

IAPWS-IF97 기준

ENGSoft

# 산업용 증기표

(ENGSoft Steam Table for Industrial Use

Based on the IAPWS-IF97)

2009 년도 초판

(The First Edition of Year 2009)

이엔지소프트(ENGSoft)

## IAPWS-IF97 기준 ENGSoft 산업용 증기표

---

이 도서의 저작권은 ENGSoft 에 있으며 일부 혹은 전체 내용을 무단 복제하는 것은 저작권법에 저촉됩니다. (Copyright 2009 by ENGSoft Inc., Seoul, Korea)

초판 1쇄 발행일 : 2009년 11월 1일  
(The first print of the first edition in July 1'st in Year 2009)

저 자(Author)	: 이엔지소프트(ENGSoft)
발 행 처(Publisher)	: 이엔지소프트(ENGSoft)
이 메 일(Email)	: engsoft@engsoft.co.kr
홈페이지(Homepage)	: www.engsoft.co.kr
정 가(Price)	: 20,000 원(20,000 KRW)

문의 사항은 이메일로만 가능합니다.  
(Communication with the author is possible only by email.)

### ENGSoft 산업용 증기표 ……

ENGSoft 산업용 증기표(이하 “ENGSoft 증기표”)는 IAPWS-IF97 공식을 기반으로 ENGSoft 에서 개발한 엑셀용 증기 성질 소프트웨어인 ES\_StableIF97 AddIn 으로 작성된 증기표입니다. 엑셀(MS Excel)은 미국 마이크로소프트(Microsoft)사의 오피스 프로그램을 일컬으며, ES\_StableIF97 AddIn 은 엑셀에서 증기 성질 값을 찾을 수 있는 함수를 제공하는 프로그램입니다. 엑셀 및 오피스 프로그램은 미국 마이크로소프트사가 저작권을 가지고 있습니다.

요즘 대부분의 엔지니어가 개인용 PC 를 사용하는 관계로, 물 및 증기의 성질을 구할 때 책자 형태로 된 증기표를 참조하기 보다는, 여러 형태의 소프트웨어를 사용하여 컴퓨터 상에서 직접 물 및 증기의 성질 값을 구하고 사용합니다.

그럼에도 불구하고, ES\_StableIF97 소프트웨어 개발과 함께 ENGSoft 증기표 책자를 만든 목적은 다음과 같습니다.

첫째, ES\_StableIF97 소프트웨어의 무결점과 기능성을 확인하기 위함입니다.

증기 성질 값을 계산하는 소프트웨어의 무결점을 확인하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으며, 그 가운데 하나가 증기표와 증기 선도를 작성해 보는 것입니다.

ES\_StableIF97 의 정확성은 IAPWS-IF97 에서 증기 성질 공식과 함께 제공하는 컴퓨터 프로그램 결과 확인용 자료와의 비교를 통해 확인할 수 있지만, 프로그램의 무결점과 기능성은 프로그램의 많은 사용을 통해 확인해야 하는데, 증기표와 증기 선도를 작성하는 것이 그러한 방법 가운데 하나 입니다. 특히, 증기 선도 작성은 증기표 프로그램의 무결점을 확인하는데 많은 도움이 됩니다.

둘째, 국내에도 자체 작성한 증기표가 있어야 한다는 취지에서 만들었습니다.

미국 기계학회(ASME)나 일본 기계학회(JSME)에서 발간한 증기표가 있듯이 우리나라에도 우리가 작성한 증기표가 있어야 하겠습니다.

물 및 증기 성질 값의 국제 표준 공식은 국제 기관인 IAPWS 에서 권장합니다. 하지만, 증기 성질 값과 관련하여 국내 산업 표준을 정하거나 혹은 국내 연구 결과의 독자적인 축적을 위해서는 국내에서 자체 제작된 증기표가 필요하다고 하겠습니다.

# 목차

---

<b>1. ENGSoft 산업용 증기표 소개</b> -----	1
1.1 ES_StableIF97 소프트웨어 -----	1
1.2 증기표 표시 내용 및 사용 공식 -----	2
1.3 영문 약자 -----	10
1.4 단위 환산 곱셈 계수 표	
<b>2. 국제 단위(SI) 증기표</b> -----	11
표 ESStb-S1, 포화 수 및 증기 성질 (온도 기준) -----	12
표 ESStb-S2, 포화 수 및 증기 성질 (압력 기준) -----	17
표 ESStb-S3, 과열 증기 및 압축 수 성질 -----	22
표 ESStb-S4, 고온 증기 성질 -----	92
표 ESStb-S5, 과열 및 준 안정(Metastable) 증기 성질 -----	105
표 ESStb-S6, 물 및 증기의 정압 비열, $C_p$ -----	108
표 ESStb-S7, 물 및 증기의 정적 비열, $C_v$ -----	109
표 ESStb-S8, 물 및 증기의 비열비, $C_p / C_v$ -----	110
표 ESStb-S9, 물 및 증기에서의 음속 -----	111
표 ESStb-S10, 물 및 증기의 절대 점도 -----	112
표 ESStb-S11, 물 및 증기의 동 점도 -----	113
표 ESStb-S12, 물 및 증기의 열 전도도 -----	114
표 ESStb-S13, 물 및 증기의 프란틀 수 (Prandtl Number) -----	115
표 ESStb-S14, 노즐 질식 유동 성질 (입구 전 압력 및 온도 기준) ---	116
표 ESStb-S15, 노즐 질식 유동 성질 (입구 전 포화 압력 및 건도 기준) -	136
<b>3. 미터(MKS) 단위 증기표</b> -----	146
표 ESStb-M1, 포화 수 및 증기 성질 (온도 기준) -----	147
표 ESStb-M2, 포화 수 및 증기 성질 (압력 기준) -----	152
표 ESStb-M3, 과열 증기 및 압축 수 성질 -----	157
표 ESStb-M4, 고온 증기 성질 -----	227

## 목차

---

표 ESStb-M5, 과열 및 준 안정(Metastable) 증기 성질 -----	240
표 ESStb-M6, 물 및 증기의 정압 비열, $C_p$ -----	243
표 ESStb-M7, 물 및 증기의 정적 비열, $C_v$ -----	244
표 ESStb-M8, 물 및 증기의 비열비, $C_p / C_v$ -----	245
표 ESStb-M9, 물 및 증기에서의 음속 -----	246
표 ESStb-M10, 물 및 증기의 절대 점도 -----	247
표 ESStb-M11, 물 및 증기의 동 점도 -----	248
표 ESStb-M12, 물 및 증기의 열 전도도 -----	249
표 ESStb-M13, 물 및 증기의 프란틀 수 (Prandtl Number) -----	250
표 ESStb-M14, 노즐 질식 유동 성질 (입구 전 압력 및 온도 기준) ---	251
표 ESStb-M15, 노즐 질식 유동 성질 (입구 전 포화 압력 및 건도 기준)-	271
<b>4. 증기 선도 (국제 단위 기준) -----</b>	<b>281</b>
그림 ESStb-S1, 엔탈피 - 엔트로피 선도 -----	282
그림 ESStb-S2, 온도 - 엔트로피 선도 -----	283
그림 ESStb-S3, 압력 - 엔탈피 선도 -----	284
그림 ESStb-S4, 노즐 질식 유량 선도 -----	285
그림 ESStb-S5, 노즐 질식 유량 선도(포화증기 상세 선도) -----	286
그림 ESStb-S6, 노즐 질식 압력 선도 -----	287
그림 ESStb-S7, 노즐 질식 엔탈피 선도 -----	288
그림 ESStb-S8, 노즐 질식 유속 선도 -----	289
그림 ESStb-S9, 노즐 질식 유속 선도(포화증기 상세 선도) -----	290
그림 ESStb-S10, 온도 - 절대 점도 선도 -----	291
그림 ESStb-S11, 온도 - 동 점도 선도 -----	292
그림 ESStb-S12, 온도 - 열 전도도 선도 -----	293
그림 ESStb-S13, 프란틀 수의 역수( $Pr^{-1}$ ) 선도 -----	294
그림 ESStb-S14, 온도 - 음속 선도 -----	295

## 목차

---

그림 ESStb-S15, 온도 - 비열비( $C_p/C_v$ ) 선도 -----	296
그림 ESStb-S16, 온도 - 정압비열의 역수( $C_p^{-1}$ ) 선도 -----	297
부록 : ES_StableIF97 에서 사용된 IAPWS-IF97 공식들 -----	298

## 1. ENGSoft 산업용 증기표 소개

### 1.1 ES\_StableIF97 소프트웨어

ENGSoft 에서는 IAPWS-IF97 의 국제 표준 공식을 사용하여 물과 증기 성질 계산 소프트웨어인 ES\_StableIF97 을 개발하였으며, ES\_StableIF97 소프트웨어 그룹의 하나로, 엑셀에서 사용할 수 있는 증기 성질 함수를 제공하는 ES\_StableIF97 AddIn 프로그램을 개발하였습니다. AddIn 프로그램이란 마이크로소프트사의 오피스 프로그램에서 사용할 수 있는 함수를 제 3 자가 개발하여 제공할 수 있도록 하는 프로그램입니다.

본 ENGSoft 증기표는 ES\_StableIF97 AddIn 프로그램을 사용하여 엑셀 프로그램으로 작성한 증기표입니다.

예를 들어, ENGSoft 증기표 가운데 "표 ESStb-S3, 과열 증기 및 압축 수 성질 - 54/70"에서 100 bar a 압력, 350 oC 온도의 엔탈피 2924.0 kJ/kg 은 ES\_StableIF97 AddIn 함수 가운데 하나인 "= ESStb\_HbyPT(100, 350, 2, 0, 1)" 함수를 해당 엑셀 셀에 입력하여 계산된 값으로, 해당 엑셀 셀의 숫자 표시를 소수점 둘째 자리에서 반올림하도록 하여 표시한 값입니다.

위에 예를 든 함수의 변수에서 첫 번째 항은 압력을(100), 두 번째 항은 온도를(350) 나타내며, 세 번째 항은 압력의 단위를(2 = bar a), 네 번째 항은 온도의 단위를(0 = oC), 다섯 번째 항은 엔탈피의 단위를(1 = kJ/kg) 나타냅니다. 이와 같이, ES\_StableIF97 AddIn 함수에는 단위 변환 기능이 있으며, ENGSoft 증기표의 MKS 단위 증기표는, SI 단위 증기표의 엑셀 파일을 복사한 후 단순히 단위 숫자 값만을 MKS 단위로 변경하여 만든 증기표입니다.

함수의 사용법에 대해서는 ES\_StableIF97 AddIn 프로그램의 도움말을 참조하시기 바랍니다.

증기표의 표시 형식은 값의 비교를 위하여 ASME 에서 발간한 증기표인 “ASME International Steam Tables for Industrial Use Based on the IAPWS Industrial Formulation 1997”을 따랐습니다.

## 1.2 증기표 표시 내용 및 사용 공식

IAPWS 와 IAPWS-IF97 에 대한 자세한 내용은 첨부된 "부록 : ES\_StableIF97 에서 사용된 IAPWS-IF97 공식들"을 참조 바랍니다.

특히 아래 설명 가운데, IAPWS-IF97 의 문서 약칭과 관련하여서는 첨부 부록의 A.2 항을 참조 바랍니다.

### 1.2.1 포화 수 및 증기 성질 표

표 ESStb-S1(국제 단위계) 및 M1(MKS 단위계)은 온도 기준의 포화 수 및 증기의 성질 표입니다. 온도에 따른 포화 압력과 포화 수 및 포화 증기 비체적, 엔탈피 그리고 엔트로피 값이 수록되어 있습니다. 아울러 포화 수와 포화 증기 성질 값의 차이도 표시되어 있습니다.

표 ESStb-S2 및 M2 는 압력 기준의 포화 수 및 증기의 성질 표이며, 표시 형식은 온도 기준의 표와 동일합니다.

이들 표는 IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 1 과 구역 2, 구역 3 그리고 구역 4 의 기본 공식을 사용하여 작성되었습니다.

포화 온도에서 포화 압력을 구할 때나, 역으로 포화 압력에서 포화 온도를 구할 때는 구역 4 의 기본 공식과 역 공식을 사용하여 계산하였습니다.

0 oC 에서 350 oC 까지 포화 수 성질은 과냉 액체 공식인 구역 1 의 기본 공식으로 계산하였으며, 0 oC 에서 350 oC 까지의 포화 증기 성질은 과열 증기 공식인 구역 2 의 기본 공식으로 계산하였습니다.

350 oC 에서 임계 온도까지는 구역 3 의 기본 공식으로 계산하였습니다. 그런데, 구역 3 의 공식은 온도와 밀도의 함수이므로, 주어진 온도와 압력에서 밀도 값을 시행 착오법에 의한 반복 계산 방식으로 계산한 후, 주어진 온도 값과 반복 계산에 의해 계산된 밀도 값을 가지고 나머지 성질 값들을 계산하였습니다.

### 1.2.2 과열 증기 및 압축 수 성질 표

표 ESStb-S3 및 표 ESStb-M3 는 과열 증기 및 압축 수 성질 표로서, 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 비체적, 엔탈피, 엔트로피 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 압력 값 옆에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기의 비체적, 엔탈피, 엔트로피 값들이 압력 값

## ENGSoft 산업용 증기표

---

표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

이들 표는 IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 1 과 구역 2, 구역 3 그리고 구역 4 의 기본 공식을 사용하여 작성되었습니다. 구역 3 에서는 포화 수 및 증기 성질 표와 마찬가지로 시행 착오법에 의한 반복 계산법을 사용하였습니다.

### 1.2.3. 고온 증기 성질 표

표 ESStb-S4 및 표 ESStb-M4 는 고온 증기 성질 표로서, 압력 별로 500 oC 에서 2000 oC 온도까지의 비체적, 엔탈피, 엔트로피 값들이 수록되어 있습니다.

이들 표는 IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 2 와 구역 3, 그리고 구역 5 의 기본 공식을 사용하여 작성되었습니다. 구역 3 에서는 시행 착오법에 의한 반복 계산법을 사용하였습니다.

### 1.2.4 과열 및 준 안정(Metastable) 증기 성질 표

표 ESStb-S5 및 표 ESStb-M5 는 과열 및 준 안정 증기 성질 표로서, 100 bar a 압력까지 압력 별로 과열 증기 영역 온도에서 5% 안정 상태 습도 범위를 포함하는 온도까지의 비체적, 엔탈피, 엔트로피 값들이 수록되어 있습니다.

포화 온도까지의 과열 증기 성질 값들은 구역 2 의 기본 공식을 사용하여 작성되었으며, 포화 온도 이하의 준 안정 증기 성질 값들은 IAPWS-IF97 에서 별도로 제공하는, 구역 2 에서의 100 bar a 압력 이하의 준 안정 증기 공식을 사용하여 작성되었습니다.

구역 2 의 100 bar a 압력 이하의 준 안정 증기 공식은 엔탈피 기준으로 5% 안정 상태 습도 범위까지만 유효한 것으로 IAPWS-IF97 이 규정하고 있으므로, 5% 안정 상태까지만 표시하였습니다.

준 안정 상태 증기 성질 값들은 증기 터빈 최종 단 노즐 해석 시에 주로 사용되는데, 이에 대한 좀더 자세한 내용은 "부록 : ES\_StableIF97 에서 사용된 IAPWS-IF97 공식들"을 참조 바랍니다.

### 1.2.5 정압 비열, 정적 비열, 비열비 표

표 ESStb-S6, S7, S8 및 표 ESStb-M6, M7, M8 는 각각 물 및 증기의 정압 비열, 정적 비열, 비열비 표로서, 1000 bar a 압력까지 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 표 아래 쪽에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기에 대한 값들이 압력 값 표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

정압 비열과 정적 비열 표는 IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 1 과 구역 2, 구역 3 그리고 구역 4 의 기본 공식을 사용하여 작성되었습니다. 구역 3 에서는 시행 착오법에 의한 반복 계산법을 사용하였습니다.

비열비 표는 단순히 정압 비열을 정적 비열로 나눈 값입니다. 이렇게 계산된 비열비 값은, 이상 기체의 음속(Speed of Sound) 계산 공식을 이용하여, 물 및 증기의 음속으로부터 계산한 값과 다르다는 점을 유의 바랍니다.

### 1.2.6 물과 증기에서의 음속 표

표 ESStb-S9 및 표 ESStb-M9 는 물 및 증기에서의 음속 표로서, 1000 bar a 압력까지 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 표 아래 쪽에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기에 대한 값들이 압력 값 표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

음속 표는 IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 1 과 구역 2, 구역 3 그리고 구역 4 의 기본 공식을 사용하여 작성되었습니다. 구역 3 에서는 시행 착오법에 의한 반복 계산법을 사용하였습니다.

### 1.2.7 물과 증기의 절대 점도 표

표 ESStb-S10 및 표 ESStb-M10 는 물 및 증기의 절대 점도 표로서, 1000 bar a 압력까지 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 표 아래 쪽에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기에 대한 값들이 압력 값 표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

절대 점도 표는 IAPWS-IF97-Vis 공식을 사용하여 작성되었습니다. IAPWS-IF97-Vis 공식은 온도와 밀도의 함수이므로, 밀도 즉 비체적 계산을 위하여, IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 1 과 구역 2, 구역 3 그리고 구역 4 의 기본 공식을 사용하였으며, 구역 3 에서는 시행 착오법에 의한 반복 계산법을 사용하였습니다.

### 1.2.8 물과 증기의 동 점도 표

표 ESStb-S11 및 표 ESStb-M11 은 물 및 증기의 동 점도 표로서, 1000 bar a 압력까지 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 표 아래 쪽에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기에 대한 값들이 압력 값 표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

동 점도는 절대 점도에 비체적을 곱한 값이므로, 절대 점도와 동일한 IAPWS-IF97 공식을 사용하였습니다.

### 1.2.9 물과 증기의 열 전도도 표

표 ESStb-S12 및 표 ESStb-M12 는 물 및 증기의 열 전도도 표로서, 1000 bar a 압력까지 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 표 아래 쪽에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기에 대한 값들이 압력 값 표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

열 전도도 표는 IAPWS-IF97-ThCond 공식을 사용하여 작성되었습니다. IAPWS-IF97-ThCond 공식은 온도와 밀도의 함수이므로, 밀도 즉 비체적 계산을 위하여, IAPWS-IF97 공식 가운데 구역 1 과 구역 2, 구역 3 그리고 구역 4 의 기본 공식을 사용하였으며, 구역 3 에서는 시행 착오법에 의한 반복 계산법을 사용하였습니다.

수록된 표의 온도 범위는 IAPWS-IF97-ThCond 공식의 유효 범위를 벗어나는 구간이 있습니다. 하지만, 증기표 표시 온도 구간의 일관성을 유지하기 위하여 유효 범위를 벗어나는 구간도 함께 표시하였습니다.

IAPWS-IF97-ThCond 공식의 유효 범위는 아래와 같습니다.

**IAPWS endorses the validity of Eq. (8) for the thermal conductivity in the following range of pressures  $p$  and temperatures  $t$**

$$p \leq 100 \text{ MPa} \quad \text{for} \quad 0 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p < 70 \text{ MPa} \quad \text{for} \quad 500 \text{ }^\circ\text{C} < t \leq 650 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p \leq 40 \text{ MPa} \quad \text{for} \quad 650 \text{ }^\circ\text{C} < t \leq 800 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7)$$

그러므로, 수록된 열 전도도 가운데 400 bar a 압력 이상의 일부 고온부의 값들은 IAPWS 에서 규정한 유효 범위를 벗어난다는 점을 유의 바랍니다.

### 1.2.10 물과 증기의 프란틀 수 (Prandtl Number)

표 ESStb-S13 및 표 ESStb-M13 은 물 및 증기의 프란틀 수 표로서, 1000 bar a 압력까지 압력 별로 0 oC 에서 800 oC 온도까지의 값들이 수록되어 있습니다.

임계 압력 이하의 포화 상태가 존재하는 압력에서는 표 아래 쪽에 포화 온도가 표시되어 있고, 포화 수 및 포화 증기에 대한 값들이 압력 값 표시 행 바로 밑에 표시되어 있습니다. 그리고 포화 온도가 포함되어 있는 온도 행은 실선으로 표시하여, 압축 수와 과열 증기 구간을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였습니다.

프란틀 수는 정압 비열 곱하기 절대 점도 나누기 열 전도도의 무차원 수이므로, 이들 성질 값들을 구하는 공식이 그대로 사용되었습니다.

## 1.2.11 노즐(Nozzle) 질식(Choking) 유동 상태

표 ESStb-S14 및 표 ESStb-M-14 는 노즐에서 등엔트로피 과정으로 팽창하는 과열 증기의 질식 유동 상태 성질 표로서, 노즐 입구 과열 증기의 전(全, Stagnation) 압력 및 전 온도 기준으로 노즐 목(Throat)에서의 단위 면적당 질량 유량(WperA), 질식 압력(Pc), 질식 엔탈피(Hc)와 질식 유속(Velc) 값들이 수록되어 있습니다.

표 ESStb-S15 및 표 ESStb-M-15 는 노즐 입구 포화 증기의 전(全, Stagnation) 포화 압력 및 건도(Dryness) 기준의 표입니다.

전(全, Stagnation) 압력 혹은 전(全, Stagnation) 온도란 유속이 0 인 상태의 압력 및 온도를 말합니다.

표 14 에서 표 상부에 표시된 압력이 노즐 입구에서의 전 압력이며, 표 좌, 우측 끝에 표시된 온도가 노즐 입구에서의 전 온도를 나타냅니다. 표 14 내부에는 노즐 목에서의 단위 면적당 질식 유량, 질식 압력, 질식 엔탈피 그리고 질식 유속 값들이 표시되어 있습니다.

표 15 에서 표 상부에 표시된 압력이 노즐 입구에서의 전 압력이며, 표 좌, 우측 끝에 표시된 건도(혹은 증기 질)가 노즐 입구 건도를 나타냅니다. 표 15 내부에 표시된 내용은 표 14 와 같습니다.

### 노즐에서의 질식 유동

노즐을 통해 흐르는 압축성 유체(Compressible Fluid)의 질량 유량은 노즐 출구 압력을 낮추면 증가합니다. 하지만 노즐 출구 압력이 어느 일정 압력에 도달하면 그 이하로 출구 압력을 낮추어도 노즐을 통과하는 유체의 질량 유량은 증가하지 않고 일정한 유량을 유지합니다.

그 어느 일정 압력까지는 압축성 유체의 유속 증가율이 비체적 증가율보다 커서 질량 유량이 증가하지만, 그 이하의 압력에서는 비체적의 증가율이 유속의 증가율보다 커져서 출구 압력을 낮추어도 질량 유량이 더 이상은 증가하지 않습니다. 이렇게 노즐 출구 압력을 더 이상 낮추어도 질량 유량이 증가하지 않는 상태를 질식(Choking) 유동 상태라고 합니다.

질식 유동 상태를 임계(Critical) 유동 상태라고 칭하기도 하여, 질식 압력을 임계 압력(Critical Pressure)라고 칭하기도 하는데, 이를 물의 임계점(Critical Point)과 혼동하지 않도록 유의해야 합니다.

이러한 질식 유동 상태는 압축성 유체일 경우에만 존재하며 비체적이 일정한 비압축성 유체의 경우에는 어떠한 경우에도 비체적 증가율이 유속 증가율보다 커질 수가 없어

## ENGSoft 산업용 증기표

---

질식 유동이 존재하지 않고, 노즐 출구 압력을 낮추면 낮출수록 질량 유량은 계속 증가합니다.

### 노즐에서의 물 및 증기 유동

증기표에 표시되는 압력 및 온도 범위에는 물과 증기가 함께 존재합니다. 즉 압축성 상태와 비압축성 상태가 함께 존재하므로, 비압축성인 압축 수 상태에서는 노즐 질식 유동 상태를 표시하는 것이 무의미합니다.

이러한 이유로 본 증기표에서는 노즐 입구 상태가 압축 수인 경우 혹은 팽창 과정 중에 압축 수 상태를 거치는 경우는 노즐 질식 유동 상태 값을 표시하지 않았습니다.

즉, 표 14 에서 노즐 입구에서의 전 압력이 임계 압력(= 22.064 Mpa) 이하이면서 전 온도가 포화 온도 이하인 경우, 즉 압축 수인 상태는 표시하지 않았습니다. 그리고 노즐 입구에서의 전 압력이 임계 압력 이상이면서 엔트로피가 임계 엔트로피(= 4.412 kJ/kg/K) 보다 작아, 팽창 과정에 압축 수 영역을 통과하는 상태도 표시하지 않았습니다.

표 15 에서는 노즐 입구 건도가 0%인 경우, 즉 포화 수 상태는 압축 수로 보아 표시하지 않았으며, 건도가 0%로 접근할 때 질식 유동 상태의 변화 과정을 보여주기 위하여 5% 이하는 1% 단위로 표시 하였습니다.

본 증기표를 만든 프로그램인 ES\_StableIF97 AddIn 프로그램도 이와 같은 비압축성 상태인 경우에는 오류 메시지를 반환합니다.

한편, 표 15 는 습증기가 팽창 과정 중에 평형(Equilibrium) 상태를 유지한다는 가정하에 작성된 표입니다. 습증기의 건도가 낮아질수록 포화 증기와 포화 수가 분리되어 흐를 가능성이 커져서 평형 상태로 가정하기에 무리가 있으므로, 제시된 표에서 노즐 입구 건도가 낮은 상태의 값들은 참고 자료로서만 사용하시기 바랍니다.

### 질식 유동 해석 방법

표 14 와 표 15 는 앞에 설명된 질식 유동의 기본 정의에 따라, 노즐 목에서의 단위 면적당 유량이 최대가 되는 상태를 시행 착오법에 의한 반복 계산으로 찾은 결과 값들입니다.

노즐에서 등엔트로피 과정으로 팽창하는 이상 기체의 질식 유속은 음속과 같습니다. 그러므로, 이상 기체에 가까운 과열 증기의 경우, 단위 면적당 질량 유량이 최대가 되는 상태를 찾는 대신에, 노즐 전후의 엔탈피 낙차에 상당하는 유속이 음속과 동일해지는 상태를 찾는 방법도 있으나, 이 방법은 습증기인 경우에는 유효하지 않아 전 구역에서 사용할 수 없는 단점이 있습니다.

이러한 단점을 회피하기 위하여, ES\_StableIF97 AddIn 프로그램은 단위 면적당 질량 유량이 최대가 되는 상태를 찾는 방법을 택하였으며, 이 경우 계산되는 유속을 음속과

## ENGSoft 산업용 증기표

---

정확히 일치시키려면 많은 계산 시간이 필요합니다. ES\_StableIF97 AddIn 프로그램은 프로그램의 계산 속도를 고려하여 질식 유속이 음속의 0.5 m/s 범위 내에서 수렴하면 계산 값을 출력하도록 하였으며, 표 14 에 표시된 값들도 이러한 이유로 음속과 정확히 같지는 않으며, 0.5 m/s 범위 내에서 일치합니다.

한편, 질식 상태가 습증기인 경우의 질식 유속은 음속과 무관한데, 질식 상태가 100% 건도에 매우 근접한 과열 증기인 경우에도 질식 유속이 음속에서 많이 벗어나는 것으로 증기표 작성 과정에서 확인되었습니다. 예를 들어, 표 ESStb-S14(13/20)에서 노즐 입구 전 압력이 50 bar a, 그리고 전 온도가 300 oC 인 경우 질식 상태는 100% 건도의 포화 증기에 근접한 과열 증기입니다. 즉, 질식 엔탈피(Hc)가 2803.043 kJ/kg 으로, 질식 압력(Pc) 28.125 bar a 에서의 100% 건도 포화 증기의 엔탈피 값인 2803.039 kJ/kg 보다 크므로, 이는 명확히 과열 증기입니다. 하지만, 질식 유속(Velc)은 495.1 m/s 로 음속 504.4 m/s 에서 상당히 벗어나 있는 것을 알 수 있습니다.

## 1.3 영문 약자

증기표에서 사용된 영문 약자에 대한 설명은 다음과 같습니다.

v	: 비체적
h	: 엔탈피
s	: 엔트로피
vl	: 포화 수 비체적
dv	: 비체적 차이
vv	: 포화 증기 비체적
hl	: 포화 수 엔탈피
dh	: 엔탈피 차이
hv	: 포화 증기 엔탈피
sl	: 포화 수 엔트로피
ds	: 엔트로피 차이
sv	: 포화 증기 엔트로피
tsat	: 포화 온도
Sat. Liq.	: 포화 수
Sat. Vap.	: 포화 증기
Tct	: 임계 온도
Pct	: 임계 압력
Pt	: 삼중점 압력
WperA	: 노즐 목 단위 면적당 질량 유량
Pc	: 노즐 질식 압력
Hc	: 노즐 질식 엔탈피
Velc	: 노즐 질식 유속

### 1.4 단위 환산 곱셈 계수 표

다음의 단위 환산 곱셈 계수 표는 ES\_StableIF97AddIn 프로그램에서 제공되는 단위 변환 함수를 사용하여 작성된 표입니다.

표 1.4 - 1 압력 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위									
	kg/cm2 a	bar a	kPa a	psi a	mmHg a(0 oC)	inHg a(0 oC)	mH2O a(20 oC)	ftH2O a(20 oC)			
kg/cm2 a	1	1.019716	1.019716E-02	7.030696E-02	1.359509E-03	3.453153E-02	9.982783E-02	3.042752E-02			
bar a	0.980665	1	0.01	6.894757E-02	1.333223E-03	3.386386E-02	9.789766E-02	2.983921E-02			
kPa a	98.0665	100	1	6.894757	1.333223E-01	3.386385875	9.789766	2.983921			
psi a	14.22334	14.50377	1.450377E-01	1	1.933676E-02	4.911537E-01	1.419885	4.327811E-01			
mmHg a(0 oC)	735.5597	750.0622	7.500622	51.71497	1	25.4	73.42933	22.38126			
inHg a(0 oC)	28.95904	29.53001	2.953001E-01	2.036022	3.937008E-02	1	2.890919	8.811520E-01			
mH2O a(20 oC)	10.01725	10.21475	1.021475E-01	7.042822E-01	1.361854E-02	3.459108E-01	1	0.3048			
ftH2O a(20 oC)	32.86498	33.51296	3.351296E-01	2.310637	4.468024E-02	1.134878	3.280840	1			

주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수

주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위

주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위

표 1.4 - 2 비체적 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위						
		m3/kg	ft3/lb	cm3/g	in3/lb	US gal/lb	UK gal/lb	
m3/kg	1	6.242796E-02	0.001	3.612729E-05	8.345404E-03	1.002283E-02		
ft3/lb	16.01846	1	1.601846E-02	5.787037E-04	1.336806E-01	1.605503E-01		
cm3/g	1000	62.42796	1	3.612729E-02	8.345404	10.02283		
in3/lb	27679.90	1728	27.67990	1	231	277.431		
US gal/lb	119.8264	7.480519	1.198264E-01	4.329004E-03	1	1.201		
UK gal/lb	99.77221	6.228576	9.977221E-02	3.604500E-03	8.326395E-01	1		
" 로 "								
단 위								

주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수

주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위

주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위

표 1.4 - 3 엔탈피 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위				
		kcal/kg	kJ/kg	Btu/lb	kgf-m/kg	ft-lbf/lb
kcal/kg	1	2.388459E-01	5.555556E-01	2.342278E-03	7.139264E-04	
kJ/kg	4.1868	1	2.326	9.806650E-03	2.989067E-03	
Btu/lb	1.8	4.299226E-01	1	4.216101E-03	1.285067E-03	
kgf-m/kg	426.9348	101.9716	237.1860	1	0.3048	
ft-lbf/lb	1400.705	334.5526	778.1693	3.280840	1	

주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수

주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위

주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위

표 1.4 - 4 엔트로피 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위				
		kcal/kg-K	kJ/kg-K	Btu/lb-oR	kgf-m/kg-K	ft-lbf/lb-oR
kcal/kg-K	1	2.388459E-01	1	4.1868	2.342278E-03	1.285067E-03
kJ/kg-K	4.1868	1	4.1868	9.806650E-03	5.380320E-03	
Btu/lb-oR	1	2.388459E-01	1	2.342278E-03	1.285067E-03	
kgf-m/kg-K	426.9348	101.9716	426.9348	1	5.486400E-01	
ft-lbf/lb-oR	778.1693	185.8625	778.1693	1.822689	1	

주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수

주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위

주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위

표 1.4 - 5 절대 점도 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위					
	cP	Pa-s	N-s/m <sup>2</sup>	kg/m-s	lb/ft-s	lbf-s/ft <sup>2</sup>	
	cP	1	1000	1000	1488.164	47880.26	
	Pa-s	0.001	1	1	1.488164	47.88026	
	N-s/m <sup>2</sup>	0.001	1	1	1.488164	47.88026	
	kg/m-s	0.001	1	1	1.488164	47.88026	
	lb/ft-s	6.719690E-04	6.719690E-01	6.719690E-01	1	32.17405	
	lbf-s/ft <sup>2</sup>	2.088543E-05	2.088543E-02	2.088543E-02	3.108095E-02	1	
" 로 "	단 위						

주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수

주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위

주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위

표 1.4 - 6 동 점도 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위						
	cSt	m2/s	ft2/s	SSU(100 oF)	SSU(210 oF)	Redwood(30 oC)		
cSt	1	1000000	92903.04	5.623348E-02	5.584037E-02	6.451613E-02		
m2/s	0.001	1	1	1	1.488164	47.88026		
ft2/s	0.001	1	1	1	1.488164	47.88026		
SSU(100 oF)	0.001	1	1	1	1.488164	47.88026		
SSU(210 oF)	6.719690E-04	6.719690E-01	6.719690E-01	6.719690E-01	1	32.17405		
Redwood(30 oC)	2.088543E-05	2.088543E-02	2.088543E-02	2.088543E-02	3.108095E-02	1		

" 로 " 단 위

- 주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수
- 주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위
- 주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위

표 1.4 - 7 열 전도도 단위 환산 곱셈 계수

		"에서" 단위									
		kcal/hr-m-oC	Btu/hr-ft-oF	W/m-K	kgf/hr-oC	cal/s-cm-oC	W/ft-F	lbf/hr-oF			
kcal/hr-m-oC	1	1.488164	8.598452E-01	2.342278E-03	360	5.077826	1.912391E-03				
Btu/hr-ft-oF	1	1.730735	5.777893E-01	1.573938E-03	241.9088	3.412142	1.285067E-03				
W/m-K	1.163	1.730735	1	2.724069E-03	418.68	5.905512	2.224111E-03				
kgf/hr-oC	426.9348	635.3490	367.0978	1	153696.5	2167.901	8.164663E-01				
cal/s-cm-oC	2.777778E-03	4.133789E-03	2.388459E-03	6.506328E-06	1	1.4105073E-02	5.312197E-06				
W/ft-F	1.969347E-01	2.930711E-01	1.693333E-01	4.612758E-04	70.89648	1	3.766161E-04				
lbf/hr-oF	522.9056	778.1693	449.6179	1.224790	188246.0	2655.224	1				

" 로 " 단 위

주1) "로" 단위 값 = "에서" 단위 값 x 환산 곱셈 계수

주2) "에서" 단위 : 환산하려고 하는 값의 단위

주3) "로" 단위 : 환산해서 얻고자 하는 값의 단위