

## 국내 산업폐열 현황에 대한 조사연구

박 일 환<sup>†</sup>, 박 준 택<sup>\*</sup>, 유 성 연<sup>\*\*</sup>

한국기술교육대학교 기계공학부, <sup>\*</sup>한국에너지기술연구원 미활용에너지팀, <sup>\*\*</sup>충남대학교 기계설계공학과

### An Investigation Study on Fact of Waste Heat of Domestic Industry

Il-Hwan Park<sup>†</sup>, Jun-Taek Park<sup>\*</sup>, Seong-Yeon Yoo<sup>\*\*</sup>

Dept. of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education, Chonan 330-708, Korea

<sup>\*</sup>Unused Energy Research Team, KIER, Daejeon 305-343, Korea

<sup>\*\*</sup>Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received August 5, 2002; revision received August 26, 2002)

**ABSTRACT:** Waste heat exhausted from seven types of the domestic industry was surveyed, which include food, fibre, paper & wood, chemical, ceramics, metalworking and others. The databases of waste heat for each industry were made by using ACCESS software of Microsoft, and data were analyzed to get correlation between waste heat and purchase energy. The volume of usable waste heat is estimated to be 9,169,000 TOE in the year of 2000, when the minimum available temperature is set as 100°C for waste gas, 30°C for hot water and 100°C for steam considering the condition of waste heat exhausting facilities and surroundings. This volume of waste heat is approximately 11.9 percent of the purchase energy of the domestic industry.

**Key words:** Waste heat(폐열), Heat recovery(열회수), Correlation coefficient(상관계수), Energy conservation(에너지 보존), Waste heat database(폐열 데이터베이스)

#### 1. 서 론

국내 총 에너지소비량의 약 45%를 소비하고 있는 산업부문 소비 에너지 중에서 얼마의 에너지가 제품생산에 사용되고, 나머지는 1차 산업폐열로서 배출된다. 산업폐열 중 얼마만큼의 에너지가 어떤 형태로 회수 이용되는가를 파악하는 것은 산업 에너지정책 수립 및 산업폐열 회수이용 기술개발을 위해 중요하다. 따라서 산업폐열에 대한 체계적 조사와 조사된 자료의 데이터베이스화가 필요하다. 현재 우리나라의 각 산업별

에너지 소비구조와 산업폐열 현황에 대한 현실성 있는 자료가 부족한 형편이다.

폐열조사의 방법으로는 어떤 업종의 대표적인 공정을 해석하여 그 공정에서 나온 폐열을 구해 그 업종 전체의 폐열을 추정하는 방법이 있다. 이 방법은 특정 공정에 대해서는 정밀도가 높은 폐열 현황을 추정할 수 있지만 한 업종이라도 여러 가지 공정이 있으므로 동일 업종의 각 공장에 대한 폐열을 추정하는 것은 대단히 어렵다.

또 다른 방법으로는 공장폐열의 부존실태를 조사하여 이 폐열이 투입에너지와 어떤 관계가 있는지 해석하고 이 해석결과를 이용하여 다른 불특정 공장의 폐열을 추정하는 방법이다. 이 방법은 한 공장의 폐열을 추정하는 것은 정밀도 측면에서 한계가 있지만, 전체의 폐열에 대해 실적이 근거한 추정치를 얻을 수 있다.

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-560-1121; fax: +82-41-560-1253

E-mail address: hwan@kut.ac.kr

국내 산업폐열에 관련한 조사와 연구는 1970년대 오일쇼크 이후 산발적으로 이루어져 왔으며,<sup>(1,2,3)</sup> 정부는 에너지 소비진단사업 등을 통해 계속적으로 조사하여 왔으나, 산업폐열 현황에 대한 종합적인 연구보고는 찾아볼 수 없다.

일본의 경우는 성에너지 센터(省エネルギーセンター) 등에서 체계적인 조사가 이루어져 왔으며,<sup>(4,5)</sup> 최근 일본 NEDO의 광역에너지 이용기술 네트워크시스템 개발을 위한 에너지시스템 설계기술 연구의 일환으로 실시한 공장군 에너지 시스템에 관한 조사연구가 있다.<sup>(6)</sup>

본 연구에서는 국내 산업 7개 업종에 대한 폐열 현황을 설문 및 자료조사를 통해 데이터베이스화하고 정량적 데이터 분석기법을 도입, 전체 산업의 폐열량을 추산하고 분석하였다.

## 2. 산업폐열의 조사방법 및 분석방법

### 2.1 폐열량의 조사방법

폐열의 실태는 에너지 소비설비의 열효율 향상과 폐열회수 이용장치의 도입확대로 매년 변한다. 정부는 에너지 절약대책의 일환으로 에너지 다소비 업체를 지정하고 이들 업체에 대해 에너지 절약기술보급과 에너지 소비진단 등의 방법으로 지도하고 있다. 이러한 에너지 소비진단 결과와 함께 한정되기는 하지만 설문, 전화 및 방문 조사에 의한 폐열현황 조사결과는 나름대로의 신뢰성을 확보할 수 있다.

본 조사연구는 연료 및 열과 전력사용 합계가 2000 TOE 이상 되는 전국 1,446개 에너지 사용실적 신고업체를 대상으로 실시하였다. 조사는 식품, 섬유, 제지·목재, 화공, 요업, 금속 및 기타의 7개 업종으로 구분하여 실시하였다. 설문서는 공장의 개요, 폐열 현황으로 구분되고, 폐열 현황에는 폐열 발생설비, 폐열 발생현황, 폐열 회수현황, 최종 배출현황 등의 항목으로 구성되었다.

조사대상 폐열로는 배가스(연소가스, 온풍 등) 100℃ 이상, 배운수 30℃ 이상, 배증기 100℃ 이상, 그리고 기타 폐열로 저칼로리 가스(부생가스 등)는 500 kcal/m<sup>3</sup> 이상의 잠열이 있는 경우, 고온 고체는 200℃ 이상의 폐열을 대상으로 하였다.

조사 대상업체 1,446개 중 474개 업체가 조사에 응하므로 32.8%의 응답률을 보였다.

### 2.2 산업폐열의 분석방법

조사에 응한 공장의 구입 에너지는 각 회사가 에너지관리공단에 신고한 자료를 활용하여, 조사된 폐열량과 구입 에너지의 상관관계를 분석하였다. 상관해석을 위해서는 정적 데이터의 처리기법을 이용하였다.<sup>(7)</sup> 두 종류의 변수 사이에 대응을 나타내는 데이터가 주어지면 양자의 관계를 직선적인 관계로서 회귀직선을 정할 수 있다. 이 회귀직선이 실제 데이터를 정확히 설명하는지 여부는 데이터에 따라 다르나, 이 직선이 어느 정도 대표하는지를 나타내는 정량적 지표로서 상관계수(correlation coefficient)  $\rho$  을 도입하였다.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}}$$

여기서,  $x$ =구입 에너지,  $y$ =폐열량,  $m$ =데이터 수,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ =각 데이터의 산술평균을 의미한다. 상관계수  $|\rho| \leq 1$ 의 성질을 가지며 이것은 공학적으로 정(+) 혹은 부(-)의 경사를 갖는 직선 위에 분포하고 있는 경우에 대응한다. 일반적으로  $\rho$ 의 절대값이 1에 가까울수록 두 변수 사이의 대응관계가 직선으로 대표된다는 것을 의미하며,  $\rho$ 가 0에 가까울수록 두 변수 사이의 대응관계를 직선으로 나타낸다고 할 수 없으며 데이터의 중심점이 주위의 방사상으로 균일하게 분포된 것을 의미한다. 본 해석에서는 상관계수의 제곱을 상관관계의 유무를 나타내는 결정계수로 정의하고 이 값이 0.4(상관계수  $\pm 0.64$ ) 이상이면 상관관계가 깊은 것으로 판단하였다.

## 3. 산업폐열의 현황

### 3.1 폐열량과 구입 에너지의 상관관계

Table 1에 업종별로 상관관계를 표시하였다. 표에서 각 산업별로 폐열량과 구입 에너지량 사이에는 상관관계가 깊은 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 1은 금속업에 있어서 폐열량과 구입 에너지량 사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 이외 다른 업종도 유사한 상관관계를 나타내고 있다. 이

Table 1 Correlation decision coefficient

Type of industry	$\rho^2$
Food industry	0.673
Fibre industry	0.693
Paper & wood industry	0.479
Chemical industry	0.612
Metalworking industry	0.794
Ceramic industry	0.579
Other industry	0.664

Table 2 Constant of correlation formula

Type of industry	$a$	$b$
Food	0.09014	6.189
Fibre	0.10191	275.671
Paper & wood	0.0596	138.329
Chemical	0.11242	29.671
Metalworking	0.10673	66.4169
Ceramic	0.01541	1.96437
Others	0.11922	-472.987

러한 상관관계를 전체적으로 관찰하여 데이터를 대표하는 관계를 함수로 표시하는 것이 편리하므로 여기에서는 데이터 정리에 잘 이용되고 있는 직선관계를 가정하여 선형화( $y = ax + b$ )하였다. 업종별 상관관계식을 Fig. 2에 나타내었으며, 상관식의 상수 값을 Table 2에 표시하였다. 업종별로 공정의 열효율에 따라 상관관계가 다르게 나타나게 되며, 이를 이용하면 동일 업종의 전국 폐열량을 환산할 수 있다. 업종별 전국 폐열량을

환산하는 식을 다음과 같이 정의한다.

$$Y = \sum_{i=1}^n (aX_i + b)$$

여기서,  $n$ 은 전국공장의 시설수,  $X_i$ 는 공장의 구입 에너지량,  $a$ 는 업종별 상관식 기울기이다. 이 식은 업종별 조사 데이터로부터 작성된 것으로 전국 공장군과 거의 같은 모집단을 형성하는 것으로 가정하였다. 즉, 설문과 동등의 큰 공장군이 접하는 소비에너지가 대부분을 접하기 때문에 폐열발생 대상공장은 동일 모집단으로서 이 식을 사용 추정할 수 있다고 가정한 것이다. 이때 사용된 전국공장 수  $n$ 는 다음 식으로 구하였다.

$$n = \frac{\text{전국 구입 에너지}}{\text{설문응답회사의 구입 에너지}} \times m$$

( $m$ 은 설문에 응당한 회사의 수)

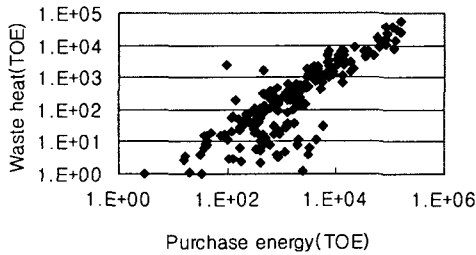


Fig. 1 Variation of waste heat with purchase energy in metalworking industry.

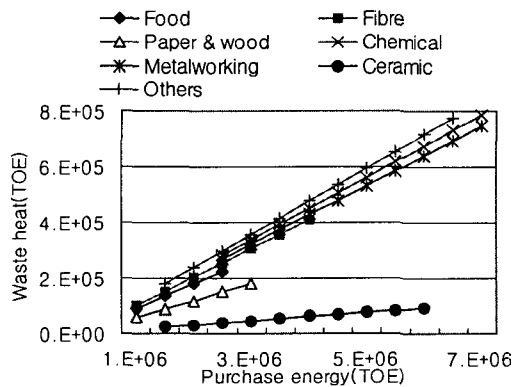


Fig. 2 Correlation of waste heat with purchase energy.

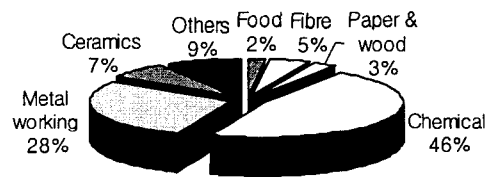


Fig. 3 Constitution of purchase energy classified by industry.

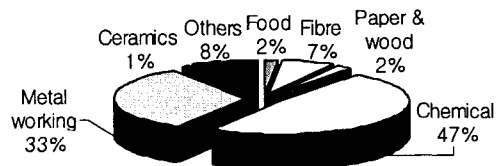


Fig. 4 Constitution of estimated waste heat classified by industry.

전체 업종의 구입 에너지량 77,790,000 TOE (2000년 기준 에너지 관리공단 데이터베이스)를 이용, 위와 같은 방법으로 계산된 전 업종의 전국 폐열 추정량은 9,169,000 TOE이었다.

Fig. 3은 업종별 구입 에너지량의 비를 나타낸 것이며, Fig. 4는 업종별 전국 추정 폐열량을 전체 폐열량에 대한 비율로 나타낸 것이다. 화공 및 금속 업종의 비중이 다른 업종에 비해 커 중공업 중심의 산업구조를 잘 나타내고 있다.

**3.2 업종별 폐열 형태별 현황과 특징**

업종별 폐열의 상황은 차이가 나지만 업종에 따라 공정의 열역학적인 열효율의 한계가 다르고, 최고 열효율에 가까이 가는 기술개발의 난이도도 다르며 또한 기술개발의 경제적 효과도 업종에 따라 차이가 있다.

각 업종별, 폐열 형태별 폐열량비의 분석결과를 Table 3에 나타내었다.

식품업의 폐열 형태별 폐열량비는 표에서 배증기가 다수를 차지하며 이것은 반응기, 숙성기 등 식품공정에서 사용된 후 배출되는 배증기와 보일러에서 생산된 증기 중에 잔여증기의 배출로 판단된다.

섬유업 폐열은 각 형태의 폐열이 균일하게 발생하며 배가스는 보일러와 공기-가스 가열기 등에서 배출되는 것으로 열교환기를 이용한 공기 예열 혹은 급수가열 등의 회수이용기술이 적용되어 왔다. 배가스는 열용량이 작고, 불순물이 혼재하는 경우가 많아 열교환기에 의한 열회수이용이 효율적이라고 할 수 없다.

제지·목재업의 배출 폐열량은 배증기 및 배온수가 많으며, 제지·목재업의 제조공정은 다량의

증기가 사용되는 특성상 공정에서 배출되는 것이 많다. 배온수는 대부분 30℃에서 60℃ 사이의 저온수로 열펌프나 열교환기 등을 사용한 폐열 회수이용에서 경제성을 확보하기가 쉽지 않다. 또한 배온수는 슬러지를 포함하는 경우가 많아 기술적 측면에서도 어려움이 있다.

화학업 폐열의 형태는 배가스로 배출되는 양이 많으며 일부가 배온수로 배출되고 있다. 배가스는 가열로, 보일러, 로터리 킬른, 소각로, 가스터빈 발전기 등 다양한 설비에서 발생하는 것들이다. 화학반응장치 열원으로서 고온증기가 많이 이용되고 있으며, 증기가 반응원료로 이용되기 때문에 배온수가 상당량 배출된다. 한편 석유업의 특징은 구입원료의 일부가 공정연료로 사용되어 폐열로 배출된다. 따라서 폐열량은 공장의 원료 처리량과 상관관계가 있다. 연소열은 증기의 형태로 변하여 각 공정의 에너지원으로 사용된다. 이때 사용된 증기의 일부가 배온수로 배출되지만 대부분 재사용되며 폐열의 대부분은 연소 배가스가 갖고 나가는 배열이다.

요업에서의 폐열 형태도 배가스가 대부분이며, 약간의 배온수가 배출된다. 배가스는 열풍로, 로터리 킬른, 터널형 가열로, 소성로, 경화로 열풍로 등 설비의 배가스이다. 요업에서 시멘트 제조 과정에서 발생하는 폐열이 회수대상이 되며, 최근 많은 시멘트 업체에 폐열 회수기술이 보급되어 고온 폐열은 상당량 줄어들었으며, 환경처리 장치의 도입과 부식방지를 위해 유지되는 일정온도의 배가스가 폐열원의 대부분이다.

금속업에서 배출되는 폐열의 형태도 그 양으로 표시하면 배가스가 대부분을 차지하며, 약간의 배온수, 배증기와 함께 소결광과 같은 제품 고체 현열, 스크랩 현열 등에 의한 기타 폐열도 일부

Table 3 Waste heat ratio classified by industry and waste heat type (%)

Types of industry	Waste gas	Waste water	Waste hot steam	Others
Food	5.1	9.1	85.8	0.0
Fibre	38.8	29	32	0.2
Paper & wood	1.0	19.9	79.1	0.0
Chemical	98.5	1.4	0.05	0.05
Ceramics	99.7	0.3	0.0	0.0
Metalworking	99.2	4.1	0.6	0.1
Others	99.6	0.4	0.0	0.0

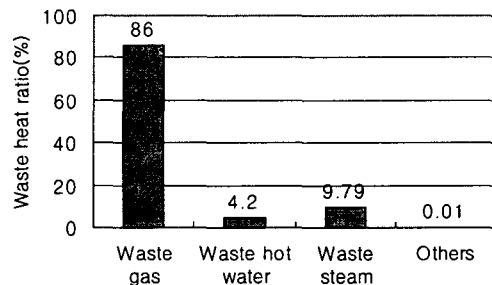


Fig. 5 Waste heat ratio classified by waste heat type.

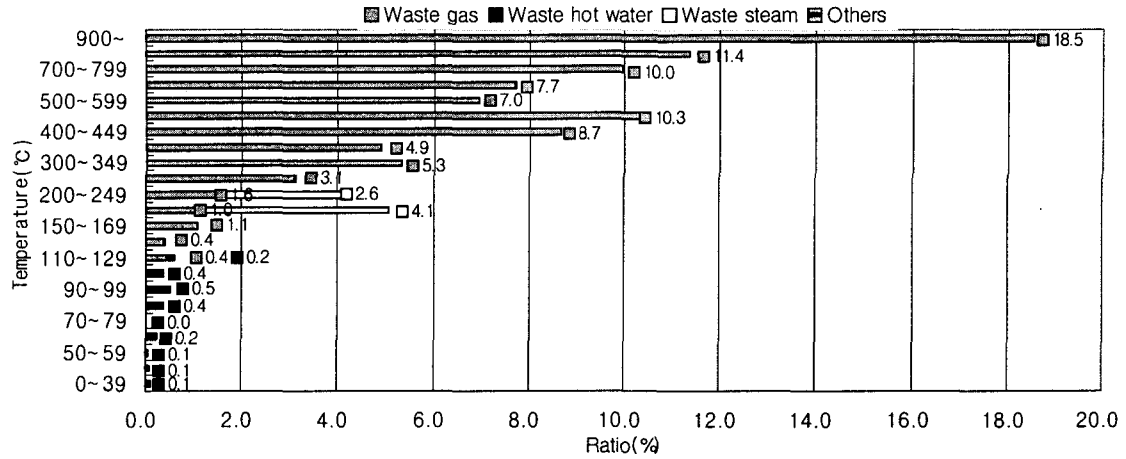


Fig. 6 Waste heat ratio classified by temperature range.

존재한다. 금속업에서의 배가스는 보일러, 가열로, 소각로, 용해로, 아연로, 오븐 등 각종 열설비에서 배출되는 것이다. 금속업에서 철강업종의 제철공정이 제조업 가운데에서도 가장 다양한 열공정을 갖고 있는 업종이다.

상기 업종에 속하지 않는 소각로, 폐열 보일러 등에서 배출되는 기타 업종의 폐열 형태도 역시 배가스가 주류를 이루고 있다.

Fig. 5는 전 업종의 폐열 형태별 폐열량비를 나타낸 것이다. 폐열량 비율은 배가스가 전체의 86% 내외로 가장 많음을 알 수 있다.

3.3 온도별 폐열 부존량

온도별 업종별 폐열량 산정은 전국의 동일 업종의 시설은 동일한 폐열 온도분포를 갖는 것으로 가정하여 앞에서 추산한 폐열량을 온도분포에 비례 배분하므로 얻을 수 있다.

Fig. 6은 폐열 형태별에 의한 온도별 폐열량 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 배가스의 폐열량이 절대적으로 많은 것을 알 수 있다. 배가스의 온도는 300°C 이상의 폐열이 대부분이며, 배가스 온도가 고온일수록 폐열량 비율이 큰 것은 폐열량 계산에서 온도가 배가스의 양보다 크게 영향을 미쳤기 때문이다. 배가스의 유량으로 보면 300°C에서 500°C의 배가스가 많으며 이것은 노 및 보일러 등의 연소가스임을 알 수 있다.

배온수의 폐열량은 배가스에 비해 극히 작은 량이지만 온도별 폐열량 비율은 온도가 80°C에서 110°C까지 배온수가 많고, 특히 90°C 이상의 폐

열량 비율이 높다. 이는 배가스와 마찬가지로 폐열량의 계산에 배온수의 온도가 배온수의 양보다 더 크게 영향을 미쳤기 때문이다. 그러나 배온수의 절대량으로 보면 30°C에서 70°C까지 모든 온도범위에서 배온수가 배출되고 있음을 나타낸다.

배증기는 170°C에서 250°C 사이의 온도범위에 배증기의 대부분이 존재함을 알 수 있다. 배증기의 경우 공장 내 이용처가 있는 경우는 대부분 그대로 사용할 수 있는 폐열이다.

기타 폐열은 극히 미미한 양으로 그림에 잘 나타나지 않고 있지만 크게 250°C에서 300°C 사이의 폐열과 600°C에서 700°C 사이의 폐열이 대부분을 차지한다. 이것들은 화공업의 반응기 부생가스와 금속업의 소결기 고온고체 폐열이다.

3.4 폐열의 회수이용과 최종배출 실태

Fig. 7은 발생 폐열량 중에서 회수이용되고 있는 양을 각 폐열 형태별로 나타낸 것이다. 회수

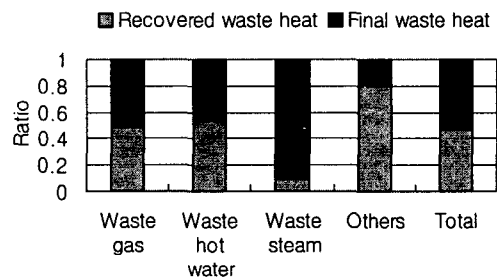


Fig. 7 Ratio between recovered and final waste heat.

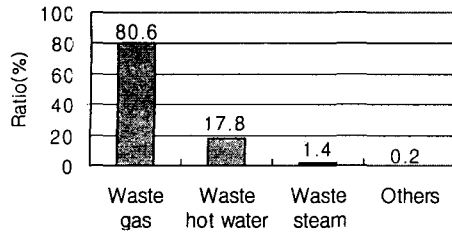


Fig. 8 Recovered waste heat ratio.

이용률이 가장 낮은 폐열 형태는 배증기로 약 6%이며, 가장 회수 이용률이 높은 폐열 형태는 기타 폐열로서 발생량의 80%에 달한다. 전 산업 폐열의 회수 이용률은 발생폐열의 46% 정도이다.

Fig. 8은 회수 이용되고 있는 폐열량의 폐열 형태별 비율을 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 배가스가 80.6%, 배온수가 17.8%에 달하여 이 두 형태의 폐열이 대부분을 차지하며 배증기 및 기타 폐열의 회수 이용량은 앞의 두 폐열에 비해 극히 미미한 수준임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

환경보전과 에너지절약 정책의 추진을 위한 산업폐열 현황에 대한 조사연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 산업폐열은 공장 단위로 폐열의 재산성 척도가 달라 공장에 따라 고온 폐열 또는 다량의 저온 폐열이 존재하는 것으로 조사되었다.
- (2) 구입 에너지와 발생 폐열량의 상관관계를 정량적 데이터 분석기법을 이용 분석한 결과, 모든 업종에서 두 변수 사이에 밀접한 상관관계를 찾을 수 있었다.
- (3) 제안된 업종별 전국 폐열량 산정방법에 따라 추산된 폐열량은 전 산업 구입 에너지의 11.7%에 달하였다.
- (4) 석유화학 및 금속업에서의 발생 폐열이 전체 폐열의 80%에 달해 중화학공업 중심의 우리나라 산업구조를 잘 나타내었다.

(5) 폐열의 형태별 발생량은 전체 폐열에 대해 배가스 86%, 배온수 4.2%, 배증기 9.8%, 기타 폐열 0.01%을 차지하는 것으로 조사되었다.

(6) 폐열 발생량의 약 46%를 회수 이용하고 54%가 최종 배출(손실 포함)되는 것으로 조사되었다.

#### 후 기

본 조사연구는 산업자원부에서 시행한 에너지자원기술개발사업에 의해 수행되었으며 이에 사의를 표한다.

#### 참고문헌

1. Kim, H. K., Kim, Y. I., Kim, D. C. and Park, J. S., 1978, Heat recovery and the utilization of waste hot-water from industrial plants, Report of Korea Inst. of Heat Energy Management, pp. 1-229.
2. KEMG, 1984, Survey Report of Waste Heat Status of Industry, Report of Korea Energy Management Corporation, pp. 1-222.
3. Park, I. H., Cho, M. J., Park, Y. J., Lee, K. W., Lee, Y. S. and Chang, K. C., 1988, Feasibility study on R & D for waste heat recovery technology, Report of MOST, pp. 1-444.
4. Hirada, K, 1996, Investigation study on waste heat & need, ECC Japan, pp. 1-159.
5. Nezu, K., Shimoda, S. and Iguchi, M., 1983, Research on the utilization of waste heat, Trans. of SHASE Japan, No. 22, pp. 79-87.
6. ECC Japan, 1999, Investigation study on Energy system in factory area, pp. 1-162.
7. JSME, 1980, Static data processing, JSME Mechanical Engineer's Handbook, A7-36.