



# 大氣汚染 防止技術 原理 및 機器 (V)

金 鍾 奭

〈環境廳 大氣管理課長·技術士〉

### 3. 自然對流 및 輻射冷却(Natural Convection and Radiation)

高溫排氣가스를 냉각 처리하는 다른 하나의 방법은 자연대류·복사방법이 있다.

자연대류·복사법은 고온배기가스가 도관(導管)을 통과할 때 도관은 고온가스에 의하여 가열되고 도관이 가열되면 도관을 둘러싸고 있는 주위 공기가 가열되며, 가열된 공기는 그 주위의 찬공기와 혼합되면서 열을 전달하게 된다. 이런 현상을 자연대류에 의한 냉각이라 한다. 또 도관이 가열되면 가열된 고온도관은 주위로 복사열(Radiation heat)을 발산한다. 이를 복사냉각이라 한다. 따라서 대류와 복사는 고온체가 냉각될 때 동시에 작용하여 냉각효과를 증가시키게 된다. 여기서는 이 대류·복사를 이용한 고온배가스의 냉각을 검토키로 한다.

자연대류에 의한 열전도량은 전열이라고 하며 이는 고온가스와 주위공기와의 평균온도차 및 방열면적(heat surface)에 의한 함수이며 아래식으로 표시된다.

$$Q = UA\Delta t_m$$

여기서 Q = 전열량(Kcal)

$$U = \text{전열계수} \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^2} \right)$$

$$A = \text{전열면적} (\text{m}^2)$$

$$\Delta t_m = \text{대수평균온도} (\text{C})$$

고온배가스 냉각시 전열량은 제거하여야 할 열량에 의하여 결정된다. 대부분의 공정에서 배출

되는 배기가스의 량과 그 최대온도는 정해져 있다. 만약 배기가스 온도가 처리 사용코자 하는 방지 기기의 처리온도 보다 부적합하게 높을 때는 처리에 적당한 온도가 될 때까지 이를 냉각시켜야 한다. 냉각에 필요한 전열량은 냉각장치입구 및 출구에서의 유입 및 유출처리가스의 엔탈피(Enthalpy) 차이로 결정한다.

$$Q = W \times \Delta h$$

여기서 Q = 냉각열량(Kcal/kg)

W = 배기가스중량(kg/hr)

$\Delta h$  = 엔탈피차(Kcal/kg)

대수평균온도는 냉각을 위한 열이동이 일어날 때 열원과 주위에서 열을 흡수하는 흡열체(여기서는 찬공기) 사이의 평균온도차로서 냉각관을 사용할 때는 다음 식으로 표시한다.

$$\Delta t_m = \frac{(t_1 - t_a) - (t_2 - t_a)}{\log \left( \frac{t_1 - t_a}{t_2 - t_a} \right)}$$

여기서  $\Delta t_m$  = 대수평균온도차 (C)

$t_1$  = 냉각관입구 가스온도 (C)

$t_2$  = 냉각관출구 가스온도 (C)

$t_a$  = 대기온도 (C)

모든 공정은 제품생산에 필요한 공정에 존재하게 되며 공정에 존재하게 되며 공정주기에 따라 배기가스의 온도도 변한다. 또 주위의 대기온도도 계절(시간)에 따라 변한다. 따라서 고온배가스용 냉각장치를 설계하고자 할 때는 처리코자 하는 배기가스 및 공기에 대해서 가장 빈번하게 발

생하는 최악의 조건을 택하여 설계하여야 모든 조건을 커버하는 냉각장치가 될 수 있음을 명심하여야 한다. 따라서  $t_1$ (냉각장치입구 배가스 온도)은 냉각장치 입구에서 예상되는 최대온도이고,  $t_2$ (냉각장치출구 배가스온도)는 배출되는 가스의 예상최대온도로,  $t_a$ (대기온도)도 최대온도를 각각 선정하여 설계함이 좋다.

총 전열계수  $U$ (over all heat transfer)는 열이동에 작용한 총 저항에 역비례한다. 즉  $Q$  Kcal 란 열이 고온부에서 저온부로 이동할 때에 작용한 저항이 크면  $U$ 는 적어지고 그 반대로 저항이 적으면  $U$ 는 커지게 된다. 복사(Radiation)로 이동된 열량은 그 이동이 좀더 복잡한 양상을 띤다. 예컨대 파이프를 통하여 고온가스를 냉각시킨다고 가정하면 파이프내에서 이 고온가스 흐름의 상태(층류, 난류)가 파이프 내벽과 고온가스 접촉부에 열전도의 정도에 영향을 미치며 이와 같은 현상을 전열경막(film)이라 한다.

따라서 이 film 효과가 열의 이동을 좌우하며 film 효과는 파이프 내경  $D$ , 전열계수  $K$ (thermal conductivity, Kcal/hr·m·°C) 열용량(heat capacity Kcal/hr·°C) 점도( $\frac{kg}{m \cdot sec}$ ) 레이놀드수  $Re$ 의 함수가 된다. 전열계수  $U$ 의 정의는 냉각장치 원리에 따라 다르나 여기서는 대기오염방지기술에 가장 흔히 사용되는 수직확장판의 것을 중심으로 설명코저 하며 수직확장판의 전열계수  $U$ 는 다음과 같이 식으로 표시할 수 있다.

$$U_o = \frac{h_{i0} \cdot h_o}{h_{i0} + h_o}$$

여기서  $h_{i0}$  : 냉각판 내부전열 경막계수를 외부전열면적을 중심으로 산출한 것  $(\frac{Kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C})$

$h_o$  : 외부전열면적의 경막계수  $(\frac{Kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C})$

내부경막계수는 아래 Kern의 공식으로 구한다.

$$h_i = j_H \frac{K}{D} \left( \frac{C\mu}{K} \right)^{-1/3}$$

$$j_H = \frac{h_i D}{K} \left( \frac{C\mu}{K} \right)^{-1/3}$$

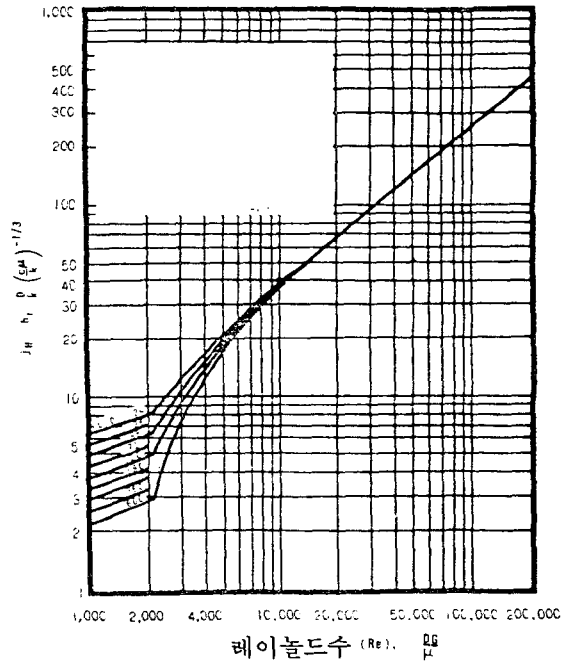
로 이는 다음 그림에서 보듯이 관내 유체상태를 표시하는 레이놀드수( $Re$ )의 함수로도 표기된다.

여기서  $K$  : 선열전도계수(thermal conductivity Kcal/hr·m·°C)

$D$  : 관내경(m)

$C$  : 열용량(heat capacity Kcal/kg·°C)

$\mu$  : 점도(kg/m·sec)



<그림 - 1>  $j_H$ 선도

레이놀드수  $Re$ 는 관경 점도 및 질량속도의 함수로 아래식으로 표시된다.

$$Re = \frac{DG_p}{\mu}$$

여기서  $G_p = \frac{W}{a_p} \left( \frac{kg}{hr \cdot m^2} \right)$

$$a_p = \text{유체 통과단면} \frac{\pi D^2}{4}$$

이상의 내용을 보면 내부경막계수(inside film coefficient)는 내부경막을 통과해서 전열

되는 열전도 척도이며 내부경막계수의 증가는 고온가스체에서 대기중으로 이동하는 열량을 증가시킨다. 윗 그림에서 레이놀드수의 증가는 열전도를 증가시키는 것을 알 수 있다.

고온가스의량은 고정되어 있으므로 레이놀드수를 증가시키기 위해선 처리가스의 속도를 증가시켜야 하며 이는 결과적으로 배가스처리에 필요한 동력을 증가시켜야 한다. 따라서 대류냉각을 사용할 때 열전도효율 증가를 최적으로 하기 위해선 동력비에 대한 송풍기의 효율과 동력 즉 최적 송풍기 성능을 결정하여야 한다. 대부분의 경우 송풍기 효율을 증가시키는 것 보다는 상대적으로 낮은 열전도를 얻는 것이 경제적이다.

이외에도 고려하여야 할 많은 변수가 포함되므로 시설자재의 장점을 찾아 이에 따르는 것이 좋다.

대류·복사 냉각시 도관벽을 통한 방열량은 외부 표면의 열경막계수  $h_o$ 가 영향을 받는다. 외부 표면 열경막계수  $h_o$ 는 대류계수( $h_e$ )와 복사계수( $h_r$ )의 합이며 도관이 수직관 또는 수평관 일 때는 아래 실험식으로 이들을 얻을 수 있다.

$$h_e = 0.27 \left(\frac{4t}{D_o}\right)^{0.25}$$

여기서  $4t = (t_w - t_a)^{\circ}F$  (대기와 도관벽 온도와의 차)

$D_o =$  관 외경 (fA)

$$h_r = \frac{e\delta(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$$

$$= 0.173 \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$$

여기서  $e$  : 도관표면 방사율(Emissivity)

$\delta$  : Stefan-Boltzman 계수

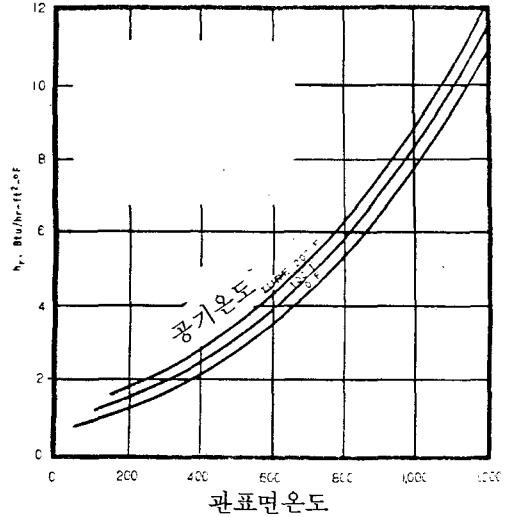
$$\frac{0.173 \times 10^{-8} \text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}R^4}$$

$T_1$  : 표면절대온도 ( $^{\circ}R$ )

$T_2$  : 공기온도 ( $^{\circ}R$ )

실제로 대류계수  $h_r$ 을 얻는 데는 아래 <그림 2>를 사용한다. 이 그림은  $e = 1$  일 때 관표면온도 별  $h_r$ 을 선도화한 것이다.

방열도  $e$ 는 관표면조건에 영향을 받는 것으로

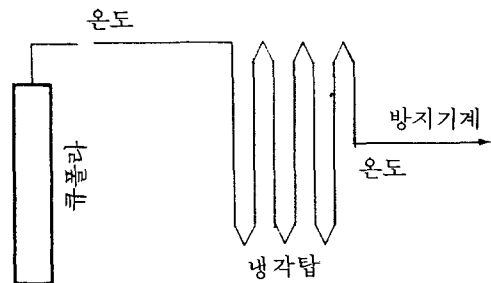


<그림-2> 복사 전열 계수( $e=1.0$ )

黑體(管)은 1이므로 냉각관은 黑管을 써야한다.

외부표면벽 열경막계수  $h_o$ 은 가상한 관벽온도  $t_w$ 와 아래식을 사용한 시행오차법을 사용하여 가상  $t_w$ 와 실제  $t_w$ 가 같아지는  $h_o$ 을 반복하여 구한다. 이  $h_o$ 를 사용하여 전열계수  $U_o$ 을 산출한다.

$U_o$ 가 결정되면 전열량  $Q$ 는  $Q=UA\Delta t_m$ 으로 구해지며 전열면적  $A$ 를 구하면 된다. 전열면적  $A$ 는 관의 길이와 외관 직경으로부터 구한다. 이때 사용하는 외관직경은 외부표면 경막계수를 구하는데 사용한 외부직경을 사용한다. 이때 구한 관의 길이가 너무 길 때는 <그림 3>에서 보는 바와 같이 U字관을 사용한 수직관 Column으로 하면 좋다.



<그림-3>

처리가스 이동관은 이동관단면적×이동속도=처리가스량이 되도록 설계하면 된다.

설계한 처리가스 이동관의 길이가 길 때는 <그림 3>의 Cooling Columns과 같이 이동관을 U자로 하여 연결하면 훌륭한 대류복사냉각장치가 된다.

이와같이 Cooling Column을 이용할 때 이동관은 흑색도장이 필요하다. 이때는 처리가스 속도가 감소하여 처리분진이 Cooling Column 내에 침강되지 않도록 속도를 증가시켜야 한다. 또 가스가 냉각되면 그 체적이 감소하므로 Cooling Column 後部쪽으로 가면서 管徑이 적어져야 한다.

대부분의 대류복사냉각 Cooling System 은 방열에 충분한 표면적을 가진 管과 처리가스 이동에 필요한 용량의 송풍기만으로 충분하다. 처리가스 온도가 극단적으로 높거나, 처리가스내 부식성 가스 또는 흙이 존재하지 않는 경우에는 黑管만으로 된 Cooling Column 으로 만족한 냉각 결과를 얻게 된다.

Cooling Column 관벽의 표면온도를 알고싶은 때는 앞서 설명한 tw를 구하면 된다. 만약에 tw를 구한 관벽표면온도가 이 黑管을 견딜 수 없는 고온일 때는 黑管의 그 부분의 재질을 내열성이 강한 재질로 바꾸던가 또는 이미 냉각된 처리가스의 일부를 이 부분에 재순환 시키면 좋다.

Cooling Column 설계시 사용한 배가스 온도보다 실제 처리하는 가스의 온도가 낮을 때에는 Cooling Column 을 거쳐 나오는 처리가스 온도가 예상했던 온도보다 낮아져 이들 처리가스가 방지기기내에 이르면 가스성분중 일부는 露點에 이르러 주증기가 물로 변하여 곤란한 문제가 생긴다. 또 이와는 반대로 냉각시설 설계시 사용한 온도보다 실제처리가스 온도가 높을 때는 냉각장치 출구에 熱傳滯(thermer comple)을 설치하여 너무 뜨거운 처리가스는 방지기기를 통하지 않고 側路(by-pass) 되도록 조치함이 좋다. 이외에 대류복사냉각법은 처리가스 온도를 자유로이 조절할 수 없다는 점과 導管의 길이가 전체적으로 길기 때문에 관내저항이 커서 송풍기의 용

량이 커져야 하는 것이 단점이며, 장점으로는 희석공기가 없고 수증기 등의 첨가가 없어 처리가스량이 희석냉각법 보다는 적고 증발법과 같이 수증기의 액화등에 의한 문제가 있는 것이 장점이다.

앞에 <그림 3>에서 보는 바와 같이 내경이 32 in 가 관으로 배출가스를 배출할 때 대류복사냉각장치 설계를 검토해 본다.

내경 32in Cupola

배가스 : 12960 lb/hr

배가스 최대온도 : 2000 °F

2000 °F에서 배가스체적 : 13280cfm (배가스 연소가스 총합으로 최대온도 2000 °C임)

냉각 Column 은 최소 지상으로 부터 20m 떨어져 설치 됨.

배가스는 공기와 같은 물리적조건을 갖는다.

(엔탈피, 점도, 열전도 계수, 밀도가스의 열용량)

### 1. 냉각에 필요한 방열량 Q

2000 °F 가스의 엔탈피 : 509.5 BTU/lb

225 °F 가스의 엔탈피 : 39.6 BTU/lb

$\Delta H = 469.6 \text{ BTU/lb}$

$Q = (469.6)(12960) = 6,078,000 \text{ BTU/hr}$

### 2. 대류평균온도차

입구측 gas 온도  $t_1 : 2,000 \text{ °F}$

출구측 gas 온도  $t_2 : 225 \text{ °F}$

대 기 온 도  $t_a : 100 \text{ °F}$

$$\Delta t_m = \frac{(t_1 - t_a) - (t_2 - t_a)}{\ln(t_2 - t_a)}$$

$$= \frac{(2000 - 100) - (225 - 100)}{\ln \frac{1900}{125}} = 653 \text{ °F}$$

### 3. 관내 경막계수 $h_i$

$$h_i = j_H \frac{K}{D} \left( \frac{c\mu}{K} \right)^{1/3}$$

$j_H$  는 <그림 1>에서 얻는다.

$$R_e = \frac{DG_p}{\mu}$$

배가스 배출속도를 3500 fpm으로 하면

$$\text{관내면적 } \bar{A} = \frac{13280 \text{ cfm}}{3500 \text{ fpm}} = 3.79 \text{ ft}^2$$

$$\text{管徑 } D = \frac{(3.79)(4)^{1/2}}{\pi} = 2.2 \text{ ft}$$

$$G_p = \frac{12960 \text{ lb/hr}}{3.79 \text{ ft}^2} = 3420 \frac{\text{lb}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2}$$

$$\mu = 0.094 \frac{\text{lb}}{\text{hr} \cdot \text{ft}} \text{ (점도표에서 찾음)}$$

$$Re = \frac{(2.2)(3420)}{0.094} = 80,000$$

$j_H$  는 <그림 1> 으로부터 215

$K = 0.0297$  (아래 <표 1> 에서 찾음)

$$e = 0.247$$

$$\frac{C\mu}{K} = 0.775$$

$$h_i = 215 \left( \frac{0.0297}{2.2} \right) (0.775)^{1/3} \\ = 2.66 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}$$

4.  $h_i$  (내부격막계수) 를 외부표면에서 본 격막계수  $h_{io}$  로 바꾼다.

관두계를 10 gage 즉 0.141 in 짜리를 사용함.

$$D_o = 2.2 + \frac{(2)(0.141)}{12} = 2.224 \text{ ft}$$

$$h_{io} = (2.66) \frac{2.2}{2.224} = 2.62 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}$$

5. 외부격막계수  $h_o$  의 산출

$$h_o = h_e + h_r$$

$$\textcircled{1} h_e = 0.27 \left( \frac{\Delta t}{D_o} \right)^{0.25}$$

관벽온도가 0.25 °F 로 가정하면

$$h_e = 0.27 \left( \frac{425}{2.224} \right)^{0.25} \\ = 1.0 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}$$

$\textcircled{2} h_r$  는 <그림 2> 에서 얻은

$$h_r = 3.42 \text{ (} e = 1 \text{)}$$

보통 녹슨 철관을 사용할 때  $e = 0.736$  을 사용

$$h_r = (3.42)(0.736) = 2.52 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}$$

$\textcircled{3} h_o = h_e + h_r$

$$= 1 + 2.52 = 3.52 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}$$

<표-1>

Table D1. PROPERTIES OF AIR

온도 °F	정압비열 ( $C_p$ ), Btu/lb-°F	전도 ( $k$ ), lb/hr-ft	전열계수 ( $k$ ), Btu/hr-ft-°F	프랜들수 ( $C\mu/k$ ), (dimensionless)	밀도 ( $\rho$ ), lb/ft <sup>3</sup>
0	0.240	0.040	0.0124	0.77	0.0863
20	0.240	0.041	0.0128	0.77	0.0827
40	0.240	0.042	0.0132	0.77	0.0794
60	0.240	0.043	0.0136	0.76	0.0763
80	0.240	0.045	0.0140	0.77	0.0734
100	0.240	0.047	0.0145	0.76	0.0708
120	0.240	0.047	0.0149	0.76	0.0684
140	0.240	0.048	0.0153	0.76	0.0662
160	0.240	0.050	0.0158	0.76	0.0639
180	0.240	0.051	0.0162	0.76	0.0619
200	0.240	0.052	0.0166	0.76	0.0601
250	0.241	0.055	0.0174	0.76	0.0558
300	0.241	0.058	0.0182	0.76	0.0521
350	0.241	0.060	0.0191	0.76	0.0489
400	0.241	0.063	0.0200	0.76	0.0460
450	0.242	0.065	0.0207	0.76	0.0435
500	0.242	0.067	0.0214	0.76	0.0412
600	0.242	0.072	0.0229	0.76	0.0373
700	0.243	0.076	0.0243	0.76	0.0341
800	0.244	0.080	0.0257	0.76	0.0314
900	0.245	0.085	0.0270	0.77	0.0295
1,000	0.246	0.089	0.0283	0.77	0.0275
1,200	0.248	0.097	0.0308	0.78	0.0238
1,400	0.251	0.105	0.0328	0.80	0.0212
1,600	0.254	0.112	0.0346	0.82	0.0192
1,800	0.257	0.120	0.0360	0.85	0.0175
2,000	0.260	0.127	0.0370	0.83	0.0161

④  $t_w$ 는 가정된 것이므로 이를 점검한다.

$$t_w = t_m - \left( \frac{h_o}{h_o + h_{i_o}} \right) (t_m - t_a)$$

$$t_m = \frac{2000 + 225}{2} = 1112^\circ\text{F}$$

$$t_a = \frac{100 + 100}{2} = 100^\circ\text{F}$$

$$t_w = 1112 - \left( \frac{3.52}{3.52 + 2.62} \right) \times (1.112 - 100) = 530^\circ\text{F}$$

가정한 온도  $525^\circ\text{F}$ 나 점검한  $530^\circ\text{F}$ 는 근사하게 맞는다.

6. 외부표면에서 본 총전열계수  $U_o$ 의 산출

$$U_o = \frac{h_{i_o} \cdot h_o}{h_{i_o} + h_o} = \frac{(2.62)(3.52)}{(2.62) + (3.52)} = 1.50 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

7. 면적  $A$ 의 산출

$$A = \frac{Q}{U_o \cdot d \cdot \Delta t_m} = \frac{6078000}{(1.50)(653)} = 62.0 \text{ ft}^2$$

8. 판길이 산출

$$L = \frac{62110}{(2.224)(\pi)} = 886 \text{ ft}$$

Cupola로부터 수직 Cooling Column까지 60ft가 되므로 Cooling Column에 사용되는 길이는  $886 - 60 = 826 \text{ ft}$ 가 필요하다.

Cooling Column 하나의 길이를 50ft로 잡는다면  $\frac{826}{50} = 16.5$ 개의 수직 Column이 필요하다. Column과 Column을 연결하는데 2ft씩이 필요하다면 Cooling Column을 완성하는데에는 2ft짜리 16개가 필요할 것이다.

실제 Cooling Column의 관경을 결정할 때는 몇개의 후보관경을 선택하여 압력강하와 설치비를 각각 구하고 이들을 비교하여 최저 가격을 결정할 수 있는 관경을 선택 사용한다.

〈다음호에 계속〉

## 新技術개발

공장의 소음공해로 인한 근로자의 청각기능장애를 사전 예방할 수 있는 새로운 시스템이 멀지않아 개발될 전망이다. 근착 英과학잡지 뉴 사이언티스트에 따르면 런던 대학의 데이비드 켈프 박사는 지난 77년 사람의 귀가 자체의 「능동적 귀환시스템」(AFS)이 만들어 내는 반향(메아리)의 분석방법을 어떻게 분석하는가를 발표한 이후 현재까지 이 분야에 대한 연구가 계속 진행중인 것으로 알려졌다.

최근 켈프 박사팀은 사람의 청력을 진단할 수 있는 연구시스템을 설치했으며 관련특허권을 영국기술단체 산하의 국립연구개발회사에 넘겨 주었다.

AFS가 내는 반향은 사람마다 다르며 약간의 청력장애가 있는 사람의 경우 이 반향이 나타나지 않기 때문에 이를 정확히 진단할 장치의 상품화가 현재 추진되고 있다.

내이의 파우작은 약 3,000개의 음향감지기

## 騒音公害 청각장애 事前예방 런던大 켈프교수 새 시스템 開發

로 이루어진 나선형 기관으로 각각의 감지기는 제한된 주파수 대역과 진폭영역에 민감하게 작용한다.

이 감지기들은 전체적으로 넓은 대역의 음향을 감지할 수 있는데 AFS는 좁은 대역의 주파수를 제외하고는 거의 모든 주파수의 음향에 작동을 하지 않는다.

그러나 AFS가 과잉 반응을 하는 사람의 귀는 매우 작은 소리를 낼 수 있는데 심지어는 고양이의 귀에서 나는 미세한 소리까지도 들을 수 있는 사람이 있다.

이처럼 사람의 귀에서 나는 반향을 컴퓨터에 입력시켜 분석하면 개개인의 청력 특성을 알 수 있는 것으로 나타났다.

놀라운 사실은 30데시벨 정도의 감도만 잃게 돼도 반향은 전혀 발생하지 않는다는 것으로, 이는 거의 느낄 수 없는 청력 손실이 지만 청력을 잃게되는 시초임을 의미한다. \*