

배관망 내의 정상상태 유동 해석

Steady-state flow analysis of pipe network

채 은 미*, 사 종 업**
E. M. Chai, J. Y. Sah

Key words: Steady-state(정상상태), Flow analysis of pipe network(가스배관망 유동해석), Data structure(데이터 구조), GUI(그래픽 사용자 환경), OOP(객체지향형 프로그래밍), ILU-CGS matrix solver(ILU-CGS 행렬 해석기)

ABSTRACT

A computer code based on a node equation method has been developed for the analysis of pipe network. Both data structure and object-oriented programming technique are used for pipe and node modelling, in which simplification process is applied to complicated and large pipe network. The semi-direct solver, ILU-CGS, improves greatly both the accuracy and the rate of convergence. The computational result of high-pressure pipe network of city gas in Taegu shows the good agreement with the real data.

기 호 설 명

- C : 조도계수
- d : 정점에서 의 경계 유입유량 [$N\ m^3/hr$]
- f : Darcy의 마찰계수
- K : 손실계수
- L : 배관의 길이 [m]
- ρ : 압력 [kg/cm^2]
- Q : 유량 [$N\ m^3/hr$]

하첨자

i, j : 배관과 배관 사이의 정점

1. 서 론

배관망에 대하여 정상상태의 유동을 해석하는 것

은 공학적 응용에 있어서 상당히 중요한 의미를 갖는다. 기본적인 지배방정식은 비선형 연립방정식의 형태를 취하므로 반복적인 계산방법에 의하지 않고는 해를 구할 수 없다. 비선형 연립 방정식은 두가지 형태로 표현이 가능하다. 파이프 내의 미지의 유량으로 비선형 연립방정식을 구성하거나, 또는 정점에서의 미지의 압력으로 비선형 연립방정식을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 전자와 후자를 각각 유량 계산법과 압력 계산법이라 부르기로 한다. 이러한 비선형 배관망 해석을 위한 몇가지 알고리즘들이 제안되었으며 이러한 방법들은 오늘날까지도 널리 사용되고 있다.

유량 계산법에 의한 배관망 해석은 Hardy Cross가 폐회로 방정식에 의한 유량 보정방법⁽¹⁾을 제안함으로써 체계를 갖추었다. Martin과 Peters⁽²⁾, 그리고 Epp와 Fowler⁽³⁾는 비선형 연립방정식을 이용하여 파이프의 유량을 동시에 계산함으로써 반복계산의 수렴성을 향상시켰다. Wood는 선형 해석법⁽⁴⁾을 통하여 유량과 압력의 초기조건에 따른 수렴성의 영향을 개선하였다.

* 영남대학교 대학원

** 정회원, 영남대학교 기계공학부

Hardy Cross⁽¹⁾는 압력 계산법도 함께 제안하였으나, 수렴성이 너무 늦다는 그의 연구 결과에 따라 연구자들로부터 한동안 거의 주목받지 못하였다. Shamir와 Howard⁽⁵⁾는 압력 계산법을 선형화한 비선형 연립방정식을 계산하여 만족할 만한 수렴성을 얻었다. 최근에 Greyvenstein과 Laurie⁽⁶⁾이 전산유체역학의 SIMPLE 계열의 방법을 참조하여 배관망 해석을 시도하였으나, 이는 본질적으로 Shamir and Howard의 압력 계산법과 동일한 것으로 밝혀졌다. 이것은 압력 계산법이 전산유체역학의 유한차분법이나 유한체적법과 동일한 선 상에 있는 배관망 해석법임을 보여주는 예이다.

기존의 연구들이 배관망 해석의 수렴성과 계산속도를 향상시키기 위한 것이었던 반면, 본 연구는 복잡한 대형 배관망을 사용자들이 쉽게 사용할 수 있도록 하는데 주된 목적을 두었다. 복잡한 배관망 형상을 쉽게 입력 및 수정할 수 있어야 하며, 어떠한 경우라도 항상 정확한 해를 줄 수 있어야 한다. 계산 속도는 최근 컴퓨터 하드웨어의 눈부신 발전으로 더 이상 문제가 되지 않을 뿐만 아니라 개인용 컴퓨터에서조차 대형 배관망을 간단하게 해석할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 수치계산의 속도보다는 복잡한 배관망을 효율적으로 다룰 수 있는 방법에 더 큰 비중을 두었다.

GUI 상에서 표현된 복잡한 배관망에 대하여 끝이 막힌 파이프들은 계산의 수렴성을 저해하고 해의 정확도를 저하시킨다. 먼저 끝이 막힌 파이프들을 제거하고 계산을 수행한 후, 다시 본래의 배관망 형태로 복구시켜 결과를 출력하면, 계산 속도와 해의 정확도를 함께 향상시켜 효율적인 배관망 해석 시스템의 개발에 도움이 된다. 이러한 단순화 과정을 복잡한 대형 배관망에서 효율적으로 처리하려면, 객체지향화 기법에 의한 파이프와 정점의 데이터 구조 설계가 중요하게 된다.

연립방정식을 계산하는 방법은 크게 세가지가 있다. 첫째, 반복법(iterative solver)으로써 점이완법(point relaxation)이나 선이완법(line relaxation)이 이에 해당하며, 반복 계산에 의하여 해를 얻는 방법이다. 둘째, 직접법(direct solver)으로써 반복없이 한번에 해를 구하는 방법이다. 직접법은 계산 시간이 빠른 반면, 행렬의 크기가 커지면 해의 정확도가 저하되어 유량이 영에 가까운 파이프는 오차의 범위 내에 속하게 되는 문제점이 있다. 반복법은 반복 계산을 계속 수행함으로써 대형 배관망의 경우 해

의 정확도는 어느 정도 보장받을 수 있는 반면, 수렴하는데 많은 반복횟수가 필요하므로 계산 시간이 오래 걸린다. 셋째, 반직접법(semi-direct solver)으로써 반복법이 수천 또는 수만회의 반복 계산을 수행하는 것에 비하여 대개 수십회의 반복 계산을 통하여 정확한 해를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 반직접법 중의 하나인 ILU-CGS⁽⁸⁾ 방법을 사용하였다.

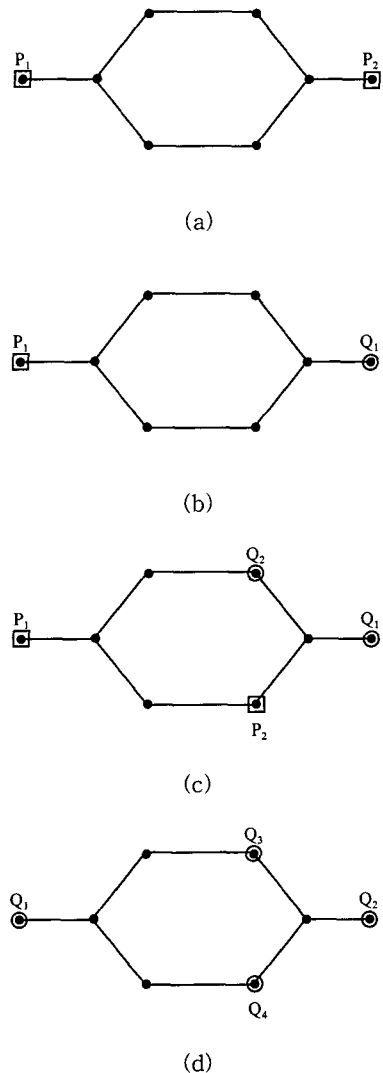


Fig. 1 Pressure B.C.(■) and flow rate B.C.(●). (a)(b)(c) : right, (d) : wrong

본 연구는 복잡한 대형 배관망 해석에 있어서 사용자의 편의성과 계산의 신뢰성 및 정확성에 관한 방법들을 제안하였다. 수렴성이나 계산속도와 관련된 배관망 해석의 구체적인 사항은 참고문헌^(4,7)을 참조할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 배관망의 경계조건

아무리 복잡한 배관망이라 하더라도, 최소한 두개의 정점에서 압력이 지정되어야 압력 차이에 의하여 배관망 내에 유동이 발생하게 된다. 이와 같이 압력이 지정되는 곳을 경계정점이라 하며, 경계정점에서는 압력 뿐만이 아니라 배관망 내부로 유입되는 유량을 대신 지정할 수도 있다. 본 연구에서는 전자와 후자를 각각 압력경계조건과 유량경계조건이라 부르기로 한다. 또한 복잡한 배관망의 경우에는 두 개 이상의 경계정점이 지정되는 경우도 흔히 볼 수 있다. 단, 모든 경계조건을 유량경계조건으로 사용하는 것은 세심한 주의가 필요하며, 유량경계조건이 사용되는 경우 최소한 하나의 정점에서는 압력경계조건이 지정되는 것이 바람직하다(Fig. 1참조).

2.2 배관망 지배방정식

배관망의 경계조건이 설정되면 그에 따라 유동이 발생하게 되며, 이 때 배관망 해석에서 구하고자 하는 물리량은 파이프에서의 유량 Q_{ij} 와, 정점에서의 압력 p_i 이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 각 배관은 압력손실에 대하여 에너지보존방정식을 만족하여야 한다.

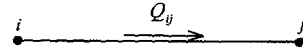
$$\Delta p_{ij} (= p_i - p_j) = K'_{ij} Q_{ij} \quad (1)$$

$$(\because K'_{ij} = \rho g K_{ij} |Q|^{a-1})$$

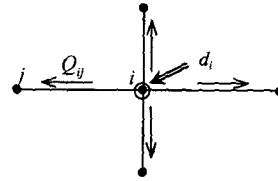
K_{ij} 와 a 는 여러문헌⁽¹⁻⁷⁾에서 다음과 같이 표현된다.

Hazen-Williams :

$$K_{ij} = \frac{10.78L}{C^{1.852} D^{4.87}}, \quad a = 1.852$$



(a) Energy conservation on a pipe,
 $P_i - P_j = K'_{ij} Q_{ij}$



(b) Mass conservation on a node,
 $\sum_j Q_{ij} = d_i$

Fig. 2 Governing equations of pipe network.

Darcy-Weisbach :

$$K_{ij} = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5}, \quad a = 2.0$$

여기서, C 는 조도계수이고, f 는 Darcy의 마찰계수이다. 본 연구에서는 도시가스업체에서 통상적으로 사용하고 있는 Hazen-Willaims의 식을 사용하였으나, Darcy-Weisbach 식도 사용할 수 있다.

배관망은 각 정점에서 연속방정식도 만족하여야 한다.

$$\sum_j Q_{ij} = d_i \quad (2)$$

윗식에서 d_i 는 정점 i 에 유량경계조건이 적용된 경우의 배관망 유입 유량이며, 그렇지 않은 경우에는 (유량경계조건이 아닌 경우) 영의 값을 갖는다.

2.3 정체영역(dead zone)

Fig. 3에서와 같이 파이프 내의 유량이 영인 경우가 존재하며, 이러한 영역을 본 연구에서는 정체영역(dead zone)이라 하기로 한다. 파이프 내

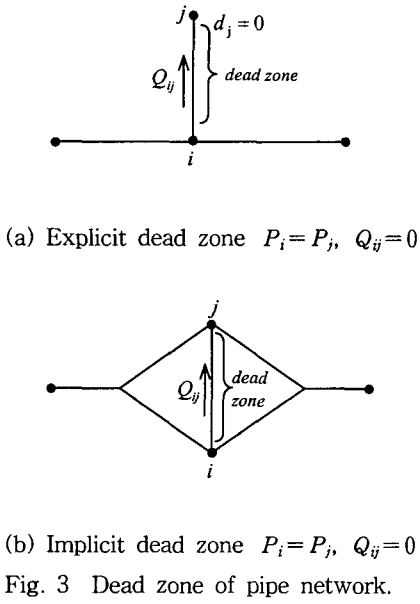


Fig. 3 Dead zone of pipe network.

의 유량이 영인 경우, 식(1)에서 K'_{ij} 도 영이 되므로 수치계산의 수렴성과 해의 정확성 및 안정성을 크게 해치게 된다. 본 연구에서는 Fig. 3(a)와 같이 명시적 정체영역(explicit dead zone)의 경우 이러한 파이프들을 제거시켜 배관망을 단순화한 뒤 계산을 수행한다. 이와 관련된 자세한 사항은 후절에서 더 자세히 언급할 것이다. Fig. 3(b)와 같이 내재적 정체영역(implicit dead zone)이 존재하는 경우, 해를 얻기 전까지는 그러한 사실을 확인할 수 없으므로 배관망을 단순화할 수 없으며, 이 경우 해의 수렴성이 저하되는 것을 피할 수 없다. 본 연구에서는 내재적 정체영역이 존재하는 경우에도 정확하고 빠른 해를 얻을 수 있도록 하였다.

2.4 객체지향형 데이터 구조

본 연구는 GUI를 통한 배관망의 입력과 배관망의 수치계산을 효율적으로 연계시키기 위하여, 파이프와 정점들에 대하여 Fig. 4와 같은 객체지향형 데이터 구조를 사용하였다. 복잡한 형상의 배관망을 쉽게 다룰 수 있도록 그래픽 사용자 환경(GUI) 하에서 배관망 해석 프로그램을 개발하였다. 이중링크 구조의 기본클래스를 선언하고, GUI상에서의 배관망 입력을 위한 전후처리용 데

```

class CElement
{
protected:
    int          id, NumDataElem;
    BOOL        fZeroM;
    double       coeff1, coeff2, M, Mold;
public:
    CconDataElem *fDataElem;
    CNode        *start, *node;
    CElement     *pre, *nxt;

    void SetZeroDischarge(BOOL flag);
    void SetSpec(CSpec *sp,char *name);
    void SetNode(CNode *s,CNode *e);
    void SetCoefficient();
    void SetMassflowRate(double m);
    double GetCoefficient();
    void CalcCoefficient();
    void CalcDischarge();
    void InitializeDischarge();
    void SetResultsToData();
};
    
```

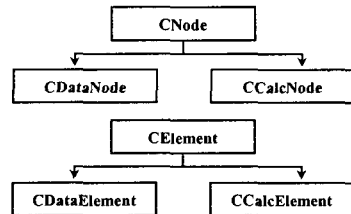
(a) Data structure of a pipe

```

class CNode
{
private:
    int          id, BC;
    double       bcM;
    int          NumConnected;
    CconElem     *fconElem;
    double       P, Pp, tempP;
public:
    CDataNode    *DataNode;
    CNode        *pre, *nxt;

    void AddConnectedElement(CElement *);
    void RemoveConnectedElement(CElement *);
    double CalcPressure();
    void CorrectPressure();
    void MakePressureMatrix();
    void MakeConnectedNodeList();
    void DeleteConnectedNodeList();
    void SetResultsToData();
    double GetError();
};
    
```

(b) Data structure of a node



(c) Inheritance of class

Fig. 4 Data structure of pipe network.

이터 구조와 수치계산을 위한 계산용 데이터 구조를 각각 기본클래스로부터 파생시켰다. 전처리용 데이터 구조는 모든 배관망에 대한 자세한 정보를 가지고 있는 것이 주목적이며, 계산용 데

이러한 구조는 수치계산의 효율을 위하여 최대한 단순화된 배관망 정보를 갖는 것이 주목적이다.

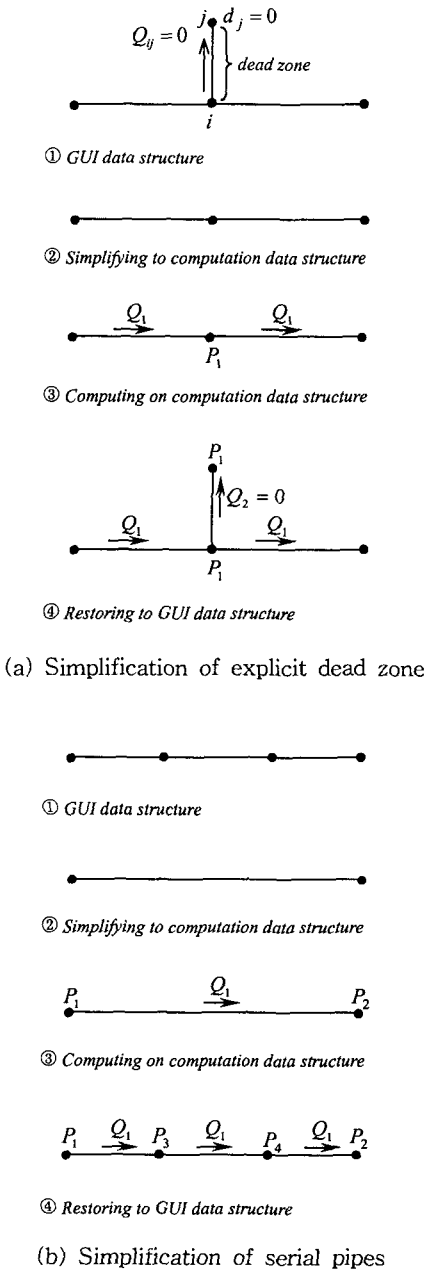


Fig. 5 Simplification and restore of pipe network.

명시적 정체영역이 있는 경우, 계산용 데이터 구조는 명시적 정체영역인 파이프를 검색하여 배관망 데이터 구조에서 삭제시킨다. 이 때 나중에 다시 전후처리용 데이터 구조로 데이터를 복구시키기 위하여 필요한 배관망 연결정보는 저장하여 둔다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 단순화된 계산용 데이터 구조에 의하여 배관망 해석을 수행한 후, 복구과정을 거쳐 전후처리 데이터 구조에 의하여 계산 결과를 출력한다. 직렬 연결된 파이프들은 Fig. 5(b)와 같이 단순화 과정을 거쳐 하나의 파이프로 대체하여 계산을 수행한 후 복구과정을 거쳐 본래 형상에 대한 결과를 출력한다.

3. 유량 계산법

3.1 유량 계산법의 경계조건

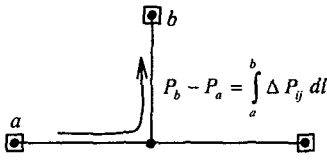
유량 계산법의 경우, 파이프 내로 흐르는 유량이 미지수이므로 파이프 개수만큼의 유량 방정식을 만드는 것이 중요하다. 그러나 다음에서 보는 바와 같이 파이프 개수만큼의 유량 방정식을 만드는 것이 그리 쉽지 않다. 유량 경계조건인 경우에는 그 정점에서 식(2)의 연속방정식을 바로 적용할 수 있는 반면, 압력 경계조건이 주어진 경우에는 단순히 유량에 관한 정보로 바꿀 수 없다. m_p 개의 압력 경계조건이 주어진 경우, 그 중 하나는 배관망 전체 압력의 기준점으로 작용하며, 나머지 $m_p - 1$ 개는 기준 압력에 대하여 독립적인 배관망의 회로 방정식을 구성한다. 예를 들면 Fig. 6(a)와 같이 압력 경계점 a와 압력 경계점 b 사이의 회로 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$p_a - p_b = \sum_y \bar{\Delta} p_{iy} = \sum_y \bar{K}_{iy} Q_{iy} \quad (3)$$

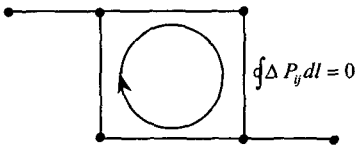
여기서, $p_b - p_a$ 는 주어진 상수이므로 유량에 대한 식을 얻을 수 있다.

3.2 유량 계산법의 연립방정식

n 개의 파이프 내에서의 유량을 미지수로 하고, n 개의 유량에 관한 방정식을 구성하기 위하여 Hardy-Cross는 배관망에서 다음 관계식을 사용



(a) Open loop equation



(b) Closed loop equation

Fig. 6 Loop equation of pipe network.

하였다.

$$n = m + L_c - 1 \tag{4}$$

여기서, n 은 파이프의 개수, m 은 정점의 개수, 그리고 L_c 는 독립적으로 구성할 수 있는 폐회로의 개수이다.

채은미와 사종엽⁽⁷⁾은 이를 다음과 같이 확장하여 사용하였다.

$$n = (m - m_p) + L_c + L_o \tag{5}$$

여기서, m_p 는 압력 경계조건이 설정된 정점의 개수, $L_o (= m_p - 1)$ 는 압력 경계정점 사이의 독립적 회로 방정식의 수이다. 압력 경계조건이 하나인 경우, 식(5)는 식(4)와 동일하다.

먼저, $m - m_p$ 개의 정점에서 식(2)의 연속방정식을 사용하여 $m - m_p$ 개의 유량에 관한 방정식을 만든다.

$$\sum_j Q_{ij} = d_i \tag{6a}$$

m_p 개의 압력 경계정점으로부터 식(3)과 같이 $L_o (= m_p - 1)$ 개의 유량에 관한 방정식을 얻는다.

$$\sum_j^{ab} K_{ij} Q_{ij} = \Delta p_{ab} \tag{6b}$$

L_c 개의 독립적인 폐회로 방정식은 Fig. 6(b)에서와 같이 각 폐회로에 대하여 압력을 선적분하므로 다음과 같이 L_c 개의 유량에 관한 방정식을 만든다.

$$\sum_j^{loop} K_{ij} Q_{ij} = 0 \tag{6c}$$

따라서, 식(5)로부터 n 개의 배관에 대하여 다음과 같은 $n \times n$ 비선형 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$[A]\{Q\} = \{B\} \tag{7}$$

여기서, $[A]$ 는 $n \times n$ 행렬이고, $\{Q\}$ 와 $\{B\}$ 는 $n \times 1$ 행렬이다. $\{Q\}$ 는 n 개의 파이프에서의 유량을 의미한다.

이와 같은 방법은 계수행렬 $[A]$ 에 비선형 계수 $K_{ij}(Q_{ij})$ 가 포함되어 있으므로 반복 방법에 의하여 해를 얻어야 한다. 특히, 앞에서 설명한 바와 같이 정체영역이 있는 경우 $K_{ij}(Q_{ij})=0$ 이 되므로 수치계산의 수렴성이나 해의 정확성에 영향을 미칠 수 있다.

다음에 설명할 압력 계산법에 비하여, 유량 계산법은 압력경계조건의 추가나 삭제, 또는 배관망의 사소한 변경에 따라 식(6b)와 식(6c)를 통하여 연립방정식의 구성에 크게 영향을 미칠 수 있다. 또한 복잡한 배관망에 대하여 식(6b)와 식(6c)를 항상 안전하게 구성하기 위하여서는, 상호 독립적인 최단거리 폐회로 및 개회로를 배관망의 형상에서 자동으로 탐색할 수 있어야 한다.

4. 압력 계산법

4.1 압력 계산법의 경계조건

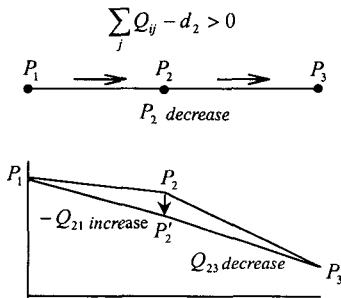
압력 계산법은 기본적으로 각 정점에서의 연속방정식을 이용하므로, 유량경계조건이 주어진 경우 식(2)와 같이 연속방정식을 만들 때 자연스럽게 고려할 수 있다. 압력경계조건이 주어진 경우에는 변수 자체가 압력이므로 문제될 것이 없다. 따라서 유량 계산법에 비하여 경계조건의 처리가 쉽고 간편하다.

4.2 압력 계산법의 연립방정식

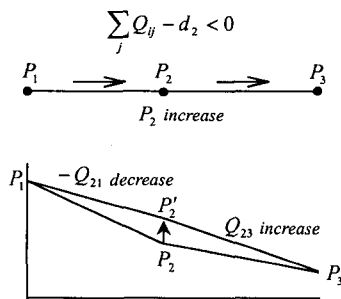
유량 계산법은 식(6a)만으로는 방정식의 개수가 부족하므로, 식(6b)와 식(6c)를 이용하여 파이프와 같은 수의 유량 방정식을 만들어야만 한다. 그러므로, 배관망 형상에 따라 회로를 탐색하는 과정이 필요하게 된다.

그러나 압력 계산법은 각 정점에서의 연속방정식 식(6a)만을 이용하는 것이다. 이 경우 미지수는 m개의 정점에서의 압력이고, 방정식은 m개의 정점에서의 연속방정식을 사용하므로 더 이상의 방정식의 추가없이 연립 방정식을 간단하게 구성할 수 있다. 이 때, 식(1)을 식(2)에 대입하여 유량 Q_{ij} 를 소거하면, 다음과 같이 압력에 대한 식을 얻는다.

$$\sum_j \frac{\Delta p_{ij}}{K_{ij}} = d_i \quad (8)$$



(a) Case of excessive outflow from a node



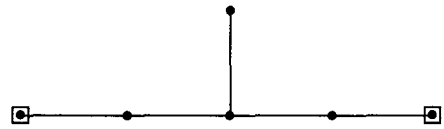
(b) Case of excessive inflow into a node

Fig. 7 Pressure correction by continuity on a node.

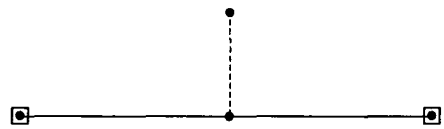
따라서, 다음과 같은 비선형 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$[C]\{p\} = \{D\} \quad (9)$$

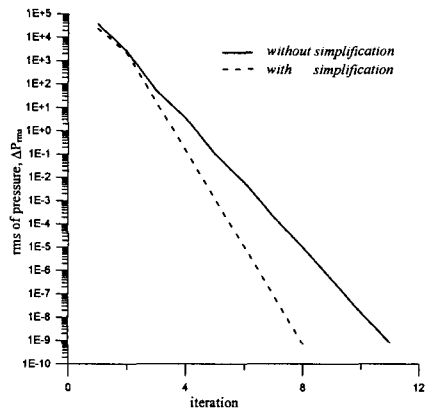
여기서, [C]는 $m \times m$ 행렬이고, {p}와 {D}는 $m \times 1$ 행렬이다. {p}는 m개의 정점에서의 압력을 의미한다. 그러나 이 방법은 이전의 유량 계산법과는 달리 압력만으로는 계산을 수행할 수 없다. 왜냐하면 계수행렬 [C]에서 $K'_{ij}(Q_{ij})$ 는 유량에 의하여 결정되므로 각 정점에서의 압력이 계산되는 중간과정마다 식(1)을 이용하여 항상 유량을 알고 있어야 한다.



(a) Without simplification



(b) With simplification

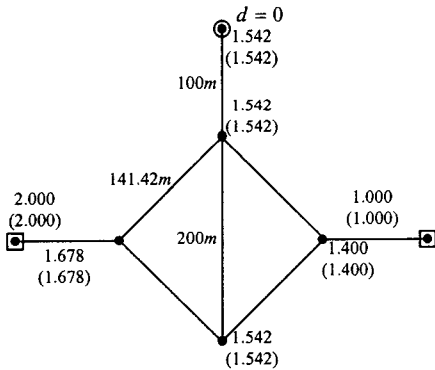


(c) Comparison of the rate of convergence

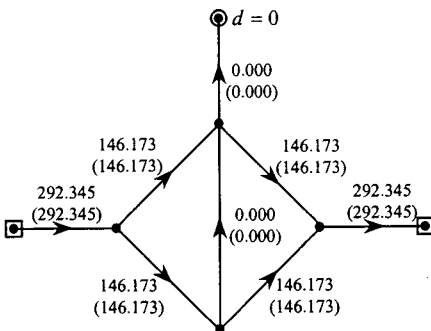
Fig. 8 Convergence acceleration by simplification.

압력 계산법은 계수행렬에 $1/K_{ij}$ 이 포함되어 있으므로, 유량이 영에 가까운 파이프에서 계수행렬이 무한히 커지게 되는 문제점이 있다. 따라서 정체 영역이 해의 정확도와 수렴성을 저하시킨다.

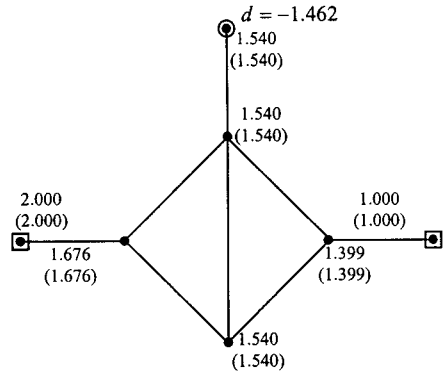
압력 계산법은 유량 계산법과는 달리, 경계조건의 처리가 용이하고, 자동 배관망 회로 탐색 기능이 필요치 않으며, 경계조건이나 배관망의 사소한 변경이 전체 연립방정식에 크게 영향을 미치지 않는다. 또한 압력 계산법은 단순히 압력에 대한 연립방정식을 구성하여 해를 구하는 이상의 물리적 의미를 가지고 있다. 각 정점에서의 연속방정식이 만족되지 않으면 연속방정식을 만족하는 방향으로 압력이 수정된다. 먼저 Fig. 7(a)에서와 같이 정점으로의 유입량이 유출량보다 많은 경우, 정점의 압력이 상승된다. 압력이 상승되면 유입 배관의 경우에는 압력 차이가 감소하여 유량이 감소하며, 유출 배관의 경우에는



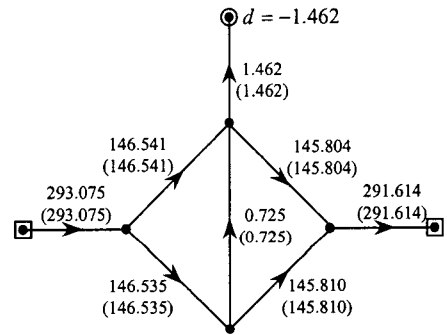
(a) Pressure (gage, kg/cm^2), $d=0$



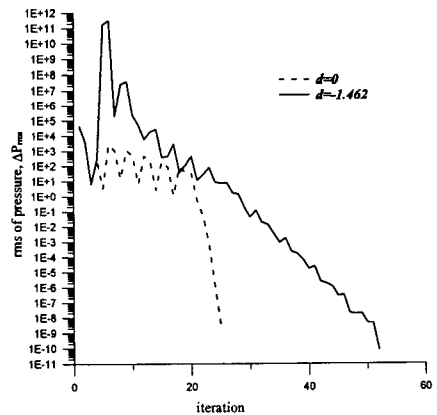
(b) Flow rate (Nm^3/hr), $d=0$



(c) Pressure (gage, kg/cm^2), $d=-1.462$



(d) Flow rate (Nm^3/hr), $d=-1.462$



(e) Convergence history

Fig. 9 Accuracy test of pipe network with dead zone and nearly dead zone.

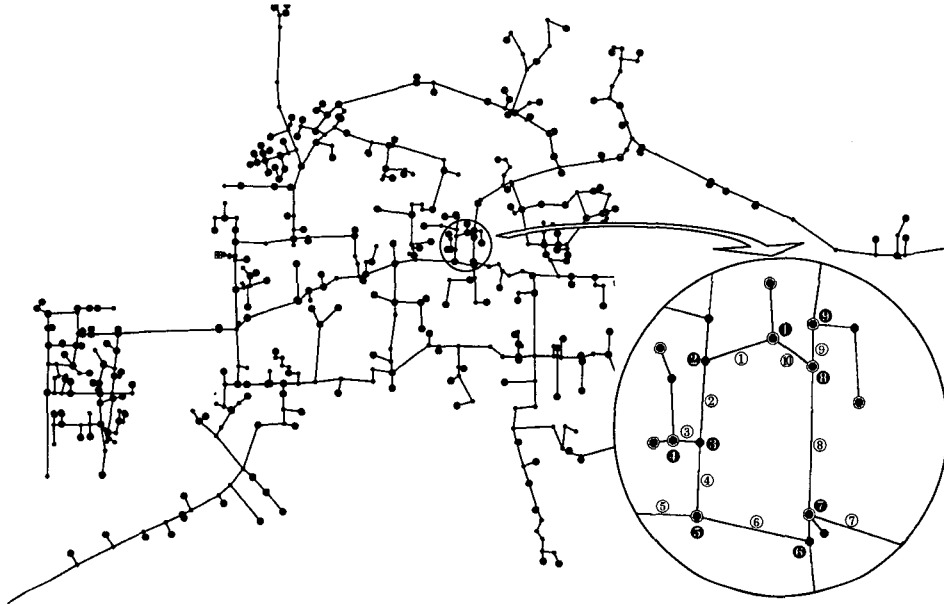


Fig. 10 High-pressure pipe network of city gas in Taegu.

압력 차이가 증가하여 유량이 증가하므로, 연속 방정식을 만족시키는 방향으로 압력이 수정된다. Fig. 7(b)에서와 같이 정점으로의 유입량이 유출량보다 적은 경우에도, 정점의 압력이 감소되어 연속방정식을 만족시키는 방향으로 압력이 수정된다.

식(9)의 압력에 대한 비선형 연립방정식을 계산하기 위하여 반직접법인 ILU-CGS 방법을 사용하였다. 반직접법을 사용하면, 해의 정확도가 얻어질 때까지 반복 계산을 계속 수행할 수 있는 반복법의 장점과 수렴속도가 빠른 직접법의 장점을 함께 취할 수 있어 빠르고 정확한 압력 계산이 가능하다.

5. 계산결과

본 연구에서는 그래픽 사용자 환경 하에서 전후처리를 포함하는 객체지향형 배관망 해석 프로그램 개발하였다. 배관망의 해석은 압력 계산법을 이용하였으며, 연립방정식의 계산은 반직접법인 ILU-CGS를 사용하였다.

명시적 정체영역과 직렬·연결 배관들에 대한

단순화 과정의 효과를 확인하기 위하여 조도계수 150, 길이 100m인 PLP32(배관용탄소강관, KSD3507, 직경 0.0362m) 5개로 이루어진 간단한 배관망에 대하여 계산을 수행하였다. 배관망 형상에 대하여 단순화 과정을 적용하지 않은 경우(Fig. 8(a))와 단순화 과정을 적용한 경우(Fig. 8(b)) 각각의 수렴성을 Fig. 8(c)에서 비교하였다. 배관망 단순화를 적용하면 그렇지 않은 경우보다 반복 계산횟수가 크게 감소할 뿐만 아니라 1회 반복에 필요한 계산시간도 함께 감소한다.

해의 정확도를 검증하기 위한 계산 예가 Fig. 9에 나타나 있다. 먼저 명시적 정체영역이 있는 경우 (즉, $d=0$), 압력 및 유량의 계산 결과가 정답과 일치하는 것을 볼 수 있으며 (Fig. 9(a), (b)), 유출량 $d = -1.462 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ 에 의하여 주변에 연결된 다른 파이프와 비교하여 아주 미소한 유량이 흐르는 경우에도 압력과 유량이 정답과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 9(c), (d)). 여기서, ()의 값은 정답을 의미한다. 특히, 본 계산결과는 많은 유량과 적은 유량이 흐르는 배관들이 각각 서로 인접하게 위치하여 있어도 수치계산의 정확도에 영향을 미치지 않는다는 것

Table 1 Computational result of high-pressure pipe network of city gas in Taegu

node	pipe		
	pressure (kg/cm^2)	discharge (Nm^3/hr)	velocity (m/sec)
●	7.284	① 4187.7	7.6
●	7.327	② 4886.7	8.9
●	7.391	③ 187.0	0.3
●	7.391	④ 5073.7	9.1
●	7.454	⑤ 17852.9	17.9
●	7.312	⑥ 12738.2	13.3
●	7.283	⑦ 7222.8	7.6
●	7.255	⑧ 4623.3	4.9
●	7.229	⑨ 8698.0	9.2
		⑩ 4126.7	7.6

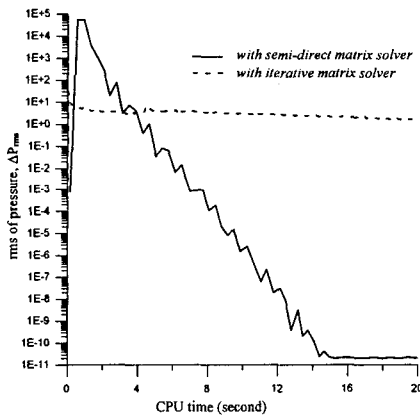


Fig. 11 Comparison of the convergence history between matrix solver.

을 잘 보여 준다. 조도계수 150, 각 배관의 길이는 100 m, 141.42 m, 200 m 인 PLP32관을 사용하여 계산을 수행하였다.

실제 경우의 복잡한 배관망에 대한 적용은 Fig. 10에 나타나 있다. 대구도시가스 배관망의 중압관을 해석한 것으로서 582개의 정점과 597개의 배관으로 구성되어 있다. 반월당 주변의 도시가스 배관망에 대한 자세한 계산 결과가 Fig. 10의 원으로 표시된 부분과 Table 1에 잘 나타나 있다.

대구지역의 도시가스 중압관 배관망에 대한 계산의 수렴성이 Fig. 11에 나타나 있으며, 계산 시

간은 개인용 컴퓨터(Pentium II 400MHz 128M RAM)를 사용하여 압력의 rms 오차가 1×10^{-11} 에 도달하는 기계적 정확도를 얻는데 39회 반복 계산에 14.06초가 소요되었다. 이는 1회 반복 계산에 약 0.36초의 시간이 소요된 것이다. 반복법에 의한 수렴성의 비교가 함께 나타나 있으며, 반직접법은 14초 이내에 기계적 정확도까지 수렴한 반면 반복법은 수렴속도가 매우 느려 만족할 만한 답을 얻기 위하여 약 2000초의 시간이 필요하다. 따라서, Fig. 11의 20초 이내의 시간에서는 압력의 rms 오차가 거의 감소하지 않는 것처럼 보인다.

본 계산에서 사용된 단위계는 도시가스업체에서 중압관에 대하여 사용하고 있는 것을 채택하였다. 중압관의 압력은 kg/cm^2 을, 유량은 대기압 상태의 부피로 환산하여 Nm^3/hr 를 사용하였다. 유속은 단위면적 당 실제 유량에 대하여 m/sec 를 사용하였다.

6. 결론

기존의 배관망 연구들이 수치계산의 수렴성 및 계산속도 향상과 관련된 것이었다면, 본 연구는 복잡한 대형 배관망에 대하여 사용자들의 편의성과 수렴의 신뢰성, 그리고 해의 정확성에 그 목적을 두었다. 유량 계산법의 경우 경계조건이나 배관망 형상이 연립방정식 구성에 영향을 주는 반면, 압력 계산법은 경계조건이나 배관망 형상이 연립방정식 구성에 아무런 영향을 주지 않는 것이 압력 계산법의 장점 중의 하나이다. 또한, 전후처리용 데이터 구조와 계산용 데이터 구조를 함께 사용함으로써 복잡한 배관망 형상을 자세하게 다룰 수 있을 뿐 만 아니라 수치계산 시에는 배관망의 형상을 단순화하여 계산 효율 및 해의 정확도를 높일 수 있다. 비선형 연립방정식을 해석하기 위하여 반직접법을 사용함으로써, 해의 정확도와 수렴성을 모두 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 대구도시가스(주)와의 산학협력에 의하여 연구비 일부 지원을 받아 수행되었습니 다.

참 고 문 헌

1. Cross, H., 1936, Analysis of flow in networks of conduits or conductors, Bulletin No. 286, University of Illinois Engr. Expr. Station, Urbana, Ill.
2. Martin, D.W., and Peters, G., 1963, The application of newton's method to network analysis by digital computer, Journal of the Institute of Water Engineers, Vol. 17, pp. 115-129.
3. Epp, R., and Fowler, A. G., 1970, Efficient code for steady-state flows in networks, Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 96, No. HY1, Proc. Paper 7002, Jan., 1970, pp. 43-56.
4. Wood, D.J., 1974, Users manual - a computer program for the analysis of pressure and flow in pipe distribution systems, Office of Engineering Continuing Education, University of Kentucky, Lexington, Ky.
5. Shamir, U., and Howard, C.D.D., 1968, Water distribution systems analysis, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94, No. HY1, Proc. Paper 5758, Jan., 1968, pp. 219-234.
6. Greyvenstein, G.P., and Laurie, D.P., 1994, A segregated CFD approach to pipe network analysis, Int. J. for Numer. Methods in Engineering, Vol. 37, pp. 3685-3705.
7. 채은미, 사중엽, 1996, 배관망 내의 유동 해석을 위한 코드개발에 관한 연구, 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집, B, pp. 336-339.
8. Dahl, O., and Wille, S.O., 1992, An ILU preconditioner with coupled node fill-in iterative solution of the mixed finite element formulation of the 2D and 3D Navier-Stokes equations, Int. J. for Numer. Methods in Fluids, Vol. 15, pp. 525-544.