水の硬さ

Stiffness of Water

相原 康彦
Aihara, Yasuhiko

The generation of high pressure in water associated with the tangential impact of a solid body is reviewed, and the possible application of the transient or unsteady behaviors of fluid motion including the water jet technology is suggested.

[High water pressure, Transient response]

1. はじめに

水の硬さという表現から、硬水、軟水を思い浮かべて、水質の話かと思われるかもしれないが、ここでは水における過渡的な物理現象をとりあげてみたいとおもう。

昭和20年代後半の、高等学校卒業にいたる時期を東京の西の郊外で過ごした私の周辺は、第2次世界大戦後のまさに国破れて山河ありの光景であった。その中で、学校内の池や、電車で3駅ほど離れた多摩川は、子供達にとって格好の遊び場であった。よく興じた遊びのひとつに”水切り”があった。それは石を投げて水面を何度もジャンプさせて遠方へ送る遊びである。子供達は経験的に、平滑な石を水面すれすれに投げればよいことを知っていた。それにしても、本来沈んでしまう筈の石が何故水面ではねかえされるのかという事実は子供心にも不思議であったし、それが何か石と水面との間の浅い角度を持つ衝撃に由来するらしいというおぼろ気な想像は持っていたように思う。

この言わば水の硬さという現象を実感、というよりも痛感したのは大学生時代に海に遊びに行った時であった。沖に設けられた数メートルの高さの飛び込み台から勇を振るって飛び込んだ時に、頭から上半身に感じた痛さは、まさに水の硬さをいやというほど味あわされたものであった。その後、捕鯨船からの鉤がその先端の形状によって水

面下の鯨に命中したり、水面ではねかえされたりするという話を聞いたり、また、飛行艇の着水時の衝撃の話を聞いたりする度に、水の硬さを思い浮かべたものであった。今日ウォータージェット学会で高圧水の様々な応用に接しながら、水の持ついろいろな働きを改めて学んでいるところである。

このような中で、このたび日本高圧力学会から水の硬さについて執筆するようお話をいただいた。この機会に、衝撃に伴い過渡的に水中に高い圧力が発生するという見地からこの現象を述べてみたい。この現象の理論的な研究がテオドール・フォン・カルマンによってなされているので紹介させていただくが、大変に昔の論文なのでご存じの方もあろうかと思う。そのせつにはご寛容をお願い申し上げる次第である。

2. 過渡的な高水圧の発生

Fig. 1のように、単位幅あたりの質量 m の2次元平板が水面上を水平速度 u_0 、沈下速度 v_0 で移動しているものとする。この平板が水面にあたり、後部が水平長さにして x だけ水没した状態を考えると、水の抵抗により水平速度は u_0 から u に、沈下速度は v_0 から v に変化する。ここで問題を沈下方向の運動にしばって考えると、運動量はつぎのよ

Fig.1.

うに保存されることになる。

$$mv_0 = mv + \frac{1}{2}\pi\left(\frac{x}{2}\right)^2\rho v \quad (1)$$

左辺は平板が沈下する方向にもともと持っていた運動量である。右辺は、水中に平板が衝撃的に突入する場合には半径 $\frac{x}{2}$ の仮想的な円筒によって占められる質量に等しい見かけの質量の増加を伴う運動になる、という流体力学の計算結果を用いたものである。 ρ は水の密度である。ところで、 v と x との間には幾何学的に

$$v = \tan \alpha \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

という関係があるので、(1) 式に代入すれば、 x と時間 t の関係が得られる。ここで α は平板の迎角である。つぎに、平板を上方に押し返す力 F は $m \frac{dv}{dt}$ で求められるが、その力は水中に発生した力で、衝撃に対する水圧によるものとみなされる。平均の水圧 p は F を水没した平板の長さ x で割

ると得られる。そのような考え方で得られる水圧 p の値は、

$$p = \frac{F}{x} = \frac{\rho v_0^2}{2} \cdot \frac{\pi \cot \alpha}{\left(1 + \frac{\rho \pi \left(\frac{x}{2}\right)^2}{2m}\right)^3} \quad (3)$$

となる。ここで (3) 式の分母の括弧内の第2項は通常1よりも十分に小さいので省略出来る。そこでたとえば、 $\alpha=20$ 度の場合に $v_0=2, 3, 4$ m/s で接水する瞬間の p は、それぞれ 0.0173、0.0388、0.069 MPa となる。(3) 式からわかるように、 α が 0 に近づく、すなわち平たい面が水面を擦るように衝突する際には、発生する水圧は計算上は無限大になり得ることになる（実際には、水圧が大きくなると水の圧縮性のために緩和作用が働いて、水圧が無限に大きくなることはない）。このような過渡的な高水圧の発生が“水切り”現象の説明になるのではないだろうか。

3. ウォータージェット加工のメカニズム

我々が日常経験する物質の硬さ、柔らかさは、個々の物質の固有の性質である。これに対して、ここでとりあげた硬さは動力的な現象に由来するものである。このような静的な現象と動的な現象の違いの中には多くの興味ある発見があり、新しい技術が生み出される可能性も秘められているのではないだろうか。

私の携わっているウォータージェット技術では、高圧にした水がジェットという動的な過程を経ることにより、単に水圧を上げただけでは得られない加工の能力をもたらすことが重要なのである。その能力の秘密は、壁に直撃するジェットに発生する非定常運動と深く関わっているものと考えている。

[1995年11月24日受理]