얻은  $P_{max}$ 보다 작게 나타나는 것으로 보아 온도와 흡수율의 상호관계를 예상할 수 있다.

Fig.9와 같이 흡수율에 따른 변위변화를 살펴보면, 상온이상에서 건조재와 침지재의 변위변화는 온도가 증가함에 따라 변형량이 점차 증가하여 복합재료의 환경강도특성을 잘 나타내며 반면에 포화침지재의 변위변화는 다소 미약하게 증가한다. 이런 현상으로 미루어 보아 GFRP재가 포화침지되었을 경우, 온도보다는 해수로 인해 수지가 경화되는 침지의 영향이 더 많기 때문인 것으로 예측되고, 상온이하에서 일반재료는 수축하여 그 변위변화가 작아지게 되나, GFRP는 오히려 상온이상에서 보다 더 많은 변위변화를 나타냈는데, 이는 실험후 시험의 표면을 관찰한 결과 표면크랙을 관찰함으로써 알 수 있었다.

### 3.3 GFRP의 파괴거동에 미치는 온도변화의 영향 GFRP의 파괴거동에 미치는 온도변화의 영향

알아보기 위해 Figs. 6~10을 관찰해 보면, 온도  $-60^{\circ}\text{C}$ 에서 실험한 하중-변위곡선은 많은 툰니형상을 보여주며  $P_{\max}$  부근에서 거의 취성재료의 인장 거동을 나타내는 곡선으로 수지와 섬유 수축으로 인해 건조재  $P_{\max}$ 가 상온 인장실험의  $P_{\max}$ (814kgf)보다 무려 150 kgf가 더 크게 나타나고, 변위도 시편 전체에 걸쳐 발생한 균열에 의해 대략 0.7 mm 정도의 차이를 보이고 있다.  $P_{\max}$ 는 건조재, 포화침지재, 침지재가 각각 940 kgf, 918 kgf, 906 kgf이다.

$-30^{\circ}\text{C}$ 에서 실험한 하중-변위곡선은 시편의 수축으로 인해  $P_{\max}$ 가 상온 건조재의  $P_{\max}$ 보다 높게 나타나는데 이는 수지와 섬유의 수축으로 인해 수지가 섬유를 더욱 조여서 결합력을 증가시키는 현상으로 보여지고 선형적인 거동을 보이지만, 곡선 전체에 걸쳐 많은 툰니형상이 발생하는데 GFRP와 같은 복합재료의 전형적인 파괴과정을 보면 균열이 진전하다 섬유에서 정지하여 하중이 급속히 증가하고, 파괴되면 matrix로 균열이 진전되어 다음 섬유로 진전할 때 발생하는 하중 변화량을 나타내는 것과 같은 현상으로 추측되어지고, 시험후 시편을 관찰하였을 때, 시편 전체에 걸쳐 미시적, 거시적 균열을 관찰할 수 있었다. 그리고,  $P_{\max}$ 는 건조재, 침지재, 포화침지재가 각각 895 kgf, 863 kgf, 848 kgf의 순으로 저하하고 있다.

$15^{\circ}\text{C}$ 의 인공해수에서 실험한 하중-변위곡선은 대기중에서 실험한 인장실험의 하중-변위곡선의  $P_{\max}$  부근에서 나타나는 연성거동이 없이 바로 파괴된 것을 알 수 있었고,  $P_{\max}$ 는 건조재, 침지재, 포화침지재가 각각 795 kgf, 765 kgf, 776 kgf로 나타났다.

$30^{\circ}\text{C}$ 에서 실험한 하중-변위곡선은 비교적 선형적인 인장거동을 보이나 건조재의 하중-변위곡선 중간에 침몰한 부분을 볼 수 있는데, 이는 시편의 미시조직관찰에서 보았듯이 이방성인 유리섬유가 순간적으로 박리현상을 일으켜 나타나는 현상으로 추측되어지며, 이는 파면사진을 관찰함으로써 확인할 수 있었고,  $P_{\max}$ 는 침지재, 건조재, 포화침지재가 각각 730 kgf, 717 kgf, 720 kgf이었다.

$60^{\circ}\text{C}$ 에서 실험한 하중-변위곡선은 비교적 선형적이나, 약간의 툰니형상을 보여주는데 이는 시편 내부에서 침지에 따른 온도의 영향을 받은 유리섬유가 박리되거나 파괴되면서 순간적으로 나타나는 현상으로 보여지며,  $P_{\max}$ 는 건조재, 침지재, 포화침

지재가 각각 722 kgf, 639 kgf, 723 kgf이다.

$80^{\circ}\text{C}$ 에서 실험한 하중-변위곡선은  $60^{\circ}\text{C}$ 와 비슷하게 곡선전반에 걸쳐 툰니형상이 보이고,  $60^{\circ}\text{C}$  이상에서 포화침지재에  $P_{\max}$ 부근에서 약간의 연성거동을 보이는데, 이는 matrix가 침지와 온도의 영향으로 소성변형을 일으키는 것으로 보여진다.  $P_{\max}$ 는 건조재, 침지재, 포화침지재가 각각 692 kgf, 687 kgf, 663 kgf이다.

이상에서 관찰하여 분 바와 같이 온도가 상승할수록, 흡습이 많이 될수록 SCC가 발생할 확률이 많다는 것을 알 수 있었다.

### 3.4 파면해석과 SCC의 발생조건

재료의 SCC현상을 연구하기 위한 여러가지 방법 중 가장 일반적인 지면형물시험법은 재료의 피막과 피에 의한 신생표면의 발생률을 용이하게 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 11은 GFRP의 파면들 중 특징적인 파면사진들로 (a)의 pull-out은 SCC가 발생하는 파면에서는 pull-out된 섬유길이가 거의 작고 그 양이 소량이며, (b)와 (c)는 SCC의 대표적인 파면현상인 co-planar와 hackle zone이고, (d)는 영하의 온도에서 변위가 크게 나타나게 되는 원인인 수지의 수축으로 인한 균열을 보여주고 있다.

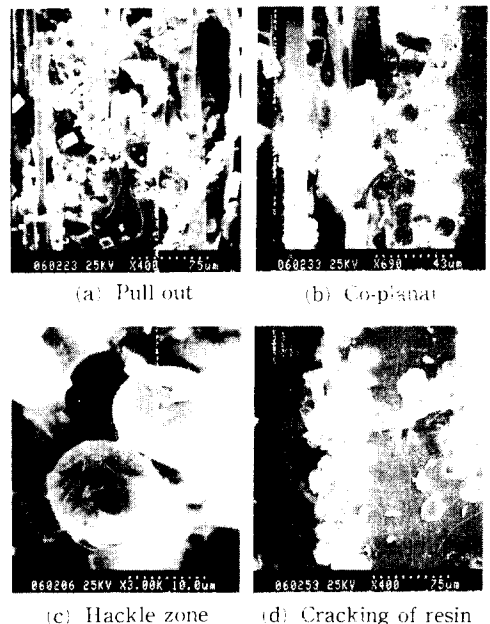


Fig. 11 SEM photographs of fiber fracture surface

본 실험에 사용된 GFRP의 경우 금속재료와 같은 부식에 의한 피막형성을 기대하기는 다소 어렵지만 온도를 낮추어 줌으로써 GFRP 각 요소들의 부식여건을 보다 견고하게 만들어 줄 수 있는 것으

로 보여진다. 이러한 생각은 특정온도에서 GFRP의 인장특성이 크게 저하된 점과 시험편 종류에 따라서는 특정온도에서 SCC의 대표적인 파면현상인 co-planar, mirror zone 그리고 hackle zone과 flat-debonding surface 등이 관찰되어짐으로써 GFRP 재가 인공해수에서 SCC가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 SCC 거동들을 각조건에 따라 나타내면 Fig. 12와 Table 1과 같으며, SCC의 발생한계를 알 수가 있었다.

이상의 결과로부터 해수중 부하상태에 있는 GFRP 구조물에서도 환경인자인 온도변화에 따른 SCC로 인해 파괴가능성이 예상된다.

#### 4. 결 론

해수 중에서의 온도와 흡습률 변화에 따른 GFRP재의 인장파괴거동과 그에 따른 응력부식균열(Stress Corrosion Crack : SCC)에 미치는 영향을 알아보기 위해 건조재, 침지재, 포화침지재를 대상으로 저변형률시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) GFRP재는 해수중에서 흡습률 시험을 통해 120일 이상 침지하였을 때 0.45%로 포화상태가 되어 더 이상의 흡습이 되지않는 것을 알 수 있었다.

(2) CSM type E-glass/polyester 복합재료의 경우, 건조재에서는 60°C 이상, 침지재는 30°C, 포화침지재는 15°C 이상의 특정한 조건하에서 co-planar, mirror 및 hackle 영역과 같은 SCC파면이 관찰되었다.

(3) 해수중 부하를 받고 있는 상태에서 GFRP 구조물은 오래 침지될수록, 또한 환경온도가 높을수록 수지의 열화와 섬유의 화학적인 침해를 증가시켜 계면결합력의 저하가 가속되어  $P_{max}$ 의 저하와 SCC에 의한 파괴가능성이 증가되었다.

#### 후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME 94 C 12)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Trimble, L. C., Waid R. L. and Connolly W. J.,

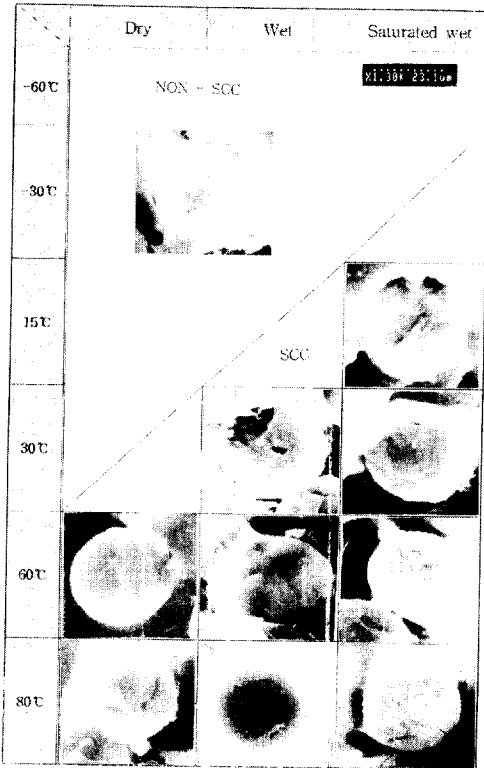


Fig. 12 SEM photog aphs of fiber fracture.(×3000)

Table 1 The situation of SCC occurrence of glass fiber in synthetic sea water

	Dry	Wet	Saturated wet
-60°C			
-30°C			
15°C			Hackle+ Mirror Zone
30°C		Hackle Zone	Hackle+ Mirror Zone
60°C	Hackle Zone	Hackle+ Mirror Zone	Mirror+ Hackle Zone
80°C	Hackle+ Mirror Zone	Mirror+ Hackle Zone	Mirror+ Hackle Zone

- 1982, "Composite Cold Water Pipe for Ocean and Thermal Energy Conversion (OTEC) Systems," 37th Ann. Conf. Rein. Plas. / Compos. Inst., The SPI, Inc., Sec. 26-B.
- (2) 浦上 良樹, 高島 昭治郎, 石井 邦男, 1990, "FRPライニングの耐酸耐アルカリ試験とその評價について," 材料, Vol. 39, No. 438, pp. 277-282.
- (3) Tsai, S. W., 1967, "Environmental Factors in the Design of Composite Materials," *Mechanics of Composite Materials, Proc. 5th Symp. Naval Structural Mechanics*, Pergamon, New York, pp. 749-767.
- (4) Whitney, J. M. and Ashton J. E., 1971, "Effect of Environment on the Elastic Response of Layered Composite Plate," *LAA Journal*, Sept., pp. 1708-1713.