

CNT강화 알루미늄 나노복합재의 자동차용 부품 적용성 연구

민병호*[†] · 남동훈* · 박훈모* · 이경문* · 이종국*

A Study on the Applicability of CNT/Aluminum Nanocomposites to Automotive Parts

Byung Ho Min*[†], Dong Hoon Nam*, Hoon Mo Park*, Kyung Moon Lee*, Jong Kook Lee*

ABSTRACT: Various characteristics(thermal expansion, microstructure, etc.) and mechanical properties of CNT-aluminum nano composites manufactured by volume production system were evaluated. Also, formability and durability were evaluated for potential applications in automotive parts, via compared with high-elasticity material (A390) and the current commercial product. As a result, this composite has excellent mechanical properties and formability, therefore, to verify its potential for application as light and high strength materials in automobile part.

초 록: CNT(carbon nanotubes) 강화 알루미늄 나노복합재는 우수한 기계적 특성으로 자동차용 차세대 경량재료로 주목을 받고 있으나 소재 제조 과정에 있어 CNT의 균일 분산 확보가 어렵고 대량제조 공정 확립이 어려워 자동차 부품으로의 적용이 어렵다. 그러나 점차 CNT 생산이 대량화 되고 있고 복합재료로서의 특성이 개선되고 있다. 따라서 본 연구는 CNT강화 알루미늄 나노복합재의 현 수준을 확인하고 자동차 부품 관점에서의 적용가능성을 검토하고자 하였다. 평가에 사용된 소재는 20L급 High energy milling기에서 알루미늄 분말과 CNT를 혼합한 후, 소결 및 압출하여 봉상(φ80)으로 제조되었다. 소재 관점에서 기계적 특성 및 열적 특성을 분석하였으며, 부품 적용성 관점에서는 현재 자동차 부품에 사용되는 소재와 그 소재가 사용되는 각 부품의 주요 요구 특성을 상대 비교하였다. 고강성과 성형성이 요구되는 부품에 사용되는 상용소재(A390) 및 SiC/Al 복합재와 성형성 비교평가를 진행하였으며, 탄성계수를 측정하였다. 피로 내구 및 경량화가 요구되는 메인베어링캡 양산소재와의 내구성 비교 평가를 실시하였다. 또한 고온 안정성이 요구되는 피스톤용 내열 소재와 열팽창계수 및 열화에 따른 강도저하를 비교 평가하였다. 구배가 큰 금형을 설계하여 단조 가공 후, 성형성(외관 crack 및 성형압 측정)을 비교하였으며, 내구성 평가를 위해 실제 부품인 H社 소형 엔진블록의 메인베어링 캡을 적용하여 일축 단품 피로 시험을 진행하였다. 이를 통해 우수한 소재 특성을 확인하였고, 자동차 구조용 부품으로 적용이 가능함을 확인하였다.

Key Words: 알루미늄(Aluminum), 카본나노튜브(Carbon-nanotubes), 자동차 부품(Automobile parts)

1. 서 론

탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 기계적, 전기적 그리고 열적특성이 매우 우수하며, 이로 인해 나노복합재료 제조 분야에서 기존의 강화재료를 대체할 수 있는 혁신적

인 물질로 여겨지고 있다[1-5]. 기계적인 특성으로는 철보다 강하며, 알루미늄보다 가볍다. 이론적으로 또는 실험적으로 판명된 단일벽 탄소나노튜브(single-wall carbon nanotube, SWNT)는 매우 높은 인장 탄성율(640 GPa to 1 TPa)과 인장 강도(150~180 GPa)를 가진다. 이러한 특징으

Received 7 July 2015, received in revised form 27 August 2015, accepted 27 August 2015

*Affiliation Hyundai.Motor Company

*[†]Affiliation Hyundai.Motor Company, Corresponding author (E-mail: mbh8994@hyundai.com)

로 인해 CNT강화 알루미늄 나노복합재 또한 우수한 기계적 특성으로 자동차용 차세대 경량재료로 주목을 받고 있다[6-10]. 그러나 소재 제조 과정에 있어 CNT의 균일 분산 확보가 어려우며 대량제조 공정 확립이 어려워 자동차 부품으로의 적용이 요원하다. 본 연구는 CNT강화 알루미늄 나노복합재 개발에 따른 자동차 부품 관점에서의 적용가능성을 검토하였다. 소재 관점에서 기계적 특성 및 열적 특성을 분석하였으며 부품 관점에서는 현재 자동차 부품에 사용되는 소재와 그 소재가 사용되는 각 부품의 요구 특성을 상대 비교하였다. 고강성이 요구되는 부품에 사용되는 고탄성 상용소재(A390) 및 SiC/Al 복합재와 성형성 비교평가를 진행하였으며, 피로 내구 및 경량화가 요구되는 메인베어링캡 양산소재와의 내구성 비교 평가를 실시하였다. 또한 고온 안정성이 요구되는 피스톤용 내열 소재와 열팽창계수 및 열화에 따른 강도저하를 비교 평가하여 실제 자동차용 부품으로의 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 실험 방법

기계적 합금화를 통해 나노 복합 분말을 제조한 후 그것을 다시 2차 공정(소결, 압출)을 진행하는 방식이 현재 가장 많이 사용되고 있는 CNT 복합재 제조 방법이다. 기계적 합금화는 고에너지밀링법(high energy ball mill, HEM)이 사용되며, 이것은 볼, CNT, 알루미늄 분말을 혼합하고 운동 에너지를 가해 분말 입자 상호 간의 충돌, 분쇄 과정을 반복하게 함으로서 나노 복합 분말 제조하는 방법이다[11]. 본 연구에 사용된 소재는 50L급 high energy milling기에서 알루미늄 합금(Al 5083) 분말과 CNT를 혼합하여 나노 복합 분말을 제조하고, 소결 후 압출하여 봉상($\phi 80$)으로 제조되었다.

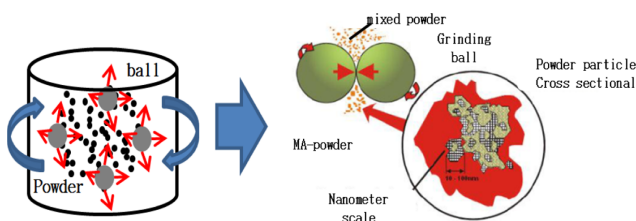


Fig. 1. Principle of ball milling

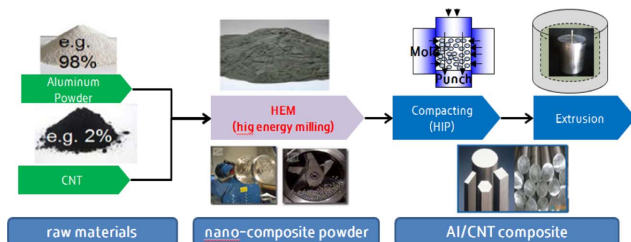


Fig. 2. Manufacturing process of the composite

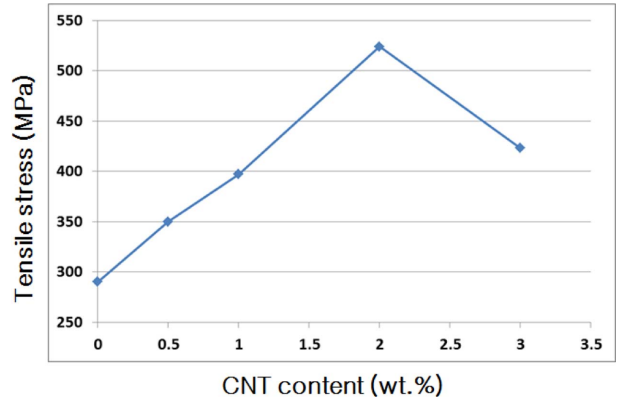


Fig. 3. Effects of CNTs content on relative tensile stress of composites

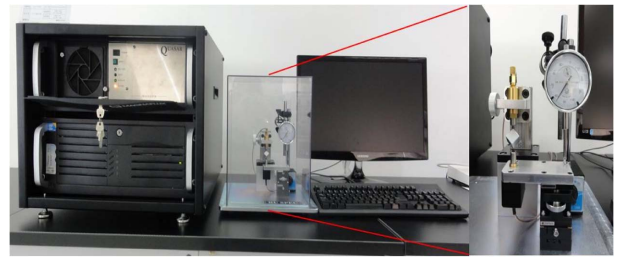


Fig. 4. Resonant ultrasound spectroscopy, RUS

Fig. 3과 같이 CNT 함량 증가에 따른 복합재 강도를 평가하였다. 함량 증가에 따라 강도가 증가하나 2 wt.% 이상 첨가 시 오히려 강도가 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 일정 부피 이상의 CNT가 첨가되었을 때 균일 분산이 어려워 오히려 물성 저하를 야기시키는 원인으로 작용하였다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 CNT 첨가량의 최적 조건을 2 wt.%(약 4 vol.%)로 하여 추가 소재 분석 및 부품 적용성 평가를 진행하였다.

특히 복합재의 탄성계수를 측정하기 위해 Fig. 4에 나타난 초음파 공명 분광법 장비(resonant ultrasound spectroscopy, Magnaflux 社)를 이용하여 탄성측정을 실시하였다. 이 방법은 금속의 공진 주파수를 측정하여 탄성계수, 전단계수, 체적탄성율, 프와송비와 같은 탄성 물성치를 계산할 수 있어 금속이나 금속복합재의 평가에 적합하다.

복합재의 성형성을 평가하기 위해 구배가 큰 금형을 설계하여 단조 가공 후, 고탄성 상용 합금(A390 17%, 19% Si 첨가) 및 SiC 금속 복합재와 외관 crack 및 성형압을 비교하였으며, 고온 인장시험을 통해 신율을 비교하였다. 단조 조건은 19% Si이 첨가된 기존 라이너 소재의 압출비(2.7) 대비 가혹한 조건(3.77)에서 실시하였으며 성형온도는 300, 350, 400°C에서 진행하였다.

내구성 평가를 위해 자기 공명 피로시험기(Rumol 社)를 활용한 단품 피로시험을 실시하였다. 부품으로는 H사 소형엔진(1.2 l)의 메인베어링 캡으로 선정하여 단조 가공하

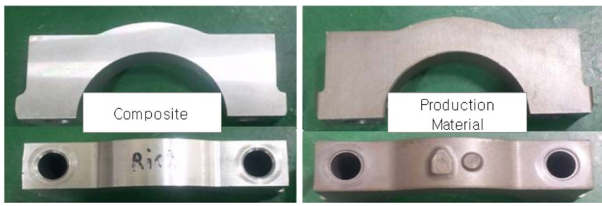


Fig. 5. Main bearing cap shapes after forging

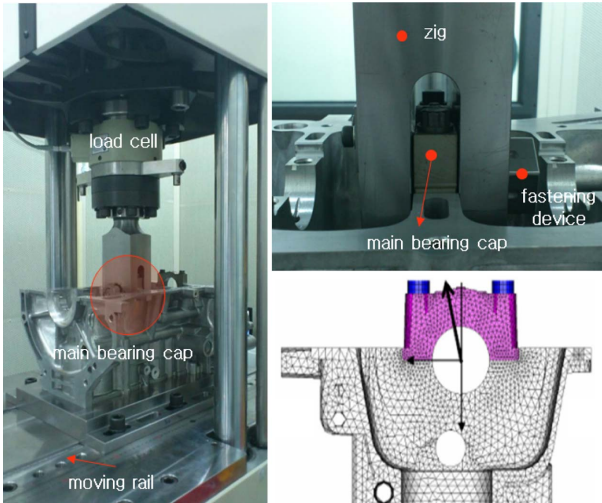


Fig. 6. Fatigue test equipment

였다. 현재 양산 소재인 steel 소결재와 CNT 강화 알루미늄 복합재 단조 가공 부품의 비교 결과 Fig. 5와 같이 복합재의 외관 crack 및 미성형 부분은 보이지 않아 부품 형상 구현에 문제가 없음을 확인하였다.

단품 피로시험은 시편용 장비를 Fig. 6와 같이 부품 용으로 개조하여 평가하였다. 메인베어링 캡과 엔진 블록 체결시 디지털 토크렌치를 이용하여 실제 소성 볼트의 체결 조건을 적용하여 2 kN, 90도 각조임을 실시하였다. 본 평가의 목적은 부품 상태에서 현재 사용 중인 소재와의 내구도 상대평가에 있다. 따라서 오일 조건은 구현이 어려워 건식조건에서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조 및 성분분석

제조된 복합재 내의 CNT 존재 유무 확인 및 형상 확인을 위해 Raman 분석 및 TEM 분석을 실시하였다. 또한 CNT 첨가량 확인을 위해 C/S분석(carbon/sulfur determination)을 실시하였다.

라만 분광 분석을 통해 얻어지는 다중벽 탄소나노튜브(multi wall nanotube, MWNT)의 주요한 피크들은 전형적인 흑연면(graphite sheet)의 특성에 의해 나타나는 1590 cm^{-1} 부근의 G-밴드 피크와 결함을 가진 흑연막이나 비정질 탄소 입자로 여겨지는 1350 cm^{-1} 부근의 D-밴드 피크이다. 본 소

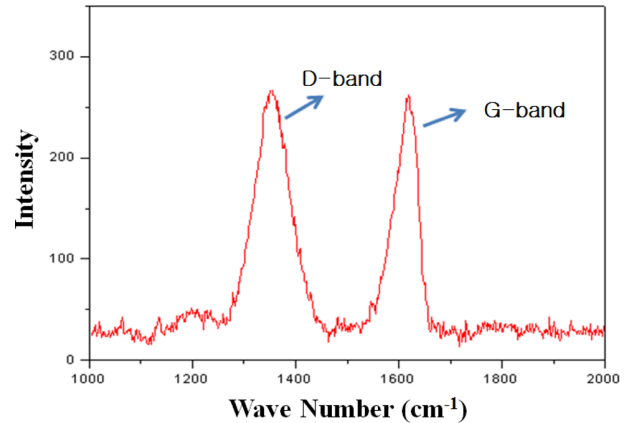


Fig. 7. Raman peak graph of the composite

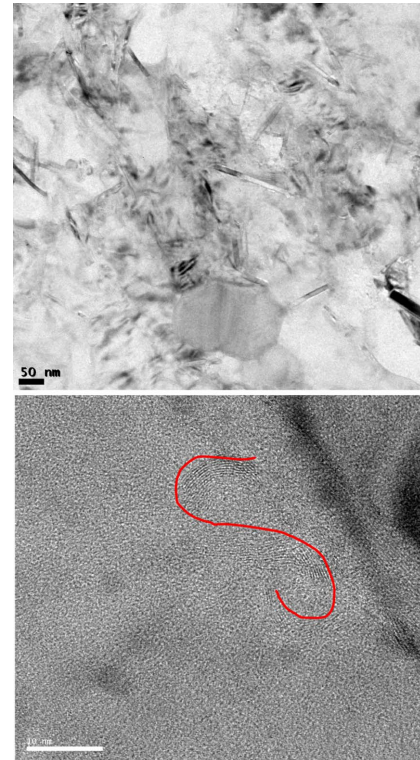


Fig. 8. TEM images of the composite

재도 Fig. 7 그래프에서 보여지듯이 D, G밴드를 통해 MWNT가 분산되어 있음을 확인할 수 있다[12].

또한 Fig. 8의 TEM image를 통해서 알루미늄 기지 내에 CNT가 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 image상에서 CNT와 알루미늄 기지 사이의 계면에 결함이 보이지 않는 것으로 보아 매우 단단한 기계적 결합을 이루고 있다고 판단된다.

C/S분석은 $\phi 80$ 의 봉상 압출재의 수직방향으로 절단한 단면의 12개 부분에서 측정하였다. 복합재 내 존재하는 CNT는 약 1.7 wt%로 첨가량 2 wt% 대비 85% 수준이다. 또한 현재 복합재 내의 분산된 강화상의 분산도를 측정하는 표준

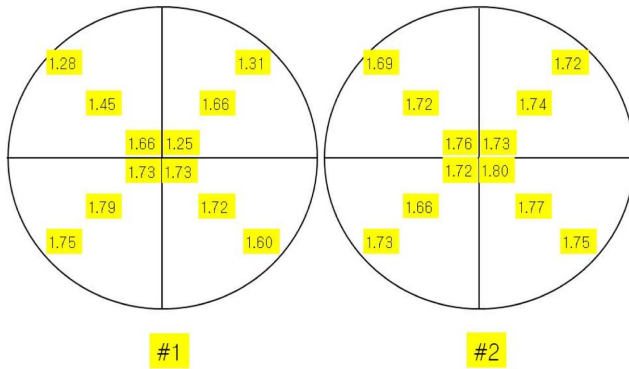


Fig. 9. Carbon/sulfur determination

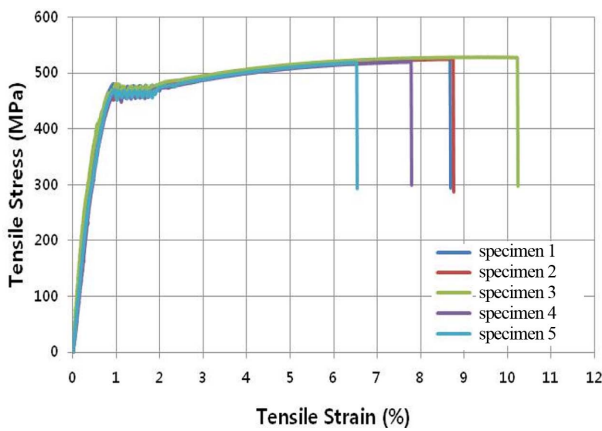


Fig. 10. Stress-strain curve of the composite

방법이 없는 현재, 각 측정 부위의 탄소함량의 비교를 통해 거시적인 분산도를 확인할 수 있다. 탄소 함량차이의 편차가 0.5~0.04로서 본 연구에서 사용된 복합재는 70% 이상 양호하게 분산된 것으로 판단된다(Fig. 9).

3.2 물성 평가

CNT분산에 의한 소재 특성향상 효과를 확인하고 자동차 구조 용 재료로서의 가능성을 판단하기 위해 인장시험을 통한 기계적 물성을 평가하였다. 인장 시험편은 ASTM E8 의 봉상 시험편으로 가공하여 실시하였다.

그 결과 기지합금(Al 5083) 대비 인장강도 80%, 항복강도

Table 1. Mechanical properties of matrix and composite

	Hardness (Hv)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al 5083 (matrix)	87	145	290	25
Al 5083 + 2 wt% CNT (composite)	162.6	459	524	8.3
	86% ↑	216% ↑	80% ↑	66% ↓

216% 증가, 연신율 66% 감소됨을 확인하였다. 기지 합금은 100 μm 크기의 Al 5083 분말을 동일 조건에서 압출하여 제조하였다. 약 3~4 vol%가 첨가 된 것을 고려할 때 CNT에 의한 강도 향상 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 균일 분산 공정이 확보되고 CNT 첨가량을 증가시킨다면 그 한계가 존재하더라도 보다 더 높은 강도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

복합재의 탄성계수를 측정하기 위해에 나타낸 초음파 공명 분광법(Resonant Ultrasound Spectroscopy) 장비를 이용하였다. 계산된 공진주파수와 RUS의 측정 공진주파수의 오차를 최소화하여 정확한 탄성계수를 측정하였다. 측정된 stiffness로부터 공학적 탄성계수인 Young's modulus를 측정하였다. 측정 결과, 78 GPa로 CNT 첨가에 의해 기지(71 GPa) 대비 9.8% 상승하였다. 탄성계수는 자동차용 부품의 강성과 NVH요구 특성에 매우 중요한 물성으로 CNT의 높은 탄성계수를 활용하여 고탄성 소재의 제조 가능성을

Table 2. High temperature tensile test

	Temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al-CNT	25	524.0	8.3
	350	176.0	14.0
	400	111.0	15.3
	450	97.7	11.0
Al-30%SiC	350	94.0	1.3
	400	89.7	1.3
	450	84.0	1.3
A390-19%Si	350	164.0	4.3
	400	127.3	5.7
	450	86.0	8.0

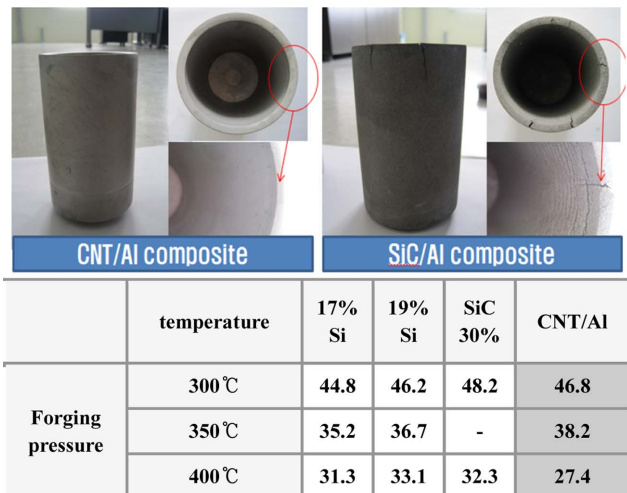


Fig. 11. Formability evaluation

확인하였다.

3.3 부품 성형성 평가

고온 인장 시험 결과(Table 2), CNT 복합재의 고온 신율이 타 소재 대비 매우 우수하였으며 이를 통해 고온 성형 공정에서도 유리할 것으로 판단하였다.

단조 성형 결과(Fig. 11), 복합재 단조품의 외관 부 crack이 전혀 없었으며 성형 시 필요한 압력 또한 현 양산소재 및 SiC복합재 대비 가장 낮았다. 특히 양산 적용 온도인 400°C에서는 성형압이 17% 감소하였다.

3.4 고온 구동 부품 요구 특성 평가

CNT첨가에 의한 열팽창 계수 변화를 dilatometer를 이용하여 측정하였다. 온도 구간은 엔진 피스톤 구동온도(350°C)를 고려하여 30~450°C에서 실시하였으며 기지소재(Al 5083)와 비교 평가하였다.

Fig. 12의 그래프에서 확인할 수 있듯이 복합재의 열팽창

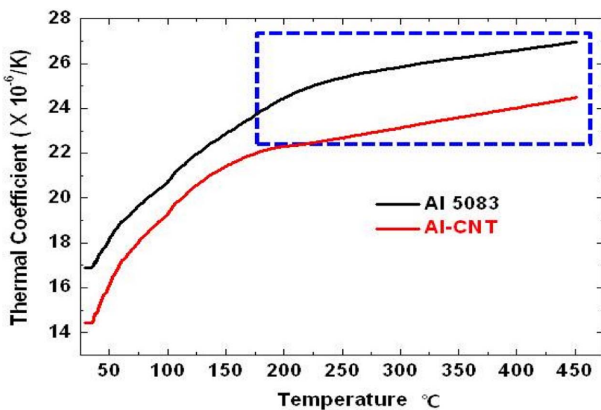


Fig. 12. The coefficient of thermal expansion of composite

Table 3. Material degradation of high-temperature

	Temperature (°C)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Al-CNT	200°C	566.1	8.5
	350°C	552.9	9.1
DM106	200°C	222.9	0.56
	350°C	170.9	0.7

계수가 기지합금 보다 낮아졌음을 확인할 수 있다. 특히 저온(30~150°C) 6.3%, 고온(200~450°C) 9.2%의 감소효과를 볼 때 고온 구간에서 더욱 안정적인 거동을 보임을 확인할 수 있다. 이는 고온 부품 적용시 치수 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 추가로 고온 노출에 의한 열화 평가를 실시하였다. 200, 350°C에서 300시간 노출시킨 후 공냉하여 상온 인장시험을 실시하였으며 현재 고 내열성 피스톤 소재로 사용중인 DM106(Al-12Si-Cu-Ni계) 소재와 비교하였다.

Table 3과 같이 상용 소재는 강도가 25% 감소한 반면 복합재의 강도는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 각 소재의 초기 강도 차이가 존재하나 복합재의 경우 열화에 의한 강도 저하가 거의 없거나 오히려 상온 인장 강도 보다 일부 상승한 결과를 확인할 수 있었으며, 이를 통해 고온에 장시간 노출되는 부품의 적용이 가능함을 확인할 수 있다. 강도 상승의 원인은 열처리에 의한 matrix의 변화에 기인한 것이라고 판단되지만, 향후 정확한 상세 분석을 통해 추가 확인이 필요할 것이다.

3.5 내구성 평가

피로 시험의 하중 조건은 κ 엔진 (1.2 l) 실린더 블록 하부 구조 해석 결과를 참고하여 설정하였다. 해석 결과와 동일한 최대 하중 분포 위치(Fig. 13)에서 파단이 일어난 것을 확

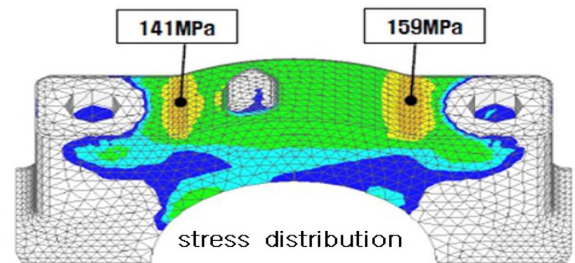


Fig. 13. Location of Fatigue Fracture

Table 4. Fatigue durability evaluation

		CNT/Al composite					Commercial material	
Safety factor		2.8	2.6	2.4	2.0	1.6	2.0	1.6
Load (KN)	P max	50.68	47.06	43.44	36.2	28.96	36.2	28.96
	P mean	26.34	24.53	22.72	19.1	15.48	19.1	15.48
Cycle		4,493,960	6,894,341	10^7	10^7	10^7	219,207	5,015,310
Result		Failure	Failure	Pass	Pass	Pass	Failure	Failure

인하였다. 수직 방향의 최대 베어링 하중이 18.1 KN (안전율 1.0)인 조건을 기준으로 하여 하중 증가에 따른 피로 강도를 측정하였다. 그 결과 10^7 cycle 기준으로 복합재의 경우 최대 안전율이 2.4 이상으로 양산 소재 대비 피로 내구한계 우위에 있음을 확인하였다(Table 4).

4. 요 약

본 연구에서는 CNT강화 알루미늄 나노복합재의 자동차 부품 적용가능성을 검토하였다. 평가에 사용된 소재는 20L 급 High energy milling기에서 알루미늄(Al 5083) 분말과 CNT를 혼합한 후, 소결 및 압출하여 봉상($\phi 80$)으로 제조되었다. 소재 관점에서 복합재의 미세구조 및 CNT 구조를 확인하였으며 기계적 물성 및 탄성계수를 평가하였다. 또한 부품 관점에서 성형성 및 고온 구동 부품의 요구 특성에 따른 열팽창 계수를 평가하였고 내열성 및 내구성 시험을 진행하였다. 그 결과는 아래와 같다.

1. 기계적 합금화 방법 (HEM)을 통해 제조된 CNT강화 알루미늄 나노 복합재의 기지 내에 분산된 CNT구조와 계면 관측 결과 단단한 결합을 이루고 있음을 확인하였다.

2. 소재 평가 결과, CNT분산에 의해 기지합금 대비 인장강도 80%, 항복강도 216% 상승함을 확인했고, 탄성계수 또한 9.8% 상승하였음을 확인하였다.

3. 구배가 큰 형상을 설계하여 양산 온도 조건(400°C)에서 단조 성형하여 성형성을 평가한 결과, 외관 부 crack이 없으며 성형 시 필요한 압력 또한 현 양산소재(A390) 대비 낮아 우수한 성형성을 확인할 수 있었다.

4. 고온 부품으로의 적용가능성을 위한 열팽창 계수 및 내열성을 평가하였다. 열팽창 계수는 고온($200\sim 450^{\circ}\text{C}$) 구간에서 9.2%의 감소되고, 고온 노출에 의한 강도 감소가 거의 없음을 확인하였다.

5. 실제 자동차 부품인 H社 소형엔진의 메인베어링캡을 선정하여 단조 가공 후 내구성 평가를 진행하였다. 가공 후 외관상 Crack 및 결함이 없음을 확인하였으며, 주응력 분포 지점에서의 파단을 확인 하였으며 현 양산 소재(steel 소결재) 대비 피로 한계 우위에 있음을 확인하였다.

CNT강화 알루미늄 나노 복합재는 우수한 기계적 특성을 보이며 부품의 고온 요구 특성에서도 현재 양산 소재 대비 동등 이상의 특성을 보이는 것을 확인하였다. 추후 균일 분산 및 대량 생산 공정이 보완되고 CNT소재 및 공정 비용이 감소된다면 고탄성, 고강도 경량재료로 자동차 부품에 적용 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Wong, E.W., Sheehan, P.E., and Lieber, C.M., "Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes," *Science*, Vol. 277, 1997, pp. 1971-1975.
2. Falvo, M.R., Clary, G.J., Taylor, II, R.M., Chi, V., Brooks, Jr, F.P., Washburn, S., and Superfine, R., "Bending and Buckling of Carbon Nanotubes under Large Strain," *Nature*, Vol. 389, 1997, pp. 582-584.
3. Yu, M.F., Files, B.S., Arepalli, S., and Ruoff, S., "Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties," *Physical Review Letters*, Vol. 84, 2000, pp. 5552-5555.
4. Yu, M.F., Lourie, O., Dyer, M.J., Moloni, K., Kelly, T.F., and Ruoff, R.S., "Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties," *Science*, Vol. 287, 2000, pp. 637-640.
5. Salvétat, J.P., Kulik, A.J., Bonard, J.M., Briggs, G.A.D., Stockli, T., Metenier, K., Bonnamy, S., Beguin, F., Burnham, N.A., and Forro, L., "Elastic Modulus of Ordered and Disordered Multi-walled Carbon Nanotubes," *Nanotechnology*, Vol. 17, 2006, pp. 7-12.
6. Goh, C.S., Wei, J., Lee, L.C., and Gupta, M., "Development of Novel Carbon Nanotube Reinforced Magnesium Nanocomposites Using the Powder Metallurgy Technique," *Science*, Vol. 287, 2000, pp. 637-640.
7. Shimizu, Y., Miki, S., Soga, T., Itoh, I., Todoroki, H., Hosono, T., Sakaki, K., Hayashi, T., Kim, Y.A., Endo, M., Morimoto, S., and Koide, A., "Multi-walled Carbon Nanotube-reinforced Magnesium Alloy Composites," *Scripta Materialia*, Vol. 58, 2008, pp. 267-270.
8. Kuzumaki, T., Miyazawa, K., Ichinose, H., and Ito, K., "Processing of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composite," *Journal of Materials Research*, Vol. 13, 1998, pp. 2445-2449.
9. He, C., Zhao, N., Shi, C., Du, X., Li, J., Li, H., and Cui, Q., "An Approach to Obtaining Homogeneously Dispersed Carbon Nanotubes in Al Powders for Preparing Reinforced Al-matrix Composites," *Advanced Materials*, Vol. 19, 2007, pp. 1128-1132.
10. Ma, R.Z., Wu, J., Wei, B.Q., Liang, J., and Wu, D.H., "Processing and Properties of Carbon Nanotubes-nano-SiC Ceramic," *Journal of Materials Science*, Vol. 33, 1998, pp. 5243-5246.
11. Kim, K.T., Cha, S.I., Lee, K.H., Mo, C.B., and Hong, S.H., "Characterization of Carbon Nanotube/Cu Nanocomposites Fabricated by using Nano-sized Cu Powders," *Materials Research Society Symposium Proceeding*, Vol. 821, 2004, pp. 25.
12. George, R., Kashyap, K.T., Rahul, R., and Yamdagni, S., "Strengthening in Carbon Nanotube/aluminium (CNT/Al) Composites," *Scripta Materialia*, Vol. 53, 2005, pp. 1159-1163.