

< 논문 >

## J-그루브를 이용한 인듀서의 캐비테이션 억제에 관한 연구

최 영 도<sup>†</sup> · 쿠로카와준이치<sup>\*</sup>

(2005년 7월 12일 접수, 2005년 10월 11일 심사완료)

### A Study on the Suppression of Cavitation in Inducer by J-Groove

Young-Do Choi and Junichi Kurokawa

**Key Words :** Cavitation(캐비테이션), Inducer(인듀서), J-Groove(J-그루브), Suction Performance (흡입성능), Turbopump(터보펌프)

#### Abstract

Cavitation is the most serious problem in developing high-speed turbopump, and inducer is often used to avoid cavitation in main impeller. Thus, inducer is always operating in the worst cavitation condition. If it is possible to control and suppress cavitation in inducer by some new device, it might be possible to suppress cavitation occurring in any type of pumps. The purpose of present study is to develop a new effective method of controlling and suppressing cavitation in inducer using shallow grooves, which is named "J-Groove". J-Groove is installed on the casing wall near the blade tip to use the pressure difference between high pressure region and low pressure region of the inducer in an axial direction. The results show that proper combination of backward-swept inducer with J-Groove improves suction performance of turbopump remarkably in the range of partial flow rate as well as designed flow rate. The rotating backflow cavitation occurring in the range of low flow rate and the cavitation surge occurring in the vicinity of the best efficiency point can be almost suppressed by installing J-Groove.

#### 기호설명

$A_2$ : 임펠러출구 유로단면적  
 $C_p$ : 압력계수 ( $= (p-p_s)/(0.5\rho u_1^2)$ )  
 $D$ : J-그루브의 깊이  
 $f$ : 압력변동의 주파수  
 $H$ : 양정  
 $L$ : J-그루브의 길이  
 $l$ : 인듀서 블레이드의 축방향 길이  
 $N$ : J-그루브의 수  
 $n$ : 회전수

$NPSH$ : 유효흡입헤드  
 $NPSH_R$ : 필요유효흡입헤드  
 $P$ : 축동력  
 $p$ : 압력  
 $p_s$ : 인듀서 입구압력  
 $p_v$ : 포화증기압  
 $Q$ : 유량  
 $R$ : 인듀서 반경  
 $r$ : 인듀서의 축중심으로부터 반경방향 거리  
 $S$ : 흡입비속도 [rpm, m<sup>3</sup>/min, m]  
 $u_2$ : 임펠러출구 원주속도  
 $u_1$ : 인듀서익끝단 원주속도  
 $v_s$ : 인듀서흡입구의 평균속도  
 $W$ : J-그루브의 폭  
 $x$ : 인듀서 블레이드 전연 끝단에서 하류측 축방향 거리

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 요코하마국립대학 대학원 공학연구원  
 E-mail : ydchoi@mach.me.ynu.ac.jp  
 TEL & FAX : +81-45-339-3903

\* 요코하마국립대학 대학원 공학연구원

그리이스문자

- $\phi$ : 유량계수 ( $=Q/(A_2u_2)$ )
- $\eta$ : 효율 ( $=\rho gQH/P$ )
- $\psi$ : 양정계수 ( $=H/(u_2^2/2g)$ )
- $\nu$ : 축동력계수 ( $=P/(\rho A_2 u_2^3)$ )
- $\rho$ : 밀도
- $\sigma$ : 캐비테이션수 ( $=(p_s-p_v)/(0.5\rho u_i^2)$ )

하첨자

- bep: 최고효율점에서의 값
- d: 설계점에서의 값

### 1. 서론

터보형 수력기계의 고속화에 대한 최대의 장애는 캐비테이션이며, 그 발생을 늦추거나 억제하려면 주임펠러의 입구 부근에 위치한 압력최저점의 압력을 높이는 것이 필요하다. 그 때문에 펌프에서는 흡입 높이를 낮게 하거나 흡입관에서의 손실을 줄이는 등의 방법이 있지만 한계가 있으며, 더욱 적극적인 방법으로서 인듀서나 부스터펌프를 설치하는 등의 외부적인 방법이 채용된다. 특히, 인듀서의 장착에 의한 흡입성능의 개선에 대해서는 많은 연구<sup>1), 2)</sup>가 이루어졌으며, 인듀서의 형상을 최적화시킴에 의해 흡입성능의 개선을 도모하였다. 그러나, 캐비테이션은 물리적인 현상이기 때문에 그 발생을 완전히 억제할 수가 없으며, 펌프내부에서 발생하는 캐비테이션을 억제하기 위해 추가로 외부적인 장치를 채용할 경우 펌프장이 대형화되고 복잡해지기 때문에 좀 더 간편한 방법에 의해 캐비테이션의 발생 그 자체를 펌프 내부유로에서 내부적으로 늦추거나 억제하는 것이 바람직하다.

Kurokawa 등<sup>3-5)</sup>은 터보기계에 발생하는 여러가지 이상유동현상을 억제하려는 목적으로 케이싱 벽면상에 주류의 압력구배방향으로 설치한 다수의 얇은 홈(이하 J-그루브로 칭함)을 제안해 왔다. 지금까지의 연구를 통해서, J-그루브는 주류의 각운동량 억제작용에 의해 선회흐름에 수반하는 여러가지 이상유동현상을 억제하는 기능 외에 또 다른 한가지 기능, 즉 고압부의 액체를 저압부로 운반해서 저압부의 압력을 높이는 송압기능을 가지는 것이 판명되었다. 이 송압기능을 이용하면, 캐비테이션의 발생 그 자체를 내부적으로 제어해서 억제할 수 있을 가능성이 크다.

한편, 인듀서는 유로폐색이 적고 캐비테이션의 발생에 따른 양정저하가 완만한 특징을 가지고 있기 때문에 주로 원심 임펠러의 캐비테이션 대책으로서 이용되고 있다. 따라서, 캐비테이션의 측면에서 볼 때 가장 엄격한 조건하에서 운전되고 있는 임펠러이며, Tsujimoto 등<sup>6)</sup>에 의하면 선회 캐비테이션이나 캐비테이션 서지 등 여러가지 형태의 캐비테이션이 인듀서에서 발생하는 것으로 밝혀졌다. 또한, Imano

등<sup>7)</sup>의 보고에 의하면 1999 년에 추락사고를 낸 일본의 H-II 로켓의 액체수소펌프의 인듀서에서 격렬한 선회 캐비테이션이 발생된 바가 있으며, Kamijo 등<sup>8)</sup>은 이러한 선회 캐비테이션을 억제하기 위한 방법을 제안했지만, 그 이후에 Fujii 등<sup>9)</sup>의 연구에 의해 일반적으로 사용될 수 있는 방법이라고 단정할 수 없다는 것이 밝혀졌다. 이러한 문제점들에 대해서 J-Groove 는 주류의 각운동량 억제기능을 가지고 있기 때문에 선회를 수반하는 캐비테이션에 대해서 특히 유효하다고 생각된다.

본 연구의 목적은 J-그루브를 이용하여 인듀서의 캐비테이션을 억제할 수 있는 가능성을 해명하는 것이며, 만약 캐비테이션의 측면에서 가장 엄격한 조건하에서 운전되고 있는 인듀서에서 발생하는 캐비테이션을 억제하여 운전범위를 넓힐 수 있다면 다른 많은 펌프에서 발생하는 캐비테이션의 발생을 늦추어서 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

### 2. 실험 및 수치해석 방법

#### 2.1 실험장치 및 실험방법

용량 2.5 m<sup>3</sup>의 탱크를 포함한 밀폐회류형의 실험장치를 이용하여 실험을 실시하였으며, 펌프로서는 Fig. 1에 나타내는 비속도 300 [rpm, m<sup>3</sup>/min, m]의 원심펌프 및 인듀서를 이용하여 성능시험 및 흡입성능시험을 실시하였다. 흡입성능시험에서는 수돗물을 필터로 여과하여 탱크 내압을 내린 후 10 시간의 탈기운전을 실시하여 용존산소량을 3 ppm 이하가 되도록 조정된 후에 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 인듀서의 제원을 Table 1 및 Fig. 2에 나타내고 있으며, 3 개의 날개를 가진 3 종류의 평판 헬리컬인듀서를 이용하였다. 직경은 모두 89 mm로 블레이드 끝단의 반경 틈새는 0.5 mm, 블레이드의 두께는 3 mm 이며, 케이싱은 아크릴수지로 제작하여 내부를 가시화 할 수 있게 하였다. 케이싱 벽면상에는 14 개의

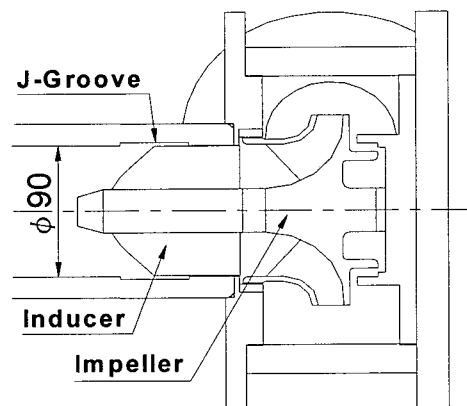


Fig. 1 Schematic view of test pump

정압공을 인듀서의 축방향으로 설치하여 인듀서입구 전후의 압력상승을 확인할 수 있도록 하였다.

Japikse<sup>(2)</sup>와 Tahara 등<sup>(10)</sup>에 의해 밝혀졌듯이 헬리컬인듀서는 블레이드 끝단의 각도가 흡입성능에 큰 영향을 미치므로 설계유량의 입사각에 대해서 압력면측의 캐비테이션을 막을 목적으로 블레이드 각도를 아주 크게 취하는 것이 보통이다. 따라서, 인듀서 A로는 블레이드 각도 17.5°의 평판헬리컬인듀서를 이용하였다. 평판헬리컬인듀서는 유입흐름이 무충돌 유량시에 무작용이 되므로 출구각을 인듀서 A와 거의 동일하게 유지하여 블레이드에 다소의 휘어짐을 적용한 것(인듀서 B)에 대해서도 실험을 하였다. Japikse<sup>(2)</sup>와 Bakir 등<sup>(11)</sup>은 인듀서의 블레이드 전연에 후퇴 스위프 (sweep)를 채용함에 의해 인듀서의 흡입성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 본 연구에서도 이러한 연구결과를 참고로 하여 인듀서 B의 블레이드 끝단에 후퇴 스위프를 적용하였다. 한층 더 흡입성능을 향상시킬 목적으로 2.2 절에서 설명될 CFD에 의한 검토결과로부터 인듀서의 보스 부근에서 발생하는 캐비테이션을 억제하기 위해 설계된 인듀서 C에 대해서도 실험을 실시하였다.

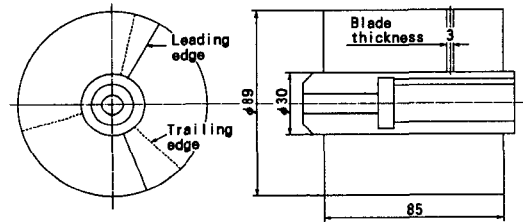
캐비테이션의 억제를 위해서 사용될 J-그루브는 Table 2 및 Fig. 3에 나타난 바와 같이 인듀서 케이싱에 홈의 깊이를 2 mm로 고정시키고 폭 및 길이를 변화시킨 4 종류의 사각형 단면을 가진 홈이다. 폭 6 mm의 홈 32 개를 블레이드 전연으로부터 길이가 상류 및 하류로 각각 20 mm가 되도록 파낸 것 (J-그루브 1), 홈의 갯수를 J-그루브 1의 1/2로 줄이고 폭을 10 mm로 한 것 (J-그루브 2), J-그루브 2의 상류 부분 홈을 매워서 없애버린 것 (J-그루브 3) 그리고, J-그루브 2로부터 홈의 폭을 12 mm로 넓힌 것 (J-그루브 4)에 대해서 실험을 각각 실시하였다. 각 J-그루브의 상류 길이 ( $L_1$ )는 저유량시에 인듀서 입구에서 발생하는 예선회 및 인듀서의 블레이드 상류로 뺏어나가는 캐비테이션을 억제하기 위해서 필요한 길이이며,<sup>(4)</sup> 하류 길이 ( $L_2$ )는 인듀서 유로내에서 발생하는 캐비테이션을 억제하기 위한 길이로서 2.2 절에서 설명하는 CFD에 의한 검토결과로부터 벽면을 따라서 흐름방향의 압력구배가 큰 부분의 길이를 선정하였다. 실험은 회전수 2,000 rpm에서 실시하였으며, 인듀서의 블레이드 끝단 원주속도에 근거하는 레이놀즈수는  $4.2 \times 10^5$ 이다.

2.2 CFD에 의한 인듀서 및 J-그루브의 형상 검토

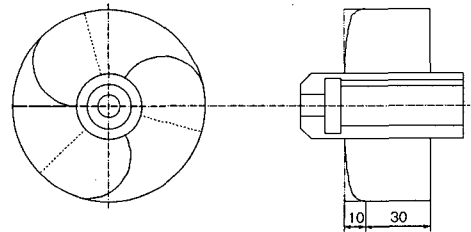
본 연구의 주된 목적인 J-그루브의 캐비테이션 억제효과를 최대한으로 발휘시키기 위해서는 J-그루브의 하류 길이  $L_2$ 의 선정이 중요하다. 또한, 고압부의 유체를 저압부로 이송시키기 위해서는 J-그루브를 압력구배가 가장 큰 부분에 설치할 필요가 있기 때문에, 범용 수치해석 코드인 CFX-TASCflow를 이용하여 케이싱 벽면에서의 축방향 압력변화를 검토

Table 1 Design parameters of test inducer

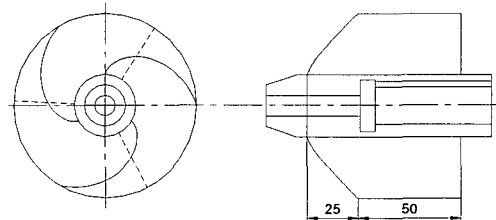
Inducer	A	B	C
Inducer diameter	89 mm	89 mm	89 mm
Tip clearance	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm
Blade number	3	3	3
Blade inlet angle at tip	17.5°	13.0°	19.5°
Blade outlet angle at tip	17.5°	17.0°	19.5°
Axial length at tip	85 mm	40 mm	75 mm
Solidity at tip	3.03	1.69	1.62



(a) Inducer A



(b) Inducer B



(c) Inducer C

Fig. 2 Test inducers

Table 2 Parameters of J-Groove

J-Groove	Number <i>N</i>	Width <i>W</i> [mm]	Depth <i>D</i> [mm]	Length <i>L</i> [mm]	
				Up-stream <i>L</i> <sub>1</sub>	Down-stream <i>L</i> <sub>2</sub>
1	32	6	2	20	20
2	16	10	2	20	20
3	16	10	2	0	20
4	16	12	2	20	20

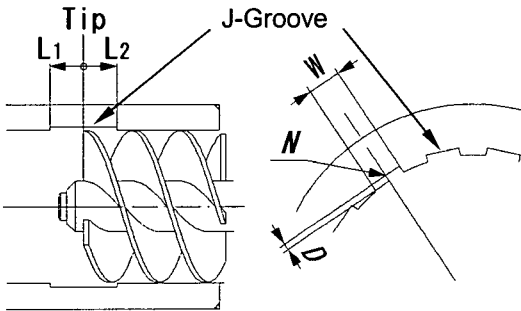


Fig. 3 J-Groove mounted on a casing wall

하였다. 인듀서와 케이싱만을 포함하는 블레이드간 단일유로에 대하여 계산격자수가 약 30 만점의 해석격자를 설치하고, 난류 모델로서는 *k-ε* 모델을, 계산유동 장의 유입 및 유출조건으로는 실험에서와 동일한 전압과 평균유출 유량을 설정하여 계산하였다. 인듀서 B 에 대한 계산결과는 Fig. 4 에 나타나듯이 실험에서 측정된 벽면압력분포와 비교적 잘 일치하는 것이 확인되었으며, 압력구배가 크게 나타나는 범위는  $0 < x/l < 0.5$  에 위치하는 것으로 판명되었기 때문에 J-그루브의 하류 길이를  $L_2 = 20$  mm로 정하였다.

J-그루브는 케이싱 벽면상에 설치하기 때문에 인듀서의 블레이드 끝단 부근에서 발생하는 캐비테이션에 대해서는 억제효과가 클 것으로 기대할 수 있지만, 허브 부근에서 발생하는 캐비테이션에 대해서는 억제하기가 어렵다. 따라서, 인듀서 블레이드 전연 부근의 캐비테이션 발생영역에 대해서 허브 부근에서는 캐비테이션이 발생하기 어렵게 하고 끝단 부근에서 캐비테이션이 비교적 발생하기 쉽도록 한다면 J-그루브의 효과를 보다 크게 발휘할 수 있으므로 좀 더 높은 흡입성능의 향상을 기대할 수 있다. 따라서, 인듀서 C 는 큰 후퇴 스위프를 가지는 블레이드 끝단 각도 19.5°의 평판헬리컬 인듀서로 설계하였다. 최고효율점 ( $\phi/\phi_{bep} = 1.0$ )에서의 수치해석 결과를 Fig. 5 에 나타내고 있으며, 후퇴 스위프의 유무에 의한 블레이드면 압력분포를 비교하고 있다. 인듀서의 반경방향 블레이드 허브 부근 ( $r/R=0.40$ ) 및 끝단 부근 ( $r/R=0.87$ )위치에서의 압력분포를 Fig. 5(a) 및 5(b) 에서 각각 나타내고 있

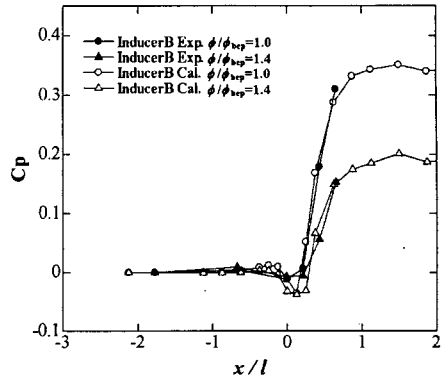
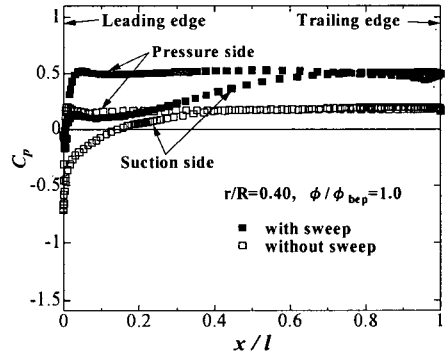
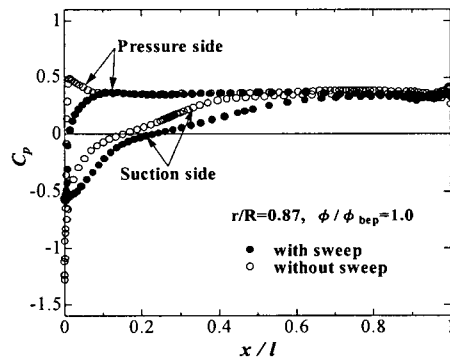


Fig. 4 Comparison of wall pressure distribution



(a)  $r/R=0.40$  (nearby blade hub)



(b)  $r/R=0.87$  (nearby blade tip)

Fig. 5 Calculated pressure distribution along a blade surface ( $\phi/\phi_{bep} = 1.0$ )

다. 최저압력은 블레이드 반경방향 전 위치에 걸쳐서 스위프를 설치한 쪽이 현저하게 개선되었음을 알 수 있다. 즉, 스위프가 설치되지 않았을 경우에는 블레이드 전연에서의 압력저하가 반경방

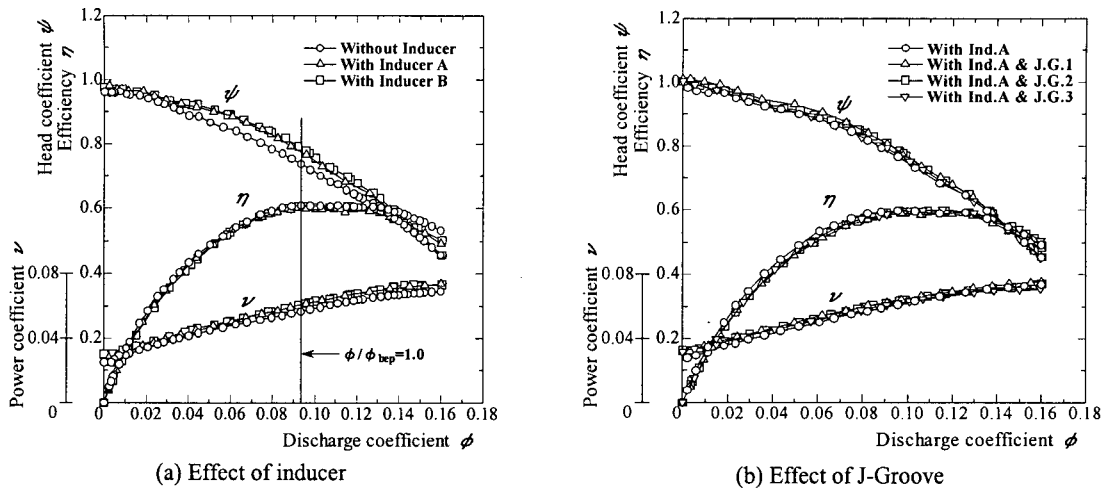


Fig. 6 Comparison of pump performance

항의 넓은 위치에 분포하지만, 후퇴 스위프를 설치하면 압력저하 부분이 블레이드의 끝단 부근에 집중하여 허브 부근에서의 캐비테이션 발생을 회피할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 펌프 성능

Fig. 6은 비캐비테이션시의 펌프 성능곡선을 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 인두서의 유무에 의한 성능곡선의 변화를 보이고 있으며,  $\phi_{bep} = 0.094$  부근에 위치하는 펌프의 최고효율점은 설계점 ( $\phi_d = 0.097$ )과 거의 일치하고 있다. 또한, 인두서의 장착에 의한 양정증가는 모든 경우에서 임펠러에 의한 양정의 불과 5% 정도 밖에 안되고, 게다가 체절점유량 부근 및 과대유량역에서는 인두서에 의한 양정증가가 적은 것을 알 수 있다. 인두서 A와 B를 비교해보면 블레이드의 전연 끝단에 후퇴 스위프를 설치한 인두서 B가 거의 전유량역에서 양정이 조금 높게 나타나지만, 최고효율은 임펠러 단독의 경우 61%, 인두서 장착에 의해 60% (인두서 A) 및 61% (인두서 B)를 보이고 있기 때문에 최고효율에 대한 인두서의 영향이 적은 것을 알 수 있다. Takamatsu 등<sup>(12)</sup>의 연구에 의하면 축동력은 인두서의 장착에 의해 거의 변화하지 않는 것으로 알려져 있지만, 본 연구에서 채용한 인두서의 경우 양정증가분 만큼 다소 축동력이 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 6(b)는 J-그루브의 설치에 의한 성능곡선의 변화를 보이고 있으며, J-그루브를 설치함에 따라 저유량 및 최고효율점유량 부근에서 양정 및 축동력이 조금 증가하고 있다. 이것은 J-그루브 본

래의 기능인 입구역류 억제효과<sup>(4)</sup>에 의해 인두서 입구에 존재하는 예선회를 지감시켜서 이론양정의 저하를 막았기 때문이라고 생각된다. 따라서, 입구역류가 발생하지 않는 과대유량역에서의 성능변화는 거의 없음을 알 수 있다.

#### 3.2 J-그루브에 의한 캐비테이션 억제효과

Fig. 7은 흡입성능시험의 일례로서 인두서 A와 관련된 결과를 보이고 있으며, 인두서의 유무 및 J-그루브를 설치했을 때의 결과를 비교하고 있다. 흡입성능은 식 (1)에서 정의되는 NPSH에 대한 펌프양정의 변화로서 나타낸다.

$$NPSH = (p_s - p_v) / \rho g + v_s^2 / 2g \tag{1}$$

또한, 흡입성능의 판단을 위해서는 종래로 부터 자주 사용되어 온 양정 3% 저하점의 NPSH를 이용하는 것으로 한다. Fig. 7에 의하면 인두서를 장착하지 않은 주 임펠러 단독의 경우 유량비  $\phi / \phi_{bep} = 0.6$ 에서 저 NPSH측까지 높은 양정을 유지한 후 급격한 양정의 저하가 일어난다. 그러나, 펌프에 인두서를 장착함에 따라 보다 저 NPSH측까지 높은 양정을 유지하여 흡입성능이 향상되었음을 알 수 있다. 유량비  $\phi / \phi_{bep} = 1.0$ 에서는 인두서가 장착되지 않았을 경우 3% 양정저하 후 급격히 양정의 저하가 일어나지만, 인두서를 장착함에 따라서 3% 양정저하 후에도 완만한 저하를 보이고 있다. 실험에 사용된 펌프의 임펠러는 흡입구 직경이 매우 크고 3차원 블레이드를 채용하고 있어서 임펠러자체의 흡입성능이 비교적 좋기 때문에 인두서의 장착에 의한 양정 3% 저하점의 저 NPSH측으로의 신장이 적고 흡입성능의 향상이 크지 않다. 유량비  $\phi / \phi_{bep} = 1.4$ 에서는 고 NPSH로부터 양정의 저하가 시작되어 인두서에 의한 흡입성능의 향상

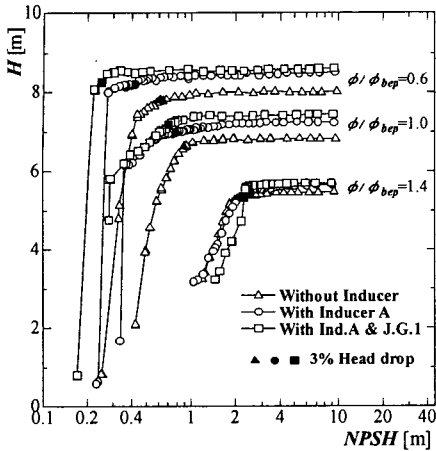


Fig. 7 Improvement of suction performance by inducer and J-Groove

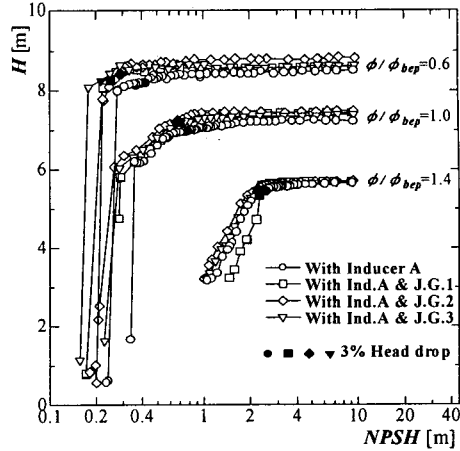


Fig. 8 Effect of J-Groove on suction performance

은 거의 보이지 않는다.

인두서 A 에 J-그루브 1 을 설치했을 경우에는 유량비  $\phi/\phi_{bep} = 0.6$  에서 양정 3 % 저하점은 인두서만 장착했을 경우 보다 한층 더 저 NPSH 측으로 성장하여 흡입성능이 큰 폭으로 개선된 것을 알 수 있다. 유량비  $\phi/\phi_{bep} = 1.0$  에서도 J-그루브를 설치하면 인두서만 장착한 경우에 비하여 저 NPSH 까지 높은 양정을 유지하고 있다. 그러나, 유량비  $\phi/\phi_{bep} = 1.4$  에서는 양정 급저하점은 인두서와 J-그루브를 장착하더라도 펌프에 임펠러만 장착한 경우와 비교해서 거의 변화가 없는 것으로 부터 양정의 급저하는 인두서에 의한 것이 아니라 임펠러에서 발생하는 캐비테이션에 의한 것이라고 판단된다.

3.3 J-그루브의 형상의 영향

Fig. 7에 의해 J-Groove는 인두서의 캐비테이션 억제에 큰 효과가 있다는 것이 판명되었다. 따라서, 최적인 J-그루브 형상의 탐구 및 인두서와의 매칭에 대해서 검토할 필요가 있다.

Fig. 8은 인두서 A와 함께 3종류의 J-그루브를 각각 설치했을 때의 흡입성능의 비교를 나타내고 있다. J-그루브를 설치함에 의해 유량비  $\phi/\phi_{bep} = 0.6$  에서는 흡의 폭을 넓게 한 J-그루브 3이 양정 3 % 저하점의 저유량역으로의 성장이 가장 크게 나타나지만, 유량비  $\phi/\phi_{bep} = 1.4$  에서는 모든 J-그루브 설치의 경우에서 캐비테이션 억제효과가 나타나지 않고 있다.

Fig. 9에서는 인두서 장착 및 J-그루브 설치에 의한 흡입비속도 S의 변화를 보이고 있다. S는 식 (2)로 정의된다.

$$S = n\sqrt{Q}/(NPSH_R)^{3/4} \tag{2}$$

여기서,  $NPSH_R$ 로는 양정 3 % 저하점의 NPSH 값을 이용하였다. 흡입비속도는 통상 최고효율점에서 정의되는 무차원수이지만, 본 연구에서는 각 유량에서의  $NPSH_R$ 을 이용한 국소흡입비속도를 정의해서 흡입성능을 비교하였다.

Takamatsu 등<sup>(12)</sup>에 의하면 일반적으로 인두서를 장착함에 따라서 최고효율점에서의 흡입비속도는 상당히 향상하는 것으로 알려져 있지만, Fig. 9(a)에 의하면 최고효율점에서 모든 인두서에서 흡입성능의 향상이 그렇게 크지 않을 뿐만 아니라 과대유량에서는 인두서 A와 C의 경우 오히려 흡입성능을 저하시키고 있다. 이러한 결과는 인두서출구에서의 흐름이 최고효율점 유량에서도 큰 선회를 가지기 때문이며<sup>(13)</sup>, 펌프의 주임펠러 입구흐름이 과대유량시의 상태와 같이 임펠러 블레이드의 압력면측에서 캐비테이션이 발생하는 것이 원인으로 판단된다. 따라서, 블레이드의 각도를 크게 설계한 평판헬리컬인두서 C는 펌프 주임펠러의 흡입성능 향상에 기여하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나, 본 연구의 목적은 여러 형상의 인두서에 대해서 J-그루브를 설치하여 그 효과를 검토하는 것이므로, 인두서 자체의 성능 보다는 J-그루브에 의한 효과를 중점적으로 고찰하였기 때문에 낮은 흡입성능을 가진 인두서에 대해서도 J-그루브의 효과를 확인할 필요성이 있기 때문에 본 연구에 포함시켰다. 유량비  $\phi/\phi_{bep} < 1.0$  에서는 인두서의 장착에 의해 흡입비속도가 상당히 향상하기 때문에 인두서의 효과가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 인두서 B가 전유량역에서 비교적 양호한 흡입성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9(b)는 인두서 A와 함께 J-그루브를 설치했을 경우의 흡입비속도를 나타내고 있다. J-그루브의 상류측 ( $L_1$ )이 없는 J-그루브 3은 저유량역에서 인두서만 장착했을 경우에 비해서 흡입비속도가 비약적으로 향상하여 유량비  $\phi/\phi_{bep} = 0.6$  에서는  $S = 3400$ 를 얻을 수 있

었다. 한편, 상류측까지 흡을 늘린 J-그루브 1 및 2에서는 비교적 고유량까지 그 효과를 발휘하고 있기 때문에 상류측의 흡 길이가 흡입성능 향상에 큰 영향을 미치는 파라미터인 것을 알 수 있다.

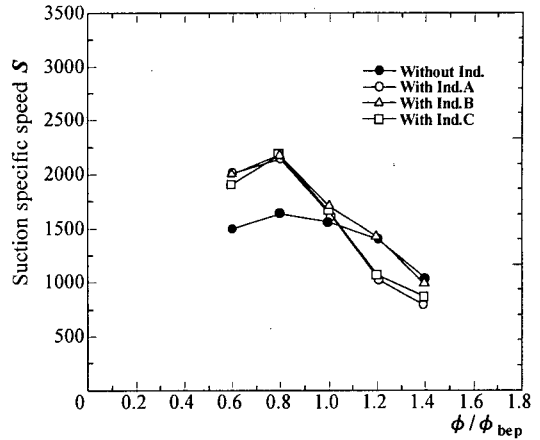
Fig. 9(c)는 각 인두서와 J-그루브 1의 조합에 의한 흡입비속도  $S$ 를 인두서를 장착하지 않은 주입펠러 단독의 경우의  $S$ 에 대한 비로서 나타내고 있다. 유량비  $\phi/\phi_{bep} \leq 1.0$ 에서 인두서 B 혹은 C와 J-그루브 1과의 조합에 의해 주입펠러 단독의 경우에 대해서 1.6배 정도의 대폭적인 흡입비속도의 향상이 달성되었음을 알 수 있다. 특히, 인두서 B와 J-그루브 1의 조합이 전유량역에서 가장 양호한 흡입성능의 향상을 보이고 있으며, 유량비가  $\phi/\phi_{bep} = 1.2$ 에서도 흡입비속도가 향상되고 있다.

이상으로 결과로 부터 후퇴 스위프를 채용한 인두서와 J-그루브를 조합시킴에 의해 과대유량역에서도 흡입성능을 향상시키는 것이 가능하고, J-그루브의 형상을 최적화시킴에 의해 흡입성능을 더욱 향상시키는 것도 가능함을 시사하고 있다.

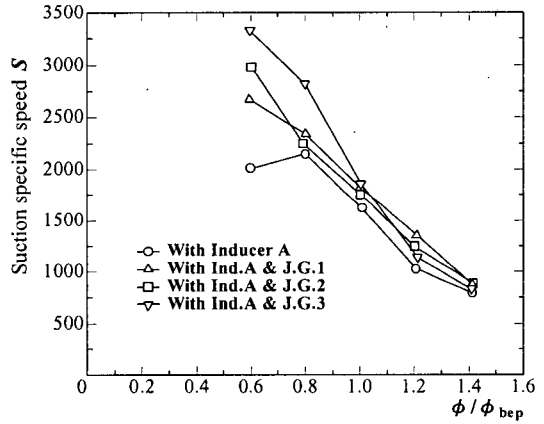
3.4 선회역류 캐비테이션 및 캐비테이션 서지의 억제

인두서 및 J-그루브에 의한 캐비테이션 억제효과를 확인하기 위해서 Fig. 10 및 11에 인두서 C만을 장착한 경우와 인두서 C와 J-그루브를 함께 설치했을 경우 인두서 입구에서의 압력변동 스펙트럼을 나타내고 있다. 횡축에 주파수  $f$ , 높이 방향으로 압력 변동  $\Delta C_p$ , 깊이 방향으로 캐비테이션수  $\sigma$ 를 나타낸다. 인두서 C만 장착했을 경우 Fig. 10(a)에 보이는 바와 같이 저유량측 ( $\phi/\phi_{bep} < 1.0$ )에서 선회역류 캐비테이션이 발생하고 있다. 선회역류 캐비테이션은 인두서와 같은 방향으로 회전하면서 주기적으로 인두서의 상류측까지 길게 성장하는 캐비테이션으로 J-그루브를 설치하면 Fig. 11(a)에 보이는 바와 같이 선회역류 캐비테이션을 거의 완전하게 억제할 수 있다. J-그루브는 본래 선회역류를 억제시키기 위한 장치<sup>(3)</sup>로서 고안되었기 때문에 이러한 종류의 캐비테이션 억제에는 특히 효과적이다. 그러나, J-그루브를 설치함에 따라 Fig. 11(b)에 나타나는 바와 같이 최고효율점 부근에서 양정 급저하의 직전에 캐비테이션 서지가 발생하고 있다. 이와 같은 문제에 대해서도 J-그루브 2로 부터 흡의 폭을 12 mm로 넓은 J-그루브 4를 설치함에 의해 Fig. 11(c)에 보이는 바와 같이 캐비테이션 서지를 거의 완전하게 억제할 수 있음이 판명되었다.

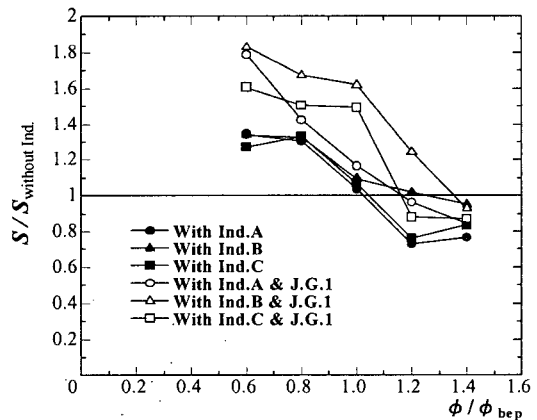
Fig. 12는 선회역류 캐비테이션의 발생[Fig. 12(a)] 및 J-그루브에 의한 억제 [Fig. 12(b)]의 결과를 나타내고 있다. 또한, Fig. 12(c)에는 흡의 폭이 비교적 넓은 J-그루브 4를 설치함에 의해 최고효율점 유량에서 발생하는 캐비테이션 서지를 억제한 결과를 나타내고 있다.



(a) Effect of inducer (without J-Groove)



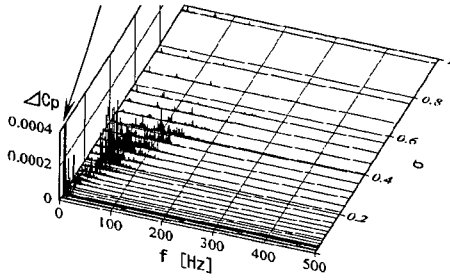
(b) Effect of J-Groove



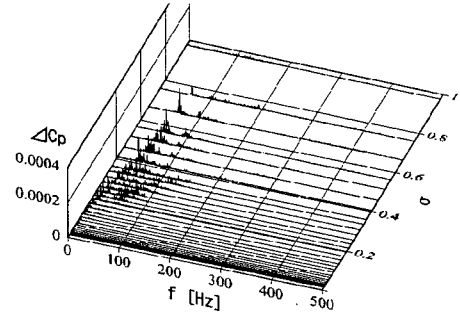
(c) Comparison of suction specific speed by inducer and J-grooves

Fig. 9 Improvement of suction specific speed by J-Groove

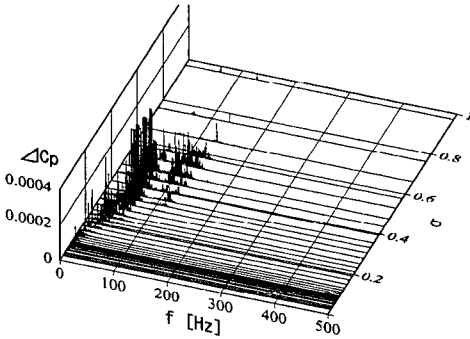
Rotating backflow cavitation



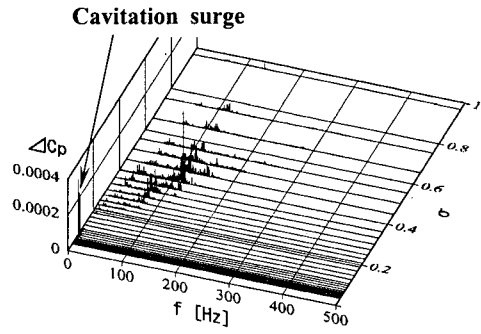
(a)  $\phi / \phi_{bep} = 0.6$



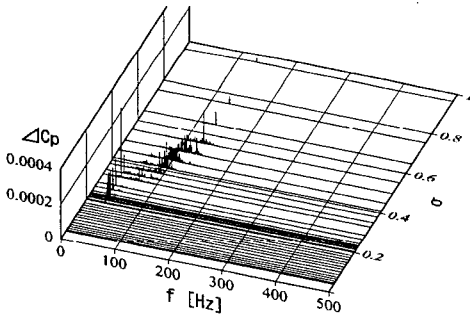
(a)  $\phi / \phi_{bep} = 0.6$  (J-Groove 2)



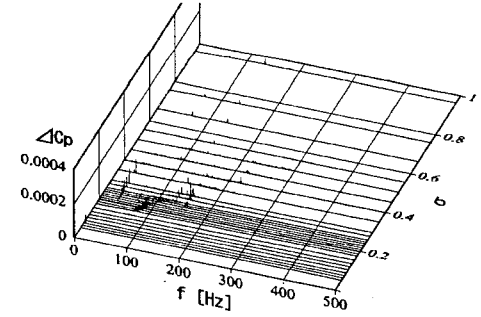
(b)  $\phi / \phi_{bep} = 1.0$



(b)  $\phi / \phi_{bep} = 1.0$  (J-Groove 2)



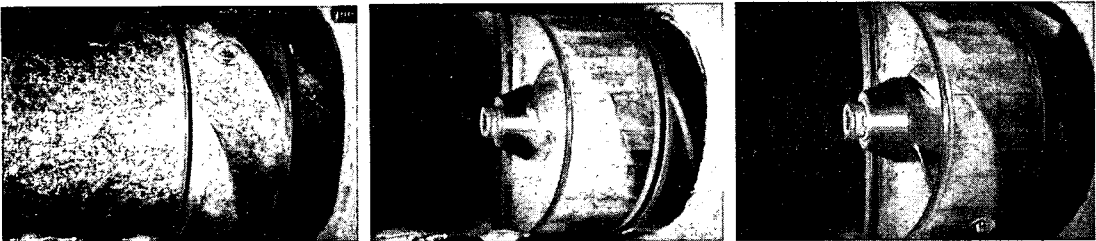
(c)  $\phi / \phi_{bep} = 1.4$



(c)  $\phi / \phi_{bep} = 1.0$  (J-Groove 4)

Fig. 10 Spectral analysis with Inducer C

Fig. 11 Spectral analysis with Inducer C and J-Grooves



(a) Without J-Groove ( $\phi / \phi_{bep} = 0.6$ )    (b) With J-Groove 2 ( $\phi / \phi_{bep} = 0.6$ )    (c) With J-Groove 4 ( $\phi / \phi_{bep} = 1.0$ )

Fig. 12 Suppression of rotating backflow cavitation and cavitation surge ( $\sigma = 0.05$ )



#### 4. 결론

(1) J-그루브는 인듀서의 흡입성능을 큰 폭으로 향상시킬 수 있고, 특히, 후퇴 스위프를 채용한 인듀서와의 조합에 의해 거의 전유량역에서 흡입성능을 향상시킬 수 있다.

(2) J-그루브에 의한 흡입성능의 향상은 특히, 저유량역에서 효과가 크다.

(3) 펌프의 주입펠러와 매칭이 불량한 인듀서를 채용할 경우 과대유량역에서 흡입성능을 오히려 저하시킬 수가 있으며, 이와 같은 경우에서도 J-그루브에 의해 흡입성능을 향상시킬 수 있다.

(4) J-그루브를 설치함에 의해 저유량역에서 발생하는 선회역류 캐비테이션을 거의 완전하게 억제할 수 있으나, 최고효율점 유량에서는 양정 급저하의 직전에 캐비테이션 서지를 발생시킬 수도 있다. 그러나, 이러한 문제점에 대해서도 J-그루브의 형상을 최적화함에 의해 캐비테이션 서지를 억제할 수 있다.

(5) J-그루브의 치수 형상은 상류측의 길이 및 폭이 흡입성능 개선에 대한 중요한 파라미터이다.

#### 참고문헌

- (1) Lakshminarayana, B., 1982, "Fluid Dynamics of Inducers - A Review," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 104, pp. 411~427.
- (2) Japikse, D., 2001, "Overview of Industrial and Rocket Turbopump Inducer Design," *Proc. CAV2001*, Session B7.001
- (3) Kurokawa, J., Saha, S. L., Matsui, J. and Kitahora, T., 2000, "Passive Control of Rotating Stall in a Parallel-Wall Vaneless Diffuser by Radial Grooves," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 122, pp. 90~96.
- (4) Saha, S. L., Kurokawa, J., Matsui, J. and Imamura, H., 2000, "Suppression of Performance Curve Instability of a Mixed Flow Pump by Use of J-Groove," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 122, pp. 592~597.
- (5) Saha, S. L., Kurokawa, J., Matsui, J. and Imamura, H., 2001, "Passive Control of Rotating Stall in a Parallel-Wall Vaned Diffuser by J-Grooves," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 123, pp. 507~515.
- (6) Tsujimoto, Y., Yoshida, Y., Maekawa, Y., Watanabe, S. and Hashimoto, T., 1997, "Observations of Oscillating Cavitation of an Inducer," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 119, pp. 775~781.
- (7) Imano, A. and Hashijume, N., 2001, "LE-7 Engine Turbo-pump and the Cause of Failure in H-II Rocket No. 8," *Turbomachinery (TSJ)*, Vol. 29, pp. 139~146.
- (8) Kamijo, K. and Yoshida, M., 1991, "Experimental Study of LE-7 LOX Pump Inducer," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 57, pp. 4023~4028
- (9) Fujii, A., Azuma, S., Yoshida, Y., Tsujimoto, Y., Horiguchi, H. and Watanabe, S., 2002, "Higher Order Rotating Cavitation in an Inducer," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 68, pp. 1466~1473.
- (10) Tahara, H. and Manabe, A., 1984, "Influence of Inlet and Outlet Angles of Inducer on Improvement in Suction Performance of Centrifugal Pump," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 50, pp. 2619~2624.
- (11) Bakir, F., Kouidri, S., Noguera, R. and Rey, R., 2003, "Experimental Analysis of an Axial Inducer Influence of the Shape of the Blade Leading Edge on the Performances in Cavitating Regime," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 125, pp. 293~301.
- (12) Takamatsu, Y., Furukawa, M. and Ishizaka, K., 1978, "Suction Performance Improvement of a Centrifugal pump by Helical Inducer," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 44, pp. 960~969.
- (13) Takamatsu, Y., Furukawa, M., Ishizaka, K. and Nikamoto, H., 1978, "Outlet Flow of a Planar Helical Inducer," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 44, pp. 950~959.