

기술자료

SP07 학회 발표내용을 바탕으로 한 최근 10년간 응고가공학 연구경향 분석

이상목†

한국생산기술연구원 신소재본부

Research Trend Analysis of Solidification Processing Technology for Recent 10 Years based on the Presentation Contents of SP07 Conference

Sang-Mok Lee†

Advanced Materials Division, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

1. 서 론

주조산업, 제철제강산업, 용접접합산업, 표면개질산업 등의 학문적, 기술적 배경을 지닌 응고가공학 분야의 연구개발내용을 발표하고 토론할 수 있는 Solidification Processing 컨퍼런스는 매 10년 주기로 열리는데, 제 5차 대회가 2007년 7월23일(월)부터 25일(수)까지 영국의 Sheffield 대학에서 “Solidification Processing 07”이라는 제목으로 개최되어 3일간의 열띤 발표와 토론이 이루어졌다. 이에 지난 10년간 응고가공학에 관한 학문적 기초, 기술개발 및 발전에 대한 발자취를 간략하게 살펴보고, 응고학의 이론적, 기술적 토대를 바탕으로 지속발전하고 있는 주조산업은 물론 관련 전후방 산업의 핵심기술 추이 및 향후 발전방향을 알아보려고 한다.

2. Solidification Processing 07 학회의 개략적 분석

SP07 학회는 다음과 같은 두 개의 주제를 설정하여 진행되었다. 하나는 최종제품 및 중간재의 특성에 영향을 미치는 응고조직의 형성 기구 고찰이며, 다른 하나는 고찰된 응고조직 형성 기구 이론을 바탕으로 하여 각종 생산품의 최적화를 위한 모델링과 공정제어기술 개발이다. 약 30여개의 나라에서 157편의 논문이 발표되었는데, 모두 구두발표 논문이었으며, 동시에 3개의 세션을 진행하는 방식으로 전개되었다. 각각의 논문은 주제별로 25개로 나뉘어져 30개 세션을 통해 발표되었다. 본 고에서는 SP07 학회에서 구성된 25개의 주제를 크게 7개의 연구 분야로 압축구분해 보았고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

각각의 25개의 주제 다음에 표기된 로마 숫자는 그 제목에 의해 진행된 세션을 나타내는데, 전통적으로 응고학 연구의 초점이 되어 온 수치상 성장에 관한 연구가 지난 10년 동안에도 가장 빈번하고 중요하게 연구되고 있는 주제라는 것을 알 수 있었고, 결정립 구조 형성, 공정응고, 미세조직 실시간 영상 기술, 고온 취화, 반 응고 가공, 공정개발 등이 그 다음으로 많

이 연구되어 발표된 분야로 나타났다. 이번 학회에서 특히 새로운 관심을 많이 끌고 있는 주제로서는 미세조직 실시간 영상 기술, 상태도용 데이터 획득, 반 응고 가공, 접합기술, 신 공정개발 등으로 나타난다.

7개의 연구 분야를 살펴보면 응고조직에 대한 분석과 이해가 10개의 주제별로 69편의 논문이 발표되어 전체 연구의 약 44% 정도에 육박할 정도로 그 중요성이 다시 한 번 강조되고 있고, 각종 응고가공용 소재 및 공정에서의 물리적 성질에 관한 연구 및 주조기술을 중심으로 한 주조결함 제어와 주조용 소재개발, 응고가공 공정개발 등이 13개 주제에서 75편이 발표되어 약 48% 정도로 활발하게 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 지난 10년간 이루어진 응고학에 대한 연구는 한마디로 “각종 응고조건하에서의 소재의 응고조직 형성에 관한 전반적 지식기반 구축위에 주조기술을 중심으로 한 산업용 부품소재 개발”이라고 표현될 수 있다.

여기서 특이할 만한 사항은 모델링과 시뮬레이션 분야인데, 10년 전만 하더라도 모델링과 시뮬레이션 분야는 응고 가공학 분야중 하나의 연구 분야로 간주되어 모델링/시뮬레이션 분야에서 활발하게 연구결과가 발표되었으나, 지금은 거의 대다수의 연구주제에서 모델링과 시뮬레이션을 기본적으로 활용하고 있기 때문에 응고학의 모든 분야에서는 보편적으로 사용되고 있는 연구방법의 한 가지 틀로서 인식되고 있다는 것이다. 실제로 본 학회에서 발표된 157개의 논문 중 대략 82개의 논문에서 모델링에 기초한 수치해석법을 활용하여 연구를 진행하였는데, 이는 전체 발표논문수의 약 52%로서 앞으로도 이러한 추세는 지속될 것이라고 판단된다.

본 학회에서 발표된 모델링 기법을 활용한 연구를 모델링 분야별로 나누어 보면 다음과 같다.

각 모델링 분야별로 논문비율을 분석해보면 응고학의 이론적 계산 분야가 약 60% 정도로 대다수를 차지하고 있고, 다음이 미세조직 예측과 거시적 열유동 현상 분야로 나타나고 있다. 앞으로도 이 세 분야에 대한 모델링 연구는 지속적으로 수행

†E-mail : smlee@kitech.re.kr

Table 1. Main titles and subsequent subjects presented in Solidification Processing 07 Conference.

연구분야	학회 주제	논문수	비율(%)
1. 응고미세조직	주제 1: 수지상정 성장 I, II, III 주제 2: 미세편석 주제 3: 결정립 구조 형성 I, II 주제 4: 결정립 미세화 주제 5: 수지상-동축정 천이 주제 6: 공정응고 I, II 주제 7: 접종과 미량원소 첨가 효과 주제 8: 편정반응과 포정반응 주제 9: 금속간화합물 응고 주제 10: 상 형성	69	43.9
2. 실시간 영상기술	주제 11: 미세조직 실시간 영상 기술 I, II	8	5.1
3. 물리적 성질	주제 12: 상태도용 데이터 획득 주제 13: 물리적 성질 측정 주제 14: 열전달계수	13	8.3
4. 구조결합	주제 15: 거시편석 주제 16: 열간 균열 I, II 주제 17: 기공 형성과 제어	18	11.5
5. 구조용 소재	주제 18: 주철의 응고 주제 19: 벌크비정질 형성	8	5.1
6. 응고공 공정	주제 20: 전자기장 효과 주제 21: 반응응고 I, II 주제 22: 금속응고 주제 23: 접합기술 주제 24: 공정개발 I, II	36	22.9
7. 모델링과 시뮬레이션	주제 25: 모델링과 시뮬레이션	5	3.2
합계		157	100.0

Table 2. Classified modelling subjects presented in the Solidification Processing 07 Conference.

모델링 분야	주제
모델링 분야	1. 미세조직 예측
	2. 물성치 평가
	3. 거시적 열유동 현상
	4. 열응력, 변형, 결합 발생
	5. 공정최적화
	6. 거시조직, 벌크성질, 응고특성
	7. 응고학 이론적 계산

될 것으로 판단된다.

본 학회에서 발표된 논문에서 다루어진 응고 및 구조소재를 중심으로 발표논문수를 분석해 보면 Fig. 2 와 같다. 알루미늄과 주강이 약 과반수를 차지하고 있으며, 그 밖에 마그네슘, 니

켈, 주철, 티타늄, 구리의 순으로 연구의 빈도수가 높게 나타난다.

발표된 논문을 사용한 공정별로 나누어보면 Fig. 3과 같은데, 일반주조법과 일방향응고법이 전통적으로 우세를 나타내고 있고, 최신주조공정과 전자기교반법 등도 많이 발표되었던 분야이다.

본 학회에서 발표된 논문을 국가별로 나누어 보면 Fig. 4와 같다. 단 국가명은 제 1저자가 속한 기관이 있는 국가로 정의 하였다. 유럽연합 일원인 독일과 함께 개최국인 영국, 중국, 프랑스, 오스트레일리아, 일본 순으로 평가되었는데, 미국은 지리적 여건 때문에 참여 수가 적은 것으로 생각된다.

모델링 연구동향을 국가별로 알아보면 Fig. 5와 같은데, 독일, 영국, 중국, 오스트레일리아 순으로 논문발표 수가 많은 것

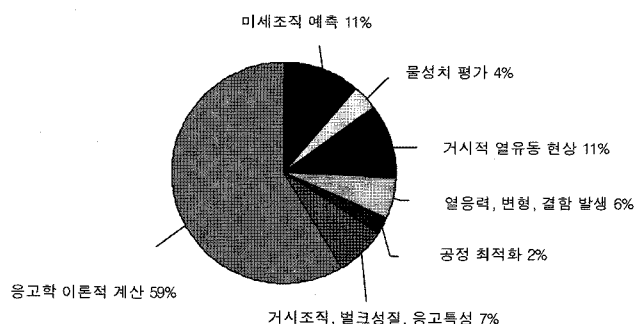


Fig. 1. Percentage classification of modelling subjects presented in the Solidification Processing 07 Conference.

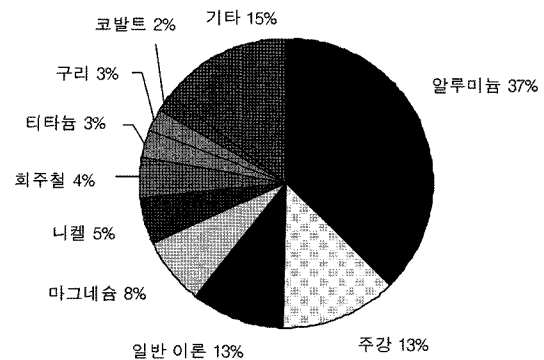


Fig. 2. Percentage classification of solidification materials presented in the Solidification Processing 07 Conference.

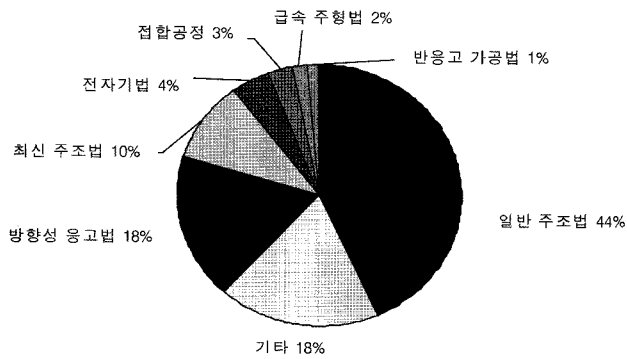


Fig. 3. Percentage classification of solidification technologies presented in the Solidification Processing 07 Conference.

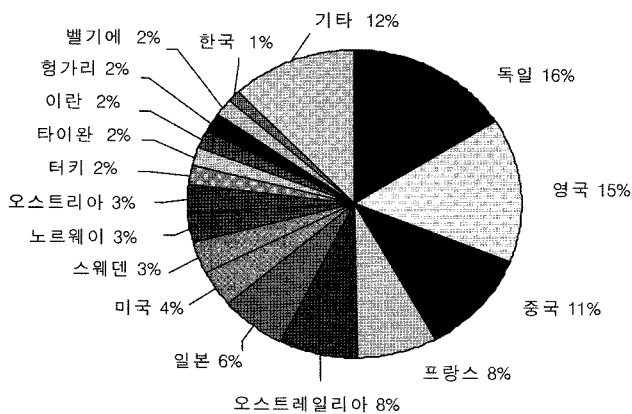


Fig. 4. Percentage classification of participated countries in the Solidification Processing 07 Conference.

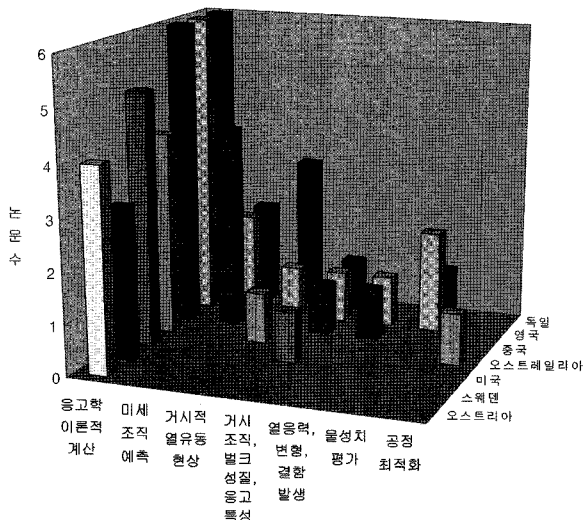


Fig. 5. Percentage classification of participated countries and modelling subjects presented in the Solidification Processing 07 Conference.

으로 나타나고 있다.

연구가 이루어진 공정별 연구동향을 국가별로 알아보면 Fig. 6과 같은데, 독일, 영국, 중국은 각 소재별 연구경향이 고르게 나타나고 있다.

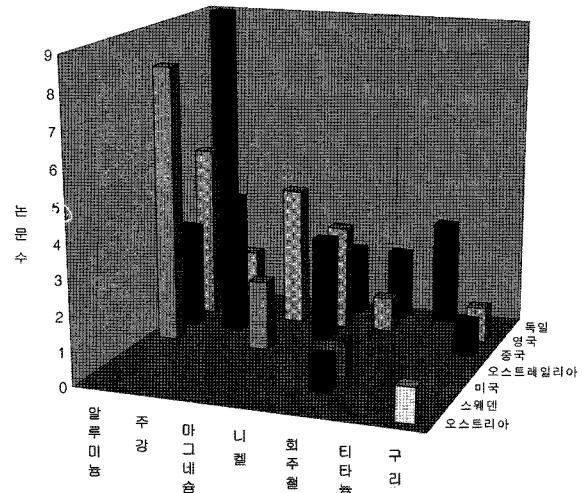


Fig. 6. Percentage classification of participated countries and solidification materials presented in the Solidification Processing 07 Conference.

3. 각 연구 분야별 연구동향

본 장에서는 표 1에 제시된 7개의 연구 분야별로 연구동향을 간략히 알아보도록 한다.

3.1. 응고조직

3.1.1. 수지상정 성장

많은 연구가 일방향응고중 퀘칭 실험 (QDS; Quenching during Directional Solidification) 을 중심으로 전개되었으며, 알루미늄, 철계 소재, 니켈, 코발트, 카드뮴, 유기물질, 복합재료 등 다양한 소재에 대한 연구가 소개되었다. 주로 다루어진 주제로는 일방향 응고중의 수지상정 간격 설정, 2차 수지상 간격의 초대화에 미치는 대류, 온도구배 대용용(TGZM; Temperature Gradient Zone Melting)의 영향, 조성 및 성장속도의 함수로서의 수지상 선단 반경, 수지상정 성장 방향, 고/액 계면 안정성, 과냉과 수지상정 간격간의 관계, 주조용 합금의 전형적 수지상 성장 거동, 복합 강화재 존재 하에서의 수지상 선단 계면 이동 특성, 확산장과 대류장이 존재할 때의 수지상정 성장 거동, 2원계 및 3원계 합금의 응고거동 전산모사 등이었다. 대부분의 연구가 응고학에 관한 이론적 모델링을 바탕으로 전개되었는데, 특히 미세조직 모사 부분에 사용된 알고리즘으로서 일부 Monte Carlo법, CA-FD(Cellular Automaton-Finite Volume) 커플링도 있지만 대부분 phase field를 사용한 국부적 미세조직 계산 방식이 주류를 차지하고 있다.

특이할 만한 연구로서 수지상정 간격에 미치는 수지상 packing pattern의 영향에 관한 연구, phase field 계산시 필요한 두 개의 농도와 온도의 확산방정식에서 각 확산계수의 비인 Lewis 수가 큰 경우에 계산시간을 단축하며 합금의 응고거동을 모사하는 효과적 방법, 계산시 인위적으로 발생하는 성장 방향 이방성을 줄이는 방법, 과냉된 액상에서 비선형 액상선 및 고상선을 고려한 수지상정 성장 모델, 미소중력장에서의 입자강화 복합재의 수지상정 응고거동 모사, Kirkendall 모델을

활용한 성장하는 수지상정 선단에서의 강화 입자 및 개재물 유동 현상 모사 등이 있었다.

3.1.2. 미세편석

철강 연속주조시 개재물과 미세편석, 전자기부유법에 의한 Al-Cu 합금 응고거동, Ni기 초합금 일방향응고시 비평정상 형성, 구상흑연주철 응고중의 다상 미세편석, 수지상 응고모델로부터 유추된 통일된 미세편석이론 등 이었다.

특히, 기존의 유한차분법에 의해 계산시간과 알고리즘 전계가 대폭 간소화된 거시적/미시적 융합 모델을 개발하여 철강 연주편의 두께방향으로의 응고도중 농축된 고액 공존구간에서 미세편석과 산화물 개재물 성장까지 고려하고 실험결과와 비교하는 연구가 있었고, 전자기 부유법에 의한 액적의 균일/불균일 핵생성 및 성장 응고거동 비교분석 및 모델링을 통하여 구속 성장 (constrained growth)과 불구속 성장 (unconstrained growth) 모델의 검증에 사용될 수 있는 데이터를 제공한 연구도 있었다. 구상흑연주철의 응고거동 모델링에서는 다성분계 다상의 미세편석 거동을 Thermo-Calc와 MicroPhase, MagmaSoft 등의 소프트웨어의 커풀링을 통하여 분석하였으며, 평형상태도와 Gulliver-Scheil 식과 비교 평가한 결과를 소개하고 있다.

3.1.3. 결정립 구조 형성

결정립 형성거동과 미세화에 관한 분석의 새로운 접근법, 즉, 알루미늄 합금과 마그네슘 합금의 결정립 미세화제의 효능 및 Zr 등 첨가제의 부작용에 대한 새로운 평가 기준으로서 성장제어인자의 역수(Q)를 도입한 연구가 있었으며, 진동장 하에서의 NH_4Cl 수용액의 핵생성 단계를 연구하면서 용기 벽에서의 불균일 핵생성 거동시 외부에서 가해지는 진동장의 진폭과 주기가 클수록, 용기벽의 온도가 낮을수록, 용기벽 표면의 노치나 피트의 크기가 작을수록 핵생성율이 증가한다는 실험적 결과를 발표한 연구도 있었다.

5성분계의 Ni기 초합금의 일방향응고 및 용체화 열처리시 미세편석 제어 및 γ 상의 분해거동을 열역학과 속도론적 데이터를 사용한 phase field 모델링 기법으로 해석하고 실험결과와 비교한 연구, 높은 온도구배가 Ni기 초합금 단결정의 결정립 형성에 미치는 영향과 높은 온도구배하에서 냉각속도가 고액계면의 안정성에 미치는 영향과 초기 인발속도 및 용탕의 과열도가 1,2차 수지상정의 간격에 미치는 영향을 실험적으로 제시한 연구 등이 발표되었다.

또한 Heusler 합금으로부터 단결정 monochrometer 제조, 일방향응고 Al-Si 및 Ni 기 초합금의 multi-scale 열전달 및 미세조직 모델링, 'feather grain'이라고 알려진 쌍정 수지상정 형성에 관한 이해, 용탕의 대류와 입자 침전 상황에서의 등축 수지상정 형성모델, 다상 응고시스템의 stochastic-deterministic 융합 모델 등에 관한 발표가 있었다. 결정립 형성에 관한 대부분의 연구는 알루미늄과 니켈을 연구대상용 합금으로 사용하여 진행되었다.

3.1.4. 결정립 미세화

일반 주조 공정이나 레오캐스팅 공정에서 결정립 미세화제 투입이나 냉각속도에 의한 영향보다는 주형 벽에서의 과냉도가 결정립 미세화에 더 큰 영향을 준다는 실험적 연구결과, 결정립 제한 이론에 기초한 Calphad 데이터베이스와 multiphase

field법의 on-line 연동에 의한 결정립미세화 거동에 미치는 용질원자의 영향 분석을 계산한 연구, 결정립 미세화제와 고상 핵간의 결정학적 방위관계 및 정합성이 불균일 핵생성 능력에 미치는 영향을 edge-to-edge matching 모델로 계산하여 각종 핵생성제의 효능을 검증한 연구, static 전자기장하에서 전류방향을 지속적으로 변화시키므로써 용탕에 교반력을 가하여 결정립을 미세화 시킬 경우 초정의 크기는 알루미늄합금과 마그네슘합금 공히 크게 감소하였으나, 수지상간격은 변하지 않는다는 실험적 결과, 알루미늄이나 마그네슘 등 경량합금 용탕에 초음파처리를 하므로써 주조제품이나 단조용 제품의 원소재 잉고트의 미세조직을 미세화한 연구, 전자기장에 의한 강제대류가 CET (Columnar-to-Equiaxed Transition) 현상을 촉진시켜 사형주조나 금형주조, 일방향응고시 결정립을 감소시킬 수 있다는 연구 내용 등이 발표되었다.

3.1.5. 수지상-등축정 천이

2차원 주상정 선단 추적 모델을 이용하여 CET 현상을 전산 모사하므로써 Al-Cu 합금의 미세조직 형성과정을 mesoscopic 범위에서 계산한 결과와 그 동안 CET이론으로 예측되었던 결과를 비교하고, 등축정 지수인 인덱스를 사용하여 최종 거시조직을 설명하는 연구내용, 과냉된 액상에서 자라나는 등축정의 6개 방향으로의 수지상정 선단 성장속도를 표준 확산론으로 계산하고 유기물질용 이용한 실험으로 비교 평가한 연구, 미소중력장에서 결정립 미세화제 투입여부에 따른 Al-7Si 합금의 CET 변화양상에 관한 연구, 미소중력장에서는 대류현상이 적어 수지상정 파단과 파단된 debris의 침전이 제한되어 CET반응이 억제되므로써 등축정 영역이 제한된다는 연구, Al-Zn 합금 및 Zn-Al합금의 CET 반응에 대한 반 경험식 도출에 관한 연구 등이 있었다.

3.1.6. 공정응고

Al-Si 합금의 공정응고에 관한 여러 가지 학설, 즉, 불순물로 야기되는 쌍정기구, 핵생성 동력학에 기인한 해석 등을 통해 공정 핵생성 과정, 편석, 과냉도 변화 등에 대해 고찰하여 주조성을 향상시킬 수 있는 방안에 대한 이해력을 높일 수 있는 연구, 소량의 TiB_2 가 첨가된 Al-Si-Mn 합금의 일방향응고시 초정상의 평활 응고계면 전방에서 초정과 관계를 가지면서 성장하는 2차상 (AlMnSi)의 성장기구를 공생 공정(symbiotic eutectic growth)으로 규정하여 관찰하면 중요한 재용용 현상이 나타난다는 실험적 연구, 수소저장용 합금으로 연구되고 있는 Mg-Ni 합금의 응고미세조직에 미치는 결정립미세화제의 영향 평가, 두 개의 공정반응을 가지는 Al_2O_3 - Y_2O_3 합금의 평형상과 비평형상의 상선택 과정에 대한 연구, 저 Peclet 수 조건하에서 공정 응고도중 라멜라상 간격과 응고속도와의 관계를 새롭게 제시하여 기존의 수정된 Jackson-Hunt 모델에 기초하는 quasi-kinetic 분석에 의한 결과와 비교하는 연구, 전자빔 부유대 용융 기술을 이용한 Si-TaSi₂ 공정복합소재 개발에 관한 연구, Ag-Cu-Ge 3원계 공정반응에서 시차열분석을 통한 invariant 공정과 univariant 공정 반응의 비교를 통한 coupled growth 연구 등이 발표되었다.

3.1.7. 접종과 미량원소 첨가 효과

응고도중 구상의 접종제 기지위에 불균일 핵생성과 입자 성

장 과정을 분석하여 기지의 크기가 작을 경우에는 표면 확산에 의한 흡착보다는 젖음성이 더욱 중요하다는 것을 실험적 관찰로 밝힌 연구, 고 유황 공구강 및 저합금 베어링 강에서 Al_2O_3 기지위에 MnS가 정출하는 과정을 고찰한 연구, Fe-V-C 합금에서 Al_2O_3 기지위에 MC 계열의 탄화물이 핵생성되는 과정과 Al_2O_3 입자들이 VC_x 화합물 상의 형태에 미치는 영향을 실험적으로 관찰한 연구, 강 표면 GALFAN(Zn-4.5Al) 코팅제의 내식성에 미치는 Mg의 영향 분석을 통하여 Mg의 양이 증가할수록 공정조직은 라벨라에서 로드 형태로 변화하고 내부식성이 감소한다는 실험적 연구, Na 개량처리된 Al-10Si 합금의 미소성분 분석을 EPMA와 나노SIMS를 통하여 수행하여 Na, K과 같은 미량성분은 대부분 Si에 편석되고 미량 성분만 Al에 편석되는 것을 밝힌 연구 등이 있었다.

3.1.8. 편정반응과 포정반응

일방향 응고하는 과냉정 Al-Bi 합금의 액적 상분리 거동을 싱크로트론 X-ray 비디오 현미경 실시간 영상 관찰법으로 분석하고 상 형성과정을 수치해석하여 중력장과 Marangoni 대류가 응고선단에서의 액적 부유 및 침전거동에 미치는 영향을 평가한 연구, 침입형 Fe-C합금과 치환형 Fe-Ni합금의 포정반응과 미세조직 형성에 관한 거동을 고온 레이저 스캐닝 공초점 현미경으로 관찰하고 phase field 모델링으로 계산하여 액상/오스테나이트/ δ -페라이트 삼중점 영역에서 용질원자의 농도구배가 미세조직 형성에 미치는 영향을 평가한 연구, AISI 304 오스테나이트 스테인레스강의 응고거동 분석을 다성분계 상선택 이론을 적용하여 γ 상과 δ 상간의 상선택 과정을 해석하고, 응고과정에서 이동 경계조건을 적용한 다성분계 확산이론을 적용하여 미세편석거동을 설명하는 연구, 일방향 응고하는 Fe-Ni 시스템의 coupled growth 거동을 실험적 관찰과 모델링으로 평가하여 in-situ 복합소재의 응고거동을 기술하는 연구, 일방향 응고하는 Fe-Ni 포정반응 시스템의 응고조건이 초기의 일시적 조건에서 정상상태까지 변화할 동안 핵생성과 조성적 과냉의 함수로서 상선택 맵을 작성하여 평면상, 수지상 및 세포상, 반복되는 줄무늬상 구역 형성을 이해할 수 있는 연구 등이 발표되었다.

3.1.9. 금속간화합물 응고

철강소재에 Al 등 미량의 경금속과 Ti, Zr 등을 복합 첨가함으로써, $(Fe, Al)_2Zr$ Laves 상, $(Fe, Zr)_2Ti$ Laves상, Fe_3Al 규칙화 격자상의 상형성이 이루어져 저온취성과 고온 크립 특성이 향상되는 과정을 설명한 연구, 중요한 촉매물질중 하나인 Raney-Ni 타입인 Ni-50Al 합금의 응고거동을 관찰하기 위하여 전자기 공중부양법을 활용한 과냉된 액적의 상 형성과정을 연구한 내용, TiAl-Nb 합금의 복잡한 구성상들인 B2 inter, intra, granular (α_2 , γ) 라벨라상, monolithic γ 상의 형성거동과 응고 및 열처리시 나타나는 상선택 과정 및 미세편석 과정을 이해하고 적정하게 제어함으로써 기계적 성질의 편차를 줄이고자 하는 연구, Ti-Al 포정합금에 전자기 교반력을 가하여 부가되는 대류 효과가 초정의 양을 증가시키고 미세조직을 구형화하여 기계적 성질을 향상시킨 결과를 실험적으로 분석한 연구, 일부 자동차용 소재 및 항공기 부품으로 사용될 수 있는 near net shape TiAl 합금 제조를 위한 원심정밀주조법의 주형충진과정과 응고거동을 해석하기 위한 수치해석 연구 등이 소개되었다.

3.1.10. 상 형성

실시간 싱크로트론 X-ray 방사선 사진술과 백색광 X-ray 토포그래피를 복합적으로 활용하여 Al 합금의 응고거동을 실시간으로 분석함으로써 응고조직 형성과정, CET, facet와 non-facet 조직 비교, 쌍정 응고 등의 과정을 동력학적으로 관찰한 연구가 발표되었는데, 방사선 기법으로는 조직의 모습과 응고속도, 성장 선단의 형상 등을 분석할 수 있고, 토포그래피를 이용하면 결정방향, 응력장, 결정결합 등을 관찰할 수 있다.

전자기 공중부양법으로 과냉된 Nd-Fe-B 합금에서 γ -Fe, $Nd_2Fe_{14}B_1$ 상과 준안정상인 Nd_2Fe_{17} 상의 형성거동을 EDX와 중성자 싱크로트론 방사선 사진술을 이용하여 분석한 연구, 경량 철강소재로서 Al이 17%까지 함유된 Fe-Mn-Al-C 합금의 응고거동을 분석한 연구, TiAl-Nb 합금을 공중부양하여 과냉도를 320K 까지 부가하여 α_2 , β , γ 상간의 상선택 거동과 준안정상의 형성과정을 분석한 연구, Al-Si-Mn 합금의 일방향응고 도중 symbiotic univariant 공정 반응을 분석하여 AlMnSi 금속간화합물의 석출을 연구한 내용 등이 발표되었다.

3.2. 실시간 영상기술

3.2.1. 미세조직 실시간 영상 기술

급속응고 공정을 이해하기 위하여 $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) 액적을 실리콘 기판위에 켄칭시킬 때, 액적의 낙하, 기판과의 충격, 퍼짐 현상을 순차적으로 기록할 수 있는 고속 적외선 열 영상장비를 사용하여 Newtonian 냉각과정의 가정하에 국부적 열전달 계수와 냉각속도를 계산하여 액적방향으로 냉각속도의 구배를 확인한 연구, Al-Cu, Al-Bi 합금을 토대로 고분해능 X-ray 이미징 기법으로 응고계면의 고/액 계면, 액/액2 계면은 물론 액상의 농도장까지 정량적으로 mapping함으로써 공정, 편정반응, CET, 수지상정 파단, 스피노달 분해 등의 상변태 과정을 실시간으로 분석할 수 있는 기법에 대한 소개, $1\mu m$ 정도의 고분해능으로 Sn, Al, Cu 합금의 응고거동을 실시간 분석함으로써 저 성장속도 구간에서 수지상 선단의 곡률반경과 고/액 계면 전진속도를 계산하여 이론치와 비교한 연구, X-ray radiography를 활용하여 Ga-In 합금의 응고거동을 $10\mu m$ 정도의 분해능으로 관찰하여 액상의 용질원자 농도장이 대류장 및 결정성장과의 관계를 제시한 연구, Al-Cu 합금의 국부 재 용해 과정을 고속 X-ray tomography를 활용하여 3차원 영상으로 제시함으로써 고/액 공존 구간에서의 응고거동을 분석한 연구, 응고선단에서 용질원자의 대류에 의한 국부적 용질원자의 농축이 고차의 수지상 가치를 파단시키는 기구를 싱크로트론 X-ray 기법을 활용하여 분석한 연구, 고속 X-ray 회절기법을 이용하여 과냉된 $YFeO_3$ 의 응고거동을 분석함으로써 준안정상으로부터 안정상인 사방정 $YFeO_3$ 상 변태시 2차 재취현상을 발견한 연구 등이 있었다.

3.3. 물리적 성질

3.3.1. 상태도용 데이터 획득

주조 및 응고공정의 수치해석을 위해 필요한 여러 가지 물리적 특성들은 온도 및 합금 조성의 함수로서 구해져야 하는데 실험적으로 모든 데이터들을 확보하기가 쉽지 않은 상황에

서 물리상수들을 대표적인 물리상수값으로부터 JMatPro라는 프로그램을 사용하여 계산하여 얻어지는 과정을 제시하고 온도의 함수로서 고상율, 비열, 열전도도, 밀도와 같은 대표적 상수값의 변화가 응고거동 수치해석 결과에 미치는 영향을 상징적으로 비교한 연구, 고순도 Sn(녹는점; 231.928°C)을 이용하여 재료연구분야에서 국제적 온도 기준으로 활용할 수 있는 데이터를 제시하기 위하여 미량의 Ag, Cu, Sb, Pb 등이 Sn의 녹는점에 미치는 영향을 실험적, 계산적 연구결과로 비교한 논문, 다성분계 응고과정중 액상표면 및 고상표면의 추적에 의한 각 성분별 변태온도, 용질재분배계수 등을 계산할 수 있는 ESTPHAD 소프트웨어 개발에 관한 연구, 국제온도협회의 기준치인 ITS-90(0.65K부터 약 3,000K까지의 측정범위) 기준에 부합하면서 Cu 합금보다 용점이 높은 액상금속의 온도를 직접 측정할 수 있는 액상형 Co-C 공정합금 cell의 녹는점과 미세조직에 미치는 응고속도의 영향을 분석한 연구, Al-7Si합금과 Al-7Si-1Fe합금의 응고거동을 시차열분석을 이용하여 비교분석하여 여러 가지 응고조건하에서 Al-Si 초정상이 응고하는 과정을 규명한 연구, 기존의 two pan DSC 기법과 새로 제안되는 single pan DSC 기법을 적용하여 LM25 합금(영국공업규격)의 상변태 온도, 엔탈피 변화량, 비열 등을 상호 비교하여 기존의 DSC 보다 정확한 온도 분석이 가능하다는 결과를 보여주는 연구 등이 발표되었다.

3.3.2. 물리적 성질 측정

액상 및 고온의 고상의 물리적 성질을 직접 측정하는 방법으로서 미소중력장에서 전자기력 용융 부유법을 활용하여 비행하는 액적의 비열변화, 표면장력, 점도 등을 측정한 연구, Pb-Sn 일방향 응고도중 액상내의 각 용질의 확산계수를 방출되는 용질이 무거운 경우와 가벼운 경우로 구별하여 각각 실험적으로 측정하고 기존의 데이터와 비교한 연구, 두 개의 전극을 사용하여 전기장을 가하므로써 Pb-Sb-Sn 저융점 합금의 미세조직을 현저히 미세화 시킨 연구 등이 보고되었다.

3.3.3. 열전달계수

알루미늄 잉고트를 대량생산하는 open mold 방식의 체인 컨베이어 주조공정중 주형과 잉고트 간에 발생하는 air gap의 영향에 따른 응고거동을 분석한 후, air gap 사이에 He 가스 주입을 통한 응고시간 단축 결과를 설명하는 연구, 실리콘계와 지르콘계 사형 주형을 사용한 잉고트 제조도중 공기보다 4-5배 정도 열전도도가 큰 He 가스를 주입하여 용탕의 냉각거동 및 미세조직과 인장특성 변화, 열처리 특성 등을 평가한 연구 등이 있었다.

3.4. 구조결합

3.4.1. 거시편석

철강의 연속주조도중 용질재분배 거동에 의해 용질원자로 농축되는 액상부위가 응고도중의 수축공과 외부적 연속주조공정의 외적 요인인 inter-roll bulging 등에 의해 수직상정간에 거시편석을 일으키는 과정을 수학적 모델링으로 제시한 연구, 2차원 유한요소법을 이용하여 연속주조 철강의 거시편석 거동을 분석한 연구, 수평식 direct chill casting을 사용한 알루미늄 빌렛 제조시 주조공정변수의 영향으로 발생하는 거시편석 거동

을 분석한 연구, Ni 기 합금의 일방향 응고시 주형벽면과 내부의 중지부위에서 발생하는 표면 공정조직을 응고변수의 함수로서 실험적으로 관찰한 연구, 미세편석 기구와 거시편석 기구를 합한 새로운 mapping 방법으로 알루미늄 합금의 direct chill casting 도중의 편석거동을 분석하고 중심부의 역편석은 대부분 수축공에 기인한 용탕의 흐름에 기인한다는 사실을 실험적 결과와 이론적 결과로 제시한 연구, CALPHAD 소프트웨어를 활용하여 다성분계 합금의 응고 경로를 근사값으로 추적하여 기존의 보고된 데이터와 비교한 연구 등이 있었다.

3.4.2. 열간균열

연속 주조되는 주강의 열간균열의 발생기구로서 고상율이 0.96에서 1 범위에서 국부적 조성변화에 따른 변형량의 축적을 제시한 연구, 순수 Cu 소재의 연성-취성 전이온도에 미치는 Cr과 Ag의 영향을 고찰한 연구, 알루미늄의 direct chill casting 시 발생하는 열간 균열을 3상 모델 접근법을 도입하여 기공에서 열간균열의 핵이 발생하여 고액 공존구간중 점소성 변형에 의해 균열이 전파하는 과정을 제시한 연구, Al-Zn합금의 응고도중 발생하는 열간균열은 Zn의 함량이 적을수록 감수성이 높아진다는 실험적 보고, 고 Sn 2xxx 합금에 Mn과 Cr을 첨가할 경우의 미세조직, 기계적 성질, 열간균열 양상을 비교 평가한 연구, 사용중의 부품의 동적특성과 신뢰성을 평가하기 위하여 주조공정 도중 열간균열의 여부를 알 수 있는 지시자를 설정하여 응고후반부의 소성 변형량 축적의 함수로서 열간균열을 예측할 수 있는 방법을 제시한 연구, 수력발전 부품의 핵심요소인 터빈 런너 밴드와 블레이드 주조시 발생하는 열응력, 내부 열간균열, 잔류응력, 변형 및 뒤틀림 등에 관한 과정을 FDM, FEM 커풀링을 통하여 제시한 연구 등이 있었다.

3.4.3. 기공형성과 제어

Al-Si-Cu 합금의 응고도중 발생하는 미세기공의 형상 및 분포를 3차원 mesomodel에 의해 제시한 후, X-ray 토모그래피로 직접 관찰하여 비교한 연구, 3차원 19개의 인접격자를 갖는 d3q19 모델을 통하여 발포금속에서의 기공 생성 기구를 제시한 연구, Al-Si 합금에서 Fe에 기인하는 기공 발생을 제어해주는 Mn의 영향에 관한 연구, 수소용해도를 변화시키므로써 기공을 발생시켜 Al-Fe 및 Al-Ti 발포금속 제조시 Al₃Fe 및 Al₃Ti 금속간화합물의 역할 평가에 관한 연구, 일방향 응고도중 금속과 개스와의 공정반응을 수소 등 존재하는 개스의 압력의 함수로서 평가하여 임계 기체 압력 이상에서 형성되는 고상의 모양에 따라 확산방정식을 푸는 과정을 소개하는 연구 등이 있었다.

3.5. 주조용 소재

3.5.1. 주철의 응고

중요한 산업용 소재중 하나인 구상흑연주철의 응고도중 발생하는 수축공과 미세기공을 감소시키기 위해 통상 큰 압탕을 사용하나 회수율을 고려하여 적정 크기의 압탕을 계산할 수 있는 미세조직 해석용 소프트웨어 프로그램을 개발하여 응고도중 밀도차나 상온의 기계적 성질을 예측하고 실험치와 비교한 연구, 주철 응고도중의 집중 과정에 대한 열역학적 모델링을 하고자 MgO, MgS, CaO, CaS, CeO₂, Ce₂O₃, CeS 상의 용

해도를 이용하여 응고 완료 전 용탕 속에 들어있는 S와 O의 평형 량을 계산하고, 평균 흑연립 크기를 예측하는 연구, 차세대 자동차용 소재인 박육 주철의 냉각속도에 따른 과냉도와 흑연립 수와의 관계를 실험적으로 구하고 모델링으로 비교한 연구, 회주철 캡 샤프트의 표피 부분에 원심방향으로 발생하는 검은 선 결함 (black line)의 존재를 설명할 수 있는 소프트웨어 계산 결과를 제시한 연구, 주철용탕의 집중시 흑연의 핵 생성처를 분석하여 MnS나 오스테나이트 수지상정이 가능한 핵 생성처라는 것을 실험적으로 제시한 연구 등이 있었다.

3.5.2. 벌크비정질 형성

다성분계 벌크비정질 합금의 비정질 형성능을 CALPHAD를 이용하여 정량적으로 분석, 제시하고, 유리전이온도, 비정질상의 열역학적 안정성 등을 평가한 연구, 전자기 교반력이 Mg-Cu-Y와 Fe-Co-B-Si-Nb 합금의 비정질 형성능을 향상시킨다는 기초적 실험연구, suction casting 법을 통한 Cu-Hf-Ti 벌크 비정질 제조 공정변수 확립과 비정질 형성능과 열적안정성을 최적화시키기 위한 최적 조성 선정 등에 대한 연구 등이 발표되었다.

3.6. 응고공공 공정

3.6.1. 전자기장 효과

Al-Si-Mg 합금의 일방향응고시 자기장을 인가하여 교반을 할 경우, Mg의 함량이나 교반력에 관계없이 수지상 선단의 반경은 거의 변화가 없다는 것을 확인한 실험적 연구, 10T 정도의 고 자기장하에서의 Al-Cu 일방향응고는 평면상에서 세포상, 수지상으로의 천이가 더 활발하게 일어나는데, 이는 고 자기장이 평형분배계수와 액상선의 기울기에 영향을 주기 때문이라는 것을 밝힌 실험적 연구, 3-20mT 범위의 자기장하에서 Al-Si 합금의 응고속도별 미세조직, Sr의 Si 개량화 영향 등을 관찰한 연구, Al-Si-Cu 합금의 일방향 응고시 자기장에 의한 교반력이 증가할수록 시편의 축 방향으로의 용질편석이 증가되고 수지상정 간격은 감소하지만 2차 수지상정 간격은 오히려 증가한다는 실험적 관찰로부터 응고 기구에 미치는 대류의 영향을 고찰한 연구, Mn-89.7Sb의 일방향응고시 자장의 크기와 구배가 MnSb 초정, MnSb 입자의 편석 및 MnSb와 Sb 입자의 상선택 거동에 미치는 영향을 평가한 연구 등이 발표되었다.

3.6.2. 반응고 가공

반응용 프리커서 소재를 주조하기 위하여 경사 냉각판을 이용한 응고도중의 미세조직의 구상화와 평균 크기 등을 분석한 실험적 연구, 경사 냉각판을 이용하여 CE = 3.6인 회주철의 반응고 거동을 분석하여 실제 활용가능성을 제시하는 실험적 연구, runner가 없는 노즐을 이용한 반응고 방식의 injection 공정을 이용하여 AZ91D 합금의 응고분율이 용탕 유동도와 미세 조직에 미치는 영향을 분석한 실험적 연구, AZ91D 소재의 returned scrap 재활용성을 액상제어기술인 rheo-diecasting 법을 이용하여 평가하여 virgin 소재를 사용했을 때와 거의 같은 기계적 특성을 얻은 연구, Mg-Al-Sr 합금의 액상제어기술을 통하여 미세조직 특성과 열적 안정성을 평가한 연구, Mg 합금의 액상처리기술을 활용하여 rheo-diecasting을 할 때 여러 가지 상들의 경쟁적 핵생성 거동과 성장거동을 제시하고 그에 따른 기계적 특성을 비교 평가한 연구, 고압 다이캐스팅과 같

이 전단응력이 부가되는 응고조건에서 발생하는 band 형태의 결함과 기공들은 자라나던 수지상들간의 충돌로 등축정화 될 때 변형량의 국부적 집적 및 소재의 팽창에 따른 dilatancy 영향에 의해 발생된다는 것을 제시한 연구, 경사 냉각 채널을 이용한 응고시 등축정과 주상정간 천이의 경계가 되는 응고조건을 관찰한 연구, 회전하는 사형주조를 사용하여 Al-7Si 합금의 초정 형성과 유동도에 미치는 원심력, 고상율, 시편 두께의 영향을 실험적으로 관찰하여 이들 간의 관계를 묘사하는 경험식을 제시한 연구 등이 있었다.

3.6.3. 급속응고

고속으로 회전하는 휠 안에서 노즐로부터 분사되는 액상에서 휘스커나 단섬유 소재를 제조하고, 이에 대한 공정변수의 영향을 제시한 실험적 연구, 가스분무법으로 제조되는 Al-Pb 합금의 미세조직 형성과정을 수치해석으로 제시하고, Stokes 형태의 이동과정과 Pb가 농축된 입자들의 브라운 운동에 의해 지배되는 입자-수지상간의 충돌 및 합체 거동에 의해 설명한 연구, 플라즈마 용사 후막 코팅 공정중 한 개의 스플렛이 기관과 충돌하며 퍼져 나가면서 응고하는 과정을 수학적으로 표현하고 수치적으로 계산한 연구, Al-Li 합금의 스프레이 포밍 빌렛 제조 시 발생하는 거시편석 거동을 OES(Optical Emission Spectroscopy)를 사용하여 분석한 연구, 연강 표면에 강한 플라즈마 펄스를 사용하여 트라이볼로지 특성을 획기적으로 향상시킨 공정 연구, 혼합되지 않는 Al-Pb 및 Al-Bi 합금의 급속 응고 과정을 냉각속도가 두께별로 조절되는 금형을 사용하여 주조하고 그 응고 과정중 미세조직의 변화양상을 실험적으로 관찰한 연구 등이 발표되었다.

3.6.4. 접합기술

기존의 Sn-37Pb 합금을 대체하기 위한 납 성분이 없는 Sn-0.7Cu-Ni 합금의 ppm 단위의 Ni 함량에 따른 유동성 변화와 응고거동 변화를 실험적으로 관찰한 연구, Sn-8.5Zn-Ag-Ga-Al 합금에서 Ag, Ga, Al 등의 미소 성분원소 변화가 응고거동 및 상선택 과정에 미치는 영향 평가에 관한 연구, 납땜 접합부의 형상을 3차원적 SOLA 법을 활용하여 수치해석적으로 계산한 연구, 복합소재 접합에서 평형응고상과 비평형 응고상간의 상선택 과정에 대한 일반화된 엔탈피법을 활용한 수치해석적 연구, YAG 레이저 빔을 사용하여 탄탈륨으로 티타늄합금 용접시 불균일 핵생성에 의한 응고거동을 관찰한 연구, 반응고 고압다이캐스팅 제품인 A356 합금의 레이저 용접과 TIG 용접시 용접부와 열영향부의 미세조직과 기계적 특성을 비교 평가한 연구 등이 발표되었다.

3.6.5. 공정개발

용탕단조, 원심주조, 반응고공정의 장점을 조합하여 완성시킨 swage casting 공정을 개발하고 A380 합금을 적용하여 최적화된 미세조직을 얻는 공정을 제시한 연구, Al 합금의 near net shape 소재를 제조하기 위하여 쓰이는 twin roll casting 공정시 자주 발생하는 중심 편석과 수지상-주상정 조직의 응고 거동을 실험적, 수치해석적으로 분석하여 상호 비교한 논문, direct chill casting 알루미늄 rolling 슬래브 절단시 크랙 발생가능성 평가지수 선정을 위한 수치해석적 연구, 길거나 짧은 응고구간을 갖는 소재별로 수축공 결함의 발생을 예측할 수

있는 수치해석법 연구, 유한요소법을 이용하여 주강 제조시 고상율, 용질원자 편석, 기공 발생 등을 예측하는 수치해석적 연구, 알루미늄 주조품의 열간균열에 영향을 미치는 미량 첨가원소의 영향을 평가하는 모델링 연구, 정밀주조품 제조시 응고도중 발생하는 잔류응력 평가를 위한 수치해석적 연구, 고강도 알루미늄합금의 제조를 위한 direct chill casting시 파괴역학을 적용하여 열간균열과 냉간 균열을 평가하는 연구, 가압방식의 vertical direct chill casting (VDC) 공정에서 액상 알루미늄의 표면장력이 주형과의 접촉각에 미치는 영향을 평가한 연구, 다양한 열처리를 한 급속응고 Fe-Cr-Mn-Si-Mo-C 합금의 미세조직 평가에 관한 연구 등이 발표되었다.

3.7. 모델링과 시뮬레이션

3.7.1. 모델링과 시뮬레이션

Cu-Sn 합금의 응고거동을 모사하기 위한 1:1 수모델 실험 장치를 사용하여 입자들을 활용한 응고선단 추적을 통한 응고 계면의 형상추적을 실험적으로 수행하고 수치해석으로 검증한 연구, 일방향 응고 공정의 수치해석시 grid 계산 기반의 알고

리즘을 적용하여 Bridgman 공정과 시뮬레이션 프로그램을 최적화하고 공정변수와 목표 기능을 얻기 위한 연구, 다상 응고 거동을 계산할 때 2원계 상태도가 아닌 3원계 상태도에서부터 열역학적 데이터를 받아들일 수 있는 커플링 기법에 관한 연구, 컴퓨터 시뮬레이션을 기반으로 한 인공지능 expert system 구축과정과 여러 가지 주조공정에의 적용 예를 보여준 연구, 연속주조 주강 슬래브 제조 공정중 열전달과 응고거동을 계산한 수치해석적 연구 등이 발표되었다.

4. 결 론

SP07학회에서 발표된 25개 주제 분야에서 157편의 논문의 내용을 바탕으로 지난 10년간 응고기공학의 연구동향을 간략히 살펴보았다. 이러한 연구경향은 일정한 방향성을 가지면서 지속적으로 또 점진적으로 진행되기 때문에 응고기공학 이론 및 기술이 적용되는 각 산업분야에서 향후 연구개발 방향 설정 및 적용에 적절히 참고 되기를 기대한다.