



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010년 2월

석사학위논문

형상적응형 냉각채널을 가진 균일/고속 냉각
사출성형 금형 개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

박 승 화

형상적응형 냉각채널을 가진 균일/고속 냉각
사출성형 금형 개발에 관한 연구

Investigation into the development of uniform and
rapid cooling mould incorporating conformal cooling
channels

2010년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

박 승 화

형상적응형 냉각채널을 가진 균일/고속
냉각 사출성형 금형 개발에 관한 연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2009 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원


기계공학과

박 승 화

박승화의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 종 관 

위 원 조선대학교 교수 한 길 영 

위 원 조선대학교 교수 안 동 규 

2009 년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 관련 연구	1
1.2 연구 목적 및 방법	4
제 2 장 직접식 금속 쾌속 툴링 공정 (Direct Metal Rapid Tooling process) 을 이용한 형상적응형 냉각 채널을 가진 사출성형 금형 설계	5
2.1 직접식 금속 쾌속 툴링 공정	5
2.2 사출성형 금형 재료 선정	6
2.3 대상 금형 설계 방법	7
2.4 형상적응형 냉각채널을 가진 사출금형의 사출성형	

경계요소 해석 모델링	9
2.4.1 대상 제품 사출성형 해석 모델링	9
2.4.2 형상적응형 냉각채널 형상 설계안	12
2.4.3 형상적응형 냉각채널과 금형표면간 높이 방향 위치에 대한 설계안	15
2.4.4 형상적응형 냉각채널간 폭방향 거리에 대한 설계안	22
제 3 장 형상적응형 냉각채널을 가진 금형과 직선형 냉각채 널을 가진 금형의 제품 사출성형 특성 분석	30
제 4 장 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출금형 제작	38
4.1 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 적층 ...	38
4.2 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 후가공 ...	41
제 5 장 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 시사출 실험 및 제품 특성 평가	46
5.1 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 시사출 실험	46

5.2 냉각시간에 따른 제품 품질 영향성 분석 47

5.3 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과 기존
직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 생산성 및
제품 품질 분석 52

제 6 장 결 론 58

REFERENCES 59

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1	Material properties of mould	6
Table 2	Initial condition of injection moulding analysis	11
Table 3	Summary of injection moulding characteristics for different cooling depths	22
Table 4	Summary of injection moulding characteristics for different cooling distances	29
Table 5	Summary of comparison results for two types of mould	37
Table 6	Hardness of mould and mould materials	45
Table 7	Experimental conditions for injection moulding experiments	46
Table 8	Specification of measurement device of eccentricity	51
Table 9	Mass of eccentricity of the product with conformal cooling channels	52
Table 10	Comparison of mass of eccentricity of the product for different mould	56

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Manufacturing process of DMT (Laser aided Direct Metal Tooling process)	6
Fig. 2 Functional decomposition of mould geometry	7
Fig. 3 Design of mould for a plastic part	7
Fig. 4 Design of a plastic for part	8
Fig. 5 Design of mould	8
Fig. 6 Design of mould with conformal cooling channel	9
Fig. 7 Procedure of mesh generation of a plastic fan part	9
Fig. 8 Procedure of mesh generation for injection moulding analysis	10
Fig. 9 Design of runner system	11
Fig. 10 PVT curves of ABS with 20 % of glass fiber	12
Fig. 11 Design alternatives of conformal cooling channels	12
Fig. 12 Shape of Conformal cooling channel for three type design alternatives	13
Fig. 13 Variation of coolant outlet temperature distributions according to design alternatives cooling channels	14
Fig. 14 Variation of product temperature distribution at an ejection time according to design alternatives of cooling channels	14
Fig. 15 Definition of cooling distance (d)	15
Fig. 16 Filling times for different cooling depth	16
Fig. 17 Variation of the injection pressure-cycle time relationship according to the cooling depth	17
Fig. 18 Variation of the clamping force-cycle time relationship according to the cooling depth	17
Fig. 19 Influence of the cooling depth on the time histories of temperature for different locations of the product	18
Fig. 20 Influence of the cooling depth on the volumetric shrinkage of the moulded product	19
Fig. 21 Effects of the cooling depth on the deflection of the moulded product (Deflection	

in the Z direction)	20
Fig. 22 Effects of the cooling depth on the formation of air-traps and weld-lines in the moulded product	21
Fig. 23 Definition of cooling distance and its design alternatives	23
Fig. 24 Filling times for different cooling distance	24
Fig. 25 Variation of injection pressure-cycle time according to cooling distance	24
Fig. 26 Variation of clamping force-cycle time according to cooling distance	25
Fig. 27 Influence of cooling distance on the temperature variations of the product	26
Fig. 28 Effect of cooling distance on the volumetric shrinkage of the product	27
Fig. 29 Effect of cooling distance on the deflection of the product	27
Fig. 30 Influence of cooling distance on the formation of air-trap and weld-line in the product	28
Fig. 31 Final design of the injection mould with conformal cooling channels	29
Fig. 32 Design of injection mould with linear cooling channels	30
Fig. 33 Meshes for injection mould with linear cooling channels	31
Fig. 34 Comparison of fill time of the designed mould and that of mould with linear cooling channels	32
Fig. 35 Comparison of injection pressure-cycle time curve of designed mould and that of mould with linear cooling channels	33
Fig. 36 Comparison of clamping force-cycle time curve of designed mould and that of mould with linear cooling channels	33
Fig. 37 Comparison of temperature-cycle time relationships of the designed mould and those of mould with linear cooling channels	34
Fig. 38 Comparison of the product deflection of the designed mould and that of mould with linear cooling channels	35
Fig. 39 Comparison of volumetric shrinkage of the product of the designed mould and that of mould with linear cooling channels	36
Fig. 40 Concept of Laser-aided Direct Metal Tooling (DMT) process	38
Fig. 41 Design of cooling channel	39
Fig. 42 Geometrical decomposition of the mould for the fan part	39
Fig. 43 Laser path for layer-by-layer stacking	40

Fig. 44 Manufacturing procedure of cores with conformal cooling channels	40
Fig. 45 Surface roughness of cores after deposition of P21	42
Fig. 46 Sequence of post-processing	42
Fig. 47 Finally fabricated mould	43
Fig. 48 Surface roughness of finally fabricated mould	43
Fig. 49 Microstructures in the vicinity of the welded regions	44
Fig. 50 Hardness of the mould	45
Fig. 51 Injection molding apparatus for experiments	47
Fig. 52 Comparison of shape of final product for different cooling times (Conformal cooling channel)	48
Fig. 53 Attachment of resin on the sprue (cooling time 12 seconds)	48
Fig. 54 Comparison of thickness of final product for different cooling channels and cooling times (Conformal cooling channels)	49
Fig. 55 Comparison of positional accuracy of final product for different cooling times (Conformal cooling channels)	50
Fig. 56 Measurement devices of eccentricity	51
Fig. 57 Comparison of shape of final product for different mould	53
Fig. 58 Comparison of thickness of final product for different cooling channels and cooling times	54
Fig. 59 Comparison of positional accuracy of final product for different mould	55
Fig. 60 Comparison of cycle times for different mould	57

ABSTRACT

Investigation into the development of uniform and rapid cooling mould incorporating conformal cooling channels

Park, Seung-Hwa

Advisor : Prof. Ahn, Dong-Gyu, Ph. D.

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

In recent, several research works on the development of the injection mould with a rapid and uniform cooling characteristics have been actively undertaken in efforts to improve productivity and the quality of the injection moulding process. After the advent of the rapid prototyping and tooling (RP&M) technologies, various attempts to apply the RP&M technologies to manufacturing of the injection mould. The preferred application of the RP&M technologies in the injection mould was the development of the injection mould with conformal cooling channels. The objective of this thesis is to manufacture an injection mould with conformal cooling channels for a plastic fan part using hybrid rapid tooling technology combining a laser-aided direct metal tooling (DMT) process with a post-processing. A proper design of the conformal cooling channels was obtained from three-dimensional injection moulding analysis using MPI V 6.1. In

order to insert conformal cooling channels into the mould, the geometry of the mould was decomposed into base and moulding parts. The base part with guide slots was fabricated from a machining process. The copper pipes were inserted on the guide slots as the conformal cooling channels. The moulding part was manufactured from DMT rapid tooling process. Finally, a post-processing was performed to improve the surface roughness of the mould. The manufacturing time of the mould was nearly 191 hrs. Characteristics of the manufactured mould were investigated through the measurement of the hardness, the observation of micro-structures in the jointed region and the leakage test. The influence of the cooling time on the qualities of the mould product was examined via injection moulding experiments. The results of the injection moulding experiments showed that an optimum cooling time, which minimizes the positional error, the thickness error and the eccentricity of the moulded product is 13 seconds. In order to investigate efficiency of the designed mould, the results of injection moulding experiments for the designed mould were compared to those for the previously designed mould with linear cooling channels. The results of the comparison showed that cooling and cycle times can be improved nearly 35.0 % and 25.7 %, respectively. In addition, it was noted that the product quality can be remarkably improved when the designed mould was used.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 관련 연구

우리나라의 산업발전은 제조업을 중심으로 발전해왔으며 제조업 중 주요 분야인 금형 산업은 최근 첨단 설계 기술을 바탕으로 선진기술을 접목시켜 자동차 산업, 전기/전자 산업, 항공 산업 등의 발전에 기여하고 있다. 금형산업 중 상당한 부분을 차지하고 있는 사출성형 분야는 특히 기술이 복잡하고, 다양한 지식과 선진국의 최신 기술 및 숙련된 경험의 요구로 연구 및 관심이 많이 필요하다. 사출성형이란 분자량이 10,000 이상인 합성수지, 합성섬유, 합성고무 등의 고분자 화합물을 가열하여 용융시킨 후, 냉각을 통해 경화시키는 과정으로써 금형의 형상대로 제품을 성형하는 가공법이다. 사출성형 금형은 제품의 형상, 재료 및 공정조건에 따라 금형 설계가 지속적으로 바뀌는 주문적응형 특성이 강하고, 금형 제작비용이 높아서 금형 개발 초기단계에 CAE (Computer Aided Engineering) 를 통한 금형의 설계조건 도출이 매우 필요하다. 사출성형 공정의 컴퓨터 시뮬레이션 기술은 여러 가지 설계 및 재료와 공정조건을 조합을 테스트 하면서 최적의 사출성형 조건을 짧은 시간에 저 비용으로 도출할 수 있는 장점이 있다. 실제로 금형을 제작하고 시제품을 생산하기 전에 CAE 를 통해서 실제 사출성형 시 발생할 수 있는 불량 즉, 웰드라인 (Weld line), 수축 (Shrinkage), 버 (Burr), 흑점 (Black spot) /흑줄 (Black streak), 크랙 (Crack) 및 휨 (Warpage) 현상 등의 가능성 및 위치를 예상함으로써 최적의 공정조건을 도출하고 금형 및 제품의 개발 기간을 최소화 할 수 있다.

사출성형 공정에서 게이트 (Gate) 의 위치가 결정되면 반드시 각 캐비티 (Cavity) 마다 수지 (Resin) 가 동시에 충전이 이루어지도록 균형 잡힌 런너 시스템 (Runner system) 을 구성하는 것이 매우 중요하다. 런너 시스템은 스프루, 런너 및 게이트를 총칭하는 용어이고, 사출성형기의 노즐 (Nozzle) 에서부터 게이트까지 용융 수지를 안내하는 유동 통로로써 최종적으로 제품과 분리되는 부분이다. 런너 시스템은 성형 사이클과 제품 사이에 중대한 영향을 미치는데 균형 잡힌 런너 시스템을 구성하는 것이 고품질 제품 양산 시 중요한 금형설계 기술이다. 사출성형 공정은 크게 용융된 수지가 스프루 (Sprue) 에서 런너 및 게이트를 지나 캐비티를 충전시키는 충전 과정 (Filling process), 충전된 수지가 캐비티 내에서 수축되는 양을 보상하는 보압 과정 (Packing

process), 캐비티 내 수지를 냉각시키는 냉각과정 (Cooling process) 및 제품을 이형시키는 취출 과정 (Ejecting process) 으로 나눌 수 있다. 이 중 50 ~ 60 % 이상을 차지하는 냉각 과정은 사출성형 공정 중 제품의 품질에 가장 큰 영향을 준다. 사출성형 시 충전과 보압 과정을 거친 금형 내의 수지는 냉각에 의해 액상에서 고상되기까지 약 15 % 정도 부피 변화를 하게 되며 이것은 최종 성형 제품에 수축 (Shrinkage) 이나 휨 변형 (Warpage) 등의 현상으로 나타나게 된다. 특히 냉장고 및 컴퓨터 등의 일상생활에 사용하는 가전제품 속에 설치되어 있는 팬 제품은 냉기 순환시스템 및 열 교환을 위하여 사용되는데, 사출성형시 블레이드의 불균일한 냉각 때문에 편수축이나 휨 현상으로 인한 진동이 발생하게 되고, 전체 시스템의 성능 저하 등의 문제를 일으켜 최종 소음이 발생하게 된다. 그래서 팬 제작용 사출금형은 수축, 휨 변형 및 구조적인 문제를 고려하여 제품의 두께에 대해 균일하게 제품의 열을 제거할 수 있는 효율적인 냉각채널 설계를 필요로 하고 있다. 팬 금형은 지금까지 드릴가공으로 인한 직선 냉각채널을 사용하기 때문에 제품의 균일냉각을 기대하기가 어렵고, 제품의 두께에 따라서 잔류응력이 제거되지 않아 제품의 품질이 저하되는 원인이 되어왔다. 이와 같은 현상을 해결하기 위해 제품 형상에 적응하는 냉각채널로 설계하면 균일한 냉각을 통하여 제품 내 잔류응력을 제거할 수 있고, 냉각 시간을 줄여서 제품의 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있다.

캐비티 내에서 이루어지는 충전, 보압, 냉각 공정에서 중요한 조건은 압력과 온도 및 냉각채널의 형상이다. 사출 압력은 수지의 흐름에 영향을 미치며 캐비티 온도 변화에 대하여 수축시 불균일한 생산품을 초래한다. 또한 냉각채널의 위치 및 형상은 냉각 과정시 제품의 고속/균일 냉각에 가장 큰 영향을 준다. 그러므로 사출성형 공정을 이용한 제품의 생산성 향상을 위하여 고속/균일 냉각을 이룰 수 있는 연구가 국내외적으로 폭넓게 수행되고 있다.¹⁻⁴⁾ 사출성형 공정에서 냉각시간 단축을 위해서는 사출성형 금형의 냉각채널의 설계 및 구현할 금형 제작 방법이 매우 중요하다.⁵⁻¹⁴⁾ 현재 사출성형 금형에 종사하는 많은 업계에서는 사출성형 금형 제작시 기계가공을 통한 절삭과정을 거친 직선형 냉각 채널을 사용하고 있어서 제품의 냉각이 불균일하게 될 뿐만 아니라 냉각 시간을 최소화 할 수가 없어서 기존의 절삭 가공을 통한 사출성형 금형으로는 고효율 제품 생산 및 생산성 향상에 한계가 있었다. 기존 절삭가공을 통한 사출성형 금형 제작의 대안으로써 쾌속 조형/틀링/생산 기술에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 직접식 금속 쾌속 틀링 공정을 사출성형 금형에 적용할 경우, 제품 형상에 적응하는 3차원 냉각채널을 금형 내부에 구현할 수 있어 금형의 냉각 성능을 향상시킬 수 있고 이로 인해 제품 생산성을 극대화 할 수 있다.¹⁵⁻²²⁾ 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

SACHS 등은 3 차원 프린팅 공정 (3D printing process) 을 이용하여 형상적응형 냉각 채널을 가진 금형 의 제작 방법 및 금형 내 온도 분포를 측정할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다.²³⁾

Li CL 등은 형상 인식 알고리즘 (Feature recognition algorithm) 을 통하여 복잡한 금형표면 형상에 적응하는 냉각채널 구현에 대한 기초 연구를 수행하였다.²⁴⁻²⁷⁾

Xiaorong 등은 실험을 통하여 형상적응형 냉각 채널과 직선형 냉각 채널의 냉각 효율을 비교하고 형상적응형 냉각채널 설계 방법에 대한 연구를 수행하였다.

Dargarno 등은 SLS 공정의 레이저 폼 (Laser Form) 재료를 이용한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제작으로 발생하는 냉각 효율과 생산성 및 경제적 향상에 관한 연구를 수행한바 있다.²⁸⁻²⁹⁾

Winpeny 등은 라스트 폼 (Last form) 공정을 이용한 BMW 사의 Rover 25 모델 CVT 콘솔 제작용 형상적응형 냉각 채널을 가진 사출 성형 금형을 개발하여 금형 개발 비용과 개발기간을 각각 54 % 와 33 % 감소시켰다.³⁰⁾

Ferreira 등은 쾌속 조형 공정 (Rapid tooling process) 을 이용하여 형상적응형 냉각 채널을 가진 사출 성형 금형 제작에 관한 실험 및 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다.³¹⁾

한국 생산기술연구원에서는 DMLS 공정을 이용한 3 차원 형상적응형 냉각 채널을 가진 인서트 몰드 제작에 관한 기초 연구를 수행한 바 있다.³²⁾

국내에서는 Ahn 등이 DMT 공정을 이용한 고속 냉각 금형 제작 방법에 대한 기초 연구를 수행한 바 있다.³³⁾

1.2 연구 목적 및 방법

본 연구에서는 팬 제작용 사출성형 금형에 대하여 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용하여 금형 표면에 적용하는 형상적응형 냉각채널로 제작한 사출성형 금형의 제품 품질 특성에 미치는 영향에 대하여 분석/고찰하고자 한다. 사출성형은 플라스틱 산업에서 가장 널리 사용되는 분야로 일상 생필품에서 자동차 및 항공기 부품에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다. 최근에는 사출성형 제품의 품질과 생산성에 대한 요구가 고도화됨에 따라 사출성형 금형 제작 방법 및 사출공정을 정밀하게 제어하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 사출성형 제품의 품질을 개선하기 위하여 CAE를 통해 사출성형시 유동 특성 분석이나 냉각 조건에 따른 금형 내의 온도 분포 해석을 바탕으로 사출성형 공정을 최적화 할 수 있는 연구가 대두되고 있다.

용융 수지의 유동은 비뉴턴성 현상에 지배를 받기 때문에 금형 내로 충전 될 때 매우 복잡한 변화를 갖는다. 재료는 금형 내 압력과 온도의 변화에 따른 PVT 특성에 따라서 수지의 선장은 제품의 용도 및 특성에 밀접한 영향이 있다.

그리고 사출성형 공정 중 가장 큰 비중을 차지하는 냉각과정을 최소화시키기 위하여 최근 사출 성형 공정에서 생산성 증가와 제품 품질 향상 극대화 할 수 있는 균일/고속 냉각을 실현시킬 수 있는 다양한 연구가 시작되고 있다. 본 논문에서는 사출성형 해석을 통하여 냉각채널의 형상을 결정하고, 금형 표면과 냉각채널간 위치 및 냉각채널의 폭당 거리에 대하여 제품의 수축률, 웰드라인, 잔류 응력 등의 특성을 분석/고찰하여 최적의 형상적응형 냉각채널을 결정하고자 한다. 이러한 사출성형 해석 결과를 통하여 도출된 최적 사출성형 조건 및 냉각채널 형상을 바탕으로 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용하여 사출성형 금형을 제작 후 시사출 실험을 통하여 고속/균일 냉각 사출성형 금형의 생산성 및 제품의 품질을 검증하고자 한다.

또한, 직접식 금속 쾌속 적층과 기계가공을 혼합하여 제작한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과의 생산성 및 제품 품질을 검증하고자 한다.

제 2 장 직접식 금속 쾌속 툴링 공정 (Direct Metal Rapid Tooling process) 을 이용한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 설계

2.1 직접식 금속 쾌속 툴링 공정

직접식 금속 쾌속 툴링 공정 (Direct Metal Rapid Tooling) 이란 1992년 미국 DTM사가 SLS (Selective Laser Sintering) 공정 이후 개발된 금형 제작 공정이다. 직접식 금속 쾌속 툴링 공정은 금속 재료의 접합 방법에 따라 분류되며 판재 적층 공정 (Lamination process), 금속 분말 소결 공정 (Sintering process), 금속 분말 용착 공정 (Melting process) 및 바인딩 공정 (Binding process) 으로 크게 나뉜다. 이 중 금속 분말 용착 공정은 직접식 금속 적층 공정 (Direct Metal Deposition), 선택적 레이저 용융 공정 (Selective Laser Melting), 직접식 금속 툴링 공정 (Laser-aided Direct Metal Tooling) 및 전자 빔 활용 금속 용융 공정 (Electron Beam Melting) 등으로 나뉜다. 이 중 직접식 금속 툴링 공정은 레이저, CAD, CAM, 센서 및 제어, 소재 등의 5 가지 기술이 복합된 융합기술로써, 고출력 레이저를 이용하여 분말 형태의 금속 가루를 녹여 붙이는 방식을 통해 컴퓨터에 저장되어 있는 3 차원 CAD 데이터로부터 직접 금속 제품 생산에 필요한 틀을 매우 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 제조 기술이다. 직접식 금속 툴링 공정은 I 사에서 개발하였다. 직접식 금속 툴링 공정의 기본 원리는 CAD 데이터를 이용하여 제작하고자 하는 제품의 3 차원 솔리드 모델링을 한 후, IGES 파일 형태로 변환 시킨 후, IGES 파일을 한 층씩 수직방향으로 나눈다. 나뉜 각각의 분할된 데이터에 대하여 고출력 레이저 빔을 금속 표면에 조사하여 순간적으로 용융풀이 생성되고 동시에 용융풀 안으로 금속 분말을 공급하여 금속 표면에 클래딩 비드를 형성시킨다. 이러한 과정을 반복하여 3D 모델과 동일한 3 차원의 금속 제품이 성형된다. 직접식 금속 툴링 공정은 수직방향으로 0.25 mm 씩 적층되며, Fig. 1 은 금속을 3D 데이터로부터 직접식 금속 툴링 공정을 이용하여 제작하는 과정이다.

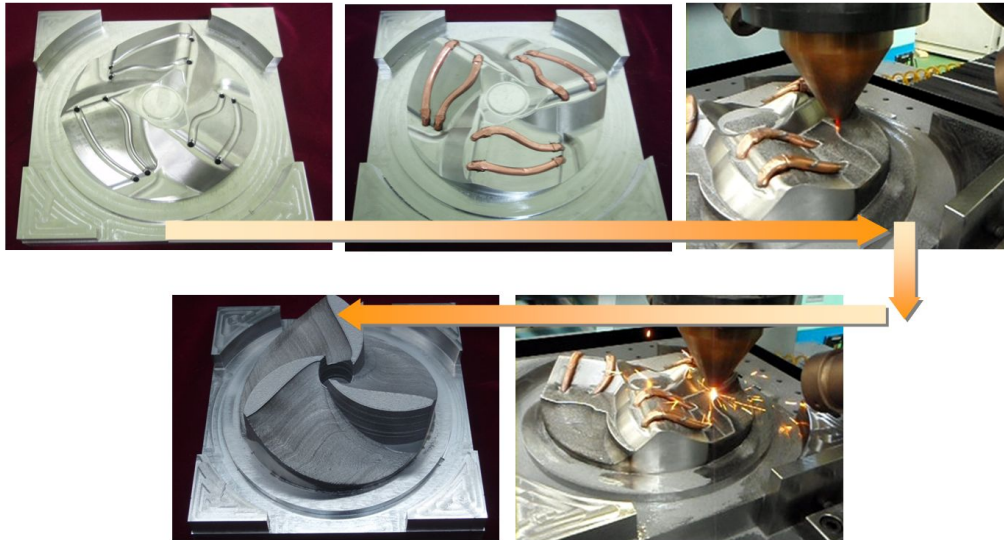


Fig. 1 Manufacturing process of DMT (Laser aided Direct Metal Tooling process)

2.2 사출성형 금형 재료 선정

직접식 금속 툴링 기술은 레이저 적층시 한 층마다 0.25 mm 씩 적층되므로 대상 금형 전체 적층시 제작시간 및 제작비용이 많이 소요된다. 본 연구는 금형제작 시간 및 제작비용을 줄이기 위해 제품 특성과 밀접한 영향이 있는 제품 표면부와 제품 특성과 관계가 적은 금형 하부로 대상 금형을 분할하여 설계하였다. 기계가공부는 국내 일반 사출 금형강인 KP4M 을 사용하였고, 적층부는 KP4M 과 비슷한 성질을 갖고 있는 NAK 80 계열의 성형성이 우수하고, KP4M 과 결합력이 탁월한 P21 을 사용하였다. 즉, 사출성형 금형의 특성을 극대화하면서 제작시간을 최소화 할 수 있도록 설계하였다. 금형의 재료별 물성은 Table 1 과 같고, Fig. 2 는 금형의 기능적 분리를 나타낸다.

Table 1 Material properties of mould

Material	Hardness (H _{RC})	Thermal conductivity (W/m·K)
P21	39	38.0
KP4M	35	20.6

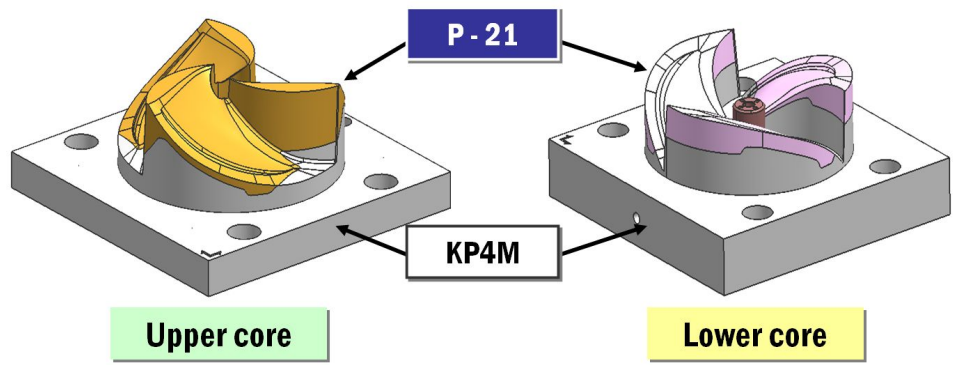


Fig. 2 Functional decomposition of mould geometry

2.3 대상 금형 설계 방법

본 연구에서는 팬 제작용 사출성형 금형을 대상으로 직접식 쾌속 톨링 기반 형상형 적응 냉각채널을 이용하여 균일/고속 냉각 특성을 향상시키고자 한다. 연구 대상 금형인 팬 제작용 사출성형 금형은 Fig. 3 과 같이 현재 양산중인 직선형 냉각채널 사출금형과 동일한 230 mm × 230 mm × 130 mm 의 크기를 가지며, 단일 캐비티 (Cavity) 로서 2 개의 상·하형 금형으로 설계된 냉장고에 사용되는 팬 제작용 사출성형 금형이다.

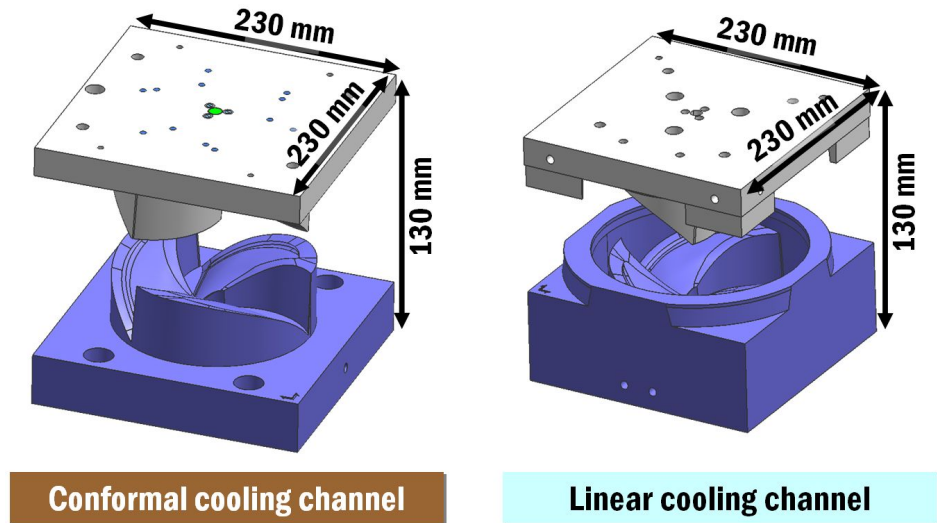


Fig. 3 Design of mould for a plastic part

팬 제품의 형상은 Fig. 4 와 같이 설계하였으며, 팬의 평균두께는 1.5 mm 이다. 사출성형 금형 내부의 냉각채널은 Fig. 5 와 같이 각각의 블레이드마다 독립적으로 2 개씩 금형 표면 형상에 적응하도록 설계되었으며, 최대한 캐비티와의 거리를 가깝도록 설계하였다. 냉각채널의 지름은 6.32 mm 이다.

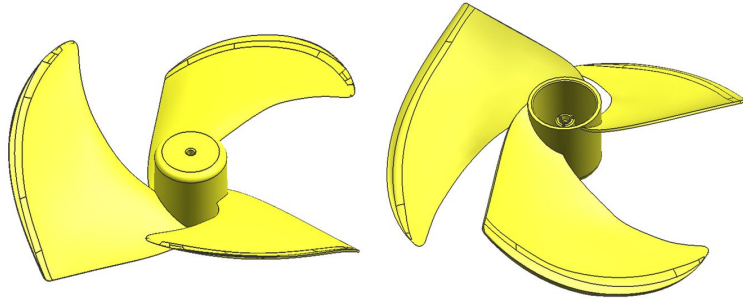


Fig. 4 Design of a plastic for part

본 연구의 사출성형 금형은 균일 냉각을 위하여 금형면 형상에 적응하는 형상적응형 냉각채널 (Conformal cooling channel) 및 기존 직선형 냉각채널 (Linear cooling channel) 을 설계하였다. 형상적응형 냉각채널은 팬 블레이드의 휨 변형을 최소화하기 위하여 Fig. 5 및 Fig. 6 과 같이 제품 전체에 균일하게 냉각이 되도록 팬 각각의 블레이드마다 독립적으로 2 개씩 제품의 두께에 최대한 일정하도록 냉각채널 형상을 설계하였고, 직선형 냉각채널은 팬의 블레이드 중앙 부분에 기계가공이 가능한 배플 (Baffle) 구조의 냉각채널로 설계하였다.

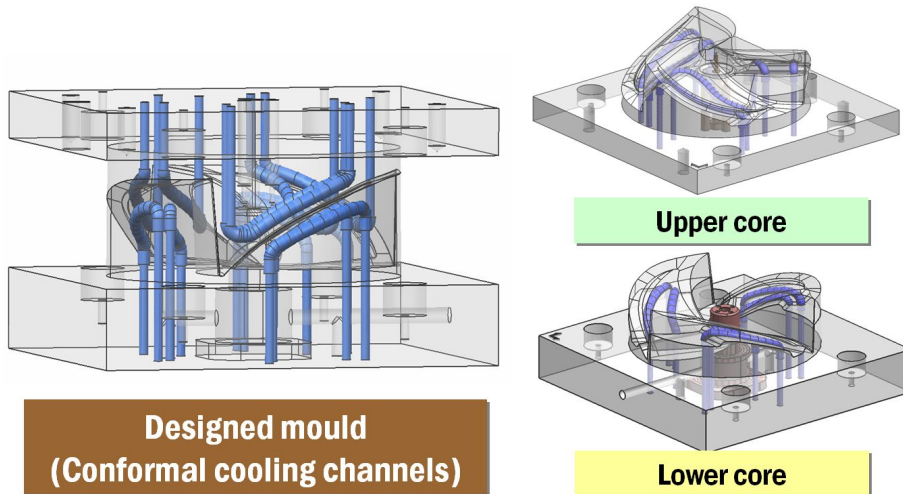


Fig. 5 Design of mould

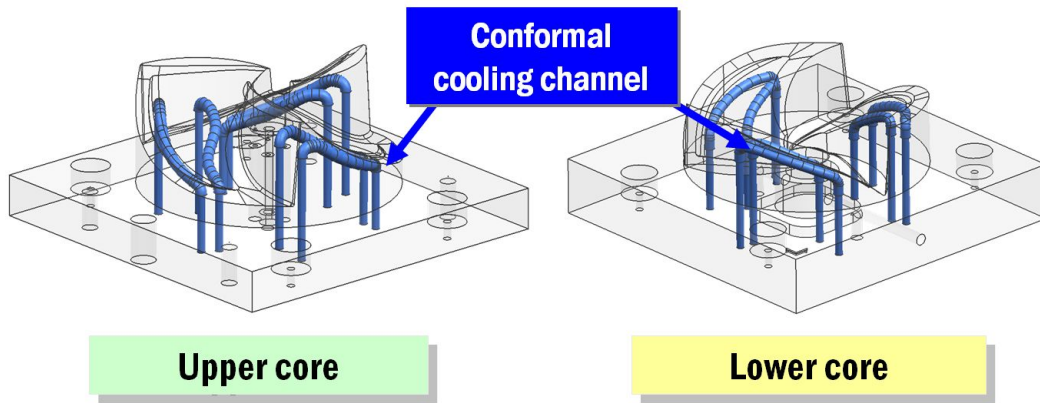


Fig. 6 Design of mould with conformal cooling channel

2.4 형상적응형 냉각채널을 가진 사출금형의 사출성형 경계 요소 해석 모델링

2.4.1 대상 제품 사출성형 해석 모델링

본 해석은 형상적응형 냉각채널을 이용한 사출성형 금형에 대하여 실제 수지가 충전되어 취출 될 때까지 제품 및 사출성형 금형의 유동 및 냉각 특성을 분석하기 위하여 Fig. 7 과 같이 Unigraphics (NX5) 에서 설계한 모델링을 STL 파일로 변환하여 Moldflow MPI 6.1 에서 BEM (Boundary Element Method) 해석 격자를 생성시켜 최종 사출성형 해석을 수행하였다. 경계요소 해석격자 생성시 해석결과에 영향을 주지 않는 필렛 (Fillet) 부분은 단순화시켜 생성하였다.



Fig. 7 Procedure of mesh generation of a plastic fan part

본 논문에서는 팬 제품용 형상적응형 냉각채널을 갖는 사출성형 금형에 대하여 사출성형 해석을 정확하게 수행하기 위해 상·하코어 모두 에지 (Edge) 길이가 8 mm 인 사면체 (Tetrahedron) 해석 격자로 생성하였다. 사출성형 해석 방법은 두께가 얇은 팬 제품에 대하여 코어변형에 기인한 제품의 휨 변형 및 두께변화 등의 사출성형 특성을 분석하고자 Fig. 8 과 같이 코어-시프트 (Core-shift) 해석을 선택하였고, 초기 사출성형 공정조건은 Table 2 와 같다. 사출성형 해석을 위한 제품의 격자 생성조건은 에지 길이 (Edge length) 3 mm, 현 간격 (Chord height) 0.1 mm 이고, 생성된 격자의 품질 향상을 위해 자유 에지 (Free edge) 제거, 형상비 (Aspect ratio) 의 최대값, 비 매니폴드 에지 (Non manifold edge) 및 격자 매치 비율 (Mesh match ratio) 등을 확인 및 수정하여 사출성형 해석에 필요한 BEM 해석 격자를 완성하였다. 유한요소 격자는 상 코어, 하 코어 및 제품으로 나누어서 생성시켰으며, 격자수는 팬 및 금형 각각 13,587 개, 1,425 개다.

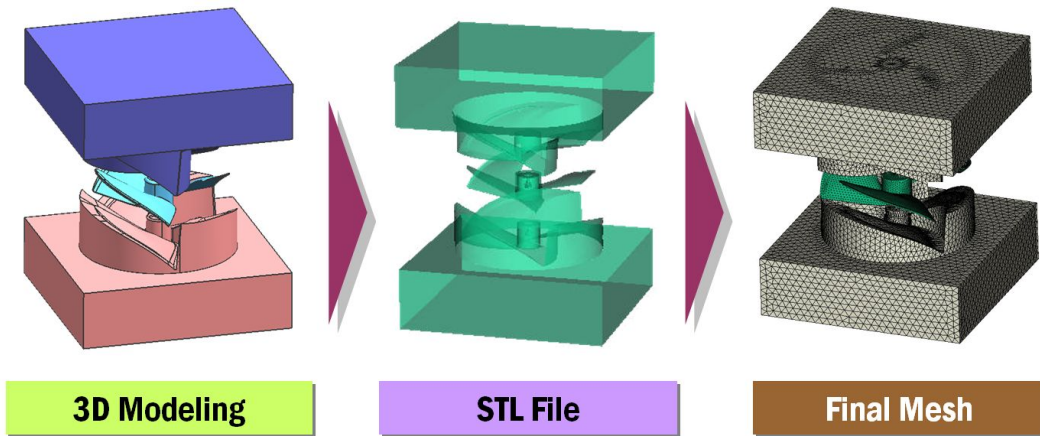


Fig. 8 Procedure of mesh generation for injection moulding analysis

런너 시스템 (Runner system) 설계는 대상 금형 및 기존의 직선형 냉각채널 금형 모두 Fig. 9 와 같이 콜드 런너 (Cold runner) 를 사용하였고, 스프루 (Sprue) 시작 지름은 3.5 mm, 끝 지름은 6.5 mm 이며, 게이트 (Gate) 는 흔적이 거의 없는 핀 포인트 게이트 (Pin point gate) 로서 시작지름 3 mm, 끝 지름 1 mm 인 3 점 게이트로 설계하였다.

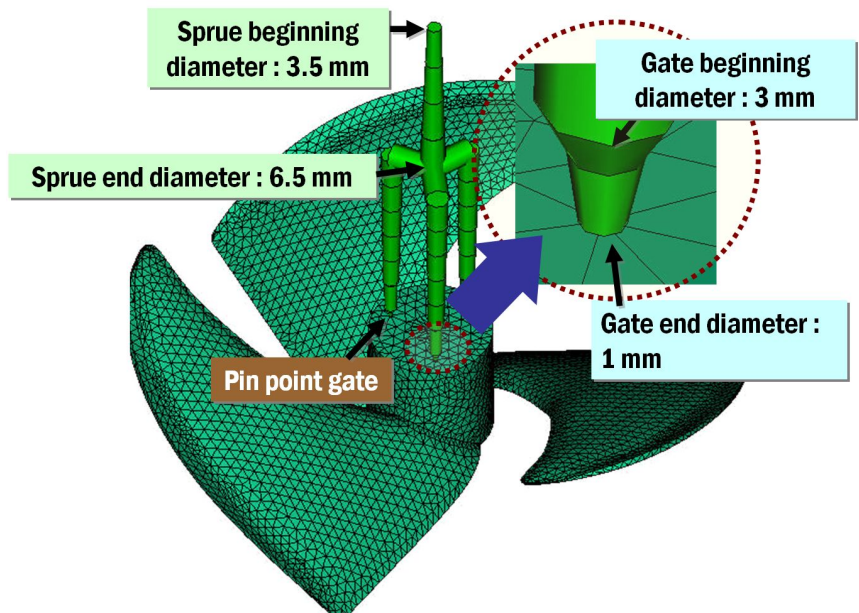


Fig. 9 Design of runner system

사출성형 해석에 사용된 수지는 충격 저항, 경도 및 성형성이 우수하고, 다른 엔지니어링 플라스틱에 비해 가격이 낮아 자동차 제품, 전자 제품, 사무기기 등 실생활에서 널리 쓰이고 있는 비결정성 코폴리머 (co-polymer) 인 열가소성 수지로써, 삼성 제일모직에서 생산하는 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 이고, 평균 수축량을 최소화하기 위하여 유리섬유 (Glass fiber) 가 20 % 포함되어 있다. 그리고 사출성형 해석에 사용된 ABS 의 PVT 선도는 Fig. 10 과 같다.

본 연구 개발로 제작될 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 정량적 특성 비교를 위하여 직선형 냉각채널 금형 역시 Table 2 와 같이 동일한 사출성형 조건으로 설계 및 해석을 수행하였다.

Table 2 Initial condition of injection moulding analysis

Filling Control	Packing pressure	Mould temperature	Melting temperature of resin	Coolant temperature
Automatic	65 MPa	80 °C	240 °C	20 °C

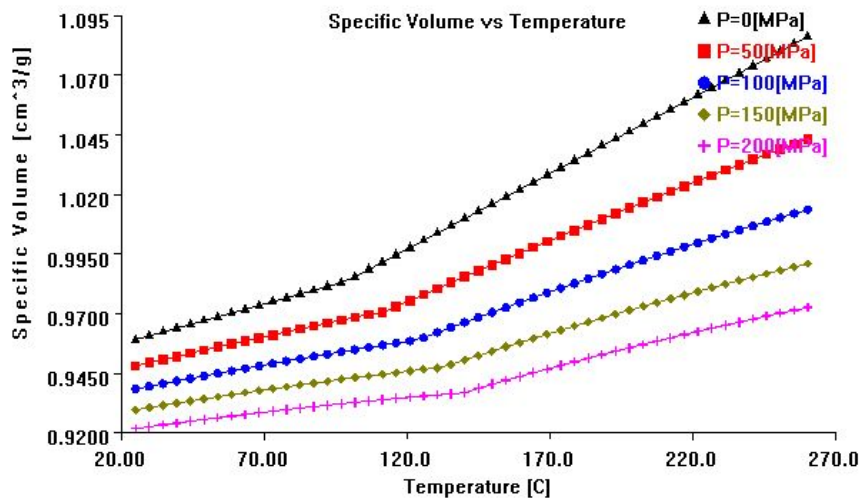


Fig. 10 PVT curves of ABS with 20 % of glass fiber

2.4.2 형상적응형 냉각채널 형상 설계안

직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용한 형상적응형 냉각채널 형상의 사출성형 금형 제작을 위한 초기 모델링은 Unigraphics (NX5) 에서 수행하였다. 냉각채널 설계는 Fig. 11 과 같이 직접식 금속 쾌속 툴링 공정으로 금속 적층 시 레이저 헤드와 사출성형 금형 형상의 간섭이 발생하지 않도록 설계하여 냉각 해석을 수행하였다.

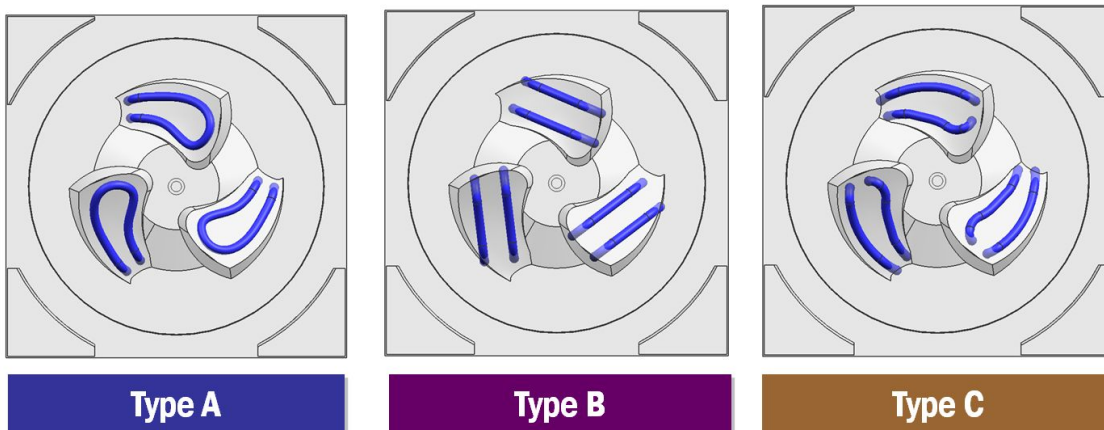


Fig. 11 Design alternatives of conformal cooling channels

형상적응형 냉각채널 형상에 대한 사출성형 해석은 3 가지 냉각채널 형상에 따른 냉각 효과 결과에 대하여 비교하고자 하였다. Fig. 12 와 같이 A 형상은 입출구가 제품 날개당 하나이며 제품 두께와 형상에 따라 일정하게 유도하여 설계하였고, B 형상은 제품 형상에 따라 일정하진 않지만 제품의 두께가 가장 두꺼운 중앙부분에 날개당 2 개의 냉각채널로 설계시켰으며, C 형상은 A 형상과 동일하게 제품의 형상과 두께에 대하여 일정하게 설계하였지만 냉각채널을 분리시켜 날개당 2 개의 입·출구를 갖도록 설계하였다. 사출성형 해석을 위한 냉각채널의 해석격자는 빔 (Beam) 해석격자이며 생성조건은 에지 길이 (Edge length) 20 mm 로 생성시켰다. 완성된 3 가지 냉각채널 설계안은 Moldflow MPI 6.1 을 이용하여 냉각해석을 수행하였다.

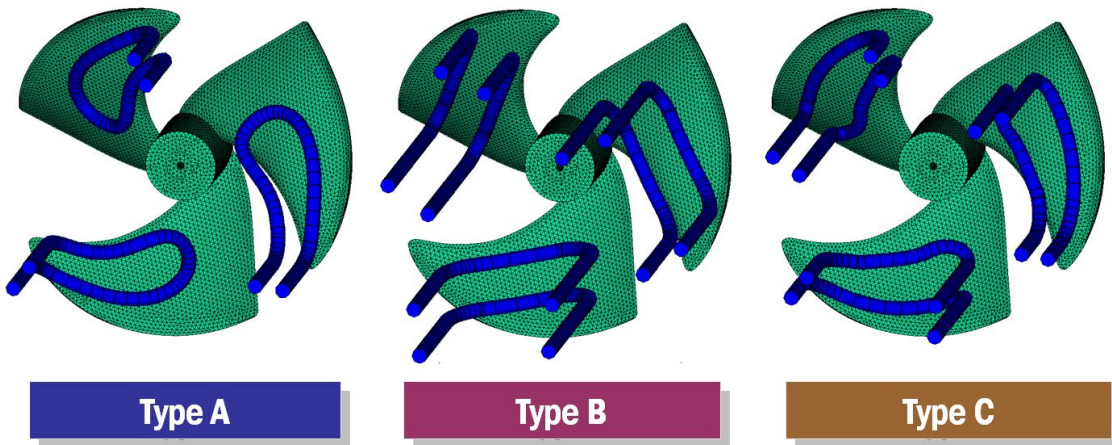


Fig. 12 Shape of Conformal cooling channel for three type design alternatives

냉각채널 형상에 대한 냉각해석 중 냉각수 입·출구 온도차에 대한 해석 결과는 Fig. 13 과 같다. 냉각채널 입구온도는 모두 4 °C 이고, 냉각수는 물로 설정하였으며 냉각해석 결과, 세 가지 냉각채널 형상 모두 냉각수 입·출구 차가 2 °C 이하로 양호한 설계임을 확인했고, C 형상 냉각채널의 냉각수 출구온도가 4.053 °C 로 가장 낮았고, A 형상의 냉각채널이 4.083 °C 로 가장 높게 나왔다.

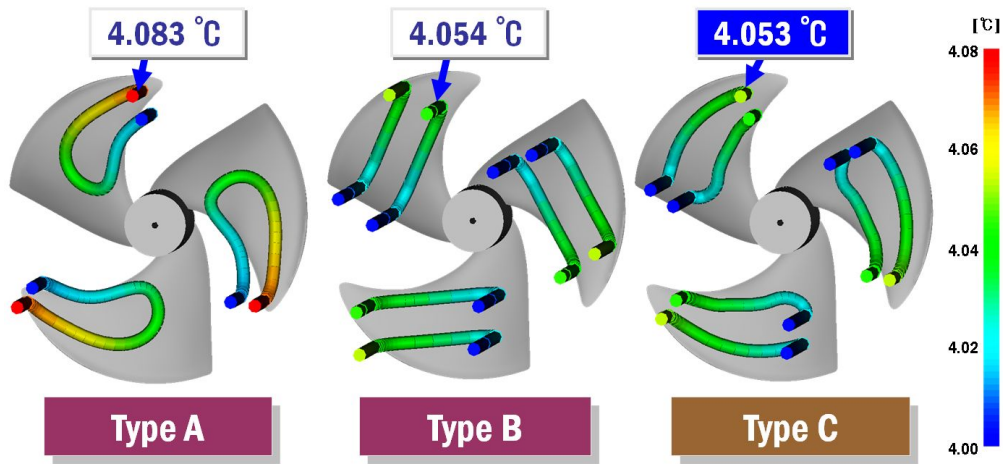


Fig. 13 Variation of coolant outlet temperature distributions according to design alternatives cooling channels

냉각과정 후 제품의 온도분포 해석 결과는 Fig. 14 와 같이 C 형상의 냉각채널을 가진 제품이 평균 9.40 °C 로 가장 낮았고, B 형상의 냉각채널을 가진 제품이 평균 10.61 °C 로 가장 온도가 높음을 알 수 있었다. 또한 제품의 온도가 전체적으로 가장 균일하게 분포되는 설계안 역시 C 형상의 냉각채널임을 확인 할 수 있었다.

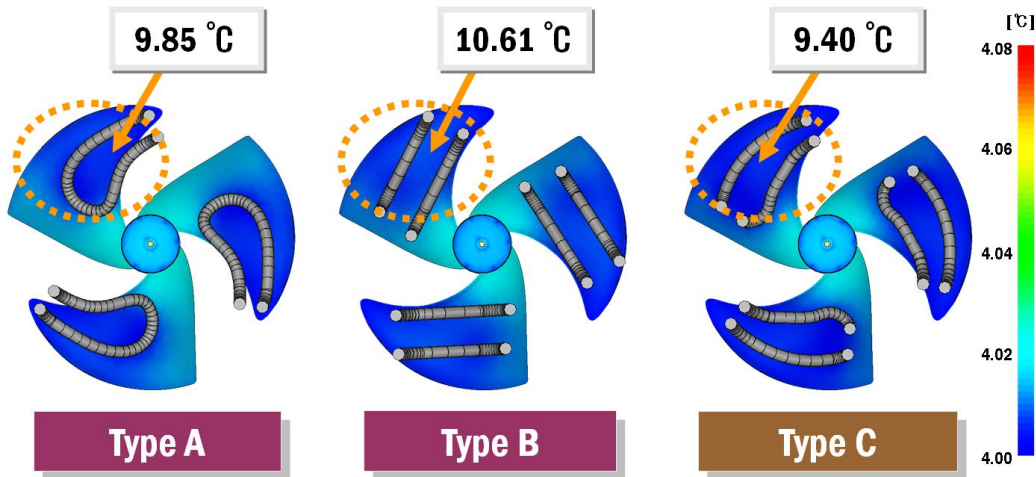


Fig. 14 Variation of product temperature distribution at an ejection time according to design alternatives of cooling channels

사출성형 해석 중 냉각해석을 통하여 세 가지 냉각채널 형상 중 C 형상의 냉각채널이 입·출구 냉각수 온도차가 4.053 °C 로 가장 적었고, 냉각해석 후 제품의 온도분포 역시 C 형상의 냉각채널을 가진 제품이 평균 9.40 °C 로 가장 낮았으며 제품 전반적으로 가장 균일한 온도를 가지므로 본 연구급형의 냉각채널 형상으로 결정하였다.

2.4.3 형상적응형 냉각채널과 금형표면간 높이 방향 위치에 대한 설계안

초기 형상적응형 냉각채널의 형상에 대한 냉각 해석 결과를 바탕으로 금형 표면 형상에 대하여 일정하게 설계된 C 형상의 냉각채널을 가진 사출성형 금형에 대하여 냉각채널과 금형 표면간 높이 방향의 위치를 결정하고자 Fig. 15 와 같이 네 가지 설계안에 대하여 사출성형 해석을 수행하였다. 상·하 코어의 냉각채널의 지름은 모두 6.32 mm 이고, 금형 표면과 냉각채널간 거리는 6 mm, 12 mm, 24 mm 및 48 mm 로 설계하였다.

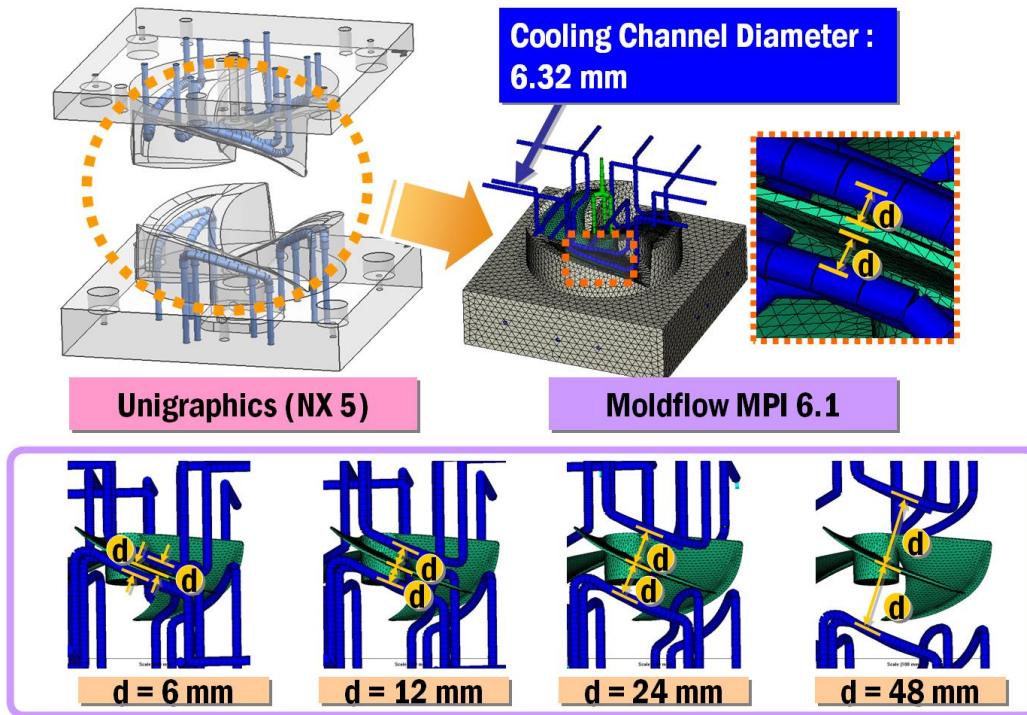


Fig. 15 Definition of cooling distance (d)

사출성형 공정은 앞서 수행한 Table 2 와 같고, Fig . 16 은 충전 해석 결과이다. 사출성형 해석 결과 네 가지 설계안 모두 제품 충전 시간은 동일하게 1.89 초가 소요되었고, 수지 충전시 유리 섬유 (Glass fiber) 가 팬 블레이드 가장자리에서 약간씩 뭉치는 현상을 확인하였지만, 대체적으로 네 가지 설계안 모두 동일한 시간동안 제품 형상에 일정하게 수지가 흘러감을 알 수 있다. 네 가지 설계안 모두 동일한 충전 시간을 갖는 것은 사출성형 공정 중 충전 과정은 냉각채널의 깊이에 전혀 관계가 없음을 알 수 있다.

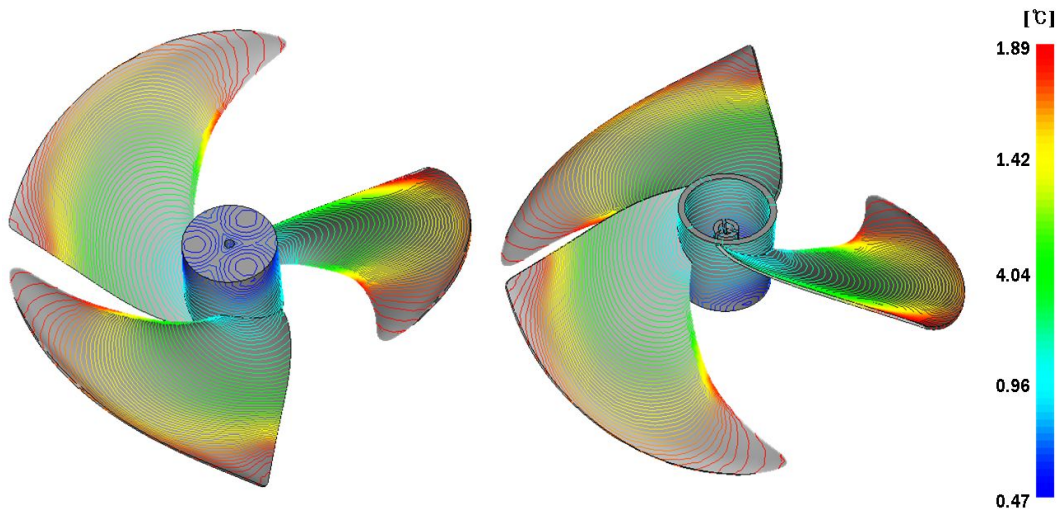


Fig. 16 Filling times for different cooling depth

사출성형 해석 결과, 사출압력 선도는 Fig. 17 과 같다. 최대 사출압력은 금형 표면과 냉각채널간 깊이에 대한 설계안 모두 사출압력 곡선이 비슷한 상태에서 제품이 성형됨을 알 수 있었고, 금형표면과 냉각채널간 깊이가 6 mm 인 금형 79.74 MPa 로 가장 적은 압력에서 제품이 성형됨을 알 수 있었다. 사출성형 공정 시간은 네 가지 설계안 모두 25.05 초임을 알 수 있었다.

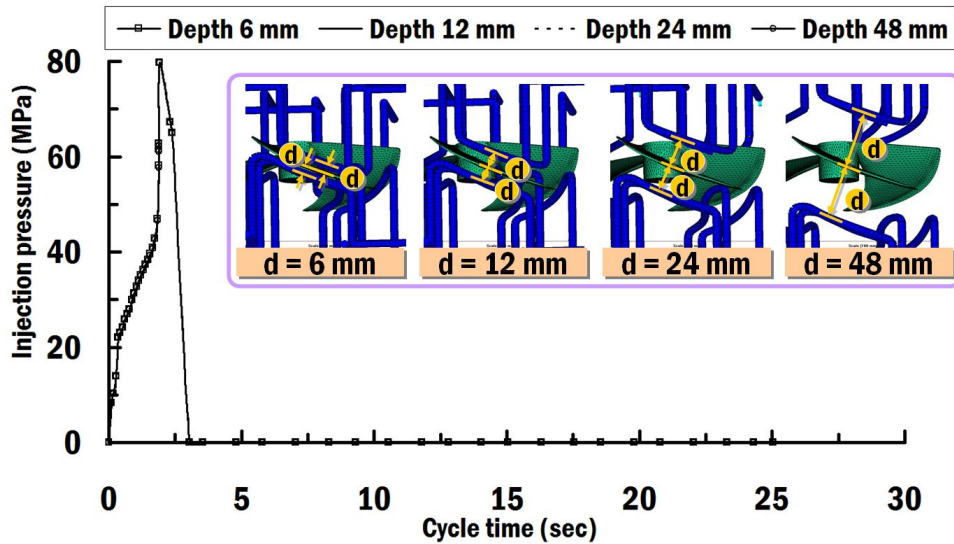


Fig. 17 Variation of the injection pressure–cycle time relationship according to the cooling depth

형체력 선도는 Fig. 18 과 같이 네 가지 설계안 모두 비슷한 형체력 선도를 가짐을 확인하였고, 최대 형체력은 네 가지 설계안 중 금형 표면과 냉각채널간 깊이가 6 mm 인 설계안이 70.50 ton 으로 가장 적은 형체력에서 제품이 성형됨을 알 수 있었다.

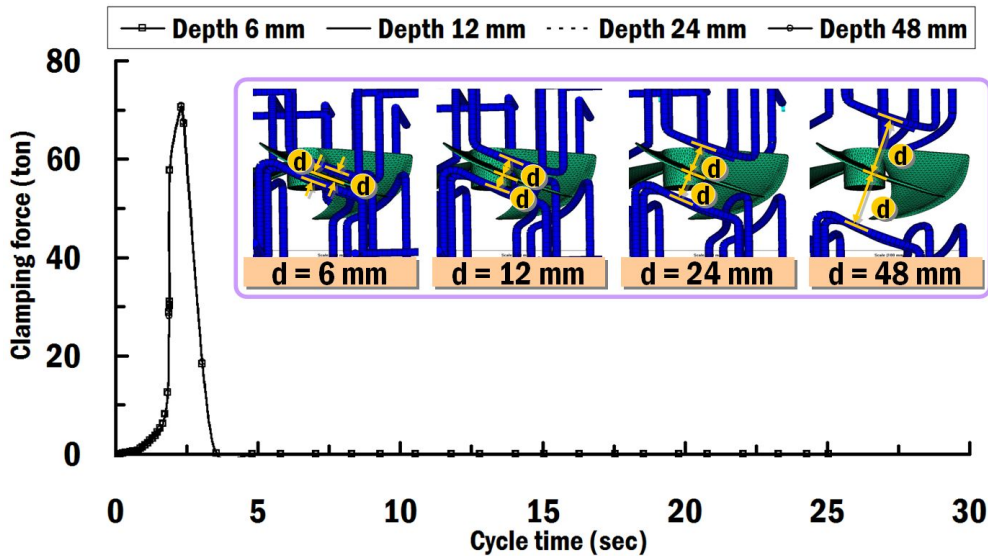


Fig. 18 Variation of the clamping force–cycle time relationship according to the cooling depth

사출성형 해석결과, 제품의 온도분포 곡선은 Fig. 19 와 같다. 제품 날개 임의의 부분 A, B 및 C 지점에 대하여 온도분포 조사 결과 충전 및 보압 과정에서는 네 가지 설계안 모두 제품의 온도분포가 일정하지만 냉각 과정이 시작되는 3 초 이후부터는 제품의 온도가 설계안마다 조금씩 달라짐을 알 수 있다. 네 가지 설계안 모두 제품의 A 지점과 B 지점이 균일하게 냉각됨을 알 수 있고, 금형 표면과 거리가 가장 가까운 6 mm 에 위치한 냉각채널이 가장 빠르게 제품의 온도가 낮아짐을 알 수 있으며, 냉각 채널이 금형 표면과 가장 먼 48 mm 에 위치한 설계안은 비교적 가장 느리게 냉각됨을 알 수 있다. 그리고 제품 중심에서 멀리 위치한 C 지점이 A, B 지점의 온도보다 약간 높음을 알 수 있다. 그리고 C 지점이 A 및 B 지점보다 제품의 두께가 두꺼워 약간의 온도차가 생김을 알 수 있다.

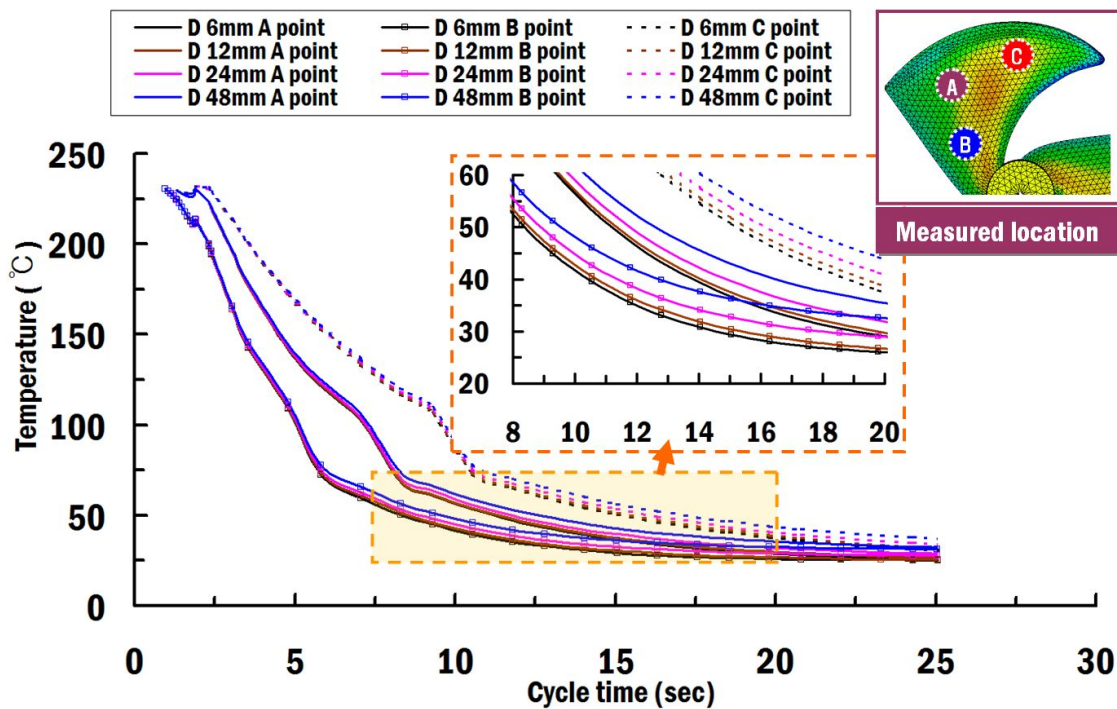


Fig. 19 Influence of the cooling depth on the time histories of temperature for different locations of the product

Fig. 20 은 제품 취출시 수축률에 대한 해석 결과를 나타낸다. 각각의 설계안 모두 수축이 발생하는 곳은 제품 두께가 가장 두꺼운 날개 중심부분이며 최대/평균 수축률이

가장 적은 설계안은 최대 수축률 9.12 % 및 평균 수축률 4.74 % 인 냉각채널이 금형 표면으로부터 6 mm 에 위치한 설계안임을 알 수 있었다. 충전 및 보압 과정에서 용융수지는 고화되면서 캐비티 내에서 수축하게 되는데 제품 전반적으로 금형 표면과 냉각채널간 거리가 6 mm 인 설계안이 가장 수축률이 적음을 알 수 있다.

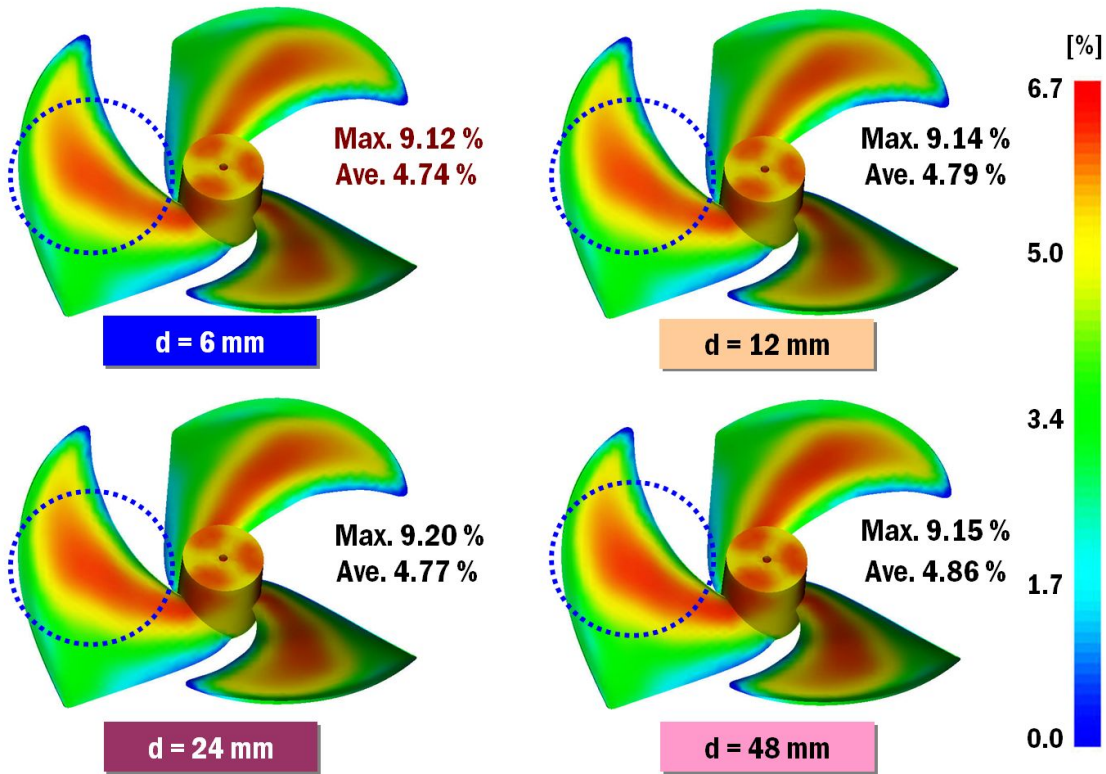


Fig. 20 Influence of the cooling depth on the volumetric shrinkage of the moulded product

Fig. 21 은 사출성형시 냉각과정 후 Z 방향인 제품 수직 방향으로의 휨 변형에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. 각각의 설계안 모두 최대 변형량 0.55 mm 이내의 아주 적은 변형이 일어남을 알 수 있다. 각각의 설계안 모두 변형이 일어나는 위치는 제품의 날개 끝부분이며 이와 같은 현상은 상·하코어 냉각채널이 완벽하게 대칭을 이루도록 설계했을 시 실제 금형 제작이 불가능하여 약간의 비대칭 설계로 인한 제품의 끝부분이 변형을 일으키는 것임을 알 수 있었다. 휨 변형이 가장 적게 발생한 설계안은 금형

표면으로부터 냉각채널이 6 mm 떨어진 설계안임을 알 수 있었고, 금형 표면으로부터 가장 가까운 곳에서 제품을 전반적으로 균일 냉각을 시킴으로써 휨 변형이 가장 적게 발생함을 알 수 있었다.

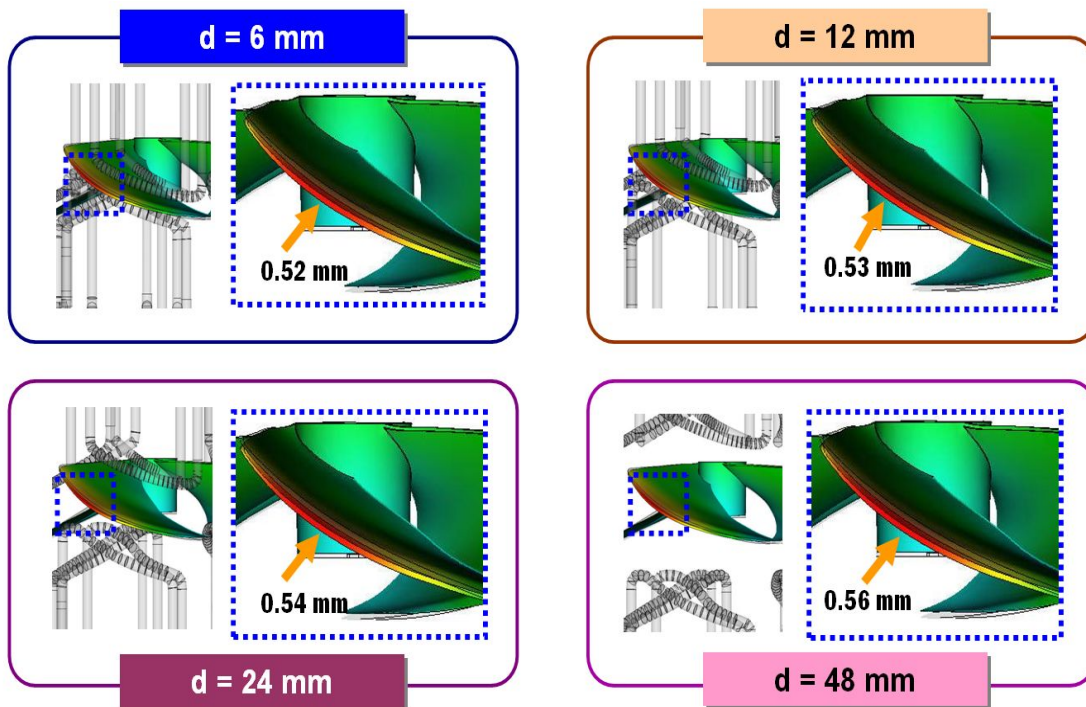


Fig. 21 Effects of the cooling depth on the deflection of the moulded product (Deflection in the Z direction)

Fig. 22 는 사출성형시 제품에 생기는 불량 중 기공 (Air-trap) 및 웰드라인 (Weld-line) 에 대한 해석 결과이다. 각각의 설계안 모두 기공 발생 위치는 제품 중심 밑부분에서 생성됨을 알 수 있고, 웰드라인 발생 위치는 네 가지 설계안 모두 제품 날개 끝부분에서 생성됨을 알 수 있다. 기공이나 웰드라인은 냉각채널의 위치에 관계없이 발생함을 알 수 있었고, 제품 외관에는 발생하지 않아 양호한 사출성형 공정임을 알 수 있었다.

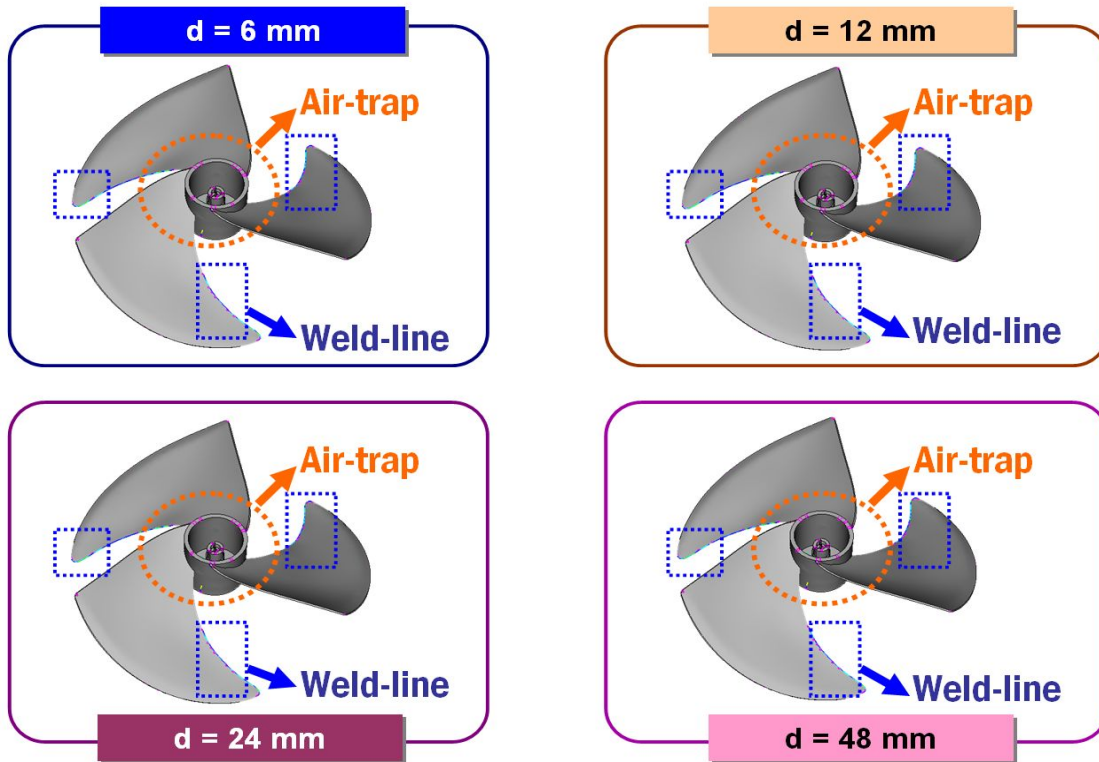


Fig. 22 Effects of the cooling depth on the formation of air-traps and weld-lines in the moulded product

냉각채널과 금형 표면간 높이방향의 위치를 결정하기 위한 네 가지 설계안에 대하여 사출성형 해석을 수행한 결과는 Table 3 과 같다. 제품의 기공 및 에어트랩은 각각의 설계안 모두 동일한 위치에서 발생하였다. 금형 표면과 냉각채널의 거리가 6 mm 인 설계안이 최대 사출압력 및 형체력이 79.74 MPa 및 70.50 ton 으로 가장 낮게 나타났고, 제품 수축률 및 휨 변형량 역시 가장 적음을 알 수 있었다. 제품의 온도분포 역시 금형 표면과 냉각채널간 거리가 6 mm 인 설계안이 가장 낮고 균일하게 냉각되어 본 논문의 형상적응형 냉각채널의 높이방향 거리에 대한 설계안으로 선정하였다.

Table 3 Summary of injection moulding characteristics for different cooling depths

Type	Depth 6 mm	Depth 12 mm	Depth 24 mm	Depth 48 mm
Fill time (sec)	1.89	1.89	1.89	1.89
Cooling time (sec)	22.11	22.11	22.11	22.11
Cycle time (sec)	25.05	25.05	25.05	25.05
Max. Injection pressure (MPa)	79.74	79.75	79.75	79.75
Max. Clamp force (ton)	70.50	70.56	70.69	70.91
Avg. Shrinkage (%)	4.74	4.77	4.79	4.86
Max. Deflection (Z direction, mm)	0.52	0.53	0.54	0.56

2.4.4 형상적응형 냉각채널간 폭방향 거리에 대한 설계안

초기 형상적응형 냉각채널의 형상 및 높이방향 위치에 대한 사출성형 해석을 통하여 제품 형상에 적응하는 2 개의 입·출구를 갖고, 금형표면과 냉각채널간 거리가 6 mm 인 냉각채널로 설계하였다. 본 연구에서는 Fig. 23 과 같이 두께가 0.04 mm ~ 2.5 mm 인 얇은 팬 제품이 냉각채널간 거리에 따른 제품 특성을 분석하고 냉각채널을 선정하기 위하여 제품 두께분포에 대해 사출금형의 폭방향으로 냉각채널의 거리를 변경하여 설계하였다. 냉각채널 설계시 실제 제작이 가능하도록 설계하였고, 냉각채널 입·출구간 폭방향 거리는 세 가지 유형별로 각각 21.9 mm / 7.5 mm, 25.4 mm / 11.3 mm 및 37.1 mm / 16.1 mm 의 위치로 선정하였고, 제품과 냉각채널과의 두께방향 거리는 6 mm 로 설계하였다.

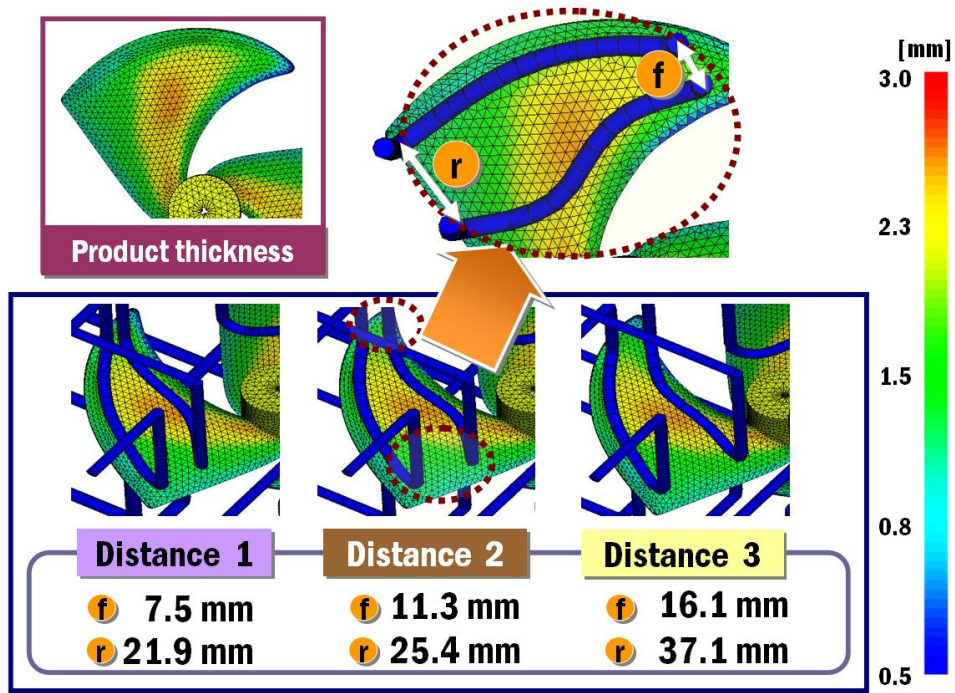


Fig. 23 Definition of cooling distance and its design alternatives

본 연구는 팬 제품에 대하여 사출성형 금형 냉각채널의 폭 방향간 위치에 따른 사출성형 해석을 수행하였다. 사출성형 공정조건은 앞서 수행한 Table 2 와 같고, 수지의 충전 해석 결과는 Fig. 24 와 같다. 사출성형 해석 결과 세 가지 설계안 모두 제품 충전 시간은 동일하게 1.89 초가 소요되었다. 수지가 금형 캐비티 내 유입시 충전 패턴 역시 세 가지 설계안 모두 제품 형상에 일정하게 수지가 흘러감을 알 수 있다. 충전 해석 결과를 통하여 각각의 설계안에 관계없이 동일한 충전 시간을 갖는 것은 사출성형 공정 중 충전 과정은 냉각과정과 전혀 관계가 없음을 알 수 있다.

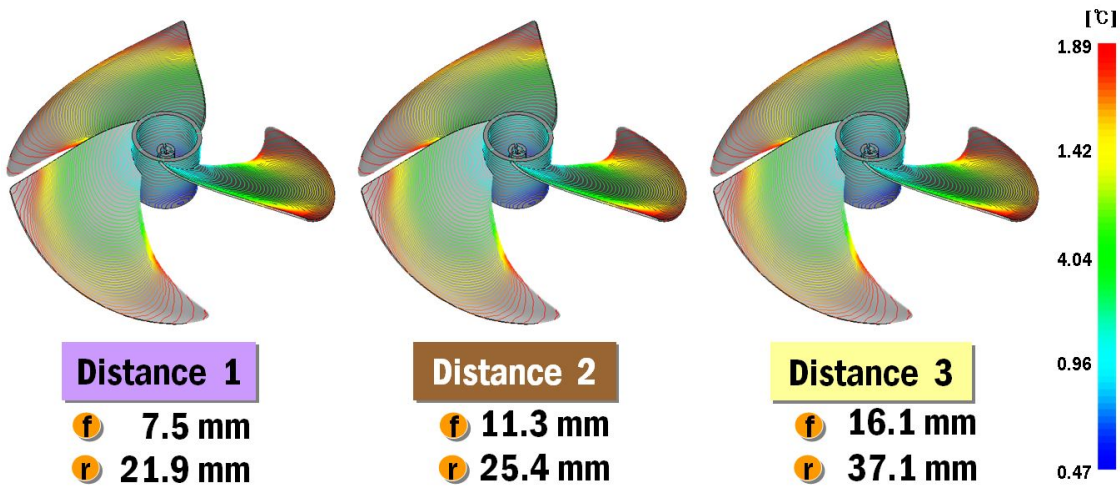


Fig. 24 Filling times for different cooling distance

냉각채널간 폭방향 거리에 대한 설계안의 사출성형 해석결과, 사출압력 선도는 Fig. 25 와 같다.

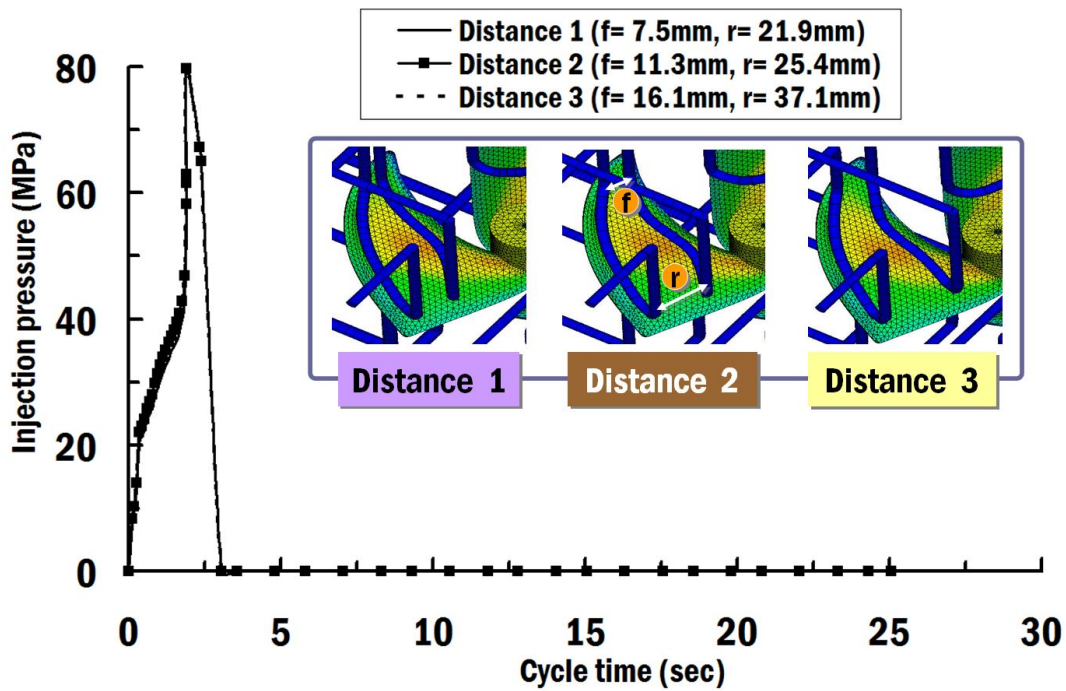


Fig. 25 Variation of injection pressure-cycle time according to cooling distance

세 가지 설계안 중 최대 사출압력은 1 번 및 3 번 설계안이 79.75 MPa 로 가장 높았으며 2 번 설계안이 79.74 MPa 로 가장 낮게 나타났다. 사출성형 공정 시간은 25.05 초로 세 가지 설계안 모두 제품 성형시 동일한 시간이 소요됨을 알 수 있었다.

형체력 선도는 Fig. 26 과 같다. 각각의 설계안 중 최대 형체력은 1 번 설계안이 72.60 ton 으로 가장 높았고, 3 번 설계안이 70.43 ton 으로 가장 적음을 알 수 있었다.

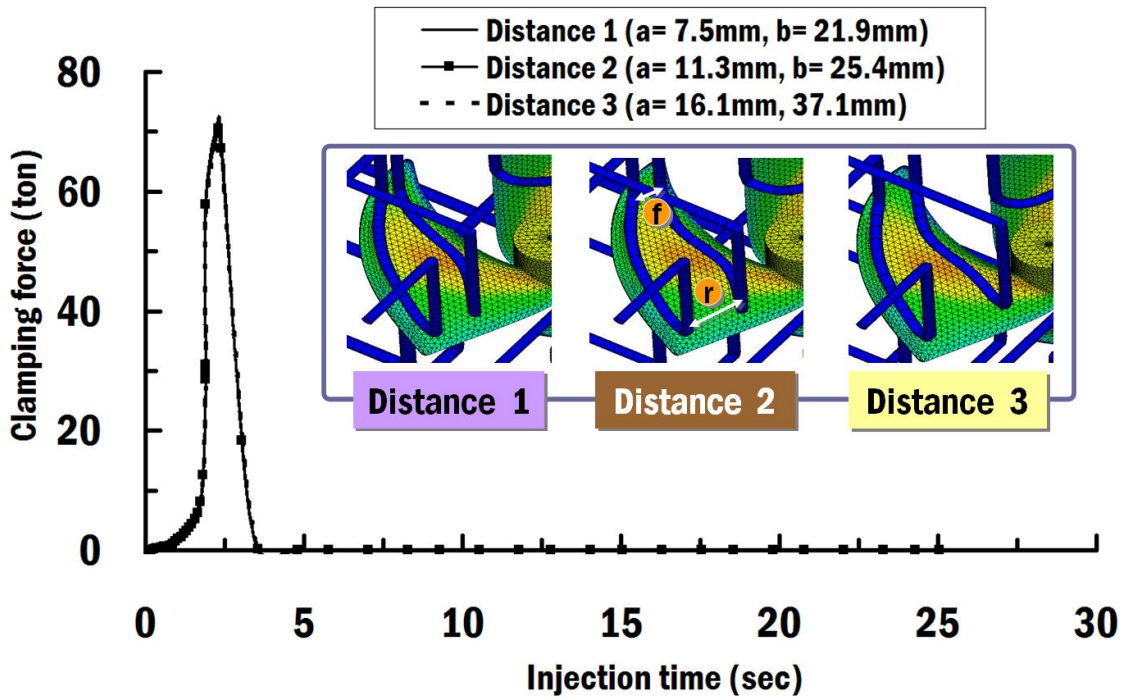


Fig. 26 Variation of clamping force-cycle time according to cooling distance

사출성형 해석결과, 제품의 온도분포 곡선은 Fig. 27 과 같다. 제품 날개 임의의 부분 A 및 B 지점과 제품 중심 부분인 C 지점에 대하여 온도분포 조사 결과 세 가지 설계안 모두 제품의 온도분포가 일정하지만 냉각과정을 통한 제품 취출시간에는 제품의 온도가 설계안마다 조금씩 달라짐을 알 수 있다. 세 가지 설계안 모두 제품의 f 지점과 r 지점이 균일하게 냉각됨을 알 수 있고, 냉각채널 폭방향 거리가 25.4 mm / 11.3 mm 인 두 번째 설계안이 가장 제품의 온도분포 차이가 적음을 알 수 있다. 냉각채널간 거리에 대한 사출성형 해석을 통하여 냉각채널 형상을 제품의 두께분포에 대하여 가장 일정하게 설계하였을 때 가장 균일하게 제품이 냉각됨을 알 수 있다.

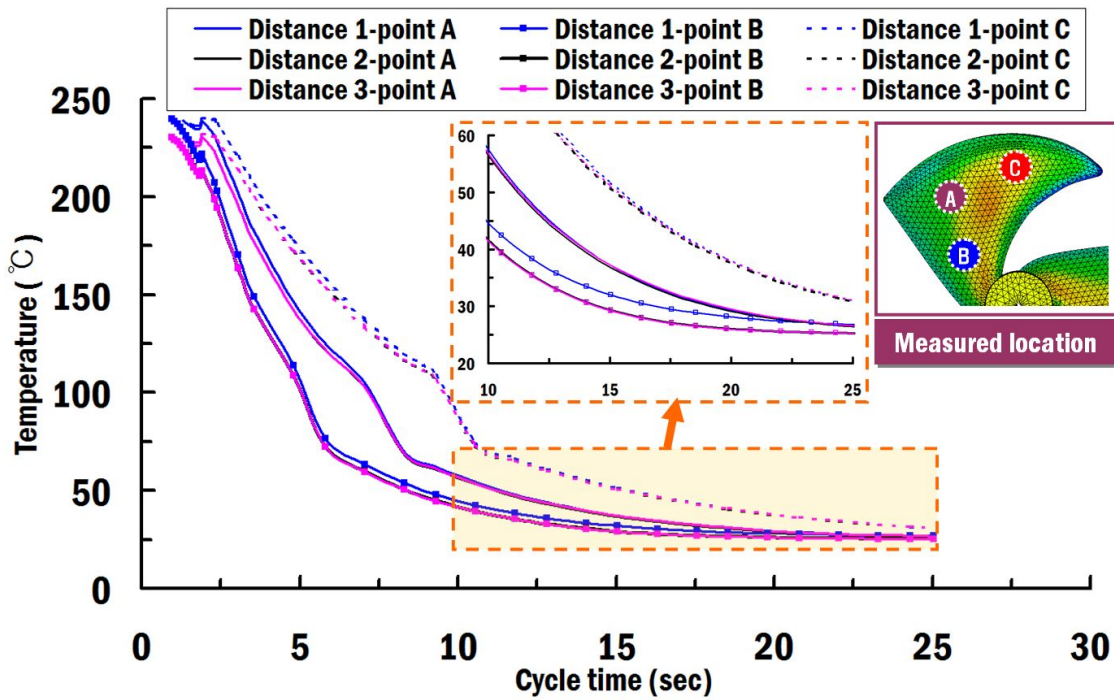


Fig. 27 Influence of cooling distance on the temperature variations of the product

Fig. 28 은 제품 취출시 수축률에 대한 해석 결과를 나타낸다. 각각의 설계안 모두 수축이 발생하는 곳은 제품의 날개 중심부분이며 최대 수축률이 가장 적은 설계안은 9.12 % 로 냉각채널 폭방향 거리가 11.3 mm / 25.4 mm 인 두 번째 설계안으로 나타났고, 평균 수축률은 각각의 설계안에 대하여 첫 번째 설계안이 5.05 %, 두 번째 및 세 번째 설계안이 4.74 % 로 두 번째 및 세 번째 설계안이 가장 낮음을 확인하였다.

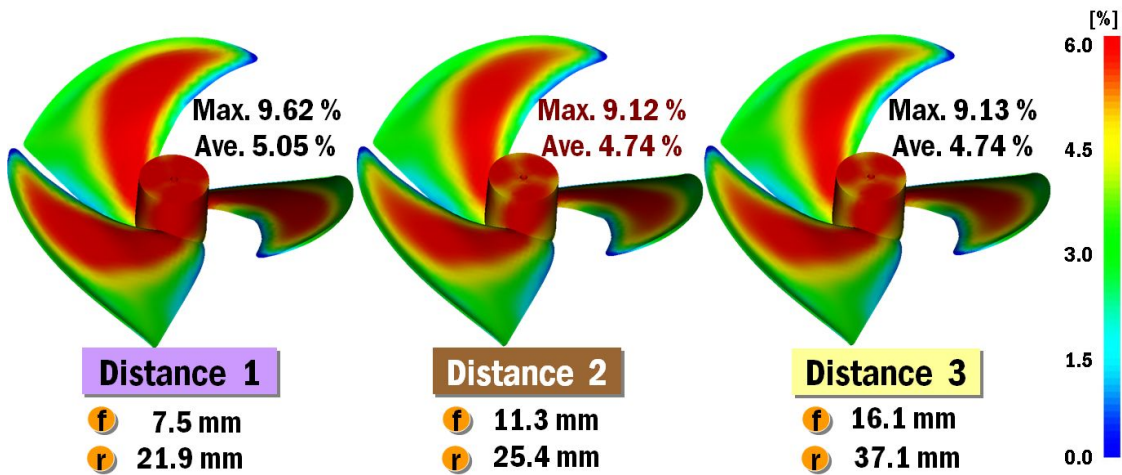


Fig. 28 Effect of cooling distance on the volumetric shrinkage of the product

Fig. 29 는 사출성형시 냉각과정 후 제품 전체 변형에 대한 해석결과이다. 각각의 설계안 모두 최대 변형량 0.5 mm 정도로 적은 변형이 일어남을 알 수 있다. 휨 변형이 일어나는 위치는 세 가지 설계안 모두 제품의 날개 끝부분이며 이와 같은 현상은 실제 사출성형 금형 제작시 냉각채널 설계를 고려한 약간 비대칭 설계로 인하여 제품의 끝부분이 변형을 일으키는 것을 알 수 있었다. 변형이 가장 적게 나타난 설계안은 제품 두께에 가장 일정하게 설계한 두 번째 설계안으로 나타났다.

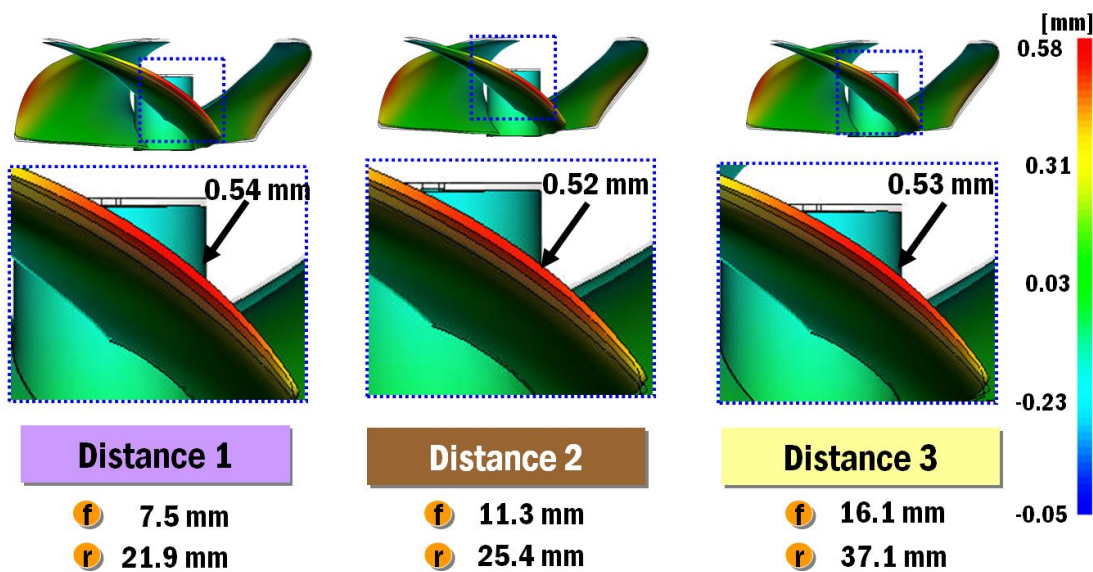


Fig. 29 Effect of cooling distance on the deflection of the product

Fig. 30 은 사출성형시 제품에 생기는 불량 중 기공 (Air-trap) 및 웰드라인 (Weld-line) 에 대한 해석 결과이다. 각각의 설계안 모두 기공 발생 위치는 제품 벽면 및 중심 밑부분에서 생성됨을 알 수 있고, 웰드라인 발생 위치는 제품 날개 끝부분 및 제품 중심 게이트 주변에서 생성됨을 알 수 있다. 기공이나 웰드라인은 냉각채널의 위치에 관계없이 발생함을 알 수 있었고, 웰드라인은 게이트 설계에 영향을 받음을 알 수 있었다.

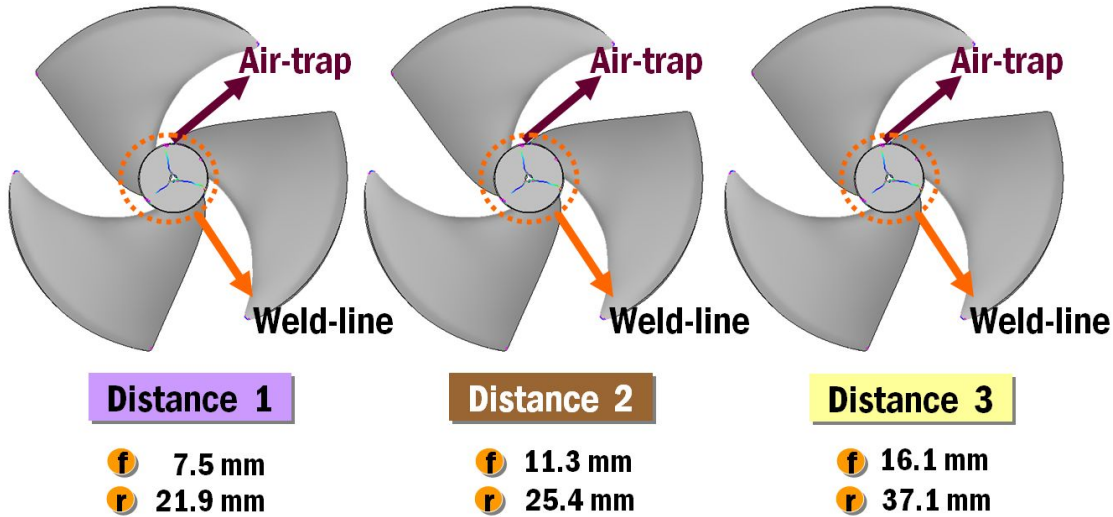


Fig. 30 Influence of cooling distance on the formation of air-trap and weld-line in the product

형상적응형 냉각채널을 폭방향간 거리를 선정하기 위한 세 가지 설계안에 대하여 사출성형 해석을 수행한 결과는 Table 4 와 같다. 제품의 기공 및 에어트랩은 각각의 설계안 모두 동일한 위치에서 발생하였고, 냉각채널 폭방향간 거리가 제품 두께 분포에 가장 일정하도록 설계된 두 번째 설계안이 최대 사출압력이 가장 낮은 상태에서 수축률, 휨 변형량, 냉각수 입·출구 온도차가 가장 적은 제품이 성형되므로 본 논문의 형상적응형 냉각채널의 최적 설계안으로 결정하였다. Fig. 31 은 사출성형 해석을 통한 대상 금형의 최적 설계안을 나타내고 있다.

Table 4 Summary of injection moulding characteristics for different cooling distances

Type	Distance 1	Distance 2	Distance 3
Fill time (sec)	1.89	1.89	1.89
Cooling time (sec)	22.11	22.11	22.11
Cycle time (sec)	25.05	25.05	25.05
Max. injection pressure (MPa)	79.75	79.74	79.75
Max. Clamping force (ton)	72.60	70.50	70.43
Ave. shrinkage (%)	5.05	4.74	4.74
Max. deflection (mm)	0.55	0.52	0.54

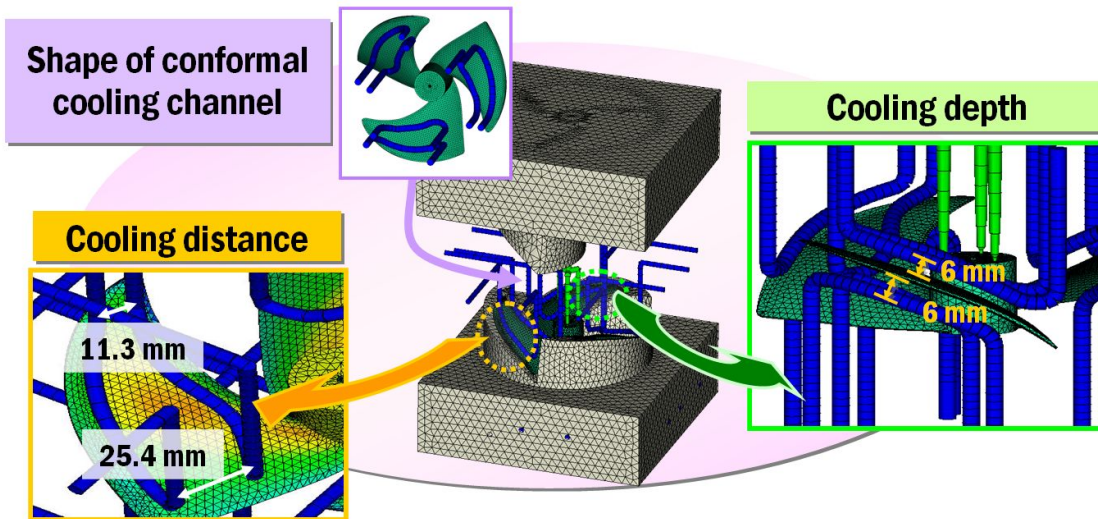


Fig. 31 Final design of the injection mould with conformal cooling channels

제 3 장 형상적응형 냉각채널을 가진 금형과 직선형 냉각채널을 가진 금형의 제품 사출성형 특성 분석

본 연구 대상 금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 및 제품의 특성을 비교/분석하기 위하여 현재 제품 양산 중인 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형을 Fig. 32 와 같이 Unigraphics NX 5 에서 설계하였다.

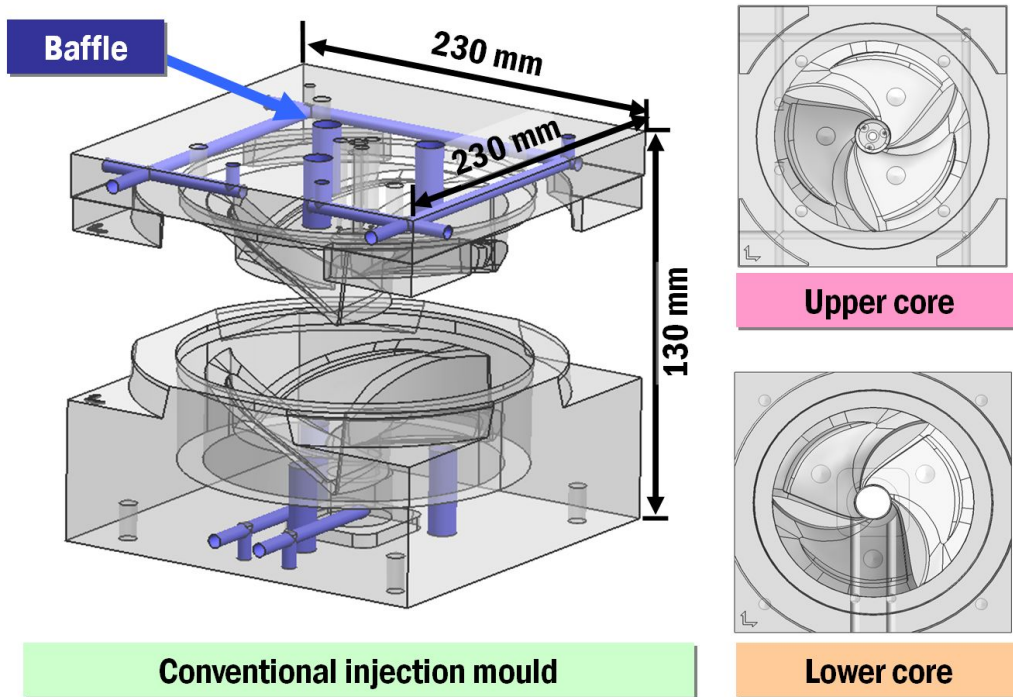


Fig. 32 Design of injection mould with linear cooling channels

직선형 냉각채널을 가진 사출성형 제품의 BEM 해석격자 생성은 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 제품과 동일하게 생성시켰다. 유한요소 격자는 상 코어, 하 코어 및 제품으로 나누어서 생성시켰고, 해석격자 수는 팬 및 금형 각각 13,587 개, 32,055 개이다. 최종 Fig 33 과 같이 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 해석 격자를 완성시켰고, 냉각채널의 지름은 8 mm, 배플 (Baffle) 지름은 16 mm 의 빔 (Beam) 해석격자로 생성시켰다.

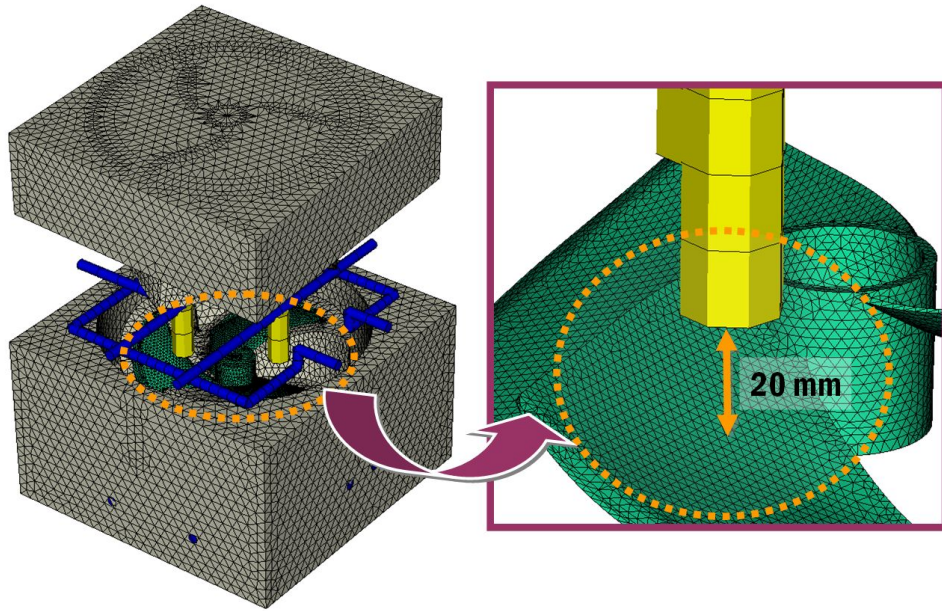


Fig. 33 Meshes for injection mould with linear cooling channels

사출성형 해석 공정조건은 Table 2 와 같이 앞서 수행한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 설계안을 도출한 공정조건과 동일하게 사출성형 해석을 수행하였다.

Fig . 34 는 형상적응형 및 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품의 충전 해석 결과이다. 사출성형 해석 결과 형상적응형 및 직선형 냉각채널 사출성형 금형의 제품 충전 시간은 1.89 초로 동일한 시간에 충전됨을 알 수 있다. 형상적응형 냉각채널 금형 및 직선형 냉각채널 금형 모두 게이트부에서 제품 끝단까지 수지는 미충진 없이 동일하게 충전됨을 알 수 있었다. 수지의 흐름은 단위시간당 거의 일정하게 흐름을 알 수 있었고, 날개의 안쪽 부분과 모서리부에서는 유리섬유로 인해 수지가 조금씩 뭉쳐지는 경향을 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

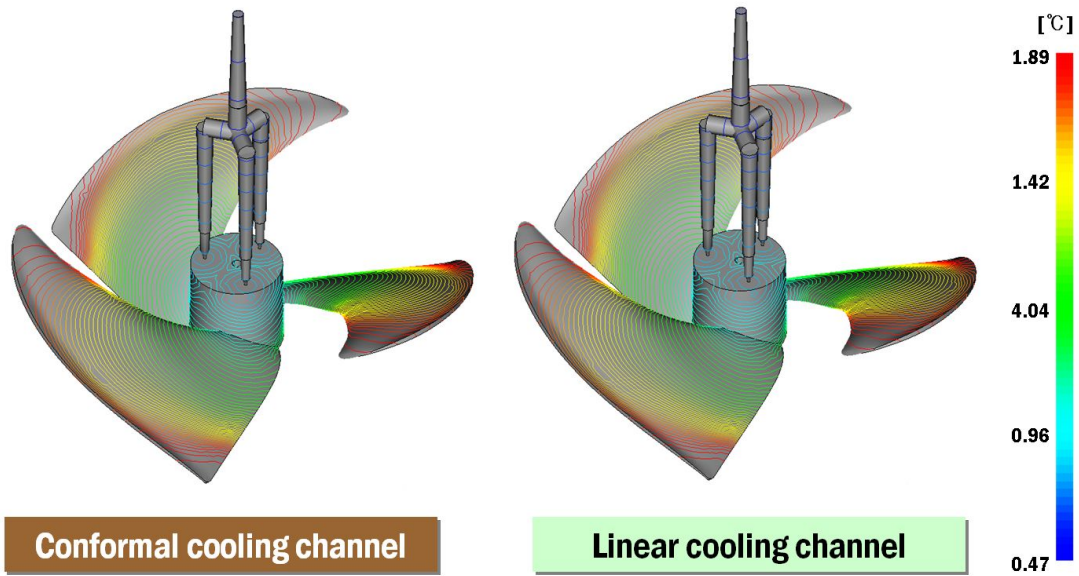


Fig. 34 Comparison of fill time of the designed mould and that of mould with linear cooling channels

형상적응형 및 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품의 사출성형 해석결과, 사출압력 선도는 Fig. 35 와 같고, 최대 사출압력은 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형이 79.76 MPa 이고, 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형이 79.83 MPa 로 형상적응형 냉각채널이 직선형 냉각채널보다 낮은 사출압력이 소요됨을 알 수 있다.

형체력 선도는 Fig. 36 과 같고, 형상적응형 및 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형이 69.39 ton 및 67.56 ton 으로 직선형 냉각채널이 약간 낮은 형체력에서 제품이 성형됨을 알 수 있었다.

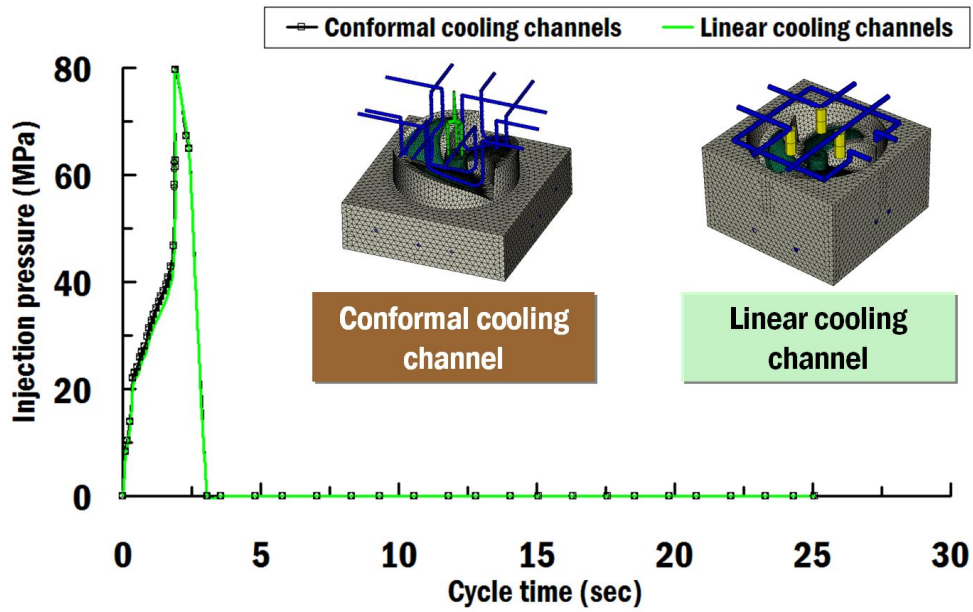


Fig. 35 Comparison of injection pressure–cycle time curve of designed mould and that of mould with linear cooling channels

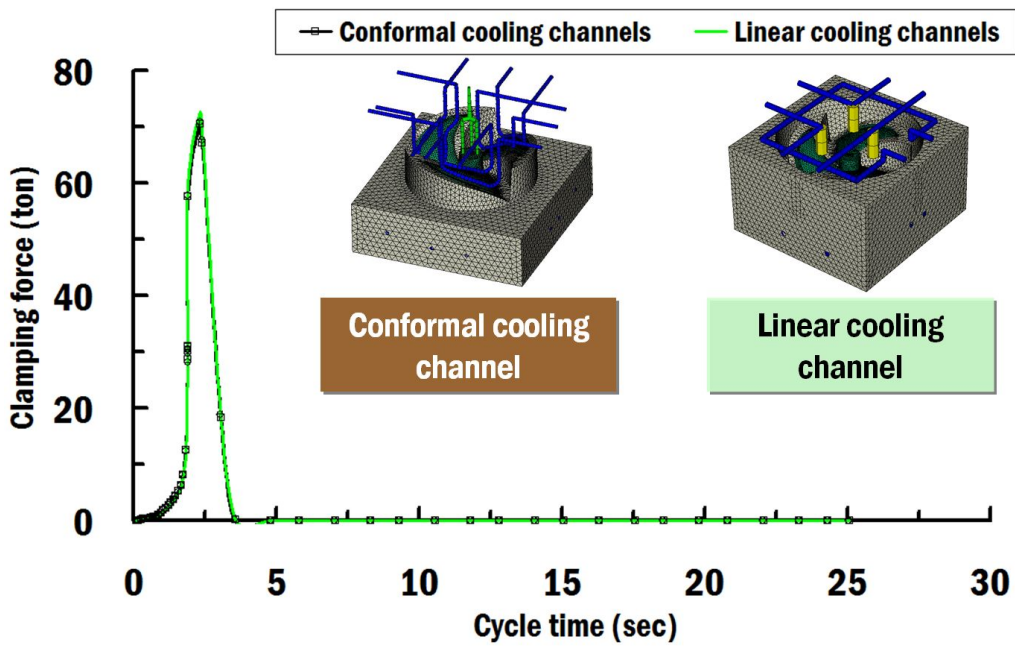


Fig. 36 Comparison of clamping force–cycle time curve of designed mould and that of mould with linear cooling channels

사출성형 해석결과, 제품의 온도분포 곡선은 Fig. 37 과 같다. 초기 사출성형 해석과 동일한 지점인 제품 날개 임의의 부분 A 및 B 지점과 제품 중심 부분인 C 지점에 대하여 온도분포 조사 결과 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품이 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품보다 온도분포가 전반적으로 낮고 균일함을 알 수 있다.

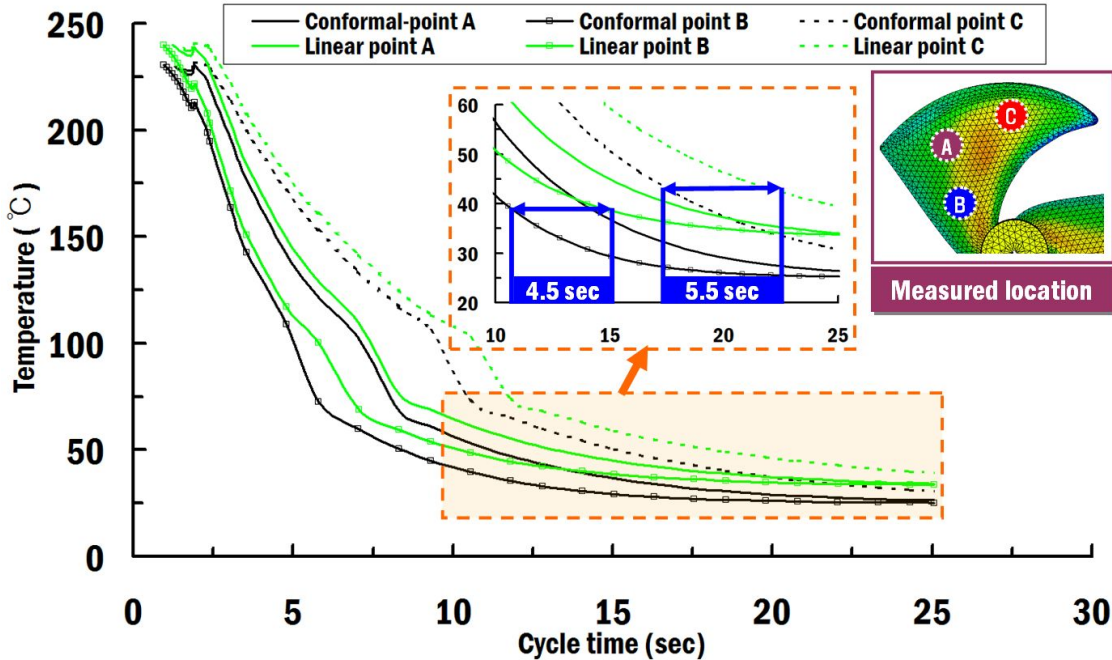


Fig. 37 Comparison of temperature-cycle time relationships of the designed mould and those of mould with linear cooling channels

Fig. 38 는 제품 취출시 제품의 변형에 대한 해석 결과를 나타낸다. 각각의 설계안 모두 변형이 발생하는 곳은 제품의 날개 끝부분이며 최대 변형량은 1 mm 이내로 양호한 사출성형 공정임을 알 수 있었다. 형상적응형 및 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품의 최대 변형량은 각각 0.52 mm 및 0.57 mm 로 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품이 이 더 적은 휨변형량을 갖는 것을 알 수 있었다. 평균 변형량 역시 형상적응형 및 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제품이 0.095 mm 및 0.100 mm 로 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 제품이 약간 낮음을 알 수 있었다. 따라서 제품의 냉각시간이 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 제품은 13 초이고, 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품은 20 초이므로 냉각시간이 13 초

일 때, 기존 냉각시간이 20 초인 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품의 특성과 비슷해짐을 알 수 있었다.

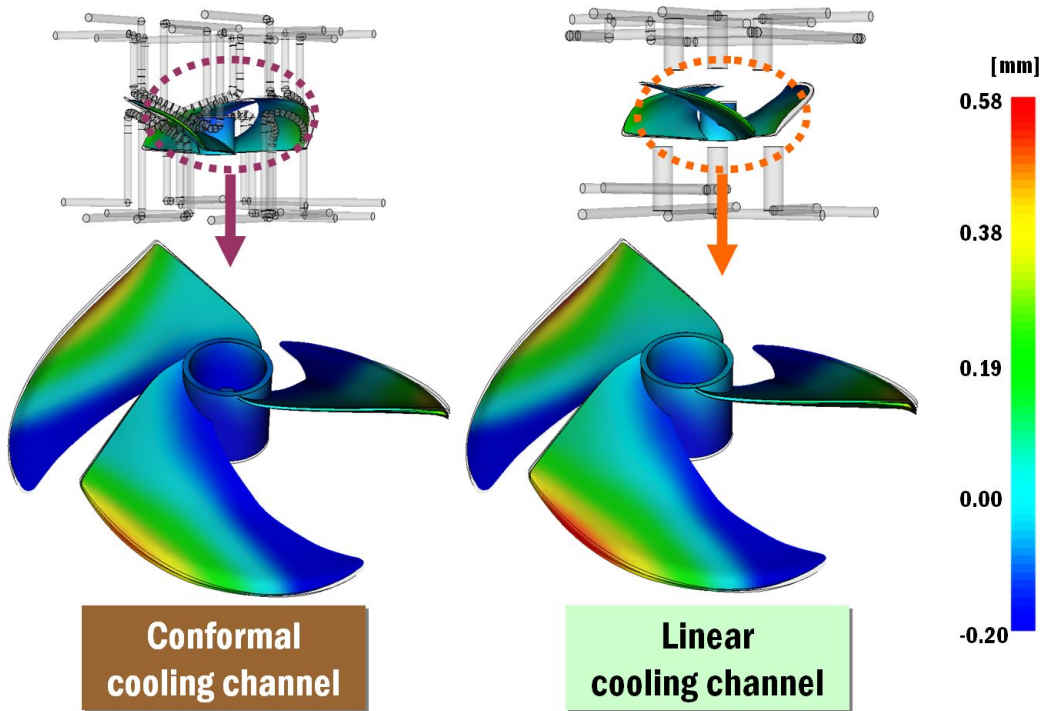


Fig. 38 Comparison of the product deflection of the designed mould and that of mould with linear cooling channels

Fig. 39 은 제품 취출시 제품의 수축률에 대한 해석 결과이다. 형상적응형 냉각채널 제품은 최대 수축률이 6.57 % 이고 평균 수축률이 4.74 % 인 반면 직선형 냉각채널 제품의 최대 수축률은 7.18 % 이고 평균 수축률은 5.20 % 로 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제품이 수축률이 더 낮음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 똑같은 사출성형 공정에서 성형을 하더라도 냉각채널의 형상에 따라 수축률이 달라짐을 알 수 있고, 형상적응형 냉각채널이 직선형 냉각채널보다 제품의 두께에 따라 균일하게 냉각 시키면서 제품의 수축률이 낮아짐을 알 수 있다.

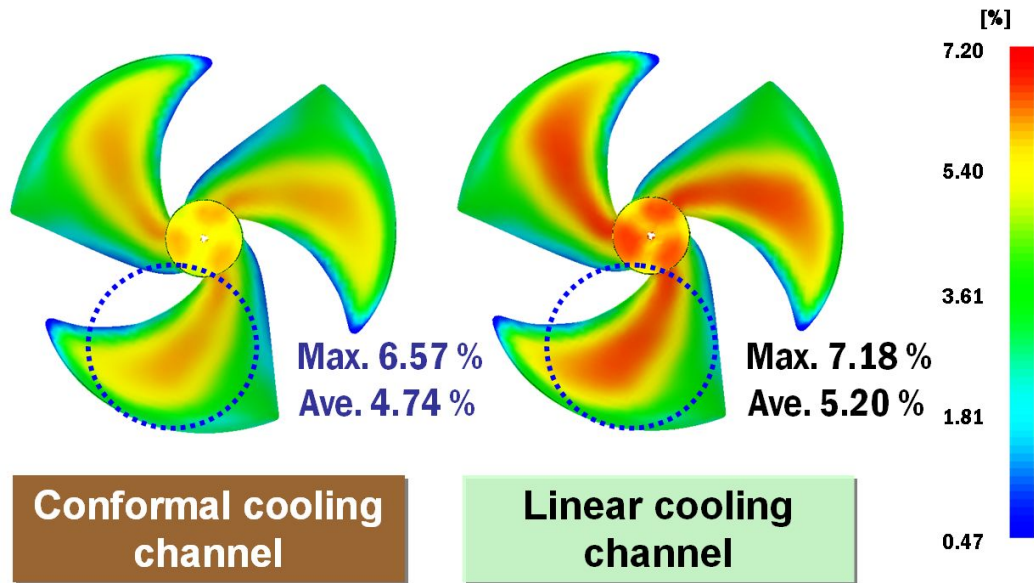


Fig. 39 Comparison of volumetric shrinkage of the product of the designed mould and that of mould with linear cooling channels

형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과 기존 기계가공을 통한 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 사출성형 해석을 수행한 결과는 Table 5 와 같다.

제품의 기공 및 에어트랩은 두 가지 설계안 모두 동일한 위치에서 발생하였고, 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 제품이 최대 사출압력 및 사출공정 시간이 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 제품보다 낮게 나타났고, 제품의 수축률 및 휨 변형량 역시 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제품이 더 낮음을 알 수 있었다.

제품의 온도분포는 균일냉각이 가능한 형상적응형 냉각채널 금형 제품이 직선형 냉각채널 제품보다 더 낮고 균일함을 알 수 있었다. 사출성형 해석을 통하여 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 냉각시간인 20 초에서의 제품 특성보다 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품이 냉각시간 13 초에서 제품이 냉각 특성이 향상됨을 알 수 있었고, 보다 균일냉각이 가능함을 알 수 있었다.

Table 5 Summary of comparison results for two types of mould

Type	Conformal cooling channel	Linear cooling channel
Fill time (sec)	1.89	1.89
Cooling time (sec)	22.11	22.11
Cycle time (sec)	25.05	25.05
Max. injection pressure (MPa)	79.74	79.74
Max. clamping force (ton)	70.50	72.77
Max. / Ave. shrinkage (%)	6.57 / 4.74	7.18 / 5.20
Max. deflection (mm)	0.52	0.57

제 4 장 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제작

4. 1 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 적층

직접식 금속 쾌속 툴링 공정은 고출력 레이저 빔을 금속 표면에 조사하여 순간적으로 용융풀 안에 금속 분말을 분사하여 금속 분말을 완전히 용융시켜 재료 위에 융착 시킴으로써 3 차원 형상을 제작한다. Fig. 40 은 직접식 금속 쾌속 툴링 공정중의 하나인 DMT (Laser-aided Direct Metal tooling) 공정의 개념도이다. 직접식 금속 쾌속 툴링 공정은 사출성형뿐만 아니라 박판성형 금형 등의 산업에서 사용되고 있으며, 금형 제작시 재료비 절감 및 쾌속 제작하기 위하여 금형 제작 및 보수분야에서 적용되고 있다. 직접식 금속 쾌속 툴링을 이용한 적층 금형의 냉각채널 설계는 Fig. 41 과 같이 DMT 노즐과 적층 금속간 간섭을 고려한 설계를 수행하였다. 적층할 금형의 하단부는 냉각 특성에 영향이 적으므로 기계가공을 수행하고, 사출성형시 제품의 성형 및 냉각 특성에 밀접한 영향이 있는 금형의 상단부는 직접식 금속 쾌속 툴링 기술을 적용하여 금형 형상을 제작하기 위해 Fig. 42 와 같이 사출금형을 분할하여 기계가공부와 직접식 금속 쾌속 툴링을 혼합하여 사용하였다. 기계가공부인 금형 하단부는 사출성형시 제품과 밀접한 관계가 적으므로 가공이 용이한 일반 사출강인 KP4M 을 사용하였고, 직접식 금속 쾌속 툴링 적층부는 KP4M 과 결합력이 우수하고 성형성이 우수한 P21 을 사용하였다. KP4M 의 열전도 계수 및 경도값은 20.6 W/m·K, 33 H_{RC} 이고, P21 의 열전도 계수 및 경도값은 38.0 W/m·K 및 40 H_{RC}이다.

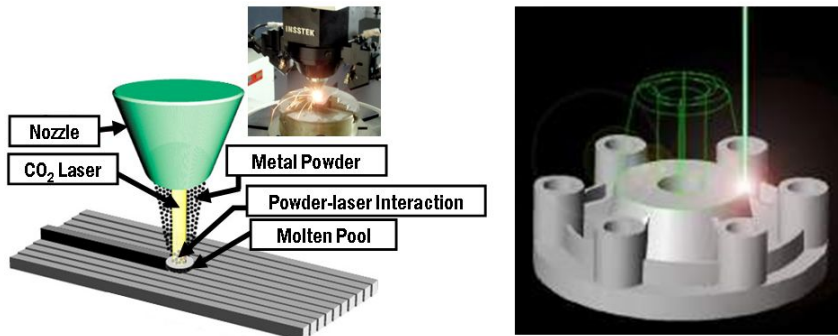


Fig. 40 Concept of Laser-aided Direct Metal Tooling (DMT) process

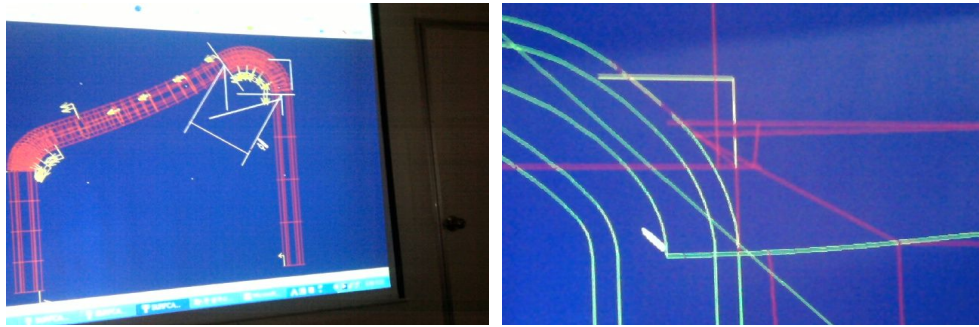


Fig. 41 Design of cooling channel

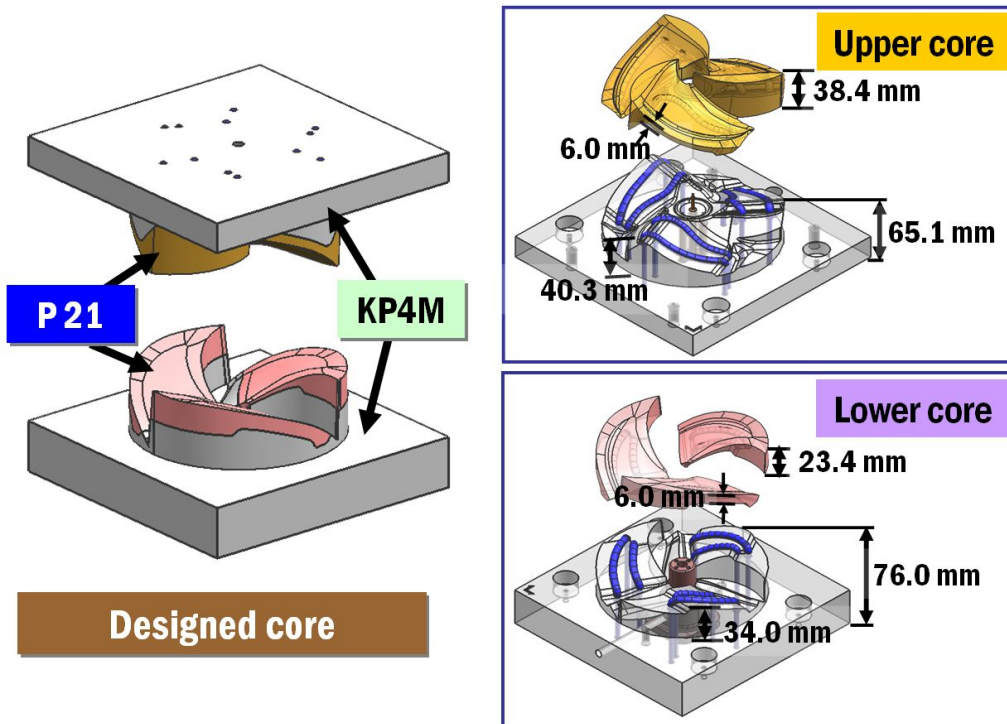


Fig. 42 Geometrical decomposition of the mould for the fan part

본 형상적응형 냉각채널 금형에 대한 적층 기능 분리 후, 3 차원 CAD 데이터로부터 IGES 파일로 변환한 후 Fig. 43 과 같이 레이저 경로 데이터 및 형상적응형 냉각채널 금형의 CAM (Computer Aided Manufacturing) 분할 데이터 (Slicing data) 를 생성 시켰다.

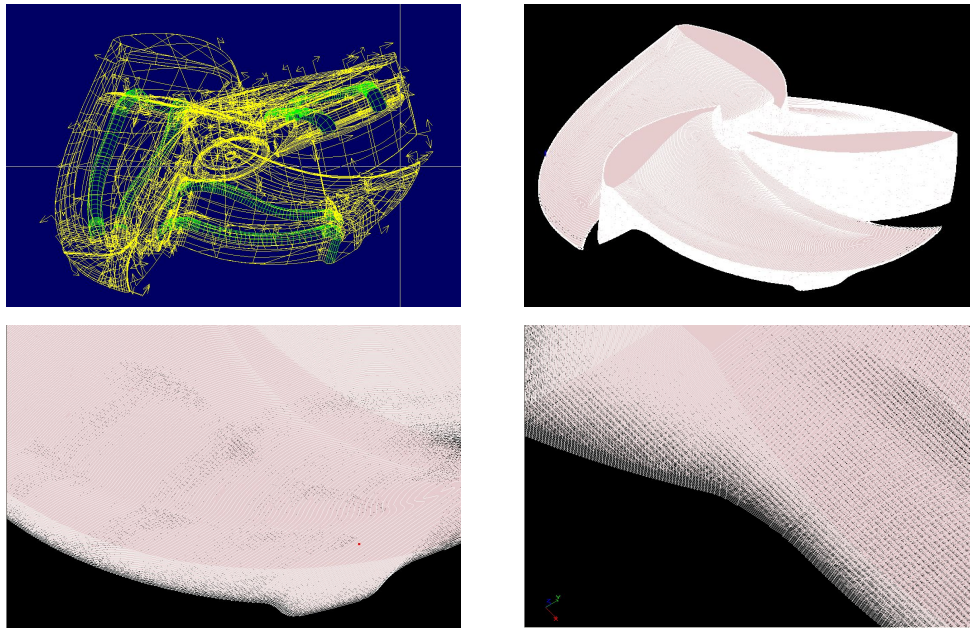


Fig. 43 Laser path for layer-by-layer stacking

Fig. 44 는 팬 제품용 형상적응형 사출성형 금형의 제작 과정이다. 사출성형 금형의 하단부인 베이스부는 기계 가공하여 제작한 후, 베이스부에 냉각 채널을 삽입하고, 냉각 채널 위에 직접식 금속 패속 틀링 공정으로 P21 재료를 적층하였다.

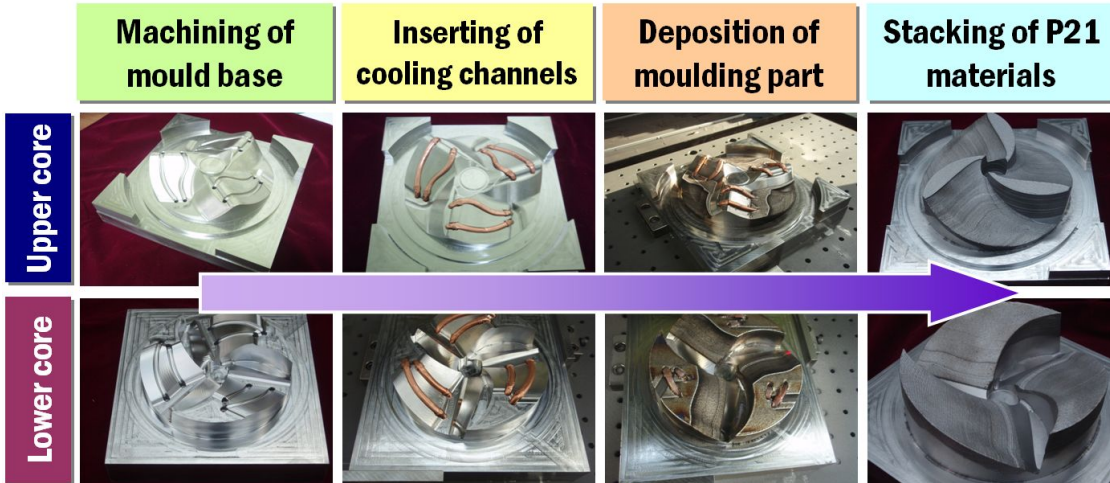
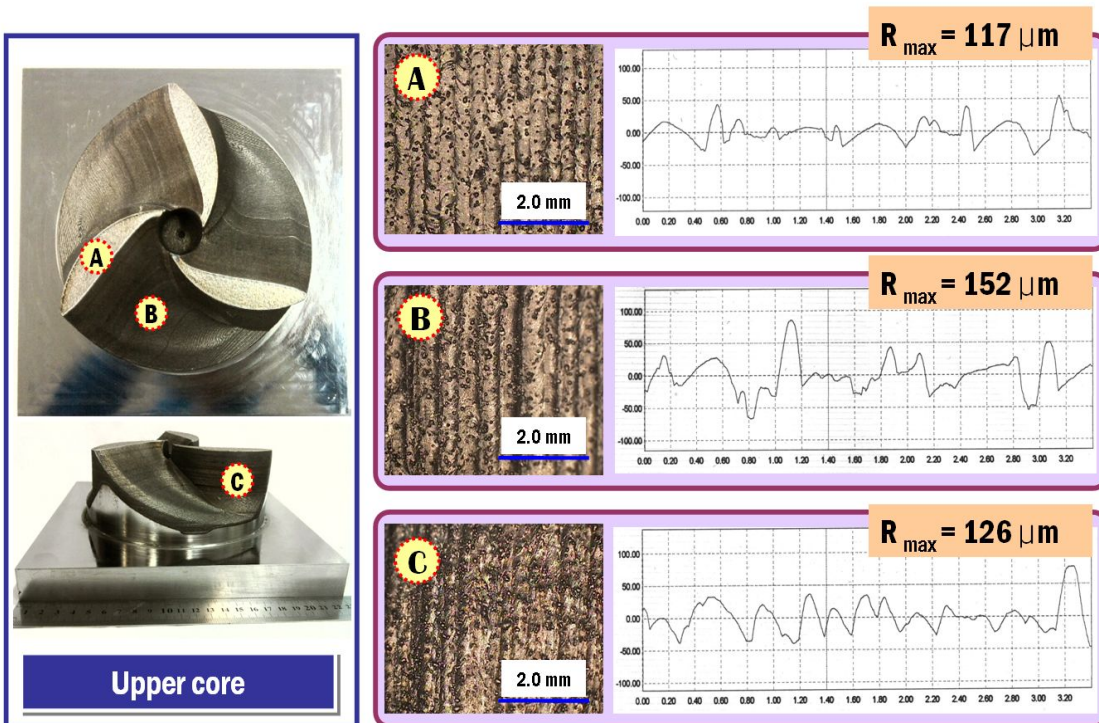


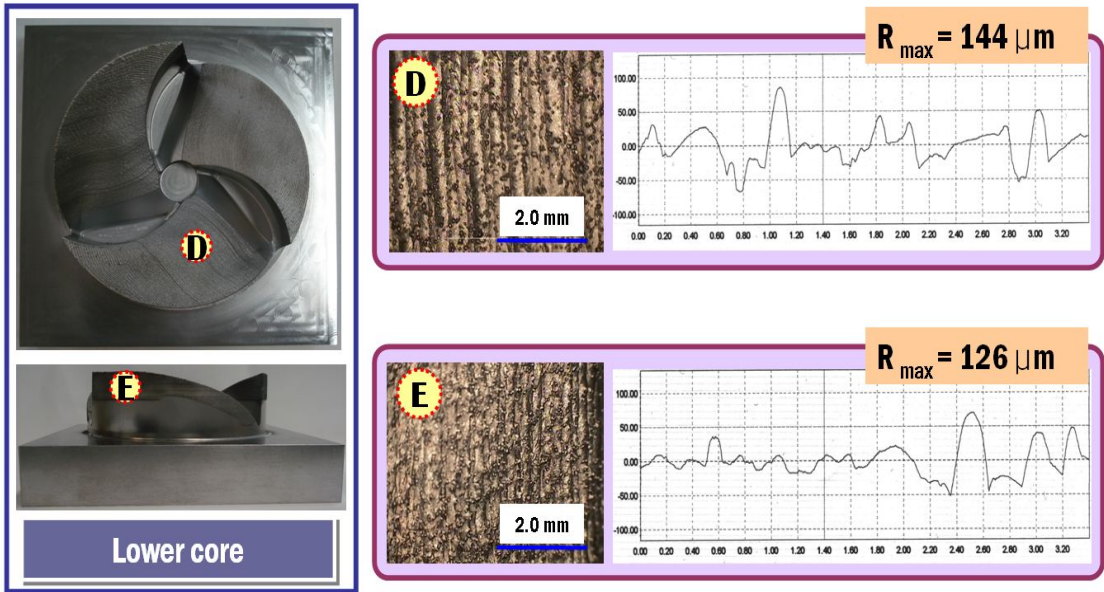
Fig. 44 Manufacturing procedure of cores with conformal cooling channels

4. 2 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 후가공

직접식 금속 쾌속 툴링 공정으로 제작한 금형의 표면 상태가 Fig. 45 와 같이 최대 표면 거칠기 (R_{max}) 가 117-152 μm 로 표면 상태가 매우 거칠어 제품 성형이 불가능한 상태이다. 그래서 후가공 처리가 절실히 필요한 상태이기 때문에 Fig. 46 과 같이 직접식 금속 쾌속 툴링 공정 부분에 대하여 후가공을 실시하였다. 사출성형 금형 표면 거칠기 향상과 제품 날개면의 정밀한 치수 구현을 위하여 고속 가공과 방전 가공 공정을 수행하였다. 후가공 처리에서는 1 차 형상 금형 제작 시 반영된 적층 후 가공량 1.0 mm 를 고려하여 고속가공 경로 데이터를 생성하였다.



(a) Upper core



(b) Lower core

Fig. 45 Surface roughness of cores after deposition of P21

직접식 금속 패속 툴링 공정으로 적층한 부분은 금형 표면의 정밀도 향상을 위하여 Fig. 46 과 같이 후가공을 실시하였다. 후가공에 소요된 시간은 75 시간이며 후가공 과정은 고속 NC 형상 가공, 전극가공 및 방전가공 등이며 후가공 공정을 거쳐 완성된 대상 금형은 Fig. 47 과 같다.

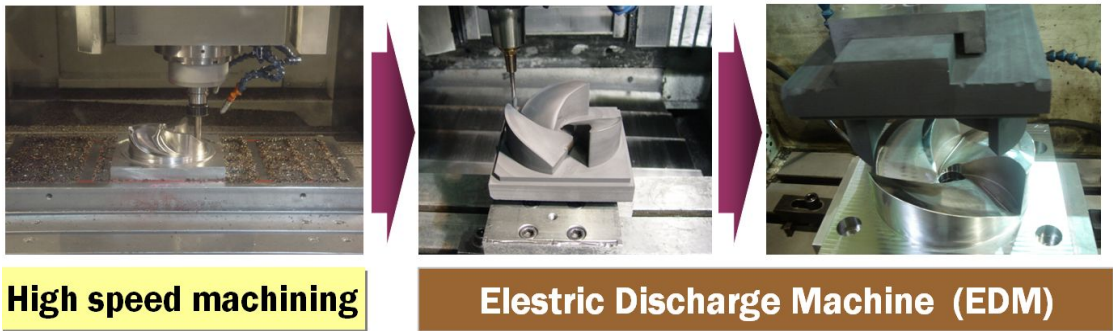


Fig. 46 Sequence of post-processing

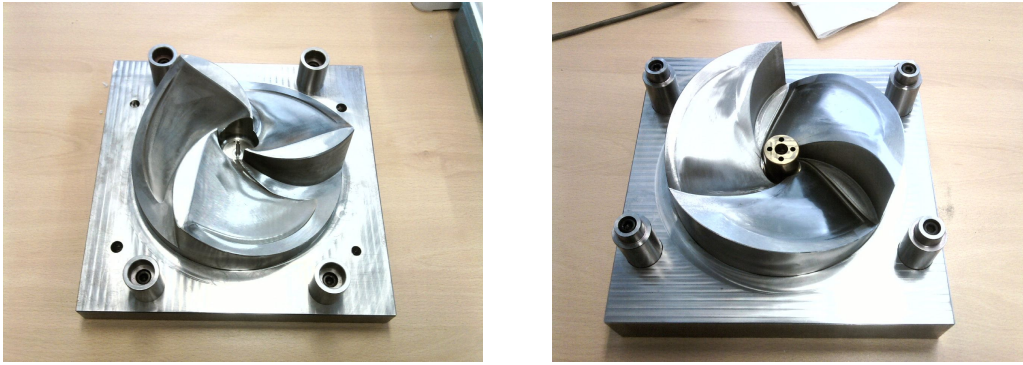


Fig. 47 Finally fabricated mould

최종 직접식 금속 쾌속 툴링 공정을 이용하여 제작한 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형에 대한 표면 거칠기 측정 결과 Fig. 48 과 같이 평균 표면 거칠기가 상면 0.931 μm , 측면 0.567 μm 로 향상됨을 알 수 있었다.

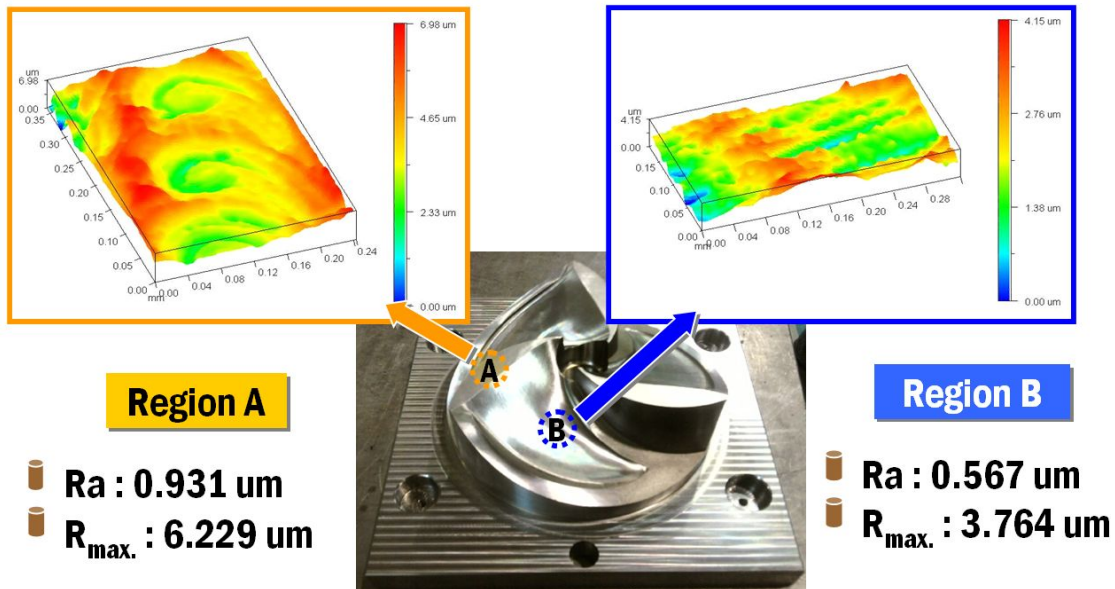


Fig. 48 Surface roughness of finally fabricated mould

직접식 금속 쾌속 툴링 공정과 기계가공을 이용한 대상 금형의 적층부 접합 지점 특성을 고찰하기 위해 전자현미경을 이용하여 Fig. 49 와 같이 미세 조직을 촬영하였다. 전자현미경은 H 사의 S-4800 이고, 고찰 결과 직접식 금속 쾌속 공정과 기계가공부의 열영향부 및 경계층인 접합 부분이 완벽히 결합됐음을 알 수 있었다.

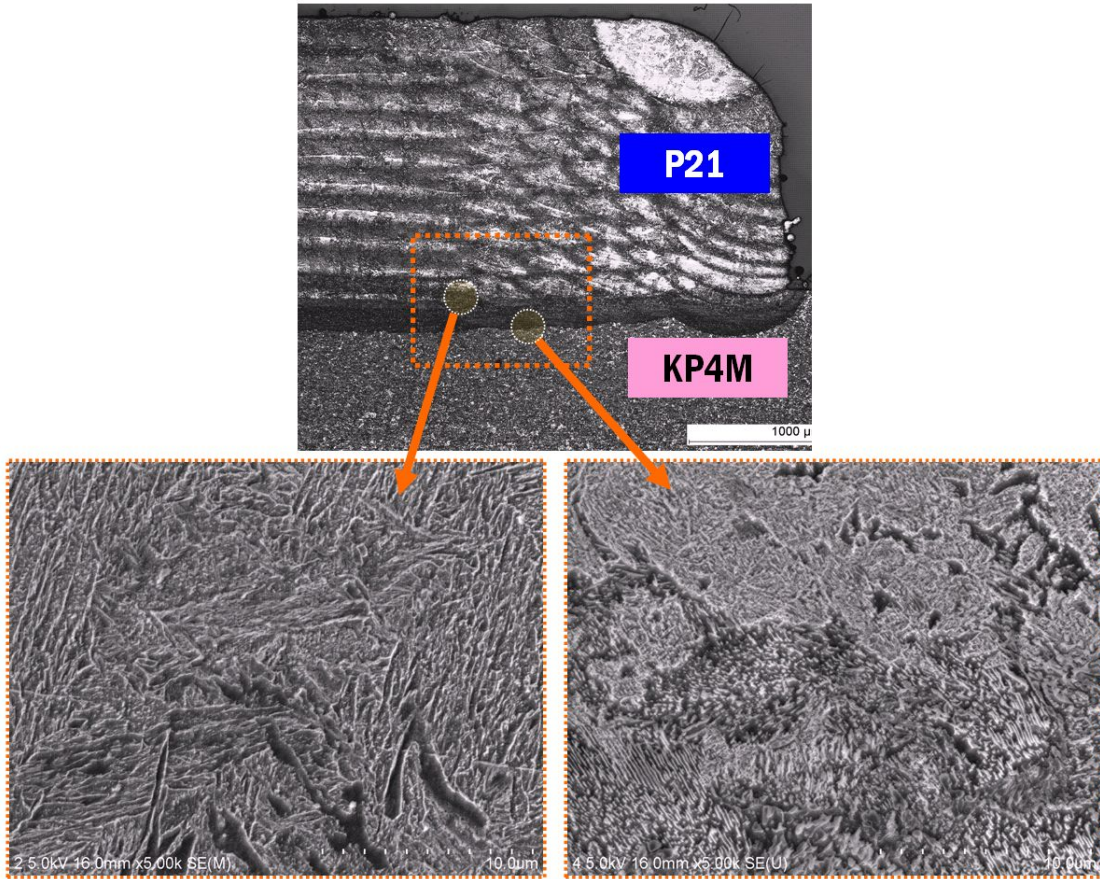


Fig. 49 Microstructures in the vicinity of the welded regions

후가공이 완료된 사출금형에 대하여 Fig. 50 과 같이 상·하코어의 기계가공부 및 적층부의 표면 경도를 측정하였고, 측정결과는 Table 7 과 같다. 직접식 금속 쾌속 툴링 방식의 금형에 대하여 P21 로 적층한 부분인 A 지점은 순수 P21 재료의 경도 39 H_{RC} 보다 높은 42 H_{RC} 였고, 사출성형 시 제품면과 관계가 적은 KP4M 부분인 B 지점은 35 H_{RC} 임을 알 수 있었다. DMT 적층시 P21 의 경도값이 순수재료보다 3 H_{RC} 증가함을 알 수 있었고, 기계가공을 한 KP4M 은 경도값이 변하지 않았음을 알 수 있었다. P21 재료의 경도 값이 3 H_{RC} 증가한 현상은 직접식 금속 쾌속 툴링 공정시 순간적으로 금속이

완전 결합되어 조직이 마르텐사이트 (Martensite) 로 변화하면서 경도 값이 증가한 것임을 알 수 있었다.

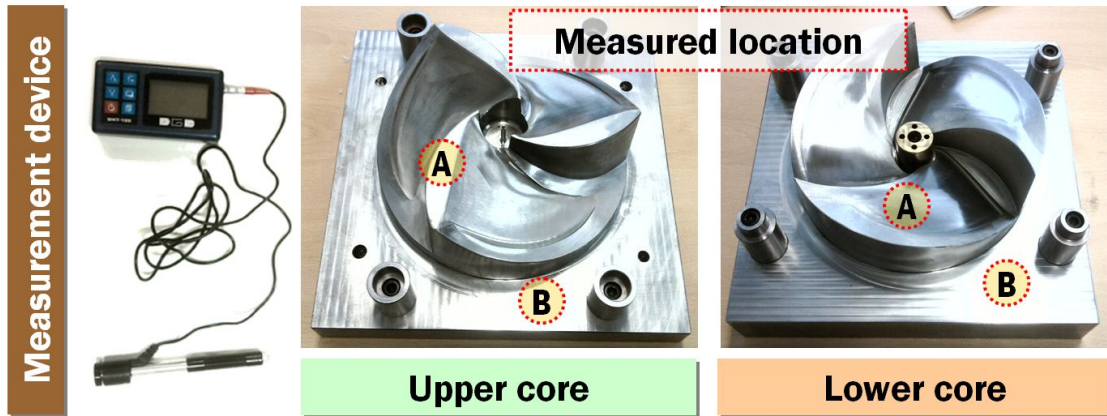


Fig. 50 Hardness of the mould

Table 6 Hardness of mould and mould materials

Hardness (H _{RC})	A (P21)	B (KP4M)
Material	39	35
Target mould	42	35

제 5 장 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 시사출 실험 및 제품 특성 평가

5.1 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 시사출 실험

본 연구에서 제작된 대상 금형의 냉각 특성 및 생산성과 제품 품질 특성을 확인하기 위하여 사출성형 실험을 수행하였다. 시사출 실험시 사용된 사출성형 공정은 Table 7 과 같고, 앞서 수행한 사출성형 해석과 같은 최대 사출압력 및 보압 조건에서 냉각 시간에 따른 제품의 품질에 대하여 비교/분석하고자 냉각시간을 최초 16 초에서 9 초로 감소시키면서 시사출 실험을 수행하였다. 각각의 냉각시간마다 성형품을 5 회 성형 및 취출 하였으며 냉각 해석과 동일한 조건으로 성형하고자 냉각수 입·출구는 12 개를 사용하여 각각의 블레이드마다 같은 시간에 냉각수를 유입시켰다. 시사출 실험에 사용한 사출성형기는 Fig. 51 과 같이 W 사의 SELEX E 250 을 사용하였고, 이 사출성형기의 특징은 재현성이 우수한 포지션 트랜스듀서 (Position transducer) 를 사용하여 다단, 속도, 압력 제어가 정확하고, 원료 교환 자동 기능을 채택할 수 있어 원료교환 및 색상 교체 시간 절약 및 생산성을 향상시킬 수 있다. 또한 온도변화에 대한 응답성이 높은 PID (비례미분적분) 를 사용하여 정밀 및 안정 성형이 가능하다. 사출성형시 사용된 수지는 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene copolymer) 이며 유리섬유가 20 % 첨가된 원료를 사용하였다.

Table 7 Experimental conditions for injection moulding experiments

Model	SELEX E 250
Injection time (sec)	3
Max. Injection pressure (MPa)	80
Packing pressure (MPa)	65
Melting temperature (°C)	240
Cooling time (sec)	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

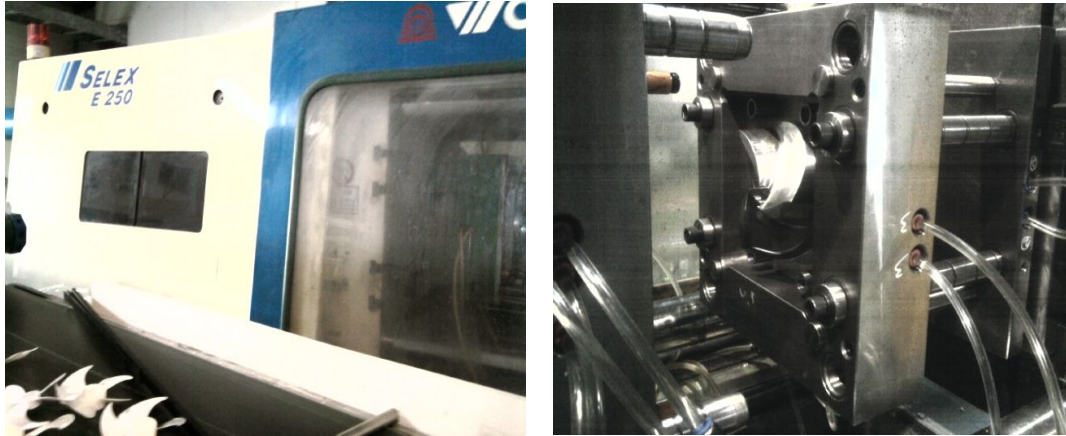


Fig. 51 Injection molding apparatus for experiments

5.2 냉각시간에 따른 제품 품질 영향성 분석

본 대상 금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 시사출 실험을 실시한 결과 Fig. 52 와 같이 사출성형 해석과 동일한 조건인 사출시간 3 초, 냉각시간 16 초에서 9 초까지 제품이 모두 외관상 결함 없이 완벽하게 성형됨을 알 수 있었다. 하지만 냉각시간이 12 초에서 9 초인 경우, 제품부의 냉각은 균일하게 이루어져서 취출이 가능하였으나 게이트부에서 냉각이 원활히 이루어지지 않아 Fig. 53 과 같이 스프루부에 게이트가 붙는 현상을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 형상적응형 냉각채널을 통해 냉각시간을 단축하여 제품을 취출 할 수 있는 시간은 9 초까지 단축하였으나 스프루부의 금형 플레이트에 대한 냉각이 원활하지 않아 생긴 현상임을 알 수 있었다. 즉, 스프루부 금형 플레이트의 냉각채널 설계시 냉각시간 9 초에서도 제품이 성형됨을 알 수 있었다.

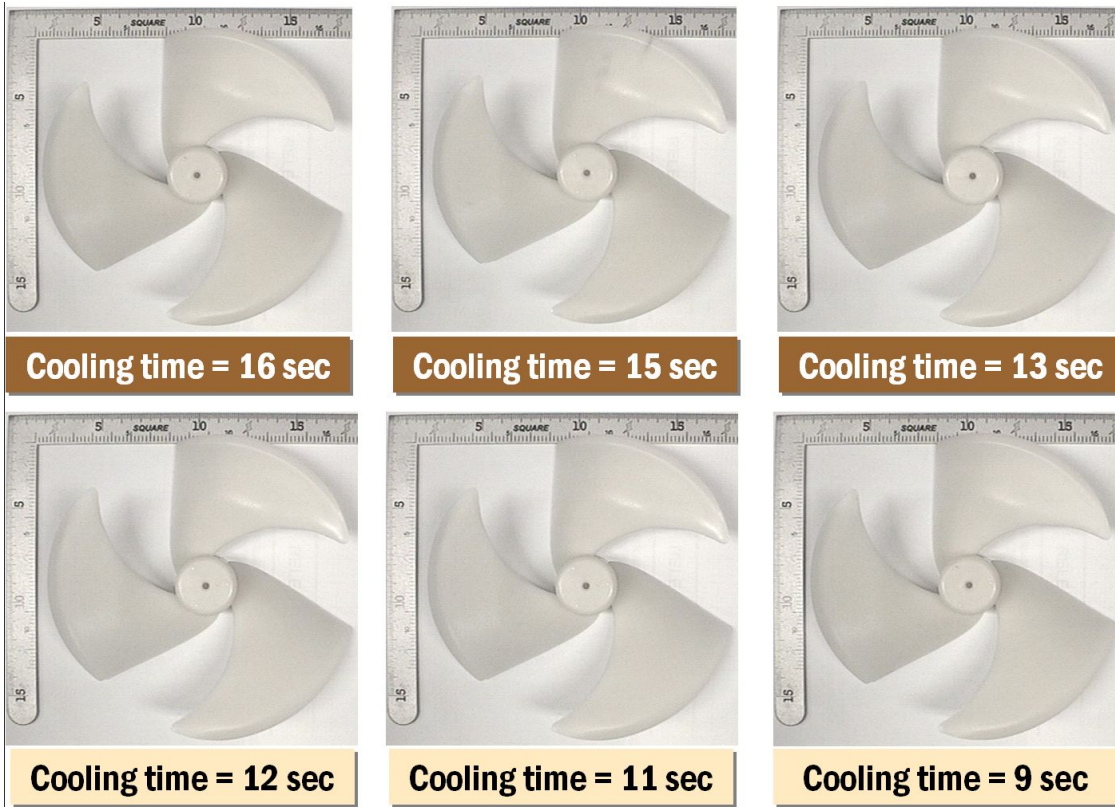


Fig. 52 Comparison of shape of final product for different cooling times (Conformal cooling channel)

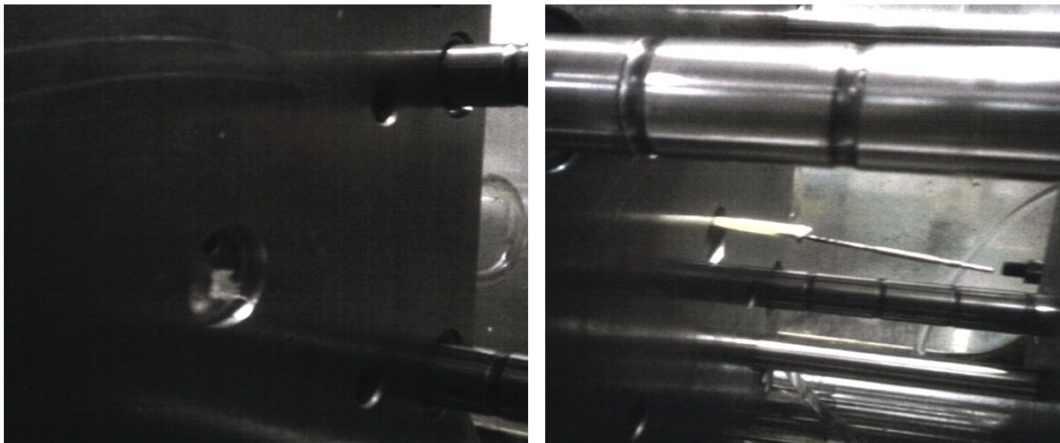


Fig. 53 Attachment of resin on the sprue (cooling time 12 seconds)

시사출 실험시 대상 금형의 냉각시간에 따른 제품 두께 비교를 하기 위해 제품 세 지점에 대하여 CAD 데이터의 두께와 비교하였다. Fig. 54 는 CAD 데이터와 냉각 시간 13 초, 15 초 및 16 초인 대상 금형의 제품 세 지점 측정 위치에 대한 두께 값이다. 제품의 두께 측정 결과, CAD 데이터와 두께가 가장 비슷하게 성형된 제품은 냉각시간이 13 초인 제품이었고, CAD 데이터와 두께 차이가 가장 많이 나는 제품은 냉각시간이 16 초인 제품임을 알 수 있었다. 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형으로 시사출 실험시 냉각시간에 관계없이 제품이 균일한 냉각에 의해 전반적으로 균일하게 수축이 일어남을 알 수 있었고, 냉각시간이 13 초일 때가 가장 이상적으로 제품이 성형됨을 알 수 있었다.

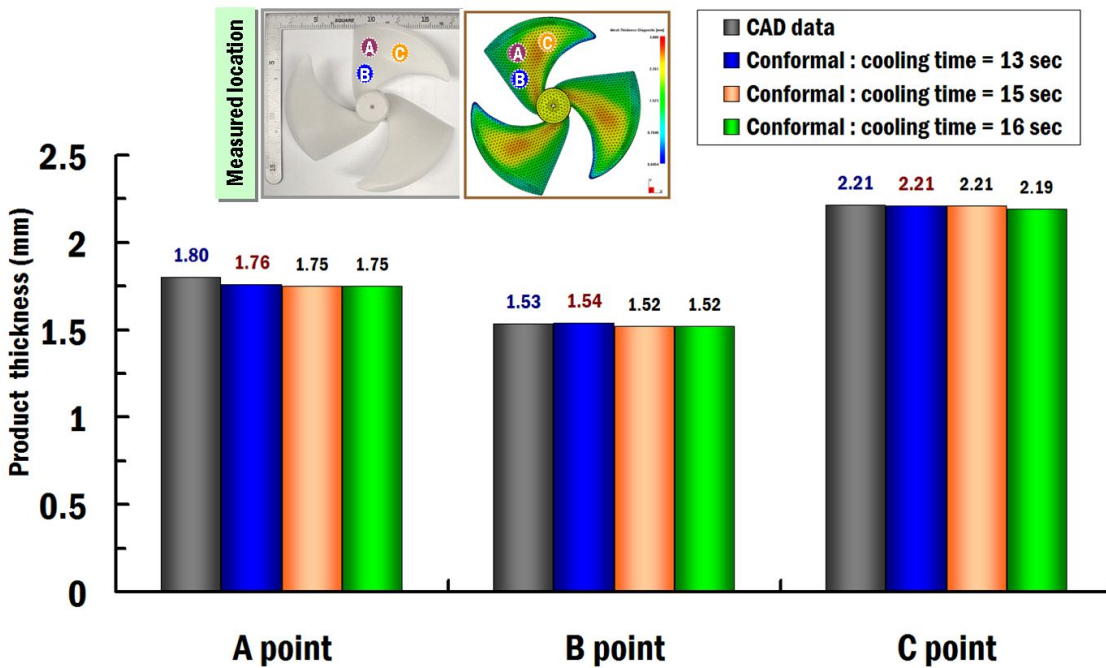


Fig. 54 Comparison of thickness of final product for different cooling channels and cooling times (Conformal cooling channels)

시사출 실험을 통하여 얻은 성형품에 대하여 3 차원 형상 측정을 하고자 Fig. 55 와 같이 G 사의 3 차원 형상 측정기인 ATOS II 400 으로 실험 조건에 따른 성형된 제품의 CAD 데이터 대비 위치 정밀도를 측정하였다. 측정 결과, 모든 제품은 냉각 시간에 관계없이 위치 편차 ± 1.0 mm 범위 내에 성형 됨을 알 수 있었다. 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품 중 냉각시간이 13 초인 제품이 CAD 데이터와 가장 유사한

값을 나타냈고, 냉각 시간이 16 초에서 13 초로 줄어들수록 사출 성형품의 블레이드별 치수 편차가 줄어들고 균일한 변형이 일어났음을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 금형 표면 형상에 적응하도록 냉각채널을 설계하여 제품의 균일 냉각을 유도함으로써 제품의 수축 및 휨 변형량이 감소되고, CAD 데이터와 비슷한 고품질의 제품이 성형되는 냉각 시간이 13 초가 가장 적당함을 알 수 있었다. 그리고 최대 치수 편차는 제품 블레이드 끝부분에서 일어났으며, 냉각 후 수축으로 인하여 균일하게 휨 변형이 일어남을 알 수 있었다.

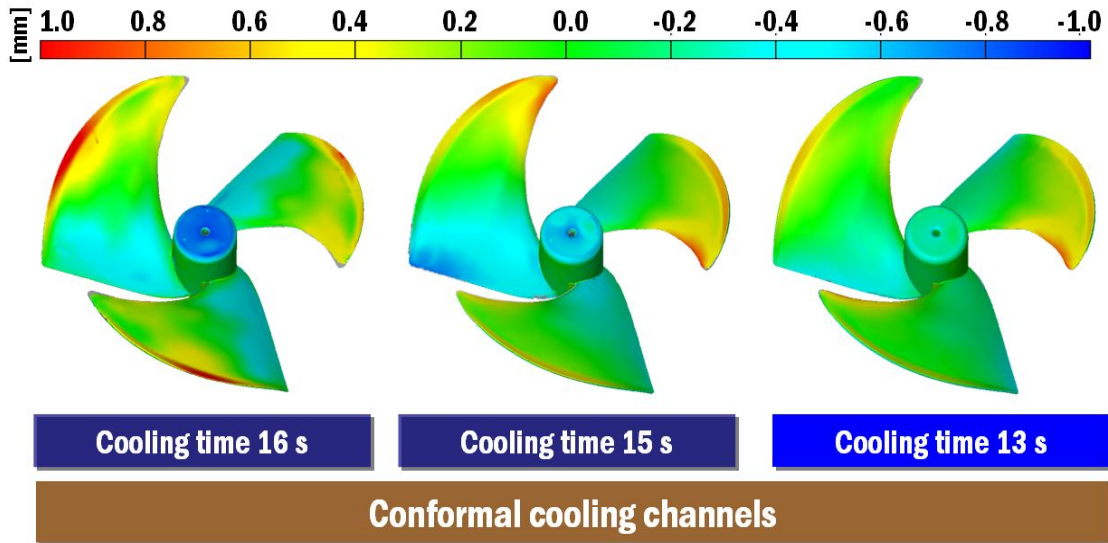


Fig. 55 Comparison of positional accuracy of final product for different cooling times (Conformal cooling channels)

대상 금형의 균일냉각에 따른 제품의 블레이드별 질량차를 확인하고자 Fig. 56 과 같이 제품의 편심량을 측정하였다. 사용된 편심량 측정기는 S 사의 버티컬 타입 밸런싱 머신 (Vertical type balancing machine) 의 VG-1 TKEL 편심량 측정기를 사용하였고, 편심량 측정은 제품을 회전시켜 블레이드별 편심되는 양과 거리를 측정하게 된다. 이 기계의 특징은 어댑터를 변경함으로써 넓은 범위의 작업을 측정할 수 있고, 에러 (Error) 에 대한 전기적 보정이 가능하다. 사용된 편심량 측정기의 제원은 Table 8 과 같고, 국내 팬 편심량 규정인 $0.15 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 이내 오차범위의 제품을 생산하기 위하여 금형의 후가공을 2 회 실시하였다. 대상 금형에 대한 시사출 제품의 편심량은 Table 9

에서 나타내고 있다. 4 차 시사출 실험 결과, 국내 팬 편심량 규정 내의 편심량을 확보한 제품을 생산할 수 있었고, 시사출 실험을 통한 대상 금형 제품의 평균 편심량은 $0.06 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 임을 알 수 있었다. 시사출 실험 결과 본 연구 대상 금형을 통해 국내 팬 제품 편심량 허용오차 범위인 $0.15 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 이하의 팬 제품을 확보할 수 있었고, 편심량 측정 결과, 대상 제품인 팬 제품에 대하여 가장 편심량이 적은 제품은 냉각시간이 13 초인 제품으로 나타났다.



Fig. 56 Measurement devices of eccentricity

Table 8 Specification of measurement device of eccentricity

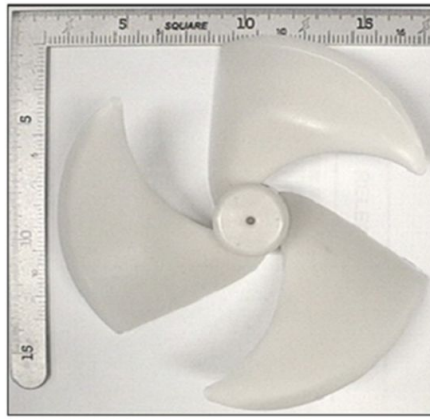
Model	VG-1 TKEL
Workpiece weight (kg)	0.03 to 1
Max. Workpiece diameter (mm)	200
Min. Achievable unbalance ($\text{g} \cdot \text{mm}$)	0.15
Power supply	3-Phase 200V, 10A, 5KVA

Table 9 Mass of eccentricity of the product with conformal cooling channels

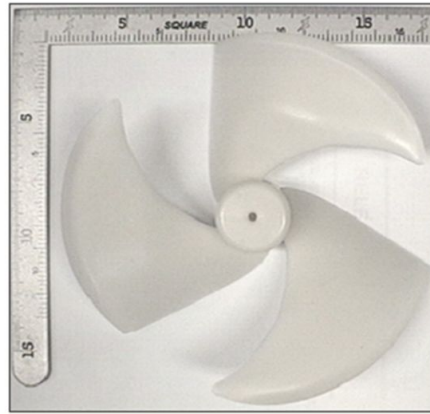
Cooling time (sec)	Mass of eccentricity (g · cm)			
	1st try-out	2nd try-out	3rd try-out	4th try out
9	-	-	0.190	0.097
10	-	0.372	0.182	0.089
11	0.441	0.370	0.167	0.102
12	0.435	0.366	0.160	0.015
13	0.461	0.360	0.161	0.009
14	0.470	0.364	0.166	0.085
15	0.466	0.362	0.172	0.032
16	0.452	0.372	0.159	0.050

5.3 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 생산성 및 제품 품질 분석

본 대상 금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 냉각시간 13 초인 제품과 기존 현장에서 사용하던 드릴가공을 이용한 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 냉각시간 20 초인 제품에 대하여 Fig. 57 과 같이 형상을 비교하였다. 제품의 형상 측정 결과, 대상 금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 대상 금형 제품이 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형을 이용한 제품과 동일한 형상으로 성형됨을 알 수 있었다. 본 연구 대상인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형은 금형 표면 형상에 적응하는 냉각채널 설계로 인해 냉각이 제품 전반적으로 균일/고속 냉각되어 냉각 시간이 13 초에서도 제품이 성형 가능한 반면, 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형으로는 고속 냉각이 불가능하여 냉각시간이 20 초 이하에서는 제품이 성형되지 않음을 알 수 있었다. 즉, 냉각채널 형상이 금형 표면 형상에 적응하는 대상 금형이 기존 드릴가공을 이용한 기존 금형보다 생산성이 우수함을 알 수 있었다.



**Conformal cooling channels,
(cooling time = 13 sec)**



**Linear cooling channels,
(cooling time = 20 sec)**

Fig. 57 Comparison of shape of final product for different mould

사출 실험시 대상 금형 냉각시간 13 초인 제품과 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 냉각시간이 20 초인 제품의 두께 비교를 하기 위하여 측정 위치에 대해 CAD 데이터와 두께를 비교하였다. Fig. 58 은 제품 CAD 데이터와 냉각시간 13 초인 대상 금형의 제품 및 냉각시간 20 초인 기존 직선형 금형 제품의 세 지점의 측정 위치에 대한 두께 값이다. 제품 세 지점의 두께 측정 결과, CAD 데이터와 가장 비슷하게 성형된 제품은 냉각시간이 13 초인 형상적응형 냉각채널을 이용한 사출성형 금형 제품이었다. 대상 금형 제품은 금형 표면에 적응하는 냉각채널로 인해 균일냉각이 가능하여 제품 수축량이 전반적으로 균일하면서 아주 적게 일어남을 알 수 있었고, 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품은 불균일한 냉각채널로 인해 측정 위치에 따라 수축이 일정하지 않음을 알 수 있었다.

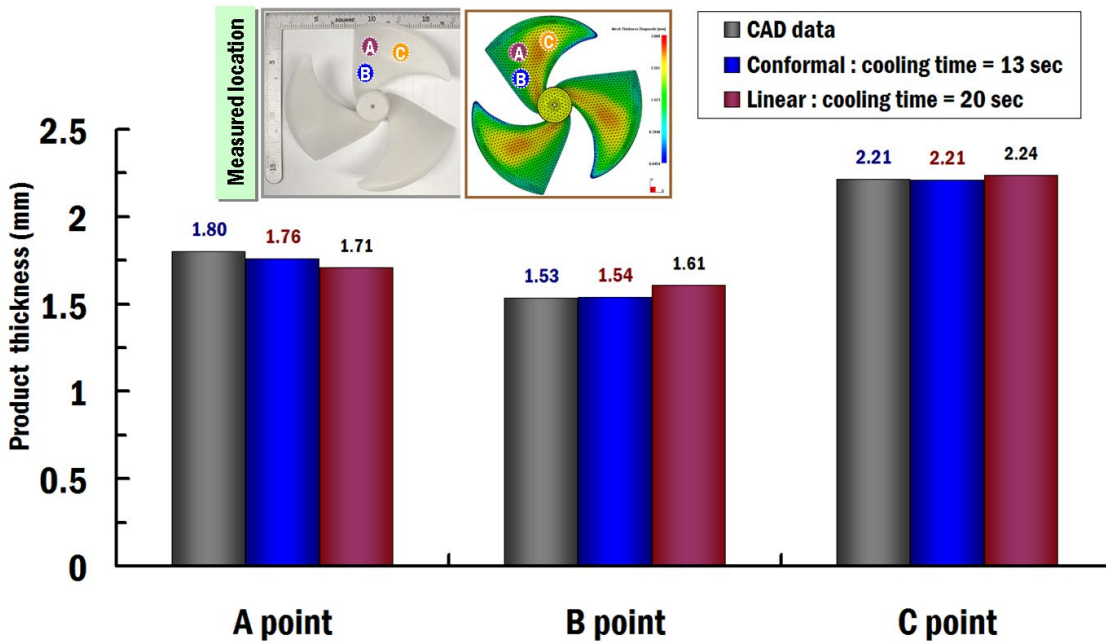


Fig. 58 Comparison of thickness of final product for different cooling channels and cooling times

형상적응형 냉각채널을 이용한 사출성형 금형의 냉각시간 13 초인 제품과 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 20 초인 제품에 대하여 CAD 데이터와의 위치 편차에 대해 측정하기 위하여 Fig. 59 와 같이 3 차원 형상 측정을 수행하였다. 3 차원 형상 측정 결과, 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품 및 대상 금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형 제품 모두 위치 편차 ± 1.0 mm 범위 내에 성형 됐음을 알 수 있었다. 냉각시간이 13 초인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 제품이 냉각 시간이 20 초인 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 제품보다 CAD 데이터와의 오차가 적었고, 금형 표면 형상에 적응하는 냉각채널의 형상이 냉각 시간보다 사출 성형품의 블레이드별 치수 편차에 더 영향이 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 금형 표면 형상에 적응하도록 냉각채널을 설계하여 제품의 균일 냉각을 유도함으로써 직선형 냉각채널을 사용한 금형의 제품보다 수축 및 휨 변형량이 감소하여 CAD 데이터와 비슷한 고품질의 제품이 성형됨을 알 수 있었다.

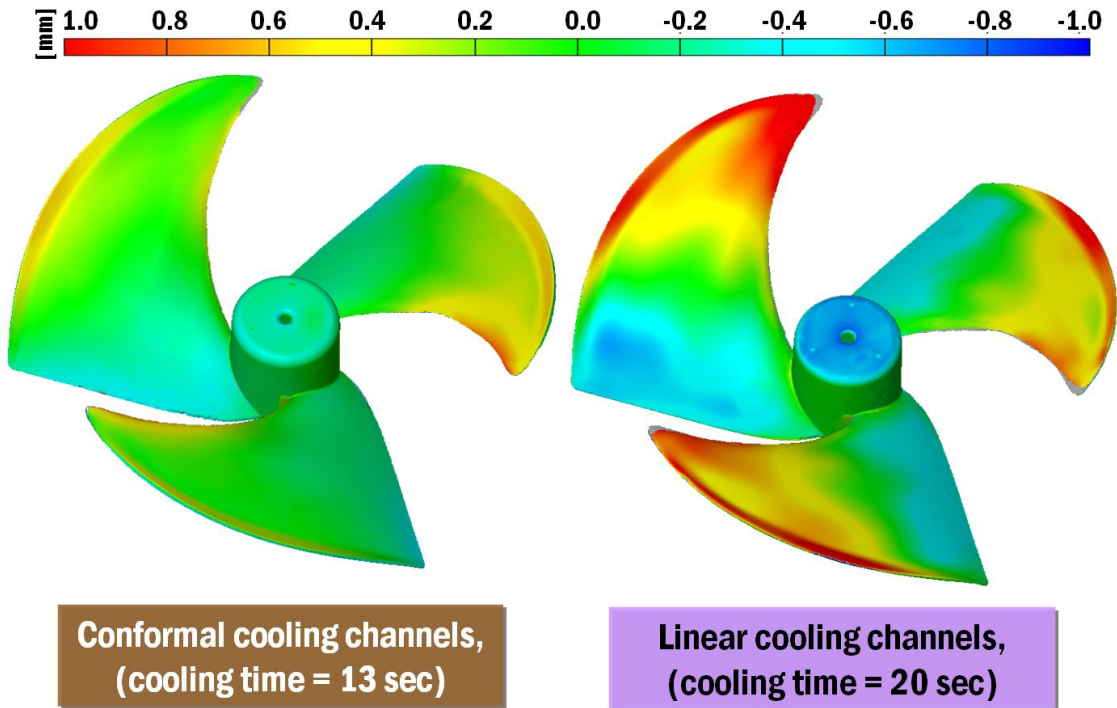


Fig. 59 Comparison of positional accuracy of final product for different mould

기존 직선형 냉각채널을 갖는 사출성형 금형의 냉각시간 20 초인 제품과 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 냉각시간 13 초인 제품에 대하여 블레이드별 무게 밸런스 (Balance) 를 확인하기 위하여 편심량 측정을 수행하였다. 사용된 편심량 측정기는 앞서 수행한 S 사의 버티컬 타입 밸런싱 머신 (Vertical type balancing machine) 의 VG-1 TKEL 편심량 측정기이고, Table 10 은 기존 금형과 대상 금형의 시사출 실험을 통한 제품 편심량 값을 나타내고 있다. 성형품의 편심량 측정 결과, 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제품은 시사출 실험 4 회에 걸쳐 국내 팬 편심량 규정인 0.15 g·cm 이내의 제품을 성형할 수 있었고, 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형은 시사출 10 차에 걸쳐 국내 팬 편심량 규정 이내의 제품이 성형됨을 알 수 있었다. 4 차 시사출 실험시 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제품의 편심량은 0.009 g·cm 이었고, 기존에 사용 중이던 직선형 냉각채널 사출금형 제품의 편심량은 0.326 g·cm 이었다. 이와 같은 현상은 형상적응형 냉각채널의 사출성형 금형은 제품에 대해 균일한

냉각이 이루어지므로 단순히 사출금형에 대해서만 수정을 하면 되기 때문에 수정 횟수를 줄일 수 있었지만, 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형은 불균일한 냉각에 기인해 제품의 블레이드마다 편심량이 불규칙하게 성형됨을 알 수 있었다.

Table 10 Comparison of mass of eccentricity of the product for different mould

Cooling time	Mass of eccentricity (g · cm)									
	1st try -out	2nd try -out	3rd try -out	4th try -out	5st try -out	6nd try -out	7rd try -out	8th try -out	9rd try -out	10th try -out
13 sec (Conformal)	0.461	0.360	0.161	0.009	-	-	-	-	-	-
20 sec (Linear)	0.472	0.240	0.489	0.326	0.156	0.267	0.223	0.072	0.260	0.082

본 대상 금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 시사출 실험 결과 냉각시간을 13 초까지 감소시켜도 성형품이 외관상에 결함 없이 성형됨을 알 수 있었다. Fig. 60 은 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과 대상금형인 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형의 제품 성형시 소요되는 사출 시간, 냉각 시간 및 전체 사이클 타임에 대하여 나타내고 있다. 형상적응형 냉각채널을 이용한 사출성형 금형은 수지의 개량 시간부터 제품 취출 시간까지 총 26 초 정도 소요되는 반면, 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형은 제품 성형시 35 초의 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 형상적응형 냉각채널을 사용함으로써 기존 35 초에 성형되었던 제품을 사출시간과 냉각 시간을 각각 2 초 및 7 초 단축시키면서 제품 전반적으로 낮은 수축률, 휨 변형량이 적고 균일냉각을 통하여 CAD 데이터와 두께가 거의 유사한 고품질의 제품을 생산할 수 있었다. 즉, 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형이 기존 직선형 냉각채널을 갖는 사출성형 금형보다 고속/균일 냉각을 통하여 생산성이 우수하면서 수축률, 휨 변형량 및 편심량이 적어 제품 회전시 진동 및 소음을 최소화 할 수 있는 고품질의 제품을 성형할 수 있었다.

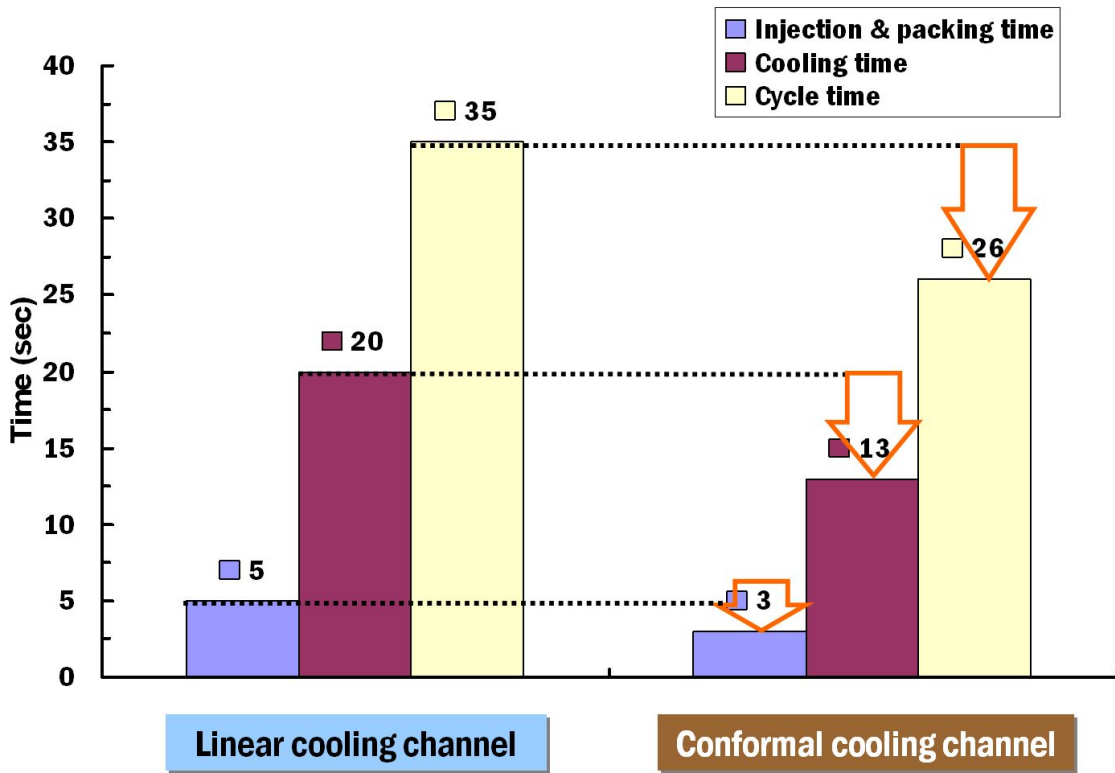


Fig. 60 Comparison of cycle times for different mould

제 6 장 결 론

본 연구에서는 직접식 금속 쾌속 툴링 공정 기반 형상적응형 냉각채널을 가진 팬 제작용 사출성형 금형의 냉각 특성 향상에 관한 연구 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 형상적응형 냉각채널의 형상, 금형 표면과 냉각채널 깊이간 거리 및 냉각채널 폭 방향간 거리에 대한 사출성형 해석을 통하여 최적의 사출성형 금형 설계안 및 사출성형 공정을 도출하였다.

2. 제품의 두께에 대하여 일정하게 설계된 냉각채널이 제품의 균일냉각에 가장 큰 영향을 미치고, 휨 변형량 및 수축률이 적은 고품질의 제품을 고속으로 성형 할 수 있음을 사출성형 해석을 통하여 알 수 있었다.

3. 대상 금형의 최적 설계안에 대하여 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형과 사출성형 해석 비교/분석 결과, 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형이 기존 직선형 냉각채널을 가진 사출성형 금형보다 고속/균일하게 제품을 생산할 수 있음을 확인하였다.

4. 직접식 금속 쾌속 툴링을 이용한 대상 금형에 대하여 시사출 실험을 수행한 결과 사출성형 해석과 비슷한 공정 조건에서 제품이 완벽하게 성형됨을 알 수 있었고, 형상적응형 냉각채널을 가진 사출성형 금형으로 제작한 제품이 균일/고속 냉각되어 편심량이 적고, 두께 및 무게가 일정한 고품질의 제품이 제작됨을 알 수 있었다.

추후 직접식 금속 쾌속 툴링을 이용한 사출성형 금형의 피로 실험/해석을 통하여 금형 피로 수명을 예측 및 금속 적층 금형의 조직 검사를 통해 기공율을 측정 비교/분석 하고자 한다.

REFERENCES

1. 노원기, 정진수, 황규선. "World Best를 위한 사출 성형과 제품 설계," 교보문고, 2006.
2. 정영득, 구본홍, "사출성형 해석에 의한 제품 및 금형설계."인터비전, 2006.
3. 정영득, "예제로 쉽게 배우는 사출성형 CAE."인터비전, 2008.
4. Austin. C., "Mold cooling," Society of Plastics Engineers Technique Papers, Vol. 31, pp 764~766, 1985.
5. Liang. J. Z., Ness. J. N., "The Calculation of Cooling time in injection moulding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 57, pp 62-64, 1996.
6. Tom. Kimerling., "Injection molding cooling time reduction and thermal stress analysis," Finite Element Analysis, Spring 2002.
7. Christer. Nylund., Kerstin. Meinander., "The influence of heat coefficient on cooling time in injection molding," Heat Mass Transfer, Vol. 428-431, No. 41, 2005.
8. Xiaorong Xu., Emanuel. Sachs., Samuel Allen., "The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling," Polymer Engineering and Science, Vol. 41, No. 7, 2001.
9. Zone-Ching Lin., Ming-Ho Chou., "Design of the Cooling Channel in Nonrectangular Plastic Flat Injection Mold," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 21, No. 3, 2002.
10. Barone. M. R., Caulk. D. A., "Optimal arrangement of holes in a two-dimensional heat conductor by a special boundary integral method," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 18, pp 657~685, 1982.
11. Chen, S, C., Hu. S. Y., Davidoff. A., "Computer-aided cooling system design and analysis of the injection molding cooling process," The Chung Yuan Journal XIX, pp 82-96, 1990.
12. Singh, K. J., "Design of mold cooling system." Injection and Compression Molding Fundamentals, Avraam I. Isayev, ed. New York : Marcel Dekkew,

1987.

13. Turng, L. S., Wang, K. K., "A computer-aided cooling line design system for injection molds." *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112, pp 161-167, 1990.
14. Glavill. A. B., E. N. Denton., "Injection-Mold Design Fundamentals," The Machinery Publishing Co. Ltd., 1997.
15. Pham D. T., Dimov S. S., "Rapid Manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling," Springer, Berlin Heidelberg New York, 2001.
16. Ahn., D. G., Kim., H. W., "Study on the Manufacturing of a Thermal Management Mould with Three Different Materials using a Direct Metal tooling Rapid Tooling Process," *Proc. IMechE* , Vol. 223, Part B, 2009.
17. Peter. D. Hilton., Paul. F. Jacobs., "Rapid Tooling," Marcel Dekker,Inc., 2000.
18. Dormal. T., "New rapid tools for injection moulding," *Materials Technology Advanced Performance Materials*, Vol. 14, pp 194-198, 1999.
19. Karapitis. N. P., Van Griethuysen, J. P. S., Glardon. R., "Direct rapid tooling: a review of current research," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 4, pp 77-89, 1998.
20. Chee. K. C., Siaw. M. C., "Rapid prototyping technologies and limitations," *Computer-aided and integrated manufacturing systems*, Vol. 3, World Scientific, Singapore, pp 165-185, 2003.
21. Au. K. M., Yu. K. M., "A scaffolding architecture for conformal cooling design on rapid plastic injection moulding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp 496~515, 2007.
22. Ferreira. J. C., Mateus. A., "Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection moulding" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp 508~516, 2003.
23. Sachs. E., Wylonis. E., Allen. M., H. Guo., "Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 40, No. 5, pp 1232~1247, 2000.
24. Xu. X., "Conformal Cooling and Rapid Thermal Cycling in injection Molding by 3D Printed Tools," PhD thesis, MIT, 1999.

25. Dimla. D. E., Camilotto. M., Miani. F., "Design and optimization of conformal cooling channels in injection moulding tools," *Journal of Materials Processing Technology* 164-165, pp 1294~1300, 2005.
26. Ring. M., "An investigation of effectiveness of conformal cooling channels and selective laser sintering material in injection moulding tools, RPD pp 1~5, 2002.
27. Xu. X., "The design of conformal cooling channels in injection molding tooling, *Polymer Engineering and Science*, vol. 41, pp 1265~1279, 2001.
28. Xiaorong. X., Emanuel. S., Samuel. A., "The design of Conformal Cooling Channels in injection Molding Tooling," *Polymer Engineering and Science*, July 2001, Vol. 41, No. 7, 2001.
29. Dalgarno. K. W., Stewart. T. D., "Manufacture of production injection mould tooling incorporating conformal cooling channels via direct selective laser sintering," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 215, pp 1323~1332, 2003.
30. Wimpenny. D. I., B. Bryden., I. R. Pashby., "Rapid laminated tooling," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, pp 214~218, 2003.
31. Ferreira., High-conductivity Materials and Conformal Cooling Channels, Warwick Manufacturing, Group, Warwick University, UK, accessed September 29, 2003.
32. Kim. J. D., Hong. S. K., Lee. G. H., Kim. M. A., "Implementation of 3-Dimensional Cooling Channel in injection Mold Using RT Technology," *Preceeding of the Korea Society Precision Engineering Spring Annual Conference 2006*, pp 199~200, 2006.
33. Ahn, D. G., Park. S. H., "Manufacturing Technology of Injection Mold with a High Cooling Rate using DMT Rapid Prototyping Process," *Preceeding of the Korea Society for Precision Engineering Autumn Annual Conference 2006*, pp 19~20, 2006.
34. J. Z. Liang., J. N. Ness., "The Calculation of Cooling Time in Injection Moulding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 57, pp. 62~64, 1996.
35. B. H. Koo., H. C. Sin., H. S. Lee., "The Effects of Packing and Cooling Stages on the Molded Parts in Injection Molding Process," *The Korean Society of*

Mechanical Engineers, Vol. 17, pp. 1150~1160, 1993.

36. L. Q. Tang., C. Chassapis., S. Manoochehri., "Optical Cooling System Design for Multi-cavity Injection Molding," Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 26, pp. 229~251, 1997.
37. W. R. Morrow., H. Q.i., I. Kim., J. Mazumder., S. J. Skerlos., "Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing : Comparison of Environmental Aspects," Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, pp. 103-110, 2004
38. <http://www.pomgroup.com>
39. <http://www.insstek.com>
40. <http://www.matweb.com>

감사의 글

먼저 항상 저를 지켜주시는 사랑이 많으신 하나님께 무한한 감사를 드립니다.

지금의 학위 논문이 나오기까지 연구자로서 목적을 이루어 갈 수 있도록 여러 방면으로 도움을 주신 여러분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다. 대학원 2년여 시간동안 여러 가지 힘든 부분도 많았지만 학업 지식뿐만 아니라 많은 것을 배우고 느끼게 된 시간이었습니다.

대학원 생활하는 동안 아낌없는 가르침과 공학자의 길을 제시해주시고, 이 논문이 작성되기까지 세심하고 적극적인 논문지도를 해주신 안동규 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 논문이 나오기까지 교정 및 심사를 하시느라 고생하신 김종관 교수님, 한길영 교수님께 깊은 감사드립니다.

전산설계실험실 1 기이며 멀리 있지만 언제나 후배들의 생각하시는 이상훈 선배님, 레이저 전공 선배이며 Home coming day 때 후배들에게 좋은 말씀과 삶의 방향을 제시해주시는 김민수 선배님, 항상 적극적인 자세와 따끔한 충고 및 격려를 해주셨던 진석이 형, 후배들을 너그럽게 배려해주시고 슬기롭게 실험실을 이끌어 갔던 경제 형, 항상 많은 조언과 세심함으로 후배를 아껴주셨던 경원이 형에게 감사의 말씀을 드립니다. 힘든 일, 기쁜 일 모두 함께 하면서 고충도 함께 풀어나가고 늘 차분하게 고민을 들어준 너그러운 광운이 형, 모든 일에 적극적이고 부족한 저에게 항상 많은 도움과 힘이 되주신 현우 형, 그리고 늘 같이 있는 것만으로도 맘이 놓였던 대원이 형 모두에게 감사드립니다. 모든 일에 열심히 하고 적극적으로 하는 동기인 경흠이, 항상 긍정적인 키 작고 돈 많은 동한이와 실험실 생활을 함께 해서 너무나도 행복했습니다. 항상 걱정이 많은 세훈이와 말이 많은 민우... 정말 내 생애 최고의 후배들이었고, 열심히 매사에 임하는 새내기인 창규와 향선이에게도 함께한 시간들이 늘 소중했음을 진심으로 전하고 싶습니다.

대학원 생활에 익숙하진 못했던 시간부터 졸업을 하기까지 저에게 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 호준이 형님, 승철이 형님, 광호 형님, 미애 누나, 현선 그리고 기계 공학과 일원으로써 함께해온 고마운 대학원 동기 승원이 형, 김재상, 임성빈, 이하

기계공학과 원우회 선·후배님들에게 감사드립니다. 그동안 함께 했던 귀중한 시간들 소중한 간직 하겠습니다.

이 논문이 완성이 되기까지 여러 학술대회 참가 및 발표 그리고 실험을 할 수 있게 해주신 우성정공 관계자 분들에게 진심으로 감사드립니다. 특히 저의 연구에 물신양면으로 도와주신 김형수 소장님, 금형에 대해서 많은 것을 가르쳐 주셨던 장규환 과장님, 늘 밝은 모습으로 여러 가지 조언과 도움을 주신 한국생산기술연구원의 이기용 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 금형을 제작할 수 있도록 도와주신 (주) 인스텍의 서정훈 박사님과 김대중 과장님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 (주) 스페이스솔루션의 주은덕 사장님과 사출성형 해석의 많은 정보와 지식을 친절하게 답변해주신 ED&C의 황순환 과장님 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

실험실 생활을 하면서 자주 연락을 못했지만 항상 반갑게 나를 맞이해준 고등학교 동창, 대학교 동창들에게 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 저를 이 자리에 까지 오기까지 항상 정직과 성실함을 가르쳐 주시고 자식 위해 많은 것을 희생하신 사랑하는 아버지, 어머니께 감사드립니다.

2009년 12월
박 승 화

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20087080	과 정	석사
성 명	한글: 박 승 화 한문 : 朴 承 華 영문 : Park Seung-Hwa				
주 소	광주광역시 북구 신안동 475-132 번지				
연락처	E-mail : psh2374@paran.com				
논문제목	한글 형상적응형 냉각채널을 가진 균일/고속 냉각 사출성형 금형 개발에 관한 연구				
	영문 Investigation into the development of uniform and rapid cooling mould incorporating conformal cooling channels				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2010년 2월

저작자: 박 승 화



조선대학교 총장 귀하