◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2020.23.1.065
ISSN (Print): 2287-9706

고고도 장기체공 무인기용 수소엔진 시스템의 구성품 배치 방법 개발

전상욱*† · 강영석** · 임병준***

Development of Packing Method to Arrange Components of Hydrogen Engine for High Altitude Long Endurance UAV

Sangook Jun*†, Young Seok Kang**, Byung Jun Lim***

Key Words : Packing(배치), Hydrogen engine(수소엔진), Pipeline(배관), Sequence quintuple(시퀀스 퀸터플), Pathfinding algorithm(길찾기 알고리즘)

ABSTRACT

This research proposes the packing method to arrange components of a hydrogen engine system, considering the pressure loss in the pipeline. The method proceeds in the order of component packing, pipeline construction, and performance calculation such as size, center of gravity, pressure loss, etc. For the replacement, sequence quintuple is used, A* algorithm is applied to make the pipeline. This packing process is performed in the system consisting of four turbochargers, three heat exchangers, one radiator, and twelve pipes. From results, it was confirmed that the proposed method has a good possibility of packing in consideration of the pressure loss. The system has a pressure loss of up to 3.4%, with the minor loss accounting for 75~91% of the total loss in most pipes. It is expected that the layout satisfied with designer's target is extracted from this process combined with the optimization tool and it can be applied the various systems with many components and complex pipeline.

1. 서 론

고고도 장기체공(High Altitude Long Endurance) 무인기는 20 km 이상의 고도에서 30시간 이상 체공하며 임무를 수행하는 무인 비행기를 말하는 것으로, 원격탐사, 감시, 기상 및 환경 관측, 통신 등의 임무를 수행한다[1]. 이러한 무인기가 운용되는 고도에서는 압력이 7.6 kPa이고, 공기의 밀도는 지상에 비해 1/10 수준으로 상당히 낮기 때문에 엔진으로 1 bar의 공기를 공급하기 위해서는 다단 터보차저 시스템이 필요하다[2-5]. 이로 인하여 엔진, 기어박스, 라디에이터 등과 같은 기존의 추진시스템에 추가로 다수의 터보차저와 인터쿨러가 포함되고 그 구성품의 수가 증가하게 되며, 이들의 위치관계에 따라 추진시스템의 성능에 영향을 미치게 된다. 또한 이들 구성품 간에는 공기, 냉각수와 같은 유체의 흐름이 고려되어야 하므로 압력손실을 낮출 수 있는 효율적인 배치 방법이 요구된다.

구성품의 배치는 흔히 패킹(Packing), 패키징(Packaging) 등의 용어로 통용되고 있다. 복잡한 기능을 처리하기 위해 많은 소자를 하나의 칩 안에 집적화한 전자부품인 초고밀도집적회로(Very Large Scale Integration; VLSI), 위성의 구성품-전자부품 배치와 같이 전기전자 분야에서 주로 연구되고 있다. Murata 등[6]은 VLSI 레이아웃 설계를 위해 2차원 평면에서 소자의 위치관계를 표현할 수 있는 시퀀스 페어(Sequence Pair)라는 방법을 도입하였고, Yamazaki 등[7]은 이 방법을 3차원으로 확장한 시퀀스 퀸터플(Sequence Quintuple)을 제안하였다. Pitre 등[8]은 구조 및 열 성능을

* 한국항공우주연구원 항공추진연구부 (Aeropropulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute)
** 한국항공우주연구원 항공추진연구부 (Aeropropulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute)
*** 한국항공우주연구원 항공추진연구부 (Aeropropulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute)
† 교신저자, E-mail : sangookjun@kari.re.kr

2019 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2019년 7월 3일~7월 5일, 휘닉스 평창
The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 23, No. 1, February 2020, pp.65~70(Received 02 Sep. 2019; revised 13 Jan. 2020; accepted for publication 13 Jan. 2020)
한국유체기계학회 논문집: 제23권, 제1호, pp.65~70, 2020(논문접수일자: 2019.09.02, 논문수정일자: 2020.01.13, 심사완료일자: 2020.01.13)

고려하고 시퀀스 페어 방법을 적용하여 2차원 평면에 우주선의 구성품을 배치하는 연구를 수행하였다. 염승용 등[9]은 위성 내부 구성품들이 간섭 없이 위성의 구조적, 열적 영향을 최소로 하는 3차원 최적배치와 이를 위한 유전알고리즘을 제안하였다. 이들 연구 대부분은 전자부품의 배치로 구성품간 유체흐름을 고려할 필요가 없다. 하지만 기계부품의 경우 구성품 사이에 공기 혹은 냉각수와 같은 유체의 흐름이 존재하는 경우가 많고 이들 파이프라인(Pipeline)의 부피도 상당하기 때문에 구성품 배치 시 함께 고려되어야 한다.

구성품 사이에 파이프라인을 고려한다는 것은 구성품의 크기, 무게와 같은 기본적인 정보에 구성품간 연결될 파이프의 정보를 함께 활용하여 배치를 수행하는 것을 의미한다. 그러므로 실체가 없는 파이프라인을 자동으로 구축하는 과정이 필요한데, 이때 구성품 혹은 다른 파이프와 충돌하지 않아야 한다. 이를 위해서 시작점(구성품의 출구)과 도착점(다른 구성품의 입구)을 지정하면 장애물(구성품과 이미 만들어진 파이프)의 위치를 파악하여 가장 짧은 거리로 연결하는 길찾기 알고리즘을 이용하는 것이 적절한 대안이 된다.

따라서 본 연구에서는 고고도 장기체공 무인기용 수소엔진 시스템에서 유체의 흐름을 고려하여 구성품을 배치하는 프로세스를 제안하고자 한다. 이 방법은 크게 구성품 배치와 파이프라인 구성으로 되어 있으며, 최종적으로 시스템 전체 크기, 무게중심, 압력손실 등의 성능을 도출하는 것을 목표로 한다. 우선 3차원으로 배치된 구성품의 위치관계를 표현할 수 있는 시퀀스 퀸터플 방법과 A* 알고리즘[10]을 적용하여 다른 구성품 및 파이프의 간섭 없이 파이프라인을 자동으로 생성하는 방법을 소개할 것이다. 또한 이 프로세스를 수소엔진 시스템에 적용하여 그 가능성을 검토하고자 한다.

2. 접근 방법

본 연구에서 제안하는 유체 흐름을 고려한 구성품 배치 방법은 Fig. 1과 같다. 우선 각 구성품의 배치를 수행한 후 여기에 맞는 파이프라인을 자동으로 구성하고 최종적으로 구성된 시스템의 성능(크기, 무게, 압력손실 등)을 도출하는 형식의 순차적인 구조를 가지고 있다.

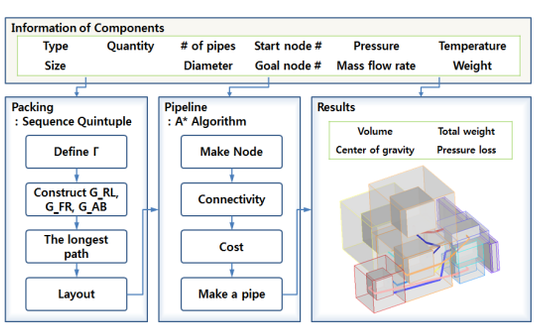


Fig. 1 Process for hydrogen engine system layout

2.1 구성품 배치(Packing)

첫 번째 단계인 배치는 3차원 공간에서 구성품간의 위치관계를 표현하는데서 시작된다. 컴퓨터는 구성품의 위치관계를 사람처럼 직관적으로 파악할 수 없기 때문에 이러한 정보가 배열과 같은 형태로 되어 있어야 한다. 이 정보가 있으면 최적화 툴을 이용해 원하는 목적에 맞는 구성품의 배치를 수행할 수 있으므로 위치관계의 표현이 배치에 있어 중요한 핵심요소라 할 수 있다.

이러한 까닭에 본 연구에서는 3차원 공간에서 구성품 위치관계를 시퀀스 퀸터플이라는 방법[6, 7]을 이용하여 표현하였다. 이 방법은 다섯 개의 로커스(Locus; Γ)를 이용하여 구성품의 좌우(x축), 앞뒤(y축), 상하(z축) 관계를 나타내는 것으로, 이들과 구성품의 위치관계는 다음과 같다. 여기서 a와 b는 구성품을 의미한다.

- RL-topology (G_RL)
  $\Gamma_1^{-1}(a) < \Gamma_1^{-1}(b)\ \&\ \Gamma_2^{-1}(a) < \Gamma_2^{-1}(b) \rightarrow$ ***a*** 는 ***b*** 의 왼쪽

- FR-topology (G_FR)
  $\Gamma_3^{-1}(a) < \Gamma_3^{-1}(b)\ \&\ \Gamma_4^{-1}(a) < \Gamma_4^{-1}(b) \rightarrow$ ***a*** 는 ***b*** 의 앞

- AB-topology (G_AB)
  a와 b는 겹침 & $\Gamma_5^{-1}(a) < \Gamma_5^{-1}(b) \rightarrow$ ***a*** 는 ***b*** 의 아래

이로부터 각 방향별로 길이가 가장 긴 지점을 구할 수 있고, 바로 그 점이 구성품의 x, y, z 좌표가 된다. 이 과정을 각 방향별로 모든 구성품에 대해 수행하면 3차원 공간상에 구성품을 배치할 수 있다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 6과 7에 나와 있다.

한편 위의 과정을 수행하기 위해 구성품의 크기, 개수, 종류 등에 대한 정보가 필요하다. 특히 크기를 정할 때 다음 사항을 고려하였다. 구성품을 직육면체 형태로 단순화하였기 때문에 직육면체가 아닌 형상은 각 방향의 최대 길이를 크기로 하였다. 실제 형상이라면 보다 컴팩트한 배치가 가능해 전체 크기를 더 줄일 수 있겠지만 최대 길이를 사용함으로써 배치의 편의를 도모하였다. 이 때, 무게중심의 경우 직육면체의 중심을 기준으로 할 경우 심각한 오차를 초래할 수 있다. 그러므로 실제 형상이 가지는 무게중심의 위치를 사용해야 한다. 하지만 본 연구에서는 제안한 방법의 가능성을 검토하는 것이 주목적이기 때문에 직육면체의 중심을 구성품의 무게중심으로 하였다. 또한 유체 흐름을 고려하기 위해 Fig. 2와 같이 구성품 주위에 파이프라인이 지나갈 수 있도록 파이프 직경만큼의 버퍼 영역(Buffer Region)을 설정하였다.

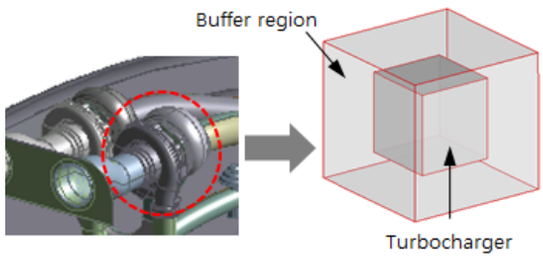


Fig. 2 Component & buffer region

2.2 파이프라인 구성

다음 단계는 파이프라인을 구축하는 단계로, 구성품의 배치가 완료된 후 수행된다. 임의의 구성품에서 다른 구성품으로 연결되는 파이프를 만들기 위해서는 이들 외의 다른 구성품 혹은 파이프와 간섭이 없어야 하고 효율저하를 방지하기 위해 가능한 직선의 형태를 가져야 한다. A* 알고리즘[10]과 같은 길찾기 방법은 시작점에서 출발하여 목표점까지 장애물의 위치를 파악하고 이를 회피하며 가장 짧은 길을 찾는 것을 목표로 하고 있어 파이프라인 구성에 적합한 방법이다.

A* 알고리즘에는 주어진 공간을 격자로 만들어 시작점과 목표점을 연결하는 가장 짧은 경로를 탐색하는 방법과 파이프가 지나갈 수 있는 중요 지점에 노드(Node)를 만들고 이들을 연결한 망(Network)을 이용하는 방법이 있다. 그런데 파이프 직경이 공간에 비해 작은 경우 격자를 이용하는 것보다 망을 만들어 탐색하는 방식이 보다 효율적이기 때문에 본 연구에서는 후자의 방법을 적용하였다.

망을 만들기 위해서는 우선 노드를 생성해야 하는데 구성품 간의 간격을 최소로 하기 위해 구성품 주위로 국한하였다. 노드는 면(Surface), 모서리(Edge), 꼭지점(Corner)에 각각 6, 12, 8개 존재할 수 있는데, 면과 모서리 노드의 경우 시작점과 목표점을 가지고 있는 구성품에 한하여 생성되지만 꼭지점 노드는 모든 구성품에서 만들어 진다. 예를 들면 Fig. 3과 같이 시작점(0)인 면에 1개의 노드, 그 면과 대응하는 면의 모서리에 8개의 노드, 꼭지점에 8개 노드가 생성된다. 목표점(2)을 가진 구성품도 같은 방식으로 노드가 만들어지며 다른 구성품들은 면과 모서리 노드 없이 꼭지점 노드만을 가지고 있다.

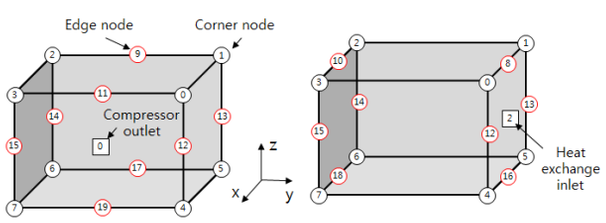


Fig. 3 Nodes created on components
(Number in circle is the node index.)

이와 같은 형식으로 노드를 생성한 후 구성품 및 이미 만들어진 파이프와 충돌여부를 고려하여 각 노드를 서로 연결한다. Fig. 4와 같이 꼭지점 노드는 두 구성품에서 가까운 노드를 연결하도록, 그 외 노드는 보이는 노드(Visible Node)를 연결하도록 하였다. 이 때 충돌은 직선과 평면의 교차점 존재 여부를 가지고 판단할 수 있다.

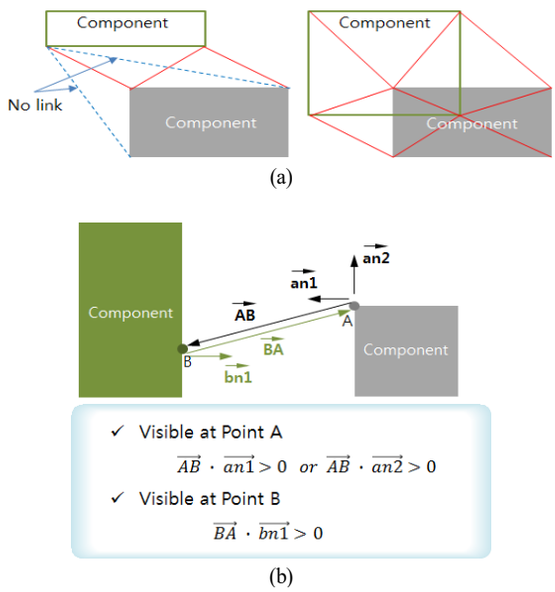


Fig. 4 (a) Connectivity between corner nodes and (b) connectivity from face or edge nodes

2.3 시스템 성능(Output)

지금까지의 두 단계를 거치면 유체흐름을 고려한 구성품의 배치가 마무리 되며 이를 바탕으로 전체 크기, 부피, 무게, 무게중심, 압력손실을 구하게 된다. 이들 값은 최적설계와 연동하여 목적함수 혹은 제약조건으로써 사용될 수 있다. 무게중심은 전술한 바와 같이, 비록 본 연구에서는 직육면체의 중심을 구성품의 무게중심으로 설정하였지만, 실제 형상이 가지는 위치를 사용해야 한다. 또한 파이프라인의 무게중심은 그 재질(본 연구에서는 주철)과 두께를 고려하여 계산하였다. 압력손실[11]은 주손실과 부손실의 합으로 계산하였고, 마찰계수는 Colebrook 방정식을 사용하였으며 손실계수는 파이프의 꺾인 각도만을 고려하였다. 파이프가 직선일수록 압력손실에 유리하기 때문에 꺾인 각도가 커질수록 손실도 함께 커지도록 시그모이드(Sigmoid) 함수를 사용하였고 180도 굽은 파이프는 손실계수 1.5가 되도록 하였다.

3. 결과 및 토의

이번 장에서는 2장에서 설명된 바와 같이 본 연구에서 제안하고 있는 방법을 수소엔진 시스템에 적용하였다. 해당 시

스템은 Fig. 5와 같이 수소엔진, 기어박스, 터보차저, 열교환기로 구성되어 있는데 여기서는 4개의 터보차저와 3개의 열교환기, 라디에이터만을 대상으로 하였다.

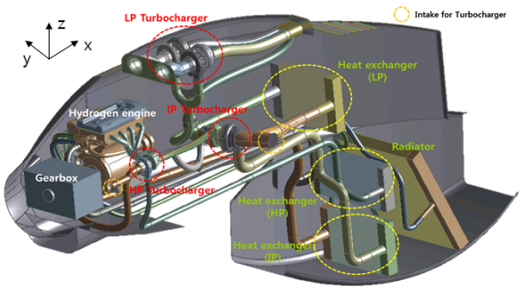


Fig. 5 Components in the hydrogen engine system

이들 구성품에 연결되어 있는 파이프는 Fig. 6에 나타내었다. LP, IP, HP는 각각 저압, 중압, 고압단 터보차저를, HX는 열교환기를 의미한다. 화살표는 공기나 물의 흐름을 나타내며 빨간색 화살표는 수소엔진으로 공기가 들어가는 과정을, 파란색 화살표는 배기가스 및 냉각수의 흐름을 뜻한다. 공기는 대기(Atmosphere)에서 저압단 터보차저(LP#1, #2)로 들어가고 이를 압축한 후 저압단 열교환기(HX LP)를 거쳐 중압단 터보차저(IP), 열교환기(HX IP), 고압단 터보차저(HP), 열교환기(HX HP) 순으로 흐른 후 수소엔진으로 공급된다. 엔진에서는 연소 후 발생된 배기가스가 고압단 터보차저로 공급되어 중압, 저압단 터보차저를 거쳐 대기로 나가게 되는 구조를 가지고 있다. 이와 동시에 엔진 냉각을 위해 라디에이터(Radiator)에서 엔진으로 냉각수가 공급 및 회수되어 레저버(Reservoir)로 흐르며, 이들은 각 단의 열교환기를 거쳐 라디에이터로 공급된다. 본 연구에서는 터보차저와 열교환기에 연결되어 있는 12개의 파이프만을 구축할 것이며 이는 Fig. 6에 실선으로 표시되어 있다. 한편 구축된 파이프의 압력손실을 구하기 위한 온도, 압력, 유량의 정보는 다단터보차저 시스템의 1차원 해석 결과[3]를 이용하였다. 구성품 및 이에 대한 내용은 Table 1과 2에 정리하였다.

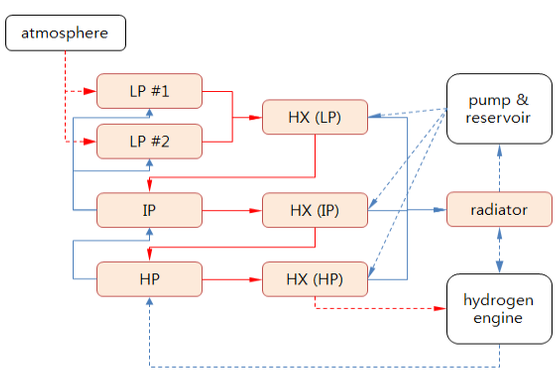


Fig. 6 Pipeline of hydrogen engine with three stage turbocharger system

Table 1 Component index and diameter of inlet/outlet

No.	Component	Diameter [m]
1	HP	0.08
2	IP	0.12
3	LP #1	0.14
4	LP #2	0.14
5*	HX(HP)	0.08
6*	HX(IP)	0.12
7*	HX(LP)	0.14
8*	Radiator	0.00

* Pipe diameter for cooling : 0.02 m

Table 2 Pipeline information

Start	End	Pressure[kPa]	Temperature [K]	Mass flow rate [kg/s]
LP #1	HX(LP)	25.33	339.27	0.06
LP #2	HX(LP)	25.33	339.27	0.06
HX(LP)	IP	22.80	265.70	0.12
IP	HX(IP)	75.24	409.72	0.12
HX(IP)	HP	67.72	293.88	0.12
HP	HX(HP)	189.60	427.89	0.12
HP	IP	60.60	831.85	0.10
IP	LP #1	21.76	705.39	0.05
IP	LP #2	21.76	705.39	0.05
HX(LP)	Radiator	150.00	300.00	0.01
HX(IP)	Radiator	150.00	300.00	0.01
HX(HP)	Radiator	150.00	300.00	0.01

3.1 구성품 배치

Fig. 5와 같은 형식으로 구성품을 배치하기 위해서는 아래 와 같은 시퀀스 퀀터플의 로커스가 필요하다.

$$\Gamma_1 = (1, 2, 3, 4, 6, 5, 7, 8)$$
$$\Gamma_2 = (1, 4, 3, 2, 7, 5, 6, 8)$$
$$\Gamma_3 = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$$
$$\Gamma_4 = (8, 7, 6, 5, 3, 4, 2, 1)$$
$$\Gamma_5 = (6, 5, 7, 8, 1, 2, 3, 4)$$

전술한 바와 같이 Γ_1과 Γ_2는 좌우(x축) 관계를 나타내는 것으로 1번 구성품이 가장 좌측에, 2~4번 구성품, 5~7번 구성품 순이며 8번 구성품이 가장 우측에 있음을 알 수 있다. 이 정보를 바탕으로 Γ_1과 Γ_2를 구성하면 되는데 2~4는 어떤 순서여도 상관없다. 예를 들어 Γ_1에 3, 2, 4의 순서로 만들었다면 Γ_2는 3개의 숫자 순서가 이어지지 않도록 4, 2, 3으로 배치하면 된다. 구성품 5~7번 역시 같은 방식으로 배치된다. Γ_3과 Γ_4는 앞뒤(y축) 관계를 나타내며, Γ_1, Γ_2와 같은 형식으로 구성하면 된다. 7개의 구성품이 가장 앞에 존재하지만 4번 구성품 1개만이 뒤쪽에 있다. 그러므로 Γ_3에서 4번 이후의 5~8번은 Γ_4에서 4번 앞에 존재하면 되고,

1~3번은 이들 중 하나 이상이 4번 앞에 놓이면 된다. Γ_5는 상하(z축) 관계로 2번 구성품 위에 3과 4번이 있고, 6, 5, 7번 순서로 상하관계가 존재한다. 이와 같이 구성된 로커스를 이용하여 3차원 공간에 구성품을 배치하면 Fig. 7과 같이 표현된다. 대부분의 구성품이 Fig. 5와 유사한 위치에 존재하지만 4번 구성품(LP #2)는 3번이 아닌 2번 뒤에 위치함을 알 수 있다. 본 방법은 원점을 기준으로 구성품을 쌓는 방식이기 때문에 이와 같이 빈 공간이 필요한 경우 이를 표현하지 못하는 단점이 있다. 하지만 3과 4번 구성품을 하나로 묶어서 접근하면 이러한 한계를 회피할 수 있다.

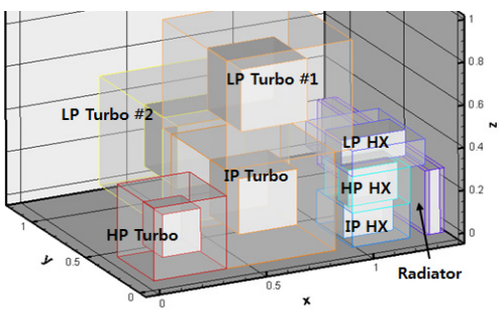
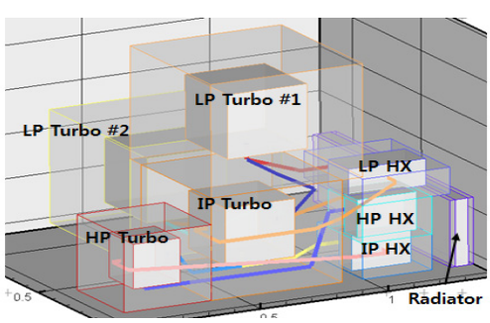


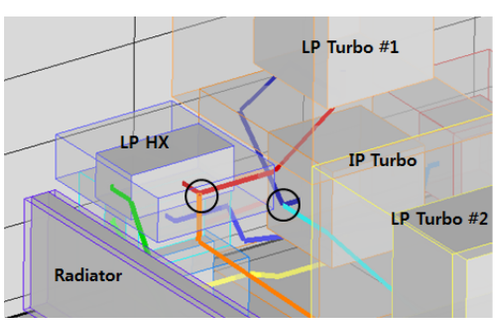
Fig. 7 Layout reproduced by sequence quintuple

3.2 파이프라인 및 시스템 성능

앞에서 구성된 배치를 바탕으로 A* 알고리즘을 적용하여 Fig. 8과 같은 파이프라인을 구성하였다. 파이프 직경은 시작점과 목표점이 되는 두 구성품 중 큰 것을 기준으로 하였고 그림에서는 그 경로만을 나타내었다. 본 연구에서는 파이프 직경을 고려하고 있기 때문에 버퍼 영역을 작게 할 경우 파이프라인이 생성되지 않을 수 있고 과도하게 꺾이는 경우가 발생할 수 있다. 그러므로 파이프라인 생성에 실패하는 경우 버퍼 영역을 보다 크게 잡을 필요가 있다. 한편 Fig. 6에 나와 있듯이 저압단 터보차저가 2개이므로 저압단 열교환기와 연결하는 파이프는 합쳐지는 형태이고, 반대로 중압단 터보차저에서 저압단으로 연결되는 파이프는 분기되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 파이프가 겹쳐지는 부분이 적절히 표현되고 있음을 Fig. 8(b)를 통해 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Pipeline constructed by A* algorithm and (b) pipeline with overlapping parts

이상과 같이 구성된 배치와 파이프라인에 대해 전체 크기, 무게, 압력손실 등의 성능을 Table 3에 정리하였다. 구성된 파이프라인의 크기 및 무게까지 고려된 것이며 파이프의 두께는 1 mm, 재질은 주철(밀도 7,800 kg/m^3)로 가정하였다. 압력손실은 Table 2의 조건하에서 계산된 것으로 냉각수가 흐르는 파이프(10~12번)는 상당히 낮은 손실을 보이고 있지만, 공기가 흐르는 파이프(1~9번)에서는 그렇지 않다. 특히 파이프 형상에 의한 부손실이 높게 나왔으며 전체 손실 중 75~91%를 차지한다. 또한 저압단 열교환기와 중압단 터보차저를 연결하는 파이프에서 3.4%로 가장 높고, 중압단 터보차저에서 저압단 터보차저로 연결되는 두 파이프에서 1% 이상의 압력손실이 발생하였다. 이것은 구성품간 공간이 협소하여 굽어진 파이프 형상이 많이 발생했기 때문이다. 최적화 과정을 통해 압력손실 최소화를 목표로 구성품을 재배치하면 이러한 현상은 해결될 것으로 보인다.

Table 3 Output of hydrogen engine system

Volume [m^3]		1.20	
Size (x, y, z) [m]		(1.34, 1.04, 0.86)	
Weight [kg]		76.85	
Center of gravity [m]		(0.62, 0.33, 0.25)	
No. of pipe	pressure loss [%]	major loss [Pa]	minor loss [Pa]
1	0.37	15.36	78.63
2	0.65	24.88	140.22
3	3.41	80.92	697.05
4	0.60	49.40	402.99
5	0.68	81.02	376.75
6	0.65	313.04	926.35
7	0.83	77.23	424.46
8	2.25	42.08	448.25
9	1.53	46.49	287.29
10	0.00	0.91	0.32
11	0.00	0.82	0.28
12	0.00	0.91	0.71

4. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서는 유체흐름을 고려한 구성품 배치방법에 대해 제안하였고, 이를 수소엔진 시스템에 적용하여 그 가능성에 대해 검토하였다.

제안된 방법은 4개의 터보차저, 3개의 열교환기, 라디에이터 총 8개의 구성품과 이들을 연결하는 12개의 파이프를 대상으로 수행되었으며, 그 결과 구성품의 배치 표현 방식, 파이프라인 구성이 적절한 것을 확인하였다. 이 때 사용된 시퀀스 퀸터플과 A* 알고리즘의 조합은 유체흐름을 고려한 구성품 배치에 타당한 방법이라 할 수 있다.

최종적으로 계산된 압력손실의 경우 초기 설계단계에서 참고할 수 있을 것으로 보인다. 지금의 수소엔진 시스템에서는 3.4% 이내의 압력손실을 가지고 있으며, 특히 공기가 흐르는 파이프에서는 부손실이 전체 손실의 75% 이상을 차지하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 구성품간 좁은 공간이 원인으로 압력손실을 최소로 하는 최적화를 통해 해결할 수 있다. 또한 본 프로세스는 수소엔진 시스템에 대한 구성품 배치뿐만이 아니라 구성품이 많고 파이프라인이 복잡한 다양한 시스템에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 주요 사업의 일환으로 수행되는 '무인기 수소왕복엔진 기술개발' 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

(1) Lim, B. J. and Rhee, D. H., 2015, "Research and development trends of high altitude long endurance UAV using hydrogen reciprocating engine," Current Industrial and Technologic Trends in Aerospace, Vol. 13, No. 2, pp. 179~186.

(2) Kang, Y. S., Lim. B. J. and Kim. J. K., 2015, "Establishment of Multi-stage Turbocharger Layout for HALE UAV Engine and Its Performance Assessment," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 18, No. 6, pp. 31~36.

(3) Kang, Y. S., Lim, B. J., and Cha, B. J., 2017, "Multi-stage turbocharger system analysis method for high altitude UAV engine," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 31, No. 6, pp. 2803~2811.

(4) Jun, S., Lim, B. J. and Kang, Y. S., 2017, "The Effects of Operating Altitude on the Performance of the Ported Shroud Centrifugal Compressor," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 4, pp. 31~36.

(5) Jun, S., Kang, Y. S. and Lim, B. J., 2019, "Ported shroud design of a compressor for the hydrogen engine of a high-altitude unmanned aerial vehicle," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 5, pp. 2113~2122.

(6) Murata, H., Fujiyoshi, K., Nakatake, S., and Kajitani, Y., 1995, "Rectangle-Packing-Based Module Placement," IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design '95, pp. 472~479.

(7) Yamazaki, H., Sakanushi, K., Nakatake, S., and Kajitani, Y., 2000, "The 3D-Packing by Meta Data Structure and Packing Heuristics," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E83-A, No.4, pp.639-645.

(8) Pitre, R. A. and Kim, I. Y., 2016, "Optimal Spacecraft Hardware Placement to Minimize Required Power Input for Hibernation Survival," AIAA 2016-3666.

(9) Yeom, S., Kim, H., and Chang, Y., 2015, "3D Optimal Layout Design of Satellite Equipment," Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 43, No. 10, pp. 875~887.

(10) Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B., 1968, "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, Vol. SSC-4, No. 2, pp. 100-107.

(11) White, F. M. 2002, Fluid Mechanics 4th edition, Mc Graw-Hill, New York.