

LP-EGR이 적용된 디젤 엔진 인터쿨러용 알루미늄 튜브의 내식성 향상

안 준* · 하 석 · 곽 동 호 · 정 병 준

현대자동차 금속재료연구팀

Corrosion Characteristics Improvement of Aluminium Tube for Diesel Engine Intercooler with LP-EGR(Low Pressure-Exhaust Gas Recirculation)

Joon Ahn* · Seok Ha · Dongho Kwak · Byungjun Jung

Metallic Materials Research Team, Hyundai-motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea
(Received 21 March 2012 / Revised 23 April 2012 / Accepted 16 May 2012)

Abstract : Recently, various after-treatment systems, such as LP-EGR(Low Pressure-Exhaust Gas Recirculation), SCR(Selective Catalytic Reduction) and LNT(Lean NO_x Trap), were developed to obey the stringent emission regulations of diesel engine. There are many researches on LP-EGR system because it has advantages of NO_x reduction and low fuel consumption. But, condensation water is generated in internal of intercooler tube and it contains various types of anion that cause the corrosion of aluminium tube. In this study, it is examined that the condensation water effects on corrosion of aluminium tube. And method for improvement of corrosion characteristics is investigated using the dipping and electrochemical test.

Key words : LP-EGR(저압배기가스 재순환), Corrosion(부식), Intercooler(인터쿨러), Aluminium tube(알루미늄 튜브)

1. 서론

지구 온난화 등 환경 문제가 대두되면서 자동차 배기가스에 대한 규제가 강화되고 있으며, 유럽 국가들을 포함하여 전 세계적으로 배기가스 배출량을 엄격히 규제하고 있다. 디젤 엔진의 배기가스에는 CO₂, NO_x, PM 등의 유해 물질이 포함되어 있는데, 2014년 9월부터 적용 예정인 유럽연합의 자동차 배기가스 법규인 EURO 6¹⁾에 의하면 승용차용 디젤엔진의 경우 NO_x 발생량을 80mg/km 수준으로 저감시켜야 한다. 이에 대응하기 위해 자동차 관련 업체들은 LP-EGR, SCR 및 LNT 등의 NO_x 저감 기술을 적용하기 위해 노력 중이다.

실린더헤드 후단의 배기가스를 재순환하여 압축된 공기와 섞어주는 기존의 HP-EGR 장치와 달리,

LP-EGR 장치는 DPF 후단의 배기가스를 재순환하여 터보차저 전단에서 공기와 섞어준다. LP-EGR을 적용하면 실린더별 가스 분배성이 좋아지고, 더욱 낮은 온도의 가스 공급이 가능하게 되므로 NO_x, PM 저감 및 연비 향상에 효과가 있다고 알려져 있다.²⁻⁷⁾

그러나, LP-EGR을 적용할 경우 수증기량이 많은 배기가스가 인터쿨러로 유입되고, 인터쿨러에서 온도가 하강할 경우, 인터쿨러 튜브 내부에 응축수가 발생할 수 있다. 응축수는 열교환 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 응축수에 포함되어 있는 음이온의 영향으로 튜브 소재가 부식될 위험성이 높아진다.^{8,9)} 이러한 응축수에 의한 소재의 부식은 부품의 수명과 관련된 중요한 인자인데, 이에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 응축수 환경에서 인터쿨러 소재의 내식성을 평가하기 위해 실제 엔진의 인터쿨러

*Corresponding author, E-mail: ahnjoon@hyundai.com

에서 생성된 응축수를 분석한 후 응축수 모사액을 제조하였으며, 이를 이용하여 현재 양산 중인 A3003 소재의 내식성을 평가하였다. 평가 결과를 바탕으로 내식성이 향상된 소재를 제안함으로써, LP-EGR 적용된 인터쿨러 튜브 소재의 수명 향상을 꾀하였다.

2. 실험 방법

2.1 대상 소재

현재 양산되고 있는 인터쿨러 튜브 소재인 A3003을 대상으로 평가를 진행하였다. 일반적으로 A3003 소재는 인터쿨러 등 열교환기 부품에 널리 사용되는 소재로서 성분 규격을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of A3003 (wt%)

	Cu	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Al
Nominal	0.05 ~0.20	0.60 Max.	0.70 Max.	0.10 Max.	1.00 ~1.50	-	balance
Actual	0.12	0.075	0.44	0.045	1.02	0.01	balance

2.2 부식평가용 응축수 모사 용액

응축수 환경에서의 소재의 부식 거동을 파악하기 위해서는 실제와 유사한 환경을 재현하는 것이 중요하다. 이는 응축수에 포함되어 있는 성분의 종류 및 함량에 따라 소재의 내식성이 변화할 수 있기 때문이다. 이를 위해 실제 LP-EGR 장치가 장착된 엔진의 인터쿨러에서 발생한 응축수를 이온크로마토그래피(ICS-3000, DIONEX社)를 이용하여 성분 분석하였다. 총 7차에 걸쳐 수집한 응축수의 성분 분석 결과를 Table 2에 나타내었다.

응축수에 포함된 성분 함량에 차이를 보이는 이유는 엔진 매핑이 다르기 때문이다. 즉, 엔진 매핑에 따라 연소 조건이 변하게 되고, 그에 따른 연소 생성물의 종류 및 양도 변하게 된다. 산성 계열의 아세트산, 포름산, 황산, 질산 이온과 함께 일부 할로젠계 이온들도 검출되었다.

이러한 이온들은 알루미늄 소재의 부식을 가속화시키는 역할을 하기 때문에 인터쿨러 튜브의 수명을 단축시킬 수 있다. 평가를 위한 성분별 함량은, 소재가 노출될 수 있는 열악한 상황을 구현하기 위해, 최대치를 선택하였다. 이와 같이 제조된 응축수 모사액의 성분 및 함량을 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Ionchromatography result of condensation water

Ion	Condensation Water (unit: mg/L)						
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
Acetate	-	193.9	1051.5	174.7	126.9	-	42.9
Formate	-	31.8	413.5	66	22.0	18.0	10.5
Chloride	2.3	4.9	-	6.5	93.9	32.2	71.7
Nitrate	-	6	-	61.6	51.4	24.5	5.8
Flouride	0.7	-	-	77.4	68.8	79.6	3.9
Nitrite	10.2	-	-	3.8	4.5	18.8	-
Bromide	-	2.3	-	-	-	-	-
Sulfate	10.1	7.7	-	102.5	-	-	-
Phosphate	1.1	-	-	-	-	-	-

Table 3 Ion composition of solution for dipping and electro-chemical test

Ion	Amount (unit: mg/L)	Ion	Amount (unit: mg/L)
Acetate	1052	Sulfate	103
Formate	414	Flouride	80
Chloride	94	Nitrite	20
Nitrate	62		

2.3 침지 평가

소재별로 정성적인 내식성을 평가하기 위해 침지 평가를 진행하였다. 소재를 20mm의 길이로 절단한 뒤 절단면은 SiC 재질의 그리드#1000 연마지로 연마하였다. 연마한 시편을 아세톤 및 알코올 용액으로 각 5분간 초음파 세척을 실시하여 표면의 기름때 등 이물질을 제거하였다. 100ml 비커에 응축수 모사액 80ml를 채운 후 시편이 완전히 잠기도록 투입하였고, 비커 상단을 3점의 알루미늄 호일로 밀봉하였다. 비커를 80°C 유지되는 환경 챔버(Dry Oven, 대성리드텍社) 안에 넣고, 250시간과 500시간 경과 후 비커를 꺼내어 시편의 표면 및 단면 관찰을 통해 부식 정도를 평가하였다.

2.4 전기화학적 평가

소재의 정량적 내식성을 평가하기 위해 전기화학적 평가를 진행하였다. 동전위 분극시험(VMP2, Bio Logic社)은 시편에 순차적인 전위를 인가하여 시편으로부터 출력되는 전류밀도를 측정하는 방법으로, 시험으로부터 얻어진 분극 곡선을 이용하여 소재의 공식이 시작되는 시점을 알 수 있고 부식속도를 계

산할 수 있다. 시험 용액은 응축수 모사 용액을 사용하였고, 통기 조건으로 진행하였다. 시편과 용액사이의 계면 반응을 안정화시키기 위하여 시편을 6시간 동안 침지시켰다. 안정화된 개방회로전위로부터 음극으로 0.25V, 양극으로는 포화감홍전극의 0.2V까지 1mV/min의 속도로 전위를 인가하여 부식 전류 밀도값을 측정하였다. 공식이 시작될 때의 전위값을 소재별로 비교하였고, 공식 전위가 높을수록 저항성이 크다는 것을 의미한다.

평가 완료한 시편의 표면과 단면을 광학현미경(CK40, OLYMPUS社)으로 관찰하여 부식 양상을 확인하였다.

2.5 압출성 평가

소재의 생산성을 검토하기 위해 압출 평가(UBE社, 2250T)를 실시하였다. 7인치 빌렛(billet)을 제작하였고, 압출 전 단계에서 520°C로 예열하였다. 금형은 현재 양산되고 있는 인터쿨러 튜브 금형을 사용하였다. 아래의 Fig. 1에 튜브의 형상을 나타내었다.

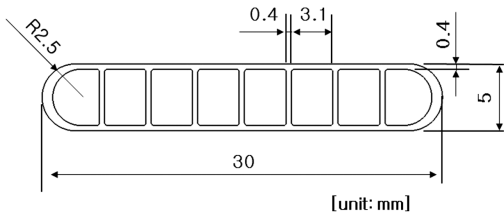


Fig. 1 Dimension of intercooler tube

3. 실험결과 및 고찰

3.1 A3003 소재 내식성 평가 결과

인터쿨러 부품에서 채취한 A3003소재를 총 500시간 동안 침지평가를 진행하였으며, 250시간 및 500시간 시점에 확인한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 250시간이 경과한 시점에서는 표면에 미세한 부식 흔적만 있을 뿐 내부로 진행된 흔적은 없었다.

그러나, 500시간 경과 시점에서는 공식이 발생하여 내부로 진행되었다. 단면을 절단하여 공식이 진행된 정도를 확인한 결과, 내부 250 μ m까지 부식된 것이 확인되었다. 이는 실제 부품에서 응축수에 의

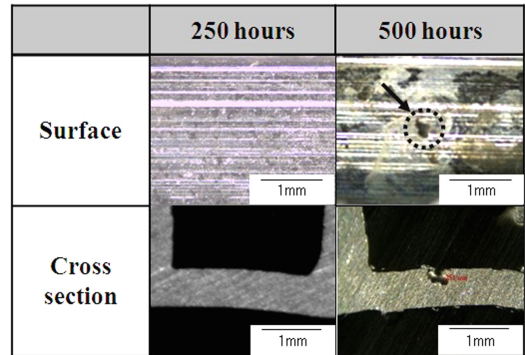


Fig. 2 Dipping test result of A3003

해 소재의 부식 문제가 발생할 수 있음을 의미한다.

3.2 A3003소재의 내식성 향상

A3003 소재의 내식성 향상 방법을 성분 측면에서 검토하기 위해 건식분광분석법(POLYVAC2000, LGER ANALYTICAL社)을 통해 성분을 분석하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

성분 분석 결과, 첨가 원소 중 내식성에 큰 영향을 줄 수 있는 것은 Cu, Fe 성분으로, 이 두 원소는 알루미늄 소재의 음극 분극 현상을 최소화하는 역할을 하여 부식에 악영향을 준다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 이를 바탕으로 A3003소재의 Cu, Fe 함량을 최소화 하도록 성분을 조정하였다. 또한, 강도 향상을 위한 원소인 Mn의 함량은 소재의 압출성을 고려하여 기존과 동일한 수준으로 정하였다. 성분 조정 이외의 다른 영향을 차단시키기 위해 기존과 동일한 빌렛 제조 및 압출 공정을 통하여 샘플을 제작하였다. 제작된 개선 소재의 성분을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Chemical composition of improved A3003 (wt%)

	Cu	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Al
Actual	-	0.035	0.09	-	1.17	0.015	balance

3.3 A3003 개선 소재의 내식성 평가 결과

A3003 개선 소재를 침지 평가하여 A3003소재의 결과와 비교하였다. 총 500시간 침지 평가를 진행하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

250시간 및 500시간 시점 모두 표면에 미세한 부식 흔적만 존재할 뿐, 소재 내부로의 부식 진행은 없

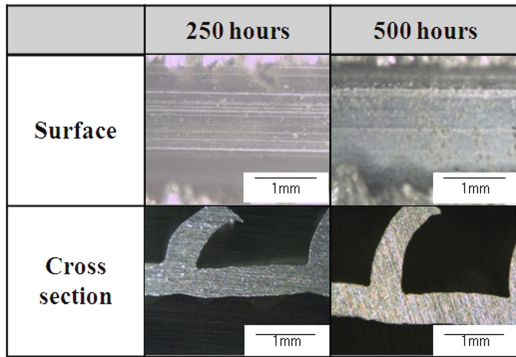


Fig. 3 Dipping test result of improved A3003

었다. 이는 침지 평가 500시간 시점에 내부 250 μ m까지 진행된 A3003 소재와 비교할 때, 소재의 내식성이 향상되었음을 의미한다.

3.4 전기화학적 평가 결과(정량적 평가)

내식성의 차이를 정량적으로 파악하기 위해 두 소재의 전기화학적 평가를 실시하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 알루미늄 소재의 부동태 피막이 본래의 기능을 하지 못하고 파괴되어 전류 밀도 값이 갑자기 증가하는 부분(A부분)이 공식이 시작되는 시점이다. 개선 소재가 A3003 대비 부동태 피막이 파괴되는 시점이 지연되었음을 확인할 수 있다. 또한, 개선 소재의 부식전위는 낮아졌으나 공식전위가 높아진 것은 개선 소재의 부동태 피막이 응축수 환경에서 더욱 안정하다는 것을 의미한다. 공식 전위의

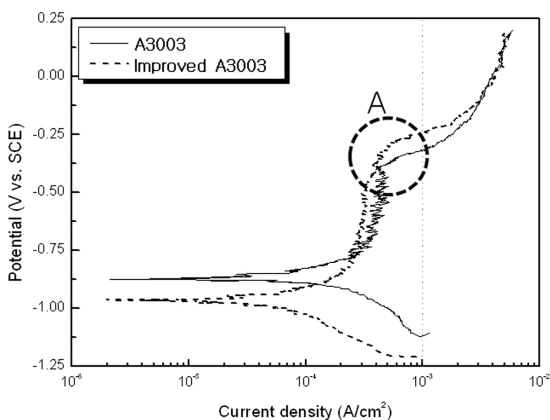


Fig. 4 Electrochemical test result of A3003 and improved A3003

Table 5 Pitting potential of A3003 and improved A3003

	A3003	Improved A3003
Corrosion potential (V vs. SCE)	-0.326	-0.249
Standard deviation	0.012	0.019

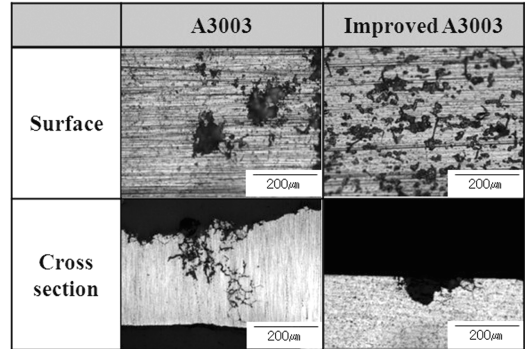


Fig. 5 Surface and cross section view of A3003 and improved A3003 after electrochemical test

평균값을 Table 5에 나타내어 비교하였다. 개선 소재의 공식 전위 값이 약 0.077V 높아 공식에 대한 저항성이 높음을 알 수 있다.

평가된 시편의 부식 양상을 파악하기 위해 표면과 단면을 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 두 소재 모두 공식이 진행된 상태를 확인할 수 있는데, 특히 A3003의 경우 공식이 좁고 깊은 형태로 진행되었고, 입계부식도 발생하였다. 입계부식이 발생한 이유는 Cu, Fe 함량이 상대적 많아 입계에 전위차를 유발하는 석출물이 더 많이 생겼기 때문으로 사료된다.¹¹⁾ 시편의 부식 양상을 볼 때, 개선 소재 대비 기존 A3003소재가 부식으로 인한 소재의 관통 발생 위험성이 높다는 것을 의미한다.

두 소재의 부식속도를 비교하기 위해 타겟 외삽법을 이용하였다. 타겟 외삽법은 동전위 분극시험을 통해 얻은 분극 곡선의 양극 음극 영역을 외삽하여 부식전류밀도와 부식전위를 구하고, 이 둘 값을 식(1)에 대입하여 부식속도를 산출하는 방법이다.

$$C.R = 0.00327 \frac{ai}{nD} \tag{1}$$

C.R : Corrosion rate (mm/year)

a : Atomic weight

- i : Current density ($\mu A/cm^2$)
- n : Number of equivalents exchanged
- D : Density of metal (g/cm^3)

식 (1)로부터 계산된 두 소재의 부식속도를 아래의 Table 6에 나타내었다. 개선 소재의 부식 속도는 0.622mm/year로, 1.291mm/year인 A3003 대비 약 50% 정도가 감소되었음을 확인하였다. 이는 침지 평가 결과에서 A3003소재가 부식이 더 진행된 것과 경향이 일치한다.

Table 6 Corrosion rate of A3003 and improved A3003

	A3003	Improved A3003
Corrosion Rate (unit: mm/year)	1.291	0.622

위의 침지 평가, 전기화학적 평가를 통해 A3003 소재와 개선 소재를 비교 평가한 결과, 두 평가 방법 모두 개선 소재가 내식성이 우수함을 나타내었다. 이를 통해 Cu와 Fe함량을 조절하는 것이 부식 환경에서는 음극 반응을 촉진하고, 조직 측면에서는 입계 석출물 발생을 최소화하여 소재의 내식성을 향상시킬 수 있다는 것이 확인되었다.

3.5 압출성 평가 결과

개선 소재의 압출성을 평가하기 위해, A3003소재의 조건과 동일한 조건으로 압출하였다. 소재별 압출 압력을 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Extrusion pressure of A3003 and improved A3003

	A3003	Improved A3003
Extrusion Pressure (unit: kgf/cm ²)	230	240

제안된 소재의 압출압력이 10kgf/cm² 정도 높았지만 압출 및 튜브 제조에는 문제가 없었다. 성분 함량을 보면 Mn 함량이 약 0.1% 높은 것을 알 수 있다. Mn의 경우, 3000계 알루미늄에서 강도 향상 원소로 첨가되는데, Mn 함량이 많을수록 강도가 증가한다. 소재의 강도가 증가하면 압출 진행시 금형과의 마

찰 저항도 증가하게 되고, 이 때문에 압출 압력이 증가하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

응축수 환경에서 인터쿨러 튜브용 A3003 소재의 내식성을 개선시키기 위해, 성분을 조정한 소재를 제안하였고, 침지평가와 전기화학적 평가를 통한 기존 소재와 비교분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) A3003 소재를 500시간동안 침지 평가한 결과, 소재 내부로 250 μm 까지 부식이 진행되는 등 응축수 환경에 취약하다는 것이 확인되었다.
- 2) 개선 소재의 전기화학적 평가 결과, A3003대비 공식전위는 0.077V 높아졌으며, 부식속도는 약 50% 감소하였다. 즉, Cu와 Fe 함량을 줄이는 것이 응축수 환경에서 소재의 내식성을 개선할 수 있다.
- 3) 개선 소재의 압출 압력이 A3003대비 약 4% 증가하지만 압출성에는 문제가 없어, 기존 설비로 생산이 가능하다.
- 4) A3003 소재의 성분 조정을 통해 내식성이 개선되고 양산 가능한 소재를 개발하였고, 이를 통해 LP-EGR장치가 적용된 디젤 엔진 인터쿨러의 수명을 향상시킬 수 있다.

References

- 1) European Parliament, Council, Regulation (EC) No.715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on Type Approval of Motor Vehicles with Respect to Emissions from Light Passenger and Commercial Vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on a Access to Vehicle Repair and Maintenances Information, OJ L 171, pp.1-16, 2007.
- 2) Y. R. Kim and S. H. Cho, "New Technologies for the Super Clean Passenger Car Diesel Engines," Auto Journal, KSAE, Vol.35, No.5, pp.16-24, 2009.
- 3) J. Shutty, "Control Strategy Optimization fo Hybrid EGR Engines," SAE 2009-01-1451, 2009.

- 4) K. H. Nam, J. Yu and S. H. Cho, "Improvement of Fuel Economy and Transient Control in a Passenger Diesel Engine Using LP(Low Pressure)-EGR," SAE 2011-01-0400, 2011.
- 5) H. W. Lee, C. H. Jo, K. H. Nam, S. Y. Lee and E. H. Lee, "Optimization of Low Pressure EGR of V6 3.0l Diesel Engine for CO₂ Reduction," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.166-173, 2011.
- 6) S. H. Lee, J. Y. Lee, J. W. Lee and K. D. Min, "Experimental Reserches on the Size Distribution and the Number of PM Emission according to EGR Types in a HSDI Engine," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.180-183, 2011.
- 7) J. W. Chung, J. H. Kang and H. G. Lee, "A Study on the Turbocharger Operating Cahracteristics of a Diesel Engine according to EGR Loop Types," Transactions of KSAE, Vol.17, No.6, pp.89-98, 2009.
- 8) C. Cuevas, D. Makaïre and P. Ngendakumana, "Thermo-hydraulic Characterization of an Automotive Intercooler for a Low Pressure EGR Application," Applied Thermal Engineering, Vol.31, Issues 14-15, pp.2474-2484, 2011.
- 9) S. Moroz, G. Bourgoïn, J. M. Lujan and B. Pla, "Acidic Condensation in Low Pressure EGR Systems Using Diesel and Biodiesel Fuels," SAE Int. J. Fuels and Lubricants, Vol.2, No.2, pp.305-312, 2010.
- 10) K. Sugimoto, Y. Sawada and S. Morioka, "Effects of Alloying Elements on the Pitting Corrosion of Aluminium," Transactions of JIM, Vol.13, pp.345-351, 1972.
- 11) V. S. Sinyavskii, V. V. Ulanova and V. D. Kalinin, "On the Mechanism of Intergranular Corrosion of Aluminium Alloys," Protection of Metals, Vol.40, No.5, pp.481-490, 2004.