

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.291

딴플형 EGR 냉각기의 설계 및 성능평가

서영호*, 이현민*, 허성찬*, 구태완*, 송우진**, 강범수*, 김 정**

* 부산대학교 항공우주공학과, ** 부산대학교 부품소재산업협력연구소

Design and Performance Evaluation of Dimpled EGR Cooler

Young Ho Seo*, Hyun Min Lee*, Seong Chan Heo*, Tae Wan Ku*, Woo Jin Song**,
Beom Soo Kang* and Jeong Kim**

* Dept. of Aerospace Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** Institute for Research & Industry Cooperation, Pusan Nat'l Univ.

(Received August 27, 2009 ; Revised January 21, 2010 ; Accepted January 22, 2010)

Key Words: Dimpled Exhaust Gas Recirculation Cooler(딴플형 EGR 냉각기), Homogenization Method (균질화 기법), Finite Element Analysis(유한요소해석), Structural Integrity(구조 건전성), Heat Exchange Efficiency(열교환 효율), Durability(내구성)

초록: 본 논문은 자동차 디젤엔진의 EGR 시스템에 사용되는 EGR 냉각기의 열교환 효율에 관한 것으로 배기가스의 냉각수 사이의 열교환을 촉진시키기 위한 방법으로 딴플형 EGR 냉각기를 설계 및 그 성능을 평가하였다. 개발초기 단계에서 딴플형 EGR 냉각기의 성능을 평가하기 위하여 기존 스파이럴 타입의 EGR 냉각기와 딴플형 EGR 냉각기의 전열면적을 비교하였으며, 균질화 기법을 이용한 유한요소해석을 통하여 딴플형 EGR 냉각기의 구조 건전성을 평가하였다. 또한, 딴플형 열교환 튜브의 생산공정-딴플성형, edge bending, center v-notch bending, 압착, 플라즈마 용접-을 체계화하였다. 최종적으로 본 연구를 통하여 딴플형 EGR 냉각기를 개발하였으며, 그 성능을 검증하였다.

Abstract: A conventional EGR cooler, which is used in an EGR system of an automobile diesel engine, has a low heat-exchange efficiency. To maximize the heat transfer between the exhaust gas and coolant, dimples are formed on the surface of heat exchange tubes. When designing the dimpled EGR cooler, the net heat transfer areas in the conventional and dimpled tube-type EGR coolers are compared. Structural integrity evaluations are also performed by combining finite element analysis with a homogenization method. Subsequently, the process of manufacturing the dimpled tube, i.e., the formation of dimples, edge bending, center v-notch bending, compression, and plasma welding, is established and carried out. Thus, the dimpled EGR cooler is developed, and its performance is verified.

1. 서론

디젤엔진은 연비, 내구성, 신뢰성, 중량당 출력 지수 등이 우수하여 다양한 산업에서 사용되고 있으나,⁽¹⁻⁴⁾ 엔진 구동 중 심각한 환경문제를 유발하는 질소산화물 및 입자상 매연 등의 배출로 인해 사회적·환경적 문제가 되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 엔진 내부 연소실의 온도상승으로 인하여 질소산화물의 배출량이 증가하고 동시에 연소 특성상 입자상 물질의 배출이 수반되는 상호 연관관계로 인하여, 이 두 가지 환경 오염 물질을 동시에 저감하

기 위한 기술개발에 많은 노력을 기울여왔다.⁽¹⁾ 더욱이 Euro-5 및 Euro-6와 같은 환경 오염 물질에 대한 강력한 규제가 유럽 등의 국가에서 실시될 예정이므로 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다. 이에 따라, 디젤 대체 연료^(6,7) 및 EGR system^(8,9)과 같은 후처리 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

엔진입구 온도가 증가할수록 출력 및 효율은 감소하며, 질소산화물 배출은 증가한다. 따라서 배기가스 중 일부를 냉각기(cooler)를 통하여 연소 온도를 낮추어 배기관에서 흡기관으로 재순환시키는 EGR system에 대한 연구가 지속적으로 이

† Corresponding Author, greatkj@pusan.ac.kr

Table 1 Comparison of net heat transfer area

			Spiral (A)	D-T4 (B)	D-T10 (C)	(B/A)*100	(C/A)*100
Geometrical Specifications (mm)	Shell	Width	52	38	39	-	-
		Height	41	55	54	-	-
		Length	144	146	146	-	-
	Internal Volume (mm ³)		307,008	305,140	307,476	99%	100%
	Tube	Width	5	5	5	-	-
		Height	5	48	24	-	-
		Length	150	150	150	-	-
	Tube Number (EA)		22	4	10	-	-
Net Heat Transfer Area (mm ²)			73,005	63,600	87,000	87%	120%

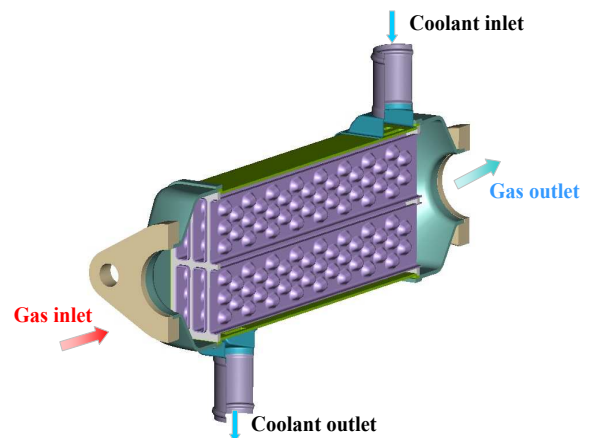
루어지고 있다. 하지만 EGR system의 성능, 배기 및 연소특성에 대한 연구는 활발히 진행되고 있지만 연소온도를 낮추는 EGR cooler의 성능평가에 관한 연구는 미비하다. Abu-Hamdeh⁽⁵⁾는 스파이럴 타입의 EGR cooler를 설계하였지만 체적대비 전열면적이 작아 열교환 효율이 낮은 구조이므로 적용에 한계가 있었다.

본 연구에서는 기존의 EGR cooler 열교환 성능을 개선하고자 딴플형 EGR cooler를 설계하였으며, 유한요소법을 이용하여 딴플형 EGR cooler의 구조 건전성을 평가하였다. 그러나, 튜브의 딴플 형상으로 인한 모델링, 요소 생성 및 요소수의 증가로 인한 해석 과정에서의 어려움이 예상되었다. 이러한 복잡한 형상의 모델을 간소화하여 해석하는 방법으로 균질화(homogenization) 기법을 활용하였으며,⁽¹⁰⁻¹²⁾ 이를 통해 등가 재료 물성치를 도출하여 딴플이 없는 평판 튜브에 적용하여 모델링 및 해석을 간소화하였다. 또한 딴플형 EGR cooler의 제작, 열교환 효율 평가 및 스파이럴 타입 EGR cooler와의 성능 비교를 통하여 우수성을 확인하였으며, 내구성 시험을 수행하여 주어진 조건에서 구조적으로 안전하다고 판단하였다.

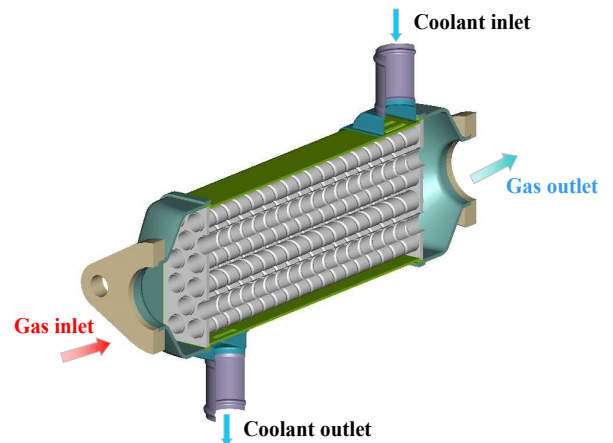
2. 딴플형 EGR 냉각기 설계

2.1 전열면적 비교

EGR 냉각기의 전열면적이 증가함에 따라 열교환 효율 역시 증가한다. 따라서 딴플형 EGR 냉



(a) Modeling of dimple type EGR cooler



(b) Modeling of spiral type EGR cooler

Fig. 1 Structural Modeling of each EGR cooler

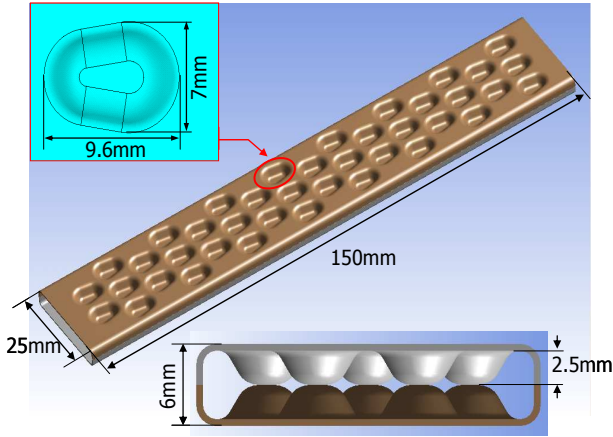


Fig. 2 Primary design of dimpled tube

각기 설계에 앞서 Fig. 1과 같은 딴플형 및 스파이럴 구조의 EGR 냉각기 형상에 대한 전열면적 비교를 통하여 딴플형 EGR 냉각기의 우수성을 분석하고자 하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 동일한 쉘(shell) 내부체적을 가지는 스파이럴(A) 및 딴플 타입의 EGR 냉각기에 대한 전열면적을 비교하였다. 딴플형 EGR 냉각기는 튜브의 크기에 따라 4개의 튜브를 가지는 D-T4(B) 모델과 10개의 튜브를 가지는 D-T10(C) 모델로 구분하였다. 이론적으로 동일한 내부체적을 가정하였을 때 튜브수와 체적대비 전열면적은 비례관계를 가지지만 구조적인 한계로 인하여 튜브 수는 10개로 제한하였다.

전열면적 비교 결과 4개의 튜브를 가지는 딴플형 EGR 냉각기의 전열면적은 스파이럴 타입의 87%에 불과하였다. 반면 10개의 튜브를 가지는 딴플형 EGR 냉각기의 전열면적은 스파이럴 타입에 비하여 20% 증가하므로, 본 연구에서는 10개의 튜브를 가지는 딴플형 EGR 냉각기를 개발하였다.

2.2 딴플형 EGR 냉각기 모델링

딴플은 전열면적을 증가시켜 튜브 내외에 흐르는 배기 가스와 냉각수의 열교환을 증대시키는 역할을 하므로 딴플형 튜브 개발은 본 연구의 핵심이 된다. Fig. 2에 딴플형 튜브의 초기 설계 형상을 도시하였다. 튜브와 딴플의 너비, 높이 및 길이는 각각 25mm, 6mm, 150mm 및 7mm, 2.5mm, 9.6mm이다. 하지만 초기 형상에 대하여 열-유체 및 열-구조 해석을 수행한 결과 기대 이하의 성능을 나타내었다. 크고 깊은 딴플로 인하여 열교환 효율은 향상되었지만 배기가스의 흐름이 원활하지 못하여 압력강하가 크게 발생하여 역류현상이 발생하였으며, 튜브 중앙부근에서 구

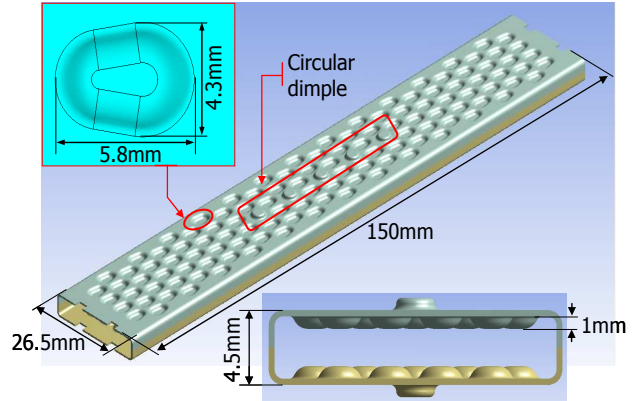


Fig. 3 Modified design of dimpled tube

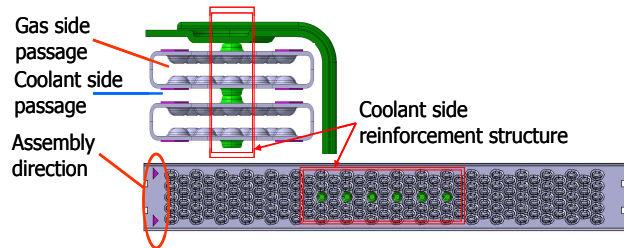


Fig. 4 The structure of dimpled EGR cooler

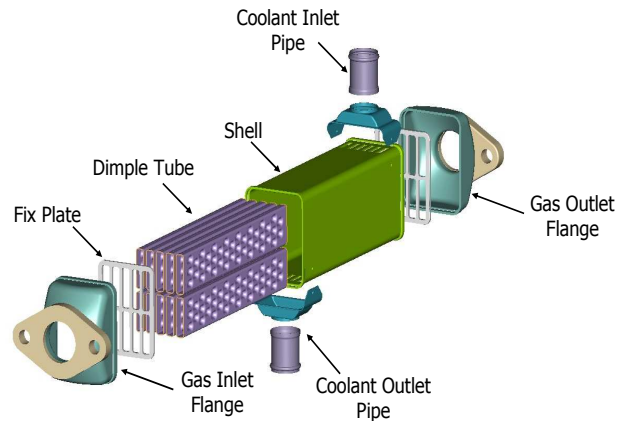


Fig. 5 Composition of dimpled EGR cooler

조적으로 취약하여 배부름 현상 및 튜브가 찢어지는 문제점을 확인하였다. 따라서 딴플형 튜브의 설계 형상을 수정하여 Fig. 3과 같은 개선안을 도출하였다. 배기가스의 압력강하 현상을 완화하기 위하여 튜브의 길이는 그대로 유지한 반면, 그 외 전체적인 형상을 수정하였다. 또한 튜브의 구조적인 취약점을 보완하기 위하여 중앙 부근에 튜브 바깥 표면으로 원형 딴플을 형성하였으며, 이로 인하여 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 원형 딴플이 튜브간 지지대 역할을 하여 배부름 혹은 터짐 현상을 예방하였다. 결과적으로 개선된 딴

Table 2 Equivalent material property with original value

		Material Property (Unit: E, G : GPa, k : $W/mm \cdot K$)			
	Equivalent	Original (SUS304)		Equivalent	Original (SUS304)
E	E_x	104	k	k_x	0.015
	E_y	200		k_y	0.005
	E_z	71		k_z	0.014
G	G_{xy}	99	ν	ν_{xy}	0.277
	G_{xz}	46		ν_{xz}	0.112
				ν_{yz}	0.29
	G_{yz}	110		ν_{yx}	0.29
				ν_{zx}	0.077
				ν_{zy}	0.06

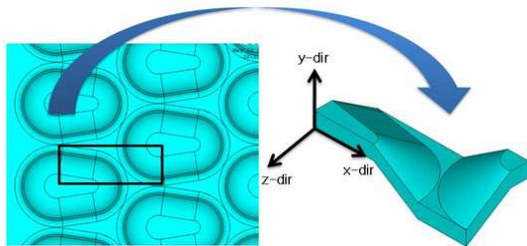


Fig. 6 Unit geometry for homogenization

플렉스 튜브를 사용함으로써 전열면적을 증가시키고, 덤플로 인한 난류유동의 형성을 통하여 배기 가스와 냉각수 사이의 열교환이 증대되었다.

앞서 언급한 바와 같이 덤플형 EGR 냉각기는 10개의 튜브, 덤플 튜브를 고정하기 위한 2개의 플레이트, 2개의 냉각수 파이프 및 가스 플랜지, 셸로 구성이 되며, 이를 Fig. 5에 도시하였다.

2.3 구조건전성 평가

2.3.1 등가 재료 물성치

덤플형 EGR 냉각기 내의 열교환 튜브는 개당 약 224개의 덤플을 포함하고 있어 유한요소화 하기에는 부적합하므로 균질화 기법을 통하여 이를 간소화하는 과정을 거치게 된다. 덤플이 없는 평판 튜브를 사용하여 덤플형 튜브의 실제 거동을 묘사하기 위해서는 재료 물성치의 수정이 요구된다. 이러한 수정된 재료 물성치를 등가 재료 물성치라 명명하며, 등가 재료 물성치를 얻기 위한 과정을 균질화라 한다. 균질화된 튜브의 등가 재료 물성치를 구하기 위하여 Fig. 6과 같은 대칭성을 가지는 단위 형상에 대하여

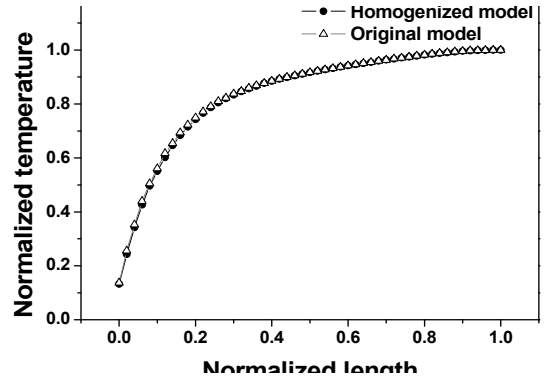


Fig. 7 Heat transfer analysis result [unit: $^{\circ}C$]

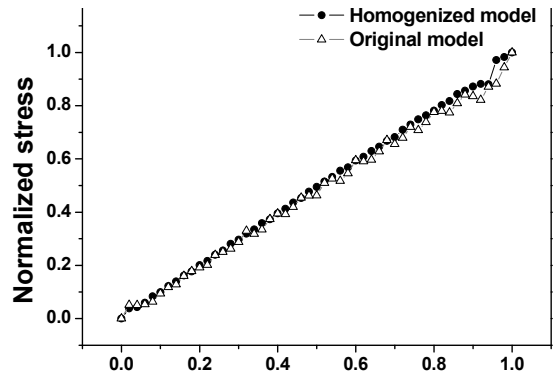


Fig. 8 Structural analysis result [unit: MPa]

적절한 경계조건을 부여하여 유한요소 해석을 수행하였다. 단위 형상은 대칭면을 따라 직교 이방성 특성을 가지므로 X-, Y- 및 Z-방향에 대하여 각각의 등가 재료 물성치를 계산하였다. 그 결과 Table 2와 같은 등가 재료 물성치를 얻을 수 있었으며,⁽²⁾ 실제 덤플 튜브 제작에 사용된 SUS 304 소재의 재료 물성치와 비교하여 나타내었다. 등가 재료 물성치의 검증은 위하여 덤플 튜브 및 균질화된 평판 튜브에 SUS 304의 소재 물성치와 등가 재료 물성치를 각각 적용하여 동일한 조건하에서 열-구조 연성해석을 수행하였고, 그 결과를 비교하였다. Fig. 7과 8에 열전달 및 구조 해석 결과를 도시하였다. 덤플 튜브와 균질화된 평판 튜브를 사용한 모델에 대한 온도 및 응력 분포의 유사한 경향성 도출을 통해 덤플형 튜브의 등가 재료물성치를 검증할 수 있었다.

2.3.2 구조 건전성 평가

앞서 언급한 바와 같이 덤플 형상을 가지는 튜브는 개당 224개의 유선형 비대칭 덤플을 포함하고 있어 해당 모델의 유한요소화 및 해석에 이르기까지 많은 난점을 포함하고 있으므로 Table 2의 등가

재료 물성치를 균질화된 EGR 냉각기에 적용하였다. 딴플 튜브 및 균질화 된 평판 튜브를 사용하여 유한요소 모델링을 각각 수행한 결과 10개의 튜브에 대하여 약 60%, 전체 모델에 대하여 약 53%의 요소 수 절감 효과를 얻을 수 있어 유한요소해석에 소모되는 시간을 줄일 수 있었다. EGR 냉각기에 대한 3차원 형상 구현은 CATIA V5를 사용하여 Fig. 9와 같이 구성하였으며, 유한요소해석은 ANSYS를 이용하였다. 또한 해석의 용이성을 위하여 전체 형상의 1/4 symmetry 모델을 사용하였다.

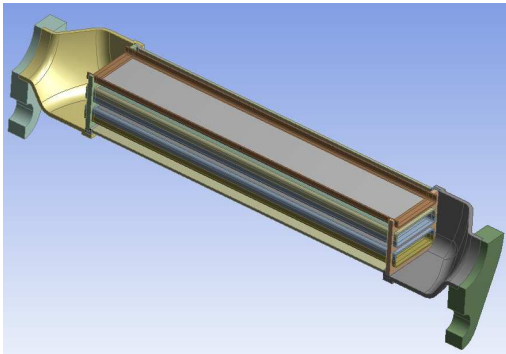


Fig. 9 1/4 symmetry modeling of assembled EGR cooler using homogenized tubes

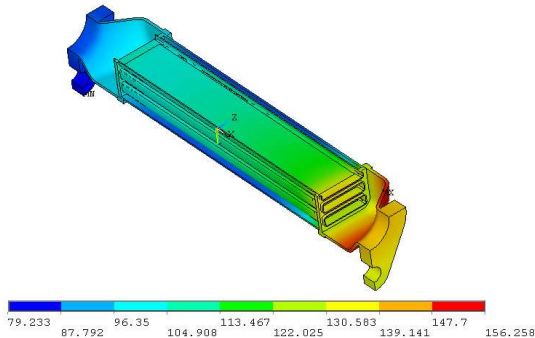


Fig. 10 Heat transfer analysis result [unit: °C]

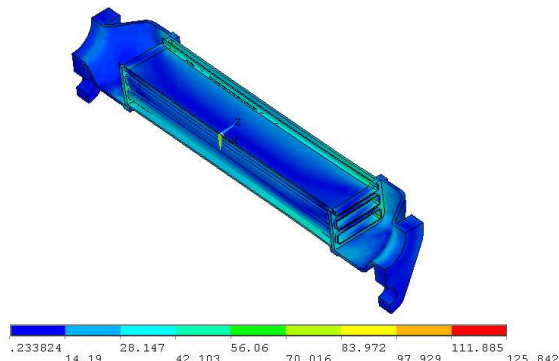


Fig. 11 Thermal-stress analysis result [unit:MPa]

2.3.2.1 열응력 해석

EGR 냉각기의 온도 분포를 도출하기 위하여 정상 상태 열전달 해석을 수행하였다. 배기 가스와 냉각수의 EGR 냉각기로의 유입 온도는 각각 500°C, 90°C이며, 이에 대한 열전달 해석 결과는 Fig. 10과 같다. 열전달 해석을 통하여 도출된 각 절점에서의 온도를 이용하여 열팽창에 의한 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 11은 해석 모델에 대한 열응력 해석 결과를 도시하고 있다. 전체적으로 볼 때 최대 응력은 약 126MPa로 고정판과 튜브 사이의 연결부에서 국소적으로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서의 EGR 냉각기에 사용된 소재인 SUS 304의 항복응력(215MPa)에 비해 낮으므로 구조적으로 안전 할 것으로 예측된다.

2.3.2.2 압력 해석

EGR 냉각기내의 튜브는 엔진의 연소실로부터 유입된 배기 가스와 냉각수의 유동에 의한 압력 차에 의해 가압을 받게 되며, 이는 튜브의 외벽에 하중으로 작용하여 구조적 특성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 튜브 내부를 통과하는 배기 가스 (2 bar)와 냉각기내 튜브 외부를 통과하는 냉각수 (1 bar)의 유동 압력 하중에 의한 영향을 평가하기 위한 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 앞선 모델과 동일하며, 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 응력은 전체적으로 고르게 분포하며 최대응력은 33MPa로 소재의 항복응력에 비해 크게 낮으므로 가스 및 냉각수의 유동이 전체 시스템에 미치는 영향은 미미할 것으로 예측되었다.

3. 딴플형 EGR 냉각기 제작

3.1 딴플형 튜브

딴플 형상을 가진 튜브는 Fig. 13과 같은 일련

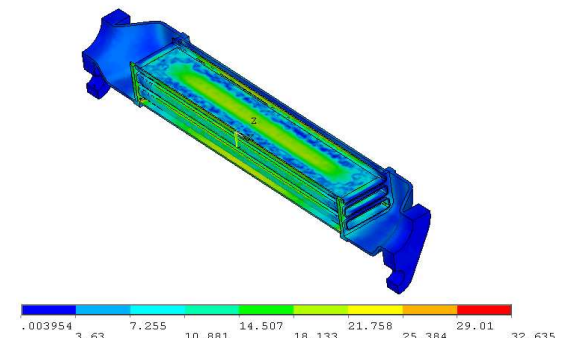


Fig. 12 Pressure analysis result [unit:MPa]

의 성형공정 - 딤플성형, 트리밍, edge bending, center v-notch bending, 압착, 플라즈마 용접 -

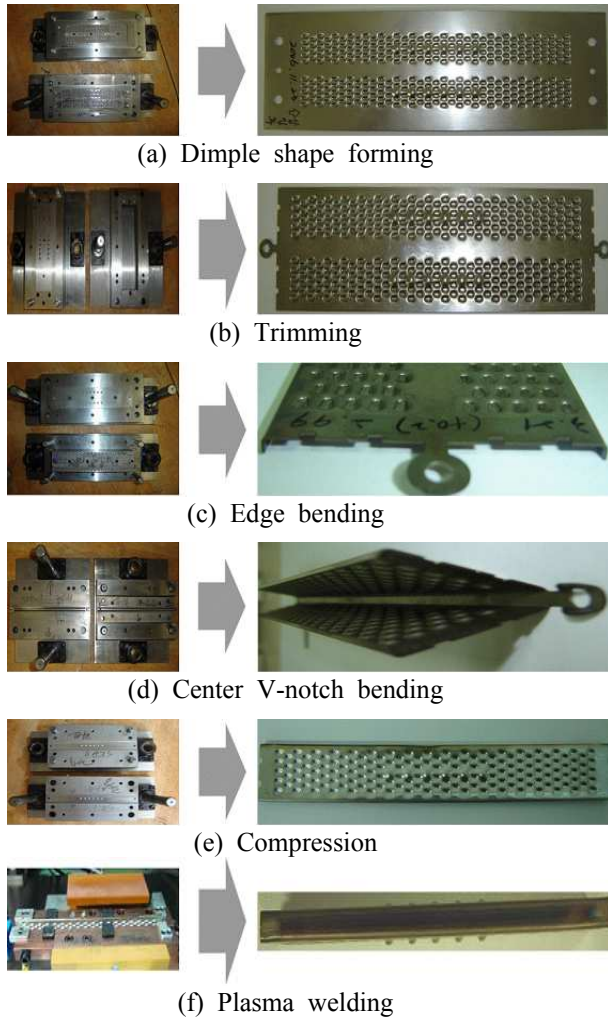


Fig. 13 Dimple shape tube forming process

을 거쳐 개발되었다. 딤플 성형공정에 있어서 직사각형 모양의 관재 양면은 다수의 딤플로 이루어져 있고 금형을 이용한 프레스 성형법 사용된다. 따라서 전열면 전체에서 상당한 변형이 발생할 것으로 예측되어 변형률기반성형한계선도와 응력기반성형한계선도를 이용하여 성형성을 평가하였으며, 그 결과 딤플형 튜브는 대부분의 성형영역에서 안정하게 성형될 수 있음을 확인하였다.⁽¹³⁾ 또한 플라즈마 용접 시 로봇 이송 속도는 소재의 변형을 최소화하기 위하여 시행착오법을 통하여 16.5m/s로 결정하였다. 최종적으로 개발된 딤플형 튜브는 전열면적을 증가시켜 열교환 효율을 증진시키며, 배기가스와 냉각수의 경계층 형성을 최소화하여 튜브 내 PM과 같은 배기 불순물의 퇴적을 방지한다.

3.2 딤플형 EGR 냉각기

기존 EGR 냉각기의 단점을 보완하기 위하여 딤플 형상을 가진 사각 튜브가 내장된 EGR 냉각기를 Fig. 5와 같이 설계하였다. Fig. 14와 같은 공정을 거쳐서 튜브 길이 150 및 200mm에 대하여 딤플형 EGR 냉각기를 개발하였다.

4. 딤플형 EGR 냉각기 성능평가

4.1 열교환 효율검증

본 연구를 통하여 개발된 딤플형 EGR 냉각기의 열교환 성능을 검증하기 위하여 기존의 스파이럴 타입의 EGR 냉각기의 열교환 효율과 비교하였다. 배기가스 온도 측정 센서는 EGR 냉각기의

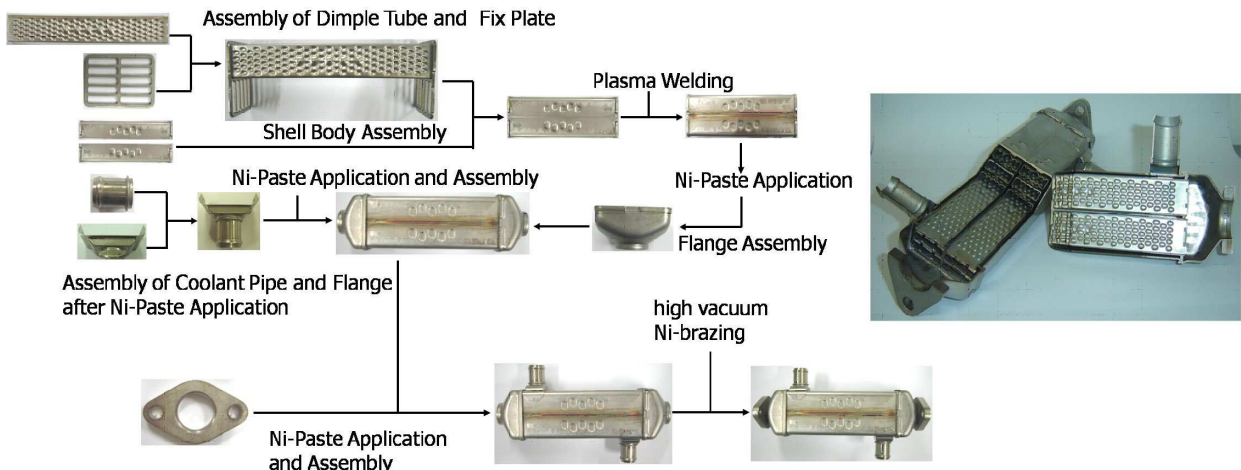


Fig. 14 Assembly process of dimpled EGR cooler

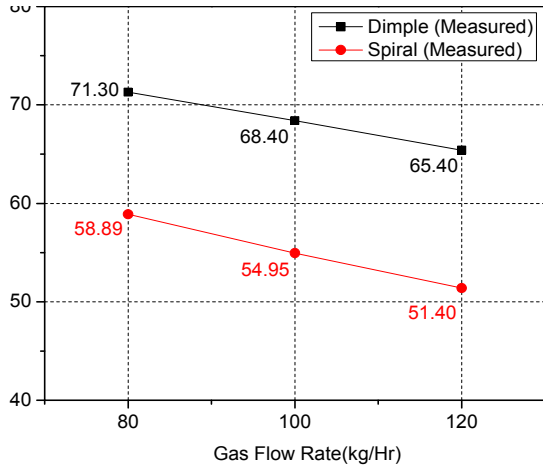
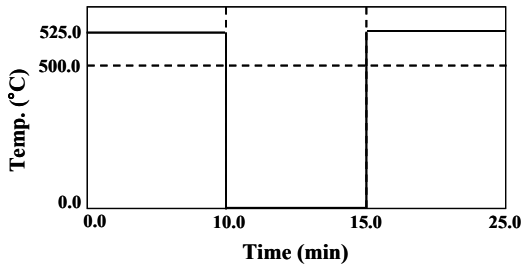


Fig. 15 Heat exchange efficiency comparison result



(a) Test condition



(b) Leakage test

Fig. 16 Thermal-shock test

입·출구 플랜지에 장착하였고, 냉각수의 온도 측정 센서는 냉각수 입·출구 파이프에 장착하였다. 튜브 길이 200mm 모델에 대하여 열교환 효율 실험을 수행한 결과 Fig. 15와 같이 딴플형 EGR 냉각기의 열교환 효율은 스파이럴 타입의 EGR 냉각기에 비하여 약 24% 증가함을 확인할 수 있었다.

4.2 내구성 평가

딴플형 EGR 냉각기의 내구성을 평가하기 위해

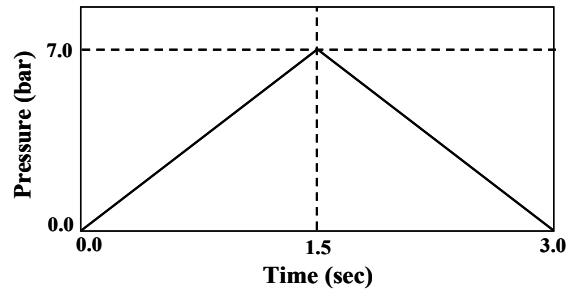


Fig. 17 Repeated pressure test

여 열충격 내구시험 및 반복압력 내구시험을 수행하였다.

열충격 내구시험의 1사이클은 Fig. 16(a)에 도시한 바와 같이 525°C의 배기가스를 10분 동안 유입시킨 후 5분의 유힬 상태로 이루어져 있다. 배기가스의 유량은 2.7kg/min으로 유지하였으며, 냉각수의 온도 및 유량은 30°C, 20 l/min이다. Fig. 16(b)와 같이 1,000사이클의 열충격 시험 수행 후, 누수 테스트를 실시한 결과 가스 및 냉각수 측 모두 누수가 발생하지 않았다.

압력내구 시험은 Fig. 17에 나타낸 바와 같이 525°C의 유압유를 1.5초 동안 7bar까지 상승시킨 후 1.5초 동안 0bar로 하강시키는 사이클을 배기가스 및 냉각수 측 모두 100,000회 반복하였다. 배기가스 및 냉각수 측 매개체는 유압 오일과 글리세린 (부동액)을 각각 사용하였으며, 그 결과 누수현상은 발생하지 않았다.

5. 결론

딴플형 EGR 냉각기에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서는 낮은 열교환 효율을 가지는 기존의 EGR 냉각기의 구조를 개선하고자 딴플형 EGR 냉각기를 설계하였으며, 이를 통하여 기존의 스파이럴 타입에 비하여 딴플형 EGR 냉각기의 전열 면적이 체적 대비 20% 증가하였다.

(2) 튜브에 형성된 224개의 딴플은 유한요소 모델링 및 해석시간을 증가시키는 요인이 되므로 구조 건전성 평가를 위한 유한요소 해석에 앞서 균질화 기법을 통하여 등가 재료 물성치를 도출하였으며, 하나의 튜브에 대한 유한 요소 해석을 수행 및 그 결과를 비교하여 이를 검증하였다.

(3) 균질화 된 튜브를 활용하여 열응력, 유동에

의한 압력에 대한 유한 요소 해석을 통하여 딥플형 EGR 냉각기의 구조 건전성을 확인하였다.

(4) 최종적으로 딥플형 EGR 냉각기를 개발하였으며, 열교환 효율 검증 실험을 수행하여 기존의 스파이럴 EGR 냉각기에 비해 열교환 효율 약 24% 증가함을 확인하였다. 또한 열충격, 반복압력 및 부식 내구성 시험을 수행하였으며, 주어진 조건에서 딥플형 EGR 냉각기는 구조적으로 안전하다고 판단된다.

후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원으로 수행된 연구 결과입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Seo, Y. H., Heo, S. C., Ku, T. W., Song, W. J., Kim, J. and Kang, B. S., 2008, "Study on Heat Exchanger Efficiency of EGR Cooler with Dimpled Rectangular Tube Shape for Application of Diesel Engine," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 32, No. 10, pp. 769~775.
- (2) Lee, H. M., Heo, S. C., Ku, T. W., Kang, B. S. and Kim, J., 2009, "Finite Element Analysis and Validation for Dimpled Tube Type Intercooler Using Homogenization Method," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 2, pp. 153~161.
- (3) Seo, Y. H., Heo, S. C., Kwon, Y. S., Ku, T. W., Kim, J. and Kang, B. S., 2008, "A Study on Thermal and Modal Characteristics for EGR System with Dimpled Rectangular Tube," *Trans. of the KSPE*, Vol. 25, No. 3, pp. 115~125.
- (4) Cheng, C. H., Cheung, C. S., Chan, T. L., Lee, S. C. and Yao, C. D., 2008, "Experimental Investigation on the Performance, Gaseous and Particulate Emissions of a Methanol Fumigated Diesel Engine," *Sci. Total Environ.*, Vol. 389, pp. 115~124.
- (5) Abu-Hamdeh, N. H., 2003, "Effect of Cooling the Recirculated Exhaust Gases on Diesel Engine Emissions," *Energy Conv. Manag.*, Vol. 44, pp. 3113~3124.
- (6) Bajpai, S., Sahoo, P. K. and Das, L. M., 2009, "Feasibility of Blending Karanja Vegetable Oil in Petro-diesel and Utilization in a Direct Injection Diesel Engine," *Fuel*, Vol. 88, pp. 705~711.
- (7) Karabektas, M., 2009, "The Effects of Turbocharger on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel," *Renew. Energy*, Vol. 34, pp. 989~993.
- (8) Zheng, M., Reader, G. and Gary Hawley, J., 2004, "Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation - A Review on Advanced and Novel Concepts," *Energy Conv. Manag.*, Vol. 45, pp. 883~900.
- (9) Maiboom, A., Tazua, X. and Hétet, J., 2008, "Experimental Study of Various Effects of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion and Emissions of an Automotive Direct Injection Diesel Engine," *Energy*, Vol. 33, pp. 22~34.
- (10) Park, S. K., Kim, J., Chang, Y. C. and Kang, B. S., 2001, "Analysis of the Deformation of a Perforated Sheet under Thermal and Tension Load Using Finite Element Method," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 113, pp. 761~765.
- (11) Huyse, L. and Maes, M. A., 2001, "Random Field Modeling of Elastic Properties Using Homogenization," *J. Eng. Mech.*, Vol. 127, pp. 27~36.
- (12) Sakata, S., Ashida, F., Kojima, T. and Zako, M., 2008, "Three-Dimensional Stochastic Analysis Using a Perturbation Based Homogenization Method for Elastic Properties of Composite Material Considering Microscopic Uncertainty," *Int. J. SolidsStruct.*, Vol. 45, pp. 894~907.
- (13) Heo, S. C., Seo, Y. H., Ku, T. W., Song, W. J., Kim, J. and Kang, B. S., 2007, "Finite Element Analysis and Formability Evaluation for Dimple Forming with Thin Sheet Metal," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 16, No. 8, pp. 621~628.