

J-그루브에 의한 인듀서의 캐비테이션 억제

쿠로카와준이치* · 최영도*

Suppression of Cavitation in Inducer by J-Groove

Junichi Kurokawa* and Young-Do Choi*

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

ABSTRACT

Cavitation is the most serious problem caused in developing high-speed turbopump, and use of an inducer is often made to avoid cavitation in main impeller. Thus, the inducer always operates under the worst condition of cavitation. If it could be possible to control and suppress cavitation in the inducer by some new device, it would also be possible to suppress cavitation occurring in all types of pumps. The purpose of our present study is to develop a new effective method of controlling and suppressing cavitation in an inducer using shallow grooves, named as "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 in the axial direction at the inlet of the inducer. 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 fully suppressed by installing J-Groove.

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⁽¹⁾⁽²⁾가 이루어졌으며, 인듀서의 형상을 최적화시킴에 의해 흡입성능의 개선을 도모하였다. 그러나, 캐비테이션은 물리적인 현상이기 때문에 그 발생을 완전히 억제할 수가 없으며, 펌프내부에

서 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⁽³⁾⁻⁽⁵⁾과 Kosyna 등⁽⁶⁾은 터보기계에서 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 각 운동량 억제작용에 의해 선회흐름에 수반하는 여러가지 이상유동현상을 억제하는 기능 외에 또 다른 기능, 즉 고압부의 액체를 저압부로 운반해서 저압부의 압력을 높이는 송압기능을 가지는 것이 판명되었다. 이 송압기능을 이용하면 캐비테이션의 발생 그 자체를 내부적으로 제어하여 억제할 수 있는 가능성이 크다.

한편, 인듀서는 유로폐색이 적고 캐비테이션의 발생

* 요코하마국립대학 대학원 공학연구원

책임저자 E-mail : ydchoi@mach.me.ynu.ac.jp

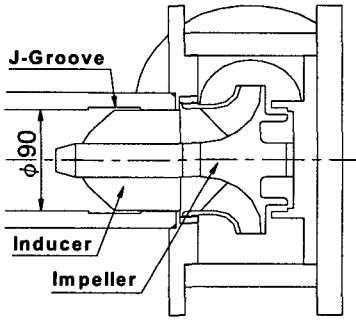


Fig. 1 Schematic view of test pump

에 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⁽⁷⁾에 의하면 선회 캐비테이션이나 캐비테이션 서지 등 여러가지 형태의 캐비테이션이 인듀서에서 발생하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 캐비테이션의 발생에 따른 문제점들⁽⁸⁾에 대해서 J-Groove는 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 m³의 탱크를 포함한 밀폐회전형의 실험장치를 이용하여 실험을 실시하였으며, 펌프로서는 Fig. 1에 나타내는 비속도 300 [m, m³/min, min⁻¹]의 원심펌프 및 인듀서를 이용하여 성능시험 및 흡입성능시험을 실시하였다. 흡입성능시험에서는 수돗물을 필터로 여과하여 탱크 내압을 내린 후 10시간의 탈기운전을 실시하여 용존산소량을 3 ppm 이하가 되도록 조정 한 후에 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 인듀서의 제원을 Fig. 2 및 Table 1

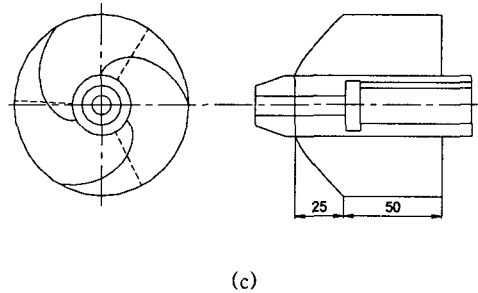
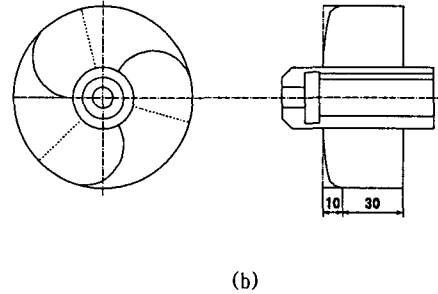
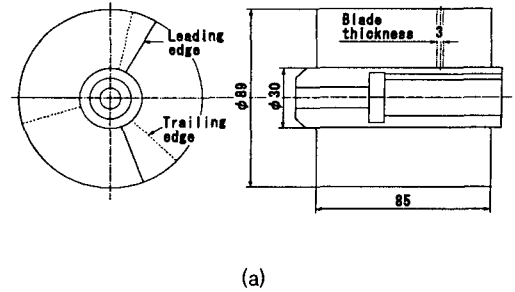


Fig. 2 Test inducers : (a) inducer A, (b) inducer B and (c) inducer C

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

에 나타내고 있으며, 3개의 날개를 가진 3종류의 평판 헬리컬인듀서를 이용하였다. 케이싱은 아크릴수지로 제작하여 내부를 가시화할 수 있게 하였다. 케이싱 벽면상에는 14개의 정압공을 인듀서의 축방향으로 설치하여 인듀서입구 전후의 압력상승을 확인할 수 있도록 하였다.

Japikse⁽²⁾와 Tahara 등⁽⁹⁾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 평판 헬리컬인듀서를 이용하였다.

평판헬리컬인듀서는 유입흐름이 무충돌 유량시에 무작용이 되므로 출구각을 인듀서 A와 거의 동일하게 유지하여 블레이드에 다소의 휘어 짐을 적용한 것(인듀서 B)에 대해서도 실험을 하였다. Japikse⁽²⁾는 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. 또한, 대유량역에서의 흡입성능을 개선할 목적으로 인듀서 블레이드 입구와 출구각도가 상대적으로 크게 설계된 인듀서 C에 대해서도 실험을 실시하였다.

캐비테이션의 억제를 위해서 사용될 J-그루브는 Fig. 3 및 Table 2에 나타난 바와 같이 인듀서 케이싱에 홈의 깊이를 2 mm로 고정시키고 폭 및 길이를 변화시킨 4종류의 사각형 단면을 가진 홈이다. 각 J-그루브의 상류 길이(L1)는 저유량시에 인듀서 입구에서 발생하는 예선회 및 인듀서의 블레이드 상류로 뻗어나가는 캐비테이션을 억제하기 위해서 필요한 길이이며⁽⁴⁾, 하류 길이(L2)는 인듀서 유로내에서 발생하는 캐비테이션을 억제하기 위한 길이이다. 실험은 회전수 2,000 min⁻¹에서 실시하였으며, 인듀서의 블레이드 끝단 원주속도에 근거하는 레이놀즈수는 $Re=4.2 \times 10^5$ 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 L2의 선정이 중요하며, 고압부의 유체를 저압부로 이송시키기 위해서는 J-그루브를 압력구배가 가장 큰 부분에 설치할 필요가 있기 때문에, 범용

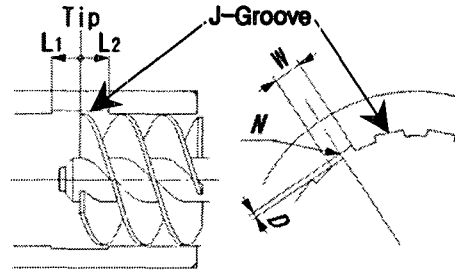


Fig. 3 J-Groove mounted on a casing wall

Table 2 Parameters of J-Groove

J-Groove	Number N	Width W [mm]	Depth D [mm]	Length L [mm]	
				Up-stream L1	Down-stream L2
1	32	6	2	20	20
2	16	10	2	20	20
3	16	10	2	0	20
4	16	12	2	20	20

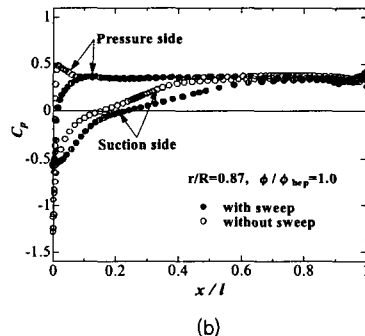
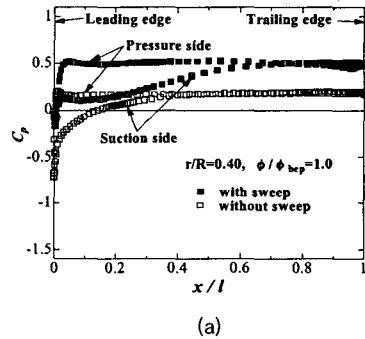


Fig. 4 Calculated pressure distribution along a blade surface : (a) $r/R=0.40$ (nearly blade hub) and (b) $r/R=0.87$ (nearly blade tip)

수치해석 코드인 CFX-TASCflow를 이용한 검토결과로부터 벽면을 따라서 흐름방향의 압력구배가 크게 나타나는 범위는 $0 < x/l < 0.5$ 에 위치하는 것으로 판명되었기 때문에 J-그루브의 하류 길이를 Table 2에 보인 바와 같이 $L2 = 20 \text{ mm}$ 로 정하였다. 또한, J-그루브는 케이싱 벽면상에 설치하기 때문에 인두서의 블레이드 끝단 부근에서 발생하는 캐비테이션에 대해서는 억제효과가 클 것으로 기대할 수 있지만, 허브 부근에서 발생하는 캐비테이션에 대해서는 억제하기가 어렵다. 따라서, 인두서 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, Fig. 4에 보이는 바와 같이 인두서 C에 대한 최고효율점 ($\phi \phi_{bep}=1.0$)에서의 수치해석 결과에 의하면 후퇴 스위프를 설치하지 않았을 경우에는 블레이드 전연에서의 압력저하가 반경 방향의 넓은 위치에 분포하지만, 후퇴 스위프를 설치함에 의해 압력저하 부분이 블레이드의 끝단 부근에 집중하여 허브 부근에서의 캐비테이션 발생을 회피할 수 있을 것으로 기대되며, 후퇴 스위프와 J-그루브를 함께 설치하면 J-그루브에 의한 인두서 입구 블레이드 끝단에서의 압력상승에 의해 캐비테이션 발생을 억제할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 펌프 성능

Fig. 5는 비캐비테이션시의 J-그루브의 설치에 의한 성능곡선의 변화를 보이고 있으며, J-그루브를 설치함에 따라 저유량 및 최고효율점유량 부근에서 양정 및 축동력이 조금 증가하였지만, 효율은 전유량역에서 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서, J-그루브를 설치하더라도 펌프의 성능을 저하시키지 않고 캐비테이션의 억제가 가능하다는 것을 알 수 있다.

3.2 J-그루브에 의한 흡입성능의 개선

Fig. 6은 펌프의 흡입성능을 보이고 있으며, 유효흡입헤드 $NPSH = (p_s - p_v) / \rho g + v_s^2 / 2g$ 에 대한 펌프양정 H 의 변화를 나타낸다. 또한, 흡입성능의 판단을 위해

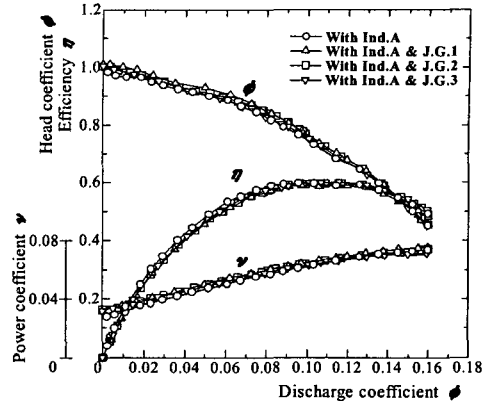


Fig. 5 Effect of J-Groove

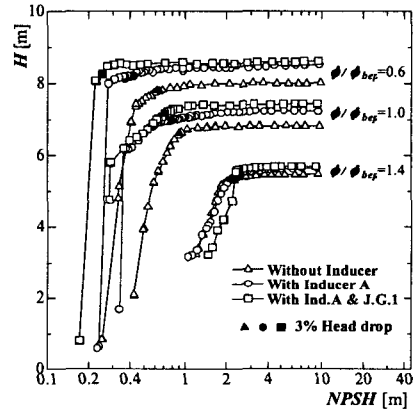


Fig. 6 Improvement of suction performance by inducer and J-Groove

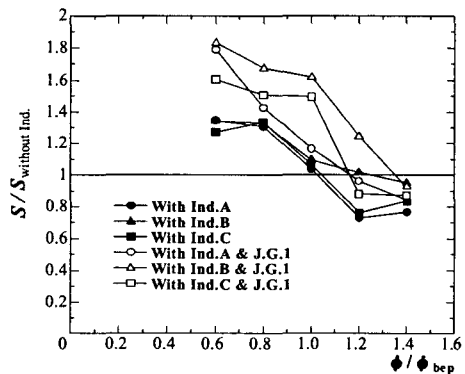


Fig. 7 Improvement of suction specific speed by J-Groove

서는 종래로부터 자주 사용되어 온 3% 양정저하점의 $NPSH$ 를 이용하였다. 인두서를 장착하지 않은 경우에 비해서 인두서를 장착함에 따라 저유량역 ($\phi\phi_{bep}=0.6$)에서는 저 $NPSH$ 측까지 높은 양정을 유지하며, 여기에 J-그루브를 설치할 경우 보다 낮은 $NPSH$ 측까지 높은 양정을 유지함을 알 수 있다. 그리고, 최고효율점 ($\phi\phi_{bep}=1.0$)에서도 $NPSH$ 의 값은 작지만 저유량역에서와 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서, 이러한 결과로부터 J-그루브를 설치하면 3% 양정저하점이 저 $NPSH$ 측으로 이동하여 흡입성능이 개선함을 알 수 있다. 그러나, 과대유량역 ($\phi\phi_{bep}=1.4$)에서는 인두서 및 J-그루브의 장착 유무에 상관없이 흡입성능의 변화가 거의 없으며, 그 원인으로는 과대유량역에서는 인두서에 의한 압력상승이 적으며, 또한, J-그루브를 설치하더라도 그루브내를 통과하는 역류의 압력이 낮고 그 유량이 적기 때문에 인두서 입구에서의 압력상승이 거의 이루어지지 않기 때문으로 판단된다.

J-Groove가 인두서에서 발생하는 캐비테이션의 억제에 큰 효과가 있다는 것이 판명됨에 따라 흡입성능 향상에 대한 J-그루브의 최적형상을 검토하기 위하여 인두서 장착 및 J-그루브 설치에 의한 흡입비속도 S ($=n\sqrt{Q}/(NPSH_R)^{3/4}$)의 변화를 검토할 필요가 있으며, 인두서 A에 대하여 J-그루브 1, 2 그리고 3을 조합하여 흡입성능을 검토한 결과 상류측 길이 및 그루브의 폭이 흡입성능 향상에 영향을 미치는 중요한 파라미터임을 확인하였다.

또한, Fig. 7에서 인두서를 장착하지 않은 주임펠러 단독의 S 에 대하여 각 인두서와 J-그루브 1의 조합에 의한 흡입비속도 S 의 비를 나타내고 있다. 또한, 흡입비속도를 구하기 위하여 필요유효흡입헤드 $NPSH_R$ 값으로는 3% 양정저하점의 $NPSH$ 를 이용하였다. 흡입비속도는 통상 최고효율점에서 정의되는 무차원수이지만, 본 연구에서는 각 유량에서의 $NPSH_R$ 를 이용한 국소흡입비속도를 정의해서 흡입성능을 비교하였다.

최고효율점 이하의 유량 ($\phi\phi_{bep}\leq 1.0$)에서는 인두서 B 또는 C와 J-그루브 1과의 조합에 의해 주임펠러 단독의 경우에 대해서 1.6배 정도의 대폭적인 흡입비속도의 향상이 가능함을 알 수 있다. 특히, 인두서 B와 J-그루브 1의 조합은 전유량역에서 가장 양호한 흡입성능의 향상을 보이고 있으며, 유량비 $\phi\phi_{bep}=1.2$ 의 과대유량역에서도 흡입비속도가 향상되었다.

이상의 결과는 후퇴 스위프를 채용한 인두서와 J-

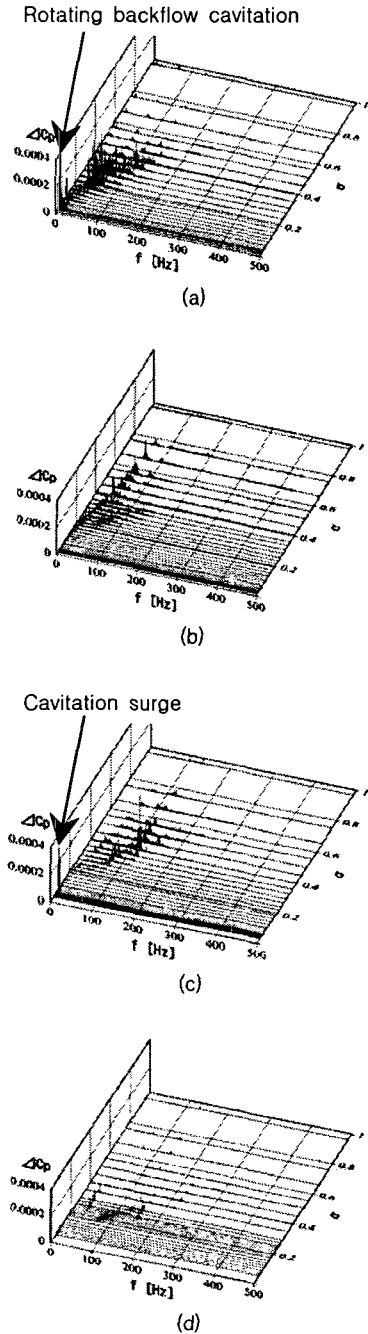


Fig. 8 Suppression of rotating backflow cavitation and cavitation surge by J-Groove : (a) $\phi\phi_{bep}=0.6$ (no groove), (b) $\phi\phi_{bep}=0.6$ (J-Groove 2), (c) $\phi\phi_{bep}=1.0$ (J-Groove 2) and (d) $\phi\phi_{bep}=1.0$ (J-Groove 4)

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

인듀서 및 J-그루브에 의한 캐비테이션 억제효과를 확인하기 위해서 Fig. 8에 인듀서 C만을 장착 한 경우와 인듀서 C와 J-그루브를 함께 설치했을 경우 인듀서 입구에서의 압력변동 스펙트럼을 나타내고 있다. 횡축에 주파수 f , 높이 방향으로 압력 변동 ΔC_p , 깊이 방향으로 캐비테이션수 σ 를 나타낸다. 인듀서 C만 장착했을 경우 Fig. 8(a)에 보이는 바와 같이 저류량측 ($\phi_{imp} < 1.0$)에서 선회역류 캐비테이션이 발생한다. 선회역류 캐비테이션은 인듀서와 같은 방향으로 회전하면서 주기적으로 인듀서의 상류측까지 길게 성장하는 캐비테이션으로 J-그루브를 설치하게 되면 Fig. 8(b)에 보이는 바와 같이 거의 완전하게 억제할 수 있다. 그러나, J-그루브를 설치함에 따라 Fig. 8(c)에 나타나는 바와 같이 최고효율점 부근에서 양정 급저하의 직전에 캐비테이션 서지가 발생하고 있다. 이와 같은 문제에 대해서도 J-그루브 2로부터 홈의 폭을 넓힌 J-그루브 4를 설치함에 의해 Fig. 8(d)에 보이는 바와 같이 캐비테이션 서지를 거의 완전하게 억제할 수 있음이 판명되었다.

4. 결론

인듀서에서 발생하는 캐비테이션을 억제하여 흡입성능을 개선하기 위한 방법으로서 J-그루브를 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) J-그루브는 후퇴 스위프를 채용한 인듀서와의 조합에 의해 거의 전유량역에서 흡입성능을 대폭 향상시킬 수 있다.

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

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

(4) 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) Kosyana G., Goltz I. and Stark, 2005, "Flow Structure of an Axial-Flow Pump from Stable Operation to Deep Stall," Proc. ASME FEDSM2005, Paper No. FEDSM2005-77350.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.