

## 반발력 적용식에 대한 연구

정기신

세명대학교 소방방재학과

### A Study on Application Formulas of The Reaction Force

Jeong, Keesin

Dept. of Fire and Disaster Prevention of Semyung Univ.

#### 요 약

반발력을 계산하는 여러 가지 식이 있다. 이 식들이 어떻게 유도되고 어디에 사용되는지를 고찰하였다. 각 식들이 옥내소화전이나 옥외소화전의 노즐 같은 실제 소방설비에 적용될 때에는 무엇을 주의하여야 하는지에 대하여 알아보고 적절한 사용방법을 제시하였다.

There are a few formulas to calculate the reaction force. I have studied these formulas for how to derive and where to use. And also have studied what do we careful to apply to actual fire protection systems such as nozzle of indoor and out door hydrant system. I suggested appropriate method to calculate the reaction force. Keywords: Reaction force, Nozzle, Hydrant system.

#### 1. 서론

소방에서 반발력의 계산식은 다양한 분야에서 사용된다. 특히 옥내소화전이나 옥외소화전, 옥외포소화전같이 사람이 노즐을 잡고 소화수나 포 등 소화약제를 방사하는 경우에는 이 반발력의 크기에 따라 방출압력을 제한하고 있다. 하지만 이 반발력을 계산하는 계산식이 여러 가지가 있어 어느 것을 사용하는 것이 적절한 것인지 혼란스러울 때가 있다. 이에 대해 본 연구에서는 반발력을 계산하는 식이 어떤 것이 있으며 어떻게 유도되었는지 또 소화설비에 적용하는 경우 어떠한 식을 사용할 것인지 또 무엇을 주의하여야 하는지에 대하여 문헌들을 통하여 알아보고 가장 바람직한 식이 어느 것인지를 제시하였다.

#### 2. 현재 사용되는 반발력계산 식 및 이의 유도

2.1 유속의 변화 발생 시 (단면적의 변화)

$$RF = 0.01667 Q (v_2 - v_1) \quad RF[N], \quad Q[lpm], \quad v[m/s] \tag{1}$$

$$RF = m a \quad m = \rho Q \Delta t \quad a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$RF = (\rho Q \Delta t) \left( \frac{\Delta v}{\Delta t} \right) \quad RF = \rho Q \Delta v$$

$$\text{단위변경 } 1 \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 60,000 \left[ \frac{\ell}{\text{min}} \right]$$

$$RF = 1000 \left( \frac{1}{60000} \right) Q' (v_2 - v_1) = 0.01667 Q (v_2 - v_1) \quad (\rho = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right])$$

2.2 유속의 변화가 없을 시 (분사추진)

2.2.1 노즐의 지름과 방출압력을 알 때

$$RF = 0.157 C_d d^2 P \quad RF[N], d[mm], P[bar] \quad (2)$$

$$RF = \rho Q v = \rho C_d A v \quad v = \rho C_d \frac{\pi}{4} d^2 v = \rho C_d \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{1000}\right)^2 d^2 (2 g 10 P)$$

$$= \rho C_d \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{1000}\right)^2 (2 g 10) d^2 P = 0.154 C_d d^2 P$$

$$\rho = 1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right] \quad RF[N] \quad d[mm] \quad P\left[\frac{kg_f}{cm^2}\right] \quad v = \sqrt{2 g h} \quad h = 10 P \quad v = \sqrt{2 g 10 P}$$

$$RF = 0.154 C_d d^2 P \quad RF[N], d[mm], P\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$$

### 2.2.2 방출량과 방출압력을 알 때

$$RF = 0.2356 Q \sqrt{P} \quad RF[N], Q[lpm], P[bar] \quad (3)$$

$$RF = \rho Q v = \rho Q \sqrt{2 g 10 P} = \rho \left(\frac{1}{1000 \times 60}\right) Q' (\sqrt{2 \times 10 \times g}) \sqrt{P} = 0.2334 Q \sqrt{P}$$

$$\rho = 1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right], v = \sqrt{2 g h} \quad h = 10 P \quad v = \sqrt{2 g 10 P}$$

$$RF = 0.2334 Q \sqrt{P} \quad RF[N] \quad Q[lpm] \quad P\left[\frac{kg_f}{cm^2}\right]$$

$$RF = 0.2356 Q \sqrt{P} \quad RF[N] \quad Q[lpm] \quad P[bar]$$

## 3. 옥내소화전 옥외소화전 설비에 적용

### 3.1 옥내소화전의 k값과 최대 방출량

옥내소화전 방출량은  $Q = C_d A v$ 에서 최소압력과 최소유량이 주어지므로

$$Q = k \sqrt{P} \quad 130[lpm] = k \sqrt{1.7[bar]} \quad k = \frac{130}{\sqrt{1.7}} \left[\frac{lpm}{\sqrt{bar}}\right] = 99.71 \left[\frac{lpm}{\sqrt{bar}}\right]$$

$$\text{최고압력인 } 7[bar] \text{에서의 방출량은 } Q = \frac{130}{\sqrt{1.7}} \times \sqrt{7} = 264[lpm]$$

$$264[lpm] = C_d A v \text{ 이다}$$

옥외소화전 방출량은  $Q = C_d A v$ 에서 최소압력과 최소유량이 주어지므로

$$Q = k \sqrt{P} \quad 350[lpm] = k \sqrt{2.5[bar]} \quad k = \frac{350}{\sqrt{2.5}} \left[\frac{lpm}{\sqrt{bar}}\right] = 221.36 \left[\frac{lpm}{\sqrt{bar}}\right]$$

$$\text{최고압력인 } 7[bar] \text{에서의 방출량은 } Q = \frac{350}{\sqrt{2.5}} \times \sqrt{7} = 586[lpm]$$

$$586[lpm] = C_d A v \text{ 이다}$$

### 3.2 노즐의 방출계수, Cd

방출계수  $C_d$ 의 계산은 다음과 같다.

$$Q = C_d A v = C_d \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 g 10 P}$$

단위변경  $Q: 1[\frac{m^3}{s}] = 60,000[\frac{l}{min}] \quad d: 1[m] = 1,000[mm]$

$$\frac{1}{60000} Q' = \frac{\pi}{4} (\frac{1}{1000})^2 \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} C_d d'^2 \sqrt{P}$$

$$Q = 0.6597 C_d d^2 \sqrt{P} \quad P[\frac{kg_f}{cm^2}] \quad 130[lpm] = 0.6597 C_d 13^2 \sqrt{1.7} \quad C_d = 0.894$$

$$Q = 0.6664 C_d d^2 \sqrt{P} \quad P[bar] \quad 130[lpm] = 0.6664 C_d 13^2 \sqrt{1.7} \quad C_d = 0.885 \quad (4)$$

$$Q = 0.6664 \times 0.885 \times 13^2 \times \sqrt{1.7} = 130$$

$$Q = 0.6664 \times 0.885 \times 13^2 \times \sqrt{7} = 264$$

### 3.3 유속 계산

40mm

호스에서

유속은

$$Q = C_d A v \text{에서 } v = \frac{Q}{C_d A} \quad v_1 = \frac{264 \times 4}{0.885 \times 60000 \times \pi \times 0.04^2} = 3.956 [\frac{m}{s}]$$

$$C_d \text{를 무시 } v = \frac{Q}{A} \quad v_1 = \frac{264 \times 4}{60000 \times \pi \times 0.04^2} = 3.501 [\frac{m}{s}]$$

13mm 노즐에서의 유속

$$v_2 = \frac{264 \times 4}{0.885 \times 60000 \times \pi \times 0.013^2} = 37.457 [\frac{m}{s}]$$

$$C_d \text{를 무시 } v_2 = \frac{264 \times 4}{0.885 \times 60000 \times \pi \times 0.013^2} = 33.149 [\frac{m}{s}]$$

### 3.4 반발력 계산

#### 3.4.1 반발력의 기준

1996년 미국 Florida의 St. Petersburg시에서 45[mm] 호스와 22[mm] 노즐을 이용하여 노즐방출압 50[psi] 기준유량 600[lpm]으로 수용가능한 반발력 266[N]을 정하고 이를 한 명이 감당할 수 있는 반발력의 기준으로 정하였다.<sup>1)</sup>

$$45\text{mm 호스에서의 유속 } v_1 = \frac{600 \times 4}{60000 \times \pi \times 0.045^2} = 6.288 \text{ m/s}$$

$$22\text{mm 노즐에서의 유속 } v_2 = \frac{600 \times 4}{60000 \times \pi \times 0.022^2} = 26.307 \text{ m/s}$$

$$\text{유속변화노즐에서의 반발력 } RF = 0.01667 \times 600 \times (26.307 - 6.288) = 200 [N]$$

$$\text{유속 } v_1 \text{을 무시하면 } RF = 0.01667 \times 600 \times 26.307 = 263 [N]$$

$$50 \text{ psi를 단위변환하면 } 50 \frac{lb}{in^2} \times \frac{0.4536kg}{lb} \times \frac{in^2}{(2.54cm)^2} \times \frac{1.01325[bar]}{1.0332[kg_f/cm^2]} = 3.448[bar]$$

$$\text{노즐구경과 압력을 알 때의 반발력 } RF = 0.157 \times 22^2 \times 3.448 = 262 [N]$$

$$\text{유량과 압력을 알 때의 반발력 } RF = 0.2356 \times 600 \times \sqrt{3.448} = 262 [N]$$

#### 3.4.2 식(1), (2), (3)을 이용한 반발력 계산

식(1) 유속의 변화가 있는 경우의

$$\text{반발력은 } RF = 0.01667 \times 264 \times (37.415 - 3.952) = 147 [N] \quad (5)$$

여기서  $v_1$ 을 무시하면

$$RF = 0.01667 \times 264 \times 37.415 = 165 [N] \quad (6)$$

노즐지름과 방출압력을 알 때의 반발력인

$$\text{식(2)} RF = 0.157 \times 13^2 \times 7 = 186 [N] \quad (7)$$

노즐지름과 방출압력을 알고 방출계수를 고려

$$\text{시} RF = 0.157 \times 0.885 \times 13^2 \times 7 = 164 [N]$$

방출량과 방출압력을 알 때의 반발력인 식(3)

$$RF = 0.2356 \times 264 \times \sqrt{7} = 165 [N] \quad (8)$$

각 식에 의한 반발력의 계산값이 다르게 산출된다.

#### 4. 한계압력의 검토

소방관이 견딜 수 있는 최대반발력의 한계는 1인이 호스를 잡는 경우는 266 N, 둘이 잡는 경우는 333 N, 세명이 답는 경우는 422 N으로 정하고 있다<sup>1)</sup>. 위의 식 (1), (3)을 이용하여 반발력을 계산하면 아래 표1과 같다.

Table 1. Limitation of Reaction Force of Fire Hydrant System

압력[bar]		3	4	5	6	7	8	9	10	11	비고
옥내소화전	유량[lpm]	173	199	223	244	264	282	299	315	331	Cd=0.886
	v <sub>2</sub> [m/s]	24.5	28.3	31.6	34.6	37.4	40.0	42.4	44.7	46.9	
	v <sub>1</sub> [m/s]	2.6	3.0	3.3	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0	
	반발력[N]식(1)	63	84	105	126	147	168	189	210	231	
	반발력[N]식(3)	70	94	117	141	164	188	211	235	258	
옥외소화전	유량[lpm]	383	443	495	542	586	626	664	700	734	Cd=0.92
	v <sub>2</sub> [m/s]	24.5	28.3	31.6	34.6	37.4	40.0	42.4	44.7	46.9	
	v <sub>1</sub> [m/s]	2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	
	반발력[N]식(1)	143	191	239	286	334	382	430	477	525	
	반발력[N]식(3)	156	209	261	313	365	417	469	522	574	

옥내소화전의 경우 한 사람이 감당할 수 있는 반발력의 한계를 266[N]으로 하면 방출압력은 화재안전규정에서 규정하는 7[bar]가 아닌 11[bar]까지 가능하며 옥외소화전의 경우는 역시 화재안전규정에서 규정하는 7[bar]가 아닌 5[bar]까지만 가능하다. 옥외소화전의 방출압을 7[bar]까지 한다면 이는 한 사람이 아닌 두 사람이 감당하는 반발력의 한계인 333[N]으로 이를 기준으로 한 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

$Q = Av$ 에서 유도된 식들은 동일한 조건에서 동일한 값을 가져야한다. 따라서 올바른 반발력계산을 위하여 다음과 같은 조건으로 식을 계산하여야 한다.

##### 5.1 유속의 변화가 있는 경우

옥내소화전에서 단면적의 변화 즉, 속도의 변화가 발생하는 노즐을 사용 시 가장 적합한 반발력 계산식은 식(1)이다. 노즐이 40[mm]에서 13[mm]로 줄어들어 따라 노즐의 원추벽이 유체에 미치는 힘이 유체의 흐름과 반대방향으로 작용하여 유체가 방출하는 힘을 감소시켜 결국 반발력을 감소시키게 된다. 작은 단면만 고려하여 반발력을 계산한 식(6)의 계산값이 큰단면에서의 유속을 고려한 식(5)의 계산값보다 크게 계산된 이유이다. 식(1)에서 유량값을 계산 시  $Q = C_d A v$ 로 방출계수를 고려하여야하고 유속을 구할 때도 역시

$v = \frac{Q}{C_d A}$ 로 방출계수를 적용하여야 정확한 계산이 된다. 만일 방출계수를 고려하지 않으면 40mm에서의 유속은 3.501m/s가 되고 13mm에서의 유속은 33.149m/s가 되어 반발력은  $0.01667 \times 264 \times (33.149 - 3.501) = 130$  N이 되어 식(5)와도 달라진다.

## 5.2 유속의 변화가 없는 경우

단변적의 변화가 없는 즉, 속도의 변화가 없는 노즐을 사용하는 경우에는 분사추진 시의 반발력 계산방법인 식(2)나 식(3)을 사용하여야한다.

### 5.2.1 노즐지름과 방출압력을 알 때

노즐의 지름과 방출압력을 아는 경우 사용하는 계산식인 식(2)의 경우 반드시 방출계수,  $C_d$ 값을 고려하여야 한다. 하지만 대부분의 경우 방출계수를 고려하지 않고 사용하고 있다. 식(2)에 방출계수를 사용하지 않을 경우는 같은 식에서 유도한 식(3)과 다른 결과를 나타낼 수 있다. 식(2)에 방출계수를 적용한 계산값인 식(7)이 식(3)의 계산결과인 식(8)과 동일하게 나타나는 것이 이를 증명하고 있다.

### 5.2.2 방출량과 방출압력을 알 때

식(3)을 이용하여 반발력을 산출 시 유량값을 먼저 구해야 한다. 이 유량값을 계산 시에도 반드시 방출계수를 고려하여  $Q = C_d A v$ 의 식으로 유량값을 구하여 식(3)에 대입하여야 한다.

## 참고문헌

1. Paul Grimwood, "Euro Firefighter", pp207-208, West Yorkshire of British(2008)  
www.jeremymillspublishing.co.uk
2. 남상욱, "소방시설의 설계 및 시공", pp1-172, 성안당(2010)