

원심펌프 벌류트 혀의 균열 원인분석 및 건전성 평가

박치용* · 김진원* · 김양석*

Integrity Evaluation and Root Cause Analysis of Cracks at the Volute Tongue of Centrifugal Pump

Chi-Yong Park*, Jin-Weon Kim*, Yang-Seok Kim*

Key Words: Pump(펌프), Volute tongue(벌류트 혀), Integrity Evaluation(건전성 평가), Crack(균열)

ABSTRACT

This paper provides integrity evaluation and root cause analysis for defects observed at volute tongue, or cutwater, of the operating centrifugal pump in power plant. The cause of the cracks are analyzed and reviewed from the viewpoint of the operation and maintenance of the pumps, and the sample obtained from the cracked volute tongue of the pump are examined. At first, in-situ hardness test and microstructure examination were performed to understand the cause of cracking at volute tongue. The evaluation of structural integrity and the possibility of the crack propagation is also evaluated. Cracks were typical intergranular cracking and propagated along with prior austenite grain boundary. At casing volute tongue, the hardness was higher than ASTM requirement and a large amount of intergranular Cr carbide was precipitated. These were due to high C content in material. P content was also higher than ASTM requirement. Therefore, Cr carbide precipitation and P segregation at grain boundary, caused by higher C and P content in material, resulted in intergranular cracking of casing volute tongue. This procedure for integrity evaluation and root cause analysis is used to guide, and support the pump designer and manufacturer's material selection and process design to avoid a costly, unplanned outage of plant.

1. 서 론

펌프의 건전성은 성능적인 측면에서 뿐만 아니라 구조적 관점에서 건전성을 유지하여야 장기간 지속적인 운전성을 보장할 수 있다. 펌프 성능의 유지 뿐만 아니라 구조적 관점에서 그 건전성을 확보하여 운전중인 펌프의 기능을 유지하기 위하여 발전소에 사용하는 펌프는 예방정비 기간에 정기 검사를 수행하며,

검사에서 결함이 발견되면 운전 성능의 확인 및 구조적 건전성을 평가한다. 본 논문에서는 이중 벌류트로 구성된 축방향 양쪽흡입, 수평형 1단 원심펌프의 벌류트 케이싱 입구 부분, 즉 벌류트 혀(Volute tongue, Volute lip, or Cutwater vane)에서 발생된 균열에 대한 원인 분석 및 건전성 평가에 관한 것이다.

펌프는 임펠러의 회전에 의해 발생한 원심력을 이용하여 유체에 압력과 속도를 주고, 케이싱에서 속도 에너지의 일부를 압력으로 변환시킴으로써 유체를 이동시킨다. 그러나 이들 펌프의 케이싱과 임펠러는 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 모두 주조에 의해 제

* 한국전력공사 전력연구원
E-mail : cypark@kepri.re.kr

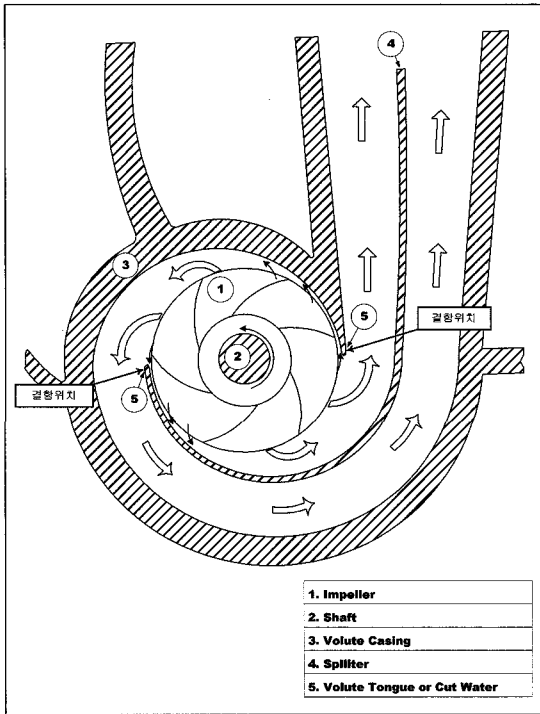


Fig. 1 Sectional diagram of the centrifugal pump and cracked points

작되며, 제작과 설계 등의 원인에 의해 손상되는 사례가 비교적 자주 보고되고 있다.^(1,2) 발전소의 2중 벌류트형 원심펌프 중 일부 케이싱 벌류트 혀에서 발견된 작은 표면균열은 모두 동일한 제작사에서 공급된 동일 모델 및 비슷한 조건에서 운전되는 펌프에서 발견되었다. 균열이 발생한 펌프는 과냉각수 조건에서 운전되고 있다. 일반적으로 펌프 케이싱에서 벌류트 혀는 주요 검사 부위가 아니므로 균열이 발견되기 전까지 검사에 대한 이력이 없는 부분이다. 따라서 발견된 균열들이 설치 초기 단계에서부터 존재한 것인지 운전에 의한 기기 열화로 생성된 것인지 분명하지 않은 경우가 대부분이다. 디퓨저가 없는 벌류트형의 원심펌프 케이싱에서 벌류트 혀는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 임펠러를 통해 흡입된 유체가 펌프 케이싱 밖으로 나가는 것을 용이하게 해주는 일종의 안내깃이다. 펌프 케이싱이 일체형으로 제작되는 경우 벌류트 혀는 매우 국부적인 곳에 위치하므로 제작성이 떨어지고, 열처리시 잔류응력과 임펠러의 회전에 의한 유동력을 많이 받을 수 있는 부분이다. 따라서 벌류트 혀에서의 결함은 여러 가지 원인들이 복합적으로 작용하여 발생할 것이다. 그러나 케이싱의 벌류트 혀는 부분적인 교체가 불가능한

부분이므로, 펌프 케이싱 교체시 상당한 경비와 인력이 소요된다. 따라서 기기 건전성 평가에 기초한 교체가 필요하며, 이를 위해서는 펌프 케이싱에 존재하는 결함의 생성 원인을 밝히고, 운전에 따른 성장 거동을 예측하는 것이 선행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 펌프의 구조건전성 평가를 위해, 먼저 결함생성 원인을 재질 분석과 파면 관찰을 통해 규명하고, 벌류트 혀의 균열 안정성을 평가하였다. 이를 통하여 펌프의 제작 및 설계시에 반영될 수 있도록 하고자 한다.

2. 건전성 평가 방법

2.1 결함 원인 분석 및 건전성 검토 절차

기기 및 구조물에 미세균열이 발견되면 균열 발생 원인 분석, 균열 성장 여부 판단 및 기기의 계속 사용 여부를 결정하는 건전성 평가가 수행된다.

Fig. 2와 같이 펌프 벌류트 혀 끝단 부위에서 미세 균열이 발견되었을 때 건전성 평가는 Table 1에 보인 바와 같이 설계, 운전 및 정비 측면의 검토, 강도 및 응력 측면의 검토, 피로 및 부식 측면에서의 검토에 의한 균열 원인 분석과 함께 균열 안정성에 대한 평가가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 설계, 운전, 강도 및 과대응력 측면에서의 결함 유발 가능성 검토와 재질분석을 통한 결함 원인 분석을 실시하였고, 또한 균열 안정성 평가를 병행하여 수행하였다.

2.2 결함유발 가능성 검토

결함 유발 가능성 검토는 Table 1에서 제시된 각 경우에 대하여 차례로 수행하였다. 육안 검사 결과 열 피로에 의한 손상 흔적은 발견할 수 없고, 또한 부식에 의한 흔적도 발견할 수 없었다. 또한 정비 이력도 없기 때문에 정비 불량에 의한 균열 발생 원인도 없었다.

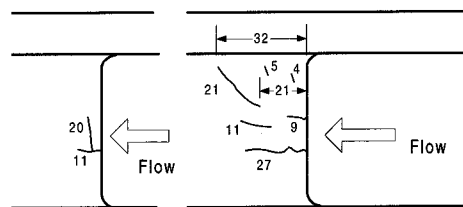


Fig. 2 Crack shapes at the volute tongue of some pumps (unit : mm)

Table 1 General guides for failure diagnosis

Items	Failure Causes	Factors	Execution Methodologies
design	design defects	shortage in technology/ test	review documents
operation/ maintenance	-	observance of rules	review experience & similar events
strength lack	materials	manufacturing/ degradation	microstructure examination
over stress	constraint op. stress	temp./pressure	internal pressure/ stress analysis
fatigue	vibration	Casing vibration	measurement vib./ experiences
	thermal fatigue	variation of temp.	investigation of fracture surface & failure shape
corrosion	SCC	environment /stress	visual inspection/ investigation of fracture surface & microstructure
	whole C.	"	
	local C.	"	

설계 및 운전 측면에서 균열 발생을 일으키는 것은 펌프의 이상 현상으로, 설계상의 오류를 포함하여 펌프 운전조건의 악화 또는 정비불량으로 인하여 발생할 수 있는 원심펌프 이상 현상의 대표적인 사례는 유체 이송 불능, 유량 또는 수두 불충분, 기동후 프라이밍(Priming) 상실, 소요 동력 과다, 스테어링 박스의 누설 과다, 패키징 수명 단축, 펌프 진동 또는 소음 과다, 베어링 수명 단축 및 펌프 과열 등이다. 이와 같은 이상현상이 발생하였을 경우 일차적으로 검토되어야 할 사항들⁽¹⁾을 확인하였다. 이 중에서 유체 이송 불능이나 기동후 프라이밍(Priming) 상실, 펌프 진동 또는 소음 과다, 펌프 과열 등이 발생한 것으로 판단되지 않으며 수두가 불충분할 경우 자동으로 펌프의 속도가 조절되기 때문에 이로 인하여 벌류트 허의 결함이 발생하지는 않을 것으로 판단되었다. 또한, 유량이 불충분한 원인 중에는 임펠러 내 이물질, 마모 링의 마모, 임펠러 손상, 케이싱 개스킷 손상 등이 있으나 이를 벌류트 허의 결함과 직접 관련짓기는 어려우며, 저유량에서 운전할 경우 캐비테이션을 비롯한 펌프 운전환경이 악화될 수 있으나 이는 정속으로 운전하고 있는 상황에서의 문제이며 정상운전시 자동으로 속도가 제어되는 펌프이기 때문에 정상운전중에 펌프의 손상을 가져올 만한 원인 제고를 하지는 않았을 것으로 판단되었다. 부

품교환의 실기(失期) 등 정비 불량에 의한 기타 다른 이상현상도 케이싱 벌류트 허의 결함과 관련이 있을 것으로 판단하기는 어려워서 설계, 운전 및 정비와 관련된 결함 발생은 없는 것으로 판단되었다. 따라서 발견된 미세균열은 일반적인 손상기구에 의한 피로 발생 가능성은 낮아 추가적으로 정밀 재질분석을 하였다.

2.3 재질 및 재질분석

2.3.1 펌프 케이싱 재료

결함이 발견된 펌프 케이싱은 주조 스테인레스강인 ASTM A487 CA6NM으로 제작되었다. 일반적으로 이 재질은 주조성과 용접성이 좋으며 인성과 강도가 높고, 부식에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ ASTM A487 CA6NM 스테인레스강은 주조 후 오스테나이트화 및 템퍼링을 통해 조직을 안정화시킨 재료로서 마르텐사이트 조직을 가지며, 제조과정에 적용되는 열처리 온도와 시간은 Table 2에 나타난 것과 같다. Table 3 및 Table 4는 CA6NM의 화학조성과 기계적 물성치에 대한 ASTM의 요건을 나타낸 것이다.

Table 2 Heat treatment process for CA6NM stainless steel in ASTM⁽⁴⁾

	Austenizing	Tempering	Quenching Temp.	Quenching Medium
Temp. (°C)	1010	565~620	below 95°C	Air cooling
Time, hr	3	3		

Table 3 Chemical composition of CA6NM stainless steel in ASTM⁽⁴⁾

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	W
w/o	0.06	1.0	0.04	0.03	1.0	3.5 ~4.5	11.5 ~14.0	0.4 ~1.0	0.5	0.1

Table 4 Material properties of CA6NM stainless steel in ASTM⁽⁴⁾

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	RA (%)	Hardness (Hv)
690	520	17	35	255

2.3.2 분석 절차

펌프 케이싱 벌류트 혀의 결함을 분석하기 위해 크게 두 가지 형태의 시험을 수행하였다. 먼저 현재 설치되어 있는 펌프 케이싱으로부터 비파괴적인 방법으로 미세조직과 경도를 측정하였으며, 다음으로 펌프 케이싱으로부터 일부 재료를 채취하여 실험실에서 파면과 재질 특성을 분석하였다. 케이싱 벌류트 혀, 펌프 케이싱의 외벽 및 벌류트 혀에서 약 30cm 정도 떨어진 내벽에서 레프리카를 채취하고 휴대용 경도기를 이용하여 비커스(Vickers) 모드로 경도를 측정하였다.

실험실 시험을 위한 재료는 펌프 벌류트 혀에서 채취하였으며, 펌프 케이싱 내부의 유동 안정성을 고려하여 양쪽의 벌류트 혀에서 동일한 크기의 재료를 절단하였다. 이들 재료를 이용하여 파면, 미세조직, 화학 조성 등을 분석하였으며, 재료의 기계적 성질을 평가하기 위해 비커스 미세경도를 측정하였다. 파면 특성은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, SEM에 장착되어 있는 X-ray를 이용하여 파면에서 화학성분의 분포를 함께 분석하였다. 미세조직은 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였으며, X-ray를 이용하여 결정립내와 입계에 존재하는 상들의 화학성분을 분석하였다. 또한 오제 분석을 통해 불순물에 의한 결정립계 편석과 입계에 존재하는 상들의 종류를 분석하였다. 한편, 재료의 전체적인 화학조성을 확인하기 위해서 화학분석도 수행하였다.

2.3.3 분석 시험 결과

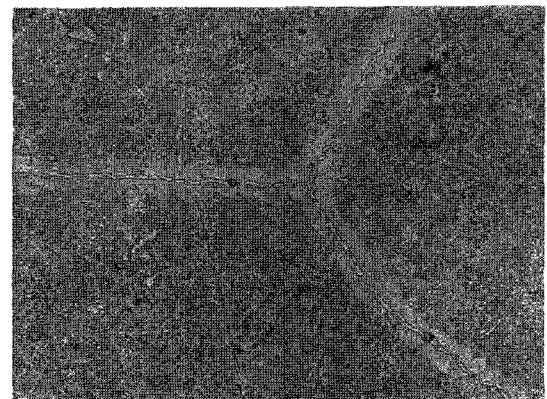
Fig. 3은 현장에서 채취한 Replica 및 채취 시편으로부터 얻은 케이싱 균열 주위의 미세조직으로 Fig. 3 (a) 및 (b)는 벌류트 혀 부분이고, Fig. 3(c)는 벌류트 혀에서 약 30cm 정도 떨어진 내벽의 균열 및 조직을 나타낸 것이다. 균열이 발생한 벌류트 혀의 미세조직은 전형적인 ASTM CA6NM과 달리 결정립계에서 입내와는 다른 새로운 상들이 관찰되고 있다. 특히 Fig. 3(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 벌류트 혀의 미세조직은 비정상적으로 큰 결정립을 보이고 있으며, 얇은 띠 형태의 상들이 입계에서 관찰되었다. 반면, Fig. 3(c)와 같이 케이싱 외부와 벌류트 혀에서 멀리 떨어진 케이싱 내부 미세조직은 전형적인 ASTM CA6NM의 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 한편 모든 균열은 Replica의 채취 위치와 관계없이 모두 결정립계를 따라 진전하고 있다.

현장에서 측정된 경도를 측정 위치에 따라 관찰한

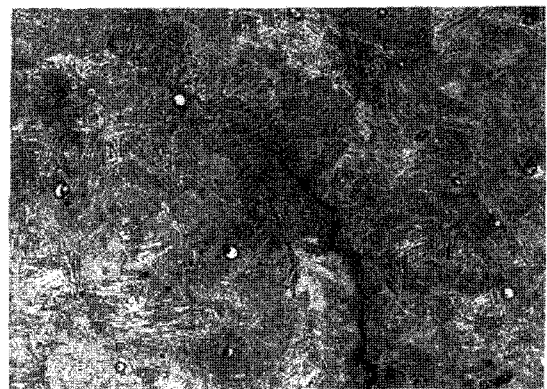
결과 케이싱 외부와 벌류트 혀에서 멀리 떨어진 위치에서 측정된 경도는 250~260 Hv 정도의 값인 데 벌류트 혀에서 측정된 경도는 각각 291~356 Hv의 값을



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Microstructure and crack shape of volute tongue (a) volute tongue specimen (b) Replica result on volute tongue (c) Volute tongue surroundings

나타내었다. 이 값들을 Table 4에서 주어진 ASTM 최대 허용경도(255 Hv)와 비교하면, 벌류트 혀에서 밀리 떨어진 영역의 경도는 허용치를 만족하고 있으나, 벌류트 혀에서의 경도는 허용 기준보다 상당히 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

가동을 위해 설치되어 있는 펌프 벌류트 혀로부터 일부 재료를 채취하여 파면 분석과 기타 재질 분석을 수행하였는데, 채취된 재료에 내재된 균열의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 현장에서 채취된 레프리카(Replica)로부터 이미 파악된 바와 같이 파면은 마르텐사이트 스테인레스강의 전형적인 입계파면을 볼 수 있으며, 대부분의 파면들은 심하게 산화되어 있었지만 산화되지 않은 파면들도 일부 발견되었다. 따라서 대부분의 균열은 오래 전에 생성되어 성장하였으며, 최근에도 일부 균열들이 생성되고 있다는 것을 알 수 있다. 한편 산화되지 않은 균열의 파면을 SEM에 장착된 X-ray로 화학성분 분포를 측정된 결과 국부적으로 Cr의 함량이 높게 나타났으며, Cr의 함량이 높은 영역에서 Fe의 함량이 낮게 나타나고 있었다. 나머지 다른 원소들은 파면 전체에 비교적 고르게 분포하고 있었다.

채취된 재료의 미세구조를 광학현미경으로 관찰한 결과도 현장에서 채취된 레프리카에서 파악된 것과 같이 1000 μm 이상의 상당히 큰 선행 오스테나이트 결정립계를 보이고 있으며, 결정립계에는 작은 띠 형태의 연속된 상들이 배열되어 있었다.

한편 결정립 경계와 위치에 따른 미세조직의 차이를 보다 자세히 살펴보기 위해서 SEM을 이용한 미세조직 관찰을 수행하고, X-ray를 이용한 화학분석을 수행 결과 입계에서 Cr의 함량이 높게 나타났으며, 이는 Cr 탄화물인 것으로 판명되었다. 파괴시험을 통해 입계 파면에서의 불순물을 분석한 결과, 파면의 곳곳에서 P가 나타나고 있었으며, 결정립계에 P가 편석되어 있는 것으로 판명되었다.

채취된 재료에서 측정된 미세경도는 329 ~ 347 Hv를 보여 현장에서 측정된 경도와 비교적 유사한 값을 보이고 있으며, 벌류트 혀의 경도가 ASTM에서 제시하고 있는 CA6NM의 경도 허용치를 크게 초과하고 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 CA6NM 재질은 황화수소 분위기에서 황화응력균열(SSC)을 방지하기 위해서 최대 경도 값을 제한하고 있으며, 이를 위해 최적의 화학조성과 템퍼링 조건을 선택하여 제작되고 있다.⁽⁵⁾

Table 5 Chemical composition from a specimen obtained from a volute tongue

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti
LH	0.395	0.70	0.07	0.00	-	4.0	14.1	0.70	0.04	0.01
RH	0.356	0.70	0.08	0.00	-	4.0	14.2	0.70	0.05	0.01

* LH(RH) : Left(Right) Hand side tongue

Table 5는 채취된 재료에 대한 화학조성을 분석한 결과이다. 분석 결과를 살펴보면 C와 P를 제외하고는 전체적으로 ASTM의 허용기준을 만족하고 있으며, Cr의 농도가 ASTM 기준보다 약간 높은 값을 보이고 있으나 오차 범위에서 만족되고 있다. 그러나 C의 함량은 ASTM의 기준인 0.06w/o의 약 6배정도 높은 값을 보이고 있으며, 불순물인 P의 농도가 허용기준 보다 약 2배정도 높은 값을 나타내고 있다. ASTM CA6NM과 같이 주조 마르텐사이트 스테인레스강에서 C의 함량 증가는 경도를 증가시키고, 용접성을 떨어뜨리며, 균열에 취약하며, 불순물로 작용하는 P의 증가는 텀프취성의 주요 원인이다.⁽⁶⁾

3. 균열원인 분석 및 건전성 평가

3.1 균열원인 분석

펌프 케이싱 벌류트 혀의 미세조직은 Fig. 4의 사진에서 처럼 ASTM CA6NM 스테인레스강이 가지는 전형적인 구조가 아닌, 비정상적으로 큰 선행 오스테나이트 결정립계에 Cr 탄화물들이 많이 석출되어 있고, 균열들은 모두 Cr 탄화물이 석출되어 있는 선행 오스테나이트 결정입계를 따라 전파되며, 벌류트 혀에서 경도가 ASTM 기준을 초과하고 있는 분석 결과를 근거로 벌류트 혀의 균열은 외부의 기계적 하중에 의해 생성된 강제 균열이라기보다는 재질의 취약성에 크게 기인한 것이며, 특히 선행 오스테나이트 결정립계에서 나타나는 Cr 탄화물들이 입계 파괴의 주요 원인인 것으로 판단된다.

선행 오스테나이트 결정립계에서 관찰되고 있는 Cr 탄화물은 ASTM CA6NM의 전형적인 미세조직에서는 나타나지 않는 것으로, 주조 후 구조물이 서냉되거나 높은 C, Si 농도 또는 낮은 Mo 농도에서 쉽게 생성되며,⁽⁷⁾ 결정립계에서 석출되는 Cr 탄화물은 재료의 인장강도 증가와 입계파괴를 일으키는 원인이다.⁽⁸⁾ 화학성분 분석결과 케이싱 벌류트 혀에서 C의 함량이 ASTM CA6NM의 허용기준을 크게 초과하고 있음을 근거로 펌프 케이싱 벌류트 혀에서 나타나고 있는 균열은 재

질의 높은 C 함량으로 인한 결정립계 Cr 탄화물의 과도한 석출에 기인하며, 높은 정도 역시 높은 C 함량에 기인한다. 또한 오제분석 결과를 근거로 결정립계에서 P의 편석이 입계 균열을 촉진시킨 것으로 판단된다. 따라서 지나치게 높은 C의 양 및 P의 과다 등과 같은 재질상의 취약성을 가진 펌프 케이싱의 벌류트 혀가 주조 제작 과정이나 제작 후 보수용접 과정에서 발생하는 잔류응력과 운전 중에 작용하는 유체의 유동력을 받게 됨에 따라 입계 균열이 발생된 것으로 판단된다.

3.2 건전성 평가

3.2.1 재질 및 제조 개선

재질 측면에서 펌프 케이싱 벌류트 혀는 높은 C와 P의 함량에 의해 입계 파괴가 발생한 것으로 분석되었다. 따라서 벌류트 혀의 균열 방지를 위해서는 재질 내의 C와 P의 함량을 감소시켜 ASTM CA6NM의 기준이하로 충분히 낮추어야 하며, 이와 같은 원소들이 제조과정에서 벌류트 혀 부분에 편석되지 않도록 해야 한다. 결정립계의 Cr 탄화물 석출을 최소화하기 위한 방법으로서 C 농도 감소뿐만 아니라 Si를 낮추고 Mo를 증가시킬 수 있다. Si 감소와 Mo 증가는 주조시 결정립계의 Cr 탄화물 석출 속도를 감소시키고, 입내의 C 용해도를 증가시킴으로서 주조시 결정립의 탄화물 석출을 감소시키기 때문이다.⁽⁵⁾

주조 제작과정 및 열처리 측면에서는 국부적인 잔류응력을 최소화할 수 있도록 벌류트 혀와 주위 케이싱의 온도 편차가 최소화되도록 주형제작 및 열처리가 이루어져야 한다. 또한, 케이싱과 벌류트 혀와의 두께 편차가 크기 때문에 일어날 수 있는 주조공정상의 냉각속도 불균일화를 방지하기 위한 해석과 공정설계가 이루어져야 한다.

3.2.2. 균열 안정성 분석

벌류트 혀에 발생된 균열의 성장을 예측하기 위해서는 먼저 벌류트 혀에 작용되는 하중을 분석하고 하중에 의한 응력을 구한다. 작용 응력을 이용하여 응력전파 매개변수인 응력확대계수 차이인 ΔK 를 구하고 이를 균열 성장곡선식을 이용하여 잔여수명을 계산한다. 앞 절에서 균열의 생성이 초기에 생성되었으며, 현재 진행 정도가 미약함을 발견할 수 있었으나, 펌프의 안정성을 확인하기 위하여 보수적으로 예측하여 보았다.

펌프 케이싱 벌류트 혀 양단의 압력차는 단일 벌류트형의 원심펌프에 대한 기존의 실험결과⁽⁹⁻¹²⁾로부터 약 1.62 kg/cm²에서 최대 4.78 kg/cm²로 추정되었으며, 이는 정상운전 상태에서 펌프 입·출구 압력차(약 53.9 kg/cm²)의 3%와 8.9%에 해당하는 값이고, 펌프 토출압력(84.8 kg/cm²)을 기준으로 하면 각각 2%와 5.6%에 해당한다. 또한 근사모델에 의한 해석적 압력차는 보수적으로 약 8.5 kg/cm²로 계산되었다.

다음으로 균열에 대한 응력확대계수 계산을 위한 응력 평가 계산은 ABAQUS Code를 이용하여 간단한 유한요소해석을 수행하였다. 해석시 작용하중으로 벌류트

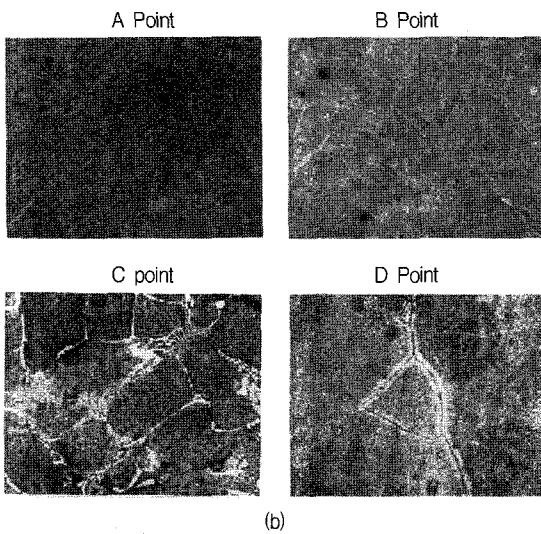
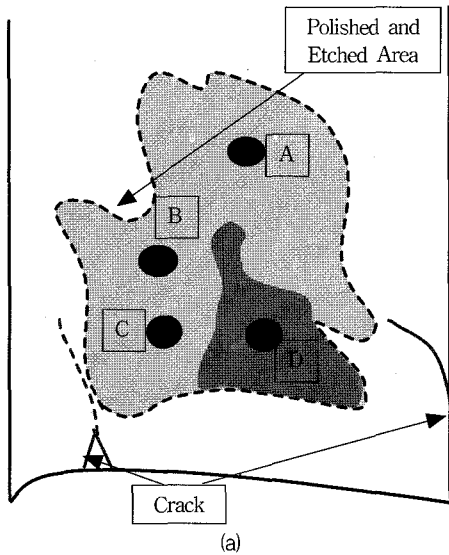


Fig. 4 Microstructure at each point of a volute tongue (a) Replica area at a volute tongue (b) Replica results at each point

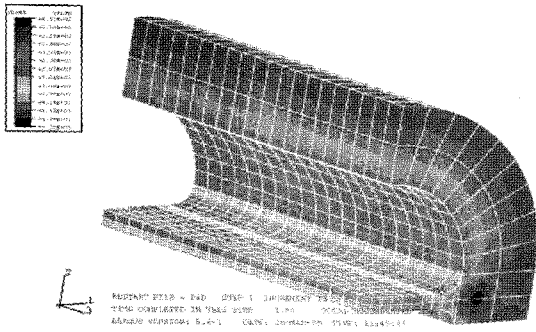


Fig. 5 Stress distribution at volute tongue by pressure difference between two volute sides

혀 양단에 작용하는 압력만을 고려하였으며, 압력차를 변화시키면서 계산을 수행하였다. 해석결과 등가응력(von-Mises stress)은 벌류트 혀 끝단 중앙과 벌류트 혀와 케이싱의 연결부위에서 높게 나타났다.

피로 균열성장 평가는 폭에 비해 균열이 작은 넓은 평판에서의 균열로 간략화하여 수행하였고, 펌프 케이싱 재료인 ASTM A487 CA6NM 주조 스테인레스강의 수화학분위기 피로균열성장 곡선이 없기 때문에 공기중 실험 데이터에서 얻은 피로균열성장 곡선을 보정하여 사용하였다. 피로균열성장 곡선은 2단계로 다음과 같이 주어진다.

Stage I ($\Delta K > 42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}^{1/2}$)

$$\frac{da}{dN} = a \times 3.8174 \times 10^{-12} (\Delta K)^{2.8473} \text{ m/cycle} \quad (1)$$

Stage II ($\Delta K \leq 42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}^{1/2}$)

$$\frac{da}{dN} = a \times 9.7409 \times 10^{-27} (\Delta K)^{11.80502} \text{ m/cycle} \quad (2)$$

또한 균열을 진전시킬 수 있는 펌프 혀 양단의 압력 편차는 유체유동이 안정화되지 않은 발전소 기동과 정지시 임펠러 회전에 의하여 나타나고, 8시간 동안 지속되는 것으로 가정하였다. 따라서 1주기 운전동안의 하중 반복횟수는 펌프 회전수 4500rpm, 임펠러 날개수 6과 기동 및 정지시간인 16시간을 곱하여 2.592×10^7 cycles를 사용하였다. 평가결과가 Table 6에 요약되었는데 균열 성장은 거의 발생하지 않는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 균열이 결정입계를 따라 진전되는 입계균열로 분석된 바와 일치하며, 균열진전이 외부하중에 의해 주도적으로 일어난 것이 아니라 특정 환경하에서 재질 취약화가 주 원인임을 보이는 것이다.

Table 6 Evaluation results for fatigue propagation using the CA6NM fatigue propagation data

Initial crack length(a_0),m	Difference in pressure (ΔP), Pa	$\Delta \sigma$ ($\max \sigma_{eq} - \min \sigma_{eq}$), Pa	ΔK , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	Crack growth length(Δa), m
0.0254	34,475	709,773	0.22469	0.0000000
	68,950	1,454,845	0.46028	0.0000000
	137,900	2,957,955	0.93584	0.0000000
	275,800	5,984,860	1.89349	0.0000000
0.0508	551,600	12,114,515	3.83280	0.0000000
	34,475	709,773	0.31776	0.0000000
	68,950	1,454,845	0.65094	0.0000000
	137,900	2,957,955	1.32348	0.0000000
	275,800	5,984,860	2.67780	0.0000000
	551,600	12,114,515	5.42039	0.0000000

벌류트 혀의 재질 분석을 통해, 얻어진 결론 및 균열 진전 구동력 가정에 따라 정성적인 균열 성장 거동을 예측하면, 균열생성 및 성장에 가장 크게 기여한 하중이 발전소의 기동과 정지시 나타나는 온도에 의한 열팽창인 경우에는 균열이 성장함에 따라 균열주위의 응력이 감소함으로 균열의 재속적인 성장은 제한될 것이며, 제작시 생성된 잔류응력인 경우에는 펌프의 기동년수와 균열이 성장됨에 따라 균열 주위의 응력이 감소함으로 계속적인 균열성장 또한 제한될 것이다. 펌프의 기동과 정지시 나타나는 압력의 차이 또는 운전중에 발생하는 유체유동하중이 균열 성장 구동력으로 작용하는 경우에는 균열이 성장할지라도 작용하중은 일정하므로 균열의 성장은 진전될 것이나, 작용하중의 크기가 기존 문헌의 분석 결과 및 균열 진전량 평가 결과를 근거로 할 때, 균열 진전이 일어나기에는 적은 하중이고, 벌류트 혀 끝에서 내부로 들어감에 따라 재질이 건전해지기 때문에 한 주기 운전 동안 균열 진전량은 극히 적거나 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

펌프 케이싱 벌류트 혀의 결함 발생과 관련하여 재질분석을 통한 원인 규명, 설계 및 운전조건 검토 및 균열안정성 분석을 통한 벌류트 혀의 건전성 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 케이싱 벌류트 혀에서 결함은 설계 및 운전/정비에

의해 발생된 것으로 볼 수 없었으며 고진동에 의한 피로 파면을 관찰할 수 없었기 때문에 강도 및 파괴에 의해 발생되지 않았다.

2. 케이싱 벌류트 혀에서 결함은 모두 선형 오스테나이트 결정립계를 따라 진전하는 전형적인 입계균열의 양상을 보였다.
3. 케이싱 벌류트 혀의 미세조직은 전형적인 ASTM CA6NM의 조직과 다르며, 큰 선형 오스테나이트 결정립과 상당히 많은 량의 Cr 탄화물이 결정립계에 석출되어 있었다. 또한 높은 경도를 보였다. 이는 재질의 높은 C 함량에 기인한 것으로 분석되었다.
4. 케이싱 벌류트 혀의 균열은 높은 C 함량에 의한 결정립계의 과다한 Cr 탄화물 석출과 높은 P의 함량에 의한 입계 석출이 입계 균열을 유발시킨 것으로 분석되었다.
5. 균열은 제조 초기에 주로 생성되었고, 한 주기 운전동안 균열 진전량은 극히 적을 것으로 판단되었다.
6. 케이싱 벌류트 혀의 건전성을 확보하기 위해 주조 공정상에서 C, P 함량조절을 엄격히 제어하여야 하며, 냉각속도의 균일화를 위한 주조공정 설계가 이루어져야 한다.
7. 균열의 안정성 평가 결과 일정 기간 운전 동안에는 균열 진전은 극히 적을 것으로 분석되어 일정 기간 운전은 가능할 것으로 분석되었다.

후 기

본 논문의 재질분석에 협조하여 주신 한국원자력연구소, 한국과학기술원 및 한국과학기술연구원 재질분석 담당자들에게 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- (1) Prakash, O. M. and Pandey, R. K., 1996, "Engineering Failure Analysis," Vol. 3, No. 1, pp. 45~52.
- (2) Failure Analysis and Prevention, 1993, ASM Metals Handbook, Vol. 1.
- (3) Park, J. R. Davids, 1994, ASM International Materials, ASM Specialty Handbook-Stainless Steels.
- (4) Annual Book of ASTM Standards-Iron and Steel Products, Sec. 1, 1997, Vol. 1.
- (5) Nalbone, C. S., 1982, Stainless Steel Castings, ASTM STP 756, pp. 315~331.
- (6) Porter, D. A. and Easterling, K. E., 1990, Phase Transformations of Metals and Alloys, McGraw-Hill.
- (7) Sibley, K. D. and Breyer, N. N., 1976, Metallurgical Transactions, Vol. 7A, pp. 1602~1604.
- (8) Iwabuchi, Y. and Sawada, S., 1982, Stainless Steel Castings, ASTM STP 756, pp. 332~354.
- (9) Brownell, R. B. Jr. and Flack, R. D. Jr., 1994, "Flow Characteristics in the Volute and Tongue Region of a Centrifugal Pumps," ASME International Gas Turbine Conference.
- (10) Iversen, H. W., Rolling, R. E., and Carlson, J. J., 1960, "Volute Pressure Distribution, Radial Force on the Impeller and Volute Mixing Losses of a Radial Flow Centrifugal Pump," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 82, No. 2, pp. 136~144.
- (11) Yuasa T. and Hinata, T., 1979, "Fluctuating Flow Behind the Impeller of Centrifugal Pump," Bulletin of JSME, Vol. 22, No. 174, pp. 1746~1753.
- (12) Uchida, N., Imaichi, K., and Shirai, T. 1971, "Radial Force on the Impeller of a Centrifugal Pump," Bulletin of JSME, Vol. 14, No. 76, pp. 1106~1117.