

# 알루미늄/발포알루미늄의 질소 플라즈마 표면처리에 따른 파괴인성평가

정협재\*, 이경엽#, 한범석\*\*, 유용문\*\*

## A Study on the Fracture Toughness of Plasma-treated Aluminum/Aluminum Foam Composites using Nitrogen Gas

Hyup Jae Chung\*, Kyong Yop Rhee#, Beom Suck Han\*\* and Yong Mun Ryu\*\*

### ABSTRACT

Aluminum foam material has unique properties that make them useful in applications to the automobile, construction and railroad industries. In this study, aluminum was plasma-treated using nitrogen gas to improve fracture behavior between aluminum and aluminum foam material. SLS specimens were used for fracture tests. They were performed using plasma-treated and untreated aluminum/aluminum foam specimens. It was shown that the fracture strength and the fracture toughness of aluminum/aluminum foam were improved ~86% and ~250%, respectively when the aluminum was plasma-treated using nitrogen gas.

**Key Words** : Aluminum foam (발포알루미늄), Fracture strength (파괴강도), Plasma (플라즈마), Fracture toughness (파괴인성)

### 1. 서론

에너지 과다 소비로 인한 지구온난화 문제와 환경 문제로 오랜 기간 동안 에너지 문제가 대두되고 있다. 에너지 소비를 줄이면서 기존 금속의 역할을 할 수 있는 경량재금속 연구가 진행되었고, 이에 따라 발포금속에 대한 중요성이 강조되었다. 발포금속은 기존 금속에 비하여 비탄성률과 비강도가 우수하며, 에너지 흡수성과 열·전기·흡음 특성등이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 이러한 발포 금속재료는 기존의 금속재료에 비하여 초경량이며

액상이나 공기등의 투과성이 양호하며 뛰어난 기계적 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 가지는 발포금속 중 하나가 발포알루미늄이다. 발포알루미늄은 특히 흡음성과 충격흡수가 우수하여 대형 건축물의 방음판으로 사용되며 자동차산업에서는 발포알루미늄을 크래쉬 박스 및 자동차 범퍼에 적용하고 있다. 최근까지 발포알루미늄에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 특히 발포알루미늄의 기계적 특성<sup>1-3</sup>과 흡음성에 관한 연구,<sup>4,5</sup> 에너지흡수성에 관한 연구,<sup>6-9</sup> 발포알루미늄 특성의 수치해석연구<sup>10-12</sup> 등이 진행되고 있다. Paul<sup>1</sup> 등은 노치에 따른

접수일: 2007년 11월 12일; 게재승인일: 2008년 3월 26일  
\* 경희대학교 기계공학과  
# 교신저자: 경희대학교 테크노공학대학 · 산학협력기술원  
E-mail: rheekey@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2565  
\*\* 자동차부품연구원

패기공 발포알루미늄의 인장강도를 측정하여 노치의 길이와 구멍의 지름이 커질수록 인장강도는 감소한다고 발표하였다. 특히 현미경 관찰을 통하여 노치 구멍의 지름과 셀의 크기의 비율에 따라 강도에 영향을 미친다고 하였다. Ramachandra<sup>6</sup> 등은 낮은 속도에서의 발포알루미늄 충격 에너지 흡수에 대한 연구를 통하여 속도가 10m/s 보다 클 경우 충격과의 영향이 상당히 커지게 되어 에너지흡수가 커진다고 발표하였다. Zhang<sup>10</sup> 등은 수치해석을 통하여 Al Foam-filled square columns 와 Multi-cell square columns 의 에너지흡수를 연구하여 Multi-cell columns 가 Foam-filled columns 보다 50~100% 높은 에너지 흡수효과를 가진다고 발표하였다. 위와 같이 발포알루미늄에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있지만, 실제 발포알루미늄이 산업에서 이용되기 위해서는 발포알루미늄과 이종재료와의 접합이 중요한 연구과제 중 하나이다. 하지만 발포알루미늄과 이종재료의 접합에 관한 연구는 아주 소수의 연구만이 진행되고 있는 실정이다.<sup>13-14</sup> 최근에 저자들은 질소 플라즈마 표면처리를 이용한 알루미늄/발포알루미늄 복합재의 접합성에 관한 연구를 통하여 알루미늄에 질소 플라즈마 처리를 했을 경우, 플라즈마 처리를 하지 않은 경우와 발포알루미늄

에 플라즈마 처리를 한 경우에 비하여 강도가 급험시험은 13%, 전단시험은 30% 증가한다고 발표하였다.<sup>13</sup> 그러나 알루미늄/발포알루미늄 복합재에서 알루미늄에 플라즈마로 표면처리 할 경우 파괴인성이 얼마나 향상되는 가에 대한 연구결과는 발표된 바 없다.

본 논문에서는 SLS (Single Lap Shear) 시편을 제작한 후 파괴인성 시험을 수행하였으며, 이로부터 질소 플라즈마 표면처리의 유/무가 알루미늄/발포알루미늄 복합재의 파괴인성에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 연구하였다.

## 2. 장 실험방법

### 2.1 플라즈마 표면처리

본 연구의 시편제작을 위해 Al 5052(25 mm \* 100 mm \* 1 mm)와 발포알루미늄(25 mm \* 100 mm \* 5 mm, 밀도 0.4~0.5g/cm<sup>3</sup>, 폼텍)을 사용하였다. 플라즈마 표면처리 전에 알루미늄의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 5분간 초음파세정을 하였다.

알루미늄 재료에 대한 플라즈마 표면처리는 Plasma Preen Cleaner (U0050725A, USA)를 사용하여 수행하였으며 Frequency 는 2.45GHz, Power 는 700W 를 적용하였다. 플라즈마 가스는 질소를 사용하였으며 표면처리 시 가스의 압력은 160kPa, 진공은 90kPa 를 유지하였다. Chung<sup>13</sup> 의 연구결과에 따르면 플라즈마를 이용한 알루미늄 표면처리 시 중요한 공정변수중 하나가 표면처리 시간이며, 접촉각 측정을 통하여 표면처리 시간이 5 분이 경과한 이후에는 접촉각의 변화가 크지 않다고 발표하였다. 따라서 본 연구에서는 플라즈마 표면처리 시간을 5분으로 하였다.

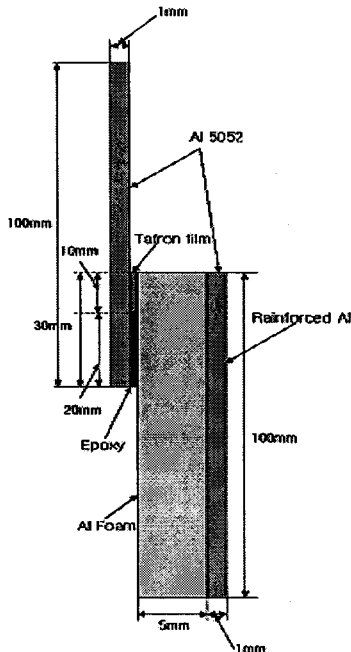


Fig. 1 SLS Specimen

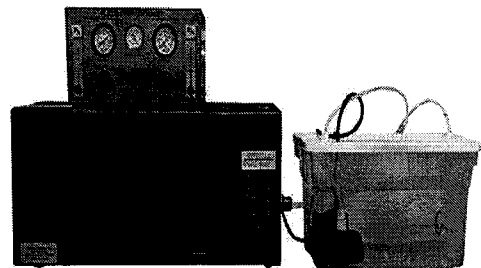


Fig. 2 Plasma Preen Cleaner

### 2.2 시편제작 및 실험방법

알루미늄/발포알루미늄 SLS (Single Lap Shear) 시편은 상온에서 경화되는 접착제를 이용하여 알루미늄/발포알루미늄 형태로 적층한 후 5kg/cm<sup>2</sup>의 일정한 압력으로 상온에서 24 시간 경화시켜 완성하였다. 접착제는 에폭시(경도화성)와 경화제(경도화성)를 중량비 2:1의 비율로 혼합하여 사용하였다. 초기 균열은 알루미늄과 발포알루미늄 복합재 계면에 20 μm 두께를 갖는 테프론 필름을 10 mm 삽입하여 형성하였다.

시편 제작 시 발포알루미늄이 알루미늄 5052 보다 강도가 약해 시험 도중 시편이 파괴되는 경우를 방지하기 위해 발포알루미늄의 접합면 반대쪽에 알루미늄을 붙여서 발포알루미늄을 강화하였다. 본 연구에서는 표면처리와 상관없이 에폭시의 양을 0.3ml로 제한하고, 상온에서 24 시간의 경화조건을 유지하여 0.2 mm의 동일한 두께의 접착제를 갖는 시편을 제작하였다. 실험의 재현성을 위하여 각각 5 개의 시편을 만들어 실험하였다. 파괴시험은 Instron 8871를 사용하여 일정변형률 (0.5 mm/min) 하에서 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 표면처리가 알루미늄 /발포알루미늄 복합재의 파괴인성에 미치는 영향을 알기 위해 SLS 시편을 이용한 파괴시험을 시행하였다. 파괴시험을 통하여 얻는 컴플라이언스 및 파괴하중

등과 같은 재료의 파괴특성은 하중-변위(P-δ)선도로부터 결정될 수 있다. Fig. 3은 표면처리 하지 않은 알루미늄과 발포알루미늄을 적용한 시편(이하 "Case 1"이라 함)과 질소 플라즈마 처리를 한 알루미늄과 발포알루미늄을 적용한 시편(이하 "Case 2"라 함) 두 경우의 알루미늄/발포알루미늄 SLS 시편의 하중 변위 선도를 비교한 그림이다. Case 1, 2 모두 초기에는 하중이 선형에 가까운 형태로 증가하다가 비선형형태로 증가하는 것을 알 수 있다. Case 1의 경우 약 50N까지는 하중이 선형으로 증가하다가 약 75N 이상이 되면서부터 비선형형태로 하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 약 327N의 하중에서 첫 번째 균열이 진전되며, 약 366N의 하중에서 시편의 파괴가 일어난다. Case 2의 경우 역시 약 50N까지는 선형의 형태로 하중이 증가하다가 50N 이후부터 비선형형태로 하중이 증가한다. 약 543N에서 첫 번째 균열이 일어나며 두 번째로 균열이 진전될 때 약 506N의 하중에서 시편의 파괴가 일어난다. 이와 같이 하중이 선형의 형태에서 비선형의 형태로 증가하는 현상은 SLS 시편이 비대칭성 시편으로서 굽힘 모멘트가 알루미늄과 발포알루미늄의 접합부에서 발생하며 하중이 증가하면 이에 대한 굽힘 변형이 무시할 수 없을 정도로 크게 나타나기 때문이다.

Fig. 4은 두 경우 시편에 대한 파괴하중 값을 에러바(error bar)로 비교한 것을 나타낸다. 파괴하중 값은 초기균열이 진전할 때의 하중 값으로 본 연구에서는 하중-변위 (P-δ) 선도에서 변위 증가

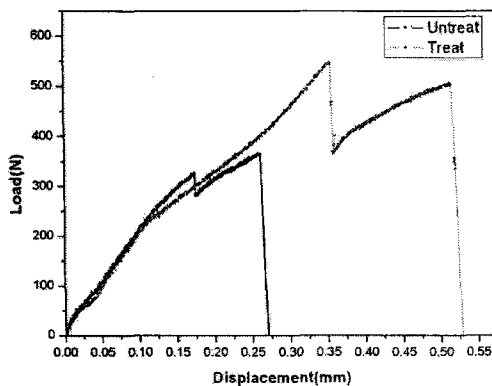


Fig. 3 Load-displacement curves of untreated (Case 1) and plasma-treated (Case 2) specimens

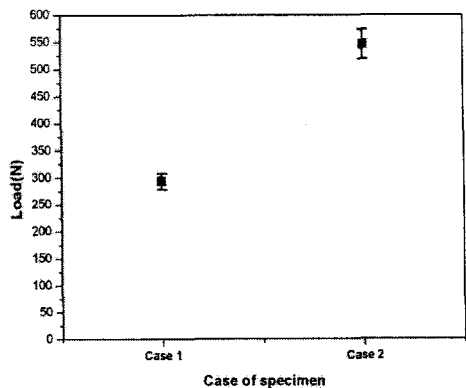


Fig. 4 Comparison of fracture load for two cases of specimen

에 대해 하중이 처음 감소할 때의 하중 값으로 결정하였다.

Fig. 4 에 나타나 있듯이 알루미늄의 표면처리의 유/무에 따라 파괴하중이 달라짐을 알 수 있다. 알루미늄을 질소 플라즈마 표면처리 할 경우 Case 2 가 약 536N 의 파괴하중을 나타내었고 Case 1 은 약 293N 의 파괴하중을 나타내었다. 이는 Case 2 가 Case 1 보다 높은 파괴하중 값을 나타냈으며, Case 1 의 경우에 비하여 약 86% 이상 증가하였다.

파괴인성 값을 구하는 방법에는 면적법, 하중법, 컴플라이언스 보정법등 여러 가지 방법을 이용해 결정할 수 있다. 본 연구에서는 일인자방법을 적용해 파괴인성 값을 측정하였다. 일인자방법을 적용하였을 때 파괴인성은 다음의 식에 의해 결정할 수 있다.

$$G_c = \frac{\eta_{el}}{Bb} A_c \quad (1)$$

위 (1)식에서는  $G_c$  파괴인성을,  $B$  는 시편의 폭(본 시편의 경우 25 mm),  $b$  는 리가먼트 길이(본 시편의 경우 20 mm)를 나타낸다.  $A_c$  는 균열이 진전할 때의 하중-변위 선도의 면적을 나타내며  $\eta_{el}$  은 탄성일인자를 나타낸다. Rhee<sup>15</sup> 의 연구에 따르면  $\eta_{el}$  은 재료 물성에 영향을 받는 값으로,  $\eta_{el}$  은 표면처리 유/무에 영향을 받지 않는 것으로 발표되었다. 따라서  $\eta_{el}$  은 표면처리 유무에 상관없이 동일한 값으로서  $A_c$  가 결정되면  $G_c$  를 구할 수 있다. 두 경우의 파괴인성의 변화를 정량화하기 위해  $A_c$  를 결정하고 식 (1)을 적용하여 표면처리 전의  $G_c$  와 표면처리 후의  $G_c$  를 표준화하여 비교하였다.

파괴인성은 Fig. 5 에서 나타난 바와 같이 알루미늄의 표면처리에 의해 상당한 영향을 받음을 알 수 있다. Case 1 의 경우를 1로 보았을 때 Case 2 의 경우 약 3.5로 Case 1 에 비하여 Case 2 의 파괴인성이 250% 정도 증가한 것을 나타내고 있다. Chung<sup>13</sup> 에 따르면 알루미늄 /발포알루미늄 복합재 접착강도의 증가는 질소 플라즈마 표면처리에 의한 친수성의 증가 때문이라고 발표하였으며, Sanchis<sup>16</sup> 는 질소 플라즈마가 폴리우레탄의 표면에 화학적 조성을 변화시켜 친수성을 좋게 하며, 접합력을 증가시킨다고 발표하였다. Rhee<sup>17</sup> 는 알루미늄을 플라즈마로 처리할 경우 표면에너지가 높아져 친수성이

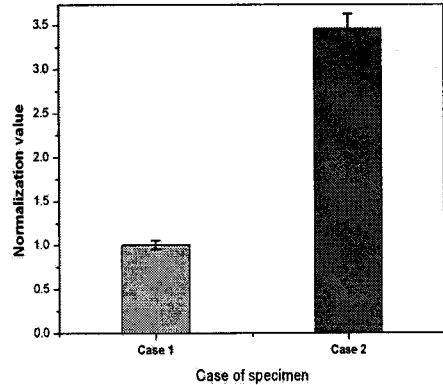
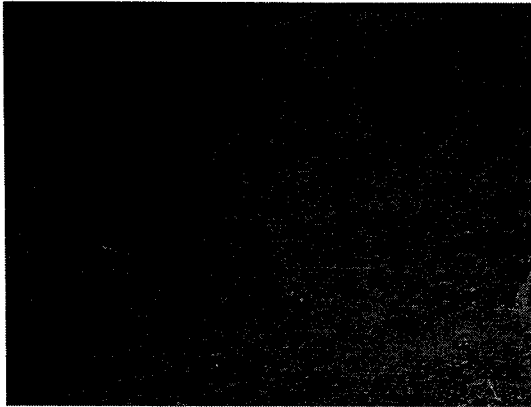


Fig. 5 Comparison of normalized  $G_c$  values for two cases of specimen

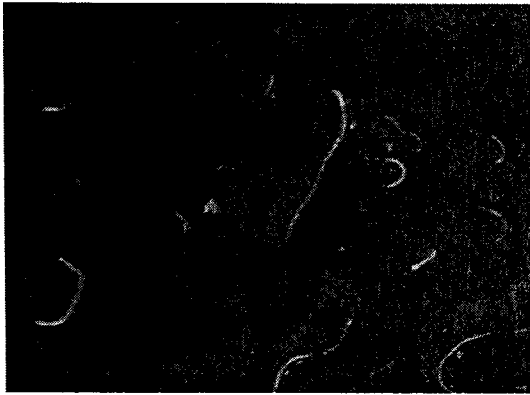
증대되며 이것은 접착제의 계면확산이 증대되어 파괴인성을 증가시킨다고 발표하였다. 위의 연구 결과들을 보면 표면처리에 의한 표면에너지의 증가는 친수성을 증가시키며, 접착제의 계면확산을 증대하여 파괴인성을 증가시키는 것으로 알 수 있다.

플라즈마 처리를 하는 경우 알루미늄 복합재의 파괴인성이 증가되는 이유를 알아보기 위해 금속현미경을 통해 파괴시편의 파단면을 비교 검사하였다.

Fig. 6 은 파괴시험 이후 알루미늄 파단면을 보여주고 있다. Case 1 에서는 알루미늄의 파단면에 이물질 없이 매우 깨끗한 것을 알 수 있다. 이는 알루미늄과 발포알루미늄이 접합될 때 에폭시가 발포알루미늄의 기공 속으로 들어가 접합되어 알루미늄과 에폭시의 접합면적보다 발포알루미늄과 에폭시의 접합 면적이 더 크게 된다. 접합 면적이 크게 되면 접합강도 역시 증가한다. 따라서 알루미늄과 에폭시의 접합강도가 발포알루미늄과 에폭시의 강도보다 낮아서 알루미늄 표면에서 계면파괴가 일어나며 알루미늄의 파단면이 매우 깨끗하다. Case 2 의 경우 Case 1 과 달리 알루미늄의 표면에 에폭시가 남아 있는 것을 볼 수 있다. Case 2 는 표면처리 후 알루미늄 표면에너지의 증가에 의해 친수성이 높아져, 알루미늄과 에폭시의 접합강도가 높아지게 된다. 이것은 표면처리된 알루미늄과 에폭시의 접합강도가 발포알루미늄과 에폭시의 접합강도 보다 커지게 되어 Case 1 과 달리 계면파괴 대신 접착제파괴가 발생했음을 알 수 있다.



Case 1



Case 2

Fig. 6 Comparison of fracture surfaces of aluminum plates after tests

#### 4. 결론

본 논문에서는 질소 플라즈마 표면처리가 알루미늄/발포알루미늄 복합재의 파괴 인성치에 미치는 영향을 실험을 통하여 알아보았다.

1) SLS 시편을 이용한 파괴시험에서 표면처리를 한 Case 2 가 약 536N, 표면처리를 하지 않은 Case 1 은 약 293N 의 파괴하중을 나타내었으며 Case 2 가 Case 1 에 비하여 약 86% 정도 높았다.

2) 본 연구에서는 파괴인성을 표준화 시켜 비교하였다. Case 1 을 1 로 보았을 때, Case 2 는 3.5 로 Case 1 에 비하여 Case 2 의 파괴인성이 약 250% 정도 증가하였다.

3) 질소 플라즈마 표면처리는 알루미늄의 표면 에너지를 높여 친수성을 증가시킨다. 이것은 접착제의 계면확산을 증대시켜 알루미늄/발포알루미늄

복합재의 파괴인성을 증가시키는 것으로 사료된다.<sup>13,16,17</sup>

#### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 자동차기반 기술개발사업의 지원으로 연구되었으며, 이에 사의를 포함합니다.

#### 참고문헌

1. Paul, A., Seshacharyulu, T. and Ramamurty, U., "Tensile strength of a closed-cell Al foam in the presence of notches and holes - Structure and Properties," Scripta materialia, Vol. 40, No. 7, pp. 809-814, 1999.
2. Papadopoulos, D. P., Konstantinidis, I. C., Papanastasiou, N., Skolianos, S., Lefakis, H. and Tsipas, D. N., "Mechanical properties of Al metal foams," Materials letters, Vol. 58, No. 21, pp. 2574-2578, 2004.
3. Antoniou, A., Onck, P. R. and Bastawros, A. F., "Experimental analysis of compressive notch strengthening in closed-cell aluminum alloy foam," Acta materialia, Vol. 52, No. 8, pp. 2377-2386, 2004.
4. Kim, S. Y., Park, S. H., Um, Y. S. and Hur, B. Y., "Sound Absorption Properties of Al Foam," Materials science forum, Vol. 486/487, pp. 468-471, 2005.
5. Jiejun, W., Chengong, L., Dianbin, W. and Manchang, G., "Damping and sound absorption properties of particle reinforced Al matrix composite foams," Composites science and technology, Vol. 63 No. 3/4, pp. 569-574, 2003.
6. Ramachandra, S., Sudheer Kumar, P. and Ramamurty, U., "Impact energy absorption in an Al foam at low velocities," Scripta materialia, Vol. 49, No. 8, pp. 741-745, 2003.
7. Asavavisithchai, S., Slater, D. and Kennedy, A. R., "Effect of tube length on the buckling mode and energy absorption of Al foam-filled tubes," Journal of materials science, Vol. 39, No. 24, pp. 7395-7396, 2004.
8. Cheng, Q., Altenhof, W., Yi Jin, S., Powell, C. and

- Harte, A. M., "Energy absorption of aluminum foam filled braided stainless steel tubes under quasi-static tensile loading conditions," *International journal of mechanical sciences*, Vol. 48, No. 11, pp. 1223-1233, 2006.
9. Santosa, S. and Wierzbicki, T., "Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam," *Computers & structures*, Vol. 68, No. 4, pp. 343-367, 1998.
10. Zhang, X. and Cheng, G., "A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns," *International journal of impact engineering*, Vol. 34, No. 11, pp. 1739-1752, 2007.
11. Toda, H., Takata, M., Ohgaki, T., Kobayashi, M., Kobayashi, T., Uesugi, K. and Makii, K., Aruga, "3-D Image-Based Mechanical Simulation of Aluminium Foams: Effects of Internal Microstructure," *Advanced engineering materials*, Vol. 8, No. 6, pp. 459-467, 2006.
12. Konstantinidis, I. Ch., Papadopoulos, D. P., Lefakis, H. and Tsipas, D. N., "Model for determining mechanical properties of aluminum closed-cell foams," *Theoretical and applied fracture mechanics*, Vol. 43, No. 2, pp. 157-167, 2005.
13. Chung, H. J., Rhee, K. Y., Han, B. S. and Ryu, Y. M., "Plasma treatment using nitrogen gas to improve bonding strength of adhesively bonded aluminum foam/aluminum composite," *Journal of alloys and compounds*, Vol. 459, Issue 1-2, pp. 196-202, 2008.
14. Kitazono, K., Kitajima, A., Sato, E., Matsushita, J. and Kuribayashi, K., "Solid-state diffusion bonding of closed-cell aluminum foams," *Materials science & engineering A*, Vol. 327, No. 2, pp. 128-132, 2002.
15. Rhee, K. Y., Lee, S. G., Choi, N. S. and Park, S. J., "Treatment of CFRP by IAR method and its effect on the fracture behavior of adhesive bonded CFRP/aluminum composites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 357, No. 1/2, pp. 270-276, 2003.
16. Sanshis, M. R., Calvo, O., Fenollar, O., Garcia, D. and Balart, R., "Surface Modification of a Polyurethane Film by Low Pressure Nitrogen Plasma for Improved Adhesion to Polyethylene Foam for Automotive Industry Laminates," *Plasma Processes and Polymers*, Vol. 4, No. s1, pp. 1091-1097, 2007.
17. Rhee, K. Y., Kim, M. T. and Choi, N. S., "A Study on the Fracture Toughness Improvement of Surface-treated CFRP and Aluminum Composites," *Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 27, No. 4, pp. 632-637, 2003.